

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 กล่าวนำ

บทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอ ผลการทดสอบ และ การวิเคราะห์อภิปรายผล ของระบบระบุตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นตามระเบียบวิธีวิจัยในบทที่แล้ว โดยเฉพาะการประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการหลอมรวมข้อมูลเซนเซอร์ด้วย Extended Kalman Filter (EKF) การทดสอบได้ดำเนินการตามเส้นทางสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบลูปในสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร โดยเปรียบเทียบความแม่นยำและความเสถียรของการระบุตำแหน่งจากสามวิธีหลัก ได้แก่ ORB-SLAM (ตำแหน่งสัมพัทธ์), GPS (ตำแหน่งสัมบูรณ์), และ EKF (การหลอมรวม) ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำเสนอในรูปแบบของตารางแสดงพิกัด, ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute Trajectory Error: ATE), ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยราก (Root Mean Square Error: RMSE), และกราฟเส้นทาง เพื่อยืนยันว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถบรรลุเป้าหมายด้านความแม่นยำและความต่อเนื่องของการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์อัตโนมัติได้

4.2 ผลการทดสอบความแม่นยำของอัลกอริทึม

เมื่อทำการทดลองการระบุตำแหน่ง โดยให้รถเคลื่อนที่ไปในแต่ละจุดและทำการบันทึกผล จะได้ตารางผลการทดสอบดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของตำแหน่งที่ความเร็วไม่เกิน 2.0 m/s

จุด	Ground Truth (เมตร)		ORB-SLAM (เมตร)		GPS (เมตร)		EKF (เมตร)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
A	0	0	-0.15	-1	0.04	1.2	-0.13	0.3
B	20	0	19.55	-0.35	18.55	-0.85	19.55	-0.35
C	40	0	36.86	-0.52	37.86	-0.95	38.9	-0.32
D	60	0	53.62	-0.7	53.92	0.54	56.23	0.1
E	80	0	72.92	-0.9	81.5	-0.9	81.2	0.5
F	94	0	86.49	-1.08	92.5	0.5	93.5	0.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของตำแหน่งที่ความเร็วไม่เกิน 2.0 m/s (ต่อ)

จุด	Ground Truth (เมตร)		ORB-SLAM (เมตร)		GPS (เมตร)		EKF (เมตร)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
G	94	14	85.47	13.25	94.2	13.05	95.4	13.5
H	80	14	79.92	13.98	81.5	13.4	79.2	13.6
I	60	14	62.2	13.59	64.2	14.5	63.2	13.8
J	40	14	38.1	13.17	37.1	15.02	39.1	13.4
K	20	14	21.58	12.42	20.88	13.69	20.6	14.2
L	0	14	1.05	12.2	0.5	15.05	0.54	14.4
A	0	0	0.02	0.11	1.5	-0.5	0.1	0.2

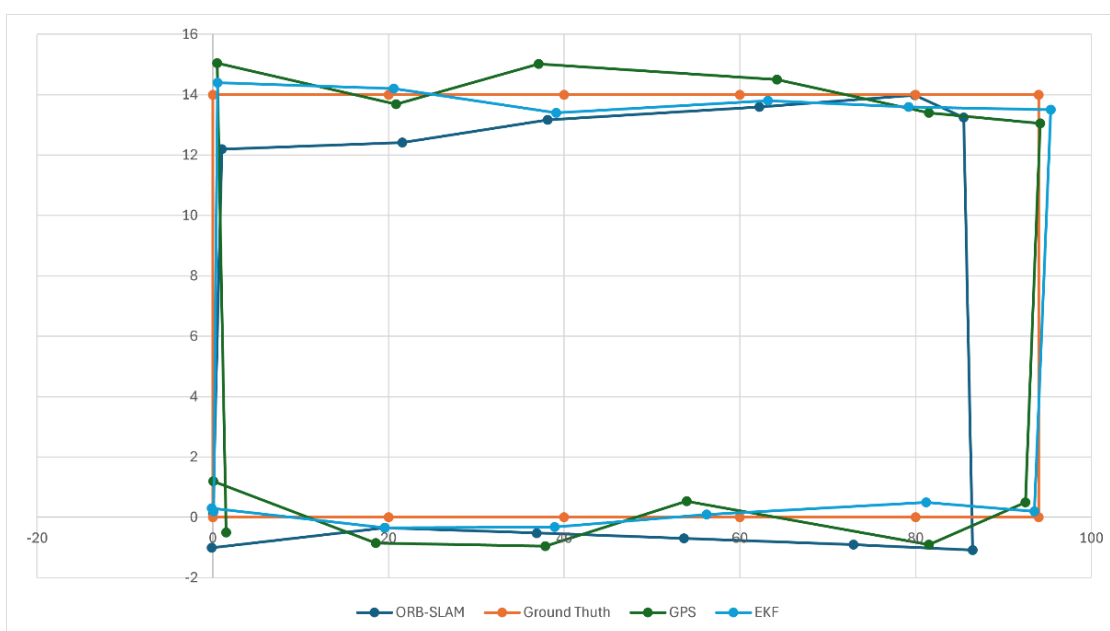
ตารางที่ 4.2 ความคลาดเคลื่อนกับตำแหน่งจริง (Absolute Trajectory Error)

จุด	ORB-SLAM (เมตร)	GPS (เมตร)	EKF (เมตร)
A	1.01	1.20	0.33
B	0.57	1.68	0.57
C	3.18	2.34	1.15
D	6.42	6.10	3.77
E	7.14	1.75	1.30
F	7.59	1.58	0.54
G	8.56	0.97	1.49
H	0.08	1.62	0.89
I	2.24	4.23	3.21
J	2.07	3.07	1.08
K	2.23	0.93	0.63
L	2.08	1.16	0.67
A	0.11	1.58	0.22

ตารางที่ 4.3 RMS error

Error (m)	ORB-SLAM	GPS	EKF
X	4.32	2.48	1.56
Y	0.92	0.80	0.36

จากการทดสอบจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางจริงเทียบกับระบบระบุตำแหน่งต่าง ๆ ดังกราฟที่แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 กราฟเส้นทางจริงเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ได้จากการทดสอบ

รูปนี้แสดงการเปรียบเทียบผลการระบุตำแหน่งจาก 4 แหล่งข้อมูล ได้แก่ ORB-SLAM, GPS, EKF และ Ground Truth ตามลำดับ เส้นสีส้ม (Ground Truth) เป็นค่ามาตรฐานสำหรับอ้างอิงการเปรียบเทียบ เส้นสีเขียว (GPS) มีการแกว่งและสวิงมาก โดยเฉพาะช่วงต้นทางและบริเวณหัวมุมของเส้นทาง สะท้อนข้อจำกัดของ GPS เส้นสีน้ำเงินเข้ม (ORB-SLAM) โดยรวมตามแนวโน้มได้ดีช่วงกลางทาง แต่มีอาการสะดุด สเกลดริฟต์ สูญเสียฟิเจอร์ในช่วงใกล้จบเส้นทาง ซึ่งมักเกิดเมื่อพื้นผิวซ้ำๆ แสงเปลี่ยนเร็ว ซึ่งทิศทางดังกล่าวตรงกับทิศทางของพระอาทิตย์ การหมุนเร็วทำให้เมตซ์ฟิเจอร์ยาก เส้นสีฟ้า (EKF) ใกล้เคียง Ground Truth มากที่สุดและต่อเนื่องตลอดเส้นทาง แสดงผลของการฟิวชันเซนเซอร์ที่ช่วยลดสัญญาณรบกวนจาก GPS และชดเชยการดริฟต์ของ ORB-SLAM

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองของตำแหน่งที่ความเร็วไม่เกิน 1.0 m/s

จุด	Ground Truth (เมตร)		ORB-SLAM (เมตร)		GPS (เมตร)		EKF (เมตร)	
	x	y	x	y	x	y	x	y
A	0	0	-0.13	-1.03	1.04	1.59	-0.17	0.16
B	20	0	20.15	-2	20.08	0.26	19.65	-0.13
C	40	0	39.12	-0.86	40.76	-1.31	39.79	-0.42
D	60	0	57.93	-0.07	59.62	-0.42	60.26	-0.16
E	80	0	78.46	-0.02	79.23	-0.25	80.03	0.17
F	94	0	91.14	-1.38	97.17	-1.39	94.11	0.1
G	94	14	92.32	12.75	94.67	14.97	93.45	13.09
H	80	14	78.91	13.96	80.95	13.69	79.52	14.14
I	60	14	59.37	14.35	59.45	14.77	59.57	13.87
J	40	14	38.42	13.14	39.77	12.85	40.63	13.88
K	20	14	19.12	14.14	18.64	13.17	20.35	13.67
L	0	14	-2.77	13.02	0.6	14.13	-0.32	13.79
A	0	0	-1.65	-0.55	1.56	0.39	-0.88	0.15

ตารางที่ 4.5 ความคลาดเคลื่อนกับตำแหน่งจริง (Absolute Trajectory Error)

จุด	ORB-SLAM (เมตร)	GPS (เมตร)	EKF (เมตร)
A	1.04	1.90	0.23
B	2.01	0.27	0.37
C	1.23	1.51	0.47
D	2.07	0.57	0.31
E	1.54	0.81	0.17
F	3.18	3.46	0.15
G	2.09	1.18	1.06
H	1.09	1.00	0.50
I	0.72	0.95	0.45
J	1.80	1.17	0.64

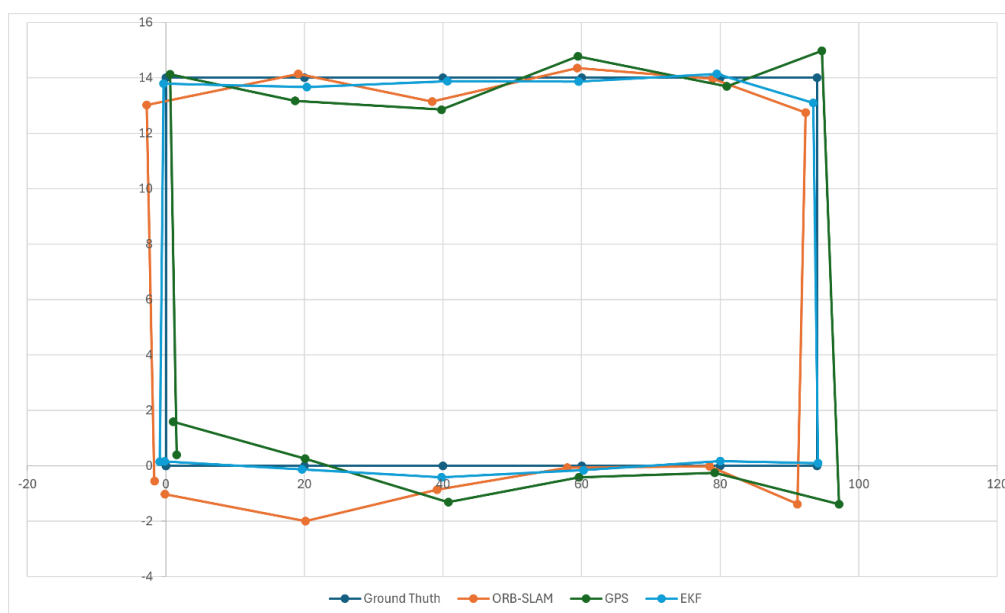
ตารางที่ 4.5 ความคลาดเคลื่อนกับตำแหน่งจริง (Absolute Trajectory Error) (ต่อ)

จุด	ORB-SLAM (เมตร)	GPS (เมตร)	EKF (เมตร)
K	0.89	1.59	0.48
L	2.94	0.61	0.38
A	1.74	1.61	0.89

ตารางที่ 4.6 RMS error

Error (m)	ORB-SLAM	GPS	EKF
X	1.61	1.20	0.43
Y	0.94	0.89	0.32

จากการทดสอบจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางจริงเทียบกับระบบระบุตำแหน่งต่าง ๆ ดังกราฟที่แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 กราฟเส้นทางจริงเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ได้จากการทดสอบ

ภาพนี้เปรียบเทียบเส้นทางกราวด์ทรูทกับผลจาก ORB-SLAM, GPS และ EKF ตลอดหนึ่งรอบเส้นทางสี่เหลี่ยมผืนผ้า กราวด์ทรูทเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ส่วน ORB-SLAM ตามแนวโน้มได้ดีแต่มีออฟเซตที่ขอบล่างและสวิงเล็ก ๆ บนแนวยาว สะท้อนการดริฟต์จากการจับคู่ฟีเจอร์และสภาพแสง

พฤติกรรมของ GPS ผันผวนกว่าชัดเจน มีสไปค์ไกล้มุมจากมัลติเพอร์และการเปลี่ยนเรขาคณิตของดาวเทียม EKF ให้ผลแนบกราวด์ทรีทที่สุต รูปร่างสี่เหลี่ยมต่อเนื่อง ไม่มีสไปค์ใหญ่ และคงความคลาดเคลื่อนต่ำตลอดทาง สรุปคือการฟิวชันด้วย EKF ลดทั้งนอยส์ระยะสั้นของ GPS และดริฟต์ของ ORB-SLAM ทำให้การประเมินตำแหน่งแม่นยำและเสถียรมากกว่าวิธีเดี่ยวๆ

ระบบการหลอมรวมข้อมูลด้วย Extended Kalman Filter (EKF) ให้ผลลัพธ์การระบุตำแหน่งที่แม่นยำและเสถียรที่สุดตลอดเส้นทาง โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยราก (RMS Error) ในแกน X ที่ดีกว่า ORB-SLAM ถึง ประมาณ 63% และ GPS ถึง ประมาณ 37% ในการทดสอบที่ความเร็ว 2.0 m/s EKF ประสบความสำเร็จในการแก้ไขปัญหา Scale Drift ที่เกิดขึ้นใน ORB-SLAM โดยเฉพาะในช่วงการเคลื่อนที่ทางยาว การทดสอบที่ความเร็วต่ำลงช่วยเพิ่มความแม่นยำให้กับระบบระบุตำแหน่งโดยรวม โดย EKF สามารถลดค่า RMS Error ในแกน X ให้เหลือเพียง 0.43 m

ผลการวิจัยยืนยันว่า การหลอมรวมข้อมูลเชิงกลและเชิงวิทัศน์ด้วย EKF เป็นแนวทางที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งที่เชื่อถือได้สำหรับหุ่นยนต์อัตโนมัติที่ใช้ในงานในสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร บทที่ 5 จะนำเสนอสรุปผลการวิจัยทั้งหมด, ข้อจำกัด, และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต