

การควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอมในแขนกล 6 องศาอิสระ
PSO BASED ADAPTIVE FORCE CONTROL FOR 6 DOF ROBOT
MANIPULATORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMUTL-2018-EN-M-020-153

การควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอมในแขนกล 6 องศาอิสระ

PSO BASED ADAPTIVE FORCE CONTROL FOR 6 DOF ROBOT
MANIPULATORS



สุทธิพงษ์ ธีัญญเจริญ

SUTTHIPONG THUNYAJARERN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

พ.ศ.2561

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-EN-M-020-153

การควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอมในแขนกล 6 องศาอิสระ

PSO BASED ADAPTIVE FORCE CONTROL FOR 6 DOF ROBOT

MANIPULATORS



สุทธิพงษ์ ธีัญญเจริญ

SUTTHIPONG THUNYAJARERN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

พ.ศ.2561

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-EN-M-020-153

PSO BASED ADAPTIVE FORCE CONTROL FOR 6 DOF ROBOT
MANIPULATORS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตั้ง 2018 ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-EN-M-020-153



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

COPYRIGHT 2018

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอมในแขนกล 6 องศาอิสระ
นักศึกษา	นายสุทธิพงษ์ ธีัญญเจริญ
รหัสประจำตัว	57601122
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

บทคัดย่อ

ปัญหาจากการควบคุมแรงเมื่อสภาพของสิ่งแวดล้อมภายนอกเปลี่ยนไปทำให้ประสิทธิผลของตัวควบคุมแรงระหว่างปลายแขนกลกับวัตถุภายนอกลดลง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอมในแขนกล 6 องศาอิสระ กระบวนการนี้ประกอบด้วย การควบคุมตำแหน่ง การควบคุมแรง และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับแบบจำลองของสิ่งแวดล้อมแบบสปริง การจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ทำในโปรแกรม Matlab/Simulink โดยใช้ Robotics toolbox รุ่นยนต์ที่ใช้จำลองคือ Puma560 การเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างวิธีการเจเนติกอัลกอริทึม และ พาทิคอลสวอมพบว่าประสิทธิผลในการปรับตัวของพาทิคอลสวอมดีกว่าเจเนติกอัลกอริทึม ผลการจำลองของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้มี 3 กรณีคือ สภาพของวัตถุภายนอกเปลี่ยนไป เปลี่ยนตำแหน่งของปลายแขนขณะสัมผัสกับวัตถุภายนอก และการขยับตำแหน่งของวัตถุภายนอกให้ใกล้ปลายแขนมากขึ้นขณะที่แขนกำลังเปลี่ยนตำแหน่ง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถปรับตัวควบคุมให้ตามสัญญาณอ้างอิงได้ดีกว่าการควบคุมแบบธรรมดาทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	PSO BASED ADAPTIVE FORCE CONTROL FOR 6 DOF ROBOT MANIPULATORS
Student	Mr.Sutthipong Thinyajarern
Student ID	57601122
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somyot Kaitwanidvilai

ABSTRACT

Because of the problem of the force control when the environment changes, the performance of the force controller that controls the force between end-effectors and environment is decreased. This thesis presents the PSO based adaptive force control for 6 DOF robot manipulators. The process composes of position controlling, force controlling, and optimizing algorithms for the spring modelled environment. The simulation was performed on Matlab/Simulink, Robotics toolbox with the manipulators, Puma560. From the comparative results between those of GA and PSO, the performance of PSO was better than that of the GA in terms of the tracking performance. The simulation results of the adaptive force control were further investigated in 3 cases, which were the cases of environment change, change in the position of the end-effector when contacting with the environment, and the position of environment and the end-effector closer than the beginning. The simulation results showed that the proposed technique can adapt the controller to track the reference signal better than that of the conventional technique.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เล่มนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยจากความเมตตาและกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล ที่ได้ให้คำแนะนำให้แนวทาง และช่วยเหลือในหลายๆเรื่องที่ผ่านมาแก่
ตัวข้าพเจ้า ตัวข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณเพื่อน พี่ น้อง ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และคอยตักเตือนข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ บิดา และมารดา ของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจ และสนับสนุนตัวข้าพเจ้ามา
โดยตลอดจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จขึ้นมาได้

สุดท้ายนี้ขอความดีที่ท่านทั้งหลายได้กระทำมา ทั้งกระทำกับตัวข้าพเจ้าเองก็ดี หรือกับผู้อื่นก็
ตาม ขอให้สิ่งดีเหล่านั้นจงสร้างสิ่งดีแก่ตัวของท่านเอง จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

สุทธิพงษ์ ธีัญญเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการควบคุมแขนกลแขนกล.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ตำแหน่ง (position).....	4
2.3 เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix).....	5
2.4 เมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์ (Homogeneous transformation matrix).....	6
2.5 จลนศาสตร์ทางตรง (Forward kinematics).....	8
2.6 การคำนวณหาเมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix)	10
2.7 จลนศาสตร์ผกผัน (Inverse kinematic).....	12
2.8 แบบจำลองพลศาสตร์ (Dynamics Model).....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.9 การควบคุมตำแหน่งของแขนกล.....	19
2.10 ตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance controller).....	21
2.11 โมเดลแรงกระทำจากภายนอก (Wall model).....	24
2.12 ตัวควบคุมแรงปรับตัวได้แบบผสมผสาน (Hybrid Adaptive Controller).....	24
บทที่ 3 การคำนวณเชิงวิวัฒนาการ.....	28
3.1 บทนำ.....	28
3.2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA).....	28
3.3 การหาค่าความเหมาะสมสูงสุดด้วยฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization)	31
บทที่ 4 ผลการจำลอง.....	35
4.1 บทนำ.....	35
4.2 ผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งของแขนกล 6 องศาอิสระ.....	35
4.3 ผลการจำลองของตัวควบคุมแรง.....	44
4.4 ผลการเปรียบเทียบการหาค่าตอบของสมการระหว่างพาทิคอลสวอม (PSO) และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA).....	46
4.5 ผลการเปรียบเทียบการปรับปรุงค่าตัวแปรของตัวควบคุมแรงระหว่าง พาทิคอลสวอม (PSO) และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA).....	59
4.6 ผลการจำลองตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอม สำหรับแขนกลเคลื่อนไหว 6 องศาอิสระ.....	50
4.6.1 การจำลองการควบคุมแรงเมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงของแบบจำลองกำแพง.....	51
4.6.2 การจำลองการควบคุมแรงเมื่อเปลี่ยนทิศทางของปลายแขนกล ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ในขณะสัมผัสกับแบบจำลองกำแพง.....	57

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.6.3 การจำลองการควบคุมแรงเมื่อเปลี่ยนทิศทางของปลายแขนกล	
และเปลี่ยนตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงในขณะที่สัมผัสกับแบบจำลองกำแพง...59	
4.7 สรุป.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการต่อยอดงานวิจัย.....	62
เอกสารอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก วิธีการจำลอง.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 (ก) ภาพแขนกล puma560 [16], (ข) แขนกล puma560 จากการจำลอง [8].....	3
รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่ง P	5
รูปที่ 2.2 แสดงการหมุนของ z_0	6
รูปที่ 2.3 พารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg (DH-parameter).....	8
รูปที่ 2.4 แรงและแรงบิดที่มากกระทำต่อก้านโยง	16
รูปที่ 2.5 แสดงผังการควบคุมตำแหน่งของแขนกล.....	20
รูปที่ 2.6 ผังการทำงานของตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์.....	22
รูปที่ 2.7 ผังการทำงานของตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ที่ใช้ควบคุมแรงที่ปลายแขนกล.....	23
รูปที่ 2.8 ภาพของแบบจำลองกำแพง.....	24
รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมของ Hybrid Adaptive Controller.....	25
รูปที่ 2.10 การทำงานของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอม สำหรับแขนกล.....	26
รูปที่ 2.11 การใช้งานตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอม.....	27
รูปที่ 3.1 ผังการทำงานของเจเนติกอัลกอริทึม.....	31
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของพาทิคอลสวอม.....	34
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งอ้างอิงในพิกัดคาร์ทีเซียนของปลายแขนกล.....	35
รูปที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 1	36
รูปที่ 4.3 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 2	37
รูปที่ 4.4 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 3	37
รูปที่ 4.5 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 4	38
รูปที่ 4.6 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 5	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.7 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 6	39
รูปที่ 4.8 องศาข้อต่อที่ 1 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด	39
รูปที่ 4.9 องศาข้อต่อที่ 2 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด	40
รูปที่ 4.10 องศาข้อต่อที่ 3 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด.....	40
รูปที่ 4.11 องศาข้อต่อที่ 4 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด.....	41
รูปที่ 4.12 องศาข้อต่อที่ 5 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด	41
รูปที่ 4.13 องศาข้อต่อที่ 6 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด	42
รูปที่ 4.14 ผลการตอบสนองตำแหน่งของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน.....	42
รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองตำแหน่งของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตามแกน x	43
รูปที่ 4.16 ผลการตอบสนองตำแหน่งของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตามแกน y	43
รูปที่ 4.17 ผลการตอบสนองตำแหน่งของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตามแกน z	43
รูปที่ 4.18 (ก) ตำแหน่งอ้างอิงของปลายแขนกล, (ข) ตำแหน่งแขนกล และแบบจำลองกำแพง	44
รูปที่ 4.19 (ก) กรณีที่ 1 ผลการตอบสนองของแรงโดยแรงอ้างอิงไม่ผ่านฟังก์ชันถ่ายโอน, และ(ข) กรณีที่ 2 ผลการตอบสนองของแรง โดยแรงอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอน	45
รูปที่ 4.20 ตำแหน่งของปลายแขนกลในทิศทางตามแนวแกน x เมื่อชนเข้ากับ กับแบบจำลองกำแพง.....	45
รูปที่ 4.21 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแรงเมื่อมีการเปลี่ยนค่า k_{spring} จาก 500 นิวตัน/เมตรเป็น 1000 นิวตัน/เมตร	46
รูปที่ 4.22 ฟังก์ชัน Sphere	47
รูปที่ 4.23 ฟังก์ชัน The eggcrate	47
รูปที่ 4.24 ฟังก์ชัน Peak	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.25 แสดงค่าแรงกระทำระหว่างปลายแขนกลและแบบจำลองกำแพงที่ใช้ การหาค่าความเหมาะสมด้วย 1) GA เจเนติกอัลกอริทึม 2) PSO พาทิคอลสวอม โดยมี reference เป็นอ้างอิง.....	50
รูปที่ 4.26 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริง จาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 1000 นิวตัน/เมตร ที่เวลา 9 วินาที	51
รูปที่ 4.27 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริง จาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 1000 นิวตัน/เมตร เมื่อปรับปรุงค่าตัวแปรแล้ว.....	52
รูปที่ 4.28 รูปขยายของแรงกระทำเมื่อเปลี่ยนเปลี่ยนค่านิจสปริง จาก 500 นิวตัน/เมตรเป็น 1000 นิวตัน/เมตร	52
รูปที่ 4.29 แสดงค่า fitness ของกรณีที่ 1.....	53
รูปที่ 4.30 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนเปลี่ยนค่านิจสปริง จาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 2000 นิวตัน/เมตร ที่เวลา 9 วินาที	53
รูปที่ 4.31 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนเปลี่ยนค่านิจสปริง จาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 2000 นิวตัน/เมตร เมื่อปรับปรุงค่าตัวแปรแล้ว	54
รูปที่ 4.32 รูปขยายของแรงกระทำเมื่อเปลี่ยนเปลี่ยนค่านิจสปริง จาก 500 นิวตัน/เมตรเป็น 2000 นิวตัน/เมตร	54
รูปที่ 4.33 แสดงค่า fitness ของกรณีที่ 2	55
รูปที่ 4.34 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนเปลี่ยนค่านิจสปริง จาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 3000 นิวตัน/เมตร ที่เวลา 9 วินาที.....	55
รูปที่ 4.35 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนเปลี่ยนค่านิจสปริง จาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 3000 นิวตัน/เมตร เมื่อปรับปรุงค่าตัวแปรแล้ว	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.36 รูปขยายของแรงกระทำเมื่อเปลี่ยนแปลงค่านิสปรึงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 3000 นิวตัน/เมตร.....	56
รูปที่ 4.37 แสดงค่า fitness ของกรณีที่ 3	57
รูปที่ 4.38 ผลของแรงกระทำระหว่างปลายแขนกลกับแบบจำลองกำแพง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งปลายแขนกลในทิศทางตามแกน y	58
รูปที่ 4.39 ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อเปลี่ยนทิศทางตามแนวแกน y	58
รูปที่ 4.40 กรณีที่ 1 แรงกระทำระหว่างปลายแขนกล กับแบบจำลองกำแพงเมื่อ มีการลดตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงจาก 0.6 เมตร เป็น 0.59 เมตร	59
รูปที่ 4.41 กรณีที่ 1 ตำแหน่งของปลายแขนกล เมื่อมีการลดตำแหน่งของ แบบจำลองกำแพงจาก 0.6 เมตร เป็น 0.59 เมตร.....	60
รูปที่ 4.42 กรณีที่ 2 แรงกระทำระหว่างปลายแขนกล กับแบบจำลองกำแพง เมื่อมีการลดตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงจาก 0.6 เมตร เป็น 0.55 เมตร.....	60
รูปที่ 4.43 กรณีที่ 2 ตำแหน่งของปลายแขนกล เมื่อมีการลดตำแหน่งของ แบบจำลองกำแพงจาก 0.6 เมตร เป็น 0.55 เมตร.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg (DH-parameter) ของ puma560.....	10
ตารางที่ 2.2 แสดงค่ามวลของก้านโยง	18
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลขึ้นกับ link coordinate frame	18
ตารางที่ 4.1 แสดงค่า K_p และ K_d	36
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบระหว่าง PSO และ GA ด้วยฟังก์ชัน Sphere, The egg crate, และ Peak.....	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในสายการผลิตสินค้าต่างๆได้มีการใช้แขนกลในการผลิตเพื่อลดเวลา เพิ่มความแม่นยำ และลดปัญหาที่เกิดจากคนงาน เช่น อุบัติหารกรรมผลิตรถยนต์ อุบัติหารกรรมสารกึ่งตัวนำ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ไม่ว่าจะเป็นการจับแล้ววาง การเชื่อมโลหะ การควบคุมตำแหน่งเพียงอย่างเดียวนั้นอาจทำให้ชิ้นงานและปลายแขนกลเสียหายได้จึงมีการนำการควบคุมแรงมาใช้เพื่อลดแรงกระทำระหว่างปลายแขนกลกับชิ้นงาน เมื่อสภาพของวัตถุเปลี่ยนความแข็งไป การควบคุมแรงแบบไม่ปรับตัวอาจจะทำความเสียหายให้กับชิ้นงานและปลายแขนกลได้

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการจำลอง ตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอมที่ใช้ควบคุมแขนกล 6 องศาอิสระ โดยมีการศึกษาในงานวิจัยในอดีตดังนี้

José de Gea และ Frank Kirchner (ค.ศ.2008) [1] ได้นำเสนอการจำลองการควบคุมแรงของแขนกล 2 องศาอิสระด้วยตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีการจำลองวิธีการควบคุมตำแหน่ง การควบคุมแรง และการสร้างแบบจำลองกำแพง ผลจากการจำลองที่ได้คือเมื่อแขนกลเคลื่อนที่ชนเข้ากับแบบจำลองกำแพง แขนกลสามารถหยุดและควบคุมแรงให้เท่ากับแรงอ้างอิงได้

Achala Pallegedara, Yoshitaka Matsuda, Naruto Egashira, Takenao Sugi และ Satoru Goto (ค.ศ.2012) [2] ได้นำเสนอการจำลองเพื่อเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงแบบอิสระ (force-free) กับตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ในแขนกล 2 องศาอิสระ ผลที่ได้จะเป็นการคุมตำแหน่งปลายของแขนกล ตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์นั้นจะหยุดอยู่ ณ จุดที่ตั้งแบบจำลองกำแพงไว้ ส่วนตัวควบคุมแรงแบบอิสระนั้นจะถอยออกมาจากแบบจำลองกำแพง

Xin-qing Wang และ Juan Gao (ค.ศ.2015) [3] ได้นำเสนอการเปรียบเทียบการใช้พาทิคอลสวอม (PSO) ในการปรับปรุงค่าตัวแปรของซัพพอร์ตเวกเตอร์แบบถดถอย (SVR) กับ ทฤษฎี grid search (GS) เพื่อใช้ในการทำนายสัญญาณแรงจับ (pinch force) ที่ใช้ทดสอบเกี่ยวกับกล้ามเนื้อ ผลที่ได้คือการใช้พาทิคอลสวอมนั้นให้ความแม่นยำในการทำนายมากกว่า GS แต่พาทิคอลสวอมใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า GS

Ouboti Djaneye-Boundjou, Xingsheng Xu และ Raúl Ordóñez (ค.ศ. 2013) [4] ได้นำเสนอการปรับจูนค่าของตัวควบคุม PID ด้วยพาทิคอลสวอมเพื่อใช้ในการควบคุมแรงบิดของแขนกล เพราะในการปรับจูนค่าตัวควบคุมในแขนกลที่มีจำนวนองศาอิสระที่มากขึ้นการปรับจูนตัวควบคุมจะยุ่งยาก มีการจำลองผลของวิธีการนี้ในแขนกล 2 องศาอิสระ

Kaitwanidvilai Somyot, Yanyong Sarucha และ Saenthon Anakkapon (ค.ศ. 2013) [5] ได้นำเสนอตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอม โดยมีผลการจำลองและการทดลองกับแขนกล 1 องศาอิสระ ผลที่ได้คือเมื่อสิ่งที่สัมผัสกับปลายแขนเปลี่ยนความแข็งไป สามารถควบคุมแรงได้ตามแรงอ้างอิง

Kaitwanidvilai Somyot และ Parnichkun Manukid (ค.ศ. 2005) [6] ได้นำเสนอการควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Neuro-Fuzzy) ในระบบกระบอกลม ซึ่งใช้แรงอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนทำให้แรงอ้างอิงค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างนุ่มนวล เพื่อลดแรงกระทำในช่วงแรก (overshoot) ระหว่างปลายแขนกลกับวัตถุ

Juing-Shian Chiou, Shun-Hung Tsai และ Ming-Tang Liu ได้นำเสนอตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy logic) กับตัวควบคุม PID ที่ทำการปรับจูนค่าด้วยพาทิคอลสวอม ผลการจำลองในระบบกันสะเทือนรถยนต์แบบแอกทีฟเปรียบเทียบกับ optimal state feedback control และ แบบพาสซีฟ (passive) โดยผลที่ได้คือระยะห่างจากการกระเด็นระหว่างล้อกับพื้น ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่ใช้พาทิคอลสวอนั้นมีระยะการกระเด็นที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบบพาสซีฟ และ optimal state feedback control

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาและจำลองการควบคุมแรงแบบปรับตัวได้ที่ปลายแขนกลของแขนกล 6 องศาอิสระ เมื่อสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง

1.2.2 ศึกษาการหาค่าความเหมาะสมด้วยฝูงอนุภาคเพื่อนำมาออกแบบตัวควบคุมแรง

1.2.3 ศึกษาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

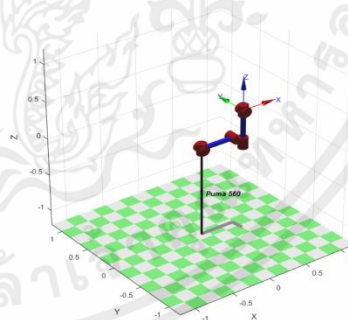
วิทยานิพนธ์นี้ใช้หลักการพลวัตทางคณิตศาสตร์ของแขนกลและทิศทาง เช่น จลศาสตร์ทางตรง, จลศาสตร์ผกผัน และแบบจำลองพลศาสตร์ของแขนกล โดยใช้ทฤษฎีเหล่านี้เพื่อควบคุมตำแหน่ง ในการควบคุมแรงจะใช้ตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นการควบคุมแรงโดยการควบคุมตำแหน่ง ทั้งนี้การปรับค่าของตัวควบคุมแรงจะใช้การหาค่าความเหมาะสมสูงสุดด้วยฝูงอนุภาค (พาทิคอลสวอม) ที่ได้แนวคิดมาจากบทความที่ [1], [4], [5], [6], [12], และ [13]

1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอมสำหรับแขนกล 6 องศาอิสระ ในที่นี้เลือกใช้แขนกล puma560 เพื่อใช้ในการทดสอบตัวควบคุมแรงนี้ โดยการควบคุมจะเริ่มที่ค่าความแข็งของแบบจำลองกำแพงที่ค่า 500 นิวตัน/เมตร แล้วจึงปรับค่าให้แข็งขึ้นเป็น 1000 นิวตัน/เมตร 2000 นิวตัน/เมตร และ 3000 นิวตัน/เมตร โดยตัวควบคุมแรงนี้ต้องสามารถควบคุมแรงตามแรงอ้างอิงได้ และสามารถควบคุมแรงตามแรงอ้างอิงเมื่อแบบจำลองเปลี่ยนค่าความแข็งไปได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.1 (ก) ภาพแขนกล puma560 [16], (ข) แขนกล puma560 จากการจำลอง [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการควบคุมแขนกลแขนกล

2.1 บทนำ

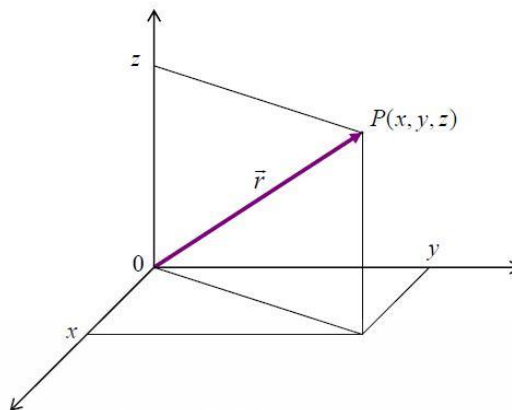
ในบทนี้จะบอกถึงการควบคุมตำแหน่ง และควบคุมแรงของแขนกล มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งหมดดังนี้ เวกเตอร์ตำแหน่ง (Position) จะบอกถึงตำแหน่งที่ขึ้นกับจุดอ้างอิง เมตริกซ์หมุน (Rotation Matrix) เป็นการหมุนรอบแกนในพิกัดคาร์ทีเซียน โดยเวกเตอร์ตำแหน่งและเมตริกซ์หมุนนี้จะนำมาเขียนรวมกันในรูปแบบเมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์ (Homogeneous Transformation Matrix) เพื่อที่จะนำไปใช้ในจลศาสตร์ทางตรง (Forward Kinematics) จลศาสตร์ทางตรงนั้นจะใช้หาตำแหน่งและกันกำหนดทิศทางการหมุนของปลายแขนกลด้วยค่าตำแหน่งของข้อต่อ เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) เป็นฟังก์ชันที่บอกความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นของปลายแขนกลกับความเร็วของข้อต่อซึ่งจะใช้ในการหาจลศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematics) จลศาสตร์ผกผันเป็นการหาตำแหน่งข้อต่อจากการกำหนดตำแหน่งปลายของแขนกล การใช้แบบจำลองพลศาสตร์เพื่อใช้ในการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกล และตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์

2.2 ตำแหน่ง

การบอกตำแหน่งนั้นจะเป็นการบอกตำแหน่งจากแกนอ้างอิง (reference frame) โดยจะมีจุด 0 เป็นจุดอ้างอิง P คือ ตำแหน่ง $P = (x, y, z)$ หรือสามารถเขียนในรูปแบบเวกเตอร์คอลัมน์ดังสมการที่ (2.1) โดยมี \vec{r} เป็นเวกเตอร์ตำแหน่ง

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 ตำแหน่ง P [17]

2.3 เมตริกซ์การหมุน

เมตริกซ์การหมุนใช้สัญลักษณ์ R เป็นหาหมุนของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยรอบแกนอ้างอิง เมตริกซ์หมุนในแกนกลไม่ใช่ปริมาณเวกเตอร์ซึ่งไม่เหมือนกับตำแหน่ง [9] โดยจะมีสมการของการหมุนรอบแต่ละแกนดังนี้

เมตริกซ์การหมุนรอบแกน x สมการที่ 2.2

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

เมตริกซ์การหมุนรอบแกน y สมการที่ 2.3

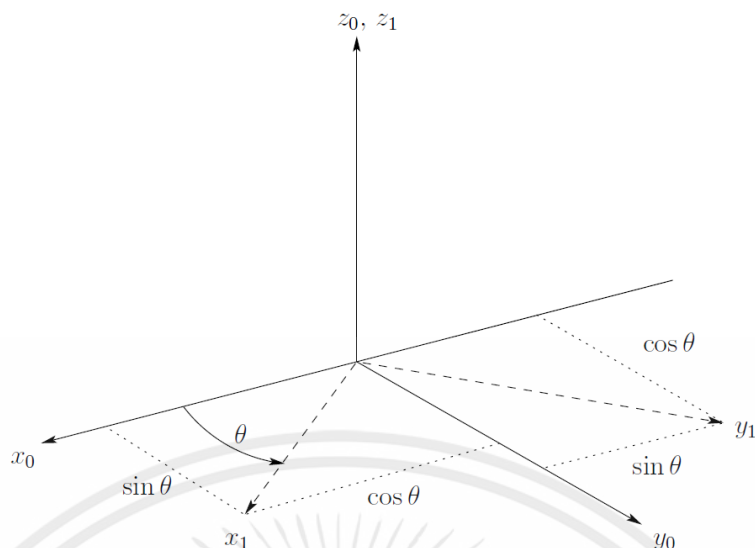
$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

เมตริกซ์การหมุนรอบแกน z สมการที่ 2.4

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

เมื่อ θ คือ องศาการหมุนรอบแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การหมุนของ z_0 [9]

2.4 เมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์

เป็นการนำเมตริกซ์หมุนและเมตริกซ์ตำแหน่งมารวมไว้ด้วยกันซึ่งจะกลายเป็นเมตริกซ์ 4×4 โดยจะมีรูปแบบดังสมการที่ (2.5)

$$H = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & \mathbf{d}_{3 \times 1} \\ \mathbf{f}_{1 \times 3} & s_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotation} & \text{Translation} \\ \text{perspective} & \text{scale factor} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

เมื่อ H คือ เมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์

Translation คือ เมตริกซ์การเลื่อนทางขนาน ซึ่งก็คือตำแหน่งในพิกัดคาร์ทีเซียน

Rotation คือ เมตริกซ์หมุน

perspective คือ เมตริกซ์ 1×3 ซึ่งจะกำหนดเป็น $[0 \ 0 \ 0]$

scale factor คือ มีค่าเป็น 1

เมตริกซ์ที่อยู่ในรูปเมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์ดังนี้

เมตริกซ์การเลื่อนทางขนานตามแกน x สมการที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานำไป ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Tran_{x,a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

เมตริกซ์การเลื่อนทางขนานตามแกน y สมการที่ 2.7

$$Tran_{y,b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

เมตริกซ์การเลื่อนทางขนานตามแกน z สมการที่ 2.8

$$Tran_{z,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

เมื่อ a, b, และ c เป็นค่าตำแหน่งตามแนวแกน x, y, และ z ตามลำดับ

เมตริกซ์หมุนรอบแกน x สมการที่ 2.9

$$Rot_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

เมตริกซ์หมุนรอบแกน y สมการที่ 2.10

$$Rot_{y,\beta} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

เมตริกซ์หมุนรอบแกน z สมการที่ 2.11

$$Rot_{z,\gamma} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

เมื่อ α , β , และ γ เป็นค่ามุมการหมุนรอบแกน x, y, และ z ตามลำดับ

โดยจะใช้รูปแบบนี้ในการหาจลศาสตร์ทางตรงในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 จลนศาสตร์ทางตรง

จลนศาสตร์ทางตรง เป็นกระบวนการที่ทำการคำนวณหาค่าตำแหน่งของปลายแขนกล (end-effector) ในพิกัดคาร์ทีเซียนด้วยค่ามุมข้อต่อของแขน จะใช้พารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg (DH-parameter) ต่อในการคำนวณ

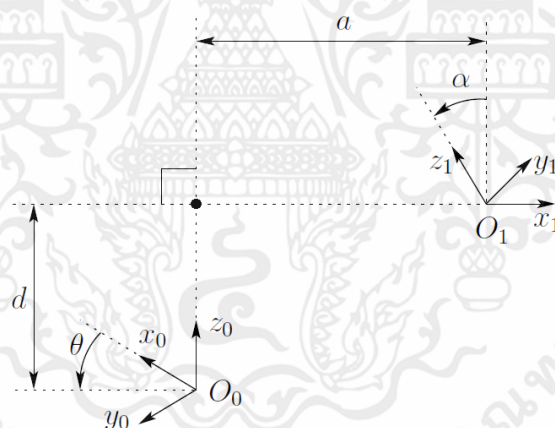
พารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg แขนกลโดยทั่วไปนั้นจะประกอบด้วยข้อต่อและก้านโยงที่นำมาต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน โดยจะโยงถึงจุดอ้างอิงก่อนหน้า เพื่อหาจุดปลายของแขนกล ซึ่งอาจจะเป็นมือจับ สว่าน ตัวเชื่อมเหล็กแล้วแต่การนำไปใช้งาน โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

θ_i คือ มุมระหว่าง x_{i-1} กับ x_i ที่หมุนรอบแกน z_i

d_i คือ ระยะตามแนวแกน z_i จากจุดอ้างอิง

$\alpha_{i,i+1}$ คือ มุมบิดระหว่าง z_{i-1} กับ z_i ที่หมุนรอบแกน x_i

$a_{i,i+1}$ คือ ความยาวจาก z_{i-1} ถึง z_i ตามแนวแกน x_i



รูปที่ 2.3 พารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg (DH-parameter) [9]

ในการนำข้อต่อแต่ละข้อมาต่ออนุกรมกันจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg ของแขนกลนั้นๆมาคำนวณ โดยจะมีสมการหลักดังสมการที่ (2.12)

$$[T] = [Z_1][X_1][Z_2][X_2][Z_3][X_3] \dots [Z_{n-1}][X_{n-1}] \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใม่เมื่อั้งสิ้น [T] ทั้งหมด คือ เมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์ของปลายแขนกล เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[Z] คือ เมตริกซ์ของข้อต่อ

$[X]$ คือ เมตริกซ์ของก้านโยง

โดยสามารถหาเมตริกซ์ข้อต่อได้จากสมการ (2.13)

$$Z_i = Rot_{Z_i}(\theta_i)Trans_{Z_i}(d_i) \quad (2.13)$$

เมื่อ $Trans_{Z_i}$ คือ เมตริกซ์การเลื่อนทางขนานตำแหน่งของข้อต่อ

Rot_{Z_i} คือ เมตริกซ์หมุนของข้อต่อ

$$Trans_{Z_i}(d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$Rot_{Z_i}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

สามารถหาเมตริกซ์ก้านโยง ได้จากสมการ (2.16)

$$X_i = Trans_{X_i}(a_{i,i+1})Rot_{X_i}(\alpha_{i,i+1}) \quad (2.16)$$

เมื่อ $Trans_{X_i}$ คือ เมตริกซ์การเลื่อนทางขนานตำแหน่งของก้านโยง

Rot_{X_i} คือ เมตริกซ์การหมุนของก้านโยง

$$Trans_{X_i}(a_{i,i+1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i,i+1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$Rot_{X_i}(\alpha_{i,i+1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_{i,i+1} & -\sin\alpha_{i,i+1} & 0 \\ 0 & \sin\alpha_{i,i+1} & \cos\alpha_{i,i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

สามารถหาเมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์ของแต่ละก้านโยงกับข้อต่อ ($[T]$) ได้ตามสมการ (2.19)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
{}^{i-1}T_i &= [Z_i][X_i] = Rot_{Z_i}(\theta_i)Trans_{Z_i}(d_i)Trans_{X_i}(a_{i,i+1})Rot_{X_i}(\alpha_{i,i+1}) \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i,i+1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_{i,i+1} & -\sin\alpha_{i,i+1} & 0 \\ 0 & \sin\alpha_{i,i+1} & \cos\alpha_{i,i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_{i,i+1} & \sin\theta_i \sin\alpha_{i,i+1} & a_{i,i+1} \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_{i,i+1} & -\cos\theta_i \sin\alpha_{i,i+1} & a_{i,i+1} \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_{i,i+1} & \cos\alpha_{i,i+1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)
\end{aligned}$$

การหาจลศาสตร์ทางตรงของแขนกล 6 องศาอิสระ ได้ตามสมการที่ (2.20)

$${}^0T_6 = {}^0T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 \quad (2.20)$$

ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg (DH-parameter) ของ puma560 [8]

Link i	θ_i (rad)	d_i (m)	$a_{i,i+1}$ (m)	$\alpha_{i,i+1}$ (rad)
1	θ_1	0	0	$\pi/2$
2	θ_2	0	0.4318	0
3	θ_3	0.15	0.0203	$-\pi/2$
4	θ_4	0.4318	0	$\pi/2$
5	θ_5	0	0	$-\pi/2$
6	θ_6	0	0	0

2.6 การคำนวณหาเมตริกซ์จาโคเบียน

เมตริกซ์จาโคเบียนเป็นฟังก์ชันทางทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นของปลายแขนกลกับความเร็วเชิงมุมของข้อต่อแขนกล สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.21)

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ คือ ความเร็วของปลายแขนกล ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 \dot{x} คือ ความเร็วของข้อต่อแขนกล

$J(q)$ คือ เมตริกซ์จาโคเบียน

q คือ ตำแหน่งองศาของข้อต่อ

โดยความเร็วนั้นจะมีทั้งความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุม จากเมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์ของปลายแขนกลนั้นจะมี ตำแหน่ง และการหมุน แสดงในสมการที่สมการ (2.22)

$${}^0_n T = \begin{bmatrix} R_n^0(q) & d_n^0(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

สมการข้างต้นนี้สามารถหาความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุม โดยสามารถหาความเร็วเชิงมุมได้ตามสมการ (2.23)

$$S(\omega_n^0) = \dot{R}_n^0 (R_n^0)^T \quad (2.23)$$

เมื่อ ω_n^0 คือ ความเร็วเชิงมุมของปลายแขนกล

R_n^0 คือ เมตริกซ์หมุนของปลายแขนกล

หาความเร็วเชิงเส้นของปลายแขนกลได้จากสมการ (2.24)

$$v_n^0 = \dot{d}_n^0 \quad (2.24)$$

เมื่อ v_n^0 คือ ความเร็วเชิงเส้นของปลายแขนกล

d_n^0 คือ เมตริกซ์ตำแหน่งของปลายแขนกล

จะได้สมการที่ (2.25)

$$v_n^0 = J_v \dot{q} \quad (2.25)$$

$$\omega_n^0 = J_\omega \dot{q} \quad (2.26)$$

เมื่อ J_v และ J_ω เป็น $3 \times n$ เมตริกซ์ เมื่อนำความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมมารวมเข้าด้วยกันจะได้สมการ (2.27)

$$\begin{bmatrix} v_n^0 \\ \omega_n^0 \end{bmatrix} = J_n^0 \dot{q} \quad (2.27)$$

เมื่อ J_n^0 คือ (2.28)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ $J_n^0 = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix}$ เป็นเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป (2.28)

เมตริกซ์ J_n^0 เรียกว่า Manipulator Jacobian โดย J_n^0 นั้นจะเป็นเมตริกซ์ $6 \times n$ เมื่อ n คือจำนวนของข้อต่อ สามารถหา J_v ได้ตามสมการ (2.29)

$$J_{v_i} = \frac{\partial d_n^0}{\partial q_i} \quad (2.29)$$

สามารถหา J_ω ได้จากสมการ (2.30)

$$J_{\omega_i} = z_{i-1} \quad (2.30)$$

เมื่อ z_{i-1} คือ เมตริกซ์หมุนรอบแกน z ของข้อต่อนั้นๆ (คอลัมน์ที่ 3 ของเมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์ 0T)

2.7 จลศาสตร์ผกผัน

จลศาสตร์ผกผัน เป็นการคำนวณหาองศาของข้อต่อแต่ละข้อ โดยจะกำหนดตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนที่ต้องการไว้ วิธีในการคำนวณมีหลายวิธี วิธีที่ใช้คือ วิธีจาโคเบียนผกผัน ซึ่งวิธีนี้เป็นการคำนวณซ้ำ (iteration method) โดยจะกำหนดตำแหน่งของข้อต่อเริ่มต้นก่อนแล้วใช้การประมาณค่าในการหาคำตอบ โดยการหาตำแหน่งของข้อต่อนั้นจะมีแนวความคิดมาจากความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วในพิกัดคาร์ทีเซียนกับความเร็วของข้อต่อ ดังแสดงในสมการที่ (2.31)

$$de = Jd\theta \quad (2.31)$$

เมื่อ e คือ ค่าตำแหน่งของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน

de คือ ความต่างระหว่างปลายแขนกลที่จุดอ้างอิงกับเป้าหมายที่กำหนด

θ คือ ตำแหน่งของข้อต่อ

$d\theta$ คือ ความต่างระหว่างตำแหน่งของข้อต่อที่จุดอ้างอิงกับเป้าหมายที่ต้องการหา

J คือ เมตริกซ์จาโคเบียน

เอกสารนี้เป็นเมื่อย้ายข้างสมการเพื่อหาค่าตำแหน่งข้อต่อ จะได้สมการ (2.32) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d\theta = J^{-1}de \quad (2.32)$$

ในการหาเมตริกซ์ผกผันของ J นั้นจะใช้วิธีซูโดอินเวอร์ส (pseudo inverse) จะได้ J^+

$$d\theta = J^+ de \quad (2.33)$$

แทนค่า $d\theta$ ลงในสมการที่ (2.34) เพื่อนำมาปรับค่า θ

$$\theta = \theta + kd\theta \quad (2.34)$$

โดย k คือค่าคงที่

จลศาสตร์ผกผัน วิธีจาโคเบียนผกผัน มีขั้นตอนดังนี้

เมื่อ e อยู่ห่างจากเป้าหมายที่ต้องการ

1. ทำการคำนวณหา เมตริกซ์จาโคเบียน J
2. ทำการคำนวณหาซูโดอินเวอร์สของเมตริกซ์จาโคเบียน J^+
3. หาค่าความต่างของตำแหน่งข้อต่อ $d\theta = J^+ de$
4. ทำการปรับปรุงตำแหน่งของข้อต่อ $\theta = \theta + kd\theta$
5. ทำการตรวจสอบตำแหน่งโดยใช้จลศาสตร์ทางตรง ถ้าความคลาดเคลื่อนยังมากอยู่ให้

กลับไปทำข้อ 1 ถึง 5 ซ้ำ

2.8 แบบจำลองพลศาสตร์

จากหัวข้อก่อนหน้าคือ จลศาสตร์ทางตรงและจลศาสตร์ผกผันนั้นเป็นการอธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยไม่มีเรื่องแรงเข้ามาเกี่ยว ในหัวข้อแบบจำลองพลศาสตร์นี้จะอธิบายเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ สมการทั่วไปของพลศาสตร์แขนกลคือ (2.35)

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (2.35)$$

เมื่อ $M(q)$ คือ เมตริกซ์ความเฉื่อยของแขนกล

$V(q, \dot{q})$ คือ แรงโคลิออริส และแรงหนีศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสาร $G(q)$ นี้ คือ แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ภายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 τ คือ สัญญาณควบคุม

q, \dot{q}, \ddot{q} คือ องศาของข้อต่อ ความเร็วของข้อต่อ และ ความเร่งของข้อต่อ

ในวิชยานิพนธ์นี้จะใช้ทฤษฎีของ Newton-Euler formulation ในการหาพลศาสตร์ของแขนกลรูปแบบนี้นั้นจะเป็นการหาแรงและแรงบิดที่มากกระทำต่อก้านโยงซึ่งจะแยกกันคำนวณ โดยจะมีสองส่วนคือ forward dynamics และ inverse dynamics

Forward dynamics คือ การหาความเร่งของข้อต่อแขนกลในขณะที่ใส่แรงบิดเข้ามา

Inverse dynamics คือ การหาแรงบิดที่จะใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนกล

2.8.1 Inverse dynamics

จะกล่าวถึง Inverse dynamics ก่อน รากฐานของ Newton-Euler formulation มี 3 ข้อ คือ

1. แรงกระทำเท่ากับแรงปฏิกิริยา ดังเมื่อก้านโยง 1 ใส่แรง \mathbf{f} และแรงบิด $\boldsymbol{\tau}$ ที่ก้านโยง 2 เช่นเดียวกับก้านโยง 2 ใส่แรง $-\mathbf{f}$ และแรงบิด $-\boldsymbol{\tau}$ ที่ก้านโยง 1
2. อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมเชิงเส้น เท่ากับแรงทั้งหมดที่ใส่ไปที่ก้านโยง
3. อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมเชิงมุม เท่ากับแรงบิดทั้งหมดที่ใส่ไปในก้านโยง

จากข้อ 2 จะได้ตามสมการ (2.36)

$$\frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \mathbf{f} \quad (2.36)$$

เมื่อ m คือ มวลของก้านโยง

\mathbf{v} คือ ความเร็วของจุดกึ่งกลางมวล

\mathbf{f} คือ แรงกระทำภายนอกที่ใส่เข้าไปที่ก้านโยง

เมื่อ m คือค่าคงที่ จากสมการ (2.37) จะได้

$$\mathbf{f} = m\mathbf{a} \quad (2.37)$$

เมื่อ \mathbf{a} คือ ความเร่งที่จุดศูนย์กลางมวล

จากข้อ 3 จะได้ (2.38)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา $\frac{d(I_0\boldsymbol{\omega}_0)}{dt} = \boldsymbol{\tau}_0$ จากเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป (2.38)

เมื่อ I_0 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของก้านโยง

ω_0 คือ ความเร็วเชิงมุมของก้านโยง

τ_0 คือ แรงบิดกระทำที่ก้านโยง

จากสมการ (2.38) จะได้สมการอัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมเชิงมุมที่ขึ้นกับเฟรมของก้านโยง (2.39)

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\omega} \times (I\boldsymbol{\omega}) + I\dot{\boldsymbol{\omega}} \quad (2.39)$$

เมื่อ $\boldsymbol{\tau}$ คือ แรงบิดที่กระทำที่ก้านโยง

I คือ เทนเซอร์ของความเฉื่อย

$\boldsymbol{\omega}, \dot{\boldsymbol{\omega}}$ คือ ความเร็ว และความเร่งเชิงมุมของเฟรม

การหาแรงและแรงบิดที่ใช้ในการควบคุมแขนกลจะทำการหาค่าของแรงและแรงบิดในแต่ละก้านโยงซึ่งจะขึ้นกับเฟรม i

$\boldsymbol{a}_{c,i}$ คือ ความเร่งที่จุดศูนย์กลางมวลของก้านโยง i

$\boldsymbol{a}_{e,i}$ คือ ความเร่งที่จุดปลายของก้านโยง i

$\boldsymbol{\omega}_i$ คือ ความเร็วเชิงมุมของเฟรม i เมื่อเทียบกับเฟรม 0

$\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ คือ ความเร่งเชิงมุมที่จุดศูนย์กลางมวลของก้านโยง i

$\boldsymbol{\alpha}_i$ คือ ความเร่งเชิงมุมของเฟรม i เมื่อเทียบกับเฟรม 0

\boldsymbol{z}_i คือ แกนกระดุน (แกนหมุนข้อต่อ) ของเฟรม i เมื่อเทียบกับเฟรม 0

\boldsymbol{g}_i คือ ความเร่งของแรงโน้มถ่วง

\boldsymbol{f}_i คือ แรงกระทำจากก้านโยง $i - 1$ บนก้านโยง i

$\boldsymbol{\tau}_i$ คือ แรงบิดกระทำจากก้านโยง $i - 1$ บนก้านโยง i

R_{i+1}^i คือ เมตริกซ์หมุนจากเฟรม i ถึง $i + 1$

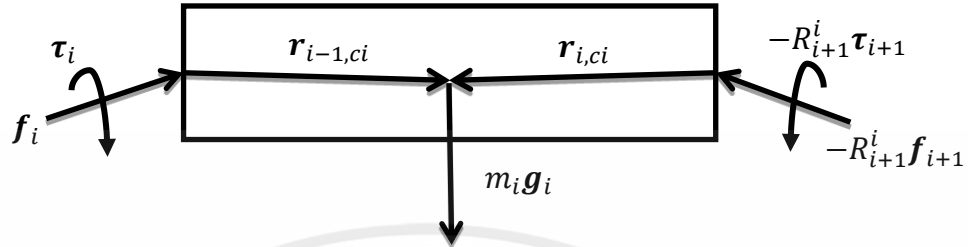
m_i คือ มวลของก้านโยง i

I_i คือ เทนเซอร์ความเฉื่อยของก้านโยง i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น $\boldsymbol{r}_{i-1,ci}$ คือ เวกเตอร์จากจุดเริ่มต้นของเฟรม $i - 1$ ถึงจุดศูนย์กลางมวลของก้านโยง i

$\boldsymbol{r}_{i-1,i}$ คือ เวกเตอร์จากจุดเริ่มต้นของเฟรม $i - 1$ ถึงจุดเริ่มต้นของเฟรม i

$r_{i,ci}$ คือ เวกเตอร์จากจุดเริ่มต้นของเฟรม i ถึงจุดศูนย์กลางมวลของก้านโยง i



รูปที่ 2.4 แรงและแรงบิดที่มากระทำต่อก้านโยง

จากรูปที่ 2.4 แสดงแรงและแรงบิดที่มากระทำต่อก้านโยง i โดย f_i คือ แรงกระทำจากก้านโยง $i - 1$ บนก้านโยง i และ $-f_{i+1}$ แรงกระทำจากก้านโยง $i + 1$ บนก้านโยง i ดังนั้น f_i จึงอยู่ในเฟรม i และ $-f_{i+1}$ อยู่ในเฟรม $i + 1$ เพื่อจะแสดงแรงทั้งสองที่มีผลต่อเฟรม i จะต้องเอาไปคูณกับ R_{i+1}^i ในส่วนของแรงบิดนั้นก็ทำเช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 2.4 จะได้สมการแรงดังนี้

$$\sum_{link} f = ma \quad (2.40)$$

$$f_i - R_{i+1}^i f_{i+1} + m_i g_i = m_i a_{c,i} \quad (2.41)$$

$$f_i = R_{i+1}^i f_{i+1} - m_i g_i + m_i a_{c,i} \quad (2.42)$$

ต่อมาคือสมการแรงบิดที่ก้านโยง เมื่อได้แรงจากสมการด้านบนนี้มาแล้ว แรงบิดนั้นก็คือ $f \times r$ เมื่อ r คือ เวกเตอร์รัศมีจากจุดที่ใส่แรงสู่จุดที่มีผลกระทบท่อแรงนั้น โดยจะมีสมการดังนี้ (2.43)

$$\sum_{link} \tau = \omega \times (I\omega) + I\dot{\omega} \quad (2.43)$$

$$\tau_i - R_{i+1}^i \tau_{i+1} + f_i \times r_{i-1,ci} - (R_{i+1}^i f_{i+1}) \times r_{i,ci} = \omega_i \times (I_i \omega_i) + I_i \alpha_i \quad (2.44)$$

$$\tau_i = R_{i+1}^i \tau_{i+1} - f_i \times r_{i-1,ci} + (R_{i+1}^i f_{i+1}) \times r_{i,ci} + \omega_i \times (I_i \omega_i) + I_i \alpha_i \quad (2.45)$$

เพื่อหาค่าตามสมการ (2.42) และ (2.45) จะทำการหาค่า $a_{c,i}$, ω_i , และ α_i เพื่อที่จะหาแรงและแรงบิด ในการเคลื่อนที่ของแขนกลนั้นจะกำหนดค่าของ q , \dot{q} , และ \ddot{q} สามารถหาความสัมพันธ์ของสองตัวแปรนี้ได้จาก

$$\boldsymbol{\omega}_i = (R_i^{i-1})^T [\boldsymbol{\omega}_{i-1} + \dot{q}_i \mathbf{z}_{i-1}] \quad (2.46)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = (R_i^{i-1})^T [\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} + \ddot{q}_i \mathbf{z}_{i-1} + \dot{q}_i \boldsymbol{\omega}_{i-1} \times \mathbf{z}_{i-1}] \quad (2.47)$$

$$\mathbf{a}_{e,i} = (R_i^{i-1})^T \mathbf{a}_{e,i-1} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \mathbf{r}_{i-1,i} + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{r}_{i-1,i}) \quad (2.48)$$

$$\mathbf{a}_{c,i} = \mathbf{a}_{e,i} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \mathbf{r}_{i-1,ci} + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{r}_{i-1,ci}) \quad (2.49)$$

การคำนวณหาค่าแรงของแขนกลด้วย Newton-Euler formulation มีขั้นตอนดังนี้
Forward recursion การกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณ

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \dot{\boldsymbol{\omega}}_0 = \mathbf{a}_{e,0} = \mathbf{a}_{c,0} = \mathbf{0} \quad (2.50)$$

แล้วทำการคำนวณค่าจากสมการ (2.46), (2.47), (2.48) และ(2.49) เพื่อที่จะหา $\boldsymbol{\omega}_i$, $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$, และ $\mathbf{a}_{c,i}$ โดยเริ่มหาค่าจากก้านโยง 1 ถึง n

Backward recursion กำหนดค่าเริ่มต้นดังนี้

$$\mathbf{f}_{i+1} = \boldsymbol{\tau}_{i+1} = \mathbf{0} \quad (2.51)$$

การคำนวณเพื่อหาค่าแรงบิดสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.42) และ (2.45) โดยเริ่มคำนวณจากก้านโยง n ถึง 1

2.8.2 Forward dynamics

ในด้าน Forward dynamics คือการหาความเร่งขององศาข้อต่อ \ddot{q} เพื่อที่จะนำไปหา q , \dot{q} ด้วยวิธีปริพันธ์ เริ่มจากสมการพลศาสตร์ (2.35) นำมาย้ายข้างเพื่อหา \ddot{q}

$$\ddot{q} = M(q)^{-1} [\boldsymbol{\tau} - (V(q, \dot{q}) + G(q))] \quad (2.52)$$

จากการหาแรงบิดในหัวข้อ Inverse dynamics เมื่อนำมาเขียนโปรแกรมเป็นฟังก์ชันในการหาแรงบิดแล้ว สามารถหา $M(q)$ และ $V(q, \dot{q}) + G(q)$ ได้ดังนี้

$$\boldsymbol{\tau} = NE(q, \dot{q}, \ddot{q}) = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) \quad (2.53)$$

เมื่อ $NE(q, \dot{q}, \ddot{q})$ คือ ฟังก์ชันการหาแรงบิดด้วยวิธี Newton-Euler formulation

สามารถหา $M(q)$ ได้จาก (2.54)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก $m = NE(q, 0, e) = M(q)$ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป (2.54)

เมื่อ e คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์ มีจำนวนหลัก (column) เท่ากับจำนวนข้อต่อของแขนกล

สามารถหา $V(q, \dot{q}) + G(q)$ ได้จากสมการ (2.55)

$$n = NE(q, \dot{q}, 0) = V(q, \dot{q}) + G(q) \quad (2.55)$$

จะสามารถหา \ddot{q} ได้จากสมการ (2.56)

$$\ddot{q} = m^{-1}[\tau - n] \quad (2.56)$$

ตารางที่ 2.2 แสดงค่ามวลของก้านโยง [8]

ก้านโยง	มวล (kg)
1	0
2	17.4
3	4.8
4	0.82
5	0.34
6	0.09

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลขึ้นกับ link coordinate frame [8]

ก้านโยง	ตำแหน่ง (m)
1	[0, 0, 0]
2	[-0.3638, 0.006, 0.2275]
3	[-0.0203, -0.0141, 0.07]
4	[0, 0.019, 0]
5	[0, 0, 0]
6	[0, 0, 0.032]

เทนเซอร์ความเฉื่อยของแต่ละก้านโยง [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $I_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.35 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.57) ถ้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_2 = \begin{bmatrix} 0.13 & 0 & 0 \\ 0 & 0.524 & 0 \\ 0 & 0 & 0.539 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} 0.066 & 0 & 0 \\ 0 & 0.086 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0125 \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

$$I_4 = \begin{bmatrix} 0.0018 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0013 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0018 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

$$I_5 = \begin{bmatrix} 0.0003 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0004 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0003 \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

$$I_6 = \begin{bmatrix} 0.00015 & 0 & 0 \\ 0 & 0.00015 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00004 \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

2.9 การควบคุมตำแหน่งของแขนกล

สมการพลศาสตร์ของแขนกลที่มีแรงกระทำจากแรงภายนอกที่จุดปลายแขนกล (2.63)

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = \tau - J^T F_{ext} \quad (2.63)$$

เมื่อ J คือ เมทริกซ์จาโคเบียน ของแขนกล

F_{ext} คือ แรงกระทำจากภายนอกที่จุดปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน

แต่เนื่องจากวิธีแบบ Newton-Euler formulation นั้นสามารถกำหนดแรงที่ปลายแขนโดย
ไม่จำเป็นต้องใช้ $J^T F_{ext}$ เพื่อใส่แรงบิดเข้าสู่สมการ (2.63) ให้กำหนด F_{ext} เป็นแรงที่ใส่เข้ามาที่ปลาย
ก้านโยงสุดท้ายใน Backward recursion หากจะใช้ $J^T F_{ext}$ ให้ใส่แรงที่ปลายแขนเป็น 0 N

จากสมการพลศาสตร์จะสามารถหาสัญญาณควบคุมได้โดยสมการ (2.64)

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = u \quad (2.64)$$

ในการควบคุมจะให้

$$\ddot{q} = \ddot{q}_r \quad (2.65)$$

$$\ddot{q} + K_D \dot{q} + K_P q = \ddot{q}_r \quad (2.66)$$

เมื่อ K_P คือ ตัวคูณของตำแหน่งของข้อต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง K_D คือ ตัวคูณของความเร็วของข้อต่อ

\ddot{q}_r คือ ค่าความเร่งของข้อต่อ

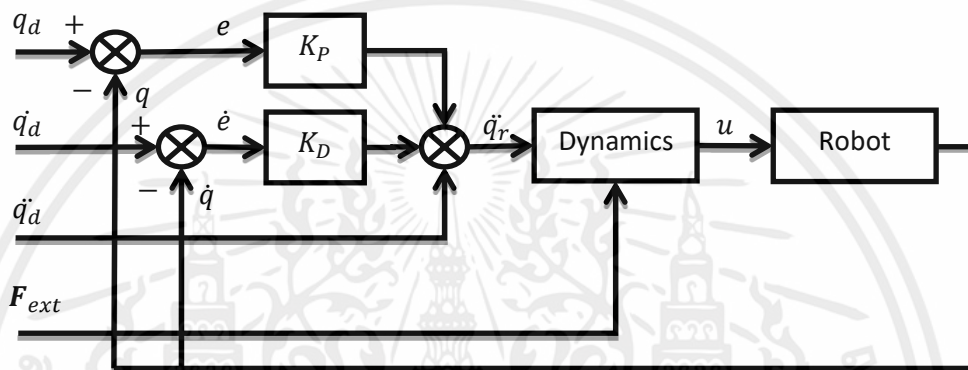
ในการ tracking error ทำได้โดยให้

$$e = q_d - q \quad (2.67)$$

เมื่อ q_d คือ ตำแหน่งข้อต่อที่ต้องการ จะได้การ tracking error ตามสมการ (2.68)

$$\ddot{q} + K_D \dot{e} + K_P e = 0 \quad (2.68)$$

ในการควบคุมตำแหน่งของแขนกลมีรูปแบบดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันการควบคุมตำแหน่งของแขนกล

เมื่อ Dynamics คือ สมการพลศาสตร์ของแขนกล

Robot คือ หุ่นยนต์

e, \dot{e} คือ ค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง และความเร็วข้อต่อ

u คือ สัญญาณควบคุม

$q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ คือ ตำแหน่ง, ความเร็ว, และความเร่งของข้อต่อที่ต้องการ

q, \dot{q} คือ ตำแหน่ง และความเร็วข้อต่อของแขนกล

\ddot{q}_r คือ ความเร่งของข้อต่อที่เข้าสู่สมการพลศาสตร์

K_P คือ ตัวคูณของตำแหน่งของข้อต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น K_D ทั้งห้ามใช้จริงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F_{ext} คือ แรงกระทำจากภายนอกที่จุดปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน

โดย q ที่ใช้จะมีทั้งหมด 6 ข้อต่อ คือ q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 และ q_6 เพื่อใช้เรียกข้อต่อที่ 1 ถึง 6

2.10 ตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์

ตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ เป็นตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมแรงกระทำระหว่างแรงภายนอกกับปลายแขนกล ตัวควบคุมนี้จะเป็นการควบคุมแรงทางอ้อมโดยจะรับเอาแรงกระทำระหว่างแขนกลกับวัตถุภายนอกแล้วเปลี่ยนเป็นตำแหน่งไปควบคุมแขนกลอีกที มีตัวแปรคือ มวล (mass) ความหน่วง (damper coefficient) และความแข็งเกร็ง (spring coefficient) ค่าตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อการควบคุม ยกตัวอย่างเช่นเมื่อ mass มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงกระทำระหว่างปลายแขนกลกับแรงกระทำภายนอกเพิ่มขึ้นเหมือนการกำหนดแล้วเอาไปทุบกำแพง โดยตัวควบคุมอิมพีแดนซ์จะมีสมการหลักคือ

(2.69)

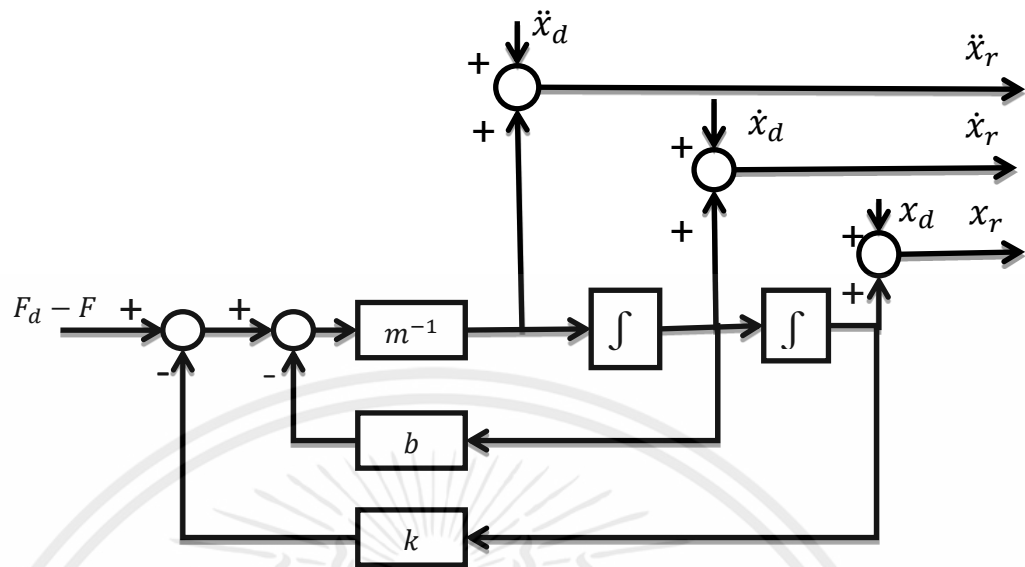
$$F = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx \quad (2.69)$$

เมื่อ m คือ มวล
 b คือ ความหน่วง
 k คือ ความแข็งเกร็ง
 F คือ แรงกระทำ

x, \dot{x}, \ddot{x} คือ ระยะ ความเร็ว และความเร่ง ที่เคลื่อนที่เมื่อมีแรงกระทำ

มีผังการทำงานตามรูปที่ (2.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



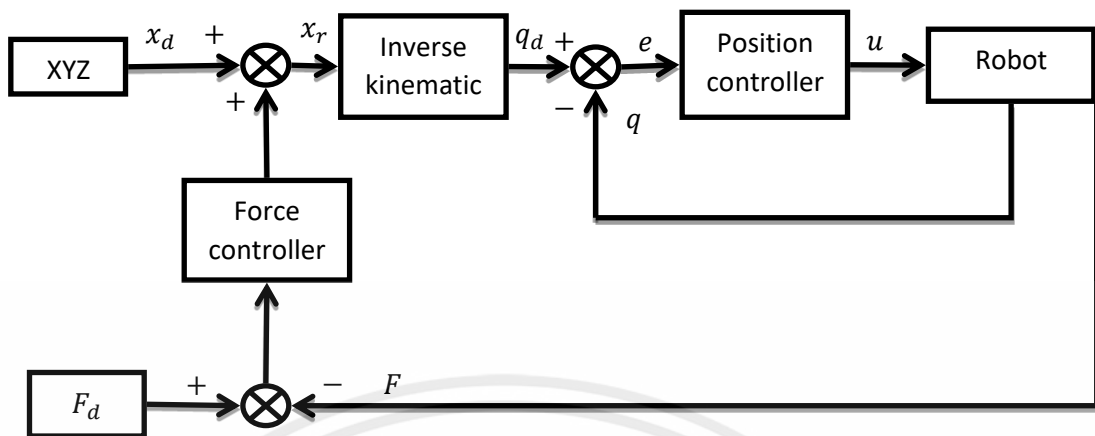
รูปที่ 2.6 ผังการทำงานของตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์

- เมื่อ F_d คือ แรงอ้างอิง
 F คือ แรงกระทำที่ได้จากการชน หรือสัมผัส ระหว่างอุปกรณ์กับวัตถุภายนอก
 m^{-1} คือ 1/มวล
 b คือ ความหน่วง
 k คือ ความแข็งเกร็ง

$x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d$ คือ คำสั่งของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของวัตถุที่ต้องการให้เคลื่อนที่ไป

$x_r, \dot{x}_r, \ddot{x}_r$ คือ ตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง อ้างอิงที่ผ่านตัวควบคุมอิมพีแดนซ์

ในงานนี้จะใช้แค่ x_r ในการควบคุมแรงเพราะการเคลื่อนที่ในพิกัดคาร์ทีเซียนที่จะใช้ในการควบคุมแขนกลนั้นมีแค่การควบคุมตำแหน่งไม่มีการควบคุมความเร็วและความเร่ง โดยการควบคุมเอกสารนี้เป็นแรงในแขนกลมีผังการทำงานตามรูปที่ (2.7) ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ผังการทำงานของตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ที่ใช้ควบคุมแรงที่ปลายแขนกล

เมื่อ	XYZ	คือ ตำแหน่งอ้างอิงของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน
	Inverse kinematic	คือ จลศาสตร์ผกผัน
	Position controller	คือ ตัวควบคุมตำแหน่ง
	Force controller	คือ ตัวควบคุมแรง
	Robot	คือ แขนกล
	x_d	คือ ตำแหน่งปลายแขนกลอ้างอิงจากการสั่งงาน
	x_r	คือ ตำแหน่งปลายแขนกลอ้างอิงที่ผ่านการควบคุมแรง
	q_d	คือ ตำแหน่งข้อต่ออ้างอิง
	q	คือ ตำแหน่งข้อต่อของแขนกล
	F_d	คือ แรงอ้างอิง
	F	คือ แรงที่ปลายแขนกล

ในขณะที่ปลายแขนกลชนเข้ากับวัตถุหากไม่มีการควบคุมการชนแรงชนจะเพิ่มขึ้นเกินค่าอ้างอิง ดังนั้นเพื่อให้ค่าของแรงกระทำเพิ่มขึ้นอย่างนุ่มนวล จะใช้สัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งต้องมีเทคนิคเบสลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเนื้อหาสิริทุกครั้งที่มีการใช้คำนวนจากสัญญาณเอาร์ทพุทของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ first order dynamic model ฟังก์ชันถ่าย

โอนี้จะไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนเชิงสถิตย์ (steady state error) และไม่มีค่าพุ่งเกิน (overshoot) โดย c จะเป็นค่าคงที่ของเวลา (time constant) ฟังก์ชันถ่ายโอนมีสมการดังนี้ (2.70)

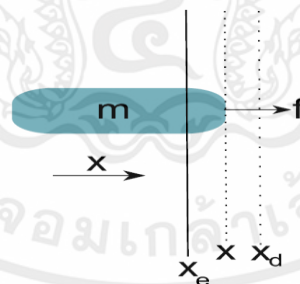
$$G_r(s) = \frac{1}{cs+1} \quad (2.70)$$

2.11 โมเดลแรงกระทำจากภายนอก

การสร้างแบบจำลองแรงกระทำจากภายนอกในพิกัดคาร์ทีเซียนนั้นจะใช้ระนาบหนึ่งในการทำโมเดลแรงกระทำ เรียกว่าแบบจำลองกำแพง (Wall model) ซึ่งจะเปรียบเหมือนระนาบสปริง เมื่อปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปจุดๆนั้นก็จะเกิดแรงกระทำเหมือนการกดสปริง โดยจะมีสมการดังนี้ (2.71)

$$f = k_{spring}(x - x_e) \quad (2.71)$$

เมื่อ f คือ แรงกระทำภายนอก
 k_{spring} คือ ค่าคงที่สปริง
 x คือ ระยะที่ปลายแขนกลเคลื่อนที่ที่จุดกระทบ
 x_e คือ จุดที่จะเกิดแรงกระทำจากภายนอก
 x_d คือ ตำแหน่งที่วัตถุจะเคลื่อนที่ไป



รูปที่ 2.8 รูปของแบบจำลองกำแพง [1]

2.12 ตัวควบคุมแรงปรับตัวได้แบบผสมผสาน (Hybrid Adaptive Controller)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 "ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น" ในตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้นั้นขณะที่กำลังทำการปรับจูนค่าตัวควบคุมจะมีบางช่วง
 การปรับปรุงที่ทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมแรงไม่ดี จึงจำเป็นต้องใช้ชุดควบคุมอีกตัวมาใช้คือตัว

ควบคุมแบบ Bang-Bang เพื่อไม่ให้แรงระหว่างปลายแขนกลกับวัตถุนั้นมากเกินไปจนขอบเขตที่ตั้งไว้ โดยจะมีหลักการการทำงานร่วมกันดังนี้

If (error > EU) // ถ้าค่าความผิดพลาดมากกว่าขอบเขตบนของค่าความผิดพลาดของแรง

Then // ใช้

Bang-bang Controller; $u = +V$

Else if (error < EL) // ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่าขอบเขตล่างของค่าความผิดพลาดของแรง

Then // ใช้

Bang-bang Controller; $u = -V$

Else // อื่นๆ

PSO Based Adaptive Impedance Controller

End

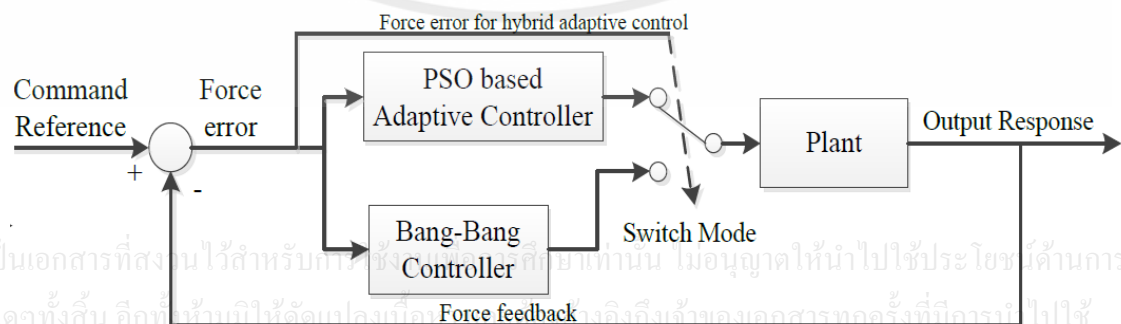
เมื่อ error คือ ค่าความผิดพลาดของแรง

EU คือ ขอบเขตบนของค่าความผิดพลาดของแรง

EL คือ ขอบเขตล่างของค่าความผิดพลาดของแรง

u คือ ค่าสัญญาณควบคุม

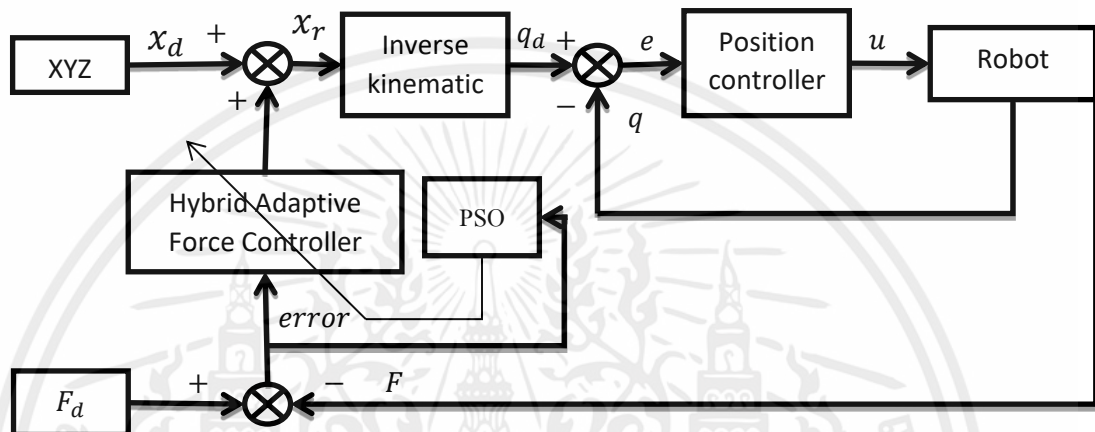
V คือ ค่าสูงสุดของสัญญาณควบคุม



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมของ Hybrid Adaptive Controller [5]

จากรูปที่ 2.9 PSO based Adaptive Controller คือตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่ใช้การหาค่าความเหมาะสมสูงสุดด้วยฝูงอนุภาค (พาทิคอลสวอม) มาปรับปรุงค่าตัวแปรของตัวควบคุมแรง โดยในส่วนตัวควบคุมนี้สามารถใช้วิธีการหาค่าความเหมาะสมวิธีอื่นมาใช้แทนได้เช่น เจเนติกอัลกอริทึม

การใช้ตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้แบบผสมผสานในการควบคุมแรงที่ปลายแขนกลจะมีผังการทำงานดังรูปที่ 2.10



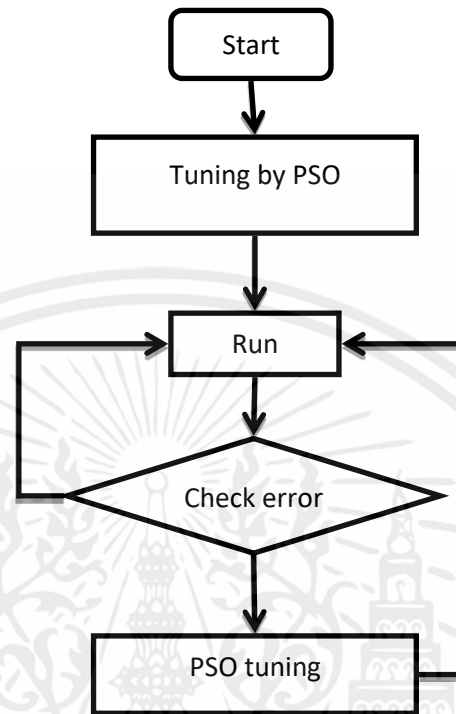
รูปที่ 2.10 การทำงานของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอม
สำหรับแขนกล

ในการใช้งานของตัวควบคุมนี้จะใช้งานในกรณีที่มีการทำงานซ้ำๆ เช่น การจับและวาง (pick and place) การเชื่อมโลหะที่จำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมแรง การทำงานของตัวควบคุมนี้จะเปรียบเสมือนการเรียนรู้ ซึ่งจะค่อยๆ เรียนรู้ไปที่ละนิดจากการทำซ้ำๆ ว่าสิ่งนี้เหมาะสมหรือไม่ไปจนกว่าจะได้เหมาะสม

การใช้ตัวควบคุมนี้มีขั้นตอนดังนี้

- 1) Tuning by PSO ในขั้นแรกจะต้องทำการปรับปรุงตัวควบคุมแรงให้ดีก่อนด้วยการหาค่าความเหมาะสมด้วยพาทิคอลสวอม
- 2) Run เริ่มเข้าขั้นตอนการทำงานซ้ำๆ ไปเรื่อยๆ
- 3) Check error เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดจะเข้าสู่การปรับตัวของตัวควบคุมโดยใช้พาทิคอลสวอมในขณะทำงาน
- 4) PSO tuning เมื่อปรับครบตามจำนวนครั้งแล้วจะออกมาเข้าสู่การทำงานปกติ

ในการใช้ตัวควบคุมนี้จะมีผังการทำงานดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การใช้งานตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณเชิงวิวัฒนาการ

3.1 บทนำ

ในทางวิศวกรรมใช้การคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary computation) เพื่อค้นหาผลลัพธ์หรือแก้ปัญหาต่างๆที่ซับซ้อน ยกตัวอย่างเช่น การหาค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุมPIDเพื่อคุมแขนกล เส้นทางที่เร็วและประหยัดพลังงานที่สุดในการคมนาคมขนส่งสินค้า การหาค่าคำตอบของฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถหาผลลัพธ์ได้ด้วยวิธีการคำนวณเชิงวิวัฒนาการทั้งสิ้น การคำนวณเชิงวิวัฒนาการนั้นมีต้นกำเนิดจากทฤษฎีการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต ผู้คิดค้นคือ Charles Darwin ปี 1842 หลักการค้นหาค่าผลลัพธ์นั้นจะจัดอยู่ในวิธีเมตาฮีริสติก (meta-heuristic) ซึ่งจะเป็นการทำวนซ้ำ การคำนวณเชิงวิวัฒนาการมีหลากหลายวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ เจเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm : GA) การหาค่าความเหมาะสมสูงสุดด้วยฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการหาค่าความเหมาะสม (fitness value) สูงสุดของสองวิธีนี้

3.2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม หรือ เจเนติกอัลกอริทึม เปรียบเสมือนการแก้ปัญหาของสิ่งมีชีวิตนั้นคือการวิวัฒนาการ เพื่อแก้ปัญหาเมื่อเจอกับสิ่งแวดล้อมใหม่ๆโดยสิ่งมีชีวิตนั้นจะประกอบด้วย โครโมโซม (chromosome) และยีน (gene) ใช้กระบวนการทางพันธุศาสตร์เพื่อวิวัฒนาการซึ่งประกอบด้วย การสืบพันธุ์ (reproduction) การกลายพันธุ์ (mutation) การแลกเปลี่ยนยีน (reproduction) และการคัดเลือกประชากร (selection) [12] ในการวิวัฒนาการเพื่อแก้ปัญหานั้นจะเป็นกระบวนการการทำซ้ำเพื่อหาการแก้ปัญหาที่ดีที่สุด

เจเนติกอัลกอริทึมแบ่งประชากรเป็นสองชนิด คือ ประชากรเก่า *Pold* และประชากรใหม่ *Pnew* ซึ่งจะเปรียบประชากรเก่าเหมือนรุ่นพ่อและแม่ ประชากรใหม่เหมือนรุ่นลูก ซึ่งประชากรเหล่านี้ประกอบด้วยโครโมโซมและยีน ส่วนในการเปรียบเทียบเพื่อแก้ปัญหานั้นจะใช้ค่าความเหมาะสม ดังนั้น พารามิเตอร์ของประชากรคือ $P_N = \{Chromosome, Fitness\ value\}$

Chromosome คือ พารามิเตอร์ที่ใช้เพื่อหาผลลัพธ์ สามารถสร้างได้ 2 แบบ คือ แบบไบนารี และจำนวนจริง ตัวอย่างเช่นถ้าจะคำนวณหาคำตอบจาก $2x - 3y + 5z = 0$ ในหนึ่งโครโมโซมก็จะมี 3 มิติ คือ $x, y,$ และ z ก็จะสามารถเขียนได้ดังตัวอย่าง $Chromosome_D = \{x, y, z\}$ ซึ่งในการกำหนดพารามิเตอร์ของโครโมโซมที่มีหลายมิติสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Chromosome_D = \{Ch_1, Ch_2, Ch_3, \dots, Ch_d\}$$

D คือ จำนวนมิติของพารามิเตอร์

Fitness value คือ ค่าความเหมาะสมของประชากร ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.10)

N คือ จำนวนประชากร

กระบวนการทำงานของ GA มี 5 กระบวนการหลักๆดังนี้ [12]

1) Initial population คือ การสร้างประชากรเริ่มต้นโดยการสุ่มค่าให้ยีน โดยการสุ่มค่านี้อาจจะไม่ให้เกินขอบเขตที่ใช้ในการแก้ปัญหา แล้วจะนำค่าที่สุ่มได้ไปเป็นค่าของประชากรเก่าสุดสมการที่ (3.1)

$$Pold_i = \text{random generator}() \quad (3.1)$$

2) Selection population การคัดเลือกประชากรเพื่อนำไปทำกระบวนการทางพันธุกรรม โดยวิธีเลือกนั้นมีหลายอย่างเช่น การคัดเลือกแบบสุ่ม การหมุนวงล้อ และการแข่งขัน แบบสุ่มเป็นวิธีการกระจายโอกาสให้ประชากรมากที่สุด การเลือกประชากรเก่าสุดจำนวนสองตัวคัดลอกเป็นประชากรใหม่คือ $Pnew_i$ และ $Pnew_j$ ตามสมการที่ (3.2)

$$[Pnew_i, Pnew_j] = \text{function selection}(Pold) \quad (3.2)$$

3) Genetic operation การกระทำทางพันธุศาสตร์ประกอบด้วย คrossover (crossover) และกระบวนการการกลายพันธุ์ (mutation)

crossover (crossover) คือการสลับค่ายีนบางส่วนซึ่งกันและกัน การสลับนั้นจะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยน (crossover probability) เรียกว่า pc ดังสมการที่ (3.3) ส่ง $Pnew_i$ และ $Pnew_j$ ให้กับฟังก์ชัน crossover โดยโอกาสในการสลับตำแหน่งขึ้นอยู่กับ pc ก็จะได้ประชากรใหม่ที่ทำ การสลับตำแหน่งยีนแล้ว เมื่อทำการ crossover เสร็จแล้วก็จะนำเข้าสู่กระบวนการการกลายพันธุ์ (mutation)

$$[Pnew_i, Pnew_j] = \text{function crossover}(Pnew_i, Pnew_j, pc) \quad (3.3)$$

กระบวนการการกลายพันธุ์ (mutation) คือการสุ่มค่าพารามิเตอร์ให้กับยีน โดยตำแหน่งของยีนที่จะมีการกลายพันธุ์จะถูกกำหนดโดยความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (mutation probability) เรียกว่า pm ดังสมการ (3.4) ส่งค่าประชากร $Pnew_i$ หรือ $Pnew_j$ จากการครอสโอเวอร์ให้ฟังก์ชันการกลายพันธุ์ซึ่งจะทำหน้าที่การเปลี่ยนค่ายีนใหม่ด้วยการสุ่ม โอกาสที่จะได้ค่ายีนใหม่ขึ้นอยู่กับ pm และจะส่งค่ากลับไปให้ประชากรใหม่ตัวเดิม

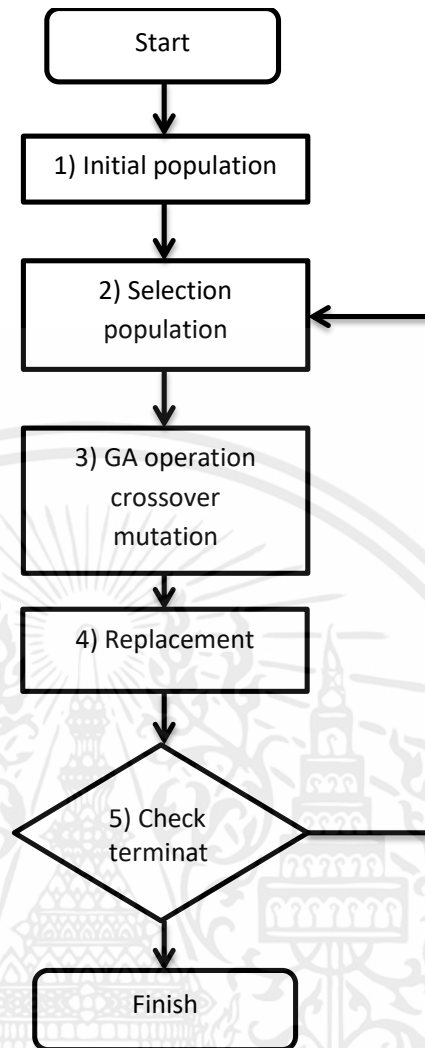
$$Pnew = function\ mutation(Pnew, pm) \quad (3.4)$$

4) Replacement เป็นการเลือกประชากรที่มีความเหมาะสมไปเป็นประชากรรุ่นต่อไป โดยจะมีทั้งประชากรเก่า $Pold$ และประชากรใหม่ $Pnew$ ซึ่งจะพิจารณาเลือกประชากรที่มีค่าความเหมาะสมสูง ส่งให้กับ $Pold$ เพื่อเป็นประชากรรุ่นถัดไป

$$Pold = function\ replacement(Pnew, Pold) \quad (3.5)$$

5) Termination การตรวจสอบการสิ้นสุดในการตรวจสอบการสิ้นสุดการทำงานของเจเนติกอัลกอริทึม สามารถตรวจสอบได้สองลักษณะคือ การได้ค่าความเหมาะสมตามที่กำหนด หรือครบตามจำนวนรอบของการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ผังการทำงานของเจเนติกอัลกอริทึม

3.3 การหาค่าความเหมาะสมสูงสุดด้วยฝูงอนุภาค

การหาค่าความเหมาะสมสูงสุดด้วยฝูงอนุภาค หรือพาทิคอลสวอม เป็นกระบวนการหาคำตอบโดยมีแรงบัลดาลใจมาจากมาจากการหาอาหารของฝูงนก โดยจะมีการส่งสัญญาณกันในฝูงเพื่อเคลื่อนที่ไปยังจุดที่มีอาหาร

นกแต่ละตัวซึ่งจะเปรียบได้ดั่งอนุภาค 1 อนุภาคหรือสมาชิกฝูง ซึ่งจะมีการจดจำตำแหน่งของตนเองเอาไว้ (x_i) พร้อมทั้งทิศทาง และความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค (v_i) ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ตำแหน่งที่ดีที่สุดของสมาชิกแต่ละตัวคือ $pbest$

ตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูงคือ $gbest$

ขั้นตอนการทำงานของพาทิคอลสวอม สามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) สร้างอนุภาคโดยสุ่มตำแหน่งเริ่มต้นให้กับอนุภาค
- 2) คำนวณค่าความเหมาะสม โดยหาจากสมการที่ (3.10) ถ้าหากว่าค่าความเหมาะสมของอนุภาคที่ได้มีค่าดีกว่าค่าเดิมให้เปลี่ยนไปใช้ค่าที่ดีกว่า เป็น $pbest$
- 3) เลือกค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดจากฝูงอนุภาคแล้วนำตำแหน่งที่เป็นค่าที่ดีที่สุดเป็น $gbest$
- 4) คำนวณค่าความเร็วใหม่สำหรับทุกๆอนุภาคโดยหาจากสมการที่ (3.7)
- 5) เคลื่อนที่อนุภาคไปยังตำแหน่งใหม่โดยหาจากสมการที่ (3.6) ทำวนซ้ำข้อ 2 ถึงข้อ 5 จนได้คำตอบหรือครบจำนวนรอบที่กำหนด

สมการที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าตำแหน่ง และ ความเร็ว ของพาทิคอลสวอม

สมการในการปรับเปลี่ยนตำแหน่ง คือสมการที่ (3.6)

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (3.6)$$

เมื่อ x_i คือ ค่าของตำแหน่ง

v_i คือ ค่าความเร็ว

สมการในการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วคือสมการที่ (3.7)

$$v_i(t + 1) = wv_i(t) + c_1r_1(pbest_i(t) - x_i(t)) + c_2r_2(gbest(t) - x_i(t)) \quad (3.7)$$

เมื่อ w คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อย

c_1 และ c_2 คือ ค่าคงที่ความเร่ง

r_1 และ r_2 คือ ค่าที่ได้จากการทำการสุ่มค่า

โดย r_1 และ r_2 หาได้จากสมการ (3.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อ $r = \frac{\text{random}(0 \text{ to } 1)}{2}$ เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป (3.8)

เมื่อ $\text{random}(0 \text{ to } 1)$ คือ การสุ่มค่าระหว่าง 0 ถึง 1

โดยสมการปรับเปลี่ยนค่า w ตามสมการที่ (3.9) ให้ w มีค่าลดลงเพื่อฝูงอนุภาคจะเกาะกลุ่มกันมากขึ้น

$$w = (iter_{max} - iter) \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \quad (3.9)$$

เมื่อ $iter$ คือ จำนวนครั้งของการวนซ้ำ

$iter_{max}$ คือ จำนวนวนซ้ำมากที่สุด,

w_{max} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยมากที่สุด

w_{min} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยน้อยที่สุด

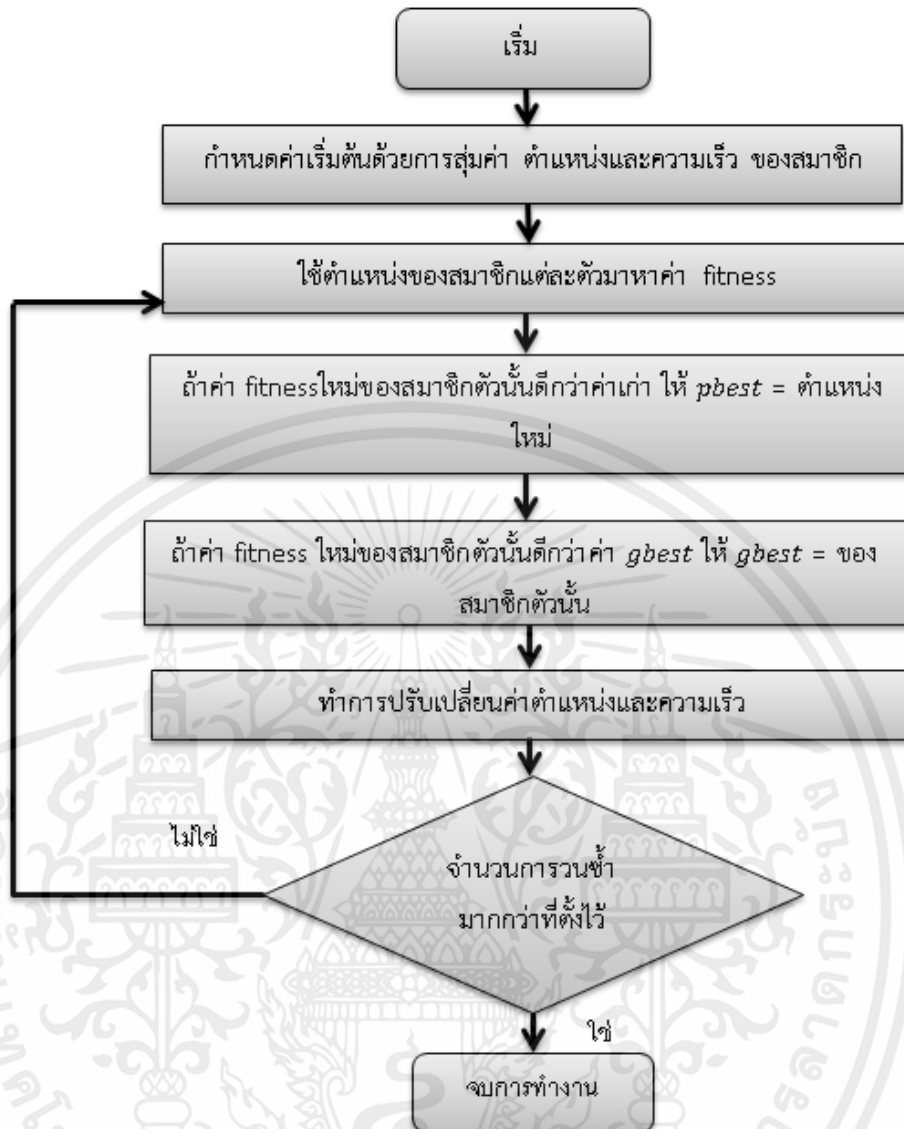
ในการหา $gbest$ และ $pbest$ ต้องใช้สมการเพื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนด้วยค่าความเหมาะสมของผลลัพธ์ คือ fitness function ดังสมการที่ (3.10)

$$f = \int e^2 dt \quad (3.10)$$

เมื่อ f คือ fitness value

e คือ ค่าความผิดพลาดของแรงกระทำที่ถูกป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของพาทิคอลสวอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

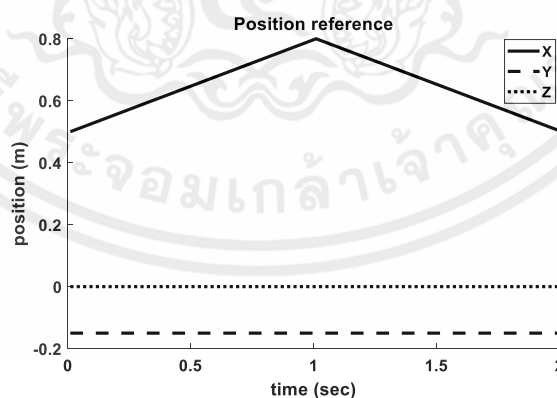
ผลการจำลอง

4.1 บทนำ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงการจำลองเพียงอย่างเดียวโดยจะทำการจำลองบนคอมพิวเตอร์ที่มีตัวประมวลผล core i5 2.4GHz แขนงกลที่ใช้คือ PUMA560 [8] โดยผลการจำลองนั้นจะเริ่มจากการควบคุมตำแหน่ง การควบคุมแรง การเปรียบเทียบการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันระหว่างพาทิคอลสวอม (PSO) และเจเนติกอัลกอริทึม (GA) เปรียบเทียบการปรับปรุงค่าตัวแปรของตัวควบคุมแรงระหว่างพาทิคอลสวอม (PSO) และเจเนติกอัลกอริทึม (GA) และผลของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอม สำหรับแขนกลเคลื่อนไหว 6 องศาอิสระ โดยจะมีผลการจำลองดังนี้

4.2 ผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งของแขนกล 6 องศาอิสระ

การจำลองนี้เพื่อปรับตัวควบคุมตำแหน่งซึ่งอยู่ในตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์โดยจะปรับด้วยมือ ในการจำลองการควบคุมตำแหน่งจะสั่งให้แขนกลเคลื่อนที่ไปในพิกัดคาร์ทีเซียน ซึ่งจะคงที่ตำแหน่ง y และ z ไว้ที่ $y = -0.1501$ เมตร และ $z = 0$ เมตร แล้วทำการสั่งให้แขนกลเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน x โดยจะใช้คลื่นรูปสามเหลี่ยมเป็นตำแหน่งอ้างอิง โดยมีจุดต่ำสุดที่ 0.5 เมตร จุดสูงสุดที่ 0.8 เมตร เวลาต่อคาบ 2 วินาทีดังรูปที่ 4.1 ใช้ sampling time = 0.01 วินาที



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งอ้างอิงในพิกัดคาร์ทีเซียน ของปลายแขนกล

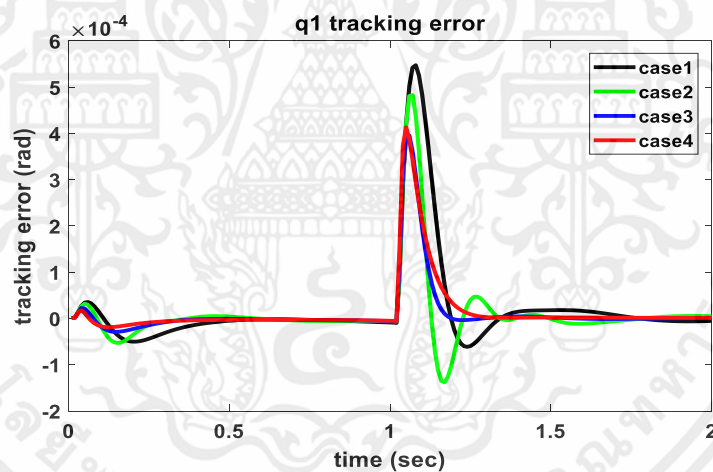
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองนี้จะทำการปรับเปลี่ยนค่า K_p และ K_d เพื่อทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งข้อต่อแล้วนำค่า โดยมีทั้งหมด 4 กรณี ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า K_p และ K_d [14]

กรณี	K_p	K_d
1	500 ,50 ,50, 5, 5 ,5	25, 5 ,5, 0.5 ,0.5 ,0.5
2	1000, 100 ,100, 10, 10, 10	25, 5 ,5, 0.5 ,0.5 ,0.5
3	1000, 100 ,100, 10, 10, 10	50, 10, 10, 1, 1, 1
4	1000, 100, 100, 10, 10, 10	70, 20, 20, 1, 1, 1

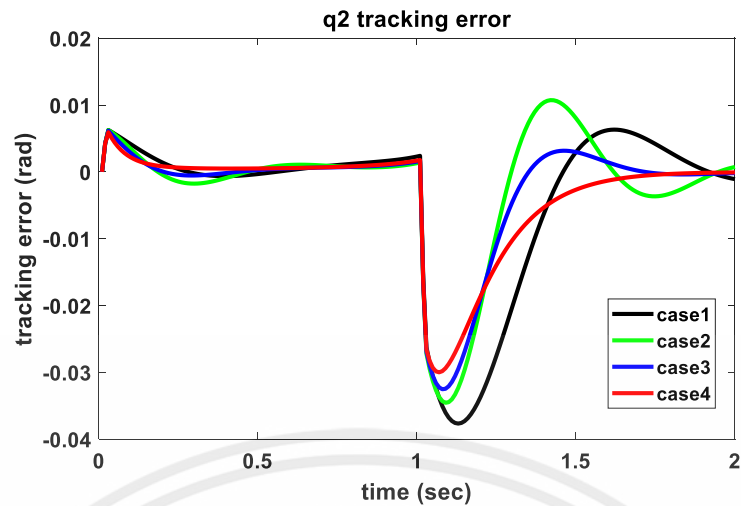
ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในการควบคุมตามตำแหน่งอ้างอิงของตำแหน่งข้อต่อในแต่ละกรณีค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อ



รูปที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 1

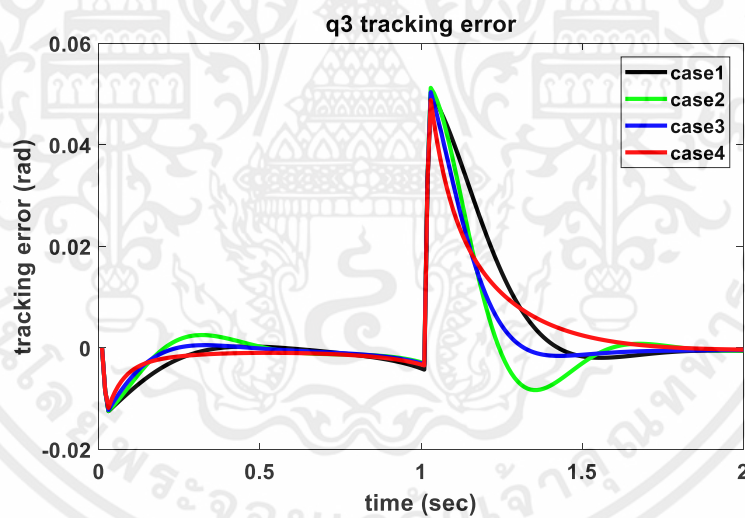
จากรูปที่ 4.2 กรณีที่ 4 มีค่าความคลาดเคลื่อนของการควบคุมตำแหน่งข้อต่อที่ 1 น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 2

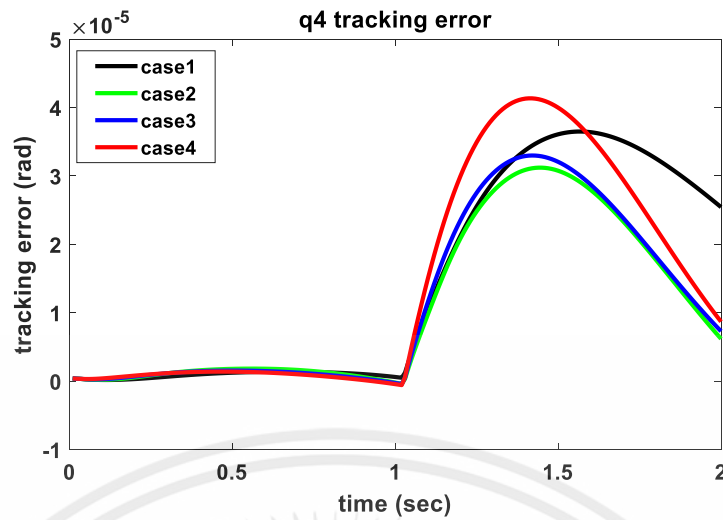
จากรูปที่ 4.3 กรณีที่ 4 มีค่าความคลาดเคลื่อนของสูงสุดการควบคุมตำแหน่งข้อต่อที่ 2 น้อยที่สุด แต่จะมีความหน่วงมากกว่ากรณีที่ 3



รูปที่ 4.4 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 3

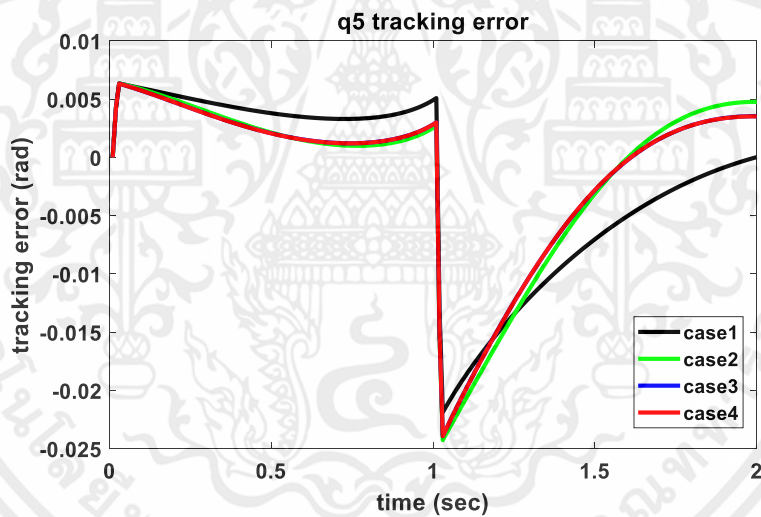
จากรูปที่ 4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของการควบคุมตำแหน่งข้อต่อที่ 3 กรณีที่ 4 น้อยที่สุด แต่จะมีความหน่วงมากกว่ากรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 4

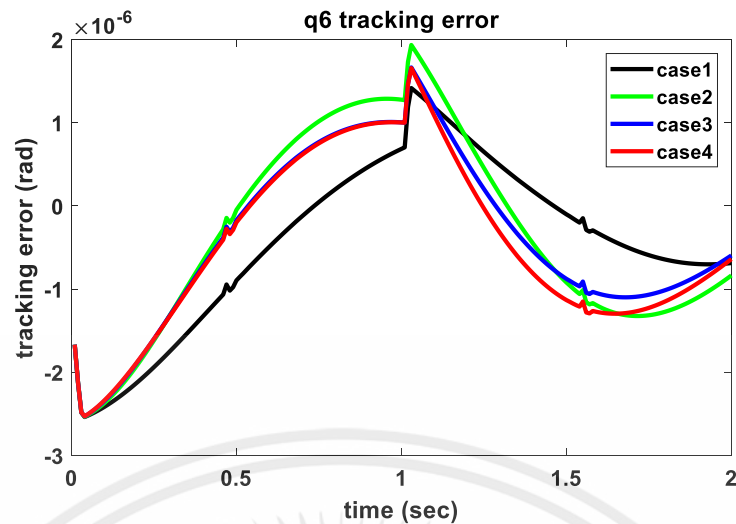
จากรูปที่ 4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนของการควบคุมตำแหน่งข้อต่อที่ 4 ของกรณีที่ 2 น้อยที่สุด



รูปที่ 4.6 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 5

จากรูปที่ 4.6 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของการควบคุมตำแหน่งข้อต่อที่ 5 กรณีที่ 1 น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

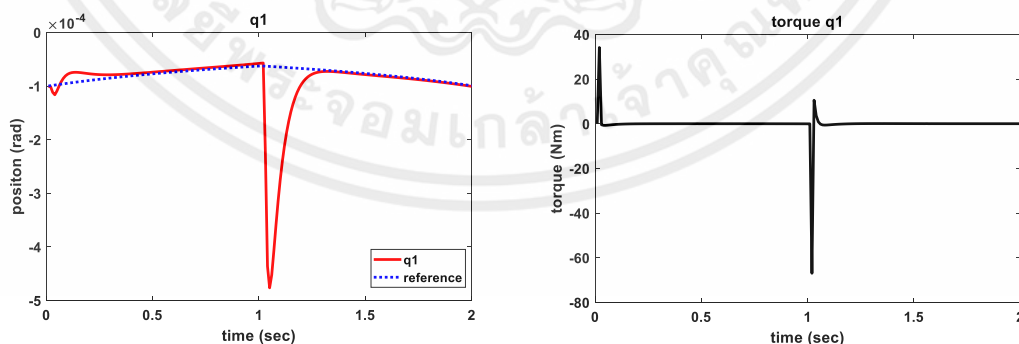


รูปที่ 4.7 ค่าความผิดพลาดขององศาข้อต่อที่ 6

จากรูปที่ 4.7 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของการควบคุมตำแหน่งข้อต่อที่ 5 กรณีที่ 1 น้อยที่สุด

จากผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งของแขนกล PUMA 560 นั้น ข้อต่อที่มีผลจะเป็นคือ ข้อต่อที่ 1 2 และ 3 จะเห็นได้ว่า ค่า K_p และ K_d ในกรณีที่ 4 นั้น มีค่าความผิดพลาดของการควบคุมตามในข้อต่อที่ 1 และ 2 น้อยกว่ากรณีอื่น ส่วนข้อต่อที่ 3 นั้นจะมีความหน่วงมากกว่ากรณีที่ 3 แต่ค่าความผิดพลาดสูงสุดของกรณีที่ 4 จะน้อยกว่ากรณีที่ 3 การเลือกใช้ค่า K_p และ K_d จึงใช้ค่าในกรณีที่ 4 คือ $K_p = [1000, 100, 100, 10, 10, 10]$ และ $K_d = [70, 20, 20, 1, 1, 1]$

จากการใช้ค่า K_p และ K_d จากกรณีที่ 4 มาใช้ในการควบคุมตำแหน่งนั้นจะได้ผลตำแหน่งข้อต่อ และแรงบิดดังนี้

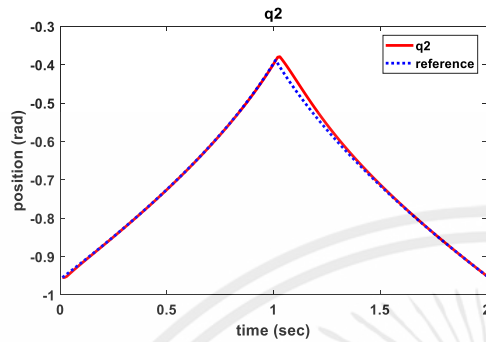


(ก)

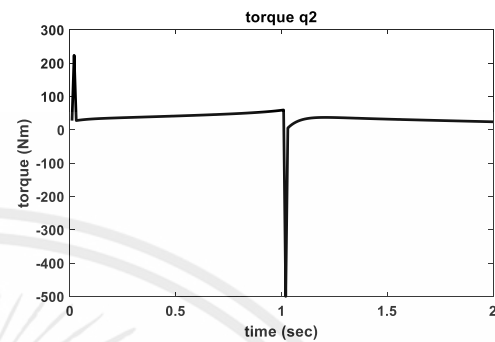
(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.8 องศาข้อต่อที่ 1 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด

จากรูปที่ 4.8 (ก) แสดงผลของการควบคุมตำแหน่งตามสัญญาณอ้างอิงของข้อต่อที่ 1 รูปที่ 4.8 (ข) แสดงแรงบิดที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของข้อต่อที่ 1



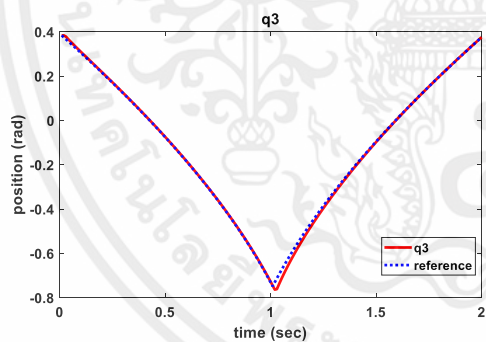
(ก)



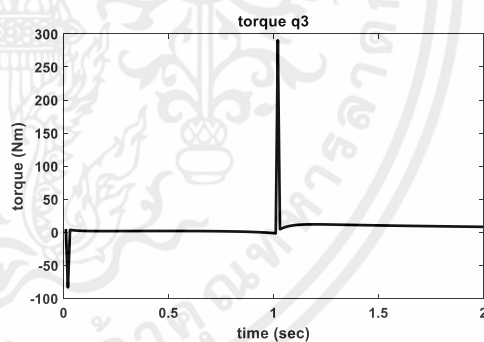
(ข)

รูปที่ 4.9 องศาข้อต่อที่ 2 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด

จากรูปที่ 4.9 (ก) ผลของการควบคุมตำแหน่งตามสัญญาณอ้างอิงของข้อต่อที่ 2 รูปที่ 4.9 (ข) แรงบิดที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของข้อต่อที่ 2



(ก)

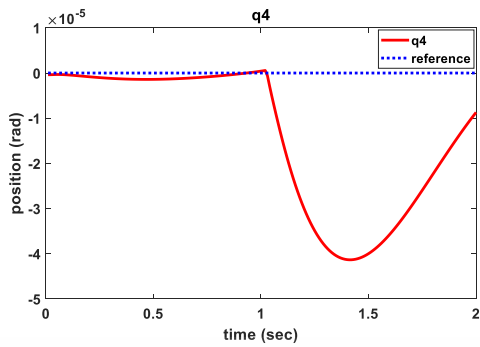


(ข)

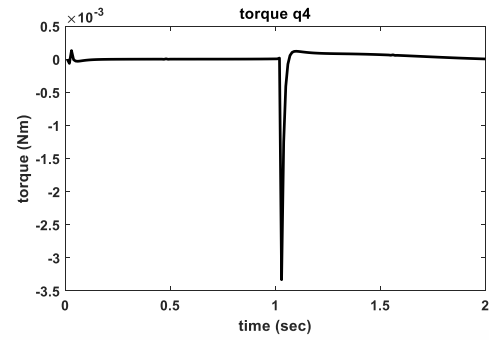
รูปที่ 4.10 องศาข้อต่อที่ 3 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด

จากรูปที่ 4.10 (ก) ผลของการควบคุมตำแหน่งตามสัญญาณอ้างอิงของข้อต่อที่ 3 รูปที่ 4.10 (ข) แรงบิดที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของข้อต่อที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



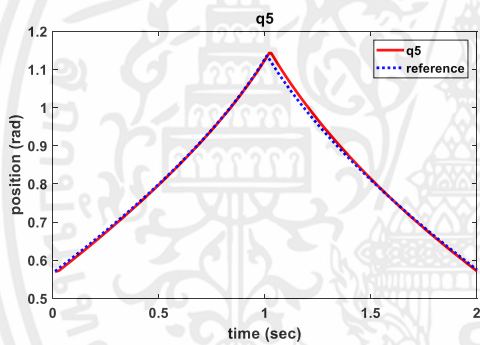
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 องศาข้อต่อที่ 4 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด

จากรูปที่ 4.11 (ก) ผลของการควบคุมตำแหน่งตามสัญญาณอ้างอิงของข้อต่อที่ 4 รูปที่ 4.11 (ข) แรงบิดที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของข้อต่อที่ 4



(ก)

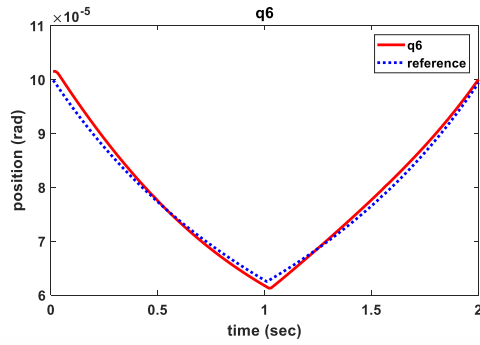


(ข)

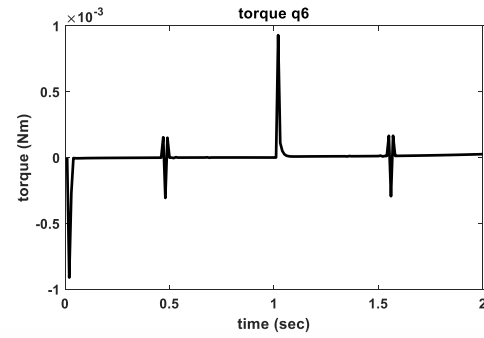
รูปที่ 4.12 องศาข้อต่อที่ 5 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด

จากรูปที่ 4.12 (ก) ผลของการควบคุมตำแหน่งตามสัญญาณอ้างอิงของข้อต่อที่ 5 รูปที่ 4.12 (ข) แรงบิดที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของข้อต่อที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

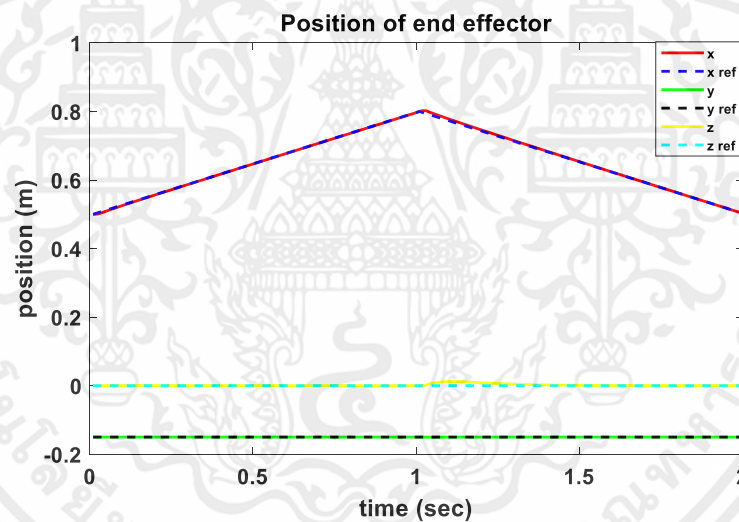


(ข)

รูปที่ 4.13 องศาข้อต่อที่ 6 : (ก) ตำแหน่ง และ (ข) แรงบิด

จากรูปที่ 4.13 (ก) ผลของการควบคุมตำแหน่งตามสัญญาณอ้างอิงของข้อต่อที่ 6 รูปที่ 4.13 (ข) แรงบิดที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของข้อต่อที่ 6

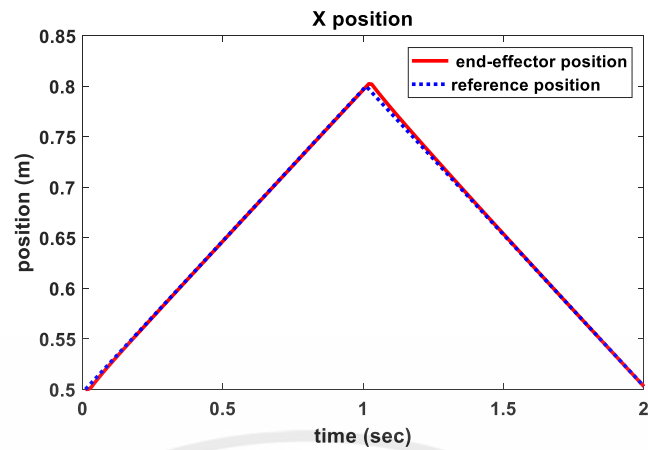
ผลการตอบสนองของปลายแขนกลเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงในพิกัดคาร์ทีเซียน



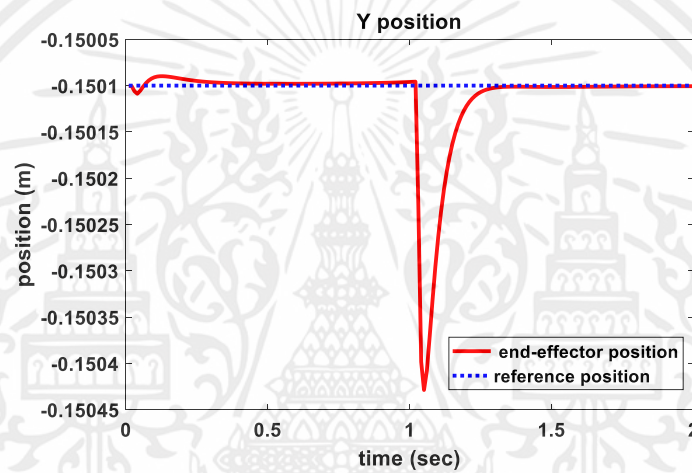
รูปที่ 4.14 ผลการตอบสนองตำแหน่งของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกลตามพิกัดคาร์ทีเซียนโดยการใช้ K_p และ K_d จากกรณีที่ 4 สามารถควบคุมตามสัญญาณอ้างอิงได้ และมีผลการควบคุมแยกตามแกนดังรูปที่ 4.15, 4.16, และ 4.17 โดยรูปที่ 4.15 แสดงการควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลตามแนวแกน x รูปที่ 4.16 แสดงการควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลตามแนวแกน y และ รูปที่ 4.17 แสดงการควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลตามแนวแกน z

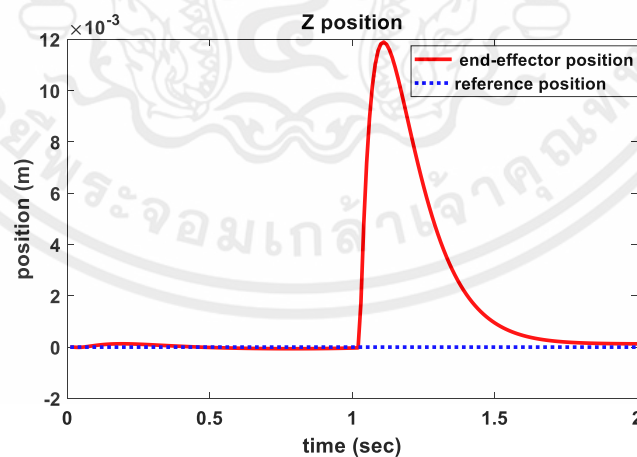
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองตำแหน่งของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตามแกน x



รูปที่ 4.16 ผลการตอบสนองตำแหน่งของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตามแกน y

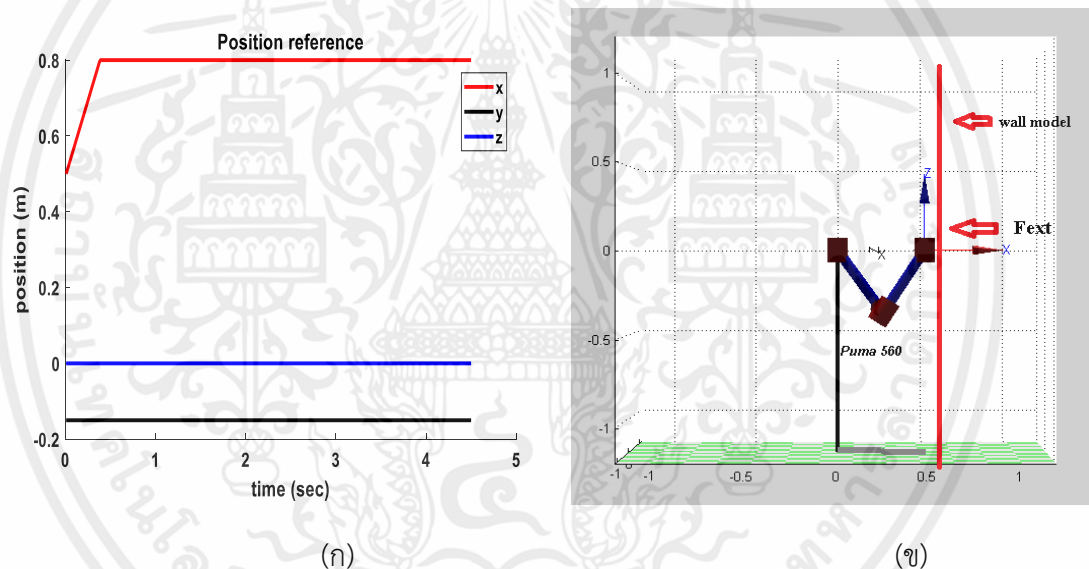


รูปที่ 4.17 ผลการตอบสนองตำแหน่งของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตามแกน z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการจำลองของตัวควบคุมแรง

การควบคุมแรงของแขนกลจะสั่งให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าไปชนเข้ากับแบบจำลองกำแพง การเคลื่อนที่นั้นจะเคลื่อนที่ไปในพิกัดคาร์ทีเซียนโดยทิศทางทางแกน x จะเคลื่อนที่จากค่า $x = 0.5$ เมตร แล้วค่อยๆเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันลาดมีความชัน (slope) เท่ากับ 0.8 โดยมีการจำกัดค่าสูงสุดที่ 0.8 เมตร การเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน y และ z จะคงค่าไว้เป็นค่าคงที่ $y = -0.1501$ เมตร และ $z = 0$ เมตร กำหนดตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงไว้ที่ตำแหน่ง $x = 0.6$ เมตร ค่านิสปริงของแบบจำลองกำแพง $k_{spring} = 500$ นิวตัน/เมตร พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงกำหนดดังนี้ $m = 0.11$, $b = 12.5$, และ $k = 0.11$ ค่าแรงอ้างอิงที่ 30 นิวตัน โดยรูปที่ 4.18 (ก) แสดงตำแหน่งอ้างอิงของปลายแขนกล รูปที่ 4.18 (ข) แสดงตำแหน่งของแขนกลและแบบจำลองแรงกระทำจากภายนอก



รูปที่ 4.18 (ก) ตำแหน่งอ้างอิงของปลายแขนกล (ข) ตำแหน่งแขนกลและแบบจำลองกำแพง

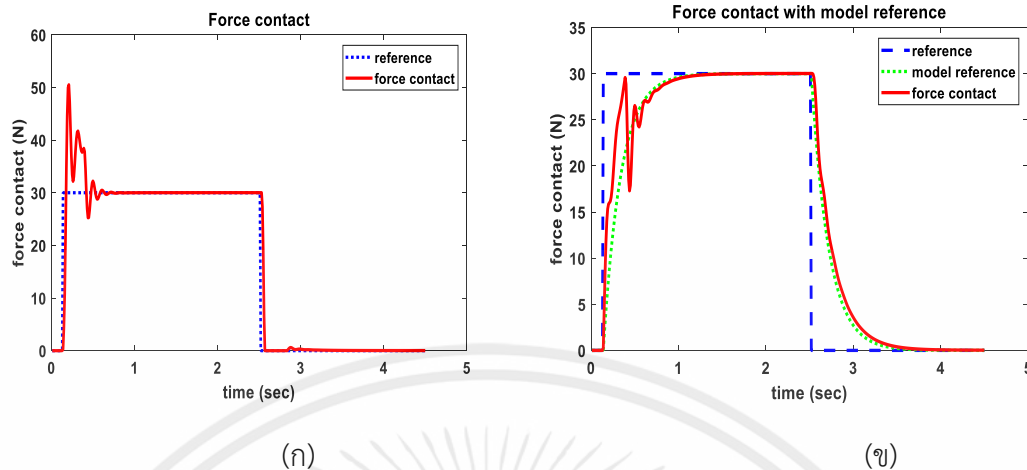
ในการจำลองแรงอ้างอิง จะมี 2 กรณี คือ 1. แรงอ้างอิงไม่ผ่านฟังก์ชันถ่ายโอน และ 2. แรงอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอน

ฟังก์ชันถ่ายโอนของแรงอ้างอิงใช้ตามสมการที่ (4.1)

$$G_r(s) = \frac{1}{0.2s+1} \quad (4.1)$$

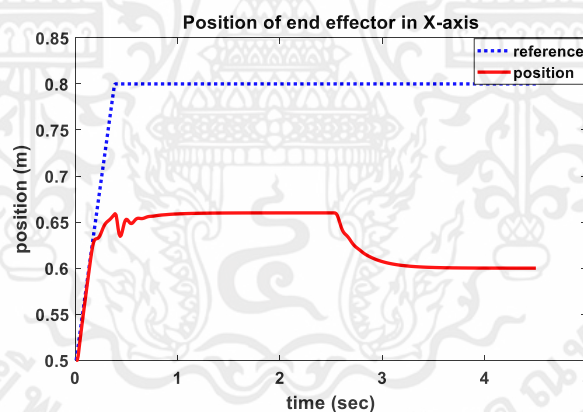
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองแรงระหว่างปลายแขนกลกับแบบจำลองกำแพงทั้งสองกรณีมีดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 (ก) กรณีที่ 1 ผลการตอบสนองของแรงโดยแรงอ้างอิงไม่ผ่านฟังก์ชันถ่ายโอน (ข) กรณีที่ 2 ผลการตอบสนองของแรง โดยแรงอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอน

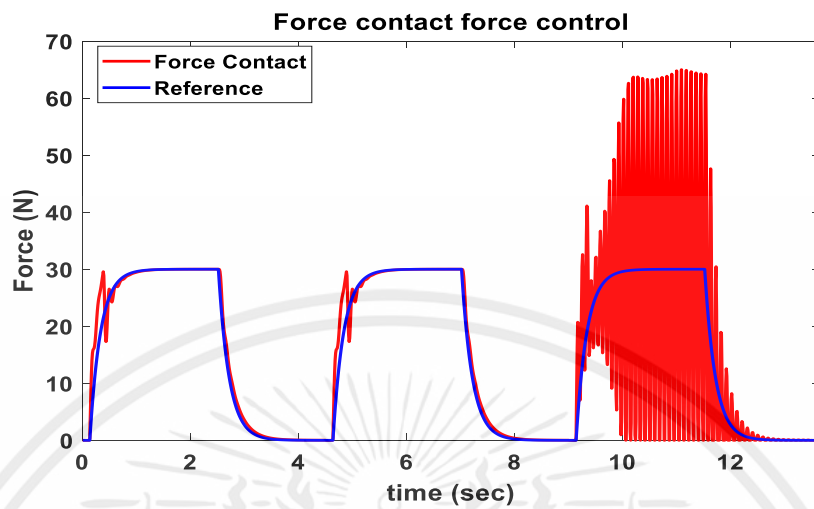
ผลการตอบสนองของตำแหน่งของปลายแขนกลตามแนวแกน x เมื่อเกิดการชนเข้ากับแบบจำลองกำแพงตามรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ตำแหน่งของปลายแขนกลในทิศทางตามแนวแกน x เมื่อชนเข้ากับแบบจำลองกำแพง

จากผลการจำลองรูปที่ 4.19 (ก) จะเห็นว่า กรณีที่ 1 ตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์สามารถควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกลในขณะชนเข้ากับแบบจำลองกำแพงไม่ให้ตามตำแหน่งอ้างอิงเพื่อลดแรงกระทำที่ปลายแขนและสามารถควบคุมแรงตามแรงอ้างอิงได้ แต่ในขณะแรกชนนั้นยังมีค่าพุงเกินของแรงกระทำอยู่ที่ 68.4 % รูปที่ 4.19 (ข) กรณีที่ 2 นั้นเมื่อให้แรงอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถลดค่าพุงเกินช่วงแรกชนลงได้ รูปที่ 4.20 แสดงค่าตำแหน่งปลายแขนกลที่เคลื่อนที่ในทิศทางแกน x ของการควบคุมแรงกรณีที่ 2 (รูปที่ 4.19 (ข)) จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก $k_{spring} = 500$ นิวตัน/เมตร เป็น 1000 นิวตัน/เมตร ที่เวลา 9 วินาที จะได้ผลการตอบสนองการควบคุมแรงตามรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแรงเมื่อมีการเปลี่ยนค่า k_{spring} จาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 1000 นิวตัน/เมตร

จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงของแบบจำลองกำแพงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 1000 นิวตัน/เมตร ตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ไม่สามารถควบคุมแรงตามอ้างอิงได้โดยมีแรงพุ่งเกินอยู่ที่ 116.6 %

4.4 ผลการเปรียบเทียบการหาค่าตอบของสมการระหว่างพาทิคอลสวอม และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ในการเปรียบเทียบระหว่างพาทิคอลสวอม กับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม จะใช้ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่รู้ค่าต่ำสุดอยู่แล้ว จะทดสอบเพื่อหาความเร็วและความแม่นยำในการคำนวณของกรคำนวณ

ฟังก์ชันที่ใช้คือ Sphere function The eggcrate function และ Peak function ซึ่งแต่ละฟังก์ชันจะมีความซับซ้อนต่างกัน Sphere function นั้นจะมีจุดต่ำสุดอยู่ที่ $x = 0$ และ $y = 0$ จะได้ $z=0$ โดยจะมีฟังก์ชันดังสมการ (4.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $z = x^2 + y^2$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (4.2) ถ้า

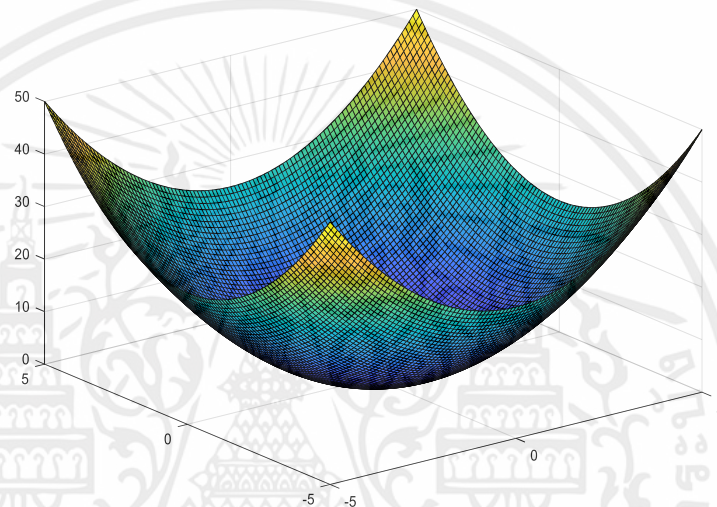
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The eggcrate function นั้นจะมีสมการที่ซับซ้อนขึ้นซึ่งค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนี้อยู่ที่ $x = 0$ และ $y = 0$ จะได้ z น้อยที่สุดประมาณ 0 ดังตามสมการ (4.3)

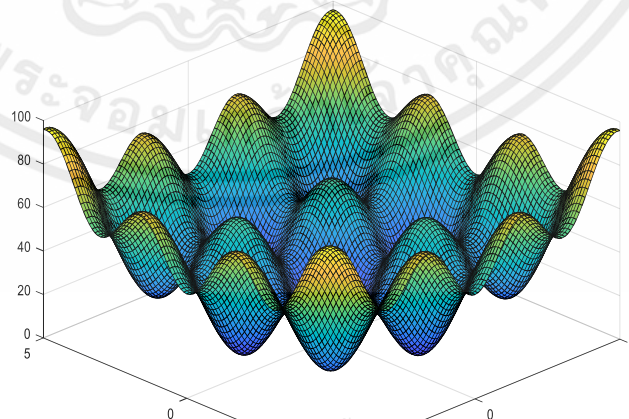
$$z = x^2 + y^2 + 25(\sin(x)^2 + \sin(y)^2) \quad (4.3)$$

Peak function มีลักษณะส่วนสูงต่ำสลับไปมาซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าสองฟังก์ชันแรก Peaks มีส่วนที่ต่ำสุดอยู่ในตำแหน่งที่ $x = 0.2283$ และ $y = -1.6255$ มีค่า z น้อยที่สุดที่ประมาณ -6.511 สมการของ Peak function แสดงดังสมการ (4.4)

$$z = 3 * (1 - x)^2 \exp(-x^2 - (y + 1)^2) - 10 * \left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5\right) \exp(-x^2 - y^2) - \frac{1}{3} \exp(-(x + 1)^2 - y^2) \quad (4.4)$$

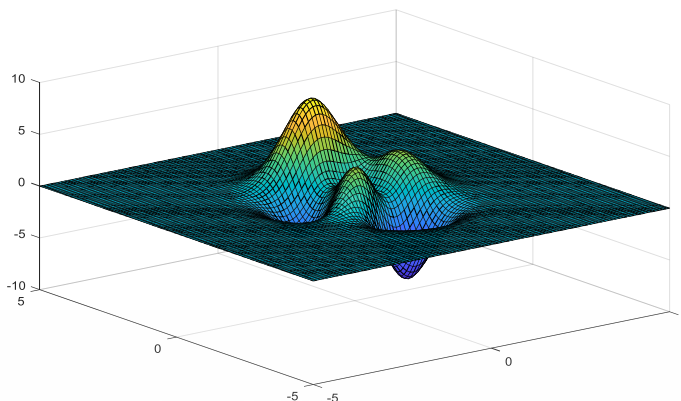


รูปที่ 4.22 ฟังก์ชัน Sphere



รูปที่ 4.23 ฟังก์ชัน The eggcrate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ฟังก์ชัน Peak

การทดสอบนั้นของ PSO และ GA มีการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมือนกันดังนี้ จำนวนประชากร = 50 จำนวนการทำซ้ำ = 30 มิติ = 2 Upper limit = 100 Lower limit = -100

ตัวแปรของ GA กำหนดดังนี้ ค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (mutation probability) = 0.05 ค่าความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนยีน (crossover probability) = 0.95

ตัวแปรของ PSO กำหนดดังนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อย $w_{max} = 1$, $w_{min} = 0.6$
ค่าคงที่ความเร่ง $c_1 = c_2 = 2.1$

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบระหว่าง PSO และ GA ด้วยฟังก์ชัน Sphere The eggcrate และ Peak

ฟังก์ชันคณิตศาสตร์	GA		PSO	
	ค่าความเหมาะสม	เวลา (วินาที)	ค่าความเหมาะสม	เวลา (วินาที)
Sphere	6.89E-06	1.5223	8.69E-15	0.10131
The eggcrate	0.0025	1.51758	4.38E-15	0.11166
Peak	-6.5511	1.5377	-3.0498	0.11924

จากผลในตารางที่ 4.2 จะได้ว่าฟังก์ชัน Sphere และ The eggcrate เวลาการคำนวณและค่าความเหมาะสมของ PSO จะดีกว่าของ GA แต่ในฟังก์ชัน Peak ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น GA สามารถลู่ออกค่าต่ำสุดได้ดีกว่า PSO

4.5 ผลการเปรียบเทียบการปรับปรุงค่าตัวแปรของตัวควบคุมแรงระหว่างพาดิคอล สวอม (PSO) และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

ผลการจำลองต่อไปนี้จะเป็นการจำลองของการหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์เพื่อที่จะนำมาใช้ในการควบคุมแรงกระทำระหว่างแขนกลกับแบบจำลองกำแพง เพื่อลดเวลา และดูความเร็วในการเข้าสู่ค่าที่ต้องการของพาดิคอลสวอม และเจเนติกอัลกอริทึม จึงลดจำนวนประชากร และจำนวนการทำซ้ำโดยจะมีการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆดังนี้

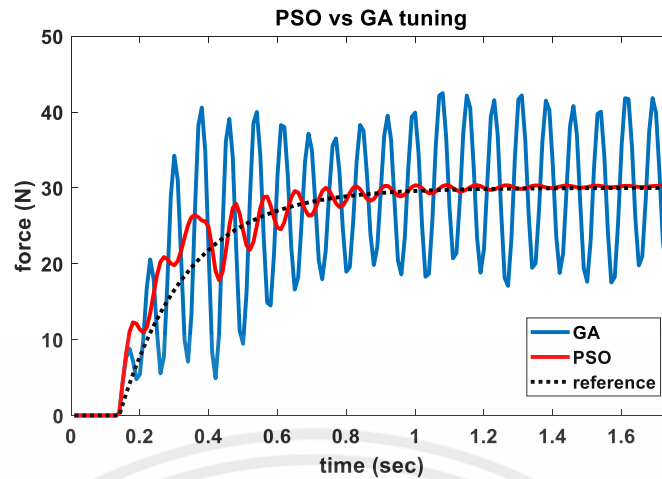
พาดิคอลสวอม และเจเนติกอัลกอริทึม มีการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมือนกันคือ จำนวนประชากร = 10 จำนวนการทำซ้ำ = 15 มิติ = 3 Upper limit = 1000 Lower limit = 0.1

ตัวแปรของเจเนติกอัลกอริทึมกำหนดดังนี้ ค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ = 0.05 ค่าความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนยีน = 0.95

ตัวแปรของพาดิคอลสวอมกำหนดดังนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อย $w_{max} = 3$, $w_{min} = 0.6$
ค่าคงที่ความเร่ง $c_1 = c_2 = 2.1$

เคลื่อนที่ของแขนกลไปทิศทางทางแกน x จะเคลื่อนที่จากค่า $x = 0.5$ เมตร แล้วเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันลาด มีความชันเท่ากับ 0.8 โดยมีการจำกัดค่าสูงสุดที่ 0.8 เมตร ส่วนการเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน y และ z จะคงค่าไว้เป็นค่าคงที่ $y = -0.1501$ เมตร และ $z = 0$ เมตร กำหนดตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงไว้ที่ตำแหน่ง $x = 0.6$ เมตร ค่านิจสปริงของแบบจำลองกำแพง $k_{spring} = 500$ นิวตัน/เมตร ใช้ sampling time = 0.01 วินาที

ผลจากการจำลองการคำนวณหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมระหว่างพาดิคอลสวอม และเจเนติกอัลกอริทึม มีผลดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แสดงค่าแรงกระทำระหว่างปลายแขนกลและแบบจำลองกำแพงที่ใช้การหาค่าความเหมาะสม 1) GA เจเนติกอัลกอริทึม 2) PSO พาทิคอลสวอม โดยมี reference เป็นแรงอ้างอิง

จากรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าในกรณีการหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมแรงที่ใช้ในแขนกลนี้ พาทิคอลสวอมสามารถหาความเหมาะสมได้ในจำนวนประชากรและการทำซ้ำที่เท่ากัน แต่เจเนติกอัลกอริทึมไม่สามารถทำได้ดีเท่าพาทิคอลสวอม โดยค่าของตัวแปรตัวควบคุมแรงที่พาทิคอลสวอมหาได้ คือ $m = 17.2680$ $b = 7.8152$ $k = 1.8496$ และค่าที่เจเนติกอัลกอริทึมหาได้ คือ $m = 61.0514$ $b = 4.6574$ $k = 1.4789$

4.6 ผลการจำลองตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอม สำหรับแขนกลเคลื่อนไหว 6 องศาอิสระ

ในการจำลองนี้จะจำลองในคอมพิวเตอร์ที่มีตัวประมวลผล core i5 2.4GHz ใช้ sampling time = 0.0001 วินาที แขนกลที่ใช้ในที่นี้คือ PUMA560 [8] เริ่มให้หุ่นเคลื่อนปลายแขนกล จาก x ซึ่งเป็นสัญญาณลาด เริ่มที่ $x = 0.5$ เมตร มี ค่าความชัน = 0.8 จำกัดตำแหน่งสูงสุดที่ 0.8 เมตร, $y = -0.1501$ เมตร คงที่, $z = 0$ เมตร คงที่ โดยจะใส่แรงกระทำภายนอกที่มี $k_{spring} = 500$ นิวตัน/เมตร ไว้ที่จุด $x = 0.6$ เมตร และมีแรงกระทำอ้างอิง = 30 นิวตัน ค่าของตัวควบคุม bang-bang กำหนด upper limit = 2 นิวตัน lower limit = -2 นิวตัน

พารามิเตอร์ในพาทิคอลสวอร์ม (PSO) กำหนดดังนี้ จำนวนการทำซ้ำสูงสุด = 15, จำนวนประชากร = 10, มิติ = 3, $c_1 = c_2 = 2.1$, $w_{max} = 1$, $w_{min} = 0.6$, ค่าสูงสุดของ m , b , $k = 1000$, ค่าต่ำสุดของ m , b , $k = 0.1$ ใดเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 การจำลองการควบคุมแรงเมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงของแบบจำลองกำแพง

การจำลองการเปลี่ยนค่านิจสปริงของแบบจำลองกำแพงนี้จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อสภาพของวัตถุภายนอกมีการเปลี่ยนไป วิธีการที่นำเสนอนี้ยังสามารถควบคุมแรงไม่ให้เกิดแรงพุ่งเกินมาก เหมือนกับรูปที่ 4.21 และยังสามารถปรับตัวให้ตัวควบคุมให้ควบคุมแรงได้ดีกว่าตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ธรรมดา การทดสอบจะทดสอบ 3 กรณี คือ

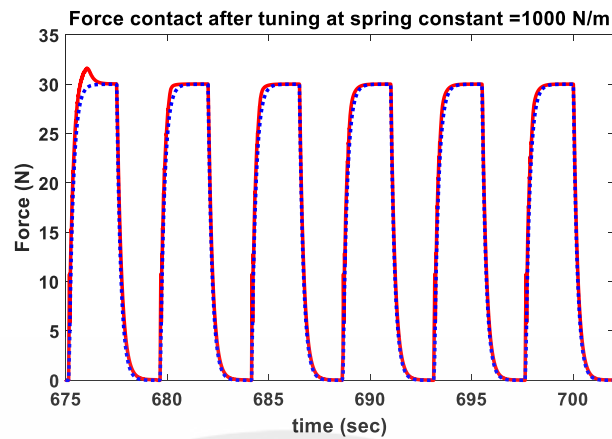
1. เปลี่ยนค่านิจสปริงของแบบจำลองกำแพงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 1000 นิวตัน/เมตร
2. เปลี่ยนค่านิจสปริงของแบบจำลองกำแพงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 2000 นิวตัน/เมตร
3. เปลี่ยนค่านิจสปริงของแบบจำลองกำแพงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 3000 นิวตัน/เมตร

กรณีที่ 1 นั้นจะเริ่มจากค่าทำการเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 1000 นิวตัน/เมตร ที่เวลา 9 วินาที



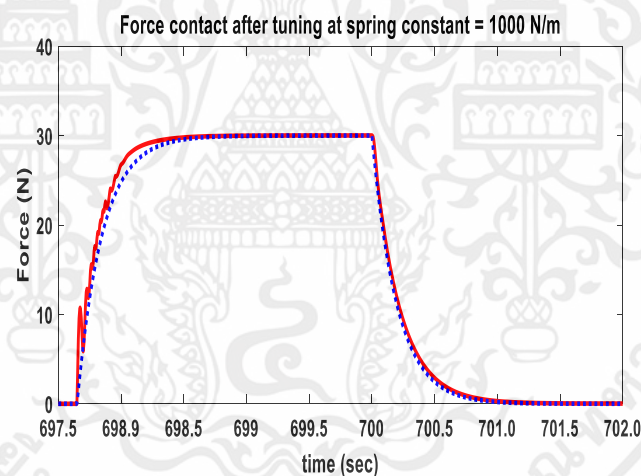
รูปที่ 4.26 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 1000 นิวตัน/เมตร ที่เวลา 9 วินาที

จากรูปที่ 4.26 มีการเปลี่ยนค่านิจสปริงในวินาทีที่ 9 จากผลการจำลองจะเห็นว่าตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้นี้สามารถควบคุมแรงพุ่งเกินได้ไม่เหมือนกับตัวควบคุมแรงแบบธรรมดา (ผลจากรูปที่ 4.21)



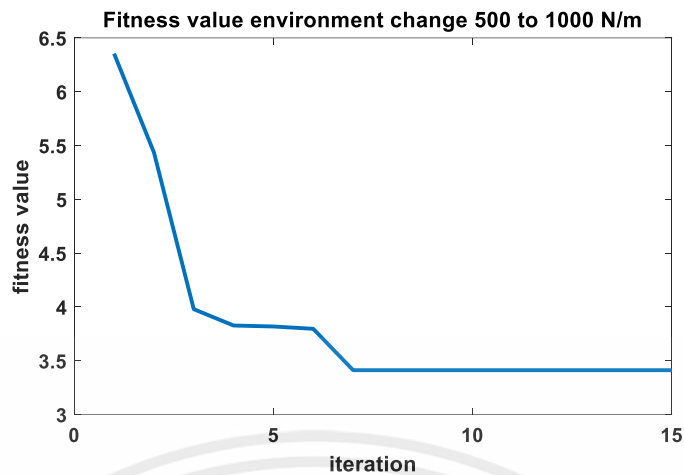
รูปที่ 4.27 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 1000 นิวตัน/เมตร เมื่อปรับปรุ่ค่าตัวแปรแล้ว

จากรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่าหลังจากการปรับตัวแล้วในสามลูกคลื่นสุดท้าย แรงพุ่งเกินในช่วงแรกจะลดลงน้อยกว่าช่วงแรกที่เปลี่ยนค่านิจสปริงในวินาทีที่ 9 ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์คือ $m = 0.1100$, $b = 4.9452$ และ $k = 0.1100$



รูปที่ 4.28 รูปขยายของแรงกระทำเมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 1000 นิวตัน/เมตร

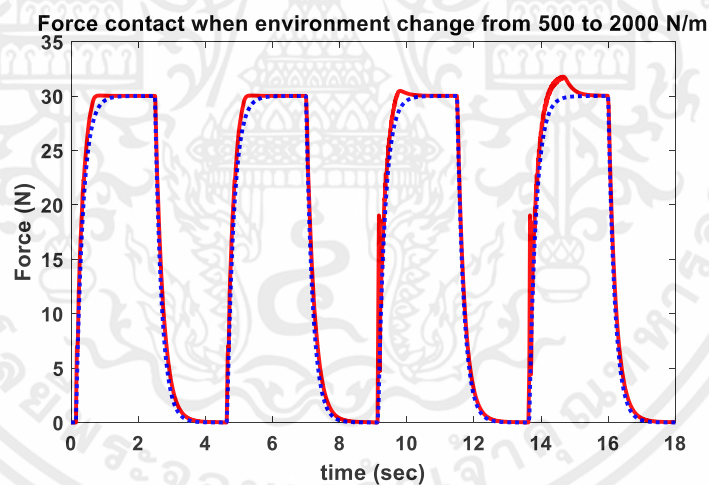
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงค่า fitness ของกรณีที่ 1

รูปที่ 4.29 แสดงค่า fitness value ของกรณีที่ 1 ซึ่งค่าได้ลู่ต่ำลงแล้วคงที่ในจำนวนการทำซ้ำรอบที่ 7 แสดงว่าหาค่าเหมาะสมได้ในจำนวนการทำซ้ำรอบที่ 7

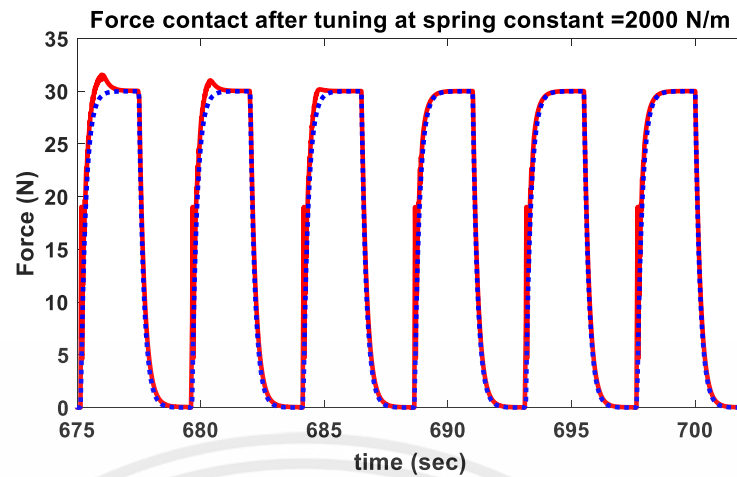
กรณีที่ 2 นั้นจะเริ่มจากค่าทำการเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 2000 นิวตัน/เมตร ที่เวลา 9 วินาที



รูปที่ 4.30 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 2000 นิวตัน/เมตร ที่เวลา 9 วินาที

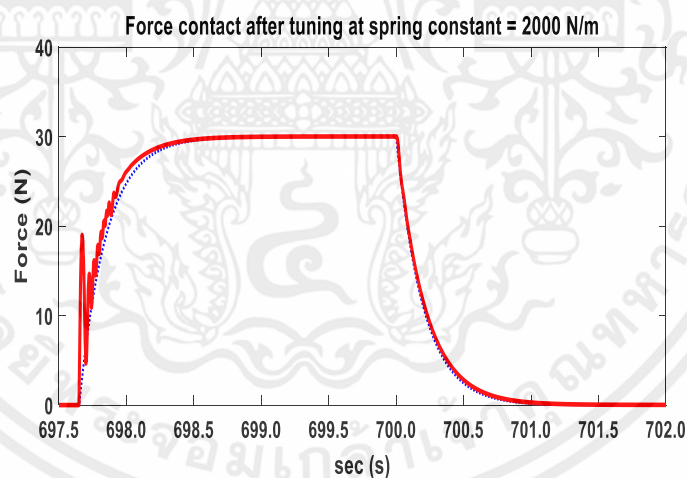
จากรูปที่ 4.30 หลังจากเปลี่ยนค่านิจสปริงเป็น 2000 นิวตัน/เมตร แล้วตัวควบคุมนี้ยังสามารถควบคุมแรงไม่ให้พุ่งเกินเหมือนตัวควบคุมแรงธรรมดาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 2000 นิวตัน/เมตร เมื่อปรับปรุ่งค่าตัวแปรแล้ว

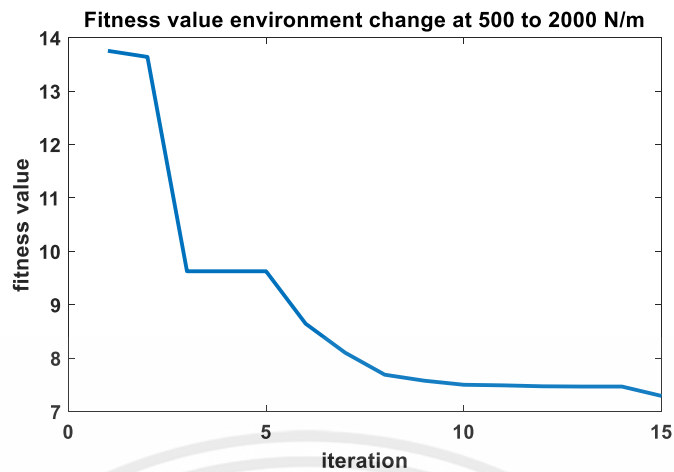
จากรูปที่ 4.31 แสดงผลหลังจากปรับตัวควบคุมเรียบร้อยแล้วในสามลูกคลื่นสุดท้าย จะเห็นว่าสามารถปรับตัวให้ควบคุมแรงได้ดีขึ้น ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์คือ $m = 0.1100$, $b = 4.8491$ และ $k = 0.1259$ และมีภาพขยายของแรงหลังปรับตัวควบคุมแล้วในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 รูปขยายของแรงกระทำเมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 2000 นิวตัน/เมตร

จากรูปที่ 4.32 ที่เวลาประมาณ 697.7 วินาที ในขณะแรกชนจะมีแรงพุ่งขึ้นเป็นรูปหนาม

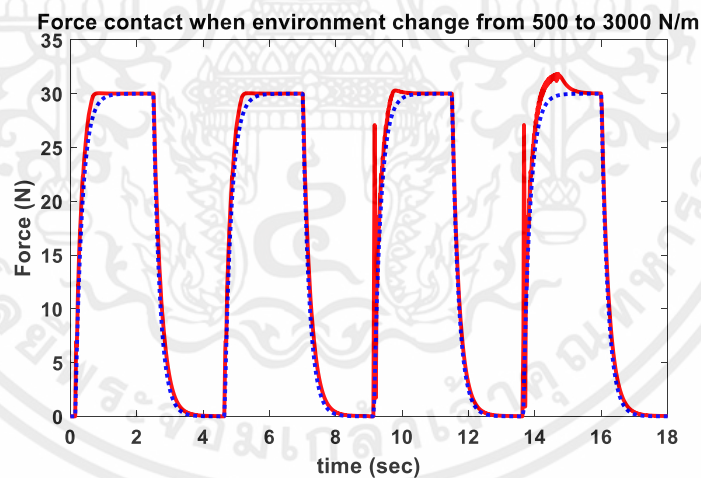
ซึ่งช่วงเวลานี้ตัวควบคุมแรงแบบผสมผสานจะใช้ตัวควบคุม bang-bang เพื่อลดแรงที่เกินขอบเขตที่ตั้งไว้คือ 2 และ -2 นิวตัน แล้วจึงเปลี่ยนมาใช้ตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ในช่วงเวลาประมาณ 698 วินาที



รูปที่ 4.33 แสดงค่า fitness ของกรณีที่ 2

รูปที่ 4.33 แสดงค่า fitness value ของกรณีที่ 2 ซึ่งค่าได้ลู่ต่ำลงแล้วคงที่ในจำนวนการทำซ้ำรอบที่ 10 และต่ำกว่าเดิมในรอบที่ 15 แสดงว่าหาค่าเหมาะสมได้ในจำนวนการทำซ้ำรอบที่ 10 และค่าที่ดีขึ้นในรอบที่ 15

กรณีที่ 3 นั้นจะเริ่มจากค่าทำการเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น 3000 นิวตัน/เมตร ที่เวลา 9 วินาที

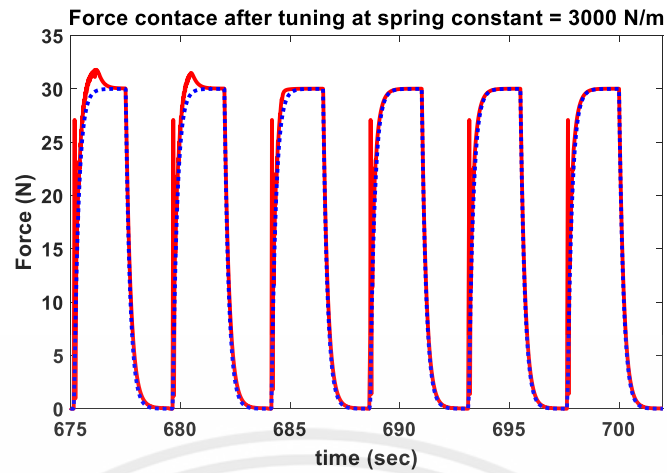


รูปที่ 4.34 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก

500 นิวตัน/เมตร เป็น 3000 นิวตัน/เมตร ที่เวลา 9 วินาที

รูปที่ 4.34 แสดงผลของแรงกระทำเมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงเป็น 3000 นิวตัน/เมตร จะเห็นได้

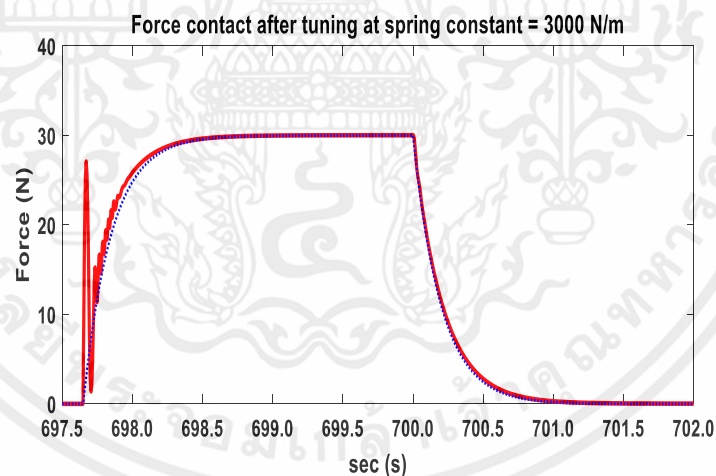
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย



รูปที่ 4.35 ผลของแรงกระทำของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้เมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก

500 นิวตัน/เมตร เป็น 3000 นิวตัน/เมตร เมื่อปรับปรุงค่าตัวแปรแล้ว

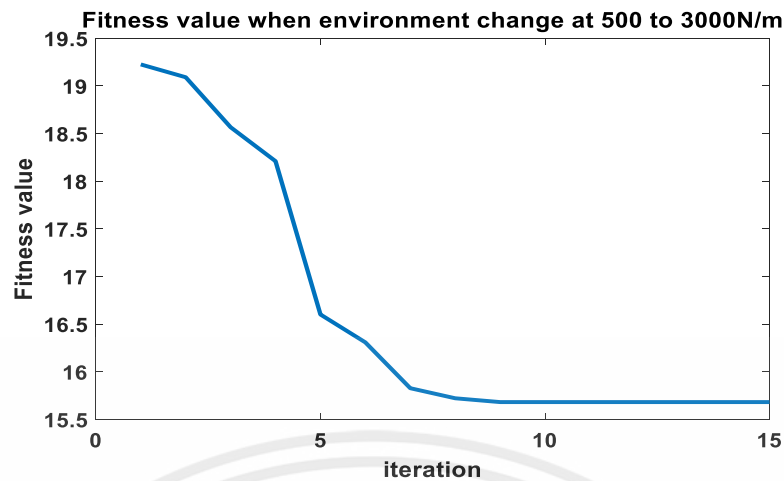
จากรูปที่ 4.35 แสดงค่าแรงกระทำหลังจากทำการปรับตัวแล้วในสามลูกคลื่นสุดท้ายได้ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์คือ $m = 0.1100$, $b = 4.7801$, $k = 0.1100$ และ ภาพภายในรูปที่ 4.36 นั้นแสดงให้เห็นว่าช่วงแรกชนที่เวลาประมาณ 697.7 วินาที นั้นตัวควบคุม Bang-Bang นั้นสามารถช่วยควบคุมแรงไม่ให้พุ่งเกินเช่นเดียวกับกรณีที่ 2



รูปที่ 4.36 รูปขยายของแรงกระทำเมื่อเปลี่ยนค่านิจสปริงจาก 500 นิวตัน/เมตร เป็น

3000 นิวตัน/เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 แสดงค่า fitness ของกรณีที่ 3

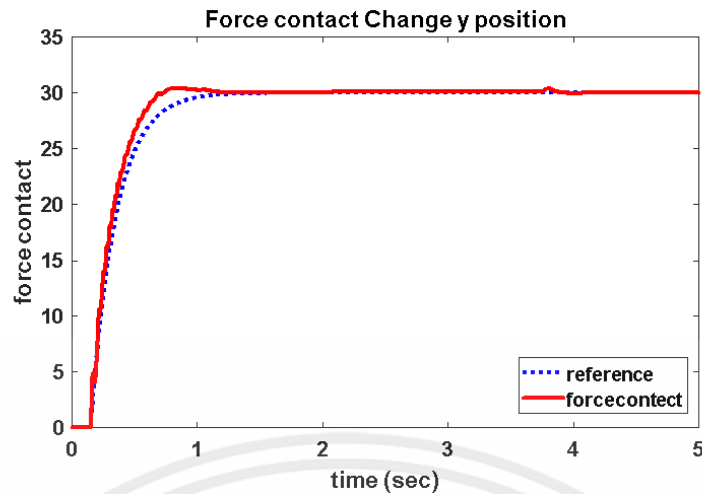
จากรูปที่ 4.37 นั้นแสดง fitness value ของกรณีที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถหาค่าที่เหมาะสมได้ในรอบที่ 9

การจำลองเพื่อทดสอบทั้ง 3 กรณี คือ เปลี่ยนค่านิจสปริงของแบบจำลองกำแพงจาก 500 N/m เป็น 1000 N/m, 2000 N/m, และ 3000 N/m ตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาดิคอลสวอมสามารถควบคุมแรงตามแรงอ้างอิง และสามารถปรับตัวตามเมื่อค่านิจสปริงของแบบจำลองกำแพงเปลี่ยนไปได้

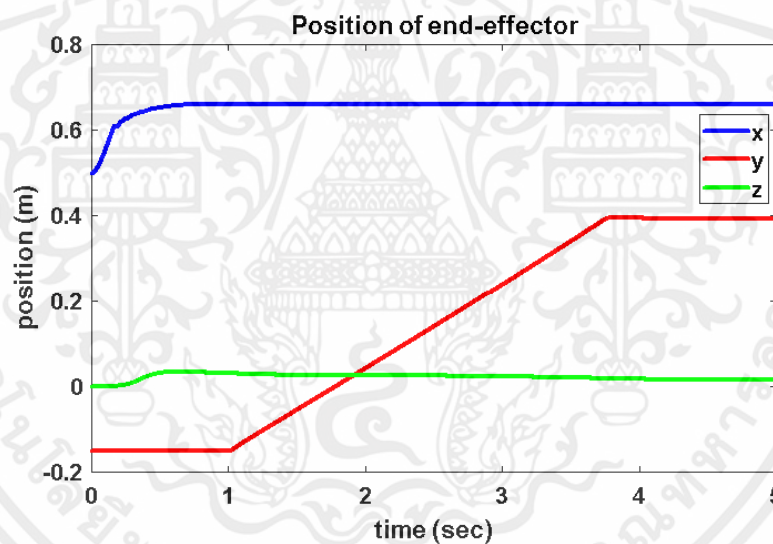
4.6.2 การจำลองการควบคุมแรงเมื่อเปลี่ยนทิศทางของปลายแขนกลในขณะสัมผัสกับแบบจำลองกำแพง

การจำลองนี้เป็นการทดสอบการควบคุมแรงขณะที่แขนกลเคลื่อนที่เมื่อสัมผัสกับวัตถุแล้ว การทดสอบตัวควบคุมแรงเมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งของปลายแขนกลในทิศทางตามแกน y โดยตำแหน่ง x เป็น สัญญาณลาดเริ่มที่ $x = 0.5$ เมตร มี ค่าความชัน = 0.8 จำกัดตำแหน่งสูงสุดที่ 0.8 เมตร, y เริ่มต้นที่ $y = -0.1501$ เมตร แล้วเริ่มเคลื่อนที่เป็นฟังก์ชันลาดเอียงที่เวลา 1 วินาที มีความชัน = 0.3 ตำแหน่งสูงสุดที่ $y = 0.4$ เมตร, $z = 0$ เมตรคงที่ ใช้ $k_{spring} = 500$ นิวตัน/เมตร จะได้ผลแรงกระทำระหว่างปลายแขนกลกับแบบจำลองกำแพงตามรูปที่ 4.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 ผลของแรงกระทำระหว่างปลายแขนกลกับแบบจำลองกำแพง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งปลายแขนกลในทิศทางตามแกน y



รูปที่ 4.39 ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อเปลี่ยนทิศทางตามแนวแกน y

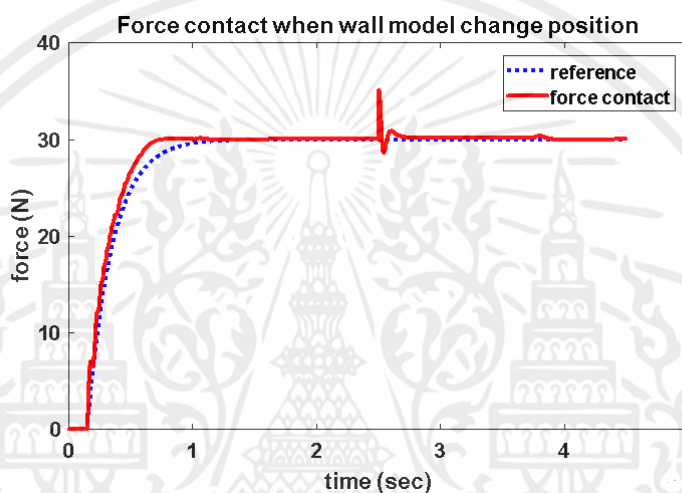
จากรูปที่ 4.39 คือตำแหน่งของปลายแขนกลที่ชนเข้ากับวัตถุภายนอกและเคลื่อนที่ไปในทิศทางแกน y จากการจำลองนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อแขนกลชนเข้ากับกำแพงแล้วทำการเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่ของปลายแขนกลไปตามแนวแกน y ตัวควบคุมนี้สามารถควบคุมแรงตามแรงอ้างอิงได้ จะมีแรงกระเพื่อมเล็กน้อยเมื่อหยุดการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 การจำลองการควบคุมแรงเมื่อเปลี่ยนทิศทางของปลายแขนกล และเปลี่ยนตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงในขณะสัมผัสกับแบบจำลองกำแพง

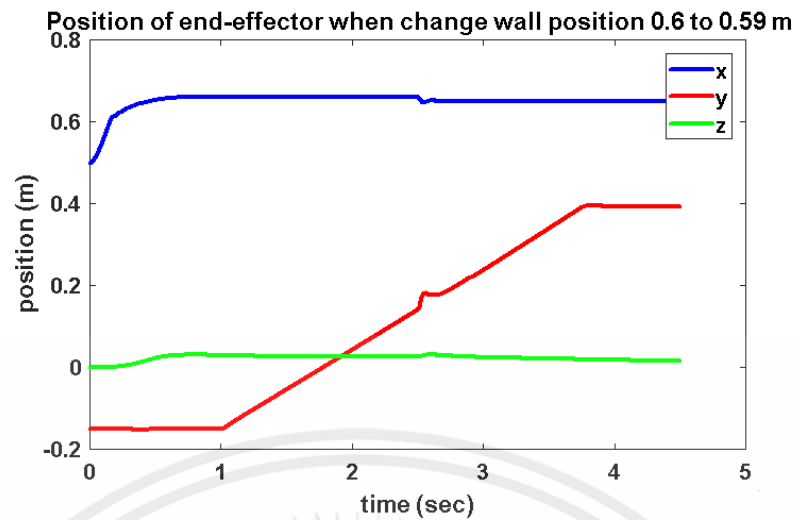
การทดสอบต่อมาคือการเคลื่อนที่ตามแกน y ไปแล้วหยุด ในการจำลองการหยุดนั้น จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงให้ใกล้เข้ามา โดยปกติจะตั้งตำแหน่งแบบจำลองไว้ที่ 0.6 เมตร จะทำการลดตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงแบบทันทีทันใด โดยจะทดสอบ 2 กรณี คือ 0.59 เมตร และ 0.55 เมตร ใช้ $k_{spring} = 500$ นิวตัน/เมตร

กรณีที่ 1 เปลี่ยนตำแหน่งแบบจำลองกำแพงจาก 0.6 เมตร เป็น 0.59 ที่เวลา 2.5 วินาที



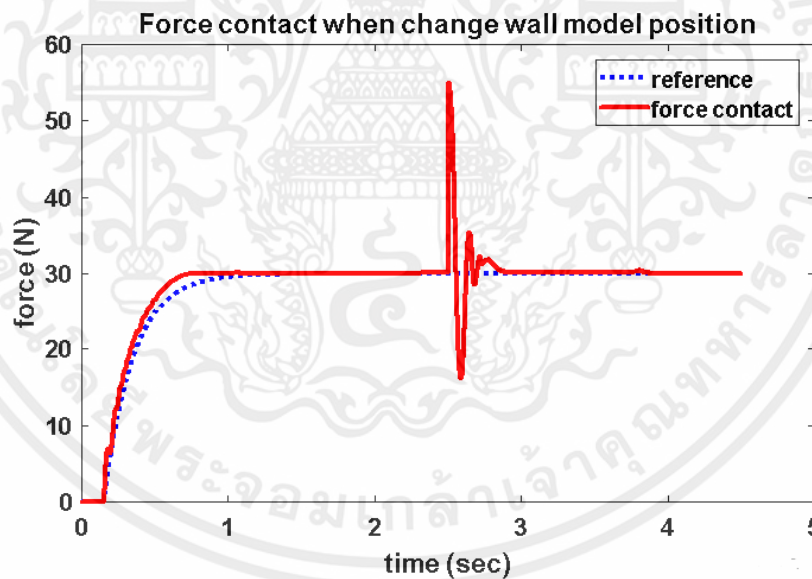
รูปที่ 4.40 กรณีที่ 1 แรงกระทำระหว่างปลายแขนกล กับแบบจำลองกำแพง เมื่อมีการลดตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงจาก 0.6 เมตร เป็น 0.59 เมตร

จากรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าที่วินาทีที่ 2.5 ได้มีการเปลี่ยนระยะแบบจำลองกำแพงให้ใกล้เข้ามา เมื่อเริ่มเปลี่ยนระยะ ค่าของแรงกระทำจะเปลี่ยนสูงขึ้นชั่วขณะโดยมีแรงพุ่งเกินอยู่ที่ 17 % แต่ก็สามารถควบคุมแรงได้ในเวลาต่อมา ซึ่งค่าของตำแหน่งปลายแขนกลในกรณีนี้แสดงในรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 กรณีที่ 1 ตำแหน่งของปลายแขนกล เมื่อมีการลดตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงจาก 0.6 เมตร เป็น 0.59 เมตร

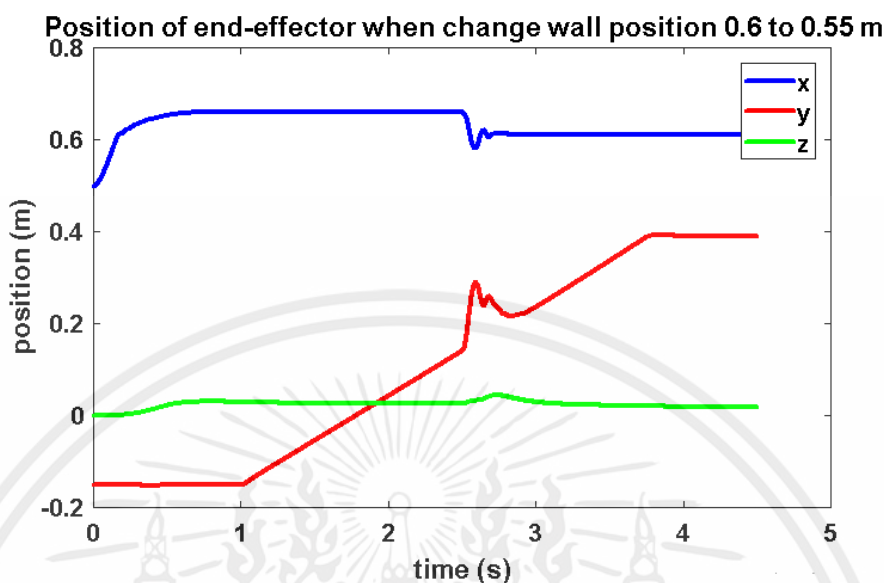
กรณีที่ 2 เปลี่ยนตำแหน่งแบบจำลองกำแพงจาก 0.6 เมตร เป็น 0.55 ที่เวลา 2.5 วินาที



รูปที่ 4.42 กรณีที่ 2 แรงกระทำระหว่างปลายแขนกล กับแบบจำลองกำแพง เมื่อมีการลดตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงจาก 0.6 เมตร เป็น 0.55 เมตร

จากรูปที่ 4.42 เปลี่ยนระยะของแบบจำลองกำแพงให้ใกล้ปลายแขนมากยิ่งขึ้น จากกรณีแรกจาก 0.6 เมตร เป็น 0.59 เมตร เป็น 0.6 เมตร เป็น 0.55 เมตร จะเห็นว่าขณะเปลี่ยนแรงกระทำของกรณีที่ 2 นั้นมากกว่าโดยมีแรงพุ่งเกินอยู่ที่ 83.6 % แต่ตัวควบคุมนี้สามารถควบคุมแรงได้

ในเวลาต่อมา ผลของการควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลสามารถดูได้จาก 4.43 จะเห็นว่ามีการลดระยะในทิศทางแกน x เพื่อควบคุมแรงให้เท่าแรงอ้างอิง



รูปที่ 4.43 กรณีที่ 2 ตำแหน่งของปลายแขนกล เมื่อมีการลดตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงจาก 0.6 เมตร เป็น 0.55 เมตร

จากผลการจำลองจะเห็นว่า ในกรณีที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงให้ใกล้เข้ามาเพื่อเปรียบเหมือนการสะดุด ตัวควบคุมแรงนี้สามารถปรับตำแหน่งของปลายแขนกลตามแนวแกน x เพื่อจะลดแรงกระทำระหว่างปลายแขนกลกับแบบจำลองกำแพงตามแรงอ้างอิงได้

4.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการจำลองของ การควบคุมตำแหน่ง การควบคุมแรง การเปรียบเทียบการหาค่าความเหมาะสมสูงสุดระหว่างเจเนติกอัลกอริทึม และพาดิคอลสวอม การควบคุมแรงแบบปรับตัวได้ในแขนกล 6 องศาอิสระ ใน 3 กรณีหลัก คือ เปลี่ยนค่าความแข็งของแบบจำลองกำแพง เปลี่ยนตำแหน่งของปลายแขนกลขณะสัมผัสกับกำแพง และเปลี่ยนตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงเพื่อจำลองการสะดุด จากผลการจำลองจะเห็นว่า ตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาดิคอลสวอมสามารถควบคุมแรงตามแรงอ้างอิงได้ทั้ง 3 กรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอมในแกนกล 6 องศาอิสระ ซึ่งจะจำลองจะเริ่มจากการเปรียบเทียบระหว่างการใช้แรงอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนและไม่มีฟังก์ชันถ่ายโอน ผลคือเมื่อนำแรงอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนนั้นสามารถช่วยลดแรงที่ปลายแขนกลในขณะที่เริ่มปะทะเข้ากับแบบจำลองกำแพง การเปรียบเทียบการนำการคำนวณเชิงวิวัฒนาการมาใช้ในการคำนวณค่าความเหมาะสมของตัวควบคุมแรง ในการจำกัดจำนวนประชากรและจำนวนครั้งที่มีจำนวนน้อยและเท่ากัน พาทิคอลสวอมนั้นสามารถหาค่าความเหมาะสมในการควบคุมแรงได้ แต่เจเนติกอัลกอริทึมนั้นไม่สามารถทำได้ การจำลองการควบคุมแรงจะแบ่งเป็น 3 กรณี คือ เมื่อเปลี่ยนความแข็งของแบบจำลองกำแพง เคลื่อนที่ปลายแขนกลขณะสัมผัสกับแบบจำลองกำแพงและเปลี่ยนตำแหน่งแบบจำลองกำแพง กรณีเปลี่ยนความแข็งของแบบจำลองกำแพงจากการจำลองพบว่าสามารถปรับตัวให้ควบคุมแรงตามแรงอ้างอิงได้ กรณีที่เปลี่ยนตำแหน่งของปลายแขนกลขณะสัมผัสกับแบบจำลองกำแพงนั้นการควบคุมแรงก็ยังควบคุมแรงตามแรงอ้างอิงได้ ส่วนในกรณีสุดท้ายคือเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแบบจำลองกำแพงแบบทันทีทันใดพบว่าระยะการเปลี่ยนมีผลต่อแรง ระยะแบบจำลองกำแพงที่ขยับเข้ามาใกล้มากกว่าแรงก็จะมากกว่าในช่วงแรกตามระยะ และตัวควบคุมนี้สามารถควบคุมแรงได้ตามแรงอ้างอิงได้หลังจากนั้นเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการต่อยอดงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมแรงในแกนกล 6 องศาอิสระ มีแนวทางในการทำวิจัยต่อได้ดังนี้

1. ในการควบคุมแรงแบบปรับตัวได้นี้สามารถนำการคำนวณหาค่าความเหมาะสมสูงสุดวิธีอื่นมาใช้ควบคุมแทนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2. เมื่อมีแรงบิดของข้อต่อก็สามารถหาค่าพลังงานที่ใช้ไปได้ โดยแนวทางคือ หากการเคลื่อนที่ค่าไม่ว่ากรณีใดของปลายแขนกลจากจุด a ถึง b เคลื่อนที่อย่างไรใช้ค่าพลังงานให้น้อยที่สุด ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gea, J., and Kirchner, F. “Modelling and Simulation of Robot Arm Interaction Forces Using Impedance control.” **International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea.,** July 2008. pp. 15589- 15594.
- [2] Pallegedara, A., Matsuda, Y., Egashira, N., Sugi, T. and Goto, S. “Comparison of Interaction Forces of Robot Arm on Force-free Control and Impedance Control by Model Based Simulations.” **SICE Annual Conference, Akita University, Akita, Japan.,** August 2012. pp. 1695-1700.
- [3] Wang, X. and Gao, J. “Application of Particle Swarm Optimization for Tuning the SVR Parameters.” **IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Busan, Korea.,** July 2015. pp. 1173-1177.
- [4] Djaneye-Boundjou, O., Xu, X. and Ordóñez, R. “Automated Particle Swarm Optimization Based PID Tuning for Control of Robotic Arm.” **IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON) and Ohio Innovation Summit (OIS), Dayton, Ohio, USA.,** July 2016. pp. 164-169.
- [5] Kaitwanidvilai, S., Yanyong, S. and Saenthon A. “PSO based Adaptive Force Controller.” **International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong.,** vol.2, March 2013.
- [6] Kaitwanidvilai, S. and Parnichkun M. “Force control in a pneumatic system using hybrid adaptive Neuro-fuzzy model reference control.” **Mechatronics.,** vol.15, February 200. pp. 23–41.
- [7] Chiou, J., Tsai, S. and Liu, M. “A PSO-based adaptive fuzzy PID-controllers.” **Simulation Modelling Practice and Theory.,** vol.26, May 2012. pp. 49–59.

เอกสารนี้เป็น [8] Corke, P. I. “Robotic Toolbox for Matlab release 9.” [Online]. Available : <http://petercorke.com/wordpress/toolboxes/robotics-toolbox>. 2014. นำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] Spong, M. W., Hutchinson, S. and Vidyasagar M. “Robot Dynamics and Control Second Edition.” [Online]. Available : <http://home.deib.polimi.it/gini/robot/docs/spong.pdf>. 2004.
- [10] Corke, P. I. “Denavit-Hartenberg notation for common robots.” [Online]. Available : <http://petercorke.com/wordpress/denavit-hartenberg-notation-for-common-robots>. 2014
- [11] Piltan, F., Emamzadeh, S., Hivand, Z., Shahriyari, F. และ Mirzaei, Mi. “PUMA-560 Robot Manipulator Position Sliding Mode Control Methods Using MATLAB/SIMULINK and Their Integration into Graduate/Undergraduate Nonlinear Control, Robotics and MATLAB Courses.” **International Journal of Robotic and Automation.**, vol.6, July 2012. pp. 106-150.
- [12] สุกกิจ นุตยະสกุล. “การคำนวณเชิงวิวัฒนาการระหว่าง เจเนติกอัลกอริทึม กับ พาทิคอลสวอมม ออปติมิซเซชัน.” **JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY.**, ปีที่ 2, ฉบับที่ 2, กรกฎาคม 2011. หน้า 13-22.
- [13] Yang, X. “A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm.” **Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization, Studies in Computational Intelligence, Springer Berlin.**, April 2010. pp. 65-74.
- [14] Li, Y. and Ge, S. S. “Impedance Learning for Robots Interacting With Unknown Environments.” **IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY.**, vol.22, July 2014. pp. 1422-1432.
- [15] Armstrong, B., Khatib, O. and Burdick, J. “The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm.” **IEEE.**, 1986. pp. 510-518.
- [16] RP Automation Inc. “PUMA 560.” [Online]. Available : <http://rpautomation.com/robot-parts/puma-560/>. 2011.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [17] Wikimedia Commons. “Position vector.” [Online]. Available : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Position_vector.JPGt. 2012.
- [18] Hoifodt, H. “Dynamic Modeling and Simulation of Robot Manipulators: The NewtonEuler-Formulation.” Master of Science in Engineering Cybernetics of Norwegian University of Science and Technology Department of Engineering Cybernetics. 2011.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

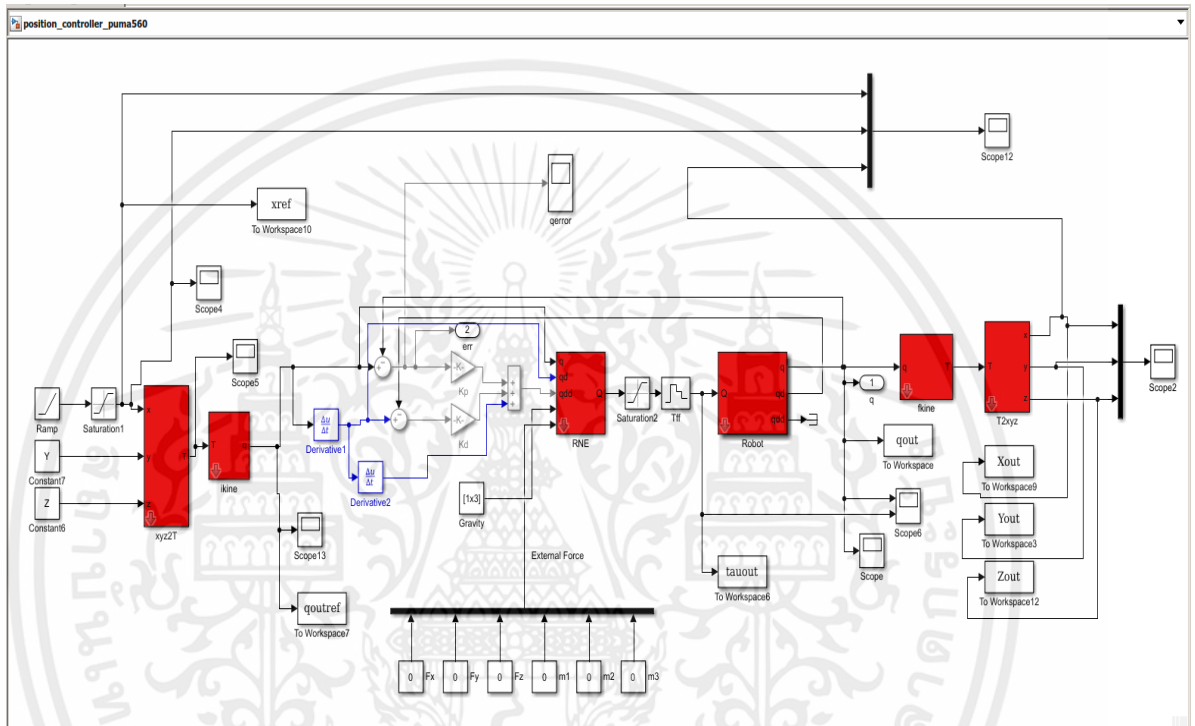


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการจำลอง

การจำลองนี้จำลองในโปรแกรม matlab r2017a toolbox ที่ใช้คือ robotic toolbox release 9.9 ของ Peter Corke โดยเริ่มจากการควบคุมตำแหน่ง ควบคุมแรง ควบคุมแรงแบบปรับตัวได้

ตัวควบคุมตำแหน่งมีฟังก์ชันการควบคุมดังนี้



รูปที่ ก-1 การจำลองการควบคุมตำแหน่งของแขนกล

เมื่อ Ramp เป็นฟังก์ชันลาดเพื่อใช้เป็นค่า x ของปลายแขนกล Y (Constant7) และ Z (Constant6) ใช้กำหนดค่า y และ z ตามลำดับ

xyz2T คือ บล็อกที่ใช้ในการเปลี่ยนพิกัด xyz ของปลายแขนกลเป็นเมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์ เพื่อที่จะทำจลศาสตร์ผกผัน เมื่อได้ q แล้วก็จะเข้าตัวควบคุมตำแหน่ง

ikine คือ จลศาสตร์ผกผัน

RNE คือบล็อกของพลศาสตร์แขนกลเพื่อที่จะใช้ควบคุมตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสาร Robot คือ แขนกล การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหามาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

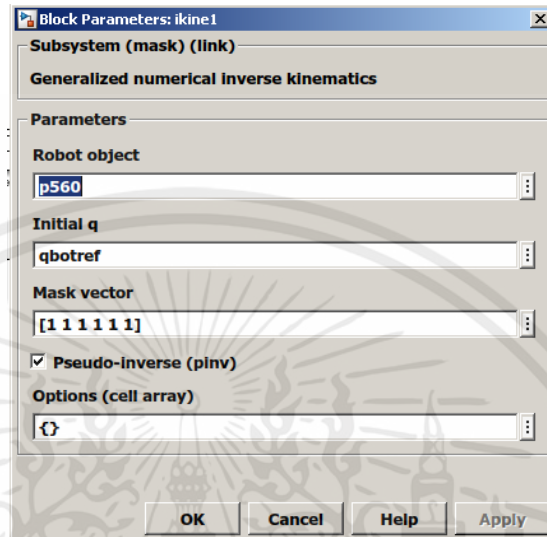
fkine คือ จลศาสตร์ทางตรง โดยในการจำลองการควบคุมตำแหน่งจะใช้จลศาสตร์ทางตรง

เพื่อการเปรียบเทียบเท่านั้นไม่ได้ใช้ในกระบวนการควบคุม

T2xyz คือ เปลี่ยนเมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์เป็นค่า xyz

ในบล็อกการทำงานตั้งค่าดังนี้

บล็อกของจลศาสตร์ผกผัน (ikine)



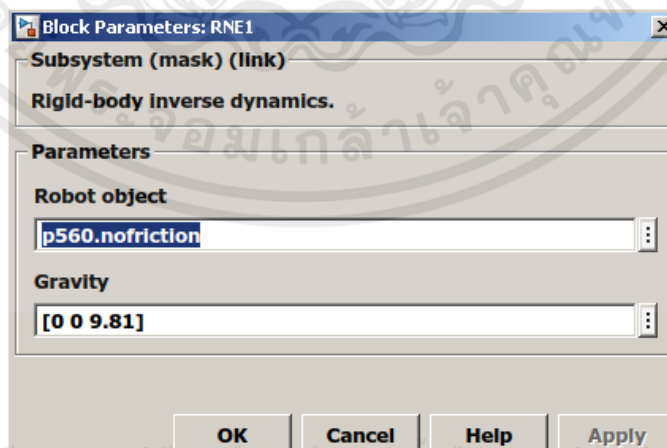
รูปที่ ก-2 การกำหนดค่าของบล็อกจลศาสตร์ผกผัน

เมื่อ Robot object คือ แขนกลที่ใช้ ให้ใส่ p560

Initial q คือ q เริ่มต้นของแขนกลเป็นเมตริกซ์ $[1 \times 6]$ qbotref คือ q ที่กำหนดขึ้น

Mask vector กำหนดเป็น $[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$

บล็อก RNE

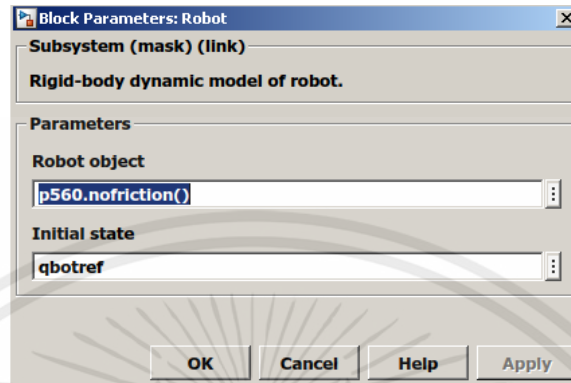


รูปที่ ก-3 การกำหนดค่าของบล็อก RNE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิได้อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Robot object ใช้ p560.nofriction เพื่อตัดแรงเสียดทานออกเพราะจะทำให้การจำลองใช้เวลาน้อยลง

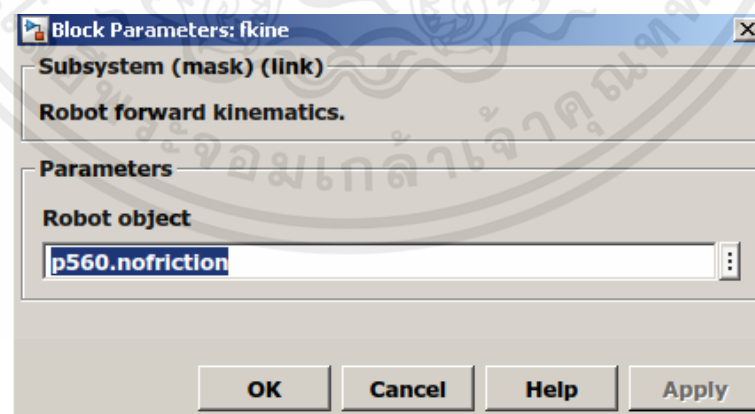
บล็อกของ Robot กำหนดค่าดังนี้



รูปที่ ก-4 การกำหนดค่าของบล็อก Robot

เมื่อ Robot object ใช้ p560.nofriction
Initial state ใช้ qbotref ที่กำหนดขึ้น

บล็อกของจลศาสตร์ทางตรง (fkine) กำหนดค่าดังนี้

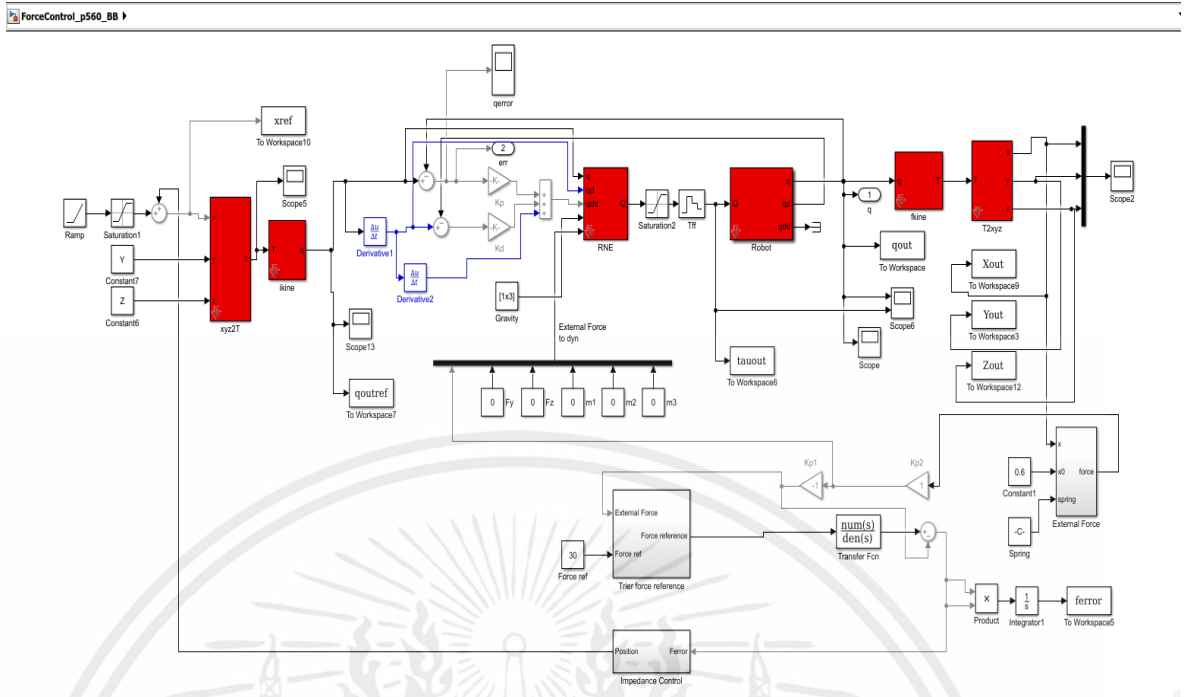


รูปที่ ก-5 การกำหนดค่าในบล็อกจลศาสตร์ทางตรง (fkine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้สำหรับงานวิจัยหรือการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานที่ไม่ถูกต้อง (สามารถตัด .nofriction ออกได้ในจลศาสตร์ทางตรง)

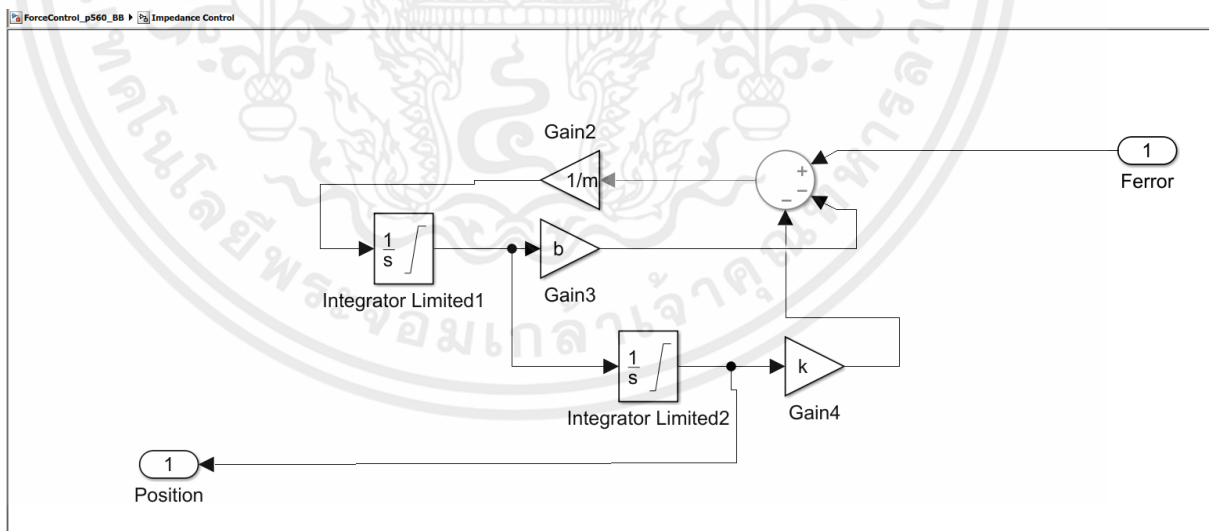
ตัวควบคุมแรงมีฟังก์ชันนี้



รูปที่ ก-6 ผังการทำงานของตัวควบคุมแรง

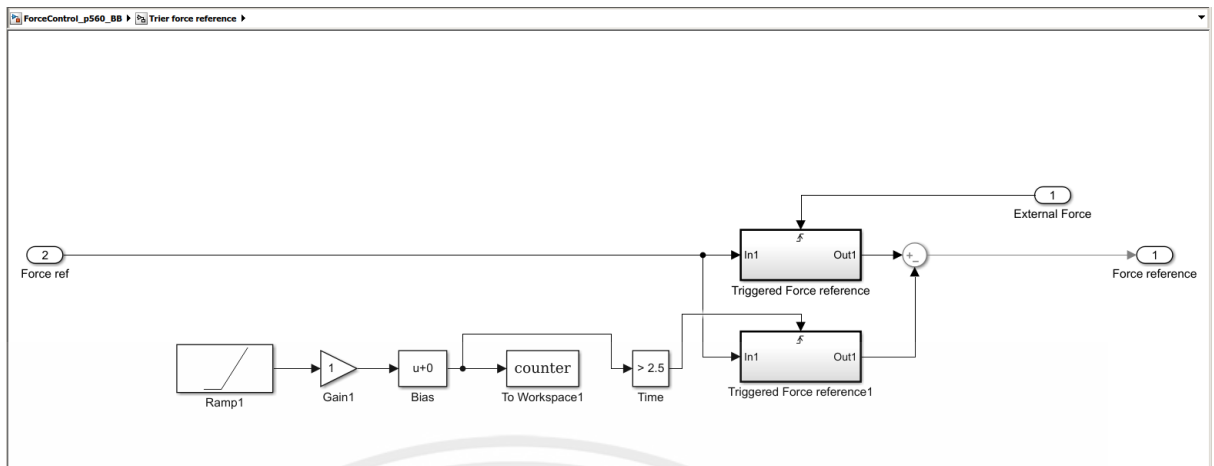
เมื่อ $ferror$ คือ ค่าปริพันธ์ของความผิดพลาดของแรงกำลังสอง ที่ใช้เปรียบเทียบในกระบวนการ PSO และ GA

Impedance Control คือ ตัวควบคุมแรง จะมีผังด้านในดังรูปที่ ก-7



รูปที่ ก-7 บล็อกของตัวควบคุมแบบอิมพีแดนซ์

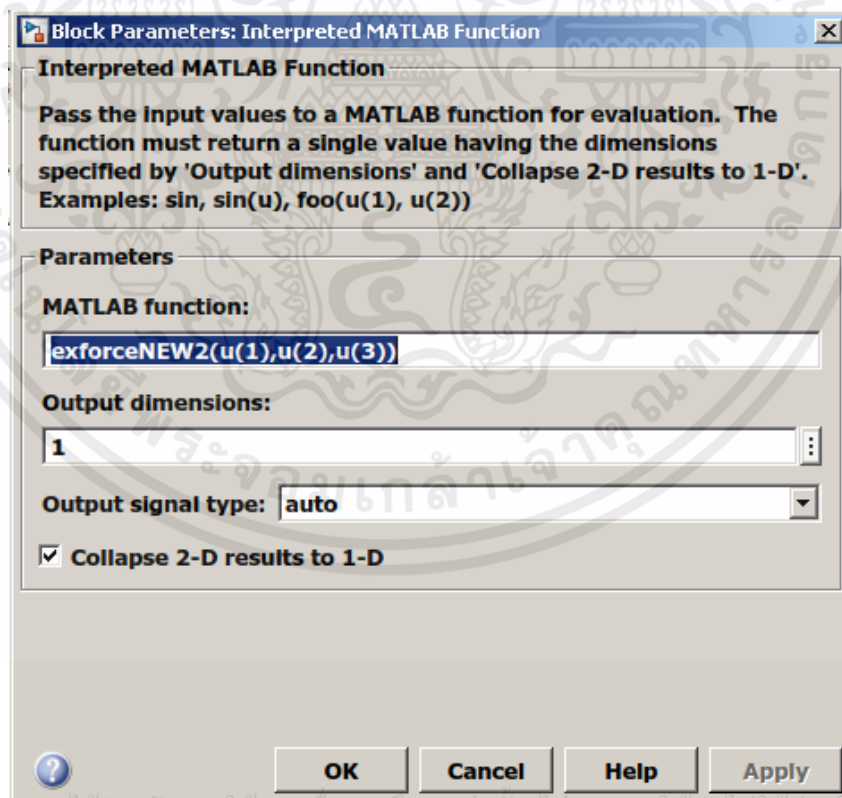
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีที่มีการศึกษาเท่านั้น ไม่ใช่ว่าการนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-8 ผังการทำงานของตัวเปิดแรงอ้างอิง

เมื่อ Time คือ เวลาที่ทำให้แรงอ้างอิงเป็น 0 นิวตัน

External Force คือ แบบจำลองกำแพงที่จะทำการใส่แรงกระทำที่ปลายแกนกลด้านในมีการกำหนดค่าดังรูป ก-9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ ก-9 การกำหนดค่าด้านในแบบจำลองกำแพงทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

exforceNEW2 มีโค้ดการทำงานดังนี้

```

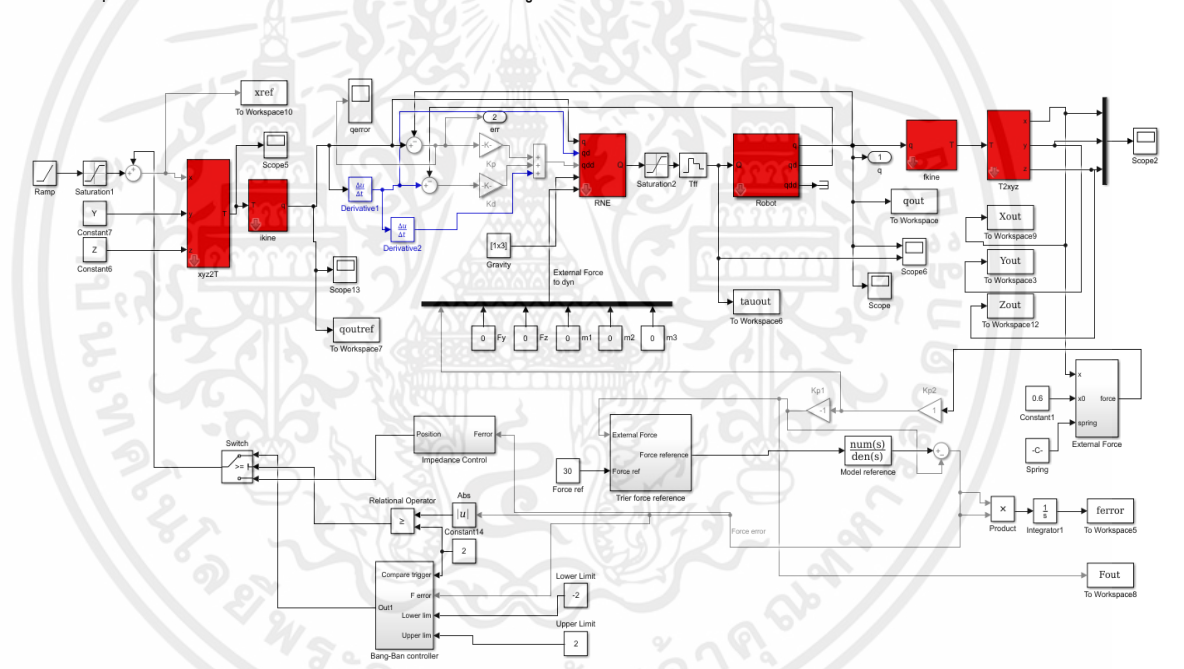
%%%%%%%%%%%%%% Spring force %%%%%%%%%%%%%%%
function fext =exforceNEW2(x,x0,spring)

%[fx fy fz mx my mz]

    if x>x0 %% at xforce at x=0.6
        fx=spring*(x-x0);
    else
        fx =0;
    end
    fy=0;
    fz=0;
    %fext=[fx fy fz 0 0 0];
    fext=-fx;
end
%xyz(1:3,4:4,1)'frm work space

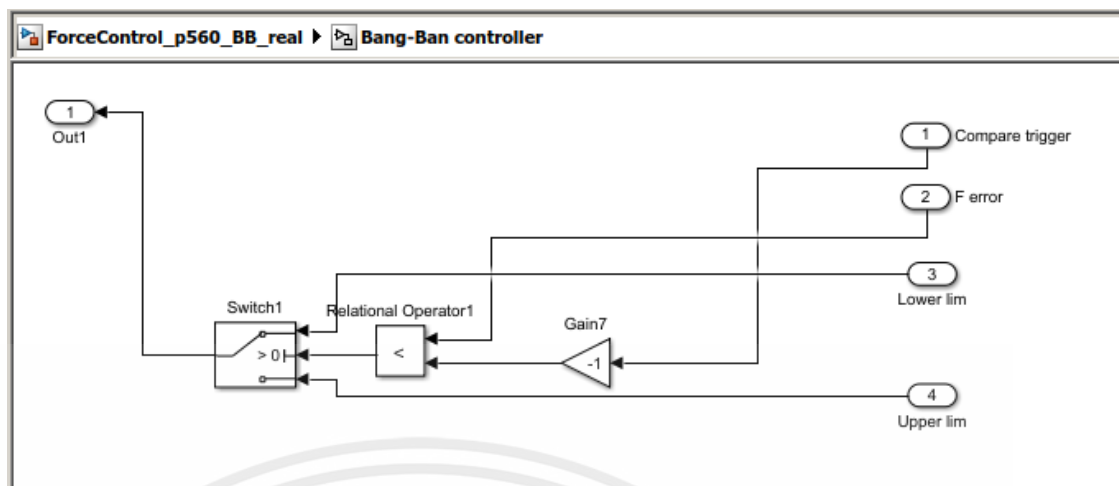
```

ตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้มีผังการทำงานดังรูปที่ ก-10



รูปที่ ก-10 ผังการทำงานของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้

ตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้นั้นจะมีการเพิ่มตัวควบคุม bang-bang ทำงานร่วมกันกับตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์แบบไฮบริด ด้านในของตัวควบคุม bang-bang ดังรูปที่ ก-11 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-11 บล็อกการทำงานของ bang-bang controller

เมื่อ Compare trigger คือ ตัวเปรียบเทียบที่ขนาดเท่ากับค่าสัมบูรณ์ของค่าขอบบนที่กำหนด
 F error คือ ค่าความผิดพลาดของแรง
 Lower lim คือ ค่าขอบล่างของแรง
 Upper lim คือ ค่าขอบบนของแรง

โค้ดการทำงานของตัวควบคุมแรงแบบปรับตัวได้โดยใช้พาทิคอลสวอม สำหรับแขนกล
 เคลื่อนไหว 6 องศาอิสระ มีดังนี้

```

%% Real time PSO Force Controller in PUMA560
clear all;
clc;
mdl_puma560
%p560.nofriction
%p560.payload(0,[0 0 0])
%p560.nofriction
global X;
global Y;
global Z;
global qbotref;
%global qout;

X = 0.7;%0.3;% to 0.7
Y = -0.1501;
Z = 0;
xreffirst = 0.5;%0.6;
T0 = transl(xreffirst, -0.1501, 0);
qbotref=p560.ikine(T0);
%PSO_IMPEDANCE_CONTROL_PUMA560_TUNING;
%PSOIMPEDANCECONTROL;% PSO impedance
ForceControl_p560_BB_real;% PSO impedance bang bang
force_collection=0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ห้ามทำซ้ำ ดัดแปลง หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

samf=176;%251 for 2.5s,176 for 1.75s;

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%initial for PSO impedance control
ii=1;
%a=100;v=100;x=100;fd=0;sumerror=0;
global Vm;global M;global fit;global pbest;global pbest_fit;global
bestfit;
global gbest;global m;global b;global k;
global ferror;global ferrorfit;global Fout;global Spring;
Spring = 500;
%set_param('PSO_IMPEDANCE_CONTROL_PUMA560_TUNING/Spring','value','[Spring]');
%set_param('PSOIMPEDANCECONTROL/Spring','value','[Spring]');
set_param('ForceControl_p560_BB_real/Spring','value','[Spring]');
dimension = 3;%%M,B,K
wmax = 1;%0.729844;
wmin = 0.6;
particle = 24%10;%20;
c1 = 2.1;% 1.496180;
c2 = 2.1;% 1.496180;
maxgen = 15; %10000;
%inital parameters
M = zeros(particle,dimension);%zeros(1,particle);
Vm = zeros(particle,dimension);
%fitness = zeros(1,particle);%2.*ones(1,10);%zeros(1,10);
pbest = zeros(particle,dimension);
pbest_fit = zeros(1,particle);
bestfit = 100000.0;
gbest = zeros(1,dimension);
%collector
%global pbest_collector;global gbest_collector;
pbest_collector=zeros(particle,dimension,maxgen);
gbest_collector=zeros(1,dimension,maxgen);
%function sphere
upli = 1000; %upper limit
lowli = 0.1;%0.01; %lower limit
vmax = upli-lowli;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%collector
n=0;
xx=0;
ic=0;
gc=0;
NPSO=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Result from tuning %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
gbest(1)=0.11
gbest(2)=12.5
gbest(3)=0.11
%bestfit=36.48;
m=gbest(1);
%% if gbest(2) < 4 %% Lowest b is 4 if not will go to error
%%     gbest(2)=4;
%% end
b=gbest(2);

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้นหากมีการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

```

k=gbest(3);
%sim('PSO_IMPEDANCE_CONTROL_PUMA560_TUNING');
sim('ForceControl_p560_BB_real');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Attempted to access (-65999,1); index must be a positive
integer or logical.

    %xx=(n-1)*6000+((ic-1)*6000)+((gc-1)*60000);
    for x=1:45000

        ForceCollection((xx+x),1) = Fout(x);
    end

    xx=xx+45000;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    fitness=max(ferror);
    bestfit=fitness;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for n=1:4
    m=gbest(1);
    %% if gbest(2) < 4 %% Lowest b is 4 if not will go to error
    %%     gbest(2)=4;
    %% end
    b=gbest(2);
    k=gbest(3);
    if n==2 %%% change spring of wall model at 2 contact
        Spring=1000;

%set_param('PSO_IMPEDANCE_CONTROL_PUMA560_TUNING/Spring','value','[Sp
ring]');

set_param('ForceControl_p560_BB_real/Spring','value','[Spring]');
    end

    %sim('PSO_IMPEDANCE_CONTROL_PUMA560_TUNING');
    sim('ForceControl_p560_BB_real');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Attempted to access (-65999,1); index must be a positive
integer or logical.

    %xx=(n-1)*6000+((ic-1)*6000)+((gc-1)*60000);
    for x=1:45000

        ForceCollection((xx+x),1) = Fout(x);
    end

    xx=xx+45000;

    fitness=max(ferror);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอแจ้งให้ทราบว่าทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    if fitness>bestfit+5
        bestfit = 100000.0;

%initial mbk
for i = 1:particle
for j = 1:dimension
M(i,j)=lowli+(rand()/2 )*vmax;
Vm(i,j)=-vmax+(rand()/2 )*(2*vmax);
pbest(i,j) = M(i,j);
end
%evaluate fitness value
%[fit(i),bestfit] = evaluateM(M,i,dimension,gbest,
bestfit,a,v,x,fd,sumerror);
%pbest_fit(i) = fit(i);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%for g=1:maxgen %%%%%% initial fitness
for i =1:particle
    m=M(i,1);
    %% if M(i,2) < 4 %% Lowest b is 4 if not will go to error
    %%     M(i,2)=4;
    %% end
    b=M(i,2);
    k=M(i,3);
    %sim('PSO_IMPEDANCE_CONTROL_PUMA560_TUNING');
    sim('ForceControl_p560_BB_real');
    %fitness = ferror(samf);%%number is sampling from simulink
    fitness = max(ferror);%%number is sampling from simulink
    %for x=1:45000
        %ForceColection((xx+x),1) = Fout(x);
    %end
% xx=xx+45000;
    if fitness < bestfit
        bestfit = fitness;
        for j = 1:dimension
            gbest(j) = M(i,j);
        end
        end
        fit(i)=fitness;
        pbest_fit(i) = fit(i);
    end
    %%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for g = 1:maxgen
for i = 1:particle
for j =1:dimension
%update velocity
r1 = rand()/2;
r2 = rand()/2;
%Vm(i,j)=((g*(wmax+wmin))/maxgen)*Vm(i,j)+c1*r1*(pbest(i,j)-M(i,j))+c2*r2*(gbest(j)-M(i,j));%wrong EQ
Vm(i,j)=((maxgen-g)*((wmax+wmin)/maxgen))*Vm(i,j)+c1*r1*(pbest(i,j)-M(i,j))+c2*r2*(gbest(j)-M(i,j));
%check boundary
if Vm(i,j) > vmax

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใด

```

    Vm(i,j) = vmax;
end
if Vm(i,j) < -vmax
    Vm(i,j) = -vmax;
end
    %update position
M(i,j) = M(i,j) + Vm(i,j);
if M(i,j) > upli
    M(i,j) = upli - 0.01;%0.01
    Vm(i,j) = 0;
end
if M(i,j) < lowli
    M(i,j) = lowli + 0.01;%0.01
    Vm(i,j) = 0;
end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
m=M(i,1);
%%if M(i,2) < 4 %% Lowest b is 4 if not will go to error
%%    M(i,2)=4;
%% end
b=M(i,2);
k=M(i,3);
sim('PSO_IMPEDANCE_CONTROL_PUMA560_TUNING');
sim('ForceControl_p560_BB_real');
%fitness = ferror(samf);%%number is samplng from simulink

% xx=((i-1)*6000)+((g-1)*60000);
% xx=((n-1)*6000)+((ic-1)*6000)+((gc-1)*60000);
for x=1:45000

    ForceColection((xx+x),1) = Fout(x);
end
xx=xx+45000;

fitness = max(ferror);%%number is samplng from simulink
if fitness < bestfit
bestfit = fitness;
for j = 1:dimension
gbest(j) = M(i,j);
end
end
fit(i)=fitness;
if fit(i) < pbest_fit(i)
for j = 1:dimension
pbest(i,j) = M(i,j);
end
pbest_fit(i) = fit(i);
end
% fit(i)=fitness;
% pbest_fit(i) = fit(i);
%%%%pbest_collector
for j = 1:dimension
pbest_collector(i,j,g)=pbest(i,j);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

```

end
    %disp(bestfit)s
    %% gbest collector
    for j = 1:dimension
    gbest_collector(1,j,g)=gbest(j);
    end
    fitM(ii)=bestfit;
    ii
    ii=ii+1;

end
NPSO=NPSO+1;
NPSO
%ic=NPSO*particle;
%gc=NPSO*maxgen;
%%
    end
end
plot(fitM);

```

โค้ดสำหรับการปรับจูนแรงด้วยเจเนติกอัลกอริทึม

```

clear all
clc
clear all;
clc;
mdl_puma560
%p560.nofriction
%p560.payload(0,[0 0 0])
%p560.nofriction
global X;
global Y;
global Z;
global qbotref;
%global qout;

X = 0.7;%0.3;% to 0.7
Y = -0.1501;
Z = 0;
xreffirst =0.5;%0.6;
T0 = transl(xreffirst, -0.1501, 0) ;
qbotref=p560.ikine(T0);
%PSO_IMPEDANCE_CONTROL_PUMA560_TUNING;
%PSOIMPEDANCECONTROL;% PSO impedance
%PSOIMPEDANCECONTROLBB;% PSO impedance bang bang
ForceControl_p560_softcontact
force_collection=0;
samf=176;%251 for 2.5s,176 for 1.75s;

%%
%%%
%%initial for PSO impedance control
ii=1;
%a=100;v=100;x=100;fd=0;sumerror=0;

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตามสงวนลิขสิทธิ์ไว้

```

global Vm;global M;global fit;global pbest;global pbest_fit;global
bestfit;
global gbest;global m;global b;global k;
global ferror;global ferrorfit;global Fout;global Spring;
Spring = 500;
%set_param('PSO_IMPEDANCE_CONTROL_PUMA560_TUNING/Spring','value','[Spring]');
%set_param('PSOIMPEDANCECONTROL/Spring','value','[Spring]');
set_param('ForceControl_p560_softcontact/Spring','value','[Spring]');
%dimension = 3;%M,B,K
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tic
options =
optimoptions('ga','MaxGenerations',15,'PopulationSize',10,'CrossoverF
cn',...
{@crossoverintermediate,0.95},'MutationFcn',
{@mutationuniform,0.05});
FitnessFunction = @simple_fitness_p560;
numberOfVariables = 3;
[x,fval] =
ga(FitnessFunction,numberOfVariables,[],[],[],[],0.1,1000,[],options)
toc
% reference 1.A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm
%           2.Evolutionary computation between Genetic Algorithm and
Particle Swarm Optimization

```

โดยสรุป การจำลองมี 3 แบบ คือ การควบคุมตำแหน่งปลายแขนกล การควบคุมแรงที่ปลายแขนกล และการควบคุมแรงแบบปรับตัวได้ โดยจะมีการเปรียบเทียบผลของการจำลองในผลการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PSO based Adaptive Force Controller for 6 DOF Robot Manipulators

Sutthipong Thunyajareern, Uma Seeboonruang and Somyot Kaitwanidvilai

Abstract— Force control in robot arm has been used in many industrial applications especially end-effector contacting with environment. When environment is change, the performance of non-adaptive controller may be decreased. This paper presents adaptive force controller for 6 DOF (degree of freedom) Robot Manipulators that do not require identifying the environment before controlling. Particle swarm optimization (PSO) has been employed to solve this problem. In simulation, the end-effector was moved and touched different environments. The simulation results were compared with typical non-adaptive control. The result shows that when the environment is changed, the performance of non-adaptive force controller decreased. On the other hand, the performance of PSO based adaptive force controller remained the same.

Index Terms— force control, impedance control, environment modelling, particle swarm optimization

I. INTRODUCTION

Force controller in robot manipulators has been adopted in a number of industries, for example, automotive industries, semiconductor and electronic component assembly lines. Force controlling methods can be categorized into direct and indirect force controls. This research applied the indirect force control system. This control scheme composed of two control loops; inner and outer loops. Inner loop controller is for position control of end-effector, while outer loop control is for force control. The outer loop control sends coordinate information to the inner loop control in order to calculate the position and control the end-effector.

In this paper, the indirect force control, which is impedance control, controls the force contact between end-effector and environment. The impedance control can regulate force contact with environment according to some specified mechanical impedance variables such as mass, damping coefficient, and spring coefficient. When the environment is changed, these parameters of impedance controller will be set to new values to generate the desired response. The method of particle swarm optimization (PSO) has been employed in order to search for the new set of parameters for this impedance controller.

Manuscript received July 7, 2017; revised July 22, 2017. This work is supported by National Science and Technology Development Agency and Thai Steel Cable Public Company Limited.

S. Thunyajareern is with Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand (e-mail: joandblood@gmail.com).

U. Seeboonruang is with Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand (e-mail: uma.se@kmitl.ac.th).

S. Kaitwanidvilai is with Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand (phone: 662-329-8300; fax: 662-329-8302; e-mail: drsomyotk@gmail.com).

At present, there are various research on force control in robot arm that apply the impedance control. Initially, 2 DOF force control operated 2 DOF robot arm and environment. Typically, this control scheme employed indirect force control, which used impedance control to control force contact between end effector and environment [1]. The study on the comparison between the impedance control and force-free control showed that both of them can stop end effector when in contact with environment but they may have different behaviors [2]. The optimization algorithm, particle swarm optimization (PSO), has been employed to solve many problems, such as tuning parameters of regression support vectors for predicting pinch force signal. The applications with PSO always perform with better accuracy than typical application [3]. Another application of PSO is for tuning parameters of PID controller to control robot arm as PID controller in MIMO plant is difficult to tune manually [4]. When environment is changed, PSO has been successfully applied in order to adjust parameters of impedance controller [5]. In other algorithm, artificial neural network (ANN) together with neuro-fuzzy is used to control force in contact with environment. When end-effector contacting with environment, force contact overshoots force signal, the neuro-fuzzy algorithm applies reference force through transfer function so that the reference force increases smoothly [6]. Moreover, this technique is the force control method, which combines the adaptive fuzzy controller and PID controller. This latest advancement applies PSO for adjusting the PID parameters for active suspension system [7].

The problem of the force control is mainly caused by the decrease of performance when the environment changes. Although there are many adaptation algorithms proposed to solve this problem; however, as shown in the previous works, the adaptive algorithm with the local minima avoidance for the force control has not been proposed in the 6DOF robot manipulators. The proposed technique enhances the ability of the force control system so that the force at the end-effector can be adapted to the environment changes which is more realistic on the force control system.

This research paper presents the PSO based adaptive force control for 6 DOF. The system of force control, position control and PSO will be proposed. The expected result is the better performance of the proposed force control over the typical impedance control.

II. OVERVIEW OF THIS SYSTEM

Firstly, the overview of PSO based adaptive force control in robot arm will be presented (Fig. 1). From block diagram, xyz is the desired position of end effector in Cartesian coordinate system.

Inverse kinematics equations are applied to determine the joint parameters that provide information on a desired position for each of the robot's end effectors. Position control is controller for controlling the joint of robot arm. Environment means the material contacting to end effector. "f ref" is force reference signal. Model reference is the transfer function. The PSO scheme is applied here for tuning parameters of the impedance control.

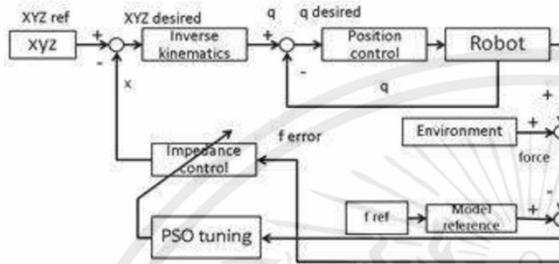


Fig. 1. Block diagram of PSO based adaptive force control in 6 DOF robot manipulators.

A. Forward Kinematics

Forward kinematics equations refer to those equations of a robot to compute the position of the end effector from some specified values for the joint parameters. The kinematics equations for the series chain of a robot are obtained using a rigid transformation [Z] to characterize the relative movement allowed at each joint and separate rigid transformation [X] to define the dimensions of each link. The result is a sequence of rigid transformations alternating joint and link transformations from the base of the chain to its end link, which is equated to the specified position for the end link.

$$[T] = [Z_1][X_1][Z_2][X_2][Z_3][X_3] \dots [Z_{n-1}][X_{n-1}] \quad (1)$$

Where [T] is the transformation locating the end-link, [Z] is the joint matrices, [X] is the link matrices.

Joint matrices can be defined as the multiplication of translation matrix and rotation matrix as shown in the following equation.

$$Z_i = Trans_{Z_i}(d_i)Rot_{Z_i}(\theta_i) \quad (2)$$

Where $Trans_{Z_i}$ is translation matrix of joint, Rot_{Z_i} is rotation matrix of joint. The matrices can be defined as in the following equation.

$$X_i = Trans_{X_i}(a_{i,i+1})Rot_{X_i}(\alpha_{i,i+1}) \quad (3)$$

Where $Trans_{X_i}$ is translation matrix of link, Rot_{X_i} is rotation matrix of link. Then, the change of link can be defined as the following:

$${}^{i-1}T = [Z_i][X_i] = Trans_{Z_i}(d_i)Rot_{Z_i}(\theta_i)Trans_{X_i}(a_{i,i+1})Rot_{X_i}(\alpha_{i,i+1}) \quad (4)$$

Where θ_i , d_i , $a_{i,i+1}$ and $\alpha_{i,i+1}$ are known as the Denavit-Hartenberg parameters.

B. Inverse Kinematics

In robotics, inverse kinematics employs the kinematics equations to determine the joint parameters that provide a desired position of the robot's end effectors. There are many methods of modelling and solving inverse kinematics problems. Most of the flexible methods among these typically rely on iterative optimization to seek out an approximate solution because of the difficulty of inverting the forward kinematics equation and the possibility of an empty solution space. In this paper, the Jacobian inverse technique is applied. From the following equation,

$$de = Jd\theta \quad (5)$$

Where e is position of end effector in Cartesian coordinate system, de is distance between positions of the target and the current position of end effector, θ is joint angle, d θ is difference of joint angles between that of the current position and the position of end effector. J is Jacobian matrix. Then, θ may be described as:

$$d\theta = J^{-1}de \quad (6)$$

Pseudo-inverse is applied for inversion from J to J^+ and the following equation is obtained:

$$d\theta = J^+de \quad (7)$$

Now the new joint angle (θ) can be described as:

$$\theta = \theta + kd\theta \quad (8)$$

Where k is a constant for the changing rate.

During the Jacobian inverse technique, the steps are applied:

While (e is far from the expected e)

1. Compute the Jacobian matrix - J
2. Compute the pseudo-inverse of the Jacobian matrix - J^+
3. Compute change in joint DOF: $d\theta = J^+de$
4. Compute the new location of the joint DOF: $\theta = \theta + kd\theta$
5. Check the new position by forward kinematics: error = expected e - e.

C. Dynamic Model

Dynamic model of a robot arm is given by:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (9)$$

Where $M(q)$ is mass matrix, $C(q, \dot{q})$ is Coriolis and centrifugal forces, $G(q)$ is gravitational force, τ is torque of each joint, q , \dot{q} , and \ddot{q} are angle, velocity and acceleration of joint, respectively.

The dynamic equation of an end-effector as the result from external force at the end-effector is given by:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau - J^T F_{ext} \quad (10)$$

Where J is end effector Jacobian matrix, F_{ext} is external force in Cartesian coordinate system.

D. Position Control of End Effector

From dynamic model, the control signal can be established as:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + J^T F_{ext} = u \quad (11)$$

Given the new controller input:

$$\ddot{q} = \ddot{q}_r \quad (12)$$

$$\dot{q} + K_2 \dot{q} + K_1 q = \dot{q}_r \quad (13)$$

Where K_1 is a multiplier of joint positions, K_2 is a multiplier of joint velocity, \ddot{q}_r is joint accelerate. Then replace \ddot{q} in (11) by \ddot{q}_r .

The error can be computed by:

$$e = q_d - q \quad (14)$$

Where q_d is expected joint position and q is current joint angle. Then the following equation is obtained:

$$\ddot{e} + K_2 \dot{e} + K_1 e = 0 \quad (15)$$

In this paper, K_1 is given as [1000 100 100 10 10 10] and K_2 is given as [50 20 20 1 1 1].

E. Impedance control

Impedance control is the force control between the external force and end-effector according to specified impedance parameters such as mass, spring coefficient and damper coefficient. The main equation of impedance control can be given by:

$$F = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx \quad (16)$$

Where m is mass, b is damper coefficient, k is spring coefficient, F is force, and x is displacement.

The impedance parameters such as mass (m), damper coefficient (b), and spring coefficient (k) will be optimized by Particle Swarm Optimization (PSO).

When the end effector initially in contacting with environment, there will be over shoot force signal. In order to solve this problem, transfer function is then applied to the force signal so that the reference force signal would grow smoothly to steady state. The transfer function is in the form of first-order dynamic model (17).

$$G_r(s) = \frac{1}{cs+1} \quad (17)$$

Where c is a time constant.

F. Environment modelling

In this paper, the movement of end effector to contact with environment is in Cartesian coordinate system. The model of environment is a simple linear spring model as (18).

$$f = k_{spring}(x - x_e) \quad (18)$$

Where f is force, k_{spring} is spring constant, x is position of end effector in Cartesian coordinate system, x_e is the static position of the environment.

G. Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) is a computational method that optimizes a problem by iteratively trying to improve a candidate solution regarding to a given measure of quality. PSO's algorithm is similar to the scheme of a group of birds finding food. Birds are compared to particles, which have position (x_i) and velocity (v_i). The best position of each particle is $pbest$ and the best position of the swarm is $gbest$.

Main algorithm of Particle Swarm Optimization can be described as following:

1. Locate positions of all particles by random values between upper limit and lower limit.
2. Calculate a fitness value by using the fitness function (23) in order to find a better position of a particle. If the new position of particle is better than before, the position will be remembered as $pbest$.
3. Find the best fitness value of swarm in each iteration, and give that position as $gbest$.
4. Calculate new velocities of particles (20).
5. Update the new positions of particles (19). And then repeat steps #2 to #5 until the number of iteration reaches the maximum value.

Equation for updating position is (19).

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (19)$$

Where x_i is position and v_i is velocity.

As the result, the updated velocity can be computed as the following equation.

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(pbest_i(t) - x_i(t)) + c_2r_2(gbest(t) - x_i(t)) \quad (20)$$

Where w is a coefficient for inertial weight, c_1 and c_2 are acceleration constants, r_1 and r_2 are positive values given by random generation (21).

$$r = \frac{\text{random}(0 \text{ to } 1)}{2} \quad (21)$$

Where $\text{random}(0 \text{ to } 1)$ is a random function generating a number range between 0 and 1.

The equation for updating w is given by (22)

$$w = \text{iter} \frac{w_{max} - w_{min}}{\text{iter}_{max}} \quad (22)$$

Where iter is number of current iteration, iter_{max} is number of maximum iteration, w_{max} is maximum value of inertial weight, w_{min} is minimum value of inertial weight.

To establish $pbest$ and $gbest$, the fitness value is acquired from the fitness function (23).

$$f = \int e^2 dt \quad (23)$$

Where f is fitness value and e is the feedback force error. PSO scheme can be shown as in the block diagram (Fig. 2).

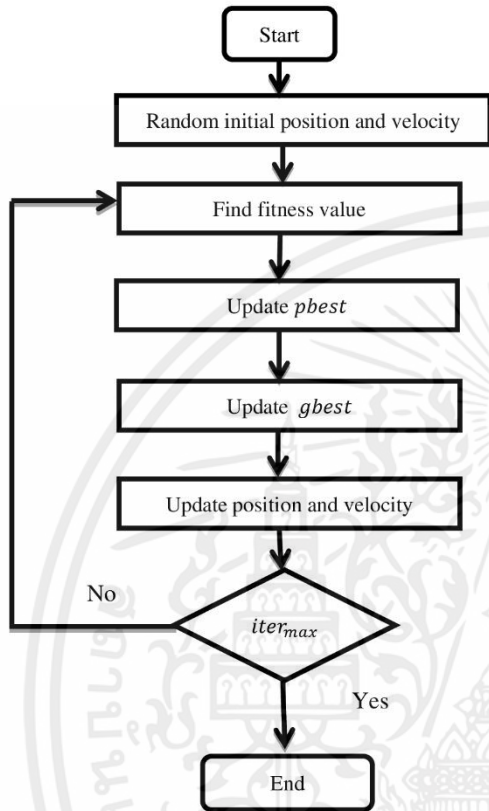


Fig. 2 Scheme of Particle Swarm Optimization (PSO)

III. SIMULATION AND RESULT

In this simulation, the applied robot arm is puma560 [8]. First, the initial position of end effector is set at $y = -0.1501$ m, $z = 0$ m and $x = 0.5$ m. The ramp function has slope = 0.8. The external force is $k_{spring} = 500$ N/m at $x = 0.6$ m, while the force reference is set at 30 N.

The transfer function applied here is expressed as (24)

$$G_r(s) = \frac{1}{0.2s+1} \quad (24)$$

The PSO parameters are as following, $iter_{max} = 15$, particles = 10, dimension = 3 (m, b, k), $c_1 = c_2 = 2.1$, $w_{max} = 3$, $w_{min} = 0.6$, upper limit = 1000, and lower limit = 0.1

The result of the PSO based the adaptive force controller for 6 DOF robot manipulators is shown here.

Fig. 3 shows the function of the fitness value. The result suggests that the optimized value has been established at the iteration 5th. Fig. 4 shows contact force between end effector and environment. The contact force is increasing smoothly following the model reference through the transfer function.

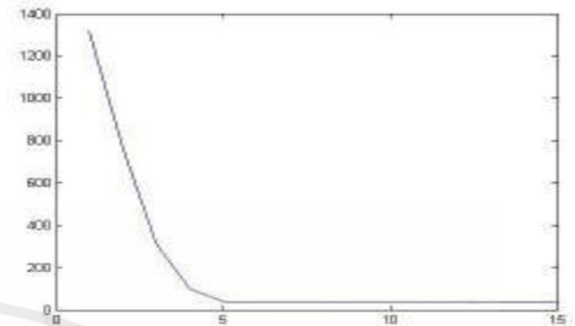


Fig.3. Fitness value function

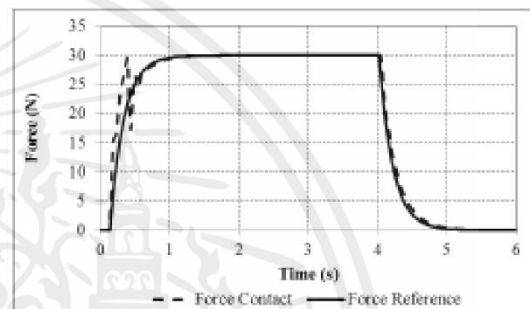


Fig.4. Contact force between end effector and environment after optimized by PSO

Fig. 5 shows the end effector position on x-axis when in contact with environment. The end effector stops at the x reference position in order to maintain the equilibrium of the contact force at the end effector.

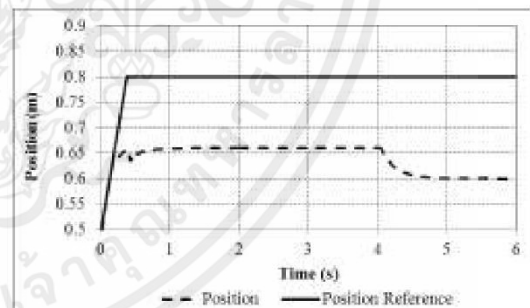


Fig.5. Position of end effector when in contact with environment.

To test the control force efficiency, another simulation is set with $k_{spring} = 1000$ N/m and the result is shown in Fig. 6.

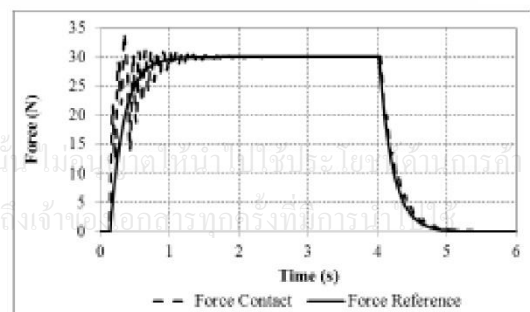


Fig.6. Contact force with $k_{spring} = 1000$ N/m

The results from the simulation with the traditional impedance control at $k_{spring}=500$ N/m and $k_{spring}=1000$ N/m are also shown in Fig. 7 and Fig. 8, respectively.

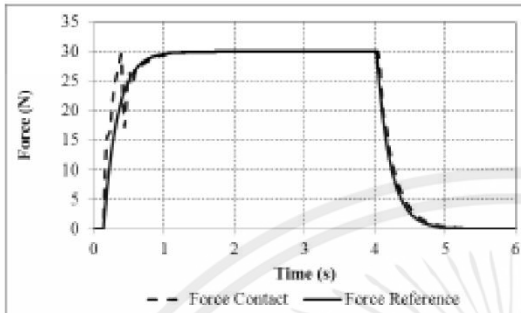


Fig.7. Contact force with impedance control when $k_{spring}=500$ N/m

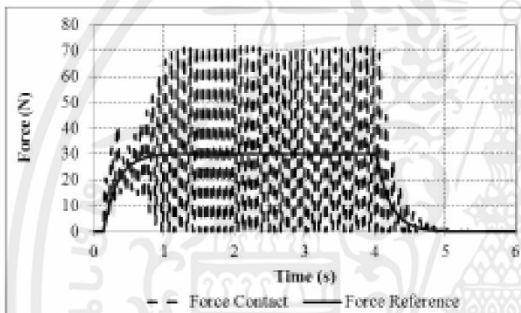


Fig.8. Contact force with impedance control when $k_{spring}=1000$ N/m

Fig. 7 and Fig. 8 illustrate the result that when environment is changed, the performance of the contact force with the traditional impedance control decreases.

IV. CONCLUSION

This paper presents the PSO based adaptive force controller for 6 DOF robot manipulators. When end effector is in contact with environment, contact force increases smoothly following the reference signal, which can reduce the damage of the end effector and environment. Comparing to the non-adaptive force control algorithm when the environment is changed, the proposed technique can be adapted to control the contact force with better performance in terms of low oscillation and overshoot. The simulation results have proven the effectiveness of this proposed system.

ACKNOWLEDGMENT

The project is financially funded by by National Science and Technology Development Agency and Thai Steel Cable Public Company Limited under the project “The development of integrated vision based-robotic arm with wireless communication for assembly production line of automotive window drive system”.

REFERENCES

- [1] J. de Gea, F. Kirchner, “Modelling and Simulation of Robot Arm Interaction Forces Using Impedance control ”, Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008
- [2] A. Pallegedara, Y. Matsuda, N. Egashira, T. Sugi and S. Goto, “ Comparison of Interaction Forces of Robot Arm on Force-free Control and Impedance Control by Model Based Simulations”, SICE Annual Conference 2012 August 20-23, 2012, Akita University, Akita, Japan
- [3] X. Wang, J. Gao, “Application of Particle Swarm Optimization for Tuning the SVR Parameters*”, 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) July 7-11, 2015. Busan, Korea
- [4] O. Djaneje-Boundjou, X. Xu, and R. Ordóñez, “Automated Particle Swarm Optimization Based PID Tuning for Control of Robotic Arm”, 978-1-5090-3441-3/16/\$31.00 ©2016 IEEE
- [5] S. Kaitwanidvilai and Y. Sarucha, and A. Saenthon, “PSO based Adaptive Force Controller”, IMECS 2013, March 2013.
- [6] S. Kaitwanidvilai and M. Pamichkun, “Force control in a pneumatic system using hybrid adaptive Neuro-fuzzy model reference control,” Mechatronics 2005, Vol. 15, No. 1, pp. 23-41.
- [7] J. Chiou, S. Tsai and M. Liu, “A PSO-based adaptive fuzzy PID-controllers”, Simulation Modelling Practice and Theory 26 (2012) 49-59
- [8] P.I. Corke, “Robotic Toolbox for Matlab release 9 ”, release date April 2014
- [9] M.W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar “Robot Dynamics and Control Second Edition”, January 28, 2004

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นาย สุทธิพงษ์ ธีัญญเจริญ
วัน เดือน ปี เกิด	28 ตุลาคม พ.ศ.2534 ที่จังหวัด สุพรรณบุรี
ที่อยู่	134 ม.2 ต.หนองโพธิ์ อ.หนองหญ้าไซ จ.สุพรรณบุรี 72240
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-ลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	ทำงานในตำแหน่ง Technician Support บริษัท Chunbok Company Limited (พ.ศ. 2559)
ผลงานวิจัย	Sutthipong Thunyajarern, Uma Seeboonruang and Somyot Kaitwanidvilai, “PSO based Adaptive Force Controller for 6 DOF Robot Manipulators” Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2017 Vol II WCECS 2017, October 25-27, 2017, San Francisco, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้