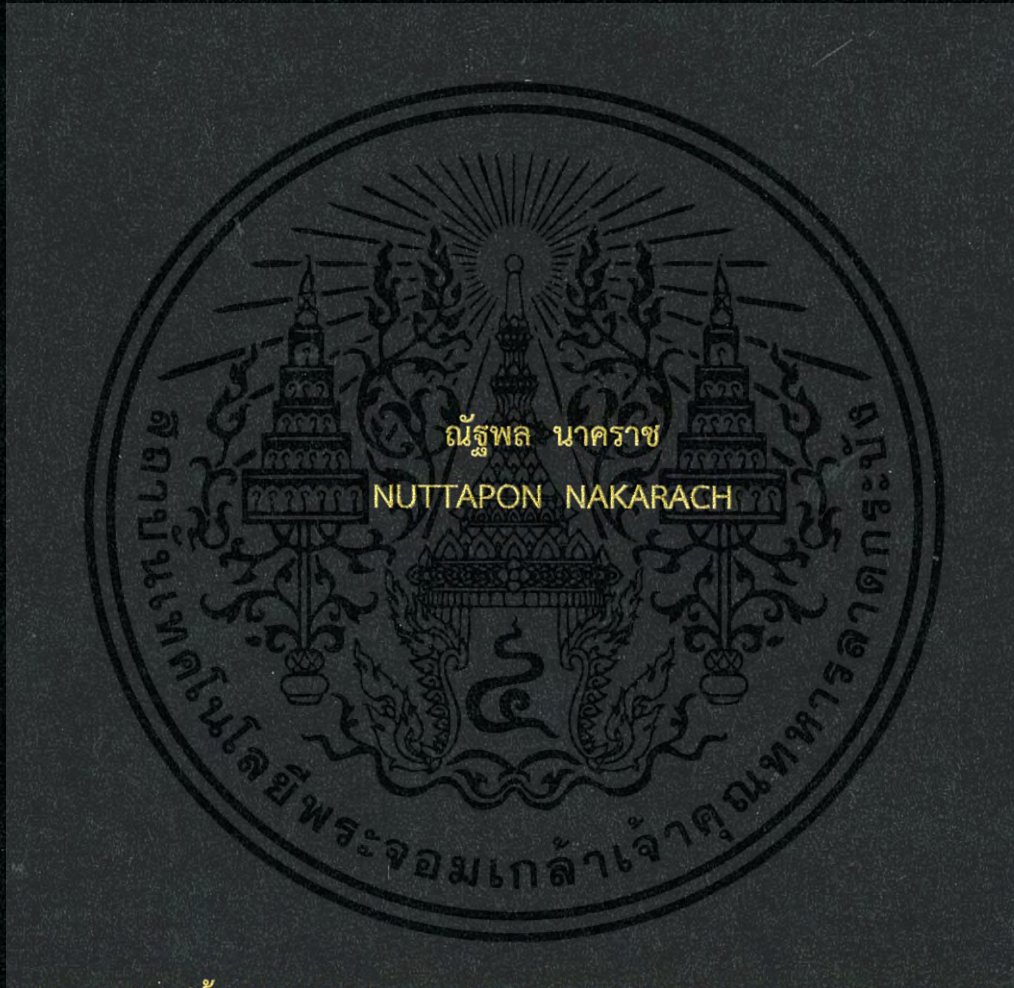


การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สาย  
ผ่านแสง

PERFORMANCE EVALUATION OF OPTICAL BEAM TRACKING ALGORITHM  
IN FREE SPACE OPTICS



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-230-109

การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สาย  
ผ่านแสง

PERFORMANCE EVALUATION OF OPTICAL BEAM TRACKING ALGORITHM  
IN FREE SPACE OPTICS



T148683

ณัฐพล นาคราช

NUTTAPON NAKARACH

เลขหมู่ 148683  
เลขทะเบียน  
พ.ศ.เดือน.ปี 174 พ.ย. 2560

b. 00267612  
l. ....

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-230-109

PERFORMANCE EVALUATION OF OPTICAL BEAM TRACKING ALGORITHM  
IN FREE SPACE OPTICS



A THESIS SUBMITTED IN FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

KMITL-2017-EN-M-230-109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์    การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง  
Thesis Title        Performance Evaluation of Optical Beam Tracking Algorithm in Free Space Optics  
นักศึกษา                นายณัฐพล นาคราช  
รหัสประจำตัว         56601107  
ปริญญา                 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา             วิศวกรรมสารสนเทศ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์    ผศ.ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์                KMITL-2017-EN-M-230-109

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.โสเมสิริ	จันทร์สกุล	
รศ.ดร.อรธสิทธิ	เหล่าสกุล	
ผศ.ดร.สุธีระ	พันธุ์ธีรานุรักษ์	
รศ.ดร.ปิติเชต	สุธีรักษา	
ผศ.ดร.พนารัตน์	เชิญถนอมวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ    วันพฤหัสบดีที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ    ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 5

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา **ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์** ระเบียบด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และวันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 ทั้งนี้มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการติดตามแสง ในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง
นักศึกษา	นายณัฐพล นาคราช
รหัสประจำตัว	56601107
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอผลการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง เนื่องจากระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่จุดเริ่มต้น ปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงสามารถส่งข้อมูลได้ในปริมาณมาก ในระดับล้านบิตต่อวินาที จนถึงระดับพันล้านบิตต่อวินาที เพื่อที่จะทำให้ระบบสามารถส่งข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง หนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องในการส่งข้อมูลของระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงคือการรักษาความระหว่างอุปกรณ์รับ-ส่งข้อมูลให้ตรงกันมากที่สุด ซึ่งหนึ่งในวิธีการที่จะช่วยรักษาการวางแนวระหว่างอุปกรณ์รับ-ส่งข้อมูล ก็คือใช้ระบบกลไกในการปรับระนาบของอุปกรณ์ เพื่อให้การปรับมุมของอุปกรณ์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการในการปรับมุมจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอกระบวนการที่ใช้ในการติดตามแสง โดยใช้กระบวนการติดตามแบบสเต็ป (Step track algorithm) และกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับใน 4 จตุภาค (4 Quadrant detectors, 4-QD) ในงานวิจัยช่วงแรกเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการติดตามแสงในระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงด้วยแบบจำลอง และในงานวิจัยช่วงหลังเป็นการพัฒนาต้นแบบเพื่อทำการทดลองกระบวนการติดตามแสง ในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง ซึ่งผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์สามารถทำงานได้ตามทฤษฎี แม้ว่าในบางครั้งจะไม่สามารถปรับระนาบได้ใกล้เคียงจุดตั้งต้นซึ่งสืบเนื่องมาจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

Thesis	Performance Evaluation of Optical Beam Tracking Algorithm in Free Space Optics
Student	Mr.Nuttapon Nakarach
Student ID.	56601107
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr.Panarat Cherntanomwong

## ABSTRACT

This thesis presents the performance evaluation of optical beam tracking algorithm in free space optics. Free Space Optics (FSO) has been developing for so long and has capability to transmit data in the rate up to gigabits per seconds. In order to make the FSO system transmitting continuity, one of the essential factors is the optical beam tracking. This thesis studies two optical beam tracking algorithms; the first one is the step track algorithm and another one is the tracking algorithm using 4 quadrant detectors (4-QD). In the first phase, the feasibility to use these tracking algorithm for FSO using the simulation model is studied. Then, for the second phase is the prototype of the tracking algorithm in the optical beam tracking mechanism is implemented. The result of the experiments shows that the algorithm work well on the prototype but not as well as theory. The reason may be the limitation of the experiments hardware and the prototype.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา สำหรับงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้และประการณที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้คำแนะนำในด้านต่างๆ ทั้งในทางวิชาการ ตลอดจนแนวทางในการดำเนินชีวิต

ขอขอบคุณพี่ภุชงค์ ศรีวิลาส น้องพรชนก นามอ่อนตา น้อง Yakub Fahim Luckyarno ตลอดจนน้องๆในห้องปฏิบัติการ Wireless Information Network ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองวิจัย และมีมิตรภาพที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณ ดร.ตะวัน ต้นติกุล พี่อดิศักดิ์ หมัดเส้น พี่สุรัช ชินธเนศ พี่นรุตม์รัฐ บุญยสิทธิโสภณ คุณวศิน อรรถมยานนท์ พี่ภูธัช เจริญเชื้อ น้องปาริณา วิทยไพสิฐสันต์ น้องปริญทร เกตุทัตทิเม ตลอดจนไปถึงพี่ๆ น้องๆ ในฝ่ายงานวิศวกรรมดาวเทียม บมจ.ไทยคม ที่ได้ช่วยเหลือ ให้ข้อมูล และให้คำปรึกษา ในการทดลองและการทำผลการทดลองวิจัย

สุดท้ายต้องขอขอบคุณบิดา มารดา ของข้าพเจ้า ที่คอยสนับสนุน ผลักดัน และเป็นกำลังใจ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ณัฐพล นาคราช

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย .....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.2 การสื่อสารไร้สายผ่านแสง [1].....	3
2.3 จุดเด่นและจุดด้อยของการสื่อสารไร้สายผ่านแสง [1] .....	3
2.4 ประเภทของการสื่อสารไร้สายผ่านแสง [1] .....	4
2.4.1 การสื่อสารในอวกาศ .....	4
2.4.2 การสื่อสารระหว่างภาคพื้นดิน.....	4
2.4.3 ระบบภายในอาคาร.....	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 พื้นฐานของระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสง [1] .....	6
2.5.1 ช่องสัญญาณในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง .....	6
2.5.2 การแพร่กระจายของสัญญาณในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง .....	7
2.5.2.1 การรบกวนของลำแสง .....	7
2.5.2.2 การสูญเสียจากชั้นบรรยากาศ.....	7
2.6 กระบวนการติดตามแสง [21] - [22].....	9
2.6.1 กระบวนการติดตามแบบสแต็ป .....	9
2.6.2 กระบวนการติดตามโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค.....	18
2.7 อุปกรณ์ต้นแบบเพื่อทดลองกระบวนการติดตามแสง.....	19
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลองวิจัย.....	24
3.1 กล่าวนำ.....	24
3.2 การทดลองวิจัย.....	24
3.2.1 สภาพแวดล้อมในการทดลองวิจัย.....	24
3.2.2 ขอบเขตการทดลองวิจัย.....	25
3.2.3 ตำแหน่งทดสอบ.....	27
3.2.4 การเก็บข้อมูล.....	28
3.2.5 การประเมินผล.....	29
3.3 ระเบียบการทดลองวิจัยช่วงที่ 1.....	30
3.4 ระเบียบการทดลองวิจัยช่วงที่ 2.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลองวิจัย .....	33
4.1 กล่าวนำ.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 1.....	33
4.2.1 ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบสตีป โดยใช้แบบจำลอง .....	33
4.2.2 ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้แบบจำลอง .....	35
4.2.3 ผลการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม โดยใช้แบบจำลอง .....	37
4.3 ผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 2.....	39
4.3.1 ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบสตีป โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง.....	39
4.3.2 ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง.....	41
4.3.3 ผลการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง.....	43
4.4 สรุปผลการทดลอง.....	45
4.4.1 สรุปผลการทดลองที่ 1.....	57
4.4.2 สรุปผลการทดลองที่ 2.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	58
5.1 กล่าวนำ.....	58
5.2 สรุปผลงานวิจัย.....	58
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	59
เอกสารอ้างอิง .....	60
ภาคผนวก.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	64
ประวัติผู้เขียน .....	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตำแหน่งเริ่มต้นในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 .....	27
3.2 ตำแหน่งเริ่มต้นในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 .....	28
3.3 รูปแบบการเก็บข้อมูลสำหรับการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 .....	29
3.4 รูปแบบการเก็บข้อมูลสำหรับการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 .....	29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายผ่านแสง.....	6
2.2 การสูญเสียเนื่องจากการรูดอกของลำแสง.....	7
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่อความยาวคลื่นแสง.....	9
2.4 กระบวนการเกรเดียนต์.....	10
2.5 ขอบเขตการค้นหา.....	11
2.6 กระบวนการค้นหาแบบเกรเดียนต์ (1).....	13
2.7 กระบวนการค้นหาแบบเกรเดียนต์ (2).....	14
2.8 กระบวนการค้นหาแบบเกรเดียนต์ (3).....	15
2.9 กระบวนการค้นหาแบบเกรเดียนต์ (4).....	16
2.10 กระบวนการค้นหาแบบเกรเดียนต์ (5).....	17
2.11 ตำแหน่งของตัวตรวจจับแสงใน 4 จุดภาค.....	18
2.12 โครงสร้างการส่ง-รับข้อมูลของอุปกรณ์ต้นแบบในการวิจัย.....	19
2.13 แบบร่างอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง.....	20
2.14 บอร์ด CNC Shield V3 for Arduino Uno.....	20
2.15 มอเตอร์แบบสเต็ป.....	21
2.16 บอร์ด Arduino Uno R3.....	21
2.17 บอร์ดภาคขยายสำหรับตัวตรวจจับแสง.....	22
2.18 ตัวตรวจจับแสงและวงจรขยายสัญญาณแบบ ไม่กลับทิศ (Non-Inverting Amplifier).....	22
2.19 กลไกของอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองกระบวนการติดตามแสง.....	23
3.1 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองกระบวนการติดตามแสง ในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 ขอบเขตการทดลองวิจัย (1).....	25
3.3 ขอบเขตการทดลองวิจัย (2).....	25
3.4 ขอบเขตการทดลองวิจัย (3).....	26
3.5 รูปร่างอิงสำหรับสมการที่ 3.3 ถึงสมการที่ 3.5 (1).....	31
3.6 รูปร่างอิงสำหรับสมการที่ 3.3 ถึงสมการที่ 3.5 (2).....	31
3.7 รูปร่างอิงสำหรับสมการที่ 3.3 ถึงสมการที่ 3.5 (3).....	32
4.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองกระบวนการติดตามแบบสแต็ปโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15).....	34
4.2 ค่าความเข้มแสงของการทดลองกระบวนการติดตามแบบสแต็ปโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15).....	34
4.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15).....	36
4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาคโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15).....	36
4.5 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15).....	38
4.6 ค่าความเข้มแสงของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15).....	38
4.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองกระบวนการติดตามแบบสแต็ปโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 5).....	40
4.8 ค่าความเข้มแสงของการทดลองกระบวนการติดตามแบบสแต็ปโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 5).....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ติดตามแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 4).....	42
4.10 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ติดตามแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 4).....	42
4.11 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 5).....	44
4.12 ค่าความเข้มแสงของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 5).....	44
4.13 จำนวนครั้งที่ใช้ในแต่ละกระบวนการติดตาม โดยใช้แบบจำลอง.....	46
4.14 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในแต่ละกระบวนการติดตาม โดยใช้แบบจำลอง.....	46
4.15 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบสแต็ป เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ ต้นแบบสำหรับการทดลอง.....	47
4.16 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบสแต็ป เทียบระหว่าง แบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง.....	47
4.17 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบสแต็ป เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด).....	48
4.18 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบสแต็ป เทียบระหว่าง แบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด).....	48
4.19 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค เทียบ ระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง.....	50
4.20 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด).....	51
4.22 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด).....	51
4.23 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง.....	52
4.24 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง.....	52
4.25 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด).....	53
4.26 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด)..	53
4.27 จำนวนครั้งที่ใช้ในแต่ละกระบวนการติดตาม โดยใช้แบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด).....	54
4.28 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในแต่ละกระบวนการ โดยใช้แบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด).....	55
4.29 ภาพขยายแกนต์ตั้งของรูปที่ 4.592 ในช่วง 0 ถึง 1 เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนรบกวนกำลังสองเฉลี่ยในกระบวนการติดตามแบบสแต็ป และแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค มีค่าน้อยมาก.....	55
4.30 จำนวนครั้งที่ใช้ในแต่ละกระบวนการติดตาม โดยใช้แบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด และสามารถปรับระนาบได้สำเร็จ).....	56
4.31 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในแต่ละกระบวนการ โดยใช้แบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด และสามารถปรับระนาบได้สำเร็จ).....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การสื่อสารไร้สายผ่านแสงเป็นการสื่อสารที่ใช้การส่งข้อมูลผ่านลำแสงโดยผ่านตัวกลางอวกาศว่าง (free space medium) เช่น ชั้นบรรยากาศ หรือตัวกลางอื่นๆ หลักการทำงานของ การสื่อสารไร้สายผ่านแสงจะคล้ายคลึงกับการส่งข้อมูลผ่านสายใยแก้วนำแสงซึ่งใช้หลอดแอลอีดี หรือใช้ไดโอดเลเซอร์ในการส่งข้อมูล ซึ่งผ่านการมอดูเลตแบบแอนะล็อกหรือดิจิทัล ความแตกต่างอยู่ตรงที่การสื่อสารไร้สายผ่านแสงไม่จำเป็นต้องใช้สายใยแก้วนำแสง แต่จะถูกส่งผ่านตัวกลางอวกาศว่าง และจะถูกรวมแสงแล้วตกกระทบที่อุปกรณ์รับแสงที่มีความไวต่อแสงสูง โดยลำแสงที่ใช้ส่วนใหญ่นั้นจะอยู่ในย่านความยาวคลื่นอินฟราเรด ในเชิงพาณิชย์นั้น ระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงสามารถทำความเร็วในการสื่อสารอยู่ในช่วง 100 ล้านบิตต่อวินาที ถึง 2.5 พันล้านบิตต่อวินาที ส่วนในรายงานการทดลอง ระบบสามารถทำความเร็วในการส่งข้อมูลได้ถึง 160 พันล้านบิตต่อวินาที [1] - [4]

กระบวนการติดตามแสง เป็นกระบวนการที่ช่วยทำให้อุปกรณ์รับส่งข้อมูลสามารถส่งข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยนี้ได้เลือกกระบวนการติดตามแบบสเต็ป (Step track algorithm) และ กระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับใน 4 จตุภาค (4 Quadrants Detectors) มาศึกษาและทำการทดลอง ซึ่งจะใช้ความเข้มแสงเป็นตัวชี้วัดเพื่อหาตำแหน่งที่มีค่าความเข้มแสงที่สุด

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาเทคนิคกระบวนการติดตาม เพื่อนำมาใช้สำหรับการสื่อสารไร้สายผ่านแสง
- 1.2.2 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการติดตามแสงแบบต่างๆ โดยการใช้แบบจำลอง
- 1.2.3 พัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับทดสอบกระบวนการติดตามแสง
- 1.2.4 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการติดตามแสง ด้วยอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้น

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

เนื่องจากความเข้มของแสงมีการลดทอนลงตามระยะทาง และมุมหรือตำแหน่งที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการวัด ผู้วิจัยจึงใช้ความเข้มของแสงมาเป็นตัวแปรที่ใช้ในการปรับอุปกรณ์ติดตามแสง ซึ่งผู้วิจัยตั้งสมมุติฐานว่า อุปกรณ์จะปรับทิศทางเข้าหาตำแหน่งที่มีความเข้มแสงมากที่สุด ซึ่งก็คือบริเวณส่วนกลางของลำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในส่วนของ การลดทอนความเข้มของแสง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสง คือ หลอดแอลอีดี สมการความเข้มของแสงจึงเป็นไปตามกฎของ เบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert Law) ส่วนในช่วงของการศึกษาความเป็นไปได้ในขั้นต้นนั้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองกระบวนการติดตามแสง โดยจำลองแหล่งกำเนิดแสงแบบเกาส์เซียน ซึ่งสมการความเข้มแสงทั้งสองแบบจะได้กล่าวถึงในบทถัดไป

ในส่วนของกระบวนการติดตามแบบสเต็ป ผู้ทดลองได้นำทฤษฎีกระบวนการติดตามที่ใช้ในงานสายอากาศ มาศึกษาและประยุกต์ใช้ สำหรับการสื่อสารไร้สายผ่านแสง ส่วนกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค เป็นกระบวนการติดตามแสงที่มีการใช้งานอยู่จริงในระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสง แต่ราคาของอุปกรณ์รับแสงแบบ 4 จตุภาค ยังมีราคาที่สูง อีกทั้งไม่เป็นที่แพร่หลายนัก ผู้วิจัยจึงต้องการนำเสนอทางเลือกในการใช้อุปกรณ์สำหรับการปรับอุปกรณ์รับส่งข้อมูลในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง ซึ่งกระบวนการติดตามทั้งสองแบบจะได้กล่าวถึงในบทถัดไปเช่นกัน

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของการวิจัยดังต่อไปนี้

- 1.5.1 การวิจัยนี้จะทดลองเฉพาะกระบวนการติดตามแสง จึงไม่ได้ทำการรับและส่งข้อมูล แต่จะทำการปล่อยแสงนิ่งจากหลอดแอลอีดี เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงอ้างอิง
- 1.5.2 ทำการทดลองในสภาวะปิด และไม่มีแสงรบกวน

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนของการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แก่

- บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย และขอบเขตของการวิจัย
- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการสื่อสารไร้สายผ่านแสง และทฤษฎีของกระบวนการติดตามแสง รวมไปถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
- บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนการทดลองวิจัยกระบวนการติดตามแสง ในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง
- บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองวิจัย สำหรับกระบวนการติดตามแสง ในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กล่าวนำ

บทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง ซึ่งประกอบไปด้วย พื้นฐานของระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสง กระบวนการติดตามแสง และอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อทดลองกระบวนการติดตามแสง

### 2.2 การสื่อสารไร้สายผ่านแสง [1]

การสื่อสารไร้สายผ่านแสง เป็นเทคนิคการสื่อสารไร้สายที่ใช้แสงเป็นตัวพาสัญญาณผ่านไปยังอวกาศว่าง หรือตัวกลางชนิดอื่นๆ ระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงถูกนำเสนอครั้งแรกโดย อเล็กซานเดอร์ แกรแฮม เบลล์ ในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 โดยได้ทำการแปลงคลื่นเสียงเป็นสัญญาณโทรศัพท์ แล้วส่งสัญญาณด้วยแสงไปยังตัวรับที่ห่างออกไป 600 ฟุต ซึ่งอุปกรณ์ทดลองนี้ถูกเรียกว่า “โทรศัพท์แสง” (Photophone) นับเป็นจุดเริ่มต้นของการสื่อสารไร้สายผ่านแสง แม้ว่าโทรศัพท์แสงจะไม่ได้มีการนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ก็ตาม

ในช่วงที่ผ่านมาการใช้งานระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงจะใช้ในทางทหาร หรือในเทคโนโลยีอวกาศเท่านั้น แต่ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาเริ่มมีการนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์มากขึ้น หลักการทำงานของระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงจะมีความเหมือนกับการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสง เพียงแต่ไม่จำเป็นต้องมีใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง

### 2.3 จุดเด่นและจุดด้อยของการสื่อสารไร้สายผ่านแสง [1]

จุดเด่นและจุดด้อยของระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงมีดังนี้

- ไม่ต้องมีใบอนุญาตการใช้งานความถี่
- มีความเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงในระดับที่ใกล้เคียงกับการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสง
- มีแบนด์วิดท์ที่กว้างเมื่อเทียบกับการสื่อสารผ่านคลื่นความถี่วิทยุ
- ใช้พลังงานต่ำเมื่อเทียบกับการสื่อสารผ่านคลื่นความถี่วิทยุ
- ไม่ถูกรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- มีความปลอดภัยสูงเนื่องจากการสื่อสารที่อยู่บนเส้นทางสัญญาณที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Line of Sight Communication)
- มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ที่ถูกกว่าและมีความยุ่งยากน้อยกว่าระบบการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสง อีกทั้งยังใช้พื้นที่น้อย รองรับการติดตั้งได้หลายรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นชอบที่จะโยนคำถามการคำนวณกรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปัญหาเรื่องการลดทอนเนื่องจากสภาพอากาศ และการบดบังจากวัตถุที่ขวางเส้นทางการส่งข้อมูล
- ปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background Noise) อันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์หรือหลอดไฟ ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงของ แอลอีดีหรือไดโอดเลเซอร์
- ข้อจำกัดเรื่องระยะทางในการส่งข้อมูลระหว่างภาคพื้นดินถูกจำกัดเนื่องด้วยปัญหาเรื่องความปลอดภัยต่อสายตาสิ่งมีชีวิต (Eye Safety Consideration)

## 2.4 ประเภทของการสื่อสารไร้สายผ่านแสง [1]

ประเภทของการสื่อสารไร้สายผ่านแสง สามารถจำแนกตามการใช้งานได้ดังนี้

### 2.4.1 การสื่อสารในอวกาศ

การสื่อสารในอวกาศ ประกอบด้วยการสื่อสารระหว่าง ภาคอากาศ - ภาคพื้นดิน ภาคอากาศ-ภาคอากาศ หรือระหว่างแต่ละวงโคจรดาวเทียม เช่นวงโคจรระดับล่าง วงโคจรค้างฟ้า ฯลฯ ไปยังภาคพื้น จากอากาศยานไปยังภาคพื้นหรืออากาศยาน และจากห้วงอวกาศลึกหรือจากดาวเคราะห์ดวงอื่นมายังภาคพื้น

ข้อดีของระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสง เทียบกับระบบการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุในการสื่อสารในอวกาศคือ อุปกรณ์ทั้งภาคพื้นและภาคอากาศนั้นมีขนาดและน้ำหนักที่น้อยลง มีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากขึ้น สามารถส่งข้อมูลได้เร็วขึ้น แต่ก็เพิ่มความท้าทายในการออกแบบระบบการสื่อสารเช่นกัน เนื่องจากขนาดของลำแสงที่ปลายทางมีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับระบบการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ ทำให้ยากต่อการปรับมุมของลำแสงให้มีความเที่ยงตรง เพื่อให้สามารถสื่อสารได้อย่างต่อเนื่องจึงจำเป็นต้องมีระบบสำหรับ ค้นหา ติดตาม และชี้เป้าภาครับ (Acquisition, Tracking and Pointing - ATP) [5]

อีกหนึ่งความท้าทายก็คือการสื่อสารผ่านกลุ่มเมฆ เป็นการยากที่จะสื่อสารข้อมูลโดยตรงจากอวกาศผ่านเมฆมายังภาคพื้น จึงจำเป็นต้องมีอากาศยาน หรืออากาศยานที่อยู่เหนือเมฆทำหน้าที่รับข้อมูลก่อน แล้วจึงส่งข้อมูลมายังภาคพื้นอีกทีหนึ่ง [6] - [8]

### 2.4.2 การสื่อสารระหว่างภาคพื้นดิน

เนื่องจากการขยายตัวอย่างมหาศาลของโครงข่ายโทรคมนาคมในระดับภูมิภาคในช่วงที่ผ่านมา ทำให้เกิดการขยายตัวของสื่อสารระยะไกลผ่านใยแก้วนำแสง (Optical Fiber Long-Haul) และเครือข่ายบริเวณกว้าง (Wide Area Network) ตามมาด้วยเครือข่ายนครหลวง (Metropolitan Area Network) ในส่วนของเครือข่ายเฉพาะที่ (Local Area Network) นั้นก็มีการขยายตัวในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะความต้องการของผู้ใช้งาน ที่ต้องการจะเข้าถึงข้อมูลอย่างรวดเร็วและตลอดเวลา จนทำให้เกิดความต้องการที่จะใช้งานโครงข่ายในระดับหลายพันล้านบิตต่อวินาที (Multi-Gigabit Network) หรือในระดับบอร์ด์แบนด์ อย่างไรก็ตามเครือข่ายเฉพาะที่โดยส่วนใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังติดข้อจำกัดในการเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายนครหลวง หรือเครือข่ายบริเวณกว้าง จึงทำให้ความเร็วในการส่งข้อมูลได้เพียงระดับไม่กี่ล้านบิตต่อวินาที [9] ในส่วนนี้เองที่การสื่อสารไร้สายผ่านแสงเข้ามา มีบทบาทเพื่อช่วยขยายการเข้าถึงโครงข่ายในระดับบอร์ดแบนด์ อีกทั้งยังเข้ามาแก้ปัญหาคอขวดที่ปลายทาง (Last Mile Bottleneck) อีกด้วย

ในส่วนของ การติดตั้งโครงข่ายการสื่อสารไร้สายผ่านแสงนั้น สามารถทำได้สะดวก รวดเร็ว และมีราคาถูก เมื่อเทียบกับการติดตั้งโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่มีราคาที่สูง และใช้เวลาในการติดตั้งนานกว่า ระบบสามารถสื่อสารได้ไกลหลายกิโลเมตรทราบเท่าที่อุปกรณ์ทั้งสองฝั่งอยู่บนเส้นทางสัญญาณที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง และกำลังในการส่งที่มากพอ

ความท้าทายในด้านการออกแบบระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงระหว่างภาคพื้นดินก็คือ การลดทอนเนื่องจากสภาพอากาศและการเคลื่อนไหวของสัญญาณ ซึ่งการลดทอนจากหมอกในอากาศส่งผลอย่างมากในช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มกำลังส่ง การใช้เส้นทางสำรอง หรือการติดตั้งระบบผสมระหว่างระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงและระบบการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ

อีกปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงเกิดจากการกระเจิงของแสง (Scintillation) หรือจากความแปรปรวนของสภาพอากาศ (Atmospheric Turbulent) ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราความผิดพลาดบิต มีความพยายามที่จะแก้ปัญหาเหล่านี้โดยหลายวิธีการได้แก่ การขยายช่องรับสัญญาณแสง การใช้การควบคุมอัตราขยายอัตโนมัติ (Automatic Gain Control) และการกู้คืนสัญญาณนาฬิกาด้วยเฟสล็อกกลุ๊ป อีกส่วนหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบก็คือการเข้ารหัสข้อมูล ในส่วนของสัญญาณรบกวนพื้นหลังซึ่งเกิดจากการถูกแสงอาทิตย์รบกวน จะมีผลกระทบต่อระบบที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้ตัวกรองความยาวคลื่นแสงกว้าง (Long-Pass Optical Filter) เพื่อปิดกั้นแสงในช่วงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 850 นาโนเมตร

อีกปัญหาหนึ่งในระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงระหว่างภาคพื้นดิน ก็คือความเสถียรของอุปกรณ์ในการชี้ตรงไปยังอุปกรณ์อีกฝั่งหนึ่ง ซึ่งปัญหานี้เกิดจากการแกว่งของอาคาร หรือการเคลื่อนไหวของตึกสูง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้ระบบการติดตามแบบแอ็กทีฟ (Actively-Tracked Systems) หรือการเพิ่มทัศนวิสัย (Field of View) ของภาครับให้รองรับการเคลื่อนที่ของลำแสง

#### 2.4.3 ระบบภายในอาคาร

การสื่อสารไร้สายผ่านแสงภายในอาคารจะใช้ระบบเดียวกับการสื่อสารไร้สายผ่านแสงระหว่างภาคพื้น แต่จะใช้แหล่งกำเนิดแสงในช่วงความยาวคลื่น 780 ถึง 950 นาโนเมตรแทนซึ่งมีราคาถูก อีกทั้งตัวตรวจจับแสงแบบโฟโตไดโอดความจุไฟฟ้าต่ำก็ยังคงตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในย่านนี้ได้เป็นอย่างดี ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของแสงอินฟราเรดก็คือไม่สามารถทะลุทะลวงกำแพงได้ จึงทำให้ระบบมีความปลอดภัย ระบบการสื่อสารอินฟราเรดภายในอาคารอยู่ภายใต้มาตรฐานที่ออกโดย Infrared

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

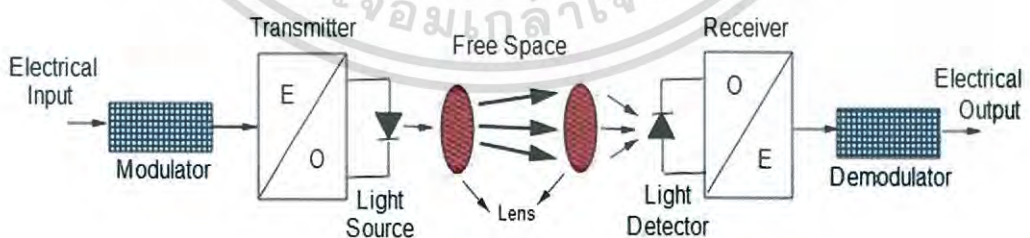
Data Association (IrDA) สำหรับการสื่อสารระยะสั้น ที่เป็นการสื่อสารสองทางครึ่งอัตรา (Half Duplex) ในเส้นทางสัญญาณที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง [10] - [13] รวมไปถึงมาตรฐาน Advance Infrared (AIr) โดย Hewlett-Packard และ IBM [14] - [15] และยังอยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.11 ในส่วนของชั้นกายภาพอินฟราเรด (Infrared Physical Layer) [16] การประยุกต์ใช้งานของระบบนี้จะถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์สำนักงาน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สิ่งอำนวยความสะดวกทางการแพทย์ รวมไปถึงโครงข่ายไร้สาย และการให้บริการสื่อประสมบรอดแบนด์ ระบบการสื่อสารอินฟราเรดภายในอาคารสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทคือ แบบลำแสงตรงหรือการสื่อสารปราศจากสิ่งกีดขวาง แบบฟุ้งกระจายหรือการสื่อสารแบบมีสิ่งกีดขวาง และระบบเซลลูลาร์อินฟราเรด

อีกหนึ่งเทคโนโลยีที่เข้ามามีบทบาทในปัจจุบันสำหรับการสื่อสารไร้สายผ่านแสงในอาคารก็คือ การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible Light Communication) ซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.7

## 2.5 พื้นฐานของระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสง [1]

### 2.5.1 ช่องสัญญาณในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง

ระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงประกอบสามารถอธิบายได้อย่างง่ายโดยรูปที่ 2.1 ในส่วนของภาคส่งประกอบไปด้วยจานสายอากาศแสงและทัศนอุปกรณ์ต่างๆ อีกทั้งยังประกอบไปด้วยเลนส์และอุปกรณ์ติดตามแสงเพื่อปรับระนาบของภาคส่งให้ตรงกับภาครับมากที่สุด ในส่วนของภาครับ จานสายอากาศแสงของภาครับจะมีเลนส์ที่ช่วยโฟกัสแสงไปยังตัวตรวจจับแสง กล้องโทรทรรศน์หนึ่งคู่เป็นอย่างน้อยถูกนำมาใช้กับเครื่องส่งรับสำหรับการสื่อสารระยะไกล โดยติดตั้งเลเซอร์และตัวตรวจจับแสงในกล้องโทรทรรศน์แต่ละตัว



รูปที่ 2.1 ช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายผ่านแสง [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 การแพร่กระจายของสัญญาณในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง

ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.3 ปัจจัยที่เป็นผลกระทบหลักของการสื่อสารไร้สายผ่านแสงคือ สภาพอากาศ ดังนั้นปัจจัยดังต่อไปนี้มีความจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสง เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพมากที่สุด

### 2.5.2.1 การรูดอกของลำแสง

ลำแสงที่ถูกส่งออกไปนั้นเกิดการรูดอกเนื่องจากการจัดกระจายของแสงที่ปลายสุดของภาคส่ง ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการที่ 2.1 [18]

$$\theta = \frac{\lambda}{D} \quad (2.1)$$

โดยที่

$\theta$  คือมุมที่แผ่ออกไป (Deg / Rad)

$\lambda$  คือความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง (m)

$D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสง (m)

โดยทั่วไปการรูดอกของแสงในระบบการสื่อสารทางแสงไร้สาย จะถูกสร้างให้มีค่ามากกว่าขอบเขตของการจัดกระจายแสง ซึ่งจะดูจากทัศนพิสัยของภาครับ เพื่อให้แสงที่ตกกระทบที่ภาครับมีขนาดใหญ่กว่ากล้องโทรทรรศน์เสมอ ทำให้ง่ายต่อการวางระยะระหว่างภาครับและภาคส่งในแต่ละแกน เมื่อภาครับส่งเกิดการขยับที่เล็กน้อย จะทำให้การรูดอกของลำแสงมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 มิลลิเรเดียน รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียเนื่องจากการรูดอกของลำแสง



รูปที่ 2.2 การสูญเสียเนื่องจากการรูดอกของลำแสง [17]

### 2.5.2.2 การสูญเสียจากชั้นบรรยากาศ

การสูญเสียจากชั้นบรรยากาศเกิดจาก 2 ปรากฏการณ์คือ การดูดกลืนของแสง และการจัดกระจายของแสง โดยการดูดกลืนของแสงนั้น เกิดจากแสงที่ถูกส่งออกไปถูกแปลงเป็นพลังงานเนื่องจากอนุภาคในบรรยากาศในการดูดซับพลังงานจากโฟตอนของสัญญาณแสง จึงทำให้พลังงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณแสงลดลง ส่วนการกระจัดกระจายของแสง ไม่ได้ทำให้พลังงานของสัญญาณแสงลดลง แต่จะทำให้เกิดแผ่ฟุ้งของสัญญาณแสงกระจายไปตามทิศทางต่างๆ ซึ่งเกิดจากแสงไปกระทบกับอนุภาคบางชนิดในบรรยากาศ ซึ่งทำให้ปริมาณแสงที่ตกกระทบภาครับลดลง ก่อให้เกิดการลดทอนของพลังงานที่ภาครับ การกระจัดกระจายของแสงสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทได้แก่ การกระจัดกระจายแบบเรย์เลห์ (Rayleigh Scattering) เกิดเมื่อแสงกระทบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง ซึ่งก็ให้เกิดการกระจัดกระจายของแสงเล็กน้อย การกระจัดกระจายแบบมี (Mie Scattering) เกิดเมื่อแสงตกกระทบอนุภาคในบรรยากาศมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสง และการกระจัดกระจายแบบที่ไม่นำมาพิจารณา (Non-Selective Scattering) ซึ่งเกิดจากการตกกระทบของแสงบนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นมากๆ

การสูญเสียในชั้นบรรยากาศสามารถอธิบายด้วยกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ดังสมการที่ (2.2) [19]

$$T(z) = \frac{I_z}{I_0} = e^{-\gamma(\lambda)z} \quad (2.2)$$

โดยที่

$T(z)$  คือสัมประสิทธิ์การส่งสัญญาณในรูปฟังก์ชันของระยะทาง  
 $z$  คือระยะทางระหว่างภาครับและภาคส่ง ( $m$ )  
 $\frac{I_z}{I_0}$  คืออัตราส่วนของความเข้มแสงที่ระยะ  $z$  ต่อความเข้มแสงที่แหล่งกำเนิด  
 $\gamma(\lambda)$  คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน ( $m^{-1}$ ) ในรูปฟังก์ชันของความยาวคลื่น ประกอบไปด้วยผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนจากการดูดกลืนและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนจากการกระจัดกระจายของแสง ดังแสดงในสมการ (2.3)

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad (2.3)$$

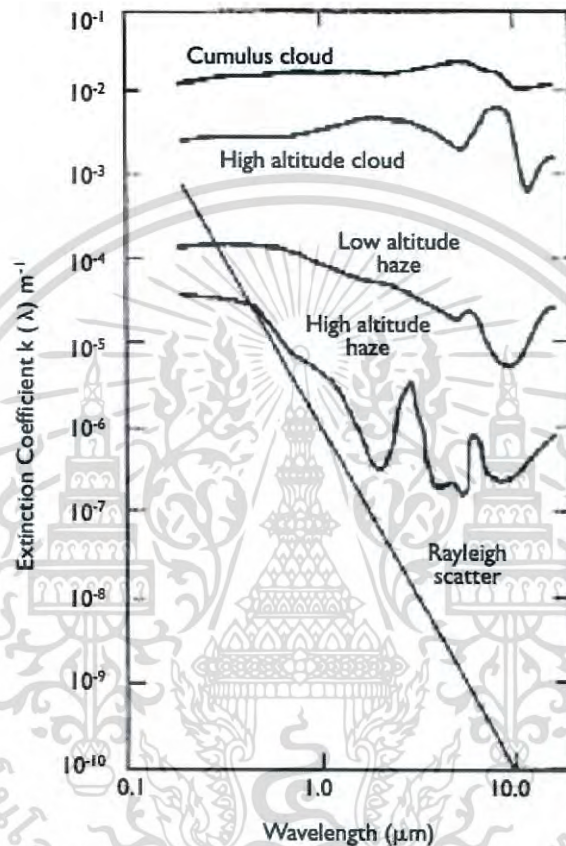
โดยที่

$\alpha_m$  คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากการดูดกลืนคลื่นแสงจากโมเลกุลในอากาศ ( $m^{-1}$ )  
 $\alpha_a$  คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากการดูดกลืนคลื่นแสงจากละอองในอากาศ ( $m^{-1}$ )  
 $\beta_m$  คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากการกระจัดกระจายของแสงจากโมเลกุลในอากาศ ( $m^{-1}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\beta_a$  คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากการกระจัดกระจายของแสงจากละอองในอากาศ ( $m^{-1}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนในแบบต่าง ต่อความยาวคลื่นแสงต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่อความยาวคลื่นแสง [20]

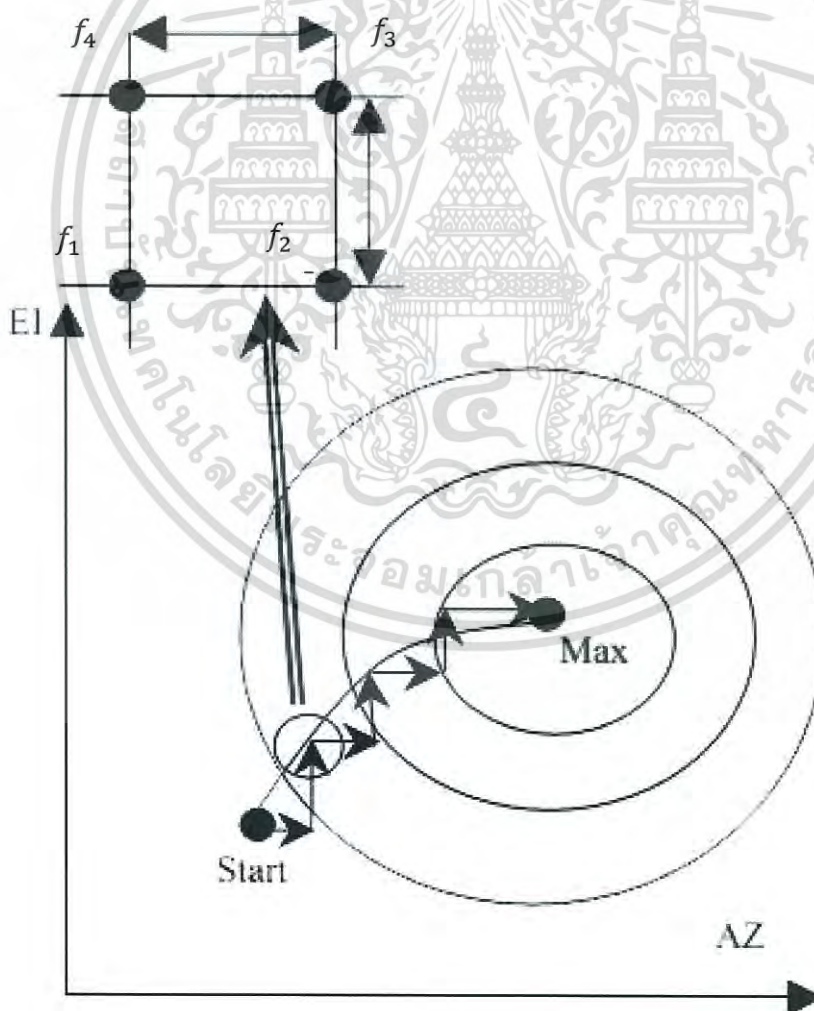
## 2.6 กระบวนการติดตามแสง [21] - [22]

ตั้งเนื้อหาที่ได้กล่าวมาใน 2.3 และ 2.4 หนึ่งในวิธีการแก้ปัญหาในด้านความน่าเชื่อถือของช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายผ่านแสงก็คือการใช้อุปกรณ์ติดตามแสง เพื่อให้ภาครับส่ง สามารถส่งและรับข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งการที่จะทำให้อุปกรณ์ติดตามแสงทำงานได้เป็นอย่างดี การศึกษากระบวนการติดตามแสงจึงมีความจำเป็น ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงกระบวนการติดตามแสง ซึ่งผู้วิจัยจะได้นำเสนอกระบวนการติดตามแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย

### 2.6.1 กระบวนการติดตามแบบสเต็ป

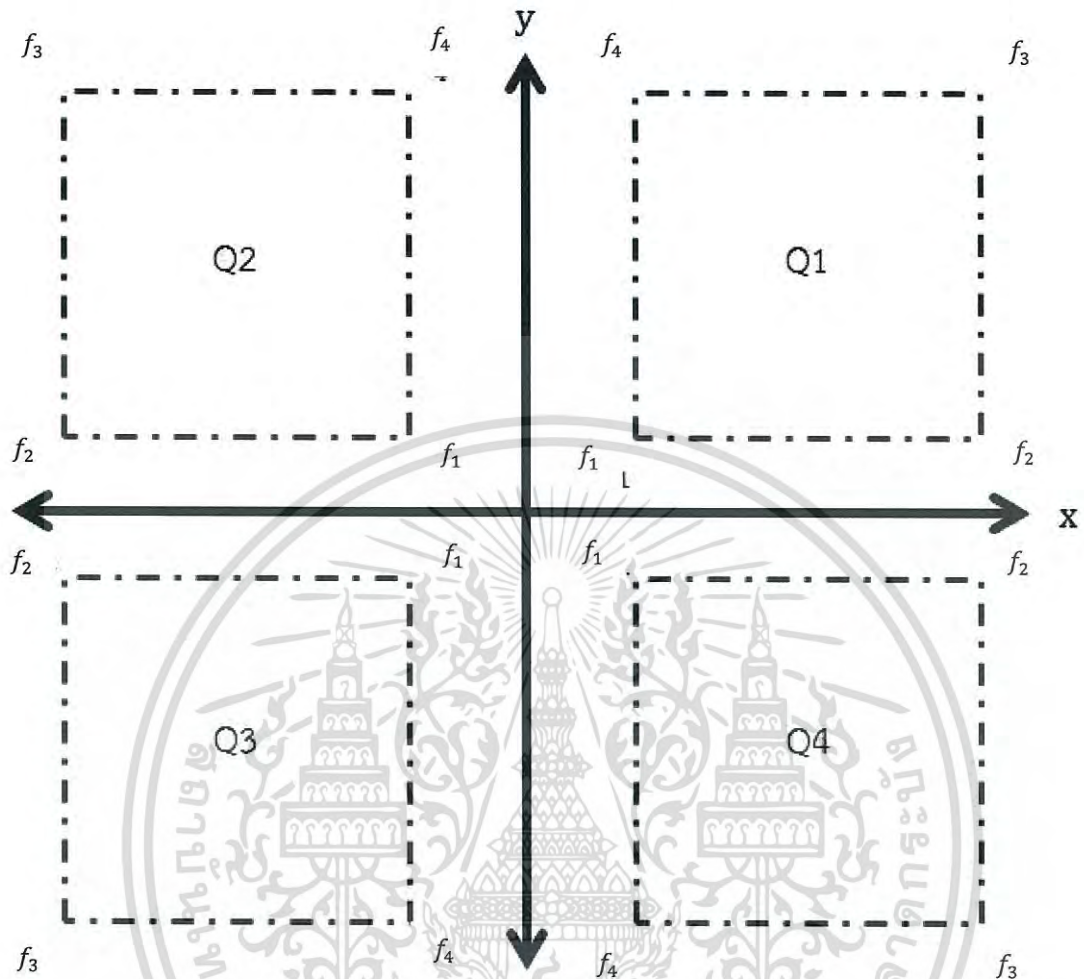
กระบวนการติดตามแบบสเต็ป (Step Track Algorithm) เป็นกระบวนการติดตามที่มีการใช้โดยทั่วไปในงานสายอากาศคลื่นวิทยุขนาดกลาง กระบวนการนี้จะใช้ระดับความเข้มของสัญญาณเป็นสัญญาณอ้างอิง มีความง่ายต่อการออกแบบด้วยราคาที่ถูก [23] กระบวนการติดตามแบบสเต็ปสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมและนำมาใช้ในวิทยุวิจัยนี้คือ กระบวนการเกรเดียนต์ (Gradient Method)

กระบวนการเกรเดียนต์ใช้การค้นหาเกรเดียนต์สูงสุด (Maximum Gradient Searching) ทิศทางการเคลื่อนที่ในกระบวนการนี้มี 2 แบบคือ Steepest Ascent และ Steepest Descent [24] ทิศทางแรกบ่งบอกถึงทิศทางเข้าหาเกรเดียนต์ อีกทิศทางหนึ่งคือทิศทางตรงกันข้าม การกำหนดทิศทางในการเคลื่อนที่สามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 2.4 โดยการวัดเกรเดียนต์ในขอบเขตการค้นหา ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 กระบวนการเกรเดียนต์ [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ขอบเขตการค้นหา [21] - [22]

รูปที่ 2.5 ขอบเขตการค้นหาในแต่ละจตุภาค ซึ่งขึ้นอยู่กับทิศทางของเกรเดียนต์ ซึ่งสามารถอธิบายโดยสมการที่ 2.4 ถึง 2.7

$$f_1 = f(x, y) \quad (2.4)$$

$$f_2 = f(x + \Delta x, y) \quad (2.5)$$

$$f_3 = f(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (2.6)$$

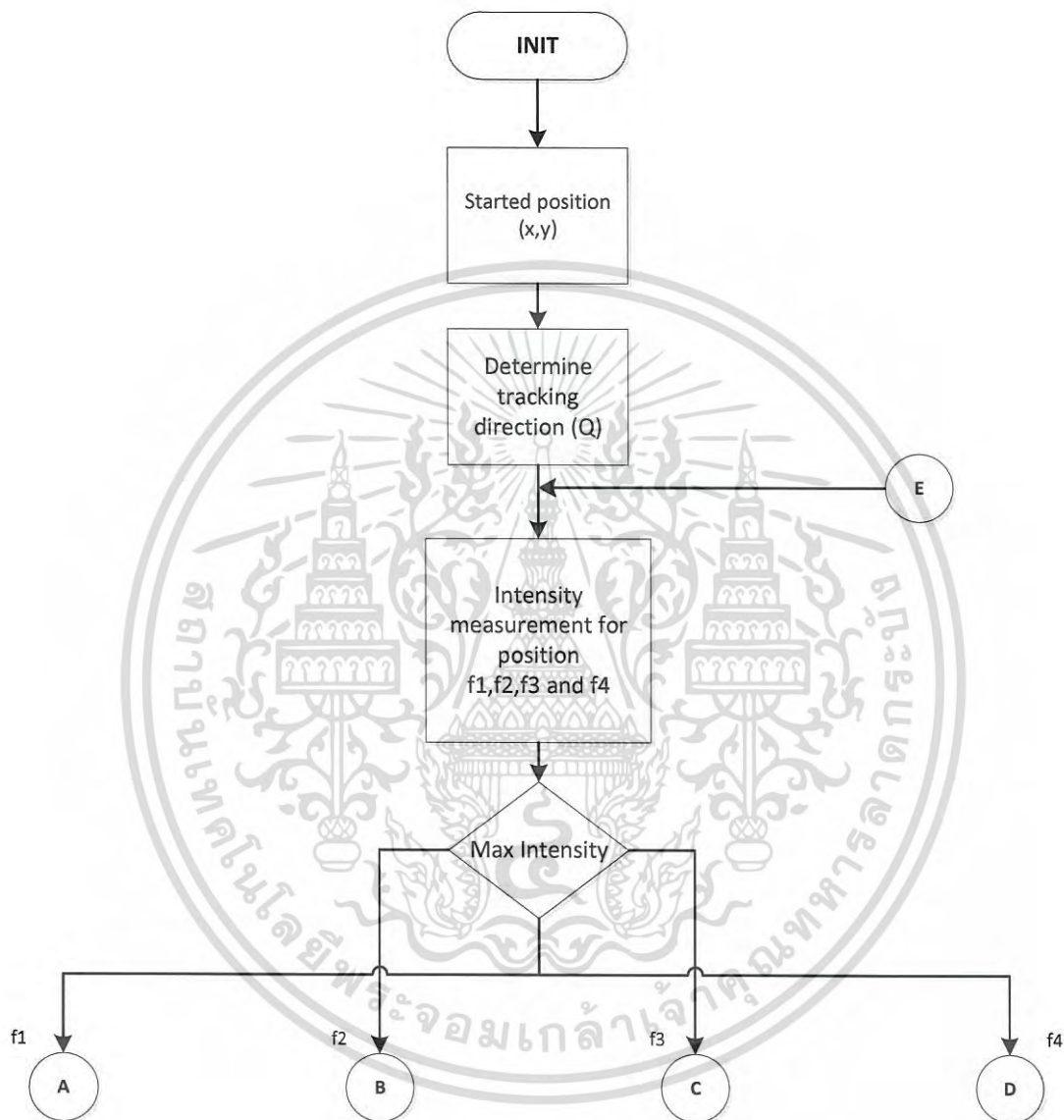
$$f_4 = f(x, y + \Delta y) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	$f_1$	คือค่าสัญญาณที่วัดได้จากจุดเริ่มต้นของขอบเขตการค้นหา
	$f_2$	คือค่าสัญญาณที่วัดได้จากจุดค้นหาในระนาบแกน X
	$f_3$	คือค่าสัญญาณที่วัดได้จากจุดค้นหาในระนาบแกน X และแกน Y
	$f_4$	คือค่าสัญญาณที่วัดได้จากจุดค้นหาในระนาบแกน X
	$\Delta x$	คือค่าความละเอียด (Resolution) ของการค้นหาตำแหน่ง ในแนวแกน X
	$\Delta y$	คือค่าความละเอียด (Resolution) ของการค้นหาตำแหน่ง ในแนวแกน Y

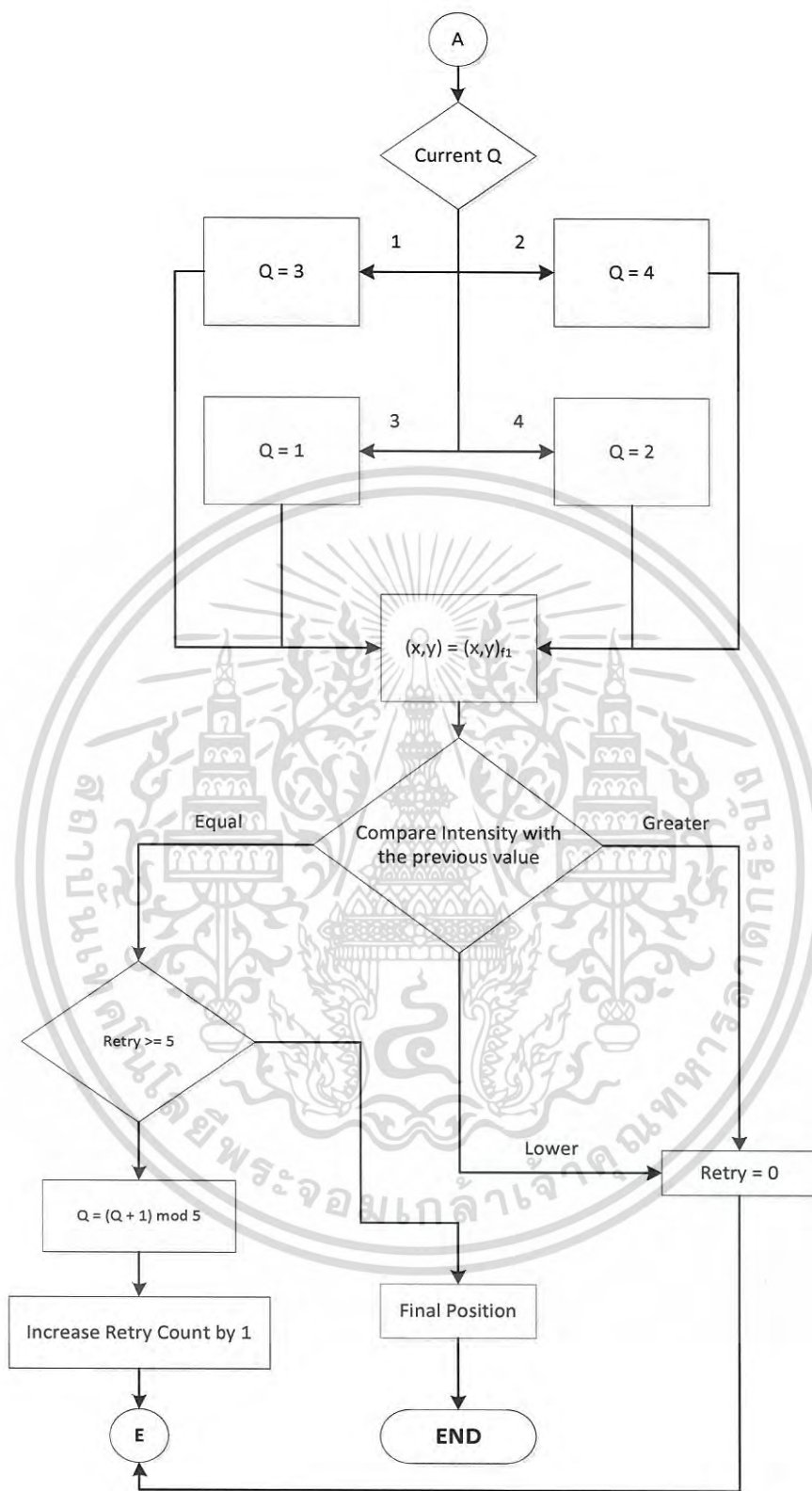
เมื่อได้ตำแหน่งที่มีค่าเกรเดียนต์มากที่สุดระบบจะเลื่อนอุปกรณ์ รับ - ส่ง สัญญาณไปยังตำแหน่งนั้นและจะทำการค้นหาตำแหน่งไปจนกว่าจะพบตำแหน่งที่มีค่าเกรเดียนต์สูงสุด โดยสามารถอธิบายกระบวนการของระบบได้ตามรูปที่ 2.6 ถึงรูปที่ 2.10 โดยรูปที่ 2.6 แสดงถึงจุดเริ่มต้นของกระบวนการติดตามแบบสแต็ป ส่วนรูปที่เหลือแสดงถึงกระบวนการติดตามแบบสแต็ปในจุดภาคต่างๆ

ความเร็วในการค้นหาตำแหน่งจะผูกพันกับค่าความละเอียดของการค้นหาตำแหน่ง หมายความว่าเพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุดในการหาตำแหน่ง ระบบจะมีความละเอียดในการค้นหาตำแหน่งต่ำสุด ทั้งนี้การจะกำหนดค่าความเร็วและความละเอียดจะขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสาร รวมไปถึงอุปกรณ์ปรับระนาบ



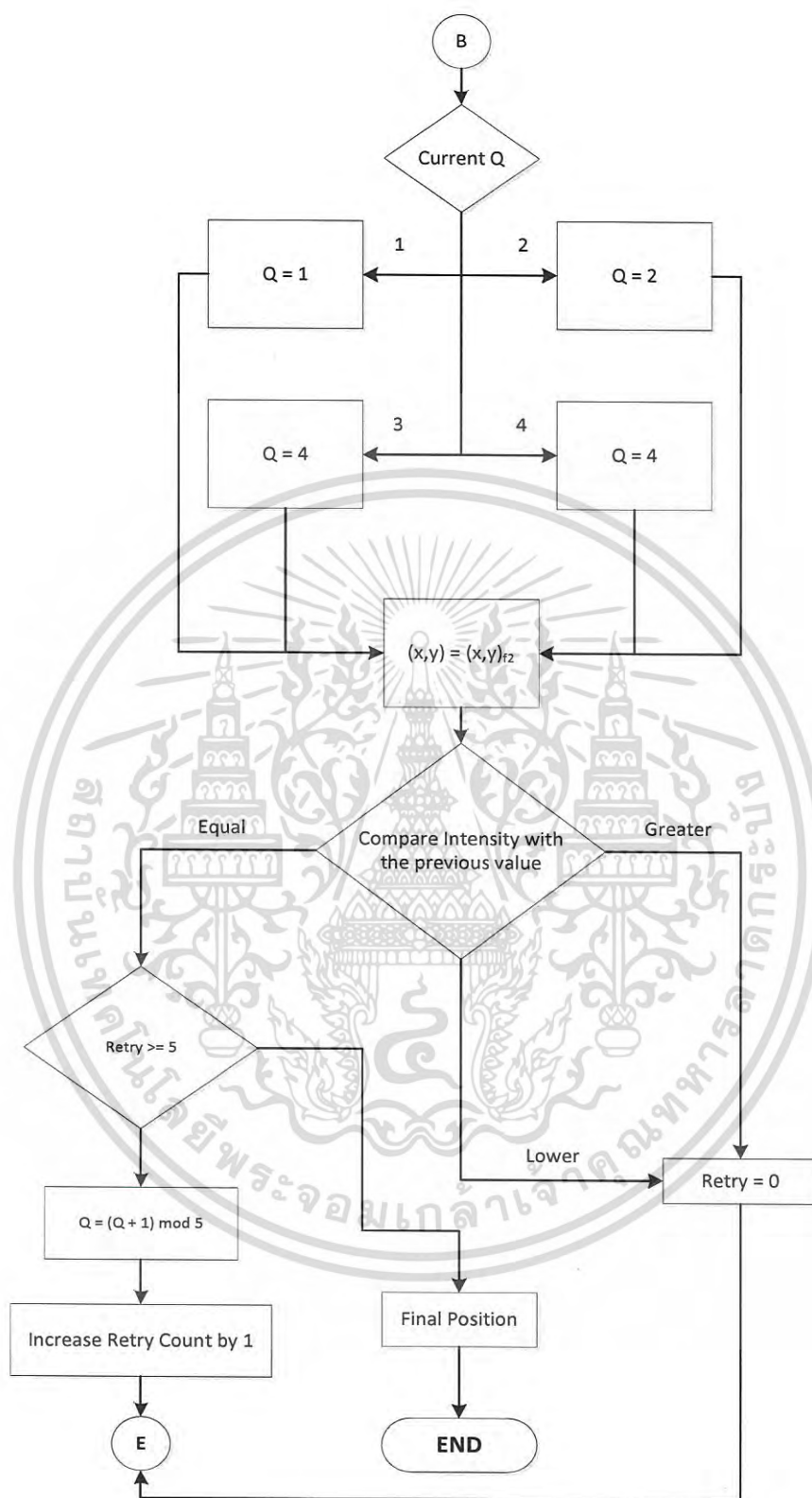
รูปที่ 2.6 กระบวนการค้นหาแบบเกรเดียนต์ (1) [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



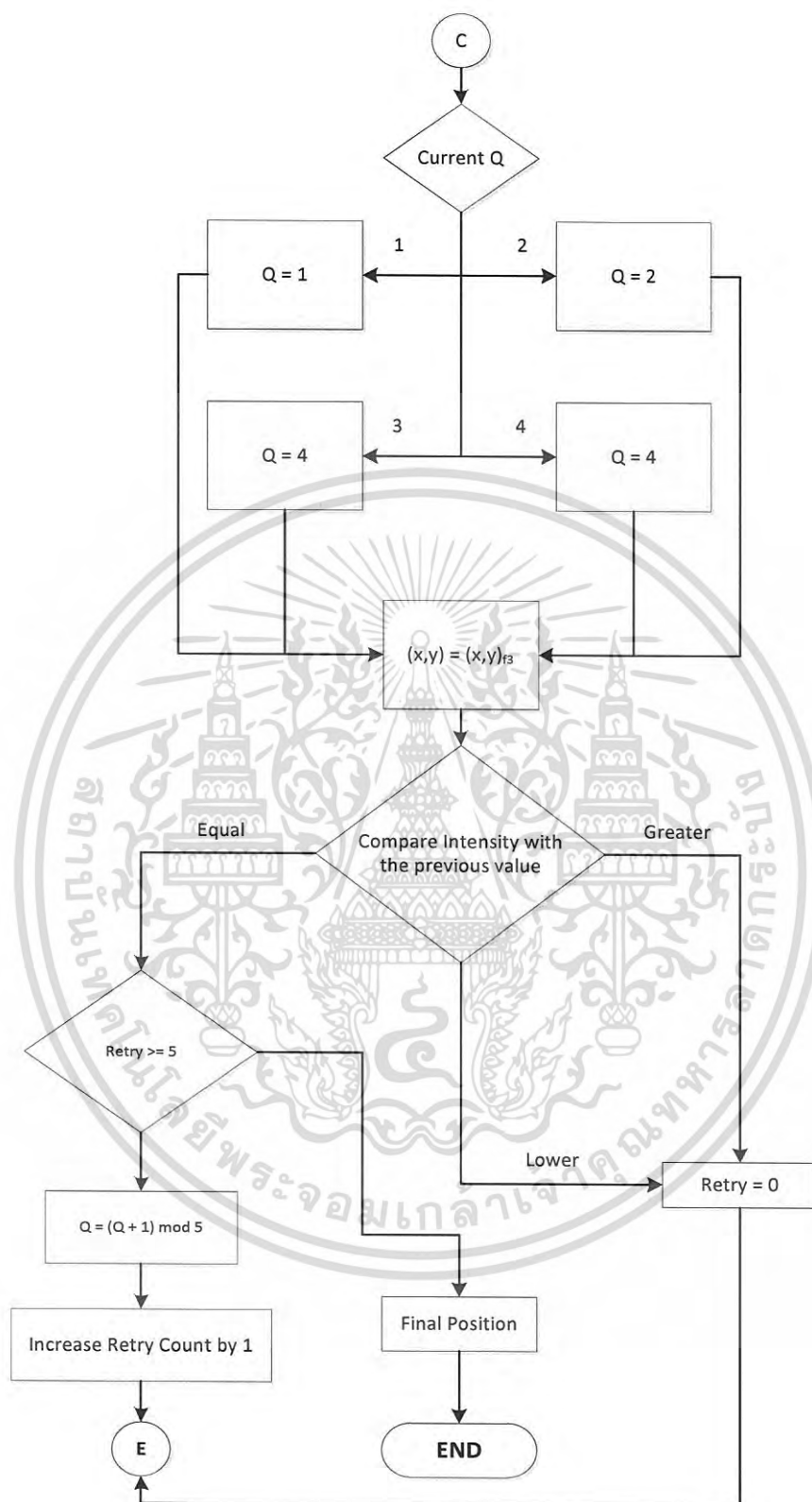
รูปที่ 2.7 กระบวนการค้นหาแบบเกรเดียนต์ (2) [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



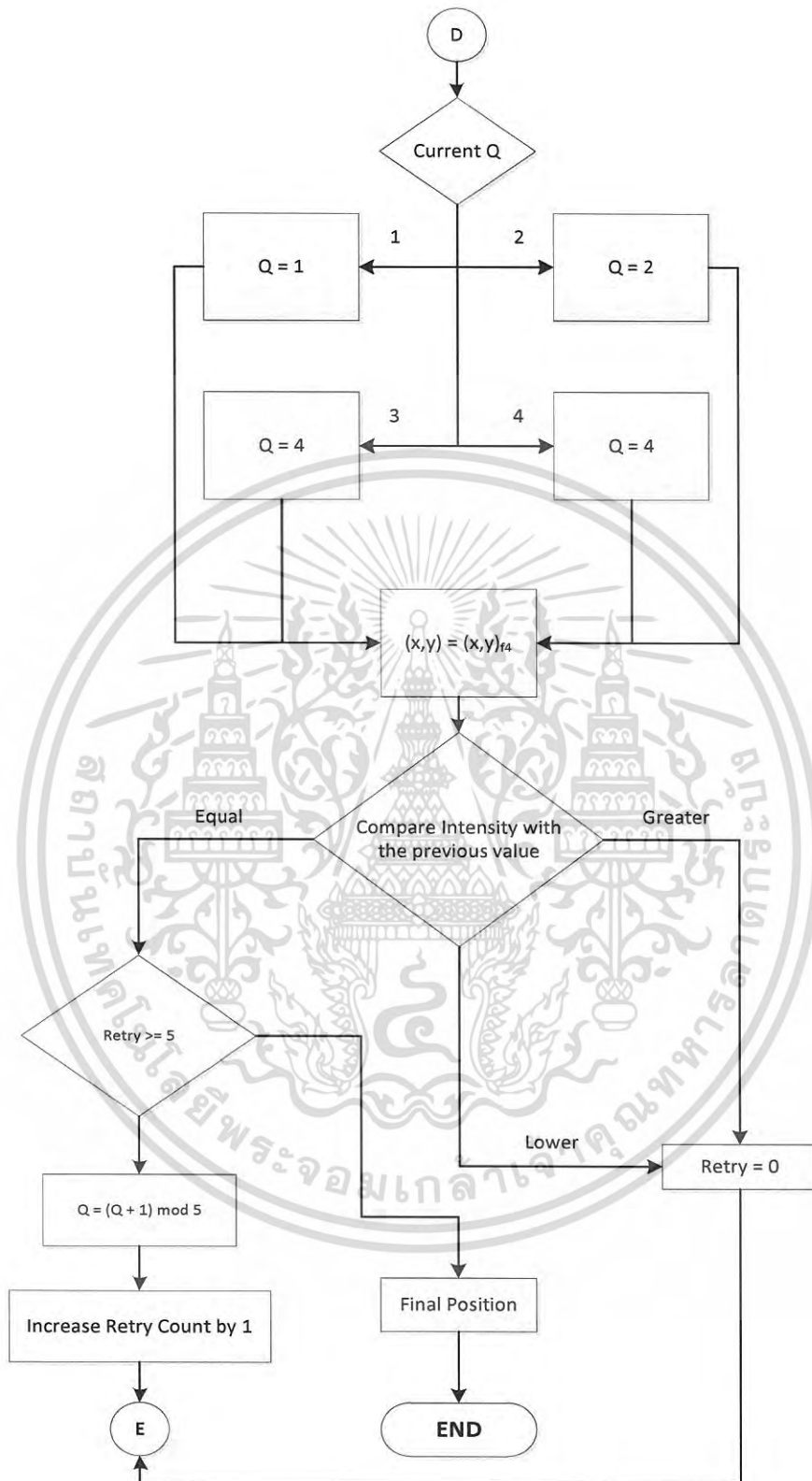
รูปที่ 2.8 กระบวนการค้นหาแบบเกรเดียนต์ (3) [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กระบวนการค้นหาแบบเกรเดียนต์ (4) [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 กระบวนการค้นหาแบบเกรเดียนต์ (5) [21]

## 2.6.2 กระบวนการติดตามโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค

กระบวนการติดตามโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค ใช้วิธีการวัดความคลาดเคลื่อนของมุมในแต่ละแกน (Axis Error Measurement) ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนมุมมาจากมุมของสัญญาณแสงที่ภาครับซึ่งตกกระทบตัวตรวจจับแสงในแต่ละจตุภาค ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนมุมนี้จะถูกนำไปใช้ในการปรับระนาบของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายผ่านแสง โดยสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 2.7 ถึงสมการที่ 2.9 [25] - [26]

$$E_x = ((S_A + S_D) - (S_B + S_C)) / \Sigma S \quad (2.7)$$

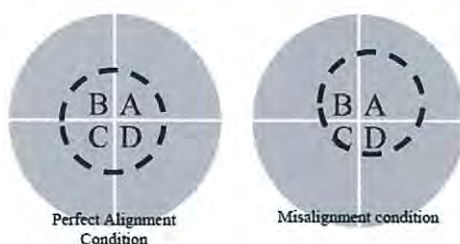
$$E_y = ((S_A + S_B) - (S_C + S_D)) / \Sigma S \quad (2.8)$$

$$\Sigma S = (S_A + S_B + S_C + S_D) \quad (2.9)$$

เมื่อ

- $S_A$  คือค่าสัญญาณที่วัดได้จากจตุภาคที่ 1
- $S_B$  คือค่าสัญญาณที่วัดได้จากจตุภาคที่ 2
- $S_C$  คือค่าสัญญาณที่วัดได้จากจตุภาคที่ 3
- $S_D$  คือค่าสัญญาณที่วัดได้จากจตุภาคที่ 4
- $E_x$  คือค่าความคลาดเคลื่อนแบบลดรูปในแกน X
- $E_y$  คือค่าความคลาดเคลื่อนแบบลดรูปในแกน Y
- $\Sigma S$  คือค่าผลรวมของสัญญาณที่วัดได้จากทุกจตุภาค

ในกรณีที่มีการวางระนาบสมบูรณ์  $E_x$  และ  $E_y$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าเกิดความคลาดเคลื่อนในแกนใดแกนหนึ่งเป็นอย่างน้อย การปรับระนาบจะเริ่มขึ้นดังรูปที่ 2.11

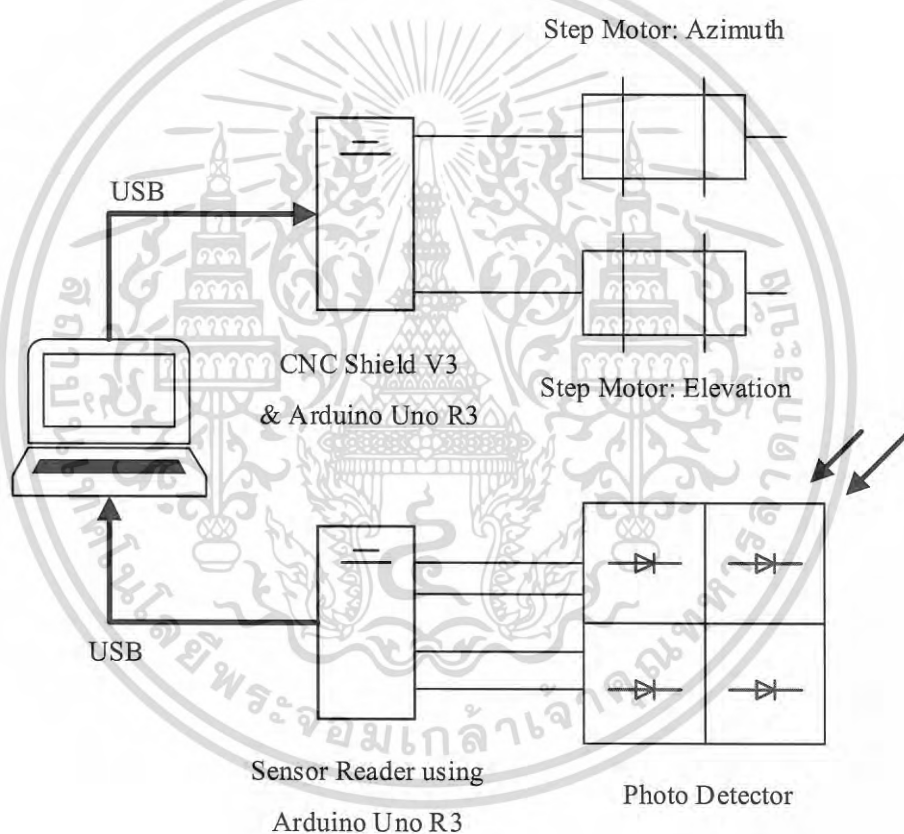


รูปที่ 2.11 ตำแหน่งของตัวตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค [25]

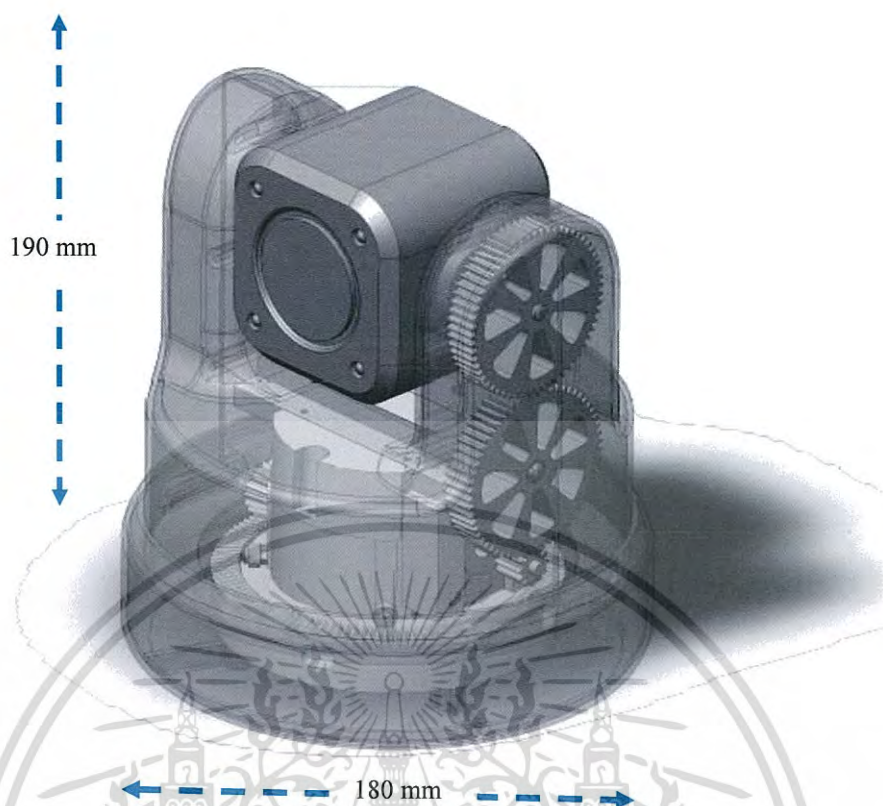
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 อุปกรณ์ต้นแบบเพื่อทดลองกระบวนการติดตามแสง

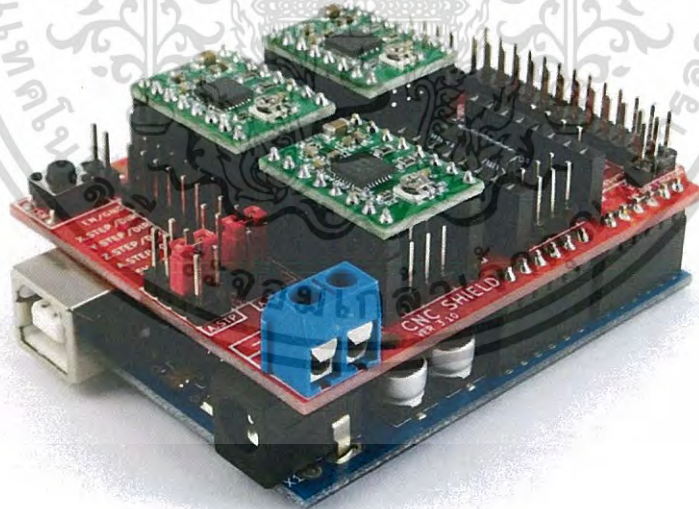
ผู้วิจัยได้พัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ปรับระนาบตามแสง เพื่อทำการทดลองกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง โดยใช้สเต็ปมอเตอร์จำนวน 2 ตัวในการปรับระนาบแกนนอน และระนาบแกนตั้ง ซึ่งจะถูกรักษาควบคุมโดยชุดควบคุมสำหรับเครื่องควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูอิโน อูโน รุ่นที่ 3 (CNC Shield V3 for Arduino Uno) โดยรับคำสั่งจากพอร์ตอนุกรมด้วยสาย USB ควบคุมโดยโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ ซึ่งรับค่าความเข้มแสงจากอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่ถูกแปลงค่าจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูอิโน อูโน ส่งสัญญาณผ่านพอร์ตอนุกรม ด้วยสาย USB แสดงดังรูปที่ 2.12 ถึง 2.19



รูปที่ 2.12 โครงสร้างการส่ง-รับข้อมูลของอุปกรณ์ต้นแบบในการวิจัย

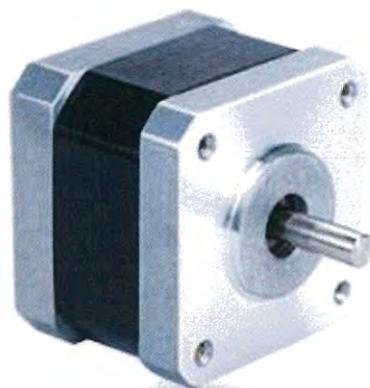


รูปที่ 2.13 แบบร่างอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง

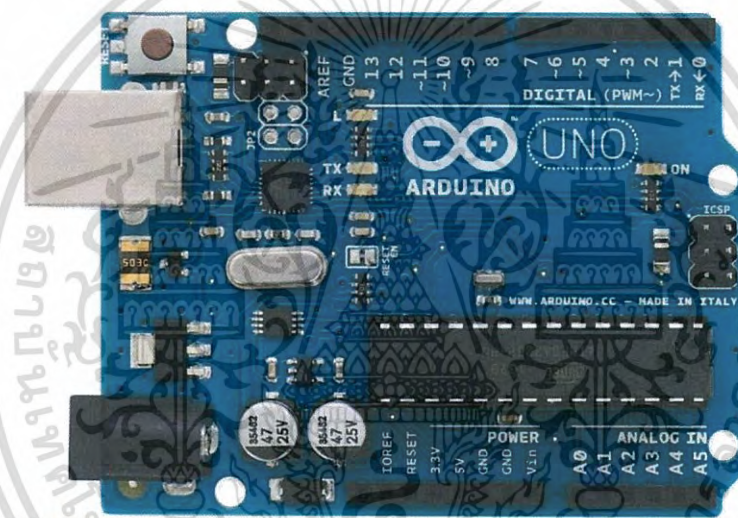


รูปที่ 2.14 บอร์ด CNC Shield V3 for Arduino Uno [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



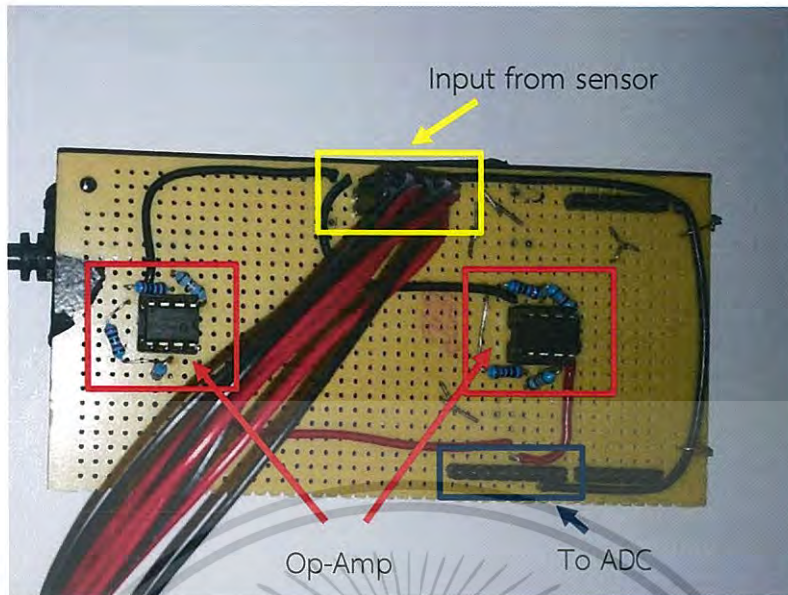
รูปที่ 2.15 มอเตอร์แบบสเต็ป [28]



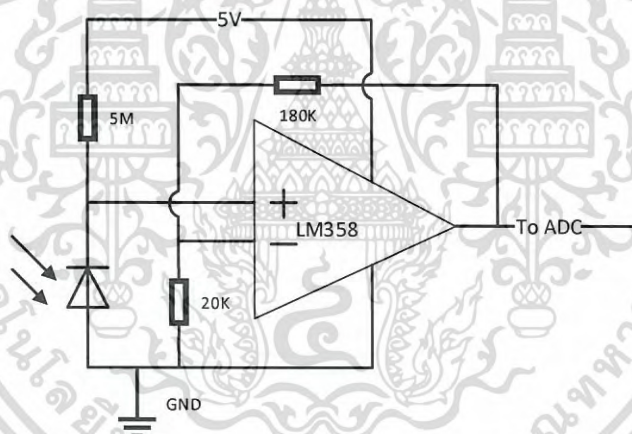
www.pololu.com

รูปที่ 2.16 บอร์ด Arduino Uno R3 [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



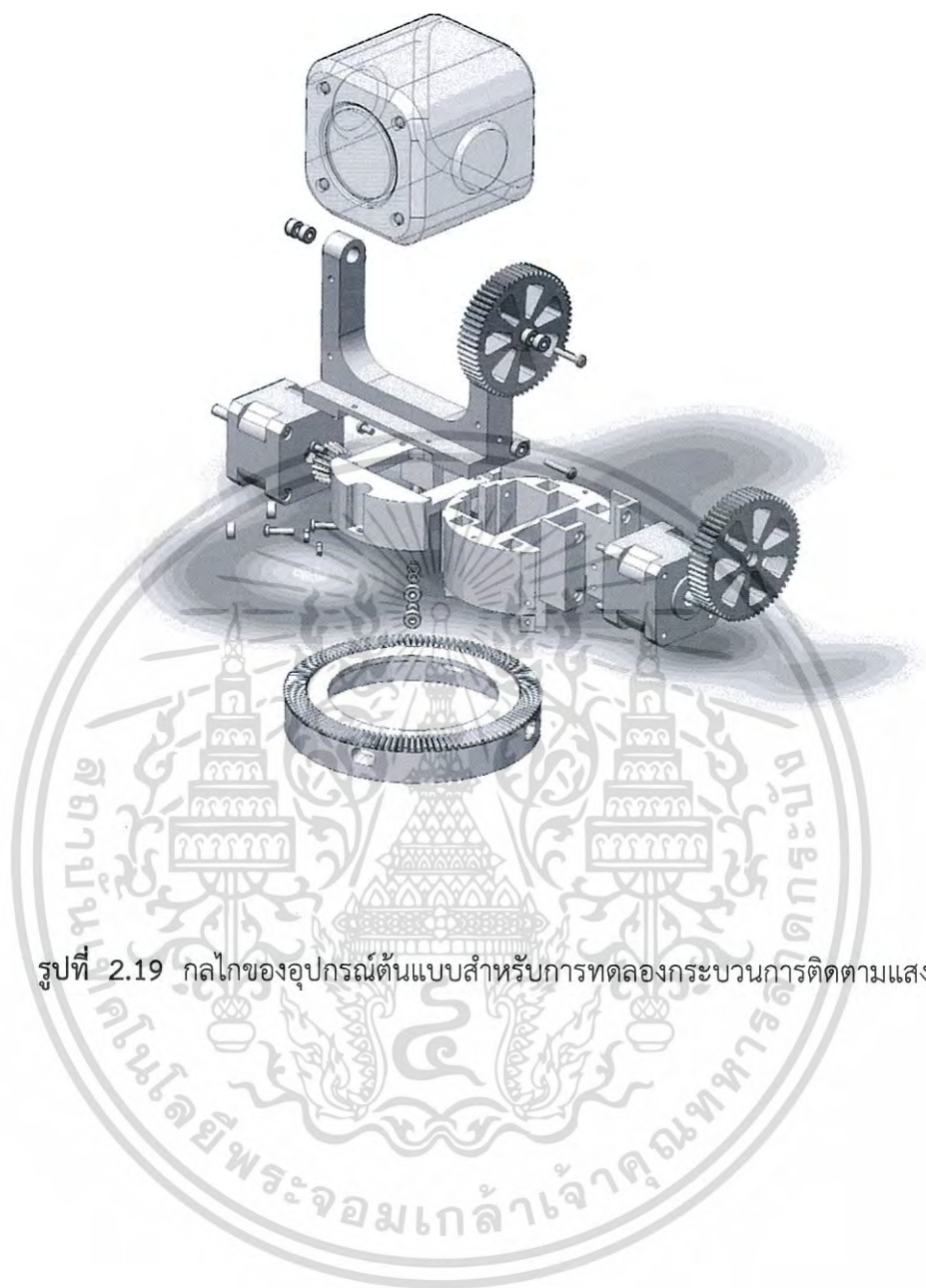
รูปที่ 2.17 บอร์ดภาคขยายสำหรับตัวตรวจจับแสง



รูปที่ 2.18 ตัวตรวจจับแสงและวงจรขยายสัญญาณแบบ ไม่กลับทิศ (Non-Inverting Amplifier)

ในส่วนตัวตรวจจับแสงทางผู้วิจัยได้เลือกตัวตรวจจับแสงแบบ SFH203P เนื่องจากมีความไวต่อแสงและความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณสูงโดยมีวงจรดังรูปที่ 2.18 ในส่วนกลไกของอุปกรณ์ต้นแบบจะแสดงดังรูปที่ 2.19 กลไกมีอัตราทดเฟืองสำหรับการหมุนในแนวราบเท่ากับ 18 ต่อ 120 และอัตราทดเฟืองสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเท่ากับ 1 ต่อ 5 มอเตอร์แบบสเต็ปมีความละเอียดในการหมุนเท่ากับ 0.1125 องศาต่อสเต็ป เมื่อรวมกับอัตราทดเฟืองแล้วจะได้ความละเอียดในการหมุนในแนวราบเท่ากับ 0.016875 องศาต่อสเต็ป และ 0.0225 องศาต่อสเต็ปในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 กลไกของอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองกระบวนกรติดตามแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# ขั้นตอนการทดลองวิจัย

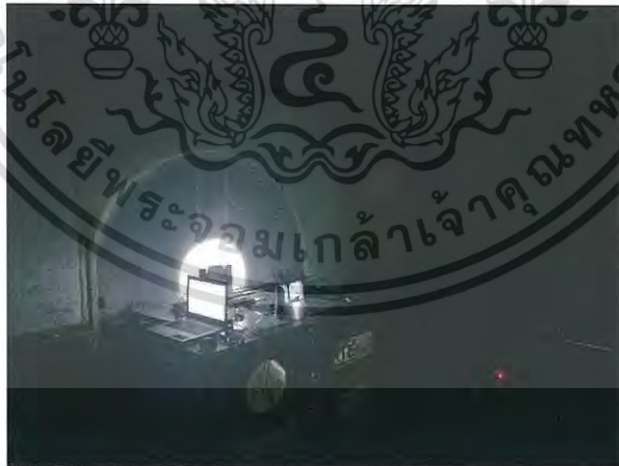
### 3.1 กล่าวนำ

บทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงขั้นตอนของการทดลองวิจัย การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง โดยการใช้กระบวนการติดตามแบบสแต็ป กระบวนการติดตามแบบใช้ตัวตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค และการปรับระนาบแบบไม่มีกระบวนการติดตาม (ใช้การปรับระนาบที่ละระนาบจนกระทั่งพบตำแหน่งที่มีความเข้มของสัญญาณมากที่สุด) ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงการวิจัย คือช่วงที่ 1 เป็นการทดลองกระบวนการติดตามแสงโดยใช้แบบจำลองในการคำนวณ และช่วงที่ 2 เป็นการทดลองกระบวนการติดตามแสง โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบ

### 3.2 การทดลองวิจัย

#### 3.2.1 สภาพแวดล้อมในการทดลองวิจัย

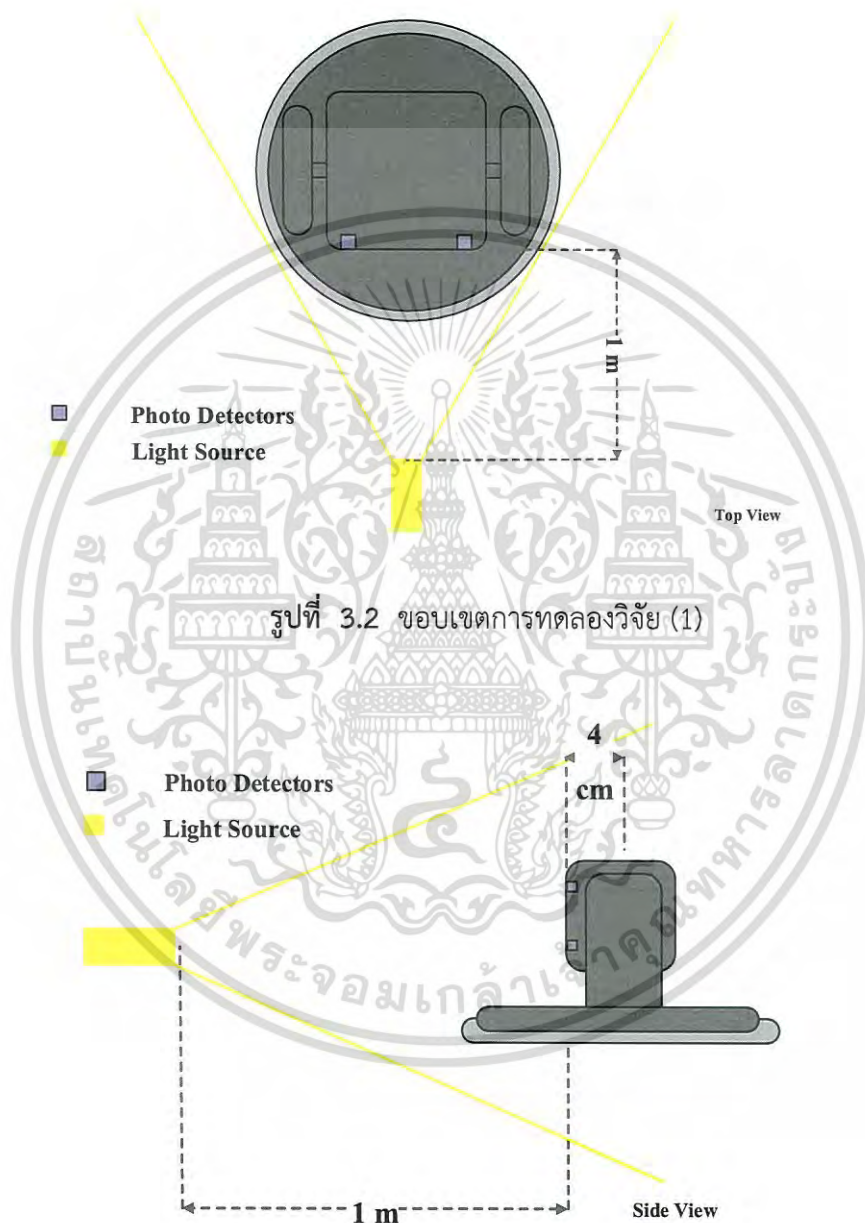
ผู้วิจัยได้ทดลองกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง คือภายในห้อง E12-911 ซึ่งเป็นห้องทึบแสงในอาคารเรียน 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังโดยทดลองในสภาวะไร้แสงรบกวน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองกระบวนการติดตามแสง ในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง

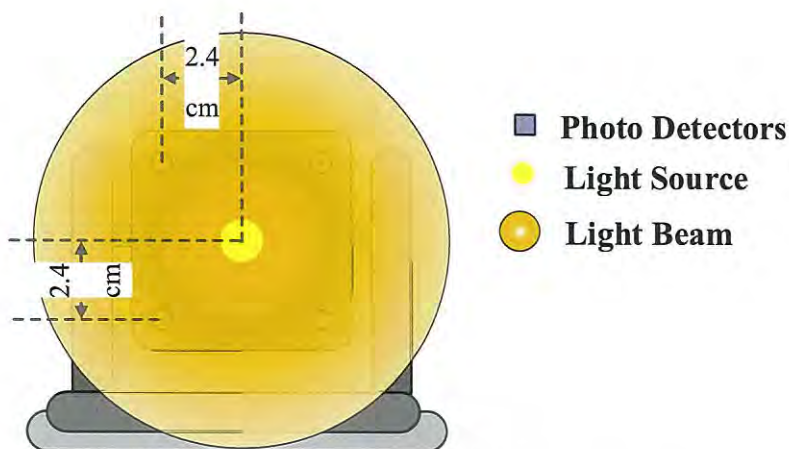
### 3.2.2 ขอบเขตการทดลองวิจัย

การทดลองวิจัยนี้ผู้ทดลองได้กำหนดระยะของแหล่งกำเนิดแสงไว้ ซึ่งห่างจากอุปกรณ์ต้นแบบเป็นระยะ 1 เมตรตั้งฉากกับอุปกรณ์ตรวจจับแสงทั้งในระนาบแนวนอน และระนาบแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ขอบเขตการทดลองวิจัย (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ขอบเขตการทดลองวิจัย (3)

ซึ่งขอบเขตการทดลองนี้จะใช้ทั้งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 และการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้คือ หลอดแอลอีดีที่ให้ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 1025 วัตต์ต่อตารางเมตร ( $W/m^2$ ) ซึ่งมาจากการวัดค่าด้วยเครื่องวัดค่าการส่องสว่าง (Lux Meter) แล้วแปลงเป็นค่าความเข้มแสง ตามสมการที่ 3.1 [30] มีมุมลู่ออกประมาณ 16.699 องศาับจากจุดศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดแสง โดยวัดเฉพาะลำแสงตรง (Direct Light Beam) ในการทดลองกระบวนการติดตามแบบสแต็ปและการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามแสงจะใช้ค่าผลรวมของความเข้มแสงจากตัวตรวจจับแสงทั้ง 4 ตัว และในการทดลองกระบวนการติดตามแสงแบบใช้ตัวตรวจจับแสงวางใน 4 จตุภาคจะใช้ค่าความเข้มแสงของแต่ละตัวตรวจจับแสง เพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละระนาบ ตามสมการที่ 2.7 ถึง 2.9

$$I = E_v / \eta \quad (3.1)$$

โดยที่

$I$	คือค่าความเข้มแสง ( $W/m^2$ )	
$E_v$	คือค่าความส่องสว่าง ( $lx$ )	
$\eta$	คือค่าประสิทธิภาพการส่องสว่าง ( $lm/W$ )	ซึ่งมีค่าประมาณ 30-90 ( $lm/W$ ) สำหรับหลอดแอลอีดี ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้ค่าเฉลี่ย (60 ( $lm/W$ )) ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ตำแหน่งทดสอบ

ในการทดลองวิจัยกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง ผู้วิจัยจะทำการทดลองกระบวนการติดตามแสงในตำแหน่งต่างๆ โดยทำการหมุนอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองไปยังมุมตั้งต้นต่างๆ เพื่อใช้กระบวนการติดตามแสงในการปรับระนาบของอุปกรณ์ให้กลับมาสู่ตำแหน่งที่มีค่าความเข้มแสงมากที่สุด ซึ่งผู้ทดลองกำหนดให้จุดตั้งต้นของอุปกรณ์ซึ่งตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดแสงในทั้ง 2 ระนาบมีค่ามุมในแนวราบและแนวตั้งเท่ากับ  $(0,0)$  องศา เมื่ออุปกรณ์ทดลองหมุนไปทางขวาหรือหมุนขึ้นด้านบน ค่ามุมในแนวราบหรือแนวตั้งจะมีค่าเป็นบวกตามลำดับ และมีค่าติดลบในทิศตรงกันข้าม โดยตำแหน่งทดลองเป็นไปดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งเริ่มต้นในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

ID	Position (Degree)	
	Azimuth	Elevation
1	-15	-15
2	-15	0
3	-15	15
4	-30	-30
5	-30	0
6	-30	30
7	0	-15
8	0	-30
9	0	15
10	0	30
11	15	-15
12	15	0
13	15	15
14	30	-30
15	30	0
16	30	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งเริ่มต้นในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

ID	Position (Degree)	
	Azimuth	Elevation
1	0	15
2	0	30
3	0	-15
4	0	-30
5	15	0
6	15	15
7	15	-15
8	30	0
9	30	30
10	30	-30
11	-15	0
12	-15	15
13	-15	-15
14	-30	0
15	-30	30
16	-30	-30

#### 3.2.4 การเก็บข้อมูล

ในการทดลองวิจัยทั้งในช่วงที่ 1 และในช่วงที่ 2 จะทำการเก็บข้อมูลอยู่ในรูปไฟล์ข้อความ ซึ่งข้อมูลที่เก็บสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 ซึ่งในตารางที่ 3.4 จำนวนสแต็ปของการหมุนในแต่ละระนาบสามารถแปลงเป็นมุมได้โดยใช้อัตราทดของเฟืองดังอธิบายในหัวข้อที่ 2.7

ตารางที่ 3.3 รูปแบบการเก็บข้อมูลสำหรับการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

Time (hh:mm:ss)	Azimuth (Degree)	Elevation (Degree)	ET	EX	EY	Loop#
Time 0	AZ0	EL0	0	0	0	0
Time 1	AZ1	EL1	ET1	EX1	EY1	1
Time 2	AZ2	EL2	ET2	EX2	EY2	2
...	...	...	...	...	...	...
Time n	AZn	ELn	ETn	EXn	EYn	n

ตารางที่ 3.4 รูปแบบการเก็บข้อมูลสำหรับการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

Time (hh:mm:ss)	Azimuth (Step)	Elevation (Step)	A	B	C	D	ET	EX* ET	EY* ET	EX	EY
Time 0	AZ0	EL0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Time 1	AZ1	EL1	A 1	B 1	C 1	D 1	ET1	EX1* ET1	EY1* ET1	EX1	EY1
Time 2	AZ2	EL2	A 2	B 2	C 2	D 2	ET2	EX2* ET2	EY2* ET2	EX2	EY2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Time n	AZn	ELn	A n	B n	C n	D n	ETn	EXn* ETn	EYn* ETn	EXn	EYn

### 3.2.5 การประเมินผล

การประเมินผลการทดลองจะใช้ผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 เป็นค่าอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบทิศทางการปรับมุมของอุปกรณ์ ในการทดลองวิจัยที่ 2 และหาความคลาดเคลื่อนโดยคำนวณจากตำแหน่งสุดท้ายของแต่ละกระบวนการติดตามแสงในแต่ละตำแหน่ง เทียบกับจุดตั้งต้น (0,0) โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทาง (Distance Error) ดังสมการที่ 3.2 [31] และทำการประเมินประสิทธิภาพเชิงเวลาโดยการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ทั้งหมดของแต่ละกระบวนการติดตามแสงในแต่ละตำแหน่งเริ่มต้นของการทดลองแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Distance\ Error = \sqrt{(az_i - az_e)^2 + (el_i - el_e)^2} \quad (3.2)$$

- เมื่อ  $az_i$  คือค่ามุมในแนวราบที่จุดตั้งต้น มีค่าเท่ากับ 0 (*deg*)  
 $el_i$  คือค่ามุมในแนวตั้งที่จุดตั้งต้น มีค่าเท่ากับ 0 (*deg*)  
 $az_e$  คือค่ามุมในแนวราบที่จุดสนใจ (*deg*)  
 $el_e$  คือค่ามุมในแนวตั้งที่จุดสนใจ (*deg*)

### 3.3 ระเบียบการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

ระเบียบการทดลองวิจัย สำหรับการทดลองกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สายผ่านแสงโดยใช้แบบจำลอง จะอ้างอิงตามตารางที่ 3.1 และ 3.3 การคำนวณค่าความเข้มแสงของตัวตรวจจับแสงจะใช้สมการที่ 2.2 เป็นตัวอ้างอิงโดยกำหนดให้ ความเข้มแสงที่จุดกำเนิด  $I_0$  เท่ากับ 1025 วัตต์ต่อตารางเมตรตามแหล่งกำเนิดแสงในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ในส่วนค่าระยะทางระหว่างตัวตรวจจับแสงกับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการการแปลงพิกัดเชิงขั้วและเชิงมุม (Coordinate Transformation) ดังสมการที่ 3.3 ถึงสมการที่ 3.5 [32] และรูปที่ 3.5 ถึง 3.7

$$x = RR \cdot \sin(\cos((R \cdot \sin(t \pm el))) / RR) \cdot \cos(abs(90 - (t \pm az))) \quad (3.3)$$

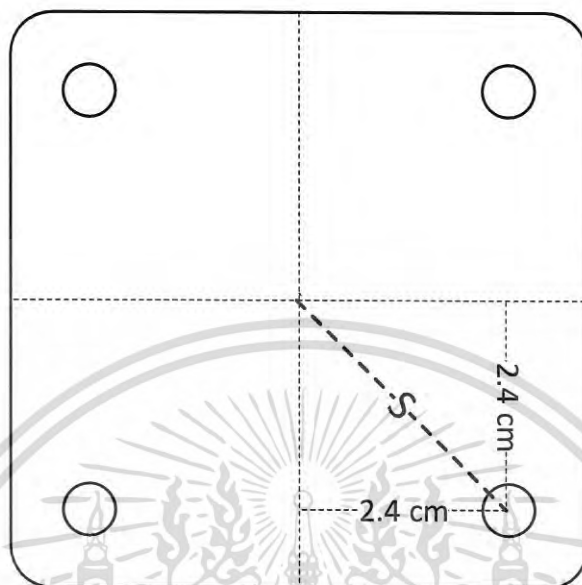
$$y = RR \cdot \sin(\cos((R \cdot \sin(t \pm el))) / RR) \cdot \sin(abs(90 - (t \pm az))) \quad (3.4)$$

$$z = RR \cdot \cos(\cos((R \cdot \sin(t \pm el))) / RR) \quad (3.5)$$

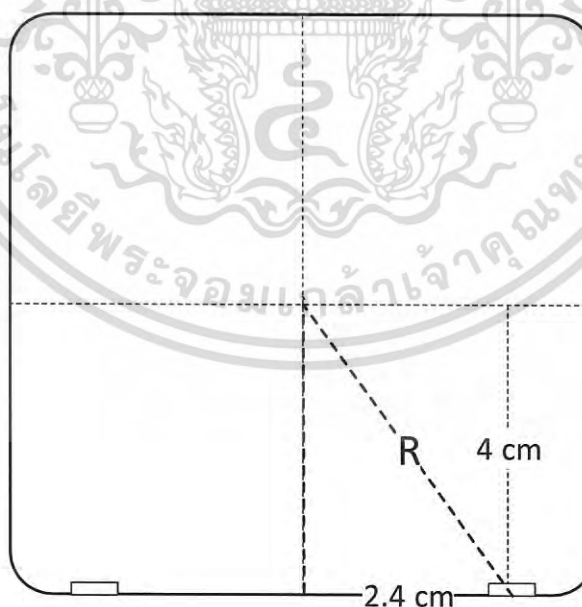
- โดยที่  $RR$  คือระยะทางระหว่างตัวตรวจจับแสงและจุดหมุน (*m*)  
 $R$  คือระยะทางแบบภาพฉายระหว่างตัวตรวจจับแสงและจุดหมุน (*m*)  
 $t$  คือค่ามุมจากเส้นปกติ (Normal Line) ที่ชี้ออกจากจุดหมุนไปยังระนาบที่วางตัวตรวจจับแสง กับตัวตรวจจับแสง (*deg*)  
 $az$  คือค่ามุมในแนวราบ (*deg*)  
 $el$  คือค่ามุมในแนวตั้ง (*deg*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้สมการจะเป็นค่าบวกหรือลบ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของตัวตรวจจับแสงและมุมปัจจุบันของอุปกรณ์ต้นแบบในการทดลอง

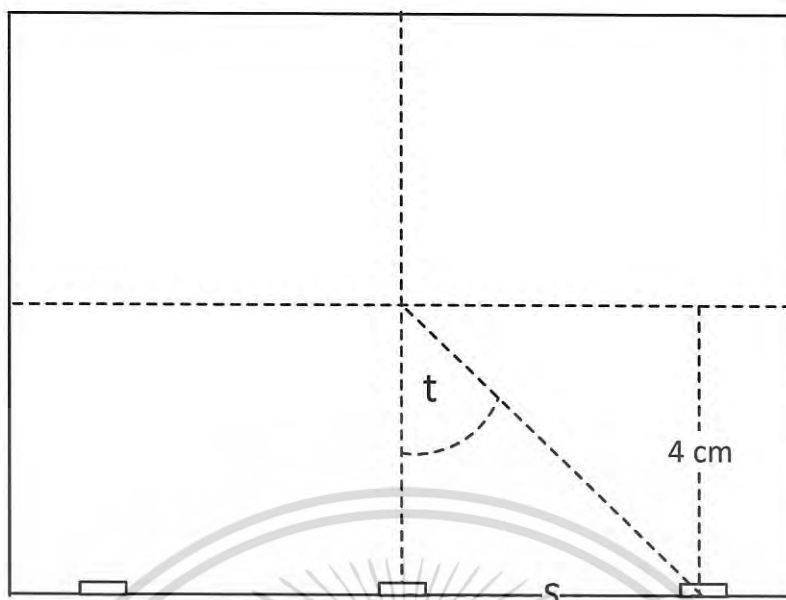


รูปที่ 3.5 รูปอ้างอิงสำหรับสมการที่ 3.3 ถึงสมการที่ 3.5 (1)



รูปที่ 3.6 รูปอ้างอิงสำหรับสมการที่ 3.3 ถึงสมการที่ 3.5 (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 รูปร่างสำหรับสมการที่ 3.3 ถึงสมการที่ 3.5 (3)

### 3.4 ระเบียบการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

ระเบียบการทดลองวิจัย สำหรับการทดลองกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สายผ่านแสงโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองกระบวนการติดตามแสง จะอ้างอิงตามตารางที่ 3.2 และ 3.4 โดยจะใช้ค่าความเข้มแสงจากอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่ถูกแปลงค่าจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูอิโน อูโน เพื่อเป็นตัวแปรในการคำนวณตามสมการของกระบวนการติดตามแสง

## บทที่ 4

# ผลการทดลองวิจัย

### 4.1 กล่าวนำ

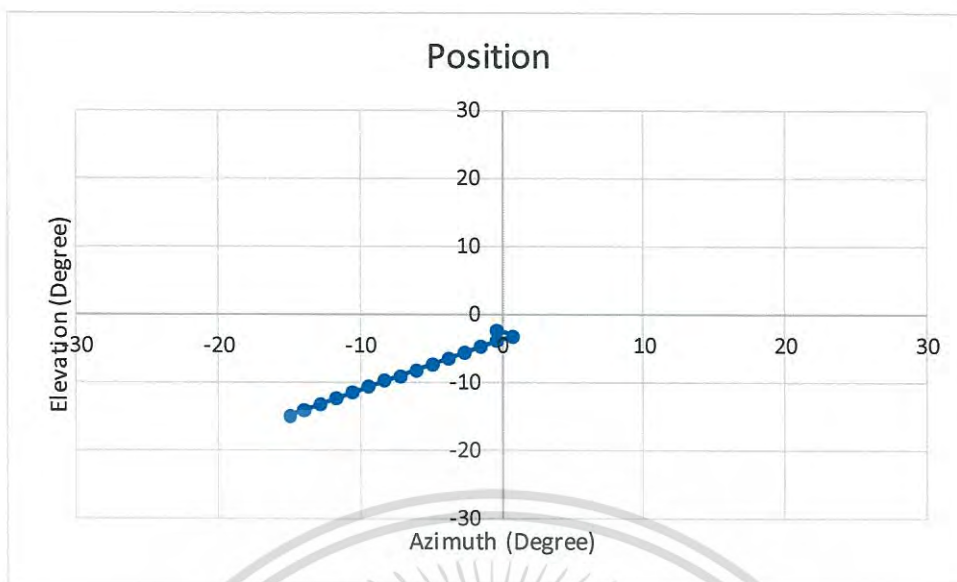
บทนี้กล่าวถึงผลการทดลองวิจัย ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงการวิจัยคือ ช่วงที่ 1 เป็นการทดลองกระบวนการติดตามแสงโดยใช้แบบจำลอง และช่วงที่ 2 เป็นการทดลองกระบวนการติดตามแสงโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองกระบวนการติดตามแสง

### 4.2 ผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

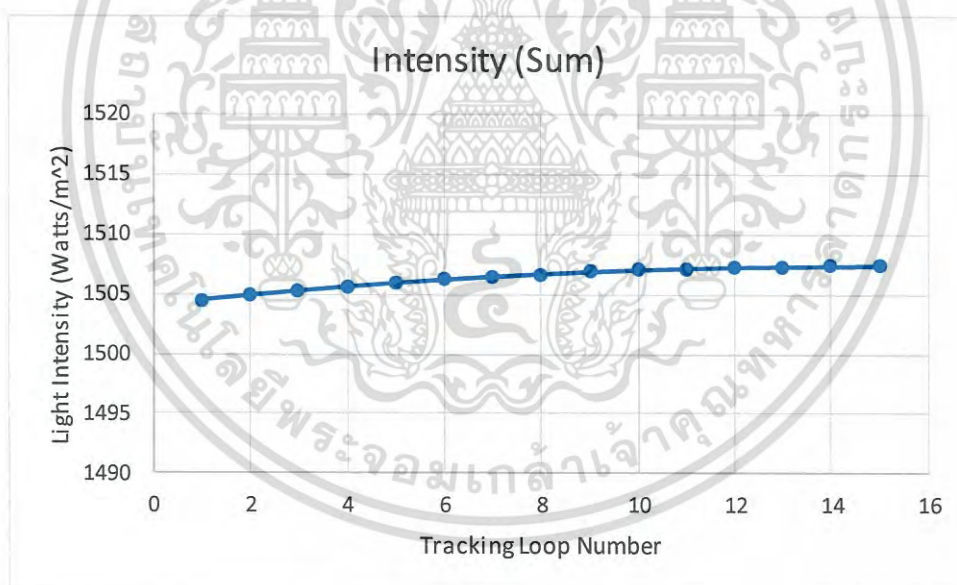
#### 4.2.1 ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบสเต็ป โดยใช้แบบจำลอง

ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบสเต็ปในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง โดยใช้แบบจำลอง จะแสดงผลโดยกราฟแสดงทิศทางการเคลื่อนที่และกราฟแสดงค่าความเข้มแสง ณ ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงของกระบวนการติดตามแสง ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1 และ 4.2 สมมติฐานในการทดลองคือแบบจำลองสามารถปรับระนาบเข้าหาจุดศูนย์กลางของลำแสงได้ และความเข้มแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของลำแสง

จากตัวอย่างผลการทดลอง ในรูปที่ 4.1 แสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ติดตามแสง ในการทดลองกระบวนการติดตามแบบสเต็ปโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง  $(-15,-15)$  ซึ่งจะพบว่าอุปกรณ์ติดตามแสงในแบบจำลอง สามารถปรับระนาบเข้าหาจุดศูนย์กลางของลำแสงได้ และในรูป 4.2 ซึ่งแสดงค่าความเข้มแสงของการทดลองกระบวนการติดตามแบบสเต็ปโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง  $(-15,-15)$  พบว่าค่าความเข้มแสงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อระนาบเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของลำแสง ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐาน โดยผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบสเต็ปโดยใช้แบบจำลองในตำแหน่งอื่นๆ



รูปที่ 4.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองกระบวนการติดตามแบบสเต็ปโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15)



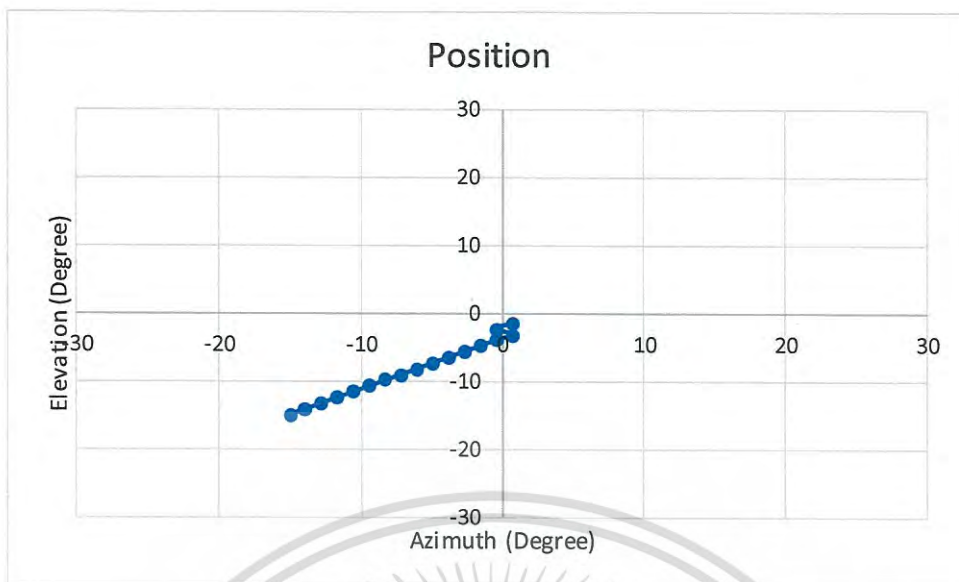
รูปที่ 4.2 ค่าความเข้มแสงของการทดลองกระบวนการติดตามแบบสเต็ป โดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

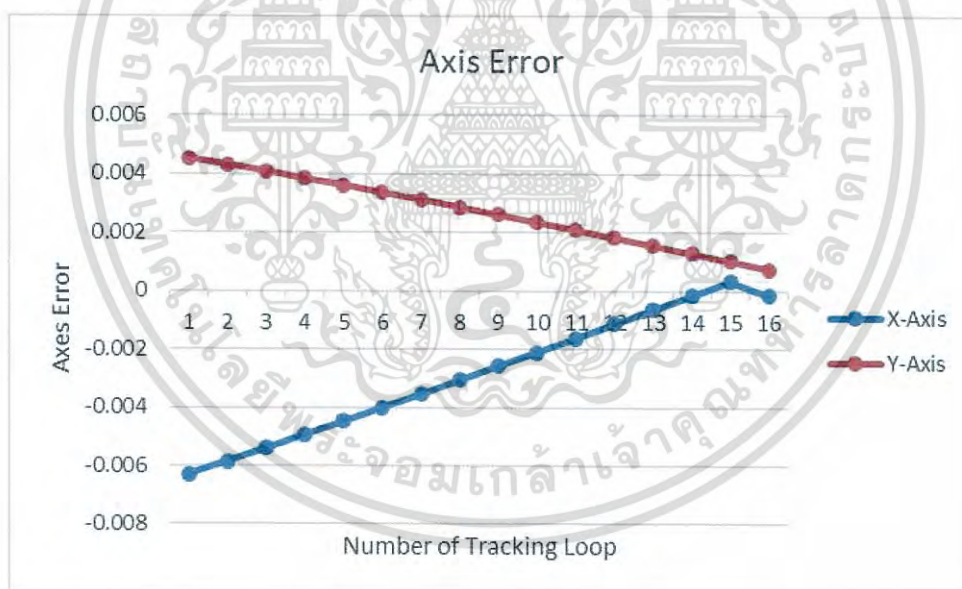
#### 4.2.2 ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้แบบจำลอง

ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาคในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง โดยใช้แบบจำลอง จะแสดงผลโดยกราฟแสดงทิศทางการเคลื่อนที่และกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุม ณ ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงของกระบวนการติดตามแสง ดังรูป 4.3 ถึง 4.4 สมมติฐานในการทดลองคือ แบบจำลองสามารถปรับระนาบเข้าหาจุดศูนย์กลางของลำแสงได้ และค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของลำแสง

จากตัวอย่างผลการทดลอง ในรูปที่ 4.3 แสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่และค่าความเข้มแสงของการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาคโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง  $(-15,-15)$  ซึ่งจะพบว่าอุปกรณ์ติดตามแสงในแบบจำลองสามารถปรับระนาบเข้าหาจุดศูนย์กลางของลำแสง และในรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของอุปกรณ์ในการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาคโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง  $(-15,-15)$  จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมในทั้งสองระนาบมีแนวโน้มลดลงเมื่อระนาบเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของลำแสง ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน โดยในส่วนของผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาคโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่งอื่นๆ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาคโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15)



รูปที่ 4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาคโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

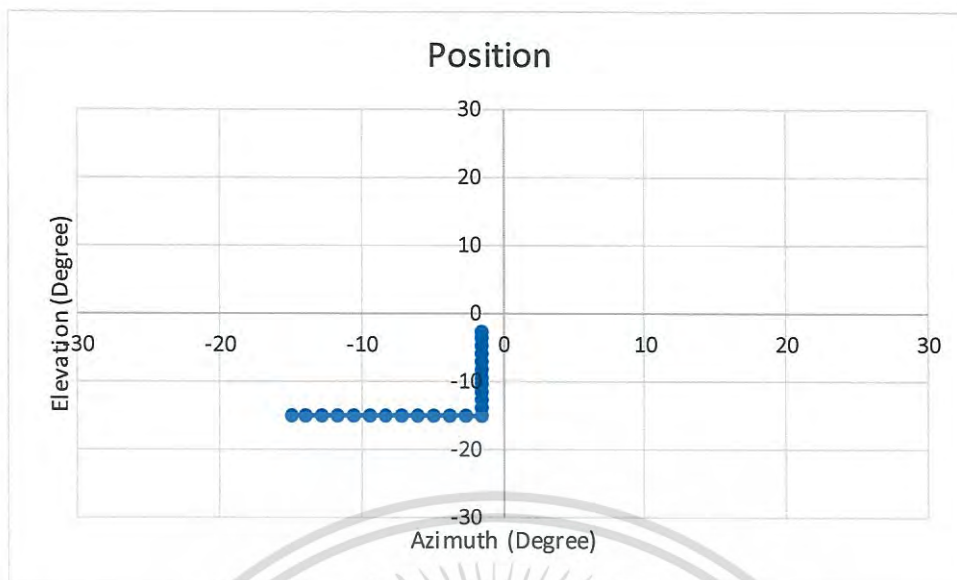
#### 4.2.3 ผลการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม โดยใช้แบบจำลอง

ผลการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง โดยใช้แบบจำลอง จะแสดงผลโดยกราฟแสดงทิศทางการเคลื่อนที่และกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุม ณ ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงของกระบวนการติดตามแสง ดังรูป 4.5 ถึง 4.6 สมมติฐานในการทดลองคือแบบจำลองสามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ และค่าความเข้มแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้แหล่งกำเนิดแสง

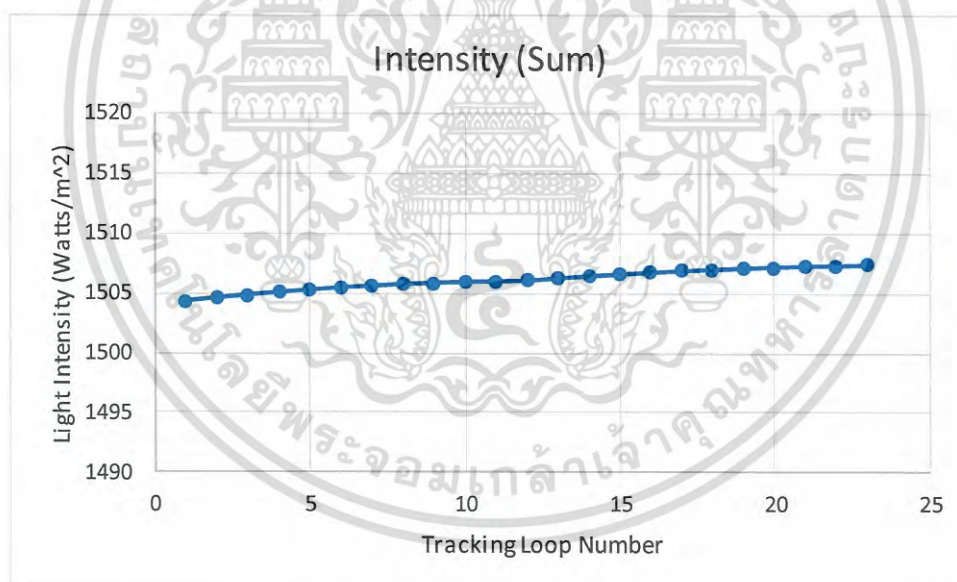
ยกตัวอย่างผลการทดลอง ในรูปที่ 4.5 แสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง  $(-15,-15)$  จะพบว่าแบบจำลองสามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้

ในรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่และค่าความเข้มแสงของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง  $(-15,-15)$  ซึ่งจะพบว่าค่าความเข้มแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระนาบเข้าใกล้ตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน อีกทั้งในส่วนของการทดลองในตำแหน่งอื่นๆ ก็แนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น

เมื่อพิจารณาถึงทิศทางการเคลื่อนที่ในแต่ละกระบวนการจะพบว่า ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามโดยใช้แบบจำลองจะใช้ระยะทางที่ไกลที่สุดเนื่องจากไม่ได้ใช้กระบวนการติดตามแสง จึงต้องหาค่าความเข้มแสงสูงสุดที่ระยะนาบ ทำให้มีความเร็วในการปรับระนาบที่ช้ากว่ากระบวนการติดตามทั้งสองแบบ



รูปที่ 4.5 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15)



รูปที่ 4.6 ค่าความเข้มแสงของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามโดยใช้แบบจำลองที่ตำแหน่ง (-15,-15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

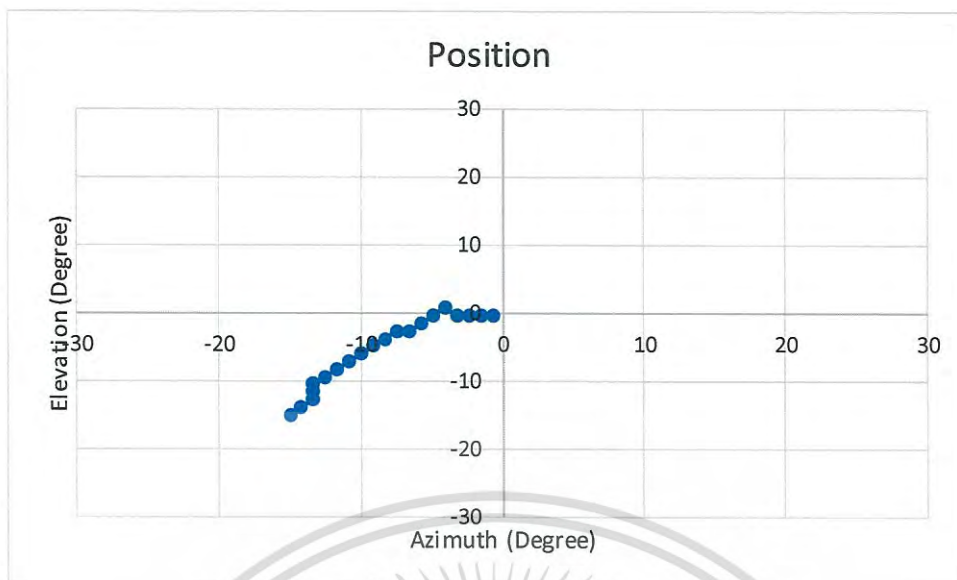
## 4.3 ผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

### 4.3.1 ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบสแต็ป โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง

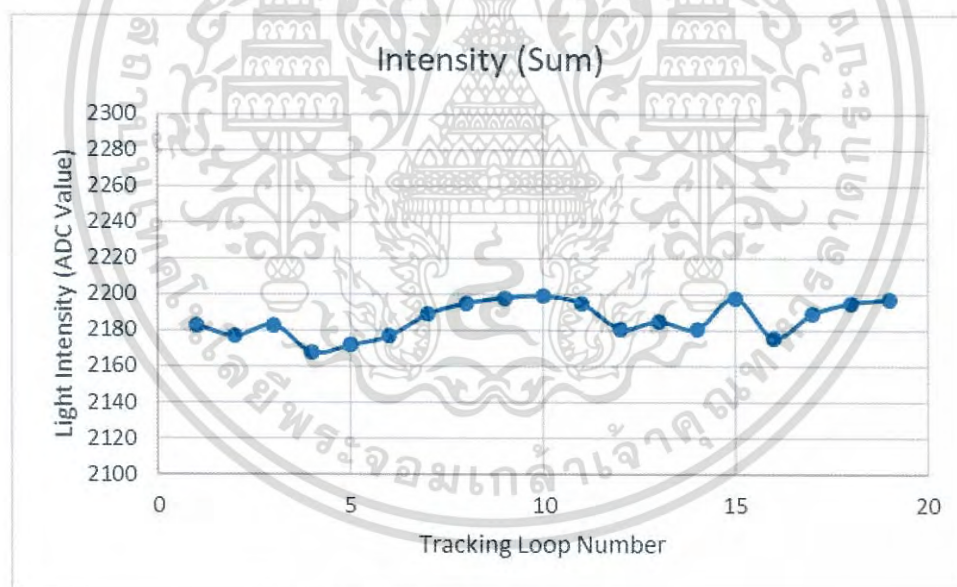
ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบสแต็ปในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง จะแสดงผลโดยกราฟแสดงทิศทางการเคลื่อนที่และกราฟแสดงค่าความเข้มแสง ณ ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงของกระบวนการติดตามแสง ซึ่งจะพบว่าการทดลองกระบวนการติดตามแบบสแต็ป โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง อุปกรณ์สามารถปรับระนาบเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของลำแสงได้ในบางครั้ง และในบางครั้งอุปกรณ์ไม่สามารถปรับระนาบไปเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของลำแสงได้ อีกทั้งยังพบว่าไม่สามารถดูแนวโน้มค่าความเข้มแสงได้ จึงไม่เป็นไปตามแบบจำลองโดยสมบูรณ์

ตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองกระบวนการติดตามแบบสแต็ป โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง  $(-15,-15)$  ในการทดลองครั้งที่ 5 พบว่าอุปกรณ์ต้นแบบสามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งที่ตั้งตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ และในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงค่าความเข้มแสงของการทดลองกระบวนการติดตามแบบสแต็ป โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง  $(-15,-15)$  ในการทดลองครั้งที่ 5 พบว่าค่าความเข้มแสงมีแนวโน้มที่ไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือค่าสัญญาณความเข้มแสงซึ่งอ่านจากการแปลงจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของอุปกรณ์ตรวจจับแสงมีการแกว่ง จึงไม่เห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเข้มแสงตามทฤษฎี

อย่างไรก็ดี อุปกรณ์ก็ยังสามารถที่จะปรับระนาบโดยใช้กระบวนการติดตามแบบสแต็ปได้เนื่องจากการวัดค่าความเข้มแสงเป็นการวัดค่า ณ เวลาปัจจุบัน (Instantaneous measurement) จึงทำให้ไม่เกิดผลกระทบเมื่อระดับสัญญาณมีการลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 4.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองกระบวนการติดตามแบบสเต็ปโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 5)



รูปที่ 4.8 ค่าความเข้มแสงของการทดลองกระบวนการติดตามแบบสเต็ปโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 5)

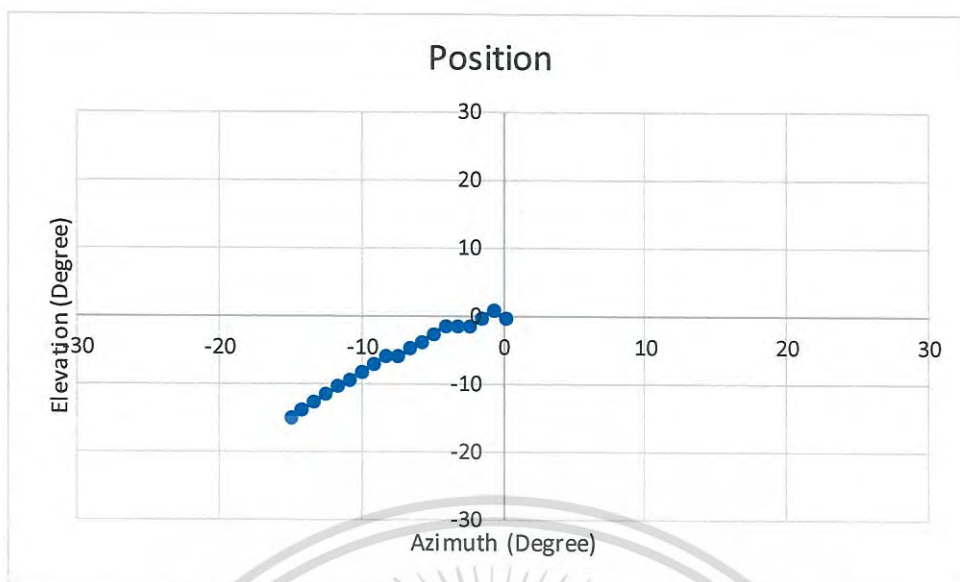
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง

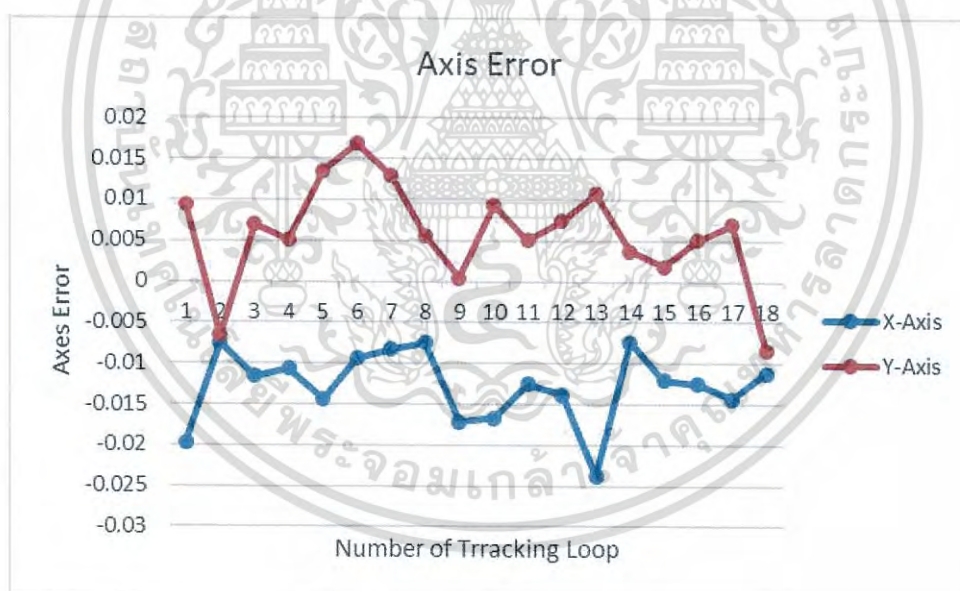
ผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง ซึ่งผลการทดลองจะแสดงผลโดยกราฟแสดงทิศทางการเคลื่อนที่และกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุม ณ ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงของกระบวนการติดตามแสง ซึ่งจะพบว่าผลการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง อุปกรณ์สามารถปรับระนาบเข้าใกล้จุดศูนย์กลางลำแสงได้ในบางครั้ง และในบางครั้งอุปกรณ์ไม่สามารถปรับระนาบไปเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของลำแสงได้ อีกทั้งยังพบว่าไม่สามารถดูแนวโน้มค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมได้ ซึ่งไม่เป็นไปตามแบบจำลองโดยสมบูรณ์

ตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง  $(-15,-15)$  ในการทดลองครั้งที่ 4 จะพบว่าอุปกรณ์ต้นแบบสามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ และในรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง  $(-15,-15)$  ในการทดลองครั้งที่ 4 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมมีแนวโน้มที่ไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมมีการแกว่ง จึงไม่เห็นแนวโน้มการลดลงตามทฤษฎี ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นได้จากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์ตรวจจับแสง

อย่างไรก็ดี อุปกรณ์ก็ยังสามารถที่จะปรับระนาบโดยใช้กระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาคได้เนื่องจากการวัดค่าความเข้มแสงเป็นการวัดค่า ณ เวลาปัจจุบัน (Instantaneous measurement) จึงทำให้ไม่เกิดผลกระทบเมื่อระดับสัญญาณมีการลดลง



รูปที่ 4.9 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ติดตามแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 4)



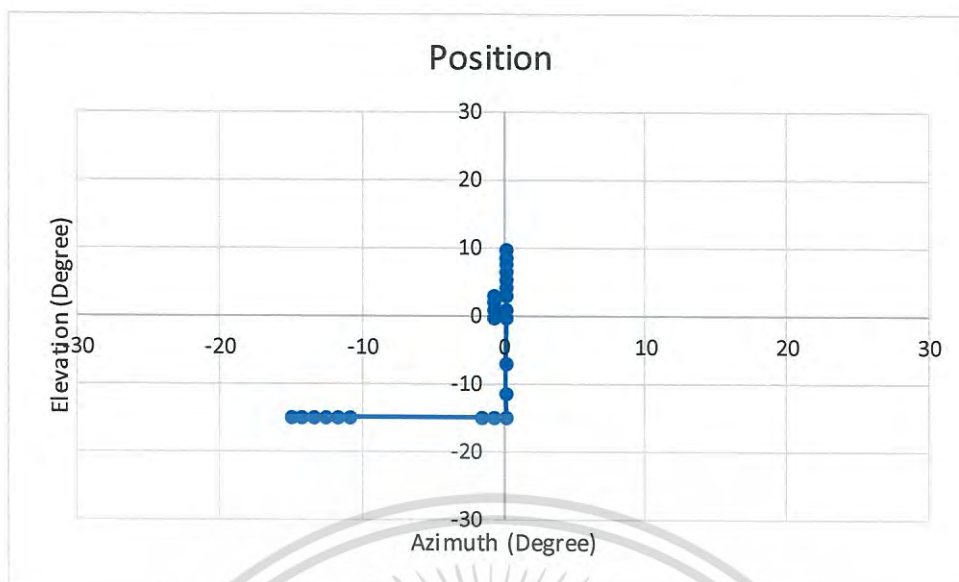
รูปที่ 4.10 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของการทดลองกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ติดตามแสงใน 4 จตุภาค โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

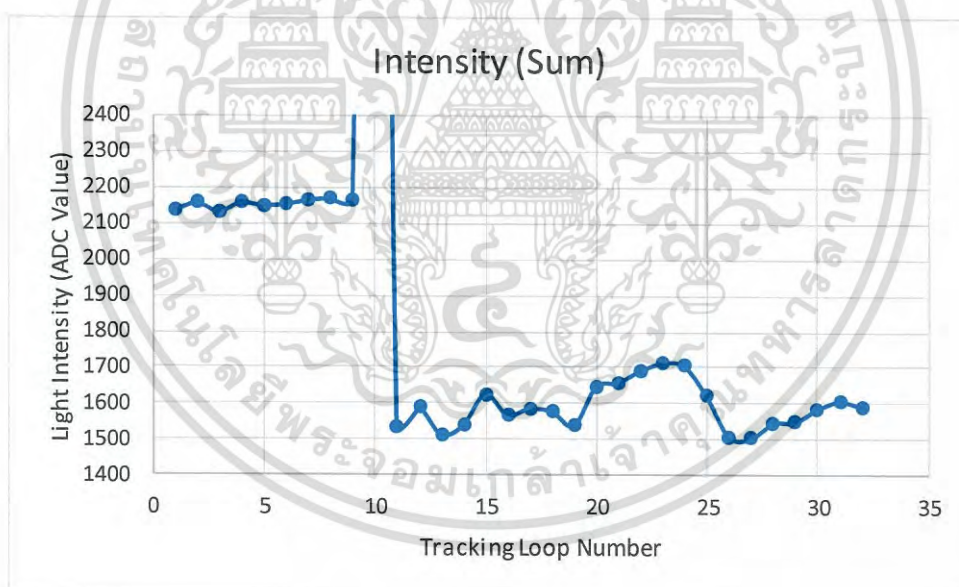
#### 4.3.3 ผลการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง

ผลการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง จะแสดงผลโดยกราฟแสดงทิศทางการเคลื่อนที่และกราฟแสดงค่าความเข้มแสง ณ ตำแหน่งต่างๆในช่วงของกระบวนการติดตามแสง ซึ่งจะพบว่าผลการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง อุปกรณ์สามารถปรับระนาบเข้าใกล้ตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดได้ในบางครั้ง และในบางครั้งอุปกรณ์ไม่สามารถปรับระนาบไปเข้าใกล้ตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดได้ อีกทั้งยังพบว่าไม่สามารถดูแนวโน้มค่าความเข้มแสงได้ ซึ่งไม่เป็นไปตามแบบจำลองโดยสมบูรณ์

ยกตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) ในการทดลองครั้งที่ 5 ผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ต้นแบบไม่สามารถปรับระนาบเข้าหาจุดกึ่งกลางของลำแสง และในรูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงค่าความเข้มแสงของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) ในการทดลองครั้งที่ 5 ซึ่งพบว่าเกิดความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าความเข้มแสง กล่าวคือค่าสัญญาณความเข้มแสงซึ่งอ่านจากการแปลงจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลของอุปกรณ์ตรวจจับแสงเกิดความผิดปกติในการอ่านค่าทำให้ค่ามีการกระโดดขึ้นและตกลง จึงไม่เห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นตามทฤษฎี ซึ่งสาเหตุที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้น่าจะเกิดจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดแสงเนื่องจาก การทดลองเป็นการทดลองอย่างต่อเนื่อง จึงอาจจะทำให้แหล่งกำเนิดแสงมีความไม่เสถียร



รูปที่ 4.11 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามโดยใช้ อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 5)



รูปที่ 4.12 ค่าความเข้มแสงของการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามโดยใช้ อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองที่ตำแหน่ง (-15,-15) (ครั้งที่ 5)

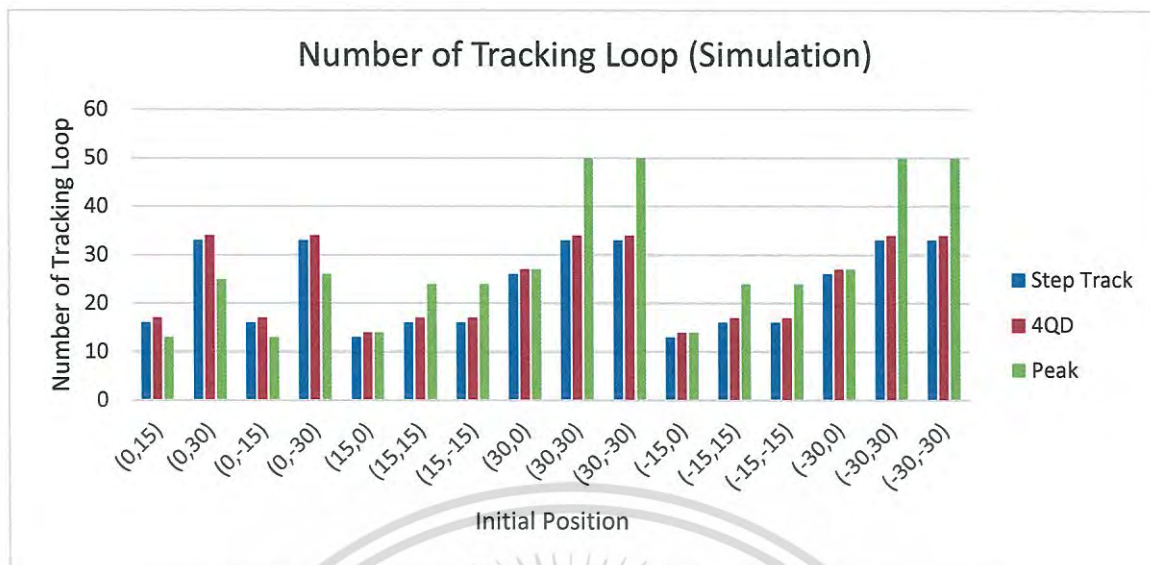
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 สรุปผลการทดลอง

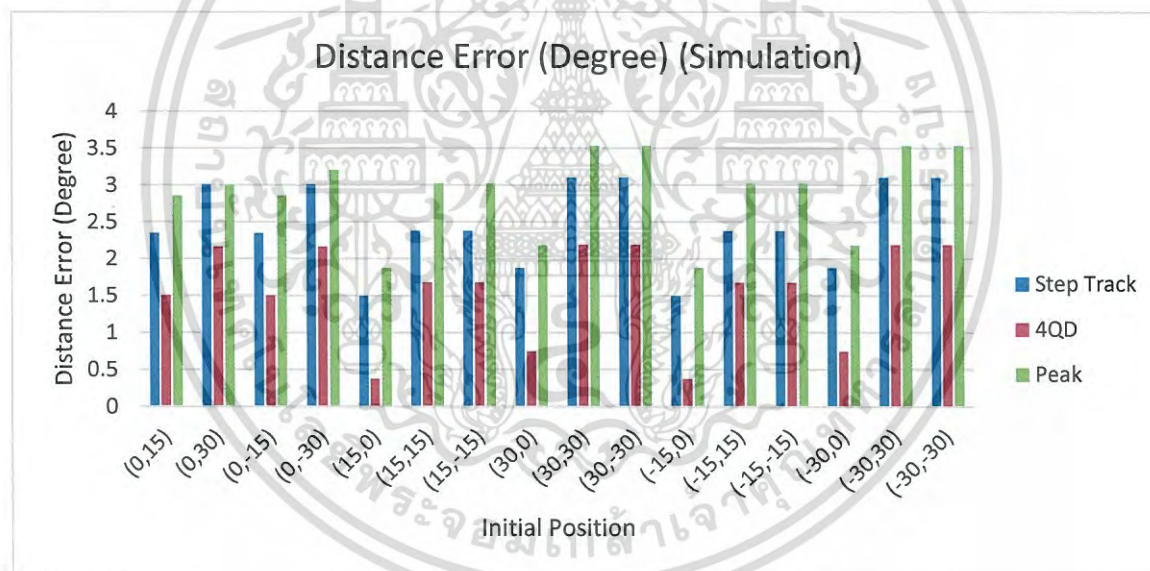
ข้อมูลสรุปผลการทดลองวิจัยกระบวนการติดตามในการสื่อสารไร้สายผ่านแสงทั้งการทดลองวิจัยที่ 1 และการทดลองวิจัยที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.31

ในรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงจำนวนครั้งที่ใช้ในแต่ละกระบวนการติดตาม และค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในแต่ละกระบวนการติดตาม โดยใช้แบบจำลอง พบว่าจำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบสแต็ป และกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ติดตามแสงใน 4 จตุภาค มีจำนวนใกล้เคียงกัน และน้อยกว่าจำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม โดยส่วนใหญ่ และค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในแต่ละกระบวนการติดตามมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ติดตามแสงใน 4 จตุภาค จะมีค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางน้อยที่สุด ตามมาด้วยกระบวนการติดตามแบบสแต็ป และการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามตามลำดับ

ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงจำนวนครั้งที่ใช้และค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบสแต็ป โดยเทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง ซึ่งจากรูปที่ 4.16 จะพบว่าในหลายการทดลอง อุปกรณ์ไม่สามารถปรับระนาบไปยังตำแหน่งที่ใกล้เคียงระนาบชี้ตรงแหล่งกำเนิดแสงได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกวิเคราะห์ค่าผลการทดลองที่ดีที่สุดซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ซึ่งแสดงจำนวนครั้งที่ใช้และค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบสแต็ปตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์สามารถสามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้เกือบทุกตำแหน่ง มีตำแหน่งที่ (30,30) และ (30,-30) ที่อุปกรณ์ไม่สามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ และจากรูปที่ 4.17 พบว่าจำนวนครั้งที่ใช้ในการปรับระนาบมีความใกล้เคียงกับแบบจำลองโดยมีตำแหน่งที่ใช้จำนวนครั้งในการปรับระนาบมากกว่าแบบจำลอง

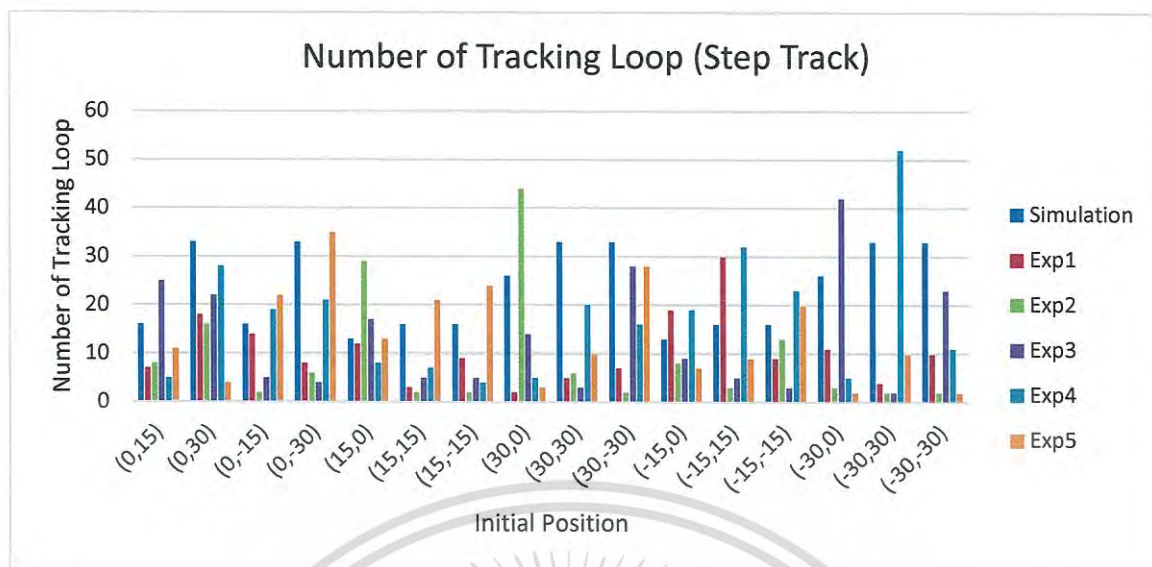


รูปที่ 4.13 จำนวนครั้งที่ใช้ในแต่ละกระบวนการติดตาม โดยใช้แบบจำลอง

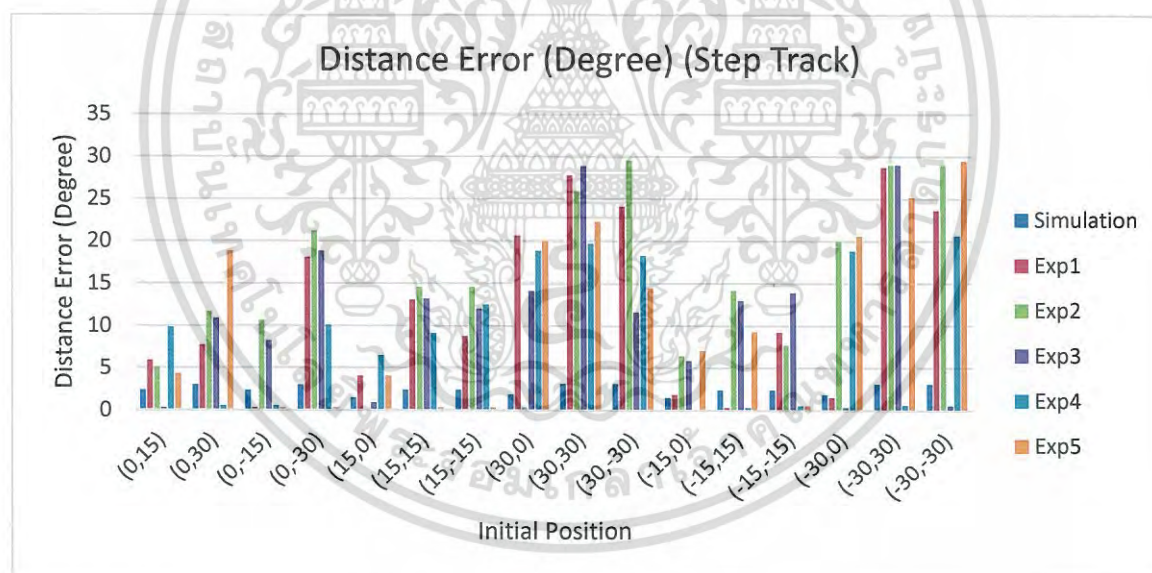


รูปที่ 4.14 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในแต่ละกระบวนการติดตาม โดยใช้แบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

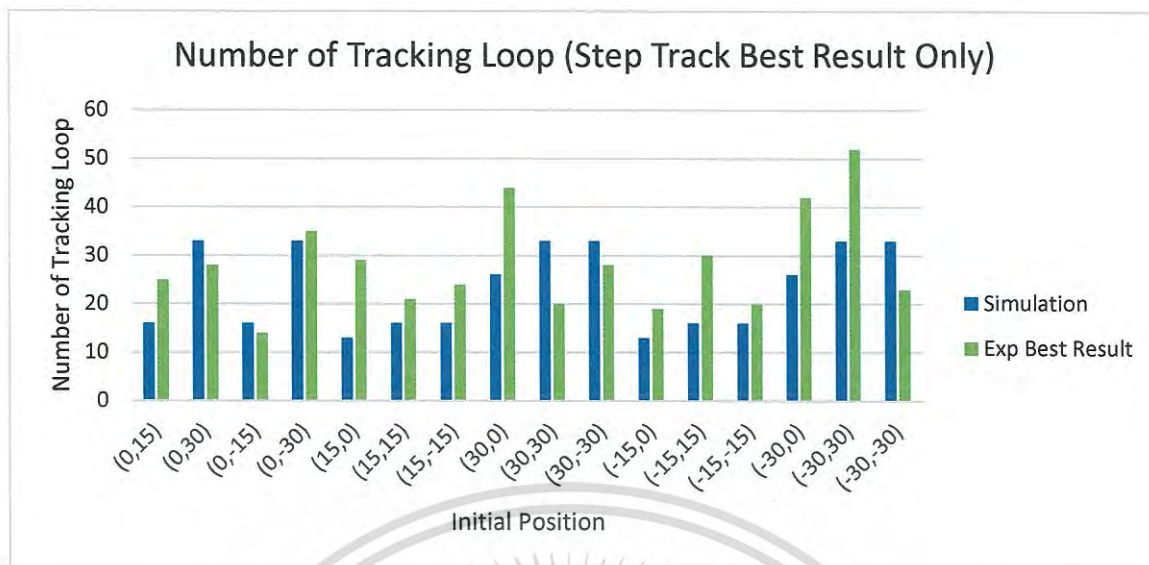


รูปที่ 4.15 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบสเต็ป เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง

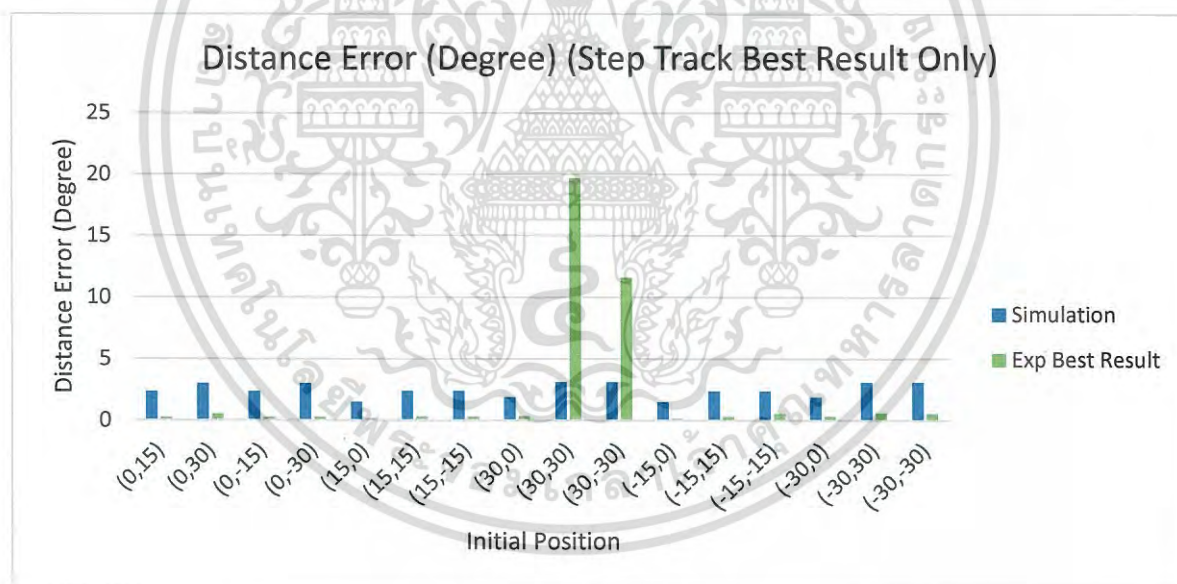


รูปที่ 4.16 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบสเต็ป เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบสเต็ป เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด)

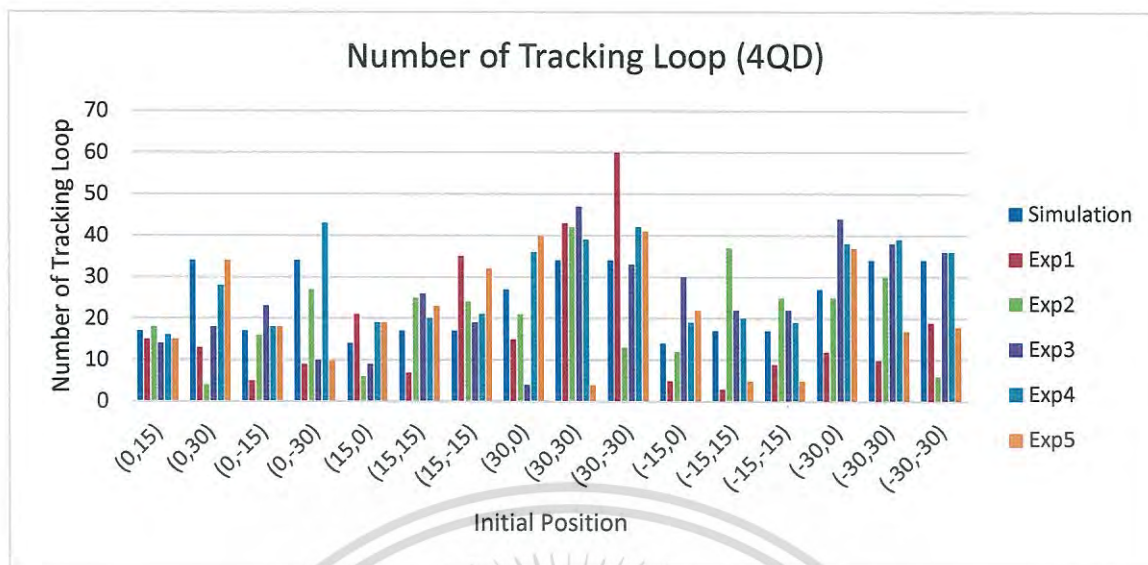


รูปที่ 4.18 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบสเต็ป เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด)

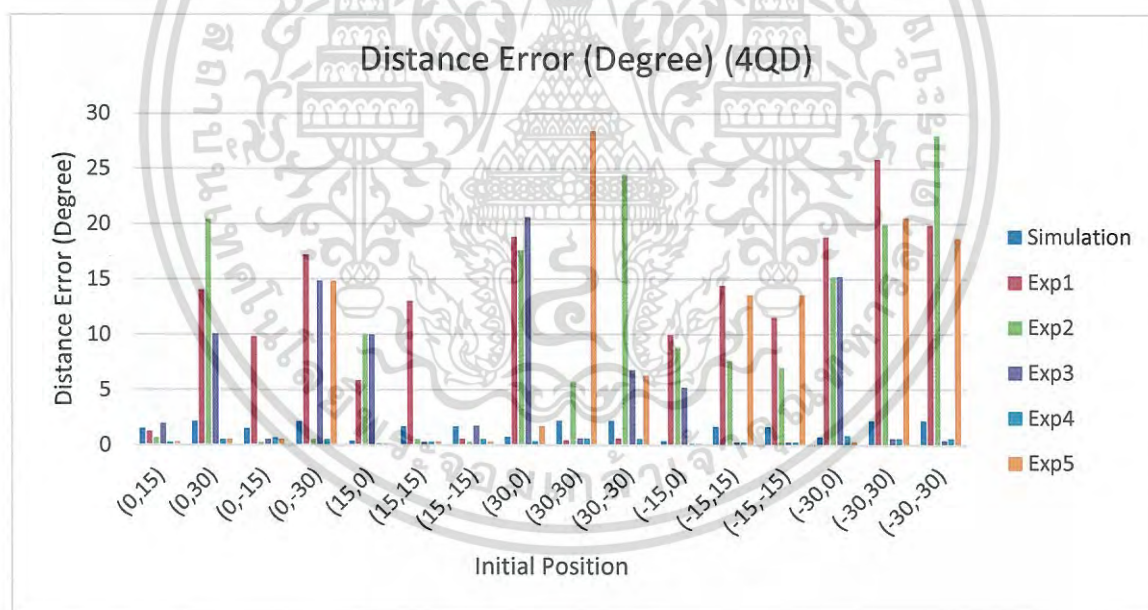
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงจำนวนครั้งที่ใช้และค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จุดภาค โดยเทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง ซึ่งจากรูปที่ 4.20 จะพบว่าในหลายการทดลอง อุปกรณ์ไม่สามารถปรับระนาบไปยังตำแหน่งที่ใกล้เคียงจุดศูนย์กลางของลำแสงได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกวิเคราะห์ค่าผลการทดลองที่ดีที่สุดซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ซึ่งแสดงจำนวนครั้งที่ใช้และค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จุดภาคตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์สามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลำแสงได้ทุกตำแหน่ง และจากรูปที่ 4.21 พบว่าจำนวนครั้งที่ใช้ในการปรับระนาบมีความใกล้เคียงกับแบบจำลองโดยมี 4 ตำแหน่งทดสอบที่ใช้จำนวนครั้งในการปรับระนาบน้อยกว่าแบบจำลอง

ในรูปที่ 4.23 และ 4.26 แสดงจำนวนครั้งที่ใช้และค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม โดยเทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง ซึ่งจากรูปที่ 4.24 จะพบว่าในหลายการทดลอง อุปกรณ์ไม่สามารถปรับระนาบไปยังจุดศูนย์กลางของลำแสงได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกวิเคราะห์ค่าผลการทดลองที่ดีที่สุดซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ซึ่งแสดงจำนวนครั้งที่ใช้และค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ไม่สามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้เกือบทุกตำแหน่ง มีเพียงตำแหน่งที่ (15,-15) เท่านั้นที่สามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ และจากรูปที่ 4.25 พบว่าจำนวนครั้งที่ใช้ในการปรับระนาบในตำแหน่งที่ (15,-15) มีความใกล้เคียงกับแบบจำลอง

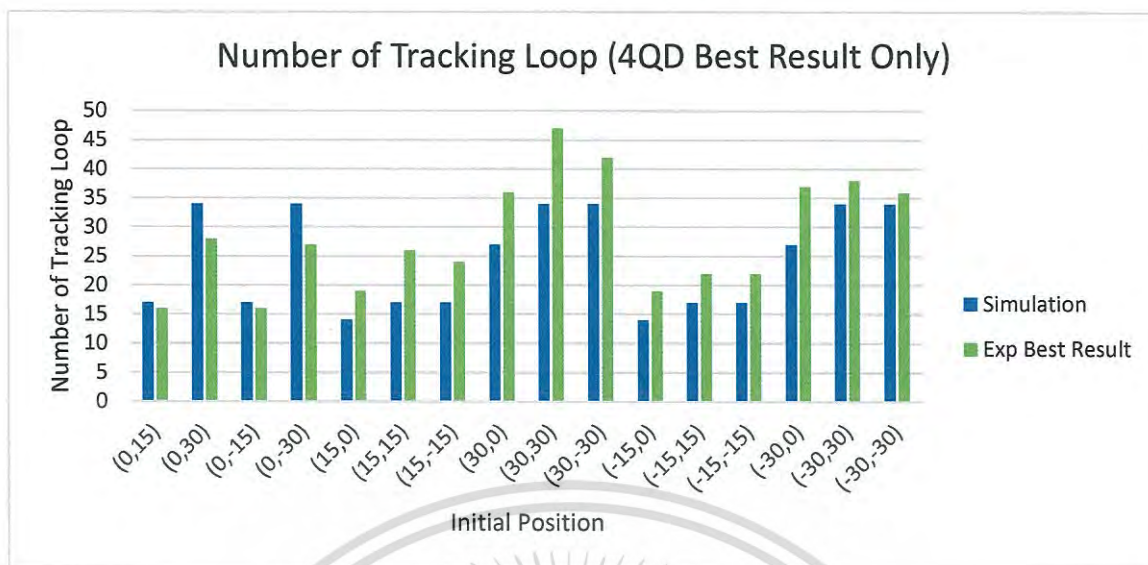


รูปที่ 4.19 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง

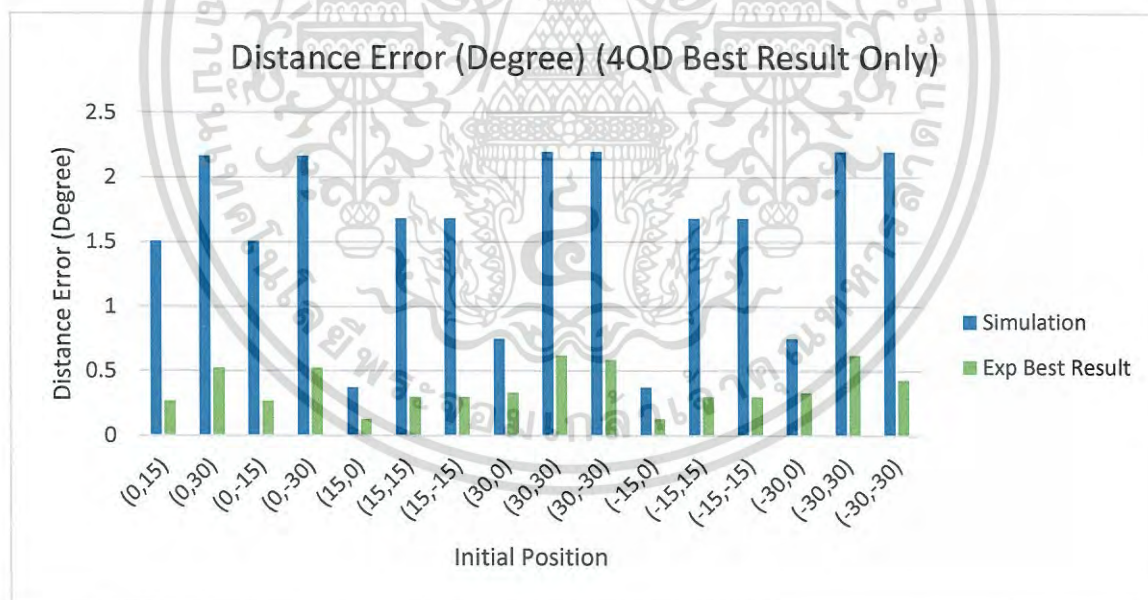


รูปที่ 4.20 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

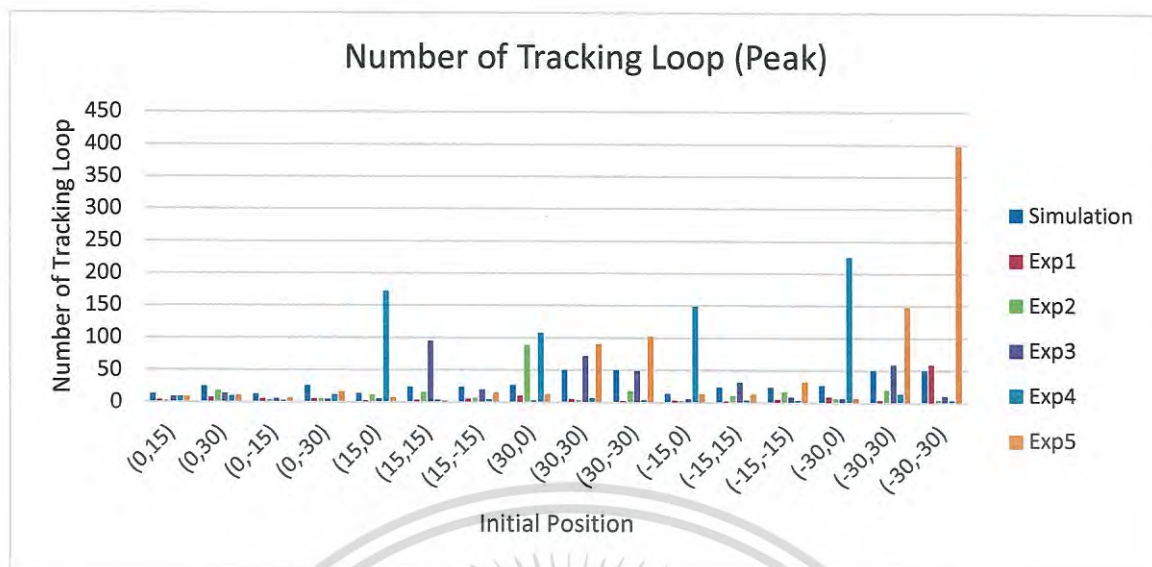


รูปที่ 4.21 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด)

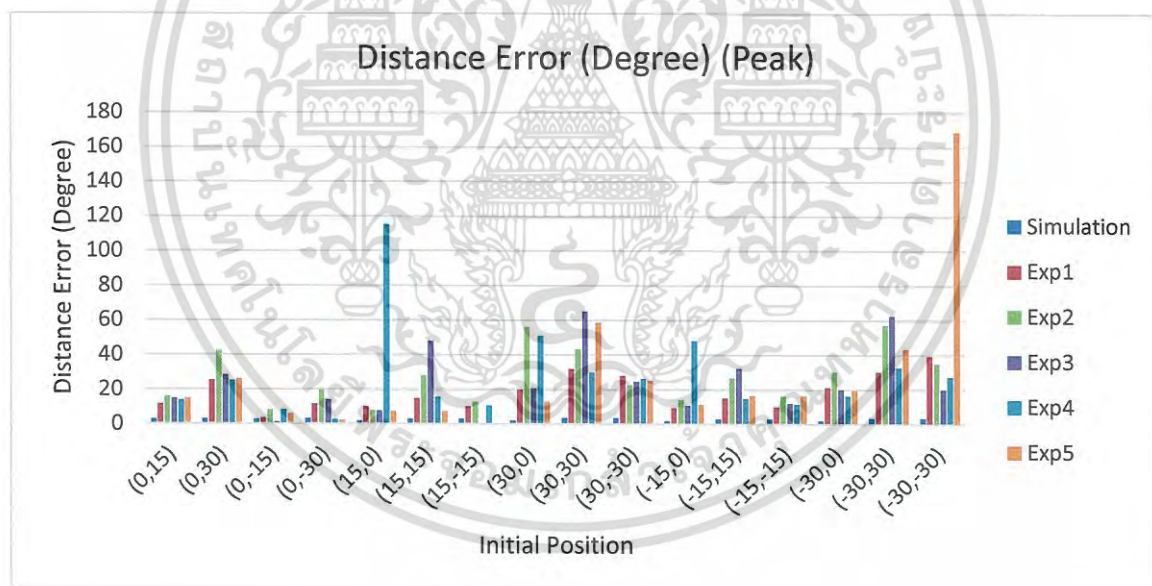


รูปที่ 4.22 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสง ใน 4 จตุภาค เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

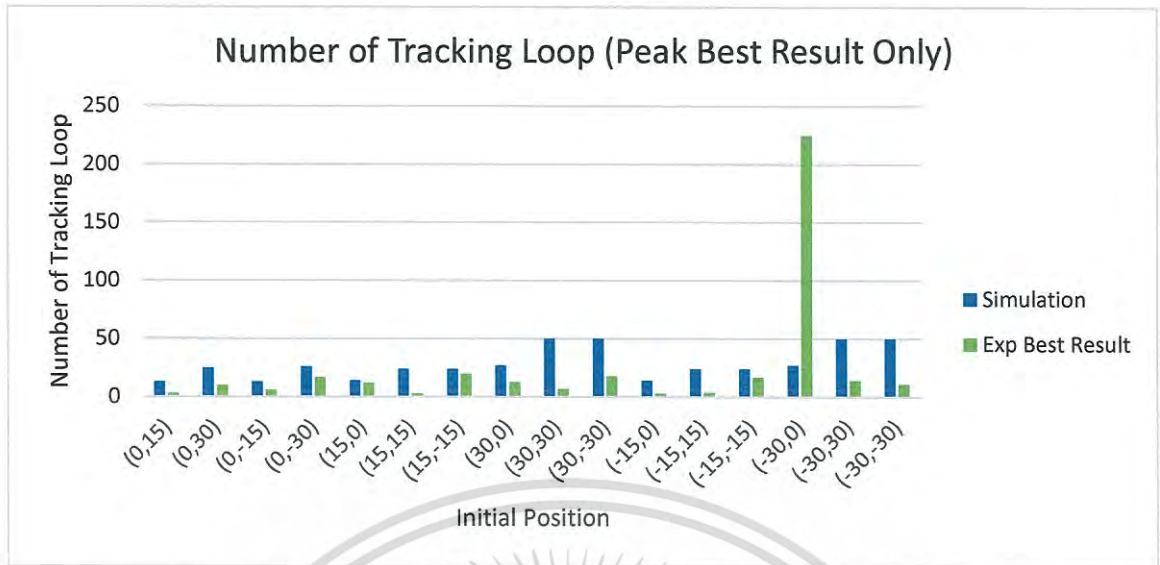


รูปที่ 4.23 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง

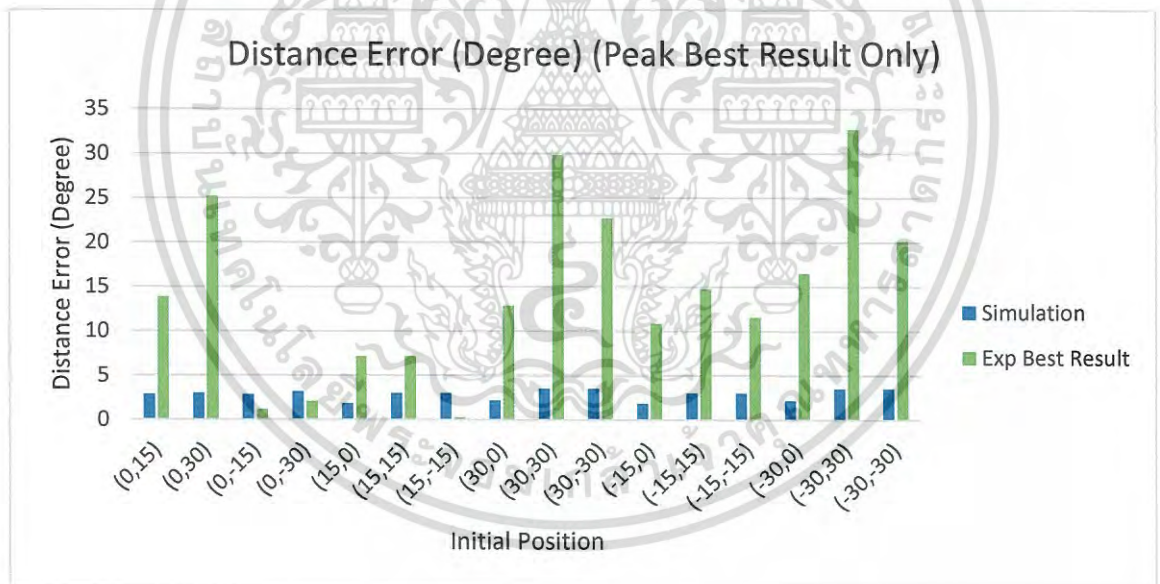


รูปที่ 4.24 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบไม่ใช้ กระบวนการติดตาม เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 จำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด)

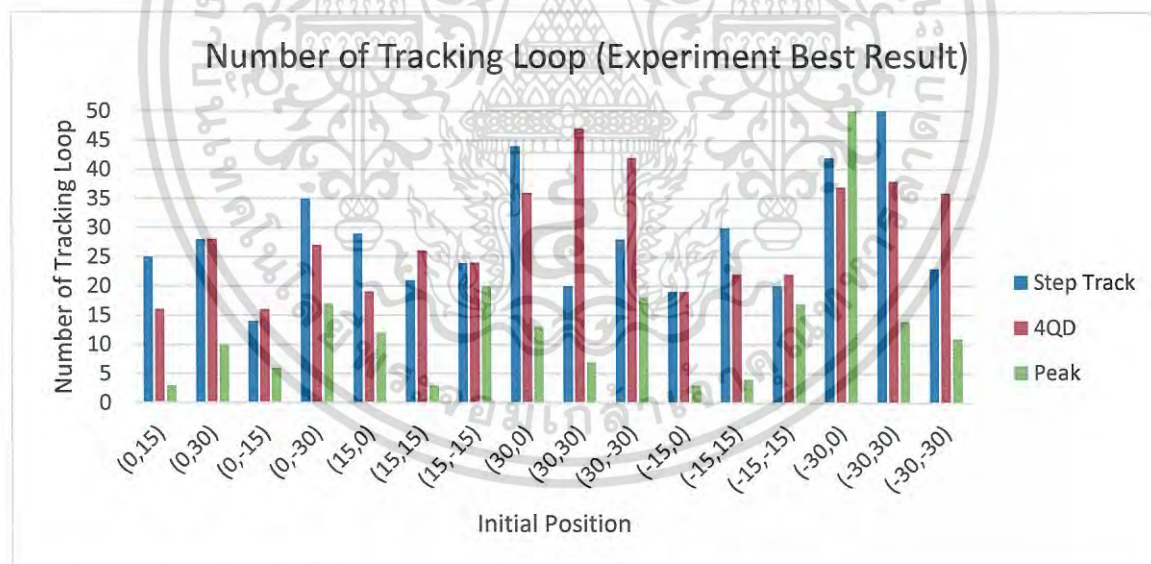


รูปที่ 4.26 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในกระบวนการติดตามแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม เทียบระหว่างแบบจำลองและอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด)

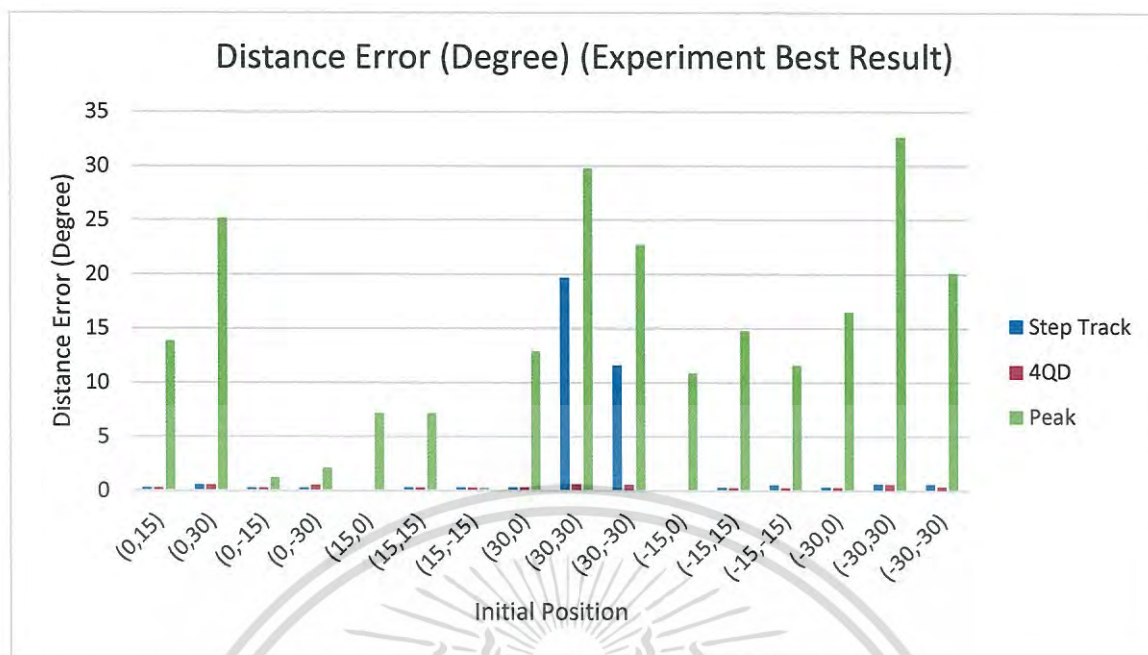
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.27 และ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนครั้งที่ใช้และค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในแต่ละกระบวนการติดตาม โดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง ซึ่งจากรูปที่ 4.28 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามมีค่าสูงมาก และมีเพียงตำแหน่งทดลองที่ (15,-15) เท่านั้นที่การทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามสามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสง และเมื่อทำการปรับแกนแนวตั้งของรูปที่ 4.118 ดังรูปที่ 4.29 จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในแต่ละกระบวนการติดตามในตำแหน่งที่สามารถปรับระนาบได้มีค่าใกล้เคียงกัน

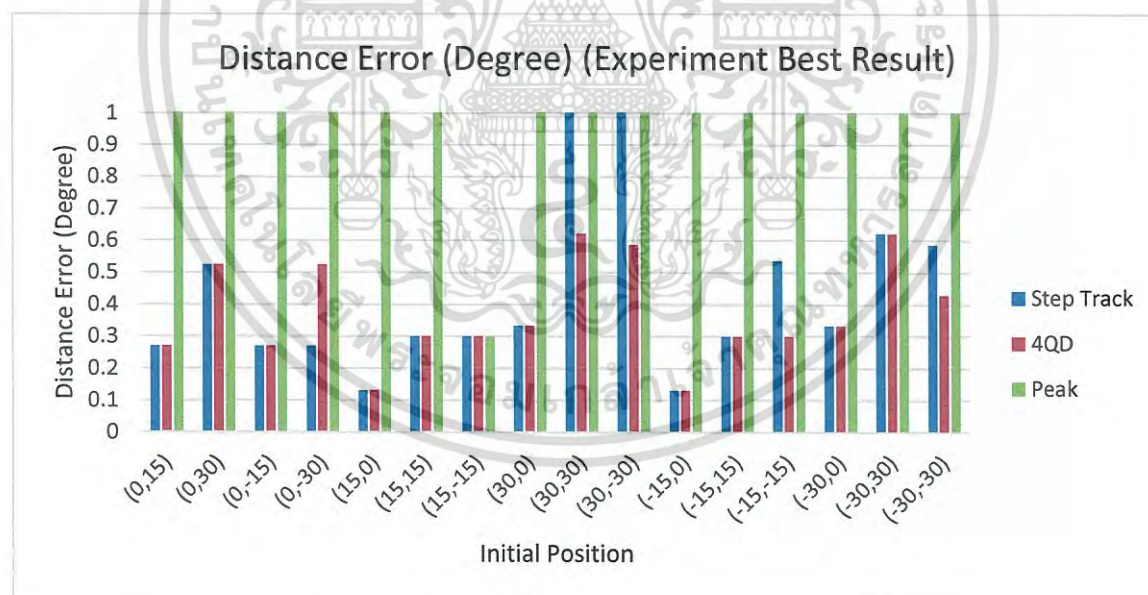
เนื่องจากการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามและมีเพียงตำแหน่งทดลองที่ (15,-15) เท่านั้นที่การทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามสามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสง และในกระบวนการติดตามแบบสเต็ป มีตำแหน่งที่ (30,30) และ (30,-30) ที่อุปกรณ์ไม่สามารถปรับระนาบเข้าหาตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ ผู้วิจัยจึงเลือกทำการวิเคราะห์เฉพาะกระบวนการติดตามแบบสเต็ป และกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ติดตามแสงใน 4 จตุภาค เฉพาะตำแหน่งที่สามารถปรับระนาบได้สำเร็จ ดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 จะพบว่าทั้งสองกระบวนการติดตามมีจำนวนครั้งที่ใช้และค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.27 จำนวนครั้งที่ใช้ในแต่ละกระบวนการติดตาม โดยใช้แบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด)

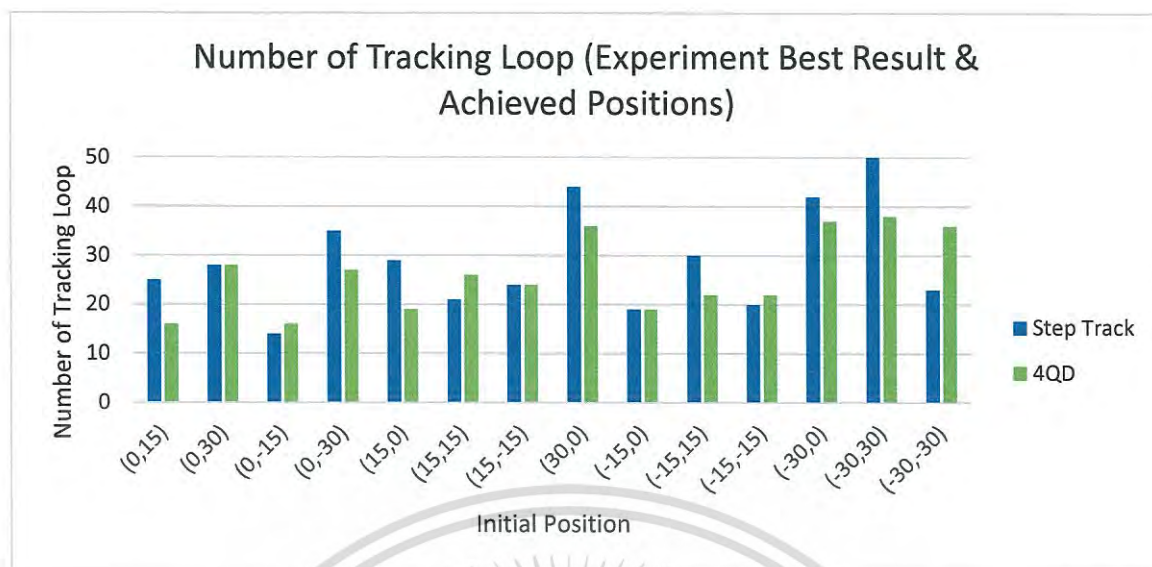


รูปที่ 4.28 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในแต่ละกระบวนการ โดยใช้แบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด)

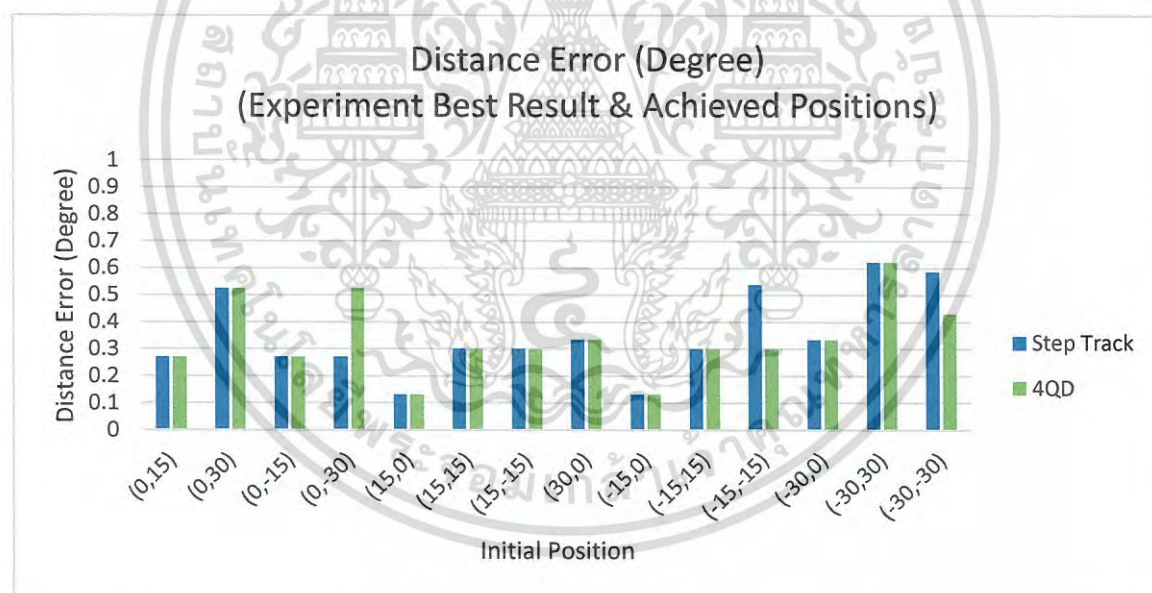


รูปที่ 4.29 ภาพขยายแกนตั้งของรูปที่ 4.592 ในช่วง 0 ถึง 1 เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนรบกวนกำลังสองเฉลี่ยในกระบวนการติดตามแบบสเต็ป และแบบไขว้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาคมีค่าน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 จำนวนครั้งที่ใช้ในแต่ละกระบวนการติดตาม โดยใช้แบบอุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด และสามารถปรับระนาบได้สำเร็จ)



รูปที่ 4.31 ค่าความคลาดเคลื่อนระยะทางในแต่ละกระบวนการ โดยใช้แบบอุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับทดลอง (เลือกเฉพาะค่าที่ดีที่สุด และสามารถปรับระนาบได้สำเร็จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 4.4.1 สรุปผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองพบว่าทุกกระบวนการติดตามสามารถปรับระนาบอุปกรณ์กลับมายังตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ จากรูปที่ 4.13 พบว่าจำนวนครั้งที่ใช้ในแต่ละกระบวนการติดตามมีความใกล้เคียงกัน โดยกระบวนการติดตามแบบสแต็ป และกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค มีจำนวนครั้งที่ใช้ในแต่ละกระบวนการติดตามมีความใกล้เคียงกันมาก และจากรูปที่ 4.14 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาคมีค่าน้อยที่สุด ตามมาด้วยกระบวนการติดตามแบบสแต็ป และแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม แต่เป็นความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาทิศทางการเคลื่อนที่ของกระบวนการติดตามแบบสแต็ป และแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค พบว่ามีทิศทางการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในแบบที่ไม่ใช้กระบวนการติดตามแสงจะใช้ระยะทางที่ไกลกว่า และใช้เวลานานกว่า เนื่องจากไม่ได้ใช้กระบวนการติดตามจึงต้องหาตำแหน่งที่มีความเข้มแสงสูงสุดทีละแกน

#### 4.4.2 สรุปผลการทดลองที่ 2

จากการทดลองพบว่าอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองไม่สามารถปรับระนาบไปยังตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ทุกครั้ง แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าที่ดีที่สุดในแต่ละตำแหน่งการทดลองของแต่ละกระบวนการติดตาม พบว่าอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองสามารถปรับระนาบไปยังตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ โดยเฉพาะกระบวนการติดตามแบบสแต็ป และแบบใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงใน 4 จตุภาค ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจากรูปที่ 4.18 และ 4.22 จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแบบจำลอง และพบว่าจำนวนครั้งที่ใช้ในกระบวนการติดตามทั้งสองแบบมีความใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 4.17 และ 4.21 แต่ในส่วนการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตามสามารถปรับระนาบอุปกรณ์ทดลองไปยังตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้เพียงบางครั้ง

ทั้งนี้การที่อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองไม่สามารถปรับระนาบไปยังตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ เนื่องจากค่าความเข้มแสงที่อ่านจากตัวตรวจจับแสงมีค่าที่แกว่งและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ต่ำหรือไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของมุมในแต่ละระนาบ ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดลองโดยใช้แบบจำลอง ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์ตรวจจับแสง ดังนั้นการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้อุปกรณ์ที่ประสิทธิภาพและความเสถียรที่มากขึ้น ย่อมส่งผลให้ผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีมากขึ้น

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัยซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทดลองกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง โดยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการติดตาม โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองวิจัยออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 เป็นการทดลองกระบวนการติดตามโดยใช้แบบจำลอง และช่วงที่ 2 เป็นการทดลองกระบวนการติดตามด้วยอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลอง โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 5 บท คือ บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย และขอบเขตการวิจัย ส่วนบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการสื่อสารไร้สายผ่านแสง และกระบวนการติดตามที่นำมาใช้ในการวิจัย ในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้กล่าวถึงขั้นตอนการทดลองวิจัยกระบวนการติดตามแสง ในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง บทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการทดลองวิจัย และบทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 5.2 สรุปผลงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการติดตามแสงในการสื่อสารไร้สายผ่านแสง เพื่อให้อุปกรณ์สื่อสารผ่านแสงสามารถส่งข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยทดลองกระบวนการติดตามแบบสเต็ป กระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์จับแสงใน 4 จตุภาค และการทดลองแบบไม่ใช้กระบวนการติดตาม โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือการทดลองโดยใช้แบบจำลอง พบว่าทุกกระบวนการติดตาม รวมไปถึงการทดลองที่ไม่ใช้กระบวนการติดตาม สามารถปรับระนาบอุปกรณ์ไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มแสงสูงสุดได้ และเมื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการติดตามจะพบว่ามีความใกล้เคียงกันระหว่างกระบวนการติดตามแบบสเต็ป และกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ติดตามแสงใน 4 จตุภาค ในส่วนการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองพบว่าอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการทดลองไม่สามารถปรับระนาบไปยังตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ทุกครั้ง แต่เมื่อนำค่าการทดลองมาจำแนกโดยพิจารณาจากค่าที่ดีที่สุดจะพบว่าอุปกรณ์ยังสามารถปรับระนาบไปยังตำแหน่งที่ชี้ตรงกับแหล่งกำเนิดแสงได้ ในเชิงประสิทธิภาพพบว่ามีความใกล้เคียงกันระหว่างกระบวนการติดตามแบบสเต็ป และกระบวนการติดตามแบบใช้อุปกรณ์ติดตามแสงใน 4 จตุภาคเช่นกันซึ่งแสดงถึงความเป็นได้ที่จะนำกระบวนการติดตามแบบสเต็ป ซึ่งเป็นกระบวนการติดตามที่ใช้ในระบบงานสายอากาศ มาประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารไร้สายผ่านแสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

แม้ว่ากระบวนการติดตามแสงจะสามารถทำงานได้ในอุปกรณ์ทดลอง แต่เนื่องจากไม่สามารถทำได้สำเร็จทุกครั้ง ซึ่งเป็นไปได้ว่าการใช้ค่าความเข้มแสงเพียงอย่างเดียวในการปรับระนาบอุปกรณ์สื่อสารผ่านแสงอาจไม่เพียงพอ อาจจำเป็นต้องใช้ตัวแปรชนิดอื่นๆ ด้วยเช่น ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) ค่าความคลาดเคลื่อนบิต เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Chadha D. **Terrestrial Wireless Optical Communication**. McGraw-Hill Education
- [2] 2017. **FREE SPACE OPTICS TECHNOLOGY OVERVIEW**. [Online]. Available : [www.lightpointe.com](http://www.lightpointe.com).
- [3] 2015. [www.comms.co.uk](http://www.comms.co.uk) [Online].
- [4] 2016. **FSO Guide**  
Available : [www.fsona.com](http://www.fsona.com).
- [5] David G. Aviv. 2006. **Laser Space Communications**. New York : Artech House.
- [6] Ortiz G.G., Lee S., Alexander W. “Sub-Micron Pointing System Design for Deep Space Optical Communication” **19<sup>th</sup> International Commun. Sat. System Conf. SPIE Proc.** Vol. 4272. 2001.
- [7] Boroson D., Bondurant R.S. and Scozzafava J.J., “Overview of High Rate Deep Space Laser Communication Options” **Free Space Laser Communication Technologies XVI. SPIE proceedings**. Vol. 5338. January 2004.
- [8] Toyoshima M. “Special Report: Trends of research and development of optical space communication technology” **Space Japan Review**. No. 44. 2005.
- [9] Kedar D. and Arnon S. “Urban Optical Wireless Communication Networks: The main challenges and possible solutions” **IEEE Optical Communications**. May 2004. pp. 52-57.
- [10] Infrared Data Association. **Serial Infrared Physical Layer Link Specification**. Version 1.3 October 15, 1998.
- [11] Infrared Data Association. **Serial Infrared Physical Layer Link Specification**. Version 1.1 October 15, 1995.
- [12] Infrared Data Association. **Serial Infrared Link Access Protocol (IrLAP)**. Version 1.1 October 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] Infrared Data Association. Link Management Protocol (IrLMP). Version 1.1 January 1996.
- [14] Hewlett-Packard Company and IBM Corporation. Request for Comments on Advance Infrared (Air) IrPHY Draft Physical Layer Specification. Version 0.4 January 1998.
- [15] Hewlett-Packard Company and IBM Corporation. Request for Comments on Advance Infrared (Air) IrMAC Draft Protocol Specification Version 0.2 July 1997.
- [16] Project IEEE 802.11. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Draft 6.1 June 1997.
- [17] Abdulsalam G.A. and Khaleel S.A. Ch. 5 Free Space Optical Communications - Theory and Practices. Contemporary Issues in Wireless Communications. Edited by Mutamed Khatib. ISBN 978-953-51-1732-2.
- [18] Friedman E., Miller J.L. Photonics Rules of Thumb McGraw-Hill Professional. 2003.
- [19] Weichel H. Laser Beam Propagation in the Atmosphere. SPIE. Bellingham WA. 1990.
- [20] Killinger D.K. "Free Space Optics for Laser Communication Through the Air" Optics & Photonics News vol. 13 pp. 36-42. October 2002.
- [21] Nakarach N. and Cherntanomwong P. "Step Track Algorithm Using in Free Space Optics" 2015 7<sup>th</sup> International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). Chiang Mai. Thailand. pp. 534-538.
- [22] Nakarach N. and Cherntanomwong P. "The Comparison of Optical Beam Tracking Algorithm for Free Space Optics" 5<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress. Pattaya. Thailand. 8-10 March 2017. pp. 449-452.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [23] Hawins G.J., Edwards D.J., and McGeehan J.P. "Tracking System for Satellite Communications" *IEE Proceedings*. vol. 135. Pt. F. No. 5. pp. 393-407. October 1988.
- [24] Pirhadi A., Hosseini M. and Hakkak M. "A Novel Implementation of GEO Satellite Step Track Subsystem" *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering* vol. 4 No. 1 pp. 71-76. Winter-Spring 2005.
- [25] Schmidt C., Horwath J., "Wide-Field-of-Regard Pointing, Acquisition and Tracking-System for small Laser Communication Terminals" *Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2012*, pp. 4-8 Ajaccio. Corsica. France. October 9-12 (2012).
- [26] Soysal G., Efe M., "Kalman Filter Aided Cooperative Optical Beam Tracking" *Radioengineering* Vol. 19 No. 2 pp. 242-248 June 2010.
- [27] 2017. **Arduino CNC Datasheet**. [Online].  
Available : <https://www.openimpulse.com/blog/wp-content/uploads/wpsc/downloadables/Arduino-CNC-Shield.pdf>.
- [28] 2017. **17HS4402 2 Phase Hybrid Stepper Motor Datasheet**. [Online].  
Available : <http://www.datasheetspdf.com/datasheet/17HS4402.html>
- [29] 2017 : **Arduino Uno R3**. [Online].  
Available : <https://www.pololu.com/product/2191>.
- [30] 2017 : **Lux to watts calculation**. [Online].  
Available : <http://www.rapidtables.com/calc/light/how-lux-to-watt.htm>.
- [31] 2017 : **Root-mean-square deviation**. [Online].  
Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square\\_deviation](https://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square_deviation).
- [32] Widnall S. **Lecture L3 - Vectors, Matrices and Coordinate Transformations** 16.07 Dynamics. Fall 2009, Lecture notes based on J. Peraire Version 2.0.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Nakarach N. and Cherntanomwong P. “Step Track Algorithm Using in Free Space Optics” 2015 7<sup>th</sup> International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). Chiang Mai. Thailand. pp. 534-538.
- [2] Nakarach N. and Cherntanomwong P. “The Comparison of Optical Beam Tracking Algorithm for Free Space Optics” 5<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress. Pattaya. Thailand. 8-10 March 2017. pp. 449-452.



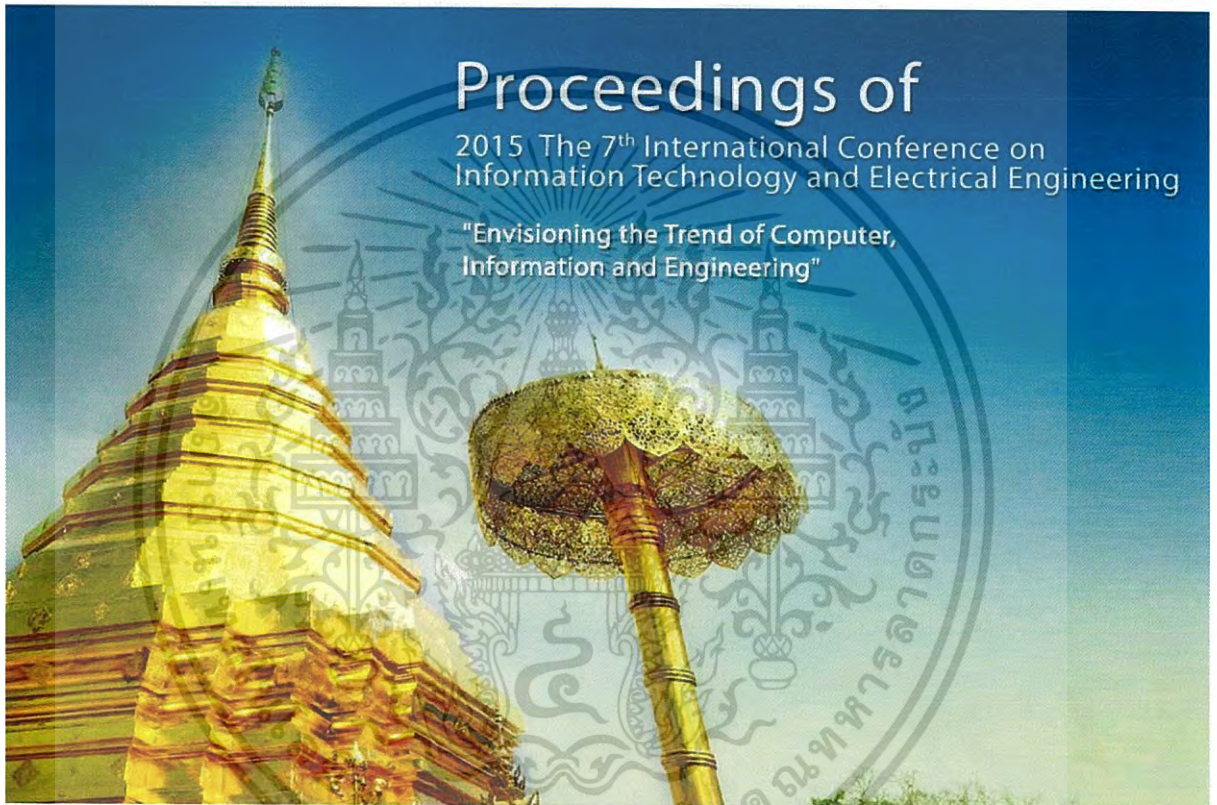
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN: 978-1-4673-7862-8



# ICITEE2015

2015 The 7<sup>th</sup> International Conference on  
Information Technology and Electrical Engineering



## Proceedings of

2015 The 7<sup>th</sup> International Conference on  
Information Technology and Electrical Engineering

"Envisioning the Trend of Computer,  
Information and Engineering"

**Le Méridien Chiang Mai Hotel, Thailand**  
**29-30 October 2015**



Organized by  
Faculty of Information Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, THAILAND



Co-organized by  
Department of Electrical Engineering and Information Technology  
Universitas Gadjah Mada, INDONESIA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Step Track Algorithm in Free Space Optics

Nuttapon Nakarach  
 Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Bangkok, Thailand  
 s6601107@kmitl.ac.th

Panarat Cherntanomwong  
 Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Bangkok, Thailand  
 krpanara@kmitl.ac.th

**Abstract**—Free Space Optics (FSO) are going to be popular in a variety of the communications due to the higher bandwidth and data rate compared with the microwave communication systems. However, there are other factors to make the FSO system more efficient. One of them is the beam alignment. In this paper, the transponder alignment for FSO is investigated. In this paper the gradient technique, one of step track algorithm, employed for transponder alignment. The simulation results show that the gradient technique can be used for beam alignment of the optical transponder.

**Index Terms**—Free Space Optics, FSO, Tracking, Step Track.

## I. INTRODUCTION

FSO is the communication using light through the medium. Generally, the system consists of the light source modulated in high bit rate, the telescope used for guiding the light to other transponders, the active tracking system used for beam alignment to maximize throughput of the communication system and the receiver amplifier used for increasing and optimizing received signals. The light sources which commonly used are laser and LEDs [1].

Beam alignment is significant to make the FSO systems more efficient. It will be used when the alignment of transponders is changed. The possible causes of the unstable position of transponder are the vibration of the transponder itself and the effect from buildings and the atmosphere [2].

Step track algorithm is the simple active algorithm commonly used for tracking the object in space such as satellites. The method called the gradient algorithm is used to implement the step track algorithm.

This paper will show the simulation of the step track algorithm using in the FSO system in which the optical intensity is used instead of the RFs received signal level. The purpose of this paper is to investigate that the step track algorithm is able to be used for the active tracking system of the FSO system.

## II. STEP TRACK ALGORITHM

Step Track Algorithm is the tracking algorithm commonly used to track medium size antennas. Generally, the RF signal

strength is used as the reference signal. This algorithm is simple and easy to be implemented [3]. There are many methods to implement the step tracking. The gradient algorithm which is the most efficient and has been popularly used so far is used in this paper.

The gradient algorithm is used for maximum gradient searching. There are two defined directions called “Steepest Accent” and “Steepest Decent” [4]. The first one is used to determine the direction of the gradient of the functions and the second one is used to determine the opposite direction of the gradient. Direction determination can be selected by gradient measurement in the searching boundary as shown in Figure 1. Figure 2 shows searching boundaries in every quadrant. The searching boundary depends on the direction of the maximum gradient.  $f_1$  is the beacon signal of the initial position for the searching boundary,  $f_2$  is the beacon signal of the searching position in x-axis,  $f_3$  is the beacon signal of the searching position in xy-axis and  $f_4$  is the beacon signal of the searching position in y-axis. These parameters can be defined in the following equation.

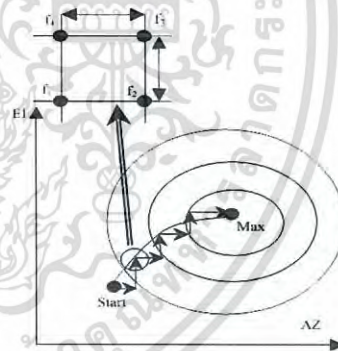


Fig. 1. Gradient Algorithm [4]



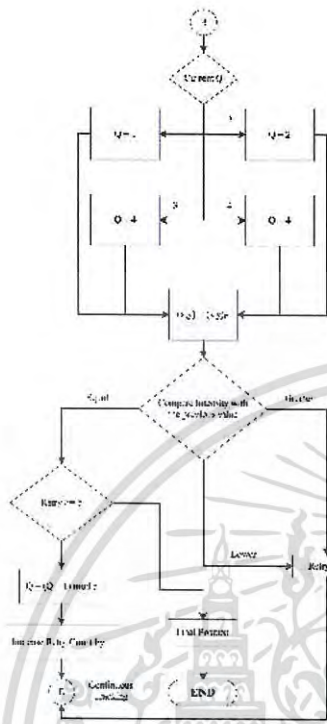


Fig. 5. Step Track Algorithm-3

distance  $z$  equal to zero meters.  $\omega_0$  represents the beam radius where the distance  $z$  equals to zero meters,  $\omega(z)$  represents the beam radius in function of  $z$ ,  $\lambda$  represents to wavelength in meter and  $n$  represents the refractive index. In the simulation, some parameters were fixed as follows.

Since this paper is the first phase of research in FSO, so we decided to make the assumption in the ideal case. We assumed that  $I_0 = 100 \text{ W/m}^2$ ,  $\omega_0 = 0.05 \text{ m}$ ,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $n = 1.00293$ ,  $\Delta x = 100 \mu\text{m}$ ,  $\Delta y = 100 \mu\text{m}$  and  $z$  will be increased 1,000 m per step for 10 experiments starting from 1,000 m to 10,000 m.

For measuring the light beam intensity, one sensor with the 0.01 m-radius light received area is considered. The light beam intensity is measured at the 640 sampling points inside the area and then averaged. The sampling points are shown in Figure 8.

In the simulation, we placed sensors in 8 initial points on the  $xy$ -plane as shown in Figure 9. The distance between each initial point is  $\omega(z)/2$  from the center of the light beam. The step track algorithm is used to move the sensor to the maximum gradient point which is the center of the light beam of Figure 9.

**B. Simulation Result**

The result is summarized in TABLE I in term of the number of loops using in the step track algorithm. The result shows that the number of loops will increase when the distance  $z$  increases.

Another thing found in the simulation is that the number of loops of some initial points which have 45 degrees angle from  $x$ -axis or  $y$ -axis is smaller, this is because of the distance of the moving sensor in each loop is longer than the other direction

The direction of a moving sensor in the experiment can be shown in Figure 10.

**IV. CONCLUSION**

This paper presents the tracking algorithm in which the gradient algorithm is used for beam alignment of the optical transponder. The simulation showed that the number of tracking loop depends on the distance and direction of the tracking algorithm. Moreover, we found that this algorithm is able to be used in the real FSO system for beam alignment.

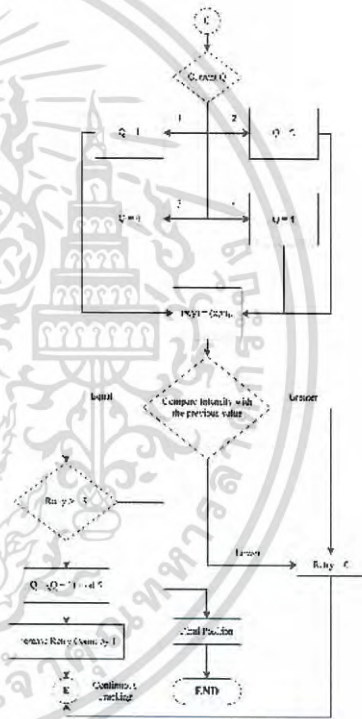


Fig. 6. Step Track Algorithm-4

TABLE I. SIMULATION RESULT

Distance	Number of loop in searching phase							
	$(\frac{w_2}{2}, 0)$	$(-\frac{w_2}{2}, 0)$	$(0, \frac{w_2}{2})$	$(0, -\frac{w_2}{2})$	$(\frac{w_2}{2\sqrt{2}}, \frac{w_2}{2\sqrt{2}})$	$(\frac{w_2}{2\sqrt{2}}, -\frac{w_2}{2\sqrt{2}})$	$(-\frac{w_2}{2\sqrt{2}}, \frac{w_2}{2\sqrt{2}})$	$(-\frac{w_2}{2\sqrt{2}}, -\frac{w_2}{2\sqrt{2}})$
1000 m	260	262	261	261	186	187	187	186
2000 m	274	275	275	275	196	197	197	196
3000 m	296	297	296	296	211	212	212	211
4000 m	323	325	324	324	231	232	232	231
5000 m	356	357	357	357	254	255	255	254
6000 m	392	394	393	393	280	280	280	280
7000 m	431	432	432	432	307	308	308	307
8000 m	471	473	472	472	336	336	336	336
9000 m	514	515	514	514	366	366	366	366
10000 m	557	559	558	558	396	397	397	396

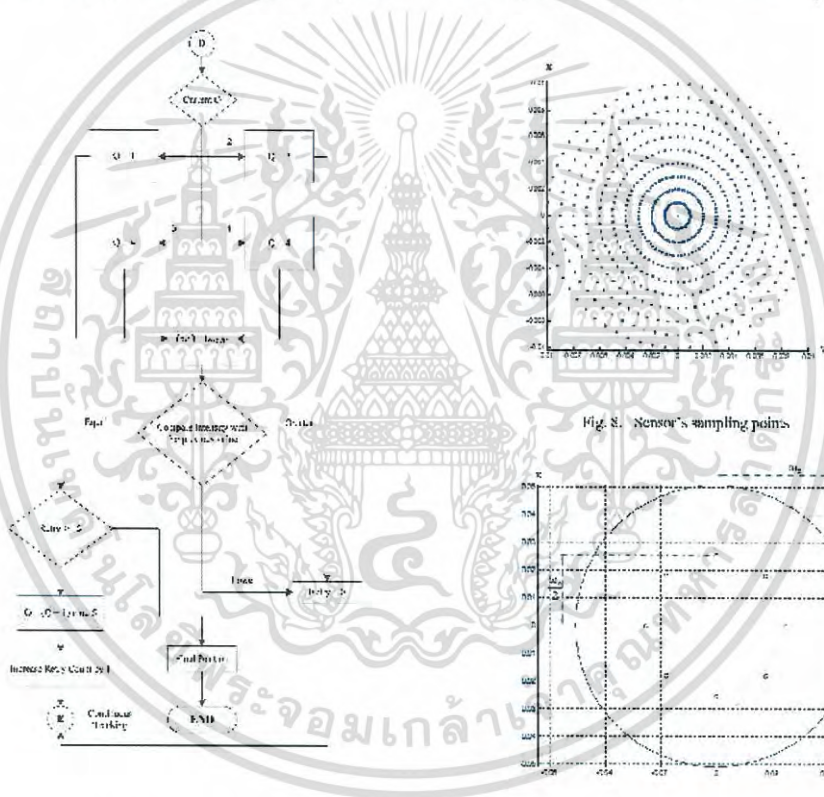


Fig. 7. Step Track Algorithm-5

Fig. 9. Simulation setup

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

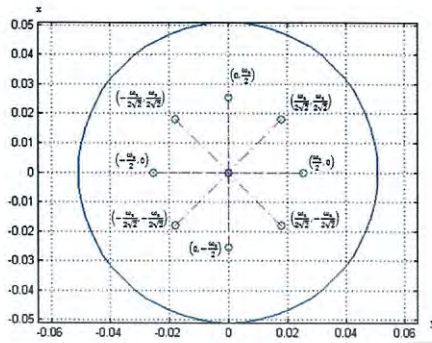


Fig. 10. Direction of sensor

REFERENCES

- [1] D.K. Killinger, "Free Space Optics for Laser Communication Through The Air," *Optics & Photonics News*, vol. 13, pp. 36–42, October 2002.
- [2] S. Bloom, *The Physics of Free-Space Optics*, White Paper, 2002, pp. 15-16.
- [3] G.J. Hawins, D.J. Edwards, and J.P. McGeehan, "Tracking System for Satellite Communications," *IEE Proceedings*, vol. 135, Pt. F, No. 5, pp. 393–407, October 1988.
- [4] A. Pirhadi, M. Hosseini, and M. Hakkak, "A Novel Implementation of GEO Satellite Step Track Subsystem," *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 4, No. 1, pp. 71–76, Winter-Spring 2005.
- [5] R. Menzel, *Photonics Linear and Nonlinear Interaction of Laser Light and Matter*, 2nd ed., Springer Berlin Heidelberg New York, 2007, pp. 52, 79.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# iEECON 2017

The 2017 International Electrical Engineering Congress  
8-10 MARCH 2017, PATTAYA THAILAND



## Proceedings

### VOLUME II

COMMUNICATIONS

ELECTRONICS & CONTROL

DIGITAL SIGNAL PROCESSING

COMPUTER & IT

Organized by



Technical Co-sponsored by



Sponsored by



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Comparison of Optical Beam Tracking Algorithm for Free Space Optics

Nuttapon Nakarach  
 Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Bangkok, Thailand  
 56601107@kmitl.ac.th

Panarat Chermtanomwong  
 Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Bangkok, Thailand  
 panarat.ch@kmitl.ac.th

**Abstract**— Free Space Optics (FSO) is the technology which has robustness in transmitting a large amount of data and energy efficient. However, there are other factors to make the FSO system more efficient. One of them is the optical beam tracking. This factor will use the optical alignment mechanism to align the optical transceiver to the maximum power point. In order to maximize the power, the tracking algorithm will apply to the mechanism. In this study these tracking algorithms which are simple peaking, step track algorithm (gradient method) and 4 Quadrant Detectors were used to peak the transponder to the maximum energy position. The simulation results show the processing time and efficiency for each algorithm. This result also shows that which algorithm is suitable for which free space optics application.

**Keywords**— Free Space Optics; FSO; Tracking

## I. INTRODUCTION

FSO is the communication using light through the medium. Generally, the system consists of the light source which is modulated in high bit rate, the telescope using for guiding the light to other transponders, the active tracking system for beam alignment to maximize throughput of the communication system and the receiver amplifier for increasing and optimizing received signals. The light sources which commonly used are laser and LEDs [1].

Beam alignment is one of the factors using to maximize the throughput for FSO. It will be used in the case of the unstable transponder which occurs by the vibration of the transponder and buildings and the atmospheric effects [2].

Simple peaking is the simple method to use for aligning the transceiver to the maximum power point. This method will adjust the transceiver axis by axis so there is no need the higher performance of the pointing controller.

Step track algorithm is another simple active algorithm using in medium size RF antennas for tracking the object in space such as satellites. This algorithm uses only the received signal level and the method called "Gradient Algorithm" is used to implement the step track algorithm.

4 Quadrants Detectors (4QD) is the light sensor which has 4 area of sensor placed in 4 quadrants. 4QD is used to provide simultaneous error outputs in each axis (x and y or azimuth and

elevation) to the actuator controller. The zero error output means the transceiver is on the maximum energy position.

This paper will show the simulation of the tracking algorithms in the FSO system in which the optical intensity is used for the tracking signal reference. The purpose of this paper is to compare performance of these tracking algorithms and will be further selected to use in a variety of FSO application.

## II. EASE OF USE

Step track algorithm is the tracking algorithm commonly using with medium size antennas. The algorithm uses the RF signal strength of the reference signal. It is so simple and easy to be designed with the low cost [3]. There are so many methods to implement step tracking. The gradient algorithm which is the most efficient and has been used so far is used in this paper.

Gradient algorithm is used for maximum gradient searching. There are two defined directions called "Steepest Ascent" and "Steepest Descent" [4]. The first one is used to determine the direction of the gradient of the functions and the second one is used to determine the opposite direction of the gradient. This can be described by Figure 1.

Direction determination can be selected by gradient measurement in the searching boundary as shown in Figure 1. This measurement can be determined by Figure 2. In Figure 2, there are searching boundaries in every quadrant. The searching boundary depends on the direction of the maximum gradient.  $f_1$  is the beacon signal of the initial position of the searching boundary,  $f_2$  is the beacon signal of the searching position in x-Axis,  $f_3$  is the beacon signal of the searching position in xy-Axis and  $f_4$  is the beacon signal of the searching position in y-Axis. The distances from  $f_1$  to  $f_2$ ,  $f_2$  to  $f_3$ ,  $f_3$  to  $f_4$  and  $f_4$  to  $f_1$  are the resolution of the algorithm ( $\Delta x$  and  $\Delta y$ ) which depend on the resolution of the active tracking hardware. These can be defined in the following equation.

$$f_1 = f(x, y), \tag{1}$$

$$f_2 = f(x + \Delta x, y), \tag{2}$$

$$f_3 = f(x + \Delta x, y + \Delta y), \tag{3}$$

and

$$I_4 = I_{(x, y + \Delta y)} \quad (4)$$

$$E_x = ((A+D) - (B+C)) / E_T, \quad (5)$$

$$E_y = ((A+B) - (C+D)) / E_T, \quad (6)$$

and

$$E_T = (A+B+C+D). \quad (7)$$

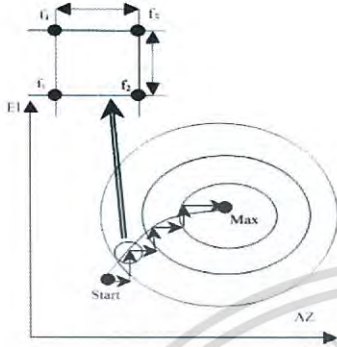


Fig. 1. Gradient Algorithm [4]

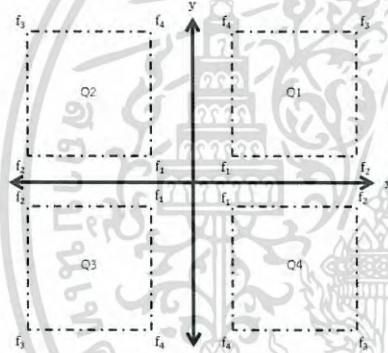


Fig. 2. Searching boundary [8]

### III. 4 QUADRANT DETECTORS

4 Quadrant Detectors (4QD) is the axis error measurement method using for active tracking algorithm. The axis error comes from the angle of the optical received signal which projects on each quadrant of the detector's surface. This error will be used by the pointing mechanism to adjust transceiver position. The axis error can be defined as the following equations [6, 7].

where A, B, C and D represents the signal from each quadrant as shown in Figure 3.  $E_x$  and  $E_y$  represent the error signal from x and y axis respectively and  $E_T$  represents the summation of the signals from every quadrant which is used to normalize the axis error signals.

In case of the perfect alignment for both axis  $E_x$  and  $E_y$  are equal to zero. If there is any tracking error in any axis the actuator control loop will active to adjust the transceiver alignment.

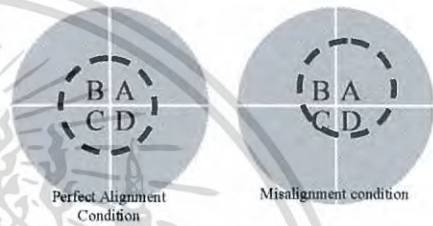


Fig. 3. The position of sensors in 4QD with optical received beam (dashed circle); left figure showed the perfect alignment, right figure showed the misalignment [6]

### IV. THE SIMULATION

#### A. Simulation Setup

The simulation was conducted using MATLAB software to simulate the optical beam tracking algorithm. The light beam intensity in the Gaussian form as shown in Eq. 8-9 [5] was used as the reference signal.

$$I_{Gauss}(r, z) = I_0 (\omega_0^2 / (\omega(z)^2)) \exp(-2(r/\omega(z))^2), \quad (8)$$

and

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/\omega_0^2 n \pi)^2}, \quad (9)$$

where  $I_{Gauss}(r, z)$  represents the beam intensity of Gaussian beam in watt per square meter,  $I_0$  represents the maximum intensity in watt per square meter where radius  $r$  and distance  $z$  equal to zero meters,  $\omega_0$  represents the beam radius where the  $z$  equals to zero meters,  $\omega(z)$  represents the beam radius in function of  $z$ ,  $\lambda$  represents to wavelength in meter and  $n$  represents the refractive index. In the simulation, some parameters were fixed as follows.

Assumed that  $I_0 = 100 \text{ W/m}^2$ ,  $\omega_0 = 0.05 \text{ m}$ ,  $\lambda = 1.55 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $n = 1.00293$ ,  $\Delta x = 100 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\Delta y = 100 \text{ }\mu\text{m}$  and  $z = 100,000 \text{ m}$ . For the intensity measurement, we simulated the sensor in a circular form with radius 0.01 m by measuring the average intensity from 640 sampling which are separated in 4 quadrants as shown in Figure 4. Simple peaking and step track algorithm

will use signal summation from every quadrant as the tracking reference signal.

In the simulation, we random 100 initial positions of the sensors on the xy-plane in the limit position of  $\pm 0.3\text{m}$  in both axes as shown in Figure 5. Then, these three tracking algorithms are used to move the sensor to the maximum signal reference point which is the center of the received optical beam for this case.

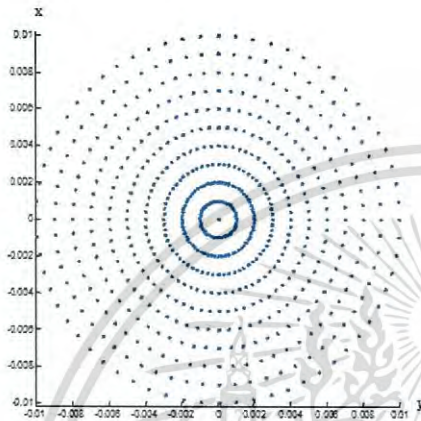


Fig. 4. Simulated Sensor [7]

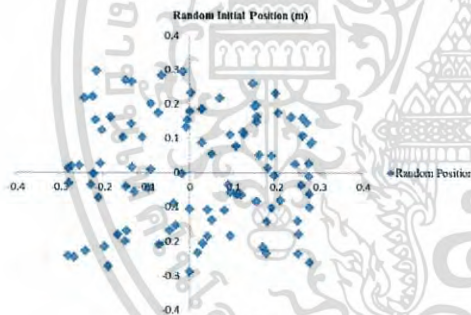


Fig. 5. Random Initial Positions

### B. Simulation Result

The result shows that the numbers of tracking loops for 4QD and step track algorithm are less than those for the simple peaking and the total processing time for these two algorithms are less than that for the simple peaking as shown in Figure 6. These results can confirm that it is better to implement the tracking algorithm for optical beam alignment than implementing the simple peaking method.

Moreover, the results show that the numbers of tracking loop and processing time of 4QD and step track algorithm are nearly the same as shown in Figure 7 but if we observed in the moving direction of these two methods, the direction of tracking algorithm using 4QD is better as shown in Figure 8, Figure 9 and Figure 10. That is because the gradient method will continue moving the mechanism in the same direction whenever the tracking reference signal (gradient) increasing but in 4QD, the axis errors will calculate in every single movement.

Another thing observed in this simulation is that the processing times per tracking step for both methods are quite not different as shown in Figure 11.

### V. CONCLUSION

This paper presents the performance comparison of the tracking algorithm which are used to align the optical beam for free space optics. The simulation results showed that the FSO system which has the tracking algorithm implemented in the optical alignment mechanism is better than the system using the simple peaking method. The simulation results also showed that the processing time of the step track and 4QD tracking are quite same but the moving direction of 4QD tracking is better than the step track algorithm. With this result, we can conclude that 4QD tracking is the better performance algorithm and this method is also suitable for the maneuverable system such as balloon, etc. due to the real time axis error calculation. For the step track algorithm, it is suitable for the stationary system. Moreover, if we consider in the cost of implementation, the step track algorithm will have lower cost of implementation.

### REFERENCES

- [1] D.K. Killinger, "Free Space Optics for Laser Communication Through The Air," Optics & Photonics News, vol. 13, pp. 36-42, October 2002.
- [2] S. Bloom, The Physics of Free-Space Optics, White Paper, 2002, pp. 15-16.
- [3] G.J. Hawkins, D.J. Edwards, and J.P. McGeehan, "Tracking System for Satellite Communications," IEE Proceedings, vol. 135, Pt. F, No. 5, pp. 393-407, October 1988.
- [4] A. Pirhadi, M. Hosseini, and M. Hakak, "A Novel Implementation of GEO Satellite Step Track Subsystem," Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 4, No. 1, pp. 71-76, Winter-Spring 2005.
- [5] R. Menzel, Photonics Linear and Nonlinear Interaction of Laser Light and Matter, 2nd ed., Springer Berlin Heidelberg New York, 2007, pp. 52, 79.
- [6] C. Schmidt, J. Horwath, Wide-Field-of-View Pointing, Acquisition and Tracking-System for small Laser Communication Terminals, Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2012, pp. 4-8, Ajaccio, Corsica, France, October 9-12 (2012).
- [7] G. Soysal, M. Efe, Kalman Filter Aided Cooperative Optical Beam Tracking, Radioengineering, Vol. 19, No. 2, June 2010, pp. 242-248.
- [8] N. Nakarach, P. Chentanonwong, Step Track Algorithm in Free Space Optics, 2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Chiang Mai, Thailand, pp. 534-538.

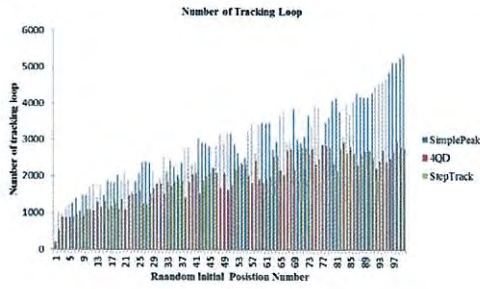


Fig. 6. Number of Tracking Loop

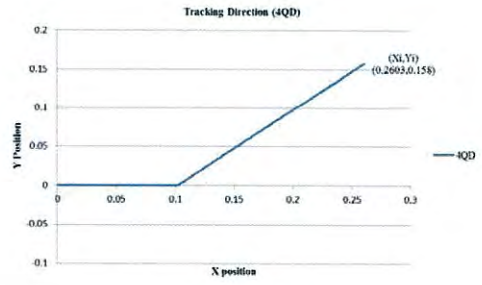


Fig. 9. Tracking Direction (4QD)

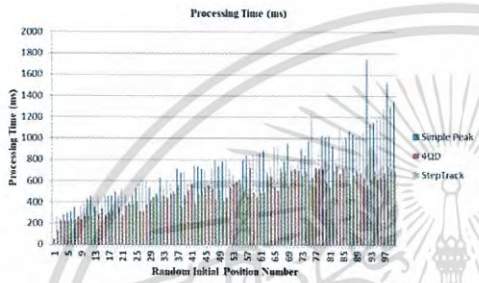


Fig. 7. Processing Time

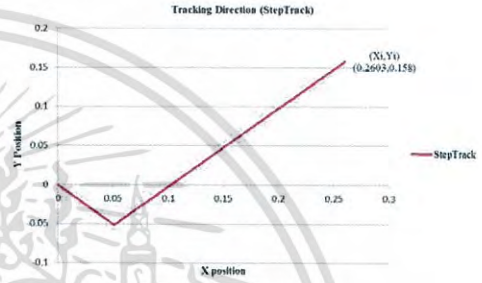


Fig. 10. Tracking Direction (Step track)

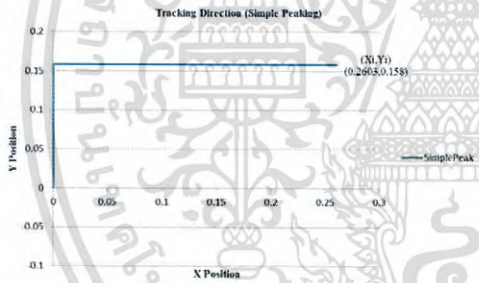


Fig. 8. Tracking Direction (Simple Peaking)

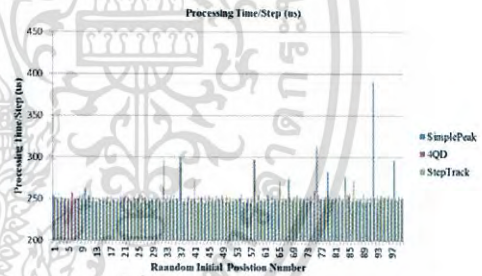


Fig. 11. Processing Time / Tracking Step (microseconds)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายณัฐพล นาคราช  
 วัน เดือน ปีเกิด 31 กรกฎาคม 2532 ที่สมุทรสงคราม  
 ที่อยู่ 135/22 ซ.รัตนานิเบศร์ 8 ถ.รัตนานิเบศร์  
 ตำบลบางกระสอ อำเภอเมือง นนทบุรี 11000  
 ประวัติการศึกษา 2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) โครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network)  
 2.) วิศวกรรมดาวเทียม

ประสบการณ์การทำงาน  
 พ.ศ.2553 นักพัฒนาซอฟต์แวร์ บริษัท วานเทจ บิสซิเนส โซลูชั่น (ประเทศไทย)  
 จำกัด  
 พ.ศ.2553-ปัจจุบัน วิศวกรอาวุโส ฝ่ายงานวิศวกรรมควบคุมดาวเทียม หน่วยงานวิศวกรรม  
 ดาวเทียม บริษัท ไทยคม จำกัด มหาชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้