

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งประเมินสมรรถนะการระบุตำแหน่งของแพลตฟอร์มเคลื่อนที่จากสามแนวทาง คือ ORB-SLAM ที่อาศัยภาพจากกล้อง, GPS และ EKF ในฐานะวิธีหลอมรวมข้อมูล โดยเปรียบเทียบกับเส้นทางอ้างอิงราวด์ทรูทบนเส้นทางสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผลลัพธ์เชิงปริมาณจากบทที่ 4 ซึ่งชี้ว่าการฟิวชันด้วย EKF ให้ความแม่นยำและความเสถียรสูงสุด ทั้งในความเร็วไม่เกิน 1.0 m/s และ 2.0 m/s โดยมีค่าสัมพัทธ์คลาดเคลื่อนเชิงรากล้างสองเฉลี่ย RMS ต่ำกว่าวิธีอื่นอย่างสม่ำเสมอ และรูปทรงเส้นทางเกาะราวด์ทรูทต่อเนื่องกว่าวิธีเดียว ในขณะที่ ORB-SLAM ให้แนวโน้มตำแหน่งดีในทางตรง แต่มีอาการดริฟต์และออฟเซตเด่นชัดบริเวณแนวกลางและช่วงเปลี่ยนทิศ ส่วน GPS มีการผันผวนและสไปค์มากกว่าทุกวิธี โดยเฉพาะบริเวณหัวมุมซึ่งสะท้อนอิทธิพลมัลติเพอร์และเรขาคณิตกลุ่มดาวเทียมที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งเดินรถ

เมื่อลองลิกที่ตัวชี้วัด RMS ในกรณีความเร็วไม่เกิน 1.0 m/s จะพบว่าแกน X ของ EKF มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดประมาณ 1.56 เมตร ขณะที่ GPS อยู่ราว 2.48 เมตร และ ORB-SLAM สูงสุดราว 4.32 เมตร สำหรับแกน Y EKF อยู่ที่ประมาณ 0.36 เมตร ดีกว่า GPS ที่ราว 0.80 เมตร และ ORB-SLAM ที่ราว 0.92 เมตร เมื่อเพิ่มความเร็วเป็นไม่เกิน 2.0 m/s EKF ยังคงรักษาความได้เปรียบโดยแกน X เหลือราว 0.43 เมตร ต่ำกว่า GPS ที่ประมาณ 1.20 เมตร และ ORB-SLAM ที่ประมาณ 1.61 เมตร ส่วนแกน Y EKF ประมาณ 0.32 เมตร ต่ำกว่า GPS ราว 0.89 เมตร และ ORB-SLAM ราว 0.94 เมตร แนวโน้มเดียวกันนี้สะท้อนผ่านค่าความคลาดเคลื่อนเชิงวิถีแบบสมบูรณ์ (ATE) รายจุดซึ่ง EKF มักมีค่าน้อยที่สุดหรือใกล้เคียงน้อยที่สุดแทบทุกตำแหน่ง โดยเฉพาะช่วงทางตรงยาวด้านบนและด้านล่างของรูปทดสอบ ซึ่งยืนยันว่าเฟรมเวิร์กฟิวชันสามารถลดนอยส์ระยะสั้นของ GPS และขดเขยการดริฟต์เชิงสะสมของวิชันได้จริงในสภาวะแวดล้อมสนามทดลองนี้

การอภิปรายเชิงสาเหตุสามารถโยงกับคุณลักษณะของแหล่งข้อมูลที่ใช้ ORB-SLAM ซึ่งพึ่งพาพีเจอร์ภาพ มีแนวโน้มเกิดสเกลดริฟต์และออฟเซตเมื่อพื้นผิวซ้ำ ๆ แสงเปลี่ยนเร็ว หรือมีการหมุนและเร่งความเร็ว ทำให้ความคลาดเคลื่อนสะสมชัดในแนวกลางก่อนเลี้ยวขึ้นด้านบน ในทางกลับกัน GPS แม้จะไร้ดริฟต์เชิงสเกล แต่ไวต่อมัลติเพอร์ การบังสัญญาณ และความผิดพลาดแบบกระชอก โดยเฉพาะบริเวณหัวมุมหรือช่วงเริ่ม-จบการวิ่ง EKF จึงมีบทบาทสำคัญในการ “หักล้างจุดอ่อน” ของทั้งสองแหล่ง โดยใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ช่วยทำให้น้ำหนักการเชื่อถือสมดุลและทำให้เส้นทางที่ประมาณ

ได้ราบเรียบขึ้นโดยไม่สูญเสียไดนามิกส์ของระบบมากเกินไป ซึ่งปรากฏชัดผ่านกราฟเปรียบเทียบเส้นทางที่เส้น EKF แบนกราวด์ทรูทและไม่ปรากฏสไปค์ใหญ่แม้ในช่วงเปลี่ยนทิศทางที่เป็นจุดอ่อนไหวที่สุดของวิถีวัดทั้งหมด

ข้อจำกัดของการศึกษานี้อยู่ที่รูปทรงเส้นทางและเงื่อนไขแสงสว่างที่ค่อนข้างสว่าง รวมทั้งจำนวนความเร็วทดสอบที่มีสองระดับซึ่งยังไม่ครอบคลุมสเปกตรัมพฤติกรรมทั้งหมดของเซนเซอร์ นอกจากนี้ตำแหน่งของสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดมลพิษ เช่น ผนังโลหะหรือกระจก ยังเป็นบริบทเฉพาะของสนามทดลอง จึงอาจทำให้การสรุปอธิบายเชิงสากลต้องระมัดระวังเมื่อไปใช้งานกลางแจ้งในพื้นที่เปิดหรือแคบต่างรูปทรง อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดดังกล่าว ความสม่ำเสมอของแนวโน้ม RMS และ ATE ระหว่างสองระดับความเร็วและตลอดแนวเส้นทางทำให้ข้อสรุปว่าการฟิวชันมีประสิทธิภาพผลยังคงมีน้ำหนักเชิงประจักษ์ที่ชัดเจนจากข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ในบทที่ 4

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติคือระบบระบุตำแหน่งสำหรับแพลตฟอร์มเคลื่อนที่ที่ต้องการความต่อเนื่องและความแม่นยำในสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างควรพิจารณาใช้สถาปัตยกรรมฟิวชัน โดยปรับจูนเมทริกซ์ความแปรปรวนของกระบวนการและการวัดให้เหมาะสมกับสัดส่วนความเชื่อถือของกล้องและ GPS ภายใต้ระดับความเร็วและโปรไฟล์การเร่งที่แท้จริง ในพื้นที่ที่เสี่ยงมลพิษสูงควรเสริมมาตรการตรวจจับค่าผิดปกติของ GPS และแนวทางปฏิเสธการอัปเดตชั่วคราว ในขณะเดียวกันสตรีมภาพควรได้รับการจัดการคุณภาพ เช่น อัตราเฟรมและแสงที่เพียงพอ รวมทั้งการตั้งค่า exposure ที่ลด motion blur เมื่อวิ่งเร็ว เพื่อบรรเทาจุดอ่อนฝั่งวิชันซึ่งเป็นต้นทางของดริฟต์ในช่วงแนวเส้นตรงยาว ส่วนการปฏิบัติการจริงอาจกำหนดนโยบายการเดินรถให้เลี่ยงการหักมุมเร็วเกินจำเป็นหรือตั้งจุดแวะ recalibrate สั้น ๆ ในโซนที่มีพีเอจอร์ภาพชัดเจน เพื่อรักษาคุณภาพการประมาณตำแหน่งต่อเนื่องในงานภาคสนาม

แนวทางวิจัยต่อไปควรมุ่งทดลองบนรูปทรงเส้นทางที่หลากหลายขึ้น เช่น ลูปซิกแซกและเส้นทางมีส่วนโค้ง เพื่อทดสอบการคงทนต่อการหมุนและความโค้งที่ต่อเนื่อง อีกทั้งควรเพิ่มย่านความเร็วและโปรไฟล์การเร่ง-หน่วงเพื่อศึกษาจุดเปลี่ยนของคุณภาพสัญญาณทั้งฝั่งกล้องและดาวเทียม รวมถึงพิจารณาเพิ่มแหล่งข้อมูลอื่น เช่น IMU คุณภาพสูง ลิเดอร์ระยะสั้น หรือ RTK-GPS ในบางช่วง เพื่อประเมินว่าการฟิวชันหลายแหล่งที่ต่างกันมากขึ้นจะยกระดับ RMS และ ATE ลงได้อีกเพียงใด ควบคู่กับการทดสอบกลยุทธ์การคัดทิ้ง outlier แบบปรับตัวและการจูนพารามิเตอร์อัตโนมัติบนสภาพแวดล้อมจริงที่แสงและพื้นผิวเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ในภาพรวม บทที่ 4 ให้หลักฐานเชิงทดลองที่แข็งแกร่งว่าการหลอมรวมข้อมูลด้วย EKF คือแนวทางที่สมดุลที่สุดสำหรับงานระบุตำแหน่งใน

สนามทดลองนี้ และผลสรุปในบทนี้ชี้ทิศทางชัดเจนทั้งต่อการนำไปใช้จริงและการขยายผลเชิงวิชาการในขั้นถัดไปของงานวิจัย