รายงานการวิจัย

การตรวจจับถนนด้วยภาพสำหรับระบบนำวิถีอัตโนมัติในพาหนะแบบชาญฉลาด

(Vision-based Lane Detection for Automatic Navigation in Smart Vehicle)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายเฉลิมพล หลงจาด

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2551

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับช่องทางเดินรถและการนำวิถีแบบอัตโนมัติโดยใช้แบบจำลองการเทียบเคียงรูปแบบ โดยระบบดังกล่าวจะเป็นการผสมผสานระหว่าง การหาแบบจำลองช่องทางเดินรถ การใช้แบบจำลองเทียบเคียงรูปแบบ เทคนิคการหาจุดเริ่มต้นของการเกิดแยก การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถและการหาค่าควรจะเป็นของช่องทางเดินรถ ระบบที่นำเสนอนี้เป็นระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถโดยไม่จำเป็นต้องมีการกำหนดสภาวะเริ่มต้นและสามารถทำงานในสภาวะแสงสว่างที่แตกต่างกันได้ นอกจากนั้นแล้วระบบนี้ยังสามารถตรวจจับช่องทางเดินประเภทต่าง ๆ ได้ เช่น ทางตรง สามแยก และสี่แยก เป็นต้น ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบด้วยกัน คือ 1. ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว 2. ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยว ซึ่งในงานนี้ได้ใช้แบบจำลองพาลาโบลา มาเป็นตัวอธิบายลักษณะทางกายภาพของช่องทางเดินรถ โดยมีฟังก์ชันค่าควรจะเป็นมากที่สุดเป็นตัวกำหนดความเหมาะสมสำหรับแต่ละภาพอย่างอัตโนมัติและใช้เทคนิคการหาจุดเริ่มต้นของการเกิดแยกในการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ เทคนิคที่นำเสนอในครั้งนี้ยังคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น สัญญาณรบกวน เงา เส้นถนนที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นต้น ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้ให้ผลการตรวจจับช่องทางเดินรถได้อย่างถูกต้องแม่นยำด้วยอัตราสูงสุดถึง 96 เปอร์เซ็นต์

Abstract

This work presents a novel automatic lane detection and navigation system using pattern matching model. The system is a combination of various techniques including lane modeling, pattern matching model, intersection and T-section detection, lane type classification and lane likelihood. The proposed system is capable of detecting lane without any initial conditions. Moreover, the included lane navigation ability allows the system to specify different types of lane such as straight lane, T-section and intersection. The overall operation of the system is mainly composed of two actions: detecting lane during straight moving and detecting lane during turning vehicle. The parabola model is applied to describe physical lane structure. The maximum likelihood technique is utilized to optimize the lane modeling for each frame of image sequences. The technique of detecting the point of lane type change is also discussed. The results show that the system is robust to the different conditions of environment, for examples, noise, shadow and discontinuity of lane in the images. These allow the system to sufficiently achieve a desirable performance up to 96% of accuracy for using in the variety of real applications.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือช่วยเหลือในด้านต่างๆ จากหลายๆ ฝ่าย จนสำเร็จไปได้ลุล่วงด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความเอื้อเฟื้อทั้งทางด้านสถานที่ เครื่องมือและบุคลากร ขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและสำนักวิศวกรรมศาสตร์สำหรับการสนับสนุนในทุกๆ ด้าน การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณพ.ศ. 2549

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .... ข

กิตติกรรมประกาศ .... ค

สารบัญ .... ง

สารบัญตาราง .... ช

สารบัญรูป .... ซ

บทที่

1 การตรวจจับช่องทางเดินรถ 1

1.1 กล่าวนำ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 2

1.2.1 ศึกษาและพัฒนาอัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงสำนึก 2

1.2.2 ออกแบบและพัฒนาระบบนำวิถีอัตโนมัติ 2

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่จำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ 2

2 ข้อจำกัดเบื้องต้นในการออกแบบระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ 3

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.2 ปัจจัยในการออกแบบระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ 4

2.3 การเลือกใช้กล้องและปัญหาในขั้นตอนการประมวลผลภาพ 6

3 การหาโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ 8

3.1 กล่าวนำ 8

3.2 สมมติฐานเบื้องต้น 8

3.3 โครงสร้างถนนแบบในอุดมคติ 9

3.3.1 การหาเส้นขอบฟ้า 9

3.3.2 การหาเส้นแนวเฉียงหรือเส้นช่องทางเดินรถ 9

3.4 โครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ 15

3.5 สรุป 24

4 ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ 25

4.1 กล่าวนำ..25
4.2 การทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ......................................25
4.3 แบบจำลองช่องทางเดินรถ..27
4.4 ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ..31
4.4.1 โครงสร้างถนน..31
4.4.2 การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ..33
4.4.3 การตามรอยช่องทางเดินรถ..39
5 ผลการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถ..41
5.1 กล่าวนำ..41
5.2 การตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่
ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว..41
5.3 การตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่
ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยว..46
5.4 สรุป..53
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 54
6.1 สรุป 54
6.2 ข้อเสนอแนะ 55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม 56
ภาคผนวก..58
ภาคผนวก ก. ภาพรูปแบบถนนประเภทต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ..................................58
ภาคผนวก ข. ภาพผลการทดสอบระบบ 61
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ 68
ประวัติผู้เขียน 69

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าและไม่เกิดการเลี้ยว....................17
3.2 ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าและเกิดการเลี้ยวซ้าย....................17
3.3 ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าและเกิดการเลี้ยวขวา....................17
4.1 การแบ่งประเภทช่องทางเดินรถ....................37
4.2 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถบริเวณทางแยกของช่องทางเดินรถที่ระยะต่าง ๆ จำนวน 125 ภาพในสภาวะสภาพแวดล้อมปกติ....................38
5.1 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการตามรอยช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่เกิดการเลี้ยวภายใต้สภาพแวดล้อมปกติของทั้ง 4 กรณี....................45
5.2 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการตามรอยช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยวภายใต้สภาพแวดล้อมปกติของทั้ง 4 กรณี....................51
5.3 ประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ....................52

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	โครงสร้างถนนภายใต้สมมุติฐานเบื้องต้น	9
3.2	ตัวอย่างการแยกองค์ประกอบถนน	10
3.3	เส้นขอบฟ้าเก่า	12
3.4	เส้นขอบฟ้าใหม่	12
3.5	ภาพต้นแบบ	13
3.6	เส้นขอบฟ้าในขณะไม่เกิดการเลี้ยว	13
3.7	เส้นขอบฟ้าในขณะเลี้ยวซ้าย	13
3.8	เส้นขอบฟ้าในขณะเลี้ยวขวา	13
3.9	การหาเส้นแนวเฉียงหรือเส้นช่องทางเดินรถ	14
3.10	การเคลื่อนที่ของยานพาหนะในประเทศทางเอเชีย (ประเทศไทย)	15
3.11	โครงสร้างถนนในมุมมองของยานพาหนะทางเอเชีย (ประเทศไทย)	15
3.12	ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา	18
3.13	ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา	19
3.14	ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา	20
3.15	ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา	22
4.1	แผนผังสรุปการทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ	26
4.2	มุมมองทางด้านบน	28
4.3	มุมมองทางด้านข้าง	28
4.4	$K = 0$ ถึง -600, $B = -0.1$ และ $M = 200$	30
4.5	$K = 0$ ถึง 600, $B = 0.1$ และ $M = 250$	30
4.6	$K = 0, B = -0.5$ ถึง -5.0 และ $M = 225$	30
4.7	$K = 0, B = 0.5$ ถึง 5.0 และ $M = 225$	30
4.8	$K = 0, B = -0.5$ และ $M = 1$ ถึง 225	31
4.9	$K = 0, B = 0.5$ และ $M = 200$ ถึง 450	31
4.10	โครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว	32
4.11	โครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวซ้าย	33
4.12	โครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวขวา	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.13 โครงสร้างการแบ่งส่วนของข้อมูลภาพ......34
4.14 ภาพต้นแบบ......36
4.15 ผลรวมข้อมูลภาพส่วนทางด้านซ้าย......36
4.16 ผลรวมข้อมูลภาพส่วนทางด้านขวา......36
4.17 จุดเริ่มต้นของการเกิดแยกของถนน......37
5.1 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกใด ๆ......42
5.2 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางซ้าย......43
5.3 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางขวา......44
5.4 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างโดยผ่านแยกทางซ้ายและขวา......45
5.5 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านสามแยกและเลี้ยวทางซ้าย......47
5.6 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านสามแยกและเลี้ยวทางขวา......48
5.7 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางซ้าย......49
5.8 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางขวา......50
ก.1 ภาพรูปแบบถนนประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ......58
ข.1 ผลการทดสอบระบบ......61

บทที่ 1
การตรวจจับช่องทางเดินรถ

1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีระบบอัตโนมัติได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากยิ่งขึ้น ในอดีตเทคโนโลยีดังกล่าวยังอยู่เพียงในช่วงที่กำลังถูกพัฒนาภายในห้องปฏิบัติการ จนกระทั่งทุกวันนี้แนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติต่างๆ ได้มุ่งไปที่การใช้งานจริงในชีวิตประจำวันของมนุษย์เรามากยิ่งขึ้น ระบบนำวิถีและควบคุมกึ่งอัตโนมัติและระบบนำวิถีและควบคุมอย่างอัตโนมัติเป็นส่วนหนึ่งในความพยายามที่จะพัฒนาการใช้งานยานพาหนะให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่นมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นมหาวิทยาลัยที่มีพื้นที่กว้างขวางกว่า 7,000 ไร่ จึงจำเป็นต้องมีการใช้งานยานพาหนะภายในมหาวิทยาลัยอยู่ตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็นการติดต่องาน การส่งเอกสาร หรือการรับส่งผู้คนระหว่างอาคารซึ่งมีที่ตั้งระยะห่างกันเกินที่จะเดินทางด้วยเท้า แนวโน้มในการพัฒนาระบบขนส่งภายในที่มีประสิทธิภาพ จึงได้ถูกวางเป็นกรอบแนวความคิดขึ้น โดยได้พิจารณาถึงความสอดคล้องกับสภาวะผันผวนของราคาน้ำมันและสภาวะทางเศรษฐกิจในปัจจุบันเป็นหลัก ระบบขนส่งดังกล่าวควรจะใช้ยานพาหนะขนาดเล็ก ที่มีความจุขนาด 2-3 คน (รวมคนขับ) พร้อมพื้นที่ในการขนสัมภาระ มีการใช้พลังงานอย่างอื่นแทนการใช้น้ำมัน เช่นพลังงานไฟฟ้า รวมไปถึงมีระบบนำวิถีอัตโนมัติเพื่อลดภาระการใช้แรงงานคนในการขับเคลื่อนในขณะที่ยานพาหนะไม่มีโหลดบรรทุกทั้งคนและสิ่งของ และระบบกึ่งอัตโนมัติในขณะที่มีคนเป็นผู้ขับเคลื่อนรถ

ระบบนำวิถีอัตโนมัติดังกล่าวมีความจำเป็นในการที่จะลดจำนวนการผลิตตัวยานพาหนะ เนื่องมาจากไม่จำเป็นจะต้องมีการสร้างยานพาหนะประจำทุกจุดของตัวอาคาร ยานพาหนะจะถูกจัดสรรคิวเพื่อนำวิถีตนเองอย่างอัตโนมัติ (ไม่ต้องมีคนขับ) ไปยังปลายทางที่เรียกใช้ได้ โดยคิวและเส้นทางต่างๆ จะถูกจัดสรรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งระยะทาง เวลาและค่าใช้จ่าย การที่พาหนะจะมีความสามารถในการนำวิถีและควบคุมอย่างอัตโนมัติ ภายในสภาวะแวดล้อมทั่วๆ ไป จำเป็นจะต้องมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนหลายๆ องค์ประกอบ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านฮาร์ดแวร์ ซึ่งได้แก่การนำเอาตัวตรวจจับหลากหลายชนิด เช่นอุปกรณ์อัลตราโซนิค (ultrasonic device) อุปกรณ์ตรวจจับระยะทาง (range finder) อุปกรณ์ตรวจจับภาพ (video device)รวมไปถึงอุปกรณ์ทางด้านเรดาร์ มาใช้งานร่วมกันเป็นการหล่อหลอมตัวตรวจจับ (sensors fusion) ไปจนถึงการประมวลผลทางด้านซอฟท์แวร์ที่ต้องใช้พลังในการคำนวณสูง โดยเฉพาะทางด้านการประมวลผลภาพในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน

ในงานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการวางกรอบงานในการออกแบบระบบนำวิถีและควบคุมอัตโนมัติ โดยเน้นวิธีการเรียนรู้เชิงศึกษาสำนึก เพื่อให้ได้มีประสิทธิภาพที่สามารถใช้งานได้จริงในสภาพแวดล้อมปกติ โดยใช้ทรัพยากรทั้งทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์ให้น้อยที่สุด เพื่อลดต้นทุนในการพัฒนาระบบให้สามารถนำไปสร้างใช้งานจริงได้ การเรียนรู้เชิงศึกษาสำนึกเป็นขบวนการปรับตัวของระบบ ให้สามารถรับรู้และเข้าใจในอินพุตแบบใหม่ๆ ได้ ซึ่งถือเป็นแนวทางเดียวกันกับการทำงานของสมองมนุษย์ จุดเด่นของขบวนวิธีดังกล่าวคือความยืดหยุ่นของระบบ และใช้ทรัพยากรในการประมวลผลที่น้อยกว่า การออกแบบระบบให้สามารถทำงานในสภาวะแวดล้อมปกติ (ไม่ใช่ในห้องปฏิบัติการ) ซึ่งถือว่ามีความซับซ้อน (complex) และมีความเป็นพลวัต (dynamic) สูง จึงต้องการขบวนการที่ยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพ สามารถรองรับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาได้เป็นอย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาและพัฒนาอัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงศึกษาสำนึก เพื่อใช้สำหรับการตรวจจับถนนจากภาพวิดีโอ
2. ออกแบบและพัฒนาระบบนำวิถีอัตโนมัติ สำหรับยานพาหนะแบบชาญฉลาด โดยใช้อัลกอริธึมที่ได้พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- พัฒนาอัลกอริธึมสำหรับตรวจจับถนนจากภาพวิดีโอ โดยประสิทธิภาพในการตรวจจับจะต้องมีความถูกต้องมากกว่า 90% ขึ้นไป
- ระบบนำวิถีอัตโนมัติสามารถทำงานได้จริง โดยสามารถระบุทิศทางการเดินทางของยานพาหนะ จากต้นทางไปยังปลายทางได้ในสภาวะแวดล้อมที่ใช้งานจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย – สามารถนำไปพัฒนาระบบขนส่งภายในมหาวิทยาลัย หรือหน่วยงานที่ลักษณะการใช้งานพื้นที่ในแนวเดียวกัน เช่นโรงงาน หรือโรงเรียน เป็นต้น
2. เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป – อัลกอริทึมในการเรียนรู้เชิงศึกษาสามัญสามารถนำเอาไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ อีก โดยเฉพาะในส่วนของระบบการคัดแยกวัตถุ สามารถนำเอาไปคัดแยกวัตถุชนิดใดๆ ก็ได้ จึงสามารถนำเอาไปประยุกต์ได้หลากหลาย
3. นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ - ระบบนำวิถีอัตโนมัติสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับยานพาหนะได้

บทที่ 2
ข้อจำกัดเบื้องต้นในการออกแบบระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยทางด้านการตรวจจับถนนได้รับความสนใจและค้นคว้าวิจัยอย่างมากมาย ตัวอย่างงานวิจัยในที่นี้จะทำการพิจารณางานวิจัยที่ใช้ตัวตรวจจับเป็นกล้องวิดีโอเพียงอย่างเดียว นับจนถึงปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมการตรวจจับช่องทางเดินถนนมากมาย โดยทั่วไปแล้วจะใช้การตรวจจับรูปแบบของถนนต่างๆ กันไป เช่น (เส้นทึบ หรือเส้นประขาวบนถนน) หรือใช้แบบจำลองของถนนแบบต่างๆ ทั้ง 2 มิติ 3 มิติ เส้นตรง หรือเส้นโค้ง รวมไปถึงการใช้เทคนิควิธีต่างๆ เช่น การแปลงแบบ Hough การจับคู่แผ่นแบบ (template matching) หรือเครือข่ายประสาทเทียม (neural network) เป็นต้น ระบบตรวจจับเลนถนนแบบต่างๆ ได้ถูกรายงานใน Kastrinaki, Zervakis and Kalaitzakis (2003) และ Bertozzi, Broggi and Cellario (2002) ในช่วงก่อนปีค.ศ. 2000 งานวิจัยด้านการตรวจจับถนนส่วนใหญ่ Schaaser and Thomas (1992) Jochem and Baluja (1993) Frank (1996) Charbonnier, Diebolt, Guillard and Peyret (1997) Thorpe, Hebert, Kanada and Shafer (1988) Kasprzak, Niemann and Wetzel (1994) Tang and Kasturi (1995) Campbell and Thomas (1992) Kluge and Lakshmanan (1995) จะตรวจหาเซกเมนต์ของเลนถนนจากกล้องที่ติดตั้งบนตัวรถ โดยใช้ตัวพรางเชิงพื้นที่ (spatial mask) สำหรับแยกเซกเมนต์ของขอบถนนด้านซ้ายและขวา ในงานวิจัยบางชิ้น ได้มีการแปลงภาพจากกล้องให้อยู่ในรูป 3 มิติ ก่อนที่จะทำการค้นหาว่าส่วนในของข้อมูลที่เป็นส่วนของเลนถนน ในขณะที่หลายๆ งานวิจัยจะใช้การตรวจจับขอบ (edge detection) ในการตรวจหาขอบของเลนถนนโดยตรง หลังจากนั้นเทคนิควิธีใหม่ๆ ได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยใน Wang, Teoh and Shen (2004) ใช้แบบจำลอง B-Snake ในการตรวจจับและติดตามเลนถนน โดยไม่จำเป็นต้องมีการปรับเทียบกล้องวิดีโอที่ใช้แต่อย่างใด งานวิจัยใน Liu, Zheng, Cheng and Xing (2003) ใช้แผ่นแบบเปลี่ยนรูปได้ (deformable template) ร่วมกับจีเนติกอัลกอริทึมในการจดจำรูปแบบของถนน วิธีการต่างๆ เหล่านี้จะอาศัยข้อมูลเฉพาะที่ (local information) เช่นขอบ ระดับค่าสีเทาของภาพ ฯลฯ ในการตรวจจับหาถนน ระบบเหล่านี้จะต้องมีการตั้งค่าเริ่มต้นให้อยู่ในย่านที่จะนำไปสู่คำตอบของระบบได้ โอกาสความผิดพลาดในการตรวจจับถนนยังคงมีอยู่บ้าง

2.2 ปัจจัยในการออกแบบระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ

การศึกษาด้านการใช้ระบบมองเห็นในการตรวจจับช่องทางเดินรถส่วนใหญ่นั้นเป็นผลการศึกษาโดยอ้างอิงรูปแบบถนนในต่างประเทศ งานวิจัยด้านการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ประสบความสำเร็จในระดับที่รถสามารถขับเคลื่อนได้โดยอัตโนมัติด้วยระบบการมองเห็นเพียงอย่างเดียวนั้นมีน้อยมาก โครงการที่มีผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจและมีการทำงานจริงในระยะทางไกลนั้นมักเป็นระบบที่ประกอบเซนเซอร์อื่น ๆ นอกไปจากการใช้กล้องเพียงอย่างเดียวและที่สำคัญไปกว่านั้นการทดสอบส่วนใหญ่ที่เป็นการเดินทางบนถนนจริงมักเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถบนถนนทางหลวงหรือทางด่วนในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศในทวีปยุโรป หรือประเทศญี่ปุ่น ข้อแตกต่างของการเคลื่อนที่บนถนนทางหลวงที่ได้รับการทดสอบส่วนใหญ่ คือ การที่ความเร็วของการขับขี่มักกำหนดให้เป็นค่าคงที่ได้ในระยะทางยาว ๆ ความโค้งของถนนไม่มากนักและมีเส้นขอบหรือเครื่องหมายแบ่งเลนที่ชัดเจน ถนนทางหลวงไม่มีทางแยกหรือสัญญาณไฟจราจร รวมทั้งไม่มีบุคคลหรือสัตว์เดินข้ามถนน สิ่งที่เคลื่อนที่บนถนนมีเพียงรถคันอื่นที่นำหน้าอยู่เท่านั้น

สิ่งแวดล้อมของการทดสอบระบบมีผลมากต่อการใช้ระบบการมองเห็นในการตรวจจับถนน ป้ายสัญญาณจราจรและสิ่งกีดขวาง ในหัวข้อนี้จะเป็นการแจกแจงองค์ประกอบที่มีผลต่อการประมวลผลภาพเพื่อใช้ในระบบการมองเห็นในส่วนที่เป็นปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมภายนอกก่อนอันได้แก่

1) รูปแบบของถนน

ถนนในประเทศไทยแบ่งออกได้เป็นกลุ่มใหญ่สี่กลุ่มด้วยกันคือ

- ถนนในเมือง
- ถนนในชนบท
- ถนนทางหลวง
- ถนนทางด่วนพิเศษ

2) สภาพถนน

สภาพถนนในประเทศไทยส่วนใหญ่โดยเฉพาะถนนในเมืองและถนนในชนบทนั้นมักไม่ได้รับการบำรุงรักษาที่ดีนัก เส้นแบ่งเลน เส้นแสดงขอบถนน สัญลักษณ์ต่าง ๆ บนถนนมักไม่ได้มาตรฐานและขาดความชัดเจน ตำแหน่งการติดตั้งสัญญาณจราจรอาจไม่อยู่ในบริเวณที่ชัดเจนต่อการตรวจจับ สภาพพื้นถนนไม่เรียบเท่ากัน บางทีมีหลุมบ่อหรือเนินซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ขับขี่โดยง่าย ถนนในชนบทส่วนใหญ่ไม่มีเส้นขอบหรือเส้นแบ่งเลน พื้นเป็นพื้นราดยางหรือดินลูกรัง การตรวจจับช่องทางเดินรถลักษณะนี้ต้องใช้ข้อมูลด้านลายผิวสี (color texture)ร่วมกับการ

สร้างแบบจำลอง 3D ซึ่งเป็นเทคนิคในระดับเดียวกับระบบการมองเห็นสำหรับ off-road vehicle ที่ใช้ในการแข่งขัน DARPA Grand Challenge

สภาพของถนนทางหลวงมีความชัดเจนในเรื่องของเส้นแสดงขอบที่ดีกว่าถนนในเมือง แต่ทว่าก็มีปัญหาเรื่องพื้นถนนที่ชำรุดเป็นระยะ ๆ ทำให้การใช้วิธีการที่อ้างอิงสี อย่างเช่นการแยกส่วนสี (color segmentation) ผิดพลาดได้ง่าย ทางหลวงในประเทศไทยไม่มีขอบกั้นคนและสัตว์สามารถเดินตัดข้ามถนนทางหลวงได้ นอกจากนี้ยังมีการปลูกต้นไม้ตลอดทางเพื่อให้ร่มเงา ซึ่งเงาที่พาดผ่านบนถนนนั้นเป็นส่วนที่ทำให้การตรวจจับช่องทางเดินรถโดยใช้ระบบการมองเห็นนั้นผิดพลาดได้ง่าย

ถนนในประเทศไทยที่มีสภาพที่เหมาะกับการใช้ระบบมองเห็นในการตรวจจับช่องทางเดินรถนั้นก็คือทางด่วนพิเศษทางด่วนมีขอบกั้นเป็นที่ชัดเจนไม่มีคนหรือสัตว์ที่จะเดินตัดผ่านได้ ทางด่วนส่วนใหญ่มีพื้นถนนที่อยู่ในสภาพดี มีเส้นแบ่งเลนและจุดสัญลักษณ์ที่เห็นได้ชัดเจนแม้ในสภาวะที่ไม่เอื้อต่อการมองเห็นเช่นเวลาฝนตก ทางด่วนส่วนใหญ่ไม่มีส่วนโค้งที่มีรัศมีแคบเกินกว่าการประมาณด้วยเส้นโค้งพาราโบลาจึงสามารถใช้แบบจำลองแบบพาราโบลา หรือ B-splineได้ดีพอสมควร

3) สภาพแสงและสภาวะอากาศ

สภาพแสงและสภาพอากาศมีผลต่อการทำงานของระบบมองเห็นอย่างมากวิธีการ เช่น การปรับค่าแสงหรือความเปรียบต่าง (contrast) นั้นช่วยได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ระบบการมองเห็นที่ดีจะต้องทำงานได้แม้ว่าสภาพแสงจะเปลี่ยนแปลงมากเพียงใดก็ตาม โดยทั่วไปวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหานี้คือ การเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถปรับแสงได้ร่วมกับการใช้วิธีการประมวลผลที่หลากหลายเพื่อรองรับสถานการณ์ที่แตกต่างกัน

4) การจราจร

การจราจรในเมืองนั้นส่วนใหญ่ค่อนข้างหนาแน่นเกือบทุกช่วงเวลา การออกแบบระบบเพื่อให้ทำงานในเมืองได้จึงต้องแตกต่างจากการออกแบบระบบการมองเห็นเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนบนทางหลวงหรือทางด่วนโดยสิ้นเชิงเมื่อการจราจรหนาแน่น วิธีการประมวลผลภาพต้องทำงานหนักมากขึ้นเป็นทวีคูณเพราะจำนวนวัตถุที่เกี่ยวข้องนั้นมีจำนวนมากขึ้น จุดเด่นของถนนเช่น ขอบถนนหรือเส้นแบ่งเลนที่จะใช้เพื่อการตรวจจับแนวถนนก็ถูกบดบังทำให้การตรวจจับทำได้ยากมาก การสร้างแบบจำลอง 3D ก็ยากขึ้นมากเพราะจำนวนจุดเด่นในภาพที่ต้องติดตามและลดจำนวนให้ได้มากที่สุด ทำให้มิติของปัญหาเพิ่มขึ้นมาก

5) นิสัยการขับขี่ยานพาหนะและวินัยการจราจร

นิสัยการขับขี่ยานพาหนะของคนไทยนั้นทำให้การตัดสินใจโดยระบบการมองเห็นนั้นยากขึ้นมาก เนื่องจากในวิธีการต่าง ๆ ที่มีผู้นำเสนอส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าการ

เปลี่ยนแปลง เช่น การเปลี่ยนเลนเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก ผู้ขับขี่รถยนต์รักษาให้รถยนต์อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางเลนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสมมุติฐานเหล่านี้ไม่เป็นจริงเลยในการขับขี่ยานพาหนะบนถนนในประเทศไทยไม่ว่าจะเป็นถนนในเมืองทางหลวงหรือทางด่วนก็ตาม

6) สิ่งกีดขวางในถนน

สิ่งกีดขวางในถนนนั้นมีทั้งในส่วนที่อยู่กับที่และส่วนที่เคลื่อนที่ ถนนในประเทศไทยนั้นในบางครั้งมีสิ่งกีดขวางซึ่งบดบังการตรวจจับช่องทางเดินรถอยู่มากมาย เช่น ถังขยะรถที่จอดในจุดห้ามจอดรถ สิ่งกีดขวางที่เคลื่อนที่ได้นั้นเป็นอันตรายมากกว่าไม่ว่าจะเป็นสุนัขจรจัดหรือคนข้ามถนนในส่วนที่ไม่ใช่ทางม้าลาย ซึ่งสิ่งกีดขวางเหล่านี้เป็นอุปสรรคต่อระบบการมองเห็นอย่างมากเนื่องจากส่วนใหญ่นั้นไม่สามารถคาดเดาได้

2.3 การเลือกใช้กล้องและปัญหาในขั้นตอนการประมวลผลภาพ

การใช้กล้องในระบบการมองเห็นบนยานพาหนะนั้นมีความต้องการพื้นฐานคือ การที่ยานพาหนะมีการเคลื่อนที่จำนวนภาพที่รับเข้ามาได้จะต้องมากและต้องชัดเจนเพียงพอที่จะนำมาใช้ในการหาแบบจำลองถนนตำแหน่งและทิศทางของยานพาหนะเมื่อเทียบกับถนน กล้องนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน กล้องที่มีคุณสมบัติที่ดีเพียงพอต่อการนำมาใช้ในระบบการมองเห็นมักมีราคาแพง นอกจากความละเอียดและความเร็วเฟรม (frame rate) แล้วการต่อประสาน (interface) กับอุปกรณ์ การกราดตรวจ (scanning) หรือการปรับแสงก็มีผลต่อคุณภาพของภาพที่จะนำมาใช้ในการประมวลผลอย่างมากตัวอย่างเช่น สัญญาณภาพที่เป็นแบบแอนาล็อกเมื่อมีการกราดตรวจแบบการต่อประสานแล้วก็จะทำให้ความละเอียด (resolution) ของภาพต่อหนึ่งหน่วยเวลาลดลงในแกนตั้งถึงสองเท่าด้วยกัน การบีบอัด (compress) สัญญาณภาพที่มีการใช้ในกล้องบางชนิด เช่น miniDV ก็จะทำให้คุณภาพภาพลดลงเนื่องจากการบีบอัด

นอกจากการเลือกกล้องแล้วการเลือกเลนส์และตำแหน่งการติดตั้งกล้องก็มีส่วนสำคัญ เลนส์กล้องที่มีมุมมอง (field of view) กว้างสามารถเก็บภาพได้กว้างกว่าแต่ความละเอียดของภาพในแกนแนวนอนก็จะลดลงและการบิดเบือนที่เกิดจากเลนส์ก็จะมีค่ามาก ซึ่งจะทำให้การตรวจจับจุดเด่นบริเวณขอบของภาพมีความผิดพลาดได้ ในการติดตั้งกล้องหากกล้องติดตั้งอยู่ในตำแหน่งสูงและชี้ลงมาที่พื้นถนนการตรวจจับพื้นผิวและสัญลักษณ์บนถนนก็จะทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากการรบกวนจากแสงภายนอกจะลดลงแต่การจับภาพของสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เช่น ป้ายสัญญาณจราจรหรือสิ่งกีดขวางอื่น ๆ ก็จะทำได้ยากหากกล้องติดตั้งอยู่ภายในรถตำแหน่งเดียวกับระดับสายตาของผู้ขับขี่ การรับภาพก็จะมีลักษณะเดียวกับการรับภาพของมนุษย์ อย่างไรก็ตามเลนส์ตาของมนุษย์มีการเคลื่อนที่และปรับเปลี่ยนโฟกัสได้ตลอดเวลา กล้องที่ติดตั้งในลักษณะนี้จึง

จำเป็นที่จะต้องเคลื่อนไหวหรือปรับระยะโฟกัสโดยอัตโนมัติด้วยเช่นกัน ซึ่งจะเพิ่มความซับซ้อนของระบบการมองเห็นขึ้นอีกมาก

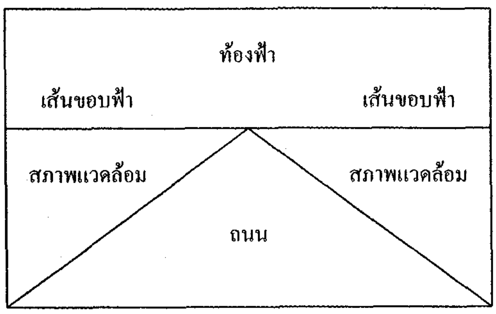
บทที่ 3
การหาโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ

3.1 กล่าวนำ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจจับช่องทางเดินรถออกจากภาพสี โดยนำเสนอระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถออกจากภาพสีที่ซึ่งสามารถแยกประเภทช่องทางเดินรถต่าง ๆ ได้แบบอัตโนมัติโดยไม่จำเป็นต้องมีการกำหนดสภาวะเริ่มต้น (initialization) และใช้กล้องเพียง 1 ตัว ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการจำแนกประเภทและแบบจำลองการเทียบเคียงรูปแบบร่วมกันโดยแยกระบบการทำงานออกเป็น 3 ระบบด้วยกันดังนี้ *ระบบที่ 1* คือ ระบบการตัดสินใจแยกแยะหาโครงสร้างถนนที่เหมาะสมกับสถานการณ์ปัจจุบัน *ระบบที่ 2* คือ ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว และ*ระบบที่ 3* คือ ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยว ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบโดยรวมของการตรวจจับช่องทางเดินรถและระบบการหาโครงสร้างถนน สำหรับระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยวและระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยวจะนำเสนอในส่วนของบทที่ 4 ในลำดับต่อไป

3.2 สมมุติฐานเบื้องต้น

โดยทั่วไปถนนที่พบในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ นั้นจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนด้วยกันกล่าวคือ *ส่วนที่ 1* ส่วนที่เป็นพื้นที่ท้องฟ้า (sky) *ส่วนที่ 2* ส่วนที่เป็นพื้นที่สภาพแวดล้อม (environment) และ *ส่วนที่ 3* ส่วนที่เป็นพื้นที่ถนน (road) โดยมีเส้นแนวนอนที่มีลักษณะเป็นแนวตัดขวางเป็นตัวแบ่งส่วนออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันโดยส่วนที่แบ่งนั้นจะเป็นส่วนที่เป็นพื้นที่ท้องฟ้ากับส่วนที่เป็นพื้นที่ถนน สำหรับเส้นแนวนอนที่ใช้ในการแบ่งส่วนในงานวิจัยนี้จะเรียกเส้นดังกล่าวนี้ว่าเส้นขอบฟ้า (vanish line) และยังมีเส้นอีกหนึ่งลักษณะที่ใช้สำหรับเป็นตัวแบ่งส่วนพื้นที่ถนนกับส่วนที่เป็นพื้นที่สภาพแวดล้อมออกจากกัน เส้นที่ใช้แบ่งส่วนพื้นที่นี้จะเรียกว่าเส้นแนวเฉียงหรือเส้นช่องทางเดินรถ (lane) ซึ่งลักษณะของเส้นดังกล่าวจะมีลักษณะที่เป็นเส้นตรงที่มีความชันต่าง ๆ กัน โดยจะแบ่งเป็นเส้นแนวเฉียงทางซ้ายและขวา โดยโครงสร้างที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะเรียกว่าโครงสร้างถนนดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างถนนภายใต้สมมุติฐานเบื้องต้น

3.3 โครงสร้างถนนแบบในอุดมคติ

ในส่วนนี้จะเป็นการกล่าวถึงเทคนิคและวิธีการหาโครงสร้างถนนแบบในอุดมคติ โดยรูปแบบของโครงสร้างถนนที่นำเสนอนี้จะแสดงถึงโครงสร้างถนนที่อยู่ภายใต้สมมุติฐานเบื้องต้น โดยมีองค์ประกอบแต่ละส่วนเท่า ๆ กันหรือสมมาตรกัน นั่นก็คือจะอยู่ภายใต้สภาวะขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องทางเดินรถโดยไม่พิจารณาเส้นแบ่งช่องทางเดินรถตรงกลาง ซึ่งขั้นตอนการหาโครงสร้างถนนแบบในอุดมคตินี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ การหาเส้นขอบฟ้าซึ่งเป็นตัวแบ่งส่วนพื้นที่ระหว่างพื้นที่ท้องฟ้ากับพื้นที่ถนนและช่องทางเดินรถซึ่งใช้เป็นตัวแบ่งพื้นที่ระหว่างพื้นที่ถนนกับพื้นที่สิ่งแวดล้อม

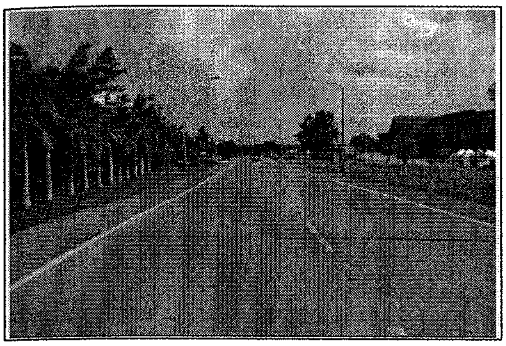
3.3.1 การหาเส้นขอบฟ้า

ภาพถนนที่นำมาหาโครงสร้างถนนนั้นจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 3 อย่าง ได้แก่ ท้องฟ้า ต้นไม้ และถนน ซึ่งองค์ประกอบแต่ละส่วนจะมีข้อมูลภาพที่แตกต่างกันออกไป สำหรับวิธีการแยกองค์ประกอบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะทำการแยกองค์ประกอบทั้ง 3 โดยเลือกใช้วิธีการตั้งค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อกำหนดระดับข้อมูลเพื่อใช้ในการแยกองค์ประกอบ ข้อมูลภาพถนนที่ใช้สำหรับการแยกองค์ประกอบจะเป็นภาพระดับเทา โดยระดับข้อมูลในการแยกองค์ประกอบจะเป็นการตั้งค่าขีดเริ่มเปลี่ยน 3 ระดับด้วยกันดังนี้ โดยกำหนดให้ $g(x)$ คือ ข้อมูลภาพระดับเทา

ระดับ 1	$g(x) > g_1$	ท้องฟ้า
ระดับ 2	$g_2 >= g(x) <= g_1$	ถนน
ระดับ 3	$0 >= g(x) < g_2$	ต้นไม้

เมื่อ g_1 และ g_2 คือ ระดับของค่าขีดเริ่มเปลี่ยน

ตัวอย่างการแยกองค์ประกอบของโครงสร้างถนนแสดงดังในรูปที่ 3.2



(ก) ภาพต้นแบบ

(ข) ท้องฟ้า

(ค) ถนน

(ง) ต้นไม้

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการแยกองค์ประกอบถนน

หลังจากแยกองค์ประกอบทั้ง 3 ชนิดออกมา จากนั้นพิจารณาถึงความเป็นไปได้ของบริเวณเส้นขอบฟ้าที่จะเกิดขึ้น พบว่าบริเวณเส้นขอบฟ้านั้นควรจะเกิดขึ้นในส่วนประกอบที่เป็นองค์ประกอบของต้นไม้ เนื่องจากเมื่อพิจารณาถึงรูปร่างลักษณะขององค์ประกอบพบว่าองค์ประกอบของต้นไม้จะมีลักษณะรูปร่างที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างองค์ประกอบท้องฟ้ากับถนน ดังนั้นบริเวณเส้นขอบฟ้าจึงน่าเกิดขึ้นบนองค์ประกอบของต้นไม้ โดยเส้นขอบฟ้าดังกล่าวจะให้ปริมาณค่าที่สูงในบริเวณแนวเส้นตัดขวางของภาพองค์ประกอบต้นไม้ซึ่งปริมาณค่าดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

$$D(i) = \sum_{j=1}^{j=m} T(i,j) \qquad \text{เมื่อ } i = 1,\ldots,n \tag{3.1}$$

เมื่อ $D(i)$ คือ ปริมาณค่าของเส้นขอบฟ้าบนองค์ประกอบต้นไม้แถวที่ i

$T(i,j)$ คือ องค์ประกอบต้นไม้มีค่า 0 และ 1

ในการใช้ปริมาณค่าบนองค์ประกอบต้นไม้ที่ได้ในสมการที่ 3.1 มาพิจารณาเส้นขอบฟ้านั้นจะเป็นเพียงการกำหนดบริเวณความเป็นไปได้คร่าว ๆ ที่จะพบเส้นขอบฟ้าเท่านั้น ในการหาเส้นขอบฟ้าจริงนั้นจะอธิบายในลำดับต่อไป การกำหนดบริเวณความเป็นไปได้ของการเกิดเส้นขอบฟ้าในแต่ละกรณีนั้นจะให้ปริมาณค่าบนองค์ประกอบต้นไม้ตรงบริเวณแนวเส้นตัดขวางแตกต่างกันออกไป โดยปริมาณค่าที่เหมาะสมกับบริเวณของเส้นขอบฟ้าจริงของทั้ง 2 กรณีจะอยู่ในช่วงบริเวณดังนี้

กรณีที่ 1	$D_1 < D(i) < D_2$	เส้นขอบฟ้าในขณะไม่เกิดการเลี้ยว
กรณีที่ 2	$D_3 < D(i) < D_4$	เส้นขอบฟ้าในขณะเกิดการเลี้ยว

โดยในช่วงของการกำหนดบริเวณความเป็นไปได้ที่เหมาะสมที่จะเป็นเส้นขอบฟ้าของทั้ง 2 กรณีนี้จะให้ค่าปริมาณดังกล่าวที่แตกต่างกันออกไปตามสภาพแวดล้อมของถนน ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ D_1 D_2 D_3 และ D_4 มีค่าเป็น 210 230 260 และ 280 ตามลำดับ หลังจากได้บริเวณความเป็นไปได้ที่เหมาะสมที่จะเป็นเส้นขอบฟ้าแล้วจากนั้นทำการหาเส้นขอบฟ้าจริงที่เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว สำหรับวิธีในการหาเส้นขอบฟ้านี้จะกระทำการหาเส้นขอบฟ้าภายใต้สมมุติฐานเบื้องต้น 2 ข้อด้วยกันกล่าวคือ

1. มีปริมาณค่าของขอบภาพสูงที่สุดตรงบริเวณแนวเส้นตัดขวางนั้น
2. เส้นขอบฟ้าที่เกิดขึ้นจะอยู่ตรงบริเวณจุดตัดหรือใกล้เคียงจุดตัดระหว่างเส้นแนวเฉียงทางซ้ายและขวามาตัดกัน

สำหรับการหาเส้นขอบฟ้านี้สามารถแบ่งได้ตามลักษณะของโครงสร้างถนนโดยจะแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีด้วยกันคือ *กรณีที่ 1* เป็นการหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนในขณะไม่เกิดการเลี้ยว และ*กรณีที่ 2* เป็นการหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนในขณะเกิดการเลี้ยว ในกรณีของการหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนในขณะเกิดการเลี้ยวนั้นจะแตกต่างจากการหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนในขณะไม่เกิดการเลี้ยว ซึ่งอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าเส้นขอบฟ้าจะเกิดขึ้นตรงบริเวณเส้นของช่องทางเดินรถทางซ้ายและขวามาตัดกันและเงื่อนไขการมีปริมาณค่าของขอบภาพสูงที่สุดตรงบริเวณแนวเส้นตัดขวาง แต่การหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนในขณะเกิดการเลี้ยวนั้นจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการมีปริมาณค่าของขอบภาพสูงที่สุดตรงบริเวณแนวเส้นตัดขวางเพียงอย่างเดียวเท่านั้นเป็นเพราะว่าโครงสร้างถนนในรูปแบบนี้เส้นของช่องทางเดินรถทางซ้ายและขวาจะไม่ตัดกันตรงบริเวณเส้นขอบฟ้า จุดตัดที่เกิดนั้นสามารถหาได้โดยหลักพีชคณิต โดยการนำสมการ

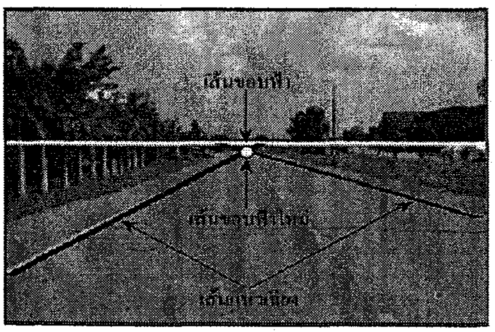
ของเส้นช่องทางเดินรถทั้งสองข้างมาพิจารณา โดยการนำสมการที่ 3.5 และ 3.6 ในหัวข้อที่ 3.5.2 ซึ่งนั่นก็คือสมการ $c_L = B_L(r_L) + M_L$ และ $c_R = B_R(r_R) + M_R$ มาพิจารณาเพื่อต้องการหาจุดตัดที่เกิดขึ้นระหว่างสมการทั้งสอง กำหนดให้ $c_L = c_R$ จะได้ดังสมการที่ 3.2

$$B_L(r) + M_L = B_R(r) + M_R \tag{3.2}$$

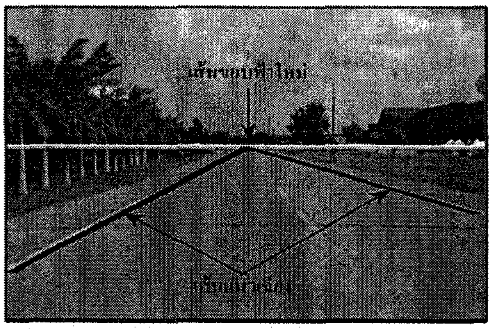
จัดรูปสมการใหม่จะได้ดังสมการที่ 3.3

$$r = \frac{(M_R - M_L)}{(B_L - B_R)} \tag{3.3}$$

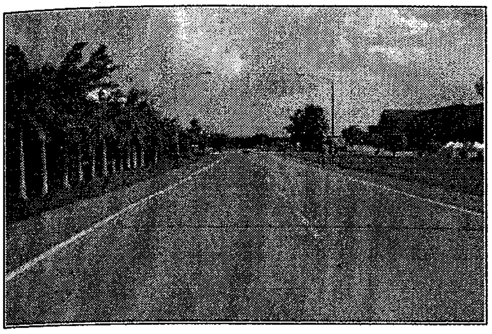
จุดตัดที่ได้ระหว่างสมการทั้งสอง คือ ตัวแปร r ที่แสดงในสมการที่ 3.3 ดังนั้น r คือ เส้นขอบฟ้าใหม่ โดยรูปที่ 3.3 แสดงเส้นขอบฟ้าที่ได้จากการกำหนดบริเวณความเป็นไปได้ที่จะเป็นเส้นขอบฟ้าและในรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นถึงเส้นขอบใหม่ที่อยู่ภายใต้สมมุติฐานเบื้องต้นทั้ง 2 ข้อโดยแสดงให้เห็นถึงจุดตัดที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นแนวเฉียงทางซ้ายและขวามาตัดกัน ในส่วนของรูปที่ 3.5-3.8 แสดงตัวอย่างการหาเส้นขอบฟ้าของทั้ง 2 กรณี โดยในรูปที่ 3.5 แสดงภาพต้นแบบของการหาเส้นขอบฟ้าในกรณีไม่เกิดการเลี้ยว ในรูปที่ 3.6 แสดงการหาเส้นขอบฟ้าในกรณีไม่เกิดการเลี้ยว และในรูปที่ 3.7 และ 3.8 แสดงการหาเส้นขอบฟ้าในกรณียานพาหนะเลี้ยวซ้ายและขวาตามลำดับ



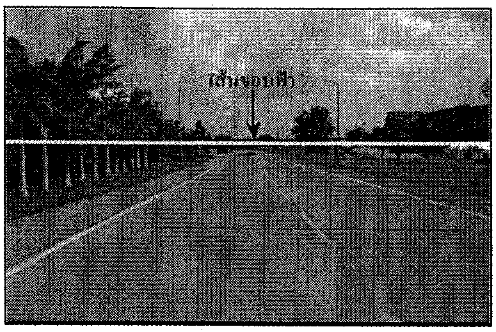
รูปที่ 3.3 เส้นขอบฟ้าเก่า



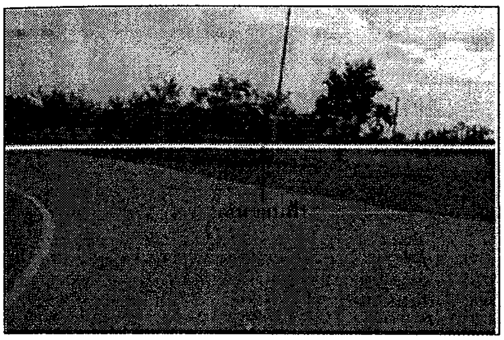
รูปที่ 3.4 เส้นขอบฟ้าใหม่



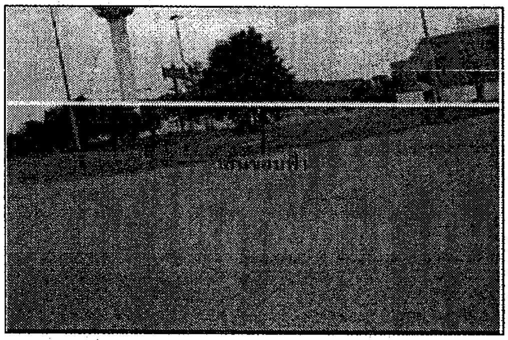
รูปที่ 3.5 ภาพต้นแบบ



รูปที่ 3.6 เส้นขอบฟ้าในขณะไม่เกิดการเลี้ยว



รูปที่ 3.7 เส้นขอบฟ้าในขณะเลี้ยวซ้าย



รูปที่ 3.8 เส้นขอบฟ้าในขณะเลี้ยวขวา

3.3.2 การหาเส้นแนวเฉียงหรือเส้นช่องทางเดินรถ

หลังจากผ่านกระบวนการหาเส้นขอบฟ้าในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้วนั้น ขั้นตอนต่อมาจะเป็นกระบวนการหาเส้นแนวเฉียง เส้นแนวเฉียงหรือเส้นช่องทางเดินรถเป็นอีกหนึ่งในสององค์ประกอบที่สำคัญเป็นอย่างมากสำหรับนำมาใช้ในการอธิบายโครงสร้างถนน โดยที่ความสำคัญขององค์ประกอบเส้นแนวเฉียงที่กำลังพิจารณานี้เป็นตัวที่ใช้สำหรับในการแบ่งส่วนพื้นที่ถนนกับต้นไม้ ซึ่งองค์ประกอบที่ใช้ในการอธิบายโครงสร้างถนนของส่วนนี้จะมีคุณลักษณะการวางตัวเป็นแนวเส้นตรงที่มีระดับความชันต่างๆกัน สำหรับการอธิบายถึงลักษณะการวางตัวของเส้นแนวเฉียงนี้จะเป็นการแสดงอยู่ในรูปคู่ลำดับ (r,c) ที่ซึ่งแสดงอยู่บนระนาบภาพเหมือนกับคู่ลำดับของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ในการอธิบายถึงรูปร่างลักษณะการวางตัวของเส้นแนวเฉียงนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องหาแบบจำลองใหม่มาใช้ในการอธิบายโดยสามารถนำแบบจำลองของช่องทางเดินรถที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.2 นี้มาประยุกต์ใช้ในการอธิบายถึงรูปร่างลักษณะการวางตัวของเส้นแนวเฉียงนี้ได้ ซึ่งกระทำได้โดยการกำหนดให้พารามิเตอร์ K ของ

แบบจำลองช่องทางเดินรถให้มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาถึงรูปร่างลักษณะของแบบจำลองหลังจากกำหนดพารามิเตอร์ K ให้มีค่าเป็นศูนย์แล้วก็จะได้รูปร่างลักษณะการวางตัวในแนวเส้นตรงที่ระดับความชันต่าง ๆ ได้ ซึ่งแสดงอยู่บนระนาบภาพดังแสดงในสมการที่ 3.4

$$c = B(r) + M \tag{3.4}$$

เมื่อ c คือ คอลัมน์ของภาพ

r คือ แถวของภาพ

B คือ สัดส่วนทิศทาง

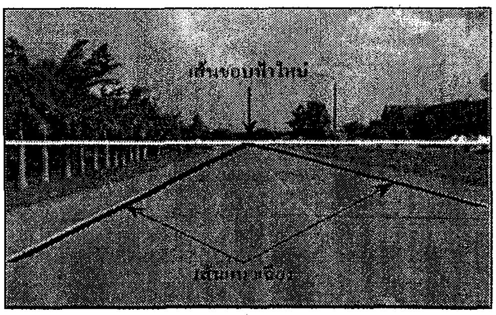
M คือ สัดส่วนชดเชย

จากสมการที่ 3.4 เส้นแนวเฉียงทางฝั่งซ้ายอธิบายได้โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ B มีค่าเป็นลบส่วนเส้นแนวเฉียงทางฝั่งขวาอธิบายได้โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ B มีค่าเป็นบวก เส้นแนวเฉียงทั้ง 2 เส้นนั้นจะเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นเส้นแนวเฉียงทั้ง 2 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$c_L = B_L(r_L) + M_L \tag{3.5}$$

$$c_R = B_R(r_R) + M_R \tag{3.6}$$

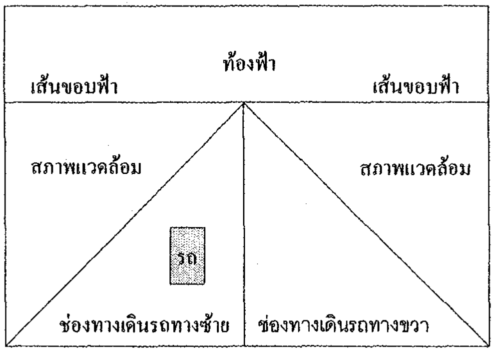
นอกจากนี้เส้นแนวเฉียงยังเป็นตัวกำหนดทิศทางลักษณะการวางตัวของโครงสร้างถนนเพื่อใช้ในการตรวจจับช่องทางเดินรถในขั้นตอนต่อไป ตัวอย่างการหาเส้นแนวเฉียงดังแสดงในรูปที่ 3.9



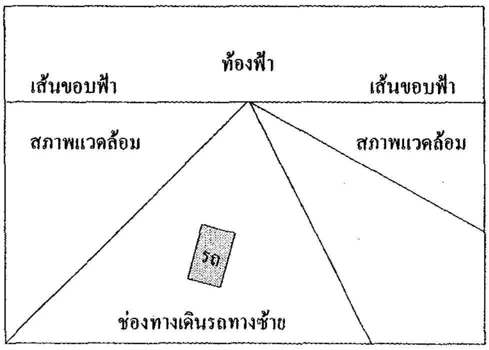
รูปที่ 3.9 การหาเส้นแนวเฉียงหรือเส้นช่องทางเดินรถ

3.4 โครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โครงสร้างถนนในมุมมองของยานพาหนะทางเอเชีย (ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11) จากนั้นพิจารณาถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเมื่ออยู่ในสภาพปกติ สภาพปกติที่กล่าวถึงในที่นี้ก็คือการที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ในช่องทางเดินรถโดยที่ยังคงรักษาสภาพการเคลื่อนที่ไว้ยังตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางเดินรถหรือมีทิศทางเบี่ยงเบนไปทางซ้ายหรือขวาเพียงเล็กน้อย โดยสภาพการเคลื่อนที่ของยานพาหนะแบบนี้จะให้มุมมองของลักษณะโครงสร้างถนนออกมาอย่างหนึ่ง ซึ่งโครงสร้างถนนที่ว่านี้จะเรียกว่าโครงสร้างถนนแบบปกติ ในทางตรงกันข้ามเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยที่ยานพาหนะไม่สามารถรักษาสภาพไว้ยังตำแหน่งกึ่งกลางช่องทางเดินรถได้หรือมีทิศทางเบี่ยงเบนไปทางซ้ายหรือขวามากผิดปกติ สภาพเช่นนี้จะให้โครงสร้างถนนออกมาอย่างหนึ่ง (ยานพาหนะเกิดการเลี้ยวหรือยานพาหนะกำลังเบี่ยงเบนออกนอกช่องทางเดินรถ) ดังนั้นโครงสร้างถนนในสภาวะแบบปกตินี้จะต้องอยู่ภายใต้สมมติฐานของการขับขี่ยานพาหนะของมนุษย์ดังนี้ (1) ยานพาหนะอยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องทางเดินรถ และ (2) ทิศทางเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก



รูปที่ 3.10 การเคลื่อนที่ของยานพาหนะในประเทศทางเอเชีย (ประเทศไทย)



รูปที่ 3.11 โครงสร้างถนนในมุมมองของยานพาหนะทางเอเชีย (ประเทศไทย)

สำหรับขั้นตอนการหาโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกตินี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน กล่าวคือ

1) กำหนดช่วงพารามิเตอร์ของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพโครงสร้างถนนในสภาวะปกติ สำหรับขั้นตอนนี้จะกระทำการทดสอบโดยการนำภาพถนนแบบวีดีโออินพุตในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่เกิดการเลี้ยวใด ๆ กับในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยเกิดการเลี้ยวมาพิจารณาหาขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนของทั้ง 2 กรณีเพื่อกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในสภาวะปกติ โดยจะแบ่งการทดสอบภาพถนนแบบวิดีโอที่อัตรา 25 เฟรม/วินาที ชนิดละ 5 ภาพและแบ่งออกตามลักษะณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว การเคลื่อนที่ขณะเกิดการเลี้ยวซ้ายและการเคลื่อนที่ขณะเกิดการเลี้ยวขวา ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวแสดงได้ดังในตารางที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ จากตารางที่ 3.1 พบว่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่เกิดการเลี้ยวนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อพิจารณาจากภาพวิดีโอทั้ง 5 แบบ ซึ่งสามารถสรุปขอบเขตพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

B_L มีค่าอยู่ในช่วง [-2.0,-1.0] M_L มีค่าอยู่ในช่วง [140,220]

B_R มีค่าอยู่ในช่วง [2.5,4.5] M_R มีค่าอยู่ในช่วง [60,160]

ต่อมาเมื่อพิจารณาถึงขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยเกิดการเลี้ยวตามที่ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 พบว่าค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาจากภาพวิดีโอทั้ง 5 แบบดังในตารางที่ 3.2 ซึ่งจะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะขณะเลี้ยวซ้ายและแบบวิดีโอทั้ง 5 แบบในตารางที่ 3.3 ซึ่งจะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะขณะเลี้ยวขวา ซึ่งสามารถสรุปขอบเขตของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

B_L มีค่าอยู่ในช่วง [-9.0,-0.2] M_L มีค่าอยู่ในช่วง [60,420]

B_R มีค่าอยู่ในช่วง [0.5,10.0] M_R มีค่าอยู่ในช่วง [-100,180]

ดังนั้นพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติในงานวิจัยนี้ควรจะเลือกใช้ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยวที่ได้จากการทดสอบข้างต้นเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานของโครงสร้างแบบสภาวะปกติ ซึ่งเป็นขอบเขตพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมากกว่า

ตารางที่ 3.1 ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า และไม่เกิดการเลี้ยว

แบบวิดีโอ	ยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยวใด ๆ			
	B_L	M_L	B_R	M_R
1	[-1.6,-1.2]	[140,200]	[2.8,3.5]	[60,160]
2	[-2.2,-1.4]	[120,180]	[2.9,3.8]	[60,160]
3	[-1.6,-1.0]	[160,220]	[2.8,4.5]	[80,140]
4	[-1.8,-1.3]	[120,180]	[3.0,4.0]	[80,140]
5	[-2.0,-1.5]	[120,180]	[2.53.5]	[60,160]

ตารางที่ 3.2 ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และเกิดการเลี้ยวซ้าย

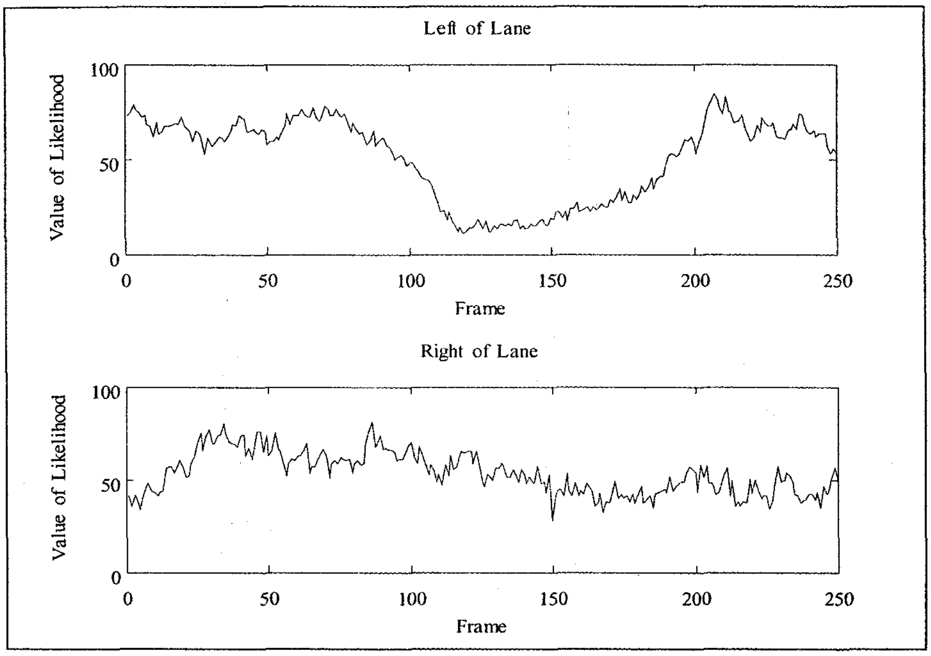
แบบวิดีโอ	ยานพาหนะเกิดการเลี้ยวซ้าย			
	B_L	M_L	B_R	M_R
1	[-2.9,-0.2]	[60,160]	[3.0,9.5]	[-100,60]
2	[-2.8,-0.5]	[80,160]	[3.8,8.5]	[-50,80]
3	[-3.0,-0.2]	[60,160]	[3.2,10.0]	[-100,60]
4	[-2.8,-0.5]	[80,160]	[3.8,8.5]	[-50,80]
5	[-3.0,-0.5]	[80,160]	[3.0,7.5]	[-50,60]

ตารางที่ 3.3 ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และเกิดการเลี้ยวขวา

แบบวิดีโอ	ยานพาหนะเกิดการเลี้ยวขวา			
	B_L	M_L	B_R	M_R
1	[-8.0,-2.5]	[160,420]	[0.5,3.8]	[80,180]
2	[-8.5,-2.0]	[160,420]	[0.2,3.2]	[60,180]
3	[-9.0,-2.5]	[160,370]	[0.5,3.6]	[80,180]
4	[-9.0,-2.0]	[160,420]	[0.2,3.0]	[60,180]
5	[-9.0,-2.0]	[160,420]	[0.5,3.8]	[60,180]

2) กำหนดขนาดความเป็นไปได้ของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ สำหรับขั้นตอนการทดสอบนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 เงื่อนไข คือ ยานพาหนะขณะไม่เกิดการเลี้ยวและยานพาหนะขณะเกิดการเลี้ยว สำหรับวิธีการหาขนาดความเป็นไปได้ของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติกระทำได้โดยการหาค่าควรจะเป็นจากภาพวิดีโออินพุตที่ 250 เฟรมของทั้ง 2 เงื่อนไขจากนั้นเปรียบเทียบค่าควรจะเป็นที่ได้มาในแต่ละเงื่อนไขเพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ ซึ่งสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกได้เป็น 4 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและผ่านแยกทางซ้าย (ไม่เกิดการเลี้ยว) ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวาดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา

จากรูปที่ 3.12 สามารถวิเคราะห์ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทั้ง 2 ด้านได้ดังนี้

เฟรมที่ 1-100 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 1-100 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

เฟรมที่ 101-200 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่าน้อยกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

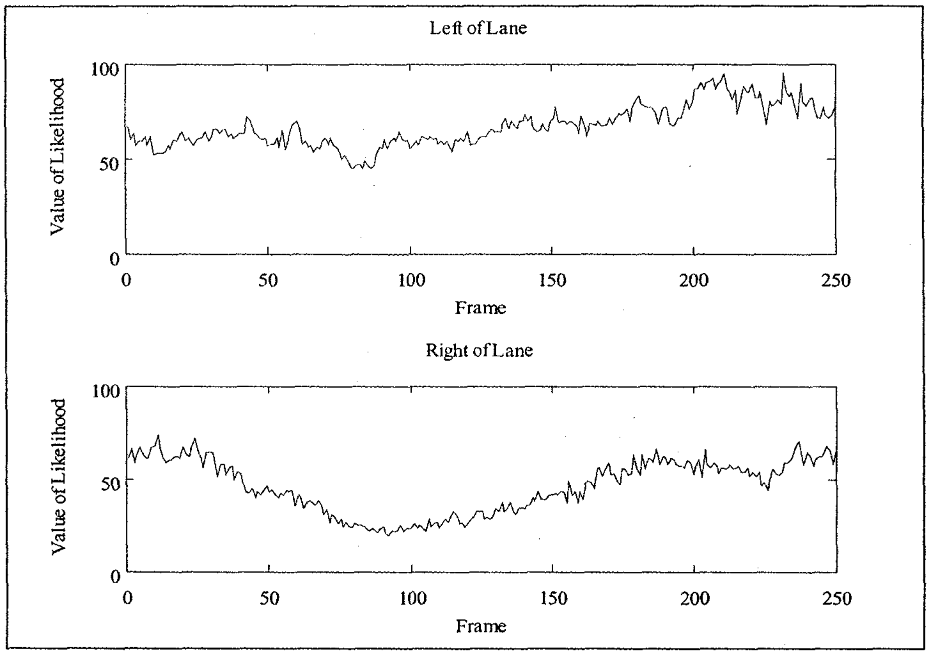
สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่101-200 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางซ้ายแต่ยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยว

เฟรมที่ 201-250 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 201-250 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

กรณีที่ 2 ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและผ่านแยกทางขวา (ไม่เกิดการเลี้ยว) ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวาดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา

จากรูปที่ 3.13 สามารถวิเคราะห์ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทั้ง 2 ด้านได้ดังนี้

เฟรมที่ 1-50 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 1-50 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

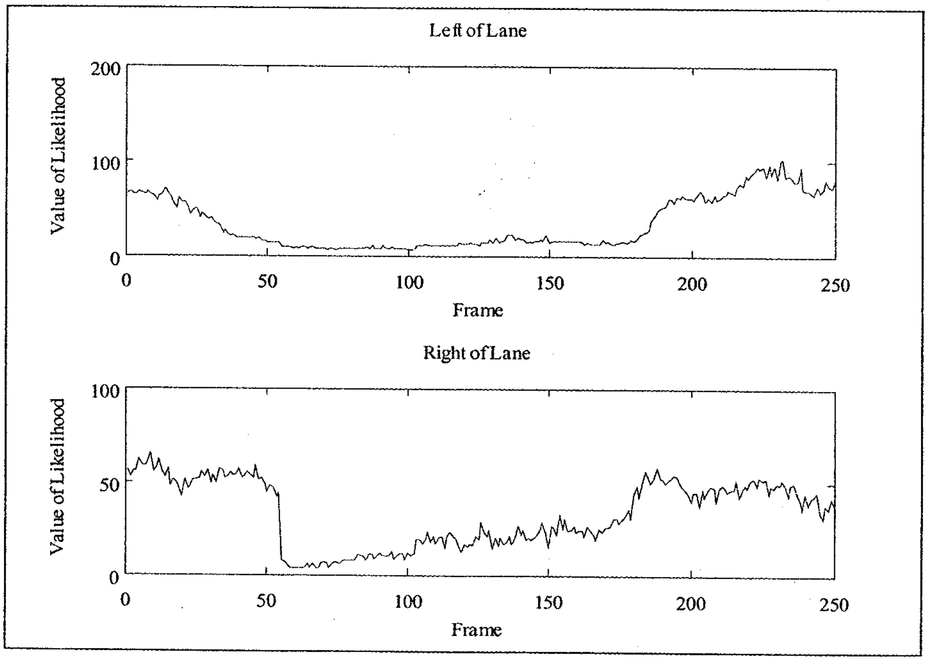
***เฟรมที่** 51-150* ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40
ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่าน้อยกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 51-150 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางขวาแต่ยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยวทางขวา

***เฟรมที่** 151-250* ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40
ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 151-250 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

กรณีที่ 3 ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและเลี้ยวแยกทางซ้าย (เกิดการเลี้ยว) ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวาดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา

จากรูปที่ 3.14 สามารถวิเคราะห์ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทั้ง 2 ด้านได้ดังนี้

เฟรมที่ 1-25 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 1-25 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

เฟรมที่ 26-50 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่าน้อยกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 26-50 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือในสภาวะดังกล่าวนี้ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยเริ่มพบบริเวณแยกทางซ้ายแต่ยังไม่ถึงแยกจึงทำให้ยังไม่เกิดการเลี้ยวใด ๆ สถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเตรียมจะเปลี่ยนจากสถานะการเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามาเป็นการเคลื่อนที่แบบการเลี้ยว เนื่องมาจากการที่ค่าควรจะทางขวามีค่ามากกว่า 40 และค่าควรจะเป็นทางซ้ายมีแนวโน้มลดลง

เฟรมที่ 51-150 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่าน้อยกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่าน้อยกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 51-150 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือในสภาวะดังกล่าวนี้ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยพบบริเวณแยกทางซ้ายและเกิดการเลี้ยวทางซ้าย จึงทำให้ค่าควรจะเป็นทางซ้ายและขวามีค่าน้อยกว่า 40 สถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะเปลี่ยนจากสถานะการเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามาเป็นการเคลื่อนที่แบบการเลี้ยว

เฟรมที่ 151-180 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่าน้อยกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่าน้อยกว่า 40

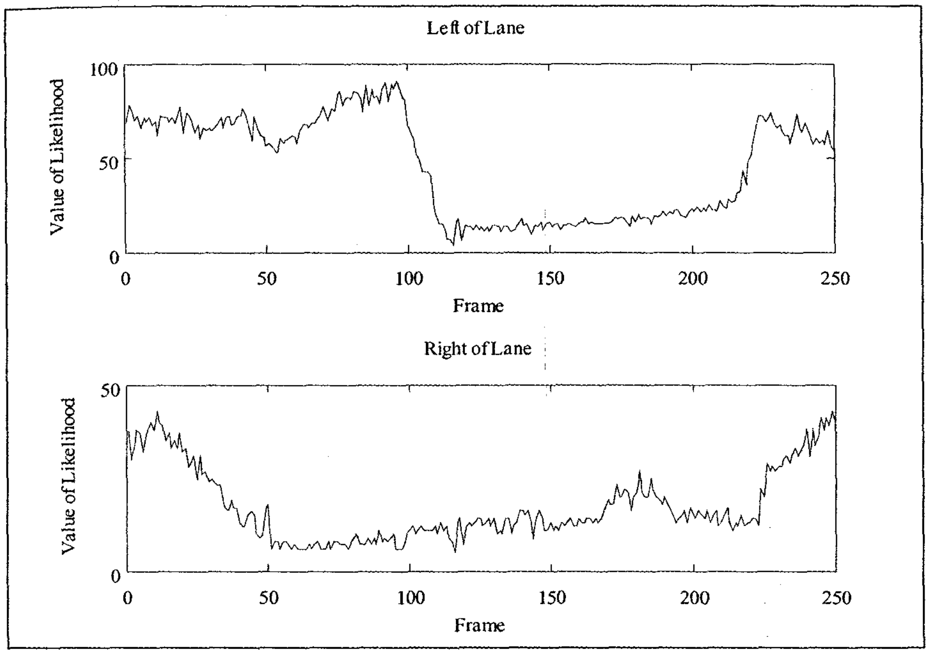
สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 151-180 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือในสภาวะดังกล่าวนี้ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยผ่านบริเวณแยกทางซ้ายและเกิดการเลี้ยวทางซ้ายแล้ว จึงทำให้ค่าควรจะเป็นทางซ้ายและขวามีค่าน้อยกว่า 40 สถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะเปลี่ยนจากการเคลื่อนที่แบบการเลี้ยวมาเป็นการเคลื่อนที่แบบตรงไปข้างหน้า เนื่องมาจากค่าควรจะเป็นทางซ้ายและขวามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เฟรมที่ 181-250 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 181-250 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะนั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

กรณีที่ 4 ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและเลี้ยวแยกทางขวา (เกิดการเลี้ยว) ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวาแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา

จากรูปที่ 3.15 สามารถวิเคราะห์ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทั้ง 2 ด้านได้ดังนี้

เฟรมที่ 1-20 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 1-20 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

เฟรมที่ 21-100 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่าน้อยกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 21-100 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือในสภาวะดังกล่าวนี้ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยเริ่มพบบริเวณแยกทางขวาแต่ยังไม่ถึงแยกจึงทำให้ยังไม่เกิดการเลี้ยวใด ๆ สถานะการเคลื่อนที่

ของยานพาหนะเตรียมจะเปลี่ยนจากสถานะการเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามาเป็นการเคลื่อนที่แบบการเลี้ยว เนื่องมาจากการที่ค่าควรจะทางซ้ายมีค่ามากกว่า 40 และค่าควรจะเป็นทางซ้ายมีแนวโน้มลดลง

เฟรมที่ 101-225 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่าน้อยกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่าน้อยกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 101-225 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือในสภาวะดังกล่าวนี้ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยพบบริเวณแยกทางขวาและเกิดการเลี้ยวทางซ้าย จึงทำให้ค่าควรจะเป็นทางซ้ายและขวามีค่าน้อยกว่า 40 สถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะเปลี่ยนจากสถานะการเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามาเป็นการเคลื่อนที่แบบการเลี้ยว

เฟรมที่ 226-250 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่าน้อยกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 151-180 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือในสภาวะดังกล่าวนี้ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยผ่านบริเวณแยกทางขวาและเกิดการเลี้ยวทางขวาแล้ว จึงทำให้ค่าควรจะเป็นทางซ้ายมีค่ามากกว่า 40 และค่าควรจะเป็นทางขวามีค่าน้อยกว่า 40 สถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะเปลี่ยนจากการเคลื่อนที่แบบการเลี้ยวมาเป็นการเคลื่อนที่แบบตรงไปข้างหน้า เนื่องมาจากค่าควรจะเป็นทางซ้ายมีค่ามากกว่า 40 และค่าควรจะเป็นทางขวามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบของการหาค่าควรจะเป็นของโครงสร้างถนนเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละกรณีนั้น พบว่าถ้าค่าควรจะเป็นของเส้นขอบโครงสร้างถนนทางด้านใดด้านหนึ่งมีค่าควรจะเป็นมากกว่า 40 แล้ว ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่เกิดการเลี้ยวใด ๆ หรือยานพาหนะยังคงสามารถรักษาทิศทางการเคลื่อนที่ไว้ได้ในสภาวะปกติ ดังนั้นโครงสร้างถนนที่เหมาะสมกับสภาพนี้จึงควรเป็นโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ ในทางตรงกันข้ามถ้าเส้นขอบของโครงสร้างถนนทั้ง 2 ด้านมีค่าควรจะเป็นน้อยกว่า 40 แล้วยานพาหนะจะเคลื่อนที่เป็นแบบการเลี้ยวหรือยานพาหนะไม่สามารถรักษาการเคลื่อนที่ไว้ยังกึ่งกลางช่องทางเดินรถได้ ดังนั้นโครงสร้างถนนที่เหมาะสมควรจะเป็นโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว จากผลการทดสอบทั้ง 2 ขั้นตอนสามารถสรุปถึงข้อกำหนดที่ใช้ในการหาโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติจำเป็นต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1. พารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ

B_L มีค่าอยู่ในช่วง [-9.0,-0.2] M_L มีค่าอยู่ในช่วง [60,420]

B_R มีค่าอยู่ในช่วง [0.5,10.0] M_R มีค่าอยู่ในช่วง [-100,180]

2. เส้นขอบถนนของช่องทางเดินรถข้างใดข้างหนึ่งมีค่าควรจะเป็นมากกว่า 40

.5 สรุป

โครงสร้างถนนแบ่งออกได้เป็น 2 สภาวะด้วยกันคือ โครงสร้างถนนขณะยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยวและโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว ซึ่งการตัดสินใจเลือกโครงสร้างถนนที่เหมาะสมกับสภาวะดังกล่าวนี้จะใช้ความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติกับโครงสร้างถนนจริงเป็นตัวตัดสินใจเพื่อนำไปใช้ในระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 4
ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ

4.1 กล่าวนำ

จากบทที่ 3 ที่ได้กล่าวถึงการหาโครงสร้างถนนซึ่งเป็นกระบวนที่ใช้สำหรับนำไปใช้เป็นอินพุตของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้วนั้นที่ว่าโครงสร้างถนนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 สภาวะด้วยกัน คือ โครงสร้างถนนขณะยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยว และโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว จากรูปแบบโครงสร้างถนนที่ได้ไว้แล้วจึงทำให้ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถแบ่งได้เป็น 2 ระบบเช่นกัน นั่นก็คือการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะขณะไม่เกิดการเลี้ยว และการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะขณะเกิดการเลี้ยว สำหรับการทำงานของทั้ง 2 ระบบนี้จะเป็นการบอกถึงวิธีการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยที่ยังรักษาทิศทางของยานพาหนะไว้ได้ และไม่สามารถรักษาทิศทางของยานพาหนะได้ ขั้นตอนการทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถที่นำเสนอในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ การหาโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ และการตามรอยช่องทางเดินรถ รายละเอียดดังกล่าวแสดงในหัวข้อถัดไป

4.2 การทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการสรุปการทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถโดยสามารถสรุปเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ (ดูในรูปที่ 4.1)

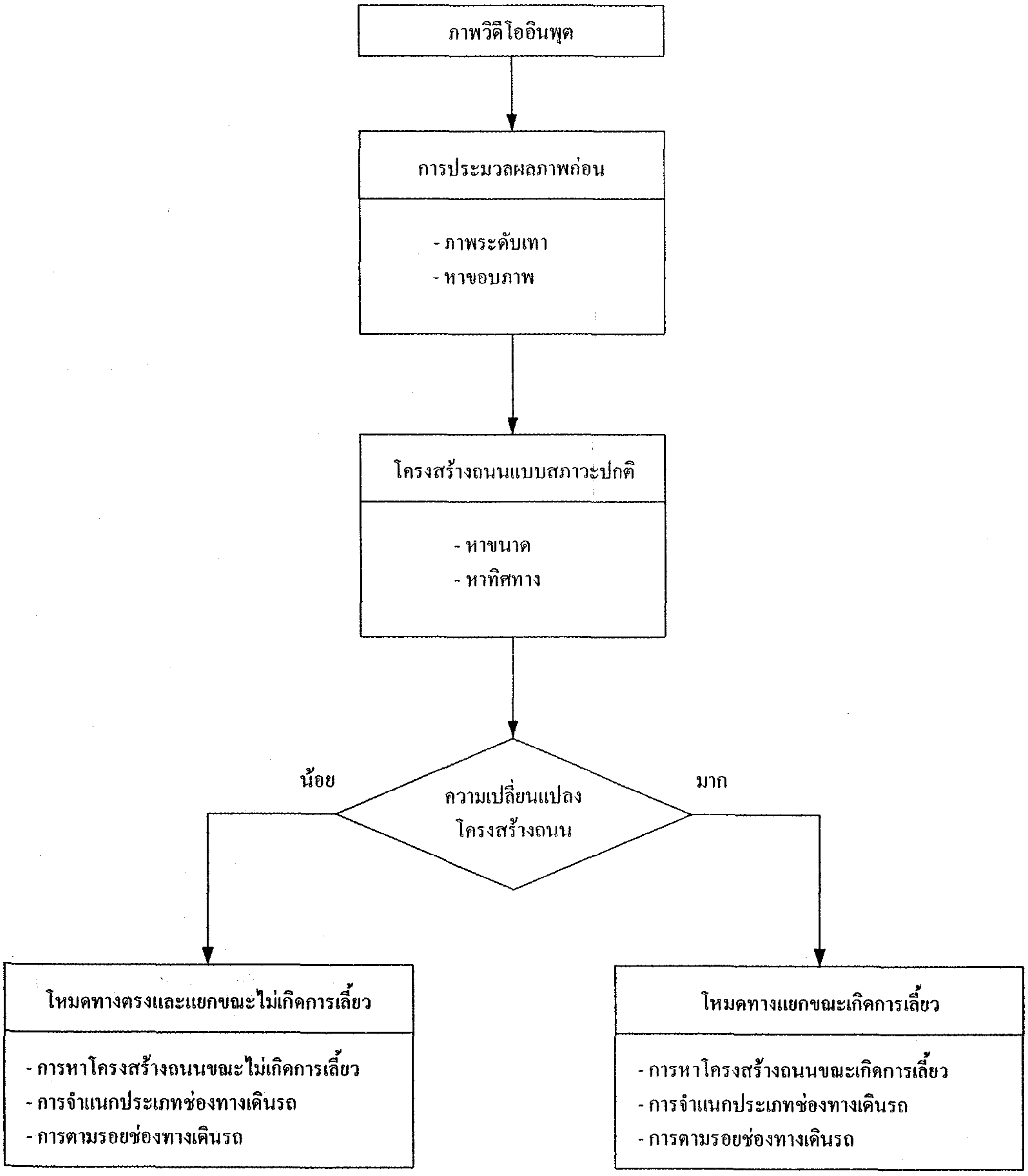
ขั้นตอนที่ 1 รับภาพวิดีโออินพุตจากกล้อง CCD โดยภาพวิดีโอที่รับมาจากกล้องนั้นจะเป็นภาพสี

ขั้นตอนที่ 2 นำภาพวิดีโออินพุตที่ได้มาผ่านกระบวนการประมวลผลก่อน โดยนำภาพวิดีโออินพุตดังกล่าวมาที่เป็นภาพสีมาแปลงให้เป็นภาพระดับเทา จากนั้นนำภาพระดับเทาที่ได้ผ่านกระบวนการหาขอบภาพ

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดโครงสร้างถนนแบบปกติเพื่อนำไปใช้เป็นข้อกำหนดในการหาโครงสร้างถนนที่เหมาะสมกับสภาพของถนนที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างถนนแบบปกติกับสภาพถนนจริงที่เกิดขึ้น โดยถ้าความเปลี่ยนแปลงโครงสร้างถนนแบบปกติมีค่าน้อยแล้วโครงสร้างถนนที่ได้จะเป็นโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยวจากนั้นจึงทำการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะไม่

เกิดการเลี้ยวและถ้าความเปลี่ยนแปลงโครงสร้างถนนแบบปกติมีค่ามากแล้วโครงสร้างถนนที่ได้จะเป็นโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว จากนั้นจึงทำการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเกิดการเลี้ยว



รูปที่ 4.1 แผนผังสรุปการทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ

4.3 แบบจำลองช่องทางเดินรถ

รูปแบบของถนนที่พบทั่วไปนั้นจะมีลักษณะของช่องทางเดินรถที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะของประเภทช่องทางเดินรถ เช่น ช่องทางเดินรถที่มีลักษณะเป็นทางตรง ทางโค้ง และทางแยก จากรูปร่างลักษณะของช่องทางเดินรถในแต่ละประเภทนั้นมนุษย์สามารถแยกแยะรูปร่างลักษณะของช่องทางเดินรถได้ด้วยการรับภาพถนนจากดวงตาทั้ง 2 ข้าง จากนั้นนำภาพถนนที่ได้ไปยังสมองส่วนที่ใช้สำหรับทำการแยกแยะ ซึ่งผลที่ได้จะให้ความรู้สึกถึงรูปร่างลักษณะของช่องทางเดินรถนั้นมีรูปร่างเป็นเส้นตรงและเส้นโค้ง แต่สำหรับในระบบการมองเห็นนั้นจะพบปัญหาคือ จะใช้อะไรเป็นตัวอธิบายลักษณะรูปร่างทางกายภาพของช่องทางเดินรถนั้น สำหรับงานวิจัยในนี้ได้นำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการอธิบายลักษณะรูปร่างทางกายภาพของช่องทางเดินรถ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เลือกนำมาใช้เป็นแบบจำลองของช่องทางเดินรถจะเลือกใช้เป็นสมการโพลีโนเมียลอันดับ 2 ซึ่งการอธิบายลักษณะทางกายภาพของช่องทางเดินรถนี้จะอธิบายในสมมุติฐานเบื้องต้นดังนี้

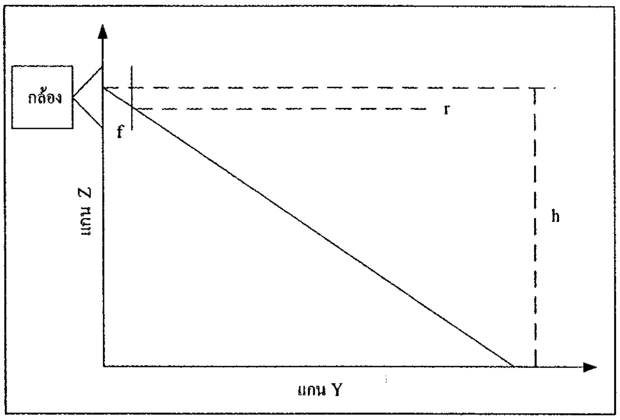
1. เส้นขอบถนนจะขนานกันอยู่ในระนาบพื้นดิน
2. ถนนเรียบ

สำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูลภาพที่ใช้ในการตรวจจับช่องทางเดินรถจะทำการติดตั้งกล้องไว้บนยานพาหนะโดยใช้กล้อง 1 ตัวที่ความสูง 160 เซนติเมตร และติดตั้งไว้ยังบริเวณกึ่งกลางของยานพาหนะ ภาพที่ได้รับจากกล้องในขั้นตอนนี้จะแสดงอยู่ในรูปของคู่ลำดับจุดภาพที่มีขนาด 240×320 จุดภาพ แบบจำลองของช่องทางเดินรถดังกล่าวสามารถอธิบายอยู่ในรูปของคู่ลำดับได้เช่นกัน ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 คู่ลำดับ คือ *คู่ลำดับแบบที่ 1* คู่ลำดับ (r,c) ซึ่งแสดงอยู่บนระนาบภาพ (image plane) เมื่อ r คือ แถวของภาพ c คือ คอลัมน์ภาพ *คู่ลำดับแบบที่ 2* คู่ลำดับ(x,y,z) ซึ่งแสดงอยู่บนระนาบพื้นดิน (ground plane) เมื่อ y คือ ทิศทางตามระนาบพื้นดิน x คือทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบ y และ z คือ ทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบพื้นดิน คู่ลำดับที่พบโดยทั่วไปของรูปร่างลักษณะช่องทางเดินรถจะแสดงอยู่ในรูปของสมการโพลีโนเมียลอันดับ 2 ซึ่งอยู่ในระนาบพื้นดิน ดังสมการที่ 4.1 (Lakshmanan and Kluge, 1996)

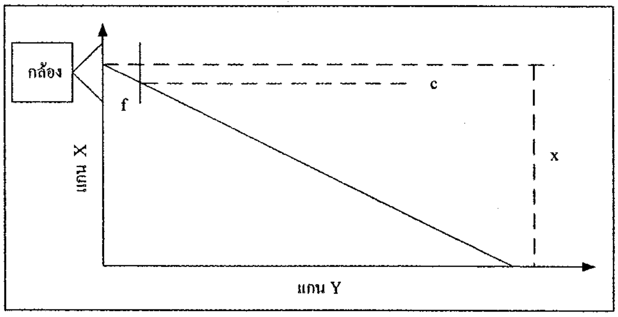
$$x = \frac{1}{2}ky^2 + my + b \tag{4.1}$$

เมื่อ	k	คือ ตัวกำหนดความโค้ง (curvature)
	m	คือ ตัวกำหนดทิศทาง (orientation)
	b	คือ ตัวชดเชย (offsets)

ทำการฉายภาพหาความสัมพันธ์ของคู่ลำดับที่อยู่บนระนาบพื้นดินกับคู่ลำดับที่อยู่บนระนาบภาพจะได้ดังในรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 มุมมองทางด้านบน (top view)



รูปที่ 4.3 มุมมองทางด้านข้าง (side view)

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{y}{h} = \frac{f}{rd} \text{ และ } \frac{x}{y} = \frac{cd}{f} \qquad (4.2)$$

เมื่อ f คือ ความยาวโฟกัส

h คือ ความสูงกล้องเทียบกับพื้นดิน

d คือ ระยะของจุดในระนาบภาพ

นำสมการที่ 4.2 มาแทนลงในสมการที่ 4.1 เพื่อหาความสัมพันธ์รูปร่างของช่องทางเดินรถเมื่ออยู่บนระนาบภาพจะได้ดังสมการที่ 4.3

$$c = \frac{k_{L,R}hf^2}{2d^2}\frac{1}{r} + \frac{b_{L,R}}{h}r + \frac{m_{L,R}f}{d} \tag{4.3}$$

จากสมการที่ 4.3 เมื่อกำหนดให้พารามิเตอร์ hf และ d คือ ค่าคงที่จะได้พารามิเตอร์ $\frac{k_{L,R}hf^2}{2d^2}$ คือ สัดส่วนความโค้ง $\frac{m_{L,R}f}{d}$ คือ สัดส่วนทิศทาง $\frac{b_{L,R}}{h}$ คือ สัดส่วนชดเชย ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$c = K_{L,R}\frac{1}{r} + B_{L,R}r + M_{L,R} \tag{4.4}$$

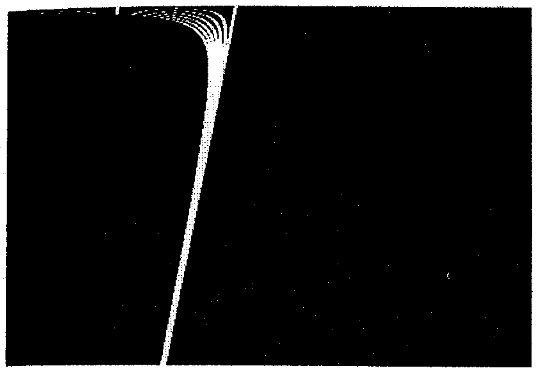
เมื่อ	K	คือ สัดส่วนความโค้ง
	B	คือ สัดส่วนทิศทาง
	M	คือ สัดส่วนชดเชย

จากนั้นนำแบบจำลองของช่องทางเดินรถที่ได้ในสมการที่ 4.4 ซึ่งใช้เป็นตัวอธิบายรูปร่างลักษณะของช่องทางเดินรถมาทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองช่องทางเดินรถในลำดับค่าต่าง ๆ กัน เพื่อทดสอบหาขีดความสามารถของแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายลักษณะทางกายภาพของช่องทางเดินรถในลักษณะต่าง ๆ ว่ามีความเหมาะสมกับสภาพถนนปัจจุบันมากน้อยเพียงใด สำหรับวิธีการที่ใช้ในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับแบบจำลองช่องทางเดินรถนี้จะเป็นการทดสอบค่าพารามิเตอร์ K B และ M ที่ค่าต่าง ๆ ในการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นี้จะกระทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ทีละตัว เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงทางรูปร่างลักษณะของช่องทางเดินรถในพารามิเตอร์นั้นโดยตรง ซึ่งกำหนดให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบนั้นให้มีค่าเปลี่ยนแปลงและในส่วนของพารามิเตอร์ที่ไม่ได้ทดสอบให้มีค่าคงที่ ในรูปที่ 4.4-4.9 จะเป็นการแสดงผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ K B และ M ที่มีความเหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของช่องทางเดินรถตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงขอบเขตความเป็นไปได้ของค่าพารามิเตอร์แบบจำลองช่องทางเดินรถที่ใช้ในการอธิบายรูปร่างลักษณะช่องทางเดินรถ ในการที่แบบจำลองช่องทางเดินรถจะสามารถครอบคลุมลักษณะทางกายภาพของช่องทางเดินรถได้ทั้งหมดพบว่าขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละตัวจะอยู่ในช่วงดังต่อไปนี้

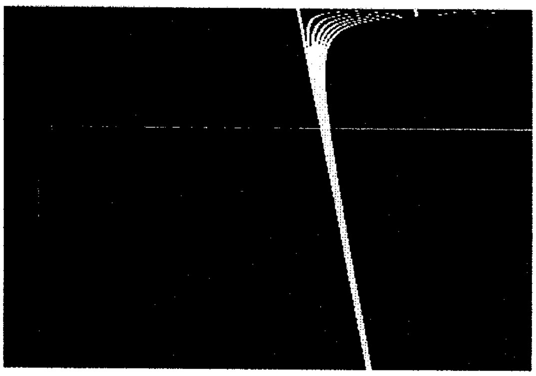
พารามิเตอร์

K	มีค่า -100 ถึง 100
B	มีค่า -12 ถึง 12
M	คือ ขนาดคอลัมภ์ของภาพ

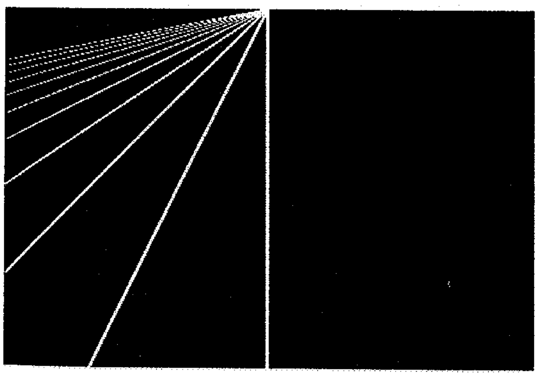
โดยที่ พารามิเตอร์ K มีขนาดเพิ่มขึ้นทีละ 50 (สำหรับใช้ในการทดสอบ)
พารามิเตอร์ B มีขนาดเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 (สำหรับใช้ในการทดสอบ)
พารามิเตอร์ M มีขนาดเพิ่มขึ้นทีละ 50 (สำหรับใช้ในการทดสอบ)



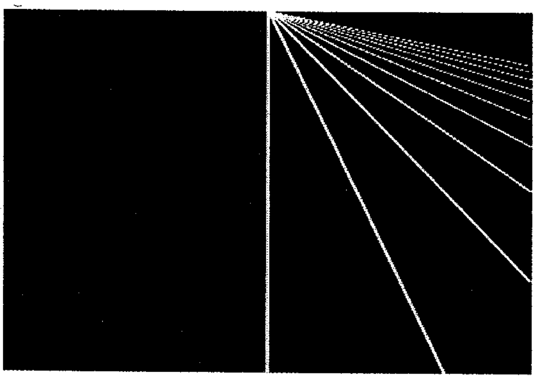
รูปที่ 4.4 K = 0 ถึง -600, B = -0.1 และ M = 200



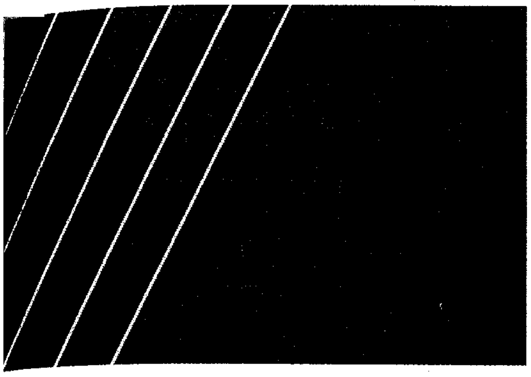
รูปที่ 4.5 K = 0 ถึง 600, B = 0.1 และ M = 250



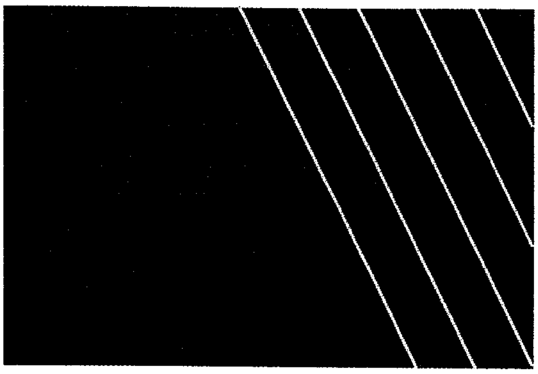
รูปที่ 4.6 K = 0, B = -0.5 ถึง -5.0 และ M = 225



รูปที่ 4.7 K = 0, B = 0.5 ถึง 5.0 และ M = 225



รูปที่ 4.8 $K = 0, B = -0.5$ และ $M = 1$ ถึง 225



รูปที่ 4.9 $K = 0, B = 0.5$ และ $M = 200$ ถึง 450

4.4 ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ

ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถที่จะกล่าวถึงในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบด้วยกันคือ ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยวและระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยว โดยในแต่ละระบบนั้นจะแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การหาโครงสร้างถนน การจำแนกประเภทของช่องทางเดินรถและการตามรอยช่องทางเดินรถ รายละเอียดการทำงานดังกล่าวจะแสดงในลำดับต่อไป

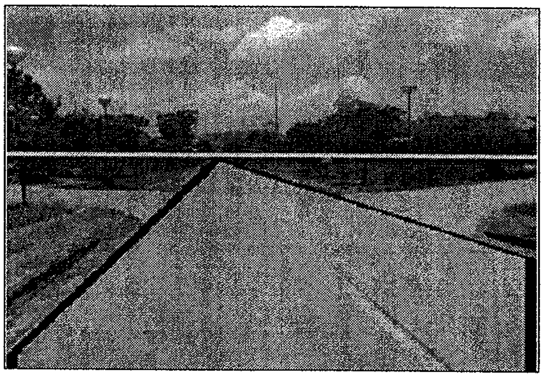
4.4.1 โครงสร้างถนน

โครงสร้างถนนของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะแบ่งออกตามสภาวะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ โดยสามารถแบ่งได้เป็นโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยวและขณะเกิดการเลี้ยว ซึ่งการอธิบายลักษณะการทำงานของการหาโครงสร้างถนนดังกล่าวนี้จะพิจารณาตามสภาวะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ โดยรายละเอียดต่าง ๆ จะแสดงในลำดับต่อไป

1) โครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการหาโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว สำหรับโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยวนี้จะแตกต่างกับโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวในแง่ของช่วงขอบเขตพารามิเตอร์ ในหัวข้อที่ 3.4 ได้กล่าวถึงวิธีการแยกภาพอินพุตถนนที่ได้รับมาเพื่อพิจารณาถึงรูปแบบของโครงสร้างถนนที่เหมาะสมกับภาพอินพุตถนนว่าควรจะเป็นโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยวหรือโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว โดยใช้วิธีการหาความแตกต่างโครงสร้างถนน

แบบสภาวะปกติ (ที่กำหนดขึ้นตามสมมติฐานของการเคลื่อนที่ยานพาหนะแบบปกติ) กับโครงสร้างถนนจริงในภาพว่าแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งถ้าโครงสร้างถนนมีความแตกต่างกันมากจะทำให้ค่าควรจะเป็นของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติมีค่าน้อยกว่าที่กำหนด ดังนั้นโครงสร้างถนนที่เหมาะสมสำหรับในกรณีนี้สมควรจะเป็นโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว ในทางตรงข้ามถ้าค่าควรจะเป็นของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดโครงสร้างถนนที่เหมาะสมควรจะเป็นโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว สำหรับโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยวที่กล่าวถึงในส่วนนี้จะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกันกับโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ เนื่องจากโครงสร้างถนนทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นโครงสร้างถนนที่อยู่ภายใต้สภาวะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะตรงไปข้างหน้า และรักษาทิศทางการเคลื่อนที่ไว้ยังตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางเดินรถ ในรูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว



รูปที่ 4.10 โครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว

2) โครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว

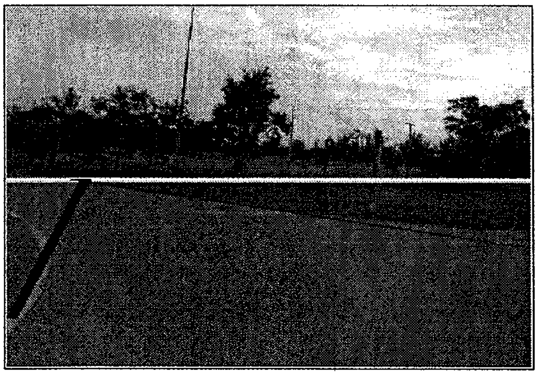
โครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวนี้เป็นโครงสร้างถนนในสภาวะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยว โครงสร้างถนนของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในส่วนนี้จะมีลักษณะแตกต่างไปจากโครงสร้างถนนขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว โดยโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวนี้จะอยู่ภายใต้การเคลื่อนที่ของยานพาหนะในสภาวะที่ยานพาหนะไม่สามารถรักษาทิศทางหรือองศาให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางเดินรถได้ ดังนั้นขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนนี้จะมีลักษณะที่ซับซ้อนมากกว่าขอบเขตโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว โดยขอบเขตของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับโครงสร้างถนนนี้จะได้มาจากการทดสอบหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับโครงสร้างถนนแบบปกติ ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.6 โดยใช้ผลที่ได้จากการทดสอบพารามิเตอร์โครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวดังตาราง

ที่ 3.2 และ 3.3 มาใช้ในการพิจารณา ซึ่งสามารถสรุปช่วงขอบเขตของพารามิเตอร์โครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวได้ดังนี้

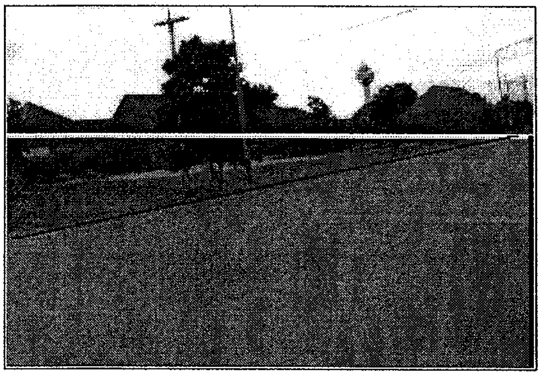
B_L มีค่าอยู่ในช่วง [-0.2,-9.0] M_L มีค่าอยู่ในช่วง [60,420]

B_R มีค่าอยู่ในช่วง [0.5,10.0] M_R มีค่าอยู่ในช่วง [-100,180]

ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวทางซ้ายและขวาตามลำดับ



รูปที่ 4.11 โครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวซ้าย



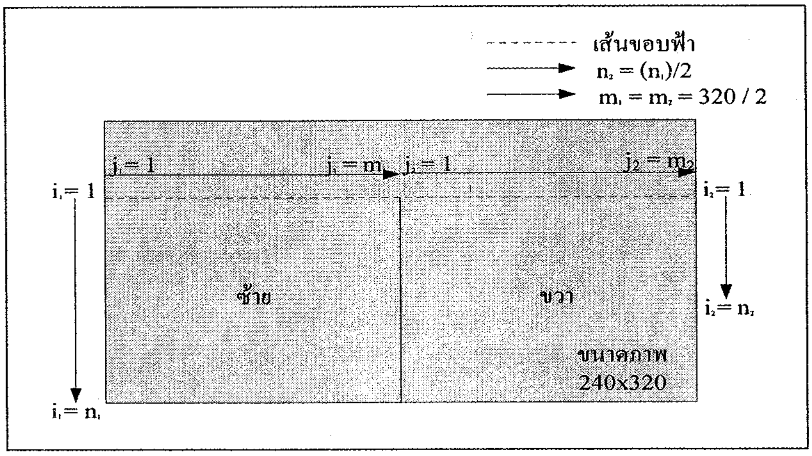
รูปที่ 4.12 โครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวขวา

4.4.2 การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ

หลังจากผ่านกระบวนการการหาโครงสร้างถนนรูปแบบต่าง ๆในขั้นต้นจะพบปัญหาที่ตามมาอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างมากสำหรับงานวิจัยทางด้านการตรวจจับช่องทางเดินรถ นั่นก็คือการจำแนกประเภทของช่องทางเดินรถ ประเภทของช่องทางเดินรถที่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้จะหมายถึงรูปแบบลักษณะของช่องทางเดินรถในลักษณะต่าง ๆ (พิจารณาจากเส้นขอบ

ถนนทั้ง 2 ข้างโดยเลือกพิจารณาทีละข้าง) โดยประเภทของช่องทางเดินรถนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภท ได้แก่ ทางตรง สามแยกและสี่แยก เป็นต้น หลังจากระบบได้พิจารณาทราบถึงประเภทของช่องทางเดินรถแล้ว ระบบจึงจะทำการตรวจจับช่องทางเดินรถได้ถูกต้อง สำหรับวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำเทคนิคการหาจุดเริ่มต้นของการเกิดแยกมาวิเคราะห์เพื่อหาประเภทของช่องทางเดินรถซึ่งมี 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ

ขั้นตอนที่ 1 นำภาพขอบถนนมาทำการแยกส่วนข้อมูล โดยภาพขนาดมี 240x320 มาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่ากัน จากนั้นนำเส้นขอบฟ้าที่ได้ก่อนหน้านี้มาเป็นตัวแบ่งส่วนภาพออกเป็น 2 ส่วนอีกครั้ง สำหรับโครงสร้างการแบ่งส่วนของข้อมูลขอบภาพแสดงดังในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 โครงสร้างการแบ่งส่วนของข้อมูลขอบภาพ

ขั้นตอนที่ 2 หาผลรวมข้อมูลของโครงสร้างถนนโดยการนำคู่ลำดับของโครงสร้างถนนมาจากนั้นพิจารณาคู่ลำดับของโครงสร้างถนนที่ตรงกับจุดภาพของข้อมูลขอบภาพนั้นและทำการตรวจสอบจุดภาพใกล้เคียงกันนั้นมีข้อมูลขอบภาพตรงกับโครงสร้างถนนมากน้อยเพียงใด โดยใช้การหาผลรวมของข้อมูลขอบภาพในแต่ละข้างของช่องทางเดินรถ สำหรับคู่ลำดับที่นำมาใช้ในการหาผลรวมของข้อมูลขอบภาพนั้นจะเป็น C_L และ C_R ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองของโครงสร้างถนนกรณีใด ๆ ผลรวมของข้อมูลขอบภาพของโครงสร้างถนนแต่ละข้างแสดงดังสมการที่

$$F_1(i_1) = B(i_1, c_{Li1}-1) + B(i_1, c_{Li1}) + B(i_1, c_{Li1}+1) \quad \text{เมื่อ } i_1 = 1,....,n_1 \tag{4.5}$$

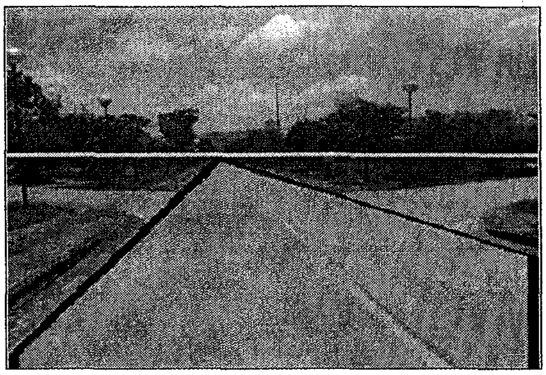
$$F_2(i_2) = B(i_2, c_{Ri2}-1) + B(i_2, c_{Ri2}) + B(i_2, c_{Ri2}+1) \quad \text{เมื่อ } i_2 = 1,....,n_2 \tag{4.6}$$

เมื่อ F_1 คือ ผลรวมข้อมูลโครงสร้างถนนทางด้านซ้ายของภาพแถวที่ i_1

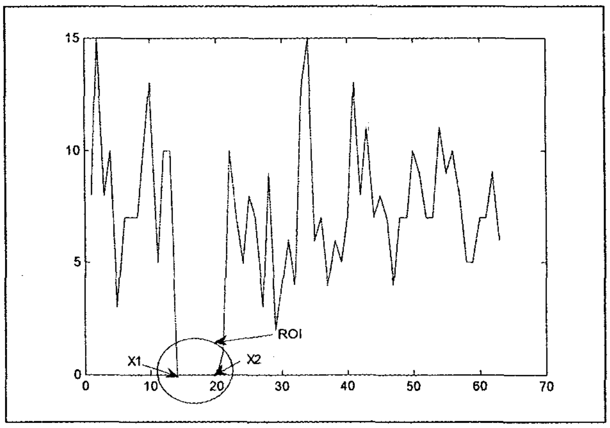
F_2 คือ ผลรวมข้อมูลโครงสร้างถนนทางด้านขวาของภาพแถวที่ i_2

$B(i,c)$ คือ ขอบภาพมีค่า 0,1

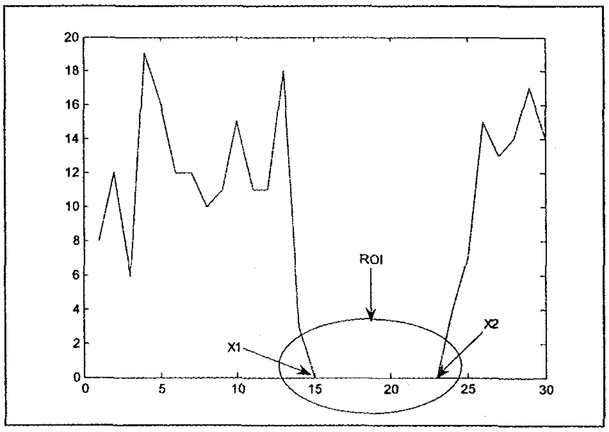
ขั้นตอนที่ 3 จะเป็นการวิเคราะห์หาประเภทของช่องทางเดินรถ โดยเลือกพิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากสมการที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งจากฟังก์ชัน F_1 และ F_2 เมื่อนำข้อมูลของโครงสร้างถนนที่ได้ในแต่ละกรณีมาวิเคราะห์ถึงความสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพพบว่าเมื่อบริเวณส่วนที่มีค่าผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนมีค่าเป็นศูนย์แล้วนั้นบริเวณดังกล่าวจะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพกับประเภทของถนนกรณีที่เป็นทางแยก ในทางตรงกันข้ามบริเวณส่วนที่มีค่าผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนมีค่าไม่เป็นศูนย์แล้วนั้นบริเวณดังกล่าวจะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพกับประเภทของถนนกรณีที่เป็นทางตรงหรือทางโค้ง โดยในรูปที่ 4.14 แสดงภาพต้นแบบและในรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงผลรวมข้อมูลโครงสร้างถนนที่สอดคดคล้องกับลักษณะทางกายภาพในส่วนทางด้านซ้ายและขวาตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสามารถให้คำจำกัดความได้ว่า “*ถ้าบริเวณที่มีผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนมีค่าเป็นศูนย์แล้วบริเวณนั้นจะมีลักษณะทางกายภาพนั้นสอดคล้องกับทางแยก (ROI) ในทางตรงกันข้ามถ้าบริเวณที่มีผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนมีค่าไม่เป็นศูนย์แล้วบริเวณนั้นจะมีลักษณะทางกายภาพนั้นสอดคล้องกับทางตรงหรือทางโค้ง*” จากคำจำกัดความดังกล่าวเราสามารถนำมาประยุกต์สำหรับใช้ในการหาตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการเกิดเป็นทางแยกของถนนได้ นั่นก็คือถ้าบริเวณที่เป็นจุดใด ๆ ของผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนที่เปลี่ยนจากค่าใด ๆ มาเป็นศูนย์ (x_1) หรือบริเวณที่เป็นจุดใด ๆ ของผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนที่เปลี่ยนจากศูนย์มาเป็นค่าใด ๆ (x_2) แล้วบริเวณจุดนั้น (x_1, x_2) จะเป็นตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการเกิดเป็นทางแยกของถนน ผลการทดสอบปรากฏว่าภาพของช่องทางเดินรถนั้นจะมีตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการเกิดเป็นแยกของถนนส่วนทางด้านซ้ายและขวานั้นมีค่าเป็นไปได้ที่เหมาะสมมากที่สุดเพียงด้านละ 2 จุดเท่านั้น เนื่องจากพิจารณาทางแยกที่ใกล้ที่สุดส่วนทางแยกที่ไกลออกไปไม่พิจารณา (กรณีที่ช่องทางเดินรถด้านใดด้านหนึ่งมีทางแยกมากกว่าหนึ่งเกิดขึ้นในภาพ) เพราะว่าโดยทั่วไปการเลี้ยวของยานพาหนะกระทำโดยการพิจารณาจากทางแยกที่ใกล้ที่สุดก่อน ขณะที่ส่วนของช่องทางเดินรถที่เป็นทางตรงนั้นจะไม่มีตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการเกิดเป็นทางแยกของถนนและส่วนของช่องทางเดินรถที่เป็นทางแยกนั้นจะมีตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการเกิดเป็นแยกของถนนเป็น 1 จุด หรือ 2 จุดเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.17 นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกประเภทของช่องทางเดินรถได้ดังตารางที่ 4.1



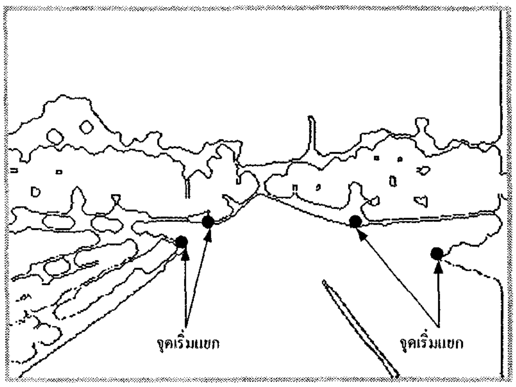
รูปที่ 4.14 ภาพต้นแบบ



รูปที่ 4.15 ผลรวมข้อมูลภาพส่วนทางด้านซ้าย



รูปที่ 4.16 ผลรวมข้อมูลภาพส่วนทางด้านขวา



รูปที่ 4.17 จุดเริ่มต้นของการเกิดแยกของถนน

ตารางที่ 4.1 การแบ่งประเภทช่องทางเดินรถ

จำนวนจุดเริ่มแยกทางด้านซ้าย	จำนวนจุดเริ่มแยกทางด้านขวา	ประเภทช่องทางเดินรถ
0	0	ทางตรงหรือโค้ง
1	0	สามแยกเลี้ยวซ้าย
0	1	สามแยกเลี้ยวขวา
1	1	สามแยกหรือสี่แยก
2	0	สามแยกเลี้ยวซ้าย
0	2	สามแยกเลี้ยวขวา
2	1	สี่แยก
1	2	สี่แยก
2	2	สี่แยก
10	0	สามแยกเลี้ยวซ้าย
10	1	สี่แยก
10	2	สี่แยก
0	10	สามแยกเลี้ยวขวา
1	10	สี่แยก
2	10	สี่แยก

หมายเหตุ : จำนวนจุดเริ่มแยกเท่ากับ 10 หมายถึงช่องทางเดินรถในด้านนั้นไม่มีหรือไม่ได้แสดงอยู่ในภาพ

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถบริเวณทางแยกของช่องทางเดินรถที่ระยะต่าง ๆ จำนวน 125 ภาพในสภาวะสภาพแวดล้อมปกติ

ชนิดภาพ	ระยะห่าง (เมตร)	จำนวนเฟรมถูกต้อง	จำนวนเฟรมผิดพลาด	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง
แยกทางซ้าย	25	85	40	65.0
	20	93	32	74.4
	15	105	20	84.0
	10	113	12	90.4
	5	121	4	96.8
แยกทางขวา	25	75	50	60.0
	20	88	37	70.4
	15	96	29	76.8
	10	115	10	92.0
	5	120	5	96.0

<u>หมายเหตุ</u> : ระยะห่างในการทดสอบนี้เป็นระยะห่างระหว่างยานพาหนะกับบริเวณทางแยกของช่องทางเดินรถ

จากผลการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถที่ระยะต่าง ๆ พบว่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ได้มีความแตกต่างกันออกไป โดยที่ระยะห่างที่ 25 เมตรจะให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องอยู่ที่ประมาณ 62.5 เปอร์เซ็นต์ ในระยะห่างที่ 20 เมตรจะให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องอยู่ที่ประมาณ 72.5 เปอร์เซ็นต์ ในระยะห่างที่ 15 เมตรจะให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องอยู่ที่ประมาณ 80.0 เปอร์เซ็นต์ ในระยะห่างที่ 10 เมตรจะให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องอยู่ที่ประมาณ 91.0 เปอร์เซ็นต์ และในระยะห่างที่ 5 เมตรจะให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องอยู่ที่ประมาณ 96.0 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างยานพาหนะกับบริเวณทางแยกของช่องทางเดินรถมีระยะห่างลดลงที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากที่ระยะห่างน้อย ๆ จะให้ข้อมูลภาพที่ใช้สำหรับในการจำแนกประเภทที่ละเอียดและสมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นระยะห่างที่เหมาะสมในการพิจารณาจำแนกประเภทช่องทางเดินรถควรเริ่มที่ระยะห่างที่ 20 เมตรเพราะให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงถึง 80.0 เปอร์เซ็นต์

4.4.3 การตามรอยช่องทางเดินรถ

หลังจากทำการจำแนกประเภทของช่องทางเดินรถแล้ว ขั้นตอนต่อมาจะเป็นการหาแบบจำลองช่องทางเดินรถที่เหมาะสมกับประเภทของช่องทางเดินรถที่ได้หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการตามรอยช่องทางเดินรถ โดยแบบจำลองช่องทางเดินรถที่นำมาใช้อธิบายลักษณะทางกายภาพของช่องทางเดินรถจะใช้แบบจำลองช่องทางเดินรถที่ได้หาไว้ในหัวข้อที่ 4.3 แสดงดังสมการที่ 4.7 สำหรับขั้นตอนในการตามรอยช่องทางเดินมีด้วยกัน 2 ขั้นตอน คือ การสร้างเมตริกซ์พารามิเตอร์ และการคำนวณหาค่าควรจะเป็นที่มากที่สุดของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่เหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$c = K\frac{1}{r} + B \times r + M \tag{4.7}$$

เมื่อ	K	คือ สัดส่วนความโค้ง
	B	คือ สัดส่วนทิศทาง
	M	คือ สัดส่วนชดเชย
	r	คือ แถวของภาพ
	c	คือ คอลัมภ์ของภาพ

1) การสร้างเมตริกซ์พารามิเตอร์

นำแบบจำลองของช่องทางเดินรถในสมการ 4.7 มาหาความสัมพันธ์กับประเภทของช่องทางเดินรถ โดยทำการสร้างเมตริกซ์พารามิเตอร์ของแบบจำลองช่องทางเดินรถทั้งทางด้านซ้ายและขวาเพื่อให้ครอบคลุมกับประเภทของช่องทางเดินรถในแต่ละประเภท อาทิเช่น ทางตรง ทางสามแยก และสี่แยก เป็นต้น อีกทั้งในกรณีที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยวและเกิดการเลี้ยว โดยที่เมตริกซ์พารามิเตอร์นี้จะต้องมีความยืดหยุ่นสูงและมีประสิทธิภาพสูงด้วย ดังสมการที่ 4.8

$$P_L(k_L) = \begin{bmatrix} K_{L1} & B_{L1} & M_{L1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{Lk_L} & B_{Lk_L} & M_{Lk_L} \end{bmatrix}_{k_L \times 3} \quad P_R(k_R) = \begin{bmatrix} K_{R1} & B_{R1} & M_{R1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{Rk_R} & B_{Rk_R} & M_{Rk_R} \end{bmatrix}_{k_R \times 3} \tag{4.8}$$

เมื่อ $k_L = \text{size}(K_L \times B_L \times M_L)$ และ $k_R = \text{size}(K_R \times B_R \times M_R)$

2) การคำนวณหาค่าควรจะเป็นมากที่สุด

ค่าควรจะเป็นสูงสุดในที่นี้คือ เป็นการวัดความคล้ายคลึงกันระหว่างแบบจำลองช่องทางเดินรถและช่องทางเดินรถที่แสดงในภาพปัจจุบัน โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทำการประมวลผลก่อนมาเป็นภาพอินพุตเพื่อใช้เป็นข้อมูลในฟังก์ชันค่าควรจะเป็น กำหนดดังสมการที่ 4.4

$$L(P(k)) = \sum_{r=v}^{r=m} (B(r,c(P(k))\text{-}1) + B(r,c(P(k))) + B(r,c(P(k))+1)) \qquad (4.9)$$

เมื่อ m คือ ขนาดแถวของภาพ

v คือ เส้นขอบฟ้า

$B(r,c)$ คือ ขอบภาพมีค่า 0, 1

ฟังก์ชันค่าควรจะเป็นสูงสุดในการค้นหาค่าพารามิเตอร์

$$P_{best} = \max[L_k] \qquad ,k \in 1,2,3,...,n_{L,R} \qquad (4.10)$$

เมื่อ $n_{L,R}$ คือ จำนวนขนาดของเมตริกพารามิเตอร์ซ้ายและขวา

บทที่ 5
ผลการทดลองการตรวจจับช่องทางเดินรถ

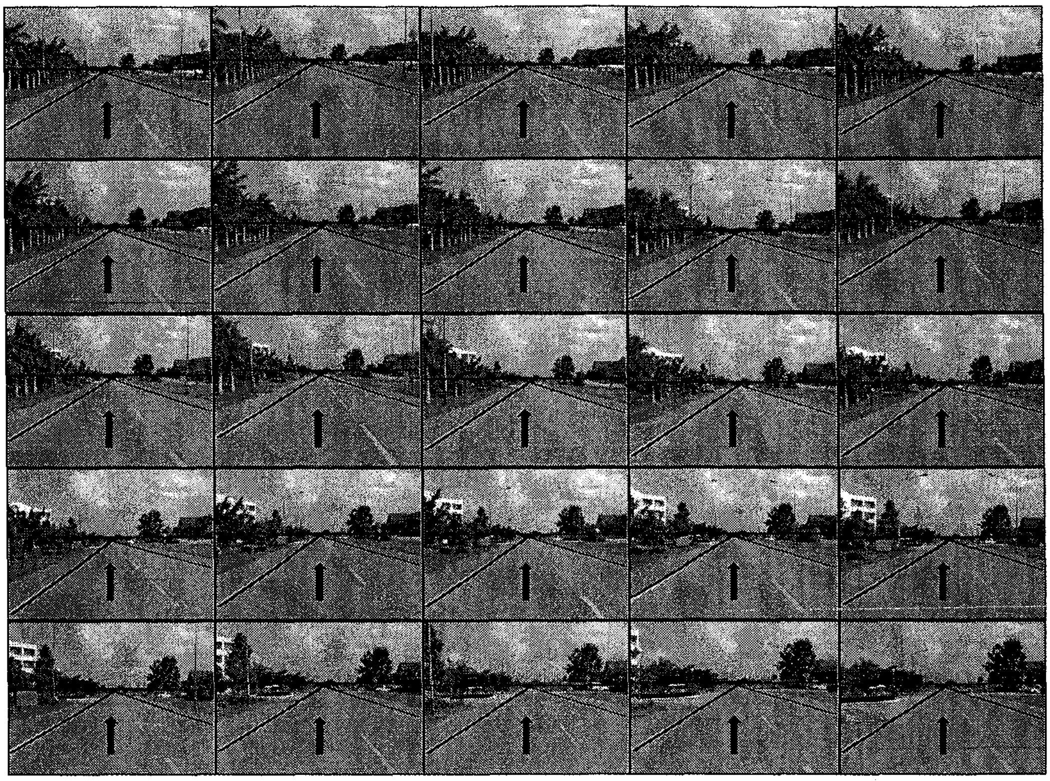
5.1 กล่าวนำ

จากหัวข้อที่ผ่านมาทั้งหมดทำให้ทราบรายละเอียดของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถของงานวิจัยนี้ รวมทั้งผลการทดสอบระบบและประสิทธิภาพของระบบไปบ้างแล้ว ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดสอบระบบในกรณีที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยวและการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.2 การตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว

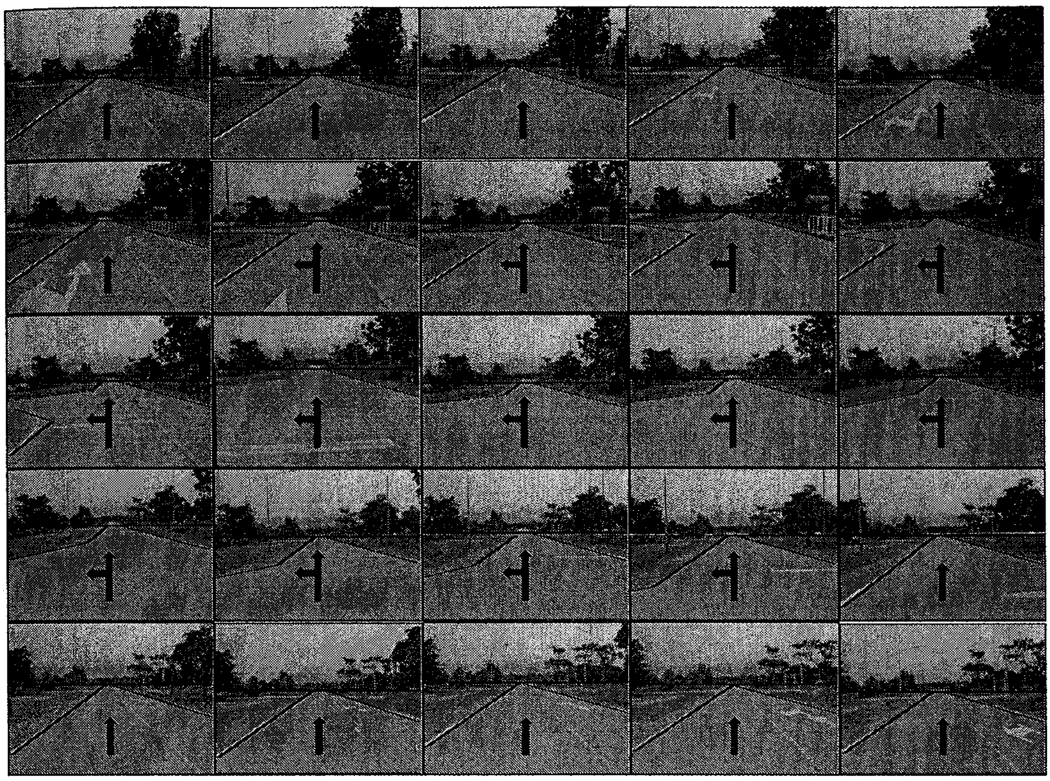
ในการทดสอบระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยวนี้จะทดสอบโดยการแบ่งตามประเภทของช่องทางเดินรถแล้วเปรียบเทียบค่าความถูกต้องกับขนาดวิดีโอที่ 250 เฟรม ซึ่งระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้สามารถปรับขนาดของแบบจำลองช่องทางเดินรถได้อัตโนมัติ โดยแต่ละเฟรมจะทำการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถจากภาพที่มีช่องทางเดินรถอยู่ ซึ่งภาพที่ใช้มีขนาด 240x320 จุดภาพ สำหรับการตรวจจับช่องทางเดินรถในส่วนนี้แบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกใด ๆ ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกใด ๆ ในการทดสอบนี้จะเลือกผลที่ได้จาการทดสอบมาแสดงให้เห็นถึงการตรวจจับช่องทางเดินรถทีละ 10 เฟรมเริ่มจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 5.1 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะปกติว่ามีขีดความสามารถมากน้อยเพียงใดของการตรวจจับช่องทางเดินรถในลักษณะช่องทางเดินรถนี้ ซึ่งถ้าหากประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถกรณีดังกล่าวนี้มีค่าน้อยแล้วนั้นจะเป็นไม่ได้เลยที่นำอัลกอริทึมนี้ไปใช้ทดสอบในกรณีต่อไปโดยแสดงให้เห็นตั้งแต่เฟรมที่ 10-250 จากผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยไม่ผ่านแยกใด ๆ

กลุ่มที่ 2 ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางซ้าย ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางซ้าย โดยยานพาหนะยังคงรักษาการเคลื่อนที่ไว้ยังตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางเดินรถถึงแม้ว่ายานพาหนะจะเคลื่อนที่ถึงแยกทางซ้ายก็ตาม ในการทดสอบนี้จะเลือกผลที่ได้จาการทดสอบมาแสดงให้เห็นถึงการตรวจจับช่องทางเดินรถทีละ 10 เฟรมเริ่มจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 5.2 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถที่เพิ่มขึ้นของการตรวจจับช่องทางเดินรถที่แตกต่างจากเดิม ซึ่งในเฟรมที่ 10-60 เป็นการแสดงการตรวจจับช่องทางเดินที่มีลักษณะเป็นทางตรงจากนั้นลักษณะช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมาเป็นแยกทางซ้ายซึ่งแสดงให้เห็นในเฟรมที่ 60 จากนั้นลักษณะของช่องทางเดินรถจะเป็นแยกทางซ้ายต่อไปเรื่อย ๆ ตั้งแต่เฟรมที่ 70-140 จนกระทั่งเมื่อถึงประมาณเฟรมที่ 150 ลักษณะของช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากแยกทางซ้ายมาเป็นทางตรงอีกครั้งนึงจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านแยกทางซ้ายนั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับลดลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยยังมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงถึง 92 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยผ่านแยกทางซ้าย

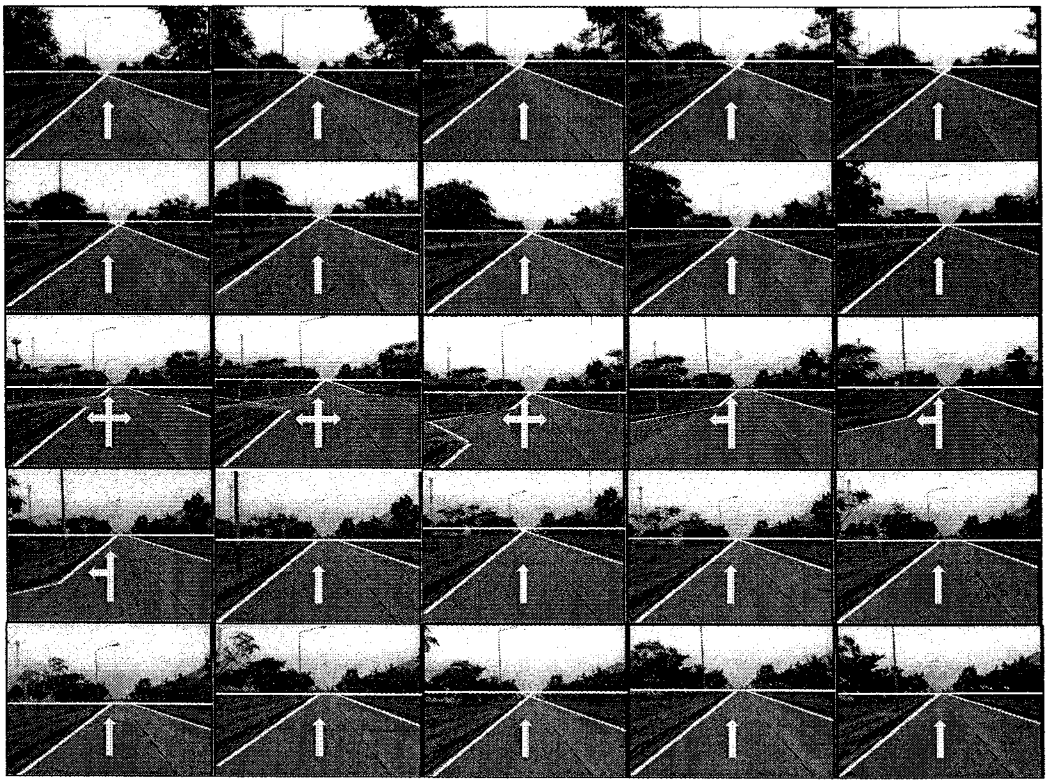
กลุ่มที่ 3 ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางขวา ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางขวา โดยยานพาหนะยังคงรักษาการเคลื่อนที่ไว้ยังตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางเดินรถถึงแม้ว่ายานพาหนะจะเคลื่อนที่ถึงแยกทางขวาก็ตาม ในการทดสอบนี้ได้เลือกผลการทดสอบมาแสดงให้เห็นถึงการตรวจจับช่องทางเดินรถทีละ 10 เฟรมเริ่มจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 5.3 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถที่เพิ่มขึ้นของการตรวจจับช่องทางเดินรถที่แตกต่างจากเดิม ซึ่งในเฟรมที่ 10 เป็นการแสดงการตรวจจับช่องทางเดินที่มีลักษณะเป็นทางตรงจากนั้นลักษณะช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมาเป็นแยกทางขวาซึ่งแสดงให้เห็นในเฟรมที่ 20 จากนั้นลักษณะของช่องทางเดินรถจะเป็นแยกทางขวาต่อไปเรื่อย ๆ ตั้งแต่เฟรมที่ 20-150 จนกระทั่งเมื่อถึงประมาณเฟรมที่ 160 ลักษณะของช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากแยกทางขวามาเป็นทางตรงอีกครั้งนึงจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบการ

ตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านแยกทางขวานั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับลดลงไปเพียงเล็กน้อย โดยยังคงให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงถึง 92.8 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 5.1

รูปที่ 5.3 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางขวา

กลุ่มที่ 4 ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางซ้ายและขวา (สี่แยก) ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยผ่านแยกสี่แยก โดยยานพาหนะยังคงรักษาการเคลื่อนที่ไว้ยังตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางเดินรถถึงแม้ว่ายานพาหนะจะเคลื่อนที่ถึงสี่แยกก็ตาม ในการทดสอบนี้จะเลือกผลที่ได้จากการทดสอบมาแสดงให้เห็นถึงการตรวจจับช่องทางเดินรถทีละ 10 เฟรมเริ่มจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 5.4 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถที่เพิ่มขึ้นของการตรวจจับช่องทางเดินรถที่แตกต่างจากเดิม ซึ่งในเฟรมที่ 10-100 เป็นการแสดงการตรวจจับช่องทางเดินที่มีลักษณะเป็นทางตรงจากนั้นลักษณะช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมาเป็นสี่แยกซึ่งแสดงให้เห็นในเฟรมที่ 110 จากนั้นลักษณะของช่องทางเดินรถนี้จะเป็นสี่แยกต่อไปเรื่อย ๆ ตั้งแต่เฟรมที่ 110-160 จนกระทั่งเมื่อถึงประมาณเฟรมที่ 170 ลักษณะของช่องทางเดินรถจะ

เปลี่ยนจากสี่แยกมาเป็นทางตรงอีกครั้งนึงจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านสี่แยกนั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับลดลงไม่มากนัก โดยยังมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงถึง 88 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางซ้ายและขวา

ตารางที่ 5.1 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการตามรอยช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่เกิดการเลี้ยวภายใต้สภาพแวดล้อมปกติของทั้ง 4 กรณี

ชนิดภาพ	ข้อมูลภาพชุดที่	จำนวนเฟรมถูกต้อง	จำนวนเฟรมผิดพลาด	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง
ทางตรงไม่ผ่านแยก	1	238	12	95.2
	2	240	10	96.0
	3	235	15	94.0
	4	240	10	96.0
	5	232	8	92.8

ชนิดภาพ	ข้อมูลภาพชุดที่	จำนวนเฟรมถูกต้อง	จำนวนเฟรมผิดพลาด	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง
ทางตรงผ่านแยกทางซ้าย	1	230	15	92.0
	2	225	25	90.0
	3	220	30	88.0
	4	227	23	90.8
	5	228	22	91.2
ทางตรงผ่านแยกทางขวา	1	228	22	91.2
	2	222	28	88.8
	3	220	30	88.0
	4	232	18	92.8
	5	225	25	90.0
ทางตรงผ่านแยกทางขวา-ซ้าย	1	220	30	88.0
	2	210	40	84.0
	3	215	35	86.0
	4	206	44	82.4
	5	213	37	85.2

<u>หมายเหตุ</u> : สภาพแวดล้อมปกติ หมายถึง สภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นตรงบริเวณเส้นขอบถนนโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเส้นขอบถนน เช่น เส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง เส้นขอบถนน มีเงาผาดผ่าน เส้นขอบถนนมีสิ่งกีดขวาง และเส้นขอบถนนเป็นเส้นประ

5.3 การตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยว

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะที่ยานพาหนะเกิดการเลี้ยว ทดสอบ โดยการพิจารณาถึงสภาวะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะแล้วเปรียบเทียบค่าความถูกต้องกับขนาดวิดีโอที่ 250 เฟรม สำหรับการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้แบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้

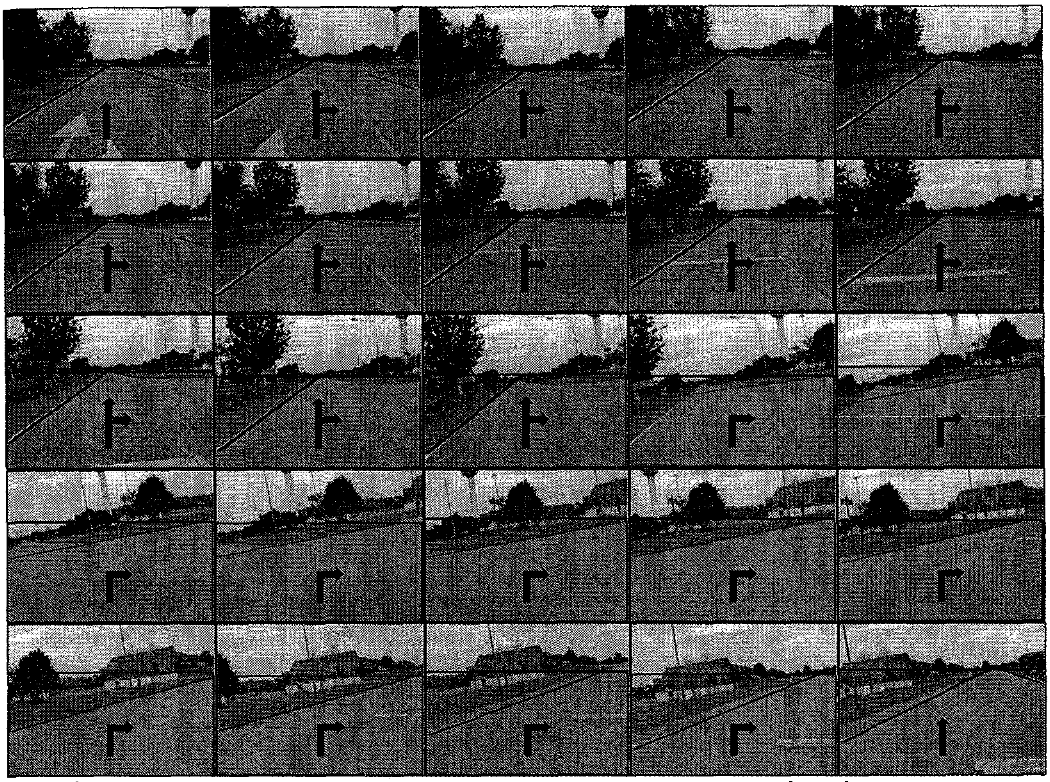
กลุ่มที่ 1 เป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อผ่านสามแยกและเลี้ยวทางซ้าย ในขั้นตอนการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถทีละ 10 เฟรมจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 5.5 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการตรวจจับช่องทางเดินรถขณะเกิดการเลี้ยว ซึ่งในเฟรมที่ 10 จะเป็นการแสดงการตรวจจับแบบทางตรง จากนั้นในเฟรมที่ 20 จะเป็นเฟรมเริ่มต้นในการตรวจจับช่องทางเดินรถที่

เป็นทางแยกจนถึงเฟรมที่ 110 จะเปลี่ยนเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถแบบเกิดการเลี้ยวจนถึงเฟรมที่ 200 ระบบการตรวจจับจะเปลี่ยนมาเป็นแบบทางตรงจนกระทั่งเฟรมที่ 250 โดยในการทดสอบนี้สามารถให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง 91.2 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 5.2

รูปที่ 5.5 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยผ่านสามแยกและเลี้ยวทางซ้าย

กลุ่มที่ 2 ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อผ่านสามแยกและเลี้ยวทางขวา ในขั้นตอนการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถทีละ 10 เฟรมจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 5.6 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้จะเป็นการตรวจจับเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจจับช่องทางเดินรถให้ครอบคลุมยิ่งขึ้น โดยในเฟรมที่ 10 จะเป็นการแสดงการตรวจจับช่องทางเดินขณะยังอยู่ในทางตรง จากนั้นเมื่อเริ่มเข้าสู่เฟรมที่ 20 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมาเป็นแยกทางขวาและดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงเฟรมที่ 130 ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากการตรวจจับแบบไม่เกิดการเลี้ยวมาเป็นการตรวจจับแบบเกิดการเลี้ยว โดยจะเริ่มตรวจจับได้ในขณะที่ยานพาหนะเริ่มเกิดการเลี้ยวขึ้นในเฟรมที่ 140 จากนั้นยานพาหนะยังคงรักษาทิศทางการเลี้ยวไว้อย่างต่อเนื่องระบบก็ยังสามารถตรวจจับช่องทางเดินรถไว้ได้จนกระทั่งถึงเฟรมที่ 240 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเริ่มเปลี่ยนมาเป็นทางตรงจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบมาเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถ

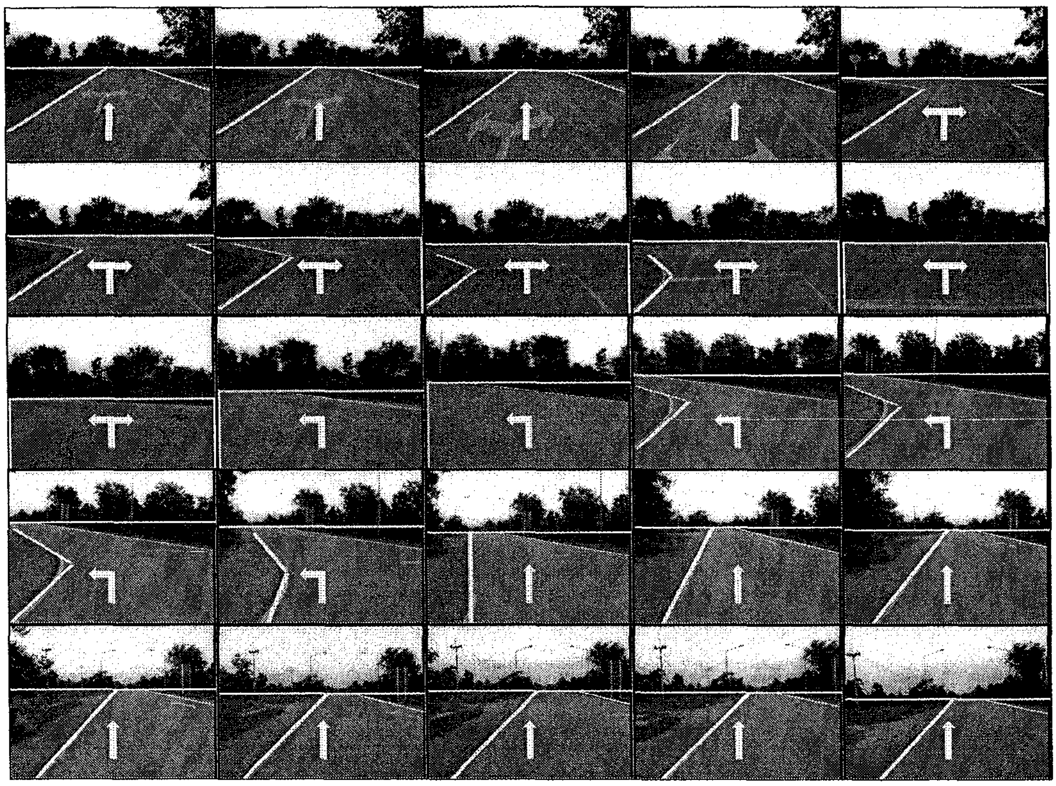
เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านแยกและเลี้ยวทางขวานั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับลดลงไม่มากนัก โดยยังมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ 88.8 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยผ่านสามแยกและเลี้ยวทางขวา

กลุ่มที่ 3 ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางซ้าย ในขั้นตอนการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถทีละ 10 เฟรมจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 5.7 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้จะเป็นการตรวจจับเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจจับช่องทางเดินรถให้ครอบคลุมยิ่งขึ้น โดยในเฟรมที่ 10 จะเป็นการแสดงการตรวจจับช่องทางเดินขณะยังอยู่ในทางตรง จากนั้นเมื่อเริ่มเข้าสู่เฟรมที่ 50 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมาเป็นสามแยกตัว T และดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงเฟรมที่ 110 ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากการตรวจจับแบบไม่เกิดการเลี้ยวมาเป็นการตรวจจับแบบเกิดการเลี้ยว โดยจะเริ่มตรวจจับได้ในเฟรมที่ 120 จากนั้นระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถขณะเกิดการเลี้ยวก็ยังสามารถตรวจจับช่องทางเดินรถไว้ได้จนกระทั่งถึงเฟรมที่ 180 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเริ่มเปลี่ยนมาเป็นทางตรงจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบมาเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อ

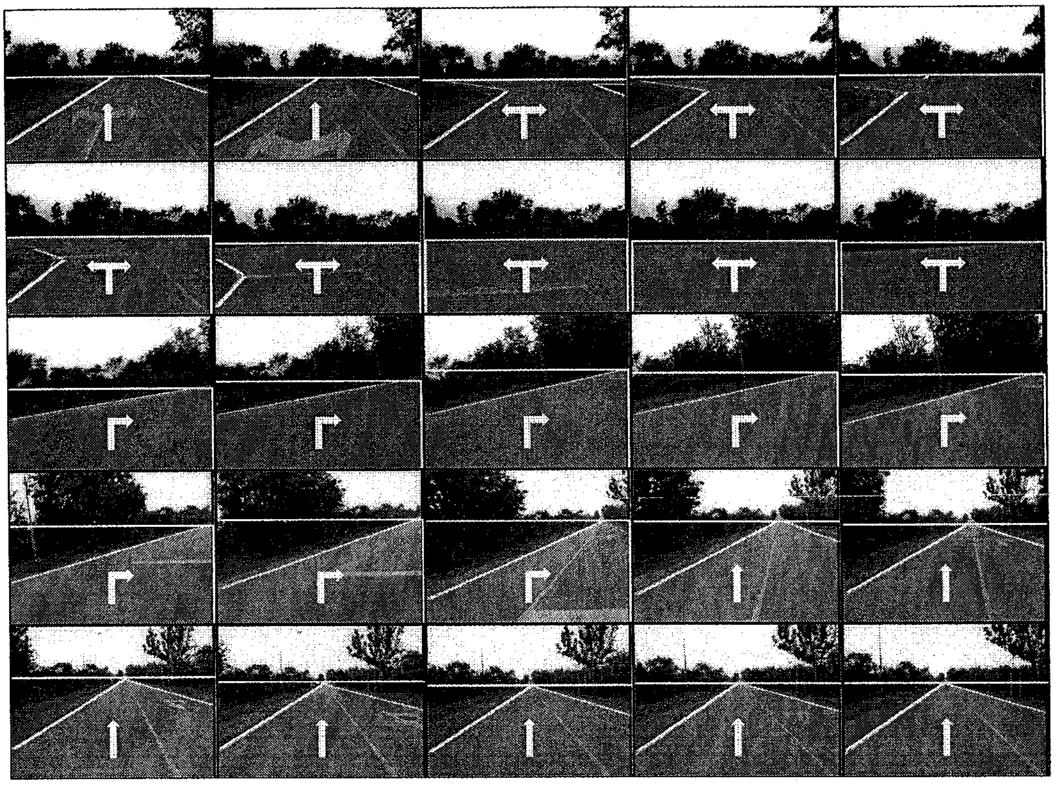
ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านแยกตัว T และเลี้ยวทางซ้ายนั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับลดลงไม่มากนัก โดยยังมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ 87.2 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางซ้าย

กลุ่มที่ 4 ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางขวา ในขั้นตอนการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถทีละ 10 เฟรมจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 5.8 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้จะเป็นการตรวจจับเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจจับช่องทางเดินรถให้ครอบคลุมยิ่งขึ้น โดยในเฟรมที่ 10 จะเป็นการแสดงการตรวจจับช่องทางเดินขณะยังอยู่ในทางตรง จากนั้นเมื่อเริ่มเข้าสู่เฟรมที่ 30 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมาเป็นสามแยกตัว T และดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงเฟรมที่ 100 ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากการตรวจจับแบบไม่เกิดการเลี้ยวมาเป็นการตรวจจับแบบเกิดการเลี้ยว โดยจะเริ่มตรวจจับได้ในเฟรมที่ 110 จากนั้นระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถขณะเกิดการเลี้ยวก็ยังสามารถตรวจจับช่องทางเดินรถไว้ได้จนกระทั่งถึงเฟรมที่ 180 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเริ่มเปลี่ยนมาเป็นทางตรงจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบมาเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อ

ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านแยกตัว T และเลี้ยวทางขวานั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับลดลงไม่มากนัก โดยยังมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ 85.4 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.8 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางขวา

ตารางที่ 5.2 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการตามรอยช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยวภายใต้สภาพแวดล้อมปกติของทั้ง 4 กรณี

ชนิดภาพ	ข้อมูลภาพชุดที่	จำนวนเฟรมถูกต้อง	จำนวนเฟรมผิดพลาด	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง
สามแยกและเลี้ยวซ้าย	1	213	37	85.2
	2	218	32	87.2
	3	215	35	86.0
	4	228	22	91.2
	5	220	30	88.0
สามแยกและเลี้ยวขวา	1	218	32	87.2
	2	212	38	84.8
	3	210	40	84.0
	4	222	28	88.8
	5	215	35	86.0
สามแยกตัว T และเลี้ยวซ้าย	1	208	42	87.2
	2	202	48	80.8
	3	209	41	83.2
	4	202	48	80.2
	5	205	45	82.0
สามแยกตัว T และเลี้ยวขวา	1	210	40	84.0
	2	206	46	82.5
	3	200	50	80.0
	4	213	37	85.2
	5	201	49	80.4

ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาพแวดล้อมต่างๆ โดยพิจารณาถึงสภาวะแวดล้อมที่เป็นสาเหตุให้การตรวจจับช่องทางเดินรถเกิดความผิดพลาดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นสภาวะแวดล้อมที่มีแสงเงาไม่ปกติ สภาพถนนไม่ชัดเจน มีการบดบังกีดขวางของวัตถุ เป็นต้น โดยประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถในการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

ตัวอย่างสภาพแวดล้อม	จำนวนเฟรมทั้งหมด	จำนวนเฟรมที่ถูกต้อง	จำนวนเฟรมที่ผิดพลาด	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง
1	1,050	961	89	91.52
2	1,350	1,248	102	92.44
3	500	471	29	94.20
4	700	675	25	96.42
5	450	402	48	89.33
6	700	655	45	93.57
7	900	865	35	96.11
8	800	770	30	96.25

จากการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ได้นำเสนอมาในหัวข้อข้างต้น ซึ่งเป็นการทดสอบในกรณีของการตรววจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว การตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยวและการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ตามลำดับ โดยการทดสอบการตรวจับช่องทางเดินรถที่ผ่านมาทั้งหมดสามารถสรุปถึงสาเหตุของความผิดพลาดในการตรวจจับช่องทางเดินรถได้ 7 สาเหตุด้วยกันดังนี้

1. เส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาถึงความไม่ต่อเนื่องของเส้นขอบถนนพบว่าความไม่ต่อเนื่องของเส้นขอบนี้เป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ ซึ่งถ้าเส้นขอบถนนมีความไม่ต่อเนื่องสูงแล้วการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น นั่นก็คือผลของการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถที่ได้อาจจะเป็นทางตรงหรือทางแยกก็ได้ขึ้นอยู่กับว่าความไม่ต่อเนื่องของเส้นขอบถนนสูงมากแค่ไหน

2. ระยะห่างระหว่างยานพาหนะกับบริเวณทางแยก ระยะห่างที่จะกล่าวถึงนี้เป็นตัวกำหนดปริมาณของข้อมูลภาพที่ใช้ในการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ ระยะห่างระหว่างยานพาหนะกับบริเวณทางแยกระยะที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการจำแนกประเภทอยู่ที่ประมาณ 10 เมตร

3. เส้นขอบฟ้าเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในอันดับเริ่มแรกของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ ถ้าหากการหาเส้นขอบฟ้ามีความผิดพลาดแล้วจะทำให้โครงสร้างถนนที่ได้ไม่ถูกต้องซึ่งจะทำให้ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถมีความถูกต้องน้อยลง

4. เส้นขอบถนนเป็นเส้นประสำหรับในสาเหตุนี้จะมีส่วนคล้ายคลึงกันกับลักษณะของเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่องจะแตกต่างกันตรงที่เส้นขอบถนนเป็นเส้นประนี้จะให้ความไม่ต่อเนื่องของเส้นขอบถนนแบบสม่ำเสมอมากกว่าสาเหตุแรก ซึ่งจะทำให้การพิจารณาการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถได้ง่ายมากกว่า

5. เงาที่พาดผ่านช่องทางเดินรถเงาที่เกิดขึ้นในช่องทางเดินรถมีผลทำให้ข้อมูลของภาพขอบมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยในแต่ละส่วนของกระบวนการการตรวจจับช่องทางเดินรถจำเป็นต้องพิจารณาให้ครอบคลุมถึงการมีเงาที่พาดผ่านช่องทางเดินไว้ด้วย เริ่มตั้งแต่การหาเส้นขอบฟ้า การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ และการติดตามช่องทางเดินรถ

6. สิ่งกีดขวางบดบังเส้นขอบถนน ซึ่งสิ่งกีดขวางที่ว่านี้มีหลายอย่างด้วยกัน อาทิเช่น รถยนต์ รถจักรยานยนต์และคนเดินถนนเป็นต้น โดยแต่ละอย่างมีผลทำให้ข้อมูลของขอบภาพมีความซับซ้อนมากเป็นผลให้การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถมีความผิดพลาด โดยเฉพาะเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่มาถึงบริเวณที่เป็นทางแยกของช่องทางเดินรถ ซึ่งถ้าในขณะนั้นมีสิ่งกีดขวางบดบังบริเวณทางแยกมากเท่าไหร่ก็จะทำให้การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถมีความผิดพลาดมากขึ้นเท่านั้น

7. ความกว้างของช่องทางเดินรถนี้เป็นผลทำให้ข้อมูลภาพที่ใช้เป็นตัวกำหนดโครงสร้างถนนมีความชัดเจนไม่เท่ากัน ยิ่งถ้าช่องทางเดินรถมีความกว้างมากแค่ไหนความชัดเจนของเส้นขอบถนนก็จะลดลงตามไปด้วย เนื่องจากกล้องที่ใช้รับภาพมีขีดความสามารถที่ระยะหนึ่งเท่านั้น

5.4 สรุป

ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยวและเกิดการเลี้ยว ได้ใช้เทคนิคการหาจุดเริ่มต้นของการเกิดแยก การเทียบเคียงรูปแบบร่วมกับแบบจำลองช่องทางเดินรถและการหาค่าควรจะเป็นมากที่สุดสำหรับการหาแบบจำลองช่องทางเดินรถที่เหมาะสม ซึ่งจากผลการทดสอบระบบเห็นว่าระบบสามารถตรวจจับช่องทางเดินรถได้อย่างมีประสิทธิภาพไว้ว่าจะเป็นกรณีที่ยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยวและเกิดการเลี้ยว ซึ่งจากการใช้เทคนิคการของการหาจุดเริ่มต้นของการเกิดแยกและการเทียบเคียงรูปแบบร่วมกับแบบจำลองช่องทางเดินรถทำให้ระบบสามารถปรับเปลี่ยนลักษณะประเภทของช่องทางเดินรถที่แตกต่างกันได้ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้สามารถตรวจจับช่องทางเดินรถแม้ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้และยังไปเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่สูง นอกจากนี้ยังได้แสดงให้เห็นถึงสาเหตุที่ทำให้การตรวจจับช่องทางเดินรถเกิดความผิดพลาดอีกด้วย

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานการเคลื่อนที่ของยานพาหนะแบบอัตโนมัติ ซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสภาวะการเคลื่อนที่ยานพาหนะขณะไม่เกิดการเลี้ยวและระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสภาวะการเคลื่อนที่ยานพาหนะขณะเกิดการเลี้ยว ซึ่งการตรวจจับช่องทางเดินรถในแต่ละระบบประกอบไปด้วย การหาโครงสร้างถนน การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ และการตามรอยช่องทางเดินรถ การดำเนินงานวิจัยดังกล่าวสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ดังต่อไปนี้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้รับการรายงานไว้ในบทที่ 2 ซึ่งพบว่าการตรวจจับช่องทางเดินรถแบบเดิมไม่สามารถตรวจจับช่องทางเดินรถและจำแนกประเภทช่องทางเดินรถได้ด้วยกล้องเพียง 1 ตัว ต้องมีการนำอุปกรณ์อื่น ๆ มาเป็นตัวจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ อาทิ เช่น เซนเซอร์ เรดาห์ และ GPS เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงดำเนินการพัฒนาวิธีการตรวจจับช่องทางเดินรถแบบใหม่ขึ้น เพื่อให้สามารถตรวจจับช่องทางเดินรถและจำแนกประเภทช่องทางเดินรถด้วยกล้องเพียง 1 ตัวได้โดยอัตโนมัติ

ในบทที่ 3 แสดงรายละเอียดของการหาโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ ซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดในการเลือกใช้ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ โครงสร้างระบบประกอบไปด้วยระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสภาวะการเคลื่อนที่ยานพาหนะขณะไม่เกิดการเลี้ยวและระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสภาวะการเคลื่อนที่ยานพาหนะขณะเกิดการเลี้ยว ในการตัดสินใจเลือกทำงานในแต่ละระบบนั้นจะใช้ความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติเปรียบเทียบกับโครงสร้างถนนจริงที่เกิดขึ้นในภาพ

ในบทที่ 4 แสดงรายละเอียดโครงสร้างระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสภาวะการเคลื่อนที่ยานพาหนะขณะไม่เกิดการเลี้ยวและระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสภาวะการเคลื่อนที่ยานพาหนะขณะเกิดการเลี้ยว โครงสร้างระบบประกอบไปด้วยเทคนิคการหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว เทคนิคการหาจุดเริ่มต้นของการเกิดแยก เทคนิคการจำแนก

ประเภทช่องทางเดินรถ และเทคนิคการตามรอยช่องทางเดินรถ โดยใช้ฟังก์ชันค่าควรจะเป็นมากที่สุดในการหาแบบจำลองช่องทางเดินรถที่เหมาะสมที่สุดและในบทที่ 5 ได้แสดงผลการตรวจจับช่องทางเดินรถประเภทต่าง ๆ ได้โดยอัตโนมัติ เช่น ทางตรง สามแยก สี่แยก ในขณะยานพาหนะเลี้ยวซ้าย-ขวา อีกทั้งยังรายงานผลการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ อีกด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1. ระบบของงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถจำแนกประเภทช่องทางเดินรถในขณะที่มีเงาพาดผ่านมาก ๆ ได้ดีนัก เพราะระบบนี้ใช้เทคนิคการหาขอบภาพเป็นปัจจัยสำคัญในการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ ดังนั้นเพื่อพัฒนาระบบให้สามารถใช้งานแม้มีเงาผาดผ่านช่องทางเดินรถ ควรคิดค้นวิธีการแบบใหม่เพื่อให้สามารถแยกเงาออกจากช่องทางเดินรถได้

2. เพื่อให้ระบบสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย จำเป็นต้องทดสอบบนสภาพถนนในประเภทต่าง ๆ เพื่อให้ระบบสามารถครอบคลุมตามสภาพถนนต่าง ๆ ได้

3. ประสิทธิภาพของการตรวจจับช่องทางเดินรถสามารถปรับปรุงได้ โดยการพิจารณาปรับปรุงแก้ไขเทคนิคการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถและสาเหตุต่าง ๆ ที่มีผลทำให้เกิดความผิดพลาด ซึ่งอาจจะทำการออกแบบให้สามารถรองรับการแปรผันของสภาพถนนให้ได้มากยิ่งขึ้นและลดขนาดของเมตริกซ์พารามิเตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เวลาคำนวณของระบบรวมไปถึงการพิจารณาปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ของเงื่อนไขให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้นด้วย

บรรณานุกรม

Kastrinaki, V., Zervakis, M., and Kalaitzakis K. (2003). A survey of video processing techniques for traffic applications. Image Vision Comput. Volume 21. Pages 359–381.

Bertozzi M., Broggi A., and Cellario, M. (2002). Artificial vision in road vehicles. Proc. of the IEEE – Special Issue on Technology and Tools for Visual Perception, July. Volume 90. Pages 1258–1271.

Schaaser, L. T. and Thomas, B. T. (1992). Finding road lane boundaries for vision-guided vehicle navigation. Vision-Based Vehicle Guidance. New York: Springer-Verlag. 1992, Pages 238–254.

Jochem, T. M. and Baluja, S. (1993). A massively parallel road follower. Workshop on Computer Architectures for Machine Perception. IEEE Computer Society. 1993. Pages 2-12.

Frank, D. (1996). Road markings recognition. Proc. IEEE ICIP '96. Volume II. Lausanne. Switzerland. 1996. Pages 669–672.

Charbonnier, P., Diebolt, F., Guillard, Y., and Peyret, F. (1997). Road markings recognition using image processing. IEEE conference on Intelligent Transportation System. Pages 912-917.

Thorpe, C., Hebert, M. H., Kanada, T. and Shafer, S. A. (1988). Vision and navigation for the Carnegie-Mellon Navlab. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. Volume 10. Number 3. Pages 362–373.

Kasprzak, W., Niemann, H. and Wetzel, D. (1994). Adaptive road parameter estimation in monocular image sequences. Proc. Brit. Machine Vision Conf. 1994. Pages 691–700.

Tang, Y. L. and Kasturi, R. (1995). Runway detection in an image sequence. Proc. SPIE. Volume 2421. Pages 181–190.

Campbell, N. W. and Thomas, B. T. (1992). Lane boundary tracking for an autonomous road vehicle. Proc. Brit. Machine Vision Conf. 1992. Pages 157–166.

Kluge, K. and Lakshmanan, S. (1995). Lane boundary detection using deformable templates: Effects of image subsampling on detected lane edges. Proc. 2nd Asian Conf. Computer Vision. Singapore. Pages 329–339.

Wang, Y., Teoh, E. K. and Shen, D. (2004). Lane detection and tracking using B-snake. Image Vision Comput. Volume 22. Pages 269–280.

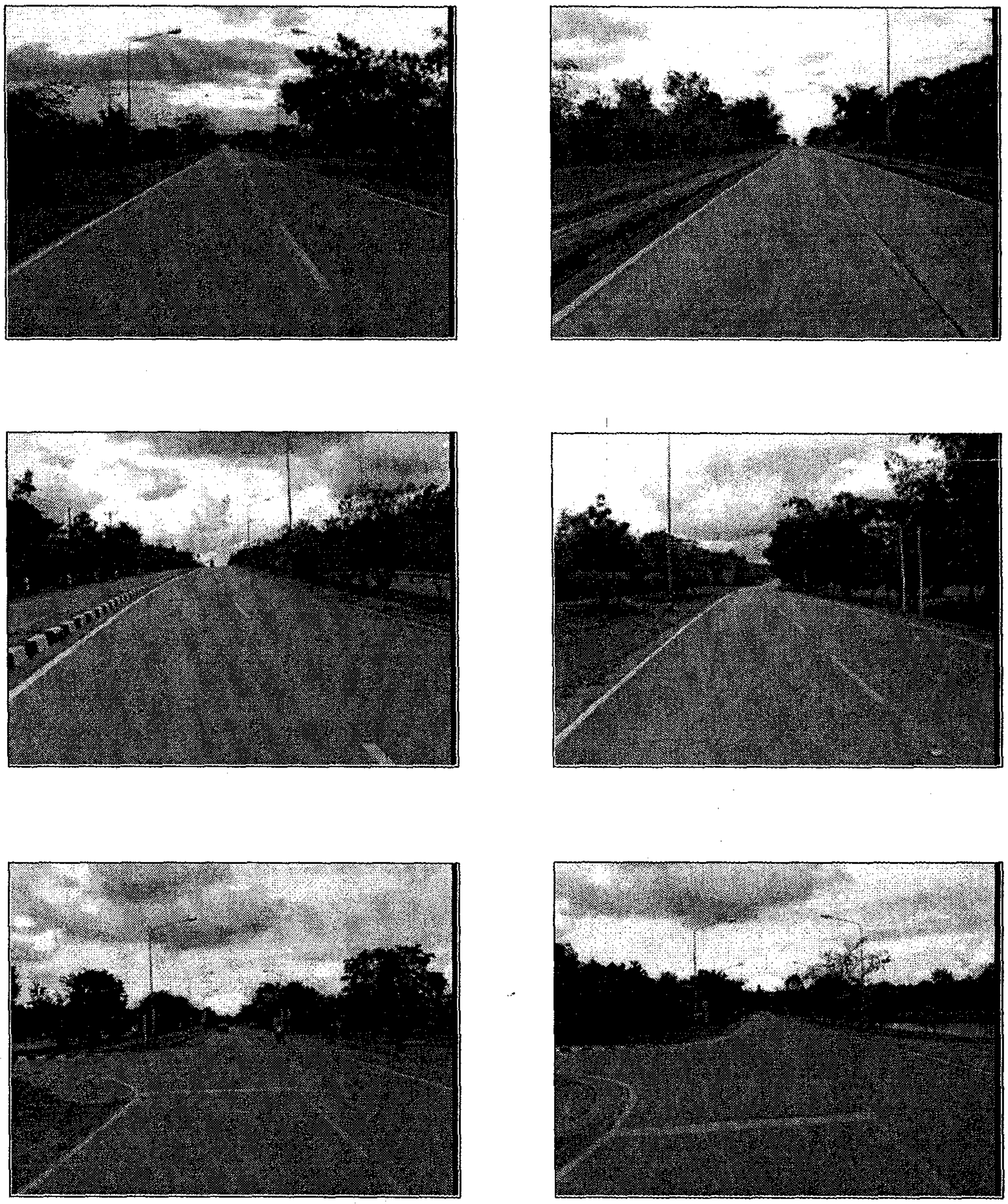
Liu, T., Zheng, N., Cheng, H. and Xing, Z. (2003). A novel approach of road recognition deformable template and genetic algorithm. Proc. Intelligent Transportation Conf. Volume 2. Pages 1251–1256.

Lakshmanan, S. and Kluge, K. (1996). LOIS: a real-time lane detection algorithm. Proc. 30th Annual Conference on Information Science and System. Princeton. NJ. March. 1996.

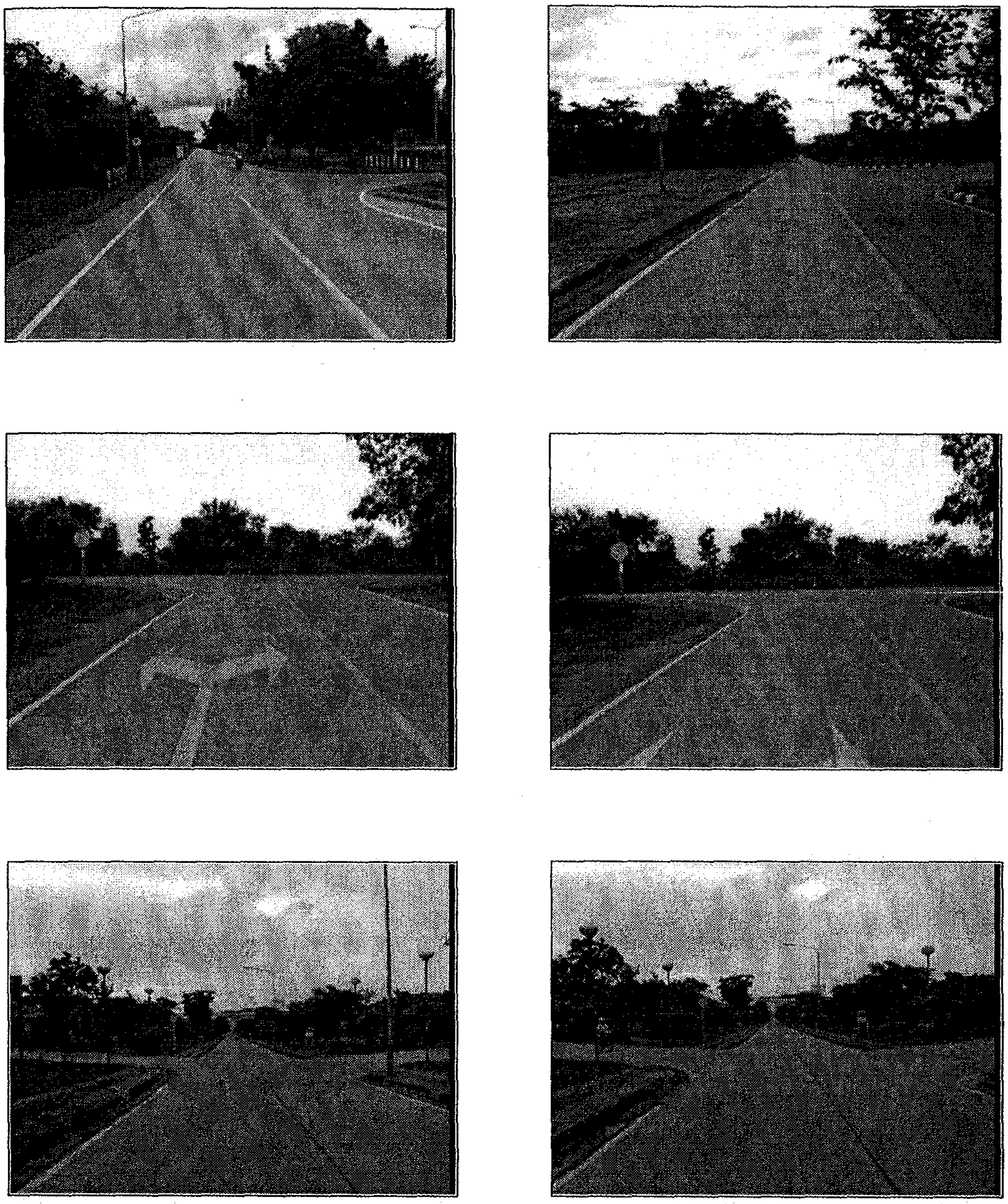
ภาคผนวก ก

ภาพรูปแบบถนนประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพรูปแบบถนนประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ ก.1 ภาพรูปแบบถนนประเภทต่าง ๆ

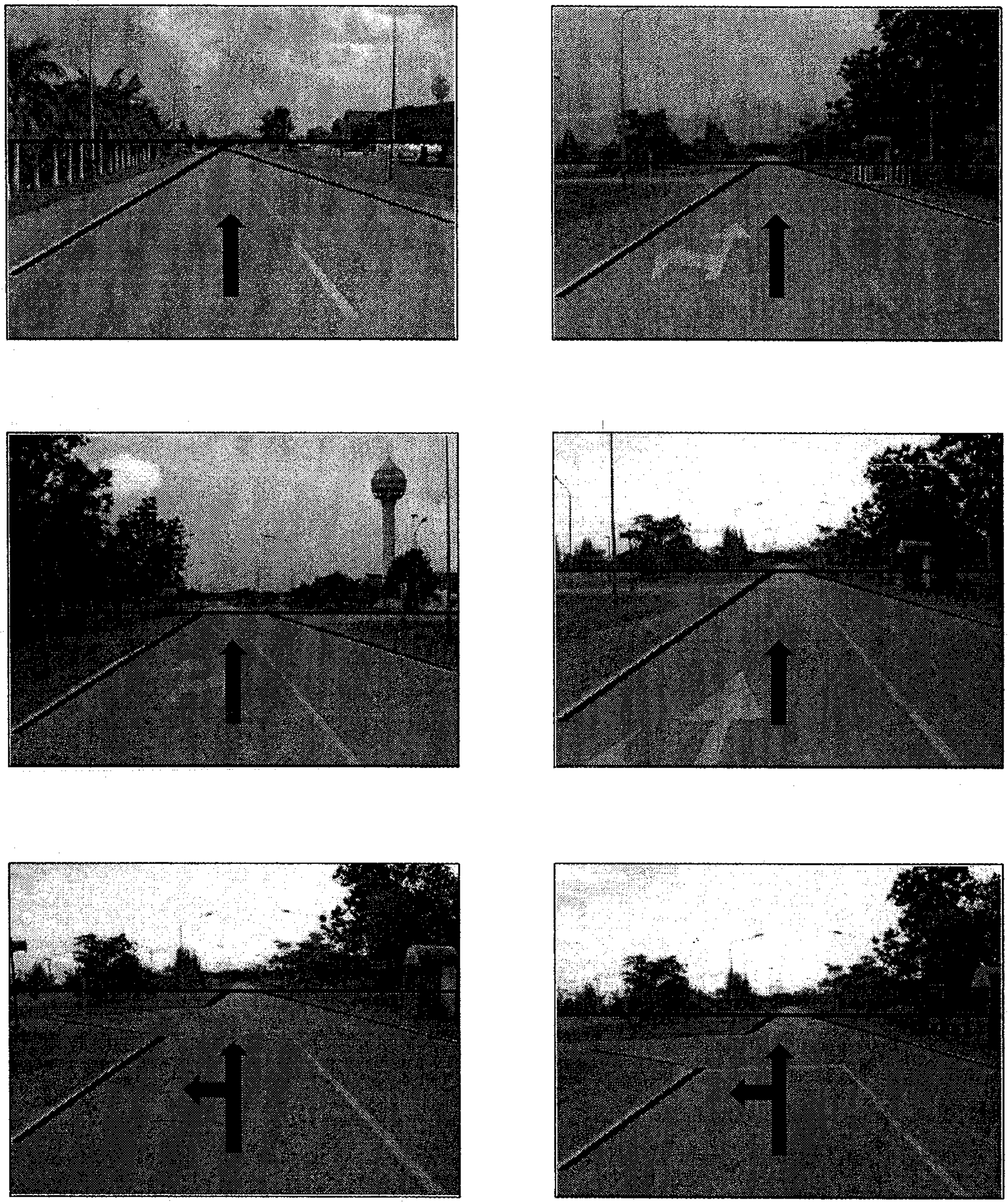


รูปที่ ก.1 ภาพรูปแบบถนนประเภทต่าง ๆ (ต่อ)

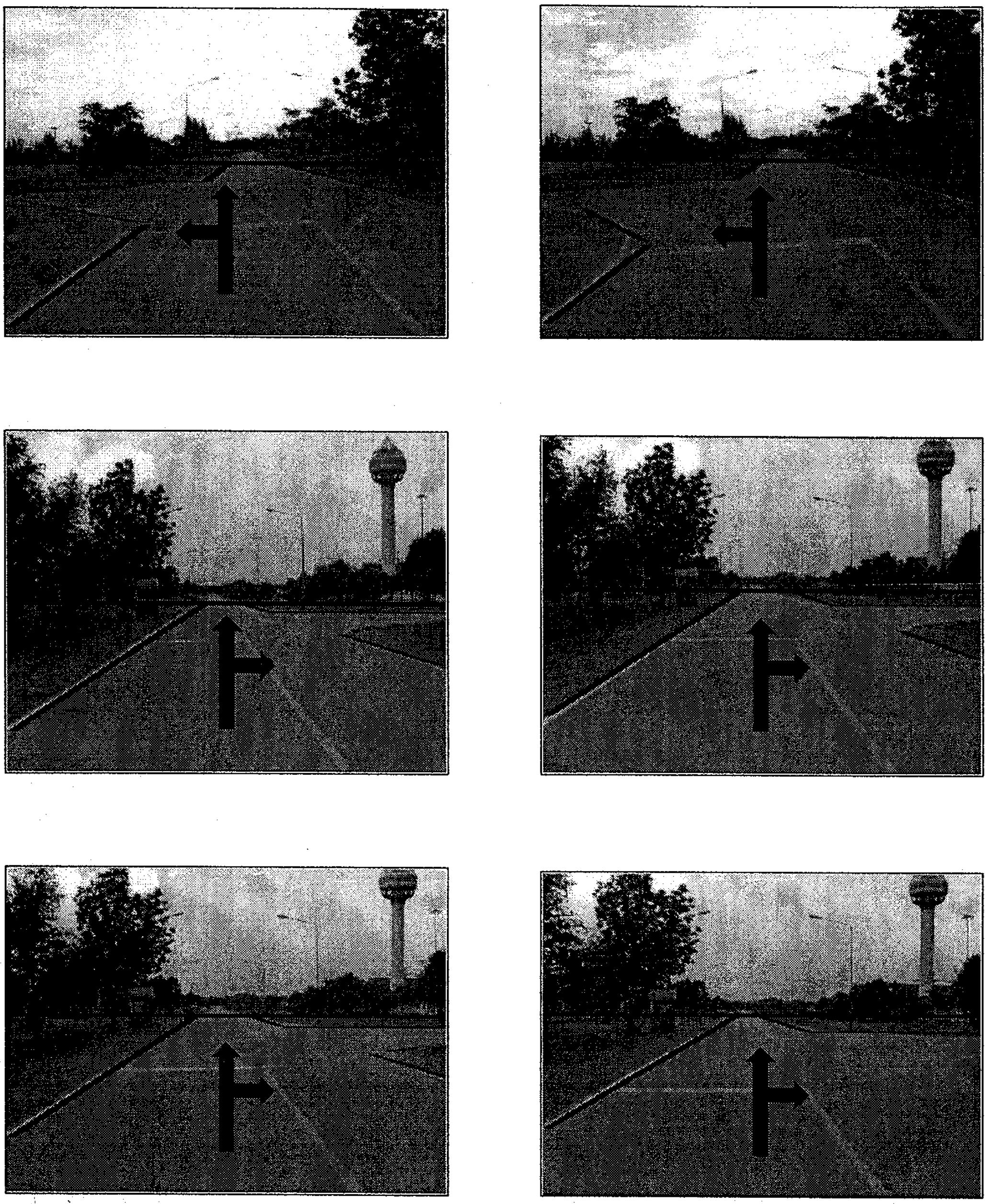
ภาคผนวก ข

ภาพผลการทดสอบระบบ

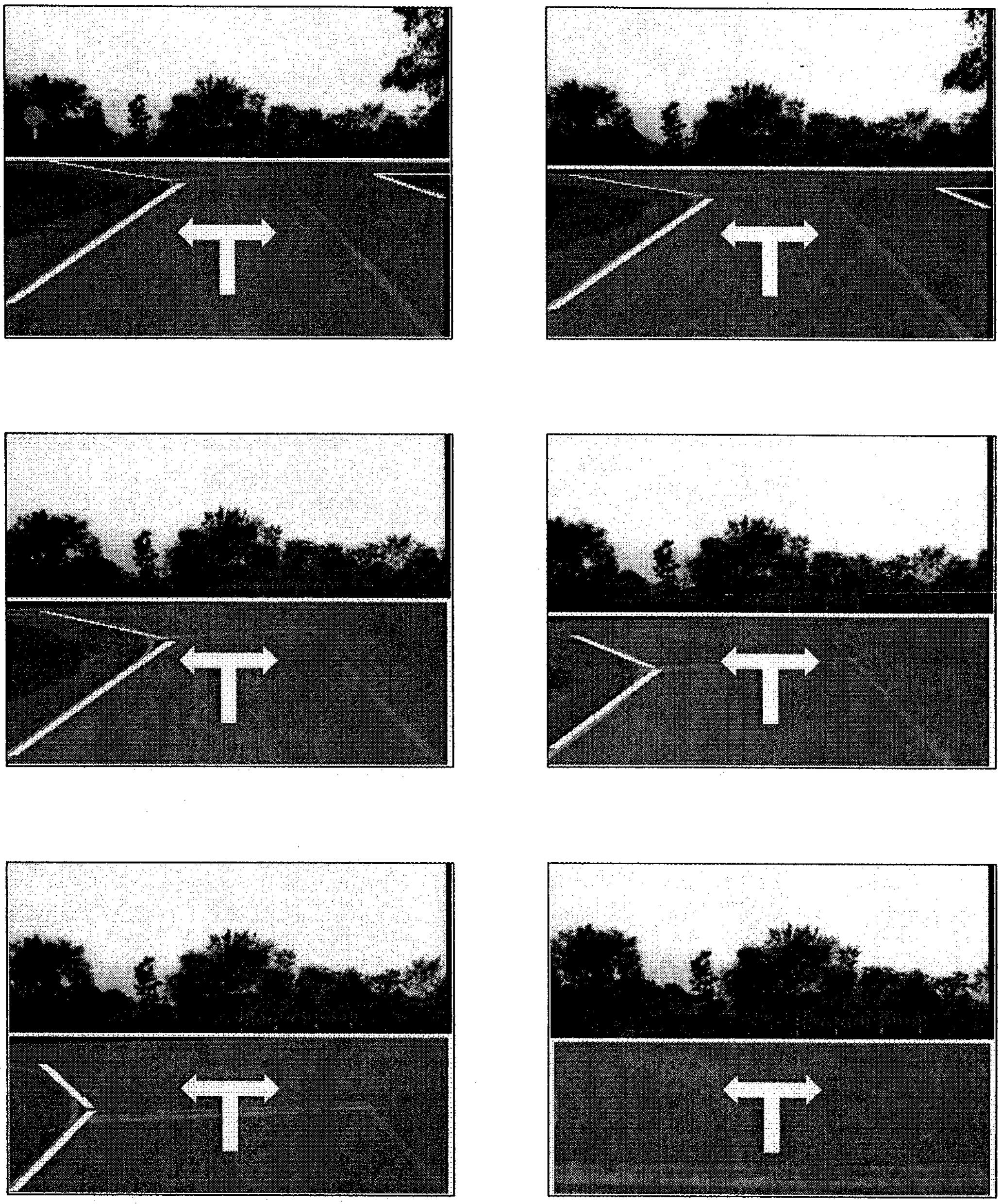
ภาพผลการทดสอบระบบ



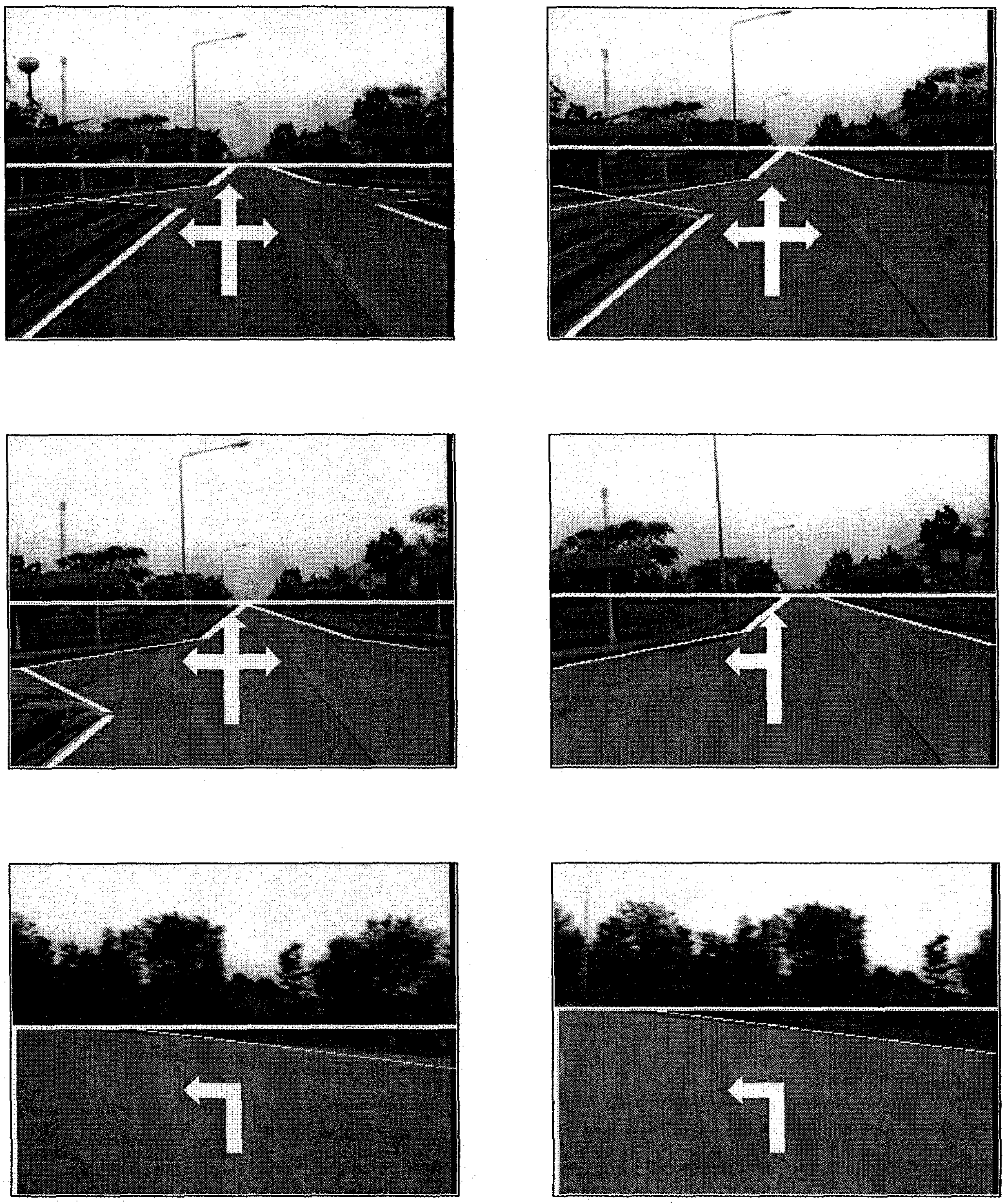
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ



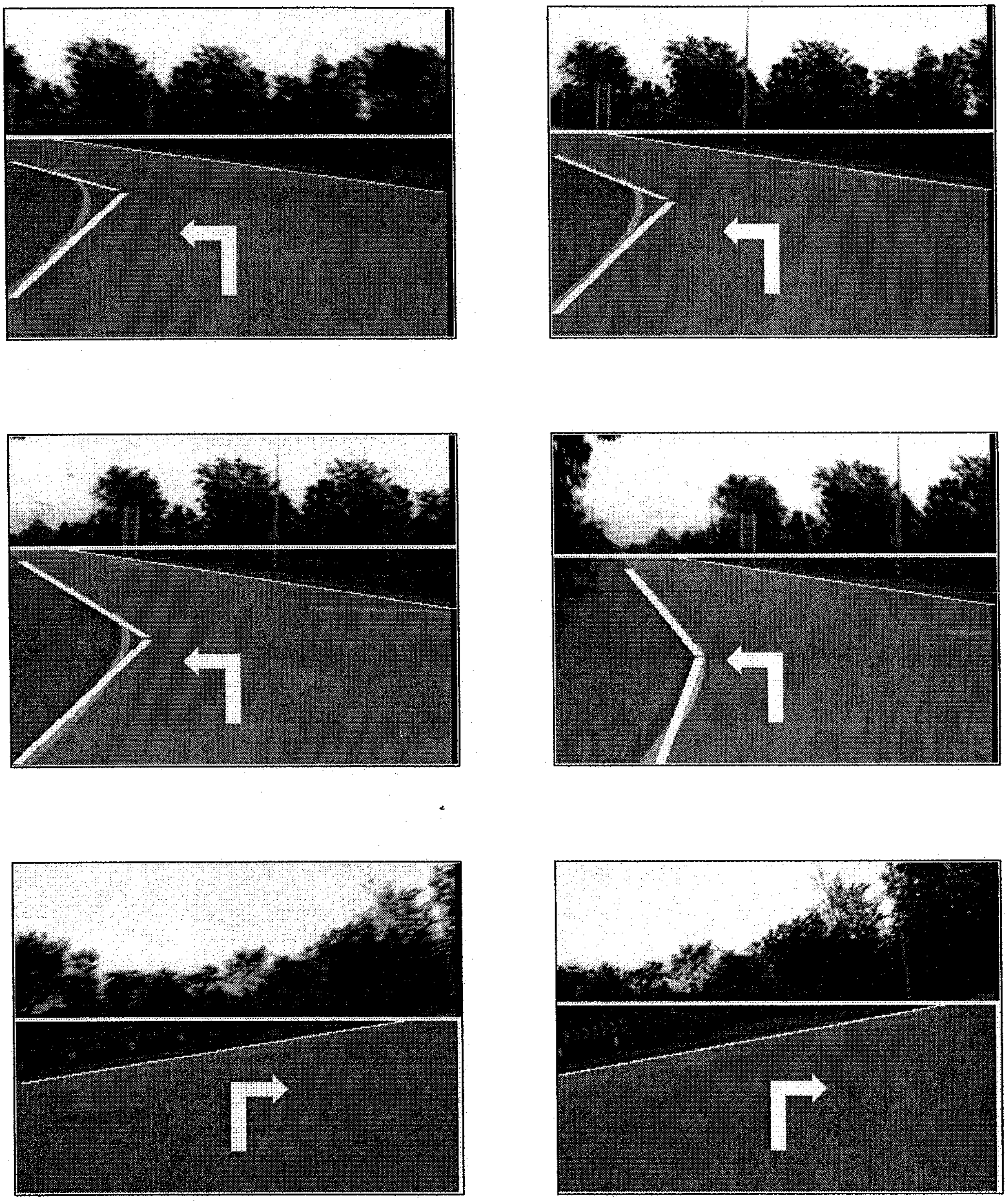
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ (ต่อ)



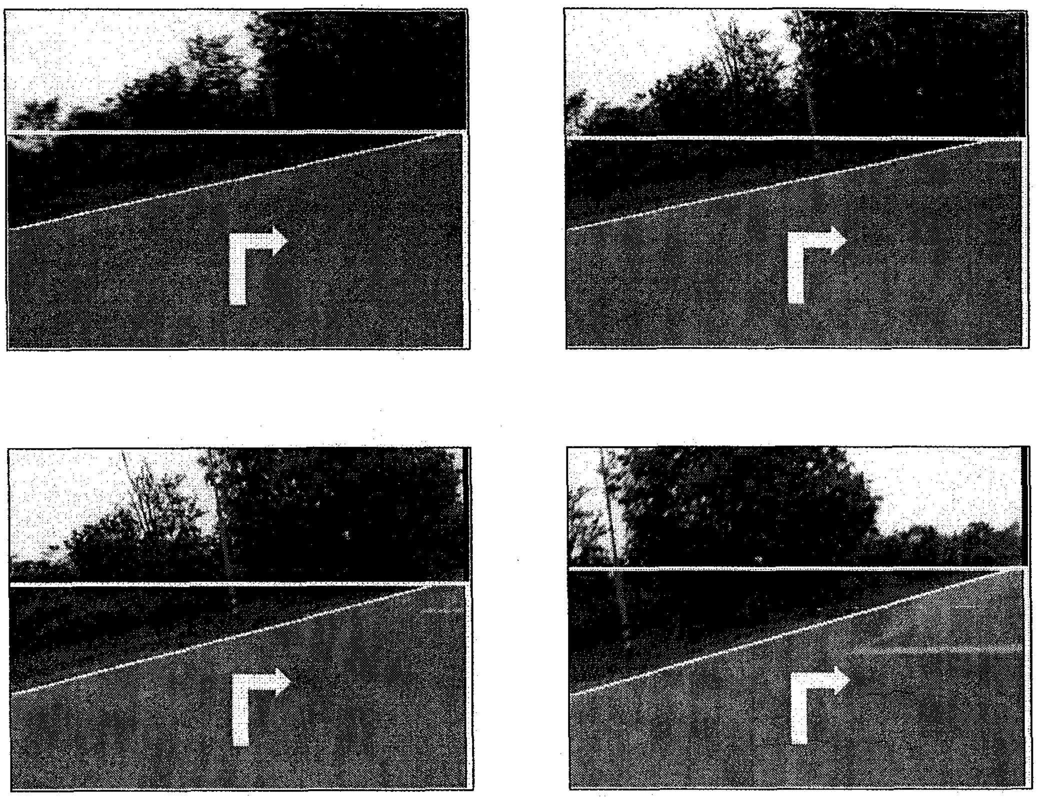
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ (ต่อ)



รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ (ต่อ)



รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ (ต่อ)



รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ (ต่อ)

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์

C. Longjard, P.Kumsawat, K.Attakitmongcol and **A. Srikaew**, "Automatic Lane Detection and Navigation using Pattern Matching Model," Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Signal, Speech and Image Processing, Beijing, China, September 15-17, (2007) 44—49

ประวัติผู้วิจัย

ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 19 พฤศจิกายน พ.ศ. 2515 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อ พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาระดับ ปริญญาโทและปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก Vanderbilt University ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อ พ.ศ. 2540 และ 2543 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรม ไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความสนใจงานวิจัยทางด้านการมองเห็นของคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ การประมวลผลภาพ และระบบทางปัญญาประดิษฐ์

นายเฉลิมพล หลงจาด เกิดเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2524 ที่เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษา ที่โรงเรียนวัดด่านสำโรง จังหวัดสมุทรปราการ ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนนครขอนแก่น จังหวัดขอนแก่นและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) และปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2545 และ 2550 ตามลำดับ มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา ดังรายชื่อที่ปรากฏในภาคผนวก ค มีความสนใจในงานทางด้านการประมวลผลสัญญาณภาพ การมองเห็นของคอมพิวเตอร์