

การลดความผันแปรในระบบพ่นทรายเสมือนแบบสองสถานี
VARIATION MINIMIZATION IN TWO-STAGE VIRTUAL SANDBLASTING SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-D-218-040

การลดความผันแปรในระบบพ่นทรายเสมือนแบบสองสถานี
VARIATION MINIMIZATION IN TWO-STAGE VIRTUAL SANDBLASTING SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VARIATION MINIMIZATION IN TWO-STAGE VIRTUAL SANDBLASTING SYSTEM



RANON JIENTRAKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTORAL OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-EN-D-218-040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดความผันแปรในระบบพ่นทรายเสมือนแบบสองสถานี
นักศึกษา	นาย รณน เจียรตระกูล
รหัสประจำตัว	56601396
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ชุมพล ยวงใย

บทคัดย่อ

ระบบพ่นทรายระยะไกล (Tele-sandblasting system) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการทำ ความสะอาดและซ่อมบำรุงพื้นผิวของโครงสร้างขนาดใหญ่ เนื่องจากพื้นที่ปฏิบัติงานจริงอาจมีความ ซับซ้อน ยากในการเข้าถึง หรืออยู่ในสภาพแวดล้อมที่อันตรายสำหรับผู้ปฏิบัติงาน ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษา พัฒนาระบบอย่างกว้างขวาง แต่ยังคงมีอุปสรรคที่สำคัญที่ยังต้องการการพัฒนาได้แก่ความผันแปรใน ระบบซึ่งส่งผลต่อความสม่ำเสมอของพื้นผิวที่ถูกพ่น นอกจากนี้ยังส่งผลให้เวลารวมในการปฏิบัติงานนาน ขึ้นและสิ้นเปลืองปริมาณวัสดุที่ใช้ทำการพ่นมากขึ้น งานวิจัยนี้นำเสนอการลดความผันแปรของระบบ โดย ได้ทำการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์เพื่อกำหนดระดับปัจจัยที่ให้ความสม่ำเสมอของรอย พ่นที่ดีที่สุด ซึ่งได้นำเสนอตัวชี้วัดสมรรถนะเพื่อใช้ในการศึกษาได้แก่ พื้นผิวไม่สะอาด พื้นผิวเสียหาย และ เวลารวมในการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ความผันแปรด้านพิกัดของหัวพ่นโดยใช้การวิเคราะห์ ความผันแปรแบบหลายสถานี (Multi-stage variation analysis) นำเสนอวิธีการลดความผันแปรที่ เกิดขึ้นในแต่ละสถานี ได้แก่ การแปลงสัมพรรค และเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเคลื่อนที่ของแขนเป็นแบบ คลื่นปลายแหลมร่วมกันตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) จากการทดลองพบว่าปัจจัยระยะการมองไม่มี ผลกระทบต่อผลลัพธ์ของระบบ แต่ปัจจัยความกว้างของเส้นทางสร้างความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ผล การทดลองยังบ่งชี้ถึงความแตกต่างระหว่างเพศอีกด้วย วิธีการกำหนดปัจจัยต่างๆสามารถช่วยระบุระดับ ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าดัชนีชี้วัดทุกตัวอยู่ในช่วงที่น่าพอใจส่งผลให้คุณภาพพื้นผิวอยู่ในช่วงที่ยอมรับ

ได้และเวลารวมในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม สำหรับการลดความผันแปรในสถานีเครื่องฟนทรายระยะไกล
วิธีการแปลงสัมพรรคสามารถช่วยปรับปรุงความแม่นยำได้ โดยความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยใน
แนวแกน x ลดลง 81.44% และแนวแกน y ลดลง 19.66% สำหรับการลดความผันแปรในสถานี
ผู้ปฏิบัติงาน การใช้วิธีการเคลื่อนที่ของแขนแบบคลื่นปลายแหลมร่วมกับตัวรองคาลมาน สามารถช่วย
ปรับปรุงความเที่ยงตรงได้ 92.04% และสามารถช่วยปรับปรุงความแม่นยำได้ 77.83% เนื่องจากข้อจำกัด
ในด้านพื้นที่ ทุนวิจัย และความสะดวกในการควบคุมตัวแปร งานวิจัยทั้งหมดนี้ได้ทำการทดลองกับระบบ
ฟนทรายระยะไกลเสมือนที่สร้างขึ้นในห้องทดลอง



Thesis	Variation Minimization in Two-Stage Virtual Sandblasting System
Student	Mr.Ranon Jientrakul
Student ID.	56601396
Degree	Doctor of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Chumpol Yuangyai

ABSTRACT

Tele-sandblasting system has widely been used to clean the surface of large building structures. The system can be operated at complex or difficult-to-reach spots and dangerous, hazardous or dynamically changed environments. Although much research has focused on the development of the system, few has studied on system variation leading to inconsistent surface quality, longer operating time, and higher consumption of blasting materials. This study proposed variation minimization approaches for tele-sandblasting system. First, performance measures which are unfinished surface, damaged surface and movement time were proposed. Then, human-robot interaction (HRI) is studied to determine proper levels of factors of interest yielding smoothest surface. The source variation of the system was analyzed using two-stage variation analysis. Variation minimization techniques: affine transformation and an arm-movement pattern incorporating with Kalman filter, were applied. The results from the HRI experiment conducted on virtual system indicated that viewing distance, one of two factors of interest, did not affect the system output while path width and gender are of significance to the system performances. Multiple-objective optimization yielded satisfactory performance measures leading to acceptable surface quality and proper movement time. For variation

minimization in tele-sandblasting-machine stage, affine transformation technique improved accuracy by 81.44% in x axis and 19.66% in y axis. Moreover, the proposed arm-movement pattern incorporating with Kalman filter increase precision by 92.04% and accuracy by 77.83% in human operator stage.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชุมพล ยวงใย ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและเจ้าหน้าที่ทุกท่านสำหรับการสนับสนุน และให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ.ดร.สรรพลสิทธิ์ ลีมนรัตน์ ที่ช่วยเหลือและสนับสนุน ในทุกช่วงชีวิตของข้าพเจ้า ดร.พลชัย โขติปรายนกุล ที่คอยแนะนำ อบรม ช่วยเหลือตลอดมาและให้หัวข้อวิทยานิพนธ์

สุดท้ายต้องขอขอบครอบครัวของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจที่ดีและให้การช่วยเหลือในทุกด้าน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

รณน เจียรตระกูล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 แนวทางการแก้ไขปัญหา.....	5
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	7
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	7
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	8
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	8
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	11
1.8 ผลกระทบของงานวิจัย.....	12
1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	13
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 ระบบปฏิบัติงานระยะไกล.....	15
2.1.1 ระบบพันทรายระยะไกล.....	17
2.1.3 ลักษณะของงานพันทรายระยะไกล.....	20
2.2 สมรรถนะที่ใช้อธิบายคุณภาพพื้นผิวในงานพันทรายระยะไกล.....	21
2.2.1 สมรรถนะของระบบพันทรายระยะไกล.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1.1 ฟังก์ชันการสูญเสียของทาคุชิ (Taguchi's loss function).....	24
2.2.2 การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ในระบบพันทรายระยะไกล.....	27
2.2.2.1 ปัจจัยในการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ในระบบพัน ทรายระยะไกล.....	29
2.3 การวิเคราะห์ความผันแปรด้านพิกัดในระบบปฏิบัติการระยะไกล.....	32
2.3.1 ความผันแปรในสถานีเครื่องพันทรายระยะไกล.....	36
2.3.2 ความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงาน.....	41
2.4 หมายเหตุ.....	45
บทที่ 3 การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ในระบบพันทรายระยะไกล.....	46
3.1 ระบบพันทรายระยะไกลเสมือน.....	47
3.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะ.....	54
3.3 การทดลองและการกำหนดปัจจัยในการทดลอง.....	56
3.4 ผลการทดลอง.....	60
3.4.1 การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยในงานพันทรายระยะไกล.....	73
3.4.2 แนวทางการออกแบบสำหรับระบบพันทรายระยะไกลและระบบที่คล้ายคลึงกัน..	77
3.4.3 คุณลักษณะพิเศษของเวลารวมในการเคลื่อนที่ในงานพันทรายระยะไกล.....	77
3.4.4 ปัญหาทางด้านพิกัดของหัวพันในระนาบสองมิติ.....	78
3.5 หมายเหตุ.....	80
บทที่ 4 การลดความผันแปรสำหรับสถานีเครื่องพันทรายระยะไกล.....	81
4.1 การวิเคราะห์ความผันแปรแบบสองสถานี.....	82
4.2 การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมหลักและอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม.....	86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมหลัก.....	86
4.2.2 การออกแบบอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม.....	89
4.3 ความผันแปรด้านพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลัก (หุ่นยนต์แบบขนาน).....	94
4.3.1 ผลการทดสอบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ควบคุมหลัก.....	94
4.3.2 ผลการทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์ควบคุมหลัก.....	99
4.4 ผลการทดสอบความผันแปรด้านพิกัดของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม.....	111
4.5 หมายเหตุ.....	120
บทที่ 5 การลดความผันแปรสำหรับสถานีผู้ปฏิบัติงาน.....	121
5.1 ความผันแปรที่เกิดจากสถานีผู้ปฏิบัติงาน.....	122
5.2 การปรับปรุงความเที่ยงตรงและความแม่นยำสำหรับผู้ปฏิบัติงาน.....	129
5.3 ผลการทดสอบวิธีที่นำเสนอ.....	139
5.3.1 การจำลอง.....	139
5.3.2 การทดลองกับผู้ปฏิบัติงาน.....	147
5.4 หมายเหตุ.....	159
บทที่ 6 สรุป.....	161
6.1 สรุปรายละเอียดของงานวิจัยทั้งหมด.....	161
6.2 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	162
6.3 โอกาสของงานวิจัยในอนาคต.....	164
6.3.1 การศึกษาเวลารวมในการเคลื่อนที่ของงานพันทรายระยะไกล.....	164
6.3.2 การประยุกต์ตัวแบบความผันแปรหลายสถานีในระบบประเภทอื่นๆ.....	165
6.3.3 การลดความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงานบนเส้นทางที่ไม่ใช่เส้นตรง.....	165

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3.4 การใช้การเคลื่อนที่แบบคลื่นปลายแหลมร่วมกับตัวกรองในงานประเภทอื่นๆ.....	165
6.3.5 การออกแบบขนาดคลื่นปลายแหลมเพื่อควบคุมเวลารวมที่ใช้ในการพ่น.....	166
เอกสารอ้างอิง.....	167
ประวัติผู้เขียน.....	180



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบพ่นทรายระยะไกล.....	19
2.2 สรุปดัชนีชี้วัดสมรรถนะในระบบปฏิบัติงานระยะไกลจากงานวิจัยที่ผ่านมา.....	22
2.3 สรุปงานวิจัยการลดความผันแปรในระบบปฏิบัติงานระยะไกล.....	35
3.1 การกำหนดขนาดของลูกโลหะตามสัดส่วนของโอเปอเรตติ้ง.....	52
3.2 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3.3 ลำดับในการทดลองของผู้เข้าร่วมการทดลอง.....	59
3.4 ผลการทดลองจากผู้เข้าร่วมการทดลอง.....	60
3.5 สหสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุต.....	67
3.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบหลายตัวแปรสำหรับผลกระทบของ PW VD and participants ที่มีต่อ MT/R, damaged surface and unfinished surface.....	67
3.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบหลายตัวแปรสำหรับผลกระทบของ PW VD and gender ที่มีต่อ MT/R, damaged surface and unfinished surface.....	68
3.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลกระทบของ PW, VD and gender ที่มีต่อ MT/R.....	71
3.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลกระทบของ PW, VD and gender ที่มีต่อ damaged surface.....	72
3.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลกระทบของ PW, VD and gender ที่มีต่อ unfinished surface.....	72
4.1 ค่าพิคัด 4 ตำแหน่ง จากการเก็บข้อมูล 30 ครั้ง.....	98
4.2 ค่าพิคัดที่ออกแบบ พิกัดที่โปรแกรมคำนวณได้ และ พิกัดหลังการแปลงสัมพรรคโดยใช้ แมทริกซ์สัมพรรค A'_3	106
4.3 ค่าพิคัดที่ใช้คำนวณแมทริกซ์สัมพรรค A'_8	108
4.4 ค่าพิคัดที่ออกแบบ พิกัดที่โปรแกรมคำนวณได้ และ พิกัดหลังการแปลงสัมพรรคโดยใช้ แมทริกซ์สัมพรรค A'_8	109

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือนเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x	113
4.6 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือนเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x และมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดในแนวแกน y แบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสมมาตร อยู่ในช่วงระหว่าง -1 ถึง 1 มม.....	117
5.1 ค่าความแปรปรวนและค่าความแปรปรวนของผู้เข้าร่วมการทดลอง 10 คนในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักเป็นเส้นตรง.....	124
5.2 ค่าความแปรปรวนของเส้นพิกัดตามระดับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มที่เพิ่มลงในเส้นพิกัด.....	143
5.3 ค่าความแปรปรวนหลังจากผ่านตัวกรองตามระดับความคลาดเคลื่อนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนตั้งแต่หนึ่งถึงห้า.....	144
5.4 ลำดับการทำการทดลอง.....	147
5.5 ความแปรปรวนของคลื่นปลายแหลมที่ผู้เข้าร่วมการทดลองสร้างขึ้น.....	148
5.6 เปรียบเทียบความแปรปรวนและค่าเฉลี่ยของเส้นพิกัดระหว่างวิธีดั้งเดิมและวิธีที่นำเสนอ.....	152
5.7 Paired t-test ระหว่างความแปรปรวนจากวิธีดั้งเดิมและวิธีที่นำเสนอ.....	153
5.8 Paired t-test ของความแปรปรวนระหว่างการทำซ้ำครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ด้วยวิธีเดิม.....	155
5.9 Paired t-test ของความแปรปรวนระหว่างการทำซ้ำครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	155
5.10 Paired t-test ของค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเส้นพิกัดระหว่างวิธีดั้งเดิมและวิธีที่นำเสนอ.....	156
5.11 Paired t-test ของค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเส้นพิกัดระหว่างการทำซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ด้วยวิธีเดิม.....	157
5.12 Paired t-test ของค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเส้นพิกัดระหว่างการทำซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	157

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบปฏิบัติงานระยะไกล.....	1
1.2 การแบ่งพื้นผิวทั้งหมดเป็นพื้นที่ย่อย เพื่อประเมินความสม่ำเสมอของคุณภาพพื้นผิว.....	3
1.3 ไดอะแกรมระบบพันทรายระยะไกลสำหรับการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์.....	5
1.4 แผนผังแสดงองค์ประกอบของระบบพันทรายระยะไกลและแหล่งความผันแปรในระบบ.....	6
1.5 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการศึกษา.....	10
2.1 (ก) เครื่องโพลีกราฟ (ภาพจาก American Philosophy Society) (ข) เรือบังคับวิทยุของเทสลา (ภาพจาก cyberneticzoo.com) (ค) ระบบปฏิบัติงานระยะไกลแบบทวิภาคี (ภาพจาก cyberneticzoo.com).....	16
2.2 ระบบพันทรายระยะไกล.....	17
2.3 ลักษณะโครงสร้างขนาดใหญ่ที่พบในงานพันทรายระยะไกล.....	20
2.4 ลักษณะการเดินหัวพ่นบนพื้นผิวเรียบรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	20
2.5 ลักษณะของความสูญเสียทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามแนวคิด (ก) แบบดั้งเดิม (ข) ฟังก์ชันการสูญเสียของทาคุชิ.....	25
2.6 ฮิสโตแกรมของข้อมูลผลิตภัณฑ์ที่ผลิตตามแนวคิด (ก) แบบดั้งเดิม (ข) ฟังก์ชันการสูญเสียของทาคุชิ.....	26
2.7 กราฟฟังก์ชันความสูญเสียของทาคุชิเมื่อค่าเป้าหมายคือ 255 เปรียบเทียบระหว่าง $k=1$ และ $k=2$	27
2.8 องค์ประกอบของระบบพันทรายระยะไกลที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ.....	29
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลื่อนที่ (Movement Time) และ ความกว้างของเส้นทาง (Path Width).....	30
2.10 เปรียบเทียบพื้นที่ทับซ้อนของรอยพ่นสำหรับ (ก) ความกว้างของเส้นทางที่ใหญ่เกินไป (ข) ความกว้างของเส้นทางที่เหมาะสม.....	31
2.11 ผลของความกว้างของเส้นทางที่มีต่อระยะทางในการปฏิบัติงานรวมบนขนาดพื้นที่คงที่.....	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12 แหล่งความผันแปรทางด้านพิกัดจำแนกตามสถานี.....	34
2.13 พื้นที่การทำงานที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากขนาดของชิ้นส่วนหุ่นยนต์ที่คลาดเคลื่อน.....	40
2.14 ภาพถ่ายของวัตถุ (ก) วัตถุเสียสัดส่วนจริงเนื่องจากมุมกล้อง (ข) รูปถ่ายผ่านการแปลงสัม พรรคเพื่อแก้ไขสัดส่วนที่เสียหาย.....	40
2.15 ความผันแปรแบบต่างๆที่ประกอบด้วยความแม่นยำและความเที่ยงตรง (ก) ความแม่นยำ สูงและความเที่ยงตรงสูง (ข) ความแม่นยำสูงและความเที่ยงตรงต่ำ (ค) ความแม่นยำต่ำ และความเที่ยงตรงสูง (ง) ความแม่นยำต่ำและความเที่ยงตรงต่ำ.....	42
2.16 รูปแบบการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงาน.....	43
3.1 หุ่นยนต์แบบขนาน.....	48
3.2 แถบแสดงความเข้มแสงของระบบสี 8 บิต เกรย์สเกล (8-bit grayscale).....	48
3.3 พิกเซลบนพื้นผิวเสมือนที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ย่อย.....	49
3.4 โอเปอเรตติ้ง มิกซ์ (operating mix) ของลูกโลหะ (steel shot) ประกอบไปด้วยอิมแพค (impact) และคัฟเวอเรจ (coverage).....	49
3.5 อาร์เรย์ที่เป็นตัวแทนลูกโลหะเสมือน (ก) ขนาด 2x2 พิกเซล มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ 1 (ข) ขนาด 1x1 พิกเซล มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ 0.51.....	50
3.6 เปรียบเทียบรอยฟัน (ก) รอยฟันจริง (ข) รอยฟันเสมือน.....	51
3.7 แสดงลักษณะความหนาแน่นของวัสดุฟันที่ได้จากการจำลองรอยฟัน.....	51
3.8 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการจำลองรอยฟัน.....	53
3.9 ลักษณะของพื้นผิวแต่ละชนิด (ก) พื้นที่ถูกฟัน (ข) หน้าตัดด้านข้างของพื้นผิวที่ถูกฟัน.....	54
3.10 ค่าความเข้มแสงที่เป็นตัวแทนพื้นผิวแต่ละชนิด.....	55
3.11 พื้นผิวเสมือนที่ใช้ในการทดลอง โดยกำหนดความกว้างของเส้นทางไว้สองระดับ ได้แก่ (ก) 15 พิกเซล และ (ข) 25 พิกเซล.....	57
3.12 ลักษณะการดำเนินการฟันทำความสะอาดพื้นผิว.....	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 สถานีงานที่ใช้ในการทดลอง ออกแบบให้จอแสดงผลสามารถปรับระยะการมองได้ โดย (ก) ระยะการมองเท่ากับ 650 มม. (ข) ระยะการมองเท่ากับ 1,350 มม.....	58
3.14 ค่าเฉลี่ยของดัชนีชี้วัดสมรรถนะจากการทดลองทั้ง 4 ครั้งของผู้เข้าร่วมการทดลองทั้งหมด...	63
3.15 กราฟแสดงสมรรถนะของผู้เข้าร่วมการทดลองทุกคน.....	66
3.16 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเพศชายและหญิง.....	70
3.17 เส้นกราฟบนพื้นผิวแสดงจุดตัดของเส้นดัชนีชี้วัดสมรรถนะซึ่งบอกถึงพื้นที่เหมาะสมที่สุดของค่าพารามิเตอร์สำหรับ (ก) ผู้เข้าร่วมการทดลองเพศชาย (ข) ผู้เข้าร่วมการทดลองเพศหญิง.....	76
3.18 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลารวมในการเคลื่อนที่ (Movement Time) กับความกว้างของเส้นทาง (Path Width) ของ การควบคุมวัตถุไปตามเส้นทางโดยทั่วไป (Steering Law) และงานพันทรายระยะไกล.....	78
3.19 ปัญหาทางด้านการควบคุมพิกัดของหัวพ่น (ก) พื้นที่ที่ทำการพ่นที่มีเส้นทางเดียว เส้นกึ่งกลางแทนพิกัดที่หัวพ่นควรจะเคลื่อนที่ผ่านระหว่างทำการพ่น (ข) ผิวงานที่ได้จากการทดลอง (จุดประสีดำคือพิกัดการเคลื่อนที่ของหัวพ่น แสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของพิกัดหัวพ่นในแนวแกน y).....	79
4.1 กระบวนการพ่นทรายระยะไกล.....	81
4.2 ระบบพ่นทรายระยะไกลจำแนกตามสถานี.....	82
4.3 ผลกระทบจากความผันแปรในระบบที่มีต่อพิกัดของหัวพ่น.....	83
4.4 แสดงพิกัดของหัวพ่นซึ่งเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous-time Process) ซึ่งมีการเก็บข้อมูล (วัดพิกัด) ทุกๆคาบเวลา t โดย z_k^t คือพิกัดในแกน y ของสถานี k ณ เวลา t ..	86
4.5 ตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบหุ่นยนต์แบบขนานในระนาบสองมิติ.....	87
4.6 โครงสร้างและตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบขนาน.....	88
4.7 หุ่นยนต์แขนกล 6 แกน.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ภาพแสดงโครงสร้างหุ่นยนต์ที่ประกอบด้วย 2 ก้านโยงและ 2 ข้อต่อ.....	91
4.9 รูปร่างและขนาดของหุ่นยนต์ 6 แขน ที่ใช้เป็นอุปกรณ์เคลื่อนที่ในระบบเสมือน.....	94
4.10 ฮิสโตแกรมจากการเก็บข้อมูล 30 ครั้ง ของค่าพิกัด (ก) X_1 ($x=370$) (ข) Y_1 ($y=500$) (ค) X_2 ($x=610$) (ง) Y_2 ($y=500$) (จ) X_3 ($x=390$) (ฉ) Y_3 ($y=580$) (ช) X_4 ($x=590$) (ซ) Y_4 ($y=580$).....	97
4.11 ลักษณะของพื้นที่ปฏิบัติงาน (Workspace) เมื่อขนาดของแขนคลาดเคลื่อนจากขนาดที่ ออกแบบไว้ (ก) แขนทั้งข้างซ้ายและข้างขวายาวกว่าขนาดที่ออกแบบ (ข) แขนทั้งข้างซ้าย และข้างขวาสั้นกว่าขนาดที่ออกแบบ (ค) แขนข้างซ้ายสั้นกว่าแขนข้างขวา และ (ง) แขนข้าง ขวาสั้นกว่าแขนข้างซ้าย.....	102
4.12 เปรียบเทียบพิกัดที่ออกแบบกับพิกัดที่วัดได้จริง.....	104
4.13 ความคลาดเคลื่อนของพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักก่อนและหลังการแปลงสัมพรรค (ก) ในแนวแกน x (ข) ในแนวแกน y	107
4.14 ความคลาดเคลื่อนของพิกัดก่อนการแปลงสัมพรรคเปรียบเทียบกับพิกัดหลังการแปลงสัม พรรคโดยใช้แมทริกซ์ A_3 และพิกัดหลังการแปลงสัมพรรคโดยใช้แมทริกซ์ A_8 (ก) พิกัดใน แนวแกน x (ข) พิกัดในแนวแกน y	110
4.15 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามสำหรับการทดลองเพื่อทดสอบสมรรถนะของ คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม.....	112
4.16 กราฟของพิกัดของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x	114
4.17 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามสำหรับการทดลองการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ เคลื่อนที่ตามเสมือนเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x และมีการ เปลี่ยนแปลงพิกัดในแนวแกน y แบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสมมาตร อยู่ในช่วงระหว่าง -1 ถึง 1 มม.....	116

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟของพิกัดของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x และมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดในแนวแกน y แบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ อยู่ในช่วงระหว่าง -1 ถึง 1 มม.....	118
5.1 ลักษณะการเดินหัวพ่นบนพื้นผิวเรียบรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	121
5.2 ขนาดความกว้างของเส้นทางและขนาดของรอยพ่นที่เหมาะสม.....	122
5.3 พิกัดของหัวพ่นที่ได้จากการทดลอง (ก) พิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 9 และ (ข) ฮิสโตแกรมของพิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 9 (ค) พิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 8 และ (ง) ฮิสโตแกรมของพิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 8 (จ) พิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 1 และ (ฉ) ฮิสโตแกรมของพิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 1.....	128
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลารวมในการเคลื่อนที่และขนาดความกว้างของเส้นทางตามกฎสตีयरริง (Steering Law).....	130
5.5 สัญญาณที่มีคลื่นรบกวนและสัญญาณที่ผ่านการกรอง.....	131
5.6 รูปแบบการเคลื่อนที่ของแขนเพื่อควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลัก (ก) วิธีเดิม (ข) วิธีที่นำเสนอ...	131
5.7 ตัวอย่างเส้นทาง.....	132
5.8 ไดอะแกรมของระบบพ่นทรายระยะไกลแสดง (ก) วิธีการเดิม (ข) วิธีการลดความผันแปรที่นำเสนอ.....	133
5.9 กระบวนการแปลงพิกัดที่ได้จากรูปแบบการเคลื่อนที่ที่นำเสนอไปเป็นผลลัพธ์ของสถานีผู้ปฏิบัติงาน.....	133
5.10 แสดงตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการสร้างเส้นทาง.....	136

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 เส้นนำทางที่สร้างจากสมการที่ 5.15 โดย (ก) เส้นพิกัดเป้าหมายเป็นเส้นตรงตามแนวแกน x (ไม่มีความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกน y) (ข) เส้นพิกัดเป้าหมายเป็นเส้นตรงตามแนวแกน y (ไม่มีความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x) (ค) เส้นพิกัดเป้าหมายเป็นเส้นตรงทำมุม 45 องศา (ความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากันทั้งสองแนวแกน).....	138
5.12 เส้นนำทางที่ใช้ในการทดสอบ.....	139
5.13 เส้นนำทางหลังจากผ่านการปรับเรียบโดยตัวกรองคาลมาน.....	140
5.14 เส้นนำทางที่มีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (ก) $N(0,1)$ (ข) $N(0,2)$ (ค) $N(0,3)$ (ง) $N(0,4)$ (จ) $N(0,5)$	141
5.15 ฮิสโตแกรมของเส้นนำทางที่มีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (ก) $N(0,1)$ (ข) $N(0,2)$ (ค) $N(0,3)$ (ง) $N(0,4)$ (จ) $N(0,5)$	142
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความแปรปรวนของเส้นพิกัดและระดับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มที่เพิ่มลงในเส้นพิกัด.....	144
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มที่เพิ่มลงในเส้นพิกัดและค่าเฉลี่ยของค่าความแปรปรวนหลังการกรอง.....	145
5.18 เส้นพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม หลังจากผ่านตัวกรองคาลมาน (ก) $N(0,1)$ (ข) $N(0,2)$ (ค) $N(0,3)$ (ง) $N(0,4)$ (จ) $N(0,5)$	146
5.19 เส้นพิกัดที่สร้างโดยผู้เข้าร่วมการทดลอง โดย (ก) ผู้เข้าร่วมการทดลองที่สร้างจำนวนคี่น้อย (ข) ฮิสโตแกรมของข้อมูลในรูป (ก) (ค) ผู้เข้าร่วมการทดลองที่สร้างจำนวนคี่มาก (ง) ฮิสโตแกรมของข้อมูลในรูป (ค).....	150
5.20 กราฟเปรียบเทียบความแปรปรวนของวิธีเดิม (เส้นทึบ) และ วิธีที่นำเสนอ (เส้นประ) วงกลมแทนการทำซ้ำครั้งที่ 1 และดอกจันแทนการทำซ้ำครั้งที่ 2.....	154
5.21 เส้นพิกัดของวิธีที่นำเสนอ (ก) เส้นพิกัดที่มีความแปรปรวนต่ำที่สุด (0.0290) (ข) เส้นพิกัดที่มีความแปรปรวนสูงที่สุด (0.2286).....	154

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.22 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเส้นพิกัดที่ได้จากการทดลอง โดยเส้นที่บแทนค่าเฉลี่ยที่ได้จากวิธีเดิม เส้นประแทนค่าเฉลี่ยที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ วงกลมแทนการทำซ้ำครั้งที่ 1 และดอกจันแทน การทำซ้ำครั้งที่ 2.....	156
5.23 เส้นพิกัดของวิธีที่นำเสนอ (ก) เส้นพิกัดที่มีค่าเฉลี่ยเข้าใกล้พิกัดเป้าหมายที่สุด (0.0299) (ข) เส้นพิกัดที่มีค่าเฉลี่ยห่างจากเป้าหมายที่สุด (0.6083).....	158

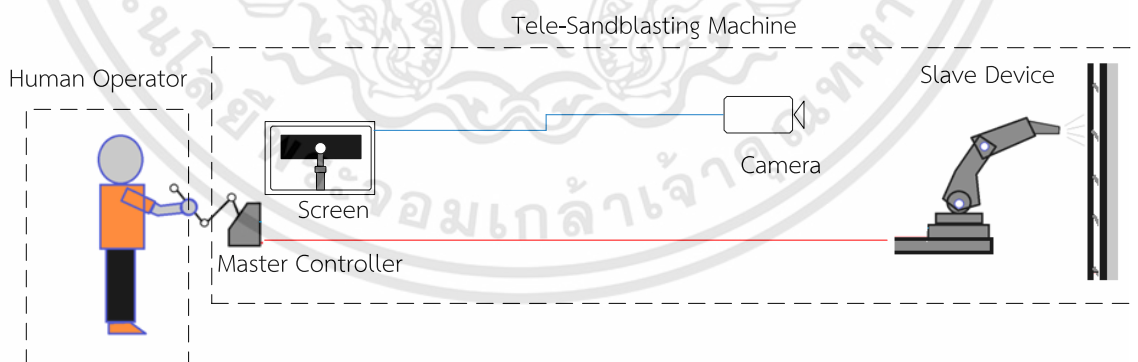


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบปฏิบัติงานระยะไกล (Teleoperation system) เป็นระบบที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลาย โดยระบบนี้ช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถปฏิบัติงานจากระยะไกลได้ ซึ่งช่วยป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากสิ่งแวดล้อมที่เป็นอันตราย ช่วยสำรวจจุดเปิดพื้นที่ที่ไม่เคยเข้าถึงมาก่อน ช่วยปฏิบัติงานในจุดที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้ นอกจากนี้ ระบบปฏิบัติงานระยะไกลยังมีความสามารถในการปรับอัตราทดในการเคลื่อนที่ ช่วยให้สามารถปฏิบัติงานกับวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆหรือใหญ่มากๆ ได้สะดวกยิ่งขึ้น ระบบปฏิบัติงานระยะไกลประกอบด้วยสององค์ประกอบหลัก ได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมหลัก (Master controller) คืออุปกรณ์ที่ผู้ปฏิบัติงานใช้สำหรับควบคุมระบบ เช่น แขนกล คั่นบังคับและสวิตช์ควบคุม และอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม (Slave device) คืออุปกรณ์ที่ถูกส่งไปในพื้นที่ปฏิบัติงาน เพื่อปฏิบัติงานตามคำสั่งที่ได้รับจากอุปกรณ์ควบคุมหลัก เช่น หุ่นยนต์ แขนกล ยานสำรวจ ตัวอย่างของระบบปฏิบัติงานระยะไกลแสดงในรูปที่ 1.1 ตัวอย่างงานที่ใช้ระบบปฏิบัติงานระยะไกล ได้แก่ งานซ่อมบำรุงโครงสร้างขนาดใหญ่ [1][2] งานกู้ภัย [3] งานขนถ่ายและกำจัดวัตถุระเบิด นิวเคลียร์ หรือวัตถุมีพิษ [4] งานเพื่อความบันเทิง [5] งานช่วยเหลือในการผ่าตัด da Vinci [6] เป็นต้น



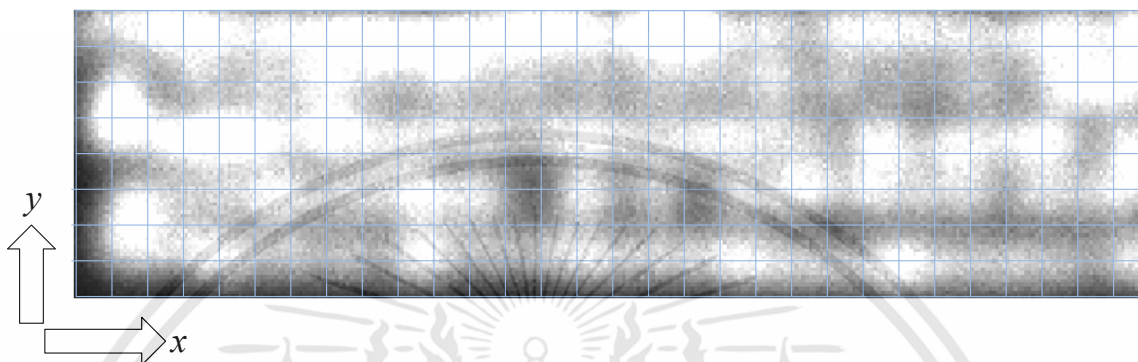
รูปที่ 1.1 ระบบปฏิบัติงานระยะไกล

ระบบพันทรายระยะไกลคือระบบปฏิบัติงานระยะไกลระบบหนึ่งซึ่งถูกนำมาควรรวมกับระบบพันทราย โดยหัวพันทรายจะถูกติดตั้งเข้ากับปลายของแขนกลเพื่อใช้ทำความสะอาดพื้นผิวของโครงสร้างขนาดใหญ่ [1] ซึ่งมีความจำเป็นสำหรับเมืองที่มีการขยายตัวหรือเมืองขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น สะพาน โกดัง หรืออาคาร ที่ต้องมีการทำความสะอาดและบำรุงรักษาพื้นผิวของตัวโครงสร้างจากฝุ่นควัน สิ่งสกปรก สนิม หรือสีเก่า ซึ่งในการทำความสะอาดนั้นไม่สามารถรื้อถอนโครงสร้างมาทำความสะอาดได้ การใช้ผู้ปฏิบัติงานขึ้นไปทำความสะอาดพื้นผิวโครงสร้างโดยตรงนั้นมีความเสี่ยงต่ออุบัติเหตุและสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นระบบพันทรายระยะไกลจึงเข้ามามีบทบาทในเพื่อช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานมีความปลอดภัยในการทำปฏิบัติงานมากขึ้น การใช้งานระบบนี้มีการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่ในแนวระนาบสองมิติซึ่งพบได้ทั่วไปในระบบปฏิบัติงานระยะไกล ผู้วิจัยเลือกใช้ระบบพันทรายระยะไกลเพื่อเป็นตัวแทนของระบบปฏิบัติงานระยะไกลในการทำวิจัย แม้ว่าระบบนี้จะถูกเรียกว่าระบบพันทรายระยะไกล แต่ในทางปฏิบัติ วัสดุที่ใช้พ่นนั้นอาจไม่ใช่เม็ดทรายเสมอไป โดยวัสดุพ่นอาจจะเป็นลูกโลหะรูปทรงต่างๆ ลม หรือน้ำตามความเหมาะสมของงานนั้นๆ โดยกลไกของระบบยังคงคล้ายคลึงกัน คือใช้แรงดันลมเพื่อพาวัสดุพ่นออกสู่ปลายหัวพ่นไปตกกระทบพื้นผิว

อุปสรรคสำคัญประการหนึ่งในระบบพันทรายระยะไกลได้แก่ ความผันแปรของพื้นผิวหลังการพ่น แม้ว่าโดยทั่วไปจะมีมาตรฐานในการประเมินคุณภาพพื้นผิว ได้แก่ มาตรฐานการเตรียมพื้นผิว [7] ซึ่งใช้การแบ่งแยกระดับของคุณภาพพื้นผิวโดยใช้การประเมินด้วยสายตาของผู้ปฏิบัติงานเปรียบเทียบกับรูปภาพอ้างอิง และไม่มีดัชนีชี้วัดเชิงปริมาณ ทำให้อาจมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประเมินของผู้ปฏิบัติงานได้ นอกจากนี้ยังไม่มีมาตรฐานที่บอกถึงความเรียบของพื้นผิวหรือความสม่ำเสมอของพื้นผิวในจุดต่างๆ ซึ่งมีความสำคัญในการปฏิบัติงานจริง จากการสังเกตการณ์ของผู้วิจัย คุณภาพพื้นผิวสามารถพิจารณาจากดัชนีชี้วัดดังนี้ ความเสียหายของพื้นผิว สิ่งตกค้างบนพื้นผิว เวลารวมในการเคลื่อนที่ (เวลารวมในการปฏิบัติงาน) และ ความคลาดเคลื่อนของพิกัดหัวพ่น

การจำกัดความของความผันแปรของพื้นผิวนั้นจำเป็นต้องอ้างอิงถึงคุณภาพของพื้นผิวหลังการพ่นซึ่งพื้นผิวหลังการพ่นที่มีคุณภาพดีนั้นต้องไม่มีสิ่งตกค้างบนพื้นผิวและพื้นผิวไม่ควรถูกพ่นนานเกินไปซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายบนพื้นผิวได้ (ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำพื้นผิว) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการใช้เวลาในการพ่นให้พอดีเป็นความแม่นยำในการสร้างรอยพ่น นอกจากนี้คุณภาพพื้นผิวทั่วทั้งพื้นที่ควรจะมีคุณภาพอยู่ในระดับเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อแบ่งพื้นที่ทั้งหมดเป็นพื้นที่ย่อยเล็กๆดังรูปที่ 1.2 คุณภาพพื้นผิวในแต่ละพื้นที่ย่อยควรจะมีค่าเหมือนกันซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นความเที่ยงตรงในการสร้างรอยพ่น ดังนั้น หากต้องการ

ประเมินความสม่ำเสมอของพื้นผิว จำเป็นต้องแบ่งพื้นผิวทั้งหมดออกเป็นพื้นที่เล็กๆและพิจารณาคุณภาพพื้นผิวจากพื้นที่เล็กๆโดยจำเป็นต้องใช้ดัชนีชี้วัดเชิงปริมาณเพื่อบ่งชี้สภาพพื้นผิวของแต่ละจุดย่อย จากนั้นจึงคิดค่าเฉลี่ยของพื้นที่ย่อยทั้งหมดเพื่อเป็นตัวแทนของความสม่ำเสมอของพื้นผิว



รูปที่ 1.2 การแบ่งพื้นผิวทั้งหมดเป็นพื้นที่ย่อย เพื่อประเมินความสม่ำเสมอของพื้นผิว

นอกจากนี้ ปัญหาสำคัญในระบบพ่นทรายระยะไกล ได้แก่ความผันแปรด้านพิกัดซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญที่ทำให้คุณภาพของพื้นผิวไม่เป็นไปตามที่ต้องการ โดยความผันแปรที่เกิดขึ้นจะส่งผลทำให้พื้นผิวที่ถูกพ่นไม่มีความสม่ำเสมอ อาจมีพื้นผิวส่วนที่สิ่งสกปรกถูกกำจัดออกไม่หมดหรือรอยพ่นลึกเกินไป ซึ่งเกิดจากความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอในการเคลื่อนที่และขนาดเส้นทางในการเดินหัวพ่น นอกจากนี้ยังมีปัญหาการเคลื่อนที่ของหัวพ่นที่ไม่ตรงตามพิกัดที่ต้องการเนื่องจากความสามารถในการบังคับอุปกรณ์ควบคุมหลักของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจำเป็นต้องทำการพ่นซ้ำเพื่อให้ได้คุณภาพตามต้องการทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการปฏิบัติงาน ต้นทุนค่าวัสดุพ่น ค่าจ้างแรงงานและอื่นๆ

สาเหตุหลักของความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกลรวมถึงระบบปฏิบัติงานระยะไกล ได้แก่ มุมมองบนหน้าจอที่จำกัดที่ทำให้เกิดความลำบากในการปฏิบัติงาน [8] เวลาหน่วงที่เกิดในระบบ [9] ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการควบคุมของมนุษย์ [10] ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตหรือประกอบ [11] งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิธีแก้ปัญหาคือเป็นต้นเหตุของความผันแปรในระบบปฏิบัติงานระยะไกล เช่น การแก้ปัญหามุมมองมุมมองบนหน้าจอ [8] [12] [13] การแก้ปัญหาเวลาหน่วงที่เกิดในระบบ [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] การแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการควบคุมของมนุษย์ [10] การแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตหรือประกอบ [23] [24] [25] [26] [27]

อย่างไรก็ตาม ปัญหาความผันแปรในระบบพันทรายระยะไกลยังมีบางส่วนของวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยที่ผ่านมาไม่สามารถแก้ไขได้ ได้แก่ ความผิดพลาดที่เกิดการควบคุมของมนุษย์สำหรับงานพันทรายระยะไกลนั้นมีลักษณะที่แตกต่างจากปัญหาในงานวิจัยที่ผ่านมา [10] เนื่องจากความคลาดเคลื่อน ที่เกิดในงานพันทรายระยะไกลเป็นความคลาดเคลื่อนในแนวแกนที่ต่างกัน ซึ่งต้องการวิธีการที่แตกต่างออกไปในการแก้ปัญหา นอกจากนี้ หุ่นยนต์ที่ใช้เพื่อการศึกษาวิจัยที่สร้างขึ้นเองในห้องทดลองนั้นโดยส่วนมากจะมีความคลาดเคลื่อนจากขั้นตอนการผลิตหรือประกอบ ทำให้เกิดปัญหาความแม่นยำในการระบุพิกัด โดยหุ่นยนต์ที่ใช้ในการศึกษางานพันทรายระยะไกลนั้นต้องการความแม่นยำในระดับที่ไม่สูงมาก แต่ต้องการความเร็วเนื่องจากระบบต้องการลดเวลาในการคำนวณเพื่อให้มีเวลาหน่วงในระบบน้อยที่สุด ดังนั้นจึงต้องการวิธีการคำนวณที่ง่ายไม่ซับซ้อนหรือวิธีการที่ทำการคำนวณเสร็จสิ้นก่อนจะเริ่มปฏิบัติงานจริง

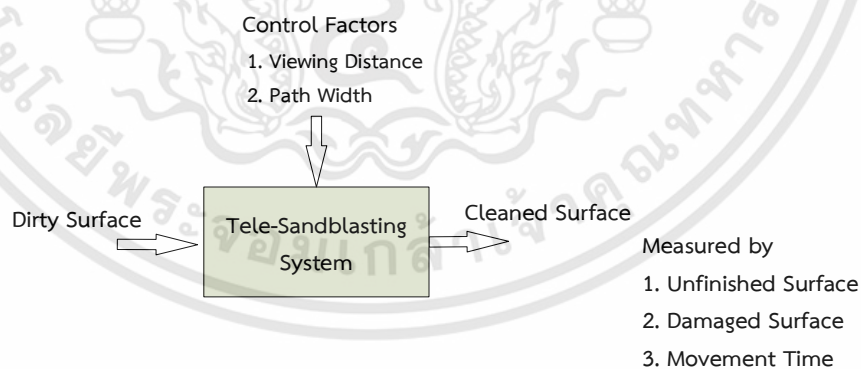
สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือ งานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดไม่มีการนำเสนอการวิเคราะห์ระบบปฏิบัติงานระยะไกลทั้งระบบ ซึ่งระบบปฏิบัติงานระยะไกลนั้นประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลายส่วน ดังนั้นการนำเสนอวิธีการแก้ไขความผันแปรเพียงจุดใดจุดหนึ่งนั้น อาจไม่สามารถลดความผันแปรของระบบได้ดีเท่าที่ควร เนื่องจากอาจมีผลกระทบที่เกิดจากแหล่งความผันแปรอื่นปะปนอยู่ในผลลัพธ์ของระบบด้วย

ดังนั้น ในการวิเคราะห์ระบบจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆทั้งหมดในระบบ เพื่อให้เข้าใจกระบวนการและแหล่งการเกิดความผันแปรในระบบ ซึ่งสำหรับระบบที่มีกระบวนการแบบอนุกรมสามารถนำทฤษฎีสายธารความผันแปร (Variation Streaming) [28] มาใช้เพื่อวิเคราะห์ความผันแปรได้ โดยจะทำการพิจารณาระบบเป็นระบบแบบหลายสถานี (Multi-Stage System) และพิจารณาความผันแปรที่เกิด ณ สถานีต่างๆและส่งต่อความผันแปรจากต้นทางไปยังปลายทาง ซึ่งช่วยให้เข้าใจความผันแปรในระบบและสามารถลดความผันแปรลงได้อย่างเป็นระบบ โดยทฤษฎีสายธารความผันแปรนั้นถูกใช้ในงานขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องจักรและงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบปฏิบัติงานระยะไกลได้

1.2 แนวทางการแก้ไขปัญห

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการลดความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกล โดยงานวิจัยทั้งหมดทำขึ้นในห้องทดลอง ระบบพ่นทรายระยะไกลที่ใช้ในการศึกษาเป็นระบบเสมือนเนื่องจากข้อจำกัดในด้านเงินทุนวิจัย ขนาดพื้นที่ นอกจากนี้ระบบเสมือนยังสามารถควบคุมตัวแปรได้ง่ายกว่าสภาพแวดล้อมจริง

ในระบบพ่นทรายระยะไกลซึ่งเป็นระบบกึ่งอัตโนมัตินั้นต้องการการทำงานร่วมกันระหว่างผู้ปฏิบัติงานและหุ่นยนต์ หัวข้อในการศึกษาจึงได้แก่ การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ โดยกำหนดปัจจัยควบคุมที่มีผลกระทบต่อความผันแปรในผลลัพธ์ของระบบ (คุณภาพพื้นผิว) ไว้สองปัจจัยได้แก่ ระยะการมอง และขนาดความกว้างของเส้นทาง และได้นำเสนอดัชนีชี้วัดสมรรถนะของระบบที่อธิบายคุณภาพพื้นผิวเชิงปริมาณของงานพ่นทรายระยะไกล ได้แก่ พื้นผิวไม่สะอาด (Unfinished surface) พื้นผิวเสียหาย (Damaged Surface) และเวลารวมในการเคลื่อนที่ (Movement Time) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 จากนั้นใช้วิธีการหาค่าตอบที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multiple Objective Optimization) เพื่อกำหนดระดับปัจจัยที่ให้ค่าดัชนีชี้วัดทุกตัวที่ดีที่สุด นอกจากนี้ จากการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ ทำให้ค้นพบลักษณะพิเศษของเวลารวมในการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กับขนาดความกว้างของเส้นทางที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎสตีริง (Steering Law) [29] และได้ค้นพบปัญหาความผันแปรทางด้านพิกัดของหัวพ่น นำมาซึ่งการวิเคราะห์ความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกลต่อไป



รูปที่ 1.3 แผนภาพระบบพ่นทรายระยะไกลสำหรับการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์

จากนั้น ผู้วิจัยได้นำเสนอการวิเคราะห์ความผันแปรด้านพิกัดในระบบพ่นทรายระยะไกลโดยใช้ทฤษฎีสายธารความผันแปร ซึ่งพิจารณาระบบพ่นทรายระยะไกลเป็นระบบสองสถานี ได้แก่สถานี

ผู้ปฏิบัติงาน และสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล ซึ่งในแต่ละสถานีจะมีแหล่งความผันแปรที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงานและความผิดพลาดในการระบุพิกัดของหุ่นยนต์แบบขนาน ซึ่งเป็นแหล่งความผันแปรของสถานีผู้ปฏิบัติงานและสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกลตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แผนภาพแสดงองค์ประกอบของระบบพ่นทรายระยะไกลและแหล่งความผันแปรด้านพิกัดในระบบ

สำหรับการลดความผันแปรในสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล ได้มีการนำเสนอการใช้เทคนิคการแปลงสัมพรรค (Affine Transformation) เพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักที่ใช้ในการทำวิจัย ซึ่งเป็นหุ่นยนต์แบบขนานที่มีพื้นที่ปฏิบัติงานอยู่บนระนาบสองมิติ โดยการแปลงสัมพรรคเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการประมวลผลภาพ (Image Processing) โดยใช้ในการปรับสัดส่วนของภาพที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากมุมมองให้กลับมามีสัดส่วนที่ถูกต้อง ซึ่งคล้ายกับปัญหาในการระบุตำแหน่งที่มีความคลาดเคลื่อนเป็นเชิงเส้น

สำหรับความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงาน เป็นปัญหาทางด้านความเที่ยงตรงและแม่นยำของพิกัดหัวพ่นที่คลาดเคลื่อนจากพิกัดเป้าหมาย (หากกำหนดแนวนอนเป็นแนวแกน x ความคลาดเคลื่อนที่สนใจได้แก่ระยะห่างจากพิกัดเป้าหมายในแนวแกน y) โดยได้ทำการศึกษาเส้นทางการพ่นที่เป็นเส้นตรงในแนวนอนซึ่งเป็นแนวแกนที่ผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่ไม่สามารถบังคับหัวพ่นให้เป็นเส้นตรงได้ดี โดยได้มีการนำเสนอการเคลื่อนที่แบบคลื่นปลายแหลมตัดกับเส้นพิกัดเพื่อปรับปรุงความแม่นยำ ร่วมกับการใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อปรับปรุงความเที่ยงตรง ซึ่งเป็นใช้แนวคิดของการลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงาน

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1.3.1 ศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ในงานพ่นทรายระยะไกล และกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อลดความผันแปรของคุณภาพพื้นผิวทั่วทั้งพื้นที่
- 1.3.2 วิเคราะห์ความผันแปรทางด้านพิกัดของระบบพ่นทรายระยะไกล โดยการจำแนกระบบเป็นสถานีย่อย
- 1.3.3 นำเสนอวิธีลดความผันแปรที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานีย่อย

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยทฤษฎีในการอธิบายปรากฏการณ์ พฤติกรรม ขององค์ประกอบในงานวิจัยหลายส่วน รวมทั้ง พิสูจน์แนวคิดที่ถูกนำเสนอ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

การวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาระบบพ่นทรายระยะไกล ซึ่งได้มีการนำทฤษฎีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้ง ฟอว์เวิร์ด คิเนมาติกส์ (Forward kinematics) และ อินเวิร์ส คิเนมาติกส์ (Inverse kinematics) มาใช้เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และ ใช้การแปลงของ บ็อกซ์-มุลเลอร์ (Box-Muller transformation) แบบสองมิติเพื่อจำลองลักษณะของรอยพ่นทราย (Sandblasting spot) เพื่อสร้างระบบพ่นทรายระยะไกลเสมือนสำหรับใช้ในการทำวิจัย

ในการวิเคราะห์ความผันแปรของระบบพ่นทรายระยะไกลนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ความผันแปรแบบหลายสถานี (Multi-stage variation analysis) เพื่อจำแนกความผันแปรตามแหล่งกำเนิด โดยใช้ตัวแบบความผันแปรหลายสถานีเพื่ออธิบายความผันแปรในสถานีนั้นๆ และความผันแปรรวม [30]

สำหรับการศึกษาการกำหนดระดับปัจจัยต่างๆในการปฏิบัติงาน ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องมือทางสถิติ (Statistics) เข้ามาช่วยในการออกแบบการทดลอง (Design of experiment) ประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟังก์ชันการสูญเสียของทาгуชิ (Taguchi's loss function) เพื่อเป็นดัชนีชี้วัดของคุณภาพผิว และใช้วิธีการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multiple objective optimization) เพื่อกำหนดระดับปัจจัยที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

สำหรับการลดความผันแปรในสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล ผู้วิจัยได้นำเสนอการใช้การแปลงสัมพรรค (Affine Transformation) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการประมวลผลภาพ (Image Processing) เพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดของหัวพ่นสำหรับพื้นที่ปฏิบัติงานที่อยู่ในระนาบสองมิติ

ในการนำเสนอรูปแบบการเคลื่อนไหวของแขนแบบคลื่นปลายแหลมร่วมกับการใช้ตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) นั้น ได้อ้างอิงมาจากสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าที่มีรูปทรงแบบคลื่นปลายแหลมหรือฟันเลื่อย (Sawtooth) เพื่อปรับปรุงความแม่นยำ และใช้ตัวกรองคาลมานในการปรับปรุงความเที่ยงตรง

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยได้กำหนดไว้ดังนี้

1.5.1 การศึกษาทั้งหมดจะทำขึ้นบนระบบพ่นทรายระยะไกลเสมือนที่สร้างขึ้นบนคอมพิวเตอร์ เนื่องจากระบบพ่นทรายระยะไกลจริงนั้นมีราคาสูง และต้องการพื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้งระบบมาก

1.5.2 พิกัดการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ควบคุมหลักและอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามที่สนใจจะอยู่ในระนาบสองมิตินานกับพื้นผิวเท่านั้น และการเคลื่อนที่ที่ทำการศึกษากำหนดเฉพาะการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงตามแนวนอน เนื่องจากเป็นการเคลื่อนที่ที่พบได้มากในงานพ่นทรายระยะไกล

1.5.3 แหล่งความผันแปรที่สนใจในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนจากการผลิตและประกอบอุปกรณ์ และ ความคลาดเคลื่อนจากการเคลื่อนที่ของมนุษย์ ดังนั้น ผลกระทบจากแหล่งความผันแปรอื่นๆเช่น เวลาหน่วงในระบบ ความคลาดเคลื่อนจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะถูกจำกัดให้ส่งผลกระทบต่อระบบน้อยที่สุด

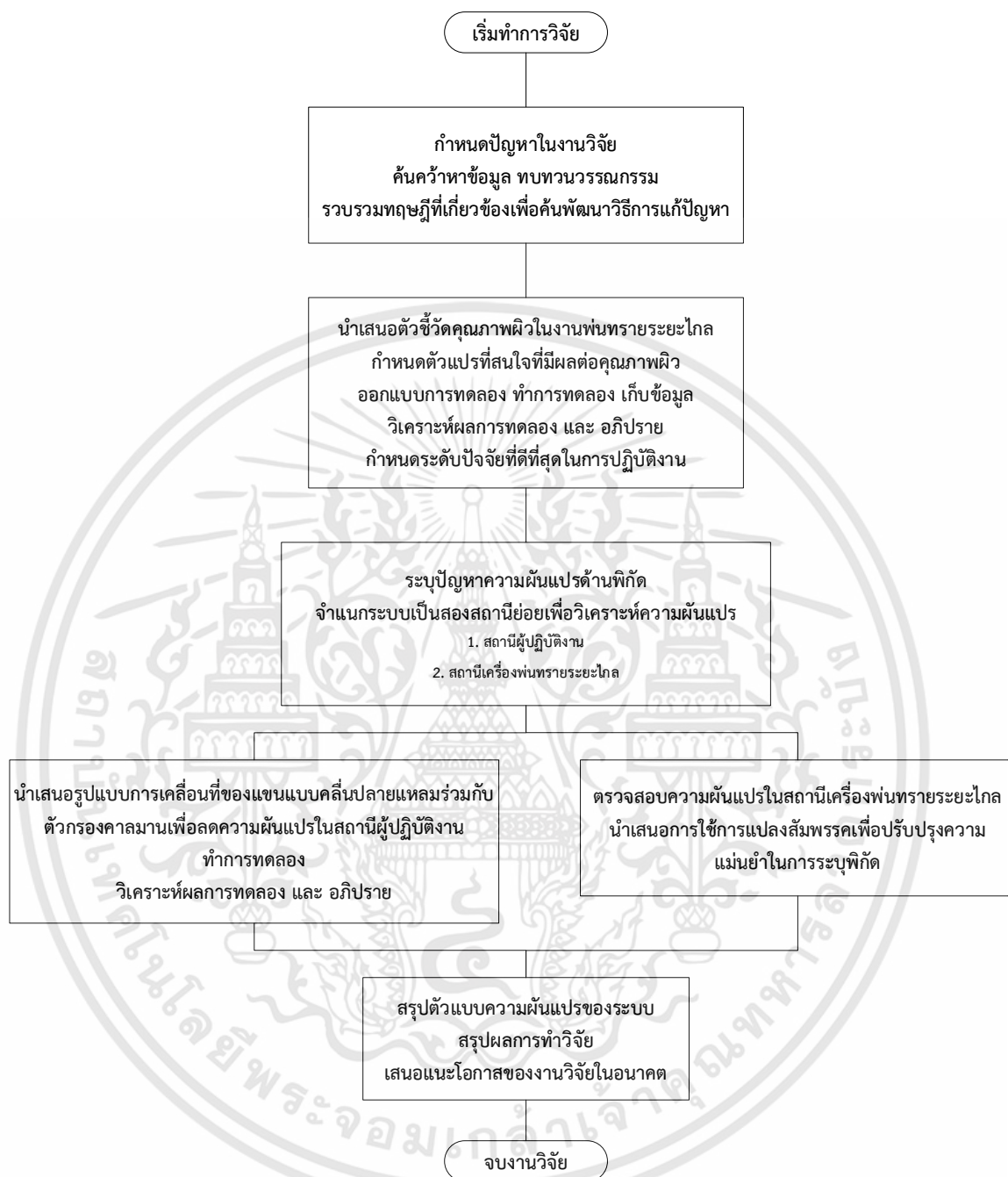
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 1.5 เริ่มจากการศึกษาหาข้อมูลและทบทวนวรรณกรรม จากนั้นทำการระบุปัญหาที่พบในงานวิจัยที่ผ่านมา (ปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ที่มีต่อคุณภาพผิวงาน) ทำการรวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อพัฒนาวิธีการแก้ปัญหา สร้างระบบพ่นทรายเสมือนเพื่อใช้ในการศึกษา นำเสนอดัชนีชี้วัดสมรรถนะของระบบที่อธิบายคุณภาพพื้นผิวในงานพ่นทรายระยะไกล กำหนดปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิว (พื้นผิวไม่สะอาด พื้นผิวเสียหาย และเวลารวมในการเคลื่อนที่) จากนั้นทำการ

ออกแบบการทดลอง ทำการทดลอง และเก็บข้อมูล ทำการวิเคราะห์และอภิปรายผล กำหนดระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าดัชนีชี้วัดที่ดีที่สุด นำเสนอแนวทางการออกแบบระบบ นำเสนอการค้นพบลักษณะพิเศษของเวลารวมในการเคลื่อนที่ของงานพ่นทรายระยะไกล และระบุปัญหาที่พบจากการศึกษา ได้แก่ ปัญหาความผันแปรด้านพิกัด

ทำการศึกษาข้อมูลและทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับความผันแปรในระบบแบบอนุกรม จากนั้นจำแนกระบบพ่นทรายระยะไกลเป็นสองสถานีย่อย ได้แก่ สถานีผู้ปฏิบัติงานและสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล จากนั้นจึงทำการศึกษาค่าความผันแปรในแต่ละสถานี เริ่มจากสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล ทำการทดสอบความผันแปร ได้แก่ ทดสอบความเที่ยงตรงและความแม่นยำในการระบุพิกัดของเครื่องพ่นทรายระยะไกล จากนั้นนำเสนอวิธีลดความผันแปรในสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล โดยวิธีการแปลงสัมพรรคเพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัด ทำการทดสอบเปรียบเทียบความแม่นยำก่อนและหลังการแปลงสัมพรรค สรุปผลการลดความผันแปรในสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล

จากนั้น ทดสอบความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงาน จากนั้นนำเสนอวิธีการลดความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงาน โดยนำเสนอรูปแบบการเคลื่อนที่แบบคลื่นปลายแหลมเพื่อปรับปรุงความแม่นยำ จากนั้นแปลงพิกัดที่ได้จากการเคลื่อนที่แบบคลื่นปลายแหลมให้เป็นเส้นตรงด้วยตัวกรองคาลมานเพื่อปรับปรุงความเที่ยงตรง ทำการทดลองเพื่อทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวิธีเดิมและวิธีที่นำเสนอ สรุปผลการลดความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงาน จากนั้นจึงทำการสรุปงานวิจัย ชี้ถึงประโยชน์ที่ได้รับ และโอกาสของงานวิจัยในอนาคต



รูปที่ 1.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการศึกษา

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

งานวิจัยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการลดความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกล โดยมีศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ที่เป็นการศึกษาาระบบเบื้องต้นและนำไปสู่ปัญหาความผันแปรในด้านพิกัดของระบบ โดยจากงานวิจัยที่นำเสนอ มีประโยชน์ที่ได้รับดังนี้

1.7.1 ในการลดความผันแปรของคุณภาพพื้นผิวทั่วทั้งพื้นที่ที่ทำการพ่น ได้มีการนำเสนอดัชนีชี้วัดสมรรถนะของระบบที่อธิบายคุณภาพพื้นผิวเชิงปริมาณสำหรับงานพ่นทรายระยะไกล ที่สามารถนำไปใช้ในการศึกษาทางวิศวกรรมได้ เนื่องจากมาตรฐานพื้นผิวของงานพ่นทรายในแบบเดิม (มาตรฐานแห่งชาติอเมริกา, An American National Standard) เป็นมาตรฐานที่ใช้การประเมินจากสายตา ไม่มีมาตรฐานชี้วัดเชิงปริมาณ ทำให้ยากแก่การจำแนกระดับความสะอาดและไม่สามารถคำนวณปริมาณที่เป็นตัวแทนเชิงคุณภาพได้ ดังนั้น ดัชนีชี้วัดพื้นผิวเชิงปริมาณที่สามารถนำแนวคิดนี้ไปปรับใช้ได้ในงานทางวิศวกรรมอื่นๆ

ในขั้นตอนการระบุระดับปัจจัยที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดนั้น เนื่องจากมีผลลัพธ์ (ดัชนีชี้วัด) ที่สนใจมากกว่าหนึ่งตัว การระบุระดับปัจจัยที่ให้ค่าดัชนีชี้วัดตัวใดตัวหนึ่งดีที่สุด อาจทำให้ค่าดัชนีชี้วัดอื่นๆอยู่ในระดับที่ไม่น่าพอใจ ความขัดแย้งนี้ให้เกิดความยากลำบากในการระบุปัจจัย ดังนั้นจึงมีการนำเสนอการใช้วิธีการกำหนดค่าที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อให้ได้ระดับปัจจัยที่ค่าดัชนีชี้วัดที่สนใจทุกตัวอยู่ในระดับที่ดีที่สุด โดยเทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ในระบบการผลิตอื่นๆ โดยใช้กำหนดระดับปัจจัยที่ลงตัวในกรณีที่เกิดความขัดแย้งระหว่างผลลัพธ์ของระบบมีมากกว่าหนึ่งตัว

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ได้มีการค้นพบองค์ความรู้ใหม่ ได้แก่คุณลักษณะเฉพาะตัวของเวลารวมในการเคลื่อนที่ (Movement time) ที่ใช้ในงานพ่นทรายระยะไกล ซึ่งแตกต่างจากงานบังคับอุปกรณ์ตามเส้นทางอื่นๆ (Steering task, Path following task) ที่สามารถอธิบายหรือพยากรณ์เวลารวมในการเคลื่อนที่ได้จากกฎสตีริง (Steering law) [29] โดยผู้วิจัยเชื่อว่าในอนาคต สามารถศึกษาเพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ให้กับเวลารวมในการเคลื่อนที่ที่ใช้ในงานพ่นทรายระยะไกล ซึ่งสามารถนำมาใช้เพื่อพยากรณ์เวลาในการเคลื่อนที่ของงานพ่นทรายระยะไกลหรืองานอื่นๆที่มีลักษณะการบังคับอุปกรณ์ไปตามเส้นทางและมีการปฏิบัติงานตามเส้นทางไปด้วย

1.7.2 ในการพิจารณาความผันแปรในระบบใดๆ โดยทั่วไปจะเป็นการพิจารณาระบบโดยรวม และประเมินระบบจากผลลัพธ์ของระบบเท่านั้น ซึ่งวิธีการแบบนี้อาจทำให้การประเมินคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลลัพธ์จากระบบอาจมีความคลาดเคลื่อนจากแหล่งกำเนิดปะปนอยู่ ดังนั้น การพิจารณาระบบโดยใช้ทฤษฎีสายธารความผันแปรที่แบ่งระบบเป็นสถานีย่อยเรียงต่อกันและประเมินผลลัพธ์จากสถานีย่อยจะช่วยลดผลกระทบของความคลาดเคลื่อนจากแหล่งกำเนิดอื่นๆที่ไม่ได้พิจารณา ดังนั้น การพิจารณาระบบในมุมมองนี้สามารถช่วยให้แก้ปัญหาในระบบได้ถูกต้องมากขึ้น นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ตัวแบบความผันแปร

แปรแบบหลายสถานีกับลักษณะงานที่เป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง (งานพันทรายระยะไกล) ที่แตกต่างจากงานลักษณะดั้งเดิมที่ตัวแบบได้ถูกนำเสนอ (งานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ งานขึ้นรูปโลหะ) ทำให้เกิดการพัฒนารูปแบบใหม่ที่มีคาบเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ถือได้ว่าเป็นองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถนำไปใช้ได้กับงานที่มีลักษณะใกล้เคียง

1.7.3 ในการศึกษาความผันแปรในสถานีเครื่องพันทรายระยะไกล พบว่าอุปกรณ์มีปัญหาด้านความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง โดยเป็นปัญหาที่พบได้มากในอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องทดลองซึ่งเป็นอุปกรณ์ต้นแบบหรืออุปกรณ์ที่ต้องผลิตหรือประกอบขึ้นเอง ทำให้มีความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการผลิตหรือประกอบ ส่งผลให้ขนาดของอุปกรณ์เกิดความคลาดเคลื่อนและมีปัญหาด้านความแม่นยำในการระบุพิกัด (ในกรณีของหุ่นยนต์) ทั้งนี้หากต้องทำการจ้างผลิตอาจมีต้นทุนสูงหรือปรับแก้ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการอาจใช้เวลานาน ดังนั้น ในกรณีเครื่องพันทรายระยะไกล ที่ใช้อุปกรณ์ควบคุมหลักเป็นหุ่นยนต์แบบขนานในระนาบสองมิติ จึงได้มีการนำเสนอการใช้การแปลงสัมพรรค (Affine Transformation) ที่เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการประมวลผลภาพ (Image Processing) ในการปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดของหุ่นยนต์ที่มีพื้นที่ปฏิบัติงานในระนาบสองมิติ โดยระดับความแม่นยำที่ได้หลังการแปลงสัมพรรคมีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการปรับปรุงที่ประหยัดต้นทุนและเวลา ทั้งนี้จำเป็นต้องพิจารณาระดับความแม่นยำที่ต้องการในงานนั้นๆด้วย

1.7.4 สำหรับสถานีผู้ปฏิบัติงาน จากการศึกษาพบว่าความผันแปรหลักที่เกิดขึ้นมาจากความสามารถในการควบคุมเครื่องพันทรายระยะไกลของผู้ปฏิบัติงาน โดยความผันแปรที่เกิดขึ้นนั้นสามารถจำแนกได้เป็นความไม่เที่ยงตรงและความไม่แม่นยำ จึงได้นำเสนอวิธีการเคลื่อนที่ของแขนแบบคลื่นปลายแหลมเพื่อปรับปรุงความแม่นยำและการใช้ตัวกรองเพื่อปรับปรุงความเที่ยงตรงในการควบคุมพิกัดของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งวิธีการนี้ไม่จำกัดเฉพาะการใช้กับงานพันทรายระยะไกลเท่านั้น หากแต่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานควบคุมอุปกรณ์ไปตามเส้นทางทั่วไป ที่ต้องการความแม่นยำและเที่ยงตรงของผู้ปฏิบัติงาน

1.8 ผลกระทบของงานวิจัย

ผลกระทบของงานวิจัยสามารถแบ่งได้เป็นสองด้าน ได้แก่ ผลกระทบเชิงวิชาการ และผลกระทบเชิงเศรษฐศาสตร์ สำหรับผลกระทบเชิงวิชาการนั้น การลดความผันแปรในระบบพันทรายระยะไกลมีการรวบรวมทฤษฎีต่างๆเข้าด้วยกันเพื่อนำเสนอแนวคิดใหม่ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานแขนงอื่นๆที่คล้ายคลึงกัน อีกทั้งยังพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถต่อยอดเพื่อเป็นประโยชน์กับงานแขนงต่างๆใน

อนาคต เช่น เวลารวมในการเคลื่อนที่ของงานพ่นทรายระยะไกล ที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของสตีริง (Steering Law) ซึ่งสามารถพัฒนาเพื่อสร้างตัวแบบที่อธิบายเวลารวมในการเคลื่อนที่ของงานพ่นทรายระยะไกลและงานที่คล้ายคลึงกัน นอกจากนี้ยังมีรูปแบบการเคลื่อนที่ของแขนเพื่อปรับปรุงความแม่นยำ เมื่อใช้ร่วมกับตัวกรองคาลที่ช่วยในการปรับปรุงความเที่ยงตรง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานลักษณะอื่นที่มีการเคลื่อนที่คล้ายคลึงกับ หรือสามารถพัฒนาต่อยอดสำหรับการบังคับอุปกรณ์ไปตามเส้นทางที่ไม่ใช่เส้นตรง

ส่วนผลกระทบเชิงเศรษฐศาสตร์ สามารถกล่าวได้ว่า การลดความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกลสามารถช่วยให้มีความแม่นยำและเที่ยงตรงในการควบคุมพิกัดมากขึ้น ส่งผลให้คุณภาพงานดีขึ้น และปฏิบัติงานได้รวดเร็วขึ้น ไม่ต้องทำการพ่นซ้ำเพื่อแก้ไข ช่วยให้ลดเวลาในการทำงาน ลดต้นทุนปฏิบัติการ ค่าวัสดุ ค่าจ้างแรงงาน

1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท โดยแบ่งเป็น

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย หัวข้องานวิจัย สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนของการศึกษา และประโยชน์ที่ได้รับ

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม แนวคิดทฤษฎี หรือผลงานที่มีมาก่อนหน้า และมีความสำคัญต่องานวิจัยนี้เพื่อเป็นแนวทางเข้าสู่กระบวนการวิจัย โดยได้กล่าวถึงรายละเอียดของระบบพ่นทรายระยะไกล สมรรถนะที่ใช้อธิบายคุณภาพพื้นผิวของงานพ่นทรายระยะไกล การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ และ การวิเคราะห์ความผันแปรด้านพิกัดในระบบพ่นทรายระยะไกล

บทที่ 3 การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ในระบบพ่นทรายระยะไกล เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปฏิบัติงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับเครื่องพ่นทรายระยะไกล ได้แก่ ระยะการมอง (Viewing Distance) และ ขนาดความกว้างของเส้นทาง (Path Width) โดยมีผลลัพธ์ที่สนใจคือคุณภาพพื้นผิวและเวลารวมในการเคลื่อนที่ (Movement Time) โดยผลการทดลองนำไปสู่การค้นพบลักษณะเฉพาะตัวของเวลารวมในการเคลื่อนที่ของงานพ่นทรายระยะไกล และปัญหาความผันแปรทางด้านพิกัด นอกจากนี้ผู้วิจัยได้มีข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบระบบพ่นทรายระยะไกลด้วย

บทที่ 4 การศึกษาความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกลแบบหลายสถานีสำหรับสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล กล่าวถึงการวิเคราะห์ความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกล และพิจารณาระบบพ่นทรายระยะไกลให้เป็นระบบแบบหลายสถานี และจำแนกสาเหตุของความผันแปรตามสถานี จากนั้นพิจารณาความผันแปรในสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล และนำเสนอวิธีปรับปรุงความแม่นยำให้กับเครื่องพ่นทรายระยะไกลเพื่อลดความผันแปรในระบบ

บทที่ 5 การศึกษาความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกลแบบหลายสถานีสำหรับสถานีผู้ปฏิบัติงาน กล่าวถึง ความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงาน สาเหตุของความผันแปร ผลกระทบที่มีต่อความเที่ยงตรงและความแม่นยำ และนำเสนอวิธีการลดความผันแปรในระบบ การปรับปรุงตัวแบบเพื่ออธิบายความผันแปรในระบบหลังจากมีการปรับปรุงแล้ว

บทที่ 6 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ข้อสรุปจากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองทั้งหมด นอกจากนี้ยังกล่าวถึงโอกาสของงานวิจัยในอนาคต ที่จะได้ทำการศึกษาต่อไป

โดยผลงานวิจัยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย งานวิจัยที่นำเสนอในการประชุมวิชาการและบทความวิชาการดังนี้

- [1] R. Jientrakul, S. Limnararat, C. Yuangyai, W. Srisuebsai, P. Chotiprayanakul, “Investigating Of Human-Robot Collaboration In A Mixed-Reality Tele-Sandblasting Maintenance System” 16th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, Ho Chi Minh City, Vietnam, December 8–11, 2015.
- [2] Jientrakul R.; Yuangyai C.; Chotiprayanakul P.; Limnararat S.; “Multiple-Performance Optimization for Human-Robot Collaboration: a Translation Motion in a Tele-Sandblasting Maintenance System”, 6th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management”, Kuala Lumpur, Malaysia, March 8-10, 2016
- [3] R. Jientrakul, C. Yuangyai, C.Y. Cheng, P. Chotiprayanakul, S. Limnararat, “Investigating Multiple Human Performance Measures In Teleoperation Task: A Translation Task In A Tele-Sandblasting Maintenance System” Hum. Factors and Ergonomics in Manufacturing and Service Industries, vol. 18, no. 3, pp. 104–116, Dec. 2017.
- [4] R. Jientrakul, C. Yuangyai, “Variation Reduction by Minimizing the Effect of Human-Arm Movement Error in a Two-Stage Tele-Sandblasting System,” Working Paper (Will Submit to International Journal of Industrial Ergonomics).

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบปฏิบัติงานระยะไกล

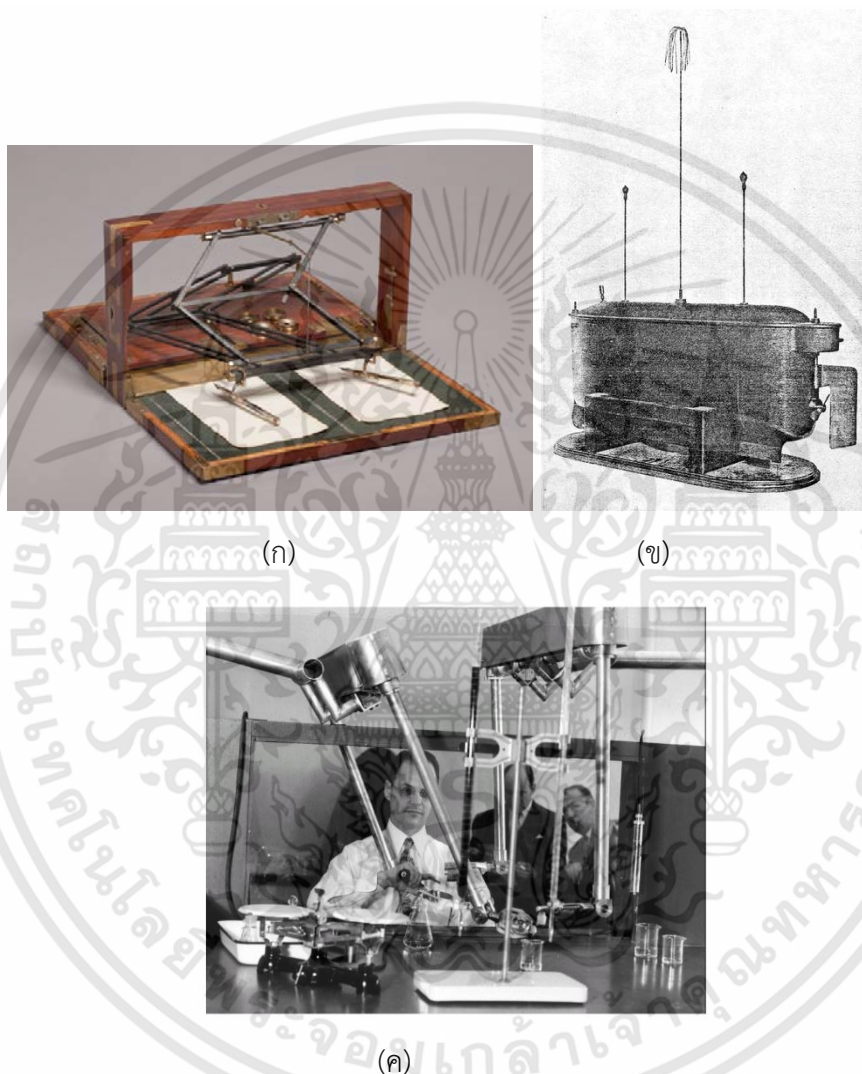
ระบบปฏิบัติงานระยะไกลถูกคิดค้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1805 โดย โทมัส เจฟเฟอร์สัน (Thomas Jefferson) ได้แก่เครื่องโพลีกราฟ (Polygraph) ซึ่งถูกใช้เพื่อร่างเอกสารสองฉบับพร้อมกันดังรูปที่ 2.1 (ก) อย่างไรก็ตาม คำว่าเทเลโอเปอเรชัน ซีสเต็ม (Teleoperation system) ได้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดยนิโคลาส เทสลา (Nikola Tesla) ในปี 1898 โดยเป็นสาธิตการใช้สัญญาณวิทยุเพื่อควบคุมเรือ (Radio-Controlled Vessel) [31] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) สำหรับระบบที่ใช้อุปกรณ์ควบคุมหลักและอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามหรือระบบปฏิบัติงานระยะไกลแบบทวิภาคี (Bilateral teleoperation) นั้นถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดย เรย์ จอร์ทซ์ (Ray Geertz) ในปี 1948 (รูปที่ 2.1 (ค)) โดยถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันมนุษย์จากรังสี [32] จากนั้นเป็นต้นมา ระบบปฏิบัติงานระยะไกลได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานหลายประเภท เช่น งานซ่อมบำรุงโครงสร้างขนาดใหญ่ [1][2] งานกู้ภัย [3] งานขนถ่ายและกำจัดวัตถุระเบิด นิวเคลียร์ หรือวัตถุมีพิษ [4] งานเพื่อความบันเทิง [5] งานช่วยเหลือในการผ่าตัด da Vinci [6] เป็นต้น

คำจำกัดความของระบบปฏิบัติงานระยะไกล (Teleoperation system) นั้น ครอบคลุมระบบที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันหลายชนิด เช่น ระบบบังคับยานพาหนะระยะไกล ระบบดาวเทียม ระบบปฏิบัติงานระยะไกลแบบทวิภาคี โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาระบบปฏิบัติงานระยะไกลแบบทวิภาคี ซึ่งระบบปฏิบัติงานระยะไกลแบบทวิภาคี (Bilateral Teleoperation System) คือระบบที่มีการสั่งงานเครื่องจักรจากระยะไกล ซึ่งมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลคำสั่งและการตอบสนองทั้งสองทิศทางระหว่างอุปกรณ์ควบคุมหลักและอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามแบบทันทีทันใดโดยใช้ช่องทางการสื่อสารที่ได้ออกแบบไว้ [33]

ระบบปฏิบัติงานระยะไกลแบบทวิภาคีประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ ผู้ปฏิบัติงาน (Human) และเครื่องปฏิบัติงานระยะไกล (Teleoperation machine) โดยส่วนประกอบทั้งสองส่วนนี้จะต้องมีการปฏิสัมพันธ์ที่เหมาะสมจึงจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Human-Robot interaction) จึงถือเป็นส่วนประกอบสำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ต้องพิจารณา

สำหรับเครื่องปฏิบัติงานระยะไกลนั้นมีส่วนประกอบทางกายภาพสองส่วน ได้แก่ อุปกรณ์ควบคุมหลัก (Master controller) และอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม (Slave device) ดังรูปที่ 1.1 โดยผู้ปฏิบัติงานจะทำการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักเพื่อกำหนดการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามให้ปฏิบัติงานแทนใน

ระยะไกล นอกจากจะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานควบคุมสั่งงานได้จากระยะไกลแล้ว นอกจากนี้ เครื่องปฏิบัติงานระยะไกลยังมีความสามารถในการปรับอัตราตในการเคลื่อนที่ทำให้สามารถปฏิบัติงานขนาดเล็กหรือใหญ่มากๆ ได้สะดวกมากขึ้น การเข้าปฏิบัติงานในจุดที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้เนื่องจากพื้นที่ปฏิบัติงานจริงอาจมีความซับซ้อน หรืออยู่ในสภาพแวดล้อมที่อันตรายและแปรปรวน [34]



รูปที่ 2.1 (ก) เครื่องโฟลิกกราฟ (ภาพจาก American Philosophy Society) (ข) เรือบังคับวิทยุของเทสลา (ภาพจาก cyberneticzoo.com) (ค) ระบบปฏิบัติงานระยะไกลแบบทวิภาคี (ภาพจาก cyberneticzoo.com)

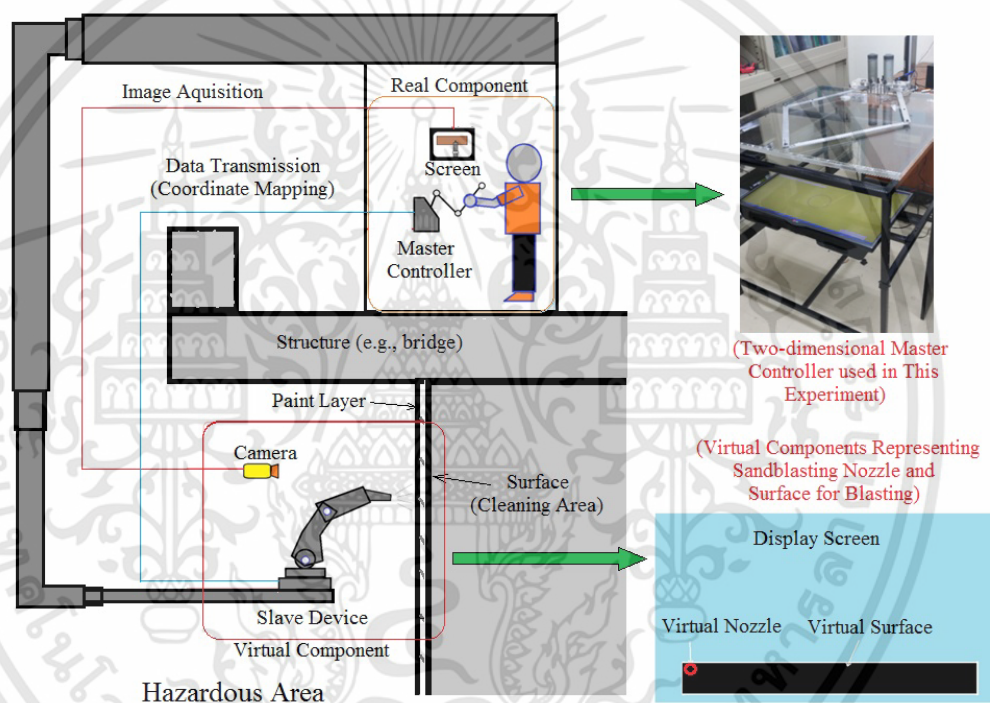
สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะให้ความสนใจกับระบบปฏิบัติงานระยะไกลแบบทวิภาคี เพื่อให้การกล่าวถึงในครั้งต่อไปกระชับ คำว่าระบบปฏิบัติงานระยะไกลที่กล่าวถึงต่อไปในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายถึงระบบปฏิบัติงานระยะไกลแบบทวิภาคี หากมีการกล่าวถึงระบบปฏิบัติงานระยะไกลแบบไม่ทวิภาคี จะมีการระบุว่าเป็นระบบปฏิบัติงานระยะไกลแบบไม่ทวิภาคี

2.1.1 ระบบพ่นทรายระยะไกล

ระบบพ่นทรายระยะไกลเป็นระบบเป็นระบบปฏิบัติงานหนึ่งที่น่าระบบปฏิบัติงานระยะไกลมาใช้ร่วมกับระบบพ่นทรายเพื่อใช้ในการซ่อมบำรุงโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ทั้งนี้เพื่อป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากสภาพแวดล้อมที่อันตรายและมีความแปรปรวน [1][2] นอกจากนี้ผู้สังเกตจากงานพ่นทรายยังมีผลต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน [35]



รูปที่ 2.2 ระบบพ่นทรายระยะไกล

ระบบพ่นทรายระยะไกลเป็นระบบหนึ่งที่มีการปฏิบัติงานแบบไม่สัมผัสวัตถุและเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งพร้อมกับทำการพ่น โดยการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะอยู่ในระนาบสองมิติ ซึ่งเป็นเคลื่อนที่ที่พบได้ทั่วไปในระบบปฏิบัติงานระยะไกลอื่นๆ เช่นระบบเชื่อมระยะไกล [10] ระบบตัดพลาสมา ระยะไกล [36] ระบบพ่นสีระยะไกล [37] ดังนั้นระบบพ่นทรายระยะไกลจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นระบบอ้างอิงในการทำวิจัย

ระบบพ่นทรายคือคำศัพท์ที่ใช้โดยทั่วไปซึ่งหมายถึง การพ่นวัสดุพ่น (Abrasive blasting) ขนาดเล็กจำนวนมากไปตามกระแสแรงดันสูงลงบนพื้นผิว เพื่อปรับปรุงให้พื้นผิวเรียบขึ้น ปรับรูปร่างพื้นผิว หรือ

กำจัดสิ่งสกปรกที่ไม่ต้องการออกจากพื้นผิว โดยการพ่นทรายถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกโดย เบนจามิน ชูว ทิลก์แมน (Benjamin Chew Tilghman) ใน ค.ศ. 1903 [38]

การพ่นทรายมีทั้งแบบแห้งและแบบเปียก โดยแบบแห้งจะเป็นการใช้แรงดันอากาศเป็นตัวพาวัสดุพ่นไปกระทบพื้นผิว ส่วนแบบเปียกจะผสมน้ำร้อนและสบู่เพื่อขจัดคราบมันไปพร้อมๆกับการพ่น วัสดุที่ใช้ในการพ่นนั้นมีมากมายหลายชนิดซึ่งมีความคมแตกต่างกันออกไป เช่น ลูกโลหะ (metal shot) ทราย (sand) ปัดแก้ว (glass beads) เปลือกวอลนัท (walnut shells) ชังข้าวโพด (corn cobs)

สำหรับมาตรฐานการเตรียมพื้นผิว (Surface preparation standard) นั้นมีการกำหนดไว้หลากหลายมาตรฐานทั่วโลก โดยมาตรฐานที่นิยมใช้กันมีสองมาตรฐานคือ SSPC NACE และ มาตรฐานสวีเดน (Swedish standard) โดยจะเป็นมาตรฐานที่ระบุระดับความสะอาดของพื้นผิว โดยระดับความสะอาดจะแบ่งได้หลายระดับ โดยใช้รูปภาพหรือคำอธิบายในการแบ่งระดับพื้นผิวหลังการพ่น ซึ่งอาจทำให้การประเมินพื้นผิวโดยผู้ปฏิบัติงานแต่ละคนได้ผลไม่ตรงกัน หรือการประเมินในสภาพแสงไม่คงที่เช่นการประเมินในที่มืดหรือที่สว่าง อาจได้ผลไม่ตรงกัน ดังนั้นการใช้ดัชนีชี้วัดเชิงปริมาณจึงมีความจำเป็นในการตรวจวัดสภาพพื้นผิว ซึ่งสามารถใช้เทคโนโลยีในปัจจุบันเพื่อช่วยเหลือในการตรวจวัดเชิงปริมาณเช่น การประเมินผลภาพถ่าย หรือการใช้เซนเซอร์สะท้อนกลับ เป็นต้น

จากตารางที่ 2.1 พบว่ามีการศึกษาระบบพ่นทรายระยะไกลและระบบที่ใกล้เคียงกันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1993 โดยส่วนมากเป็นการนำเสนอการออกแบบโครงสร้างระบบเพื่อความเหมาะสมกับลักษณะงานและสภาพแวดล้อม [1][36][38][39][40][41] และยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาความสามารถของส่วนระบบปฏิบัติงานระยะไกล เช่นการวางแผนเส้นทางการเดินหัวพ่น [40][42] การสร้างโครงร่างเรขาคณิต [43] และการออกแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์ หุ่นยนต์ และสภาพแวดล้อม [44]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับวัสดุพ่น (blasting material) และรอยพ่น (blasting spot) เช่น Achtsnick et al., (2005) ได้นำเสนอหัวพ่นชนิดลาवाल (Laval-type nozzle) ที่ช่วยเพิ่มความเร็วของวัสดุที่วิ่งออกจากหัวพ่นและความหนาแน่นของรอยพ่น 30% [45] Fan et al., (2011) ศึกษาการไหลของวัสดุพ่นโดยวิธี particle image velocimetry (PIV) ซึ่งพบว่า การไหลของวัสดุพ่นเป็นเส้นตรงและอัตราส่วนการกระจายตัวใกล้เคียงเชิงเส้น (linear expansion) [46] Li et al., (2009) นำเสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วของวัสดุพ่น ความยาวของหัวพ่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุพ่น ความหนาแน่นของวัสดุพ่น ความเร็วของการไหลของอากาศ [47] อย่างไรก็ตามการพัฒนาการพ่นเพียงอย่างเดียวโดยไม่พิจารณาพฤติกรรมพ่นของผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถการันตีคุณภาพของพื้นผิวได้

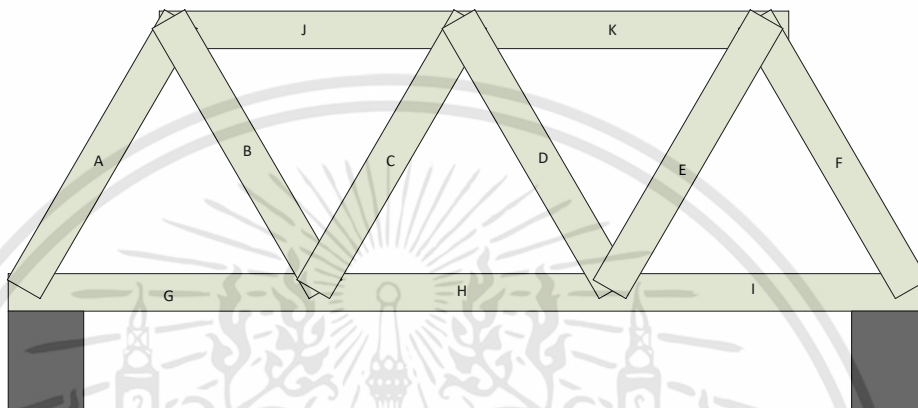
ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบพ่นทรายระยะไกล

Authors	Application	Proposed					
		Main System Design/Description	Path Planning / Colli. Avoidance	Geometric Mapping	HRE Interface/Virtual Force	Blasting Spot / Process Improv.	Movement Velocity
Gravez & Fournier, 1993	Plasma Cutting	✓					
Lorenc et al., 2000	Maintenance/Cleaning	✓					
Iborra et al., 2001	Hull Cleaning	✓					
Achtsnick et al., 2005	Sand Blasting					✓	
Liu et al., 2008	Maintenance/Cleaning	✓	✓				
To et al., 2009	Maintenance/Cleaning		✓				
Paul et al., 2009	Maintenance/Cleaning			✓			
Li et al., 2009	Sand Blasting					✓	
Fan et al., 2011	Sand Blasting					✓	
Chotiprayanakul et al., 2012	Maintenance/Cleaning				✓		
Liu & Zhang, 2014	Welding						✓
Zhang et al., 2018	Maintenance/Cleaning	✓					

แม้ว่าจะมีการจัดตั้งมาตรฐานการเตรียมพื้นผิวและความพยายามในการพัฒนาลักษณะการพ่นของหัวพ่นในงานวิจัยที่ผ่านมา แต่การศึกษาคุณภาพองค์รวมของระบบพ่นทรายซึ่งรวมถึงคุณภาพอุปกรณ์และพฤติกรรมผู้ปฏิบัติงานขณะทำการพ่นที่สัมพันธ์กับคุณภาพพื้นผิวยังไม่เคยมีการนำเสนอมาก่อน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ที่มีผลต่อคุณภาพพื้นผิวในงานพ่นทรายระยะไกล

2.1.2 ลักษณะของงานพันทราเยระยะไกล

เนื่องจากงานพันทราเยระยะไกลนั้นถูกนำมาใช้เพื่อการซ่อมบำรุงโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น โครงสร้างสะพานขนาดใหญ่ [1] ซึ่งพื้นที่ที่ทำการพ่นนั้นอาจมีรูปทรงหรือลักษณะที่แตกต่างกันไป อย่างไรก็ตาม ลักษณะพื้นผิวที่พบได้บ่อยๆพื้นผิวเรียบรูปทรงสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างขนาดใหญ่ที่พบในงานพันทราเยระยะไกล

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษางานพันทราเยระยะไกลอ้างอิงการพ่นกับพื้นผิวเรียบรูปทรงสี่เหลี่ยมเป็นหลัก ซึ่งลักษณะในการเดินหัวพ่นนั้นจะเป็นการเดินไปตามแนวด้านยาวของพื้นที่โดยเดินตามขนาดเส้นทางที่กำหนดให้ เมื่อเดินหัวพ่นจนสุดทางก็จะทำการเดินหัวพ่นกลับจนกว่าจะทำการพ่นได้เต็มพื้นที่ดังรูปที่ 2.4 โดยสมมติให้ทิศทางแกน x ขนานกับเส้นทางและแกน y ตั้งฉากกับแกน x



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเดินหัวพ่นบนพื้นผิวเรียบรูปทรงสี่เหลี่ยม

2.2 สมรรถนะที่ใช้อธิบายคุณภาพของพื้นผิวในงานพ่นทรายระยะไกล

โดยวิธีการดั้งเดิม การประเมินพื้นผิวหลังการพ่นจะใช้เกณฑ์มาตรฐานการเตรียมพื้นผิว (Surface preparation standard) ที่กำหนดโดยองค์กรต่างๆมากมาย มาตรฐานที่ได้รับความนิยมได้แก่ 1. Steel Structures Painting Council (SSPC) 2. National Association of Corrosion Engineers (NACE) และ 3. Swedish Standard โดยมาตรฐานต่างๆได้กำหนดระดับคุณภาพของพื้นผิวไว้ด้วยคำจำกัดความที่ระบุว่าพื้นผิวในแต่ละระดับคุณภาพต้องมีสภาพหลังการพ่นอย่างไร ซึ่งการนำมาตรฐานต่างๆไปใช้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากผู้ทำการประเมิน หรือสภาพแวดล้อมเช่นแสงหรือฝุ่นได้ ดังนั้นหากมีการชี้วัดคุณภาพเชิงปริมาณจะทำให้สามารถประเมินคุณภาพพื้นผิวเป็นตัวเลขได้

ในการประเมินคุณภาพของพื้นผิวหลังการพ่น พื้นผิวที่มีคุณภาพดีควรจะเป็นพื้นผิวที่ไม่มีสิ่งตกค้างหลังการพ่น นอกจากนี้ หลังจากพื้นผิวถูกพ่นสะอาดแล้วไม่ควรจะถูกพ่นต่ออีกเนื่องจากอาจทำให้พื้นผิวเสียหายและสิ้นเปลืองวัสดุพ่นและเวลาที่ใช้ในการพ่น โดยการพ่นที่ไม่มีสิ่งตกค้างหลงเหลือและไม่นานเกินไปนั้นคือความแม่นยำในการควบคุมความลึกของรอยพ่น ในขณะที่ความสม่ำเสมอของคุณภาพพื้นผิวทั่วทั้งพื้นที่ที่ทำการพ่นสามารถประเมินได้จากการแบ่งพื้นที่ทั้งหมดเป็นพื้นที่ย่อยและวัดคุณภาพพื้นผิวจากแต่ละพื้นที่ย่อย จากนั้นนำค่าที่ได้จากพื้นที่ย่อยทั้งหมดมาเฉลี่ยกัน จะได้ค่าความสม่ำเสมอของพื้นผิว

อย่างไรก็ตาม ดัชนีชี้วัดสมรรถนะของระบบที่อธิบายคุณภาพพื้นผิวเชิงปริมาณในงานพ่นทรายระยะไกลยังไม่เคยมีการนำเสนอมาก่อน ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอดัชนีชี้วัดเพื่อใช้ในการวิจัย โดยได้กำหนดตัวดัชนีวัดและวิธีคำนวณค่าดัชนีชี้วัดดังต่อไปนี้

2.2.1 สมรรถนะของระบบพ่นทรายระยะไกล

ปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษและพัฒนาาระบบปฏิบัติงานระยะไกล โดยในการพัฒนาระบบจำต้องมีการประเมินสมรรถนะของระบบ ซึ่งการวัดสมรรถนะของระบบนั้นแตกต่างออกไปตามกายภาพและวัตถุประสงค์ในการใช้งานและวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบนั้นๆ จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ดัชนีชี้วัดที่ใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับระบบปฏิบัติงานระยะไกลสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปดัชนีชี้วัดสมรรถนะในระบบปฏิบัติการระยะไกลจากงานวิจัยที่ผ่านมา

ผู้แต่ง (Author(s))	ประเภทงาน (Task)	ดัชนีชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ (Performance Indices used)										
		Task completion time	Velocity of Movement	Force	Avg. error of spatial movement	No. of Error Points	No. of Objects Dropped	No. of Object per Container	% Success Tasks Rate	Angulation f Handpiece	Excessive Distance	Degree of Error Direction
Malysz, Sirouspour, 2013 [5]	Steering task	✓		✓								
Wildenbeest <i>et. al.</i> , 2013 [49]	Free Space Movement, Contact Transition Task, Constrained Translation Task, Constrained Rotational Task	✓		✓								
Talasz <i>et. al.</i> , 2012 [50]	Knot Tightening Task			✓								
Anders J. <i>et. al.</i> , 2009 [51]	Steering Task	✓			✓							
Chotiprayanakul <i>et. al.</i> , 2011 [2]	Steering Task		✓			✓						
Richard, P <i>et. al.</i> , 1999 [52]	Grabbing Task	✓			✓							
Hendrix and Durfee, 2003 [53]	Target Acquisition Task	✓										
Kaber D. B., <i>et. al.</i> , 2012 [54]	Target Acquisition Task	✓										
Chaudhari <i>et. al.</i> , 2011 [55]	Target Acquisition Task		✓	✓								
King <i>et. al.</i> , 2009 [56]	Grabbing Task	✓		✓								
Osafo-Yeboah <i>et. al.</i> , 2013 [57]	Filling Task	✓					✓	✓				
Yang <i>et. al.</i> , 2015 [58]	Switching Task								✓			
Suebnuarn <i>et. al.</i> , 2009 [59]	Tooth Preparation Task	✓		✓						✓		
Hyoung <i>et. al.</i> , 2011 [60]	Steering Task /w Collision Avoidance		✓		✓							
Semere <i>et. al.</i> , 2004 [61]	Target Acquisition Task			✓								
Hayashi, Tamura 2009 [62]	Pointing Task	✓										

จากตารางที่ 2.2 สังเกตได้ว่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะนั้น มีทั้งดัชนีชี้วัดที่นิยมใช้ซึ่งสามารถใช้วัดสมรรถนะในงานได้เกือบทุกประเภทและดัชนีชี้วัดสำหรับงานเฉพาะทาง โดยดัชนีชี้วัดที่นิยมใช้ ได้แก่

1. เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน หรือ เวลารวมในการเคลื่อนที่ (Task completion time or movement time) ได้แก่เวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มปฏิบัติงานจนงานเสร็จสิ้น
2. แรง (Force) เป็นดัชนีชี้วัดที่ใช้ในระบบปฏิบัติงานระยะไกลที่อุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม มีการสัมผัสกับวัตถุ ทั้งนี้แรงที่ใช้แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะของการสัมผัส ขนาดและลักษณะของวัตถุ และการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม
3. ความเร็วในการเคลื่อนที่ (Velocity of movement) ได้แก่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามจากจุดหนึ่ง โดยส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม (Steering task) หรืองานเคลื่อนที่หาเป้าหมาย (Target acquisition task) เป็นหลัก
4. ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดในพิกัดการเคลื่อนที่ (Average error of spatial movement) คือค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian) ในขณะที่อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามกำลังเคลื่อนที่

นอกจากดัชนีชี้วัดที่ใช้โดยทั่วไปแล้ว ยังมีดัชนีชี้วัดที่พบไม่มาก ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดที่สัมพันธ์กับประเภทของงานหนึ่งๆโดยเฉพาะ เช่น จำนวนจุดที่ผิดพลาดในการเคลื่อนที่ จำนวนครั้งที่ทำวัตถุหล่น จำนวนของวัตถุในภาชนะ เปอร์เซ็นต์ที่งานสำเร็จ มุมของมือจับในขณะที่เข้าถึงวัตถุ ระยะที่เคลื่อนที่เกินมุมของการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาด

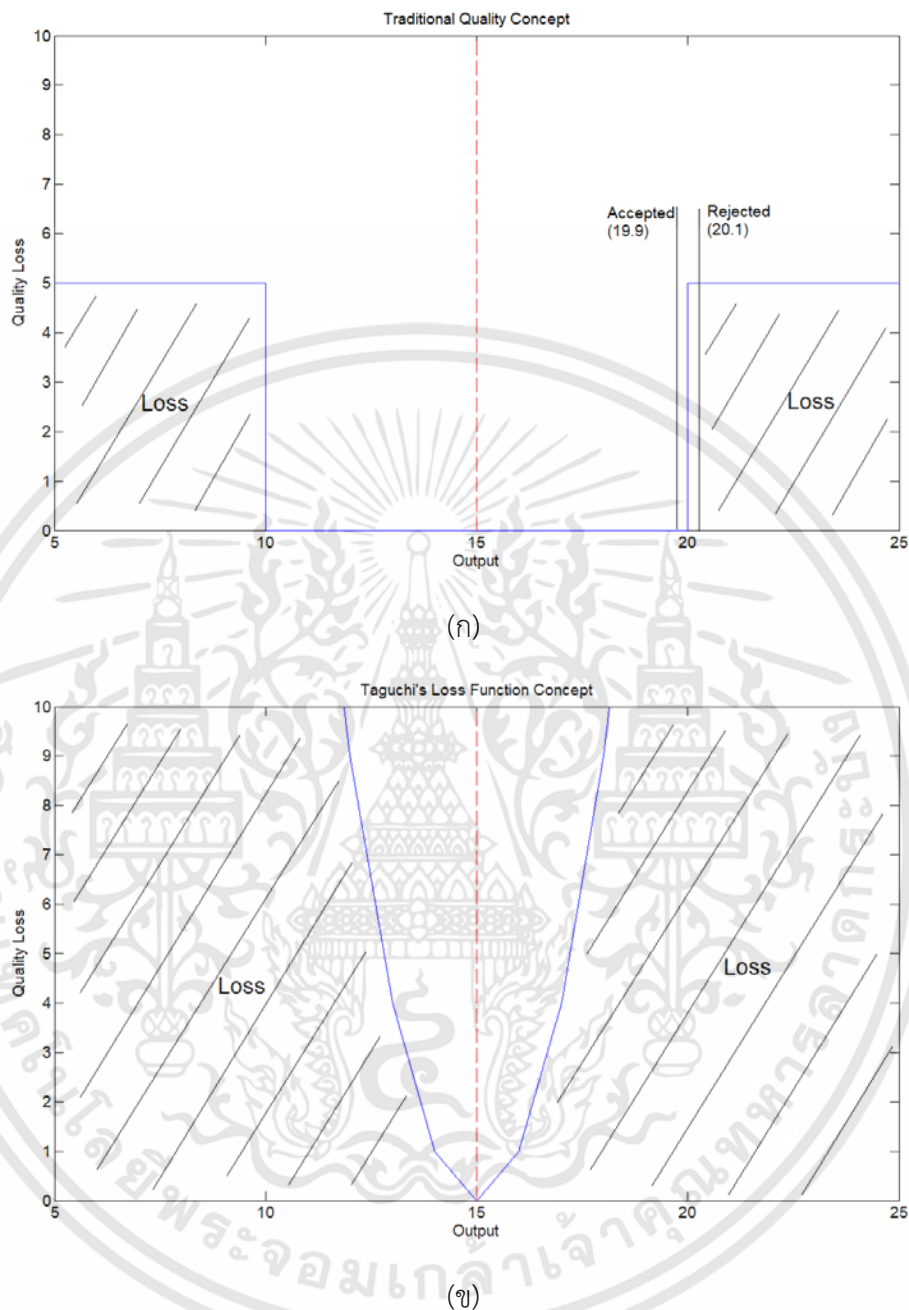
จากดัชนีชี้วัดในตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานและแรงเป็นหัวข้อที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายแต่ความผิดพลาดของพิกัดการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับสมรรถนะของระบบ ยังไม่มีการศึกษามากนัก และในงานวิจัยที่ผ่านมาไม่มีการนำเสนอวิธีที่ชัดเจนในการลดความผิดพลาดในพิกัดการเคลื่อนที่ สำหรับสมรรถนะของระบบพ่นทรายระยะไกลนั้นไม่พบว่ามี การนำเสนอมาก่อน แม้ว่าจะมีมาตรฐานการเตรียมพื้นผิวสำหรับงานพ่น แต่ระดับความสะอาดจะเป็นการประเมินด้วยสายตา ไม่มีการประเมินเชิงปริมาณซึ่งอาจทำให้การประเมินคลาดเคลื่อนได้ ในงานพ่นทรายระยะไกล การทำงานอย่างมีประสิทธิภาพหมายถึงพื้นผิวที่ถูกพ่นมีความสะอาด ไม่เกิดความเสียหายจากการพ่นที่มากเกินไปและใช้เวลาสั้นที่สุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอดัชนีชี้วัดสำหรับงานพ่นทรายระยะไกล ได้แก่ พื้นผิวเสียหาย (Damaged surface) และ พื้นผิวไม่สะอาด (Unfinished surface) เพื่อใช้ร่วมกับดัชนีเวลาในการเคลื่อนที่ (Movement time) โดยการคำนวณค่าดัชนีชี้วัดจะใช้วิธีคำนวณที่อธิบายการสูญเสียของคุณภาพในการปฏิบัติงาน ได้แก่ ฟังก์ชันการสูญเสียของทากูชิ

2.2.1.1 ฟังก์ชันการสูญเสียของทาคุชิ (Taguchi's loss function)

ดัชนีชี้วัดที่ใช้ในการศึกษาระบบพ่นทรายจะพิจารณาบนพื้นฐานของระบบพ่นทรายเสมือนโดยใช้ค่าความเข้มของแสงในแต่ละพิกเซลบนพื้นผิวเสมือนซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นผิวและสิ่งสกปรกบนพื้นผิว ดังนั้นในการคำนวณดัชนีชี้วัดคุณภาพพื้นผิว จะใช้ค่าความเข้มของแสงในแต่ละพิกเซลเพื่อเป็นตัวแทนสภาพพื้นผิวในจุดนั้นๆ

วิธีการคำนวณค่าดัชนีชี้วัดนั้นมีหลากหลายวิธี ซึ่งการคำนวณแต่ละวิธีก็ใช้อธิบายความหมายของดัชนีชี้วัดแตกต่างกันออกไป เช่น การใช้ค่าเฉลี่ยสามารถบอกถึงสภาพพื้นผิวโดยรวมว่ามีสิ่งสกปรกตกค้างอยู่หรือเกิดความเสียหายบนพื้นผิวมากน้อยเท่าไรโดยประมาณ แต่ค่าเฉลี่ยไม่สามารถบอกถึงความแตกต่างของสภาพพื้นผิวในจุดที่แตกต่างกันได้ ในขณะที่ค่าความแปรปรวนนั้นสามารถบอกถึงความแตกต่างของสภาพพื้นผิวในแต่ละจุด แต่ไม่สามารถบอกถึงระดับความสะอาดหรือความเสียหายของพื้นผิวได้

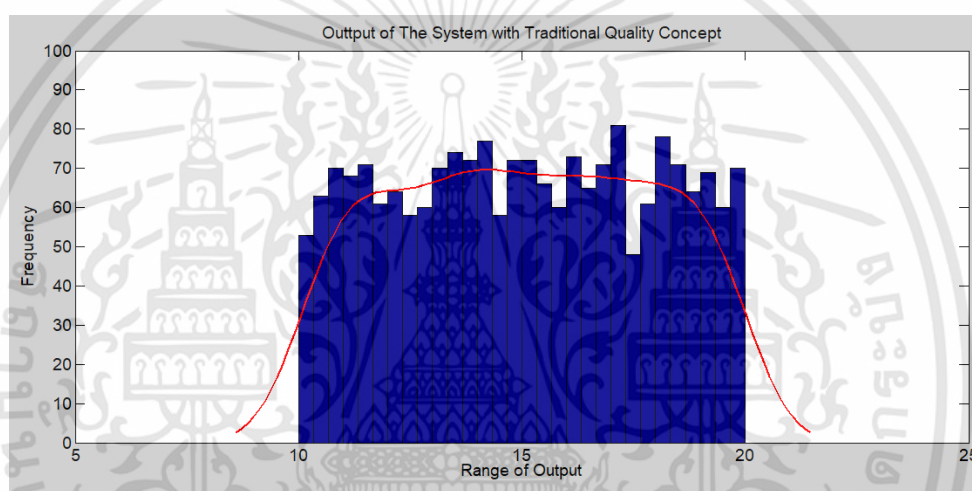
ในการควบคุมคุณภาพของผลลัพธ์ของระบบนั้น แนวคิดดั้งเดิมคือการควบคุมผลลัพธ์ให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ส่วนผลลัพธ์ของระบบที่มีค่าอยู่นอกเหนือช่วงที่ยอมรับได้ ถือว่าเป็นผลลัพธ์ที่ไม่มีคุณภาพ แต่ถ้าพิจารณาผลลัพธ์ของระบบที่มีค่าอยู่ใกล้เคียงกับขอบเขตของช่วงที่ยอมรับได้ เช่นกำหนดช่วงที่ยอมรับได้ของผลลัพธ์ของระบบอยู่ระหว่าง 10 หน่วย ถึง 20 หน่วย และค่าเป้าหมายอยู่ที่ 15 หน่วย หากผลลัพธ์ของระบบมีค่า 19.9 ถือว่าผลลัพธ์นั้นๆมีคุณภาพ ในขณะที่ หากผลลัพธ์ของระบบมีค่า 20.1 ถือว่าไม่มีคุณภาพ ซึ่งไม่สมเหตุผล และการผลิตจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้เสมอ ทั้งที่สามารถปรับปรุงระบบให้มีผลลัพธ์เข้าใกล้ค่าเป้าหมายได้มากขึ้น (ความแปรปรวนในระบบลดลง) ดังนั้น ในปี 1960 ทาคุชิจึงเสนอแนวคิดฟังก์ชันการสูญเสีย โดยมุ่งเน้นไปที่ค่าเป้าหมาย และไม่ว่าผลลัพธ์ของระบบจะคลาดเคลื่อนจากเป้าหมายมากหรือน้อย ก็ถือว่ามีปัญหาด้านคุณภาพซึ่งส่งผลกระทบต่อความพึงพอใจของผู้บริโภคมากหรือน้อยสอดคล้องกับความคลาดเคลื่อนจากเป้าหมายของผลลัพธ์นั้นๆ โดยแนวคิดความสูญเสียแบบดั้งเดิมและแนวคิดความสูญเสียของทาคุชิสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



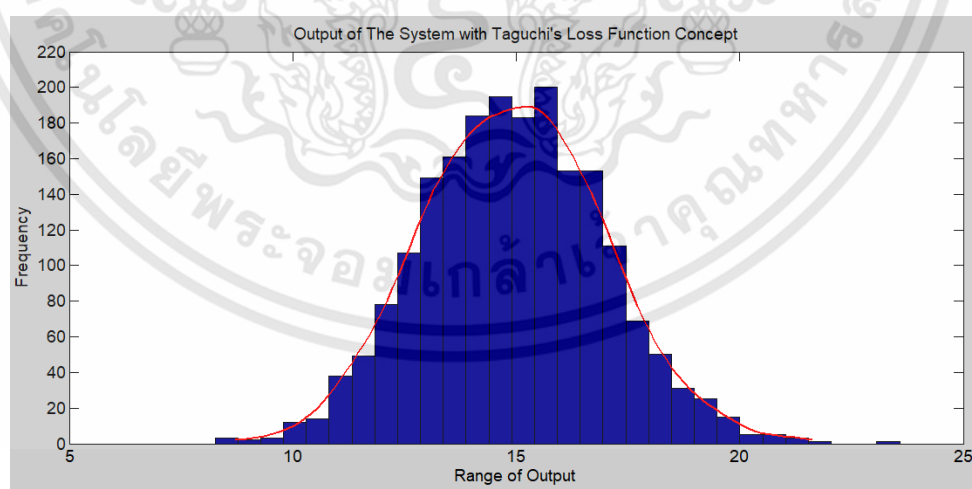
รูปที่ 2.5 ลักษณะของความสูญเสียทางคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามแนวคิด (ก) แบบดั้งเดิม (ข) ฟังก์ชันการสูญเสียของทาคุชิ

ดังนั้นในการพัฒนาหรือปรับปรุงระบบ หากใช้ค่าผลลัพธ์ของระบบเป็นดัชนีชี้วัดโดยตรง จะไม่สะท้อนความสูญเสียที่แท้จริง เพราะถึงแม้ว่าค่าผลลัพธ์ของระบบจะอยู่ในช่วงที่ยอมรับ แต่หากไม่ตรงกับค่าเป้าหมาย ผลลัพธ์นั้นก็มีความบกพร่องอยู่ ดังนั้น ฮิสโตแกรมของผลลัพธ์ของระบบภายใต้แนวความคิดแบบดั้งเดิม ผลลัพธ์ของระบบจะมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) อยู่ภายในช่วง

ที่ยอมรับได้ และไม่ถือว่าค่าผลลัพธ์ที่อยู่ในช่วงดังกล่าวมีความบกพร่องด้านคุณภาพหรือมีความสูญเสีย ซึ่งไม่สะท้อนความเป็นจริง ดังนั้น จึงควรใช้ดัชนีชี้วัดที่สะท้อนถึงความเสียหาย ได้แก่ ฟังก์ชันความสูญเสียของทากูชิที่เน้นค่าความเสียหายเมื่อผลลัพธ์ของระบบไม่ได้ตรงตามค่าเป้าหมาย ฮิสโตแกรมของระบบแบบนี้จะมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) โดยในตอนเริ่มต้น ระบบอาจให้ผลลัพธ์ที่ความแปรปรวนสูง ซึ่งจะสะท้อนออกมาในค่าฟังก์ชันความสูญเสีย จากนั้นเมื่อทำการปรับปรุงระบบอย่างต่อเนื่อง ฮิสโตแกรมจะมีความถี่สูงขึ้นที่รอบๆค่าเป้าหมาย ความแปรปรวนในระบบจะลดลง ซึ่งเป็นการปรับปรุงระบบเพื่อที่จะพยายามปรับให้ผลลัพธ์เข้าใกล้ค่าเป้าหมายเพื่อให้ดัชนีชี้วัดมีค่าต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6



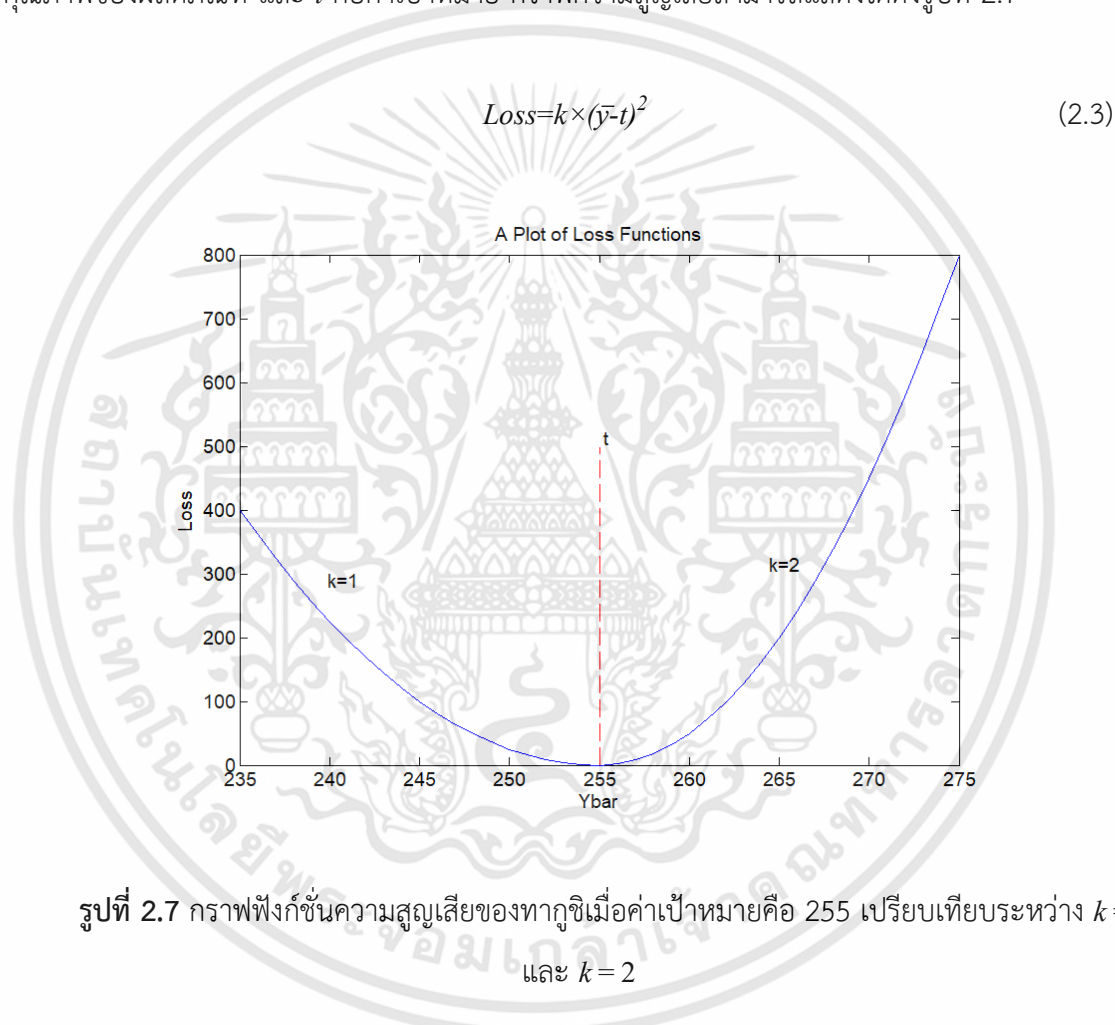
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.6 ฮิสโตแกรมของข้อมูลผลิตภัณฑ์ที่ผลิตตามแนวคิด (ก) แบบดั้งเดิม (ข) ฟังก์ชันการสูญเสียของทากูชิ

ฟังก์ชันการสูญเสียของทากูชิแสดงดังสมการที่ 2.3 โดยมีแนวคิดที่สำคัญในการผลิตคือการทำผลิตภัณฑ์ที่ได้คุณภาพตามเป้าประสงค์ และความผันแปรทำให้คุณภาพในการผลิตแย่งลง ดังนั้นฟังก์ชันการสูญเสียของทากูชิจึงถูกออกแบบให้เป็นฟังก์ชันกำลังสอง โดยความผิดพลาดที่ไกลออกจากค่าเฉลี่ยจะยิ่งมีความสูญเสียมากเป็นทวีคูณ [48] อาจกล่าวได้ว่า ค่าความสูญเสียจะยิ่งมีมากขึ้นหากคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยิ่งไกลออกจากเป้าหมาย การเน้นค่าความสูญเสียทำได้โดยเปลี่ยนแปลงค่า k โดย \bar{y} คือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และ t คือค่าเป้าหมาย กราฟความสูญเสียสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟฟังก์ชันความสูญเสียของทากูชิเมื่อค่าเป้าหมายคือ 255 เปรียบเทียบระหว่าง $k = 1$ และ $k = 2$

2.2.2 การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ในระบบพันทรายระยะไกล

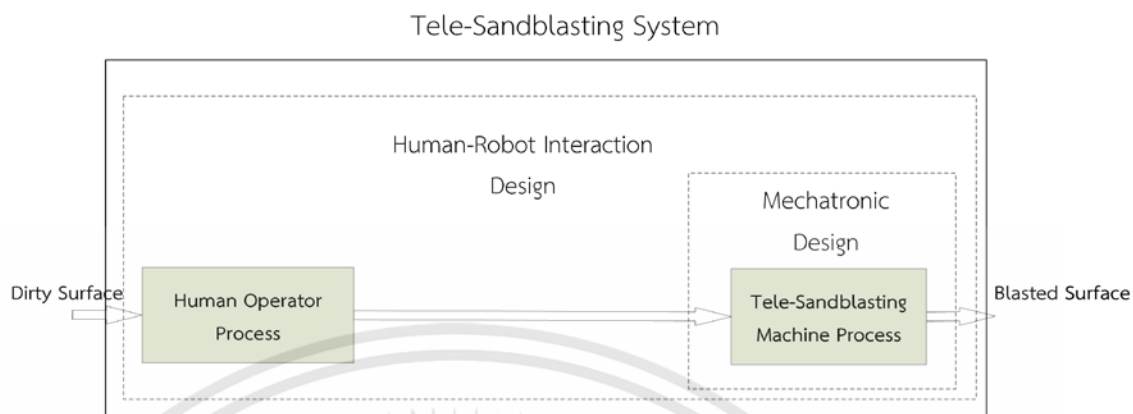
สำหรับการศึกษาระบบพันทรายระยะไกลเบื้องต้นนั้น ผู้วิจัยให้ความสนใจกับสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบ โดยในการออกแบบระบบปฏิบัติงานระยะไกลซึ่งเป็นระบบที่ใช้มนุษย์ปฏิบัติงานร่วมกับหุ่นยนต์นั้น มีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงดังนี้

- 1 แมคคาทรอนิกส์ (Mechatronics) ได้แก่ อุปกรณ์และชิ้นส่วนทางกายภาพต่างๆที่ต้องการความสามารถทางวิศวกรรมในการสร้างและประกอบขึ้นเป็นระบบ นอกจากนี้ยังรวมไปถึงระบบควบคุม วิธีการสื่อสารของข้อมูล การจัดการพลังงานอีกด้วย งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบระบบปฏิบัติงานระยะไกลทางด้านแมคคาทรอนิกส์หลายบทความ เช่น [6][63][64][65][66]
- 2 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human-robot interaction, HRI) เป็นการพิจารณาการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพและเป็นธรรมชาติ [67] โดยในงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์นั้นสามารถแบ่งเป็นสองประเภท ได้แก่

2.1 การเชื่อมต่อระหว่างมนุษย์และเครื่องจักร (Human-Machine Interface, HMI) หมายถึงการติดต่อสื่อสารที่เกิดระหว่างมนุษย์และเครื่องจักรซึ่งรวมถึงการสั่งการที่มนุษย์ให้กับเครื่องจักรและความคืบหน้าหลังจากคำสั่งนั้นๆหรือผลลัพธ์ที่เครื่องจักรส่งกลับมาสู่มนุษย์ เช่น ภาพ เสียง ความรู้สึก โดยการเชื่อมต่อระหว่างมนุษย์และเครื่องจักรนั้นหมายรวมถึงการออกแบบซอฟต์แวร์ อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่มนุษย์ใช้ทำการสื่อสารสั่งการเครื่องจักร การส่งถ่ายข้อมูล การใช้ภาพเป็นตัวประสานกับผู้ใช้ (Graphic User Interface, GUI) ฯลฯ [68]

2.2 ความร่วมมือระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human-Robot Collaboration, HRC) หมายถึงกิจกรรมที่มนุษย์และหุ่นยนต์ร่วมมือกันเพื่อทำงานในพื้นที่ๆหนึ่งๆ [69] ประสิทธิภาพในการร่วมมือกันเป็นตัวบ่งชี้ถึงสมรรถนะของระบบ การเพิ่มสมรรถนะให้ระบบสามารถทำได้โดยการจัดสภาพแวดล้อมในการทำงานเพื่อให้มนุษย์ทำงานได้อย่างเป็นธรรมชาติและมีประสิทธิภาพ ในขณะที่หุ่นยนต์นั้นสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ การทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพของหุ่นยนต์นั้นอาจทำได้โดยการปรับเปลี่ยนโปรแกรมการทำงาน แต่การทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพของมนุษย์นั้นต้องการการปรับสภาพแวดล้อมการทำงานให้เข้ากับความคิดเฉพาะตัวของผู้ปฏิบัติงาน

ในระบบพันทรายระยะไกลนั้น การออกแบบด้านแมคคาทรอนิกส์และการออกแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ล้วนเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพ องค์ประกอบของระบบพันทรายระยะไกลที่สัมพันธ์กับการออกแบบทั้งสองด้านแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบของระบบพ่นทรายระยะไกลที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ

แม้ว่าจะมีการนำเสนองานวิจัยด้านการออกแบบระบบปฏิบัติงานระยะไกลทางด้านแมคาทรอนิกส์มากมาย แต่งานวิจัยทางด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์สำหรับระบบปฏิบัติงานระยะไกลนั้นมีการนำเสนอไม่มากเท่าที่ควร อีกทั้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ของงานแต่ละประเภทนั้นจะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะการทำงานของมนุษย์และหุ่นยนต์ในงานนั้นๆ ซึ่งการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์สำหรับระบบงานพ่นทรายระยะไกลนั้นยังไม่เคยมีการนำเสนอมาก่อน

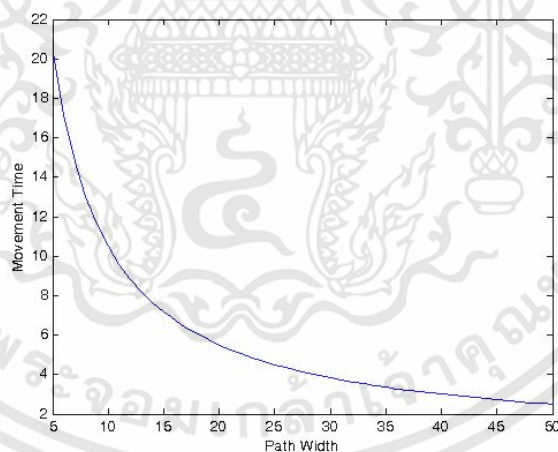
2.2.2.1 ปัจจัยในการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ในระบบพ่นทรายระยะไกล

ในการศึกษาปฏิสัมพันธ์ของมนุษย์และหุ่นยนต์ในงานพ่นทรายระยะไกลนั้น ผู้วิจัยจะทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ โดยปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นมีอิทธิพลต่อการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงาน โดยปัจจัยที่สนใจได้แก่ ระยะระหว่างดวงตาและหน้าจอปฏิบัติงานหรือระยะการมอง (Viewing Distance) และการกำหนดขนาดเส้นทางในการเดินหัวพ่น (Path Width)

ในการใช้งานระบบปฏิบัติงานระยะไกลส่วนมากนั้น การรับรู้ภาพ (Visual Perception) ของผู้ปฏิบัติงานนั้นมีส่วนสำคัญอย่างมากสำหรับประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงาน มีรายงานในงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับผลกระทบของการรับรู้ภาพในการใช้งานระบบปฏิบัติงานระยะไกล โดยในงานวิจัยเหล่านั้นได้ศึกษาการรับรู้ภาพในหลายแง่มุมเช่น การปฏิบัติงานโดยมีข้อมูลภาพเปรียบเทียบกับ การไม่มีข้อมูลภาพ [70][71][72][73] ผลกระทบของมุมในการมอง [70][74][75] ขนาดของกราฟฟิก [74][76] สิ่งกีดขวางในการมอง [75] สัดส่วนของขนาดวัตถุจริงกับขนาดของวัตถุในจอภาพ [2] อย่างไรก็ตาม การศึกษาระยะห่างระหว่างดวงตากับหน้าจอหรือระยะการมอง (Viewing Distance, VD) ในระบบปฏิบัติงานระยะไกลนั้นยังไม่มีนำเสนอ

แม้ว่าการศึกษาระยะการมองนั้นจะมีรายงานในงานวิจัยอยู่บ้าง [77][78][79] แต่เป็นเพียง การศึกษาการรับรู้ข้อมูลทางเดียว กล่าวคือเป็นการศึกษาระยะการมองของมนุษย์แต่ไม่มีกิจกรรมหรือการ ทำงานตอบสนองจากการมองเห็นที่ใกล้เคียงกับระบบปฏิบัติงานระยะไกล เช่น Ankrum (1996) แนะนำ ระยะการมองสำหรับสถานีงานคอมพิวเตอร์ที่ 25 นิ้ว [80] Sakamoto et al., (2008) แนะนำระยะการ มองที่เหมาะสมสำหรับหน้าจอให้มีขนาด 3-4 เท่าตัวของความสูงหน้าจอ [81] Sakamoto et al., (2009) ศึกษาผลกระทบของระยะการมองที่มีต่ออัตราการกระพริบตา อัตราการเต้นของหัวใจ นอกจากนี้ยังทด สอบการตอบคำถามจากการดูรายการโทรทัศน์ [79] แต่ในงานปฏิบัติงานระยะไกลนั้น ต้องผู้ปฏิบัติงานต้อง ตอบสนองกับข้อมูลที่เห็นจากหน้าจอ ดังนั้นระยะการมองที่ทำให้ผู้ปฏิบัติงานทำงานได้ประสิทธิภาพสูง ที่สุดอาจแตกต่างกับระยะการมองที่แนะนำในงานวิจัยที่ศึกษาการรับรู้ข้อมูลทางเดียว

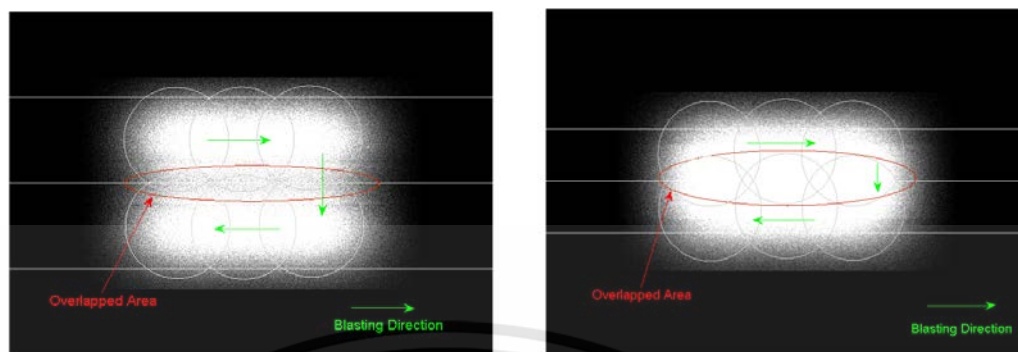
นอกจากระยะการมองแล้ว อีกหนึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่องานประเภทการควบคุมการเคลื่อนที่ไปตาม เส้นทาง (Steering Task or Translation Task) สำหรับงานพ่นทรายระยะไกลได้แก่ขนาดความกว้าง ของเส้นทาง (Path Width, PW) โดยในงานประเภท Steering Task ทั่วไปนั้น Accot and Zhai, (1997) ได้อธิบายกฎการเคลื่อนที่ในชื่อ Steering Law (สมการที่ 2.4) ซึ่งขนาดเส้นทางเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อ เวลาในการเคลื่อนที่ (Movement Time, MT) โดยขนาดเส้นทางที่กว้างขึ้นจะมีส่วนช่วยให้เวลาในการ เคลื่อนที่สั้นลง [29] ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลื่อนที่ (Movement Time) และ ความกว้างของเส้นทาง (Path Width)

$$MT = a + b \frac{D}{PW} \quad (2.4)$$

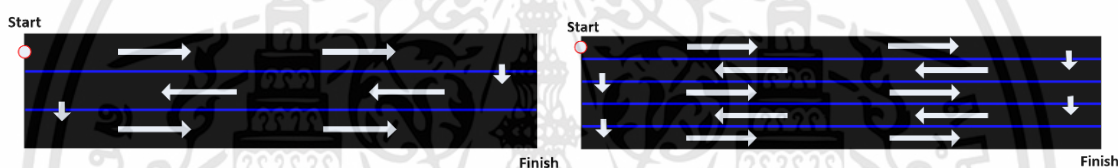
โดย a และ b คือ พารามิเตอร์ของกฎของฟิตต์และ D คือระยะทางในการเคลื่อนที่



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบพื้นที่ทับซ้อนของรอยฟันสำหรับ (ก) ความกว้างของเส้นทางที่ใหญ่เกินไป
(ข) ความกว้างของเส้นทางที่เหมาะสม



รูปที่ 2.11 ผลของความกว้างของเส้นทางที่มีต่อระยะเวลาในการปฏิบัติงานรวมบนขนาดพื้นที่คงที่
(ก) ความกว้างเส้นทางมากทำให้ระยะเวลาในการปฏิบัติงานรวมลดลง (ข) ความกว้างเส้นทางน้อยทำให้
ระยะเวลาในการปฏิบัติงานรวมเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม ในงานฟันทรายระยะไกลนั้นมีความแตกต่างจากงานบังคับการเคลื่อนที่ตามเส้นทางทั่วไปเนื่องจากในการฟันทรายไม่ต้องการเวลาในการเคลื่อนที่ที่เร็วที่สุดเพียงอย่างเดียว แต่ต้องการความสะดวกของพื้นผิวบนเส้นทางที่เดินหัวฟันด้วย ดังนั้น เวลาในการเคลื่อนที่ควรเป็นเวลาที่เหมาะสม และเนื่องจากลักษณะของรอยฟันนั้นมีความหนาแน่นตรงกลางรอยฟันและลดความหนาแน่นลงตามแนวเส้นรัศมี หากทำการฟัน ณ จุดเดิมไปเรื่อยๆ รอยฟันจะค่อยๆ ขยายใหญ่ขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นของวัสดุที่ตกกระทบรอบนอกของรอยฟันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ความหนาแน่นตรงกลางของรอยฟันจะเพิ่มขึ้นเยอะมากเช่นกันจนอาจเกิดความเสียหายกับพื้นผิวตรงบริเวณกลางรอยฟันมากกว่าส่วนอื่นๆ ดังนั้นหากกำหนดความกว้างของเส้นทางใหญ่มากจะทำให้ใช้เวลาในการปฏิบัติงานนานมาก อีกทั้งพื้นที่ทับซ้อนของรอยฟันบริเวณขอบเส้นทางอาจไม่สะดวกเท่าที่ควร (รูปที่ 2.10) ในขณะที่ หากกำหนดความกว้างของเส้นทางเล็กเกินไปจะเป็นการทำความสะดวกเกินออกไปนอกเส้นทางมากเกินไปทำให้สิ้นเปลืองวัสดุฟันและเป็นการเพิ่มระยะทางรวมในการฟันอีกด้วย (รูปที่ 2.11) ดังนั้นขนาดความกว้างของเส้นทางที่เหมาะสมที่ทำให้คุณภาพพื้นผิวดีที่สุดอาจทำการคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการ

กระจายตัวของรอยฟัน อย่างไรก็ตามการหาค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นในการปฏิบัติงานจริงนั้นเป็นไปได้ยาก อีกทั้งความไม่แน่นอนในการควบคุมหัวฟันของผู้ปฏิบัติงานอาจทำให้ค่าความกว้างของเส้นทางที่คำนวณได้ไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมในการใช้งานจริง ดังนั้นการหาค่าความกว้างของเส้นทางที่เหมาะสมนั้น ควรทำการทดลองเฉพาะสำหรับงานนั้นๆ เนื่องจากความแตกต่างของขนาดและลักษณะของรอยฟัน รวมถึงลักษณะพื้นผิวและวัสดุด้วย

2.3 การวิเคราะห์ความผันแปรด้านพิกัดในระบบปฏิบัติงานระยะไกล

แม้ว่าระบบปฏิบัติงานระยะไกลจะมีประโยชน์ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น การใช้ระบบปฏิบัติงานระยะไกลก็มีปัญหาที่ทำให้สมรรถนะในการปฏิบัติงานลดลง งานวิจัยที่ผ่านมาได้ระบุปัญหาของระบบปฏิบัติงานระยะไกลไว้หลายหัวข้อ เช่น มุมมองที่ของภาพที่ได้จากกล้องไม่ครอบคลุมสภาพแวดล้อมในการปฏิบัติงาน [82] สภาพแวดล้อมเสมือน [83] เวลาหน่วงในการรับส่งข้อมูล [9] และความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ [84] ความผิดพลาดในการควบคุมที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงาน [10] ซึ่งปัญหาเหล่านี้ทำให้เกิดความผันแปรของผลลัพธ์ของระบบ โดยคำจำกัดความของความผันแปรคือการที่ผลลัพธ์ของระบบเกิดความคลาดเคลื่อนไปจาก และความคลาดเคลื่อนนั้นจะไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา [85] ซึ่งจากคำจำกัดความนี้สามารถกล่าวได้ว่าความผันแปรนั้นประกอบไปด้วยความไม่แม่นยำ (Inaccuracy) และความไม่เที่ยงตรง (Imprecision)

จากการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ในระบบพ่นทรายระยะไกล ได้มีการใช้ดัชนีชี้วัดสมรรถนะ ได้แก่ พื้นผิวเสียหาย พื้นผิวไม่สะอาด และ เวลารวมในการเคลื่อนที่ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า ระบบนั้นมีความคลาดเคลื่อนทางด้านพิกัดของหัวฟันเกิดขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้พิกัดของหัวฟัน ไม่ตรงกับพิกัดเป้าหมาย สำหรับระบบพ่นทรายระยะไกลนั้น การควบคุมพิกัดคาร์ทีเซียนในระนาบสองมิติที่ขนานกับพื้นผิวของการเคลื่อนที่ของหัวฟันนั้นมีผลต่อคุณภาพของพื้นผิวโดยตรง ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น ประกอบด้วย ความไม่เที่ยงตรง และ ความไม่แม่นยำ ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงกำหนดให้ ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวในการควบคุมพิกัดคาร์ทีเซียนในระนาบสองมิติที่ขนานกับพื้นผิวของหัวฟันคือ ความผันแปรทางด้านพิกัดในระบบพ่นทรายระยะไกล อย่างไรก็ตาม จากการสังเกตการณ์ขณะทำการทดลองในการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ พบว่า ขอบเขตของระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา ไม่สามารถช่วยปรับปรุงให้ความผันแปรด้านพิกัดลดลงได้ หรืออาจกล่าวได้ว่า ปัจจัยที่ทำการศึกษา ไม่มีนัยสำคัญกับความผันแปรด้านพิกัด ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาความผันแปรด้านพิกัดเพิ่มเติม นอกเหนือจากการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์

สำหรับความผันแปรในระบบพันพรายระยะไกลนั้นมีแหล่งที่มาที่หลากหลาย โดยสามารถจำแนกได้ตามทฤษฎีการวิเคราะห์ความผันแปรแบบหลายสถานี (Multi-Stage Variation Analysis) [28] ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้เพื่อจำแนกแหล่งที่มาของความผันแปรที่สะสมในกระบวนการผลิตแบบอนุกรม [30][86][87][88][89][90] โดยความผันแปรของแต่ละสถานีในระบบนั้นสามารถอธิบายโดยใช้สมการของ [91] ดังแสดงในสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}_{k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}_k\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (2.5)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}_k\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2.6)$$

โดยเวกเตอร์ \mathbf{x}_k คือคุณลักษณะเชิงคุณภาพ (the key quality characteristic) ของผลิตภัณฑ์ ณ สถานี k . \mathbf{A}_{k-1} คือแมทริกซ์ของการแปลง (Transformation Matrix) ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ระบุค่าคุณลักษณะความผิดพลาด เช่น ความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของแขนมนุษย์หรือความผิดพลาดของอุปกรณ์ซึ่งก่อให้เกิดความเบี่ยงเบนจากค่าคาดหวัง (Expected Value) ในเวกเตอร์ \mathbf{x} จากสถานี $k-1$ สู่สถานี k . \mathbf{u}_k คือจุดอ้างอิงที่คาดหวัง (Expected Origin Point) ของสถานี k . \mathbf{B}_k คือพารามิเตอร์ที่อธิบายความผิดพลาดในการตั้งค่า (Calibration Error) \mathbf{w}_k คือค่าความผิดพลาดอื่นๆ. \mathbf{C}_k คือแมทริกซ์ของการแปลงที่แปลงค่าคุณลักษณะเชิงคุณภาพไปสู่แมทริกซ์ของหน่วยคุณภาพ \mathbf{y}_k และ \mathbf{v}_k คือสัญญาณรบกวนในการวัด (measurement noise)

การสะสมความผันแปร (Variation Propagation) จากสถานีหนึ่งไปยังสถานีถัดไปสามารถแสดงได้ดังนี้ ค่าคาดหวังของ \mathbf{x}_k สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.7

$$E[\mathbf{x}_k] = \mathbf{A}_{k-1}E[\mathbf{x}_{k-1}] + \mathbf{B}_kE[\mathbf{u}_k] \quad (2.7)$$

ค่าคาดหวังของ \mathbf{y}_k สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.8

$$E[\mathbf{y}_k] = \mathbf{C}_kE[\mathbf{x}_k] \quad (2.8)$$

โดยที่ \mathbf{w}_k และ \mathbf{v}_k มีการกระจายตัวแบบปกติและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ($N[0, \sigma]$)

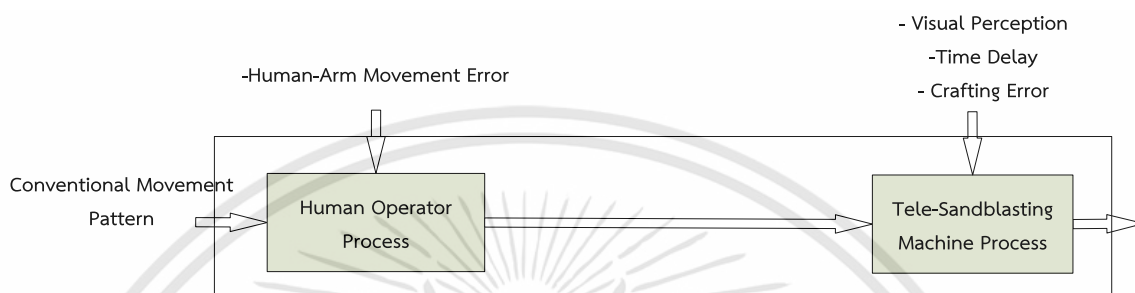
ความผันแปรในสถานีสามารถแสดงได้โดยโควาเรียนซ์ของ \mathbf{x}_k ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$Cov[\mathbf{x}_k] = \mathbf{A}_{k-1}\Sigma_{\mathbf{x}_{k-1}}\mathbf{A}_{k-1}' + \mathbf{B}_k\Sigma_{\mathbf{u}_k}\mathbf{B}_k' + 2\mathbf{A}_{k-1}Cov[\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_k]\mathbf{B}_k' + \Sigma_{\mathbf{w}_k} \quad (2.9)$$

โควาเรียนซ์ของ \mathbf{y}_k คือ

$$Cov[y_k] = C_k \Sigma_{x_k} C_k' + \Sigma_{v_k} \quad (2.10)$$

ในระบบพ่นทรายระยะไกลสามารถจำแนกสถานะตามส่วนประกอบในระบบได้เป็นสองสถานะคือ ผู้ปฏิบัติงานและเครื่องพ่นทรายระยะไกล ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แหล่งความผันแปรทางด้านพิกัดจำแนกตามสถานะ

จากรูปที่ 2.12 แหล่งที่มาของความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกลสามารถจำแนกตามสถานะได้ ดังนี้

1. ความผันแปรที่เกิดในสถานะผู้ปฏิบัติงาน ได้แก่ ความผิดพลาดที่เกิดจากการควบคุมของมนุษย์ [10]
2. ความผันแปรที่เกิดในสถานะเครื่องพ่นทรายระยะไกล ได้แก่ มุมมองบนหน้าจอที่จำกัดที่ทำให้เกิดความลำบากในการปฏิบัติงาน [8] เวลาหน่วงที่เกิดในระบบ [9] ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตหรือประกอบ [11][92]

งานวิจัยที่ผ่านมามีการนำเสนอวิธีลดความผันแปรมากมาย สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปงานวิจัยการลดความผันแปรในระบบปฏิบัติงานระยะไกล

			Sources of Variation													HE									
			Viewing Angle	Time-Delay						Crafting Error															
		Approach	Machine-vision-based teleoperator aid	Mobile Camera, Mobile Screen	Multiple Camera, Self-Arranged Information	Virtual Bird's-Eye View	Wave-Variable Transformation	time domain passivity approach (TDPA)	model-mediated teleoperation (MMT)	Smith predictor Controller	Lyapunov-Krasovskii Functional for PD Controller	Network and communication disturbance observer	Position synchronization and Encoding	Laser Tracking System for Calibration	External Mechanical Measurement Device for Calibration	Camera for Calibration	Minimizing Error Between Measured and Estimated Values	Calibration using Information from Robot- Joint Sensors	Ultrasonic Triangular Sensor	Limiting Joint Motion for Calibration	Hand-Eye Calibration	Positional Error Similarity for Error Compensation	Compensation of Error due to Scanning Process	Compressed Sensing for Calibration for Serial Robot	Reduction of Variation from Human Error in Horizontal Axis
No.	Reference	Year																							
30	Zhuang et al.	1999														✓									
31	Wampler et al.	1995															✓								
32	Zhuang	1997															✓								
33	Baron and Angeles	1998															✓								
34	Patel and Ehmann	2000															✓								
35	Du and Zhang	2013														✓	✓								
36	Marwan et al.	2017															✓	✓							
37	Filion et al.	2018														✓	✓								
38	Wang and Masory	1993																	✓						
39	Khalil and Besnard	1999																	✓						
40	Zhang	1998																		✓					
41	Motai and Kosaka	2008																		✓					
42	Tan	2015																						✓	
43	Zeng et al.	2016																				✓			
44	Barnfather and Abram	2018																					✓		
45	Liu and Zhang	2014																							✓

จากตารางที่ 2.3 วิธีการลดความผันแปรต่างๆสามารถจำแนกตามสถานีในระบบพ่นทรายระยะไกลได้ดังนี้

2.3.1 ความผันแปรในสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล

ความผันแปรจากเครื่องพ่นทรายระยะไกลนั้นเป็นแหล่งความผันแปรหนึ่งในระบบพ่นทรายระยะไกล เนื่องจากความแม่นยำและเที่ยงตรงในการเคลื่อนที่ของหัวพ่นนั้นมีผลกระทบต่อคุณภาพของผิวงาน ดังนั้นความผันแปรในการระบุพิกัดที่เกิดจากเครื่องพ่นทรายระยะไกลนั้นจึงเป็นสาเหตุสำคัญสาเหตุหนึ่งของความผันแปรโดยรวมในระบบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเพื่อแก้ปัญหาความผันแปรที่เกิดจากแหล่งความผันแปรในสถานีเครื่องฟันทรายระยะไกลดังนี้

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิธีแก้ปัญหาที่เป็นต้นเหตุของความผันแปรในระบบปฏิบัติงานระยะไกล โดย Hoff et al., (1991) นำเสนอการแก้ปัญหาหมมองของกล้องในขณะปฏิบัติงาน ซึ่งใช้วิธีที่มีชื่อว่า การช่วยเหลือการปฏิบัติงานระยะไกลบนพื้นฐานวิสัยทัศน์ของเครื่องจักร (Machine-vision-based teleoperator aid) ที่เป็นการใช้ข้อมูลจากกล้องเพื่อคำนวณท่าทางของวัตถุ (ตำแหน่งและทิศทาง) เมื่อวัตถุหรือจุดที่ต้องการเข้าถึงอยู่ในมุมมองสายตาของกล้อง ระบบจะสร้างภาพจำลองหรือข้อมูลตัวเลขแสดงบนหน้าจอแทนวัตถุจริง ซึ่งทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถประมาณการความลึกและทิศทางของวัตถุได้ในขณะที่วัตถุอยู่ในมุมมองสายตาของกล้อง[8] Diner (1994) นำเสนอระบบปฏิบัติงานระยะไกลที่มีจำนวนกล้องเท่ากับจำนวนหน้าจอแสดงผล โดยกล้องสามารถเคลื่อนที่ได้ขณะปฏิบัติงานเพื่อหามุมที่สามารถมองเห็นจุดที่ปฏิบัติงานได้ชัดเจน โดยหน้าจอแสดงผลจะเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของกล้องเพื่อเลียนแบบมุมมองจริงทำให้การมองเห็นจุดปฏิบัติงานสมจริงมากยิ่งขึ้น[12] Fukuda et al., (2000) นำเสนอวิธีการจัดการเรียงเรียงข้อมูลด้วยตัวเองของระบบในการใช้กล้องหลายตัวเพื่อเพิ่มมุมมองในพื้นที่ปฏิบัติงาน[93] Hara et al., (2014) นำเสนอวิธี Virtual bird's-eye view ซึ่งนำภาพที่ถ่ายไว้ก่อนหน้ามาซ้อนทับกันเพื่อให้เกิดภาพที่ไม่มีอุปสรรคกีดขวางสายตาผู้ควบคุมหรือเพื่อให้ทราบระยะระหว่างหุ่นยนต์กับอุปสรรค[13]

สำหรับปัญหาเวลาหน่วงในระบบ ส่วนใหญ่เกิดจากกระยะทางในการส่งข้อมูล ความเร็วในการส่งข้อมูล และคุณภาพของช่องทางการสื่อสาร โดยเฉพาะในระบบที่มีแรงตอบสนอง (Force Feedback) นั้น จะเกิดปัญหาด้านเสถียรภาพในระบบที่มีเวลาหน่วง โดยปริมาณของเวลาหน่วงอยู่ในช่วงตั้งแต่สิบ มิลลิวินาทีถึงหลายร้อยมิลลิวินาที โดยเวลาหน่วงเพียงเล็กน้อยนั้นสามารถก่อกำเนิดด้านเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบ ได้มีการนำเสนอวิธีการปรับปรุงเวลาหน่วงเช่น wave-variable transformation [14][15][16] time domain passivity approach (TDPA) [17][18][19] model-mediated teleoperation (MMT) [20][21][22] ระบบควบคุมแบบพยากรณ์โดยใช้ตัวพยากรณ์สมิท (Smith predictor) [9][95][96] การใช้ฟังก์ชัน Lyapunov-Krasovskii ภายใต้เวลาหน่วงสำหรับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์สัดส่วน (Proportional-derivative) [97][98][99] นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอวิธีอื่นๆ เช่น Natori, (2014) นำเสนอตัวชดเชย (Compensator) ที่ใช้แนวคิดการสังเกตการณ์สิ่งรบกวนในเครือข่ายและสิ่งรบกวนในการสื่อสาร (Network disturbance and communication disturbance

observer) สำหรับระบบปฏิบัติการระยะไกลภายใต้เวลาหน่วงที่ผันแปร โดยตัวชดเชยที่นำเสนอจะไม่พิจารณาตัวแบบเวลาหน่วง (Time-delay models) ทำให้วิธีนี้สามารถใช้ได้กับระบบควบคุมผ่านเครือข่ายที่ไม่ทราบเวลาหน่วงหรือมีเวลาหน่วงที่ผันแปรมาก โดยผู้แต่งได้แสดงผลลัพธ์ของวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากตัวพยากรณ์สมิทซ์[100] Chawda and O'Mally, (2015) นำเสนอวิธีการประสานตำแหน่ง (Position synchronization) ระหว่างอุปกรณ์ควบคุมหลักและอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามภายใต้เวลาหน่วงโดยใช้การเข้ารหัส (Encoding) ข้อมูลตำแหน่งและความเร็วและส่งเป็นสัญญาณเพื่อตรวจจับตำแหน่งขณะปฏิบัติงาน[101] Sun et al., (2016) นำเสนอวิธีควบคุม An innovative wave-based time-domain passivity approach ภายใต้เวลาหน่วงที่แปรผันในระบบสำหรับหุ่นยนต์สามแกน โดยวิธีดังกล่าวสามารถการันตีเสถียรภาพของระบบและทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น[94] จะเห็นได้ว่าการนำเสนอวิธีการปรับปรุงปัญหาเวลาหน่วงในระบบที่หลากหลายและสามารถช่วยให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างรวดเร็วทำให้การประมวลผลของคอมพิวเตอร์ ระบบส่งข้อมูลและการสื่อสารรวดเร็วขึ้นซึ่งจะช่วยลดปัญหาเวลาหน่วงในระบบลงได้ในอนาคตอันใกล้ อีกทั้งระบบพันทรายระยะไกลที่ทำการศึกษามีระบบแรงตอบสนองในระบบ ทำให้ผู้วิจัยไม่พิจารณาเวลาหน่วงเป็นสาเหตุของความผันแปรในระบบ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดผลกระทบของเวลาหน่วงต่อความผันแปรในระบบ ระบบพันทรายระยะไกลเสมือนที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้เวลาหน่วงในระบบมีค่าคงที่ ที่ 500 มิลลิวินาที

นอกจากนี้ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนขึ้นส่วนต่างๆของหุ่นยนต์ ทำให้ขนาดต่างๆของหุ่นยนต์เกิดความคลาดเคลื่อน ส่งผลต่อความแม่นยำในการระบุพิกัด ดังนั้นการปรับตั้งค่า (Calibration) จึงมีความจำเป็นเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนของหุ่นยนต์ [92] โดยการปรับตั้งค่าสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท ได้แก่ การปรับตั้งค่าจากภายนอก (External calibration) และการปรับตั้งค่าแบบอัตโนมัติ (Auto calibration) การปรับตั้งค่าจากภายนอกนั้นจะใช้เครื่องมือวัดจากภายนอกตัวหุ่นยนต์ช่วยในการเปรียบเทียบตำแหน่ง เช่นการใช้ระบบเลเซอร์ตรวจจับ (Laser tracking system) [102][103] อุปกรณ์ทางกล (Mechanical device) [104] ระบบกล้องตรวจวัด (Camera system) [105][106] การใช้อุปกรณ์ตรวจวัดจากภายนอกนั้น ทำให้สามารถวัดพิกัดของปลายแขนหุ่นยนต์หรือพิกัดของข้อต่อต่างๆ และปรับตั้งค่าโดยการปรับลด (Minimizing) ความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้และค่าที่ประมาณการได้ [107][108][109] ในขณะที่การปรับตั้งค่าแบบอัตโนมัติจะใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ที่ตรวจตำแหน่งบริเวณข้อต่อของหุ่นยนต์ [110][111][112][113] หรือใช้วิธีการจำกัดการเคลื่อนไหวของข้อต่อ [114][115] โดยการปรับตั้งค่าแบบอัตโนมัติมีความสะดวกสบายในการใช้งานมากกว่า เนื่องจากไม่ต้องการอุปกรณ์เสริมใน

การตรวจวัดค่าพิกัดของหุ่นยนต์ ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดภายนอกที่มีความแม่นยำสูงจะมีราคาที่สูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อไม่มีตัวตรวจวัดพิกัดจากภายนอกเพื่อเปรียบเทียบค่า ทำให้การปรับตั้งค่าแบบอัตโนมัติ นั้นเป็นไปได้ยากกว่าการปรับตั้งค่าจากภายนอก อีกทั้งมีการคำนวณที่ซับซ้อนและใช้เวลาค่อนข้างมาก [92]

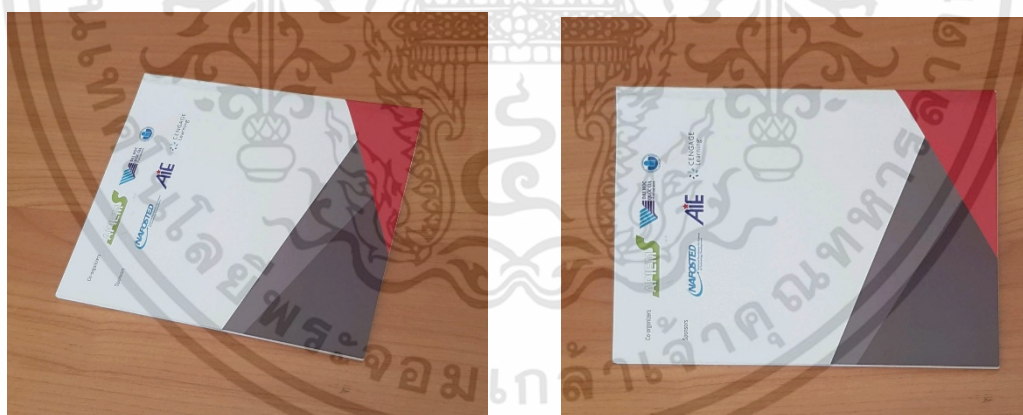
Zhang (1998) นำเสนอวิธีเชิงเส้นสำหรับปัญหาการปรับตั้งค่าแบบมือ-ตา (Hand-eye calibration) สำหรับหุ่นยนต์ประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (SCARA robot) เพื่อปรับปรุงความแม่นยำ [23] Du and Zhang (2013) นำเสนอวิธีการปรับตั้งค่าหุ่นยนต์ออนไลน์บนพื้นฐานวิสัยทัศน์ (Vision-based online robot calibration) ซึ่งอาศัยรูปภาพอ้างอิงในการปรับตั้งค่าเพื่อความแม่นยำ โดยหุ่นยนต์สามารถปรับตั้งค่าตัวเองแบบอัตโนมัติ ไม่ต้องมีการช่วยเหลือจากมนุษย์ในขั้นตอนการปรับตั้งค่า [24] Marwan et al. (2017) ได้ใช้หน่วยวัดความเฉื่อย (Inertial measurement unit, IMU) ในการวัดท่าทางของหุ่นยนต์ร่วมกับตัวตรวจจับอัลตราโซนิกแบบสามเหลี่ยม (Ultrasonic triangulation sensor) เพื่อเพิ่มความเร็วในการประมวลผลและลดภาระให้กับคอมพิวเตอร์ โดยเมื่อนำวิธีเหล่านี้มาใช้ร่วมกับการประมวลผลภาพในการปรับตั้งค่าหุ่นยนต์ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่รวดเร็วและแม่นยำ [26] Filion et al. (2018) นำเสนอการใช้ระบบการวัดระยะโดยใช้ภาพถ่ายแบบเคลื่อนที่ (Portable photogrammetry system) ในการปรับตั้งค่าหุ่นยนต์ โดยผู้แต่งได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการตั้งค่ากับระบบตั้งค่าด้วยเลเซอร์ ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน [27] Tan (2015) นำเสนอวิธีคอมเพรส เซนซิง (Compressed Sensing) หรือ CS เพื่อใช้ในการตั้งค่า (Calibration) เพื่อแก้ปัญหาความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต (Geometric Errors) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของปัญหาด้านความแม่นยำของตำแหน่งของหุ่นยนต์แขนกลแบบอนุกรม (Serial Robot Manipulator) [84] Zeng et al., (2016) นำเสนอวิธี Positional Error Similarity เพื่อการวิเคราะห์และการชดเชยความผิดพลาดด้านพิกัดของหุ่นยนต์ โดยสามารถลดความผิดพลาดได้มากที่สุดถึง 75.36% [25] Barnfather and Abram (2018) นำเสนอการจัดการข้อมูลเพื่อชดเชยความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เนื่องจากปัญหาสัญญาณรบกวนในขั้นตอนการสแกนข้อมูล [116] การปรับตั้งค่าเหล่านี้เป็นการปรับตั้งค่าของหุ่นยนต์ทกแกนหรือหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างในแบบที่พบได้มากในงานอุตสาหกรรม

สำหรับหุ่นยนต์ที่ใช้ในการศึกษา งานพ่นทรายระยะไกลนั้นต้องการความแม่นยำในระดับที่ไม่สูงมาก แต่ต้องการความรวดเร็วเนื่องจากระบบต้องการลดเวลาในการคำนวณเพื่อให้มีเวลาหน่วงในระบบน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม การคำนวณเพื่อชดเชยความผิดพลาดของหุ่นยนต์แบบขนานนั้น ยังมีความซับซ้อนและใช้เวลามาก [92] ดังนั้น ผู้วิจัยจึงต้องการวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการคำนวณและรวดเร็ว

สำหรับหุ่นยนต์สองมิติแบบขนานนั้นจะมีพื้นที่การทำงานในระนาบสองมิติซึ่งคล้ายคลึงกับรูปภาพซึ่งอุปกรณ์ที่มีขนาดชิ้นส่วนของอุปกรณ์ผิดเพี้ยนไปนั้นทำให้ขนาดและรูปร่างของพื้นที่การทำงานมีความผิดเพี้ยนตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.13 เปรียบได้กับรูปภาพที่วัตถุในรูปเสียสัดส่วนจากมุมกล้องและความโค้งของเลนส์ดังแสดงในรูปที่ 2.14(ก) โดยในทฤษฎีการประมวลผลภาพถ่าย (Image Processing) จะมีการใช้วิธีการแปลงสัมพรรค (Affine Transformation) เพื่อแก้ไขสัดส่วนของรูปถ่ายนั้นๆ ดังรูปที่ 2.14(ข) ดังนั้นผู้วิจัยจึงตั้งสมมติฐานว่า การแปลงสัมพรรคสามารถช่วยปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดของหุ่นยนต์ที่ขนาดของชิ้นส่วนมีความผิดเพี้ยนได้



รูปที่ 2.13 พื้นที่การทำงานที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากขนาดของชิ้นส่วนหุ่นยนต์ที่คลาดเคลื่อน



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายของวัตถุ (ก)วัตถุเสียสัดส่วนจริงเนื่องจากมุมกล้อง (ข) รูปถ่ายผ่านการแปลงสัมพรรคเพื่อแก้ไขสัดส่วนที่เสียหาย

การแปลงสัมพรรค (Affine Transformation) คือ การแปลงสัดส่วนแบบเชิงเส้น เป็นเทคนิคที่ใช้มากในการแก้สัดส่วนภาพถ่ายที่เสียไปเนื่องจากความโค้งของเลนส์หรือมุมกล้อง เช่นงานด้าน อิมเมจ รีจิส

เตรซัน(Image registration)[117] การแก้สัดส่วนของภาพ (Image distortion correction)[118] การชดเชยการเคลื่อนไหว(motion compensation)[119] การเคลื่อนย้าย ย่อ-ขยาย หมุนรูปภาพ (image translation scaling and rotation)[120] หรืองานด้านอาร์เอฟไอดี (RFID application)[121] ซึ่งเทคนิคนี้จะเปลี่ยนตำแหน่งจุด เส้น ระนาบบนรูปแต่ไม่มีการเสียหายกับจุดอื่นๆในรูปนั้น การแปลงสัมพรรคสามารถอธิบายได้ดังนี้

สมมติให้จุด $p = (p_x, p_y)$ ในระนาบ $x-y$ ถ้าต้องการจะกำหนดจุด a ลงบนระนาบ $x'-y'$ โดยจุดใหม่ที่กำหนดลงไปคือจุด $p' = (p'_x, p'_y)$ จุด a จะสามารถถูกกำหนดพิกัดลงบนระนาบ $x'-y'$ ได้ดังสมการที่ 2.11

$$p' = A \cdot p \quad (2.11)$$

โดยที่ A คือแมทริกซ์สัมพรรค สมการที่ 2.2 สามารถแสดงสมาชิกในแต่ละแมทริกซ์ได้ดังสมการ 2.12

$$\begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

โดยที่สมาชิก a_{11} a_{12} a_{21} และ a_{22} คือตัวแปรสำหรับการหมุนและการย่อ (rotation and scaling) ขยายจุด เส้น หรือระนาบ ขณะที่ตัวแปร a_{13} และ a_{23} นั้นใช้สำหรับการเคลื่อนย้าย (translation) โดยแมทริกซ์สัมพรรคสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.13

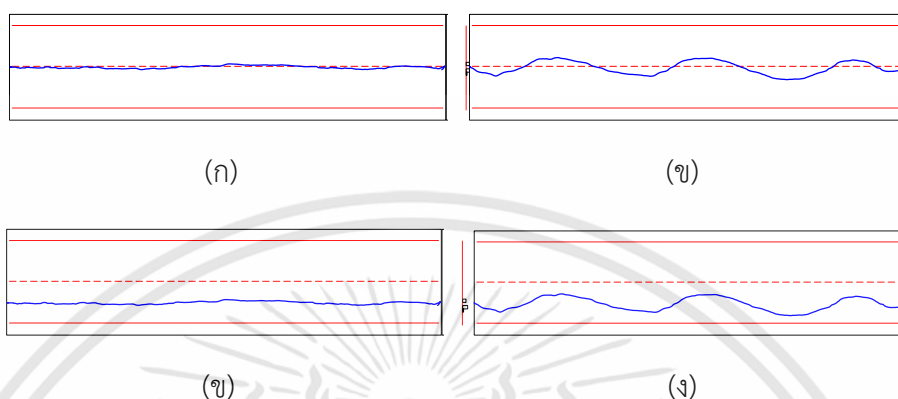
$$A = p' \cdot p^{-1} \quad (2.13)$$

เมื่อได้แมทริกซ์สัมพรรคแล้ว สามารถนำไปคูณกับพิกัดที่วัดได้ เพื่อปรับปรุงความแม่นยำของค่าพิกัดได้ ซึ่งใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว

นอกจากความผันแปรที่เกิดจากอุปกรณ์แล้วยังมีความผันแปรที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงานซึ่งเป็นแหล่งความผันแปรหลักในระบบที่ต้องพิจารณา

2.3.2 ความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงาน

สำหรับความผันแปรที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงานในระบบพันทรายระยะไกลนั้น มีสาเหตุจากความสามารถในการควบคุมกล้ามเนื้อแขนในการบังคับอุปกรณ์ควบคุมหลักที่แตกต่างกันของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานทุกคนมีลักษณะของความผิดพลาดในการควบคุมเป็นของตนเองจึงสร้างความผันแปรได้ไม่เหมือนกันในการปฏิบัติงานแต่ละครั้งและแตกต่างกันระหว่างบุคคล โดยความผันแปรจะเป็นการผสมกันของความไม่แม่นยำและความไม่เที่ยงตรง โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิดหลักๆ ดังรูปที่ 2.15



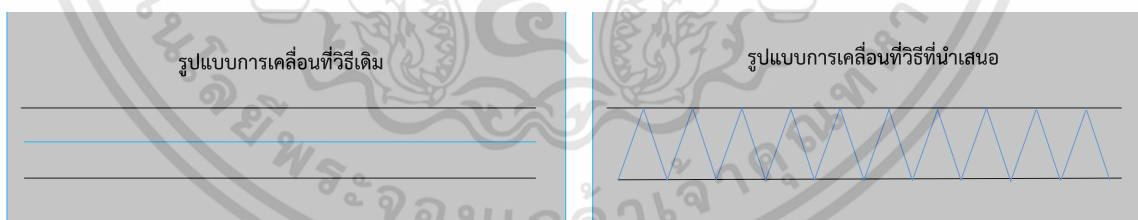
รูปที่ 2.15 ความผันแปรแบบต่างๆที่ประกอบด้วยความแม่นยำและความเที่ยงตรง (ก) ความแม่นยำสูงและความเที่ยงตรงสูง (ข) ความแม่นยำสูงและความเที่ยงตรงต่ำ (ค) ความแม่นยำต่ำและความเที่ยงตรงสูง (ง) ความแม่นยำต่ำและความเที่ยงตรงต่ำ

นอกจากความสามารถของผู้ปฏิบัติงานแต่ละคนจะแตกต่างกันแล้ว ความสามารถของผู้ปฏิบัติงานในการบังคับอุปกรณ์ควบคุมหลักในแต่ละทิศทางก็ยังคงแตกต่างกันออกไป ยกตัวอย่างเช่น การบังคับอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแนวแกน x (ทำมุม 0 องศา) และแนวแกน y (ทำมุม 90 องศา) นั้นมีความยากง่ายแตกต่างกัน โดยมีหลักฐานในงานวิจัยว่า โดยทั่วไปมนุษย์สามารถทำการควบคุมการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแนวแกน y ได้ดีกว่าแนวแกน x [122] อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแนวแกน x เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ที่พบได้มากในงานพนทรายระยะไกล ดังนั้นการลดความผันแปรในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนให้เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x จึงมีผลต่อการปรับปรุงสมรรถนะในงานพนทรายระยะไกล

แม้ว่าจะมีการแก้ปัญหาในด้านต่างๆมากมาย แต่โดยธรรมชาติของระบบปฏิบัติงานระยะไกลนั้นเป็นระบบที่ต้องการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ ดังนั้นความผิดพลาดที่เกิดในระบบเนื่องจากมนุษย์เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ Liu and Zhang, (2014) นำเสนอวิธีลดความผิดพลาดที่เกิดจากการควบคุมของมนุษย์สำหรับระบบปฏิบัติงานระยะไกลที่ใช้สำหรับงานเชื่อมโลหะ[10] โดยลักษณะของงานเชื่อมนั้น เป็นงานที่ต้องบังคับหัวเชื่อมให้เดินตามแนวรอยต่อเพื่อเชื่อมประสานรอยต่อนั้นๆ โดยรอยต่อนั้นทำหน้าที่เหมือนเส้นนำทางให้หัวเชื่อมทำให้ไม่มีปัญหาการบังคับหัวเชื่อมคลาดเคลื่อนออกจากรอยต่อ แต่ปัญหาความเร็วในการเดินหัวเชื่อมให้เหมาะสมและคงที่ตลอดเส้นทางจึงเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับงาน

เชื่อม ซึ่งผู้แต่งได้นำเสนอตัวแบบที่ใช้สำหรับวิเคราะห์คุณลักษณะของการตอบสนองของมนุษย์ในงานเชื่อมโลหะ และ ตัวแบบที่ใช้ช่วยในการควบคุมเพื่อลดความผันแปรด้านความเร็วในการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตาม ปัญหาการเคลื่อนที่ในงานพ่นทรายระยะไกลนั้นแตกต่างออกไป เพราะไม่มีแนวรอยต่อให้เดินตาม แต่เป็นพื้นผิวเรียบและไม่มีเส้นทางทำให้ปัญหาการควบคุมพิกัดหัวพ่นคลาดเคลื่อนออกจากเส้นทางที่คาดหวัง ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนทางด้านพิกัดคนละแนวแกนกับงานเชื่อม ความคลาดเคลื่อนนี้ก่อให้เกิดปัญหาคุณภาพพื้นผิว โดยปัญหานี้ยังไม่ได้รับการแก้ไขมาก่อน

สำหรับการปรับปรุงการควบคุมพิกัดของผู้ปฏิบัติงานนั้น ผู้วิจัยได้แนวคิดจากงานวิจัยทางด้านสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งผู้วิจัยสังเกตเห็นประโยชน์ของการนำรูปแบบของสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (คลื่นปลายแหลม) มาใช้เป็นรูปแบบในการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงาน กล่าวคือ การเคลื่อนที่ในรูปแบบเดิม (เป็นเส้นตรง) ไปตามเส้นทางที่กำหนดให้ นั้น ผู้ปฏิบัติงานคาดเดาพิกัดเป้าหมาย (กึ่งกลางเส้นทางได้ยาก) และ บังคับให้เส้นพิกัดเป็นเส้นตรงได้ยากเช่นกัน ซึ่งทั้งสองปัญหานี้ทำให้เส้นพิกัดมีความไม่แม่นยำและไม่เที่ยงตรง ในขณะที่การเคลื่อนที่แบบคลื่นปลายแหลมนั้นผู้ปฏิบัติงานไม่ต้องคาดเดาจุดกึ่งกลางของเส้นทางแต่ประมาณการขอบเส้นทางทั้งสองฝั่งเพื่อสร้างคลื่นปลายแหลมไปตามเส้นทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงานนั้นจะทำให้คลื่นปลายแหลมมีขนาดที่แตกต่างกัน แต่เส้นพิกัดแบบคลื่นปลายแหลมจะตัดผ่านจุดกึ่งกลางของเส้นทางอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ข้อมูลพิกัดมีความถี่สูงที่บริเวณใกล้เคียงกับกึ่งกลางของเส้นทางซึ่งเป็นพิกัดเป้าหมาย ซึ่งเป็นการกัญหาความแม่นยำ จากนั้นจึงใช้เครื่องมือที่ใช้ในการลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าเพื่อแปลงรูปแบบกลับมาให้เป็นเส้นตรงราบเรียบ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาความเที่ยงตรง



รูปที่ 2.16 รูปแบบการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงาน

ในการกรองสัญญาณรบกวน มีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงดังนี้ ประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์และเวลาในการประมวลผล การสูญเสียข้อมูลบางส่วนเพื่อให้สามารถลดสัญญาณรบกวนลงได้มากขึ้น ลักษณะของสัญญาณรบกวน ตัวกรองสัญญาณรบกวนนั้นมีมากมาย ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ตัวกรองคาลมาน (Kalman filter)[123] ซึ่งเป็นตัวกรองที่ใช้กันแพร่หลาย [124][125][126] เนื่องจากเป็นตัวกรองที่ไม่ต้องการประสิทธิภาพคอมพิวเตอร์ที่สูงมาก มีคามแม่นยำสูง ความซับซ้อนในการคำนวณต่ำ ไม่เปลือง

พื้นที่ในเก็บข้อมูลย้อนหลัง และบอกถึงคุณภาพในการประมาณการ (ความผันแปรของการประมาณการ) [127]

หลักการการทำงานของตัวกรองคาลมานั้นจะแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือขั้นตอนการพยากรณ์ (Prediction) และการปรับปรุง (Update) โดยในขั้นตอนการพยากรณ์ จะอ้างอิงจากค่าที่ผ่านมาในอดีต จากนั้นจะทำการปรับปรุงผลลัพธ์ โดยการปรับปรุงจะขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดและผลลัพธ์ที่ได้จากการพยากรณ์ ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของตัวกรองคาลมานแสดงในสมการที่ 2.14 และ 2.15

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{D}\mathbf{y}_{t-1} + \mathbf{E}_t\mathbf{s}_t + \mathbf{q}_t \quad (2.14)$$

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{F}\mathbf{y}_t + \mathbf{r}_t \quad (2.15)$$

โดย \mathbf{y}_t คือเวกเตอร์ของพิกัดของหัวพันทราย ณ เวลา t , \mathbf{D}_t คือแมทริกซ์ของการแปลงสถานะจากเวลาที่ $t-1$ ไปสู่เวลา t , \mathbf{E}_t คือแมทริกซ์ควบคุมของอินพุท, \mathbf{s}_t คือเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ควบคุมของอินพุท, \mathbf{q}_t คือเวกเตอร์ของสิ่งรบกวนในระบบ, \mathbf{z}_t คือแมทริกซ์ของผลลัพธ์ที่ได้จากการวัด, \mathbf{F}_t คือแมทริกซ์ของการแปลงผลลัพธ์ของระบบให้อยู่ในโดเมนการวัด, \mathbf{r}_t คือเวกเตอร์ของสิ่งรบกวนในการวัด

ในทางปฏิบัติ ตัวกรองคาลมานนั้นจะเริ่มทำงานโดยการพยากรณ์ สมการของการพยากรณ์นั้นแสดงในสมการที่ 2.16

$$\hat{\mathbf{y}}_t = \mathbf{D}_t\hat{\mathbf{y}}_{t-1} + \mathbf{E}_t\mathbf{s}_t \quad (2.16)$$

โดย $\hat{\mathbf{y}}_t$ คือค่าพยากรณ์ของสถานะ ณ เวลา t จากนั้นค่าความเชื่อมั่นในการพยากรณ์, \mathbf{P}_k , สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{D}\mathbf{P}_{t-1}\mathbf{D}^T + \mathbf{Q} \quad (2.17)$$

เมื่อ \mathbf{Q} คือแมทริกซ์ของโควาเรียนซ์ของสิ่งรบกวนในระบบซึ่งอยู่บนสมมติฐานว่ามีการกระจายตัวแบบปกติและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ หลังจากทำการพยากรณ์แล้ว จะทำการปรับปรุงสถานะโดยใช้สมการที่ 2.18, 2.18 และ 2.19

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t\mathbf{F}^T(\mathbf{F}\mathbf{P}_t\mathbf{F}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (2.18)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_t = \hat{\mathbf{y}}_t + \mathbf{K}_t(\mathbf{z}_t - \mathbf{F}\hat{\mathbf{y}}_t) \quad (2.18)$$

$$P_t = (I - K_t F) P_t \quad (2.19)$$

เมื่อ K_t คือตัวขยายคาลมาน (Kalman gain) เพื่อใช้ในการปรับปรุงสถานะ และ R คือเมทริกซ์ของโควาริเียนซ์ของสิ่งรบกวนในการวัดซึ่งอยู่บนสมมติฐานว่ามีการกระจายตัวแบบปกติและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์

2.4 หมายเหตุ

ระบบปฏิบัติงานระยะไกลนั้นมีประโยชน์ในการช่วยลดข้อจำกัดให้งานต่างๆที่ไม่สามารถทำได้หรือมีความเสี่ยงในอดีตให้สามารถเป็นไปได้ การนำระบบปฏิบัติงานระยะไกลมาทำงานร่วมกับระบบพันทราชนั้น ช่วยให้งานทำความสะอาดและบำรุงรักษาโครงสร้างขนาดใหญ่มีความสะดวก รวดเร็ว และปลอดภัยมากขึ้นสำหรับผู้ปฏิบัติงาน หลังจากได้มีการนำเสนอระบบพันทราชนระยะไกลในปี 2001 [1] ได้มีการศึกษาพัฒนาระบบพันทราชนระยะไกลอยู่บ้าง [44] โดยผู้วิจัยสังเกตเห็นประโยชน์ของระบบพันทราชนระยะไกลที่จะสามารถเข้ามามีบทบาทในการซ่อมบำรุงทำความสะอาดโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีอยู่มากในประเทศไทย โดยเฉพาะในเขตเมืองหรือเขตอุตสาหกรรม จึงทำการศึกษาและปรับปรุงระบบ

อย่างไรก็ตาม การศึกษาทำความเข้าใจระบบพันทราชนระยะไกล โดยเฉพาะการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และเครื่องพันทราชนระยะไกลที่มีผลกระทบต่อคุณภาพผิวซึ่งเป็นผลลัพธ์ของระบบ ยังไม่มีการนำเสนอมาก่อน นอกจากนี้ความผันแปรทางด้านพิกัดในการควบคุมเครื่องพันทราชนระยะไกลนั้นเป็นปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนและเวลาการปฏิบัติงานนับเป็นอีกหนึ่งปัญหาหลักของระบบพันทราชนระยะไกล และระบบที่คล้ายคลึงกันที่ต้องการความเที่ยงตรงและแม่นยำของมนุษย์ในการควบคุมพิกัด

บทที่ 3

การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ในระบบพันทราຍ ระยะไกล

วัตถุประสงค์ของบทนี้คือการศึกษาระบบที่มึผลต่อความผันแปรในผลลัพธ์ของระบบ (พื้นผิวหลังการพัน) และกำหนดระดับปัจจัยเพื่อลดความผันแปรในระบบ โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ในระบบพันทราຍระยะไกล การศึกษาจะมุ่งเน้นที่ปัจจัยที่มีผลต่อการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงาน ณ จุดที่ควบคุมหุ่นยนต์หรือเครื่องพันทราຍระยะไกล ซึ่งผลลัพธ์ของระบบจะเป็นดัชนีชี้วัดสมรรถนะที่บ่งชี้คุณภาพพื้นผิวและเวลารวมในการเคลื่อนที่

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ โดยการทดลองจะกำหนดปัจจัยที่ต้องการศึกษาสองปัจจัยได้แก่ความกว้างของเส้นทางและระยะการมอง ปัจจัยละสองระดับ รวมเป็นสี่ทรีทเมนต์ ผู้เข้าร่วมการทดลองจะทำการปฏิบัติงานโดยใช้ระดับปัจจัยทั้งสี่ทรีทเมนต์ ซึ่งจะใช้ระบบพันทราຍระยะไกลเสมือนที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทำการศึกษาในห้องทดลอง และเก็บข้อมูลผลลัพธ์ของระบบมาใช้คำนวณดัชนีชี้วัดสมรรถนะ และวิเคราะห์ผลการทดลอง

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าข้อมูลที่นำเสนอในบทนี้จะเป็นข้อมูลเฉพาะของระบบที่ใช้ทำการศึกษาในห้องทดลอง ทำให้ตัวเลขที่ได้ในผลการทดลองไม่สามารถนำไปใช้กับระบบอื่นๆได้โดยตรง แต่วิธีการที่นำเสนอ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่นๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับรายละเอียดของการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ในระบบพันทราຍระยะไกล มีดังนี้

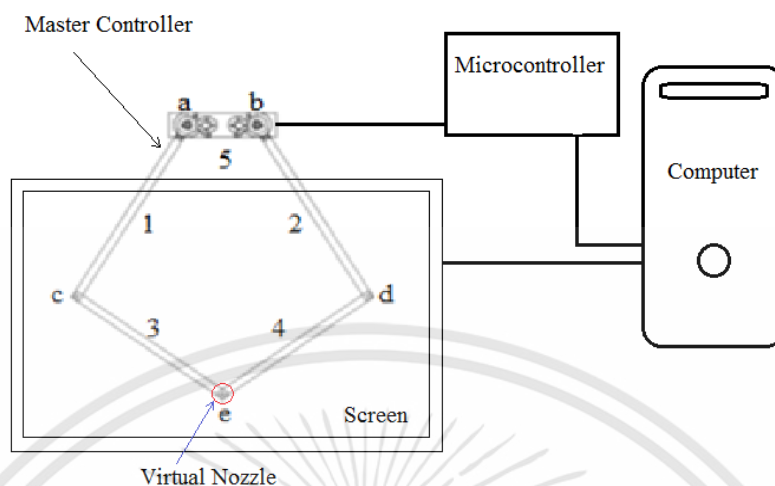
1. ระบบพันทราຍระยะไกลเสมือน ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ทำการศึกษา
2. ดัชนีชี้วัดสมรรถนะสำหรับงานพันทราຍระยะไกล
3. ปัจจัยที่ทำการศึกษา
4. รายละเอียดการทดลอง
5. ผลการทดลอง
6. สรุป

3.1 ระบบพ่นทรายระยะไกลเสมือน

ในการศึกษาระบบพ่นทรายระยะไกลนั้น จำเป็นต้องมีการสร้างระบบขึ้นมาในห้องทดลอง เนื่องจากการนำระบบพ่นทรายจริงในห้องทดลองต้องการพื้นที่มาก ต้องมีระบบป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นจากการพ่น และราคาอุปกรณ์ต่างๆที่ค่อนข้างสูง ผู้วิจัยจึงทำการสร้างระบบเสมือนเพื่อใช้ในการศึกษา โดยรายละเอียดของระบบเสมือนมีดังนี้

การจำลองและระบบเสมือนได้ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการออกแบบและแก้ปัญหาในระบบการผลิตมาเป็นระยะเวลา [128] เนื่องจากความยืดหยุ่นและประหยัดงบประมาณ แม้ว่าระบบเสมือนจะมีข้อจำกัดในการทำงานเนื่องจากการยากที่จะสร้างระบบเสมือนที่มีข้อมูลมากพอที่จะสะท้อนระบบจริงได้อย่างครบถ้วน จากประโยชนดังกล่าว ระบบเสมือนได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับมนุษย์-คอมพิวเตอร์ ผู้วิจัยจึงได้สร้างระบบพ่นทรายระยะไกลเสมือนเพื่อใช้ในการศึกษา ประเมิน และออกแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ ระบบพ่นทรายระยะไกลเสมือนประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วน (รูปที่ 2.1) ได้แก่ อุปกรณ์จริงและอุปกรณ์เสมือน

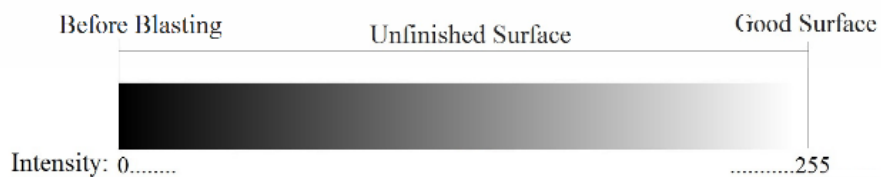
3.1.1 อุปกรณ์จริง (Real component) ประกอบด้วย อุปกรณ์ควบคุมหลักและหน้าจอแสดงผล อุปกรณ์ควบคุมหลักถูกออกแบบให้เป็นหุ่นยนต์แบบขนานซึ่งเคลื่อนที่ในระนาบสองมิติ หุ่นยนต์ประกอบด้วย 5 ลิงค์ (link) ได้แก่ลิงค์ 1, 2, 3, 4 และ 5 และ 5 ข้อต่อ (joint) ได้แก่ข้อต่อ a, b, c, d และ e ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จุดปลายของหุ่นยนต์คือจุด e เป็นจุดที่มีปฏิสัมพันธ์กับผู้ปฏิบัติงานเพื่อควบคุมหัวพ่นทราย เมื่อจุด e เคลื่อนที่ จะทำให้เอนโคดเดอร์ (encoder) ที่จุด a และ b เคลื่อนที่ คอมพิวเตอร์จะคำนวณตำแหน่งของจุด e จากตำแหน่งเอนโคดเดอร์ทั้งสองตัวที่เปลี่ยนไป จากนั้นตำแหน่งที่คำนวณได้จะถูกส่งไปยังอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเคลื่อนที่



รูปที่ 3.1 หุ่นยนต์แบบขนาน

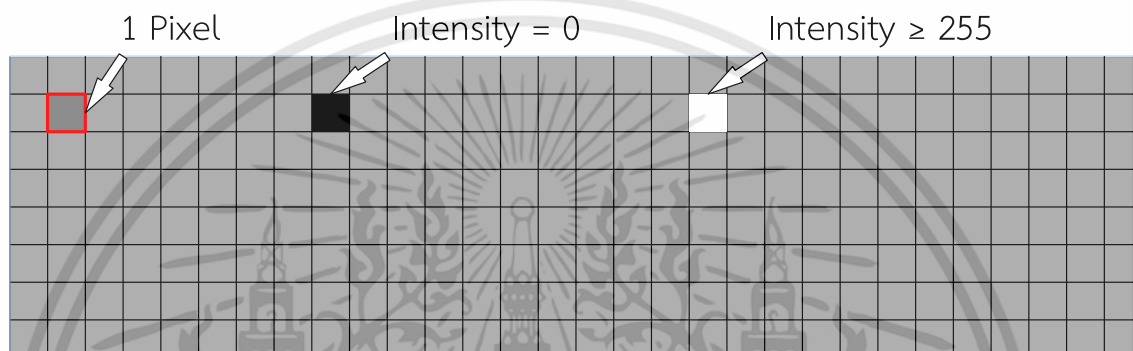
3.1.2 อุปกรณ์เสมือน (Virtual component) ประกอบไปด้วยหัวพ่นทรายที่ติดตั้งอยู่กับหุ่นยนต์แขนกล นอกจากนี้ยังประกอบด้วยกล้องที่คอยส่งภาพสภาพแวดล้อมของที่ปฏิบัติงานให้ผู้ปฏิบัติงานเพื่อเป็นข้อมูลในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลัก (รูป 2.1) ตำแหน่งในการติดตั้งกล้องมีผลต่อมุมมองและจุดอับสายตาและความผิดพลาดของสัดส่วนของวัตถุในภาพ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้แต่งสมมติให้ไม่มีความผิดพลาดของสัดส่วนของวัตถุและสมมติให้ตัวหุ่นยนต์เป็นวัตถุใส ไม่บดบังการมองเห็นของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้น ที่หน้าจอปฏิบัติงานจะปรากฏเพียงพื้นผิวที่จะทำการพ่นและหัวพ่นทรายซึ่งแทนด้วยจุดวงกลม แม้ว่าหุ่นยนต์จะไม่ได้ถูกแสดงในจอ แต่การเคลื่อนที่ของหัวพ่นทรายจะถูกคำนวณเหมือนเป็นการเคลื่อนที่ของจุดปลายแขนกล

ข้อมูลที่แสดงทางหน้าจอแสดงผลทั้งหมด (พื้นผิว หัวพ่น และวัสดุที่ใช้พ่น) ถูกสร้างโดยใช้เทคนิคทางการประมวลผลภาพ (image processing) ซึ่งระบบภาพที่ใช้อยู่บนพื้นฐานระบบสี 8 บิต เกรย์สเกล (8-bit grayscale) หรือระบบสีขาวดำ โดยค่าความเข้มของแสงของระบบสีขาวดำมีค่าอยู่ระหว่าง 0-255 โดยที่ 0 แทนความเข้มแสงสูงสุด (สีดำ) และ 255 แทนความเข้มแสงน้อยสุด (สีขาว) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งระดับความเข้มแสงจะถูกใช้แทนสภาพพื้นผิวและวัสดุที่ใช้ทำการพ่น

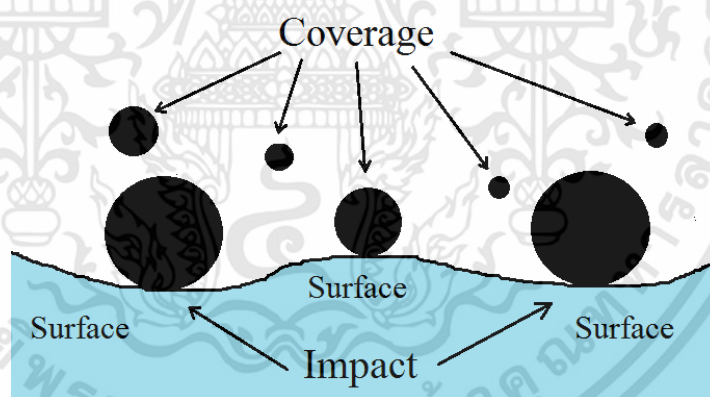


รูปที่ 3.2 แถบแสดงความเข้มแสงของระบบสี 8 บิต เกรย์สเกล (8-bit grayscale)

พื้นผิวที่ทำการพ่นจะมีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยในพื้นที่นั้นจะประกอบไปด้วยพิกเซลเล็กๆที่ถูกใช้เป็นพื้นที่ย่อยเพื่อใช้สำหรับประเมินความสม่ำเสมอของคุณภาพของพื้นผิวทั่วทั้งพื้นที่ โดยแต่ละพิกเซลบนหน้าจอแสดงผลจะมีค่าความเข้มแสงของตนเอง ซึ่งสามารถเก็บค่าความเข้มแสงที่เป็นค่าไม่ติดลบ (ศูนย์หรือมากกว่า) โดยค่าเหล่านี้จะแสดงระดับความเข้มแสงออกทางหน้าจอแสดงผล ซึ่งค่าที่สว่างที่สุดคือ 255 ถ้าค่าความเข้มแสงเกินกว่านี้ จะแสดงความเข้มแสงทางหน้าจออยู่ที่ระดับ 255 เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 พิกเซลบนพื้นผิวเสมือนที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ย่อย



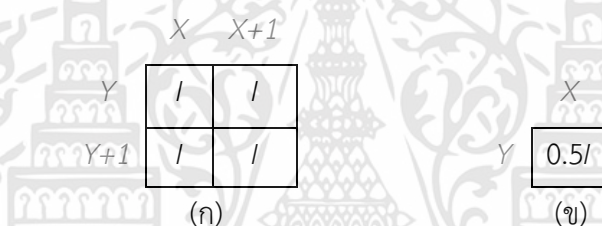
รูปที่ 3.4 โอเปอเรตติ้ง มิกซ์ (operating mix) ของลูกโลหะ (steel shot) ประกอบไปด้วยอิมแพค (impact) และคัฟเวอเรจ (coverage)

การจำลองกระบวนการพ่นทราย สำหรับการพ่นทรายจริงเพื่อทำความสะอาดโครงสร้างที่เป็นโลหะวัสดุที่ใช้พ่นจะเป็นลูกโลหะทรงกลม (steel shot) ที่มีความแข็งประมาณ 40-51 ร็อกเวลสเกลซี (HRC) มีขนาดตั้งแต่ 0.18 มม. ถึง 2.8 มม.[7] โดยวัสดุที่ใช้ในการพ่นจะมีลูกโลหะหลายขนาดผสมกันเรียกว่าโอเปอเรตติ้ง มิกซ์ (operating mix) เป็นการผสมกันของลูกโลหะใหม่เรียกว่าอิมแพค (impact) และลูกโลหะแตกที่ผ่านการใช้งานเรียกว่าคัฟเวอเรจ (coverage) โดยอิมแพคจะทำหน้าที่กำจัดชิ้นส่วนขนาดใหญ่ที่ติด

บนพื้นผิวและคัพเวอเรจจะกำจัดชิ้นส่วนขนาดเล็กที่หลงเหลือบนพื้นผิว เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนและลดเวลาในการพ่น ช่วยให้พื้นผิวสะอาดได้รวดเร็วขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.4 สัดส่วนในการผสมโอเปอเรตติ้งมิกซ์ จะขึ้นอยู่กับขนาดของอิมแพค ลักษณะของงาน คุณภาพผิวที่ต้องการและแรงดันลมที่ใช้พ่น

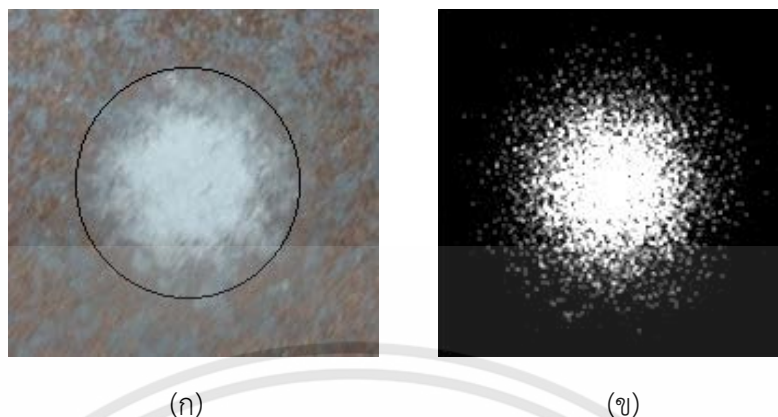
สำหรับพื้นผิวที่ทำการพ่นจะถูกปกคลุมไปด้วยสิ่งสกปรกที่ไม่ต้องการเช่น คราบสีเก่า สนิม ซึ่งในระบบเสมือนนั้น พื้นผิวที่ถูกปกคลุมด้วยสิ่งสกปรกถูกสมมติให้รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ประกอบไปด้วยพิกเซลหลายพิกเซลเรียงต่อกัน โดยค่าความเข้มแสงในแต่ละพิกเซลจะถูกกำหนดให้มีค่าความเข้มแสงสูงสุด (0) และขนาดของลูกโลหะที่ใช้เป็นวัสดุพ่นจะแทนด้วยอาร์เรย์ของพิกเซลขนาด $n \times n$ และค่าความเข้มแสงในอาร์เรย์จะมีค่าตามขนาดของลูกโลหะและความแรงในการพ่นดังรูปที่ 3.5 (I คือค่าความเข้มแสง)

รูปที่ 3.5(ก) แสดงตัวอย่างอาร์เรย์ของค่าความเข้มแสงที่ใช้แทนของลูกโลหะในระบบเสมือนโดยมีขนาด 2×2 และมีค่าความเข้มแสงเท่ากับ I ใช้เป็นตัวแทนอิมแพค และรูปที่ 3.5(ข) คืออาร์เรย์ที่ใช้แทนคัพเวอเรจ โดยมีขนาด 1×1 และค่าความเข้มแสงเป็นครึ่งหนึ่งของอิมแพค ($0.5I$)



รูปที่ 3.5 อาร์เรย์ที่เป็นตัวแทนลูกโลหะเสมือน (ก) ขนาด 2×2 พิกเซล มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ I (ข) ขนาด 1×1 พิกเซล มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ $0.5I$

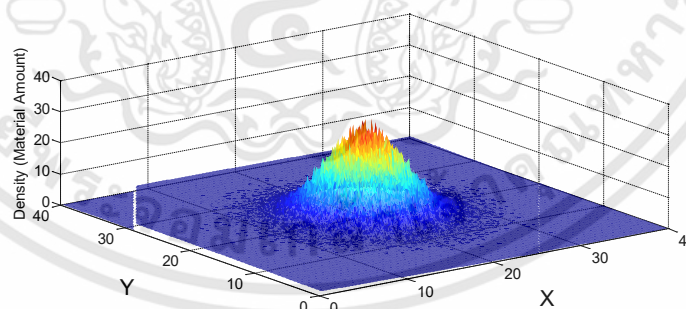
ในระบบเสมือน เมื่อทำการพ่น ลูกโลหะเสมือนจะถูกพ่นไปกระทบพื้นผิว พื้นผิว ณ จุดนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าความเข้มแสงของลูกโลหะที่กำหนด เช่น ก่อนทำการพ่น พื้นผิว ณ จุด (x_1, y_1) มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ 0 เมื่อทำการพ่น มีลูกโลหะดังรูปที่ 3.5 (ข) ไปตกรกระทบ ณ จุด (x_1, y_1) ทำให้ค่าความเข้มแสง ณ จุดนั้นมีค่าเปลี่ยนจาก 0 เป็น $0+0.5I$ และถ้ามีลูกโลหะขนาดเดียวกันมากระทบที่จุดเดิม ค่าความเข้มแสงจะถูกบวกเพิ่มจาก $0.5I$ เป็น $0.5I+0.5I$ ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อความเข้มแสง ณ จุดนั้นมีค่า 255 หมายความว่าสิ่งสกปรก ณ จุดนั้นได้ถูกกำจัดจนหมด หลังจากนั้นถ้ามีลูกโลหะมากระทบที่จุดนั้น ค่าความเข้มแสงในพิกเซลจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆซึ่งหมายถึง พื้นผิวจะเริ่มเกิดการเสียหาย



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบรอยพ่น (ก) รอยพ่นจริง (ข) รอยพ่นเสมือน

ในการพ่นจริง เมื่อทำการพ่น (กรณีไม่มีการเคลื่อนที่ของหัวพ่น และหัวพ่นตั้งฉากกับพื้นผิว) ลูกโลหะจะพุ่งออกมากระทบกับพื้นผิวทำให้เกิดเกิดการสะสมของของการกระทบของลูกโลหะก่อเป็นรอยพ่น (blasting spot) ลักษณะใกล้เคียงดังรูปที่ 3.6(ก)

เมื่อทำการพ่นโดยไม่มีการเคลื่อนที่ของหัวพ่นและหัวพ่นตั้งฉากกับพื้นผิว ลูกโลหะเสมือนจะถูกพ่นออกมากระทบกับพื้นผิวโดยรอบ สะสมกันในช่วงเวลาหนึ่งๆ เกิดการสะสมของความเข้มแสงจนเกิดเป็นรอยพ่นจะกระจายเป็นวงอยู่ในกรอบขนาด $m \times m$ พิกเซล มีรัศมีประมาณ $\frac{m}{2}$ ดังรูปที่ 3.6 (ข) ซึ่งลักษณะของรอยพ่นจะมีความหนาแน่นของวัสดุพ่น(ลูกโลหะ)มากบริเวณตรงกลางรอยพ่นและหนาแน่นน้อยลงตามแนวเส้นรัศมีออกสู่ขอบวงของรอยพ่น ซึ่งความหนาแน่นของรอยพ่นมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ (Achtsnick et al., 2005, Momber, 2008) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะความหนาแน่นของวัสดุพ่นที่ได้จากการจำลองรอยพ่น

ในกระบวนการพ่นของระบบเสมือน ระบบจะทำการสร้างรอยพ่นลงบนอาร์เรย์ขนาด $m \times m$ ดังรูปที่ 3.6 (ข) ก่อน (ค่าตัวเลขในอาร์เรย์หนึ่งช่องจะแทนค่าความเข้มแสงของหนึ่งพิกเซล) จากนั้นจะนำค่าความเข้มแสงของรอยพ่นไปเพิ่มลงบนพื้นผิวโดยที่จุดศูนย์กลางของรอยพ่นอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันกับหัว

พ่น การสร้างรอยพ่นนั้น จะใช้การสุ่มเลือกตำแหน่งบนอาร์เรย์ที่ลูกโลหะจะตกกระทบ และจะสุ่มเลือกขนาดของลูกโลหะ จากนั้นจะเพิ่มความเข้มแสงของลูกโลหะนั้นๆลงบนตำแหน่งในอาร์เรย์ที่สุ่มได้ โดยการสุ่มเลือกตำแหน่งบนอาร์เรย์จะใช้การสุ่มของการกระจายแบบปรกติสองตัวแปร (bivariate normal distribution) โดยใช้สมการการแปลงของบ็อกซ์-มุลเลอร์ (Box-Muller transformation) ดังแสดงในสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$S_x = \sqrt{-2\ln(R_1)} \cdot \cos(2\pi R_2) \quad (3.1)$$

$$S_y = \sqrt{-2\ln(R_3)} \cdot \cos(2\pi R_4) \quad (3.2)$$

โดย S_x และ S_y คือตำแหน่งบนอาร์เรย์ที่ลูกโลหะตกกระทบ R_1 R_2 R_3 และ R_4 คือตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบยูนิฟอร์ม

นอกจากนี้การกำหนดสัดส่วนของโอเปอเรตติ้ง มิกซ์ จะใช้การสร้างตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบยูนิฟอร์มโดยมีขั้นตอนดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1: การกำหนดขนาดของลูกโลหะตามสัดส่วนของโอเปอเรตติ้งมิกซ์

If ($R_m < k$) Then

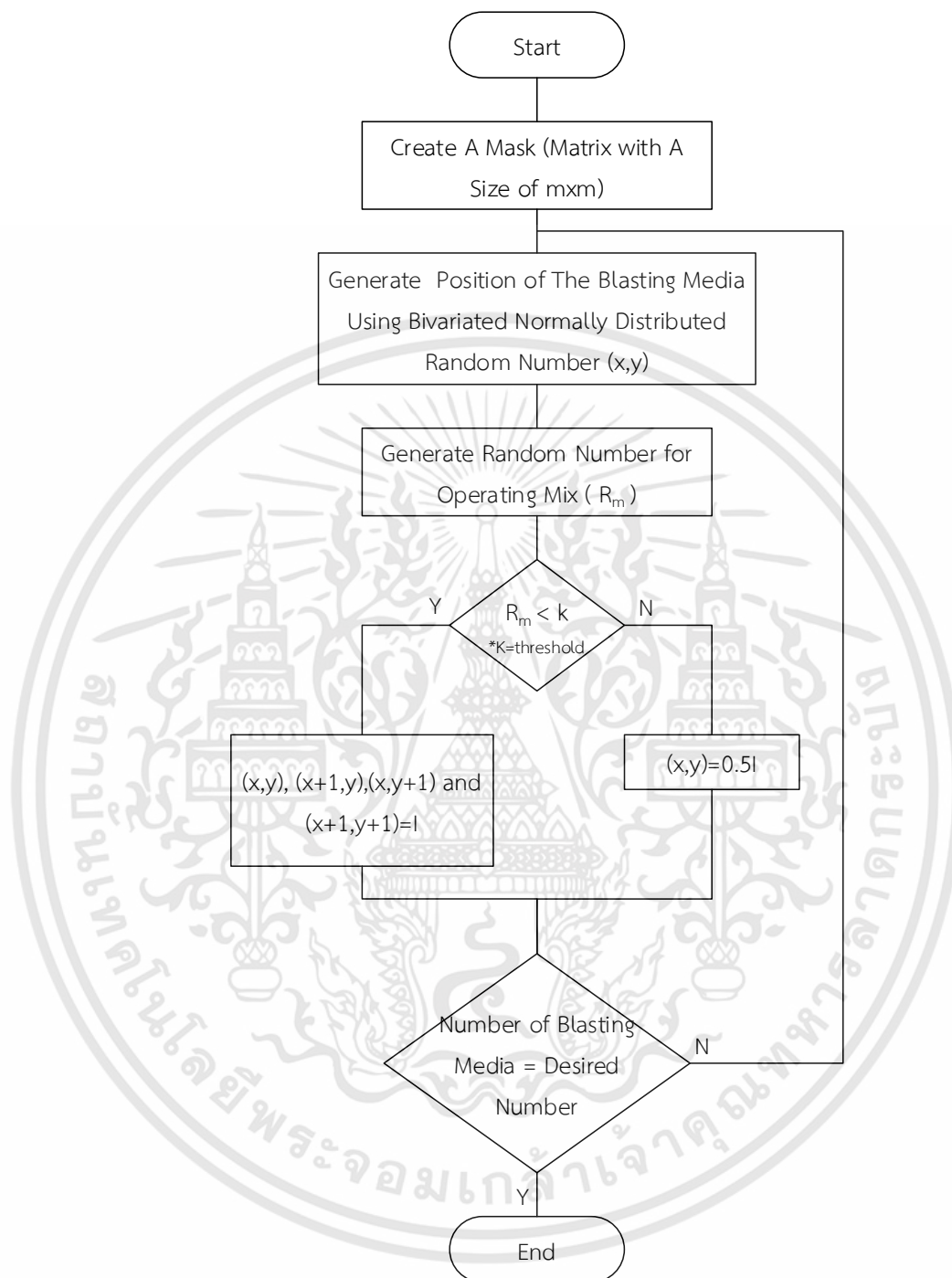
value of pixels (X,Y), ($X+I,Y$), ($Y+I,X$) and ($X+I,Y+I$)= I

Else value of pixel (X,Y)= $I/2$

กำหนดให้ k คือสัดส่วนของอิมแพคโดยที่ $k < 1$ และ R_m คือตัวแปรสุ่ม ถ้า R_m มีค่าน้อยกว่า k ให้ลูกโลหะมีขนาดเท่ากับอิมแพค ถ้า R_m มีค่ามากกว่า k ให้ลูกโลหะมีขนาดเท่ากับคัพเวอเรจ โดยจะทำการสร้างลูกโลหะจำนวน 1500 ลูกต่อการสร้างรอยพ่นหนึ่งครั้ง

อย่างไรก็ตามในระหว่างการพ่นนั้น อาจมีค่าความเข้มแสงสะสมในหนึ่งพิกเซลเกิน 255 ในกรณีนี้ระดับความเข้มแสงที่แสดงบนหน้าจอก็จะมีระดับความเข้มเท่ากับ 255 (สีขาวที่สุดหรือสว่างที่สุด) เท่านั้น

วิธีการจำลองรอยพ่นสามารถสรุปได้ดังแผนภูมิในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการจำลองรอยพ่น

ในระบบจริงจะมีการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ควบคุมหลักและอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม ทำให้เกิดเวลาหน่วงในระบบ ดังนั้น เพื่อให้ระบบเสมือนมีความสมจริง ผู้วิจัยจึงกำหนดให้มีเวลาหน่วงในระบบคงที่ที่ 500 มิลลิวินาที

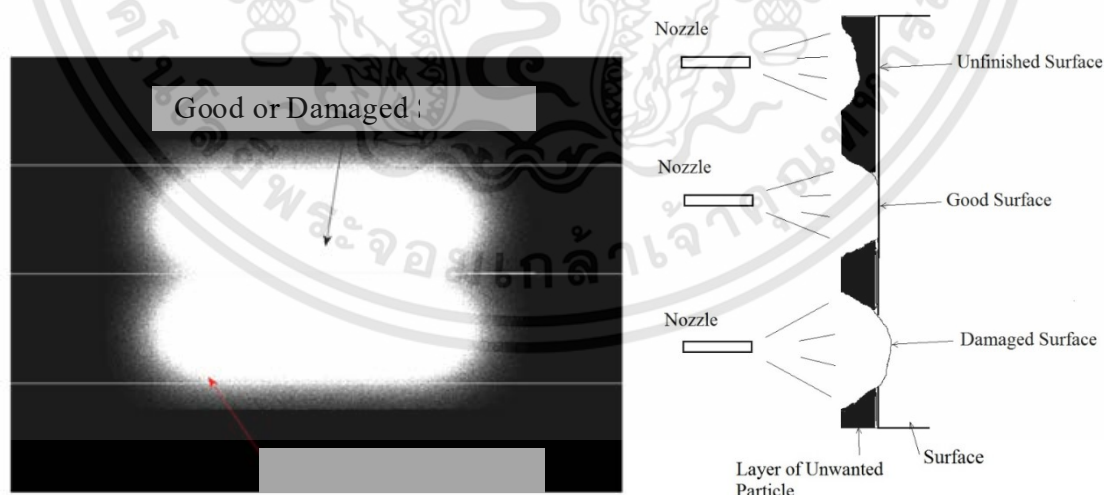
3.2 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะ

สำหรับการทดลองนี้ ผลลัพธ์ที่สนใจได้แก่คุณภาพผิวงาน ดังนั้นดัชนีชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ได้แก่ พื้นผิวไม่สะอาด (Unfinished Surface) พื้นผิวเสียหาย (Damaged Surface) นอกจากนี้เวลารวมที่ใช้ในการปฏิบัติงานหรือเวลารวมในการเคลื่อนที่ไม่เพียงแต่สะท้อนถึงแนวโน้มจำนวนของพื้นผิวไม่สะอาดหรือพื้นผิวเสียหายบนพื้นที่ที่ทำการพ่น แต่ยังเป็นผลลัพธ์ที่สัมพันธ์กับปัจจัยความกว้างของเส้นทาง ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดที่บ่งชี้ได้ว่าระดับปัจจัยใดให้ผลผลิตภาพที่ดีที่สุดโดยที่คุณภาพพื้นผิวอยู่ในระดับที่ดีที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้เวลารวมในการเคลื่อนที่ (Movement Time, MT) เป็นดัชนีชี้วัดในการศึกษานี้ด้วย โดยการระบุพื้นผิวไม่สะอาด และพื้นผิวเสียหายนั้นจะอ้างอิงจากค่าความเข้มแสงในพื้นที่ย่อยของพื้นผิว ซึ่งในระบบพ่นทรายเสมือน จะกำหนดพื้นที่ย่อยเป็นพิกเซลที่ประกอบกันเป็นพื้นผิวที่ทำการพ่น และค่าความเข้มแสงในแต่ละพิกเซลที่เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพพื้นผิวจะใช้เป็นข้อมูลเพื่อคำนวณดัชนีชี้วัดสมรรถนะลักษณะของพื้นผิวแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 3.9 โดยที่:

พื้นผิวไม่สะอาด หมายถึงพื้นผิวที่ผ่านการพ่นแล้วยังมีสิ่งสกปรกตกค้างอยู่บนพื้นผิว

พื้นผิวดี หมายถึงพื้นผิวที่ผ่านการพ่นแล้วไม่มีสิ่งสกปรกตกค้างอยู่และไม่เกิดการเสียหายของพื้นผิว ซึ่งในความเป็นจริงพื้นผิวดีจะเกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากวัสดุพ่นทรายถูกพ่นออกมาจำนวนมากอย่างรวดเร็วทำให้การควบคุมการพ่นให้สะอาดพอดีโดยไม่เกิดความเสียหายนั้นทำได้ยาก

พื้นผิวเสียหาย หมายถึงพื้นผิวที่ผ่านการพ่นแล้วเกิดการเสีของพื้นผิว



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.9 ลักษณะของพื้นผิวแต่ละชนิด (ก) พื้นที่ถูกพ่น (ข) หน้าตัดด้านข้างของพื้นผิวที่ถูกพ่น

ในการทดลองนี้กำหนดให้ค่าความเข้มแสงในแต่ละพิกเซลบนพื้นผิวเสมือนเป็นตัวแทนของสภาพพื้นผิวแต่ละชนิดดังนี้ ความเข้มแสงตั้งแต่ 0-254 เป็นพื้นผิวไม่สะอาด ความเข้มแสง 255 เป็นพื้นผิวดี ความเข้มแสง 256 ขึ้นไปเป็นพื้นผิวเสียหายดังแสดงในรูปที่ 3.10 สำหรับดัชนีชี้วัดคุณภาพพื้นผิว(พื้นผิวไม่สะอาด พื้นผิวเสียหาย) จะใช้ค่าที่ได้จากการคำนวณฟังก์ชันการสูญเสียของทากูชิ โดยกำหนดค่า $k=1$ ดังแสดงในสมการที่ 3.3 ซึ่งคล้ายคลึงกับค่าความผิดพลาดกำลังสอง (Square Error)



รูปที่ 3.10 ค่าความเข้มแสงที่เป็นตัวแทนพื้นผิวแต่ละชนิด

$$Loss = I \times (\bar{y} - t)^2 \quad (3.3)$$

โดย \bar{y} คือค่าความเข้มแสงของพิกเซล t คือค่าเป้าหมาย ได้แก่ 255

สำหรับพื้นผิวไม่สะอาดของแต่ละพิกเซลสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4 และพื้นผิวไม่สะอาดเฉลี่ยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.5

$$Loss_{(i,j)}^u = \begin{cases} k_u (\bar{y}_{(i,j)} - t)^2, & \bar{y}_{(i,j)} < 255 \\ 0, & \bar{y}_{(i,j)} \geq 255 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$Unfinished\ Surface = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Loss_{(i,j)}^u}{m \times n} \text{ intensity}^2 \quad (3.5)$$

และพื้นผิวเสียหายของแต่ละพิกเซลสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.6 และและพื้นผิวเสียหายเฉลี่ยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.7

$$Loss_{(i,j)}^d = \begin{cases} k_d (\bar{y}_{(i,j)} - t)^2, & \bar{y}_{(i,j)} > 255 \\ 0, & \bar{y}_{(i,j)} \leq 255 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$Damaged\ Surface = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Loss_{(i,j)}^d}{m \times n} \text{ intensity}^2 \quad (3.7)$$

โดย i และ j คือตำแหน่งของพิกเซลในแกน x และ แกน y ตามลำดับ, $Loss_{(i,j)}^u$ คือความสูญเสียที่เกิดจากพื้นผิวไม่สะอาดที่ตำแหน่ง (i,j) , $Loss_{(i,j)}^d$ คือความสูญเสียที่เกิดจากพื้นผิวเสียหาย k_u และ k_d คือตัวคูณค่าเสียหายในแต่ละกรณีซึ่งในที่นี้สมมติให้เป็น 1 ทั้งสองตัว

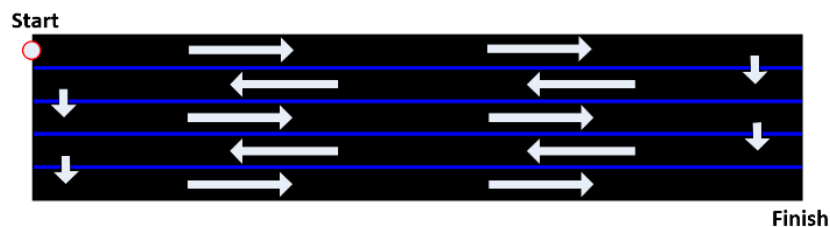
สำหรับเวลารวมในการเคลื่อนที่นั้น โปรแกรมจะทำการจับเวลาในการเคลื่อนที่ตั้งแต่เริ่มการพ่นจนจบการพ่น อย่างไรก็ตามการใช้เวลารวมในการเคลื่อนที่เพื่อพิจารณาผลกระทบของความกว้างของเส้นทางที่มีต่อเวลารวมในการเคลื่อนที่นั้น ไม่สามารถใช้เวลาในการเคลื่อนที่ตั้งแต่เริ่มการพ่นจนจบการพ่นได้ เนื่องจากระยะทางรวมในการพ่นของสองขนาดเส้นทางนั้นไม่เท่ากัน เช่น สำหรับพื้นที่ทำการทดลองกว้าง 75 พิกเซล ถ้ากำหนดขนาดเส้นทาง 25 พิกเซล จะแบ่งพื้นที่ทำการพ่นตามขนาดเส้นทางได้ 3 ช่องหรือแถว (row) ผู้เข้าร่วมการทดลองต้องทำการเดินหัวพ่นเป็นระยะทาง $220 \times 3 = 660$ มม. ในขณะที่ถ้ากำหนดขนาดเส้นทาง 15 พิกเซล ผู้เข้าร่วมการทดลองต้องทำการเดินหัวพ่นเป็นระยะทาง $220 \times 5 = 1100$ มม. ดังนั้นการใช้เวลาที่ทำการพ่นต่อระยะทางที่เท่ากันจึงจะเป็นดัชนีชี้วัดที่เหมาะสมในการพิจารณาผลกระทบของความกว้างของเส้นทางที่มีต่อเวลารวมในการเคลื่อนที่ โดยดัชนีชี้วัดดังกล่าวจะใช้เวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อ 1 แถว (MT/R) การคำนวณดัชนีชี้วัดจะเป็นการเอาเวลารวมในการเคลื่อนที่หารด้วยจำนวนช่องเส้นทางดังแสดงในสมการที่ 3.8

$$MT/R = \frac{MT}{\text{No. of Bands Covering Entire Surface}} \quad (3.8)$$

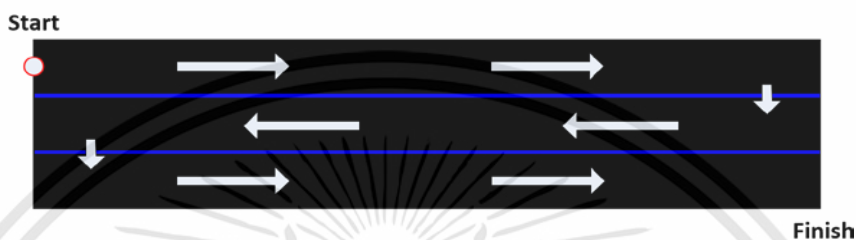
3.3 การทดลองและการกำหนดปัจจัยในการทดลอง

การทดลองจะเป็นการกำหนดให้ผู้เข้าร่วมการทดลองทำการพ่นทำความสะอาดพื้นผิวเสมือนที่มีขนาดหน้าจอกว้างเท่ากับ 220 มม. x 28 มม. หรือ 600 พิกเซล x 75 พิกเซล โดยบนพื้นผิวจะมีเส้นกำหนดขนาดความกว้างของเส้นทางดังรูปที่ 3.11 ผู้เข้าร่วมการทดลองเป็นนักศึกษาที่ไม่เคยปฏิบัติงานพ่นทรายระยะไกลมาก่อน โดยแบ่งเป็นเพศชาย 10 คน และเพศหญิง 10 คน

ตัวอย่างของการพ่นทำความสะอาดพื้นผิวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 โดยหัวพ่นจะแทนด้วยวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 พิกเซล และสมมติให้หัวพ่นสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนโดยไม่มีสิ่งบดบังเช่นโครงสร้างของหุ่นยนต์ เพื่อไม่ให้ความผิดพลาดในการควบคุมเนื่องจากสิ่งกีดขวางการมองเห็นมีผลต่อสมรรถนะในการปฏิบัติงาน ซึ่งไม่ได้รวมอยู่ในปัจจัยที่ทำการศึกษา

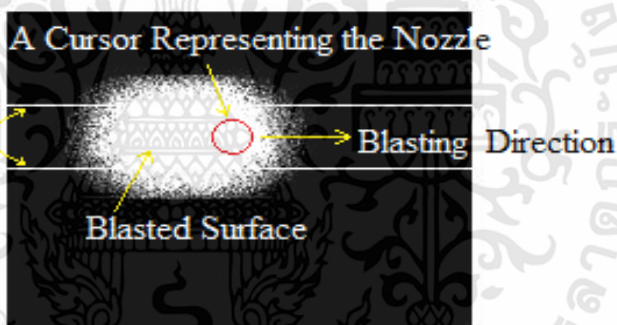


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.11 พื้นผิวเสมือนที่ใช้ในการทดลอง โดยกำหนดความกว้างของเส้นทางไว้สองระดับ ได้แก่ (ก) 15 พิกเซล และ (ข) 25 พิกเซล



รูปที่ 3.12 ลักษณะการดำเนินการพ่นทำความสะอาดพื้นผิว

สำหรับปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ระยะการมอง (VD) และ ความกว้างของเส้นทาง (PW) โดยผู้วิจัย กำหนดไว้สองระดับซึ่งเป็นระยะที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ได้แก่ 650 มม. (ประมาณ 25 นิ้ว) [80] และ 1,350 มม.[78] ดังรูปที่ 3.13 และกำหนดความกว้างของเส้นทางไว้สองระดับคือ 15 พิกเซล และ 25 พิกเซล และกำหนดทิศทางการพ่นกำหนดไว้ตามลูกศรดังรูปที่ 3.11 พื้นผิวที่ทำการพ่นนั้น ก่อนทำการพ่นจะถูกกำหนดให้มีสีดำ หรือมีค่าความเข้มแสงเท่ากับศูนย์ในแต่ละพิกเซลบนพื้นผิว จากนั้นเมื่อวัสดุพ่นตกกระทบที่ตำแหน่งใดบนพื้นผิว ตำแหน่งนั้นจะเก็บสะสมค่าความเข้มแสงของวัสดุพ่นไว้ ทำให้พิกเซลนั้นมีค่าความเข้มแสงมากขึ้นทำให้สว่างขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อความเข้มแสงมีค่า 255 พิกเซล พิกเซลนั้นจะมีสีขาวหรือสว่างที่สุด อย่างไรก็ตาม พิกเซลนั้นจะสามารถเก็บสะสมค่าต่อไปได้อีกแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองสามารถสรุปดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	ระดับ (Level)	
	1	2
ระยะการมอง (VD)	650 mm	1350 mm
ความกว้างของเส้นทาง (PW)	15 pixels	25 pixels

สำหรับจุดที่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์นั้น ได้แก่สถานีงานที่มีอุปกรณ์ควบคุมหลัก โดยผู้วิจัยได้จัดทำสถานีงานดังรูปที่ 3.13 ซึ่งอุปกรณ์ควบคุมหลักนั้นเป็นหุ่นยนต์แบบขนานมีพื้นที่การทำงานขนาด 900 มม. x 450 มม. อยู่บนระนาบสองมิติ ตัวสถานีงานประกอบด้วยหุ่นยนต์แบบขนานพร้อมชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใช้ในการวัดตำแหน่ง หุ่นยนต์เคลื่อนที่อยู่บนพื้นผิวอะคริลิก ด้านล่างของอะคริลิกเป็นหน้าจอแสดงผลขนาด 32 นิ้วที่ออกแบบให้ปรับเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งได้เพื่อปรับระยะการมองสำหรับการทดลอง โดยผู้ปฏิบัติงานจะควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ควบคุมหลักที่จุดปลายของหุ่นยนต์ (วงกลมแดงในรูปที่ 3.13(ก))



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.13 สถานีงานที่ใช้ในการทดลอง ออกแบบให้จอแสดงผลสามารถปรับระยะการมองได้ โดย (ก) ระยะการมองเท่ากับ 650 มม. (ข) ระยะการมองเท่ากับ 1,350 มม.

ตารางที่ 3.3 ลำดับในการทดลองของผู้เข้าร่วมการทดลอง

Order	Run Order	Participant	Gender	PW	VD	Order	Run Order	Participant	Gender	PW	VD
1	69	1	F	15	0	41	79	11	M	15	0
2	61	1	F	15	60	42	73	11	M	15	60
3	60	1	F	25	0	43	78	11	M	25	0
4	36	1	F	25	60	44	15	11	M	25	60
5	13	2	F	15	0	45	33	12	M	15	0
6	47	2	F	15	60	46	65	12	M	15	60
7	80	2	F	25	0	47	35	12	M	25	0
8	26	2	F	25	60	48	38	12	M	25	60
9	59	3	F	15	0	49	37	13	M	15	0
10	76	3	F	15	60	50	46	13	M	15	60
11	25	3	F	25	0	51	8	13	M	25	0
12	12	3	F	25	60	52	31	13	M	25	60
13	3	4	F	15	0	53	32	14	M	15	0
14	72	4	F	15	60	54	62	14	M	15	60
15	5	4	F	25	0	55	17	14	M	25	0
16	51	4	F	25	60	56	56	14	M	25	60
17	43	5	F	15	0	57	16	15	M	15	0
18	77	5	F	15	60	58	7	15	M	15	60
19	19	5	F	25	0	59	14	15	M	25	0
20	44	5	F	25	60	60	10	15	M	25	60
21	58	6	F	15	0	61	34	16	M	15	0
22	70	6	F	15	60	62	23	16	M	15	60
23	40	6	F	25	0	63	28	16	M	25	0
24	29	6	F	25	60	64	52	16	M	25	60
25	39	7	F	15	0	65	4	17	M	15	0
26	45	7	F	15	60	66	75	17	M	15	60
27	27	7	F	25	0	67	48	17	M	25	0
28	30	7	F	25	60	68	64	17	M	25	60
29	41	8	F	15	0	69	1	18	M	15	0
30	54	8	F	15	60	70	57	18	M	15	60
31	67	8	F	25	0	71	68	18	M	25	0
32	20	8	F	25	60	72	49	18	M	25	60
33	6	9	F	15	0	73	53	19	M	15	0
34	55	9	F	15	60	74	66	19	M	15	60
35	9	9	F	25	0	75	63	19	M	25	0
36	71	9	F	25	60	76	74	19	M	25	60
37	11	10	F	15	0	77	18	20	M	15	0
38	21	10	F	15	60	78	22	20	M	15	60
39	2	10	F	25	0	79	50	20	M	25	0
40	24	10	F	25	60	80	42	20	M	25	60

ก่อนเริ่มทำการทดลอง ผู้เข้าร่วมการทดลองจะได้ทำการทดลองใช้เครื่องเพื่อสร้างความคุ้นเคยในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลัก จากนั้นจะให้ผู้เข้าร่วมการทดลองได้ฝึกซ้อมการพ่นจนรู้สึกว่าจะสามารถควบคุมได้อย่างเป็นธรรมชาติ จากนั้นจะเริ่มทำการทดลอง โดยการทดลองจะประกอบด้วย 4 ทริทเมนต์ (ประกอบด้วยสองปัจจัย ปัจจัยละสองระดับ) ดังตารางที่ 3.2 ผู้เข้าร่วมการทดลองจะทำการทดลองทั้งสิ้น 4 ครั้ง โดยลำดับของทริทเมนต์จะถูกสุ่มเพื่อลดอิทธิพลของลำดับการทดลอง จำนวนครั้งการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 80 ครั้ง ลำดับการทำการทดลองที่ได้จากการสุ่มแสดงในตารางที่ 3.3

ระหว่างทำการทดลองจะมีการบันทึกเวลาที่ใช้ในการทดลองและค่าความเข้มแสงแต่ละฟลักเซลบนพื้นผิวเพื่อนำมาคำนวณดัชนีชี้วัดสมรรถนะที่จะใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

3.4 ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลอง ผู้วิจัยได้นำผลจากการทดลองมาใช้เพื่อคำนวณดัชนีชี้วัด โดยดัชนีชี้วัดที่ได้จากผลการทดลองของผู้เข้าร่วมการทดลองทั้งหมดแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลการทดลองจากผู้เข้าร่วมการทดลอง

Order	Participant	Gender	PW	VD	MT	MT/R	Damage	Unfinish	Mean	STDEV
1	1	F	15	0	65.729	13.146	3206	31	571	209
2	1	F	15	60	76.324	15.265	7241	25	729	312
3	1	F	25	0	98.401	32.800	15039	63	890	516
4	1	F	25	60	57.933	19.311	5434	109	546	401
5	2	F	15	0	94.061	18.812	9605	13	834	302
6	2	F	15	60	104.142	20.828	13984	9	946	378
7	2	F	25	0	76.592	25.531	8806	60	708	434
8	2	F	25	60	75.803	25.268	9766	52	727	461
9	3	F	15	0	271.771	54.354	121550	0	2359	986
10	3	F	15	60	173.557	34.711	43069	1	1509	583
11	3	F	25	0	152.376	50.792	34128	29	1226	757
12	3	F	25	60	148.218	49.406	39074	23	1307	793
13	4	F	15	0	90.228	18.046	8821	6	806	296
14	4	F	15	60	96.750	19.350	8033	6	779	286
15	4	F	25	0	72.737	24.246	6914	63	655	386
16	4	F	25	60	65.781	21.927	5294	58	594	350
17	5	F	15	0	247.920	49.584	82431	2	2060	636
18	5	F	15	60	220.027	44.005	73976	4	1937	677
19	5	F	25	0	207.916	69.305	97483	11	1985	1156
20	5	F	25	60	166.044	55.348	54995	12	1544	884

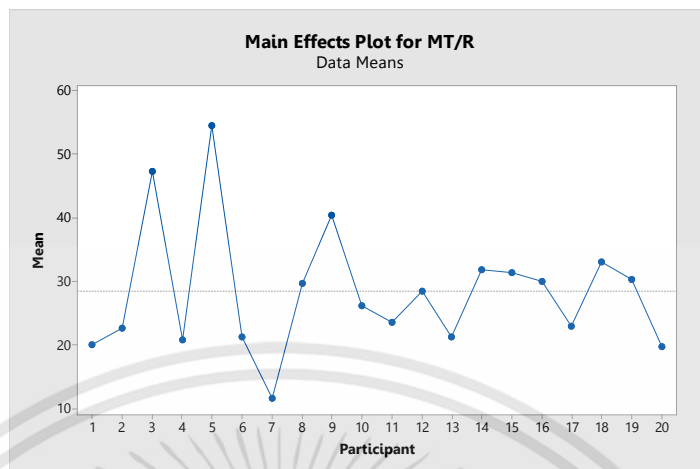
ตารางที่ 3.4 (ต่อ) ผลการทดลองจากผู้เข้าร่วมการทดลอง

Order	Participant	Gender	PW	VD	MT	MT/R	Damage	Unfinish	Mean	STDEV
21	6	F	15	0	97.839	19.568	11314	43	852	384
22	6	F	15	60	85.277	17.055	8168	64	743	356
23	6	F	25	0	71.477	23.826	7166	98	656	402
24	6	F	25	60	75.095	25.032	9333	70	727	441
25	7	F	15	0	46.000	9.200	1351	64	359	227
26	7	F	15	60	61.177	12.235	2536	15	502	228
27	7	F	25	0	38.392	12.797	1054	169	343	215
28	7	F	25	60	36.707	12.236	1177	159	337	229
29	8	F	15	0	99.431	19.886	10561	12	875	291
30	8	F	15	60	112.912	22.582	14083	22	954	371
31	8	F	25	0	110.085	36.695	15205	39	893	519
32	8	F	25	60	119.030	39.677	24029	42	1083	619
33	9	F	15	0	163.403	32.681	31710	0	1359	436
34	9	F	15	60	107.633	21.527	12594	2	912	356
35	9	F	25	0	200.947	66.982	79697	11	1831	1028
36	9	F	25	60	121.345	40.448	25708	38	1090	667
37	10	F	15	0	141.416	28.283	30835	16	1314	499
38	10	F	15	60	87.820	17.564	4675	58	612	287
39	10	F	25	0	110.134	36.711	20679	65	1025	573
40	10	F	25	60	66.319	22.106	6907	98	637	406
41	11	M	15	0	95.105	19.021	7122	6	754	258
42	11	M	15	60	104.630	20.926	12283	34	888	382
43	11	M	25	0	80.725	26.908	8974	50	730	418
44	11	M	25	60	82.320	27.440	5025	77	584	343
45	12	M	15	0	137.347	27.469	11698	3	905	310
46	12	M	15	60	174.165	34.833	18882	8	1042	469
47	12	M	25	0	85.670	28.557	9604	41	752	425
48	12	M	25	60	68.804	22.935	6785	58	641	393
49	13	M	15	0	63.114	12.623	2469	32	514	209
50	13	M	15	60	84.953	16.991	6134	17	672	314
51	13	M	25	0	71.737	23.912	6738	74	656	376
52	13	M	25	60	95.488	31.829	14400	50	859	526
53	14	M	15	0	108.096	21.619	12968	12	914	376
54	14	M	15	60	121.777	24.355	18177	15	1041	435
55	14	M	25	0	150.371	50.124	13811	36	862	495
56	14	M	25	60	93.761	31.254	15053	31	889	518

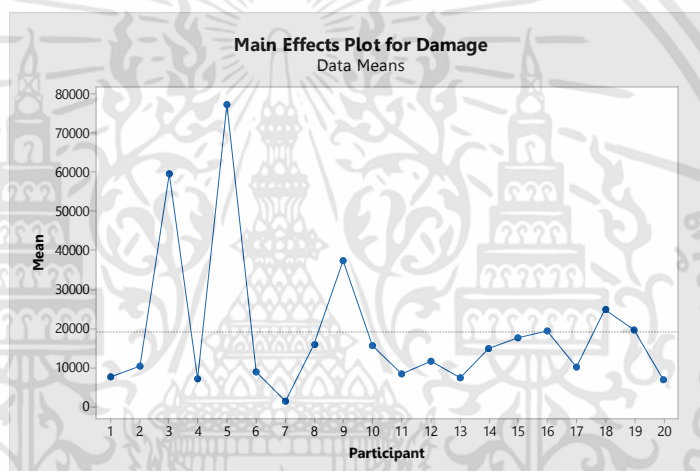
ตารางที่ 3.4 (ต่อ) ผลการทดลองจากผู้เข้าร่วมการทดลอง

Order	Participant	Gender	PW	VD	MT	MT/R	Damage	Unfinish	Mean	STDEV
57	15	M	15	0	100.912	20.182	10445	15	868	298
58	15	M	15	60	137.266	27.453	17391	11	998	469
59	15	M	25	0	122.120	40.707	26474	28	1150	612
60	15	M	25	60	112.364	37.455	16319	46	913	542
61	16	M	15	0	149.835	29.967	23574	3	1203	385
62	16	M	15	60	144.427	28.885	29191	16	1264	527
63	16	M	25	0	93.768	31.256	12239	65	814	483
64	16	M	25	60	90.113	30.038	12520	39	835	470
65	17	M	15	0	95.746	19.149	8704	2	807	284
66	17	M	15	60	62.295	12.459	3824	35	561	278
67	17	M	25	0	84.284	28.095	9463	12	798	355
68	17	M	25	60	96.513	32.171	18995	20	970	576
69	18	M	15	0	118.204	23.641	14440	7	969	361
70	18	M	15	60	145.966	29.193	34237	25	1288	674
71	18	M	25	0	136.154	45.385	30530	34	1220	653
72	18	M	25	60	102.299	34.100	20327	70	975	622
73	19	M	15	0	85.667	17.133	8448	7	806	267
74	19	M	15	60	106.119	21.224	12629	9	918	349
75	19	M	25	0	137.251	45.750	35217	21	1247	762
76	19	M	25	60	112.462	37.487	22288	30	1058	588
77	20	M	15	0	87.931	17.586	8219	2	799	262
78	20	M	15	60	69.253	13.851	4767	21	655	228
79	20	M	25	0	78.916	26.305	10251	30	782	422
80	20	M	25	60	64.638	21.546	4753	53	561	346

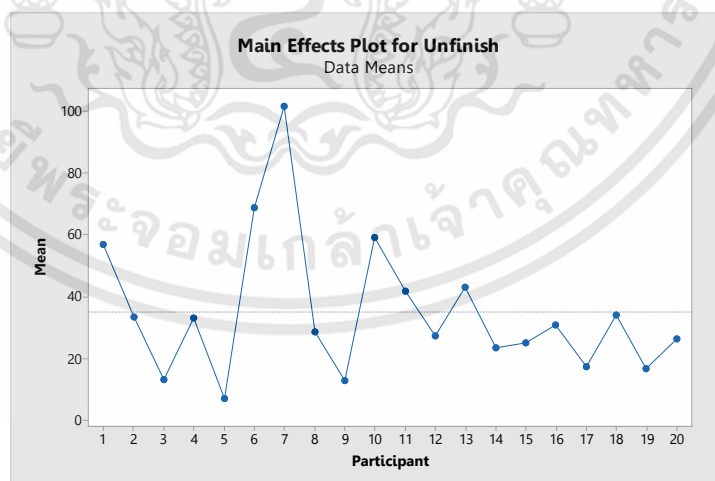
เมื่อได้ค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 3.4 ผู้วิจัยได้นำค่าเฉลี่ยของดัชนีชี้วัด เวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อ 1 แถว (MT/R), พื้นผิวเสียหาย (Damaged Surface) และ พื้นผิวไม่สะอาด (Unfinished Surface) จากการทำการทดลองทั้ง 4 ครั้ง ของผู้เข้าร่วมการทดลองแต่ละคนมาสร้างกราฟ ดังรูปที่ 3.14 โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าผู้เข้าร่วมการทดลองหมายเลข 3 และ 5 นั้น มีค่า MT/R และ damaged surface ที่สูงผิดปกติ และผู้เข้าร่วมการทดลองหมายเลข 7 มีค่า unfinished surface สูงผิดปกติ ดังนั้น เพื่อไม่ให้เกิดการวิเคราะห์เกิดความผิดเพี้ยนจากค่าผิดปกติเหล่านี้ ผู้วิจัยจึงไม่พิจารณาผลการทดลองที่ได้จากผู้เข้าร่วมการทดลองทั้งสามหมายเลขนี้



(ก)



(ข)

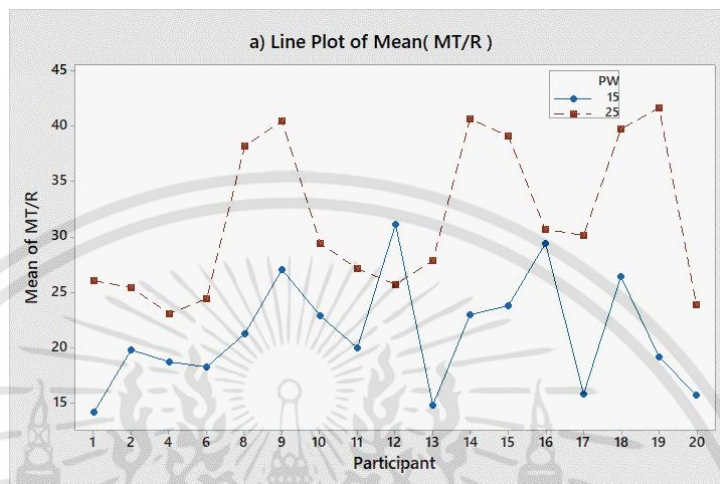


(ค)

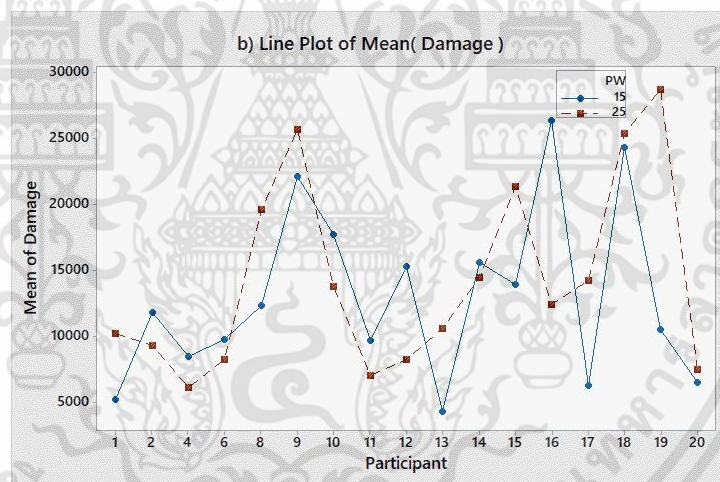
รูปที่ 3.14 ค่าเฉลี่ยของดัชนีชี้วัดสมรรถนะจากการทดลองทั้ง 4 ครั้งของผู้เข้าร่วมการทดลองทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากตัดผลการทดลองที่ผิดพลาดออกแล้ว ผู้วิจัยจึงสร้างกราฟค่าเฉลี่ยของ MT/R, พื้นผิวเสียหาย (Damaged Surface) และ พื้นผิวไม่สะอาด (Unfinished Surface) แยกตามแต่ละปัจจัยแสดงในรูปแบบที่ 3.15

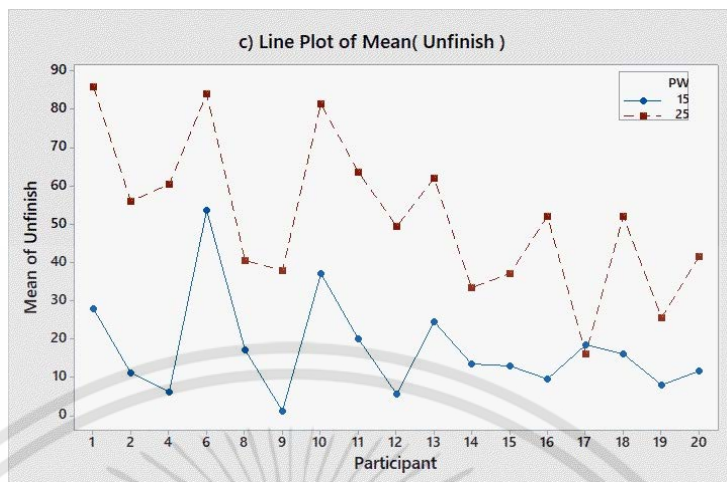


(ก)

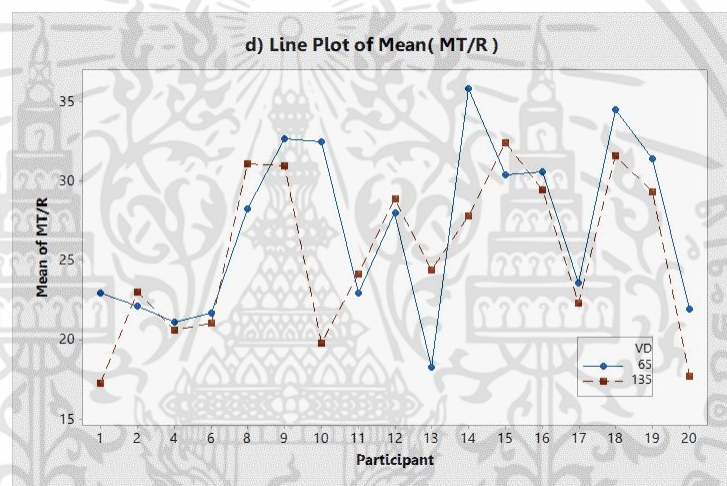


(ข)

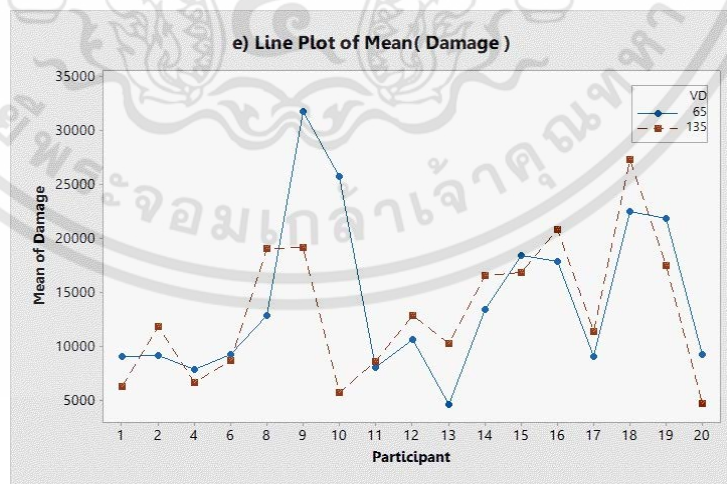
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

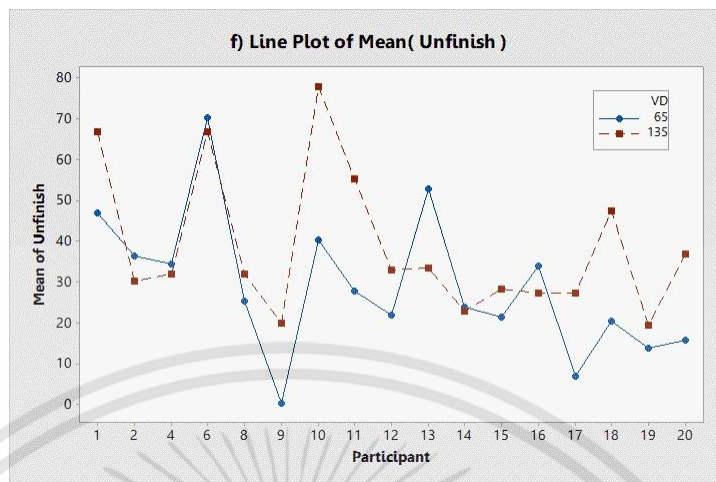


(ง)



(จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

รูปที่ 3.15 กราฟแสดงสมรรถนะของผู้เข้าร่วมการทดลองทุกคน

จากรูปที่ 3.15 อิทธิพลของปัจจัยความกว้างของเส้นทาง (PW) มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อ MT/R และ Unfinished Surface อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยกราฟอย่างเดียวอาจนำไปสู่การสรุปผลที่ผิดพลาดได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้การวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อยืนยันผลการทดลอง

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองที่มีหลายดัชนีชี้วัด (Multiple indices) นั้น จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างดัชนีชี้วัด เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกเครื่องมือในการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 3.4 มาคำนวณสหสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ของระบบ (ตารางที่ 3.5) พบว่า MT/R นั้นมีสหสัมพันธ์กับ Damaged Surface อย่างชัดเจน ขณะที่ Unfinished surface นั้นไม่มีสหสัมพันธ์กับดัชนีชี้วัดตัวอื่นๆเลย ซึ่งสหสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นว่าเวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อ 1 แถวมีความสัมพันธ์กับปริมาณความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว โดยเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเสียหายเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม เวลาที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่สัมพันธ์กับปริมาณสิ่งสกปรกที่ตกค้างบนพื้นผิว ดังนั้น เวลา รวมในการเคลื่อนที่ต่อ 1 แถวสามารถลดลงได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความสะอาดของพื้นผิวแต่สามารถลดความเสียหายบนพื้นผิวได้ด้วย แต่ทั้งนี้ เวลาที่ใช้ทำการพ่นนั้นต้องเป็นเวลาที่เหมาะสม ซึ่งเป็นเวลาน้อยที่สุดที่ทำให้พื้นผิวยังคงสะอาดเมื่อประเมินด้วยสายตาผู้ปฏิบัติงาน โดยลักษณะเฉพาะตัวนี้มีความสำคัญมากที่จะช่วยให้เข้าใจการออกแบบเพื่อปรับปรุงสมรรถนะได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 3.5 สหสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ของระบบ

	MT/R	Damaged surface
Damaged surface	0.723	
Unfinished surface	0.084	-0.273

เนื่องจากมีสหสัมพันธ์ระหว่างดัชนีชี้วัด การวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงไม่สามารถใช้วิธีปกติได้ วิธีที่เหมาะสมในกรณีนี้ได้แก่การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบหลายตัวแปร (Multivariate Analysis of Variance, MANOVA) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบหลายตัวแปรสำหรับผลกระทบของ PW VD and participants ที่มีต่อ MT/R, damaged surface and unfinished surface

MANOVA for PW VD PW*VD Participants: Test Criterion: Wilks'						
Test	DF					
Criterion	Statistic	F	Num	Denom	P	
PW	0.10888	122.772	3	45	0.000	
VD	0.85501	2.544	3	45	0.168	
PW*VD	0.90780	1.523	3	45	0.221	
Particip	0.12355	2.861	48	134	0.000	

ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 3.6 บ่งชี้ว่าขนาดความกว้างของเส้นทางมีผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวมของระบบ ซึ่งสอดคล้องรูปที่ 3.15 ที่แสดงให้เห็นว่าขนาดความกว้างของเส้นทางมีผลต่อเวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อหนึ่งแถวและพื้นผิวไม่สะอาด โดยขนาดเส้นทางที่กว้างขึ้น ทำให้ผู้ปฏิบัติงานใช้เวลามากขึ้นในการทำความสะอาดเนื่องจากมีพื้นที่ที่ต้องทำความสะอาดมากขึ้น และส่งผลให้ทำความสะอาดยากขึ้น ซึ่งขนาดเส้นทางที่กว้างขึ้นทำให้มีสิ่งสกปรกตกค้างบริเวณขอบของเส้นทางที่เป็นขอบของรอยฟัน นอกจากนี้ยังพบว่าสมรรถนะโดยรวมของผู้เข้าร่วมการทดลองแต่ละคนนั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความแตกต่างในความสามารถในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลัก ความสามารถในการประสานงานกันระหว่างตาและมือ ความสามารถในการประเมินพื้นผิวด้วยสายตา โดยจะสังเกตได้จากรูปที่ 3.14 ซึ่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างของสมรรถนะโดยรวมระหว่างผู้ปฏิบัติงานในทุกๆกราฟ สำหรับระยะเวลาการมอง

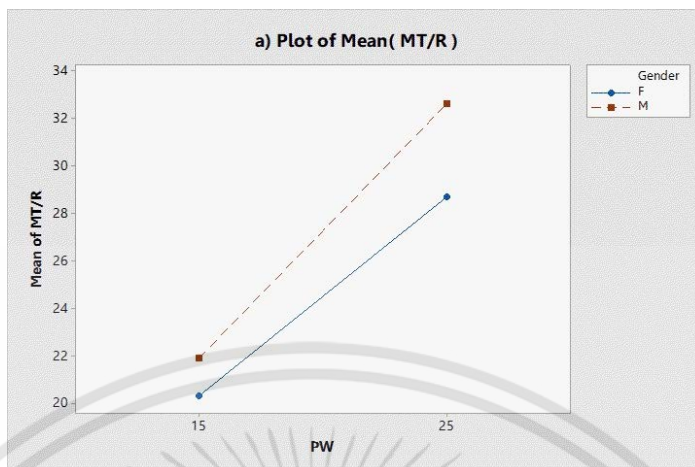
ทั้งสองระดับนั้นไม่สร้างความแตกต่างในด้านสมรรถนะโดยรวม หมายความว่าระยะเวลาการมองที่แนะนำโดย [78] และ [80] นั้นไม่ทำให้สมรรถนะในการปฏิบัติแตกต่างกัน นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ไม่พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการมองและความกว้างของเส้นทาง ในขณะที่ความกว้างของเส้นทางนั้นมีผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเวลารวมในการเคลื่อนที่และพื้นผิวไม่สะอาด ซึ่งเห็นได้จากรูปที่ 3.14 (ก) และ (ค) เนื่องจากขนาดเส้นทางที่สัมพันธ์กับขนาดของรอยพ่นมีผลโดยตรงต่อความสะอาดของพื้นผิว

เนื่องจากผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่ามีความแตกต่างของสมรรถนะโดยรวมระหว่างผู้ปฏิบัติงานนั้น ยังไม่สามารถบอกได้ว่าในกลุ่มผู้ปฏิบัติงานนั้นมีกลุ่มย่อยที่มีความคล้ายคลึงในด้านสมรรถนะโดยรวมหรือไม่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ที่โดยแบ่งกลุ่มผู้เข้าร่วมการทดลองเป็นกลุ่มย่อย โดยจะแบ่งตามเพศแล้วทำการวิเคราะห์อีกครั้งหนึ่ง โดยกราฟค่าเฉลี่ยของสมรรถนะแบ่งตามเพศแสดงดังรูปที่ 3.16 และผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.7

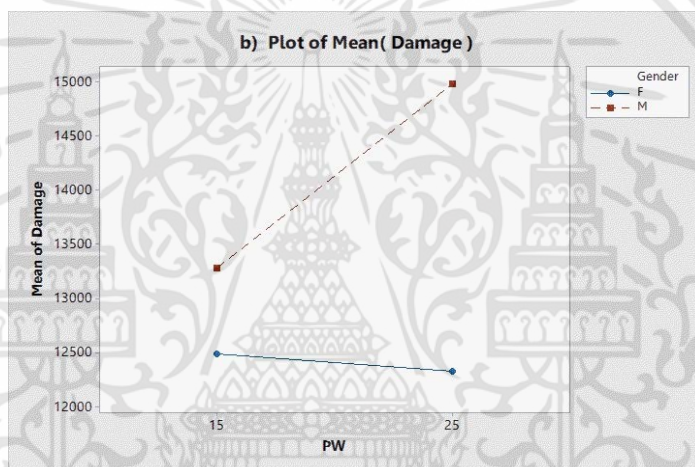
ตารางที่ 3.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบหลายตัวแปรสำหรับผลกระทบของ PW VD and Gender ที่มีต่อ MT/R, damaged surface and unfinished surface

MANOVA for PW VD PW*VD Gender: Test Criterion: Wilks'						
Test	DF					
Criterion	Statistic	F	Num	Denom	P	
PW	0.18822	86.261	3	60	0.000	
VD	0.93184	1.463	3	60	0.234	
PW*VD	0.95312	0.984	3	60	0.407	
Gender	0.83416	3.976	3	60	0.012	

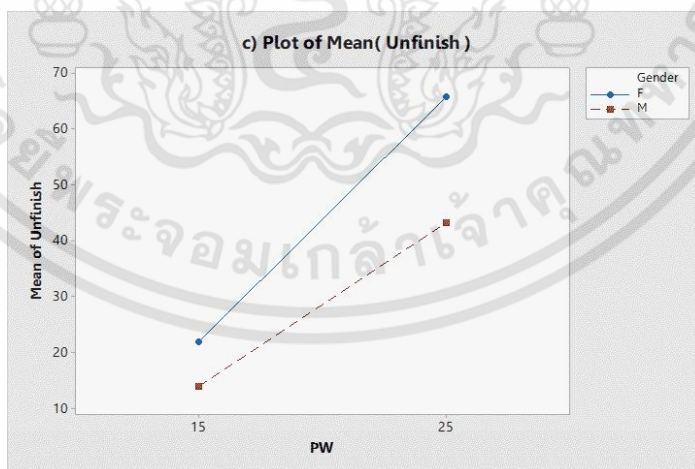
จากรูปที่ 3.16 (ก) จะเห็นได้ว่าผู้เข้าร่วมการทดลองเพศชายใช้เวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อหนึ่งแถวมากกว่าผู้เข้าร่วมการทดลองเพศหญิงเล็กน้อยทั้งสองระดับของความกว้างของเส้นทาง ส่งผลให้ผู้เข้าร่วมการทดลองเพศชายสร้างปริมาณของพื้นผิวเสียหายมากกว่าผู้เข้าร่วมการทดลองเพศหญิง (รูปที่ 3.16 (ข)) อย่างไรก็ตาม ผู้เข้าร่วมการทดลองเพศชายสามารถทำความสะอาดพื้นผิวได้สะอาดกว่าผู้เข้าร่วมการทดลองเพศหญิง สังเกตได้จากปริมาณพื้นผิวไม่สะอาดในรูปที่ 3.16 (ค) รูปที่ 3.16 (ง)-(ฉ) แสดงผลกระทบของระยะเวลาการมองต่อผลลัพธ์ของระบบซึ่งคล้ายคลึงกับผลกระทบของขนาดความกว้างของเส้นทาง ยกเว้นพื้นผิวเสียหาย (รูปที่ 3.16 (จ)) ที่ผู้เข้าร่วมการทดลองเพศหญิงจะสร้างพื้นผิวเสียหายมากกว่าเพศชายเล็กน้อยที่ระยะเวลาการมอง 650 มม. อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อยืนยันปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ดังกล่าว



(ก)

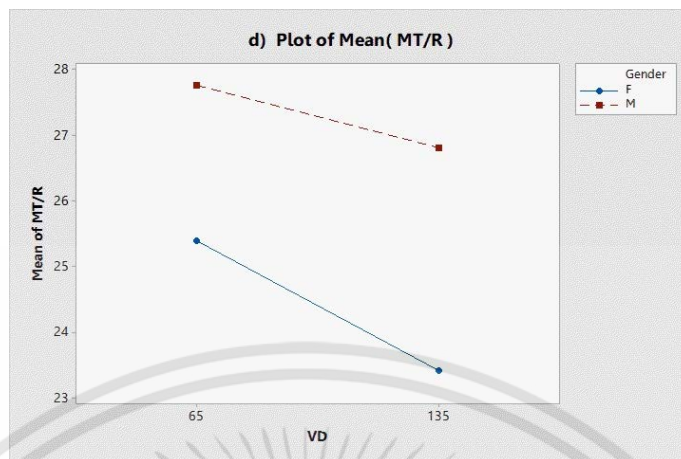


(ข)

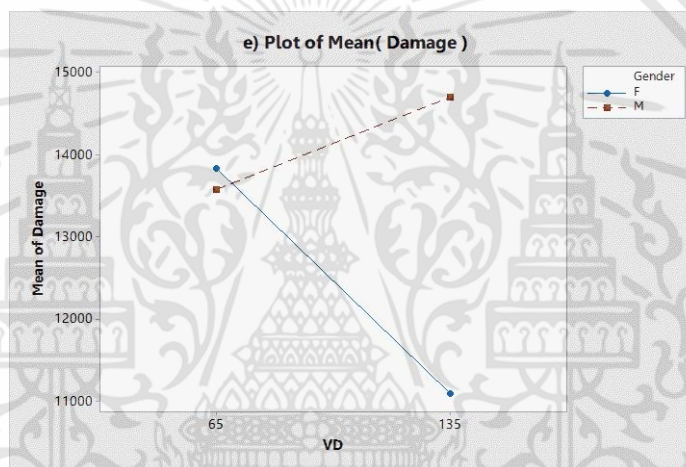


(ค)

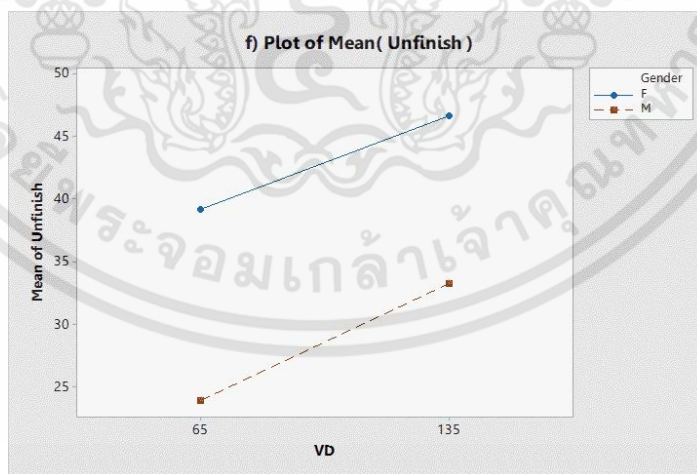
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 3.16 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเพศชายและหญิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่า ผลกระทบของระยะการมอง ความกว้างของเส้นทาง และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัยนั้นมีความคล้ายคลึงกับผลการทดลองในตารางที่ 3.6 แต่พบว่ามี ความแตกต่างของสมรรถนะโดยรวมระหว่างเพศอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลการวิเคราะห์นั้นสอดคล้องกับ [129] และ [130] โดยในงานวิจัยเหล่านี้พบว่าผู้เข้าร่วมการทดลองเพศชายมักจะมีสมรรถนะที่ดีกว่าเพศหญิงซึ่ง คล้ายคลึงกับผลที่ผู้วิจัยค้นพบ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ที่ผ่านมาเป็นการวิเคราะห์สมรรถนะโดยรวม ซึ่งไม่ได้บ่งชี้ว่าปัจจัยทั้งสองนั้นมีผลกระทบต่อ สมรรถนะแต่ละตัว (เวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อ 1 แถว พื้นผิวเสียหาย พื้นผิวไม่สะอาด) อย่างไร ดังนั้นจึง จำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์สมรรถนะแต่ละตัว เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อสมรรถนะนั้นๆ ผลกระทบของขนาดเส้นทาง (PW) ระยะการมอง (VD) และเพศ (gender) ที่มีต่อเวลารวมในการเคลื่อนที่ ต่อ 1 แถว แสดงในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 3.8 ผลกระทบของ PW, VD and gender ที่มีต่อพื้นผิวเสียหายแสดงในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 3.9 และผลกระทบของ PW, VD and gender ที่มีต่อพื้นผิวไม่สะอาดแสดงในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลกระทบของ PW, VD and gender ที่มีต่อ MT/R

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
PW	1	1623.72	1623.73	1623.73	35.46	0.000
VD	1	40.96	39.91	39.91	0.87	0.354
PW*VD	1	61.63	58.49	58.49	1.28	0.263
Gender	1	115.06	115.06	115.06	2.51	0.118
Error	62	2839.20	2839.20	45.79		
Total	66	4680.55				

ตารางที่ 3.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลกระทบของ PW, VD and gender ที่มีต่อ damaged surface

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
PW	1	16310573	16134732	16134732	0.24	0.628
VD	1	3803911	3610258	3610258	0.05	0.819
PW*VD	1	24515569	23276468	23276468	0.34	0.561
Gender	1	45129760	45129760	45129760	0.66	0.419
Error	62	42268x10 ⁵	42268x10 ⁵	68174632		
Total	66	4316587000				

ตารางที่ 3.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลกระทบของ PW, VD and gender ที่มีต่อ unfinished surface

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
PW	1	20331.7	20518.5	20518.5	63.27	0.000
VD	1	1141.2	1059.4	1059.4	3.27	0.076
PW*VD	1	41.1	56.7	56.7	0.17	0.677
Gender	1	3605.3	3605.3	3605.3	11.12	0.001
Error	62	20108.0	20108.0	324.3		
Total	66	45227.3				

การวิเคราะห์ผลกระทบของ PW, VD and gender ที่มีต่อ MT/R ในตารางที่ 3.8 บ่งชี้ว่า MT/R จะเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเปลี่ยนขนาดความกว้างของเส้นทางเท่านั้น และทั้งเพศหญิงและชายจะได้รับผลกระทบไปในทางเดียวกันคือเมื่อขนาดเส้นทางใหญ่ขึ้นจะใช้เวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อ 1 แกวมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ก) เนื่องจากเมื่อขนาดเส้นทางใหญ่ขึ้น หมายถึงมีพื้นที่ด้านข้างที่ต้องทำความสะอาดมากขึ้น ในขณะที่รอยพ่นยังมีขนาดและอัตราการขยายตัวเท่าเดิม ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องรอให้รอยพ่นขยายตัวให้ครอบคลุมพื้นที่ด้านข้างของเส้นทางให้สะอาดทั้งหมดจึงค่อยเคลื่อนที่ต่อไป ทำให้ใช้เวลานานขึ้นเมื่อความกว้างของเส้นทางมากขึ้น โดยในรูปที่ 3.16 (ก) จะเห็นได้ว่าขนาด

เส้นทางที่เพิ่มจาก 15 พิกเซลเป็น 25 พิกเซล ทำให้เวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อ 1 แฉวเพิ่มขึ้นประมาณ 8 วินาทีสำหรับเพศหญิงและ 10-11 วินาทีสำหรับเพศชาย

ตารางที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลกระทบต่อปริมาณพื้นผิวเสียหายเลย ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของระยะการมอง หรือความกว้างของเส้นทาง ปริมาณของพื้นผิวเสียหายก็ยังไม่เปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าผู้ปฏิบัติงานจะทำการพ่นและประเมินความสะอาดได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังนั้นเมื่อขนาดเส้นทางเพิ่มขึ้นจึงต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้ความสะอาดที่ต้องการ

ในตารางที่ 3.10 ความกว้างของเส้นทางนั้นมีผลกระทบต่อพื้นผิวไม่สะอาด เมื่อพิจารณาประกอบกับรูปที่ 3.16 (ค) จะเห็นได้ว่า ความกว้างของเส้นทางขนาด 15 พิกเซล ทำให้เกิดพื้นผิวไม่สะอาดน้อยกว่าความกว้างของเส้นทางขนาด 25 พิกเซล ซึ่งเหตุผลเนื่องมาจากเมื่อกำหนดความกว้างของเส้นทางน้อยนั้นจะทำให้มีพื้นที่ทับซ้อนมากขึ้น (พื้นที่ทับซ้อนของรอยพ่นของสองเส้นทางที่ติดกัน, รูปที่ 2.14) ทำให้มีจุดที่เกิดการพ่นซ้ำในมากขึ้น ทำให้โอกาสเกิดพื้นผิวไม่สะอาดน้อยลง อย่างไรก็ตาม หากขนาดเส้นทางเล็กเกินไปจะทำให้ระยะทางในการพ่นรวมเพิ่มขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุและเวลารวมในการพ่น นอกจากนี้ พื้นผิวไม่สะอาดเป็นสมรรถนะเดียวที่ได้รับอิทธิพลของความแตกต่างระหว่างเพศ (ตารางที่ 3.10) ซึ่งหากพิจารณารูปที่ 3.16 (ค) และ (ง) จะพบว่าเพศชายนั้นมีปริมาณพื้นผิวไม่สะอาดน้อยกว่าเพศหญิง ซึ่งสอดคล้องกับ [129][130] ที่พบว่ามีความแตกต่างทางด้านสมรรถนะระหว่างเพศชายและหญิงในงานประเภทการควบคุมการเคลื่อนที่ (Spatial Movement Task) โดยผู้วิจัยสันนิษฐานว่าเพศชายสามารถประเมินความสะอาดบนพื้นผิวระหว่างปฏิบัติงานได้ดีกว่าเพศหญิง

แม้ว่าการทดลองนี้จะเป็นการนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ แต่จากตารางที่ 3.8-3.10 นั้นค่าความคลาดเคลื่อน (error terms) สามารถนำไปใช้อ้างอิงสำหรับระบบที่คล้ายคลึงกันได้ โดยค่าต่างๆเหล่านี้สามารถใช้เป็นขอบเขตขั้นต่ำสำหรับผู้ปฏิบัติงานที่มีความชำนาญ โดยปริมาณความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเหล่านี้ มีสาเหตุมาจากความแตกต่างระหว่างผู้ปฏิบัติงานที่แต่ละคนมีความสามารถ ลักษณะในการปฏิบัติงานที่แตกต่างกัน

3.4.1 การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยในงานพ่นทรายระยะไกล

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษามีอิทธิพลต่อความผันแปรของคุณภาพผิวในงานพ่นทรายระยะไกล ดังนั้นหากต้องการให้มีความผันแปรในผลลัพธ์ของระบบต่ำที่สุด จำเป็นต้องมีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับผู้ปฏิบัติงาน สำหรับในการทดลองนี้ มีการศึกษาสองปัจจัย ได้แก่ ระยะการมอง และ ความกว้างของเส้นทาง นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างของเพศและความสามารถรายบุคคลของผู้ปฏิบัติงานอีกด้วย เนื่องจากผลลัพธ์ของระบบนั้นมีมากกว่าหนึ่งดัชนีชี้วัด การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ดัชนีชี้วัดสมรรถนะทุกตัวมีค่าที่ดีที่สุดจึงมีความซับซ้อนมากกว่าระบบที่

สนใจดัชนีชี้วัดสมรรถนะเพียงหนึ่งตัว เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งอาจไม่เหมาะสมสำหรับดัชนีชี้วัดตัวอื่นๆ ซึ่งในสถานการณ์ดังกล่าวจำเป็นต้องแลกเปลี่ยนสมรรถนะที่ดีที่สุดของดัชนีชี้วัดสมรรถนะตัวใดตัวหนึ่ง เพื่อให้ได้มาซึ่งสมรรถนะที่น่าพึงพอใจสำหรับดัชนีชี้วัดทุกตัวเพื่อใช้สำหรับการออกแบบระบบ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้เทคนิคการหาคำตอบที่ดีแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multiple-objective Optimization) ซึ่งใช้สำหรับระบุคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ข้อกำหนดของระบบ เพื่อช่วยในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสม[131]

สำหรับตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการหาคำตอบที่ดีแบบหลายวัตถุประสงค์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.9-3.11

$$\text{Min } Y_k, \forall k \quad (3.9)$$

Subject to

$$L_i < X_i < U_i, \forall i \quad (3.10)$$

$$i=1,2,\dots,m; k=1,2,\dots,n \quad (3.11)$$

โดย Y_k คือวัตถุประสงค์ที่ k , X_i คือปัจจัยที่สนใจลำดับที่ i , L_i และ U_i คือขอบเขตล่างและขอบเขตบนของปัจจัยลำดับที่ i ตามลำดับ

สำหรับการทดลองนี้ ปัจจัยที่สนใจได้แก่ ระยะการมอง และ ความกว้างของเส้นทาง ส่วนวัตถุประสงค์ได้แก่ดัชนีชี้วัดสมรรถนะ คือ เวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อ 1 แกว (MT/R), พื้นผิวเสียหาย (Damaged Surface) และ พื้นผิวไม่สะอาด (Unfinished Surface) ดังนั้นฟังก์ชันจุดประสงค์และข้อกำหนดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.12-3.16

$$\text{Min: } MT/R \quad (3.12)$$

$$\text{Min: } \text{Damaged Surface} \quad (3.13)$$

$$\text{Min: } \text{Unfinished Surface} \quad (3.14)$$

Subject to:

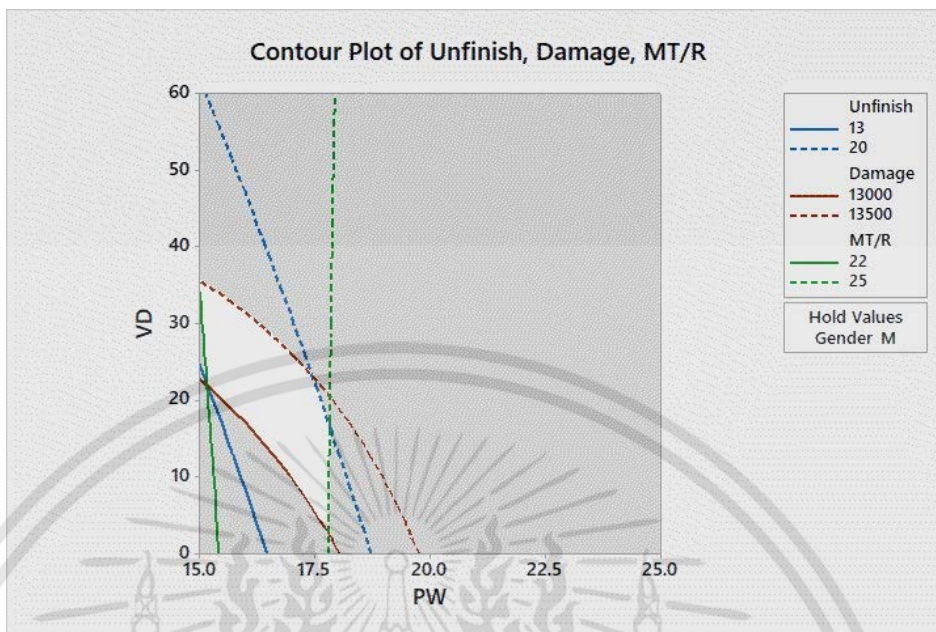
$$65 \text{ cm.} < \text{Viewing Distance} < 135 \text{ cm.} \quad (3.15)$$

$$5 \text{ pixels} < \text{Path width} < 25 \text{ pixels} \quad (3.16)$$

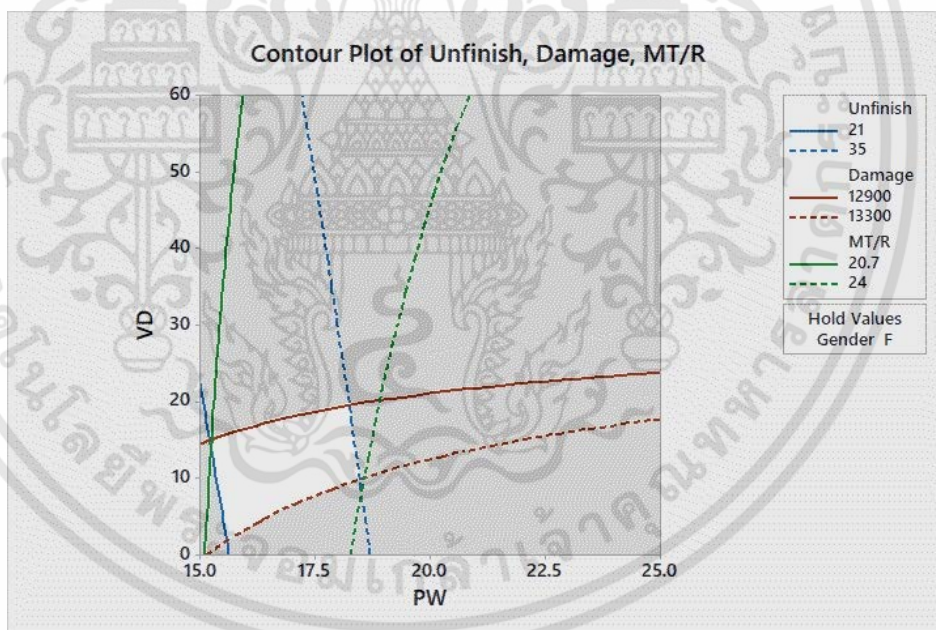
เนื่องจากมีความแตกต่างทางสมรรถนะระหว่างเพศชายและหญิง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของเพศชายกับเพศหญิงแยกกัน เนื่องจากข้อจำกัดด้านเพศนั้นไม่สามารถฝึกฝนหรือเปลี่ยนแปลงได้ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของทั้งเพศชายและหญิงแสดงโดยจุดตัดบนพื้นผิวในรูปที่ 3.17

จากพื้นผิวในรูปที่ 3.17 พื้นที่สว่าง (สีขาว) แสดงถึงพื้นที่ที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้พื้นผิวมีความผันแปรน้อยที่สุด สำหรับผู้เข้าร่วมการทดลองเพศชาย (รูปที่ 3.17 (ก)) ระยะการมองที่เหมาะสมอยู่ในช่วงประมาณ 680 – 1,000 มิลลิเมตร และ ความกว้างของเส้นทางอยู่ที่ประมาณ 15 – 17.5 พิกเซล โดยเมื่อปรับตั้งพารามิเตอร์ตามค่าดังกล่าวแล้ว จะได้ค่าสมรรถนะ พื้นผิวไม่สะอาด (unfinished surface) อยู่ในช่วง 13 – 20 หน่วยความเข้มแสงกำลังสอง (intensity unit²), พื้นผิวเสียหาย (damaged surface) อยู่ในช่วง 13,000 – 13,500 หน่วยความเข้มแสงกำลังสองและ เวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อ 1 แถว (MT/R) อยู่ในช่วง 22-25 วินาที สำหรับผู้เข้าร่วมการทดลองเพศชาย (รูปที่ 3.17 (ข)) ระยะการมองที่เหมาะสมอยู่ในช่วงประมาณ 680 – 830 มิลลิเมตร และ ความกว้างของเส้นทางอยู่ที่ประมาณ 15.5 – 18.5 พิกเซล โดยเมื่อปรับตั้งพารามิเตอร์ตามค่าดังกล่าวแล้ว จะได้ค่าสมรรถนะ พื้นผิวไม่สะอาดอยู่ในช่วง 21 – 35 หน่วยความเข้มแสงกำลังสอง, พื้นผิวเสียหายอยู่ในช่วง 12,900 – 13,300 หน่วยความเข้มแสงกำลังสอง และ เวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อ 1 แถวอยู่ในช่วง 20.7 – 24 วินาที

จะเห็นได้ว่าที่ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ค่าพื้นผิวไม่สะอาดที่มากที่สุดของผู้เข้าร่วมการทดลองเพศชายนั้นยังน้อยกว่าค่าที่น้อยที่สุดของผู้เข้าร่วมการทดลองเพศหญิง โดยที่มีค่าพื้นผิวเสียหาย และ เวลารวมในการเคลื่อนที่ต่อ 1 แถวอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น จากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่า ผู้ปฏิบัติงานเพศชายมีความเหมาะสมสำหรับงานพันทราจาระยะไกลมากกว่า อย่างไรก็ตาม ด้วยสมรรถนะที่ไม่แตกต่างกันมากเกินไป หากมีการฝึกฝนมากขึ้นเรื่อยๆ ผู้วิจัยเชื่อว่า ความชำนาญจากการฝึกฝนนั้นสามารถช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานเพศชายและเพศหญิงปฏิบัติงานได้อย่างเท่าเทียมกันในด้านสมรรถนะ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.17 เส้นกราฟบนพื้นผิวแสดงจุดตัดของเส้นดัชนีชีวิตสมรรถนะซึ่งบอกถึงพื้นที่เหมาะสมที่สุดของค่าพารามิเตอร์สำหรับ (ก) ผู้เข้าร่วมการทดลองเพศชาย (ข) ผู้เข้าร่วมการทดลองเพศหญิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 แนวทางการออกแบบสำหรับระบบพ่นทรายระยะไกลและระบบที่คล้ายคลึงกัน

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้น แนวทางการออกแบบระบบสำหรับที่คล้ายคลึงกันสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความกว้างของเส้นทางนั้นควรจะกำหนดอย่างระมัดระวังเนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีผลต่อดัชนีชี้วัดสมรรถนะแต่ละตัวในทางที่แตกต่างกัน
2. ระยะเวลามองในช่วง 650 – 1,350 มม. นั้นไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม หากใช้ระยะเวลามองที่อยู่นอกเหนือจากช่วงดังกล่าวแล้ว อาจก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญได้
3. ความแตกต่างระหว่างเพศมีผลต่อสมรรถนะของระบบ ดังนั้น เพศจึงควรเป็นปัจจัยที่ถูกพิจารณาในการออกแบบระบบ และ แต่ละเพศควรได้รับการฝึกฝนที่แตกต่างกัน

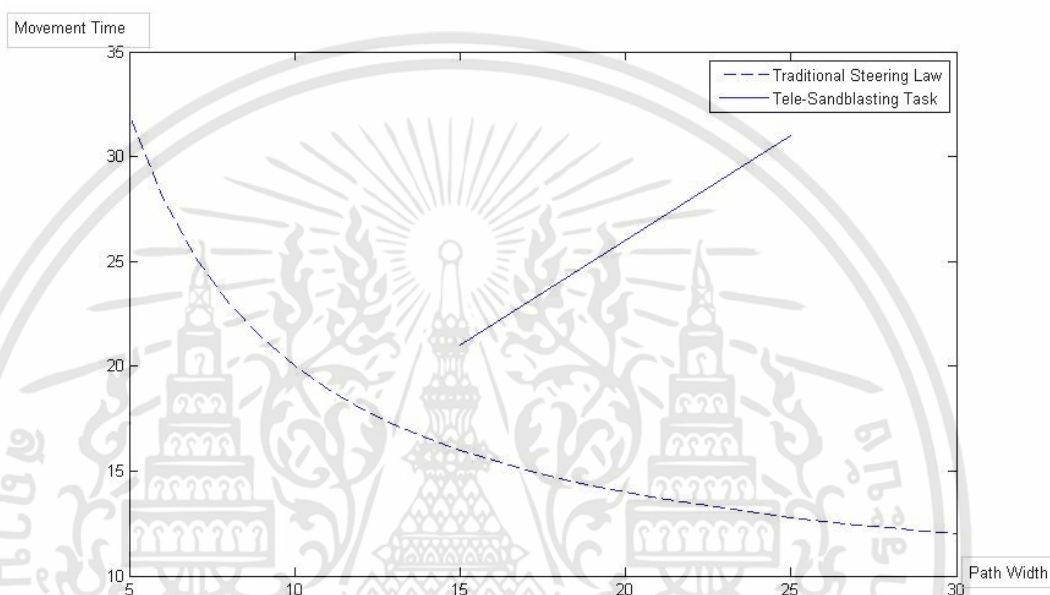
3.4.3 คุณลักษณะพิเศษของเวลารวมในการเคลื่อนที่ในงานพ่นทรายระยะไกล

จากผลการทดลอง ผู้วิจัยได้พบความสัมพันธ์ระหว่างเวลารวมในการเคลื่อนที่ (Movement Time) กับความกว้างของเส้นทาง (Path Width) ที่มีลักษณะเฉพาะตัวของงานพ่นทรายระยะไกล

โดยทั่วไป ความสัมพันธ์ระหว่างเวลารวมในการเคลื่อนที่ (Movement Time) กับความกว้างของเส้นทาง (Path Width) สำหรับงานควบคุมการเคลื่อนที่ในระนาบสองมิติ (Steering Task) นั้น สามารถอธิบายได้โดย Steering Law [29] ซึ่งอธิบายไว้ว่า การควบคุมการเคลื่อนที่บนเส้นทางที่ความกว้างน้อยนั้นจะใช้เวลามากกว่าการควบคุมการเคลื่อนที่บนเส้นทางที่ความกว้างมาก เมื่อเทียบจากระยะทางที่เท่ากัน โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลารวมในการเคลื่อนที่กับความกว้างของเส้นทางตาม Steering Law แสดงได้ดังเส้นประในรูปที่ 3.18

สำหรับงานพ่นทรายระยะไกลนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างเวลารวมในการเคลื่อนที่กับความกว้างของเส้นทางจะมีลักษณะที่แตกต่างจาก Steering Law เนื่องจากเมื่อเส้นทางมีความกว้างมากขึ้น หมายถึงพื้นที่ที่ต้องทำความระมัดระวังมากขึ้น ทำให้ต้องใช้เวลาในการพ่น ฝน จุดๆหนึ่งนานขึ้น ทำให้เส้นกราฟความสัมพันธ์เป็นไปในทางตรงกันข้ามกับ Steering Law ดังเส้นตรงที่แสดงในรูปที่ 3.18 อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยยังไม่ได้ทำการสังเกตการณ์การพ่นที่มีขนาดเส้นทางเล็กกว่า 15 ฟุตเซล ซึ่งผู้วิจัยสันนิษฐานว่า เมื่อขนาดเส้นทางเล็กมาก จนมีขนาดเข้าใกล้วัตถุที่เคลื่อนที่อยู่บนเส้นทาง (ในการทดลองนี้คือหัวพ่นขนาด 8 ฟุตเซล) อาจทำให้เวลารวมในการเคลื่อนที่มากขึ้นเนื่องจากการควบคุมวัตถุให้อยู่ในเส้นทางยากขึ้น ทำให้เคลื่อนที่ได้ช้าลง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการกำหนดขนาดเส้นทางที่เล็กมากในงานพ่นทรายระยะไกลทำ

ให้เพิ่มระยะทางรวมในการปฏิบัติงาน และมีพื้นที่ทับซ้อนมากขึ้น (ทำให้ต้องพ่นจุดเดิมที่สะอาดแล้ว ทั้งยังก่อให้เกิดพื้นผิวเสียหายมากขึ้น) ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิต ในงานพ่นทรายจึงไม่มีการกำหนดเส้นทางในลักษณะนี้ อีกทั้งการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลารวมในการเคลื่อนที่กับความกว้างของเส้นทางนั้นอยู่นอกเหนือขอบเขตของการศึกษาความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกล ดังนั้น การทดลองในส่วนนี้จึงยังอยู่ในแผนการทดลองในอนาคต



รูปที่ 3.18 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลารวมในการเคลื่อนที่ (Movement Time) กับความกว้างของเส้นทาง (Path Width) ของ การควบคุมวัตถุไปตามเส้นทางโดยทั่วไป (Steering Law) และงานพ่นทรายระยะไกล

3.4.4 ปัญหาทางด้านพิกัดของหัวพ่นในระนาบสองมิติ

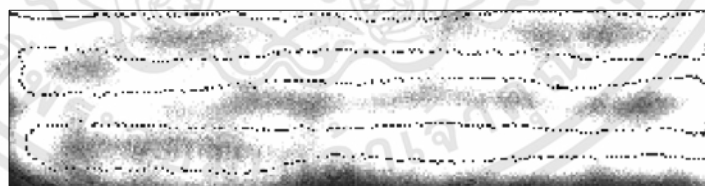
ในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาทำความเข้าใจระบบพ่นทรายระยะไกล โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิว ดัชนีชี้วัดสมรรถนะที่สนใจได้แก่เวลารวมในการเคลื่อนที่ พื้นผิวเสียหาย และพื้นผิวไม่สะอาด ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความเรียบของพื้นผิวหลังจากการพ่น อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาที่ผ่านมา แม้ว่าวิธีการที่นำเสนอจะสามารถลดความผันแปรด้านความเรียบของพื้นผิว แต่จากการวิเคราะห์ข้อมูลเส้นทางการบังคับอุปกรณ์ควบคุมหลักของผู้เข้าร่วมการทดลองพบว่า การควบคุมหัวพ่นให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ต้องการนั้นมีความคลาดเคลื่อนของพิกัดในระนาบสองมิติ (ระนาบ $x-y$) โดยความคลาดเคลื่อนของพิกัดนี้สามารถส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิวงานอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 3.19 (ก) การพ่นทำความสะอาดพื้นผิวไปตามเส้นทางตรงตามแนวแกน x นั้น

พิกัดของหัวพ่นที่ต้องการขณะเคลื่อนที่คือตามแนวเส้นประกึ่งกลางของเส้นทาง (เส้นที่บแทนขอบเขตของเส้นทาง) แต่ผลจากการทดลองปรากฏว่า ผู้เข้าร่วมการทดลองไม่สามารถบังคับหัวพ่นให้เคลื่อนที่ไปตามพิกัดกึ่งกลางของเส้นทางได้อย่างแม่นยำ (มีความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวแกน y ดังจะเห็นได้จากจุดประสีดำแสดงในรูปที่ 3.19(ข)) โดยความคลาดเคลื่อนของพิกัดนี้ทำให้จุดศูนย์กลางของรอยพ่นซึ่งเป็นจุดที่มีความหนาแน่นของวัสดุพ่นมากที่สุดไม่ได้อยู่กึ่งกลางของเส้นทาง แต่เข้าไปใกล้ขอบเส้นทางข้างใดข้างหนึ่งและออกห่างจากขอบเส้นทางอีกข้างหนึ่ง ทำให้บริเวณนั้นมีความเข้มของรอยพ่นสูงที่ขอบเส้นทางด้านหนึ่งและอีกข้างหนึ่งของเส้นทางอาจหลงเหลือสิ่งสกปรกอยู่บนพื้นผิวดังรูปที่ 3.19 (ข) ดังนั้น ถึงแม้ผู้ปฏิบัติงานจะสามารถควบคุมปริมาณ damaged surface และ unfinished surface ได้สม่ำเสมอ แต่หากไม่สามารถควบคุมความแม่นยำของพิกัดหัวพ่นได้อย่างดีก็สามารถส่งผลให้คุณภาพผิวไม่ได้มาตรฐานตามที่ต้องการ

ดังนั้น ในบทต่อไป ผู้วิจัยจะทำการศึกษาความผันแปรทางด้านพิกัดของหัวพ่นในระนาบสองมิติ และนำเสนอวิธีการลดความผันแปรดังกล่าว ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพผิวโดยรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.19 ปัญหาทางด้านการควบคุมพิกัดของหัวพ่น (ก) พื้นที่ที่ทำการพ่นที่มีเส้นทางเดียว เส้นกึ่งกลางแทนพิกัดที่หัวพ่นควรเคลื่อนที่ผ่านระหว่างทำการพ่น (ข) ผิวงานที่ได้จากการทดลอง (จุดประสีดำคือพิกัดการเคลื่อนที่ของหัวพ่น แสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของพิกัดหัวพ่นในแนวแกน y)

3.5 หมายเหตุ

จากการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ในงานพันทราเยระยะไกล พบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษามีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ โดยความกว้างของเส้นทางมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมรรถนะ ในขณะที่ระยะการมองทั้งสองระดับ ได้แก่ 650 มม. (ประมาณ 25 นิ้ว) [80] และ 1,350 มม. [78] แม้จะสร้างความแตกต่างให้กับสมรรถนะของระบบอยู่บ้าง แต่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ระยะการมองที่นอกเหนือจากช่วงที่ทำการศึกษาอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะอย่างมีนัยสำคัญได้ แต่ระยะดังกล่าวอาจไม่เป็นที่นิยมในการปฏิบัติงานจริง ผู้วิจัยจึงไม่ได้ทำการศึกษาช่วงระยะการมองดังกล่าว

นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างเพศของผู้ปฏิบัติงานยังส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบเช่นกัน โดยจากการศึกษาพบว่าผู้ปฏิบัติงานเพศชายสามารถกำจัดสิ่งสกปรกบนพื้นผิวได้ดีกว่าผู้ปฏิบัติงานเพศหญิง แต่ไม่มีนัยสำคัญในด้านเวลารวมในการเคลื่อนที่ จากผลการทดลองเหล่านี้ ผู้วิจัยได้กำหนดระดับปัจจัยที่ทำให้ความผันแปรของคุณภาพผิวต่ำที่สุด ซึ่งข้อมูลและวิธีการเหล่านี้เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบระบบภายภาคหน้า

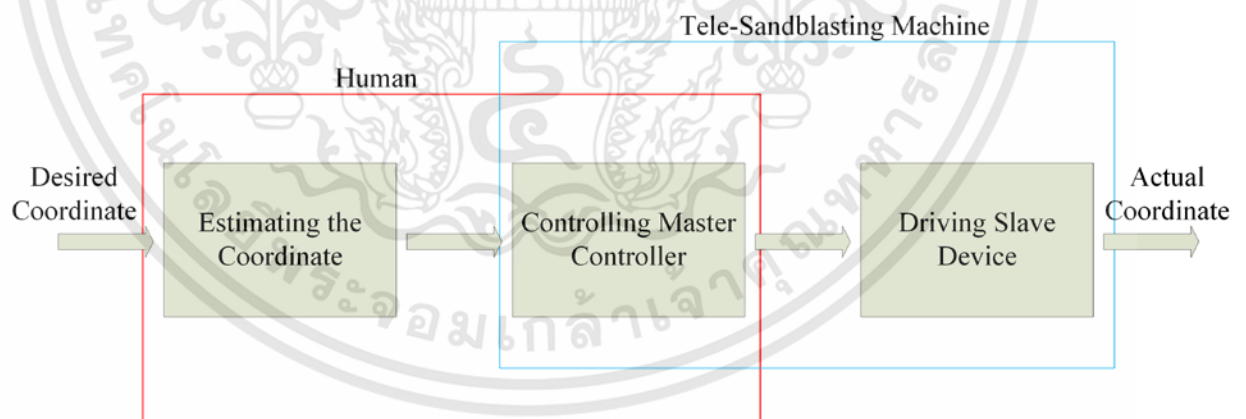
ผู้วิจัยยังได้ค้นพบคุณลักษณะพิเศษของเวลารวมในการเคลื่อนที่ของงานพันทราเยระยะไกลซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎสตีริง (Steering Law) ซึ่งเป็นกฎทั่วไปที่ใช้อธิบายเวลาในการเคลื่อนที่ของการบังคับอุปกรณ์ไปตามเส้นทาง ซึ่งเป็นช่องว่างงานวิจัยที่สามารถทำการศึกษาในอนาคต นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ชี้ให้เห็นถึงปัญหาความผันแปรด้านพิกัดในระนาบสองมิติของงานพันทราเยระยะไกล ซึ่งเป็นปัญหาหลักประการหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ของระบบ โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและนำเสนอวิธีลดความผันแปรในบทต่อไป

บทที่ 4

การลดความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกลแบบสองสถานี สำหรับสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล

ดังที่ได้กล่าวในท้ายบทที่ 3 ถึงปัญหาด้านความคลาดเคลื่อนของพิกัดในระนาบสองมิติในการควบคุมหัวพ่นซึ่งเป็นปัจจัยหลักอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพผิว ดังนั้น ในบทที่ 4 จึงเป็นการตรวจสอบความผันแปรและนำเสนอวิธีการลดความผันแปรของพิกัดของหัวพ่นในระนาบสองมิติ อย่างไรก็ตาม การลดความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกลนั้น สิ่งสำคัญคือการระบุแหล่งที่มาของความผันแปรในระบบ

สำหรับระบบพ่นทรายระยะไกลนั้น สามารถพิจารณาเป็นระบบการผลิตที่มีกระบวนการดังนี้ (เนื่องจาก ผู้วิจัยสนใจในพิกัดการเคลื่อนที่ของหัวพ่นในระนาบสองมิติ ดังนั้นระบบที่พิจารณาก็จะเป็นกระบวนการการควบคุมพิกัดของหัวพ่น) เมื่อเริ่มกระบวนการ ผู้ปฏิบัติงานจะต้องประมาณพิกัดที่อยู่กึ่งกลางเส้นทางที่จะควบคุมหัวพ่นให้เคลื่อนที่ จากนั้นผู้ปฏิบัติงานจะทำการบังคับอุปกรณ์ควบคุมหลักเพื่อให้หัวพ่นเคลื่อนที่ไปตามพิกัดที่ได้ประมาณไว้ จากนั้นเครื่องพ่นทรายระยะไกลจะคำนวณพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลัก แล้วส่งพิกัดนี้ไปยังอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม เพื่อให้เคลื่อนที่ไปตามพิกัดที่ต้องการ สำหรับอินพุตของระบบได้แก่ในขณะพิกัดที่ต้องการในอุดมคติ (กึ่งกลางขอเส้นทาง) และเอาต์พุตของระบบได้แก่พิกัดที่หัวพ่นเคลื่อนที่ไป ดังแสดงในรูปที่ 4.1

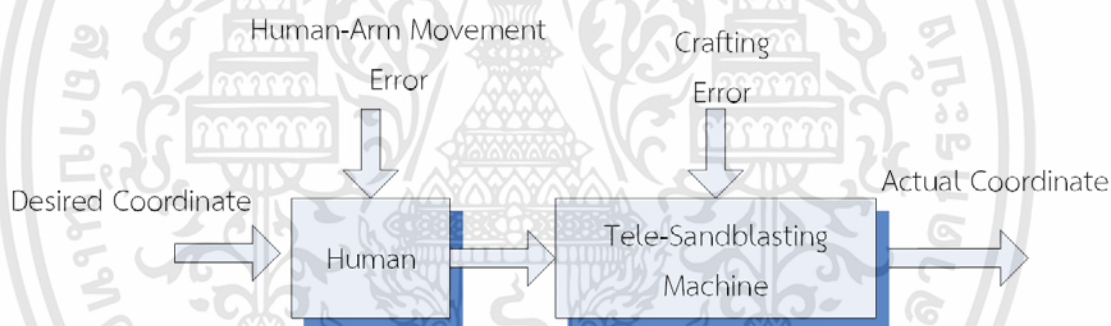


รูปที่ 4.1 กระบวนการพ่นทรายระยะไกล

4.1 การวิเคราะห์ความผันแปรแบบสองสถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโครงสร้างของกระบวนการพ่นทรายระยะไกลในรูปที่ 3.1 ผู้วิจัยจำแนกระบบเป็นระบบแบบหลายสถานี (Multi-Stage System) เพื่อทำการจำแนกความผันแปรโดยรวมของระบบตามแหล่งที่มาของความผันแปรนั้นๆ ให้ง่ายต่อการพิจารณาและอิทธิพลของแหล่งความผันแปรอื่นๆที่ไม่เกี่ยวข้อง สำหรับระบบพ่นทรายระยะไกลนั้นสามารถระบุแหล่งที่มาของความผันแปรของพิกัดของหัวพ่นในระนาบสองมิติได้สองแหล่งใหญ่ๆคือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแขนของผู้ปฏิบัติงาน และความคลาดเคลื่อนในการระบุพิกัดของเครื่องพ่นทรายระยะไกล (ความผิดพลาดในขั้นตอนการผลิตและประกอบอุปกรณ์ควบคุมหลัก) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงจำแนกระบบพ่นทรายระยะไกลได้เป็นสองสถานี คือ สถานีผู้ปฏิบัติงาน และ สถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล โดยในสถานีผู้ปฏิบัติงานนั้นจะมีแหล่งที่มาของความผันแปร คือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแขนของผู้ปฏิบัติงาน และ ในสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกลนั้นมีแหล่งที่มาของความผันแปรคือความผิดพลาดในขั้นตอนการผลิตและประกอบอุปกรณ์ควบคุมหลัก ดังรูปที่ 4.2

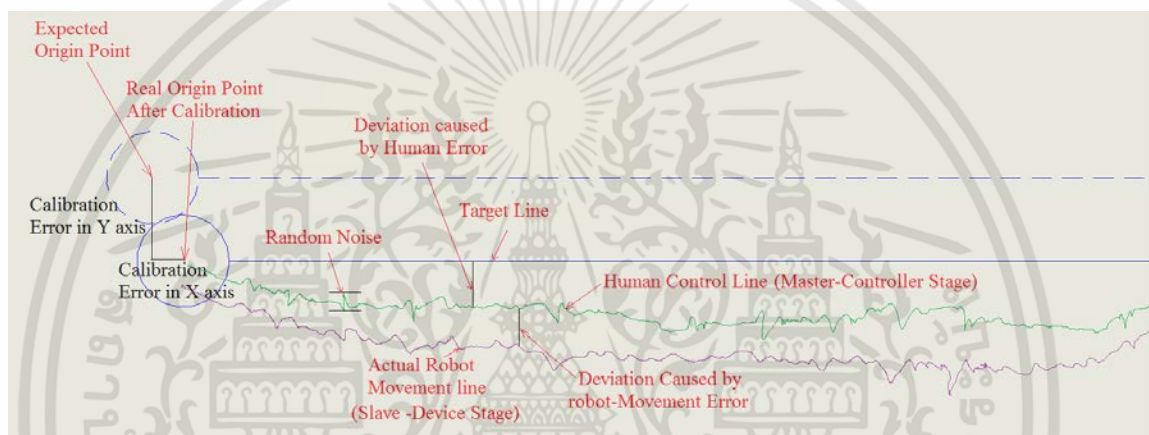


รูปที่ 4.2 ระบบพ่นทรายระยะไกลจำแนกตามสถานี

สำหรับสถานีผู้ปฏิบัติงานนั้น การปฏิบัติงานเกิดขึ้นที่อุปกรณ์ควบคุมหลัก โดยผู้ปฏิบัติงานจะทำการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักไปตามพิกัดที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.3 โดยความผันแปรที่เกิดขึ้นที่สถานีนี้เกิดจากคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงานให้เคลื่อนที่ไปตามพิกัดที่ต้องการ ซึ่งผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำ โดยค่าพิกัดนั้นเป็นพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักที่ถูกควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงาน

ในส่วนของสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล จะเป็นการนำพิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้ปฏิบัติงานผ่านอุปกรณ์ควบคุมหลักไปใช้เป็นพิกัดเป้าหมายเพื่อสั่งการให้อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเคลื่อนไปหาพิกัดนั้นๆ โดยความผันแปรที่เกิดในสถานีนี้มีแหล่งที่มาจากอุปกรณ์ควบคุมหลัก โดยอุปกรณ์ควบคุมหลักที่ใช้ใน

งานวิจัยนี้เป็นหุ่นยนต์แบบขนานที่เคลื่อนที่ในระนาบสองมิติ (รูปที่ 2.3) ที่ถูกสร้างขึ้นในห้องทดลอง ซึ่งระยะของแขน ตำแหน่งการเจาะรูเพื่อเชื่อมต่อแขน อาจมีความคลาดเคลื่อนจากระยะที่ใช้ในการออกแบบแต่ในการเขียนโปรแกรมคำนวณพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักนั้น ยังใช้ระยะที่ใช้ในการออกแบบ ดังนั้นพิกัดที่อุปกรณ์ควบคุมหลักเคลื่อนที่ไปจริงกับระยะที่คำนวณได้จึงมีความคลาดเคลื่อน ส่งผลให้การระบุพิกัดขาดความแม่นยำ นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนจากเครื่องมือวัดซึ่งได้แก่เอนโคเดอร์ (Encoder) ทำให้บางครั้งพิกัดที่คำนวณได้มีความผิดพลาดไป รูปที่ 4.3 แสดงผลกระทบจากความผันแปรจากสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกลและสถานีผู้ปฏิบัติงานที่มีต่อพิกัดของหัวพ่น



รูปที่ 4.3 ผลกระทบจากความผันแปรในระบบที่มีต่อพิกัดของหัวพ่น

สำหรับการวิเคราะห์ความผันแปรแบบหลายสถานี ผู้วิจัยจะใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่เป็นแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space Model) (Jin and Shi, 1999) ดังแสดงในสมการที่ 2.5 และ 2.6 ในการอธิบายความผันแปรในระบบ โดยสมการดังกล่าวจำแนกแหล่งความผันแปรไว้สี่ชนิด ได้แก่ ความผันแปรหลัก ความผันแปรจากการปรับตั้งค่า ความผันแปรจากความผิดพลาดในกระบวนการที่คาดเดาไม่ได้ และความผันแปรจากสัญญาณรบกวนของเครื่องมือวัด อย่างไรก็ตาม สมการที่ 2.5 และ 2.6 นั้นถูกออกแบบมาเพื่ออธิบายความผันแปรในสายการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่มีการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง ในขณะที่ระบบพ่นทรายระยะไกลนั้นเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามในการใช้ระบบเสมือนที่สร้างบนคอมพิวเตอร์ กระบวนการแบบต่อเนื่องจะถูกแบ่งเป็นคาบเวลาเพื่อให้สามารถเก็บข้อมูล ณ เวลา t ใดๆได้ (รูปที่ 4.4) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการประยุกต์สมการที่ 2.5 และ 2.6 เพื่อให้เหมาะสมกับความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกล ณ เวลา t ใดๆ ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$y'_k = A'_{k-1}y'_{k-1} + B'_k u'_k + w'_k \quad (4.1)$$

$$z'_k = C'_k y'_k + m'_k, \quad k=1,2 \quad (4.2)$$

โดย y'_k คือเวกเตอร์พิกัดของหัวฟันในแกน y ณ เวลา t และสถานี k , A'_{k-1} แมทริกซ์การแปลงพิกัดจากสถานี $k-1$ มาสู่สถานี k , u'_k คือจุดอ้างอิงที่คาดหวังของสถานี k ณ เวลา t , B'_k แมทริกซ์ของความคลาดเคลื่อนจากการปรับตั้งค่า (Calibration Error) ของ สถานี k ณ เวลา t , w'_k คือความคลาดเคลื่อนในระบบที่ไม่สามารถคาดเดาได้, C'_k คือแมทริกซ์การแปลงค่า y'_k ไปสู่โดเมนของหน่วยการวัดที่สนใจซึ่งแทนด้วย z'_k , m'_k คือสัญญาณรบกวนในการวัด

สำหรับแต่ละสถานีของระบบพ่นทรายระยะไกลสามารถกำหนดตัวแปรในสมการ 4.1 และ 4.2 ได้ดังนี้

สถานีผู้ปฏิบัติงาน:

y'_1 = เวกเตอร์พิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักซึ่งเป็นพิกัดที่ควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงาน

y'_0 = เวกเตอร์พิกัดของหัวฟันที่คาดหวัง

A'_0 = แมทริกซ์คุณลักษณะที่แปลงพิกัดของอินพุทของสถานีผู้ปฏิบัติงานไปเป็นพิกัดเอาต์พุทของสถานีผู้ปฏิบัติงานที่ต้องการ

B'_1 = แมทริกซ์การแปลงความคลาดเคลื่อนจากการปรับตั้งค่า (Calibration Error) หรืออธิบายความแม่นยำของผู้ปฏิบัติงาน

u'_1 = เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนที่วัดได้จากผู้ปฏิบัติงาน

* $B'_1 u'_1$ คือแมทริกซ์อธิบายความแม่นยำของผู้ปฏิบัติงาน

w'_1 = เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนในระบบที่ไม่สามารถคาดเดาได้ (Unmodeled Error) หรืออธิบายความเที่ยงตรงของผู้ปฏิบัติงาน

z'_1 = เวกเตอร์พิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักที่ได้จากการวัด

C'_1 = แมทริกซ์ที่แปลงเวกเตอร์พิกัด y'_1 ให้อยู่ในหน่วยการวัดที่ต้องการ

m'_1 = ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสัญญาณรบกวนในการวัด

สถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล:

y_2^t = เวกเตอร์พิกัดของหัวพ่น (เอาท์พุทของระบบ)

y_1^t = เวกเตอร์พิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักที่ถูกควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงาน

A_1^t = แมทริกซ์คุณลักษณะที่แปลงพิกัดของอินพุทของสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกลไปเป็นพิกัดเอาท์พุทของสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกลที่ต้องการ

B_2^t = แมทริกซ์การแปลงความคลาดเคลื่อนจากการปรับตั้งค่า (Calibration Error)

u_2^t = เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนที่วัดได้จากเครื่องพ่นทรายระยะไกล

* $B_2^t u_2^t$ คือแมทริกซ์อธิบายความแม่นยำของเครื่องพ่นทรายระยะไกล

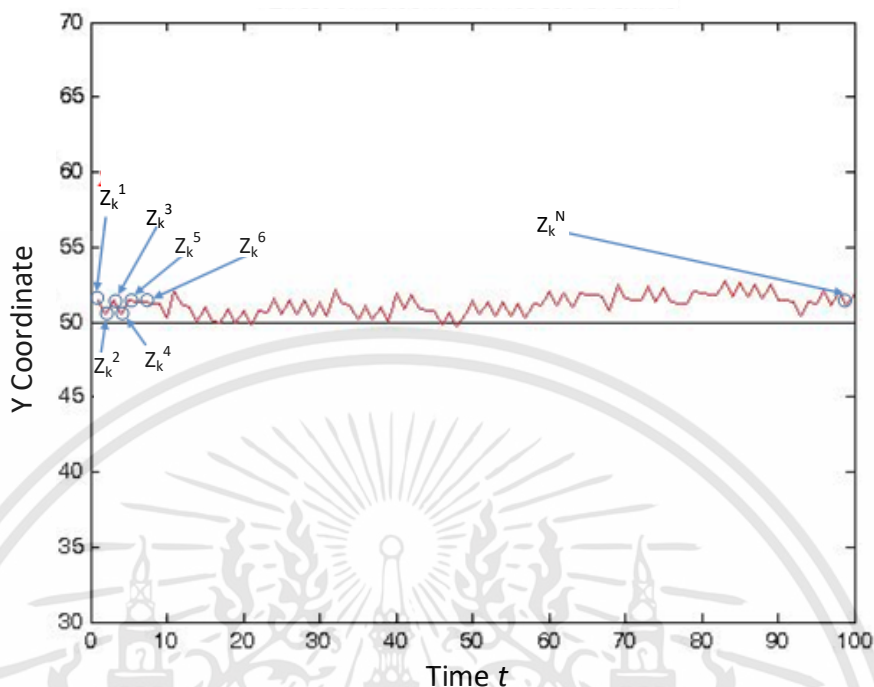
w_2^t = เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนในระบบที่ไม่สามารถคาดเดาได้ (Unmodeled Error) หรืออธิบายความเที่ยงตรงของเครื่องพ่นทรายระยะไกล

z_2^t = เวกเตอร์พิกัดของหัวพ่นที่ได้จากการวัด

C_2^t = แมทริกซ์ที่แปลงเวกเตอร์พิกัด y_2^t ให้อยู่ในหน่วยการวัดที่ต้องการ

m_2^t = ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสัญญาณรบกวนในการวัด

พิจารณารูปที่ 4.2 แม้ว่าสถานีผู้ปฏิบัติงานมาก่อนสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกลก็ตาม แต่ในการปฏิบัติงานจริง ต้องมีการเตรียมเครื่องพ่นทรายให้พร้อมก่อนการปฏิบัติงาน ซึ่งรวมไปถึงการลดความผันแปรหรือคลาดเคลื่อนของการระบุพิกัดของตัวเครื่องด้วย ดังนั้น ในบทที่ 4 จะเป็นการนำเสนอวิธีลดความผันแปรในการระบุพิกัดของเครื่องพ่นทรายระยะไกล เพื่อให้การระบุพิกัดมีความแม่นยำมากขึ้น จากนั้นจึงทำการศึกษาความผันแปรที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงานซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 5



รูปที่ 4.4 แสดงพิกัดของหัวพันซึ่งเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous-time Process) ซึ่งมีการเก็บข้อมูล (วัดพิกัด) ทุกๆคาบเวลา t โดย z_k^t คือพิกัดในแกน y ของสถานี k ณ เวลา t

4.2 การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมหลักและอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม

4.2.1 การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมหลัก

หุ่นยนต์แบบขนานที่ใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมหลักในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้เคลื่อนที่ในระนาบสองมิติ โดยหุ่นยนต์จะมีสองแขน แขนละสองข้อต่อ ทั้งสองแขนจะเชื่อมต่อกันที่จุดปลายแขน ที่จุดโคนแขนของทั้งสองแขนจะมีเอนโคเดอร์เพื่อวัดองศาการหมุนที่จุดโคนแขน

ในการออกแบบจะเริ่มจากการกำหนดพื้นที่ปฏิบัติงานของหุ่นยนต์ (Workspace) จากนั้นจึงคำนวณหาขนาดความยาวของแขนอื่นๆ โดยการคำนวณสามารถทำได้ดังนี้ (Huang et al., 2004)

กำหนดให้พื้นที่ปฏิบัติงานมีความสูง h และความกว้าง b ดังรูปที่ 4.5 ระยะจากจุดอ้างอิง, O (Origin Point) ถึงจุดกึ่งกลางของพื้นที่ปฏิบัติงานซึ่งแทนด้วยตัวแปร H สามารถคำนวณได้ดังสมการที่

4.3

$$H=l_2+\frac{h}{2}-l_1\sin\theta_u \quad (4.3)$$

กำหนดให้

$$A=-2(H+\frac{h}{2})l_1 \quad (4.4)$$

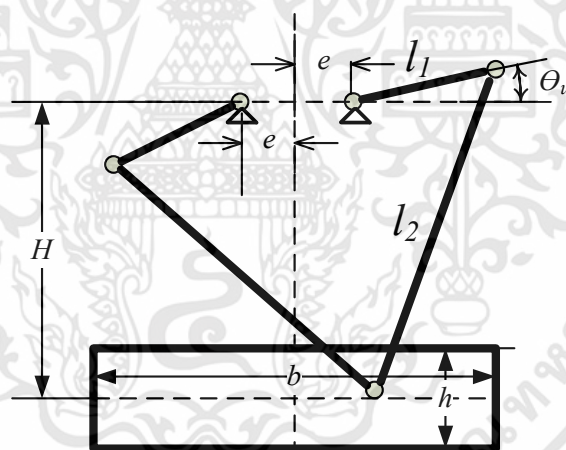
$$B=2(\frac{b}{2}+e)l_1 \quad (4.5)$$

$$C=(\frac{b}{2}+e)^2+(H+\frac{h}{2})^2+l_1^2-l_2^2 \quad (4.6)$$

สำหรับระยะขอบเขตล่าง (ระยะไกลที่สุดที่แขนหุ่นยนต์ยื่นออกไปได้) จะเป็นระยะที่ทำให้สมการที่ 4.7 เป็นจริง

$$A\sin(\theta-\theta_u)+B\cos(\theta-\theta_u)+C=0 \quad (4.7)$$

จากสมการที่ 4.3 -4.7 เมื่อกำหนด h และ b จะสามารถคำนวณหา l_1 , l_2 , e และ H ได้



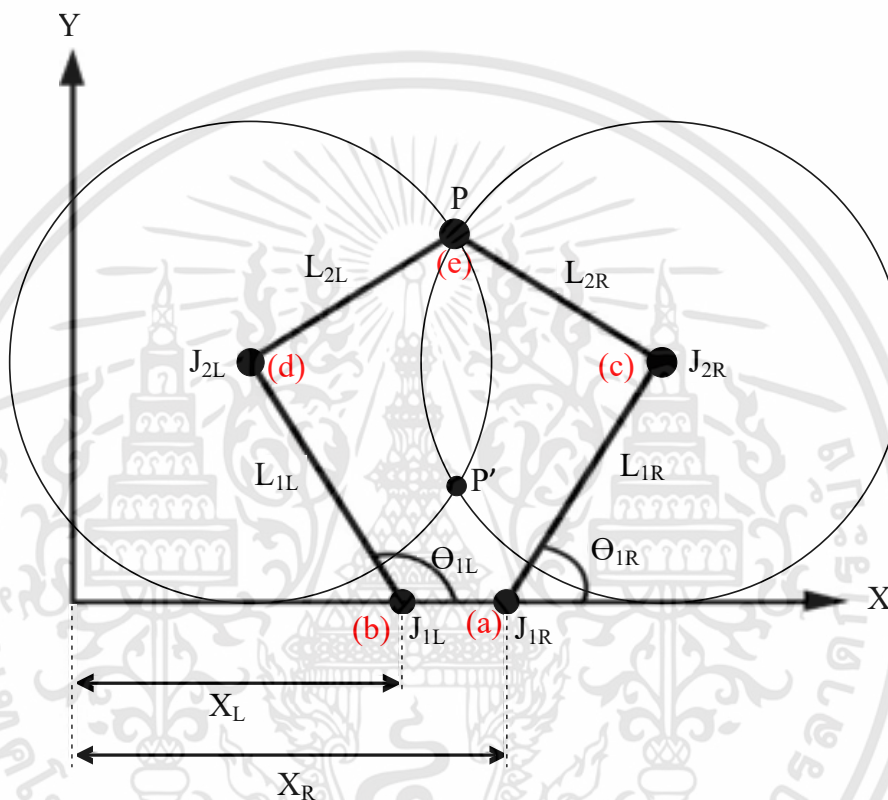
รูปที่ 4.5 ตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบแขนหุ่นยนต์แบบขนานในระนาบสองมิติ

สำหรับขนาดพื้นที่ปฏิบัติงานในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีขนาด 900 มม. × 450 มม. ซึ่งเป็นขนาดที่แขนผู้ปฏิบัติงานสามารถเคลื่อนที่ได้ครอบคลุมพื้นที่ จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.3-4.7 ผู้วิจัยกำหนดให้โคนแขนทั้งสองมีระยะห่างกัน 200 มม. ($e = 100$ มม.) ระยะแขน $l_1 = 485$ มม. ระยะแขน $l_2 = 515$ มม. โดยระยะดังกล่าวสามารถครอบคลุมพื้นที่ปฏิบัติงานขนาด 900 มม. × 450 มม. ได้ (หมายเหตุ ระยะที่กำหนดนั้นครอบคลุมพื้นที่มากกว่าพื้นที่ปฏิบัติงานเล็กน้อย ซึ่งเป็นระยะเผื่อเผื่อไม่ให้แขนกาง

ออกมาสู่ระยะซึ่งอาจทำให้ข้อต่อระหว่างแขน I_1 และ I_2 พับเข้าในในมุมกลับ (β_1 หรือ β_2 มีค่ามากกว่า 180°) ส่งผลให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดขัด)

ในด้านการคำนวณตำแหน่งของจุดปลายแขนหุ่นยนต์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

สมมติให้หุ่นยนต์แบบขนานในรูปที่ 4.6 ขนาดต่างๆดังตัวแปรที่กำกับในรูป ตำแหน่งของจุดต่างๆของหุ่นยนต์สามารถคำนวณได้โดยสมการ 4.8 ถึง 4.18



รูปที่ 4.6 โครงสร้างและตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบขนาน

กำหนดให้ พิกัด J_{1L} ในแกน x , $J_{1Lx} = x_L$ (4.8)

พิกัด J_{1R} ในแกน x , $J_{1Rx} = x_R$ (4.9)

พิกัด J_{1L} ในแกน y , $J_{1Ly} = 0$ (4.10)

พิกัด J_{1R} ในแกน y , $J_{1Ry} = 0$ (4.11)

พิกัด J_{2L} ในแกน x , $J_{2Lx} = x_L + L_{1L} \cos \theta_{1L}$ (4.12)

พิกัด J_{2L} ในแกน y , $J_{2Ly} = L_{1L} \sin \theta_{1L}$ (4.13)

พิกัด J_{2R} ในแกน x , $J_{2Rx} = x_R + L_{1R} \cos \theta_{1R}$ (4.14)

พิกัด J_{2R} ในแกน y , $J_{2Ry} = L_{1R} \sin \theta_{1R}$ (4.15)

จากทฤษฎีของสมการวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางที่พิกัด (h, k) และมีรัศมี R หน่วย จะสามารถคำนวณค่า R ได้จากสมการ (2.9)

$$R^2 = (x - h)^2 + (y - k)^2 \quad (4.16)$$

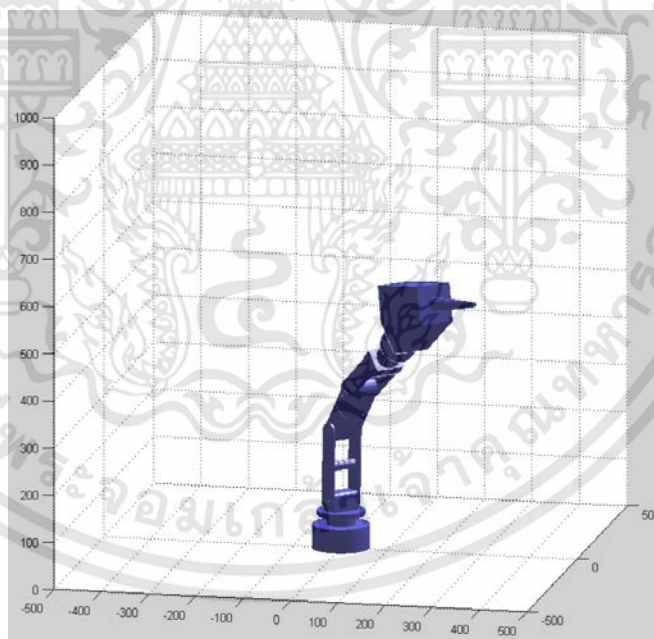
ดังนั้น

$$L_{2L}^2 = (x - J_{2Lx})^2 + (y - J_{2Ly})^2 \quad (4.17)$$

$$L_{2R}^2 = (x - J_{2Rx})^2 + (y - J_{2Ry})^2 \quad (4.18)$$

ขั้นตอนต่อมาทำการจัดรูปสมการ 4.17 และ 4.18 ให้อยู่ในเทอมของ θ โดยทำการแทนค่าของสมการ 4.12 ถึง 4.15 ลงในสมการ 4.17 และ 4.18 จากนั้นกำหนดสมการ 4.17 เท่ากับ 4.18 เพื่อคำนวณหาสมการเส้นตรงที่ตัดผ่านจุด P และ P' ดังรูป 4.5 โดยจุดที่จะนำมาใช้เป็นพิกัดของปลายแขนหุ่นยนต์คือจุด P

4.2.2 การออกแบบอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม



รูปที่ 4.7 หุ่นยนต์แขนกล 6 แกน

นอกจากหุ่นยนต์แบบขนานที่ใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมหลักแล้ว ยังมีหุ่นยนต์ที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามอีกด้วย ดังนั้นในระบบเสมือน การเคลื่อนที่ของหัวพันที่ติดอยู่กับปลายของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามจึงต้องทำการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่เป็นอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามด้วย สำหรับหุ่นยนต์ที่ถูก

เลือกมาใช้เป็นอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามในงานพ่นทรายระยะไกลนั้นจะเป็นหุ่นยนต์แขนกลแบบ 6 แกนดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการเคลื่อนที่สูง สามารถปรับเปลี่ยนมุมการเข้าถึงจุดต่างๆได้หลากหลายซึ่งมีความเหมาะสมกับงานพ่นทรายระยะไกลที่อาจต้องเจอพื้นที่ที่ซับซ้อนหรือมุมในการเข้าถึงพื้นที่ที่แตกต่างกัน

โดยทั่วไป ตำแหน่งที่ปลายแขนหรือข้อต่อต่างๆของหุ่นยนต์นั้นสามารถระบุได้โดยเวกเตอร์ 3×1 ดังสมการ 4.19

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้ทรานสฟอร์มเมชันเมทริกซ์ (Transformation matrix) ของวัตถุในระนาบสามมิติซึ่งประกอบไปด้วยเมทริกซ์การเคลื่อนย้าย (Translation matrix) และเมทริกซ์การหมุน (Rotation matrix)

เมทริกซ์การเคลื่อนย้ายสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.20 ขณะที่เมทริกซ์การหมุนนั้นแบ่งออกเป็นการหมุนตามแกน x , y และ z ดังแสดงในสมการที่ 4.21 – 4.23 ตามลำดับ

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & D_x \\ 0 & 1 & 0 & D_y \\ 0 & 0 & 1 & D_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

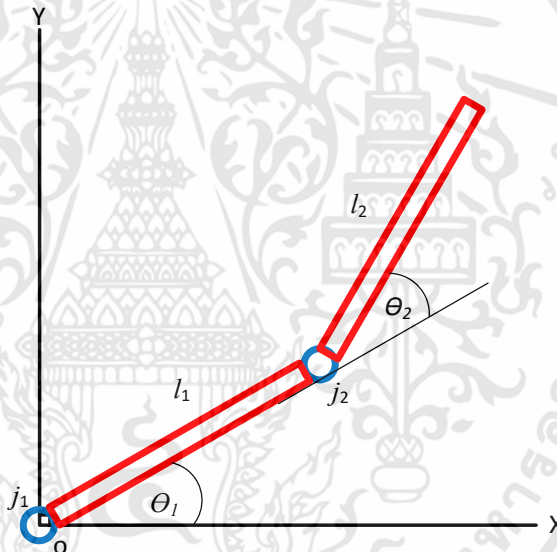
$$\mathbf{R}_X(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\mathbf{R}_Y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$\mathbf{R}_Z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

อาศัยเมทริกซ์ในสมการ 4.20 – 4.23 ตำแหน่งของข้อต่อใดๆของหุ่นยนต์สามารถคำนวณได้โดยจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematics)

จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าเป็นการคำนวณเพื่อหาพิกัดของข้อต่อใดๆของหุ่นยนต์ที่สัมพันธ์กับจุดอ้างอิงที่ต้องการ โดยเริ่มจากฐานไปจนถึงจุดปลายของหุ่นยนต์โดยใช้การคูณแมทริกซ์ สมมติให้จุดอ้างอิงคือจุดฐานของหุ่นยนต์ รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างหุ่นยนต์ที่มีสองข้อต่อและสองแขนต่อกัน การคำนวณตำแหน่ง P เริ่มจากการกำหนดจุดอ้างอิงโดยกำหนดให้จุดหมุน j_1 เป็นจุดอ้างอิง จากนั้นใช้แมทริกซ์การหมุนของจุดหมุนที่หนึ่งที่หมุนเป็นมุม θ_1 เป็นแมทริกซ์เริ่มต้น จากนั้นจะนำไปคูณกับแมทริกซ์การเคลื่อนย้ายที่หนึ่งซึ่งมีพิกัดของปลายแขน l_1 ที่สัมพันธ์กับจุดอ้างอิง เมื่อได้ผลลัพธ์ของการคูณจะนำผลลัพธ์นั้นไปคูณกับแมทริกซ์การหมุนของจุดหมุน j_2 ที่หมุนเป็นมุม θ_2 จากนั้นจะคูณกับแมทริกซ์การเคลื่อนย้ายที่มีพิกัดของปลายแขน l_2 ที่สัมพันธ์กับจุดหมุน j_2 ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นพิกัดของปลายแขนที่สอง (จุด P) ที่สัมพันธ์กับจุดอ้างอิงดังแสดงในสมการที่ 4.24



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงโครงสร้างหุ่นยนต์ที่ประกอบด้วย 2 ก้านโยงและ 2 ข้อต่อ

$$P = {}^0_2T = {}^0_1R_{(z, \theta_1)} \cdot {}^1_0D_{l_1} \cdot {}^1_2R_{(z, \theta_2)} \cdot {}^2_1D_{l_2} \quad (4.24)$$

โดยที่ ${}^jR_{(a, \theta)}$ คือแมทริกซ์การหมุนของข้อต่อ i เป็นมุม θ รอบแกน a , jD คือแมทริกซ์การเคลื่อนย้ายของแขนท่อนที่ j สัมพันธ์กับปลายแขนท่อนที่ i , P คือตำแหน่งที่จุด P และ 0_2T คือทรานสฟอร์มเมชันแมทริกซ์ที่มีพิกัดของปลายแขนท่อนที่สองที่สัมพันธ์กับจุดอ้างอิง ดังนั้น สำหรับหุ่นยนต์ใดๆ สามารถคำนวณตำแหน่งที่จุดปลายแขนได้ดังสมการที่ 4.25

$$P = {}^0_2T = \prod_{i=1}^2 {}^i_{i-1}R_{(z, \theta_i)} \cdot {}^i_{i-1}D_{l_i} \quad (4.25)$$

นอกจากจลศาสตร์แบบไปข้างหน้าที่ใช้เพื่อคำนวณตำแหน่งของหุ่นยนต์แล้ว ยังมีการใช้จลศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematics) โดยจลศาสตร์แบบย้อนกลับนั้น จะใช้ตำแหน่งที่จุด P เพื่อคำนวณหาค่ามุมของแต่ละจุดหมุน (θ_i) โดยวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือวิธีจาโคเบียน (Jacobian) ซึ่งใช้การกำหนดความสัมพันธ์ของสองตัวแปรในระบบ เช่น สำหรับแขนกลสองท่อน เราสามารถบอกตำแหน่งของแขนกลได้สองแบบคือ พิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian) ของตำแหน่งของปลายแขน และ มุมของแต่ละข้อต่อ วิธีจาโคเบียนจะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของมุมที่มีต่อพิกัดของปลายแขนดังแสดงในสมการที่ 4.26

$$J = \frac{\partial x}{\partial q} \quad (4.26)$$

โดย J คือจาโคเบียนแมทริกซ์ x คือพิกัดคาร์ทีเซียนของแขนกล และ q คือมุมของข้อต่อ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ต่อเวลา จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.27

$$J = \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial q} \quad (4.27)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial x}{\partial t} = J \frac{\partial q}{\partial t} = \dot{x} = J\dot{q} \quad (4.28)$$

จะเห็นได้ว่า \dot{x} และ \dot{q} เป็นอนุพันธ์เวลาของ x และ q ดังนั้น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของปลายแขนจะเท่ากับแมทริกซ์จาโคเบียนคูณกับความเร็วมุมของข้อต่อ ดังนั้นเมื่อเราทราบแมทริกซ์จาโคเบียนของหุ่นยนต์แล้ว สามารถกำหนดพิกัดคาร์ทีเซียนที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป ก็จะสามารถคำนวณมุมในการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อเพื่อไปยังพิกัดที่ต้องการ

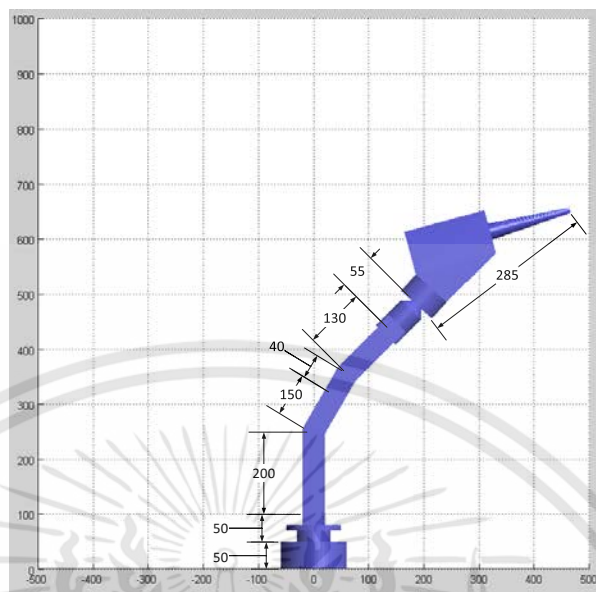
ในการควบคุมอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามในงานวิจัยนี้ซึ่งอยู่ในส่วนของระบบเสมือนนั้น จะมีการจำลองและควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แกนโดยใช้ทฤษฎีจลศาสตร์แบบไปข้างหน้าจะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณพิกัดของหุ่นยนต์ และจลศาสตร์แบบย้อนกลับจะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณมุมและความเร็วในการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะใช้จลศาสตร์ย้อนกลับแบบจาโคเบียน (Jacobian) โดยไม่มีการคำนวณน้ำหนักของแขนหุ่นยนต์เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (ผลกระทบจากน้ำหนักของหุ่นยนต์) เป็นการจำกัดผลกระทบที่มีต่อความผันแปรในระบบ ซึ่งความคลาดเคลื่อนจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไม่ได้รวมอยู่ในแหล่งความผันแปรที่สนใจ

สำหรับขนาดของหุ่นยนต์ 6 แกนที่ใช้ในการจำลองอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามนั้น มีขนาดดังนี้: ฐานของหุ่นยนต์สูงจากพื้นไปถึงจุดหมุนที่หนึ่ง 50 มม. ระยะจากจุดหมุนที่หนึ่งไปหาจุดหมุนที่สอง 50 มม. ระยะแขนจากจุดหมุนที่สองไปหาจุดหมุนที่สาม 200 มม. ระยะแขนจากจุดหมุนที่สามไปถึงจุดหมุนที่สี่ 150 มม. ระยะแขนจากจุดหมุนที่สี่ไปหาจุดหมุนที่ห้า 40 มม. ระยะแขนจากจุดหมุนที่ห้าไปจุดหมุนที่หก 130 มม. และระยะความยาวปลายแขนที่ต่อจากจุดหมุนที่หก 55 มม. ต่อจากปลายแขนจะติดหัวพ่นยาว 285 มม. โดยข้อต่อทั้ง 6 (จากฐานไปหาปลายแขน) เมื่ออยู่ในสภาพเริ่มต้นจะหมุนรอบแกน $z y y z y z$ ตามลำดับ พิกัดปลายแขนของหุ่นยนต์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.29 รูปร่างและขนาดของหุ่นยนต์แสดงในรูปที่ 4.9

$$P = {}^0_6T = {}^0_6D \cdot {}^1_0R_{(z,\theta_1)} \cdot {}^1_0D \cdot {}^2_1R_{(y,\theta_2)} \cdot {}^2_1D \cdot {}^3_2R_{(y,\theta_3)} \cdot {}^3_2D \cdot {}^4_3R_{(z,\theta_4)} \cdot {}^4_3D \cdot {}^5_4R_{(y,\theta_5)} \cdot {}^5_4D \cdot {}^6_5R_{(z,\theta_6)} \cdot {}^6_5D \quad (4.29)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 {}^0_6D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 50 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^1_0R_{(z,\theta_1)} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^1_0D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 50 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2_1R_{(y,\theta_2)} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^2_1D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 200 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^3_2R_{(y,\theta_3)} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^3_2D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4_3R_{(z,\theta_4)} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^4_3D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 40 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^5_4R_{(y,\theta_5)} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^5_4D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 130 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^6_5R_{(z,\theta_6)} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^6_5D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 55+285 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$



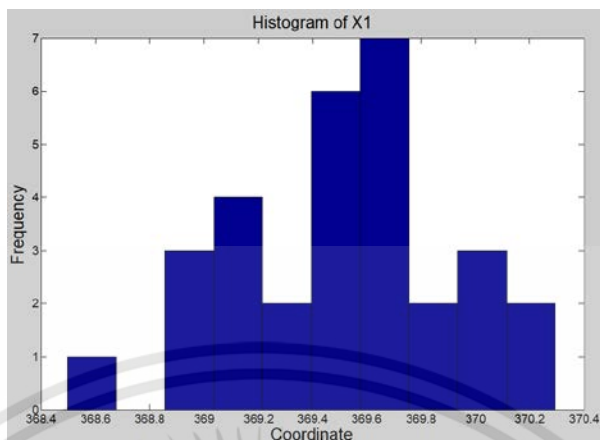
รูปที่ 4.9 รูปร่างและขนาดของหุ่นยนต์ 6 แกน ที่ใช้เป็นอุปกรณ์เคลื่อนที่ในระบบเสมือน

4.3 ความผันแปรด้านพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลัก (หุ่นยนต์แบบขนาน)

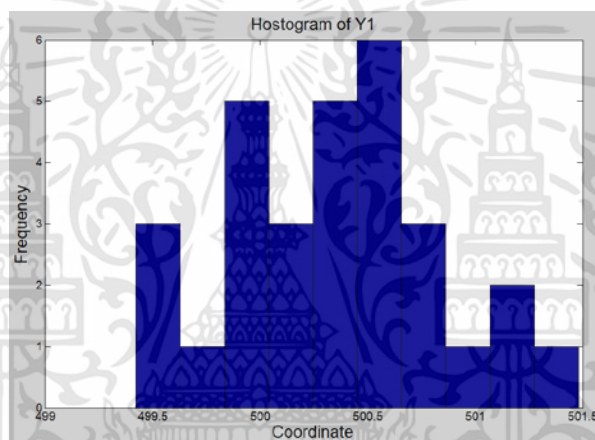
ความคลาดเคลื่อนในการระบุพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักคือสาเหตุหลักสาเหตุหนึ่งของความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกล ในทางสถิติ ความผันแปรประกอบไปด้วยความบกพร่องด้านความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) โดยความแม่นยำจะสนใจค่าที่วัดเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย ในขณะที่ ความเที่ยงตรงจะสนใจค่าความแตกต่างจากการทำซ้ำ โดยความคลาดเคลื่อนในการทำซ้ำนั้นส่วนมากจะเกิดจากความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error) (Vardeman and Jobe, 2016) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการตรวจสอบความแม่นยำและเที่ยงตรงของอุปกรณ์ควบคุมหลัก

4.3.1 ผลการทดสอบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ควบคุมหลัก

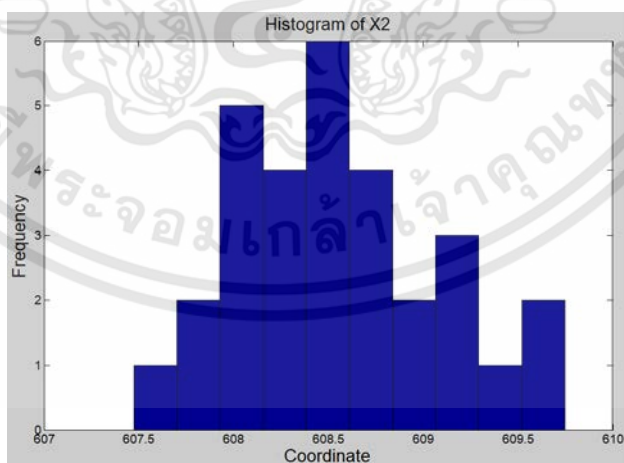
จากการทดลองคำนวณพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลัก พบว่า ค่าพิกัดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยทุกครั้งเมื่อเคลื่อนที่อุปกรณ์ควบคุมหลักไปยังจุดหนึ่งๆ บนพื้นที่ปฏิบัติงานซ้ำๆกัน ผู้วิจัยได้ทำการเก็บค่าพิกัดบนพื้นที่ปฏิบัติงาน 4 ตำแหน่ง ได้แก่ (370,500), (610,500), (390,580) และ (590,580) แต่ละตำแหน่งเก็บข้อมูลเป็นจำนวน 30 ครั้ง ดังตารางที่ 4.1 แล้วนำมาสร้างกราฟฮิสโตแกรม (รูปที่ 4.10) พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวใกล้เคียงกับการกระจายตัวแบบปกติ (สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ระหว่างลำดับกับข้อมูลนั้นไม่มีความสัมพันธ์กัน) โดยค่าเฉลี่ยมีความเอนเองจากค่าเป้าหมาย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.41- 0.56 มม.



(ก)

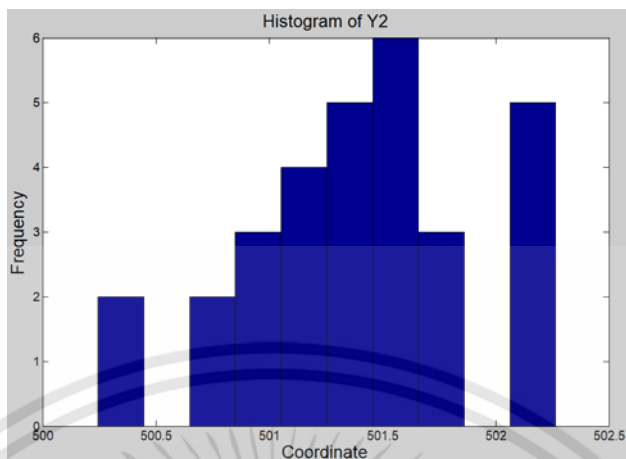


(ข)

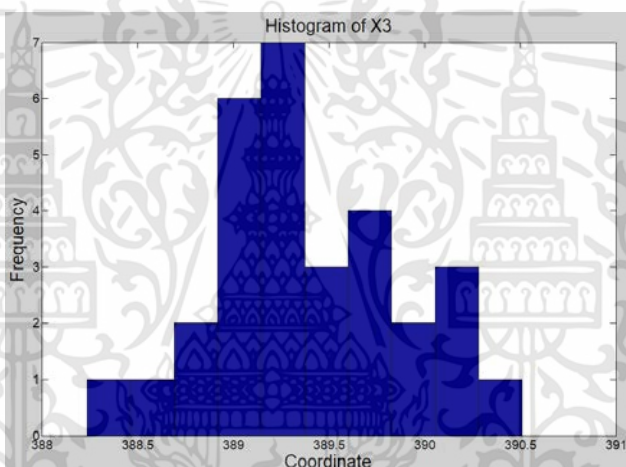


(ค)

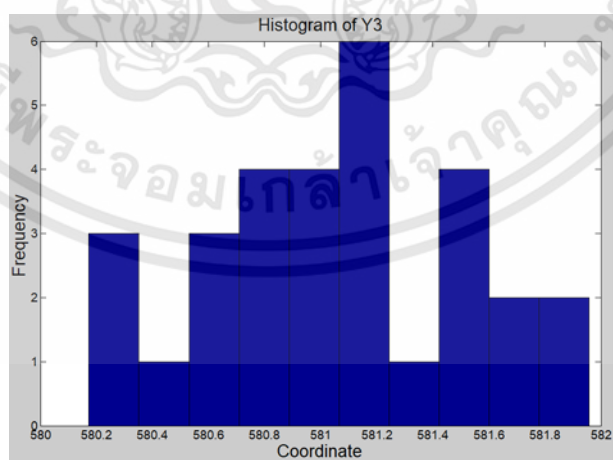
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

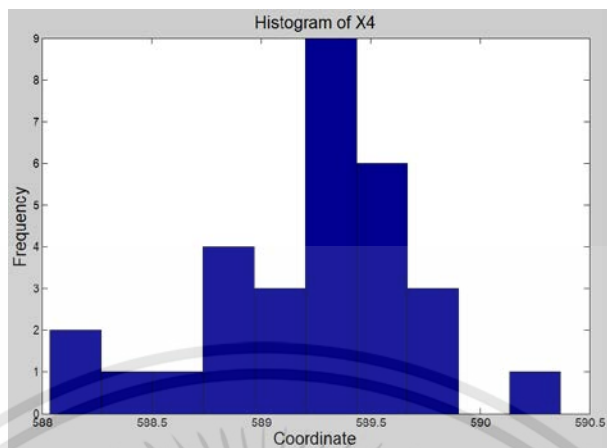


(จ)

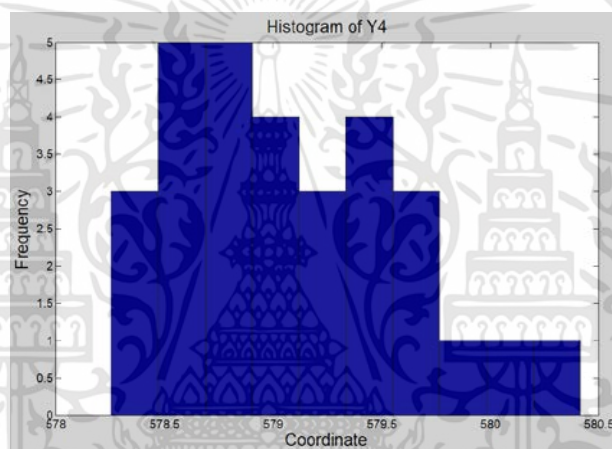


(ฉ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ช)



(ซ)

รูปที่ 4.10 ฮิสโตแกรมจากการเก็บข้อมูล 30 ครั้ง ของค่าพิกัด (ก) X_1 ($x=370$) (ข) Y_1 ($y=500$) (ค) X_2 ($x=610$) (ง) Y_2 ($y=500$) (จ) X_3 ($x=390$) (ฉ) Y_3 ($y=580$) (ช) X_4 ($x=590$) (ซ) Y_4 ($y=580$)

ตารางที่ 4.1 ค่าพิกัด 4 ตำแหน่ง จากการเก็บข้อมูล 30 ครั้ง

No.	พิกัด (Coordinate)							
	พิกัดที่ 1		พิกัดที่ 2		พิกัดที่ 3		พิกัดที่ 4	
	X1 (x=370)	Y1 (y=500)	X2 (x=610)	Y2 (y=500)	X3 (x=390)	Y3 (y=580)	X4 (x=590)	Y4 (y=580)
1	369.42	499.43	608.23	501.05	388.98	580.52	589.07	580.00
2	369.00	500.22	608.98	502.06	389.59	581.57	589.46	578.78
3	369.56	500.21	607.97	501.78	389.38	580.98	589.17	579.45
4	369.54	500.46	608.55	501.50	388.97	581.46	589.72	578.71
5	370.29	500.27	608.29	501.03	388.96	580.60	589.20	579.75
6	369.61	500.78	609.07	500.25	389.27	581.24	589.38	578.33
7	368.86	500.75	608.35	501.74	388.88	580.27	589.40	579.55
8	370.15	499.61	607.75	500.75	389.33	580.77	589.67	578.26
9	368.50	500.46	608.99	501.08	388.73	581.00	588.23	578.98
10	369.76	500.47	607.47	501.21	389.20	581.96	589.48	578.94
11	369.99	499.85	608.24	502.56	390.09	581.43	589.27	578.68
12	369.72	499.95	608.69	501.61	389.91	580.86	589.34	579.36
13	368.91	500.44	609.19	501.53	389.20	581.29	588.90	579.19
14	369.28	500.35	608.64	502.54	389.57	581.88	588.04	578.75
15	369.47	499.95	607.78	501.77	389.65	581.21	589.22	578.54
16	369.11	500.31	608.07	501.63	390.51	580.83	589.35	578.46
17	370.01	499.89	608.51	501.17	389.60	581.08	589.01	580.42
18	369.04	500.34	609.72	500.91	389.62	580.54	589.54	579.13
19	369.67	500.22	608.53	502.59	388.24	580.27	589.23	578.65
20	369.20	499.63	607.97	501.27	388.99	580.65	588.82	578.51
21	370.01	499.88	609.30	501.29	388.64	580.77	589.49	579.49
22	369.43	500.50	608.72	500.76	389.07	580.17	588.81	579.44
23	369.70	501.48	608.49	500.41	390.18	581.70	588.74	579.08
24	369.73	500.55	608.75	501.41	389.33	581.11	588.64	579.67
25	369.35	500.70	607.99	500.94	389.31	580.95	589.62	579.27
26	369.61	499.65	607.94	501.57	389.18	581.70	589.69	578.69
27	369.78	501.04	608.57	502.67	389.87	581.17	589.46	579.07
28	369.15	500.54	608.43	501.29	390.22	581.18	590.37	578.82
29	369.63	501.14	609.75	501.62	388.96	581.46	588.38	578.84
30	369.48	501.09	609.11	501.46	389.80	580.91	589.35	579.91
μ	369.50	500.34	608.54	501.39	389.37	581.05	589.20	579.09
σ	0.41	0.49	0.56	0.51	0.51	0.47	0.48	0.53
Cor.	0.062	0.386	0.222	0.022	0.206	0.047	0.000	0.040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าข้อมูลมีความถี่สูงสุดอยู่บริเวณกึ่งกลางและกระจายตัวออกทั้งด้านซ้ายและขวา นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 4.1 ยังบ่งชี้ว่าข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับของการเก็บข้อมูล จึงสามารถสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) โดยสามารถสรุปได้ว่า ความเที่ยงตรง (Precision) ในการระบุพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักอยู่ที่ระดับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 0.5 มม. ซึ่งระดับความคลาดเคลื่อนนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง ซึ่งความเที่ยงตรงในลักษณะไม่สามารถกำจัดไปได้ อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถศึกษาาระบบพันทราเยระยะไกล ระดับความเที่ยงตรงที่วัดได้ก็ยังถือว่ายอมรับได้

อย่างไรก็ดี ข้อมูลที่มีความถี่สูงสุดในรูปที่ 4.10 นั้นมีความเอนเอียง (Bias) ไม่ตรงกับค่าเป้าหมาย แสดงให้เห็นว่านอกจากพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักมีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error) แล้ว ยังมีความเอนเอียงในการระบุพิกัดซึ่งบ่งชี้ถึงปัญหาด้านความแม่นยำ (Accuracy) ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์ความแม่นยำของอุปกรณ์ควบคุมหลักต่อไป

4.3.2 ความแม่นยำของอุปกรณ์ควบคุมหลัก

จากสมการที่ 4.8-4.18 จะเห็นได้ว่าความยาวและมุมของแขนของหุ่นยนต์จะเป็นตัวแปรที่ใช้ระบุตำแหน่งของจุดปลายแขนหุ่นยนต์ หากความยาวของแขนผิดเพี้ยนไปจากที่ออกแบบ การระบุพิกัดของปลายแขนก็จะผิดเพี้ยนไปด้วย อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวแขนที่ผิดเพี้ยนกับความคลาดเคลื่อนของการระบุพิกัดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของหุ่นยนต์ และขนาดของความผิดเพี้ยนและจุดที่เกิดความผิดเพี้ยน ยกตัวอย่างเช่น แขน L_{IL} และ L_{IR} ถูกออกแบบให้มีความยาว 485 มม. และ แขน L_{2L} และ L_{2R} ถูกออกแบบให้มีความยาว 515 มม. X_L ยาว 350 มม. และ X_R ยาว 550 มม. แต่ในขั้นตอนการผลิต แขน L_{IR} นักวิจัยอาจเจาะรูเอียงศูนย์ ทำให้ขนาดความยาวแขนไม่ตรงตามแบบที่ต้องการ เพื่อเป็นการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทำวิจัย ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณพิกัดเปรียบเทียบเมื่อ:

1. แขน L_{IL} , L_{IR} , L_{2L} และ L_{2R} มีขนาดตรงตามที่ออกแบบไว้
2. แขน L_{IL} , L_{IR} , L_{2L} และ L_{2R} ที่มีขนาดผิดพลาดตั้งแต่ 3 ถึง -3 มิลลิเมตร

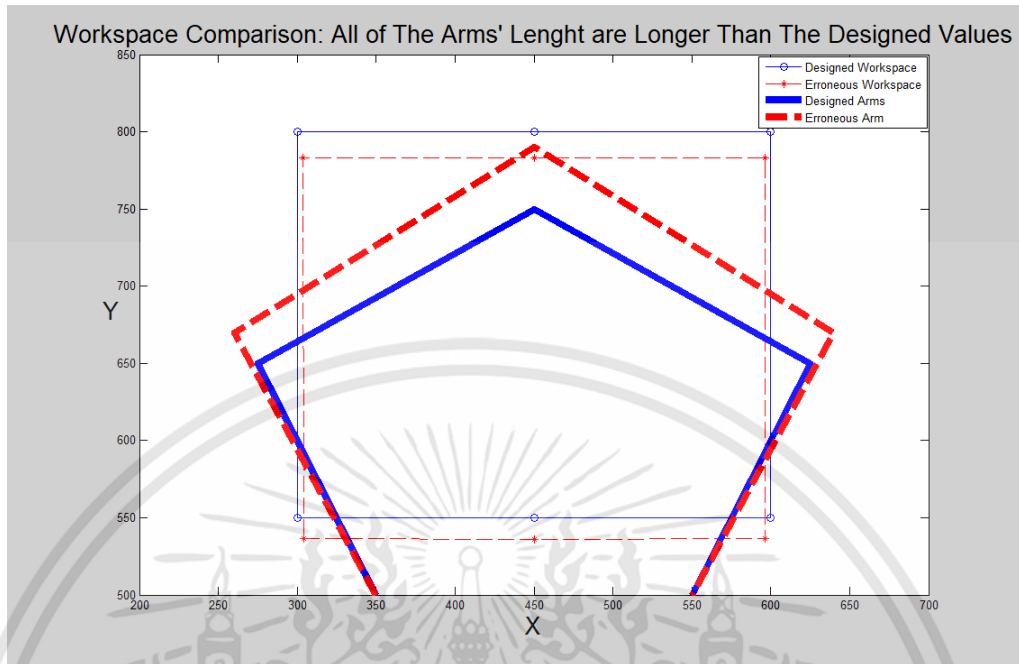
โดยกำหนดให้มุม θ_{IL} เท่ากับ 120 องศา และมุม θ_{IR} เท่ากับ 60 องศา

จากการคำนวณพิกัด ในกรณีที่แขนทุกท่อนมีขนาดตามที่ออกแบบไว้ จะได้พิกัด $x = 450$ และ $y = 804.6244$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของแขนแล้ว พิกัดในแกน x สามารถคลาดเคลื่อนจากเดิมถึง 5.9279 มม. (เมื่อแขนข้างซ้ายหรือขวาทั้งสองท่อนมีขนาดยาวที่สุดในขณะที่แขนอีกข้างหนึ่งมีขนาดสั้นที่สุด เช่น $L_{IL} = 488$ มม. $L_{2L} = 518$ มม., $L_{IR} = 482$ มม. และ $L_{2R} = 512$ มม.) พิกัดในแกน y

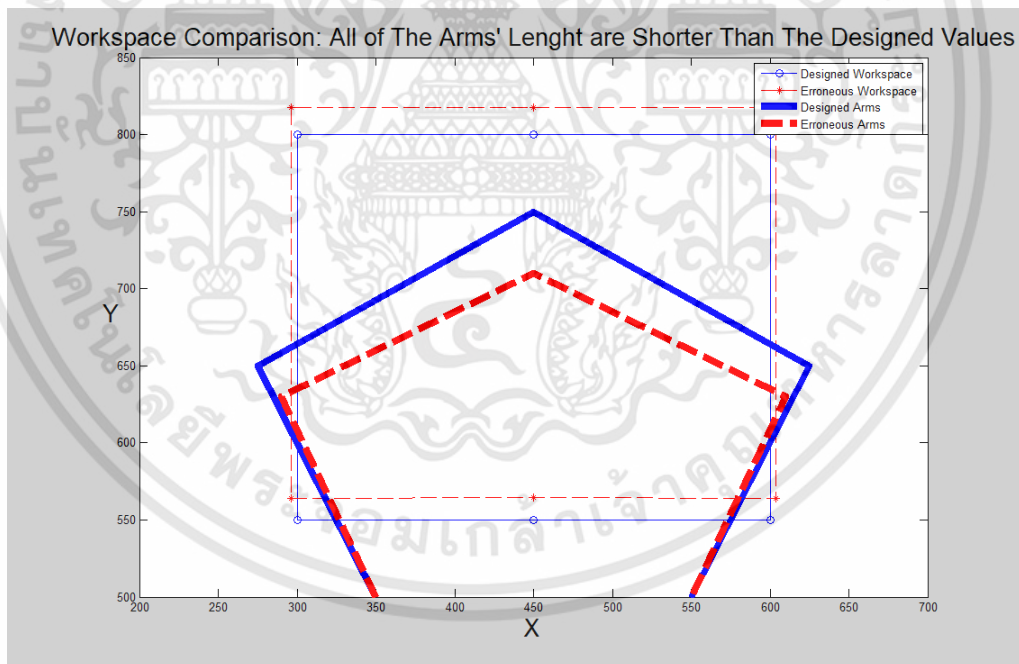
สามารถคลาดเคลื่อนที่จากเดิมถึง 5.2788 มม. (เมื่อแขนทุกท่อนมีขนาดยาวที่สุดหรือสั้นที่สุด เช่น $L_{1L}=488$ มม., $L_{2L}=518$ มม. $L_{1R}=488$ มม. และ $L_{2R}=518$ มม.)

ดังนั้น เมื่อขนาดความยาวของแขนไม่ตรงกับความยาวที่ออกแบบและใช้สำหรับคำนวณพิกัด หากเคลื่อนปลายหุ่นยนต์ให้มาอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ จะทำให้มุม θ_{1L} และมุม θ_{1R} นั้นคลาดเคลื่อน ส่งผลให้ตำแหน่งที่คำนวณได้ผิดพลาด เช่น หากแขนทุกท่อนมีความยาวมากกว่าความยาวที่ออกแบบไว้ 3 มม. ($L_{1L}=488$ มม., $L_{2L}=518$ มม., $L_{1R}=488$ มม. และ $L_{2R}=518$ มม.) เมื่อเคลื่อนที่ปลายแขนมาที่พิกัดจริงที่ (450, 804.6244) ค่ามุม θ_{1L} และมุม θ_{1R} ที่เอนโคดเดอร์วัดได้จะเท่ากับ 120.4849 องศา และ 59.5151 องศา ตามลำดับ ซึ่งค่ามุมที่ควรจะเป็นคือ 120 องศาและ 60 องศา ดังนั้น เมื่อเอาค่ามุมที่เอนโคดเดอร์วัดได้ไปทำการคำนวณ จะได้พิกัดของปลายแขน คือ (450.0000, 799.3697) ซึ่งตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่คำนวณได้นั้นคลาดเคลื่อนไปถึง 7.2547 มม.

จากความผิดพลาดนี้ เมื่อเคลื่อนปลายแขนไปที่พิกัดต่างๆหลายๆจุดในพื้นที่ปฏิบัติงาน (Workspace) จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปร่างพื้นที่ปฏิบัติงานระหว่างพิกัดจริงกับพิกัดที่คำนวณได้ รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะของพื้นที่ปฏิบัติงานเมื่อขนาดความยาวของแขนตรงตามความยาวที่ออกแบบเปรียบเทียบกับพื้นที่ปฏิบัติงานเมื่อขนาดความยาวของแขนคลาดเคลื่อนจากขนาดที่ออกแบบ โดยลักษณะความคลาดเคลื่อนจะแบ่งเป็น 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่ แขนทั้งข้างซ้ายและข้างขวายาวกว่าขนาดที่ออกแบบแต่แขนทั้งสองข้างมีความยาวเท่ากัน แขนทั้งข้างซ้ายและข้างขวาสั้นกว่าขนาดที่ออกแบบแต่แขนทั้งสองข้างมีความยาวเท่ากัน แขนข้างซ้ายสั้นกว่าแขนข้างขวา และ แขนข้างขวาสั้นกว่าแขนข้างซ้าย โดยที่ขนาดที่ออกแบบไว้คือ $L_{1L}=485$ มม., $L_{2L}=515$ มม. $L_{1R}=485$ มม. และ $L_{2R}=515$ มม. ขณะที่ขนาดที่ผิดพลาดยาวกว่าค่าที่ออกแบบจะมีค่า +10 มม. จากค่าที่ออกแบบ และ ขนาดที่ผิดพลาดสั้นกว่าค่าที่ออกแบบจะมีค่า -10 มม. จากค่าที่ออกแบบ

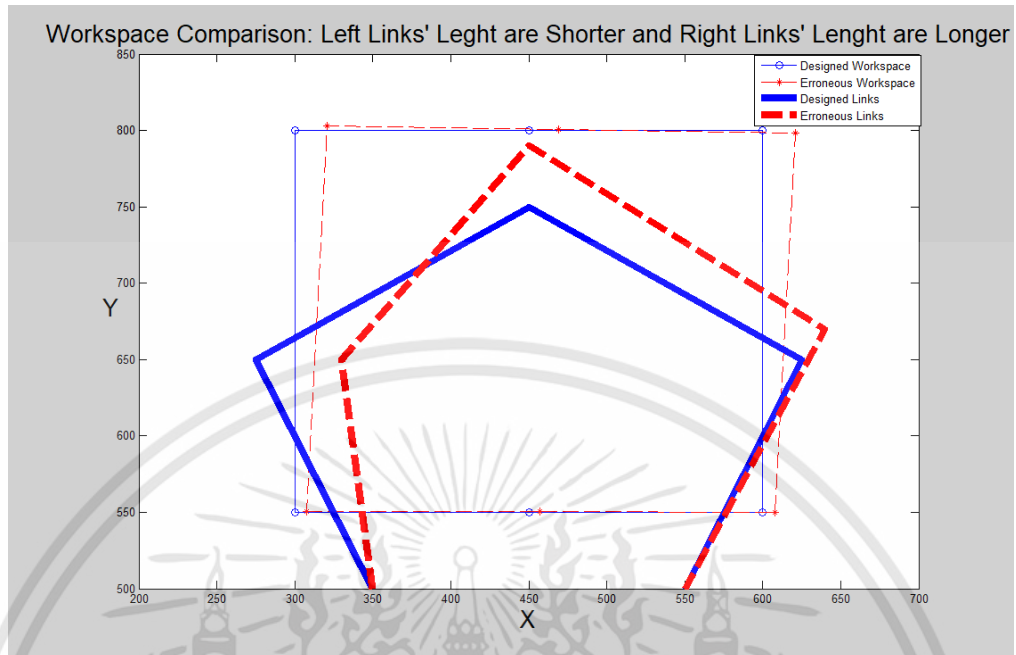


(ก)

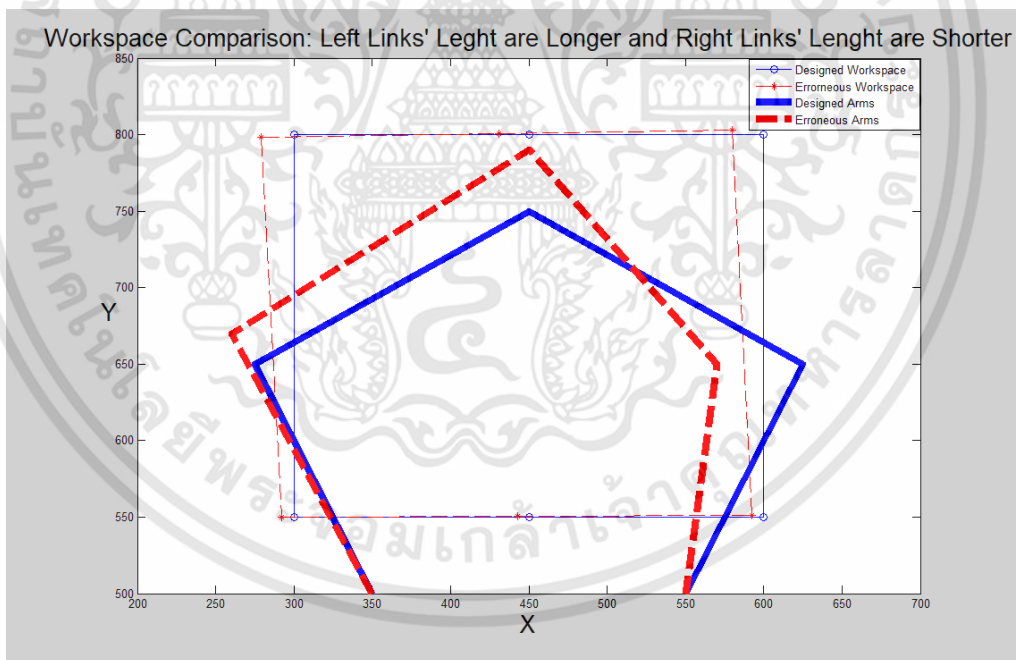


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.11 ลักษณะของพื้นที่ปฏิบัติงาน (Workspace) เมื่อขนาดของแขนคลาดเคลื่อนจากขนาดที่ออกแบบไว้ (ก) แขนทั้งข้างซ้ายและข้างขวายาวกว่าขนาดที่ออกแบบ (ข) แขนทั้งข้างซ้ายและข้างขวาสั้นกว่าขนาดที่ออกแบบ (ค) แขนข้างซ้ายสั้นกว่าแขนข้างขวา และ (ง) แขนข้างขวาสั้นกว่าแขนข้างซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11(ก) ในกรณีที่ความยาวแขนทั้งหมดยาวกว่าความยาวที่ออกแบบ จะทำให้ได้พื้นที่ปฏิบัติงานที่มีค่าพิคัดในแกน y น้อยกว่าค่าพิคัดจริง เมื่อปลายแขนอยู่ทางครึ่งฝั่งซ้ายของพื้นที่ปฏิบัติงาน ค่าพิคัดในแกน x จะมากกว่าค่าพิคัดจริง และเมื่อปลายแขนอยู่ทางครึ่งฝั่งขวาของพื้นที่ปฏิบัติงาน ค่าพิคัดในแกน x จะน้อยกว่าค่าพิคัดจริงเนื่องจากมุม θ_{IL} จะมีค่าน้อยกว่าค่ามุมที่ควรจะเป็นและมุม θ_{IR} จะมีค่ามากกว่าค่ามุมที่ควรจะเป็น ในกรณีที่ความยาวแขนทั้งหมดสั้นกว่าความยาวที่ออกแบบ (รูปที่ 4.11(ข)) จะส่งผลให้พื้นที่ปฏิบัติงานมีลักษณะที่ตรงกันข้ามกับกรณีที่มีความยาวแขนทั้งหมดยาวกว่าความยาวที่ออกแบบ

สำหรับกรณีที่แขนข้างซ้ายและขวายาวไม่เท่ากันนั้น พื้นที่ปฏิบัติงานจะเกิดการเบี่ยงไปทางแขนฝั่งที่ยาวกว่า ทำให้พิคัดในแกน x ผิดเพี้ยนไปทางฝั่งแขนที่ยาวกว่า และพิคัดในแกน y จะมากกว่าที่ควรจะเป็น เมื่อปลายแขนอยู่ในฝั่งที่แขนสั้น และ น้อยกว่าที่ควรจะเป็นเมื่อปลายแขนอยู่ในฝั่งที่แขนยาว ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 4.11(ค) แขนข้างซ้ายของหุ่นยนต์ (L_{1L}, L_{2L}) มีความยาวน้อยกว่าแขนข้างขวา (L_{1R}, L_{2R}) ทำให้พิคัดในแกน x จะมีค่ามากกว่าที่ควรจะเป็น และเมื่อปลายแขนอยู่ในครึ่งฝั่งซ้ายของพื้นที่ปฏิบัติงาน พิคัดในแกน y จะมีค่ามากกว่าที่ควรจะเป็น แต่เมื่อปลายแขนอยู่ในครึ่งฝั่งขวาของพื้นที่ปฏิบัติงาน พิคัดในแกน y จะมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ในกรณีที่แขนข้างซ้ายมีความยาวมากกว่าแขนข้างขวา จะให้ผลลัพธ์ที่ตรงกันข้าม ดังแสดงในรูปที่ 4.11(ง)

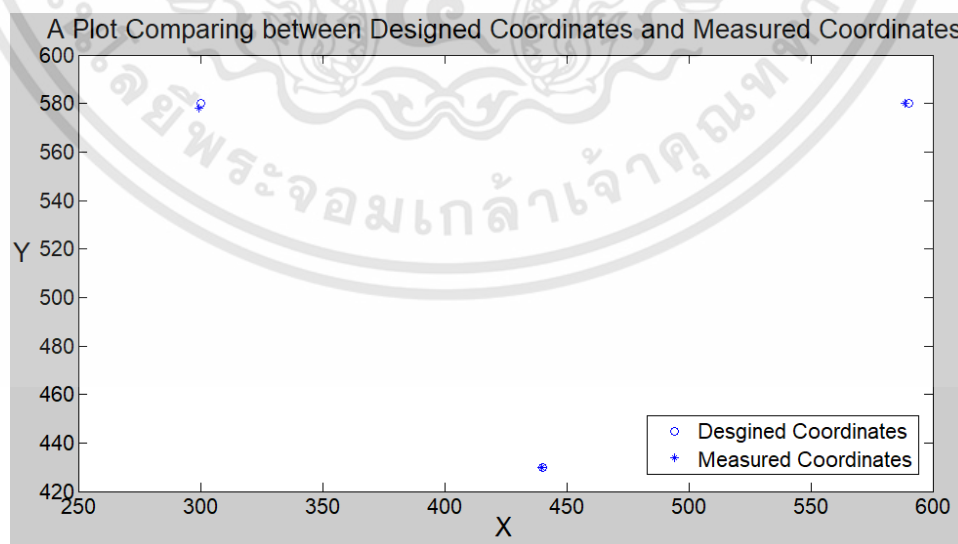
อย่างไรก็ดี แม้ว่าลักษณะของพื้นที่ปฏิบัติงานจะสามารถแบ่งแยกได้ 4 ประเภทหลักๆ แต่แขนแต่ละข้างนั้นยังประกอบด้วยแขนย่อยสองแขน ซึ่งขนาดความยาวของทั้งสองแขนย่อยอาจจะผิดพลาดต่างกันอย่างสิ้นเชิง ทำให้ได้พื้นที่ปฏิบัติงานที่มีรูปร่างผิดเพี้ยนไป ซึ่งอาจจะคล้ายคลึงกับลักษณะความผิดพลาดทั้ง 4 ประเภท แต่สัดส่วนความผิดพลาดในแต่ละแนวแกนอาจจะไม่เท่ากัน เช่น แขนฝั่งซ้าย ประกอบด้วยแขน L_{1L} และ L_{2L} ซึ่งแขน L_{1L} อาจจะสั้นกว่าค่าที่ออกแบบ แต่ แขน L_{2L} อาจจะยาวกว่าค่าที่ออกแบบ ซึ่งความยาวรวมของแขนทั้งสองท่อนอาจจะสั้นกว่าความยาวรวมของแขนข้างขวา (L_{1R} และ L_{2R}) อาจทำให้ได้พื้นที่ปฏิบัติงานคล้ายกับรูปที่ 4.11(ค) แต่สัดส่วนการเบี่ยงของพื้นที่ปฏิบัติงานอาจแตกต่างกับรูปที่ 4.11 (ค)

ดังนั้น การระบุขนาดความผิดพลาดที่แน่นอนของแขนแต่ละท่อนด้วยลักษณะความผิดพลาดของพื้นที่ปฏิบัติงานและขนาดความคลาดเคลื่อนนั้นจึงทำได้ยากและต้องการเวลาในการทดลองมาก อีกทั้งในการระบุขนาดความยาวที่แน่นอนของแขนแต่ละท่อนด้วยเครื่องมือวัดนั้นอาจต้องการเครื่องมือที่มีราคาสูง (ในกรณีที่แขนมาขนาดยาวมากกว่าช่วงการวัดของเครื่องมือวัดทั่วไป เช่นเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ที่ใช้ในงานวัดทั่วไปที่มีช่วงการวัดประมาณ 150 มม.) ดังนั้น ปัญหานี้จึงเป็นอุปสรรคหนึ่งสำหรับนักวิจัยในห้อง

ปฏิบัติงานการ อีกทั้งยังเป็นแหล่งสร้างความผันแปรในระบบ ทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนอีกด้วย

อย่างไรก็ดี หากพิจารณาจากพื้นที่ปฏิบัติงานในรูปที่ 4.11 แล้ว จะพบว่า ลักษณะของพื้นที่ปฏิบัติงานคลาดเคลื่อนแบบมีแบบแผนและเป็นเชิงเส้น ซึ่งหากพิจารณาพื้นที่ปฏิบัติงานเป็นรูปถ่าย ก็จะเป็นรูปถ่ายที่วัตถุภายในรูปนั้นมีรูปทรงหรือขนาดผิดเพี้ยนไปจากรูปทรงจริง ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ก) ซึ่งในการประมวลผลภาพถ่าย จะใช้วิธีการแปลงสัมพรรค (Affine Transformation) เพื่อแก้ปัญหารูปทรงหรือขนาดที่ผิดเพี้ยน (รูปที่ 2.8(ข)) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำวิธีการแปลงสัมพรรคมาใช้เพื่อแก้ปัญหารูปทรงของพื้นที่ปฏิบัติงานที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากความผิดพลาดของขนาดความยาวแขน

สำหรับอุปกรณ์ควบคุมหลักถูกออกแบบไว้ดังนี้ (รูปทรงตามรูปที่ 4.6) แขน L_{1L} และ L_{1R} ถูกออกแบบให้มีความยาว 485 มม. และ แขน L_{2L} และ L_{2R} ถูกออกแบบให้มีความยาว 515 มม. ระยะ X_L ยาว 350 มม. และ X_R ยาว 550 มม. แต่เมื่อได้ทดลองใช้งานแล้ว พิกัดมีความคลาดเคลื่อนดังนี้ เมื่อเคลื่อนที่ปลายแขนของอุปกรณ์ควบคุมหลักไปยังพิกัดจริงที่ (300,580), (590,580), (440,430) ตามลำดับ โปรแกรมได้คำนวณค่าพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักออกมาดังนี้ (299.23, 577.89), (588.64, 580.23) และ (439.74, 429.86) ตามลำดับ รูปเปรียบเทียบพิกัดจริงกับพิกัดที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 4.12 เพื่อแก้ไขพิกัดที่ผิดพลาด ผู้วิจัยจึงได้ทำการคำนวณแมทริกซ์สัมพรรค (Affine Matrix) ดังสมการที่ 4.29 หมายเหตุ สำหรับระนาบสองมิติ จำนวนจุดที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการคำนวณคือสามจุด หรือ สำหรับพื้นที่ปฏิบัติงานใดๆ จำนวนจุดที่น้อยที่สุดที่ใช้คำนวณการแปลงสัมพรรคคือ $n+1$ เมื่อ n คือจำนวนมิติของพื้นที่ปฏิบัติงาน



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบพิกัดที่ออกแบบกับพิกัดที่วัดได้จริง

$$\mathbf{p}' = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{p} \quad (4.30)$$

โดย \mathbf{p}' คือพิกัดที่ต้องการ (พิกัดจริง), \mathbf{p} คือพิกัดที่คำนวณได้จากโปรแกรม และ \mathbf{A} คือแมทริกซ์สัมพรรค ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

กำหนดให้

$$\mathbf{p}' = \begin{bmatrix} 720 & 530 & 1 \\ 490 & 430 & 1 \\ 190 & 580 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} 719.12 & 531.59 & 1 \\ 489.74 & 429.86 & 1 \\ 191.61 & 578.27 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

จากสมการ 4.30 จัดเรียงใหม่จะได้

$$\begin{bmatrix} 720 \\ 530 \\ 490 \\ 430 \\ 190 \\ 580 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 719.12a_{11} + 531.59a_{12} + a_{13} \\ 489.74a_{11} + 429.86a_{12} + a_{13} \\ 191.61a_{11} + 578.27a_{12} + a_{13} \\ 719.12a_{21} + 531.59a_{22} + a_{23} \\ 489.74a_{21} + 429.86a_{22} + a_{23} \\ 191.61a_{21} + 578.27a_{22} + a_{23} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

จากนั้นหาคำตอบของสมการโดยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square) จะได้แมทริกซ์ \mathbf{A}'_3 (แมทริกซ์สัมพรรคที่คำนวณจากค่าพิกัด 3 จุด) ดังสมการที่ 4.35

$$\mathbf{A}'_3 = \begin{bmatrix} 1.0044 & -0.0038 & -0.2573 \\ -0.0065 & -0.9977 & 4.3327 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

ซึ่งจะให้ค่าพิกัดใหม่ดังสมการที่ 4.36

$$\mathbf{p}' = \begin{bmatrix} 720.0068 & 530.0258 \\ 490.0041 & 430.0207 \\ 189.9984 & 580.0272 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

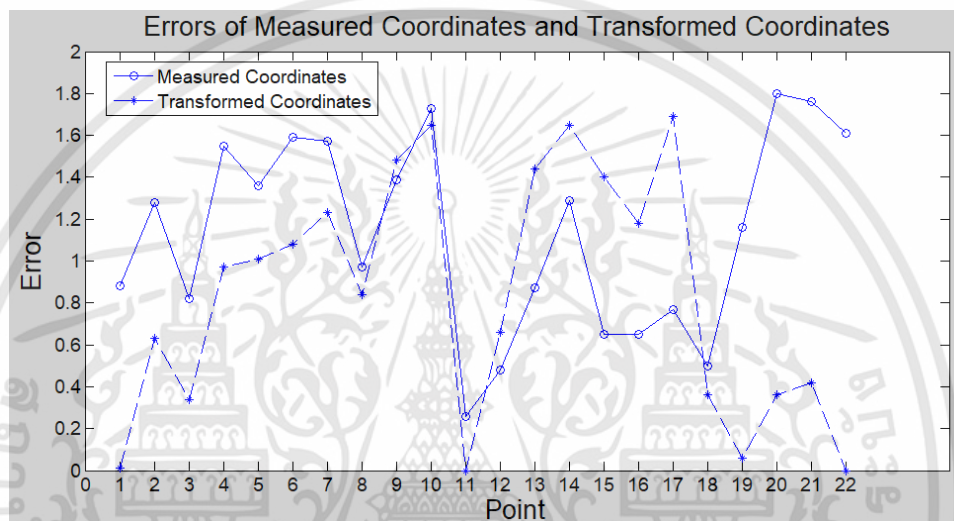
ค่าพิกัดหลังจากการแปลงสัมพรรคในสมการที่ 4.25 จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าพิกัดที่ออกแบบ (สมการที่ 4.20) ซึ่งพิกัดจริงก่อนการแปลงสัมพรรคมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error) ในแนวแกน $x = 0.8367$ และแนวแกน $y = 1.5082$ เปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ได้จากการแปลงสัมพรรคซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวแกน $x = 0.000364$ และแนวแกน $y = 0.000358$ จะเห็นได้ว่าการ

แปลงสัมพรรคะนั้นช่วยปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักได้อย่างมาก อย่างไรก็ตาม ก็ดีเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแมทริกซ์สัมพรรค ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการแปลงสัมพรรคด้วยแมทริกซ์สัมพรรคที่คำนวณได้โดยใช้พิกัดสามจุดกับค่าพิกัดอื่นๆด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.2 หมายเหตุ พิกัดที่ใช้ทดสอบนั้น ผู้วิจัยได้ใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัดสามครั้งต่อหนึ่งจุด

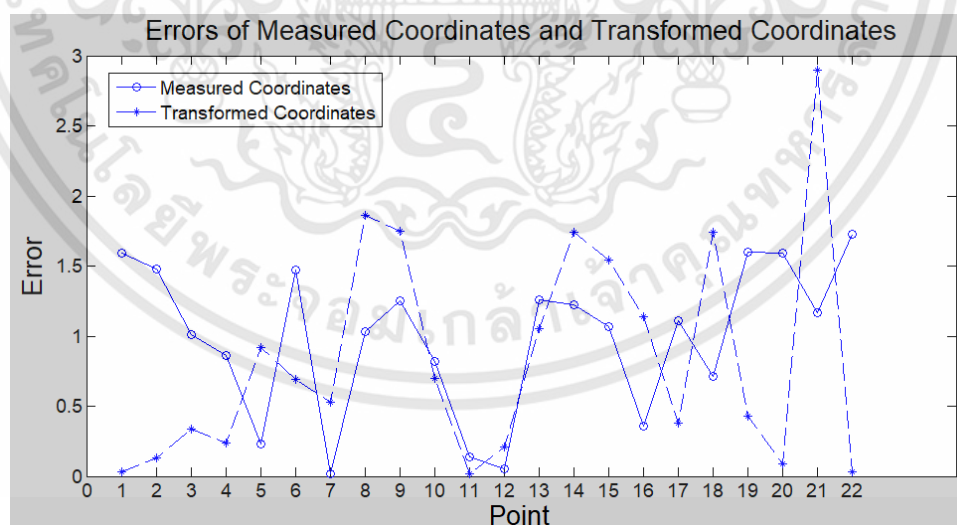
ตารางที่ 4.2 ค่าพิกัดออกแบบ พิกัดจากโปรแกรม และ พิกัดหลังการแปลงสัมพรรค (แมทริกซ์ A'_3)

No.	Designed		Measured		Transformed	
	x	y	x	y	x	y
1	720.00	530.00	719.12	531.59	720.01	530.03
2	710.00	580.00	708.72	581.48	709.37	579.87
3	670.00	580.00	669.18	581.01	669.66	579.66
4	650.00	530.00	648.45	530.86	649.03	529.76
5	640.00	580.00	638.64	580.23	638.99	579.08
6	610.00	500.00	608.41	501.47	608.92	500.69
7	570.00	500.00	568.43	499.98	568.77	499.47
8	590.00	580.00	589.03	578.97	589.16	578.14
9	540.00	580.00	538.61	578.75	538.52	578.25
10	510.00	500.00	508.27	500.82	508.35	500.70
11	490.00	430.00	489.74	429.86	490.00	430.02
12	450.00	500.00	449.52	499.95	449.34	500.21
13	430.00	580.00	429.13	578.74	428.56	578.95
14	410.00	500.00	408.71	501.22	408.35	501.74
15	390.00	580.00	389.35	581.07	388.60	581.54
16	370.00	500.00	369.35	500.36	368.82	501.14
17	350.00	580.00	349.23	578.89	348.31	579.62
18	320.00	530.00	320.5	530.71	319.64	531.74
19	280.00	580.00	281.16	578.40	279.94	579.57
20	230.00	580.00	231.8	578.41	230.36	579.91
21	210.00	530.00	211.76	531.17	210.42	532.90
22	190.00	580.00	191.61	578.27	190.00	580.03

จากตารางที่ 4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ของพิกัดที่โปรแกรมคำนวณในแนวแกน x เท่ากับ 2.6808 และแนวแกน y เท่ากับ 1.2521 ในขณะที่ค่า MSE ของพิกัดที่ผ่านการแปลงสัมพรรคในแนวแกน x เท่ากับ 1.0299 และ แนวแกน y เท่ากับ 1.2929 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า MSE ของแนวแกน x มีค่าลดลง ในขณะที่ค่า MSE ในแนวแกน y มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งหากพิจารณาบางจุดจะพบว่าหลังจากการแปลงสัมพรรค ค่าพิกัดมีค่าไกลจากเป้าหมายมากขึ้นทั้งสองแนวแกนดังแสดงในกราฟในรูปที่ 4.13



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.13 ความคลาดเคลื่อนของพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักก่อนและหลังการแปลงสัมพรรค

(ก)ในแนวแกน x (ข) ในแนวแกน y

จากรูปที่ 4.13 (ก) หลังจากการแปลงสัมพรรคแล้ว จุดที่ 12 ถึง จุดที่ 17 พิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักในแนวแกน x มีค่าผิดพลาดมากกว่าก่อนการแปลงสัมพรรค ซึ่งเป็นพิกัดในแนวแกน x ในช่วง 350-450 และ รูปที่ 4.13 (ข) แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวแกน y ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนหลังจากการแปลงสัมพรรคสูงกว่าก่อนแปลงสัมพรรคอยู่หลายจุดเช่นกัน จากข้อมูลนี้ อาจเป็นไปได้ว่าค่าพิกัดที่โปรแกรมคำนวณออกมานั้น ไม่ได้มีความผิดพลาดที่เกิดจากขนาดความยาวของแกนเพียงอย่างเดียว แต่มีค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มรวมอยู่ในพิกัดที่นำไปสร้างแมทริกซ์สัมพรรคและพิกัดที่ถูกแปลงทำให้ค่าพิกัดที่นำไปทำการแปลงสัมพรรคเกิดความผิดพลาด ดังนั้น เพื่อลดผลกระทบของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม ผู้วิจัยจึงทดลองทำการเพิ่มจำนวนจุดที่ใช้ในการสร้างแมทริกซ์สัมพรรคจาก 3 จุด เป็น 8 จุด โดยพิกัดที่ใช้แสดงในตารางที่ 4.3 โดยได้แมทริกซ์สัมพรรค A_8 ดังสมการที่ 4.37

ตารางที่ 4.3 ค่าพิกัดที่ใช้คำนวณแมทริกซ์สัมพรรค A_8

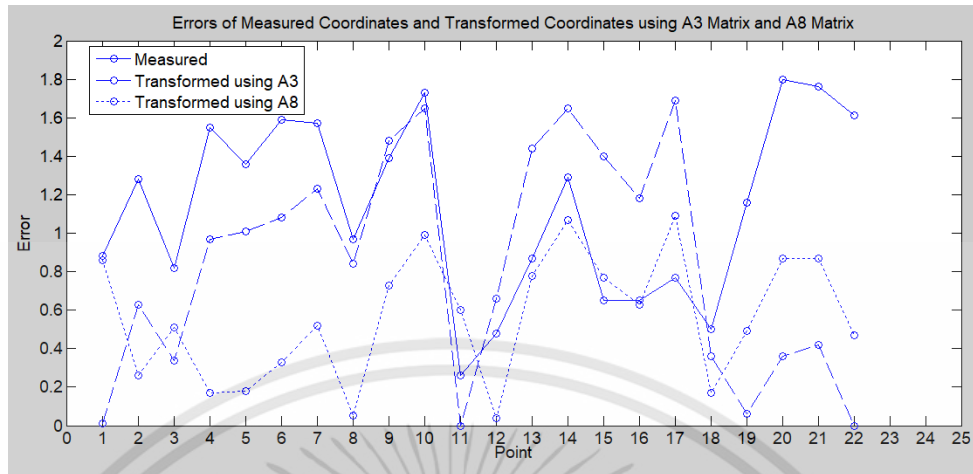
No.	P		P'	
	x	y	x	y
1	530	720	719.12	531.59
2	530	650	648.45	530.86
3	500	570	568.43	499.98
4	430	490	489.74	429.86
5	500	410	408.71	501.22
6	580	350	349.23	578.89
7	580	230	231.80	578.41
8	580	190	191.61	578.27

$$A_8 = \begin{bmatrix} 1.0025 & -0.0030 & -0.4018 \\ -0.0053 & 1.0029 & 1.0040 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

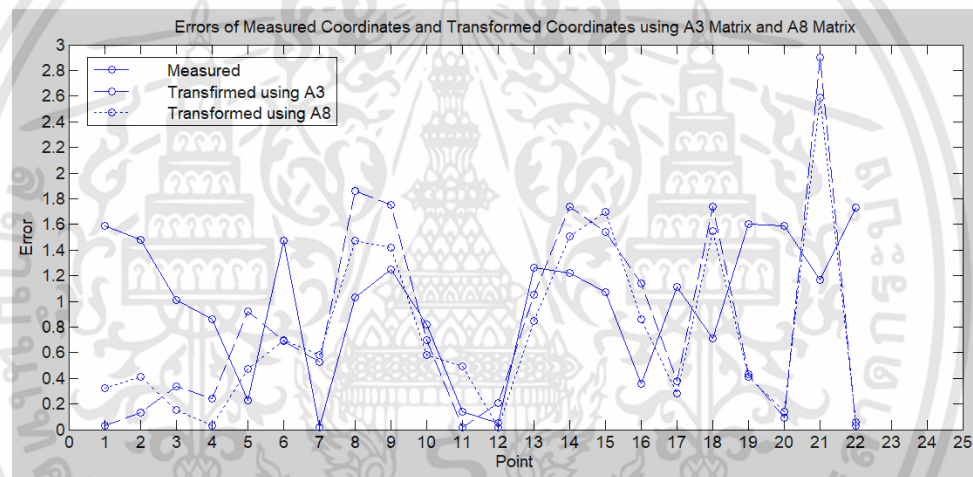
แมทริกซ์สัมพรรค A_8 สามารถปรับปรุงความแม่นยำได้ดีขึ้น โดยค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวแกน x ลดลงเหลือเพียง 0.4232 และ แนวแกน y เหลือเพียง 1.0058 ค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดเปรียบเทียบพิกัดก่อนการแปลง พิกัดหลังการแปลงโดยใช้แมทริกซ์สัมพรรค A_8 และพิกัดหลังการแปลงโดยใช้แมทริกซ์สัมพรรค A_8 แสดงในรูปที่ 4.14 ค่าพิกัดที่คำนวณได้จากแมทริกซ์สัมพรรค A_8 แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าพิกัดออกแบบ พิกัดจากโปรแกรม และ พิกัดหลังการแปลงสัมพรรค (แมทริกซ์ A_8)

No.	Designed		Measured		Transformed	
	x	y	x	y	x	y
1	720.00	530.00	719.12	531.59	720.86	530.32
2	710.00	580.00	708.72	581.48	710.26	580.41
3	670.00	580.00	669.18	581.01	670.51	580.15
4	650.00	530.00	648.45	530.86	649.83	529.97
5	640.00	580.00	638.64	580.23	639.82	579.53
6	610.00	500.00	608.41	501.47	609.67	500.70
7	570.00	500.00	568.43	499.98	569.48	499.42
8	590.00	580.00	589.03	578.97	589.95	578.53
9	540.00	580.00	538.61	578.75	539.27	578.58
10	510.00	500.00	508.27	500.82	509.01	500.58
11	490.00	430.00	489.74	429.86	490.60	429.51
12	450.00	500.00	449.52	499.95	449.96	500.02
13	430.00	580.00	429.13	578.74	429.22	579.15
14	410.00	500.00	408.71	501.22	408.93	501.51
15	390.00	580.00	389.35	581.07	389.23	581.70
16	370.00	500.00	369.35	500.36	369.37	500.86
17	350.00	580.00	349.23	578.89	348.91	579.72
18	320.00	530.00	320.5	530.71	320.17	531.55
19	280.00	580.00	281.16	578.40	280.49	579.59
20	230.00	580.00	231.8	578.41	230.87	579.86
21	210.00	530.00	211.76	531.17	210.87	532.59
22	190.00	580.00	191.61	578.27	190.47	579.94



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 ความคลาดเคลื่อนของพิกัดก่อนการแปลงสัมพรรคเปรียบเทียบับพิกัดหลังการแปลงสัมพรรคโดยใช้เมทริกซ์ A_3 และพิกัดหลังการแปลงสัมพรรคโดยใช้เมทริกซ์ A_8 (ก) พิกัดในแนวแกน x (ข) พิกัดในแนวแกน y

จะเห็นได้ว่า การแปลงสัมพรรคสามารถช่วยปรับปรุงความแม่นยำของอุปกรณ์ควบคุมหลักได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error, MSE) ในแนวแกน x เท่ากับ 0.4232 มม.^2 และแนวแกน y เท่ากับ 1.0058 มม.^2 จากเดิมที่ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวแกน x เท่ากับ 2.2807 มม.^2 และแนวแกน y เท่ากับ 1.2519 มม.^2 โดยสามารถลดความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวแกน x ได้ 81.44% และแนวแกน y ได้ 19.66% ซึ่งพิกัดหลังจากการปรับปรุงนั้นสามารถยอมรับได้

สำหรับงานพันทรายระยะไกล เป็นวิธีการที่ใช้เวลาน้อย และช่วยประหยัดงบประมาณเนื่องจากไม่ต้องมีการแก้ไขหรือผลิตชิ้นใหม่สำหรับชิ้นส่วนที่มีขนาดผิดพลาด

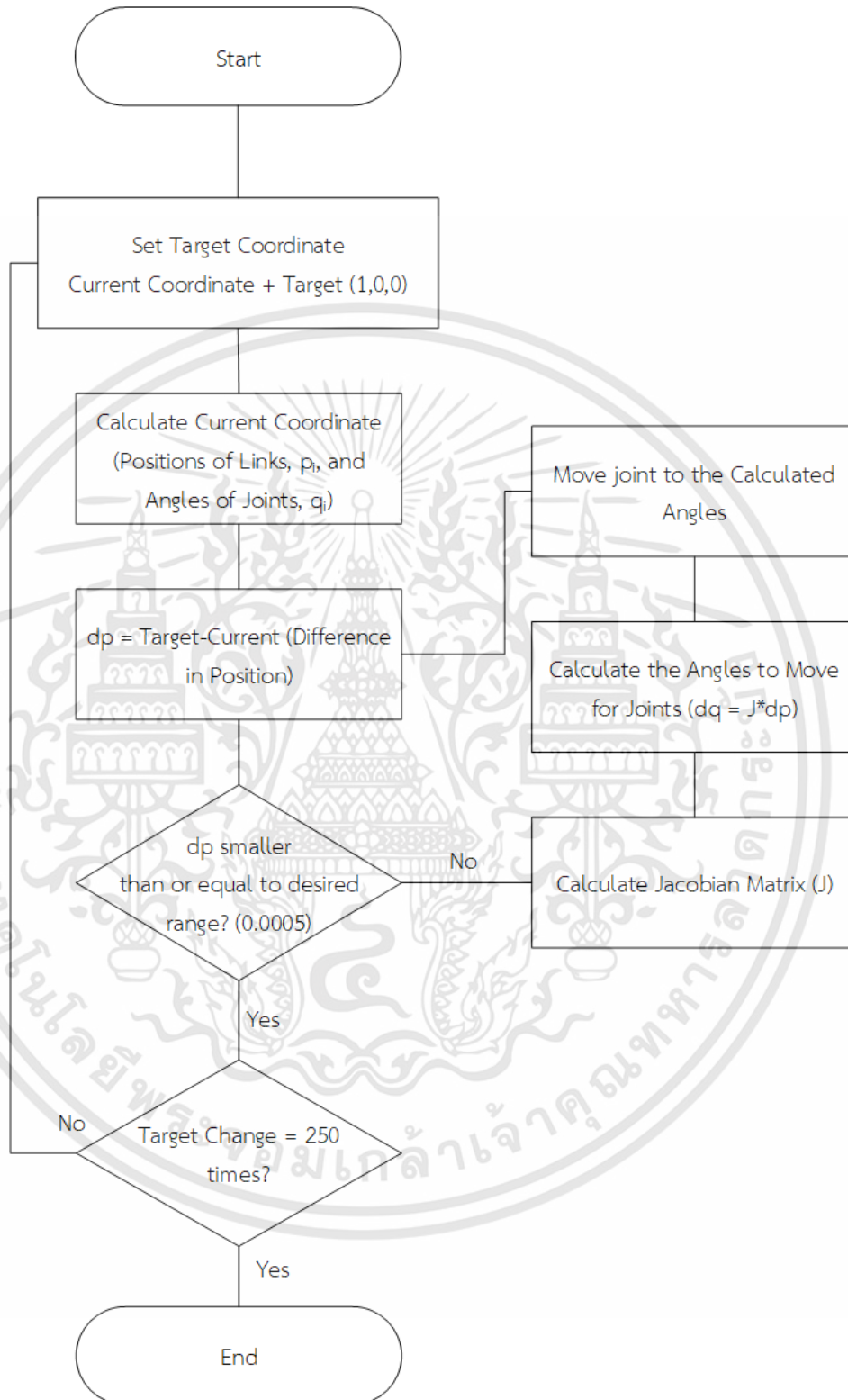
หลังจากการปรับปรุงความแม่นยำของอุปกรณ์ควบคุมหลักแล้ว หัวข้อต่อไป ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ และสังเกตการณ์ความเที่ยงตรงและแม่นยำของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามที่ได้ทำการจำลองขึ้น

4.4 ผลการทดสอบความผันแปรด้านพิกัดของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามนั้นจะพิจารณาเพียงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ โดยไม่ได้พิจารณาน้ำหนักของแขนแต่ละท่อน โดยจะสมมติให้อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามนั้นมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.01 มม. ซึ่งในการจำลองที่พิจารณาเพียงตำแหน่งในการเคลื่อนที่อย่างเดียวนั้นสามารถกำหนดระดับความแม่นยำของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามได้ แต่ความเร็วในการเข้าหาตำแหน่งให้อยู่ในระดับความแม่นยำที่ต้องการจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่ใช้

เพื่อทดสอบสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ (ทำงานได้ในเวลาที่คาดหวังเมื่อกำหนดระดับความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.0005 มม.) ผู้วิจัยทำการทดลองให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามแกน x ทีละ 1 มม. เมื่อเข้าเป้าหมายในระยะ ± 0.0005 มม. จึงเปลี่ยนเป้าหมายใหม่และเคลื่อนที่ต่อไป (เพิ่มพิกัดในแนวแกน x มม.) โดยในการทดลองจะทำการเก็บค่าพิกัดและเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามทุกครั้งก่อนจะมีการเปลี่ยนเป้าหมาย โดยจะทำการเปลี่ยนเป้าหมายทั้งหมด 250 ครั้ง (ระยะทางรวม 250 มม. เพื่อให้ครอบคลุมกับระยะทางที่ทำการทดลอง) กำหนดพิกัดเริ่มต้นเท่ากับ (0.0000, 477.7604, 7.8601) แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามสำหรับการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยผลการทดลองที่คาดหวังคือ ต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงพิกัดในแนวแกน x โดยพิกัดในแนวแกน y และ z มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลอง (ตำแหน่งพิกัดและเวลาที่ใช้ที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางภาคผนวก บทที่4) และกราฟของพิกัดการเคลื่อนที่แสดงในรูปที่ 4.16

หมายเหตุ คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ใช้หน่วยประมวลผล Intel® core i5-7200U 2.50 GHz มีหน่วยความจำ (RAM) 8.00 GB ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 10 โสแม 64-บิต (64-bit Windows 10 Home Operating System) การ์ดแสดงผล (VGA card) Intel® HD Graphics 620



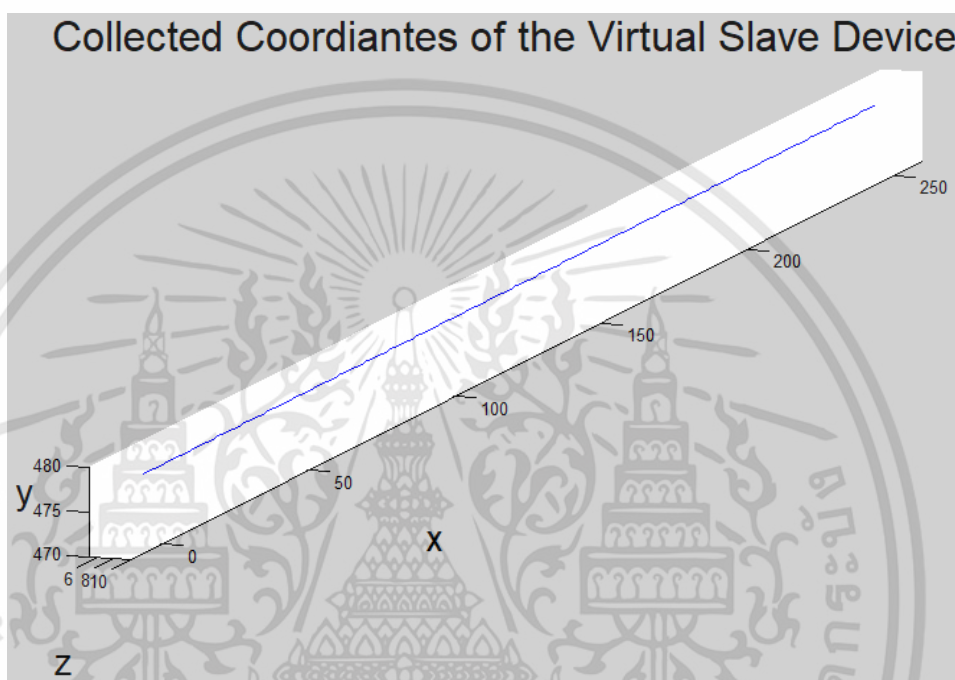
รูปที่ 4.15 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามสำหรับการทดลองเพื่อทดสอบสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือนเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x

พิกัดของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเริ่มต้น	(0.0000, 477.7604, 7.8601) มม.
พิกัดเป้าหมายห่างจากจุดเริ่มต้น	(1.0000, 0.0000, 0.0000) มม.
เปลี่ยนพิกัดเป้าหมาย	250 ครั้ง
ระยะทางรวมตามแนวแกน x ที่คาดหวัง	250.0000 มม.
พิกัดของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเมื่อถึงเป้าหมายสุดท้าย	(250.0000, 477.7604, 7.8601) มม.
ระยะทางที่อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเคลื่อนที่จริงไปตามแนวแกน x	250.0000 มม.
ค่าเฉลี่ยพิกัดแนวแกน y ตลอดเส้นทาง	477.7604 มม.
ค่าเฉลี่ยพิกัดแนวแกน z ตลอดเส้นทาง	7.8601 มม.
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดแนวแกน y	0.000001515236 มม.
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดแนวแกน z	0.000001518095 มม.
เวลารวมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมด	14.3962 วินาที
ความเร็วเฉลี่ย	17.3657 มม./วินาที
เวลาเฉลี่ยในการเคลื่อนที่เข้าหาพิกัดเป้าหมาย	0.0007 วินาที
จำนวนรอบการทำงานในการเคลื่อนที่เข้าหาพิกัดเป้าหมาย	2 รอบ
ระยะทางเฉลี่ยในการเคลื่อนที่เข้าหาพิกัดเป้าหมาย (250 ครั้ง)	0.999999883560 มม.

จากการทดลองพบว่า ระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามแกน x ทั้งหมด 250.0000 มม. โดยเวลารวมที่ใช้ในการเคลื่อนที่เท่ากับ 14.3962 วินาที ดังนั้น ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามคือ 17.3657 มม./วินาที ในขณะที่ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของแขนจากการทดลองในบทที่ 3 คือ 7.7500 มม./วินาที ดังนั้นอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือนที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถตอบสนองการสั่งงานได้ทัน่วงทีสำหรับงานพันทระยาระยะไกล (ที่ความคลาดเคลื่อน ± 0.0005 มม.) โดยเมื่อสั่งให้อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไปตามแนวแกน x ความแม่นยำในแนวแกนอื่นมีค่าดังนี้ ค่าเฉลี่ยพิกัดในแนวแกน y เท่ากับ 477.7604 มม. ค่าเฉลี่ยพิกัดในแนวแกน z เท่ากับ 7.8601 มม. และความเที่ยงตรงในแนวแกนอื่นมีค่าดังนี้ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดในแนวแกน y และแนวแกน z มีค่าน้อยกว่า 0.0001 มม. อย่างไรก็ตาม จะสังเกตได้ว่า วิธีการคำนวณหาจาโคเบียนแมทริกซ์นั้นให้ผลลัพธ์ที่เป็น

ค่าประมาณการ ไม่ใช่ผลลัพธ์ที่ละเอียดและเที่ยงตรง โดยจะสังเกตได้จากคอมพิวเตอร์จะต้องทำการคำนวณ 2 รอบ (Number of Iteration to Reach the Target) การทำงานเพื่อให้อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเข้าใกล้เป้าหมายในระดับความละเอียดที่ต้องการ ดังนั้นคอมพิวเตอร์ที่ใช้จะต้องมีสมรรถนะที่เพียงพอที่จะทำการคำนวณได้ในเวลาที่ต้องการ

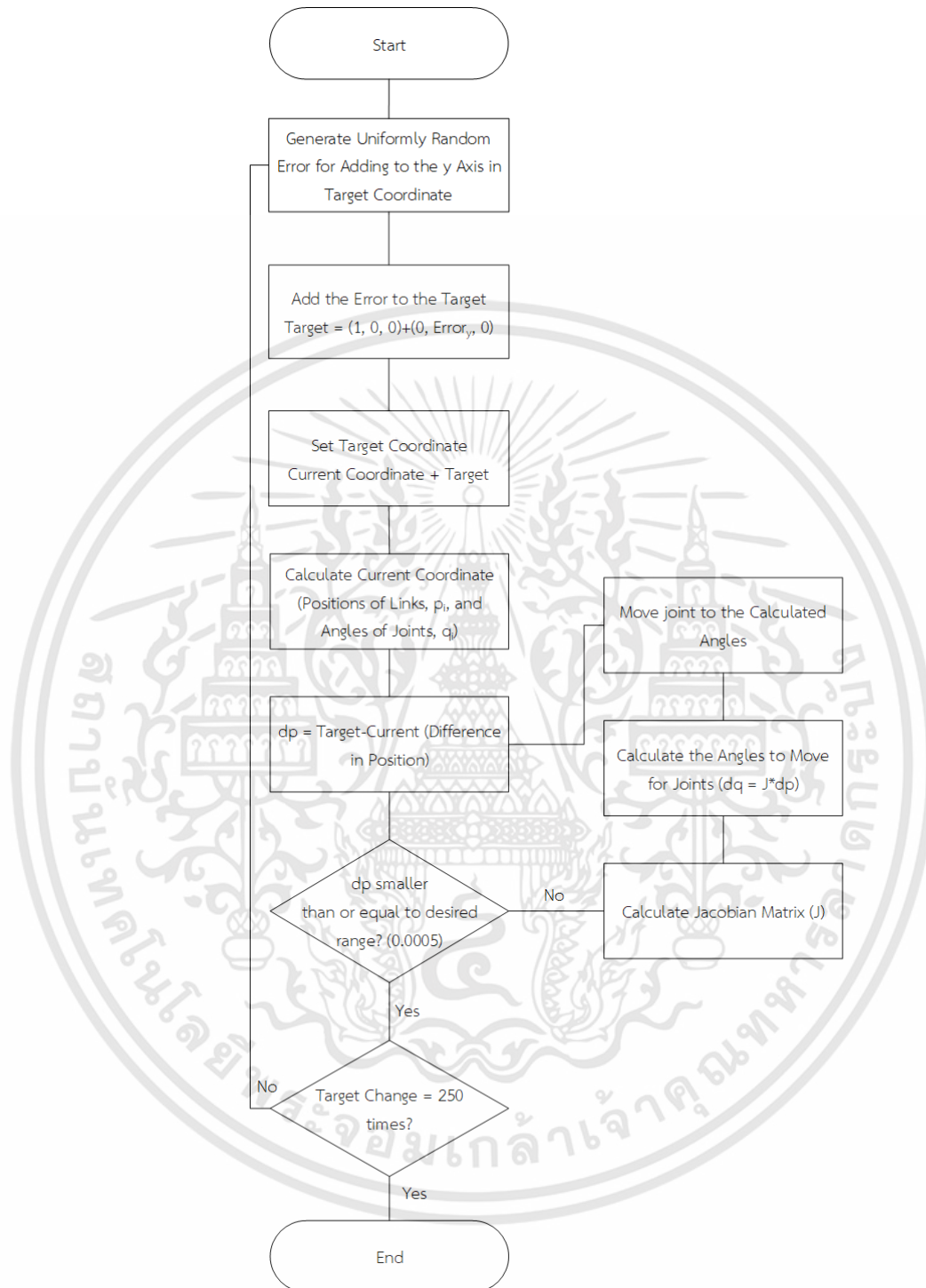


รูปที่ 4.16 กราฟของพิกัดของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x

อย่างไรก็ดี ในการปฏิบัติงานจริง อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามต้องเคลื่อนที่ไปตามพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักซึ่งถูกควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจากการทดลองในบทที่ 3 พบว่า เมื่อผู้ปฏิบัติงานควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x จะเกิดความคลาดเคลื่อนในแนวแกน y มากกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง (0.000249 มม.) ทำให้เส้นพิกัดไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการทำการทดลองทดสอบสมรรถนะ (ความแม่นยำและเที่ยงตรงภายในเวลาที่ต้องการ) ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเมื่อต้องเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน x โดยมีความเปลี่ยนแปลงของพิกัดในแนวแกน y ซึ่งความเปลี่ยนแปลงในแนวแกน y นั้นจะเป็นการสร้างตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniformly Distributed Random Number) อยู่ในช่วงระหว่าง -1 ถึง 1 มม. (ซึ่งเป็นระยะประมาณการที่ผู้ปฏิบัติงานจะเคลื่อนไกวผิดพลาดจากเป้าหมายแนวแกน y) บวกเพิ่มเข้าไปในพิกัดของแกน y ในทุกครั้ง

ที่มีการเปลี่ยนพิกัดเป้าหมาย กำหนดระยะทางเป้าหมายให้เปลี่ยนแปลงไปตามแกน x ครั้งละ 1 มม. จากนั้นจะสุ่มระยะในแกน y แล้วบวกเพิ่มไปในพิกัดเป้าหมาย โดยจะทำการเปลี่ยนเป้าหมายทั้งหมด 250 ครั้ง (ระยะทางรวม 250 มม.) แผนภูมิในรูปที่ 4.17 แสดงขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6 และพิกัดของหัวพ่นแสดงในรูปที่ 4.18





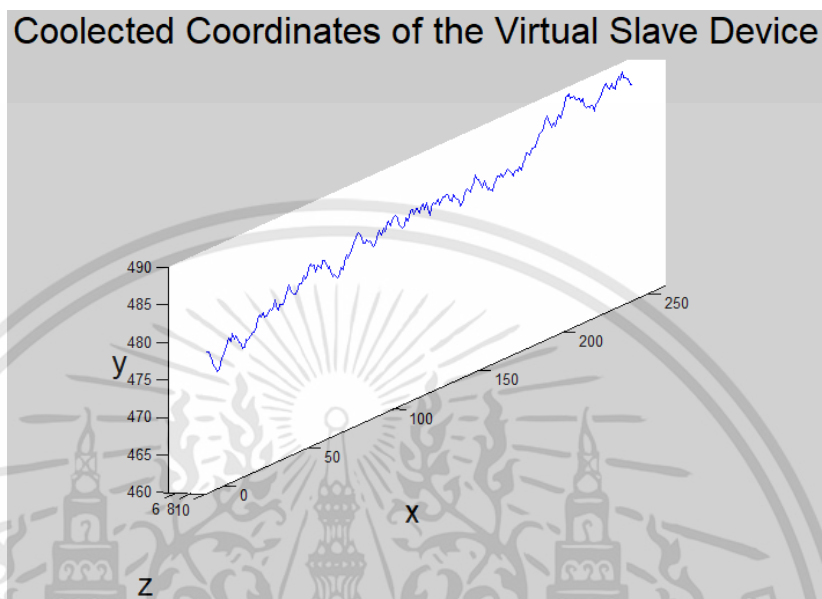
รูปที่ 4.17 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามสำหรับการทดลองการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือนเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x และมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดในแนวแกน y แบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสมมาตร อยู่ในช่วงระหว่าง -1 ถึง 1 มม.

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือนเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x และมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดในแนวแกน y แบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมออยู่ในช่วงระหว่าง -1 ถึง 1 มม.

พิกัดของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเริ่มต้น	(0.0000, 477.7604, 7.8601) มม.
พิกัดเป้าหมายห่างจากจุดเริ่มต้น	(1.0000, 0.0000, 0.0000) มม.
เปลี่ยนพิกัดเป้าหมาย	250 ครั้ง
ระยะทางรวมตามแนวแกน x ที่คาดหวัง	250.0000 มม.
พิกัดของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเมื่อถึงเป้าหมายสุดท้าย	(249.9999, 487.7759, 7.8601) มม.
ระยะทางที่อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเคลื่อนที่จริงไปตามแนวแกน x	249.9999 มม.
ค่าเฉลี่ยพิกัดแนวแกน y ตลอดเส้นทาง	483.2768 มม.
ค่าเฉลี่ยพิกัดแนวแกน z ตลอดเส้นทาง	7.8601 มม.
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดแนวแกน y	3.5897 มม.
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดแนวแกน z	0.000002784101 มม.
เวลารวมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมด	14.6099 วินาที
ความเร็วเฉลี่ย	17.1116 มม./วินาที
เวลาเฉลี่ยในการเคลื่อนที่เข้าหาพิกัดเป้าหมาย	0.0007 วินาที
จำนวนรอบการทำงานในการเคลื่อนที่เข้าหาพิกัดเป้าหมาย	2 รอบ
ระยะทางเฉลี่ยในการเคลื่อนที่เข้าหาพิกัดเป้าหมาย (250 ครั้ง)	0.999999688392 มม.

จากการทดลองพบว่า ระยะทางรวมที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามแกน x เท่ากับ 249.9999 มม. โดยเวลารวมที่ใช้ในการเคลื่อนที่เท่ากับ 14.6099 วินาที ดังนั้น ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามคือ 17.1116 มม./วินาที เมื่อมีความเปลี่ยนแปลงในแนวแกน y ค่าเฉลี่ยพิกัดในแนวแกน y ตลอดเส้นทางเท่ากับ 477.7604 มม. และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกน y เท่ากับ 3.5897 มม. ซึ่งจะเห็นได้ว่า แม้มีการเปลี่ยนแปลงพิกัดทั้งแนวแกน x และ y (โดยการเปลี่ยนแปลงพิกัดแนวแกน y เป็นแบบสุ่ม) อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามก็ยังสามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดหมายได้โดยใช้เวลาใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง และจำนวนรอบในการทำงานเพื่อเข้าสู่พิกัดเป้าหมายก็ยังใช้จำนวนรอบเท่าเดิม สำหรับค่าเฉลี่ยพิกัดในแนวแกน z เท่ากับ 7.8601 มม. และความเที่ยงตรงในแนวแกน z ยังคงมีค่าที่น่าพอใจ (ค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดในแนวแกน z มีค่าน้อยกว่า 0.0001 มม.) ซึ่งบ่งบอกถึงการรักษาระดับความห่างของหัวพ่นกับพื้นผิวนั้นคงที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.18 กราฟของพิกัดของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x และมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดในแนวแกน y แบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ อยู่ในช่วงระหว่าง -1 ถึง 1 มม.

จะเห็นได้ว่านอกจากอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือนสามารถเคลื่อนที่ได้แม่นยำตามต้องการในระนาบสองมิติแล้ว ยังสามารถรักษาระดับความห่างของหัวพ่นกับพื้นผิวได้อย่างน่าพอใจ โดยสังเกตจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพิกัดในแนวแกน z ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้วิธีการควบคุมย้อนกลับโดยการสร้างแมทริกซ์จาโคเบียนในการควบคุมอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามในงานวิจัยนี้ และในงานวิจัยนี้ความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ที่เกิดจากอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามนั้นจะถูกสมมติให้มีค่าเป็นศูนย์ กล่าวคือ ไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าอินพุตและเอาต์พุตของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือน ดังนั้น แมทริกซ์ที่ใช้อธิบายความแม่นยำของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือนสามารถแทนได้ด้วยแมทริกซ์เอกลักษณ์

จากผลการทดลอง สามารถสร้างตัวแบบความผันแปรสำหรับสถานีเครื่องฟันทรายระยะไกลได้ดังนี้

ความผันแปรในสถานีเครื่องฟันทรายระยะไกล ณ เวลา t ใดๆ สามารถอธิบายด้วยสมการตัวแบบหลายสถานี (สมการที่ 4.1 และ 4.2)

$$y'_2 = A'_1 y'_1 + B'_2 u'_2 + w'_2$$

$$z'_2 = C'_2 y'_2 + m'_2$$

โดย

$$y'_2 = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}'_2 = \text{เวกเตอร์พิกัดของหัวฟันที่เป็นเอาท์พุทของระบบ}$$

$$y'_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}'_1 = \text{เวกเตอร์อินพุทของระบบ (พิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักที่ถูกควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงาน)}$$

$A'_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ = แมทริกซ์แปลงพิกัดอินพุทไปสู่พิกัดเอาท์พุทของสถานี ซึ่งกำหนดให้เป็นแมทริกซ์เอกลักษณ์ เนื่องจากเอาท์พุทของสถานีถูกคาดหวังให้เป็นพิกัดเดียวกันกับที่รับอินพุทเข้ามา

$B'_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ = แมทริกซ์การแปลงความคลาดเคลื่อนจากการปรับตั้งค่า (Calibration Error) ของเครื่องฟันทรายระยะไกล

$$u'_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N (p'_y - y'_1)}{N} \end{bmatrix} = \text{เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนที่วัดได้จากเครื่องฟันทรายระยะไกล}$$

* เมื่อทำการประมาณการ ณ เวลา N โดย p'_y คือพิกัดที่ได้จากการแปลงสัมพรรค

* $B'_2 u'_2$ คือแมทริกซ์อธิบายความแม่นยำของเครื่องฟันทรายระยะไกล

$$w'_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ N(0, \sigma_{\text{Transformed Position}}^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ N(0, \frac{\sum_{i=1}^N (p'_y - \bar{y}_2)^2}{N}) \end{bmatrix} = \text{เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนในระบบที่ไม่}$$

สามารถคาดเดาได้

z'_2 = เวกเตอร์พิกัดของหัวฟันในแกน y ที่ได้จากการวัด

$C'_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ เนื่องจาก y'_2 อยู่ในหน่วย มม. จึงไม่จำเป็นต้องแปลงหน่วยการวัด

$m'_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ = ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสัญญาณรบกวนในการวัดของอุปกรณ์ควบคุมหลัก โดยผู้วิจัยสมมติให้เป็น 0

4.5 หมายเหตุ

จากการศึกษาความผันแปรที่เกิดในสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล พบว่าความผันแปรที่เกิดจากอุปกรณ์ควบคุมหลักนั้นประกอบด้วยความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error) และ ความเอนเอียง (Bias) ซึ่งส่งผลกระทบต่อความเที่ยงตรงและความแม่นยำ ตามลำดับ ในขณะที่อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือนนั้นสามารถเคลื่อนที่ตามพิกัดที่ได้รับจากอุปกรณ์ควบคุมหลักได้เที่ยงตรงและแม่นยำ สมรรถนะของคอมพิวเตอร์สามารถสั่งงานให้อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือนตอบสนองคำสั่งในการเคลื่อนที่ได้ทันท่วงที

สมการตัวแบบหลายสถานีของสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล สามารถใช้อธิบายความผันแปรของสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกลได้ โดยครอบคลุมแหล่งกำเนิดความผันแปรในระบบ ทั้งนี้ เครื่องพ่นทรายระยะไกลที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นเครื่องที่ถูกสร้างเพื่อการวิจัยในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมหลักที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์เคลื่อนที่ตามเสมือนที่จำลองขึ้นบนคอมพิวเตอร์

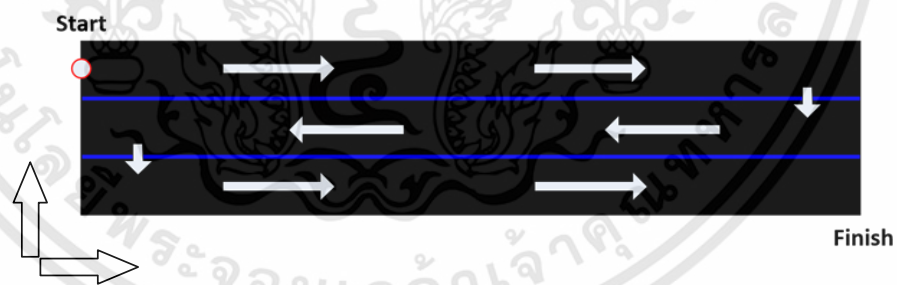
อย่างไรก็ดี เครื่องพ่นทรายระยะไกลเป็นเพียงสถานีหนึ่งในระบบพ่นทรายระยะไกล เพื่อวิเคราะห์ความผันแปรของทั้งระบบ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงานด้วยซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอในบทต่อไป

การลดความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกลแบบสองสถานี สำหรับสถานีผู้ปฏิบัติงาน

ในระบบพ่นทรายระยะไกลนั้นประกอบด้วยสถานีผู้ปฏิบัติงานและสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล โดยความหลังจากที่ได้ศึกษาและลดความผันแปรในสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกลซึ่งเป็นการเตรียมเครื่องพ่นทรายระยะไกลให้มีความแม่นยำและเที่ยงตรงมากที่สุด เพื่อลดผลกระทบที่มีต่อเอาท์พุทของระบบ ทำให้สามารถวิเคราะห์ความผันแปรที่เกิดจากสถานีผู้ปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง

สำหรับการศึกษาความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงาน จะให้ความสนใจความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของแขนของผู้ปฏิบัติงานในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักเป็นหลัก ซึ่งจะสนใจการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแนวแกน x (รูปที่ 5.1) ซึ่งเป็นลักษณะการเคลื่อนที่แบบหนึ่งทีพบได้บ่อยในงานพ่นทรายระยะไกล

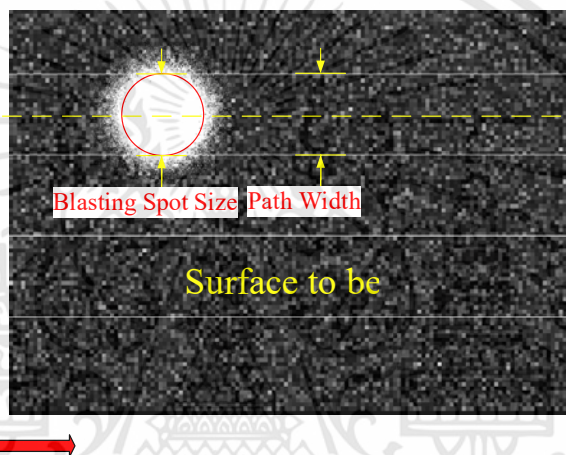
สมมติให้พื้นที่ที่ทำการพ่นมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยความยาวตามแนวแกน x มากกว่าความยาวตามแนวแกน y การวางแผนเส้นทางการพ่นจะกำหนดให้เป็นเส้นตรงไปตามแนวแกน x จากขอบด้านมุมบนซ้ายไปยังขอบมุมบนด้านขวา จากนั้นเลื่อนลงมายังพื้นที่ที่ยังไม่ได้ทำการพ่น แล้วพ่นจากขอบด้านขวาไปยังขอบด้านซ้าย ไปเรื่อยๆจนพ่นทำความสะอาดเต็มพื้นที่ ตัวอย่างเส้นทางการพ่นแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ลักษณะการเดินหัวพ่นบนพื้นผิวเรียบรูปทรงสี่เหลี่ยม

จากลักษณะการพ่นนี้ ขนาดความกว้างของเส้นทางการเดินหัวพ่นมีผลต่อปริมาณวัสดุพ่นที่ใช้ ความสะอาดและความเสียหายบนพื้นผิว และเวลารวมที่ใช้ในการพ่น (Jientrakul et al., 2018) ขนาดความกว้างของเส้นทางการพ่นที่เหมาะสมที่สุดในอุดมคติควรมีขนาดเล็กกว่าขนาดของรอยพ่นเล็กน้อย (รูปที่ 5.2) เพื่อให้สามารถพ่นได้เต็มเส้นทางและมีระยะทางรวมสั้นที่สุด ใช้เวลาน้อยที่สุด สิ้นเปลืองวัสดุพ่นน้อยที่สุด และความสม่ำเสมอของรอยพ่นใกล้เคียงกันทั่วทั้งพื้นผิว อย่างไรก็ตาม ขนาด

ความกว้างเส้นทางที่เท่ากับรอยพ่นนั้น ต้องการความแม่นยำและเที่ยงตรงจากผู้ปฏิบัติงานในการควบคุมหัวพ่น เพื่อให้หัวพ่นเคลื่อนที่อยู่ในเส้นทาง จุดกึ่งกลางของหัวพ่นต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นเป้าหมายที่อยู่กึ่งกลางของเส้นทาง ซึ่งในการปฏิบัติงานจริงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากในสถานการณ์จริงไม่มีเส้นเป้าหมายแสดงขณะทำการพ่น อีกทั้งการที่ประมาณจุดกึ่งกลางของเส้นทางด้วยสายตาและการควบคุมกล้ามเนื้อของผู้ปฏิบัติงานให้หัวพ่นเคลื่อนที่ไปตามพิกัดที่ต้องการนั้นอย่างแม่นยำและเที่ยงตรงต้องการการฝึกฝนอย่างมากและใช้เวลานาน ความผันแปรของพิกัดขณะทำการควบคุมหัวพ่น (หัวพ่นเคลื่อนที่ออกจากเส้นเป้าหมาย) ทำให้พื้นที่ขอบเส้นทางบางส่วนไม่ถูกพ่น หรือทำความสะอาดไม่หมด ส่งผลต่อคุณภาพผิว



รูปที่ 5.2 ขนาดความกว้างของเส้นทางและขนาดของรอยพ่นที่เหมาะสม

เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถควบคุมหัวพ่นได้อย่างแม่นยำและเที่ยงตรง ส่งผลให้เกิดความผันแปรของพิกัดของหัวพ่น ทำให้ขนาดความกว้างของเส้นทางมักจะถูกกำหนดให้มีขนาดเล็กกว่าขนาดรอยพ่นมากเพื่อครอบคลุมความผิดพลาดเมื่อผู้ปฏิบัติงานเคลื่อนหัวพ่นออกนอกเส้นเป้าหมาย ซึ่งส่งผลให้ระยะทางในการพ่นเพิ่มมากขึ้น มีการพ่นทับพื้นที่ที่ถูกพ่นแล้วมากขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองเวลาและเพิ่มต้นทุนการลดความผันแปรโดยการปรับปรุงความสามารถของผู้ปฏิบัติงานเพื่อลดความผิดพลาดการควบคุมกล้ามเนื้อด้วยการฝึกฝนอย่างหนักเป็นวิธีที่ใช้เวลาและความพยายามอย่างสูง อีกทั้งยังเพิ่มความเครียดในการปฏิบัติงานให้กับผู้ปฏิบัติงานในระยะยาว (Tovian et al., 2015) ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการลดความผันแปรที่ใช้ประโยชน์จากความผิดพลาดในการควบคุมกล้ามเนื้อแทนที่จะกำจัดความผิดพลาด

5.1 ความผันแปรที่เกิดจากสถานีผู้ปฏิบัติงาน

จากสมการตัวแบบความผันแปรหลายสถานีในสมการที่ 4.1 และ 4.2 สามารถสร้างสมการตัวแบบความผันแปรและระบุตัวแปรต่างๆสำหรับสถานีผู้ปฏิบัติงานได้ดังนี้

$$y_1^t = A_0^t y_0^t + B_1^t u_1^t + w_1^t \quad (5.1)$$

$$z_1^t = C_1^t y_1^t + m_1^t \quad (5.2)$$

โดย

y_1^t = เวกเตอร์พิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักซึ่งเป็นพิกัดที่ควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงาน

y_0^t = เวกเตอร์พิกัดของหัวพันที่คาดหวัง

A_0^t = แมทริกซ์คุณลักษณะที่แปลงพิกัดของอินพุทของสถานีผู้ปฏิบัติงานไปเป็นพิกัดเอาต์พุทของสถานีผู้ปฏิบัติงานที่ต้องการ

B_1^t = แมทริกซ์ของความคลาดเคลื่อนจากการปรับตั้งค่า (Calibration Error) เช่นการจัดท่าทางในการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงาน

u_1^t = เวกเตอร์พิกัดจุดอ้างอิงหรือจุดเริ่มต้นการเคลื่อนที่ของแขน (Desired Origin Point)

w_1^t = เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนในระบบที่ไม่สามารถคาดเดาได้ (Unmodeled Error)

z_1^t = เวกเตอร์พิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักที่ได้จากการวัด

C_1^t = แมทริกซ์ที่แปลงเวกเตอร์พิกัด y_1^t ให้อยู่ในหน่วยการวัดที่ต้องการ

m_1^t = ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสัญญาณรบกวนในการวัด

สำหรับสถานีผู้ปฏิบัติงาน B_1^t จะถูกสมมติให้เป็นศูนย์ เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมหลักนั้นสามารถรู้เชิงค่า ณ จุดเริ่มต้นได้ และ ผู้ปฏิบัติงานสามารถจัดท่าทางให้มีความพร้อมในการปฏิบัติงานได้ จึงถือเป็นการปรับตั้งค่า (Calibration) ก่อนการปฏิบัติงานจริง ส่วน w_1^t นั้นกำหนดให้เป็นศูนย์ เนื่องจากความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงานนั้นจะอยู่ในแมทริกซ์ A_0^t อยู่แล้ว และความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ควบคุมหลักจะถูกบรรจุอยู่ใน w_2^t แมทริกซ์ C_1^t จะถูกกำหนดให้เป็นแมทริกซ์เอกลักษณ์ และความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด (m_1^t) จะมีค่าเท่ากับศูนย์

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาพิกัดที่ผู้เข้าร่วมการทดลองได้ทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ควบคุมหลัก พบว่าผู้ปฏิบัติงานมีความผันแปรของพิกัดในลักษณะที่หลากหลายแตกต่างกันออกไป โดยความผันแปรที่เกิดขึ้นระกอบไปด้วยข้อบกพร่องด้านความเที่ยงตรงและความแม่นยำ เพื่อศึกษาความผันแปรที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลอง ให้ผู้ปฏิบัติงานควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักเพื่อพ่นพินฉิวตามเส้นทางที่กำหนดให้เป็นเส้นตรงจากพิกัด (0.0000, 477.7604,

7.8601) ไปยัง (275.0000, 477.7604, 7.8601) โดยขนาดความกว้างเส้นทางมีขนาด 12.9 มิลลิเมตร (35 พิกเซล) โดยรอยพ่นกำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.8 มิลลิเมตร (40 พิกเซล) ขนาดหัวพ่นแทนด้วยวงกลมสีแดงขนาด 2.9 มิลลิเมตร (8 พิกเซล) พิกัดเป้าหมายคือจุดกึ่งกลางของเส้นทาง ดังรูปที่ 5.2 โดยมีผู้เข้าร่วมการทดลอง 10 คน โดยผู้เข้าร่วมการทดลองแต่ละคนจะทำการทดลองคนละ 2 ครั้ง

จากการทดลอง ผู้วิจัยได้เก็บพิกัดของหัวพ่นระหว่างการทดลองเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ความผันแปรตัวอย่างพิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้ปฏิบัติงาน แสดงดังรูปที่ 5.3 โดยตัวชี้วัดความเที่ยงตรงที่ใช้คือค่าความแปรปรวนของพิกัดในแนวแกน y และค่าความแม่นยำจะวัดจากค่าเฉลี่ย เมื่อเทียบกับพิกัดเป้าหมายในแนวแกน y ที่วัดได้ตลอดเส้นทางดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าความแปรปรวนและค่าความแปรปรวนของผู้เข้าร่วมการทดลอง 10 คนในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักเป็นเส้นตรง

Participant	Variance		Mean	
	Trial 1	Trial 2	Trial 1	Trial 2
1	1.4506	1.2460	-1.6053	0.9009
2	1.0600	0.5851	-1.3722	-1.3923
3	1.7145	1.1104	-1.3540	-1.6639
4	1.4788	0.7743	1.4443	1.1816
5	0.7442	0.2832	-1.3039	-1.3662
6	1.5024	0.4830	2.4879	1.5596
7	0.6460	0.9139	-1.4188	0.9027
8	1.8070	1.2530	1.4288	1.2873
9	0.2690	1.0935	-2.3238	-1.9216
10	4.1377	5.4481	-1.1316	-2.0126
เฉลี่ย	1.1858	0.8602	(Absolute)	(Absolute)
เฉลี่ยรวม	1.0230		1.4952	

จากตารางที่ 5.1 พบว่า ค่าความแปรปรวนจากผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 10 มีค่าสูงผิดปกติ จึงตัดออกจากการพิจารณา เนื่องจากอาจส่งผลให้การวิเคราะห์ผลผิดพลาดได้

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.1 ค่าความแปรปรวนซึ่งเป็นตัวชี้วัดความเที่ยงตรงในการควบคุม (ความตรงของเส้นพิกัดหัวพ่นที่ถูกควบคุมโดยผู้เข้าร่วมการทดลอง) มีค่าตั้งแต่ 0.2690 ถึง 1.8070 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักของผู้เข้าร่วมการทดลองแต่ละคนนั้นแตกต่างกัน โดย

เส้นพิกัดที่มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.2690 แสดงดังรูปที่ 5.3 (ก) และฮิสโตแกรมของเส้นพิกัดแสดงดังรูปที่ 5.3 (ข) ซึ่งจากฮิสโตแกรม จะเห็นได้ว่า ข้อมูลมีความถี่สูงอยู่สองตำแหน่งที่ไม่ไกลจากกัน ทำให้ความแปรปรวนต่ำ ขณะที่เส้นพิกัดของผู้เข้าร่วมการทดลองที่มีค่าความแปรปรวน 1.8070 แสดงดังรูปที่ 5.3 (ค) ซึ่งจะเห็นได้ว่าความตรงของเส้นพิกัดแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาฮิสโตแกรมของข้อมูลในรูปที่ 5.3 (ง) ก็จะพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวค่อนข้างกว้างซึ่งสอดคล้องกับเส้นพิกัดที่โค้งสลับขึ้นลง ทำให้มีความแปรปรวนสูง

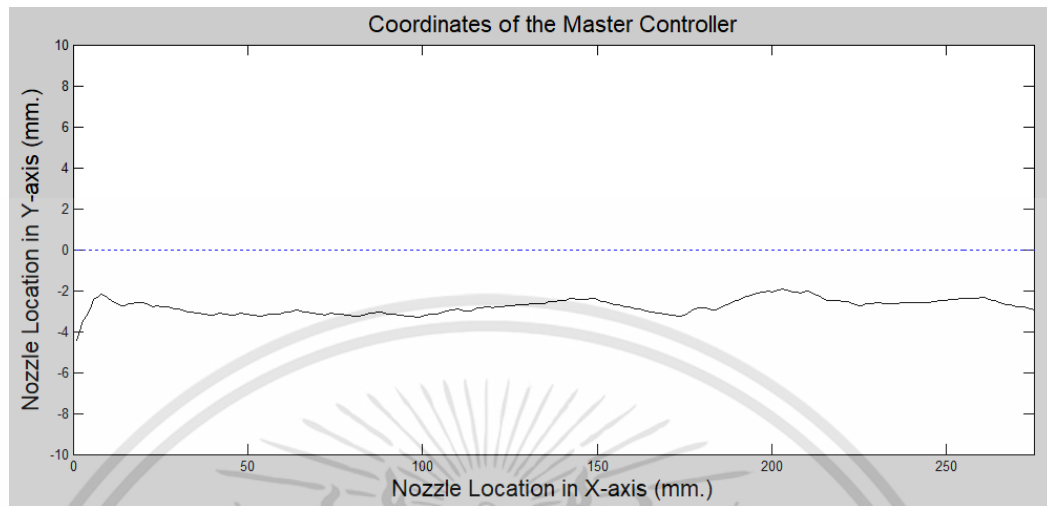
จะเห็นได้ว่ารูปแบบของเส้นพิกัดสามารถมีลักษณะที่แตกต่างกันได้หลากหลาย ทำให้คาดเดาได้ยาก ดังนั้น การเคลื่อนที่แบบเป็นเส้นตรงทำให้หาวิธีป้องกันหรือทำให้ความแปรปรวนลดลงได้ยากเช่นกัน

เมื่อพิจารณาความแม่นยำของเส้นพิกัด ค่าเฉลี่ยซึ่งใช้บ่งชี้ความแม่นยำนั้นมีค่าตั้งแต่ 0.9009 (รูปที่ 5.3 (จ)) ถึง 2.4879 (รูปที่ 5.3 (ก)) (ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์) โดยเส้นพิกัดของผู้เข้าร่วมการทดลองที่มีระดับความแม่นยำสูง (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.9009) จะค่อนข้างอยู่ใกล้เส้นพิกัดเป้าหมายตลอดเส้นทาง แต่ก็สังเกตเห็นได้ว่า เส้นพิกัดมีการแกว่ง ทำให้ค่าความแปรปรวนสูง (ปัญหาด้านความเที่ยงตรง) โดยจะเห็นได้ชัดจากฮิสโตแกรมในรูปที่ 5.3 (ฉ) ที่ข้อมูลมีการกระจายตัวค่อนข้างกว้าง (-3 ถึง 2) แต่ข้อมูลส่วนมากจะอยู่ในช่วง 0 ถึง -1 ขณะที่เส้นพิกัดของผู้เข้าร่วมการทดลองที่มีความแม่นยำต่ำ (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ -2.4879) ในรูปที่ 5.3 (ก) นั้นอยู่ห่างจากเส้นพิกัดเป้าหมายค่อนข้างมากตลอดเส้นทาง (ประมาณ 2.5 มม.) ซึ่งสอดคล้องกับฮิสโตแกรมที่ข้อมูลมีความถี่สูงที่ -2 ถึง -3 มม.

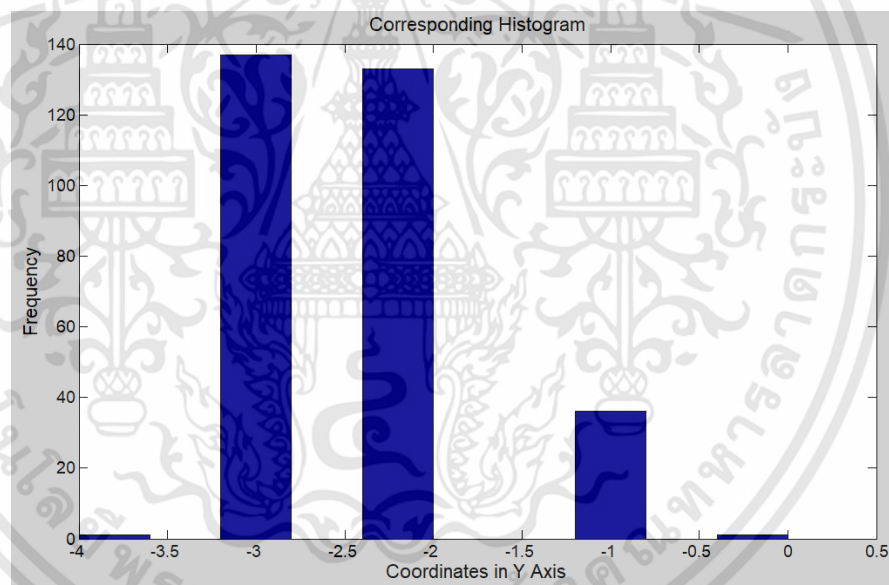
เนื่องจากขนาดเส้นทางที่ค่อนข้างกว้าง (10 มม.) ซึ่งแม้จะทำให้ผู้เข้าร่วมการทดลองมีอิสระในการเคลื่อนที่ แต่ก็มีผลลบในประมาณการเส้นพิกัดเป้าหมาย ดังนั้นจึงทำให้มีโอกาสสูงที่ผู้เข้าร่วมการทดลองจะเคลื่อนที่อุปกรณ์ควบคุมหลักออกห่างจากเป้าหมาย

หากเปรียบเทียบการระหว่างการทำซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะพบว่า ผู้เข้าร่วมการทดลองหลายคนมีค่าความแปรปรวนค่อนข้างแตกต่างกัน เช่นผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 6 ที่มีค่าความแปรปรวนในการทำทดลองครั้งที่ 1 เท่ากับ 1.5024 และค่าความแปรปรวนในการทำทดลองครั้งที่ 2 เท่ากับ 0.4830 ความแตกต่างนี้บ่งชี้ว่าผู้เข้าร่วมการทดลองไม่สามารถรักษาระดับความเที่ยงตรงในเส้นพิกัดได้ สะท้อนให้เห็นถึงการขาดความสามารถในการทำซ้ำด้านความเที่ยงตรง

นอกจากนี้ ในการทำการทดลองทั้งสองรอบ (20 ครั้ง) มีเพียง 2 ครั้ง หรือ 10% ที่มีค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ต่ำกว่า 1 ในขณะที่ผู้เข้าร่วมการทดลองส่วนที่เหลือ ไม่สามารถประมาณการพิกัดเป้าหมายได้ ทำให้ขาดความแม่นยำ นอกจากนี้ ในด้านการทำซ้ำ มีเพียง ผู้เข้าร่วมการทดลอง 2 คน ที่สามารถรักษาค่าเฉลี่ยของทั้งสองครั้งได้แตกต่างกันไม่ต่ำกว่า 90% ผู้เข้าร่วมการทดลอง 4 คน ที่สามารถรักษาค่าเฉลี่ยของทั้งสองครั้งได้แตกต่างกันไม่ต่ำกว่า 80% และ 4 คนที่เหลือมีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทั้งสองครั้งประมาณ 50%-60%

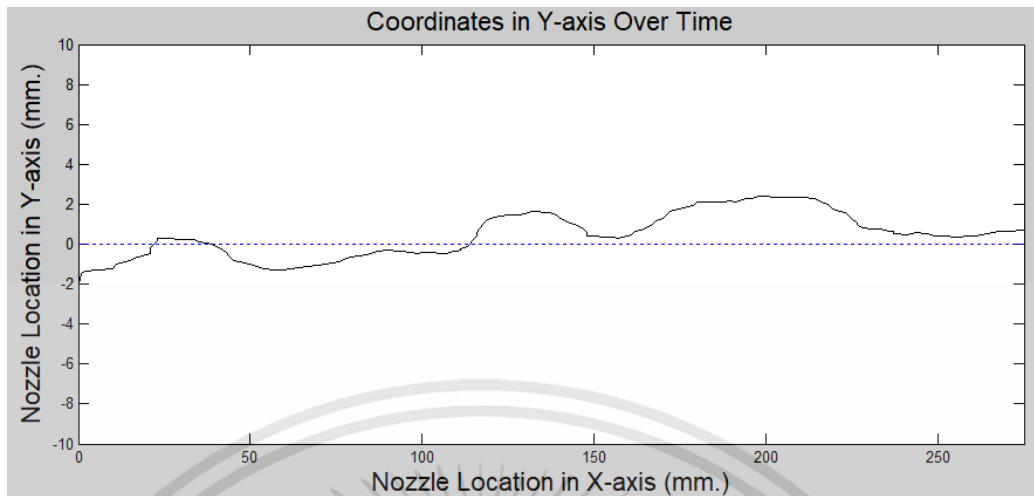


(ก)

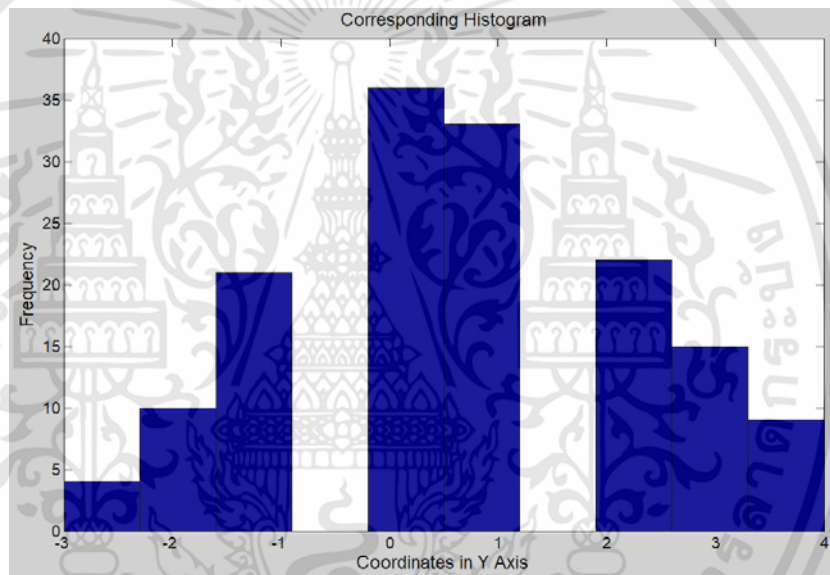


(ข)

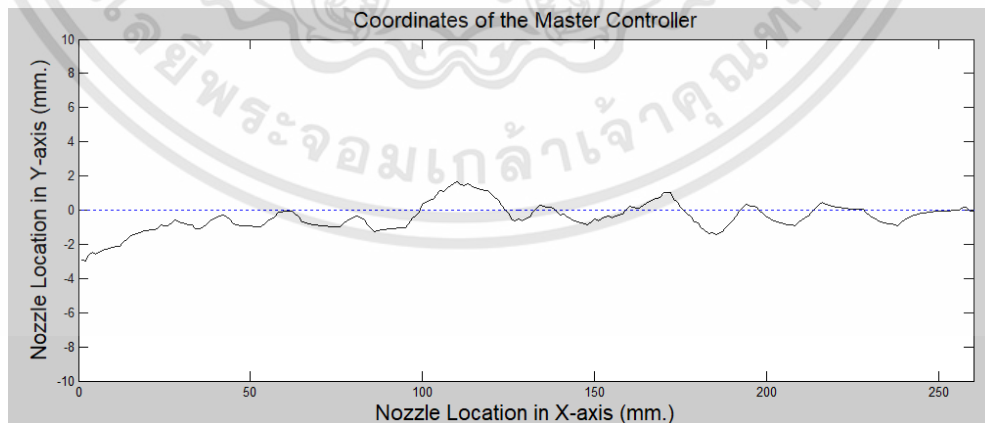
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

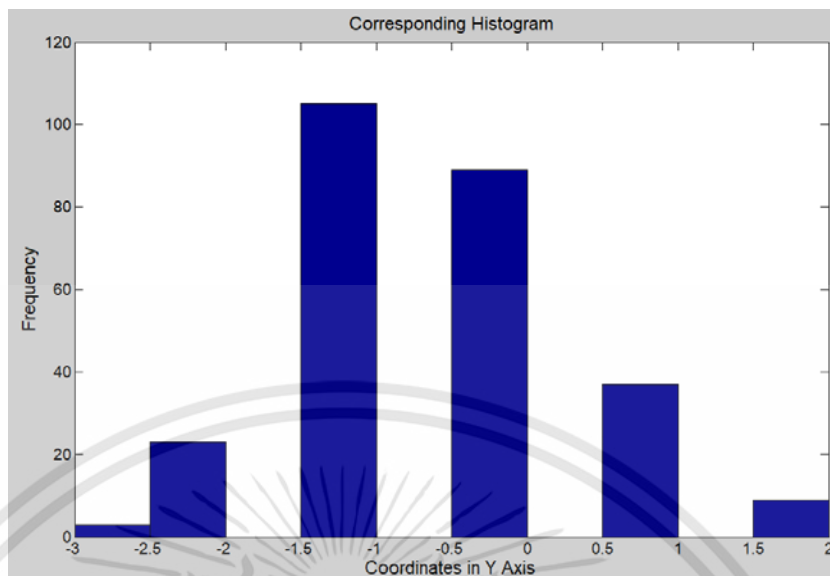


(ง)



(จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

รูปที่ 5.3 พิกัดของหัวฟันที่ได้จากการทดลอง (ก) พิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 9 และ (ข) ฮิสโตแกรมของพิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 9 (ค) พิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 8 และ (ง) ฮิสโตแกรมของพิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 8 (จ) พิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 1 และ (ฉ) ฮิสโตแกรมของพิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 1

จากปัญหาข้างต้น ทำให้เกิดความผันแปรของพิกัดของหัวฟันในแนวแกน y แม้ว่าขนาดของความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในระดับมิลลิเมตร แต่ในการปฏิบัติงานจริงนั้น อาจมีการขยายสัดส่วนของการเคลื่อนที่ระหว่างอุปกรณ์ควบคุมหลักและอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม ทำให้ความคลาดเคลื่อนที่ปลายทางของระบบมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย เช่นหากระบบฟันทรายระยะไกลหนึ่งๆ มีอัตราส่วนการขยายของการเคลื่อนที่ระหว่างอุปกรณ์ควบคุมหลักและอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม 1:10 หากมีความคลาดเคลื่อนที่อุปกรณ์ควบคุมหลักจากพิกัดเป้าหมาย 2 มม. จะทำให้หัวฟันที่อุปกรณ์เคลื่อนที่ตามคลาดเคลื่อนจากเป้าหมายไปถึง 20 มม. ส่งผลถึงพื้นผิวบริเวณขอบเส้นทางและขนาดพื้นที่ทับซ้อนของรอยฟันบริเวณขอบเส้นทางอาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ต้องการทำให้บริเวณดังกล่าวอาจจะไม่ถูกทำความสะอาดได้เรียบร้อย

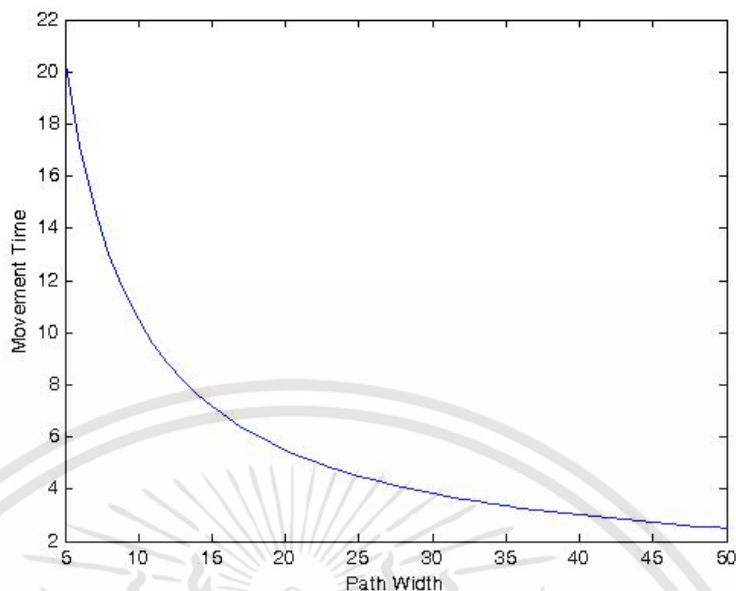
เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงาน (A'_b) ซึ่งทำให้พิกัดที่คาดหวัง (y'_b) คลาดเคลื่อนไปจากเดิม โดยเมื่อสมมติให้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการปรับตั้งค่า $B'_1 u'_1$ และความคลาดเคลื่อนในระบบที่ไม่สามารถคาดเดาได้ (w'_1) ไม่มีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนรวม (มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ A'_b) จะพบว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงานไม่มีรูปแบบที่แน่นอน และรูปแบบความคลาดเคลื่อนมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำซ้ำ ดังรูปที่ 5.3

กล่าวคือไม่สามารถสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นการปรับเปลี่ยนรูปแบบของความคลาดเคลื่อนในระบบให้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์จึงมีความจำเป็นสำหรับการอธิบายความผันแปรในระบบ เช่น ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบปกติ เป็นต้น

5.2 การปรับปรุงความเที่ยงตรงและความแม่นยำสำหรับผู้ปฏิบัติงาน

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าผู้เข้าร่วมการทดลองมีปัญหาในด้านความเที่ยงตรงและความแม่นยำรวมถึงการทำซ้ำ ทั้งนี้ เนื่องจากความสามารถในการควบคุมกล้ามเนื้อให้บังคับเส้นพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักเป็นเส้นตรงของแต่ละคนมีขีดจำกัดที่ไม่เท่ากันทำให้เกิดปัญหาด้านเที่ยงตรง นอกจากนี้ความสามารถในการประมาณการพิกัดเป้าหมายด้วยสายตาของแต่ละคนที่มีไม่เท่ากัน ทำให้เส้นพิกัดที่ตนเองกำลังควบคุมห่างออกจากเป้าหมาย

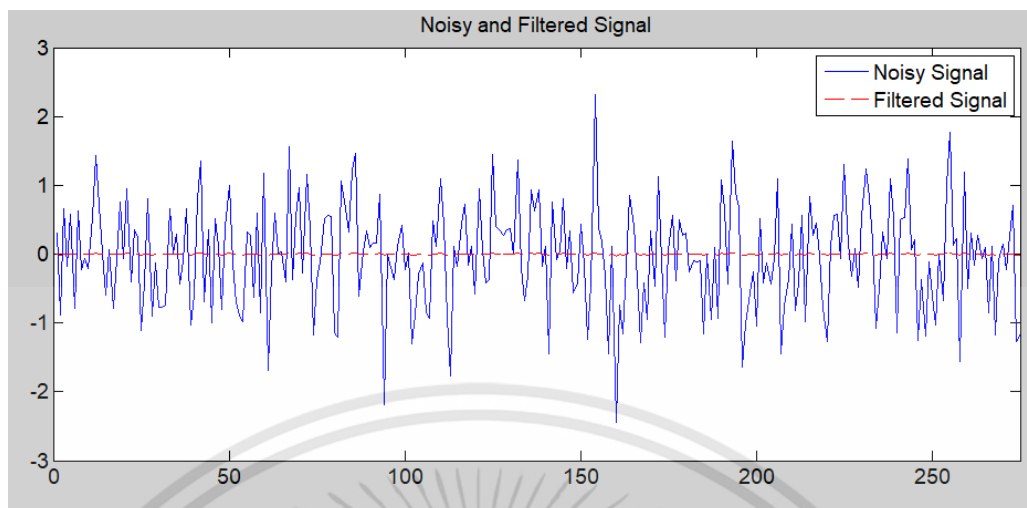
ทั้งนี้สาเหตุหลักสาเหตุหนึ่งคือขนาดเส้นทางที่กว้าง ทำให้ผู้เข้าร่วมการทดลองมีอิสระในการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลัก ซึ่งทำให้มีโอกาสสูงที่พิกัดที่ควบคุมจะไม่ตรงกับพิกัดเป้าหมาย การลดขนาดเส้นทางหรือกำหนดเส้นช่วยนำทาง (Guideline) อาจช่วยปรับปรุงความเที่ยงตรงและความแม่นยำได้ แต่อาจจะเป็นสาเหตุทำให้เวลารวมในการพ่นยาวนานขึ้น โดยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นของผู้ปฏิบัติงานแต่ละคนอาจไม่เท่ากัน ดังนั้นอาจจะมีผู้ปฏิบัติงานบางคนที่ใช้เวลายาวนานมากเมื่อขนาดเส้นทางแคบลง ขณะที่ผู้ปฏิบัติงานบางคนอาจใช้เวลาสั้นกว่าเวลาที่เหมาะสมเล็กน้อย ทำให้ยากต่อการควบคุม ทั้งนี้ เวลาที่ยาวนานขึ้นนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตและสิ้นเปลืองวัสดุ อีกทั้งยังก่อให้เกิดความเสียหายบนพื้นผิวมากขึ้นด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างของเส้นทางและเวลารวมในการปฏิบัติงานสามารถอธิบายได้โดยกฎสตีริง (Steering Law) (Accot and Zhai, 1997) ที่ระบุว่า ในระยะทางที่เท่ากัน ขนาดเส้นทางที่เล็กลงจะทำให้เวลาในคลื่อนที่ (อยู่ในเส้นทาง) นานขึ้น โดยความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 5.4



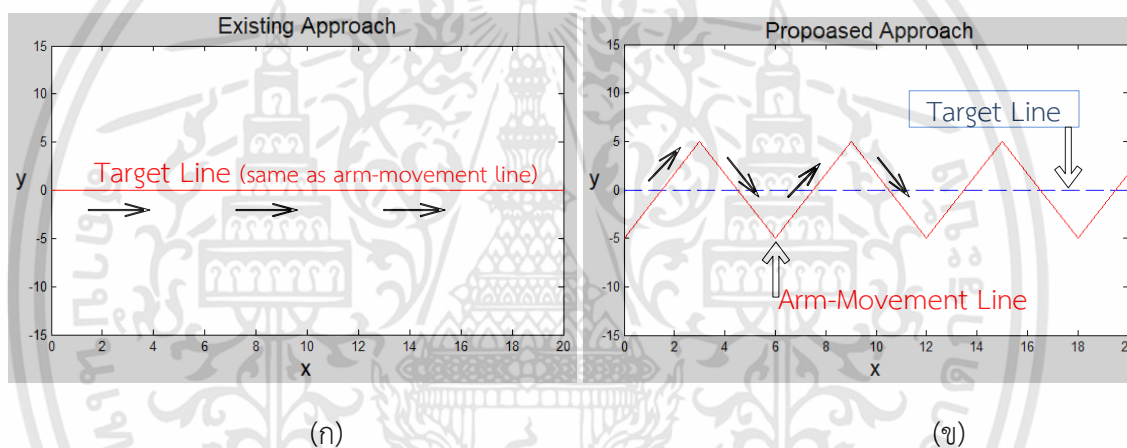
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลารวมในการเคลื่อนที่และขนาดความกว้างของเส้นทางตามกฎสตีเรียจ (Steering Law)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงค้นหาวิธีอื่นในการปรับปรุงความเที่ยงตรงและแม่นยำของเส้นพิกัด โดยวิธีที่นำเสนอ นั้น มีแนวคิดมาจากการลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นคลื่นปลายแหลมหรือฟันเลื่อย โดย ในทางไฟฟ้า มีหลากหลายวิธีที่ใช้ลดสัญญาณรบกวนเหล่านี้ เช่นการทำให้สัญญาณราบเรียบหรือการ กรองสัญญาณ ดังรูปที่ 5.5 ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดให้เส้นพิกัดเป้าหมายเปรียบเสมือนสัญญาณทางไฟฟ้าที่ ผ่านการกรองเอาสัญญาณรบกวนออกแล้ว โดยสัญญาณรบกวนคลื่นปลายแหลมนั้นจะถูกสร้างขึ้นโดย ผู้ปฏิบัติงาน (รูปที่ 5.6) ซึ่งวิธีนี้จำทำให้ผู้ปฏิบัติงานหลีกเลี่ยงการเคลื่อนที่หัวพันเป็นเส้นตรงไปตาม แนวแกน x ซึ่งมนุษย์ทำได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ตามแนวแกน y (Flash and Hogan, 1985) โดย

1. เมื่อกำหนดขนาดความสูงของคลื่นให้มีขนาดเท่ากับขนาดความกว้างของเส้นทาง จะทำให้ ผู้ปฏิบัติงานต้องบังคับอุปกรณ์ควบคุมหลักให้เคลื่อนที่เป็นฟันเลื่อยเต็มเส้นทาง ดังนั้นค่าเฉลี่ย ของพิกัดรูปคลื่นนี้จะอยู่เข้าใกล้เส้นพิกัดเป้าหมาย (จุดศูนย์กลางของเส้นทาง) มากขึ้น ซึ่งเป็น การปรับปรุงความแม่นยำ
2. จากนั้นจึงใช้ตัวกรองเพื่อปรับคลื่นปลายแหลมให้ราบเรียบซึ่งเป็นการปรับปรุงความเที่ยงตรง

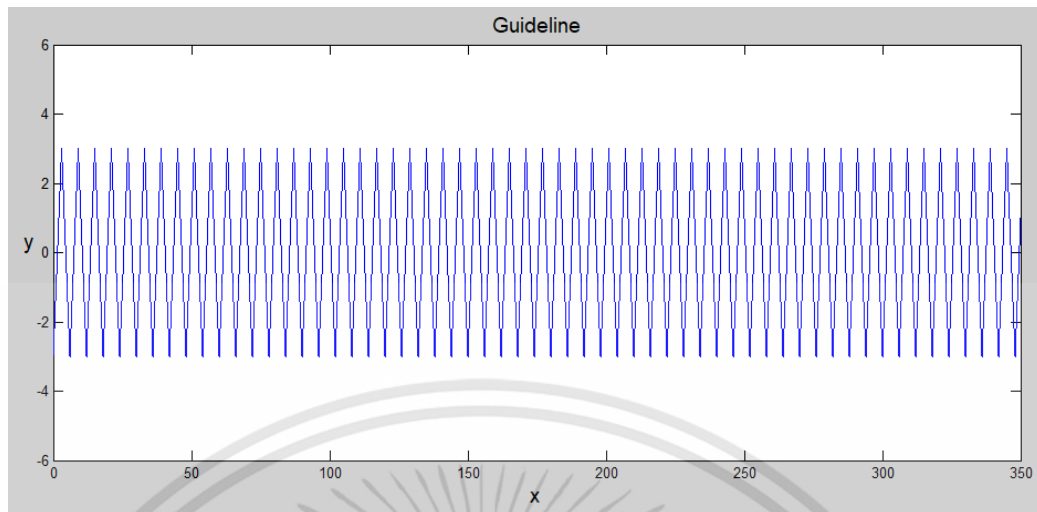


รูปที่ 5.5 สัญญาณที่มีคลื่นรบกวนและสัญญาณที่ผ่านการกรอง



รูปที่ 5.6 รูปแบบการเคลื่อนที่ของแขนเพื่อควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลัก (ก) วิธีเดิม (ข) วิธีที่นำเสนอ

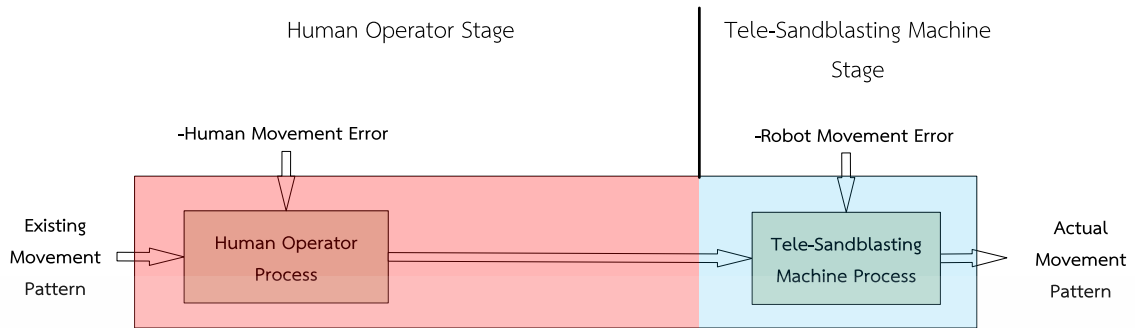
ในการสร้างเส้นพิกัดเลียนแบบสัญญาณรบกวนของผู้ปฏิบัติงานนั้น ผู้วิจัยได้กำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงานโดยใช้การฝึกซ้อมการเคลื่อนที่กับเส้นนำทาง (Guideline) ที่มีรูปแบบเป็นพื้นเลื่อยดังรูปที่ 5.7



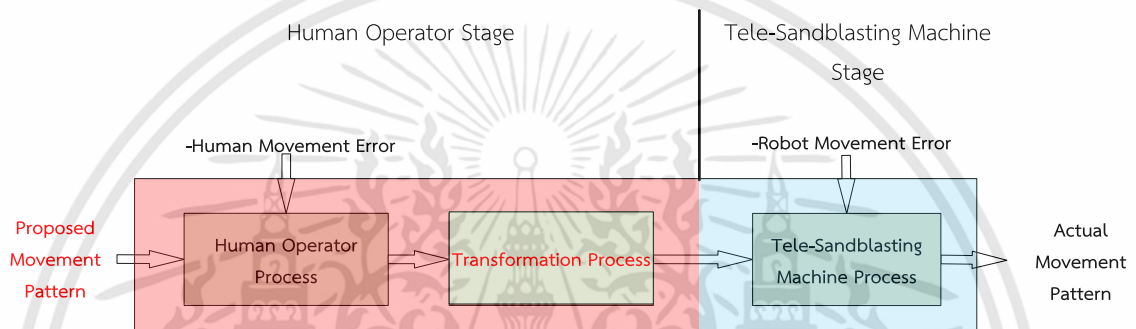
รูปที่ 5.7 ตัวอย่างเส้นทาง

ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่าการเคลื่อนที่ของแขนในรูปแบบคลื่นปลายแหลมนี้ จะไม่กำจัดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงาน แต่จะใช้ประโยชน์จากความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของแขน โดยความไม่เที่ยงตรงและไม่แม่นยำในการสร้างคลื่นปลายแหลม จะทำให้คลื่นมีทั้งขนาดเล็กกว่าและใหญ่กว่าขนาดคลื่นในเส้นทาง แต่โดยรวมแล้ว ข้อมูลส่วนใหญ่จะยังอยู่ใกล้เคียงกับจุดศูนย์กลางของเส้นทาง ซึ่งทำให้อัลกอริทึมของพิกัดการเคลื่อนที่ในแนวแกน y มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งคล้ายกับการกระจายตัวแบบปกติ

จากนั้นเมื่ออัลกอริทึมของพิกัดมีความใกล้เคียงกับการกระจายตัวแบบปกติที่กระจายตัวอยู่รอบๆ พิกัดเป้า (แสดงถึงข้อมูลมีความแม่นยำ) จะนำตัวกรองที่มีความเหมาะสมกับข้อมูลมาใช้ปรับคลื่นปลายแหลมให้ราบเรียบเพื่อปรับปรุงความเที่ยงตรง สำหรับตัวกรองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) เนื่องจากเหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลที่มีการกระจายตัวแบบปกติ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณได้รวดเร็วและไม่จำเป็นต้องเก็บค่าย้อนหลังทำให้ไม่สิ้นเปลืองหน่วยความจำในการเก็บข้อมูล โดยพิกัดที่ได้จากการควบคุมของผู้ปฏิบัติงาน จะถูกสมมติให้เป็นสิ่งรบกวนจากเครื่องวัดของตัวกรองคาลมาน จากนั้นตัวกรองคาลมานจะประมาณการค่าเอาท์พุทซึ่งคือพิกัดคาดหวังที่จะถูกส่งต่อไปให้อุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม ไดอะแกรมของวิธีที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 5.8



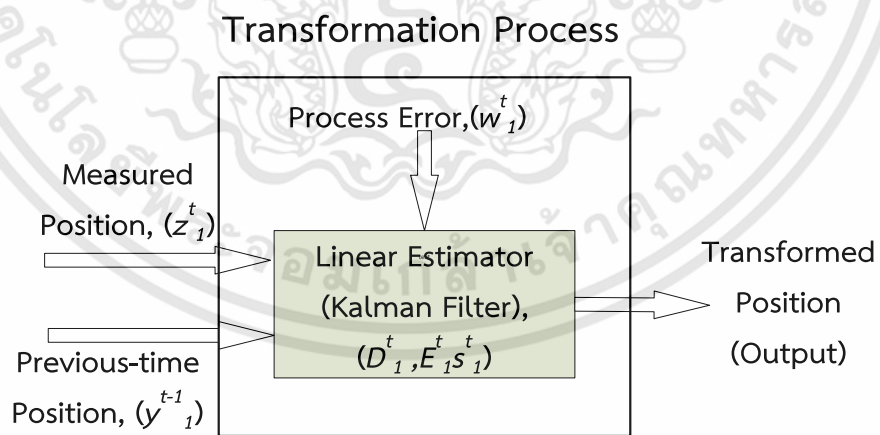
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.8 ไดอะแกรมของระบบพันทรายระยะไกลแสดง (ก) วิธีการเดิม

(ข) วิธีการลดความผันแปรที่นำเสนอ



รูปที่ 5.9 กระบวนการแปลงพิกัดที่ได้จากรูปแบบการเคลื่อนที่ที่นำเสนอไปเป็นผลลัพธ์ของสถานีผู้ปฏิบัติงาน

จากไดอะแกรมในรูปที่ 5.8 (ข) จะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่และเพิ่มกระบวนการแปลง (Transformation Process) ซึ่งได้แก่ตัวกรองคาลมานเข้ามาในระบบ โดยพิกัดที่ผู้ปฏิบัติงานต้องควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักจะเรียงตัวกันเป็นรูปคลื่นปลายแหลม จากนั้นจะนำพิกัดดังกล่าวไปใช้เสมือนเป็นสิ่งรบกวนของเครื่องมือวัดของตัวกรองคาลมาน โดยกระบวนการแปลงพิกัดด้วยตัวกรองคาลมานแสดงดังรูปที่ 5.9 กำหนดให้ผลลัพธ์ของสถานีจากคาบเวลาก่อนหน้า และพิกัดที่ได้จากผู้ปฏิบัติงานจากคาบเวลาปัจจุบัน คืออินพุทของตัวกรองคาลมาน และที่ออกจากตัวกรองคาลมานจะเป็นผลลัพธ์ของสถานีผู้ปฏิบัติงานที่ส่งต่อไปยังสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล

ในขั้นตอนปฏิบัตินั้น เมื่อมีการเพิ่มตัวกรองคาลมานเข้ามาในระบบ จึงจำเป็นต้องปรับตัวแปรต่างๆ ใหม่ เพื่อให้สอดคล้องกับตัวแปรที่ใช้ร่วมกับสถานีอื่นๆ โดยการทำงานของระบบคือ เมื่อกำหนดให้เอาท์พุทของสถานีคือเอาท์พุทที่ออกจากตัวกรองคาลมาน และเอาท์พุทของสถานีในคาบเวลาก่อนหน้าคืออินพุทของตัวกรองคาลมาน ส่วนอินพุทของสถานี (พิกัดเป้าหมายในแกน y) จะถูกใช้สำหรับอ้างอิงค่า P^0 ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเริ่มต้น เมื่อนำตัวกรองคาลมานเข้ามาในระบบแล้ว ตัวกรองคาลมานสามารถที่จะทำหน้าที่กรองสิ่งรบกวนที่ผู้ปฏิบัติงานสร้างขึ้น (คลื่นปลายแหลม) รวมไปถึงสิ่งรบกวนระบบด้วย ตัวแบบความผันแปรของสถานีผู้ปฏิบัติงานสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 5.3 และ 5.4

$$y'_1 = A'_0 y'_0 + B'_1 u'_1 + w'_1 \quad (5.3)$$

$$z'_1 = C'_1 y'_1 + m'_1 \quad (5.4)$$

ซึ่งสามารถนำมาสร้างตัวแบบของตัวกรองคาลมานแสดงได้ดังสมการที่ 5.5 และ 5.6

$$y'_j = D'_j y'_{j-1} + E'_j s'_j + w'_j \quad (5.5)$$

$$z'_j = C'_j y'_j + m'_j \quad (5.6)$$

โดยตัวกรองคาลมานจะพิจารณาสิ่งรบกวนที่คาดเดาไม่ได้ในระบบ (w'_j) และสิ่งรบกวนจากเครื่องมือวัด (m'_j) ด้วย

จากตัวแบบในสมการที่ 5.5 และ 5.6 สามารถนำไปสร้างสมการของตัวกรองคาลมานได้ดังสมการที่ 5.7 – 5.11 (ดัดแปลงจากสมการที่ 2.6 – 2.10)

$$\hat{y}_1^t = D^t y_1^{t-1} + E^t s^t \quad (5.7)$$

$$P^t = D^t P^{t-1} D^{tT} + W^t \quad (5.8)$$

$$K^t = P^t C^{tT} (C^t P^t C^{tT} + M^t)^{-1} \quad (5.9)$$

$$\hat{y}_1^t = \hat{y}_1^{t-1} + K^t (z_1^t - C^t \hat{y}_1^{t-1}) \quad (5.10)$$

$$P^t = (I - K^t C^t) P^{t-1} \quad (5.11)$$

โดยสมการที่ 5.7 – 5.10 คือขั้นตอนการประมาณการเอาต์พุทของระบบ (\hat{y}_1^t) ซึ่งสามารถรวมเป็นหนึ่งสมการได้ดังสมการที่ 5.12

$$\hat{y}_1^t = D^t \hat{y}_1^{t-1} + E^t s^t + (D^t P^{t-1} D^{tT} + W^t) \cdot C^{tT} (C^t (D^t P^{t-1} D^{tT} + W^t) \cdot C^{tT} + M^t)^{-1} \cdot (z_1^t - C^t (D^t \hat{y}_1^{t-1} + E^t s^t)) \quad (5.12)$$

โดย \hat{y}_1^t จะเป็นเอาต์พุทของสถานีผู้ปฏิบัติงานที่ผ่านการปรับปรุงความเที่ยงตรงและแม่นยำแล้ว โดยสามารถกำหนดตัวแปรในตัวแบบหลายสถานีได้ใหม่ดังนี้

$$y_1^t = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_1^t = \text{เวกเตอร์พิกัดของหัวพันที่เป็นเอาต์พุทของระบบ}$$

$$y_0^t = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_0^t = \text{เวกเตอร์พิกัดเป้าหมาย}$$

$A_0^t = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$ = แมทริกซ์แปลงพิกัดอินพุทไปสู่พิกัดเอาต์พุทของสถานี ซึ่งกำหนดให้เป็นแมทริกซ์เอกลักษณ์ เนื่องจากเอาต์พุทของสถานีถูกคาดหวังให้เป็นพิกัดเดียวกันกับที่รับอินพุทเข้ามา

$$B_1^t = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} = \text{แมทริกซ์การแปลงความคลาดเคลื่อนจากการปรับตั้งค่า (Calibration Error)}$$

$$u_1^t = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_1^t - y_1^0)}{N} \end{bmatrix} = \text{เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนที่วัดได้จากผู้ปฏิบัติงาน เมื่อทำการประมาณการ}$$

ณ เวลา N

* $B_1^t u_1^t$ คือแมทริกซ์อธิบายความแม่นยำของผู้ปฏิบัติงาน

$$w_I^t = \begin{bmatrix} 0 \\ N(0, \sigma_{Filtered\ Line}^2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ N(0, \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^t - \bar{y}_t)^2}{N}) \end{bmatrix} = \text{เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนในระบบที่ไม่}$$

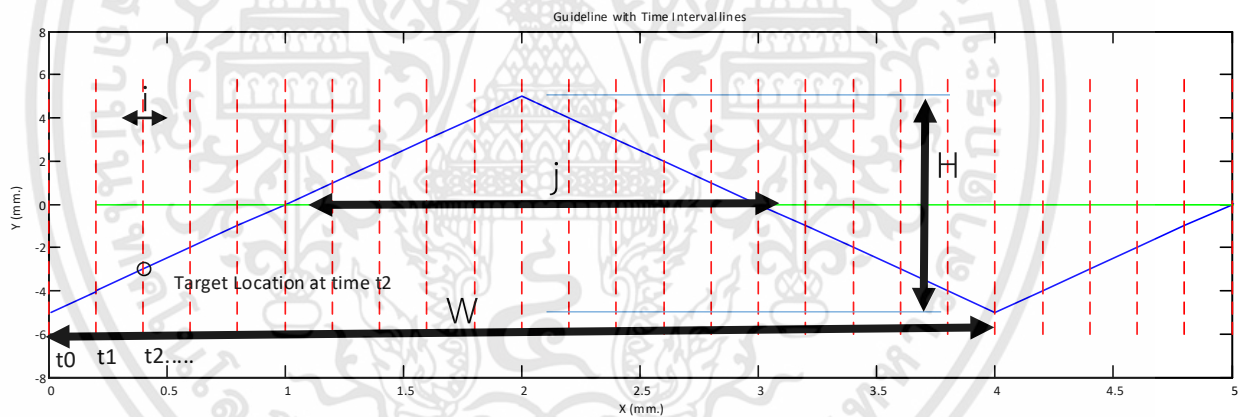
สามารถคาดเดาได้ ซึ่งใช้อธิบายความเที่ยงตรงของเอาท์พุท

$z_I^t =$ เวกเตอร์พิกัดของหัวพ่นในแกน y ที่ได้จากการวัด

$C_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ เนื่องจาก y_2^t อยู่ในหน่วย มม. จึงไม่จำเป็นต้องแปลงหน่วยการวัด

$m_I^t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} =$ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสัญญาณรบกวนในสถานี ซึ่งสมมติให้เป็น 0

ในการฝึกซ้อมของผู้ปฏิบัติงานก่อนการปฏิบัติงานจริงนั้น จำเป็นต้องฝึกซ้อมกับคลื่นที่มีขนาดเฉพาะเจาะจงกับงานนั้นๆ สมการที่ใช้ในการสร้างเส้นทางแสดงในสมการที่ 5.15 (เนื่องจากการเก็บพิกัดในการเคลื่อนที่ ทำโดยคอมพิวเตอร์ซึ่งเก็บข้อมูลเป็นคาบเวลา ดังนั้น จึงมีตัวแปรของคาบเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องในสมการด้วย)



รูปที่ 5.10 แสดงตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการสร้างเส้นทาง

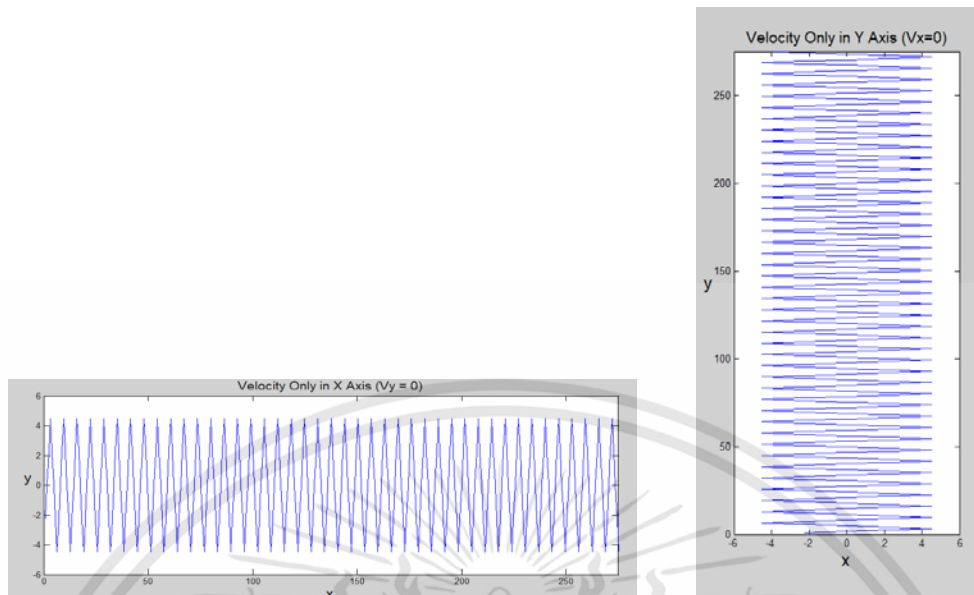
$$\begin{bmatrix} x_t^G \\ y_t^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\tan^{-1}(\frac{v_y}{v_x})) & -\sin(\tan^{-1}(\frac{v_y}{v_x})) \\ \sin(\tan^{-1}(\frac{v_y}{v_x})) & \cos(\tan^{-1}(\frac{v_y}{v_x})) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \cdot i \cdot t \\ (-1)^{\lfloor \frac{t}{j} \rfloor} \cdot (\frac{H}{2} + \frac{H}{j} \cdot (t \bmod j)) \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

โดย x_t^G คือพิกัดของเส้นทางในแนวแกน x ณ เวลา t (เวลาที่ต้องการให้อุปกรณ์ควบคุมหลักอยู่ที่พิกัดนั้นๆ) y_t^G คือพิกัดของเส้นทางในแนวแกน y ณ เวลา t , v_x ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ต้องการในแนวแกน x , v_y ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ต้องการในแนวแกน y (ตามเส้นพิกัดเป้าหมายที่ต้องการ เช่น พิกัดเป้าหมายที่เป็นเส้นตรงไปตามแนวแกน x จะมีความเร็วในแกน x เท่านั้น แม้คลื่นปลายแหลมที่ออกแบบจะมีการเคลื่อนที่ทั้งสองแนวแกนก็ตาม), i ปริมาณเวลาที่อยู่ระหว่างการเก็บข้อมูลแต่ละครั้ง, H คือความสูงของคลื่นปลายแหลมและ j คือจำนวนคาบเวลาที่อยู่ในช่วงครึ่งของความกว้างของฐานคลื่น(รูปที่ 5.10) ตัวอย่างของเส้นทางที่สร้างโดยสมการที่ 5.15 แสดงดังรูปที่ 5.11 ส่วนความกว้างของฐานของคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.16

$$W = 2 \cdot j \cdot i \cdot (|v_x + v_y|) \quad (5.16)$$

และระยะทางรวมของเส้นทางสามารถคำนวณได้จาก

$$D_T = \sqrt{(v_x \cdot i \cdot t)^2 + (v_y \cdot i \cdot t)^2} \quad (5.17)$$



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 5.11 เส้นทางที่สร้างจากสมการที่ 5.15 โดย (ก) เส้นพิกัดเป้าหมายเป็นเส้นตรงตามแนวแกน x (ไม่มีความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกน y) (ข) เส้นพิกัดเป้าหมายเป็นเส้นตรงตามแนวแกน y (ไม่มีความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x) (ค) เส้นพิกัดเป้าหมายเป็นเส้นตรงทำมุม 45 องศา (ความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากันทั้งสองแนวแกน)

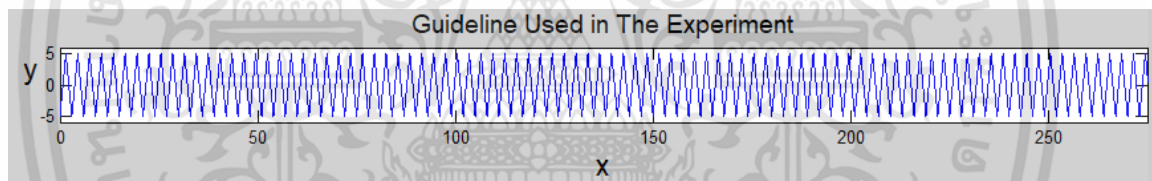
หมายเหตุ ข้อจำกัดของสมการสร้างเส้นทางคือ $\frac{l}{j}$ ต้องเป็นจำนวนเต็มเสมอ กล่าวคือ j ต้องเป็นจำนวนเต็ม หาก j ไม่ใช่จำนวนเต็ม จะทำให้ความสูงของคลื่นมีขนาดไม่เท่ากัน

5.3 การทดสอบวิธีการที่นำเสนอ

เพื่อเป็นการทดสอบวิธีการลดความผันแปรที่นำเสนอ ผู้วิจัยได้แบ่งการทดสอบเป็นสองขั้นตอน ได้แก่ 1.การทดสอบโดยการจำลอง ซึ่งเป็นการจำลองเส้นพิกัดจากนั้นใช้ตัวกรองเพื่อปรับเรียบ 2.การทดลองกับผู้ปฏิบัติงาน โดยให้ผู้เข้าร่วมการทดลองที่เข้าร่วมการทดลองควบคุมอุปกรณ์ควบคุมตามวิธีที่นำเสนอ

5.3.1 การทดสอบโดยการจำลอง

การทดสอบโดยการจำลองนั้น จะเป็นการทดสอบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถช่วยปรับปรุงความเที่ยงตรงได้ ก่อนที่จะนำไปทดลองกับมนุษย์ โดยผู้วิจัยได้จำลองเส้นพิกัดที่เหมือนกับเส้นทาง เป็นระยะทาง 275 มม. ไปตามแนวแกน x มีขนาดเส้นทแยงกว้าง 10 มม. เส้นทางมีขนาดคลื่นปลายแหลมสูง 10 มม. ฐานของคลื่นกว้าง 3 มม. ช่วงความกว้างของคาบเวลาในการเก็บข้อมูลคือ 100 มิลลิวินาที ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ต้องการประมาณ 8 มม./วินาที โดยเส้นทางมีความแปรปรวนเท่ากับ 8.3348 ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 เส้นทางที่ใช้ในการทดสอบ

จากนั้นจะใช้ตัวกรองคาลมานปรับคลื่นปลายแหลมให้เรียบ โดยกำหนดให้สิ่งรบกวนในเครื่องมือวัดมีค่าความแปรปรวนเท่ากับค่าความแปรปรวนของเส้นทาง ($\sigma_1^2 = 8.3348$) และมีการตั้งค่าตัวแปรอื่น ๆ ดังนี้

$E's^t = 0$ เนื่องจากในระบบไม่มีอินพุตควบคุม

$D^t = 1$ เนื่องจากเส้นพิกัดเป็นเส้นตรงตามแนวแกน x ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพิกัดในแนวแกน y

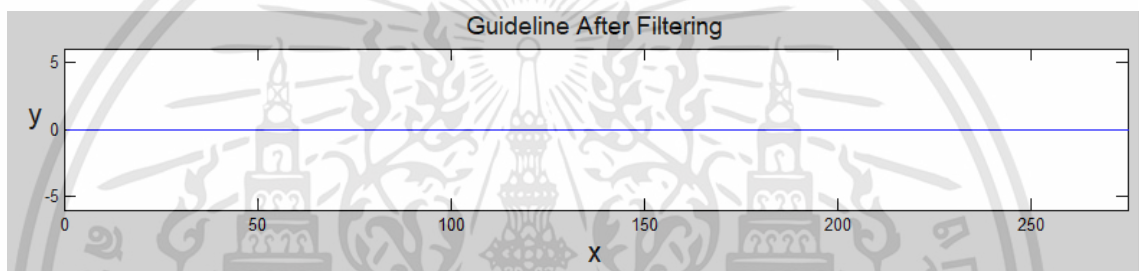
$F^t = 1$ เนื่องจากการวัดไม่มีการเปลี่ยนแปลงยูนิตหรือโดเมน

q_1^t ถูกสมมติให้มีค่าน้อยมากเข้าใกล้ศูนย์ (สัญญาณรบกวนในระบบไม่มีนัยสำคัญต่อเอาพุทของระบบ)

P_0 คือค่าความคลาดเคลื่อนเริ่มต้น (Initialization Error) มีค่าน้อยมากๆ เนื่องจากจุดเริ่มต้นการทำงานจะเริ่มจากจุด $y=0$ ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนเริ่มต้นจึงมีค่าน้อย แต่ไม่เท่ากับศูนย์

ในการกำหนดค่า q'_1 และ P_0 นั้น เนื่องจากไม่มีข้อกำหนดตายตัว แต่ใช้การปรับแต่งค่าจนได้เอาท์พุทที่พอใจ อย่างไรก็ตาม ข้อควรคำนึงคือตัวแปรทั้งสองควรมีค่าน้อยมากๆ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทดลองปรับค่าจะได้ระดับที่เอาท์พุทจากตัวกรองเป็นเส้นตรงโดยพิกัด $y = 0$ ตลอดเส้นทาง โดย ค่า $q'_1 = 0.0001$ และ $P_0 = 0.0001$

จากการปรับเส้นนำทางในรูปที่ 5.12 ด้วยตัวกรองคาลมานตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด เอาท์พุทของจากตัวกรองคาลมานแสดงดังรูปที่ 5.13

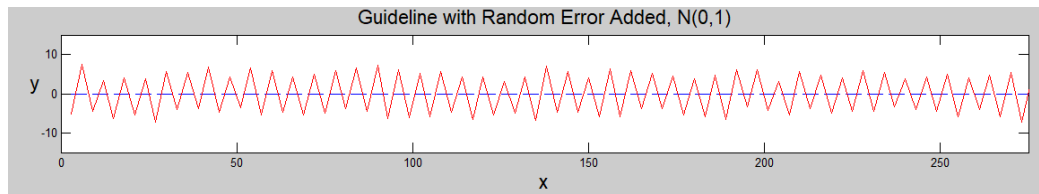


รูปที่ 5.13 เส้นนำทางหลังจากผ่านการปรับเรียบโดยตัวกรองคาลมาน

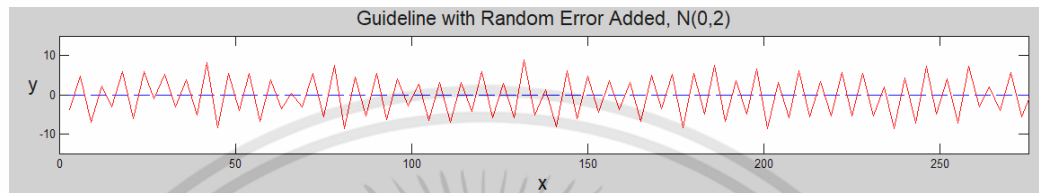
หลังจากใช้ตัวกรองคาลมานปรับเรียบแล้ว ค่าความแปรปรวนของเส้นพิกัดเท่ากับ $7.3279e-05$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวกรองคาลมานสามารถปรับเรียบเส้นนำทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากนั้น เพื่อจำลองความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเคลื่อนของแขนผู้ปฏิบัติงาน ผู้วิจัยจะทำการเพิ่มความคลาดเคลื่อนเข้าไปในพิกัดของเส้นนำทาง เพื่อเป็นการทดสอบผลกระทบของระดับความเที่ยงตรงและแม่นยำ

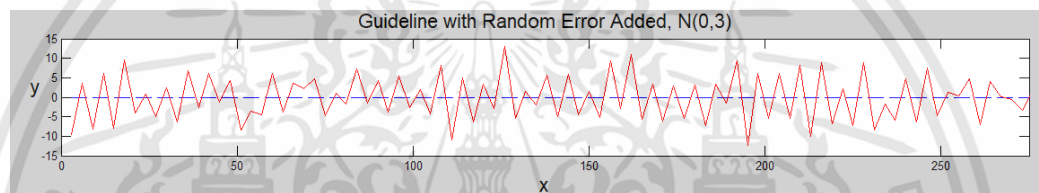
สำหรับการทดสอบผลกระทบของระดับความเที่ยงตรง จะทดสอบตัวกรองที่พารามิเตอร์เดิม แต่เปลี่ยนปริมาณของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม เพื่อทดสอบว่าตัวกรองจะยังทำหน้าที่ได้ดีอยู่หรือไม่เมื่อความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น โดยจะใช้ความคลาดเคลื่อนที่มีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยที่ศูนย์ และความแปรปรวนเท่ากับหนึ่งถึงห้า ($N_{(0,1)}-N_{(0,5)}$) โดยเส้นพิกัดที่จำลองความคลาดเคลื่อนที่มีความแปรปรวนตั้งแต่หนึ่งถึงห้าแสดงดังรูปที่ 5.14 (ก) - (จ) ตามลำดับ หลังจากที่ยังจำลองความคลาดเคลื่อนเพิ่มเข้าไปในพิกัดของเส้นนำทางแล้ว ฮิสโตแกรมของข้อมูลที่ได้อาจจะมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ ดังรูปที่ 5.15 (ก) - (จ) โดยมีช่วงความกว้างของฐานและความถี่ที่ตกต่างกันไปตามปริมาณของความแปรปรวน



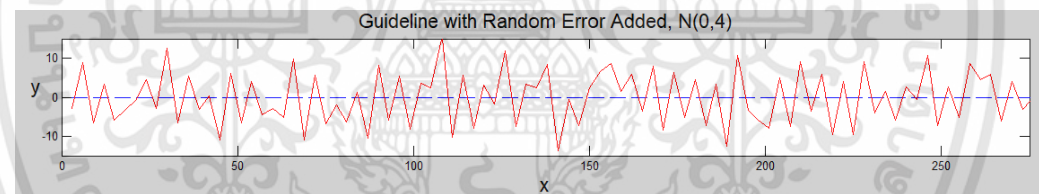
(ก)



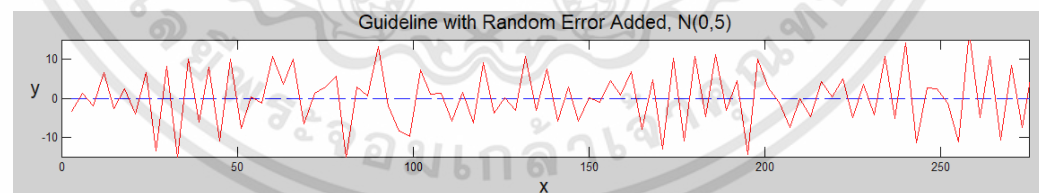
(ข)



(ค)



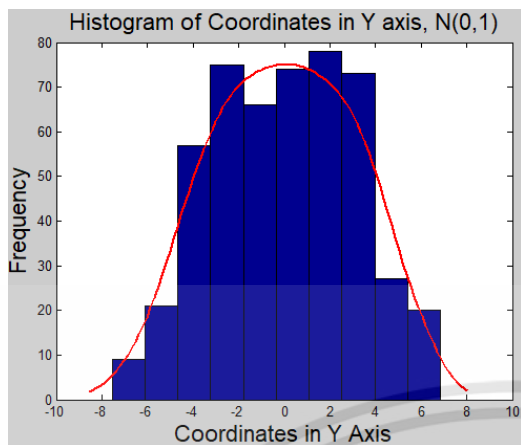
(ง)



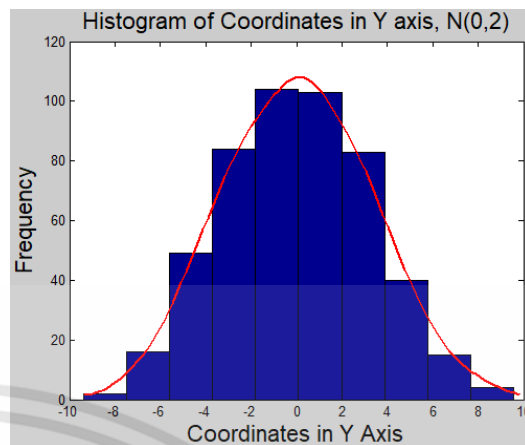
(จ)

รูปที่ 5.14 เส้นนำทางที่มีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (ก) $N(0,1)$ (ข) $N(0,2)$ (ค) $N(0,3)$ (ง) $N(0,4)$ (จ) $N(0,5)$

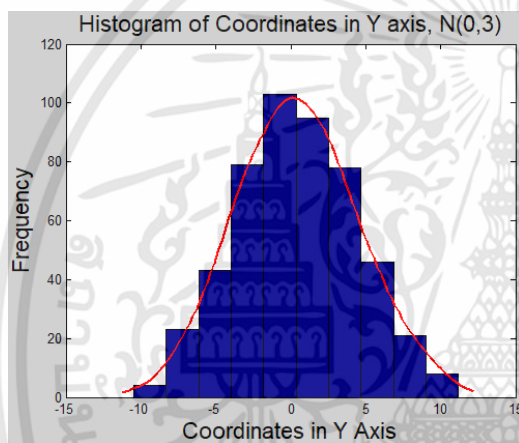
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



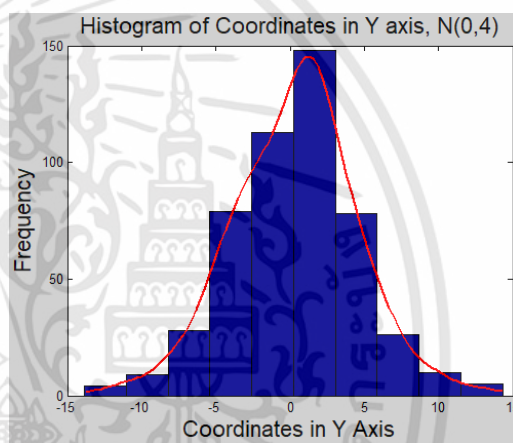
(ก)



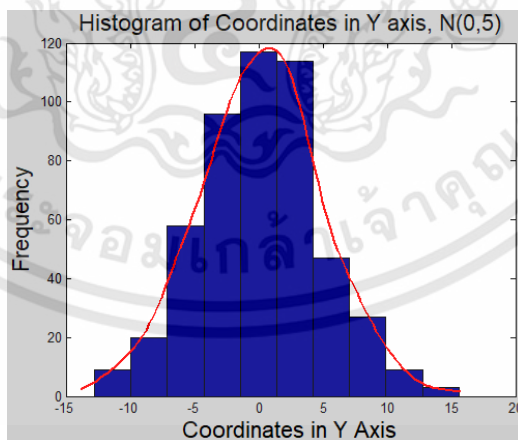
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 5.15 ฮิสโตแกรมของเส้นนำทางที่มีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (ก) $N(0,1)$ (ข) $N(0,2)$ (ค) $N(0,3)$ (ง) $N(0,4)$ (จ) $N(0,5)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

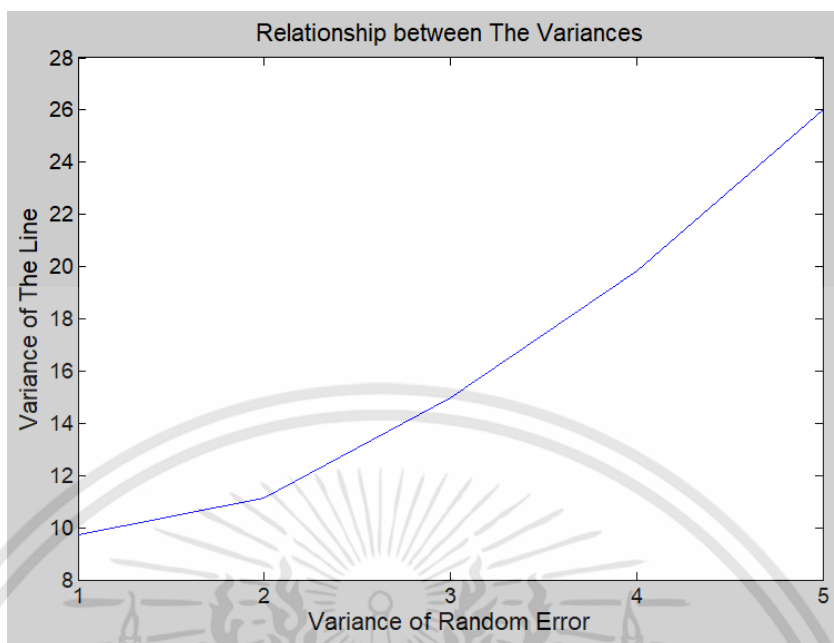
จากการสุ่มความคลาดเคลื่อนซ้ำ 5 ครั้ง ค่าความแปรปรวนของเส้นพิกัดเมื่อเพิ่มความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มที่มีระดับความแปรปรวนตั้งแต่ 1 ถึง 5 ลงไปในเส้นพิกัดแสดงดังตารางที่ 5.2 โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับความแปรปรวนของเส้นพิกัดและค่าความแปรปรวนที่เพิ่มลงไปบนเส้นพิกัดแสดงดังรูปที่ 5.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อระดับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มที่เพิ่มลงไปบนเส้นพิกัดมากขึ้น ระดับความแปรปรวนของเส้นพิกัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อระดับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มเพิ่มมากขึ้น ค่าความแปรปรวนของเส้นพิกัดก็มีการแกว่งมากขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 5.2 ค่าความแปรปรวนของเส้นพิกัดตามระดับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มที่เพิ่มลงในเส้นพิกัด

สุ่มครั้งที่	ความแปรปรวนของเส้นพิกัด				
	N(0,1)	N(0,2)	N(0,3)	N(0,4)	N(0,5)
1	9.9850	11.4499	14.3020	22.0621	27.4499
2	9.6989	10.6291	15.5330	22.6167	31.6375
3	9.6687	11.4559	15.9105	18.0063	23.6264
4	9.8055	11.4366	13.8610	17.3390	26.2795
5	9.4783	10.7756	15.2905	19.2157	21.0912
เฉลี่ย	9.7272	11.1494	14.9794	19.8479	26.0169
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1665	0.3680	0.7719	2.1286	3.5690

จากนั้น ผู้วิจัยจึงต้องการทำการทดสอบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งไว้สำหรับเส้นทางที่ไม่มี ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มผสมเมื่อต้องกรองเส้นพิกัดที่มีค่าความแปรปรวนเพิ่มขึ้นผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นอย่างไร เนื่องจากในการปฏิบัติงานจริงนั้น ไม่สามารถคาดเดาปริมาณความคลาดเคลื่อนที่แน่นอนได้ จึงต้องยึดถือค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเส้นทางไว้สำหรับเป็นค่าอ้างอิง

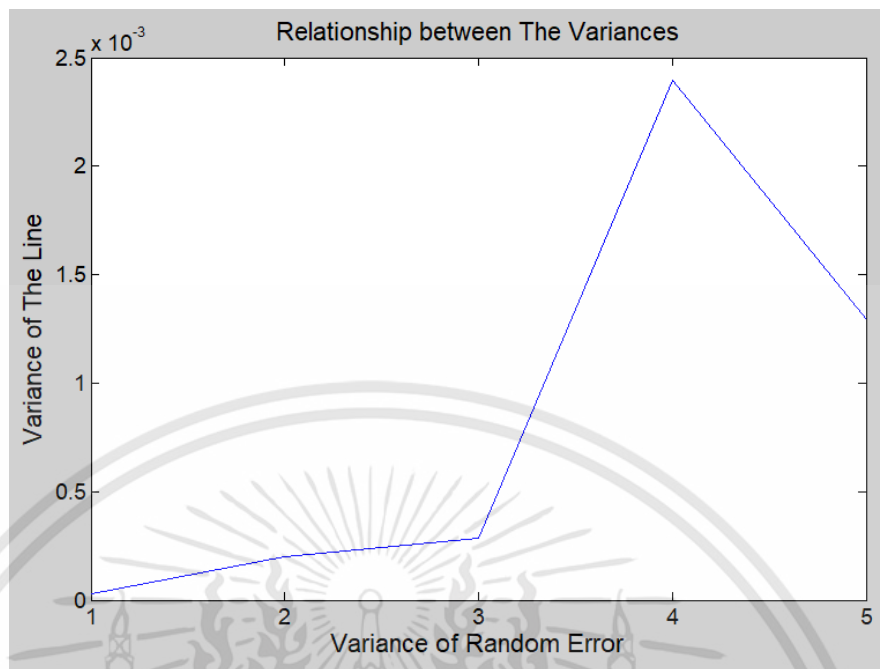
เมื่อผู้วิจัยได้ใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อปรับเส้นพิกัดให้เรียบ จะได้ค่าความแปรปรวนดังตารางที่ 5.3 โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับความแปรปรวนก่อนการกรองและค่าความแปรปรวนหลังการกรองแสดงดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความแปรปรวนของเส้นพิกัดและระดับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มที่เพิ่มลงในเส้นพิกัด

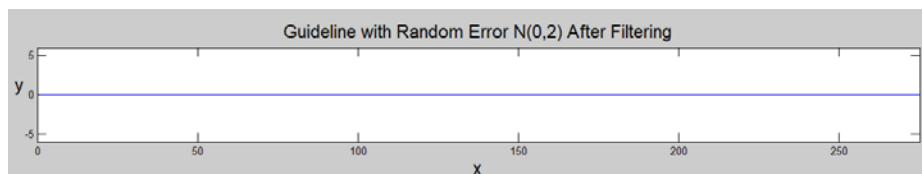
ตารางที่ 5.3 ค่าความแปรปรวนหลังจากผ่านตัวกรองตามระดับความคลาดเคลื่อนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนตั้งแต่หนึ่งถึงห้า

สุ่มครั้งที่	ความแปรปรวนของเส้นพิกัดหลังการกรอง				
	N(0,1)	N(0,2)	N(0,3)	N(0,4)	N(0,5)
1	3.9409e-05	2.5131e-04	2.8476e-04	0.0022	4.7514e-04
2	1.1684e-05	2.1844e-04	2.6959e-04	9.0188e-05	3.8622e-04
3	2.6893e-05	5.3006e-05	3.6205e-04	0.0034	0.0011
4	2.0975e-05	4.0467e-04	1.0665e-04	0.0024	7.0702e-04
5	4.8101e-05	7.8208e-05	3.9256e-04	0.0039	0.0038
เฉลี่ย	2.9412e-05	2.0113e-04	2.8312e-04	2.3980e-03	1.2937e-03
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.2969e-05	0.0001	9.9533e-05	9.0828e-06	0.0013

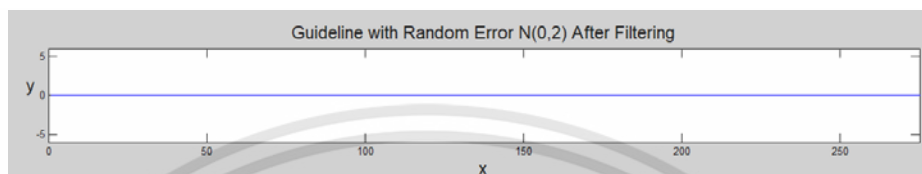


รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มที่เพิ่มลงในเส้นพิกัดและค่าเฉลี่ยของค่าความแปรปรวนหลังการกรอง

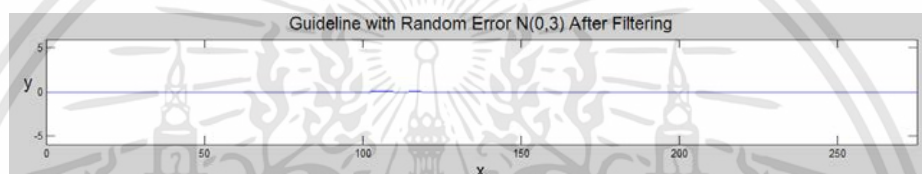
จากรูปที่ 5.17 จะเห็นได้ว่า หลังจากผ่านตัวกรองคาลมานแล้ว ไม่สามารถสรุปได้ว่าระดับความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มและค่าความแปรปรวนของเส้นพิกัดมีความสัมพันธ์กัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระดับความแปรปรวนเพิ่มขึ้น ค่าความแปรปรวนของเส้นพิกัดมีการแกว่งมากขึ้นโดยสังเกตได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แม้กระทั่งหลังจากผ่านตัวกรองแล้วการแกว่งก็ยังมากกว่าระดับความแปรปรวนที่ต่ำกว่า ทำให้ค่าความแปรปรวนหลังการกรองมีการแกว่ง อย่างไรก็ตาม ค่าความแปรปรวนของเส้นพิกัดหลังการกรองอยู่ในระดับต่ำกว่า 0.01 ซึ่งเป็นความละเอียดที่ยอมรับจึงสรุปได้ว่า ที่ระดับความแปรปรวนของเส้นพิกัดก่อนการกรองไม่เกิน 26 ตัวกรองคาลมานยังทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างของเส้นพิกัดที่ระดับความแปรปรวนหนึ่งถึงห้าหลังผ่านตัวกรองแสดงดังรูปที่ 5.18



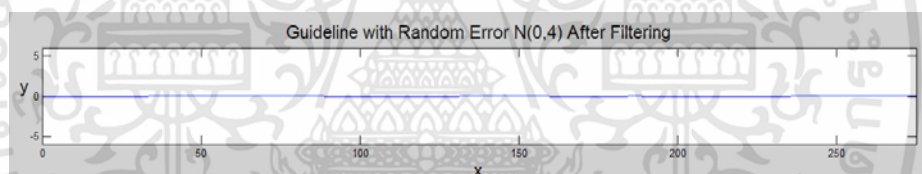
(ก)



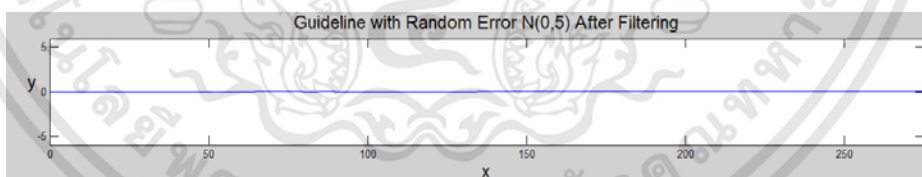
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 5.18 เส้นพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม หลังจากผ่านตัวกรองคาลมาน (ก) $N(0,1)$ (ข)

$N(0,2)$ (ค) $N(0,3)$ (ง) $N(0,4)$ (จ) $N(0,5)$

เมื่อได้ทำการทดสอบโดยการจำลองแล้ว พบว่าผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ ต่อไป ผู้วิจัยจึงทำการทดลองโดยใช้มนุษย์เข้าร่วมทำการทดลองเพื่อสร้างเส้นพิกัดจริง

5.3.2 การทดลองกับผู้ปฏิบัติงาน

ในการทดลองจริงนี้ จะเป็นการทดสอบว่าการให้ผู้ปฏิบัติงานสร้างคลื่นปลายแหลมให้เต็มเส้นทาง แทนที่การเคลื่อนเป็นเส้นตรงจะช่วยปรับปรุงความแม่นยำได้ อีกทั้งยังเป็นการทดสอบวิธีที่นำเสนอในการใช้งานจริงกับมนุษย์อีกด้วย

สำหรับการทดลองจะให้ผู้เข้าร่วมการทดลองที่เข้าร่วมการทดลองควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักเป็นเส้นตรงที่ได้นำเสนอในตอนต้นของบทนี้ทำการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักด้วยรูปแบบการเคลื่อนที่เป็นคลื่นปลายแหลมจากพิกัด (0.0000, 477.7604, 7.8601) ไปยัง (275.0000, 477.7604, 7.8601) จากนั้นตัวกรองคาลมานที่ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ไว้จะทำการปรับคลื่นปลายแหลมให้ราบเรียบ มีผู้เข้าร่วมการทดลองทั้งหมดจำนวน 10 คน แบ่งเป็นผู้ชาย 5 คน และผู้หญิง 5 คน โดยแต่ละคนจะทำการทดลองซ้ำสองครั้ง ก่อนทำการทดลอง ผู้เข้าร่วมการทดลองจะทำการฝึกซ้อมกับเส้นนำทางจรรยาสุกคุ้นเคย จึงเริ่มทำการทดลองจริง โดยในการทดลองจริง จะไม่มีเส้นนำทาง แต่ให้ผู้เข้าร่วมการทดลองเคลื่อนที่บนเลียนแบบเส้นนำทาง ลำดับในการทดลองจะถูกสุ่มเพื่อป้องกันความโน้มเอียงต่างๆที่จะเกิดกับผลการทดลอง โดยลำดับการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.4 ผู้เข้าร่วมการทดลองจะทำการควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักไปตามเส้นทางที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน x เป็นระยะทาง 275 มม. ขนาดเส้นทางกว้าง 10 มม. เส้นนำทางมีขนาดคลื่นปลายแหลมสูง 10 มม. ฐานของคลื่นกว้าง 3 มม. ช่วงความกว้างของคาบเวลาในการเก็บข้อมูลคือ 100 มิลลิวินาที ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ต้องการประมาณ 8 มม./วินาที โดยเส้นนำทางมีความแปรปรวนเท่ากับ 8.3348 (เส้นนำทางแสดงในรูปที่ 5.12)

ตารางที่ 5.4 ลำดับการทำการทดลอง

Order	Run	Participant	Order	Run	Participant
1	16	8	11	2	1
2	6	3	12	13	7
3	12	6	13	8	4
4	20	10	14	10	5
5	5	3	15	14	7
6	15	8	16	9	5
7	3	2	17	18	9
8	11	6	18	17	9
9	1	1	19	4	2
10	7	4	20	19	10

จากการทดลอง ผู้วิจัยได้เก็บค่าพิกัดในการเคลื่อนที่ จากนั้นนำมาคำนวณค่าดัชนีชี้วัดต่างๆ โดยจะเริ่มพิจารณาจากค่าความแปรปรวนของคลื่นปลายแหลมเมื่อเทียบกับพิกัดเป้าหมาย ($y = 0$) ที่ผู้เข้าร่วมการทดลองสร้างขึ้นดังแสดงในตารางที่ 5.5

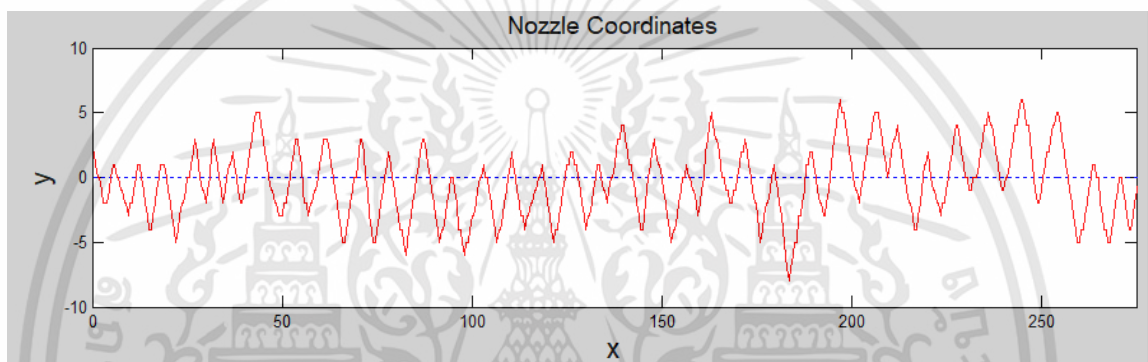
ตารางที่ 5.5 ความแปรปรวนของคลื่นปลายแหลมที่ผู้เข้าร่วมการทดลองสร้างขึ้น

Participant	Variance		Mean	
	Trial 1	Trial 2	Trial 1	Trial 2
1	6.2091	6.9543	-1.0845	-0.9453
2	6.6444	7.0406	-0.7278	-0.9284
3	6.2937	7.2367	-0.1676	-0.9970
4	6.2213	6.6222	-0.7007	-1.1089
5	8.5829	6.6927	-0.8087	-0.4041
6	5.7632	7.8622	-0.5048	-0.7883
7	6.8473	5.9483	0.0290	0.0265
8	9.8100	9.0987	-0.7286	-0.824
9	4.9270	6.4579	-1.0626	-0.9189
10	7.1642	6.2816	-0.6363	-0.6372
เฉลี่ย	6.8463	7.0195	0.6450	0.7578
เฉลี่ยรวม	6.9329		0.7014	

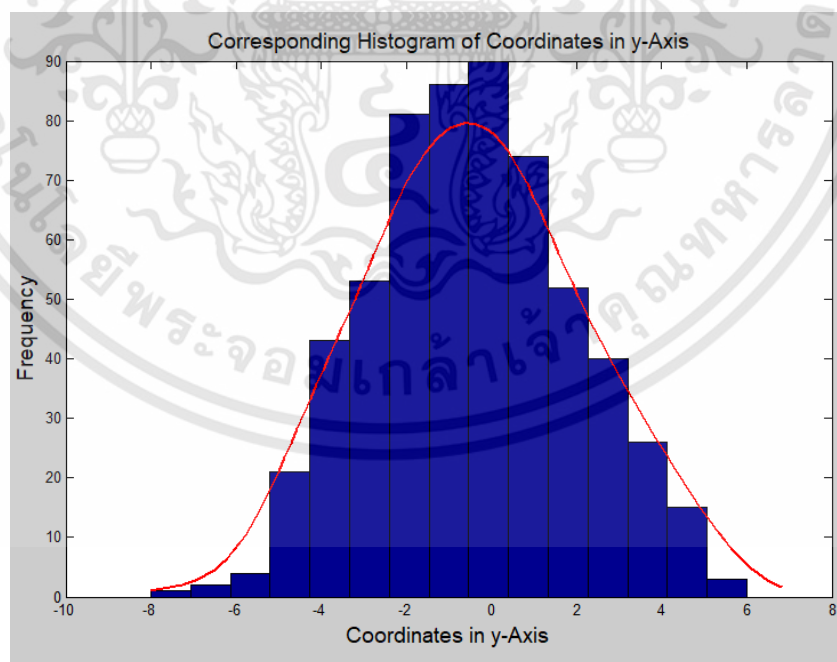
เมื่อเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนที่ได้จากผู้เข้าร่วมการทดลองกับเส้นทาง พบว่าผู้เข้าร่วมการทดลองส่วนใหญ่สร้างคลื่นปลายแหลมที่มีค่าความแปรปรวนเฉลี่ยน้อยกว่าซึ่งอนุมานได้ว่าขนาดความสูงของคลื่นน้อยกว่าเส้นทาง ซึ่งจากตัวอย่างของเส้นพิกัดที่ได้จากผู้เข้าร่วมการทดลองแสดงในรูปที่ 5.19 จะเห็นได้ว่ามีหลายคลื่นที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดความกว้างเส้นทาง (-5 ถึง 5) และอยู่ในขอบเขตของเส้นทาง แต่ก็มีบางคลื่นที่มีขนาดใหญ่กว่าความกว้างเส้นทางเช่นกัน

แม้ว่าผู้เข้าร่วมการทดลองส่วนใหญ่จะไม่สามารถสร้างคลื่นได้มีขนาดเท่ากับเส้นทาง (ค่าความแปรปรวนที่ได้จากการทดลองน้อยกว่าเส้นทาง) ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะการเคลื่อนที่เพื่อสร้างคลื่นปลายแหลมอาจเป็นระยะที่ถนัดของแต่ละบุคคล โดยเป็นระยะที่นิ้วและข้อมือขยับขึ้นลงได้อย่างสะดวก ดังนั้นขนาดเส้นทางที่ทำการพ่นและขนาดเส้นทางที่สร้างคลื่นปลายแหลมอาจไม่เท่ากัน

ส่วนขนาดจำนวนคลื่นที่ผู้เข้าร่วมการทดลองแต่ละคนสร้างขึ้นนั้นมีจำนวนไม่เท่ากันซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าแล้วแต่ความถนัดและความเร็วในการเคลื่อนที่ของผู้เข้าร่วมการทดลองแต่ละคน โดยคนที่สร้างจำนวนคลื่นน้อยจะเคลื่อนที่แขนค่อนข้างช้า (รูปที่ 5.19 (ก)) แสดงออกถึงว่าในขณะที่ปฏิบัติงาน ผู้เข้าร่วมการทดลองคนนั้นระมัดระวังในการเคลื่อนที่ตลอดเวลาโดยจะคำนึงถึงขอบเส้นทาง ขนาดความสูงและความกว้างของคลื่น ในขณะที่สร้างจำนวนคลื่นมากจะเคลื่อนที่แขนค่อนข้างเร็ว(รูปที่ 5.19 (ค)) แสดงถึงความเชื่อมั่นในการเคลื่อนที่ของแขนว่าสามารถทำซ้ำได้ โดยใช้ความรู้สึกซึ่งจากการสอบถาม ผู้เข้าร่วมการทดลองจะรู้สึกเหมือนกับการแรงแบบระบายสี

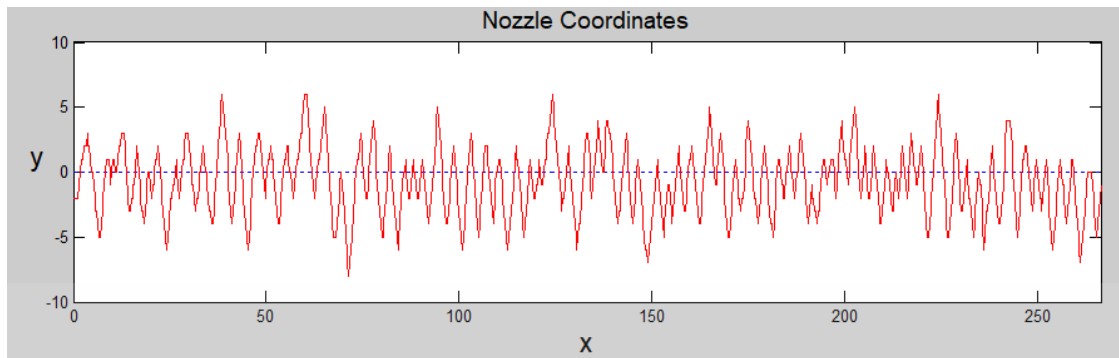


(ก)

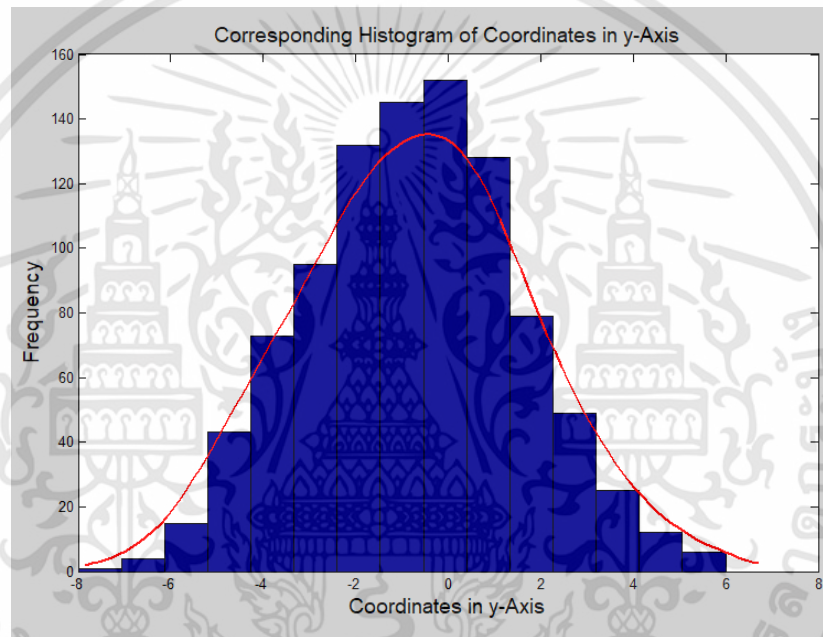


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.19 เส้นพิกัดที่สร้างโดยผู้เข้าร่วมการทดลอง โดย (ก) ผู้เข้าร่วมการทดลองที่สร้างจำนวนคลื่นน้อย (ข) ฮิสโตแกรมของข้อมูลในรูป (ก) (ค) ผู้เข้าร่วมการทดลองที่สร้างจำนวนคลื่นมาก (ง) ฮิสโตแกรมของข้อมูลในรูป (ค)

อย่างไรก็ดี การเคลื่อนที่ทั้งสองแบบ (ช้าและเร็ว) นั้น สามารถเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นพิกัดเป้าหมาย (เส้นประ) ได้ตลอดเส้นทาง บ่งบอกว่าแนวคิดในการเคลื่อนที่ทั้งสองแบบนี้ไม่มีผลต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งค่าความแปรปรวนของรูปที่ 5.19 (ก) เท่ากับ 6.6927 ในขณะที่ รูปที่ 5.19 (ข) มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 6.6444

เมื่อพิจารณาฮิสโตแกรมของข้อมูลในรูปที่ 5.19 (ข) และ (ง) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวคล้ายระฆังคว่ำ โดยมีจุดศูนย์กลางเข้าใกล้ศูนย์ บ่งบอกถึงความแม่นยำซึ่งเกิดขึ้นโดยการบังคับให้ผู้เข้าร่วมการทดลองเคลื่อนที่ให้เต็มเส้นทาง จึงมีค่าเฉลี่ยเข้าใกล้พิกัดเป้าหมาย จะเห็นได้ว่าวิธีนี้เป็นการปรับปรุงความแม่นยำอย่างได้ผล แม้ว่าผู้เข้าร่วมการทดลองไม่สามารถเลียนแบบเส้นทางได้เหมือนมาก เนื่องจากมีความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงาน แต่กลับทำให้ข้อมูลมีการกระจายตัวใกล้เคียงกับการกระจายตัวแบบปกติและกระจายตัวอยู่รอบพิกัดเป้าหมาย ซึ่งปรากฏการณ์นี้ยืนยันสมมติฐานที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น โดยวิธีการนี้ช่วยให้ผู้เข้าร่วมการทดลองมีปรับปรุงความแม่นยำให้คงที่และใกล้เคียงกันทุกคน ดังนั้น ข้อมูลพิกัดจะมีแค่ปัญหาด้านความเที่ยงตรงเท่านั้น ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการใช้ตัวกรองเพื่อปรับสัญญาณให้เรียบ

การตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองคาลมาน จะกำหนดค่าต่างๆตามค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ปรับเทียบกับเส้นทาง โดย:

$r'_1 = 8.3348$ ความแปรปรวนที่เกิดจากสิ่งรบกวนในเครื่องมือวัด

$E's^t = 0$ เนื่องจากในระบบไม่มีอินพุตควบคุม

$D' = 1$ เนื่องจากเส้นพิกัดเป็นเส้นตรงตามแนวแกน x ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพิกัดในแนวแกน y

$F' = 1$ เนื่องจากการวัดไม่มีการเปลี่ยนแปลงยูนิตหรือโดเมน

$q'_1 = 0.0001$ สิ่งรบกวนในระบบไม่มีนัยสำคัญต่อเอาพุทของระบบ

$P_0 = 0.0001$ ค่าความคลาดเคลื่อนเริ่มต้น (Initialization Error) มีค่าน้อยมากๆ เนื่องจากจุดเริ่มต้นการทำงานจะเริ่มจากจุด $y=0$ ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนเริ่มต้นจึงมีค่าน้อย แต่ไม่เท่ากับศูนย์

เมื่อผ่านการปรับเรียบโดยตัวกรองคาลมาน ความแปรปรวนของพิกัดในแนวแกน y และค่าเฉลี่ยของพิกัดในแนวแกน y ตลอดเส้นทาง และแสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบความแปรปรวนและค่าเฉลี่ยของเส้นพิกักระหว่างวิธีเดิมและวิธีที่นำเสนอ

Participant	Existing Approach				Proposed Approach			
	Variance		Mean		Variance		Mean	
	Trail 1	Trial 2	Trial 1	Trail 2	Trial 1	Trail 2	Trial 1	Trail 2
1	1.4506	1.2460	-1.6053	0.9009	0.1078	0.0375	-0.4432	-0.2629
2	1.0600	0.5851	-1.3722	-1.3923	0.0609	0.2286	-0.3688	-0.6083
3	1.7145	1.1104	-1.3540	-1.6639	0.0665	0.0821	-0.0355	-0.2783
4	1.4788	0.7743	1.4443	1.1816	0.0385	0.1380	-0.2521	-0.6067
5	0.7442	0.2832	-1.3039	-1.3662	0.1232	0.0290	-0.4643	-0.1775
6	1.5024	0.4830	2.4879	1.5596	0.0328	0.0395	-0.2043	-0.3564
7	0.6460	0.9139	-1.4188	0.9027	0.0246	0.0171	-0.0956	0.0299
8	1.8070	1.2530	1.4288	1.2873	0.0914	0.0882	-0.5739	-0.4387
9	0.2690	1.0935	-2.3238	-1.9216	0.0872	0.1179	-0.4010	-0.4891
10	4.1377	5.4481	-1.1316	-2.0126	0.0676	0.0621	-0.3505	-0.3780
เฉลี่ย	1.1858	0.8602	(Abs.) 1.6376	(Abs.) 1.3529	0.0703	0.0864	(Abs.) 0.3154	(Abs.) 0.3608
เฉลี่ยรวม	1.0230		1.4952		0.0783		0.3381	

จากตารางที่ 5.6 เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากผู้เข้าร่วมการทดลองทั้ง 10 คน พบว่า ผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 10 มีค่าความแปรปรวนแตกต่างจากผู้เข้าร่วมการทดลองคนอื่นๆ ดังนั้น เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการวิเคราะห์ ผู้วิจัยจึงไม่พิจารณาผลจากผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 10

เมื่อเปรียบเทียบความแปรปรวนระหว่างสองวิธี จะพบว่า ความแปรปรวนเฉลี่ยรวมลดลงจาก 1.0230 เหลือเพียง 0.0783 เมื่อทำการทดสอบทางสถิติด้วย paired t-test (ตารางที่ 5.7) พบว่า ค่าเฉลี่ยของทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันถึง 0.9450 ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของวิธีเดิมมีค่า 0.468 ในขณะที่วิธีที่นำเสนอมีค่าเพียง 0.053 ซึ่งบ่งบอกถึงวิธีที่นำเสนอช่วยลดความแตกต่างระหว่างบุคคลด้วย ค่า p-value จากการทดสอบนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.05 นั้นสามารถสรุปได้ว่า วิธีที่นำเสนอช่วยลดความแปรปรวนในเส้นพิกัได้อย่างมีนัยสำคัญด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% บ่งชี้ว่าความเที่ยงตรงของเส้นพิกัถูกปรับปรุงขึ้นด้วยวิธีที่นำเสนอ

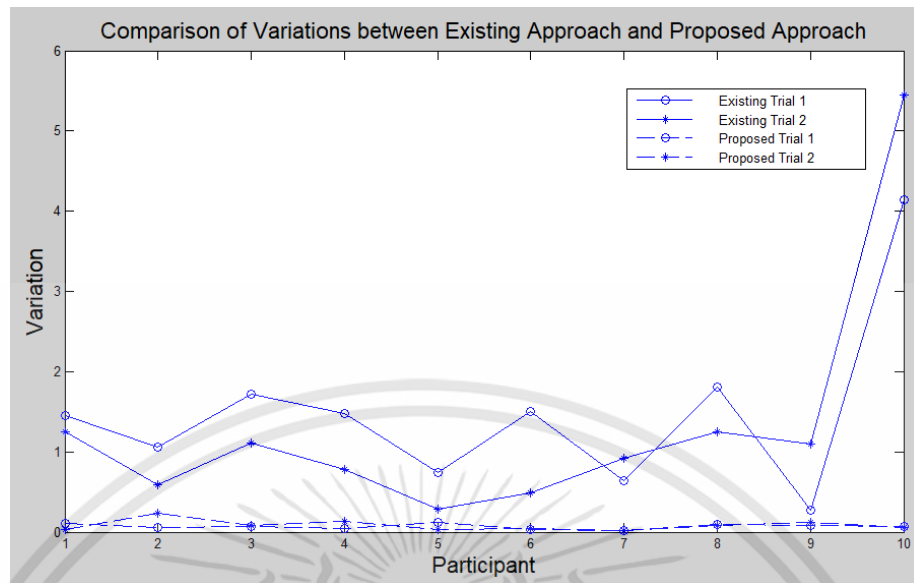
ตารางที่ 5.7 Paired t-test ระหว่างความแปรปรวนจากวิธีเดิมและวิธีที่นำเสนอ

Paired T for Existing - Proposed				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Existing	18	1.023	0.468	0.110
Proposed	18	0.078	0.053	0.012
Difference	18	0.945	0.477	0.112

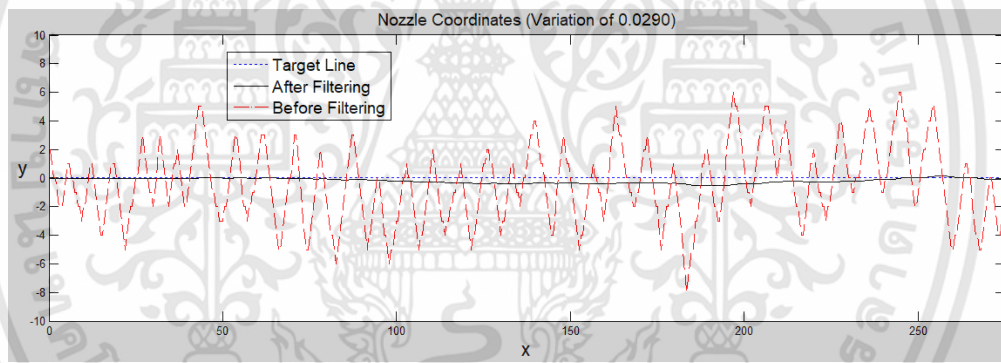
95% CI for mean difference: (0.708, 1.182)

T-Test of mean difference = 0 (vs \neq 0): T-Value = 8.41 P-Value = 0.000

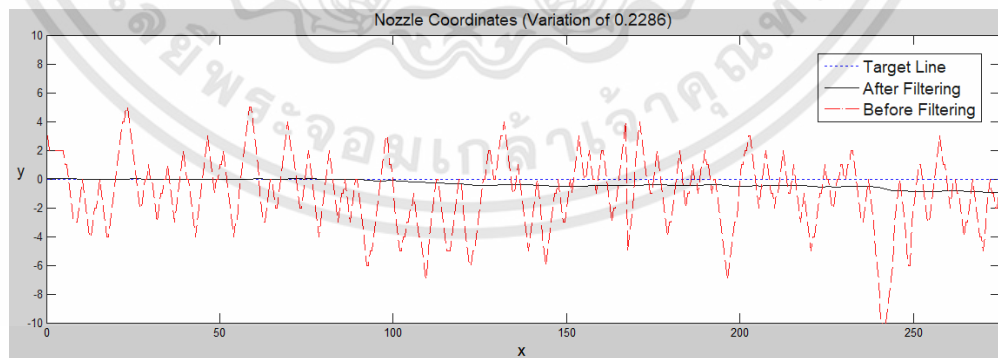
นอกจากนี้ จะสังเกตได้ว่าวิธีที่นำเสนอสามารถช่วยลดความแตกต่างในการทำซ้ำด้านความเที่ยงตรง โดยสังเกตได้จากรูปที่ 5.20 เส้นทึบทั้งสองเส้น (การทำซ้ำวิธีเดิมครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2) นั้นมีความห่างกัน เมื่อเทียบกับความห่างของเส้นประทั้งสองเส้น (การทำซ้ำวิธีที่นำเสนอครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2) โดยเมื่อทำการทดสอบทางสถิติ (paired t-test) พบว่าความแตกต่างระหว่างการทำซ้ำวิธีเดิมครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 (ตารางที่ 5.8) มีค่าเฉลี่ยความแปรปรวนต่างกัน 0.326 และมีค่า p-value เท่ากับ 0.118 ซึ่งจะกล่าวได้ว่าการทำซ้ำมีความแตกต่างกัน (ปฏิเสธสมมติฐานหลัก) ที่ระดับความเชื่อมั่นตั้งแต่ 88% หรือน้อยกว่า (หากมีการเก็บข้อมูลซ้ำหลายๆครั้ง อาจได้ค่า p-value ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาจมีค่าน้อยกว่า 0.118) ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างการทำซ้ำวิธีที่นำเสนอครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 (ตารางที่ 5.9) มีค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแตกต่างกันเพียง 0.0161 และมีค่า p-value เท่ากับ 0.573 หมายความว่า การทำซ้ำทั้งสองครั้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 5.20 และผลทางสถิติ บ่งชี้ว่าวิธีที่นำเสนอช่วยปรับปรุงความเที่ยงตรงและการทำซ้ำด้านความเที่ยงตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเส้นพิกัดของวิธีที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 5.21 โดย รูปที่ 5.21 (ก) แสดงเส้นพิกัดที่มีความแปรปรวนต่ำที่สุด (0.0290) และ รูปที่ 5.21 (ข) แสดงเส้นพิกัดที่มีความแปรปรวนสูงที่สุด (0.2286)



รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบความแปรปรวนของวิธีเดิม (เส้นทึบ) และ วิธีที่นำเสนอ (เส้นประ) วงกลมแทนการทำซ้ำครั้งที่ 1 และดอกจันแทนการทำซ้ำครั้งที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.21 เส้นพิกัดของวิธีที่นำเสนอ (ก) เส้นพิกัดที่มีความแปรปรวนต่ำที่สุด (0.0290) (ข) เส้นพิกัดที่มีความแปรปรวนสูงที่สุด (0.2286)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 Paired t-test ของความแปรปรวนระหว่างการทำซ้ำครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ด้วยวิธีเดิม

Paired T for Existing Trial 1 - Existing Trial 2				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Existing Trial 1	9	1.186	0.532	0.177
Existing Trial 2	9	0.860	0.350	0.117
Difference	9	0.326	0.557	0.186

95% CI for mean difference: (-0.103, 0.754)

T-Test of mean difference = 0 (vs \neq 0): T-Value = 1.75 P-Value = 0.118

ตารางที่ 5.9 Paired t-test ของความแปรปรวนระหว่างการทำซ้ำครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ด้วยวิธีที่นำเสนอ

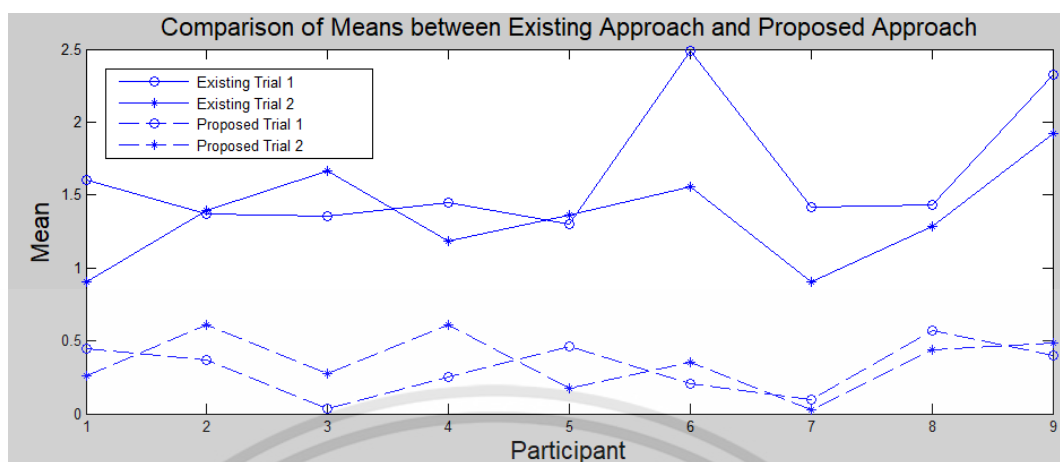
Paired T for Proposed Trial 1 - Proposed Trial 2				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Proposed Trial 1	9	0.0703	0.0345	0.0115
Proposed Trial 2	9	0.0864	0.0676	0.0225
Difference	9	-0.0161	0.0797	0.0266

95% CI for mean difference: (-0.0774, 0.0451)

T-Test of mean difference = 0 (vs \neq 0): T-Value = -0.61 P-Value = 0.561

ลำดับต่อไป ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ความแม่นยำจากค่าเฉลี่ยเส้นพิกัดในตารางที่ 5.6 โดยในการวิเคราะห์นั้น ผู้วิจัยจะใช้ค่าสัมบูรณ์ของค่าเฉลี่ยเนื่องจาก เครื่องหมายบวกและลบอาจทำให้ปริมาณความผิดพลาดคลาดเคลื่อนได้ กราฟค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเส้นพิกัดแสดงดังรูปที่ 5.22

ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยเส้นพิกัดที่ได้จากวิธีเดิมเท่ากับ 1.4952 มม. ขณะที่ค่าที่ได้จากวิธีที่นำเสนอเท่ากับ 0.3381 มม. ซึ่งวิธีที่นำเสนอมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าวิธีเดิม 1.157 มม. สังเกตได้จากรูปที่ 5.22 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของวิธีที่นำเสนอ (เส้นประ) นั้นมีค่าต่ำกว่าวิธีเดิม (เส้นทึบ) อย่างชัดเจน จากตารางที่ 5.10 จะพบว่าค่า p-value น้อยกว่า 0.05 นั้นยืนยันว่าค่าเฉลี่ยเส้นพิกัดของวิธีที่นำเสนอน้อยกว่าวิธีเดิมอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากวิธีเดิมเท่ากับ 0.4099 ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยจากวิธีที่นำเสนอเท่ากับ 0.1834 บ่งชี้ว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเส้นพิกัดของแต่ละบุคคลนั้นน้อยลงเมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 5.22 ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเส้นพิกัดที่ได้จากการทดลอง โดยเส้นที่แทนค่าเฉลี่ยที่ได้จากวิธีเดิม เส้นประแทนค่าเฉลี่ยที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ วงกลมแทนการทำซ้ำครั้งที่ 1 และดอกจันแทนการทำซ้ำครั้งที่ 2

2

ตารางที่ 5.10 Paired t-test ของค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเส้นพิกัดระหว่างวิธีเดิมและวิธีที่นำเสนอ

Paired T for Existing Mean - Proposed Mean				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Existing Mean	18	1.4953	0.4099	0.0966
Proposed Mean	18	0.3381	0.1834	0.0432
Difference	18	1.157	0.433	0.102
95% CI for mean difference: (0.942, 1.372)				
T-Test of mean difference = 0 (vs \neq 0): T-Value = 11.35 P-Value = 0.000				

พิจารณาความสามารถในการทำซ้ำด้านความแม่นยำ ผู้วิจัยใช้ Paired t-test เพื่อทดสอบค่าเฉลี่ยของการทำซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ด้วยวิธีเดิม (ตารางที่ 5.11) พบว่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของการทำซ้ำทั้งสองครั้งอยู่ที่ $0.285 (1.638 \pm 0.445$ และ $1.353 \pm 0.336)$ อย่างไรก็ตาม ค่า p-value เท่ากับ 0.062 นั้นแม้จะหมายถึงค่าเฉลี่ยของการทำซ้ำทั้งสองครั้งไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่หากมีการเก็บข้อมูลใหม่ หรือเก็บข้อมูลเพิ่ม อาจพบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยการทำซ้ำทั้งสองครั้ง ดังนั้นเมื่อเกิดความไม่มั่นใจในค่า p-value ผู้วิจัยจึงปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ระดับความเชื่อมั่น 90% โดยสรุปว่าพบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของการทำซ้ำทั้งสองครั้ง

ตารางที่ 5.11 Paired t-test ของค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเส้นพิศระหว่างการทำซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ด้วยวิธีเดิม

Paired T for Existing Mean Trial 1 - Existing Mean Trial 2				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Existing Mean Trial 1	9	1.638	0.445	0.148
Existing Mean Trial 2	9	1.353	0.336	0.112
Difference	9	0.285	0.395	0.132

95% CI for mean difference: (-0.019, 0.588)

T-Test of mean difference = 0 (vs \neq 0): T-Value = 2.17 P-Value = 0.062

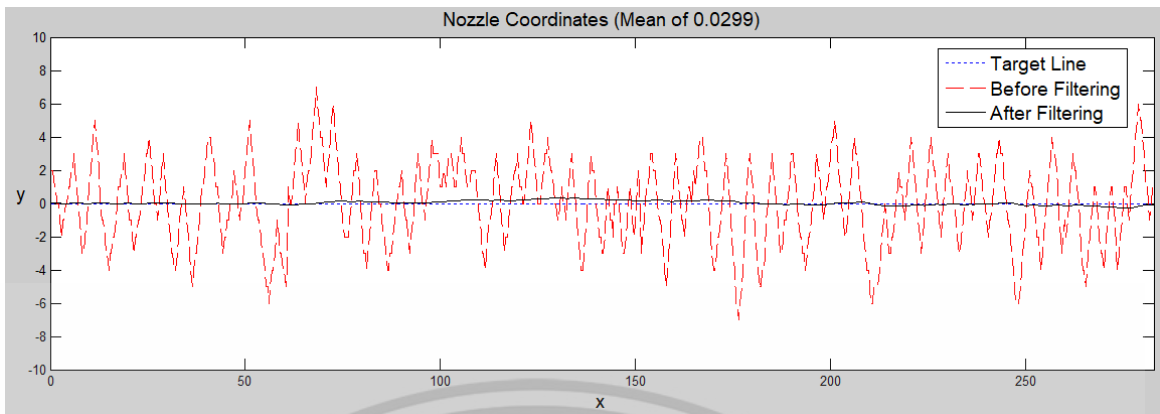
ตารางที่ 5.12 แสดงผลการทดสอบ paired t-test ของค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเส้นพิศระหว่างการทำซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ด้วยวิธีที่นำเสนอ โดยค่าเฉลี่ยของการทำซ้ำครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.3154 ขณะที่ค่าเฉลี่ยของการทำซ้ำครั้งที่ 2 เท่ากับ 0.3609 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้งสองครั้งเท่ากับ 0.1798 และ 0.1949 ตามลำดับ โดยความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของการทำซ้ำทั้งสองครั้งเท่ากับ 0.0455 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.22 จะพบว่าเส้นประทั้งสองเส้นอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน และค่า p-value ในตารางที่ 5.12 เท่ากับ 0.555 บ่งชี้ว่าค่าเฉลี่ยของการทำซ้ำทั้งสองครั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่า วิธีที่นำเสนอช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำซ้ำด้านความแม่นยำอย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างของเส้นพิศของวิธีที่นำเสนอที่มีค่าเฉลี่ยเข้าใกล้และห่างจากพิศเป้าหมายที่สุดแสดงในรูปที่ 5.23 โดยรูปที่ 5.23 (ก) แสดงเส้นพิศที่มีค่าเฉลี่ยเข้าใกล้พิศเป้าหมายที่สุด (0.0299) และ รูปที่ 5.23 (ข) แสดงเส้นพิศที่มีค่าเฉลี่ยห่างจากเป้าหมายที่สุด (0.6083)

ตารางที่ 5.12 Paired t-test ของค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเส้นพิศระหว่างการทำซ้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ด้วยวิธีที่นำเสนอ

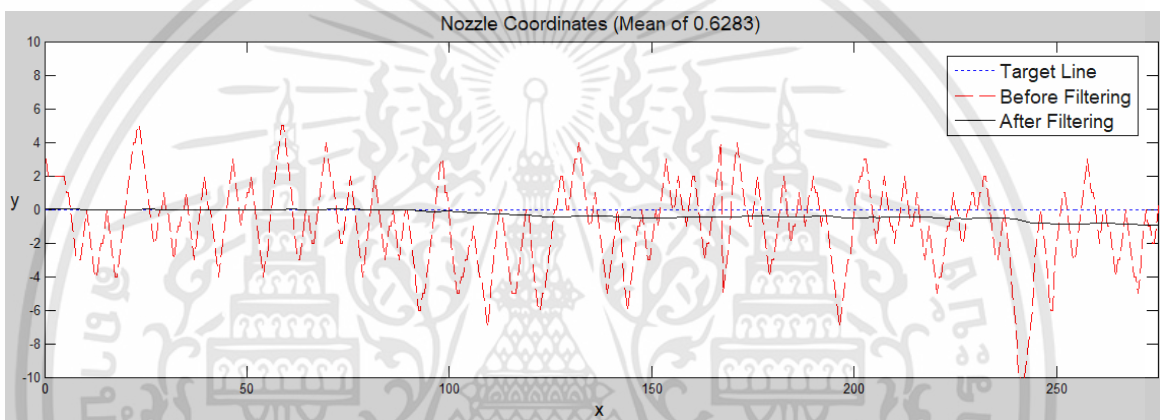
Paired T for Proposed Mean Trial 1 - Proposed Mean Trial 2				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Proposed Mean Trial 1	9	0.3154	0.1798	0.0599
Proposed Mean Trial 2	9	0.3609	0.1949	0.0650
Difference	9	-0.0455	0.2213	0.0738

95% CI for mean difference: (-0.2155, 0.1246)

T-Test of mean difference = 0 (vs \neq 0): T-Value = -0.62 P-Value = 0.555



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.23 เส้นพิกัดของวิธีที่นำเสนอ (ก) เส้นพิกัดที่มีค่าเฉลี่ยเข้าใกล้พิกัดเป้าหมายที่สุด (0.0299) (ข) เส้นพิกัดที่มีค่าเฉลี่ยห่างจากเป้าหมายที่สุด (0.6083)

				-				
10	4.1377	5.4481	-1.1316	2.0126	0.0676	0.0621	-0.3505	-0.3780

จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 1 ถึง 9 จะพบว่าตัวกรองสามารถทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับผู้เข้าร่วมการทดลองที่ 10 ที่มีค่าความแปรปรวนของเส้นพิกัดสูงผิดปกติเมื่อทำการพ่นด้วยวิธีเดิมนั้น เมื่อทำการพ่นด้วยวิธีที่นำเสนอ กลับพบว่าสามารถปฏิบัติงานได้ไม่แตกต่างกับผู้เข้าร่วมการทดลองคนอื่นๆ โดยค่าความแปรปรวนและค่าเฉลี่ยที่ได้จากการพ่นด้วยวิธีที่นำเสนอ มีค่า

ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของผู้เข้าร่วมการทดลองคนอื่นๆ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า วิธีการที่นำเสนอ สามารถช่วยปรับปรุงความเที่ยงตรงและแม่นยำในกรณีที่ผู้ปฏิบัติงานปฏิบัติงานด้วยวิธีเดิมได้ไม่อย่างมาก

5.4 หมายเหตุ

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถช่วยลดความผันแปรให้กับสถานีผู้ปฏิบัติงานและลดความผันแปรโดยรวมในระบบพจนานุกรมระยะไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวิธีการที่นำเสนอสามารถช่วยปรับปรุงทั้งความแม่นยำและความเที่ยงตรงให้กับพิกัดเอาท์พุทของสถานีผู้ปฏิบัติงาน โดยการเปลี่ยนแปลงการทำงานของสถานี จากการที่ให้ผู้ปฏิบัติงานควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักไปตามพิกัดเป้าหมายโดยตรง เป็น ให้ผู้ปฏิบัติงานควบคุมอุปกรณ์ควบคุมหลักเพื่อสร้างคลื่นปลายแหลม เพื่อใช้เป็นสิ่งรบกวนจากเครื่องมือวัดให้กับตัวกรองคาลมาน จากนั้นตัวกรองคาลมานจะประมาณการพิกัดเพื่อใช้เป็นเอาท์พุทของระบบ

โดยการสร้างคลื่นปลายแหลมไปตามเส้นทางนั้น ช่วยลดโอกาสเกิดความโน้มเอียงของข้อมูล ทำให้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความแม่นยำมากขึ้น ผนวกเข้ากับตัวกรองคาลมานที่ช่วยปรับคลื่นปลายแหลมให้ราบเรียบ ทำให้ข้อมูลมีความเที่ยงตรงเพิ่มขึ้น

แม้ว่าตัวกรองคาลมานจะทำงานได้ดีที่สุดกับสิ่งรบกวนที่มีการกระจายตัวแบบปกติ แต่จากการทดลอง พบว่าแม้ว่าพิกัดของคลื่นปลายแหลม ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการกระจายตัวแบบปกติ ซึ่งมีความถี่ข้อมูลสูงใกล้เคียงกับเป้าหมาย และลดความถี่ถึงเมื่อไกลออกจากเป้าหมายทั้งสองทิศทาง (บวกและลบ) ทำให้ฮิสโตแกรมของข้อมูลมีความคล้ายคลึงกับการกระจายตัวแบบปกติ ก็สามารถทำให้ตัวกรองคาลมานทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แม้ว่าในงานวิจัยนี้ ตัวกรองคาลมานจำถูกใช้เพื่อปรับปรุงความผันแปรจากสถานีผู้ปฏิบัติงาน เพื่อแสดงให้เห็นการลดความผันแปรในสถานีอย่างชัดเจน แต่สำหรับการใช้งานจริง ผู้ใช้งานสามารถนำตัวกรองคาลมานไปใช้ทำการกรองผลลัพธ์ของระบบแทนที่ผลลัพธ์จากสถานีผู้ปฏิบัติงานก็ได้ โดยวิธีการนี้สามารถช่วยลดความผันแปรที่เกิดในส่วนอื่นๆของระบบได้ด้วย ทำให้ความผันแปรของผลลัพธ์ของระบบลดลงได้มากขึ้น

อย่างไรก็ดี จากการทดลองที่นำเสนอข้างต้น ผู้วิจัยสนใจกรณีที่เส้นพิกัดเป้าหมายเป็นเส้นตรงไปตามแนวแกน x เท่านั้น เนื่องจากเป็นกรณีที่พบได้บ่อยในการปฏิบัติงานจริง และเป็นกรณีที่มนุษย์ไม่

สามารถควบคุมความเที่ยงตรงและแม่นยำได้ดีเท่าที่ควร ในอนาคต ผู้วิจัยคาดหวังจะทำศึกษาความผันแปรและทดลองใช้วิธีที่นำเสนอกับการเคลื่อนที่ในแบบอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกล ผู้วิจัยได้ใช้ทฤษฎีสายธารความผันแปรเพื่อจำแนกระบบออกเป็นหลายสถานี และระบุแหล่งความผันแปรของแต่ละสถานี จากนั้นจึงนำเสนอวิธีการต่างๆในการลดความผันแปร เพื่อผลลัพธ์ คือการลดความผันแปรโดยรวมของระบบ โดยรายละเอียดต่างๆสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 สรุปรายละเอียดของงานวิจัยทั้งหมด

หลังจากการทบทวนวรรณกรรม ผู้วิจัยได้สร้างระบบพ่นทรายระยะไกลเสมือนที่ใช้ในการศึกษาวิจัย กำหนดตัวชี้วัดสมรรถนะที่ใช้สำหรับระบบปฏิบัติงานระยะไกล ได้แก่พื้นผิวไม่สะอาด พื้นผิวเสียหาย และเวลารวมในการเคลื่อนที่ โดยใช้แนวความคิดฟังก์ชันการสูญเสียของทากูชิในการคำนวณตัวชี้วัดพื้นผิวไม่สะอาด และพื้นผิวเสียหาย ด้านปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลลัพธ์ของระบบ ผู้วิจัยกำหนดสองปัจจัย ได้แก่ ระยะการมองและความกว้างของเส้นทาง จากนั้นจึงทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งพบว่าช่วงระยะการมองที่กำหนดในการทดลองนั้นไม่มีนัยสำคัญต่อผลลัพธ์ของระบบ ในขณะที่ขนาดความกว้างของเส้นทางมีนัยสำคัญต่อผลลัพธ์ของระบบ นอกจากนี้ยังพบความแตกต่างของสมรรถนะในการปฏิบัติงานระหว่างเพศ จากนั้นทำการระบุระดับปัจจัยที่สามารถทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถผลิตงานที่มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทุกตัวดีที่สุด โดยใช้วิธีการหาค่าตอบที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยยังได้แนะนำแนวทางการออกแบบระบบสำหรับระบบที่คล้ายคลึงกันด้วย จากการทดลองทำให้ค้นพบลักษณะเฉพาะของเวลารวมในการเคลื่อนที่ (Movement Time) ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎสเตียร์ริง (Steering Law, Accot and Zhai, 1997) และ ได้นำไปสู่ปัญหาความคลาดเคลื่อนทางด้านพิกัดในระบบพ่นทรายระยะไกล

เมื่อได้ทำการระบุปัญหาจากการศึกษาระบบเบื้องต้นแล้ว พบว่าความคลาดเคลื่อนทางด้านพิกัดนั้นประกอบไปด้วยปัญหาทางด้านความแม่นยำและความเที่ยงตรง ซึ่งถือเป็นความผันแปรที่เกิดขึ้นในระบบในการวิเคราะห์ความผันแปร ได้มีการนำเสนอระบบพ่นทรายระยะไกลแบบหลายสถานีที่มีการเก็บข้อมูลเป็นคาบเวลา โดยพัฒนาตัวแบบมาจากตัวแบบการอธิบายความผันแปรของแต่ละสถานีของ Jin and Shi (1999) โดยได้แบ่งสถานีในระบบเป็นสถานีผู้ปฏิบัติงานและสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล และทำการ

ระบุแหล่งความผันแปรของแต่ละสถานี จากนั้นจึงปรับปรุงเพื่อลดความผันแปรในแต่ละสถานี โดยเริ่มจากสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล เพื่อเป็นการเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ให้พร้อมก่อนการใช้งานร่วมกับผู้ปฏิบัติงาน ผู้วิจัยได้ทดสอบความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ควบคุมหลัก และนำเสนอการใช้การแปลงสัมพรรคเพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลัก นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความเที่ยงตรงและแม่นยำของอุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม ตอนท้ายของบทที่ 4 ผู้วิจัยได้สรุปตัวแปรในตัวแบบความผันแปรของสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกลซึ่งเป็นค่าที่ใช้สำหรับเครื่องพ่นทรายระยะไกลที่ใช้ในการทำวิจัยนี้

สำหรับสถานีผู้ปฏิบัติงาน แหล่งความผันแปรหลักได้แก่ความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของแขนผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งก่อให้เกิดความผันแปรของพิกัดในแนวแกน y ที่ไม่สามารถคาดเดารูปแบบได้และไม่สามารถอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการลดความผันแปรในแนวแกน x (Liu and Zhang, 2014) จึงได้นำเสนอการลดความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงาน โดยใช้แนวคิดของการลดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ซึ่งผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการเคลื่อนที่ของแขนรูปแบบคลื่นปลายแหลมที่มีลักษณะคล้ายสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ทำให้มีการเคลื่อนที่ได้เต็มเส้นทาง และพิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลักส่วนใหญ่จะอยู่ใกล้กับพิกัดเป้าหมาย ทำให้ฮิสโตแกรมของพิกัดมีความแม่นยำมากขึ้น แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบคลื่นปลายแหลมตัดเส้นพิกัดเป้าหมายทำให้พิกัดที่ได้ไม่มีความเที่ยงตรง ฮิสโตแกรมที่ได้จึงมีรูปร่างระฆังคว่ำใกล้เคียงกับการกระจายตัวแบบปกติ จากนั้นจึงใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อปรับปรุงความเที่ยงตรง ซึ่งการทดสอบทางสถิติโดยใช้ข้อมูลจากผลลัพธ์ของระบบบ่งชี้ว่าวิธีที่นำเสนอสามารถลดความผันแปร (ความไม่แม่นยำและไม่เที่ยงตรง) ที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยใช้ระบบพ่นทรายระยะไกลเสมือนเพื่อศึกษาความผันแปรจากแหล่งกำเนิดที่สนใจเท่านั้น ในการใช้งานจริงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบจากความผันแปรที่เกิดขึ้นจากแหล่งความผันแปรอื่นด้วย เช่น ความผิดพลาดในขณะเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุปกรณ์เคลื่อนที่ตาม ความแปรผันของเวลาหน่วงในระบบ เป็นต้น

6.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

จากการศึกษาความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกลที่ได้นำเสนอ ผู้วิจัยได้สร้างองค์ความรู้ใหม่จากการบูรณาการทฤษฎีในแขนงต่างๆในการวิเคราะห์และปรับปรุงความผันแปรอย่างเป็นระบบ โดยเริ่มจากการสร้างระบบพ่นทรายระยะไกลเสมือนเพื่อใช้เป็นตัวแทนของระบบพ่นทรายระยะไกลเพื่อใช้ในการศึกษา ซึ่งนอกจากใช้ในการศึกษาความผันแปรแล้ว ระบบพ่นทรายระยะไกลเสมือนนั้นยังสามารถใช้

เพื่อฝึกหัดงานพ่นทรายก่อนการปฏิบัติงานจริงได้ อีกทั้งสามารถดัดแปลงโปรแกรมเพื่อประยุกต์ใช้กับการฝึกหัดงานที่ใช้ระบบปฏิบัติงานระยะไกลอื่นๆที่คล้ายคลึงกัน

ในขั้นตอนการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ ผู้วิจัยได้นำเสนอดัชนีชี้วัดสำหรับงานพ่นทรายระยะไกล เพื่อเป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำไปกำหนดเป็นมาตรฐานของพื้นที่เป็นรูปธรรมแทนที่การประเมินด้วยสายตาซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในกรณีที่มีผู้ประเมินหลายคนมีหลักในการพิจารณาแตกต่างกัน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ประยุกต์ใช้การหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดระดับปัจจัยที่ดีที่สุดในการกรณีที่เอาท์พุทของระบบที่สนใจมีมากกว่าหนึ่งตัว โดยเทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ในระบบการผลิตอื่นๆ โดยใช้กำหนดระดับปัจจัยที่ลงตัวในกรณีที่เกิดความขัดแย้งระหว่างผลลัพธ์ของระบบมีมากกว่าหนึ่งตัว จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ได้มีการค้นพบองค์ความรู้ใหม่ ได้แก่คุณลักษณะเฉพาะตัวของเวลารวมในการเคลื่อนที่ (Movement time) ที่ใช้ในงานพ่นทรายระยะไกล ซึ่งแตกต่างจากงานบังคับอุปกรณ์ตามเส้นทางอื่นๆ (Steering task, Path following task) ที่สามารถอธิบายหรือพยากรณ์เวลารวมในการเคลื่อนที่ได้จากกฎสตีเรียจ (Steering law) (Accot and Zhai, 1997) โดยผู้วิจัยเชื่อว่าในอนาคต สามารถศึกษาเพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ให้กับเวลารวมในการเคลื่อนที่ที่ใช้ในงานพ่นทรายระยะไกล ซึ่งสามารถนำมาใช้เพื่อพยากรณ์เวลาในการเคลื่อนที่ของงานพ่นทรายระยะไกลหรืองานอื่นๆที่มีลักษณะการบังคับอุปกรณ์ไปตามเส้นทางและมีการปฏิบัติงานตามเส้นทางไปด้วย

ในการวิเคราะห์ความผันแปรทางด้านพิกัดในระบบพ่นทรายระยะไกล ได้ใช้ทฤษฎีสายธารความผันแปร โดยใช้ตัวแบบความผันแปรแบบหลายสถานะของ Huang and Shi (2000) โดยปกติ ตัวแบบนี้ใช้กับสายการประกอบรถยนต์ ผู้วิจัยได้นำมาประยุกต์ตัวแบบเพื่อใช้กับระบบพ่นทรายระยะไกลซึ่งมีการใช้งานคอมพิวเตอร์เก็บข้อมูลเป็นคาบเวลา ซึ่งการวิเคราะห์ความผันแปรในระบบแบบหลายสถานะนี้ยังไม่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งที่ทฤษฎีนี้สามารถช่วยกำหนดเส้นทางของความผันแปรและแหล่งความผันแปรของแต่ละสถานะอย่างเป็นระบบ ช่วยให้ลดผลกระทบจากความผันแปรอื่นๆในขณะที่พิจารณาความผันแปรที่เกิดจากแหล่งใดแหล่งหนึ่งอยู่ และสามารถเห็นความผันแปรที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานะและส่งต่อไปจนถึงผลลัพธ์ของระบบได้อย่างชัดเจน ดังนั้นการนำทฤษฎีสายธารความผันแปรมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นการเปลี่ยนมุมมองในการวิเคราะห์ความผันแปรในระบบการผลิตซึ่งสามารถใช้เป็นตัวอย่งในการศึกษาความผันแปรในระบบการผลิตอื่นๆได้

ส่วนความผันแปรของแต่ละสถานะผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการลดความผันแปรซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับงานอื่นๆ โดย ในสถานีเครื่องพ่นทรายระยะไกล ได้มีการนำการแปลงสัมพรรคซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการประมวลผลภาพ (Image Processing) มาใช้เพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการระบุ

พิกัดของอุปกรณ์ควบคุมหลัก ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงความแม่นยำในการระบุพิกัดของหุ่นยนต์สำหรับงานที่มีพื้นที่การทำงานในระนาบสองมิติ และมีความคลาดเคลื่อนเป็นเชิงเส้น

สำหรับความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงาน ผู้วิจัยได้นำแนวคิดของการกรองสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง โดยเปลี่ยนการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นการเคลื่อนที่เป็นคลื่นปลายแหลมไปตามเส้นพิกัดเป้าหมายเพื่อปรับปรุงความแม่นยำและใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อปรับปรุงความเที่ยงตรง ซึ่งผลลัพธ์ปรากฏว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถลดความผันแปรได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวิธีที่นำเสนอเป็นการนำทฤษฎีการกรองสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้ามาใช้ในรูปแบบที่ยังไม่เคยมีการนำเสนอมาก่อน ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าสามารถนำวิธีที่นำเสนอไปใช้กับระบบอื่น ๆ ที่มีมนุษย์เป็นส่วนหนึ่งของระบบและมีลักษณะการเคลื่อนที่ที่คล้ายคลึงกัน หรือแม้กระทั่ง ช่วยให้ผู้ป่วยที่มีการสั่นของกล้ามเนื้อสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันได้ดียิ่งขึ้น

จากวิธีการที่นำเสนอมาทั้งสิ้น ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการลดความผันแปรในระบบพ่นทรายระยะไกล โดยการลดความผันแปรที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนำไปใช้อ้างอิงหรือเป็นต้นแบบในระบบอื่นๆในงานอุตสาหกรรมได้

6.3 โอกาสของงานวิจัยในอนาคต

เนื่องจากระบบปฏิบัติงานระยะไกลนำประโยชน์มากมายมาให้กับวงการอุตสาหกรรม การแพทย์ การทหาร และวิทยาศาสตร์ ทำให้การศึกษาพัฒนาระบบยังคงดำเนินต่อไป ซึ่งทำให้เกิดปัญหาใหม่ๆที่รอการแก้ไขปรับปรุง บางส่วนของปัญหาที่ผู้วิจัยวางแผนต่อยอดจากการวิจัยระบบพ่นทรายระยะไกลที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีดังนี้

6.3.1 การศึกษาเวลารวมในการเคลื่อนที่ของงานพ่นทรายระยะไกล

ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนท้ายบทที่ 3 ลักษณะเฉพาะของงานพ่นทรายคือการเดินหัวพ่นไปตามเส้นทาง โดยทำการพ่นพื้นผิวไปตลอดเส้นทาง ดังนั้นผู้พ่นจึงต้องเดินหัวพ่นโดยใช้เวลาให้เร็วที่สุด แต่ภายใต้เงื่อนไขคือพื้นผิวต้องถูกพ่นให้สะอาด ซึ่งในงานพ่นทรายระยะไกล หากกำหนดขนาดเส้นทางใหญ่ขึ้น จะทำให้ใช้เวลาในการพ่นนานขึ้น และหากกำหนดขนาดเส้นทางเล็กมาก จะทำให้ผู้ปฏิบัติงานต้องใช้ความระมัดระวัง ส่งผลให้ใช้เวลานานขึ้นเช่นกัน ในขณะที่กฎของเสตียริง (Accot and Zhai, 1997) กล่าวว่าเมื่อขนาดเส้นทางใหญ่ขึ้นจะทำให้เวลาในการเคลื่อนที่ลดลงซึ่งขัดแย้งกับการค้นพบในการทดลอง ดังนั้นเพื่อยืนยันการค้นพบ ระบุปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายเวลารวมในการเคลื่อนที่ของงานพ่นทรายระยะไกลและงานที่มีลักษณะใกล้เคียง ซึ่งสามารถพยากรณ์เวลารวมในการเคลื่อนที่เพื่อใช้ในการออกแบบระบบได้

6.3.2 การประยุกต์ตัวแบบความผันแปรหลายสถานีในระบบประเภทอื่นๆ

การวิเคราะห์ความผันแปรในระบบโดยใช้ทฤษฎีสายธารความผันแปร (Variation Streaming) นั้นช่วยให้เข้าใจสาเหตุของความผันแปรอย่างมีระบบ และทราบว่าความผันแปรเกิดที่จุดใดในระบบ มีการส่งผ่านความผันแปร สร้างผลกระทบต่อจุดถัดไปในระบบอย่างไร โดย Huang and Shi, (2000) ผู้นำเสนอตัวแบบความผันแปรหลายสถานี (Multi-Stage Variation Model) ได้เสนอตัวแบบสำหรับระบบการผลิตต่างๆ การขึ้นรูปโลหะ การประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าตัวแบบนี้สามารถนำไปต่อยอดหรือประยุกต์ใช้กับระบบอื่นๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังเช่นที่ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้กับระบบพันธรายระยะไกลที่มีการเก็บข้อมูลเป็นคาบเวลา ในอนาคต ผู้วิจัย หรือผู้ที่สนใจ สามารถประยุกต์ใช้ตัวแบบนี้กับระบบต่างๆ เช่น ระบบการบริการ ระบบคลัง เพื่อให้อาสาเหตุของความผันแปรในระบบได้อย่างถูกต้องและแก้ปัญหาได้ถูกต้อง

6.3.3 การลดความผันแปรในสถานีผู้ปฏิบัติงานบนเส้นทางที่ไม่ใช่เส้นตรง

การลดความผันแปรที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงานสำหรับเส้นทางตรงนั้น การสร้างคลื่นปลายแหลมร่วมกับตัวกรองเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเส้นทางที่ไม่ใช่เส้นตรง วิธีการอาจจะต่างออกไป ทั้งนี้ เนื่องจากมนุษย์อาจไม่ถนัดทำการเคลื่อนไหวเพื่อสร้างคลื่นปลายแหลมไปตามทางที่คดเคี้ยว ดังนั้น จำเป็นต้องคิดค้นการเคลื่อนไหวแบบอื่นเพื่อให้ข้อมูลพิกัดมีการกระจายตัวอยู่รอบพิกัดเป้าหมายได้ ก่อนที่จะพิจารณาใช้ตัวกรองที่เหมาะสมกับลักษณะของเส้นทาง โดยอาจมีข้อจำกัด คือ ลักษณะของเส้นทางต้องเป็นรูปทรงที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สามารถประมาณการพิกัดเป้าหมายได้ เช่น ตัวกรองอันเซ็นท์คาลมาน (Unscent Kalman Filter) หรือตัวกรองเอ็กซ์เทนดด์คาลมาน (Extended Kalman Filter)

6.3.4 การใช้การเคลื่อนที่แบบอื่นๆร่วมกับตัวกรอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงการประยุกต์ใช้การกรองสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าในรูปแบบที่ไม่เคยมีการนำเสนอมาก่อน ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอช่วยในการเคลื่อนที่ที่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำมากขึ้น โดยคุณสมบัตินี้ อาจมีความเหมาะสมกับงานประเภทอื่นที่ต้องการความเที่ยงตรงและแม่นยำในการเคลื่อนที่ โดยไม่จำเป็นต้องเป็นงานที่ใช้ระบบปฏิบัติงานระยะไกล เช่น ช่วยในการเคลื่อนไหวของผู้ป่วยกล้ามเนื้ออ่อนแรงที่ไม่สามารถควบคุมกล้ามเนื้อได้ตามต้องการ หรือผู้ป่วยที่มีการสั่นของกล้ามเนื้อเวลาเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถวิเคราะห์รูปแบบการสั่นของกล้ามเนื้อขณะเคลื่อนที่ และปรับหาตัวกรองหรือวิธีอื่นๆที่เหมาะสมเพื่อให้ผลลัพธ์เป็นการเคลื่อนที่ที่ผู้ป่วยต้องการ

6.3.5 การออกแบบขนาดคลื่นปลายแหลมเพื่อควบคุมเวลารวมที่ใช้ในการพ่น

ในการสร้างคลื่นปลายแหลมนั้น แม้ว่าผู้ปฏิบัติงานจะสร้างคลื่นปลายแหลมที่มีขนาดตามความถนัดของตนเอง แต่หากได้รับการฝึกฝนกับขนาดคลื่นที่ไม่ตรงกับความถนัดของตนเองอย่างมากพอ จนสามารถหาวิธีการใช้กล้ามเนื้อให้เคยชิน ก็สามารถสร้างคลื่นปลายแหลมที่มีขนาดที่แตกต่างออกไปได้ โดยวัตถุประสงค์ในการสร้างคลื่นปลายแหลมที่มีขนาดต่างกันั้น เพื่อให้สามารถควบคุมเวลารวมในการเคลื่อนที่เมื่อพบว่าผู้ปฏิบัติงานมีการเคลื่อนที่เร็วเกินหรือช้าเกินไป โดยการออกแบบขนาดคลื่นปลายแหลม สามารถอธิบายได้โดยใช้กฎของฟิตต์ (Fitts' Law) ที่อธิบายเวลาในการเคลื่อนด้วยตัวแปรระยะทางและขนาดของเป้าหมาย



เอกสารอ้างอิง

- [1] Lorenc S., Handlon B., Bernold L., “Development of a robotic bridge maintenance system”, *Automation in Construction*, vol. 9, no. 3, pp. 251–258, 2000
- [2] Chotiprayanakul, P., Liu D., Paul G., “Effect of View Distance and Movement Scale on Haptic-based Teleoperation of Industrial Robots in Complex Environments.” *ISARC*, Seoul, Korea, 2011.
- [3] Hirche S., Stanczyk B., Buss M., “Transparent exploration of remote environments by internet telepresence”, in *Proc. Int. Workshop High-Fidelity Telepresence Teleaction/IEEE Conf/ HUMANOIDS*, Munich, Germany, 2003
- [4] Kron A., Schmidt G., Petzold B., Za M. F., Hinterseer P., Steinbach E., “Disposal of explosive ordnances by use of a bimanual haptic telepresence system,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, New Orleans, LA, pp. 1968–1973, Apr. 2004
- [5] Malysz P. and Sirouspuor S., “Task Performance Evaluation of Asymmetric Semiautonomous Teleoperation of Mobile Twin-Arm Robotic Manipulators”, *IEEE Transactions on Haptics*, pp.484-495, Vol. 6, No. 4, October-December 2013
- [6] Polushin, I.G.; Takhmar, A.; Patel, R.V., "Projection-Based Force-Reflection Algorithms With Frequency Separation for Bilateral Teleoperation," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* , vol.20, no.1, pp.143,154, Feb. 2015
- [7] “Standard Guide of Metallic Abrasive Blasting to Descale the Interior of Pipe”, *An American National Standard*, Reapproved 2001.
- [8] Hoff W. A., Lance B. Gatrell, John R. “Spofford, Machine-Vision-Based Teleoperation Aid, *Telematics And Informatics*,” Pages 403-423, Volume 8, Issue 4, 1991
- [9] Munir S., Book W. J., “Wave Based Teleoperation with Prediction,” *Proceeding of the American Control Conference*, Arlington VA, June 25-27, 2001
- [10] Liu Y., Zhang Y., “Control Of Human Arm Movement In Machine-Human Cooperative Welding Process”, *In Control Engineering Practice*, Pages 161-171, Volume 32, 2014

- [11] Shah S. K., Mishra R., Mohapatro G., "Experimental and Theoretical Design Analysis and Modeling of a CT Image Guided Robotic Arm," *2018 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)*, pp. 1-4, Phuket, 2018
- [12] Diner D. B., "Adjustable Control Station with Moveable Monitors And Cameras For Viewing Systems In Robotics And Teleoperations", *United States Patent*, Patent Number US5331413A, Date of Patent 07/19/1994
- [13] Hara S., Sato N., Morita Y., "Verification Of Usability Of Teleoperation System Using Past Image Records By Sharing Information Obtained From External Cameras," *2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014)*, Seoul, pp. 78-81, 2014
- [14] Anderson R., Spong M. W., "Bilateral Control Of Teleoperators With Time Delay," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 34, no. 5, pp. 494–501, May 1989
- [15] Niemeyer G., Slotine J. J. E., "Stable Adaptive Teleoperation," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 152–162, Jan. 1991
- [16] Sun D., Naghdy F., Du H., "Application Of Wave-Variable Control To Bilateral Teleoperation Systems: A Survey," *Annu. Rev. Control*, vol. 38, no. 1, pp. 12–31, 2014
- [17] Ryu J.-H., Artigas J., Preusche C., "A Passive Bilateral Control Scheme For A Teleoperator With Time-Varying Communication Delay," *Mechatronics*, vol. 20, no. 7, pp. 812–823, Oct. 1994
- [18] Hannaford B., Ryu J.H., "Time-Domain Passivity Control Of Haptic Interfaces," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–10, Feb. 2002.
- [19] Ryu J.-H., "Bilateral Control With Time Domain Passivity Approach Under Time-Varying Communication Delay," in *Proc. 16th IEEE Int. Conf. Robot Human Interact. Commun.*, Jeju, Korea, pp. 986–991, Aug. 2007

- [20] Hannaford B., “A Design Framework For Teleoperators With Kinesthetic Feedback,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 5, no. 4, pp. 426–434, Aug. 1989.
- [21] Mitra P., G. Niemeyer, “Model-Mediated Telemanipulation,” *Int. J. Robot. Res.*, vol. 27, no. 2, pp. 253–262, Feb. 2008.
- [22] Willaert B., Bohg J., Van Brussel H., Niemeyer G., “Towards Multi dof Model Mediated Teleoperation: Using Vision To Augment Feedback,” in *Proc. IEEE Int. Workshop HAVE*, Munich, Germany, Oct. 2012, pp. 25–31
- [23] Zhang H., “Hand/Eye Calibration For Electronic Assembly Robots,” in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 4, pp. 612-616, Aug. 1998
- [24] Du G., Zhang P., “Online Robot Calibration Based On Vision Measurement,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Pages 484-492, Volume 29, Issue 6, 2013
- [25] Zeng Y., Tian W., Liao W., “Positional Error Similarity Analysis For Error Compensation Of Industrial Robots,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Pages 113-120, Volume 42, 2016
- [26] Marwan A., Simic M., Imad F., “Calibration Method For Articulated Industrial Robots”, *Procedia Computer Science*, Pages 1601-1610, Volume 112, 2017
- [27] Filion A., Joubair A., Tahan A. S., Bonev I. A., “Robot Calibration Using A Portable Photogrammetry System,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, pp. 77-87, Volume 49, 2018
- [28] J. Shi, “Stream of Variation Modeling and Analysis for Multistage Manufacturing Process,” *CRC Press*, pp. 117–141, 2007
- [29] Accot, J., Zhai, S., “Beyond Fitts' Law: Models For Trajectory-Based HCI Tasks.” *Paper presented at the Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*, 1997
- [30] Huang W., Zhou N., Shi J., “Stream Of Variation Modeling And Diagnosis Of Multi-Station Machining Processes,” *Proceedings of the 2000 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Orlando, FL, vol. 11, pp.81–88, 2000

- [31] Tesla N., Anderson L. I., Peterson G., “Nikola Tesla: Guided Weapons and Computer Technology.” *Tesla Presents Series*. Twenty First Century Books (CO), 1998
- [32] Sheridan T. B., “Telerobotics”. *In: Automatica* 25.4, pp. 487– 507, 1989
- [33] Rodrigues J., Cardoso P., Monteiro J., Figueiredo M., “Handbook Of Research On Human-Computer Interfaces,” *developments, and applications, IGI Global*, 2016
- [34] Son H. I., Bhattacharjee T., Hashimoto H., “*Enhancement in Operator's Perception of Soft Tissues and Its Experimental Validation for Scaled Teleoperation Systems,*” in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 16, no. 6, pp. 1096-1109, Dec. 2011.
- [35] Rosenberg B., Yuan L., Fulmer S., “*Ergonomics Of Abrasive Blasting: A Comparison Of High Pressure Water And Steel Shot*”, *Applied Ergonomics*, pp. 659-667, Volume 37, Issue 5, 2006
- [36] Gravez, P., & Fournier, R., TAO-2: “*Remote Task Performing With A Computer-Aided Teleoperation (CAT) System.*” United Kingdom: Thomas Telford Services Ltd., 1993.
- [37] Basanez L., Suarez R., "Teleoperation" in *Springer Handbook of Automation*, New York:Springer-Verlag, pp. 449-468, 2009
- [38] Tilghman B. C., Sand-blast Machinery, patent No. US727030A, 1903
- [39] Ortiz F.; Pastor J. ; Alvarez B. ; Iborra A.; Ortega N.; Rodriguez D., "Robots for hull ship cleaning," *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, 2007, pp. 2077-2082.
- [40] Liu D.K., Dissayanake G., Manamperi P. B., Brooks P. A., Fang G., “A Robotic System for Steel Bridge Maintenance: Research Challenges and System Design”, *Proc. the 2008 Australasian Conf. Robotics and Automation*, Canberra, Australia, Dec, 2008.
- [41] Zhang P.T., Shen T.Y., Wang C., Guo L.Q., 2018. "Remote Engineering Blasting System Based on Six-legged Robot Structure," *International Conference on Control Engineering and Mechanical Design (CEMD 2017)*, Chao Li, ASME, New York, 2017

- [42] To W. K., Paul G., Kwok N.M., Liu D.K., “An Efficient Trajectory Planning Approach for Autonomous Robots in Complex Bridge Environments”, *Int. J. Computer Aided Engineering and Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 185-208, 2009
- [43] Paul G., Liu D.K., Kirchner N., Dissanayake G., “An Effective Exploration Approach to Simultaneous Mapping and Surface Material-type Identification of Complex 3D Environments”, *J. Field Robot*, vol. 26, no. 11-12, pp. 915-933, 2009.
- [44] Chotiprayanakul P., “Effective Methods For Human-Robot-Environment Interaction By Means Of Haptic Robotics”, Doctoral Thesis, University of Technology Sydney, 2012
- [45] Achtsnick M., Geelhoed P.F., Hoogstrate A.M., Karpuschewski B., “Modelling And Evaluation Of The Micro Abrasive Blasting Process,” *Wear*, Pages 84-94, Volume 259, Issues 1–6, 2005
- [46] Fan J.M., Li H.Z., Wang J., Wang C.Y., “A Study Of The Flow Characteristics In Micro-Abrasive Jets,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, Pages 1097-1106, Volume 35, Issue 6, 2011
- [47] Li H.Z., Wang J., Fan J.M., “Analysis And Modelling Of Particle Velocities In Micro-Abrasive Air Jet,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Pages 850-858, Volume 49, Issue 11, 2009
- [48] Taguchi G., Introduction to Quality Engineering. Asian Productivity Organisation, Tokyo, 1986.
- [49] Wildenbeest J. G. W., Abbink D. A., Heemskerk C. J. M., van der Helm F. C. T., Boessenkool H., “The Impact of Haptic Feedback Quality on the Performance of Teleoperated Assembly Tasks”, *2013 IEEE Transactions on Haptics*, Vol.6, No.2, April-June, pp. 242-252, 2013
- [50] Talasaz, A.; Trejos, A.L.; Patel, R.V., "Effect of force feedback on performance of robotics-assisted suturing," *Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on* , vol., no., pp.823,828, 24-27 June 2012

- [51] Andersh J., Mettler B., Papanikolopoulos N., "Experimental Investigation of Teleoperation Performance for Miniature Rotocraft", *Joint 48th IEEE conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai*, P.R. China, December 16-28, pp. 6005-6010, 2009
- [52] Richard, P.; Coiffet, P., "Dextrous haptic interaction in virtual environments: human performance evaluations," *Robot and Human Interaction, 1999. RO-MAN '99. 8th IEEE International Workshop on* , vol., no., pp.315,320, 1999
- [53] Hendrix, C., & Durfee, W. K. (2003). Human motor performance while using a single-DOF visual-haptic interface. In *Proceedings - 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS, 2003*
- [54] Kaber, D.B.; Yingjie Li; Clamann, M.; Yuan-Shin Lee, "Investigating Human Performance in a Virtual Reality Haptic Simulator as Influenced by Fidelity and System Latency," *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on* , vol.42, no.6, pp.1562,1566, Nov. 2012
- [55] Chaudhari, R.; Schuwerk, C.; Nitsch, V.; Steinbach, E.; Farber, B., "Opening the haptic loop: Network degradation limits for haptic task performance," *Haptic Audio Visual Environments and Games (HAVE), 2011 IEEE International Workshop on* , vol., no., pp.56,61, 14-17 Oct. 2011
- [56] King, C.-H.; Culjat, M.O.; Franco, M.L.; Lewis, C.E.; Dutson, E.P.; Grundfest, W.S.; Bisley, J.W., "Tactile Feedback Induces Reduced Grasping Force in Robot-Assisted Surgery," *Haptics, IEEE Transactions on* , vol.2, no.2, pp.103,110, April-June 2009
- [57] Osafo-Yeboah B., Jiang S., Delpish R., Jiang Z., Ntuen C., "Empirical Study to Investigate the Range of Force Feedback Necessary for Best Operator Performance in a Haptic Controlled Excavator Interface." *International Journal of Industrial Ergonomics : IE* 43.3, 2013
- [58] Yang T., Fu Y., Tavakoli M., "Digital versus analog control of bilateral teleoperation systems: A task performance comparison," *Control Engineering Practice*, 38 pp. 46-56, 2015

- [59] Suebnukarn S., Phattanasathiankul N., Sombatweroje S., Rhienmora P, Haddawy P.,
 “Process and outcome measures of expert/novice performance on a haptic virtual reality system,” *Journal of Dentistry* , Volume 37 , Issue 9 , 658 – 665, 2009
- [60] Son H. I.; Chuang, L.L.; Franchi, A.; Junsuk K., Lee D.; Lee S.W.; Bulthoff H.H., Giordano, P.R., "Measuring an operator's maneuverability performance in the haptic teleoperation of multiple robots," *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on* , vol., no., pp.3039,3046, 25-30 Sept. 2011
- [61] Semere, W., Kitagawa, M. and Okamura, A.M. (2004), “Teleoperation with sensor/actuator asymmetry: task performance with partial force feedback”, *Proceedings of the 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems*, Chicago, IL, pp. 121–7, 2004.
- [62] Hayashi, K. and Tamura, T., "Teleoperation performance using excavator with tactile feedback," *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on* , vol., no., pp.2759,2764, 9-12 Aug. 2009
- [63] Brooks, D.J.; Lunderville, M.; Yanco, H.A., "Design of a 2D joystick for robot control based on a 6 DOF haptic device," *Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), IEEE International Conference on* , pp.1,6, 22-23 April 2013
- [64] Akshay, N.; Deepu, S.; Rahul, E.S.; Ranjith, R.; Jose, J.; Unnikrishnan, R.; Bhavani, R.R., "Design And Evaluation Of A Haptic Simulator For Vocational Skill Training And Assessment," *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE* , vol., no., pp.6108-6113, 10-13 Nov. 2013
- [65] Bolopion, A.; Regnier, S., "A Review of Haptic Feedback Teleoperation Systems for Micromanipulation and Microassembly," *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on* , vol.10, no.3, pp.496,502, July 2013
- [66] Kang, X.K.; Chin, P.J.H.; Rahman, H.A.; Che Fai Yeong; Su, E.L.M.; Narayanan, A.L.T., "A Novel Haptic Interface And Control Algorithm For Robotic Rehabilitation Of Stroke Patients," *Haptics Symposium (HAPTICS), 2014 IEEE* , pp.421,426, 23-26 Feb. 2014

- [67] Goodrich M. A., Schultz A. C., "Human-Robot Interaction: A Survey", *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, pp. 203-275, Vol.1, No.3, 2007
- [68] Murray T., Whitescarver J., Hiltz S. R.. "The Human Machine Interface In A Computerized Conferencing Environment." *Proc. IEEE Conf on Interactive Systems, Man, and Cybernetics*. 1978
- [69] Kosuge, K., et al. "Robot-Human Collaboration For New Robotic Applications." *Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, 1994. IECON'94., 20th International Conference on. Vol. 2. IEEE, 1994
- [70] Widmer, A.; Hu Y., "Effects of the Alignment Between a Haptic Device and Visual Display on the Perception of Object Softness," *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on* , vol.40, no.6, pp.1146-1155, Nov. 2010
- [71] Williams, L.E.P.; Loftin, R.B.; Aldridge, H.A.; Leiss, E.L.; Bluethmann, W.J., "Kinesthetic And Visual Force Display For Telerobotics," *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on* , vol.2, no., pp.1249,1254, 2002
- [72] Toyoda, N., Yabuta, T., Matsunaga, K., "Effects Of Visual Information On Teaching Of Passive Drawing Using A Haptic Interface," *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2012 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.3004,3008, 14-17 Oct. 2012
- [73] Samad, M.D., "Effect Of Haptic And Visual Information On Asymmetric Hand Motion In A Robot-Assisted Task," *Communication and Computer Vision (ICCCV), 2013 International Conference on* , vol., no., pp.1,6, 20-21 Dec. 2013
- [74] Passmore P.J., Nielsen C.F., Cosh W.J., Darzi A., "Effects of Viewing and Orientation on Path Following in a Medical Teleoperation Environment", *Virtual Reality, Proceedings. IEEE*, 2001

- [75] Lii, N.Y., Zhaopeng C., Pleintinger B., Borst C.H., Hirzinger G., Schiele A., "Toward Understanding The Effects Of Visual- And Force-Feedback On Robotic Hand Grasping Performance For Space Teleoperation," *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on* , vol., no., pp.3745,3752, 18-22 Oct. 2010
- [76] Huber JW, Taffinder N, Russell RC, Darzi A, "The Effects Of Different Viewing Conditions On Performance In Simulated Minimal Access Surgery." *Ergonomics*, pp. 999-1016., 46 (10), Aug 2003
- [77] Yu Z., Wu H. R., Ferguson T., "The Influence of Viewing Distance on Subjective Impairment Assessment", *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 48, No. 4, pp. 331-336, November 2002
- [78] Sakamoto K., Aoyama S., Asahara S., Yamashita K., Okada A., "Evaluation of Viewing Distance vs. TV Size on Visual Fatigue in a Home Viewing Environment", *Consumer Electronics, ICCE'09*, 2009
- [79] Wu C. H., Lakany H., "The Effect of The Viewing Distance of Stimulus on SSVEP Response for Use in Brain-Computer Interfaces", *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics.*, pp. 1840-1845, 2013
- [80] Ankrum D. R., "Viewing Distance at Computer Workstations (Guidelines for Monitor Placement)", *Reprinted from Workplace Ergonomics, Sept/Oct 1996, p10-12.*
- [81] Sakamoto, K., Aoyama, S., Asahara, S., Yamashita, K., & Okada, A., "Relationship Between Viewing Distance And Visual Fatigue In Relation To Feeling Of Involvement." *Paper presented at the Asia-Pacific Conference on Computer Human Interaction*, 2008
- [82] Hacinecipoglu, A.; Konukseven, E.I.; Koku, A.B., "Evaluation Of Haptic Feedback Cues On Vehicle Teleoperation Performance In An Obstacle Avoidance Scenario," in *World Haptics Conference (WHC), 2013* , vol., no., pp.689-694, 14-17 April 2013
- [83] Stanney K. M.; Mourant R. R.; Kennedy R. S., "Human Factor Issues in Virtual Environments: A Review of the Literature", *Presence*, pp.327-351., Vol. 7, No. 4, Aug 1998

- [84] Tan N., "Calibration For Accuracy Improvement Of Serial Manipulators Based On Compressed Sensing," in *Electronics Letters*, vol. 51, no. 11, pp. 820-822, 5/ 28/ 2015
- [85] Steiner S. H., Mackay R. J., "Statistical Engineering: An Algorithm for Reducing Variation in Manufacturing Processes", *American Society for Quality*, 2005
- [86] Suri R., Otto K., "Variation Modeling For A Sheet Stretch Forming Manufacturing System," *Annals of CIRP*, vol. 48, 397-400, 1999
- [87] Djurdjanovic D., Ni J., "Linear State Space Modeling Of Dimensional Machining Errors," *Transactions of NAMRI/SME*, vol. 29, 541-548, 2001.
- [88] Zhou S., Huang Q., Shi J., "State Space Modeling Of Dimensional Variation Propagation In Multistage Machining Process Using Differential Motion Vectors," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 2, pp. 296-309, 2003
- [89] Yuangyai C., Nembhard H.B., Hayes G., Antolino N., Adair J.H., "Yield Improvement For Lost Mould Rapid Infiltration Forming Process By A Multistage Fractional Factorial Split Plot Design," *International Journal of Nanomanufacturing*, vol. 3, no. 4, pp. 351-367, 2009
- [90] Yuangyai C., Lin K.J., "Understanding Multistage Experiments," *International Journal of Experimental Design and Process Optimisation*, vol. 3, no. 4, pp. 384-409, 2013
- [91] Jin J. and Shi J., "State Space Modeling of Sheet Metal Assembly for Dimensional Control", *ASME Transactions, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 121, No.4, pp756-762, 1999.
- [92] Cong S., Feng C., Zhang Y., Li Z., Jiang S., "Kinematic Parameters Auto-Calibration of Redundant Planar 2-DOF Parallel Manipulator, Parallel Manipulators," *IntechOpen*, DOI: 10.5772/5371. Available from :
https://www.intechopen.com/books/parallel_manipulators_new_developments/kinematic_parameters_auto-calibration_of_redundant_planar_2-dof_parallel_manipulator , April 1st 2008.

- [93] Arai F.; Sugiyama T., Luangjarmekorn P., Kawaji A., Fukuda T., Itoigawa K., Maeda A., "3D viewpoint selection and bilateral control for bio-micromanipulation," *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, San Francisco, CA, USA, 2000, pp. 947-952 vol.1.
- [94] Sun D., Naghdy F., Du H., "Wave-Variable-Based Passivity Control of Four-Channel Nonlinear Bilateral Teleoperation System Under Time Delays," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, no. 1, pp. 238-253, Feb. 2016
- [95] Uddin R. and Ryu J., "Preliminary Drawing Test Via Predictive Energy Bounding Algorithm For Time-Delayed Bilateral Teleoperation," *2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems*, JeJu Island, pp. 745-747, 2012
- [96] Kim T. E. and Lee J., "Predictive Control Of Time-Delayed Teleoperation In A Non-Visible Environment," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, pp. 7221-7226, 2017
- [97] Hua C., Liu P. X., "Convergence Analysis of Teleoperation Systems With Unsymmetric Time-Varying Delays," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 56, no. 3, pp. 240-244, March 2009
- [98] Songnan D., Bin L., "The Controller Design And Stability Analysis Of Teleoperation Systems With Time Delay And Without Velocity Measurements," *36th Chinese Control Conference (CCC)*, Dalian, pp. 8224-8229, 2017
- [99] Chang Y., Yang C., Lin H., "Adaptive Control For Bilateral Teleoperation Systems With Time-Varying Delays," *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*, Chiba, pp. 1111-1114, 2018
- [100] K. Natori, "Mechanical power factor as performance index of bilateral teleoperation systems," *2014 IEEE 13th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, Yokohama, pp. 764-769, 2014

- [101] V. Chawda and M. K. OMalley, "Position synchronization in bilateral teleoperation under time-varying communication delays," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, no. 1, pp. 245–253, Feb. 2015
- [102] Vincze, M.; Prenninger, J.P. & Gander, H., "A Laser Tracking System To Measure Position And Orientation Of Robot End-Effectors Under Motion," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 13, No. 4, pp. 305-314, 1994
- [103] Koseki, Y.; Arai, T.; Sugimoto, K.; Takatuji, T. & Goto, M. (1998). Design and accuracy evaluation of high-speed and high-precision parallel mechanism. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1340-1345, Leuven, May, 1998
- [104] Jeong, W.J.; Kim, H.S. & Kwak, K.Y., "Kinematics And Workspace Analysis Of A Parallel Wire Mechanism For Measuring A Robot Pose," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 34, No. 6, pp. 825-841, 1999.
- [105] Zou, H., Notash, L., "Discussions On The Camera-Aided Calibration Of Parallel Manipulators," *Proceedings of CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines, and Mechatronics*, Montreal, Canada, 2001
- [106] Renaud, P.; Andreff, N.; Lavest, J.M. & Dhome, M., "Simplifying The Kinematic Calibration Of Parallel Mechanisms Using Vision-Based Metrology," *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 22, No. 1, pp. 12-22, 2006
- [107] Masory, O.; Wang, J. & Zhuang, H., "On The Accuracy Of A Stewart Platform-Part II: Kinematic Calibration And Compensation," *Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation*, pp 725-731, Atlanta, USA, 1993
- [108] Zhuang, H.; Masory, O. & Yan, J., "Kinematic Calibration Of A Stewart Platform Using Pose Measurements Obtained By A Single Theodolite," *Proceedings of the IEEE international conference on intelligent robots and systems*, pp 329-334, Pittsburgh, USA, 1995

- [109] Zhuang, H., Yan, J., Masory, O., "Calibration Of Stewart Platforms And Other Parallel Manipulators By Minimizing Inverse Kinematic Residuals," *Journal of Robotics and System* Vol.15, No.7, pp.395-405, 1999
- [110] Wampler C.W., Hollerbach J.M., Arai T., "An Implicit Loop Method For Kinematic Calibration And Its Application To Closed-Chain Mechanisms," *IEEE Transactions on Robotics and Automation* Vol.11, No.5, pp.710-724, 1995
- [111] Zhuang, H., "Self-Calibration Of Parallel Mechanisms With A Case Study On Stewart Platforms," *IEEE Transaction on Robotics and Automation* Vol.13, No.3, pp.387-397, 1997
- [112] Baron, L. & Angeles, J., "The On-Line Direct Kinematics Of Parallel Manipulators Under Joint-Sensor Redundancy," *Proceedings Of International Symposium On Advances In Robot Kinematics*, pp 126-137, Strobl, Austria, 1998
- [113] Patel, A.J. & Ehmann, K.F., "Calibration Of A Hexapod Machine Tool Using A Redundant Leg," *International Journal of Maching Tools and Manufacture*, Vol.40, No.4, pp.489-512, 2000
- [114] Wang J. and Masory, O., "On The Accuracy Of A Stewart Platform-Part I, The Effect Of Manufacturing Tolerances," *Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation*, Atlanta, USA, pp.114 – 120, 1993
- [115] Khalil, W. & Besnard, S., "Self Calibration Of Stewart-Gough Parallel Robots Without Extra Sensors," *IEEE Transactions on Robotics and Automation* Vol.15, No.6, pp.1116- 1121, 1999
- [116] Barnfather J.D., Abram T., "Efficient Compensation Of Dimensional Errors In Robotic Machining Using Imperfect Point Cloud Part Inspection Data," *Measurement*, pp. 176-185, Volume 117, 2018
- [117] Ashburner J, Neelin P., Collins D.L., Evans A., Friston K., "Incorporating Prior Knowledge into Image Registration," *NeuroImage*, Pages 344-352, Volume 6, Issue 4, 1997

- [118] Flusser J. , Suk T., "A Moment-Based Approach To Registration Of Images With Affine Geometric Distortion," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 32, no. 2, pp. 382-387, Mar 1994
- [119] Lee M. C., Chen W. G., "Image Compression And Affine Transformation For Image Motion Compensation", United States Patent, Patent Number 5,970,173, Date of Patent 10/19/1999
- [120] Stearns C., Kannappan K., "Method For 2-D Affine Transformation Of Images", United States Patent, Patent Number 5,475,803, Date of Patent 12/12/1995
- [121] Shen T., Zhang S., "The Optimized Implementation of Affine Transformation of S-Box in Rijndael Algorithm," *2015 8th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, Hangzhou, pp. 156-159, 2015
- [122] Flash T., Hogan N., "The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model", *Neuroscience*, Vol. 5, No. 7, pp. 1688-1703, Jul 1985
- [123] Kalman, R. E., "A New Approach To Linear Filtering And Prediction Problems". *Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45, 1960
- [124] Lu X., Wang L., Wang H., Wang X., "Kalman Filtering For Delayed Singular Systems With Multiplicative Noise," in *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 3, no. 1, pp. 51-58, January 10 2016
- [125] Deng X., Zhang Z., "Automatic Multihorizons Recognition For Seismic Data Based On Kalman Filter Tracker," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 14, no. 3, pp. 319-323, March 2017.
- [126] Soken H. E., Hajiyev C., Sakai S.I., "Robust Kalman Filtering For Small Satellite Attitude Estimation In The Presence Of Measurement Faults," *European Journal of Control*, Pages 64-72, Volume 20, Issue 2, March 2014

- [127] Wei G., Ling Y., Guo B., Bin X., Vasillakos A. V.; “Prediction-Based Data Aggregation In Wireless Sensor Networks: Combining Grey Model And Kalman Filter”, *Computer Communications*, Vol.34(6), pp. 793-802, May 2011
- [128] Negahban, A., & Smith, J. S., “Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis,” *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2), 241-261, 2014
- [129] Cherney, I. D., Poss, J. L., “Sex Differences In Nintendo Wii™ Performance As Expected From Hunter-Gatherer Selection.” *Psychological reports*, 102(3), 745-754, 2008
- [130] Sharps, M. J., Price, J. L., & Williams, J. K., “Spatial cognition and gender: Instructional and stimulus influences on mental image rotation performance,” *Psychology of Women Quarterly*, 18(3), 413-425, 1994
- [131] Montgomery, D. C.; *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons, 2008
- [132] Huang T., Li Z., Li M., Chetwynd D, Gosselin CM., “Conceptual Design And Dimensional Synthesis Of A Novel 2-DOF Translational Parallel Robot For Pickand-Place Operations.” *ASME Journal of Mechanical Design*, pp. 449–455, Vol126, 2004
- [133] Vardeman S.B., Jobe J.M., “Statistical Methods for Quality Assurance”, *Springer Texts in Statistics*, 2016
- [134] Jientrakul R., Yuangyai C., Cheng C.Y., Chotiprayanakul P., Limnararat S., “Investigating Multiple Human Performance Measures In Teleoperation Task: A Translation Task In A Tele-Sandblasting Maintenance System,” *Hum. Factors and Ergonomics in Manufacturing and Service Industries*, vol. 18, no. 3, pp. 104–116, Dec. 2017
- [135] Tovian S., Thorn B., Coons H., Labott S., Burg M., Surwit R., Bruns D., “Stress Effects on the Body”, *American psychological association (APA)*© 2015

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายรณน เจียรตระกูล

วัน เดือน ปีเกิด 9 พฤศจิกายน 2524 ที่ชลบุรี

ที่อยู่ 684/13 ซ.พัฒนาการ 44 ถ.พัฒนาการ

แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

ประวัติการศึกษา 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรม (เกียรตินิยมอันดับ 2)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2552 Masters of Science in Industrial and Systems Engineering

Virginia Polytechnic Institute and State University

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ระบบหลายสถานี (Multi-Stage Systems)

2.) ระบบอัตโนมัติ

3.) ระบบการผลิต

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2549-2550 นักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2556-ปัจจุบัน อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัย

- [1] R. Jientrakul, S. Limnararat, C. Yuangyai, W. Srisuebsai, P. Chotiprayanakul, “Investigating of human-robot collaboration in a mixed-reality tele-sandblasting maintenance system,” 16th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, Ho Chi Minh City, Vietnam, December 8–11, 2015.
- [2] Jientrakul R.; Yuangyai C.; Chotiprayanakul P.; Limnararat S.; “Multiple-Performance Optimization for Human-Robot Collaboration: a Translation Motion in a Tele-Sandblasting Maintenance System”, 6th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management”, Kuala Lumpur, Malaysia, March 8-10, 2016
- [3] R. Jientrakul, C. Yuangyai, “Minimizing multi-stage system variation using Kalman filter for a tele-sandblasting system,” IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology (ICMIT), Bangkok, pp. 133–138, 2016.
- [4] R. Jientrakul, C. Yuangyai, C.Y. Cheng, P. Chotiprayanakul, S. Limnararat, “Investigating multiple human performance measures in teleoperation task: A translation task in a tele-sandblasting maintenance system,” Hum. Factors and Ergonomics in Manufacturing and Service Industries, vol. 18, no. 3, pp. 104–116, Dec. 2017.
- [5] Jientrakul R., Chotiprayanakul P.; “Accuracy Improvement in Two-Dimensional Coordinate Mapping: A Parallel Robot for Engineering Laboratory”, 2017 International Symposium on Multimedia and Communication Technology, Ayutthaya, Thailand, August 23 – 25, 2017
- [6] Jientrakul R., Attavanish P., Chotiprayanakul P., Limnararat S., Yuangyai C.; “Variation Minimization in Tele-Sandblasting System: The Effect of Human Arm Movement Error ”, The 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2018), Phuket, Thailand, July 2018.

- [7] R. Jientrakul, C. Yuangyai, “Minimizing the Effect of Human-Arm Movement Error for Variation in a Two-Stage Tele-Sandblasting System”, Being Submitted to IEEE Transactions on Human Machine Systems.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้