

การตรวจจับช่องทางเดินรถและการนำวิธีแบบอัตโนมัติ
โดยใช้แบบจำลองการเทียบเคียงรูปแบบ

นายเฉลิมพล หลงจา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2550

**AUTOMATIC LANE DETECTION AND NAVIGATION
USING PATTERN MATCHING MODEL**

Chalernpol Longjard

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2007

การตรวจจับช่องทางเดินรถและการนำวิถีแบบอัตโนมัติ

โดยใช้แบบจำลองการเทียบเคียงรูปแบบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ธนัชชัย กุลวรรณพงษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วราพงษ์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เฉลิมพล หลงจาต : การตรวจจับช่องทางเดินรถและการนำวิถีแบบอัตโนมัติโดยใช้
แบบจำลองการเทียบเคียงรูปแบบ (AUTOMATIC LANE DETECTION AND
NAVIGATION USING PATTERN MATCHING MODEL)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว, 98 หน้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการตรวจจับช่องทางเดินรถและการนำวิถีแบบอัตโนมัติโดยใช้แบบจำลองการเทียบเคียงรูปแบบ โดยระบบดังกล่าวจะเป็นการผสมผสานระหว่าง การหาแบบจำลองช่องทางเดินรถ การใช้แบบจำลองเทียบเคียงรูปแบบ เทคนิคการหาจุดเริ่มต้นของการเกิดแยก การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถและการหาค่าควรจะเป็นของช่องทางเดินรถ ระบบที่นำเสนอนี้เป็นระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถโดยไม่จำเป็นต้องมีการกำหนดสถานะเริ่มต้นและสามารถทำงานในสถานะแสงสว่างที่แตกต่างกันได้ นอกจากนั้นแล้วระบบนี้ยังสามารถตรวจจับช่องทางเดินประเภทต่าง ๆ ได้ เช่น ทางตรง สามแยก และสี่แยก เป็นต้น ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบด้วยกัน คือ 1. ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว 2. ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยว ซึ่งในงานนี้ได้ใช้แบบจำลองพลาโบลามาเป็นตัวอธิบายลักษณะทางกายภาพของช่องทางเดินรถ โดยมีฟังก์ชันค่าควรจะเป็นมากที่สุดเป็นตัวกำหนดความเหมาะสมสำหรับแต่ละภาพอย่างอัตโนมัติและใช้เทคนิคการหาจุดเริ่มต้นของการเกิดแยกในการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ เทคนิคที่นำเสนอในครั้งนี้อย่างคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น สัญญาณรบกวน เงา เส้นถนนที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นต้น ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้ให้ผลการตรวจจับช่องทางเดินรถได้อย่างถูกต้องแม่นยำด้วยอัตราสูงสุดถึง 96 เปอร์เซ็นต์

CHALERMPOL LONGJARD : AUTOMATIC LANE DETECTION AND
NAVIGATION USING PATTERN MACTHING MODEL. THESIS

ADVISOR : ASST. PROF. ARTHIT SRIKAEW, Ph.D., 98 PP.

PATTERN MATCHING MODEL/LANE DETECTION/LANE CLASSIFICATION/
AUTOMATIC NAVIGATION

This thesis 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.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2007

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชัย สุจิตจร รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณคุณอัญชลี รักด่านกลาง คุณภัทราวรรณ สิทธิกวินกุล และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของข้าพเจ้า

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อสุพจน์ คุณแม่ภรรณิกา พี่บอย พี่เจี๊ยบ รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด และขอขอบคุณคุณกวีรัตน์ เปี้ยท่งน้อย ที่ได้ให้ความรัก ดูแล ห่วงใย ให้ความช่วยเหลือและความเสียสละทุกอย่าง รวมทั้งเป็นกำลังใจในยามที่ผู้วิจัยท้อและทุกข์ใจช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

เฉลิมพล หลงจา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 กล่าวนำ	3
2.1.1 การใช้ระบบการมองเห็นในการช่วยขับเคลื่อนพาหนะ.....	3
2.1.2 การใช้ระบบการมองเห็นในรถอัตโนมัติ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2.1 การออกแบบระบบการมองเห็น	4
2.2.2 การตรวจจับช่องทางเดินรถ.....	14
2.3 แนวทางการออกแบบระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ.....	19
2.3.1 ข้อจำกัดของสิ่งแวดล้อม.....	19
2.3.2 การเลือกใช้กล้องและปัญหาในขั้นตอนการประมวลผล.....	22
2.4 สรุป.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การหาโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ.....	24
3.1	กล่าวนำ.....	24
3.2	สมมติฐานเบื้องต้น.....	24
3.3	โครงสร้างถนนแบบในอุดมคติ.....	25
3.3.1	การหาเส้นขอบฟ้า.....	25
3.3.2	การหาเส้นแนวเฉียงหรือเส้นช่องทางเดินรถ.....	29
3.4	โครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ.....	31
3.5	สรุป.....	41
4	ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ.....	42
4.1	กล่าวนำ.....	42
4.2	การทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ.....	42
4.3	แบบจำลองช่องทางเดินรถ.....	44
4.4	ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ.....	48
4.4.1	โครงสร้างถนน.....	48
4.4.2	การกำหนดประเภทช่องทางเดินรถ.....	50
4.4.3	การตามรอยช่องทางเดินรถ.....	56
4.5	ผลการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถ.....	57
4.5.1	การตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว.....	57
4.5.2	การตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยว.....	63
4.5.3	การตรวจจับช่องทางเดินรถภายใต้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ.....	68
4.6	สรุป.....	81
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	82
5.1	สรุป	82
5.2	ข้อเสนอแนะ	83

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง	84
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ภาพรูปแบบถนนประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ.....	86
ภาคผนวก ข. ภาพผลการทดสอบระบบ	89
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา	96
ประวัติผู้เขียน	98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การกำหนดทิศทางความชันทั้ง 4 แคน.....17
3.1	ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าและไม่เกิดการเลี้ยว.....34
3.2	ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าและเกิดการเลี้ยวซ้าย.....34
3.3	ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าและเกิดการเลี้ยวขวา.....34
4.1	การแบ่งประเภทช่องทางเดินรถ.....54
4.2	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ บริเวณทางแยกของช่องทางเดินรถที่ระยะต่าง ๆ จำนวน 125 ภาพ ในสภาวะสภาพแวดล้อมปกติ.....55
4.3	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการตามรอยช่องทางเดินรถ ในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่เกิดการเลี้ยว ภายใต้สภาพแวดล้อมปกติของทั้ง 4 กรณี.....62
4.4	เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการตามรอยช่องทางเดินรถ ในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยว ภายใต้สภาพแวดล้อมปกติของทั้ง 4 กรณี.....67
4.5	ประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ.....79

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะทางเรขาคณิตของกล้องสองตาในสามมิติ.....7
2.2	การวางกล้องทั้งสองให้เกิดการตัดกันของแกนที่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น.....9
2.3	การตามรอยในแนวแกน Z.....10
2.4	การตามรอยศูนย์กลางของวัตถุด้วยมุมก้มเงย.....11
2.5	ภาพของถนนและยานพาหนะอื่น ๆ ซึ่งถือเป็นสิ่งกีดขวาง ในการเคลื่อนที่เป็นภาพแบบกล้องตาเดียวซึ่งได้จากกล้องที่ติดตั้งบนรถ.....12
2.6	การตั้งใบ้อิสของตัวกรอง steerable ในทิศทางต่าง ๆ.....18
3.1	โครงสร้างถนนภายใต้สมมุติฐานเบื้องต้น.....25
3.2	ตัวอย่างการแยกองค์ประกอบถนน.....26
3.3	เส้นขอบฟ้าเก่า.....28
3.4	เส้นขอบฟ้าใหม่.....28
3.5	ภาพต้นแบบ.....29
3.6	เส้นขอบฟ้าในขณะไม่เกิดการเลี้ยว.....29
3.7	เส้นขอบฟ้าในขณะเลี้ยวซ้าย.....29
3.8	เส้นขอบฟ้าในขณะเลี้ยวขวา.....29
3.9	การหาเส้นแนวเฉียงหรือเส้นช่องทางเดินรถ.....30
3.10	การเคลื่อนที่ของยานพาหนะในประเทศทางเอเชีย (ประเทศไทย)31
3.11	การเคลื่อนที่ของยานพาหนะในประเทศทางยุโรป (อเมริกา).....31
3.12	โครงสร้างถนนในมุมมองของยานพาหนะทางเอเชีย (ประเทศไทย)32
3.13	โครงสร้างถนนในมุมมองของยานพาหนะทางยุโรป (อเมริกา)32
3.14	ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา.....35
3.15	ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา.....36
3.16	ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา.....37
3.17	ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา.....39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	แผนผังสรุปการทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ.....43
4.2	มุมมองทางด้านบน.....45
4.3	มุมมองทางด้านข้าง.....45
4.4	$K = 0$ ถึง -600 , $B = -0.1$ และ $M = 200$47
4.5	$K = 0$ ถึง 600 , $B = 0.1$ และ $M = 250$47
4.6	$K = 0$, $B = -0.5$ ถึง -5.0 และ $M = 225$47
4.7	$K = 0$, $B = 0.5$ ถึง 5.0 และ $M = 225$47
4.8	$K = 0$, $B = -0.5$ และ $M = 1$ ถึง 22548
4.9	$K = 0$, $B = 0.5$ และ $M = 200$ ถึง 45048
4.10	โครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว.....49
4.11	โครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวซ้าย.....50
4.12	โครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวขวา.....50
4.13	โครงสร้างการแบ่งส่วนของข้อมูลภาพ.....51
4.14	ภาพต้นแบบ.....53
4.15	ผลรวมข้อมูลภาพส่วนทางด้านซ้าย.....53
4.16	ผลรวมข้อมูลภาพส่วนทางด้านขวา.....53
4.17	จุดเริ่มต้นของการเกิดแยกของถนน.....54
4.18	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกใด ๆ.....58
4.19	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางซ้าย.....59
4.20	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางขวา.....60
4.21	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างโดยผ่านแยกทางซ้ายและขวา.....61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านสามแยกและเลี้ยวทางซ้าย.....63
4.23	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านสามแยกและเลี้ยวทางขวา.....64
4.24	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางซ้าย.....65
4.25	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางขวา.....66
4.26	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะบังคับเส้นขอบถนน.....68
4.27	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง.....69
4.28	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนเป็นเส้นประ.....69
4.29	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อช่องทางเดินรถมีแยกทางซ้าย.....69
4.30	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อช่องทางเดินรถมีแยกทางขวา.....70
4.31	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมียานพาหนะบังคับเส้นขอบถนน.....70
4.32	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนเป็นเส้นประ.....71
4.33	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง.....71
4.34	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางซ้าย.....71
4.35	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางขวา.....72
4.36	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง.....72
4.37	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง.....73
4.38	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางขวา.....73
4.39	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อแอ่งน้ำทางซ้าย.....74
4.40	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อแอ่งน้ำทางขวา.....74
4.41	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีเงาผาดผ่านช่องทางเดินรถ.....74
4.42	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมียานพาหนะบังคับช่องทางเดินรถ.....75
4.43	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางซ้าย.....75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.44	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง.....76
4.45	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางขวา.....76
4.46	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมียานพาหนะบดบังช่องทางเดินรถ.....76
4.47	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมียานพาหนะบดบังช่องทางเดินรถ.....77
4.48	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางขวา.....77
4.49	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมียานพาหนะบดบังช่องทางเดินรถ.....78
4.50	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีเส้นขอบถนนเป็นเส้นประ.....78
4.51	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางซ้าย.....78
4.52	ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางขวา.....79
ก.1	ภาพรูปแบบถนนประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ.....87
ข.1	ผลการทดสอบระบบ90

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

P	=	ตำแหน่งของจุดภาพแต่ละจุดเมื่อวัดจากจุดศูนย์กลางของระนาบภาพ
$\bar{P}$	=	ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของระนาบภาพถึงจุดศูนย์กลางของภาพวัตถุ
$I(i,j)$	=	ค่าความเข้มที่จุด (i,j)
$D(i)$	=	ปริมาณค่าของเส้นขอบฟ้าบนองค์ประกอบต้นไม้อแถวที่ i
$T(i,j)$	=	องค์ประกอบต้นไม้อมีค่า 0, 1
c	=	คอนสแตนต์ของภาพ
r	=	แถวของภาพ
K	=	สัดส่วนความโค้ง
B	=	สัดส่วนทิศทาง
M	=	สัดส่วนขนาด
k	=	ตัวกำหนดความโค้ง
m	=	ตัวกำหนดทิศทาง
b	=	ตัวขนาด
f	=	ความยาวโฟกัส
h	=	ความสูงของกล้องเทียบกับพื้นดิน
d	=	ระยะของจุดในระนาบภาพ
F_1	=	ผลรวมข้อมูลโครงสร้างถนนทางด้านซ้ายของภาพแถวที่ i_1
F_2	=	ผลรวมข้อมูลโครงสร้างถนนทางด้านขวาของภาพแถวที่ i_2
$B(i,j)$	=	ขอบภาพมีค่า 0,1
v	=	เส้นขอบฟ้า
$n_{L,R}$	=	จำนวนของเมตริกซ์พารามิเตอร์ซ้ายและขวา

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันได้มีการนำเอาระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถมาประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะทางด้านการเตือนภัยและดูแลความปลอดภัยระบบการขับขี่ยานพาหนะ อาทิเช่น ระบบการเตือนเมื่อรถมีแนวโน้มที่จะออกจากเลนถนน (lane departure detection) ระบบการเตือนเมื่อมีสัญญาณไฟจราจรหรือสัญญาณจราจร ระบบการเตือนเมื่ออยู่ในสถานการณ์ที่อาจเกิดการชนกัน เป็นต้น ในประเทศไทยเองยังคงมีการใช้งานที่กำลังจัดเนื่องจากงานวิจัยทางด้านนี้มีน้อยและไม่สามารถนำงานวิจัยของต่างชาติมาใช้ได้โดยตรง เนื่องจากลักษณะสภาพถนนที่แตกต่างกันในด้านประเภทถนน ขนาดถนน และในแต่ละประเทศลักษณะของถนนยังมีความแตกต่างกันไป สำหรับการตรวจจับช่องทางเดินรถภายนอกอาคารนั้นจำเป็นต้องรู้สภาพแวดล้อมรอบยานพาหนะที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา เพื่อให้ระบบสามารถแยกแยะการทำงานของยานพาหนะว่าขณะนี้ยานพาหนะควรจะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าหรือเลี้ยวซ้าย-ขวา โดยที่ยังคงรักษาเส้นทางการเคลื่อนที่ให้อยู่ในทิศทางและองศาตรงบริเวณกึ่งกลางของช่องทางเดินรถไว้ได้

ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนด้วยกันกล่าวคือ ส่วนที่ 1 การหาโครงสร้างถนน (road structure) เป็นการหาโครงสร้างและขอบเขตที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาประเภทของช่องทางเดินรถในขั้นต่อไป ส่วนที่ 2 การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ (lane classify) เป็นการแยกแยะประเภทช่องทางเดินรถเพื่อให้เหมาะกับแบบจำลองที่นำมาใช้ในการอธิบายลักษณะของช่องทางเดินรถ ส่วนที่ 3 การตามรอย (tracking) เป็นการติดตามตำแหน่งช่องทางเดินรถภายในภาพวิดีโออินพุต ในการตรวจจับช่องทางเดินรถจากภาพวิดีโออินพุตนี้จำเป็นต้องรวมเอาทั้ง 3 ส่วนเข้าด้วยกันไม่สามารถขาดส่วนใดส่วนหนึ่งได้ โดยระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้ได้มีการเสนอวิธีการและเทคนิคต่าง ๆ อย่างมากมายซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับงานวิจัยที่นำเสนอขึ้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของโครงสร้างการตรวจจับช่องทางเดินรถจากภาพแบบใหม่ ซึ่งสามารถทำการตรวจจับช่องทางเดินรถจากภาพสีได้ โดยระบบดังกล่าวสามารถปรับตัวเองได้อัตโนมัติไม่จำเป็นต้องมีการกำหนดสถานะเริ่มต้น สามารถตรวจจับช่องทางเดินรถในลักษณะแยกต่าง ๆ ได้ และมีลักษณะปรับตัวแบบเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมได้โดยอัตโนมัติ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมในการระบุช่องทางเดินรถ

1.2.2 เพื่อออกแบบและพัฒนากระบวนการนำทางภายนอกอาคารแบบอัตโนมัติ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 เป็นการจำลองสถานการณ์ของระบบนำทางของยานพาหนะแบบอัตโนมัติบนคอมพิวเตอร์

1.3.2 กล้องที่ใช้ในการตรวจจับช่องทางเดินรถเป็นกล้องแบบ CCD

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ช่องทางเดินรถเป็นแบบโครงสร้างสภาพแวดล้อม (structured environment) และระบบชนเมือง (rural way) โดยเป็นสภาพถนนที่อยู่ภายในหน่วยงาน มทส. เท่านั้น

1.4.2 ช่องทางเดินรถเป็นแบบประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ทางตรง ทางเลี้ยวซ้าย-ขวา สามแยกและสี่แยก ยกเว้นแบบแยกตัว Y

1.4.3 ระบบสามารถตรวจจับในกรณีที่ไม่สามารถระบุช่องทางเดินรถได้

1.4.4 สภาพถนนเป็นเพียงสภาพตอนกลางวันอย่างเดียว โดยที่ช่องทางเดินรถเป็นแบบมีเส้นขอบและไม่มีเส้นขอบถนน เส้นขอบถนนเป็นเส้นทึบและเส้นประ เส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง มีสิ่งกีดขวางบังเส้นขอบถนนและมีเงาผาดผ่านเส้นขอบถนน

1.4.5 ใช้การประมวลผลภาพจากกล้อง 1 ตัว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.6.1 เพื่อนำไปใช้เป็นระบบนำทางของการขับขี่ยานพาหนะแบบอัตโนมัติ

1.6.2 เพื่อนำไปใช้เป็นระบบเตือนภัยในการขับขี่ยานพาหนะ

1.6.3 ได้ซอฟต์แวร์แบบใหม่สำหรับการตรวจจับช่องทางเดินรถจากข้อมูลสัญญาณภาพ ซึ่งมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและมีความเร็วมากขึ้น

1.6.4 ประยุกต์ใช้ในงานด้านการเชื่อมต่อระหว่างยานพาหนะและคอมพิวเตอร์

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในการขับขี่ยานพาหนะนั้นระบบการมองเห็นของผู้ขับขี่ถือเป็นส่วนการประมวลผลข้อมูลที่สำคัญที่สุดในการตัดสินใจเพื่อการบังคับควบคุมยานพาหนะ การทำความเข้าใจเกี่ยวกับระบบการมองเห็นในมนุษย์นั้นยังเป็นปัญหาที่อยู่ในระหว่างขั้นตอนของการวิจัยระดับพื้นฐานอย่างมาก ระบบการมองเห็นของมนุษย์มีการทำงานที่ซับซ้อนและต้องอาศัยการประมวลผลเป็นสัดส่วนที่สูงเมื่อเทียบกับการประมวลผลต่อการตอบสนองทางประสาทในด้านอื่น ๆ ในการขับขี่ยานพาหนะนั้นระบบการมองเห็นนับว่าเป็นปัญหาทางงานวิจัยที่เปิดกว้างเป็นอย่างมากเนื่องจากระบบที่จะทำงานได้จริงต้องมีความทนทานต่อความเปลี่ยนแปลงสูง มีการประมวลผลที่รวดเร็วและแม่นยำ รวมทั้งต้องมีการวิเคราะห์เชิงปัญญาประดิษฐ์เพื่อที่จะสร้างผลตอบสนองที่เหมาะสมกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างปลอดภัยและเป็นธรรมชาติ

การประยุกต์ใช้ของงานวิจัยทางด้านระบบการมองเห็นในยานพาหนะนั้นสามารถแบ่งเป็นสองแนวทางด้วยกันกล่าวคือ

2.1.1 การใช้ระบบการมองเห็นในการช่วยขับขี่ยานพาหนะ

ระบบการมองเห็นในการช่วยการขับขี่ยานพาหนะนั้นเป็นระบบที่ทำหน้าที่ช่วยผู้ขับขี่ยานพาหนะเพื่อเพิ่มความปลอดภัย ความสะดวกสบาย และเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการการจราจรอย่างเป็นระบบ การใช้ระบบการมองเห็นเพื่อช่วยในด้านความปลอดภัยนั้นประกอบไปด้วย ระบบการเตือนเมื่อรถมีแนวโน้มที่จะออกจากเลน (lane departure detection) ระบบการเตือนเมื่อมีสัญญาณไฟจราจรหรือสัญญาณจราจร และระบบการเตือนเมื่ออยู่ในสถานการณ์ที่อาจเกิดการชนกันได้ เช่น การชนบุคคลหรือรถที่อยู่ในระยะกระชั้นชิด เป็นต้น ในการเพิ่มความสะดวกสบายในการขับขี่ยานพาหนะนั้นระบบการมองเห็นสามารถทำหน้าที่รักษาระยะติดตามรถคันหน้าโดยอัตโนมัติ และแจ้งเตือนผู้ขับขี่ในกรณีที่ต้องอาศัยการตัดสินใจของผู้ขับขี่เมื่อสถานการณ์ที่ตั้งไว้มีการเปลี่ยนแปลง ระบบนี้จะมีประโยชน์ในการช่วยการขับขี่ยานพาหนะเมื่อการจราจรติดขัดหรือเมื่อเป็นการขับขี่ยานพาหนะบนทางด่วนซึ่งเป็นการขับขี่ยานพาหนะที่มีความเร็วคงที่เป็นระยะเวลานาน อีกทั้งยังเป็นระบบที่เริ่มจะแพร่หลายในการนำมาประยุกต์ใช้กับยานพาหนะแบบอัตโนมัติ

2.1.2 การใช้ระบบการมองเห็นในรถอัตโนมัติ

ในการพัฒนายานพาหนะซึ่งสามารถตัดสินใจในการเคลื่อนที่ได้ด้วยตนเองโดยปราศจากคนขับนั้น ระบบนำร่องของยานพาหนะจำเป็นจะต้องมีความสามารถพื้นฐานในการตรวจจับ แยกแยะบริเวณที่เป็นถนนซึ่งปลอดภัยสำหรับการเคลื่อนที่รวมไปถึงสิ่งกีดขวางที่อาจเป็นอันตรายต่อการเคลื่อนที่ เช่น ยานพาหนะอื่น ๆ ในถนนหรือบุคคล ระบบการรับรู้สัญญาณซึ่งเป็นที่นิยมในการตรวจจับช่องทางเดินรถ และสิ่งกีดขวางมักประกอบด้วยกล้อง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับภาพของสิ่งแวดล้อม จากนั้นจึงนำมาภาพที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อนำมาใช้ประกอบการตัดสินใจในการนำร่องสำหรับการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของยานพาหนะไว้คนขับต่อไป ระบบนำร่องแบบอัตโนมัติจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมในการตัดสินใจในด้านต่าง ๆ อันประกอบไปด้วย ระบบการป้องกันการชน (collision avoidance) ระบบการป้องกันการออกจากเส้นแบ่งทางของยานพาหนะ (lane departure avoidance) ระบบการตรวจจับสัญญาณจราจร และระบบควบคุมการขับเคลื่อน (intelligent cruise control)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การออกแบบระบบการมองเห็น

ระบบการใช้กล้องที่ใช้เทคนิคของการมองเห็นของเครื่องจักร (machine vision) ในการประมวลผลภาพแบบอัตโนมัตินั้นมักมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง สามารถใช้ได้ในการตรวจจับช่องทางเดินรถ เส้นแบ่งทาง สิ่งกีดขวางบนถนน ยานพาหนะอื่น ๆ หรือลักษณะเด่นที่กำหนดจุดจุดหมายปลายทางของการเคลื่อนที่ ภาพที่ใช้อาจเป็นภาพสีหรือภาพขาวดำก็ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการ และข้อจำกัดทางด้านการประมวลผลข้อมูล นอกจากการใช้ระบบการมองเห็นแล้ว การตรวจจับสิ่งกีดขวาง และถนนยังสามารถใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ชนิดอื่นมาประกอบได้อีกด้วย เช่น การใช้อัลตราโซนิกส์ และเรดาร์ เป็นต้น การใช้เซนเซอร์เหล่านี้มาประกอบในการตัดสินใจมักใช้ได้ดีในกรณีของการตรวจจับสิ่งกีดขวาง เนื่องจากเซนเซอร์เหล่านี้มีความสามารถพื้นฐานในการวัดระยะทางจากสิ่งกีดขวางโดยตรงให้ข้อมูลออกมาได้โดยไม่ต้องผ่านการประมวลผลที่ซับซ้อนมากนักและมักจะให้ความแม่นยำสูง ในขณะที่การใช้ภาพในการวัดระยะห่างจากสิ่งกีดขวางจำเป็นจะต้องใช้วิธีที่ค่อนข้างซับซ้อนและอาจมีการตรวจจับที่ผิดพลาดได้ง่ายหากข้อมูลภาพมีความไม่ชัดเจน เช่น มีแสงเงา และการบดบังกันของวัตถุ เป็นต้น

1) การใช้กล้องเดี่ยว

งานวิจัยในช่วงเริ่มต้นมักนิยมใช้กล้องเดี่ยวหรือที่เรียกว่ากล้องตาเดียว (monocular) ซึ่งมีข้อดีคือในการคำนวณผลนั้นค่อนข้างเร็วและค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ แต่กล้องตาเดียว

นั้นไม่สามารถที่จะดึงข้อมูลที่สำคัญของภาพออกมาได้ ซึ่งข้อมูลที่ได้ออกมานั้นก็คือระยะห่างหรือความลึกของวัตถุกับกล้อง งานวิจัยที่สำคัญที่ผ่านมาในอดีต ได้แก่ งานวิจัยของ Dickmanns and Zapp (1986) ที่ได้แสดงการขับเคลื่อนโดยอัตโนมัติของยานพาหนะที่อาศัยระบบประมวลผลภาพในเวลาจริง (real-time) ที่ความเร็ว 96 km/h บนทางด่วนในประเทศเยอรมัน โดย Dickmanns ได้ใช้ตัวกรองกาลมาน (kalman Filter) ในการประมวลผลภาพที่เป็นลำดับ (image sequence analysis) เพื่อควบคุมการขับเคลื่อนในเวลาจริง ความสำเร็จของงานวิจัยนี้ทำให้มีผู้ทำงานวิจัยทางด้านการใช้ระบบการมองเห็นเพื่อช่วยในการขับขี่ยานพาหนะเพิ่มขึ้นตลอดระยะยี่สิบปีที่ผ่านมาอย่างต่อเนื่อง

งานวิจัยที่ได้รับการอ้างอิงอย่างมากอีกงานหนึ่งคืองานวิจัยของมหาวิทยาลัยคาร์เนกีเมลลอน ซึ่งเป็นผู้บุกเบิกการใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับช่องทางเดินรถที่เรียกว่าระบบ ALVINN (Pomerleau, 1989) งานวิจัยส่วนใหญ่เกี่ยวกับการตรวจจับช่องทางเดินรถในช่วงเริ่มแรกนั้นมักให้ความสำคัญต่อการใช่วิธีการหาขอบ (edge detection) ในการตัดสินใจและแยกแยะบริเวณถนนออกจากสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ นอกจากนั้นยังใช้วิธีการแปลงภาพเพื่อหาเส้นตรงในภาพ เช่น การใช้การแปลงแบบเฮา (hough transform) ขอบที่แสดงเส้นซ้าย-ขวาของขอบถนนมักมีสีที่โดดเด่นเป็นที่สังเกตได้ชัดเจนและสามารถลากไปตัดกันที่จุดสูญหาย (vanishing point) ที่แถวแนวนอนในภาพได้ เช่น ระบบ LANELOCK (Kenue, 1989) วิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นมาในช่วงแรกนี้มักไม่ทนทานต่อการตรวจจับทางโค้งและขอบถนนซึ่งไม่มีเส้นบอกทางที่ชัดเจน

ระบบที่ได้พัฒนาขึ้นในระยะต่อมานั้นใช้เทคนิคของการจับคู่ (matching) มากขึ้น โดยจะเลือกใช้วิธีการจับคู่จุดเด่นที่เกิดขึ้น (feature) ในภาพเพื่อให้เข้ากับข้อจำกัดพื้นฐานของถนน (global road shape constraint) เช่น ระบบ LOIS (Lakshmanan and Kluge, 1996) ซึ่งใช้การจับคู่แผ่นแบบ (template matching) ในการจับคู่ส่วนเด่นของภาพที่อยู่ในภาพทั้งหมดกับแผ่นแบบของถนน วิธีการนี้มักทนทานต่อความไม่แน่นอนของสิ่งแวดล้อมในภาพมากกว่าวิธีการที่ใช้กันในระยะแรก แต่ทว่าก็ยังมีการตรวจจับช่องทางเดินรถผิดพลาดในหลายกรณี เช่น เมื่อมีสิ่งกีดขวางอื่น ๆ ในถนน ซึ่งทำให้จุดเด่นของภาพที่ใช้ในการจับคู่กับแผ่นแบบของถนนไม่สมบูรณ์หรือผิดพลาด (false match)

ในการใช้จุดเด่นที่อยู่ในภาพเพื่อหาเส้นกึ่งกลางถนน (road skeletal line) และขอบถนนจะเป็นการใช้การหาเส้นตรงในภาพ โดยใช้วิธีการหาขอบร่วมกับการแปลงแบบเฮาภายในบริเวณที่กำหนดหรือการหาจุดสัญญาณ (reflexive spotted lane marker) จากการใชตัวกรอง (filter) ที่เป็นฐานทรงกลม เช่น steerable filter (first-order differentiation of Gaussian function) ซึ่งนำเสนอโดย McCall and Trivedi (2004)

การสร้างแบบจำลองของช่องทางเดินรถเพื่อใช้ในการตรวจจับช่องทางเดินรถนับได้ว่าเป็นวิธีการที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายไม่น้อยกว่าการใช้จุดเด่นในภาพ รูปร่างของ

แบบจำลองของช่องทางเดินรถสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันเส้นตรง (Franke, 2001) เส้นโค้งของสมการโพลีโนเมียลอันดับสอง (Franke, 2001) และฟังก์ชัน B-spline (Hu and Uchimura, 2001) ในการตรวจจับช่องทางเดินรถภาพที่ผ่านการประมวลผลเบื้องต้นจะถูกนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์เบื้องต้นของแบบจำลองโดยใช้วิธีการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization technique) แบบจำลองที่ได้จะถูกปรับด้วยข้อมูลภาพที่เข้ามาใหม่ในระหว่างการเคลื่อนที่ ข้อดีของวิธีการนี้คือการสร้างแบบจำลองของช่องทางเดินรถนั้นมักจะทนทานต่อสัญญาณรบกวนและข้อมูลที่ขาดหายไปได้ดีกว่าวิธีการหาจุดเด่นในภาพโดยตรง เนื่องจากการใช้แบบจำลองถนนนั้นรูปแบบเบื้องต้นได้มีการสมมุติไว้ก่อนแล้ว การใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อปรับแบบจำลองจึงทนทานต่อความผิดพลาดของข้อมูลได้ดีกว่าการใช้จุดเด่นในภาพโดยตรงโดยที่ไม่มีการอ้างอิงจากแบบจำลอง

ในงานวิจัยของ Wang, Teoh and Shen (2004) ได้นำเสนอถึงวิธีการที่เรียกว่า B-snake ซึ่งใช้ความสัมพันธ์ของเส้นขนานใน 3D เพื่อที่จะหารูปร่างของแบบจำลองช่องทางเดินรถใน 2D จากการใช้การคำนวณจุดสุดท้ายของข้อมูลที่ได้จากภาพจะถูกนำมาปรับค่าพารามิเตอร์รูปแบบจำลองช่องทางเดินรถซึ่งเป็นฟังก์ชัน B-spline โดยการใช้ Minimum Mean Square Error (MMSE)

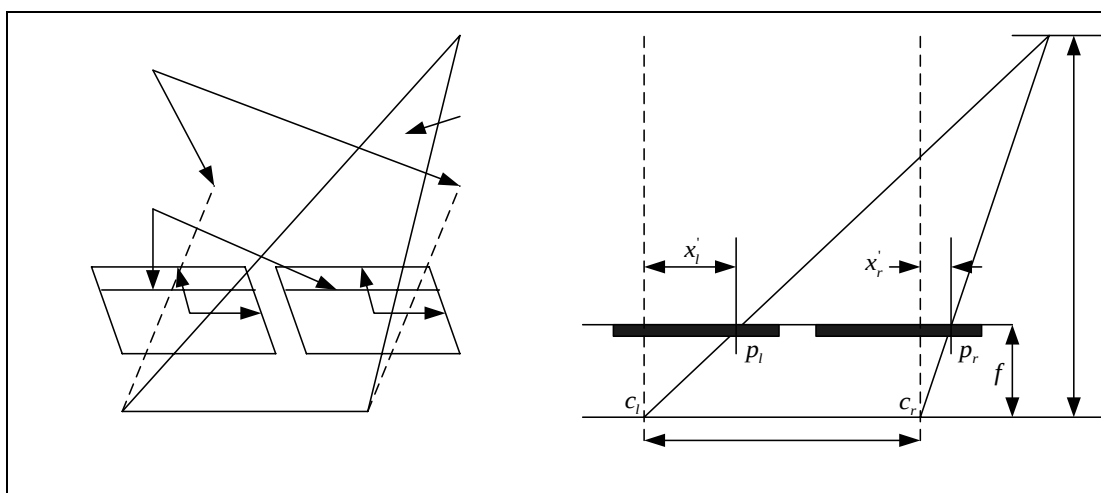
นอกจากวิธีที่ได้กล่าวมานี้การใช้กล้องหนึ่งตัวสามารถคำนวณระยะระหว่างกล้องกับวัตถุที่อยู่ข้างหน้าได้หากมีข้อมูลเพิ่มเติมจากเซนเซอร์ที่แสดงสถานะของยานพาหนะ เช่น การใช้ข้อมูลความเร็วล้อเพื่อที่จะสามารถบอกตำแหน่งผลต่างของกล้องที่เวลาต่าง ๆ กันได้ การใช้ภาพซึ่งได้จากการเก็บภาพ ณ เวลาที่ต่างกันนั้นสามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งใน 3D ของวัตถุได้โดยการคำนวณความแตกต่างกัน (disparity) ของภาพจากความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติในลักษณะที่คล้ายคลึงกับการใช้กล้องมากกว่าหนึ่งตัวนั่นเอง อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องอาศัยความแม่นยำของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดอื่น เช่น เซนเซอร์ตรวจจับความเร็วล้อทำให้ต้องอาศัยวิธีการทางด้านการทำนาย (prediction) เข้ามาช่วยด้วย เช่น การใช้ตัวกรองคาลมาน (kalman filter) หรือการใช้ตัวกรองอนุภาค (particle filter) (Apostoloff and Zelinsky, 2002) เพื่อใช้ประมาณค่าตำแหน่งของกล้องที่เวลาต่าง ๆ กันให้มีความแม่นยำมากขึ้นร่วมกับการใช้วิธีการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะลดค่าระหว่างความผิดพลาดในแบบจำลองสามมิติ (3D model) ให้ให้น้อยที่สุดจากข้อมูลที่ได้รับเมื่อเวลาต่าง ๆ

2) การใช้กล้องมากกว่าหนึ่งตัว

งานวิจัยเกี่ยวกับระบบตรวจจับช่องทางเดินรถและสิ่งกีดขวางของยานพาหนะไร้คนขับและหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ในปัจจุบันนั้นจะเป็นการวิจัยเกี่ยวกับการมองเห็นในระนาบสามมิติ (stereo vision) เป็นส่วนใหญ่เพราะการประมวลผลภาพในสามมิตินั้นไม่เพียงแต่ให้ข้อมูลที่สำคัญ

คือ ระยะห่างระหว่างกล้องและระยะจากวัตถุออกมาเท่านั้น ทั้งนี้ยังสามารถทำการแบ่งส่วนภาพ (image segmentation) ออกมาได้ดีกว่าการใช้กล้องตาเดียวอีกด้วย แต่การใช้ระบบการมองเห็นในสามมิตินั้นต้องการระบบประมวลผลที่มีความไวสูงพอที่จะทำให้การประมวลผลภาพใกล้เคียงเวลาจริงเพราะระบบการมองเห็นในสามมิตินั้นต้องการการประมวลผลภาพจากกล้องสองกล้องเพื่อให้ได้ข้อมูลตามที่ต้องการ

ในการนำทางของหุ่นยนต์โดยใช้ระบบการมองเห็นในสามมิตินั้นเป็นการนำทางซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดวงตาของมนุษย์มาก เพราะว่าการมองเห็นในสามมิตินั้นใช้กล้องในการจับภาพวัตถุ 2 ตัวทำให้สามารถที่จะระบุถึงระยะห่างของตัวหุ่นยนต์กับวัตถุได้ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์มากในการวางแผนการเคลื่อนที่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางไปหาเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของกล้องสองตาในสามมิติ (binocular stereo) นั้นแสดงดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะทางเรขาคณิตของกล้องสองตาในสามมิติ (binocular stereo)

จากรูปจะเห็นว่าแบบจำลองพื้นฐานของกล้องทั้งสองนี้จะแยกกันเพียงทิศทางแกน x เท่านั้น โดยจะมีระยะห่างเท่ากับระยะเส้นฐาน (base line : b) และระนาบของภาพ (image plane) ของกล้องทั้งสองตัวนั้นอยู่ในระนาบเดียวกัน ดังนั้นทำให้จุดที่เราสนใจของภาพจากภายนอกปรากฏลงบนระนาบของกล้องทั้งสองที่ตำแหน่งต่างกัน ซึ่งระยะระหว่างตำแหน่งภาพบนระนาบนั้นเรียกว่าความแตกต่างกัน (disparity) และระนาบที่ผ่านจุดศูนย์กลางของกล้องทั้งสองจุดที่เราสนใจนั้นเรียกว่าระนาบเอพิโพลาร์ (epipolar plane) เส้นที่เกิดขึ้นจากการตัดกันของระนาบภาพกับระนาบเอพิโพลาร์นั้นถูกกำหนดให้เป็นระนาบเอพิโพลาร์ ซึ่งจากแบบจำลองของรูป

ที่ 2.1 แสดงนั้นลักษณะจุดของภาพจากระนาบหนึ่งจะอยู่ในแถวเดียวกันกับอีกระนาบหนึ่ง หมายความว่าเส้นระนาบเอพิโพลจะอยู่ที่ตำแหน่งแถวเดียวกันของระนาบภาพของกล้องทั้งสอง แต่ในการกำหนดให้เป็นแบบนี้ได้นั้นแสดงว่าต้องกำหนดให้ความแตกต่างกันในแนวตั้ง (vertical disparity) นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ จากรูปที่ 2 จุด P จะปรากฏเป็นจุด p_l และ p_r บนระนาบภาพ ด้านซ้ายและระนาบภาพด้านขวาตามลำดับ และกำหนดให้จุดกำเนิดของพิกัดโลกอยู่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งศูนย์กลางเลนส์ของกล้องด้านซ้าย ดังนั้นเราเปรียบเทียบกับสามเหลี่ยมคล้าย PMC_l และ p_lLC_r ดังนั้นเราจะได้

$$\frac{x}{z} = \frac{x_l'}{f} \quad (2.1)$$

ในทำนองเดียวกัน จากสามเหลี่ยมคล้าย PNC_r และ p_rRC_r เราจะได้

$$\frac{x-b}{z} = \frac{x_r'}{f} \quad (2.2)$$

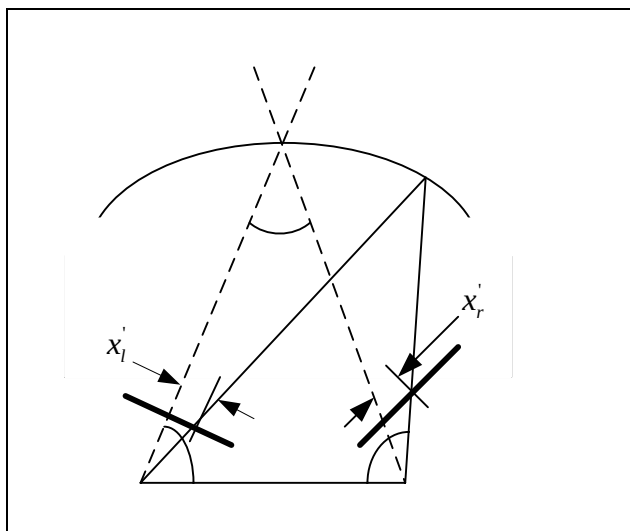
รวมสมการ 2.1 และ 2.2 เข้าด้วยกันเราจะได้

$$z = \frac{bf}{(x_l' - x_r')} \quad (2.3)$$

ดังนั้นเราจะหาระยะ z หรือระยะห่างระหว่างวัตถุกับจุดศูนย์กลางของภาพได้จาก ค่าความแตกต่างกันของภาพนั่นเอง ในการมองของมนุษย์นั้นจะมีหลักการมองเหมือนกับหลักการของการมองเห็นในสามมิติที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเพียงแต่จากหลักการที่กล่าวมาเกณฑ์เกี่ยวกับการมองเห็น (optical) ของกล้องทั้งสองนั้นขนานกัน ซึ่งการมองของคนเราจะมีลักษณะการมอง เหมือนกับนำกล้องสองตัวมาติดตั้งให้เกณฑ์เกี่ยวกับการมองเห็นตัดกันแสดงดังในรูปที่ 2.2

ในกรณีนี้ค่าความแตกต่างกันจะขึ้นอยู่กับค่าของมุมการเบน (vergence) โดยที่ ทุก ๆ มุมจะมีพื้นผิวของค่าความแตกต่างกันเป็นศูนย์ (zero disparity) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งวัตถุที่อยู่ไกลออกไปจากพื้นผิวนี้จะมีค่าความแตกต่างกันมากกว่าศูนย์ ส่วนวัตถุที่อยู่ใกล้กว่าจะมีค่าความ

แตกต่างกันน้อยกว่าศูนย์ ซึ่งหลักการที่ใช้ในการหามุมการเบนที่มีค่าความแตกต่างกันเป็นศูนย์นั้น จะอาศัยหลักการของการจับคู่ในสามมิติ (stereo matching) เข้ามาช่วยดังนี้



รูปที่ 2.2 การวางกล้องทั้งสองให้เกิดการตัดกันของแกนที่เกี่ยวกับการมองเห็น (optical)

การจับคู่ในสามมิติ คือการหาความเหมือนกันของภาพสองภาพ โดยทำการหาแต่ละจุดที่อยู่ทีภาพซ้ายซึ่งเหมือนกับจุดที่อยู่บนภาพด้านขวาเพื่อที่จะนำข้อมูลมาหาค่าความแตกต่างกันต่อไป ในการทำการจับคู่ในสามมิตินั้นมีลำดับการทำดังนี้

1. ทำการกรองภาพทั้งสองภาพเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน (noise) เช่น การใช้ตัวกรองเกาส์เซียน (gaussian filters) ตัวกรองมัธยฐาน (median filters) เป็นต้น
 2. ทำการหาขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) และทำการหาขอบด้วยกระบวนการหาขอบ
 3. หาความเหมือนของภาพโดยใช้หลักการ Sum of Squared Difference (SSD)
- โดย

$$SSD[I_1(i, j), I_2(i, j)] = \sum_{i, j} [I_1(i, j) - I_2(i, j)]^2 \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 จะพบว่าถ้าภาพ I_1 และ I_2 เป็นภาพเดียวกันหรือเป็นภาพที่คล้ายกันจะทำให้ค่าที่ได้ของ SSD จะมีค่าเท่ากับศูนย์หรือมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (correlation function) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความแตกต่างกันดังนี้

$$\text{corr}(I_1, I_2; d) = \text{SSD} \left[I_1 \left(i + \frac{d}{2}, j \right), I_2 \left(i - \frac{d}{2}, j \right) \right] \quad (2.5)$$

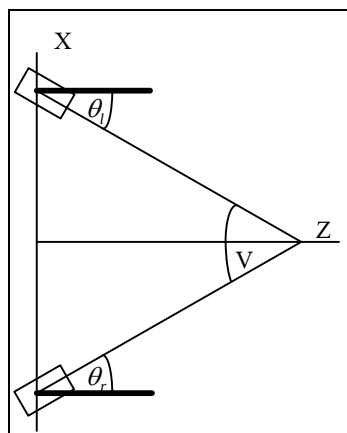
จากสมการที่ 2.5 สามารถที่จะทำการหาค่าความแตกต่างกันของภาพทั้งสองออกมาได้ โดยกำหนดช่วงการหาของค่าความแตกต่างกันได้โดย

$$D = \{d_1, \dots, d_n\}$$

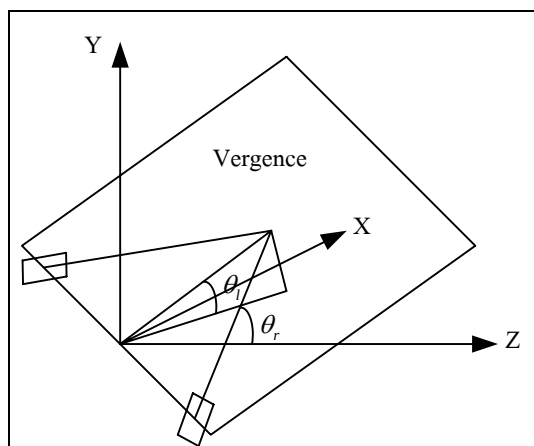
ซึ่งจะทำการแทนค่าความแตกต่างกันแล้วทำการเลือกค่า $\text{corr}(I_1, I_2; d_n)$ ที่มีค่าต่ำที่สุดเพราะเป็นระยะห่างระหว่างภาพที่ใกล้เคียงที่สุด

จากหลักการที่ได้กล่าวมาสามารถเปรียบเทียบกับการมองของคนได้ว่าการที่คนต้องการมองวัตถุอย่างหนึ่งอย่างใดนั้นจะต้องสนใจไปที่วัตถุนั้นและปรับโฟกัสของการมองที่วัตถุนั้นให้มีความชัด โดยที่สภาวะแวดล้อมที่อยู่ห่างจากวัตถุออกไปจะมองได้ไม่ชัด ในทำนองเดียวกันกับการนำทางหุ่นยนต์ด้วยกล้องก็สามารถประยุกต์คุณสมบัติการมองของคนมาใช้ในการจับภาพวัตถุที่ต้องการเพื่อให้ได้ภาพที่คมชัดและสามารถนำไปทำการตีความหมายภาพได้สะดวกขึ้น

ในการหามุมการเบนที่มีค่าความแตกต่างกันเป็นศูนย์ที่ได้กล่าวมานั้นก็คือการตามรอย (tracking) ทางความลึกของภาพ แสดงดังในรูปที่ 2.3 ซึ่งในการตามรอยวัตถุด้วยวิธีนี้จะต้องใช้คู่กับการตามรอยให้จุดศูนย์กลางของภาพวัตถุอยู่ศูนย์กลางของระนาบภาพด้วย แสดงดังรูปในที่ 2.4



รูปที่ 2.3 การตามรอยในแนวแกน Z



รูปที่ 2.4 การตามรอยศูนย์กลางของวัตถุด้วยมุมก้มเงย (pan tilt)

การตามรอยวัตถุให้อยู่ตรงกลางของระนาบภาพตลอดเวลา โดยใช้หลักการของจุดเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centriod) ของภาพในการหาตำแหน่งความผิดพลาดที่ผิดไปจากตรงกลางคือ

$$\bar{P} = \frac{\iint_{x,y} I(x,y) p \, dx dy}{\iint_{x,y} I(x,y) \, dx dy} \quad (2.6)$$

โดยที่ P คือ ตำแหน่งของจุดภาพแต่ละจุดเมื่อวัดจากจุดศูนย์กลางของระนาบภาพ
 $\bar{P}$ คือ ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของระนาบภาพถึงจุดศูนย์กลางของภาพวัตถุ

การใช้การมองเห็นแบบสามมิติในการตรวจจับช่องทางเดินรถและสิ่งกีดขวางนั้น บางงานวิจัยได้เพิ่มความสามารถของอุปกรณ์ โดยการใช้กล้องที่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งรับภาพและปรับตำแหน่งโฟกัสได้ ซึ่งเรียกว่าการใช้ระบบการมองเห็นแบบไวงาน (active vision) ระบบการมองเห็นแบบไวงานนี้มีข้อดีในแง่ของความสามารถการรับภาพได้กว้างกว่าแบบไม่ไวงาน (passive vision) แต่ก็เป็นการเพิ่มความซับซ้อนของการทำงานขึ้นอีกมากด้วยเช่นกัน โดยในระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถของกลุ่มนักวิจัยที่เกี่ยวข้องของมหาวิทยาลัยแห่งชาติออสเตรเลีย นั้นได้ใช้การติดตั้งกล้องคู่แบบไวงานเพื่อจับภาพในระยะใกล้ (near field) และในระยะไกล (far field) รวมสองชุดด้วยกัน เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของระบบในการตัดสินใจที่ได้จากข้อมูลที่อยู่ในระยะต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง (Beauvais and Lakshmana, 2000)

3) การใช้กล้องประกอบกับเซนเซอร์ชนิดอื่น ๆ

ในการใช้ระบบการมองเห็นเพื่อตัดสินใจในการควบคุมยานพาหนะโดยอัตโนมัติ งานวิจัยที่ใช้ระบบการมองเห็นเพียงอย่างเดียวมักประสบปัญหาเกี่ยวกับความน่าเชื่อถือของข้อมูลความแม่นยำและการใช้เวลาในการคำนวณที่สูงมาก ดังนั้นทางแก้ไขคือการใช้เซนเซอร์ชนิดอื่น ๆ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าในการวัดข้อมูลบางชนิด เช่น ระยะทางไปถึงวัตถุที่อยู่ข้างหน้าหรือระดับความสูงของถนนเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงเซนเซอร์ที่นิยมนำมาใช้ร่วมกับระบบการมองเห็นมักนิยมเป็นเซนเซอร์วัดระยะทาง (range sensor) เช่น เครื่องกราดตรวจเลเซอร์ (laser scanner) อัลตราโซนิก (ultrasonic) หรือเรดาร์ (radar) เป็นต้น อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้รับมาจากเซนเซอร์ชนิดอื่น เช่น GPS เซนเซอร์วัดความเร็วล้อ หรือเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (gyro sensor) ก็มีประโยชน์ในการช่วยการทำความเข้าใจภาพเป็นอย่างมาก แต่การรวมข้อมูลจากเซนเซอร์เหล่านี้มักได้รับการนำไปใช้ในระดับการตัดสินใจช่วยระบบควบคุมการขับเคลื่อน (intelligent cruise control) มากกว่า

การใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ชนิดอื่นมาประกอบระบบการมองเห็น เช่น การใช้อัลตราโซนิกและเรดาร์เพื่อมาประกอบในการตัดสินใจมักใช้ได้ดีในกรณีของการตรวจจับสิ่งกีดขวาง เนื่องจากเซนเซอร์เหล่านี้มีความสามารถพื้นฐานในการวัดระยะทางจากสิ่งกีดขวางโดยตรง ซึ่งให้ข้อมูลออกมาได้โดยไม่ต้องผ่านการประมวลผลที่ซับซ้อนมากนักและมักจะให้ความแม่นยำสูง ในขณะที่การใช้ภาพในการวัดระยะห่างจากสิ่งกีดขวางจำเป็นจะต้องใช้วิธีที่ค่อนข้างซับซ้อนและอาจมีการตรวจจับที่ผิดพลาดได้ง่ายหากข้อมูลภาพมีความไม่ชัดเจน เช่น มีแสงเงาและการบดบังกันของวัตถุ เป็นต้น ในงานวิจัยของ Beauvais and Lakshmanan (2000) ได้มีการใช้ข้อมูลจากเรดาร์เซนเซอร์มาประกอบกับข้อมูลภาพในการตรวจจับเส้นแบ่งทางบนถนนและสิ่งกีดขวางโดยเรียกว่าระบบ CLARK ซึ่งพบว่าทำให้การตรวจจับมีความถูกต้องมากขึ้นกว่าการใช้ข้อมูลจากภาพเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.5 ภาพของถนนและยานพาหนะอื่น ๆ ซึ่งถือเป็นสิ่งกีดขวางในการเคลื่อนที่เป็นภาพแบบกล้องตาเดียวซึ่งได้จากกล้องที่ติดตั้งบนรถ (Beauvais and Lakshmanan, 2000)

ในการตรวจจับช่องทางเดินรถซึ่งไม่มีขอบหรือเส้นชัดเจน เช่น ถนนดินลูกรัง หรือถนนในป่านี้ งานวิจัยของ Hong, Rasmussen, Chang, and Shneier (2004) ได้เสนอการใช้ภาพจากกล้องร่วมกับข้อมูลจากเรดาร์ในการสร้างแบบจำลอง 3D ของถนนขึ้น โดยมีการปรับจากเซนเซอร์ทั้งสองชนิดเป็นระยะเพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งของยานพาหนะเมื่อเทียบกับถนนได้ แม่นยำขึ้นภาพที่ได้จากกล้องจะมีข้อมูล 2D ซึ่งจะต้องนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองถนน ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับสอง ดังสมการที่ 2.7

$$x = c_1 + c_2y + c_3y^2 \quad (2.7)$$

โดยที่ c_1 , c_2 และ c_3 เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดคุณลักษณะรูปร่างและตำแหน่งของแบบจำลองของเส้นขอบถนนในแต่ละภาพที่ได้รับจากกล้อง การประมวลผลภาพจะกระทำที่บริเวณที่สนใจเท่านั้น เพื่อความรวดเร็วในการประมวลผล เมื่อภาพผ่านกระบวนการหาขอบภาพ ขอบภาพที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสมการแบบจำลองถนน และใช้ Square Root Information Filter (SRIF) ในการปรับสมการแบบจำลองเพื่อให้สอดคล้องกับขอบภาพต่อไป ในขั้นตอนของการหาแบบจำลอง 3D ของถนนนั้น ในงานวิจัยนี้จะหมายความว่าความถึงบริเวณที่ราบเรียบใน 3D เมื่อเทียบกับแกนเปรียบเทียบที่ได้ตั้งไว้ (วัดได้จาก elevation map) ด้วยวิธีการนี้การเคลื่อนที่จะไม่จำกัดอยู่กับการติดตามจุดเด่นในภาพ เช่น เส้นตรงหรือจุด แต่จะเป็นการเคลื่อนที่ในบริเวณที่ไม่มีสิ่งกีดขวางเมื่อพิจารณาจากแบบจำลอง 3D การจับคู่ภาพกับข้อมูลที่ได้จากเรดาร์จะกระทำในแบบจำลอง 3D โดยพิจารณาสีของบริเวณที่เป็นถนนร่วมกับข้อมูล 3D ที่ได้จากเรดาร์เซนเซอร์เพื่อทำการยืนยันว่าบริเวณที่ระบุนั้นมีความน่าเชื่อถือมากน้อยเช่นใดในการระบุว่าเป็นบริเวณถนน

ในการแข่งขัน DARPA Grand Challenge ซึ่งเป็นการใช้ระบบการมองเห็นในรถอัจฉริยะ ซึ่งต้องเคลื่อนที่ผ่านทะเลทรายที่ไม่มีถนนชัดเจน การทำงานของระบบรถอัจฉริยะส่วนใหญ่ที่เข้าร่วมในการแข่งขันนั้นจะเป็นการใช้ระบบกล้องร่วมกับเซนเซอร์ชนิดอื่น ๆ เป็นหลัก ตัวอย่างเช่น ทีม TerraMax จาก Ohio State University ก็จะใช้กล้องร่วมกับเซนเซอร์อีกสามชนิดคือ scanning laser rangefinder, radar และ ultrasonic วิธีการหาเส้นทางเคลื่อนที่โดยใช้ระบบการมองเห็นของทีม TerraMax คือ การใช้การหาพื้นผิวจากภาพสีเพื่อเลือกพื้นผิวที่มีความเรียบพอที่จะเป็นเส้นทางที่เคลื่อนที่ผ่านได้ก่อน จากนั้นจึงทำการกำหนดขอบของเส้นทาง หลังจากนั้นจึงใช้วิธีการจับคู่เส้นทางกับแบบจำลองที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดอื่น ๆ ในระดับความละเอียดต่าง ๆ กัน (multiresolution) เพื่อลดเวลาในการคำนวณ ในส่วนของการตรวจจับวัตถุสิ่งกีดขวางนั้นจะใช้กล้องคู่ stereoscopic เพื่อหาตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง

2.2.2 การตรวจจับช่องทางเดินรถ (lane detection)

การตรวจจับช่องทางเดินรถนั้นมีความสำคัญมากทั้งในการขับเคลื่อนอัตโนมัติและระบบการช่วยการขับขี่ซึ่งต้องอาศัยการเตือนหากพาหนะมีการเคลื่อนที่หลุดออกจากถนน โดยทั่วไปข้อมูลสำคัญที่จะได้จากระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถซึ่งจะนำไปใช้ในการบังคับการขับเคลื่อนคือ ความโค้งของถนนที่มองเห็นในระยะไกลออกไป ตำแหน่ง และทิศทางของรถเมื่อเทียบกับถนน (อยู่กึ่งกลางเลนหรือไม่ หันทิศทางหน้ารถต่างไปจากเส้นกึ่งกลางถนนมากน้อยเท่าไร) โดยทั่วไปแบบจำลองของถนนสามารถอธิบายได้โดยสมการ

$$c(L) = c_0 + c_1 \times L \quad (2.8)$$

เมื่อกำหนดให้ $c(L)$ คือ ส่วนความโค้ง (curvature) ที่ระยะ L ของ clothoid c_0 คือ ความโค้งเริ่มต้น (initial curve) และ c_1 คือ อัตราส่วนความโค้ง (curvature rate) โดยที่ $c = 1/R$ เมื่อ R คือ รัศมีของส่วนโค้งการใช้แบบจำลองช่องทางเดินรถตามสมการที่ 2.8 นั้นอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าถนนมีการออกแบบโดยใช้ความโค้งพาราโบลา (parabolic curve) แต่หากถนนมีความโค้งที่ไม่เป็นไปตามสมมุติฐานของการออกแบบดังกล่าวแล้วนั้น การใช้แบบจำลองแบบ B-spline จะมีความเหมาะสมมากกว่า

ข้อสังเกตอีกข้อหนึ่งซึ่งต้องกล่าวถึงคือ วิธีการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อถนนเป็นทางด่วนหรือทางหลวงนั้น การใช้วิธีการติดตามช่องทางเดินรถโดยอาศัยแบบจำลองของถนนนั้นสามารถใช้ได้ดี แต่หากว่าเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถในเมืองซึ่งมักมีการจราจรหนาแน่นวิธีการหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองช่องทางเดินรถมักจะล้มเหลว เนื่องจากจุดเด่นของถนน เช่น ขอบถนนหรือเส้นแบ่งถนนมักจะถูกบดบังโดยวัตถุต่าง ๆ เช่น รถยนต์ คนเดิน ฯลฯ รูปแบบของช่องทางเดินรถมักเป็นเส้นตรงแต่มีทางแยกหรือวงเวียนอยู่เป็นระยะ นอกจากนั้นการขับเคลื่อนยานพาหนะในถนนในเมือง มักมีลักษณะที่แตกต่างจากการขับเคลื่อนยานพาหนะทางไกล เนื่องจากการเคลื่อนที่มักจะมีลักษณะเป็นแบบ stop-and-go แทนที่จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ๆ การตัดสินใจมักจะเป็นการเคลื่อนที่ตามรถคันหน้าหรือการเลี้ยวที่แยกแทนที่จะเป็นการรักษาดำแหน่งของรถให้อยู่ภายในเลนที่กำหนด

1) การหาขอบ (edge detection)

เนื่องจากการจัดเก็บรูปภาพเป็นการจัดเก็บในรูปแบบจุดภาพ (pixel) ฉะนั้นในการที่จะแยกวัตถุ 2 วัตถุออกจากกันหรือแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง (background) จึงต้องอาศัยขอบของวัตถุเป็นตัวที่ใช้สำหรับการแยก การหาขอบของวัตถุสามารถทำได้โดยการดูความแตกต่าง

ของสีของจุดภาพใกล้เคียง โดยถ้าสีแตกต่างกันแสดงว่ามีขอบอยู่ระหว่างจุดภาพนี้ การหาขอบนั้นสามารถหาได้หลายวิธี เช่น การใช้ตัวดำเนินการโรเบิร์ตส์ (roberts operator) การใช้ตัวดำเนินการโซเบล (sobel operator) การหาขอบของแคนนี่ (canny edge detection)

(1) ตัวดำเนินการโรเบิร์ตส์ (roberts operator)

การหาขอบด้วยวิธีของตัวดำเนินการโรเบิร์ตส์ใช้จุดภาพจำนวน 4 จุดภาพ โดยจะหาขอบที่จุด $\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right)$ การคำนวณหาขอบทำได้โดยใช้สมการที่ 2.8

$$E\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right) = [I(i, j) - I(i+1, j+1) + I(i+1, j) - I(i, j+1)] \quad (2.8)$$

แต่เนื่องจากการเก็บค่าของขอบไม่สามารถเก็บที่จุด $\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right)$ ได้ ดังนั้นจึงจัดเก็บที่จุด (i, j) แทน ฉะนั้นสมการจึงเปลี่ยนเป็นดังสมการที่ 2.9

$$E(i, j) = |I(i, j) - I(i+1, j+1)| + |I(i+1, j) - I(i, j+1)| \quad (2.9)$$

เมื่อ $I(i, j)$ คือ ค่าความเข้มที่จุด (i, j)

จากสมการที่กล่าวข้างต้นนั้นสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์และใช้วิธีสังวัตนาการ (convolution) กับค่าความเข้ม (intensity) จะได้ดังสมการที่ 2.10

$$E(i, j) = |E_x(i, j)| + |E_y(i, j)| \quad (2.10)$$

ซึ่งแผ่นบังสังวัตนาการ (convolution masks) คือ $E_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ และ $E_y = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ แทนลงในสมการที่ 2.10 จะได้ดังสมการที่ 2.11

$$E_x(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I(i, j) & I(i, j+1) \\ I(i+1, j) & I(i+1, j+1) \end{bmatrix}$$

$$E_x(i, j) = [I(i, j) - I(i+1, j+1)] \quad (2.11)$$

เมื่อทำการคำนวณหาขอบของทุกจุดภาพของทั้งภาพแล้วจะได้ภาพของขอบซึ่งสีขาวที่ได้นั้นจะเป็นการแสดงขอบ (High Intensity)

(2) ตัวดำเนินการโซเบล (sobel operator)

การหาขอบแบบตัวดำเนินการโซเบลจะคล้ายกับตัวดำเนินการโรเบิร์ตส์ เพียงแต่จะใช้จุดภาพ 9 จุดภาพในการคำนวณหาขอบ เพราะฉะนั้นแผ่นบังสังวัตนาการที่ใช้จึงต่างกับตัวดำเนินการโรเบิร์ตส์ ในการคำนวณหาขอบทำได้โดยใช้สมการดังนี้

$$E(i, j) = \sqrt{E_x^2(i, j) + E_y^2(i, j)}$$

$$\text{แผ่นบังสังวัตนาการ คือ } E_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ และ } E_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

ขอบที่ได้จากตัวดำเนินการโซเบลนั้นจะอยู่ที่ตำแหน่ง (i, j) ซึ่งจะต่างจากขอบที่ได้จากตัวดำเนินการโรเบิร์ตส์

(3) การหาขอบของแคนนี่ (canny edge detection)

จากกระบวนการในการหาขอบข้างต้นจะพบว่าขอบที่ได้จะมีขนาดใหญ่มากกว่า 1 จุดภาพหรือถ้ามีการทำให้ขอบมีขนาดเล็กลงให้เหลือ 1 จุดภาพก็จะได้ขอบที่อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องได้ (ตำแหน่งที่มีความแตกต่างระหว่างจุดภาพมากที่สุด) แต่ว่ากระบวนการในการหาขอบโดยใช้การหาขอบของแคนนี่ (canny edge detection) นั้นสามารถหาขอบที่อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องได้และขอบที่ได้มีขนาดแค่ 1 จุดภาพเท่านั้น ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการใช้รูปที่ทำการปรับเรียบ (smooth) จากตัวกรองเกาส์เซียนแล้วมาคำนวณหาขนาดความชัน (gradient magnitude) และการกำหนดทิศทางความชัน (gradient orientation) โดยใช้แผ่นบังสังวัตนาการดังนี้

$$E_x = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \text{ และ } E_y = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

ซึ่งการหาขนาดความชันและการกำหนดทิศทางความชันสามารถกระทำได้โดยคำนวณจากสมการดังนี้

$$M(i, j) = \sqrt{E_x^2(i, j) + E_y^2(i, j)}$$

$$\theta(i, j) = \arctan(E_y^2(i, j), E_x^2(i, j))$$

การกำหนดทิศทางความชันที่คำนวณได้จะถูกนำมาเปลี่ยนให้เป็น 4 แขนคือแกนแนวตั้ง แนวนอน และแนวทะแยงทั้งสอง โดยการกำหนดทิศทางของทั้ง 4 แขนนั้นสามารถแสดงได้ดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 การกำหนดทิศทางความชันทั้ง 4 แขน

แนวแกน	องศา
แกนแนวนอน	-22.5 – 22.5 และ 157.5 – 202.5
แกนแนวทะแยง (ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ)	22.5 – 67.5 และ 202.5 – 247.5
แกนแนวตั้ง	67.5 – 102.5 และ 247.5 – 292.5
แกนแนวทะแยง (ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ)	102.5 – 157.5 และ 292.5 – 337.5

แนวแกนนี้จะนำไปใช้ในการลดขนาดของขอบ โดยในแต่ละจุดภาพของขอบถ้าจุดภาพรอบข้างในแนวของการกำหนดทิศทางความชันใดที่ไม่ใช่ค่าสูงสุดจะไม่ถือว่าเป็นขอบ ดังนั้นจะมีเพียงจุดภาพเดียวที่เป็นขอบ นอกจากนี้ยังสามารถทำการรวมขอบเข้าเป็นกลุ่มเดียวกันได้โดยใช้การกำหนดทิศทางความชันที่ต่อเนื่องกันระหว่างขอบ 2 จุดภาพ

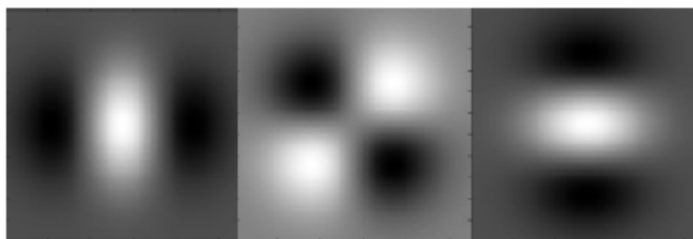
2) การแปลงแบบเฮา (Hough transform)

การแปลงแบบเฮาเป็นการค้นหาสมการเส้นตรง เส้นโค้งวงกลม วงรี จากจุดต่าง ๆ โดยแต่ละจุดจะโหวตว่าจุดนั้น ๆ อยู่บนเส้นใดบ้างเมื่อทุกจุดโหวตแล้วสมการที่ถูกโหวตมากที่สุดจะเป็นเส้นที่ผ่านจุดมากที่สุดดังตัวอย่างเช่น ต้องการหาสมการเส้นตรงที่ผ่านจุดที่กำหนดให้ จุดหนึ่งจุดจะมีเส้นตรงมากมายนับไม่ถ้วนผ่านโดยสมการเส้นตรงนั้นจะมีสมการซึ่งอยู่ในรูปแบบ $y = mx + c$ เส้นตรงที่ผ่านจุด (x, y) คือ เส้นตรงที่มีพารามิเตอร์ (m, b) ซึ่ง $c = y - mx$ จุดหนึ่ง ๆ จะโหวตให้กับสมการเส้นตรงที่มีพารามิเตอร์ต่าง ๆ กันได้หลายสมการ เมื่อ

จุดทุกจุดได้โหวตเสร็จเรียบร้อยแล้วสมการเส้นตรงที่ถูกโหวตมากที่สุดจะเป็นเส้นตรงที่ผ่านจุดที่กำหนดให้มากที่สุด

3) ตัวกรอง steerable

ตัวกรอง steerable (Joel and Trivedi, 2004) นั้นเป็นตัวกรองที่ได้จากการหาอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) ของฟังก์ชันเกาส์เซียนแบบ 2 มิติ (two dimensional gaussian function) มีคุณสมบัติที่สำคัญอยู่สองอย่างด้วยกันนั่นก็คือ สามารถแยกออกเป็นตัวกรองหลาย ๆ ตัวกรองได้ เช่น สามารถแยกออกเป็น 2 ตัวกรอง คือ ตัวกรองในแนวแกน x และ y ซึ่งเมื่อแยกตัวกรองออกเป็นตัวกรองหลาย ๆ ตัวกรองก็จะทำให้การคำนวณเร็วขึ้น นอกจากนั้นตัวกรอง steerable สามารถนำไปใช้ในการดูในแต่ละองศาที่ต้องการหรือในทุก ๆ องศาได้ เนื่องจากมีการสร้างไบอัสของทุกองศาที่ต้องการไว้



รูปที่ 2.6 การตั้งไบอัสของตัวกรอง steerable ในทิศทางต่าง ๆ

4) SIFT

SIFT ที่ซึ่งย่อมาจาก Scale Invariant Feature Transform คือการเอาจุดเด่นในรูปที่ขึ้นอยู่กับการกำหนดทิศทาง ตำแหน่ง มุมการมอง แสงสว่าง เงา มาทำให้จุดเด่นนั้นไม่ขึ้นอยู่กับการกำหนดทิศทาง ฯลฯ ซึ่งจะทำให้สามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบจุดเด่นในรูปอื่น ๆ ได้ง่ายและถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยเป็นจุดเด่นที่มักนิยมใช้กันเป็นอย่างมากในการทำ การระบุตำแหน่งที่ตั้ง เช่น การใช้เทคนิค SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) ในหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (David, 2004)

5) เส้นตรง (Straight line)

ในการตรวจจับช่องทางเดินรถด้วยรูปแบบที่ง่ายที่สุด คือ การตั้งสมมุติฐานว่าช่องทางเดินรถนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองที่เป็นสมการเส้นตรง สมการเส้นตรงโดยทั่วไปมีพารามิเตอร์สองตัว การใช้ประมวลผลภาพวิธีการตรวจจับเส้นตรงเช่น การใช้การแปลงแบบเฮาส์สามารถที่จะนำมาจับคู่ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองของช่องทางเดินรถได้ อย่างไรก็ตาม

การใช้แบบจำลองถนนที่เป็นสมการเส้นตรงหรือส่วนของเส้นตรงต่อ ๆ กันนั้นค่อนข้างจะจำกัดว่าถนนต้องมีรัศมีความโค้งที่มีค่ามากพอ หากถนนมีค่าความโค้งสูง การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่เป็นเส้นตรงจะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องและความผิดพลาดจากแบบจำลองที่มีค่าสูงได้

6) เส้นโค้งพาราโบลา (Parabolic curve)

การออกแบบช่องทางเดินรถโดยทั่วไปนั้นมักจะมีพื้นฐานมาจากการใช้ parabolic clotoid ดังนั้นการใช้แบบจำลองช่องทางเดินรถที่เป็นฟังก์ชันเส้นโค้งแบบพาราโบลาจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมเมื่อถนนนั้นอยู่บนระนาบที่มีความเรียบใน 3D ความโค้งของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่เป็นเส้นโค้งพาราโบลาสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.8 ค่าของความโค้งที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.8 นั้นสามารถนำไปใช้ในการคำนวณ steering input ที่เหมาะสมกับความเร็วเชิงเส้นขณะเคลื่อนที่ได้โดยอาศัยสมการจลนศาสตร์ของความเร็วซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมของวัตถุที่เคลื่อนที่ตามเส้นโค้งพาราโบลา

7) B-Snake

ในงานวิจัยของ Wang, Teoh and Shen (2004) ได้นำเสนอวิธีการที่เรียกว่า B-Snake เพื่อใช้ในการตรวจจับช่องทางเดินรถ ซึ่งมีหลักการทำงานกล่าวคือ ถนนซึ่งเป็นเส้นคู่ขนานที่ถูกส่งมาอยู่ในภาพทัศนมิติ (perspective) จะถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลอง B-Snake ซึ่งเป็นฟังก์ชัน B-spline โดยมี 3 หรือ 4 จุดควบคุม (control point) จากนั้นจะใช้วิธีการประมาณค่าจุดสุดท้ายด้วยการประมาณค่า Canny/Hough (CHEVP) เพื่อหาค่าเริ่มต้นของแบบจำลอง B-Snake ที่ใช้สำหรับในการตรวจจับช่องทางเดินรถภายใต้เวลาจริงนั้นจะใช้วิธีการ Gradient Vector Flow (GVF) เพื่อทำการหาสนามแรง (external force field) ที่จะทำการหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (minimize mean square error) ระหว่างขอบที่ได้จากภาพและแบบจำลอง B-Snake จากนั้นจึงทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่อยู่ในรูป B-Snake แบบซ้ำไปตลอดการทำงาน

2.3 แนวทางการออกแบบระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ

2.3.1 ข้อจำกัดของสิ่งแวดล้อม

การศึกษาด้านการใช้ระบบมองเห็นในการตรวจจับช่องทางเดินรถส่วนใหญ่นั้นเป็นผลการศึกษาโดยอ้างอิงรูปแบบถนนในต่างประเทศ งานวิจัยด้านการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ประสบความสำเร็จในระดับที่รถสามารถขับเคลื่อนได้โดยอัตโนมัติด้วยระบบการมองเห็นเพียงอย่างเดียวนั้นมีน้อยมาก โครงการที่มีผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจและมีการทำงานจริงในระยะทาง

ไกลนั้นมักเป็นระบบที่ประกอบเซนเซอร์อื่น ๆ นอกไปจากการใช้กล้องเพียงอย่างเดียวและที่สำคัญไปกว่านั้นการทดสอบส่วนใหญ่ที่เป็นการเดินทางบนถนนจริงมักเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถบนถนนทางหลวงหรือทางด่วนในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศในทวีปยุโรปหรือประเทศญี่ปุ่น ข้อแตกต่างของการเคลื่อนที่บนถนนทางหลวงที่ได้รับการทดสอบส่วนใหญ่คือ การที่ความเร็วของการขับมีกำหนดให้เป็นค่าคงที่ได้ในระยะทางยาว ๆ ความโค้งของถนนไม่มากนักและมีเส้นขอบหรือเครื่องหมายแบ่งเลนที่ชัดเจน ถนนทางหลวงไม่มีทางแยกหรือสัญญาณไฟจราจร รวมทั้งไม่มีบุคคลหรือสัตว์เดินข้ามถนน สิ่งที่เคลื่อนที่บนถนนมีเพียงรถคันอื่นที่นำหน้าอยู่เท่านั้น

สิ่งแวดล้อมของการทดสอบระบบมีผลมากต่อการใช้ระบบการมองเห็นในการตรวจจับถนน ป้ายสัญญาณจราจรและสิ่งกีดขวาง ในหัวข้อนี้จะเป็นการแจกแจงองค์ประกอบที่มีผลต่อการประมวลผลภาพเพื่อใช้ในระบบการมองเห็นในส่วนที่เป็นปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมภายนอกก่อนอันได้แก่

1) รูปแบบของถนน

ถนนในประเทศไทยแบ่งออกได้เป็นกลุ่มใหญ่สี่กลุ่มด้วยกันคือ

1. ถนนในเมือง
2. ถนนในชนบท
3. ถนนทางหลวง
4. ถนนทางด่วนพิเศษ

2) สภาพถนน

สภาพถนนในประเทศไทยส่วนใหญ่โดยเฉพาะถนนในเมืองและถนนในชนบทนั้นมักไม่ได้รับการบำรุงรักษาที่ดีนัก เส้นแบ่งเลน เส้นแสดงขอบถนน สัญลักษณ์ต่าง ๆ บนถนนมักไม่ได้มาตรฐานและขาดความชัดเจน ตำแหน่งการติดตั้งสัญญาณจราจรอาจไม่อยู่ในบริเวณที่ชัดเจนต่อการตรวจจับ สภาพพื้นถนนไม่เรียบเท่ากัน บางทีมีหลุมบ่อหรือเนินซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ขับขี่ได้ง่าย ถนนในชนบทส่วนใหญ่ไม่มีเส้นขอบหรือเส้นแบ่งเลน พื้นเป็นพื้นลาดยางหรือดินลูกรัง การตรวจจับช่องทางเดินรถลักษณะนี้ต้องใช้ข้อมูลด้านลายผิวสี (color texture) ร่วมกับการสร้างแบบจำลอง 3D ซึ่งเป็นเทคนิคในระดับเดียวกับระบบการมองเห็นสำหรับ off-road vehicle ที่ใช้ในการแข่งขัน DARPA Grand Challenge

สภาพของถนนทางหลวงมีความชัดเจนในเรื่องของเส้นแสดงขอบที่ดีกว่าถนนในเมือง แต่ทว่าก็มีปัญหาเรื่องพื้นถนนที่ชำรุดเป็นระยะ ๆ ทำให้การใช้วิธีการที่อ้างอิงสี อย่างเช่น การแยกส่วนสี (color segmentation) ผิดพลาดได้ง่าย ทางหลวงในประเทศไทยไม่มีขอบกันคนและสัตว์สามารถเดินตัดข้ามถนนทางหลวงได้ นอกจากนี้ยังมีการปลูกต้นไม้ตลอดทางเพื่อให้ร่มเงา ซึ่ง

เงาที่พาดผ่านบนถนนนั้นเป็นส่วนที่ทำให้การตรวจจับช่องทางเดินรถโดยใช้ระบบการมองเห็นนั้นผิดพลาดได้ง่าย

ถนนในประเทศไทยที่มีสภาพที่เหมาะสมกับการใช้ระบบมองเห็นในการตรวจจับช่องทางเดินรถนั้นก็คือทางด่วนพิเศษทางด่วนมีขอบกั้นเป็นที่ชัดเจนไม่มีคนหรือสัตว์ที่จะเดินตัดผ่านได้ ทางด่วนส่วนใหญ่มีพื้นถนนที่อยู่ในสภาพดี มีเส้นแบ่งเลนและจุดสัญลักษณ์ที่เห็นได้ชัดเจน แม้ในสถานะที่ไม่เอื้อต่อการมองเห็นเช่นเวลาฝนตก ทางด่วนส่วนใหญ่ไม่มีส่วนโค้งที่มีรัศมีแคบเกินกว่าการประมาณด้วยเส้นโค้งพาราโบลาจึงสามารถใช้แบบจำลองแบบพาราโบลา หรือ B-spline ได้ดีพอสมควร

3) สภาพแสงและสภาวะอากาศ

สภาพแสงและสภาพอากาศมีผลต่อการทำงานของระบบมองเห็นอย่างมาก วิธีการ เช่น การปรับค่าแสงหรือความเปรียบต่าง (contrast) นั้นช่วยได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ระบบการมองเห็นที่ดีจะต้องทำงานได้แม้ว่าสภาพแสงจะเปลี่ยนแปลงมากเพียงใดก็ตาม โดยทั่วไปวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหานี้คือ การเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถปรับแสงได้รวมกับการใช้วิธีการประมวลผลที่หลากหลายเพื่อรองรับสถานการณ์ที่แตกต่างกัน

4) การจราจร

การจราจรในเมืองนั้นส่วนใหญ่มักค่อนข้างหนาแน่นเกือบทุกช่วงเวลา การออกแบบระบบเพื่อให้ทำงานในเมืองได้จึงต้องแตกต่างจากการออกแบบระบบการมองเห็นเพื่อใช้ในการจับเคลื่อนบนทางหลวงหรือทางด่วนโดยสิ้นเชิงเมื่อการจราจรหนาแน่น วิธีการประมวลผลภาพต้องทำงานหนักมากขึ้นเป็นทวีคูณเพราะจำนวนวัตถุที่เกี่ยวข้องนั้นมีจำนวนมากขึ้น จุดเด่นของถนน เช่น ขอบถนนหรือเส้นแบ่งเลนที่จะใช้เพื่อการตรวจจับแนวถนนก็ถูกบดบังทำให้การตรวจจับทำได้ยากมาก การสร้างแบบจำลอง 3D ก็ยากขึ้นมากเพราะจำนวนจุดเด่นในภาพที่ต้องติดตามและลดจำนวนให้ได้มากที่สุด ทำให้มิติของปัญหาเพิ่มขึ้นมา

5) นิสัยการขับขี่ยานพาหนะและวินัยการจราจร

นิสัยการขับขี่ยานพาหนะของคนไทยนั้นทำให้การตัดสินใจโดยระบบการมองเห็นนั้นยากขึ้นมาก เนื่องจากในวิธีการต่าง ๆ ที่มีผู้นำเสนอส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า การเปลี่ยนแปลง เช่น การเปลี่ยนเลนเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก ผู้ขับขี่รถยนต์รักษาให้รถยนต์อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางเลนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสมมุติฐานเหล่านี้ไม่เป็นจริงเลยในการขับขี่ยานพาหนะบนถนนในประเทศไทยไม่ว่าจะเป็นถนนในเมืองทางหลวงหรือทางด่วนก็ตาม

6) สิ่งกีดขวางในถนน

สิ่งกีดขวางในถนนนั้นมีทั้งในส่วนที่อยู่กับที่และส่วนที่เคลื่อนที่ ถนนในประเทศไทยนั้นในบางครั้งมีสิ่งกีดขวางซึ่งบดบังการตรวจจับช่องทางเดินรถอยู่มากมาย เช่น ถังขยะ

รถที่จอดในจุดห้ามจอดรถ สิ่งกีดขวางที่เคลื่อนที่ได้ นั้นเป็นอันตรายมากกว่าไม่ว่าจะเป็นสุนัขจรจัด หรือคนข้ามถนนในส่วนที่ไม่ใช่ทางม้าลาย ซึ่งสิ่งกีดขวางเหล่านี้เป็นอุปสรรคต่อระบบการมองเห็นอย่างมากเนื่องจากส่วนใหญ่นั้นไม่สามารถคาดเดาได้

2.3.2 การเลือกกล้องและปัญหาในขั้นตอนการประมวลผลภาพ

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 ป้าย สัญญาณจราจรหรือสิ่งกีดขวางอื่น ๆ ก็จะทำให้ยากหากกล้องติดตั้งอยู่ภายในรถตำแหน่งเดียวกับระดับสายตาของผู้ขับขี่ การรับภาพก็จะมีลักษณะเดียวกับการรับภาพของมนุษย์ อย่างไรก็ตาม เลนส์ตาของมนุษย์มีการเคลื่อนที่และปรับเปลี่ยนโฟกัสได้ตลอดเวลา กล้องที่ติดตั้งในลักษณะนี้จึงจำเป็นที่จะต้องเคลื่อนไหวหรือปรับระยะโฟกัสโดยอัตโนมัติด้วยเช่นกัน ซึ่งจะเพิ่มความซับซ้อนของระบบการมองเห็นขึ้นอีกมาก

2.4 สรุป

บทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE, IEE, ScienceDirect และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะ

นักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นการตรวจจับช่องทางเดินรถและจำแนกประเภทช่องทางเดินรถด้วยกล้องเพียงตัวเดียวมาก่อน โดยทั่วไปการตรวจจับช่องทางเดินรถแบบดั้งเดิมมุ่งเน้นการใช้ GPRS มาทำการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ การทำงานด้วยหลักการนี้อาจจะไม่ได้คำนึงภาระค่าใช้จ่ายในการสิ้นเปลืองกับการใช้ GPRS ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยชิ้นนี้จึงถือกำเนิดขึ้นเพื่อแสวงหาแนวทางการออกแบบการตรวจจับช่องทางเดินรถแนวใหม่ภายใต้วัตถุประสงค์ของการลดค่าใช้จ่ายดังกล่าว

บทที่ 3

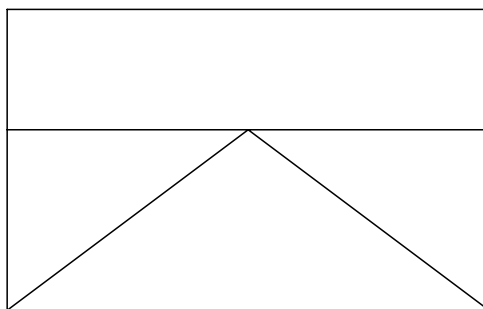
การหาโครงสร้างถนนแบบสถานะปกติ

3.1 กล่าวนำ

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการตรวจจับช่องทางเดินรถออกจากภาพสี โดยนำเสนอระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถออกจากภาพสีที่สามารถแยกประเภทช่องทางเดินรถต่าง ๆ ได้แบบอัตโนมัติโดยไม่จำเป็นต้องมีการกำหนดสถานะเริ่มต้น (initialization) และใช้กล้องเพียง 1 ตัว ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคการจำแนกประเภทและแบบจำลองการเทียบเคียงรูปแบบร่วมกันโดยแยกระบบการทำงานออกเป็น 3 ระบบด้วยกันดังนี้ ระบบที่ 1 คือ ระบบการตัดสินใจแยกแยะหาโครงสร้างถนนที่เหมาะสมกับสถานการณ์ปัจจุบัน ระบบที่ 2 คือ ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว และระบบที่ 3 คือ ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยว ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบโดยรวมของการตรวจจับช่องทางเดินรถและระบบการหาโครงสร้างถนน สำหรับระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยวและระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยวจะนำเสนอในส่วนของบทที่ 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 โดยรูปแบบของโครงสร้างถนนที่นำเสนอจะแสดงถึงโครงสร้างถนนที่อยู่ภายใต้สมมุติฐานเบื้องต้น โดยมีองค์ประกอบแต่ละส่วนเท่า ๆ กันหรือสมมาตรกัน นั่นก็คือจะอยู่ภายใต้สภาวะขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องทางเดินรถโดยไม่พิจารณาเส้นแบ่งช่องทางเดินรถตรงกลาง ซึ่งขั้นตอนการหาโครงสร้างถนนแบบในอุดมคตินี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือการหาเส้นขอบฟ้าซึ่งเป็นตัวแบ่งส่วนพื้นที่ระหว่างพื้นที่ท้องฟ้ากับพื้นที่ถนนและช่องทางเดินรถซึ่งใช้เป็นตัวแบ่งพื้นที่ระหว่างพื้นที่ถนนกับพื้นที่สิ่งแวดล้อม

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	$g_2 \geq g(x) \leq g_1$	ถนน
ระดับ 3	$0 \geq g(x) < g_2$	ต้นไม้

เมื่อ g_1 และ g_2 คือ ระดับของค่าขีดเริ่มเปลี่ยน

ตัวอย่างการแยกองค์ประกอบของโครงสร้างถนนแสดงดังในรูปที่ 3.2



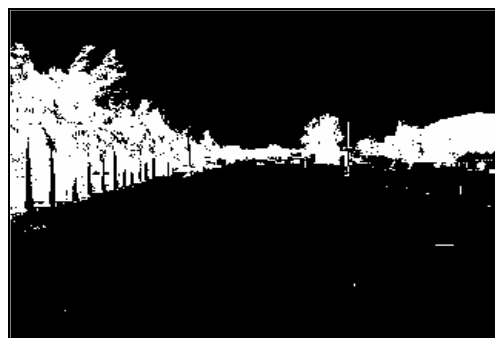
(ก) ภาพต้นแบบ



(ข) ท้องฟ้า



(ค) ถนน



(ง) ต้นไม้

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการแยกองค์ประกอบถนน

หลังจากแยกองค์ประกอบทั้ง 3 ชนิดออกมา จากนั้นพิจารณาถึงความเป็นไปได้ของบริเวณเส้นขอบฟ้าที่จะเกิดขึ้น พบว่าบริเวณเส้นขอบฟ้านั้นควรจะเกิดขึ้นในส่วนประกอบที่เป็นองค์ประกอบของต้นไม้ เนื่องจากเมื่อพิจารณาถึงรูปร่างลักษณะขององค์ประกอบพบว่าองค์ประกอบของต้นไม้จะมีลักษณะรูปร่างที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างองค์ประกอบท้องฟ้ากับถนน ดังนั้นบริเวณเส้นขอบฟ้าจึงน่าเกิดขึ้นบนองค์ประกอบของต้นไม้ โดยเส้นขอบฟ้าดังกล่าวจะให้ปริมาณค่าที่สูงในบริเวณแนวเส้นตัดขวางของภาพองค์ประกอบต้นไม้ซึ่งปริมาณค่าดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

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

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	$D_1 < D(i) < D_2$	เส้นขอบฟ้าในขณะไม่เกิดการเลียว
กรณีที่ 2	$D_3 < D(i) < D_4$	เส้นขอบฟ้าในขณะเกิดการเลียว

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

1. มีปริมาณค่าของขอบภาพสูงที่สุดตรงบริเวณแนวเส้นตัดขวางนั้น
2. เส้นขอบฟ้าที่เกิดขึ้นจะอยู่ตรงบริเวณจุดตัดหรือใกล้เคียงจุดตัดระหว่างเส้นแนว

เฉียงทางซ้ายและขวามาตัดกัน

สำหรับการหาเส้นขอบฟ้านี้สามารถแบ่งได้ตามลักษณะของโครงสร้างถนนโดยจะแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีด้วยกันคือ *กรณีที่ 1* เป็นการหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนในขณะไม่เกิดการเลียว และ *กรณีที่ 2* เป็นการหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนในขณะเกิดการเลียว ในกรณีของการหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนในขณะเกิดการเลียวนั้นจะแตกต่างจากการหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนในขณะไม่เกิดการเลียว ซึ่งอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าเส้นขอบฟ้าจะเกิดขึ้นตรงบริเวณเส้นของช่องทางเดินรถทางซ้ายและขวามาตัดกันและเงื่อนไขการมีปริมาณค่าของขอบภาพสูงที่สุดตรงบริเวณแนวเส้นตัดขวาง แต่การหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนในขณะเกิดการเลียวนั้นจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการมีปริมาณค่าของขอบภาพสูงที่สุดตรงบริเวณแนวเส้นตัดขวางเพียงอย่างเดียวเท่านั้นเป็นเพราะว่าโครงสร้างถนนในรูปแบบนี้เส้นของช่องทางเดินรถทางซ้ายและขวาจะไม่ตัดกันตรงบริเวณเส้นขอบฟ้า จุดตัดที่เกิดขึ้นสามารถหาได้โดยหลักพีชคณิตโดยการนำสมการ

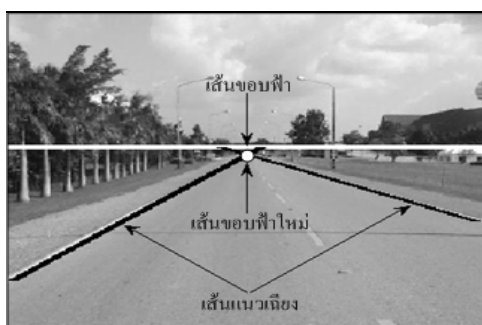
ของเส้นช่องทางเดินรถทั้งสองข้างมาพิจารณา โดยการนำสมการที่ 3.5 และ 3.6 ในหัวข้อที่ 3.5.2 ซึ่งนั่นก็คือสมการ $c_L = B_L(r_L) + M_L$ และ $c_R = B_R(r_R) + M_R$ มาพิจารณาเพื่อต้องการหาจุดตัดที่เกิดขึ้นระหว่างสมการทั้งสอง กำหนดให้ $c_L = c_R$ จะได้สมการที่ 3.2

$$B_L(r) + M_L = B_R(r) + M_R \quad (3.2)$$

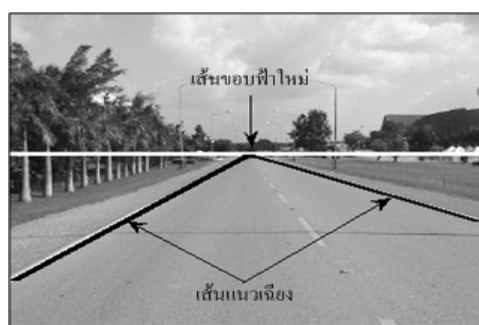
จัดรูปสมการใหม่จะได้สมการที่ 3.3

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

จุดตัดที่ได้ระหว่างสมการทั้งสอง คือ ตัวแปร r ที่แสดงในสมการที่ 3.3 ดังนั้น r คือ เส้นขอบฟ้าใหม่ โดยรูปที่ 3.3 แสดงเส้นขอบฟ้าที่ได้จากการกำหนดบริเวณความเป็นไปได้ที่จะเป็นเส้นขอบฟ้าและ ในรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นถึงเส้นขอบฟ้าใหม่ที่อยู่ภายใต้สมมุติฐานเบื้องต้นทั้ง 2 ข้อ โดยแสดงให้เห็นถึงจุดตัดที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นแนวเฉียงทางซ้ายและขวามาตัดกัน 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 ขั้นตอนต่อไปจะเป็นกระบวนการหาเส้นแนวเฉียง เส้นแนวเฉียงหรือเส้นช่องทางเดินรถเป็นอีกหนึ่งในสององค์ประกอบที่สำคัญเป็นอย่างมากสำหรับนำมาใช้ในการอธิบายโครงสร้างถนน โดยที่ความสำคัญขององค์ประกอบเส้นแนวเฉียงที่กำลังพิจารณานี้เป็นตัวที่ใช้สำหรับการแบ่งส่วนพื้นที่ถนนกับต้นไม้ ซึ่งองค์ประกอบที่ใช้ในการอธิบายโครงสร้างถนนของส่วนนี้จะมีคุณลักษณะการวางตัวเป็นแนวเส้นตรงที่มีระดับความชันต่าง ๆ กัน สำหรับการอธิบายถึงลักษณะการวางตัวของเส้นแนวเฉียงนี้จะเป็นการแสดงอยู่ในรูปคู่ลำดับ (x, c) ที่ซึ่งแสดงอยู่บนระนาบภาพเหมือนกับคู่ลำดับของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ในการอธิบายถึงรูปร่างลักษณะการวางตัวของเส้นแนวเฉียงนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องหาแบบจำลองใหม่มาใช้ในการอธิบายโดยสามารถนำแบบจำลองของช่องทางเดินรถที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.2 นี้มาประยุกต์ใช้ในการอธิบายถึงรูปร่างลักษณะการวางตัวของเส้นแนวเฉียงนี้ได้ ซึ่งกระทำได้โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ K ของ

แบบจำลองช่องทางเดินรถให้มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาถึงรูปร่างลักษณะของแบบจำลองหลังจากกำหนดพารามิเตอร์ K ให้มีค่าเป็นศูนย์แล้วก็จะได้รูปร่างลักษณะการวางตัวในแนวเส้นตรงที่ระดับความชันต่าง ๆ ได้ ซึ่งแสดงอยู่บนระนาบภาพดังแสดงในสมการที่ 3.4

$$c = B(r) + M \quad (3.4)$$

เมื่อ	c	คือ คอลัมน์ของภาพ
	r	คือ แถวของภาพ
	B	คือ สัดส่วนทิศทาง
	M	คือ สัดส่วนขนาดเซ

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

$$c_L = B_L(r_L) + M_L \quad (3.5)$$

$$c_R = B_R(r_R) + M_R \quad (3.6)$$

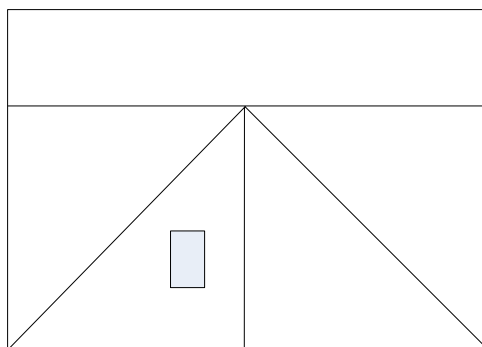
นอกจากนี้เส้นแนวเฉียงยังเป็นตัวกำหนดทิศทางลักษณะการวางตัวของโครงสร้างถนนเพื่อใช้ในการตรวจจับช่องทางเดินรถในขั้นตอนต่อไป ตัวอย่างการหาเส้นแนวเฉียงดังแสดงในรูปที่ 3.9



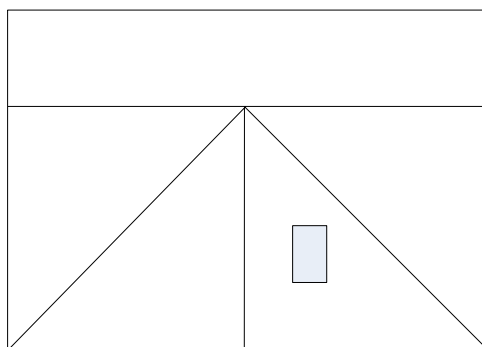
รูปที่ 3.9 การหาเส้นแนวเฉียงหรือเส้นช่องทางเดินรถ

3.4 โครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ

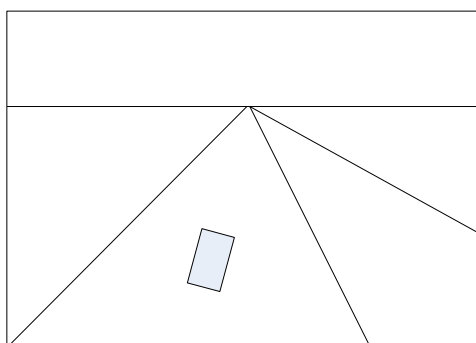
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงรูปแบบของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกโครงสร้างถนนที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ ในขั้นตอนต่อไป โครงสร้างถนนที่พบทั่วไปในแต่ละประเทศนั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะของแต่ละประเทศ เช่น การเคลื่อนที่ของยานพาหนะในประเทศทางเอเชียนั้นยานพาหนะส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ในบริเวณช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในประเทศทางยุโรปนั้นยานพาหนะส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ในบริเวณช่องทางเดินรถทางด้านขวา ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ โดยในรูปที่ 3.12 และ 3.13 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของโครงสร้างถนนที่มองผ่านทางยานพาหนะในประเทศทางเอเชียและยุโรปตามลำดับ



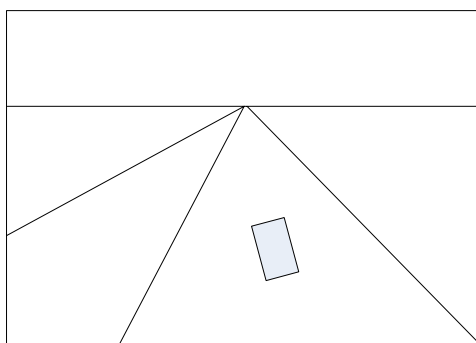
รูปที่ 3.10 การเคลื่อนที่ของยานพาหนะในประเทศทางเอเชีย (ประเทศไทย)



รูปที่ 3.11 การเคลื่อนที่ของยานพาหนะในประเทศทางยุโรป (อเมริกา)



รูปที่ 3.12 โครงสร้างถนนในมุมมองของยานพาหนะทางเอเชีย (ประเทศไทย)



รูปที่ 3.13 โครงสร้างถนนในมุมมองของยานพาหนะทางยุโรป (อเมริกา)

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้โครงสร้างถนนในมุมมองของยานพาหนะทางเอเชีย จากนั้นพิจารณาถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเมื่ออยู่ในสภาพปกติ สภาพปกติที่กล่าวถึงในที่นี้ก็คือการที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ในช่องทางเดินรถโดยที่ยังคงรักษาสภาพการเคลื่อนที่ไว้ยังตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางเดินรถหรือมีทิศทางเบี่ยงเบนไปทางซ้ายหรือขวาเพียงเล็กน้อย โดยสภาพการเคลื่อนที่ของยานพาหนะแบบนี้จะให้มุมมองของลักษณะโครงสร้างถนนออกมาอย่างหนึ่ง ซึ่งโครงสร้างถนนที่ว่านี้จะเรียกว่าโครงสร้างถนนแบบปกติ ในทางตรงกันข้ามเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยที่ยานพาหนะไม่สามารถรักษาสภาพไว้ยังตำแหน่งกึ่งกลางช่องทางเดินรถได้หรือมีทิศทางเบี่ยงเบนไปทางซ้ายหรือขวามากผิดปกติ สภาพเช่นนี้จะให้โครงสร้างถนนออกมาอย่างหนึ่ง (ยานพาหนะเกิดการเลี้ยวหรือยานพาหนะกำลังเบี่ยงเบนออกนอกช่องทางเดินรถ) ดังนั้นโครงสร้างถนนในสภาวะแบบนี้จะต้องอยู่ภายใต้สมมติฐานของการขับขี่ยานพาหนะของมนุษย์ดังนี้ (1) ยานพาหนะอยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องทางเดินรถ และ (2) ทิศทางเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

สำหรับขั้นตอนการหาโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกตินี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน กล่าวคือ

1) กำหนดช่วงพารามิเตอร์ของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพโครงสร้างถนนในสภาวะปกติ สำหรับขั้นตอนนี้จะกระทำการทดสอบโดยการนำภาพถนนแบบวิดีโออินพุตในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่เกิดการเลี้ยวใด ๆ กับในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยเกิดการเลี้ยวมาพิจารณาหาขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนของทั้ง 2 กรณีเพื่อกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในสภาวะปกติ โดยจะแบ่งการทดสอบภาพถนนแบบวิดีโอที่อัตรา 25 เฟรม/วินาที ชนิดละ 5 ภาพและแบ่งออกตามลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว การเคลื่อนที่ขณะเกิดการเลี้ยวซ้ายและการเคลื่อนที่ขณะเกิดการเลี้ยวขวา ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวแสดงได้ดังในตารางที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ จากตารางที่ 3.1 พบว่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่เกิดการเลี้ยวขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อพิจารณาจากภาพวิดีโอทั้ง 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

แบบวิถีโอ	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]	[2.5,3.5]	[60,160]

ตารางที่ 3.2 ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และเกิดการเลี้ยวซ้าย

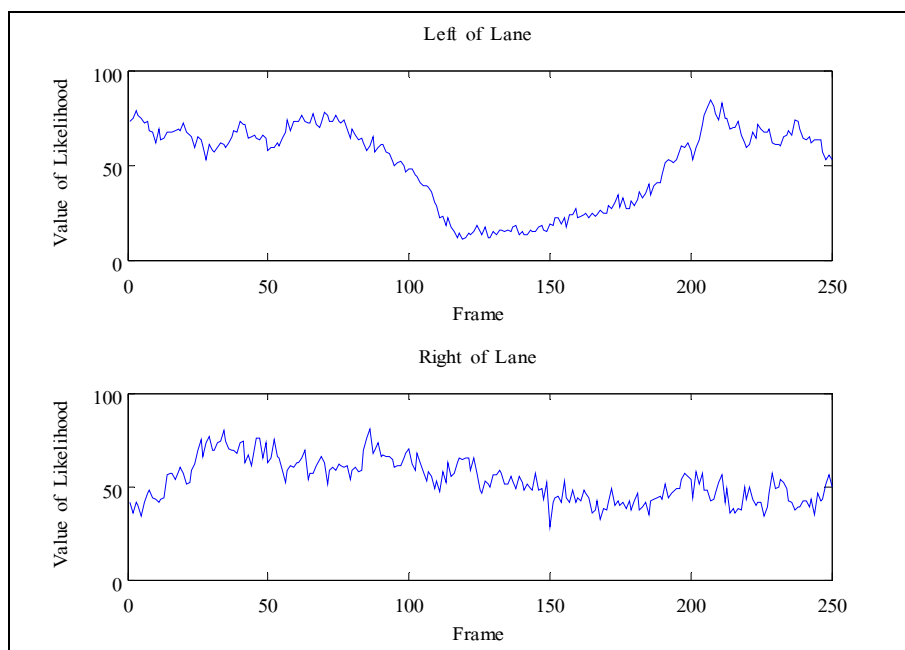
แบบวิถีโอ	ยานพาหนะเกิดการเลี้ยวซ้าย			
	B_L	M_L	B_R	M_R
1	[-2.9,-0.2]	[60,160]	[3.0,9.5]	[-100,60]
2	[-2.8,-0.5]	[80,160]	[3.8,8.5]	[-50,80]
3	[-3.0,-0.2]	[60,160]	[3.2,10.0]	[-100,60]
4	[-2.8,-0.5]	[80,160]	[3.8,8.5]	[-50,80]
5	[-3.0,-0.5]	[80,160]	[3.0,7.5]	[-50,60]

ตารางที่ 3.3 ขอบเขตพารามิเตอร์ของโครงสร้างถนนในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และเกิดการเลี้ยวขวา

แบบวิถีโอ	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 ยานพาหนะขณะไม่เกิดการเลี้ยวและยานพาหนะเกิดการเลี้ยว สำหรับวิธีการหาขนาดความเป็นไปได้ของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติกระทำได้โดยการหาค่าควรจะเป็นจากภาพวิดีโออินพุตที่ 250 เฟรมของทั้ง 2 เงื่อนไขจากนั้นเปรียบเทียบค่าควรจะเป็นที่ได้มาในแต่ละเงื่อนไขเพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ ซึ่งสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกได้เป็น 4 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและผ่านแยกทางซ้าย (ไม่เกิดการเลี้ยว) ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวาดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา

จากรูปที่ 3.14 สามารถวิเคราะห์ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทั้ง 2 ด้านได้ดังนี้

เฟรมที่ 1-100 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 1-100 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

เฟรมที่ 101-200 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่าน้อยกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

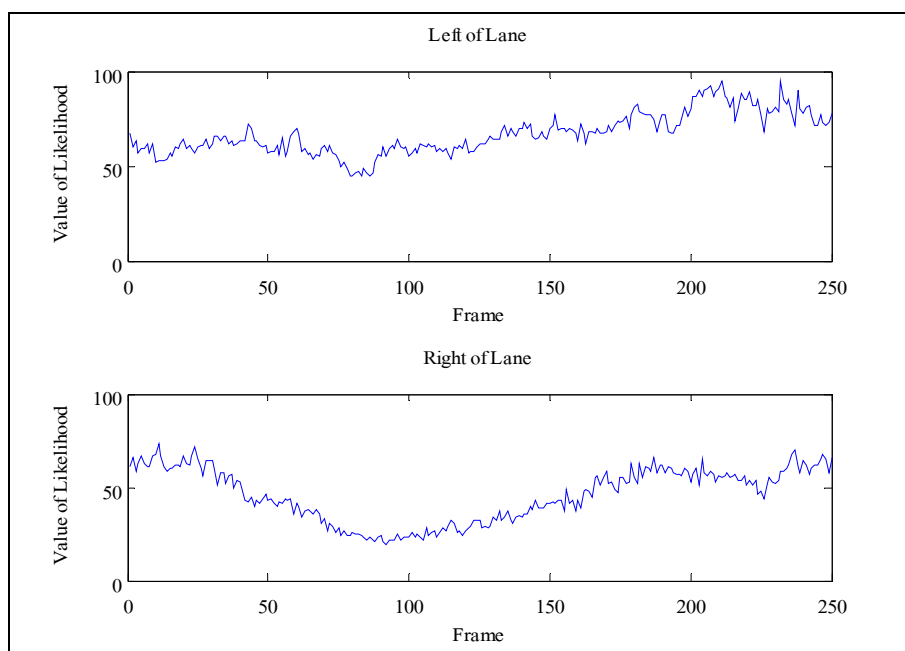
สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 101-200 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางซ้ายแต่ยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยว

เฟรมที่ 201-250 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 201-250 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

กรณีที่ 2 ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและผ่านแยกทางขวา (ไม่เกิดการเลี้ยว) ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวาดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา

จากรูปที่ 3.15 สามารถวิเคราะห์ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทั้ง 2 ด้านได้ดังนี้

เฟรมที่ 1-50 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 1-50 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

เฟรมที่ 51-150 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่าน้อยกว่า 40

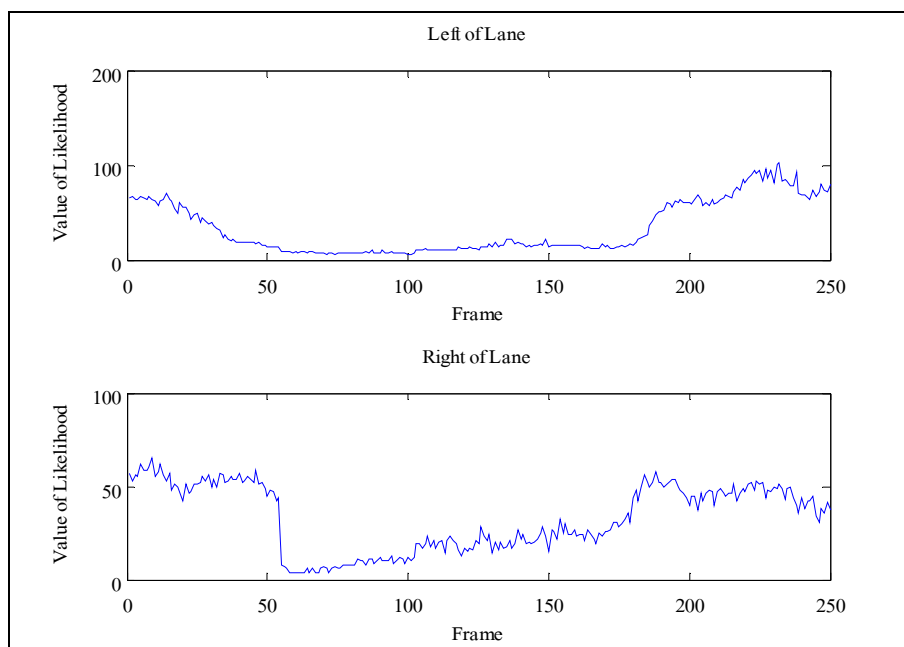
สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 51-150 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกทางขวาแต่ยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยวทางขวา

เฟรมที่ 151-250 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 151-250 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

กรณีที่ 3 ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและเลี้ยวแยกทางซ้าย (เกิดการเลี้ยว) ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวาดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา

จากรูปที่ 3.16 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 เนื่องมาจากการที่ค่าควรจะเป็นทางขวามีค่ามากกว่า 40 และค่าควรจะเป็นทางซ้ายมีแนวโน้มลดลง

เฟรมที่ 51-150 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่าน้อยกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่าน้อยกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 51-150 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือในสภาวะดังกล่าวนี้ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยพบบริเวณแยกทางซ้ายและเกิดการเลี้ยวทางซ้าย จึงทำให้ค่าควรจะเป็นทางซ้ายและขวามีค่าน้อยกว่า 40 สถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะเปลี่ยนจากสถานะการเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามาเป็นการเคลื่อนที่แบบการเลี้ยว

เฟรมที่ 151-180 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่าน้อยกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่าน้อยกว่า 40

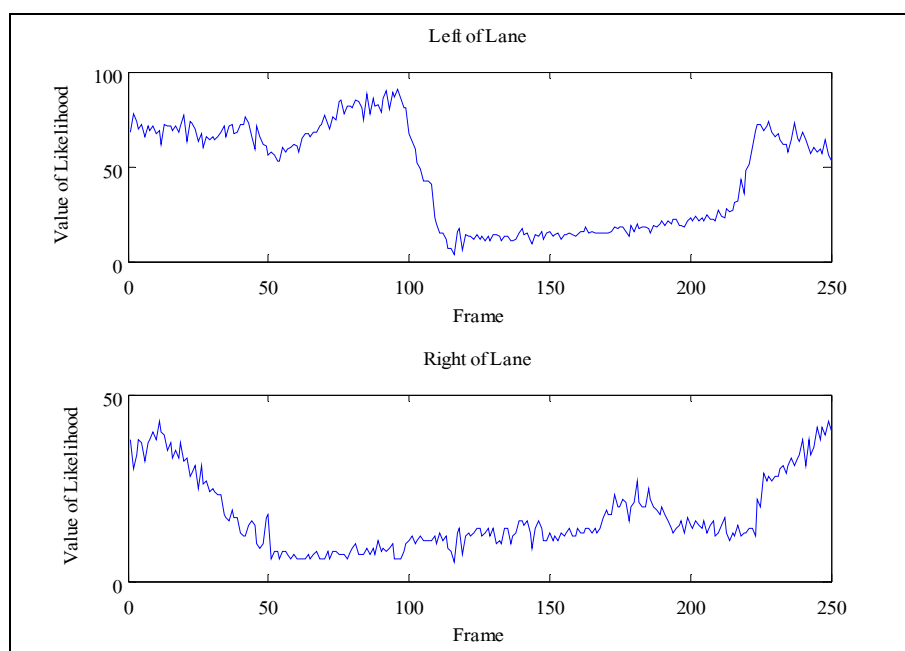
สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 151-180 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ นั่นก็คือในสภาวะดังกล่าวนี้ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยผ่านบริเวณแยกทางซ้ายและเกิดการเลี้ยวทางซ้ายแล้ว จึงทำให้ค่าควรจะเป็นทางซ้ายและขวามีค่าน้อยกว่า 40 สถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะเปลี่ยนจากการเคลื่อนที่แบบการเลี้ยวมาเป็นการเคลื่อนที่แบบตรงไปข้างหน้า เนื่องมาจากค่าควรจะเป็นทางซ้ายและขวามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เฟรมที่ 181-250 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่ามากกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 181-250 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ยานพาหนะนั้นก็คือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกหรือเกิดการเลี้ยวใด ๆ

กรณีที่ 4 ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและเลี้ยวแยกทางขวา (เกิดการเลี้ยว) ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวาแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายและขวา

จากรูปที่ 23 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 นั่นก็คือในสภาวะดังกล่าวนี้ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

โดยเริ่มพบบริเวณแยกทางขวาแต่ยังไม่ถึงแยกจึงทำให้ยังไม่เกิดการเลี้ยวใด ๆ สถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเตรียมจะเปลี่ยนจากสถานะการเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามาเป็นการเคลื่อนที่แบบการเลี้ยว เนื่องมาจากการที่ค่าควรจะเป็นทางซ้ายมีค่ามากกว่า 40 และค่าควรจะเป็นทางซ้ายมีแนวโน้มลดลง

เฟรมที่ 101-225 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่าน้อยกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่าน้อยกว่า 40

สำหรับค่าควรจะเป็นที่เกิดขึ้นในช่วงของภาพวิดีโอเฟรมที่ 101-225 จะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ นั่นก็คือในสภาวะดังกล่าวนี้ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยพบบริเวณแยกทางขวาและเกิดการเลี้ยวทางซ้าย จึงทำให้ค่าควรจะเป็นทางซ้ายและขวามีค่าน้อยกว่า 40 สถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะเปลี่ยนจากสถานะการเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามาเป็นการเคลื่อนที่แบบการเลี้ยว

เฟรมที่ 226-250 ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านซ้ายมีค่ามากกว่า 40

ค่าควรจะเป็นของเส้นขอบช่องทางเดินรถทางด้านขวามีค่าน้อยกว่า 40

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

จากผลการทดสอบของการหาค่าควรจะเป็นของโครงสร้างถนนเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละกรณี พบว่าถ้าค่าควรจะเป็นของเส้นขอบโครงสร้างถนนทางด้านใดด้านหนึ่งมีค่าควรจะเป็นมากกว่า 40 แล้ว ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่เกิดการเลี้ยวใด ๆ หรือยานพาหนะยังสามารถรักษาทิศทางเคลื่อนที่ไว้ได้ในสภาวะปกติ ดังนั้น โครงสร้างถนนที่เหมาะสมกับสภาพนี้จึงควรเป็นโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติ ในทางตรงกันข้ามถ้าเส้นขอบของโครงสร้างถนนทั้ง 2 ด้านมีค่าควรจะเป็นน้อยกว่า 40 แล้ว ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ที่เป็นแบบการเลี้ยวหรือยานพาหนะไม่สามารถรักษาการเคลื่อนที่ไว้ยังกึ่งกลางช่องทางเดินรถได้ ดังนั้น โครงสร้างถนนที่เหมาะสมควรจะเป็นโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว 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

3.5 สรุป

โครงสร้างถนนแบ่งออกได้เป็น 2 สภาวะด้วยกันคือ โครงสร้างถนนขณะยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยวและโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว ซึ่งการตัดสินใจเลือกโครงสร้างถนนที่เหมาะสมกับสภาวะดังกล่าวนี้จะใช้ความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติกับโครงสร้างถนนจริงเป็นตัวตัดสินใจเพื่อนำไปใช้ในระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 4

ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ

4.1 กล่าวนำ

จากบทที่ 3 ที่ได้กล่าวถึงการหาโครงสร้างถนนซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับนำไปใช้เป็นอินพุตของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ ตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้วนั้นที่ว่าโครงสร้างถนนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 สถานะด้วยกัน คือ โครงสร้างถนนขณะยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยว และโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว จากรูปแบบโครงสร้างถนนที่ได้ไว้แล้วจึงทำให้ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถแบ่งได้เป็น 2 ระบบเช่นกัน นั่นก็คือการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะขณะไม่เกิดการเลี้ยว และการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะขณะเกิดการเลี้ยว สำหรับการทำงานของทั้ง 2 ระบบนี้จะเป็นการบอกถึงวิธีการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยที่ยังรักษาทิศทางของยานพาหนะไว้ได้ และไม่สามารถรักษาทิศทางของยานพาหนะได้ ขั้นตอนการทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถที่น่าเสนอในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ การหาโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว การจำแนกประเภทช่องทางทางเดินรถ และการตามรอยช่องทางเดินรถ รายละเอียดดังกล่าวแสดงในหัวข้อถัดไป

4.2 การทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ

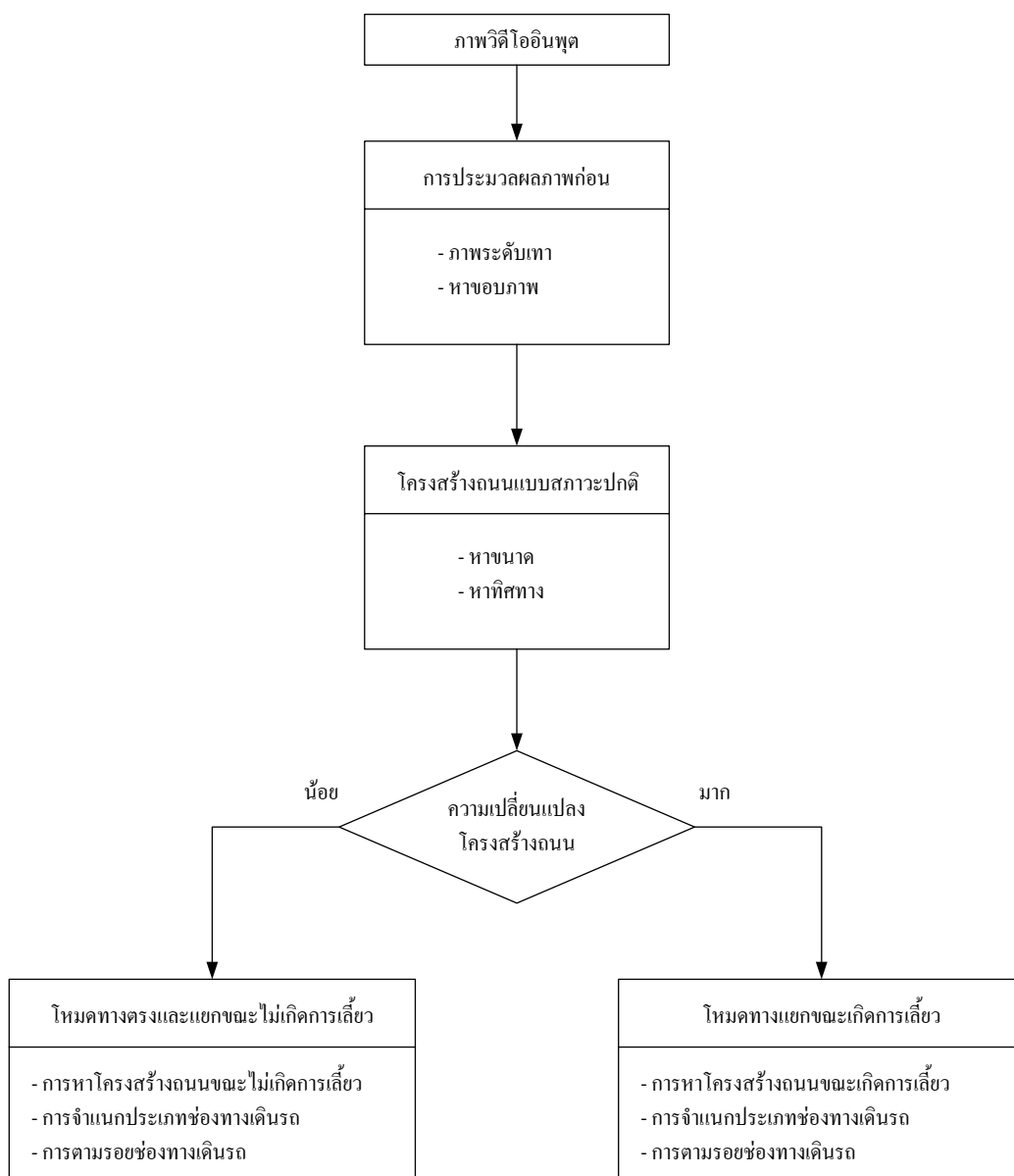
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการสรุปการทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถโดยสามารถสรุปเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ (ดูในรูปที่ 4.1)

ขั้นตอนที่ 1 รับภาพวิดีโออินพุตจากกล้อง CCD โดยภาพวิดีโอที่รับมาจากกล้องนั้นจะเป็นภาพสี

ขั้นตอนที่ 2 นำภาพวิดีโออินพุตที่ได้มาผ่านกระบวนการประมวลผลก่อน โดยนำภาพวิดีโออินพุตดังกล่าวมาที่เป็นภาพสีมาแปลงให้เป็นภาพระดับเทา จากนั้นนำภาพระดับเทาที่ได้ผ่านกระบวนการหาขอบภาพ

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดโครงสร้างถนนแบบปกติเพื่อนำไปใช้เป็นข้อกำหนดในการหาโครงสร้างถนนที่เหมาะสมกับสภาพของถนนที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างถนนแบบปกติกับสภาพถนนจริงที่เกิดขึ้น โดยถ้าความเปลี่ยนแปลงโครงสร้างถนนแบบปกติมีค่าน้อยแล้วโครงสร้างถนนที่ได้จะเป็นโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยวจากนั้นจึงทำการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยวและถ้าความเปลี่ยนแปลงโครงสร้างถนนแบบปกติมีค่ามากแล้วโครงสร้างถนนที่ได้จะเป็นโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว จากนั้นจึงทำการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเกิดการเลี้ยว



รูปที่ 4.1 แผนผังสรุปการทำงานของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ

4.3 แบบจำลองช่องทางเดินรถ

รูปแบบของถนนที่พบทั่วไปนั้นจะมีลักษณะของช่องทางเดินรถที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะของประเภทช่องทางเดินรถ เช่น ช่องทางเดินรถที่มีลักษณะเป็นทางตรง ทางโค้ง และทางแยก จากรูปร่างลักษณะของช่องทางเดินรถในแต่ละประเภทนั้นมนุษย์สามารถแยกแยะรูปร่างลักษณะของช่องทางเดินรถได้ด้วยการรับภาพถนนจากดวงตาทั้ง 2 ข้าง จากนั้นนำภาพถนนที่ได้ไปยังสมองส่วนที่ใช้สำหรับการแยกแยะ ซึ่งผลที่ได้จะให้ความรู้ถึงรูปร่างลักษณะของช่องทางเดินรถนั้นมีรูปร่างเป็นเส้นตรงและเส้นโค้ง แต่สำหรับในระบบการมองเห็นนั้นจะพบปัญหาคือ จะใช้อะไรเป็นตัวอธิบายลักษณะรูปร่างทางกายภาพของช่องทางเดินรถนั้น สำหรับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการอธิบายลักษณะรูปร่างทางกายภาพของช่องทางเดินรถ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เลือกนำมาใช้เป็นแบบจำลองของช่องทางเดินรถจะเลือกใช้เป็นสมการโพลีโนเมียลอันดับ 2 ซึ่งการอธิบายลักษณะทางกายภาพของช่องทางเดินรถนี้จะอธิบายในสมมุติฐานเบื้องต้นดังนี้

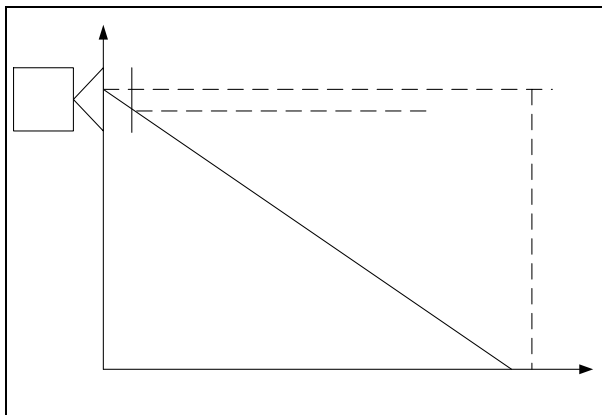
1. เส้นขอบถนนจะขนานกันอยู่ในระนาบพื้นดิน
2. ถนนเรียบ

สำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูลภาพที่ใช้ในการตรวจจับช่องทางเดินรถจะทำการติดตั้งกล้องไว้บนยานพาหนะโดยใช้กล้อง 1 ตัวที่มีความสูง 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)

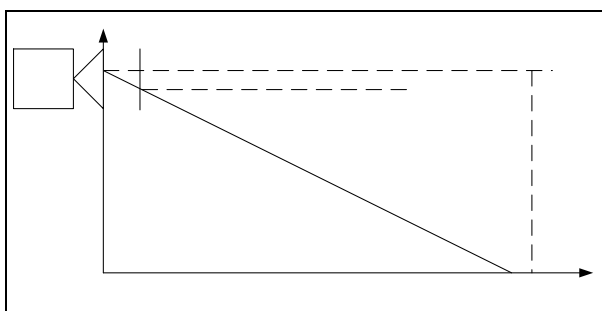
$$x = \frac{1}{2}ky^2 + my + b \quad (4.1)$$

เมื่อ	k	คือ ตัวกำหนดความโค้ง (curvature)
	m	คือ ตัวกำหนดทิศทาง (orientation)
	b	คือ ตัวขจัดเซช (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

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

เมื่อ	f	คือ ความยาวโฟกัส
	h	คือ ความสูงกล้องเทียบกับพื้นดิน
	d	คือ ระยะของจุดในระนาบภาพ

นำสมการที่ 4.2 มาแทนลงในสมการที่ 4.1 เพื่อหาความสัมพันธ์รูปร่างของช่องทางเดินรถเมื่ออยู่บนระนาบภาพจะได้ดังสมการที่ 4.3

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

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

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

เมื่อ	K	คือ สัดส่วนความโค้ง
	B	คือ สัดส่วนทิศทาง
	M	คือ สัดส่วนขนาดเขย

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

จะสามารถครอบคลุมลักษณะทางกายภาพของช่องทางเดินรถได้ทั้งหมดพบว่าขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละตัวจะอยู่ในช่วงดังต่อไปนี้

พารามิเตอร์

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

โดยที่ พารามิเตอร์ K มีขนาดเพิ่มขึ้นทีละ 50 (สำหรับการทดสอบ)

พารามิเตอร์ B มีขนาดเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 (สำหรับการทดสอบ)

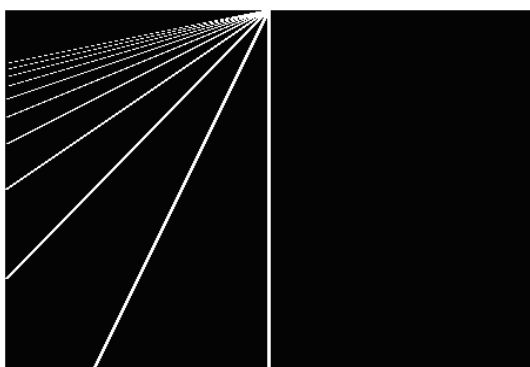
พารามิเตอร์ M มีขนาดเพิ่มขึ้นทีละ 50 (สำหรับการทดสอบ)



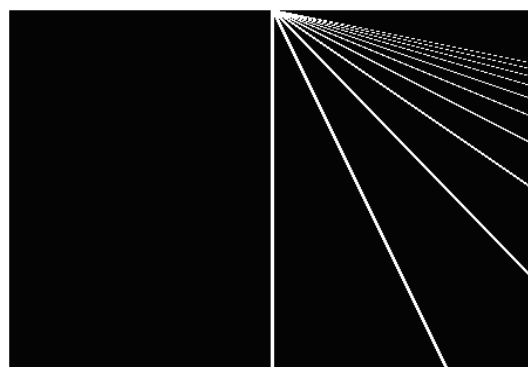
รูปที่ 4.4 $K = 0$ ถึง -600 , $B = -0.1$ และ $M = 200$



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



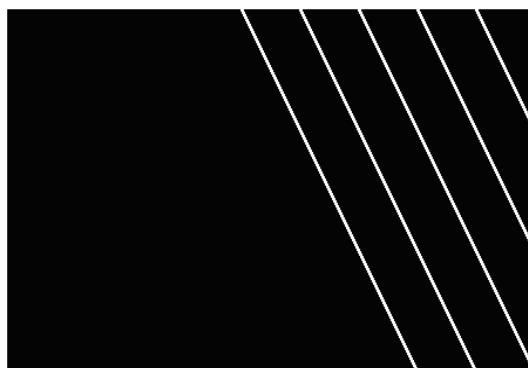
รูปที่ 4.6 $K = 0$, $B = -0.5$ ถึง -5.0 และ $M = 225$



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 ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยวและระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยว โดยในแต่ละระบบนั้นจะแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การหาโครงสร้างถนน การจำแนกประเภทของช่องทางเดินรถและการตามรอยช่องทางเดินรถ รายละเอียดการทำงานดังกล่าวจะแสดงในลำดับต่อไป

4.4.1 โครงสร้างถนน

โครงสร้างถนนของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะแบ่งออกตามสถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ โดยสามารถแบ่งได้เป็นโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยวและขณะเกิดการเลี้ยว ซึ่งการอธิบายลักษณะการทำงานของการทำงานของการหาโครงสร้างถนนดังกล่าวนี้จะพิจารณาตามสถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ โดยรายละเอียดต่าง ๆ จะแสดงในลำดับต่อไป

1) โครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการหาโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว สำหรับโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยวนี้จะแตกต่างกับโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวในแง่ของช่วงขอบเขตพารามิเตอร์ ในหัวข้อที่ 3.6 ได้กล่าวถึงวิธีการแยกภาพอินพุตถนนที่ได้รับมาเพื่อพิจารณาถึงรูปแบบของโครงสร้างถนนที่เหมาะสมกับภาพอินพุตถนนว่าควรจะเป็นโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยวหรือโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว โดยใช้วิธีการหาความแตกต่างโครงสร้างถนน

แบบสภาวะปกติ (ที่กำหนดขึ้นตามสมมติฐานของการเคลื่อนที่ยานพาหนะแบบปกติ) กับโครงสร้างถนนจริงในภาพว่าแตกต่างกันเล็กน้อยเพียงใด ซึ่งถ้าโครงสร้างถนนมีความแตกต่างกันมากจะทำให้ค่าควรจะเป็นของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติมีค่าน้อยกว่าที่กำหนด ดังนั้นโครงสร้างถนนที่เหมาะสมสำหรับในกรณีนี้สมควรจะเป็นโครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยว ในทางตรงข้ามถ้าค่าควรจะเป็นของโครงสร้างถนนแบบสภาวะปกติมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด โครงสร้างถนนที่เหมาะสมควรจะเป็นโครงสร้างถนนขณะไม่เกิดการเลี้ยว 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



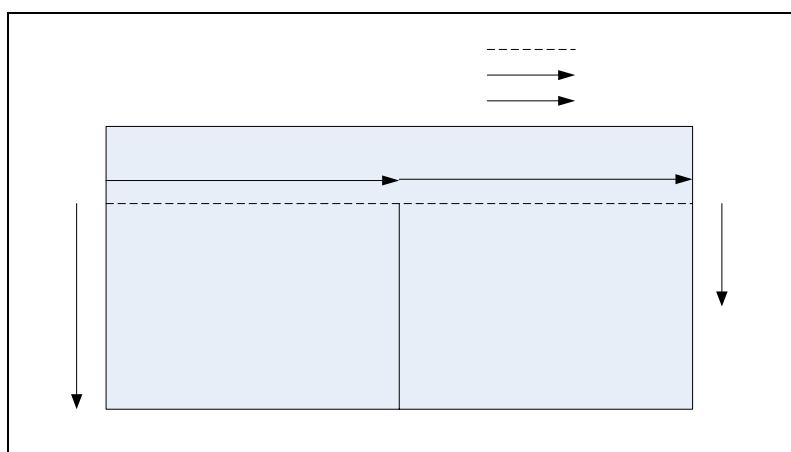
รูปที่ 4.12 โครงสร้างถนนขณะเกิดการเลี้ยวขวา

4.4.2 การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ

หลังจากผ่านกระบวนการการหาโครงสร้างถนนรูปแบบต่าง ๆ ในขั้นต้นจะพบปัญหาที่ตามมาอีกอย่างหนึ่ง 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

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

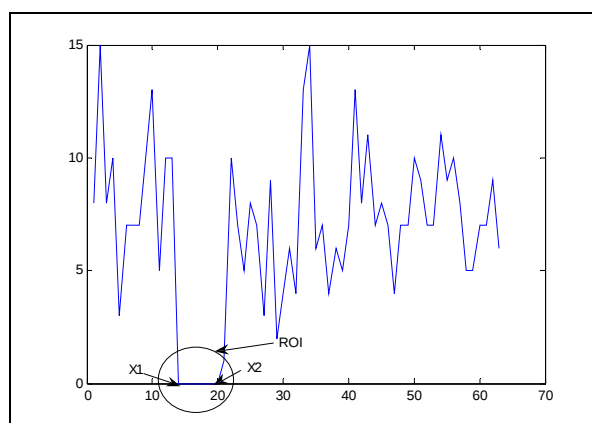
$$F_2(i_2) = B(i_2, c_{Ri2}-1) + B(i_2, c_{Ri2}) + B(i_2, c_{Ri2}+1) \quad \text{เมื่อ } i_2 = 1, \dots, n_2 \quad (4.6)$$

เมื่อ F_1	คือ ผลรวมข้อมูลโครงสร้างถนนทางด้านซ้ายของภาพแถวที่ i_1
F_2	คือ ผลรวมข้อมูลโครงสร้างถนนทางด้านขวาของภาพแถวที่ i_2
$B(i,c)$	คือ ขอบภาพมีค่า 0,1

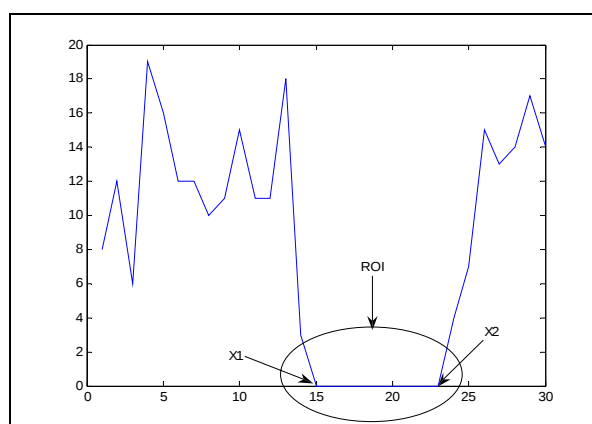
ขั้นตอนที่ 3 จะเป็นการวิเคราะห์หาประเภทของช่องทางเดินรถ โดยเลือกพิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากสมการที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งจากฟังก์ชัน F_1 และ F_2 เมื่อนำข้อมูลของโครงสร้างถนนที่ได้ในแต่ละกรณีมาวิเคราะห์ถึงความสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพพบว่าเมื่อบริเวณส่วนที่มีค่าผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนมีค่าเป็นศูนย์แล้วนั้นบริเวณดังกล่าวจะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพกับประเภทของถนนกรณีที่เป็นทางแยก ในทางตรงกันข้ามบริเวณส่วนที่มีค่าผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนมีค่าไม่เป็นศูนย์แล้วนั้นบริเวณดังกล่าวจะสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพกับประเภทของถนนกรณีที่เป็นทางตรงหรือทางโค้ง โดยในรูปที่ 4.14 แสดงภาพต้นแบบและในรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงผลรวมข้อมูลโครงสร้างถนนที่สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพในส่วนทางด้านซ้ายและขวาตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสามารถให้คำจำกัดความได้ว่า “ถ้าบริเวณที่มีผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนมีค่าเป็นศูนย์แล้วบริเวณนั้นจะมีลักษณะทางกายภาพนั้นสอดคล้องกับทางแยก (ROD) ในทางตรงกันข้ามถ้าบริเวณที่มีผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนมีค่าไม่เป็นศูนย์แล้วบริเวณนั้นจะมีลักษณะทางกายภาพนั้นสอดคล้องกับทางตรงหรือทางโค้ง” จากคำจำกัดความดังกล่าวเราสามารถนำมาประยุกต์สำหรับการหาตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการเกิดเป็นทางแยกของถนนได้ นั่นก็คือถ้าบริเวณที่เป็นจุดใด ๆ ของผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนที่เปลี่ยนจากค่าใด ๆ มาเป็นศูนย์ (x_1) หรือบริเวณที่เป็นจุดใด ๆ ของผลรวมของข้อมูลโครงสร้างถนนที่เปลี่ยนจากศูนย์มาเป็นค่าใด ๆ (x_2) แล้วบริเวณจุดนั้น (x_1, x_2) จะเป็นตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการเกิดเป็นทางแยกของถนน ผลการทดสอบปรากฏว่าภาพของช่องทางเดินรถนั้นจะมีตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการเกิดเป็นแยกของถนนส่วนทางด้านซ้ายและขวานั้นมีค่าเป็นไปได้ที่เหมาะสมมากที่สุดเพียงด้านละ 2 จุดเท่านั้น เนื่องจากพิจารณาทางแยกที่ใกล้ที่สุดส่วนทางแยกที่ไกลออกไปไม่พิจารณา (กรณีช่องทางเดินรถด้านใดด้านหนึ่งมีทางแยกมากกว่าหนึ่งเกิดขึ้นในภาพ) เพราะว่าโดยทั่วไปการเลี้ยวของยานพาหนะกระทำโดยการพิจารณาจากทางแยกที่ใกล้ที่สุดก่อน ขณะที่ส่วนของช่องทางเดินรถที่เป็นทางตรงนั้นจะไม่มีตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการเกิดเป็นทางแยกของถนน และส่วนของช่องทางเดินรถที่เป็นทางแยกนั้นจะมีตำแหน่งจุดเริ่มต้นของการเกิดเป็นแยกของถนนเป็น 1 จุด หรือ 2 จุดเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.17 นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกประเภทของช่องทางเดินรถได้ดังตารางที่ 4.1



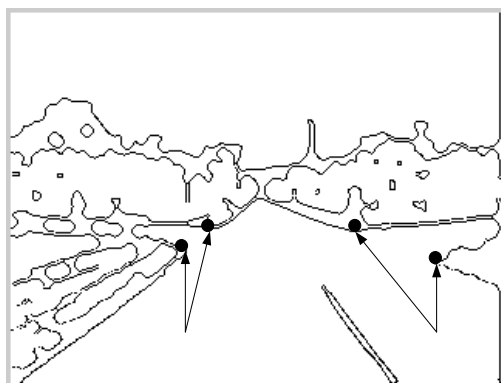
รูปที่ 4.14 ภาพต้นแบบ



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 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถบริเวณทางแยกของ
ช่องทางเดินรถที่ระยะต่าง ๆ จำนวน 125 ภาพในสภาวะสภาพแวดล้อมปกติ

ชนิดภาพ	ระยะห่าง (เมตร)	จำนวนเฟรม ถูกต้อง	จำนวนเฟรม ผิดพลาด	เปอร์เซ็นต์ ความถูกต้อง
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

หมายเหตุ: 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 ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการหาแบบจำลองช่องทางเดินรถที่เหมาะสมกับประเภทของช่องทางเดินรถที่ได้หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการตามรอยช่องทางเดินรถ โดยแบบจำลองช่องทางเดินรถที่นำมาใช้อธิบายลักษณะทางกายภาพของช่องทางเดินรถจะใช้แบบจำลองช่องทางเดินรถที่ได้หาไว้ในหัวข้อที่ 4.3 แสดงดังสมการที่ 4.7 สำหรับขั้นตอนในการตามรอยช่องทางเดินรถมีด้วยกัน 2 ขั้นตอน คือ การสร้างเมตริกซ์พารามิเตอร์ และการคำนวณหาค่าควรจะเป็นที่มากที่สุดของแบบจำลองช่องทางเดินรถที่เหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$c = K \frac{1}{r} + B \times r + M \quad (4.7)$$

เมื่อ	K	คือ สัดส่วนความโค้ง
	B	คือ สัดส่วนทิศทาง
	M	คือ สัดส่วนขนาด
	r	คือ แถวของภาพ
	c	คือ คอลัมน์ของภาพ

1) การสร้างเมตริกซ์พารามิเตอร์

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

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

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

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

เมื่อ	m	คือ ขนาดแถวของภาพ
	v	คือ เส้นขอบฟ้า
	$B(r, c)$	คือ ขอบภาพมีค่า 0, 1

ฟังก์ชันค่าควรจะเป็นสูงสุดในการค้นหาค่าพารามิเตอร์

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

เมื่อ	$n_{L,R}$	คือ จำนวนขนาดของเมตริกพารามิเตอร์ซ้ายและขวา
-------	-----------	---

4.5 ผลการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถ

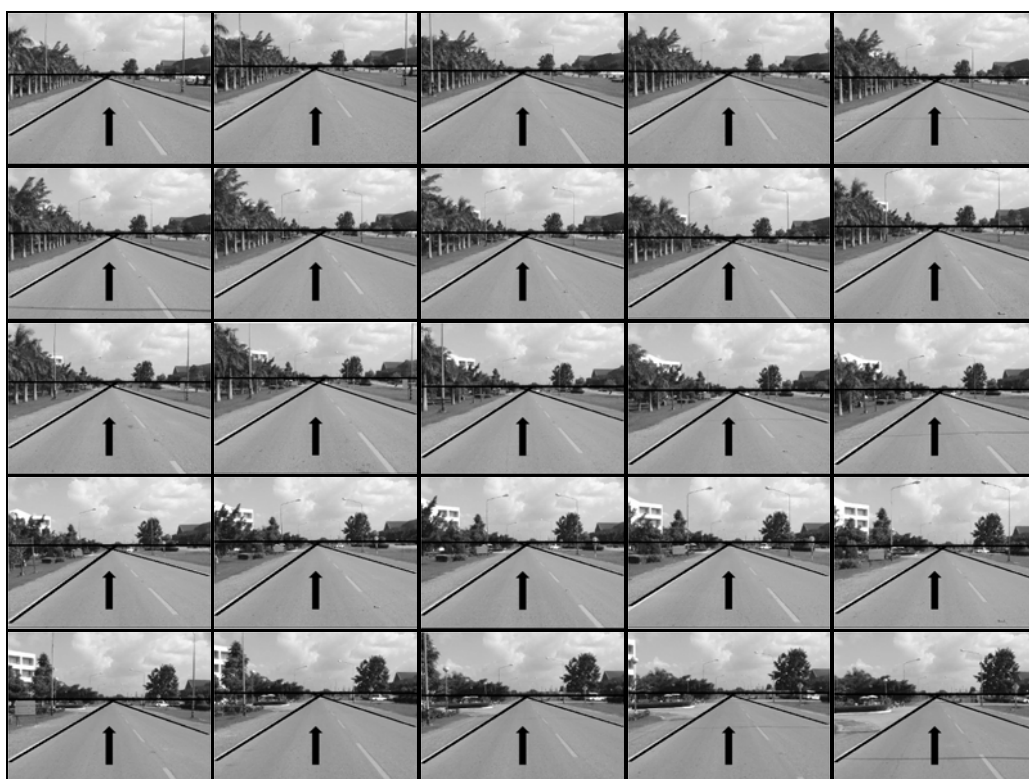
จากหัวข้อที่ผ่านมาทั้งหมดทำให้ทราบรายละเอียดของระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถของวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งผลการทดสอบระบบและประสิทธิภาพของระบบไปบ้างแล้ว ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดสอบระบบในกรณีที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยวและการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.5.1 การตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า ขณะไม่เกิดการเลี้ยว

ในการทดสอบระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยวนี้จะทดสอบโดยการแบ่งตามประเภทของช่องทางเดินรถแล้วเปรียบเทียบค่าความถูกต้องกับขนาดวิดีโอที่ 250 เฟรม ซึ่งระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้

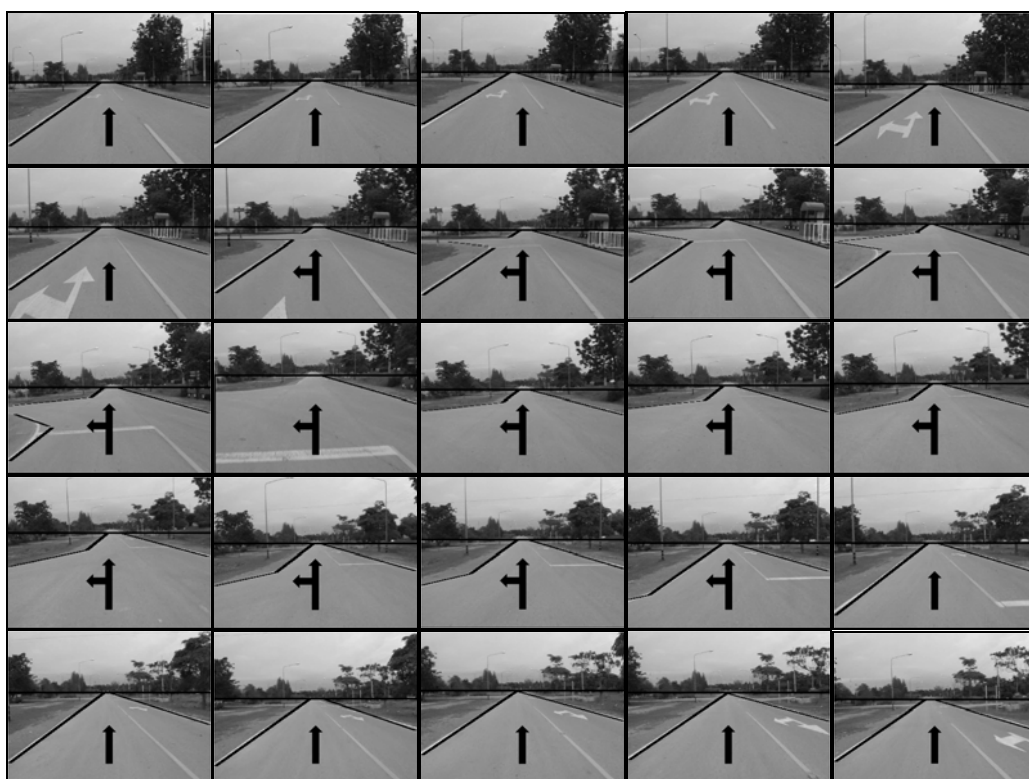
สามารถปรับขนาดของแบบจำลองช่องทางเดินรถได้อัตโนมัติ โดยแต่ละเฟรมจะทำการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถจากภาพที่มีช่องทางเดินรถอยู่ ซึ่งภาพที่ใช้มีขนาด 240x320 จุดภาพ สำหรับการตรวจจับช่องทางเดินรถในส่วนนี้แบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกใด ๆ ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกใด ๆ ในการทดสอบนี้จะเลือกผลที่ได้จากการทดสอบมาแสดงให้เห็นถึงการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ละ 10 เฟรมเริ่มจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 4.18 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะปกติว่ามีขีดความสามารถมากน้อยเพียงใดของการตรวจจับช่องทางเดินรถในลักษณะช่องทางเดินรถนี้ ซึ่งถ้าหากประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถกรณีดังกล่าวนี้มีค่าน้อยแล้วนั้นจะเป็นไม่ได้เลยที่นำอัลกอริทึมนี้ไปใช้ทดสอบในกรณีต่อไปโดยแสดงให้เห็นตั้งแต่เฟรมที่ 10-250 จากผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 4.3



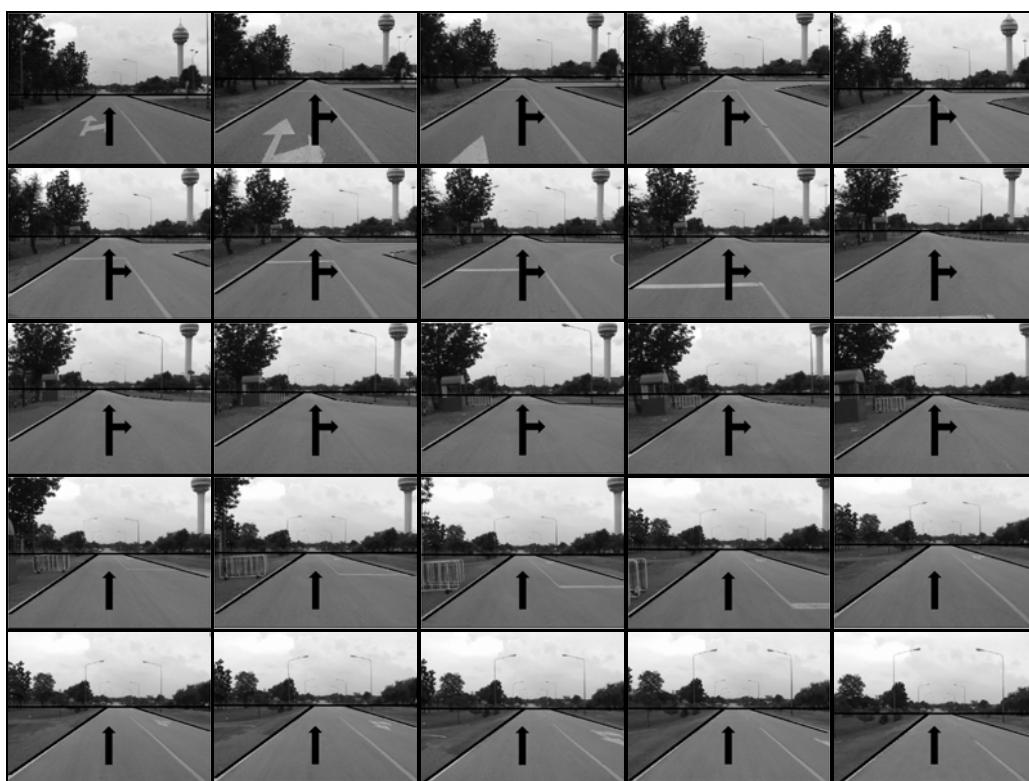
รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยไม่ผ่านแยกใด ๆ

กลุ่มที่ 2 ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางซ้าย ในกลุ่มนี้จะเป็น การทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยผ่านแยก ทางซ้าย โดยยานพาหนะยังคงรักษาการเคลื่อนที่ไว้ยังตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางเดินรถถึงแม้ว่า ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ถึงแยกทางซ้ายก็ตาม ในการทดสอบนี้จะเลือกผลที่ได้จากการทดสอบมาแสดง ให้เห็นถึงการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ละ 10 เฟรมเริ่มจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงใน รูปที่ 4.19 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถที่ เพิ่มขึ้นของการตรวจจับช่องทางเดินรถที่แตกต่างจากเดิม ซึ่งในเฟรมที่ 10-60 เป็นการแสดงการ ตรวจจับช่องทางเดินที่มีลักษณะเป็นทางตรงจากนั้นลักษณะช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมา เป็นแยกทางซ้ายซึ่งแสดงให้เห็นในเฟรมที่ 60 จากนั้นลักษณะของช่องทางเดินรถจะเป็นแยกทางซ้าย ต่อไปเรื่อย ๆ ตั้งแต่เฟรมที่ 70-140 จนกระทั่งเมื่อถึงประมาณเฟรมที่ 150 ลักษณะของช่องทางเดินรถ จะเปลี่ยนจากแยกทางซ้ายมาเป็นทางตรงอีกครั้งหนึ่งจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบการ ตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านแยกทางซ้ายนั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับ ลดลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยยังมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงถึง 92 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 4.3



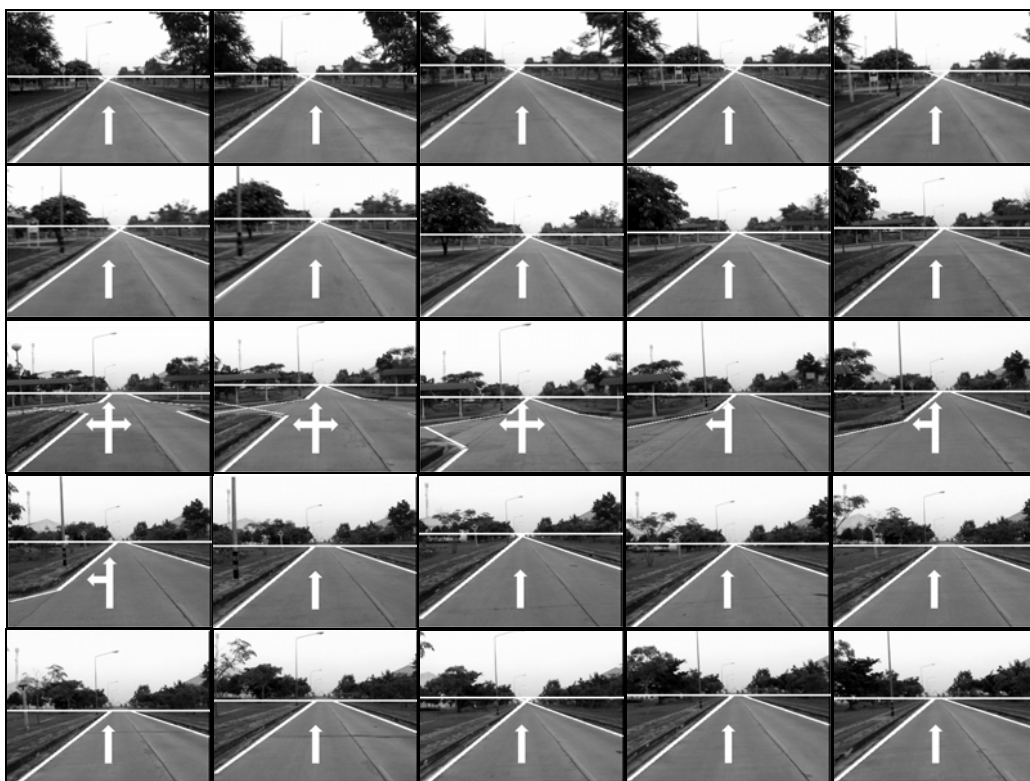
รูปที่ 4.19 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยผ่านแยกทางซ้าย

กลุ่มที่ 3 ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางขวา ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางขวา โดยยานพาหนะยังคงรักษาการเคลื่อนที่ไว้ยังตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางเดินรถถึงแม้ว่ายานพาหนะจะเคลื่อนที่ถึงแยกทางขวาก็ตาม ในการทดสอบนี้ได้เลือกผลการทดสอบมาแสดงให้เห็นถึงการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ละ 10 เฟรมเริ่มจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 4.20 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถที่เพิ่มขึ้นของการตรวจจับช่องทางเดินรถที่แตกต่างจากเดิม ซึ่งในเฟรมที่ 10 เป็นการแสดงการตรวจจับช่องทางเดินที่มีลักษณะเป็นทางตรงจากนั้นลักษณะช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมาเป็นแยกทางขวาซึ่งแสดงให้เห็นในเฟรมที่ 20 จากนั้นลักษณะของช่องทางเดินรถจะเป็นแยกทางขวาต่อไปเรื่อย ๆ ตั้งแต่เฟรมที่ 20-150 จนกระทั่งเมื่อถึงประมาณเฟรมที่ 160 ลักษณะของช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากแยกทางขวามาเป็นทางตรงอีกครั้งหนึ่งจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านแยกทางขวานั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับลดลงไปเพียงเล็กน้อย โดยยังคงให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงถึง 92.8 เปอร์เซนต์ ดังในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.20 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางขวา

กลุ่มที่ 4 ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าโดยผ่านแยกทางซ้ายและขวา (สี่แยก) ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสถานะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยผ่านแยกสี่แยก โดยยานพาหนะยังคงรักษาการเคลื่อนที่ไว้ยังตำแหน่งกึ่งกลางของช่องทางเดินรถ ถึงแม้ว่ายานพาหนะจะเคลื่อนที่ถึงสี่แยกก็ตาม ในการทดสอบนี้จะเลือกผลที่ได้จากการทดสอบมา แสดงให้เห็นถึงการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ละ 10 เฟรมเริ่มจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 4.21 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถที่เพิ่มขึ้นของการตรวจจับช่องทางเดินรถที่แตกต่างจากเดิม ซึ่งในเฟรมที่ 10-100 เป็นการแสดงการตรวจจับช่องทางเดินที่มีลักษณะเป็นทางตรงจากนั้นลักษณะช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมาเป็นสี่แยกซึ่งแสดงให้เห็นในเฟรมที่ 110 จากนั้นลักษณะของช่องทางเดินรถนี้จะเป็นสี่แยกต่อไปเรื่อย ๆ ตั้งแต่เฟรมที่ 110-160 จนกระทั่งเมื่อถึงประมาณเฟรมที่ 170 ลักษณะของช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากสี่แยกมาเป็นทางตรงอีกครั้งหนึ่งจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านสี่แยกนั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับลดลงไม่มากนัก โดยยังมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงถึง 88 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยผ่านแยกทางซ้ายและขวา

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการตามรอยช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่
ตรงไปข้างหน้าโดยไม่เกิดการเลี้ยวภายใต้สภาพแวดล้อมปกติของทั้ง 4 กรณี

ชนิดภาพ	ข้อมูลภาพ ชุดที่	จำนวนเฟรม ถูกต้อง	จำนวนเฟรม ผิดพลาด	เปอร์เซ็นต์ ความถูกต้อง
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
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

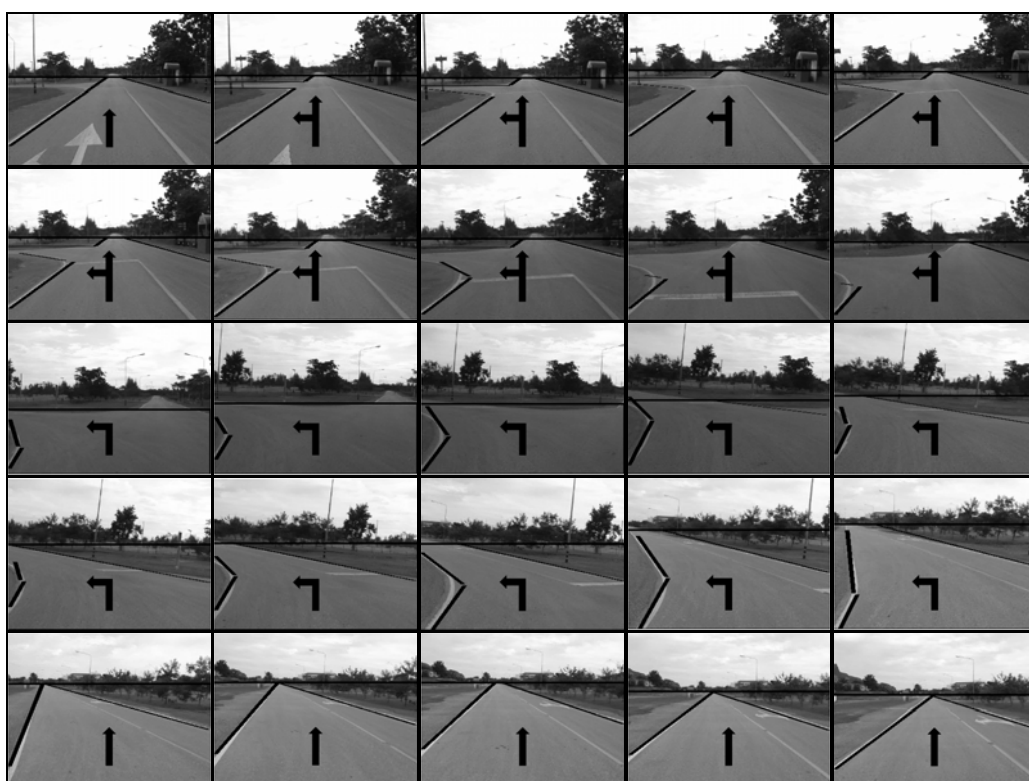
หมายเหตุ : สภาพแวดล้อมปกติ หมายถึง สภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นตรงบริเวณเส้นขอบถนน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเส้นขอบถนน เช่น เส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง เส้นขอบถนน มีเงาผาดผ่าน เส้นขอบถนนมีสิ่งกีดขวาง และเส้นขอบถนนเป็นเส้นประ

4.5.2 การตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า

ขณะเกิดการเลี้ยว

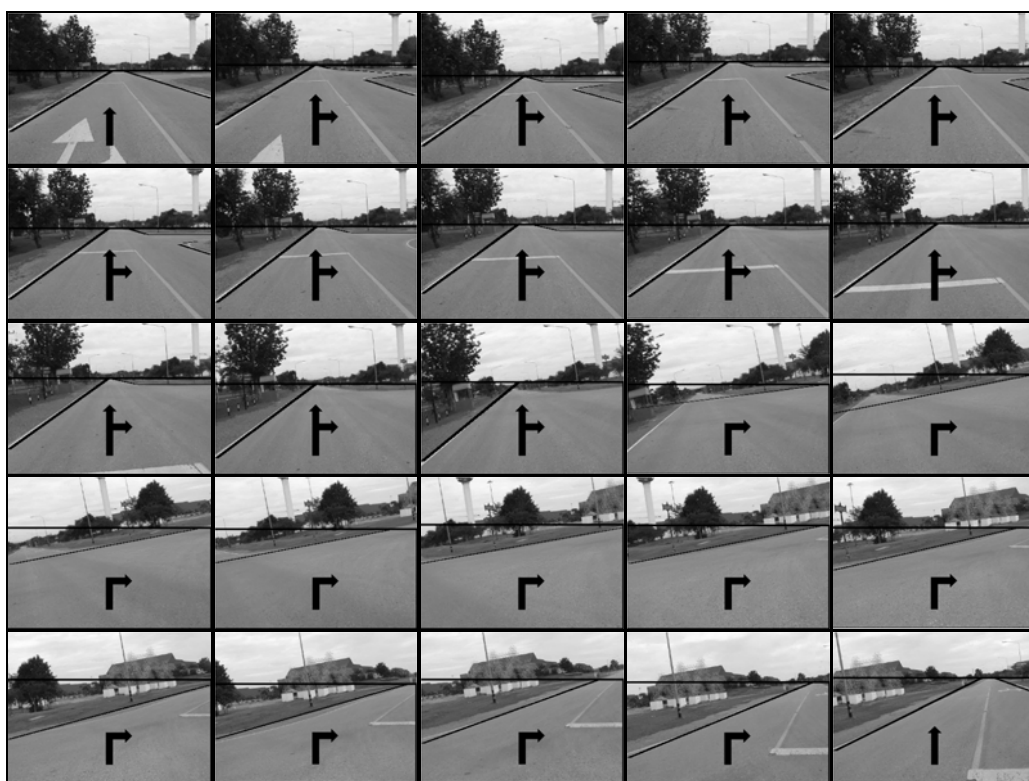
ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาวะที่ยานพาหนะเกิดการเลี้ยว ทดสอบโดยการพิจารณาถึงสภาวะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะแล้วเปรียบเทียบกับค่าความถูกต้องกับขนาดวิดีโอที่ 250 เฟรม สำหรับการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้แบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 เป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อผ่านสามแยกและเลี้ยวทางซ้าย ในขั้นตอนการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ละ 10 เฟรมจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 4.22 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการตรวจจับช่องทางเดินรถขณะเกิดการเลี้ยว ซึ่งในเฟรมที่ 10 จะเป็นการแสดงการตรวจจับแบบทางตรง จากนั้นในเฟรมที่ 20 จะเป็นเฟรมเริ่มต้นในการตรวจจับช่องทางเดินรถที่เป็นทางแยกจนถึงเฟรมที่ 110 จะเปลี่ยนเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถแบบเกิดการเลี้ยวจนถึงเฟรมที่ 200 ระบบการตรวจจับจะเปลี่ยนมาเป็นแบบทางตรงจนกระทั่งเฟรมที่ 250 โดยในการทดสอบนี้สามารถให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง 91.2 เปอร์เซนต์ ดังในตารางที่ 4.4



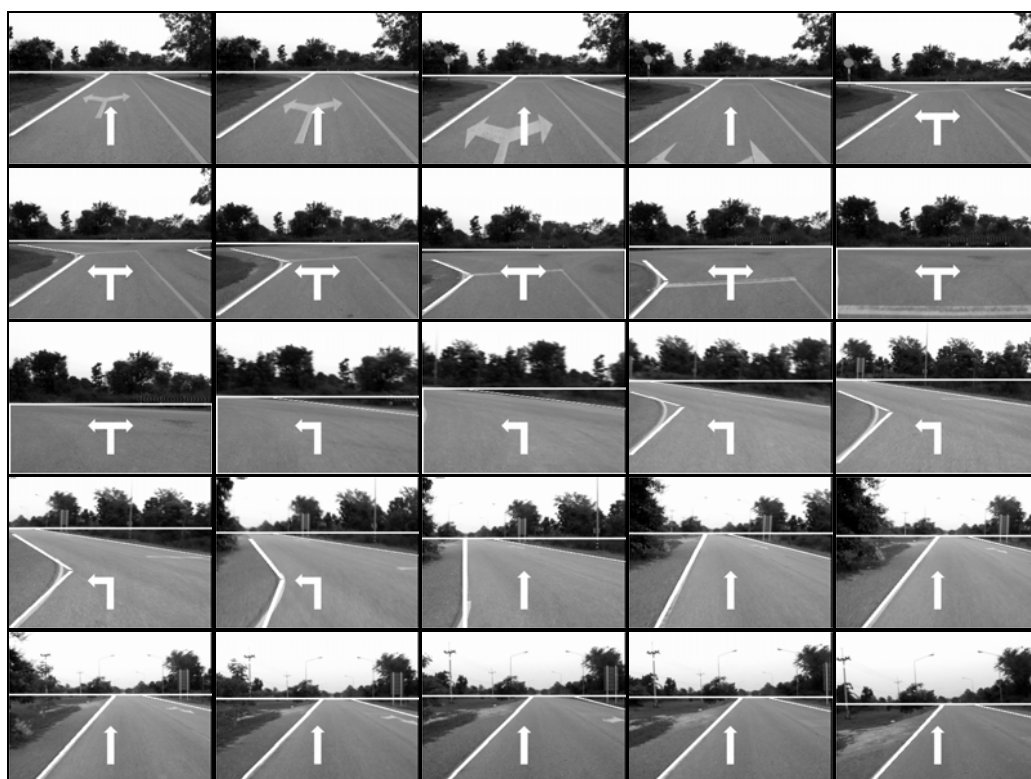
รูปที่ 4.22 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยผ่านสามแยกและเลี้ยวทางซ้าย

กลุ่มที่ 2 ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อผ่านสามแยกและเลี้ยวทางขวา ในขั้นตอนการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ละ 10 เฟรมจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้จะเป็นการตรวจจับเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจจับช่องทางเดินรถให้ครอบคลุมยิ่งขึ้น โดยในเฟรมที่ 10 จะเป็นการแสดงการตรวจจับช่องทางเดินขณะยังอยู่ในทางตรง จากนั้นเมื่อเริ่มเข้าสู่เฟรมที่ 20 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมาเป็นแยกทางขวาและดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงเฟรมที่ 130 ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากการตรวจจับแบบไม่เกิดการเลี้ยวมาเป็นการตรวจจับแบบเกิดการเลี้ยว โดยจะเริ่มตรวจจับได้ในขณะที่ยานพาหนะเริ่มเกิดการเลี้ยวขึ้นในเฟรมที่ 140 จากนั้นยานพาหนะยังคงรักษาทิศทางการเลี้ยวไว้อย่างต่อเนื่องระบบก็ยังสามารถตรวจจับช่องทางเดินรถไว้ได้จนกระทั่งถึงเฟรมที่ 240 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเริ่มเปลี่ยนมาเป็นทางตรงจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบมาเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านแยกและเลี้ยวทางขวานั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับลดลงไม่มากนัก โดยยังมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ 88.8 เปอร์เซนต์ ดังในตารางที่ 4.4



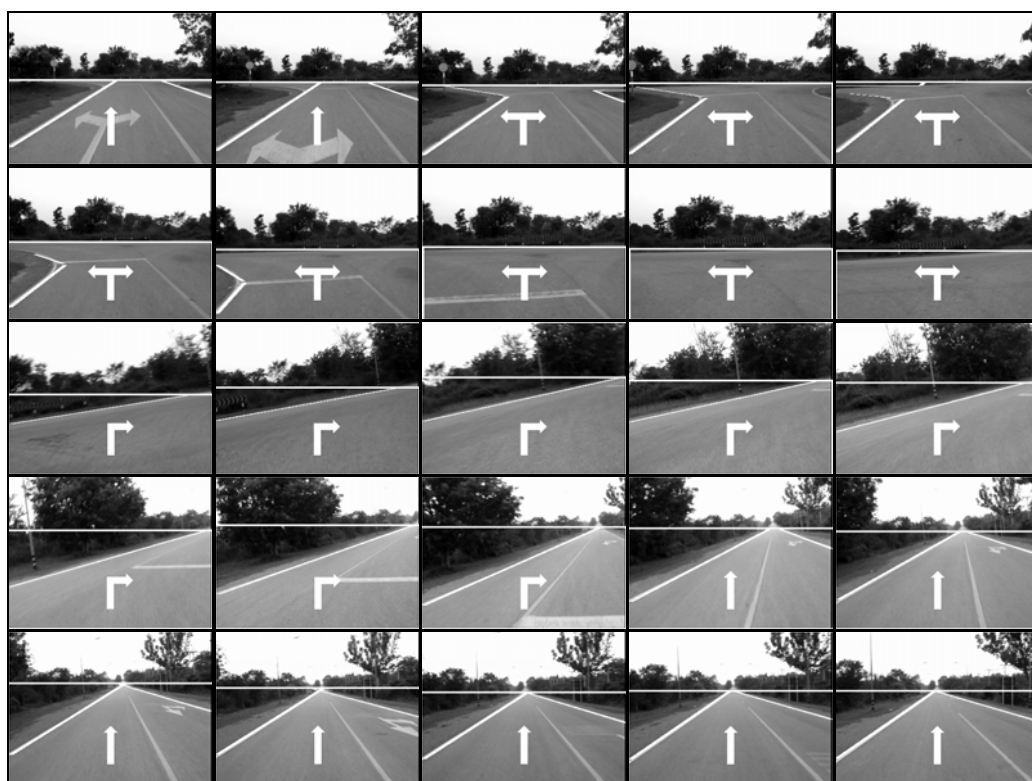
รูปที่ 4.23 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยผ่านสามแยกและเลี้ยวทางขวา

กลุ่มที่ 3 ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางซ้าย ในขั้นตอนการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ละ 10 เฟรมจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 4.24 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้จะเป็นการตรวจจับเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจจับช่องทางเดินรถให้ครอบคลุมยิ่งขึ้น โดยในเฟรมที่ 10 จะเป็นการแสดงการตรวจจับช่องทางเดินขณะยังอยู่ในทางตรง จากนั้นเมื่อเริ่มเข้าสู่เฟรมที่ 50 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมาเป็นสามแยกตัว T และดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงเฟรมที่ 110 ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากการตรวจจับแบบไม่เกิดการเลี้ยวมาเป็นการตรวจจับแบบเกิดการเลี้ยว โดยจะเริ่มตรวจจับได้ในเฟรมที่ 120 จากนั้นระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถขณะเกิดการเลี้ยวก็ยังสามารถตรวจจับช่องทางเดินรถไว้ได้จนกระทั่งถึงเฟรมที่ 180 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเริ่มเปลี่ยนมาเป็นทางตรงจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบมาเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านแยกตัว T และเลี้ยวทางซ้ายนั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับลดลงไม่มากนัก โดยยังมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ 87.2 เปอร์เซ็นต์ ดังในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.24 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางซ้าย

กลุ่มที่ 4 ในกลุ่มนี้จะเป็นการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางขวา ในขั้นตอนการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ละ 10 เฟรมจากเฟรมที่ 10 จนถึงเฟรมที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 4.25 สำหรับการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้จะเป็นการตรวจจับเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจจับช่องทางเดินรถให้ครอบคลุมยิ่งขึ้น โดยในเฟรมที่ 10 จะเป็นการแสดงการตรวจจับช่องทางเดินขณะยังอยู่ในทางตรง จากนั้นเมื่อเริ่มเข้าสู่เฟรมที่ 30 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากทางตรงมาเป็นสามแยกตัว T และดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงเฟรมที่ 100 ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถจะเปลี่ยนจากการตรวจจับแบบไม่เกิดการเลี้ยวมาเป็นการตรวจจับแบบเกิดการเลี้ยว โดยจะเริ่มตรวจจับได้ในเฟรมที่ 110 จากนั้นระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถขณะเกิดการเลี้ยวก็ยังสามารถตรวจจับช่องทางเดินรถไว้ได้จนกระทั่งถึงเฟรมที่ 180 การตรวจจับช่องทางเดินรถจะเริ่มเปลี่ยนมาเป็นทางตรงจนถึงเฟรมที่ 250 หลังจากเปลี่ยนการทดสอบมาเป็นการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านแยกตัว T และเลี้ยวทางขวานั้นประสิทธิภาพในการตรวจจับลดลงไม่มากนัก โดยยังมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่ 85.4 เปอร์เซนต์ ดังในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.25 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า โดยผ่านสามแยกตัว T และเลี้ยวทางขวา

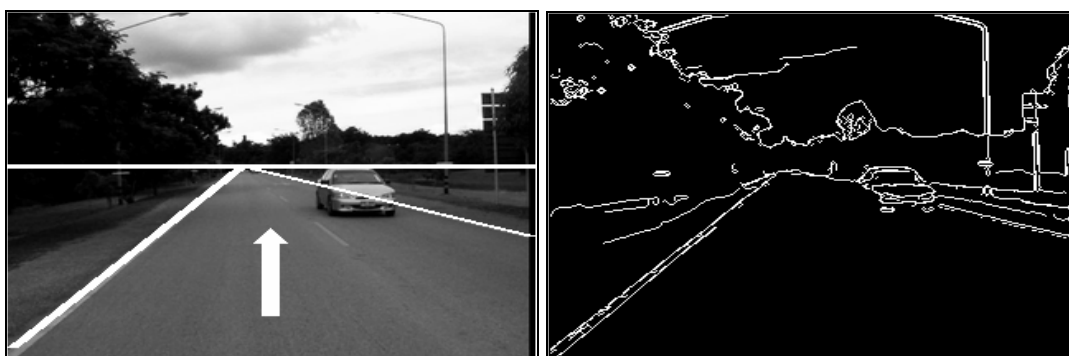
ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการตามรอยช่องทางเดินรถในในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่
ตรงไปข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยวภายใต้สภาพแวดล้อมปกติของทั้ง 4 กรณี

ชนิดภาพ	ข้อมูลภาพ ชุดที่	จำนวนเฟรม ถูกต้อง	จำนวนเฟรม ผิดพลาด	เปอร์เซ็นต์ ความถูกต้อง
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

4.5.3 การตรวจจับช่องทางเดินรถภายใต้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ

ในส่วนของการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้ จะเป็นการทดสอบตามลักษณะของช่องทางเดินรถที่อยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น มีเส้นขอบหรือเส้นทึบ ไม่มีเส้นขอบ เส้นขอบไม่ต่อเนื่องหรือเส้นประ มีเงาพาดผ่านช่องทางเดินรถ และมีสิ่งกีดขวางบดบังช่องทางเดินรถ ซึ่งสภาพแวดล้อมที่เลือกนำมาใช้ในการทดสอบนี้จะมีด้วยกัน 8 พื้นที่ตัวอย่าง โดยในแต่ละพื้นที่จะมีลักษณะสภาพแวดล้อมที่แตกต่าง ๆ กันออกไป ซึ่งในการทดสอบนี้จะแสดงรูปให้อยู่ด้วยกัน 2 แบบโดยในรูปทางซ้ายจะเป็นการแสดงผลการตรวจจับช่องทางเดินรถส่วนทางขวาจะเป็นรูปที่ได้จากกระบวนการหาขอบ

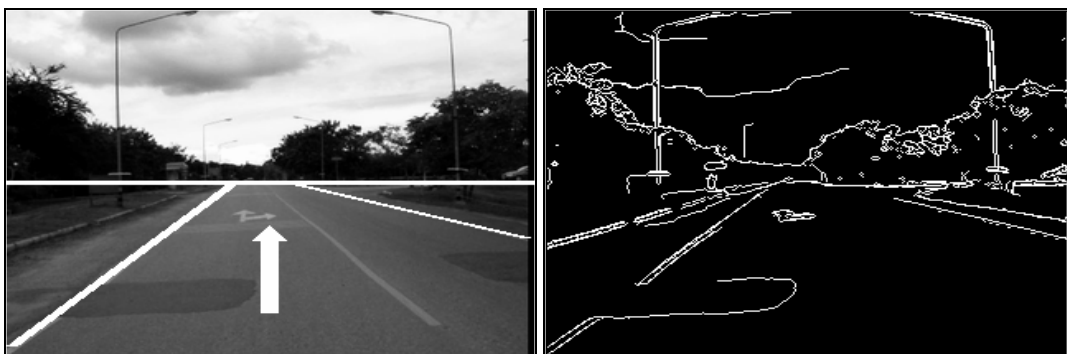
ตัวอย่างสภาพแวดล้อมที่ 1 (ถนนหน้าบขส.) ในตัวอย่างนี้ได้เลือกนำสภาพแวดล้อมในบริเวณพื้นที่ของช่องทางเดินรถที่ประกอบไปด้วยลักษณะที่มียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน เส้นขอบถนนไม่ชัดเจนหรือไม่ต่อเนื่อง เส้นขอบถนนเป็นเส้นประ มีช่องทางเดินรถลักษณะเป็นแยกทางซ้ายและขวา โดยสภาพถนนในตัวอย่างนี้จะมีเส้นขอบถนนเป็นแบบเส้นทึบเป็นส่วนใหญ่ ผลการทดสอบต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 4.26-4.30 ตามลำดับ



(ก) ยานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน

(ข) ภาพขอบขณะยานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน

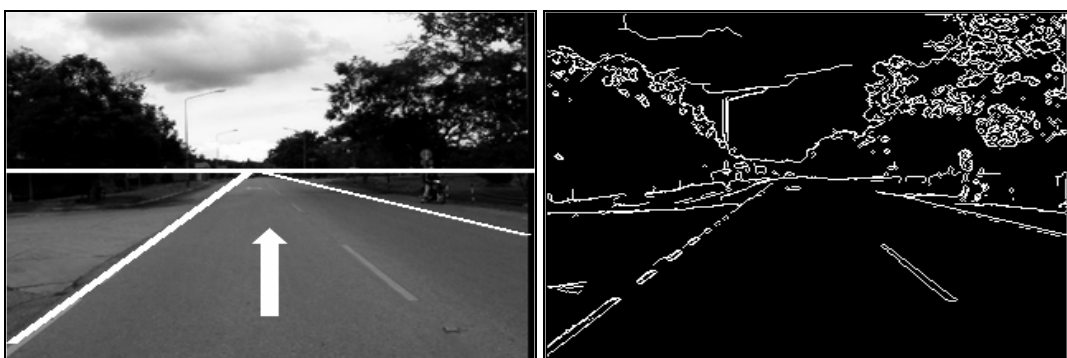
รูปที่ 4.26 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน



(ก) เส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง

(ข) ภาพขอบขณะเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง

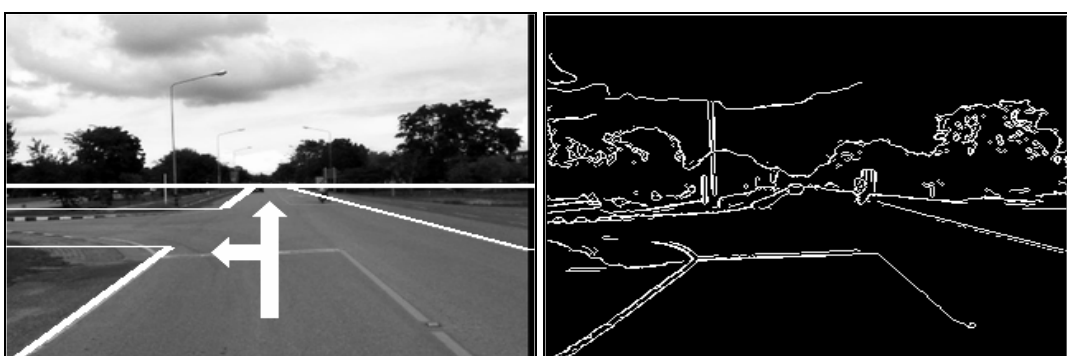
รูปที่ 4.27 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง



(ก) เส้นขอบถนนเป็นเส้นประ

(ข) ภาพขอบขณะเส้นขอบเป็นเส้นประ

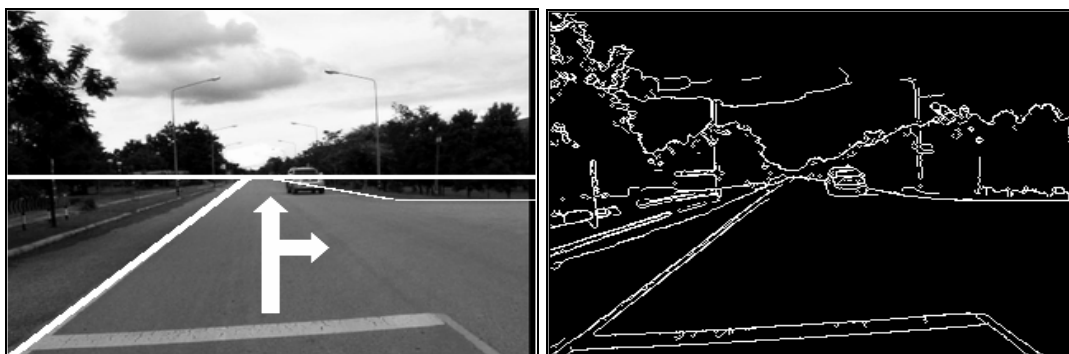
รูปที่ 4.28 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนเป็นเส้นประ



(ก) ช่องทางเดินรถมีแยกทางซ้าย

(ข) ภาพขอบขณะมีแยกทางซ้าย

รูปที่ 4.29 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อช่องทางเดินรถมีแยกทางซ้าย



(ก) ช่องทางเดินรถมีแยกทางขวา

(ข) ภาพขอบขณะมีแยกทางขวา

รูปที่ 4.30 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อช่องทางเดินรถมีแยกทางขวา

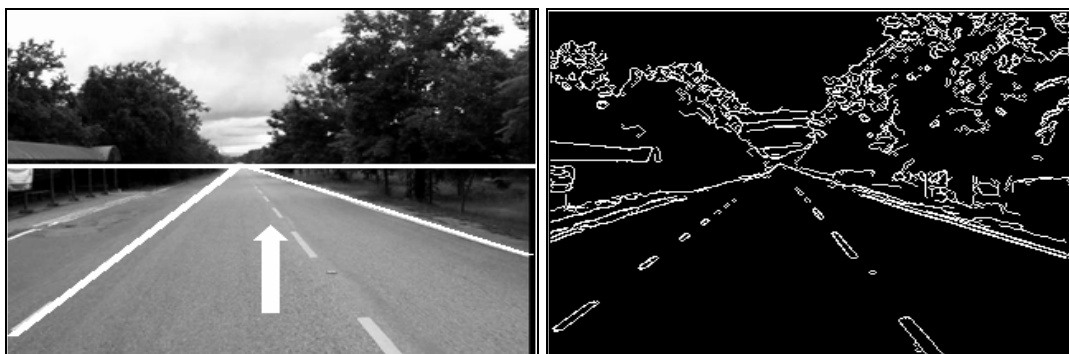
ตัวอย่างสภาพแวดล้อมที่ 2 (ถนนหน้าเรียนรวม) ในตัวอย่างนี้ได้เลือกนำสภาพแวดล้อมในบริเวณพื้นที่ของช่องทางเดินรถที่ประกอบไปด้วยลักษณะที่มียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน เส้นขอบถนนเป็นเส้นประ ถนนมีการปรับปรุงทำให้เส้นขอบถนนขาดหายไปหรือเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่องและมีช่องทางเดินรถมีลักษณะเป็นแยกทางซ้ายและขวา โดยสภาพถนนในตัวอย่างนี้จะมีเส้นขอบถนนเป็นแบบเส้นทึบและเส้นประเป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งตัวอย่างสภาพแวดล้อมที่นำมาทดสอบนี้ยังมีโครงสร้างถนนที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้นเมื่อมีเนินชะลอความเร็วมาอยู่ในโครงสร้างถนนอีกด้วย ผลการทดสอบต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 4.31-4.35 ตามลำดับ



(ก) ยานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน

(ข) ภาพขอบขณะยานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน

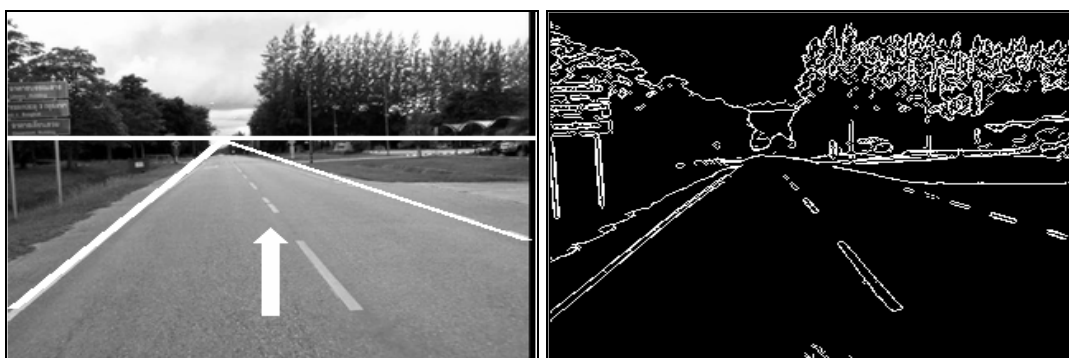
รูปที่ 4.31 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน



(ก) เส้นขอบถนนเป็นเส้นประ

(ข) ภาพขอบขณะเส้นขอบถนนเป็นเส้นประ

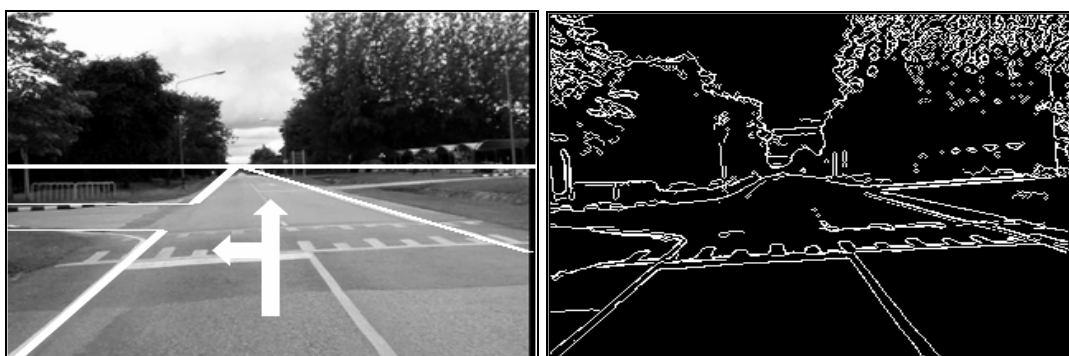
รูปที่ 4.32 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนเป็นเส้นประ



(ก)เส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง

(ข) ภาพขอบขณะเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง

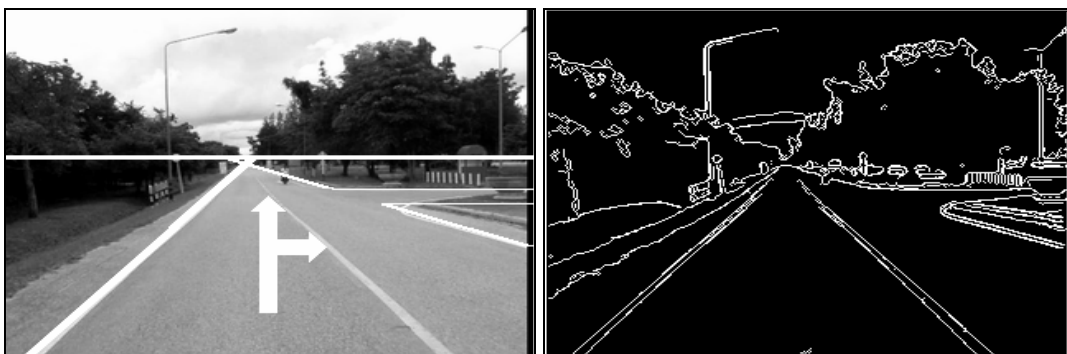
รูปที่ 4.33 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง



(ก) ช่องทางเดินรถมีแยกทางซ้าย

(ข) ภาพขอบขณะมีแยกทางซ้าย

รูปที่ 4.34 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางซ้าย

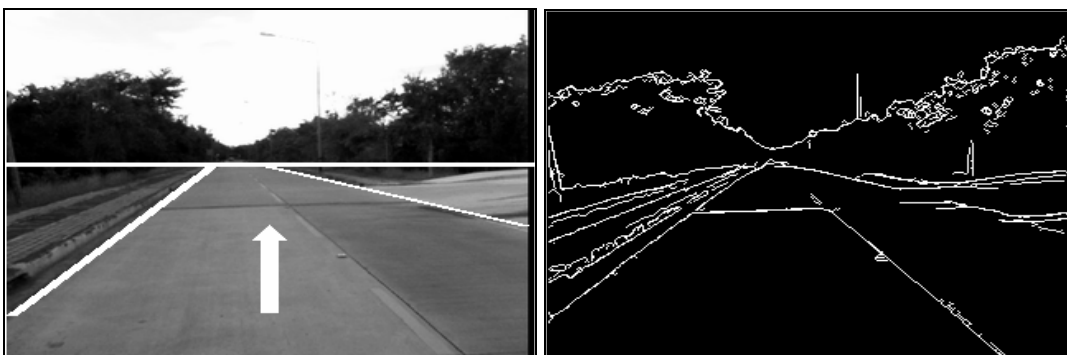


(ก) ช่องทางเดินรถมีแยกทางขวา

(ข) ภาพขอบขณะมีแยกทางขวา

รูปที่ 4.35 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางขวา

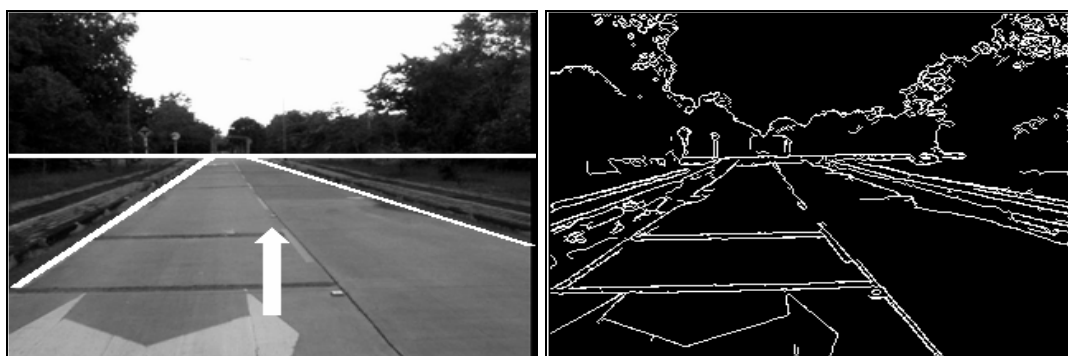
ตัวอย่างสภาพแวดล้อมที่ 3 (ถนนหน้าโรงอาหารเรียนรวม) ในตัวอย่างนี้ได้เลือกนำสภาพแวดล้อมในบริเวณพื้นที่ของช่องทางเดินรถที่ประกอบไปด้วยลักษณะถนนเป็นแบบมีฟุตบอล เส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากพื้นที่นี้มีการซ่อมแซมถนนเป็นจำนวนมากและมีช่องทางเดินรถลักษณะเป็นแยกทางขวา ผลการทดสอบต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 4.36-4.38 ตามลำดับ



(ก) เส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง

(ข) ภาพขอบขณะเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง

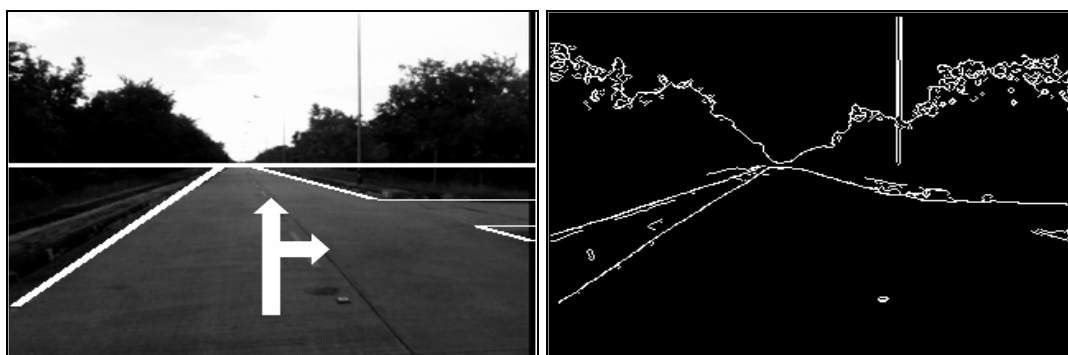
รูปที่ 4.36 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง



(ก) เส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง

(ข) ภาพขอบขณะเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง

รูปที่ 4.37 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง

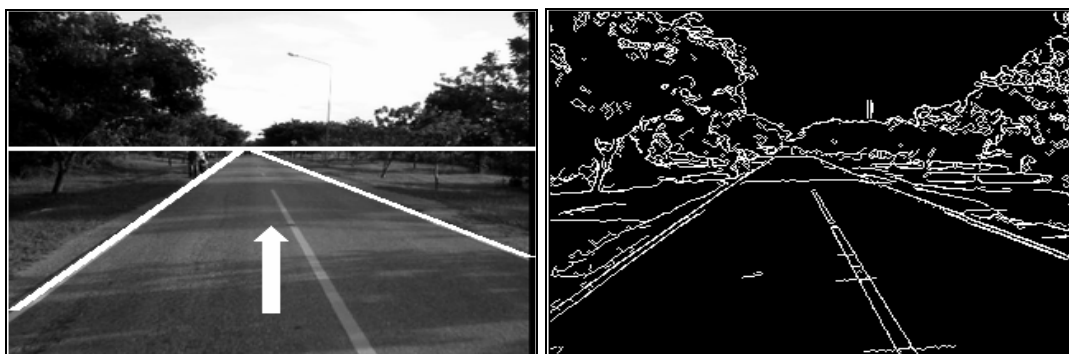


(ก) ช่องทางเดินรถมีแยกทางขวา

(ข) ภาพขอบขณะมีแยกทางขวา

รูปที่ 4.38 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางขวา

ตัวอย่างสภาพแวดล้อมที่ 4 (ถนนหน้าฟาร์ม) ในตัวอย่างนี้ได้เลือกนำสภาพแวดล้อมในบริเวณพื้นที่ของช่องทางเดินรถที่มีเงาพาดผ่านช่องทางเดินรถเป็นส่วนใหญ่ มียานพาหนะบบังเส้นขอบถนนและมีแยกทางซ้าย ผลการทดสอบต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 4.39-4.41 ตามลำดับ



(ก) มีเงาพาดผ่านช่องทางเดินรถ

(ข) ภาพขอบขณะมีเงาพาดผ่านช่องทางเดินรถ

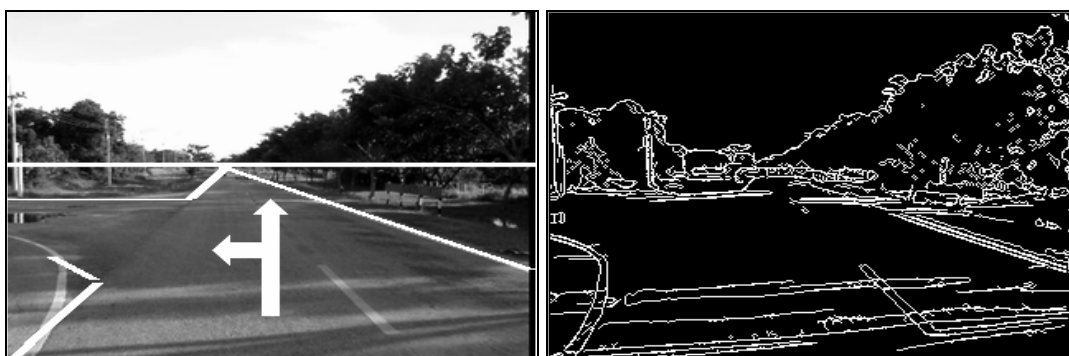
รูปที่ 4.39 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีเงาพาดผ่านช่องทางเดินรถ



(ก) มียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน

(ข) ภาพขอบขณะมียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน

รูปที่ 4.40 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมียานพาหนะบดบังช่องทางเดินรถ

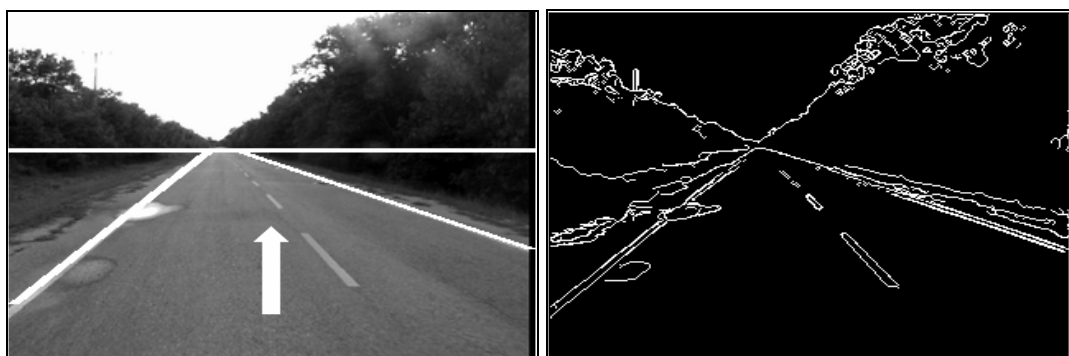


(ก) ช่องทางเดินรถมีแยกทางซ้าย

(ข) ภาพขอบขณะมีแยกทางซ้าย

รูปที่ 4.41 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางซ้าย

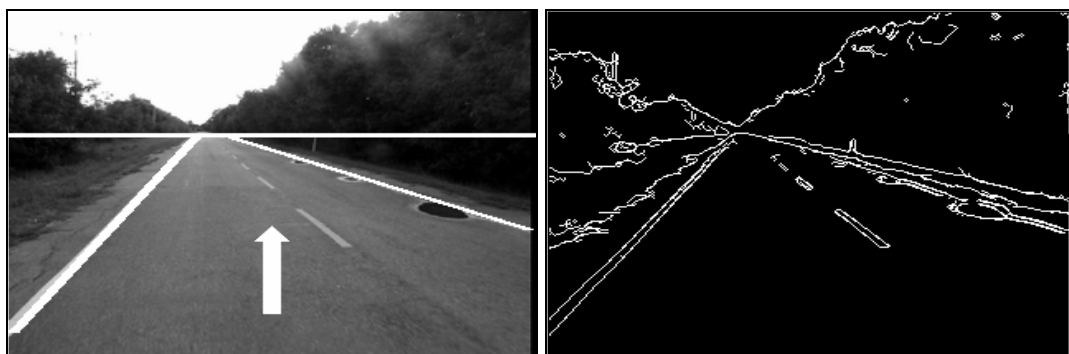
ตัวอย่างสภาพแวดล้อมที่ 5 (ถนนบริเวณหน้าสะพานสามแฉก) ในตัวอย่างนี้ได้เลือกนำสภาพแวดล้อมในบริเวณพื้นที่ของช่องทางเดินรถที่มีลักษณะเส้นขอบถนนชัดเจนแต่มีแอ่งน้ำเกิดตรงบริเวณเส้นขอบถนน ผลการทดสอบต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 4.42-4.43 ตามลำดับ



(ก) มีแอ่งน้ำทางซ้าย

(ข) ภาพขอบขณะมีแอ่งน้ำทางซ้าย

รูปที่ 4.42 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อแอ่งน้ำทางซ้าย

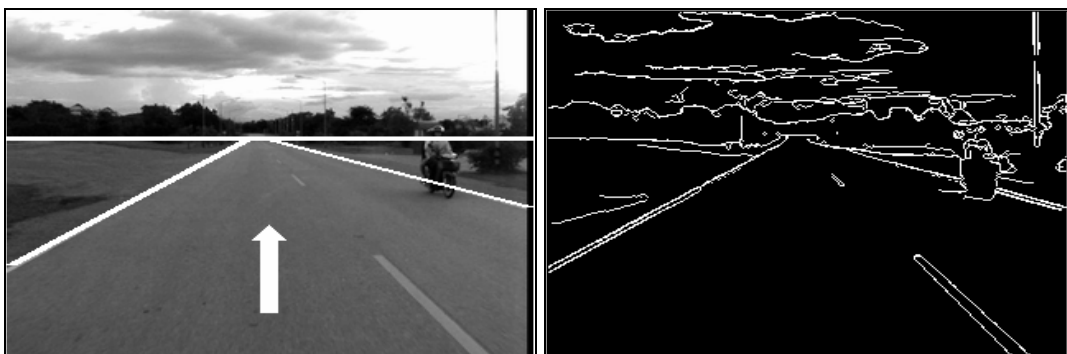


(ก) มีแอ่งน้ำทางขวา

(ข) ภาพขอบขณะมีแอ่งน้ำทางขวา

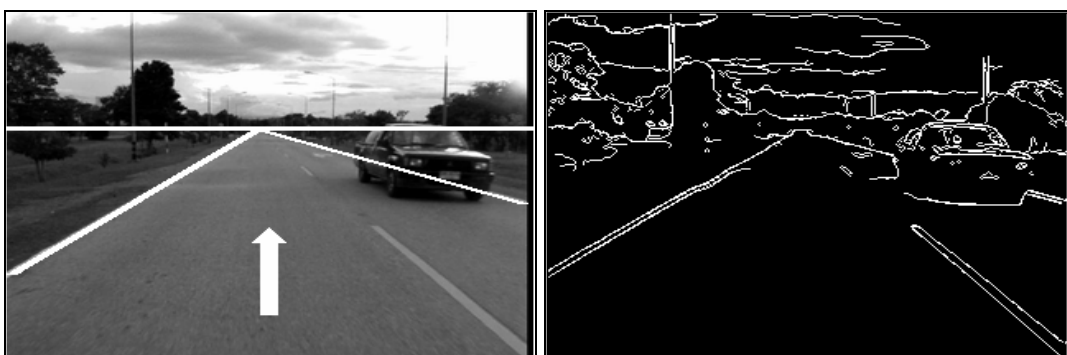
รูปที่ 4.43 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อแอ่งน้ำทางขวา

ตัวอย่างสภาพแวดล้อมที่ 6 (ถนนหลังหอสุรนา) ในตัวอย่างนี้ได้เลือกนำสภาพแวดล้อมในบริเวณพื้นที่ของช่องทางเดินรถที่มีเส้นขอบถนนต่อเนื่องเป็นส่วนใหญ่ มียานพาหนะบดบังช่องทางเดินรถ และมีแยกทางขวา ผลการทดสอบต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 4.44-4.46 ตามลำดับ



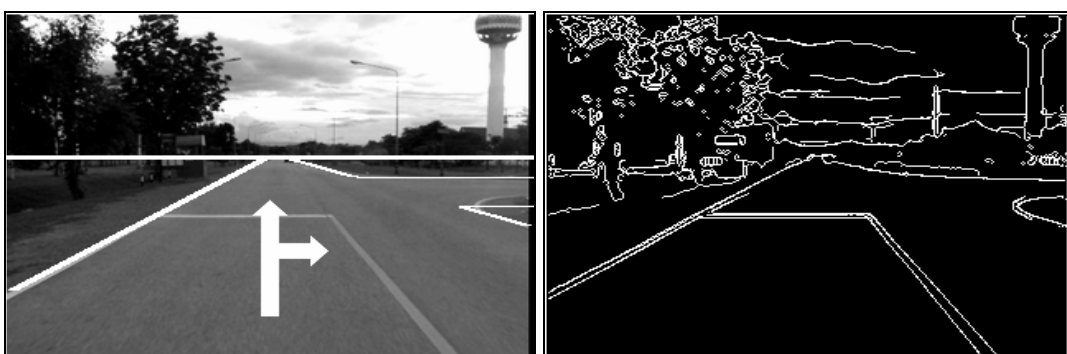
(ก) มียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน (ข) ภาพขอบขณะมียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน

รูปที่ 4.44 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมียานพาหนะบดบังช่องทางเดินรถ



(ก) มียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน (ข) ภาพขอบขณะมียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน

รูปที่ 4.45 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมียานพาหนะบดบังช่องทางเดินรถ



(ก) ช่องทางเดินรถมีแยกทางขวา

(ข) ภาพขอบขณะมีแยกทางขวา

รูปที่ 4.46 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางขวา

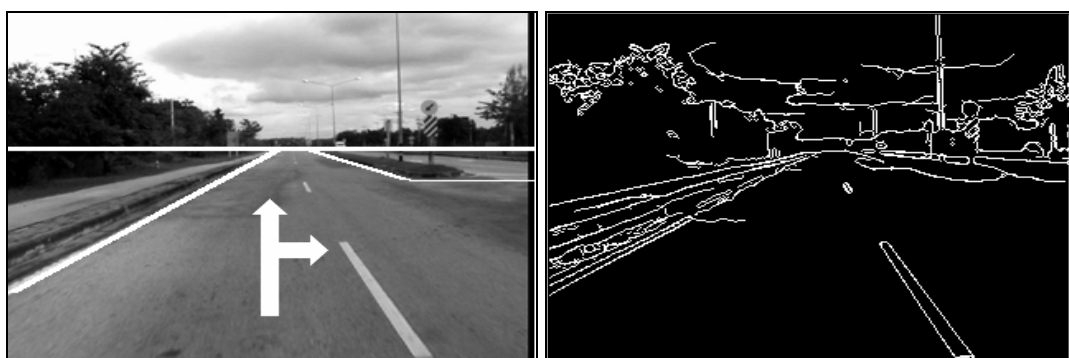
ตัวอย่างสภาพแวดล้อมที่ 7 (ถนนทางไปประตู 2) ในตัวอย่างนี้ได้เลือกนำสภาพแวดล้อมในบริเวณพื้นที่ของช่องทางเดินรถที่มีเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่องเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากถนนมีการปรับปรุง และมีช่องทางเดินรถที่มีลักษณะเป็นแยกทางขวา ผลการทดสอบต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 4.47-4.48 ตามลำดับ



(ก) เส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง

(ข) ภาพขอบขณะมีเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง

รูปที่ 4.47 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง



(ก) ช่องทางเดินรถมีแยกทางขวา

(ข) ภาพขอบขณะมีแยกทางขวา

รูปที่ 4.48 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางขวา

ตัวอย่างสภาพแวดล้อมที่ 8 (ถนนหน้าอาคาร A) ในตัวอย่างนี้ได้เลือกนำสภาพแวดล้อมในบริเวณพื้นที่ของช่องทางเดินรถที่มียานพาหนะบังคับเส้นขอบถนน เส้นขอบถนนเป็นเส้นประ และมีช่องทางเดินรถเป็นแยกทางซ้ายและขวา ผลการทดสอบต่าง ๆ แสดงดังในรูปที่ 4.49-4.52 ตามลำดับ



(ก) มียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน (ข) ภาพขอบขณะมียานพาหนะบดบังเส้นขอบถนน

รูปที่ 4.49 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมียานพาหนะบดบังช่องทางเดินรถ



(ก) เส้นขอบถนนเป็นเส้นประ

(ข) ภาพขอบขณะเส้นขอบถนนเป็นเส้นประ

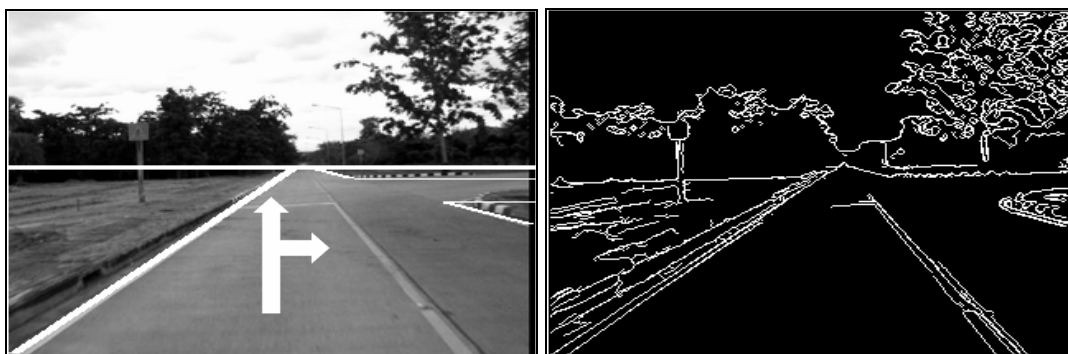
รูปที่ 4.50 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีเส้นขอบถนนเป็นเส้นประ



(ก) ช่องทางเดินรถมีแยกทางซ้าย

(ข) ภาพขอบขณะมีแยกทางซ้าย

รูปที่ 4.51 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางซ้าย



(ก) ช่องทางเดินรถมีแยกทางขวา

(ข) ภาพขอบขณะมีแยกทางขวา

รูปที่ 4.52 ตัวอย่างการตรวจจับช่องทางเดินรถเมื่อมีแยกทางขวา

ในการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอนี้ เป็นเพียงการนำเสนอเป็นเพียงบางส่วนที่ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้การตรวจจับช่องทางเดินรถเกิดความผิดพลาดขึ้น โดยประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถในการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

ตัวอย่าง สภาพแวดล้อม	จำนวนเฟรม ทั้งหมด	จำนวนเฟรมที่ ถูกต้อง	จำนวนเฟรมที่ ผิดพลาด	เปอร์เซ็นต์ ความถูกต้อง
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

จากการทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ได้นำเสนอมาในหัวข้อที่ 4.51-4.53 ซึ่งเป็นการทดสอบในกรณีของการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยว การตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไป

ข้างหน้าขณะเกิดการเลี้ยวและการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ตามลำดับ โดย การทดสอบการตรวจจับช่องทางเดินรถที่ผ่านมาทั้งหมดสามารถสรุปถึงสาเหตุของความผิดพลาดใน การตรวจจับช่องทางเดินรถได้ 7 สาเหตุด้วยกันดังนี้

1. เส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาถึงความไม่ต่อเนื่องของเส้นขอบถนนพบว่า ความไม่ต่อเนื่องของเส้นขอบนี้เป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการการ จำแนกประเภทช่องทางเดินรถ ซึ่งถ้าเส้นขอบถนนมีความไม่ต่อเนื่องสูงแล้วการจำแนกประเภท ช่องทางเดินรถจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น นั่นก็คือผลของการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถที่ได้ อาจจะเป็นทางตรงหรือทางแยกก็ได้ขึ้นอยู่กับว่าความไม่ต่อเนื่องของเส้นขอบถนนสูงมากแค่ไหน

2. ระยะห่างระหว่างยานพาหนะกับบริเวณทางแยก ระยะห่างที่จะกล่าวถึงนี้เป็น ตัวกำหนดปริมาณของข้อมูลภาพที่ใช้ในการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ ระยะห่างระหว่าง ยานพาหนะกับบริเวณทางแยกระยะที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการจำแนกประเภทอยู่ที่ ประมาณ 10 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2

3. เส้นขอบฟ้าเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในอันดับเริ่มแรกของระบบการตรวจจับ ช่องทางเดินรถ ถ้าหากการหาเส้นขอบฟ้ามีความผิดพลาดแล้วจะทำให้โครงสร้างถนนที่ได้ไม่ ถูกต้องซึ่งจะทำให้ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถมีความถูกต้องน้อยลง

4. เส้นขอบถนนเป็นเส้นประสำหรับในสาเหตุนี้จะมีส่วนคล้ายคลึงกันกับลักษณะ ของเส้นขอบถนนไม่ต่อเนื่องจะแตกต่างกันตรงที่เส้นขอบถนนเป็นเส้นประนี้จะให้ความไม่ ต่อเนื่องของเส้นขอบถนนแบบสม่ำเสมอมากกว่าสาเหตุแรก ซึ่งจะทำให้การพิจารณาการจำแนก ประเภทช่องทางเดินรถได้ง่ายมากกว่า

5. เงาที่พาดผ่านช่องทางเดินรถเงาที่เกิดขึ้นในช่องทางเดินรถมีผลทำให้ข้อมูลของ ภาพขอบมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยในแต่ละส่วนของกระบวนการการตรวจจับช่องทางเดินรถ จำเป็นต้องพิจารณาให้ครอบคลุมถึงการมีเงาที่พาดผ่านช่องทางเดินรถไว้ด้วย เริ่มตั้งแต่การหาเส้น ขอบฟ้า การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ และการติดตามช่องทางเดินรถ

6. สิ่งกีดขวางบดบังเส้นขอบถนน ซึ่งสิ่งกีดขวางที่ว่ามีหลายอย่างด้วยกัน อาทิ เช่น รถยนต์ รถจักรยานยนต์และคนเดินถนน เป็นต้น โดยแต่ละอย่างมีผลทำให้ข้อมูลของขอบภาพ มีความซับซ้อนมากเป็นผลให้การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถมีความผิดพลาด โดยเฉพาะเมื่อ ยานพาหนะเคลื่อนที่มาถึงบริเวณที่เป็นทางแยกของช่องทางเดินรถ ซึ่งถ้าในขณะนั้นมีสิ่งกีดขวาง บดบังบริเวณทางแยกมากเท่าไรก็จะทำให้การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถมีความผิดพลาดมาก ขึ้นเท่านั้น

7. ความกว้างของช่องทางเดินรถนี้เป็นผลทำให้ข้อมูลภาพที่ใช้เป็นตัวกำหนดโครงสร้างถนนมีความชัดเจนไม่เท่ากัน ยิ่งถ้าช่องทางเดินรถมีความกว้างมากแค่ไหนความชัดเจนของเส้นขอบถนนก็จะลดลงตามไปด้วย เนื่องจากกล้องที่ใช้รับภาพมีขีดความสามารถที่ระยะหนึ่งเท่านั้น

4.6 สรุป

ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้าขณะไม่เกิดการเลี้ยวและเกิดการเลี้ยว ได้ใช้เทคนิคการหาจุดเริ่มต้นของการเกิดแยก การเทียบเคียงรูปแบบร่วมกับแบบจำลองช่องทางเดินรถและการหาค่าควรจะเป็นมากที่สุดสำหรับการหาแบบจำลองช่องทางเดินรถที่เหมาะสม ซึ่งจากผลการทดสอบระบบเห็นว่าระบบสามารถตรวจจับช่องทางเดินรถได้อย่างมีประสิทธิภาพไว้ว่าจะเป็นกรณีที่ยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยวและเกิดการเลี้ยว ซึ่งจากการใช้เทคนิคการของการหาจุดเริ่มต้นของการเกิดแยกและการเทียบเคียงรูปแบบร่วมกับแบบจำลองช่องทางเดินรถทำให้ระบบสามารถปรับเปลี่ยนลักษณะประเภทของช่องทางเดินรถที่แตกต่างกันได้ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถนี้สามารถตรวจจับช่องทางเดินรถแม้ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้และยังไปเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่สูง นอกจากนี้ยังได้แสดงให้เห็นถึงสาเหตุที่ทำให้การตรวจจับช่องทางเดินรถเกิดความผิดพลาดอีกด้วย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานการเคลื่อนที่ของยานพาหนะแบบอัตโนมัติ ซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยวและระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเกิดการเลี้ยว ซึ่งการตรวจจับช่องทางเดินรถในแต่ละระบบประกอบไปด้วย การหาโครงสร้างถนน การจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ และการตามรอยช่องทางเดินรถ การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ดังต่อไปนี้

การปฏิวัติวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้รับการรายงานไว้ในบทที่ 2 ซึ่งพบว่า การตรวจจับช่องทางเดินรถแบบเดิมไม่สามารถตรวจจับช่องทางเดินรถและจำแนกประเภทช่องทางเดินรถได้ด้วยกล้องเพียง 1 ตัว ต้องมีการนำอุปกรณ์อื่น ๆ มาเป็นตัวจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ อาทิเช่น เซนเซอร์ เรดาร์ และ GPS เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงดำเนินการพัฒนาวิธีการตรวจจับช่องทางเดินรถแบบใหม่ขึ้น เพื่อให้สามารถตรวจจับช่องทางเดินรถและจำแนกประเภทช่องทางเดินรถด้วยกล้องเพียง 1 ตัวได้โดยอัตโนมัติ

ในบทที่ 3 แสดงรายละเอียดของการหาโครงสร้างถนนแบบสถานะปกติ ซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดในการเลือกใช้ระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถ โครงสร้างระบบประกอบไปด้วยระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยวและระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเกิดการเลี้ยว ในการตัดสินใจเลือกทำงานในแต่ละระบบนั้นจะใช้ความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างถนนแบบสถานะปกติเปรียบเทียบกับโครงสร้างถนนจริงที่เกิดขึ้นในภาพ

ในบทที่ 4 แสดงรายละเอียดโครงสร้างระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะไม่เกิดการเลี้ยวและระบบการตรวจจับช่องทางเดินรถภายในสถานะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเกิดการเลี้ยว โครงสร้างระบบประกอบไปด้วยเทคนิคการหาเส้นขอบฟ้าของโครงสร้างถนนไม่เกิดการเลี้ยว เทคนิคการหาจุดเริ่มต้นของการเกิดแยก เทคนิคการจำแนก

ประเภทช่องทางเดินรถ และเทคนิคการตามรอยช่องทางเดินรถ โดยใช้ฟังก์ชันค่าควรจะเป็นมากที่สุดในการหาแบบจำลองช่องทางเดินรถที่เหมาะสมที่สุดและในบทนี้ได้แสดงผลการตรวจจับช่องทางเดินรถประเภทต่าง ๆ ได้โดยอัตโนมัติ เช่น ทางตรง สามแยก สี่แยก ในขณะยานพาหนะเลี้ยวซ้าย-ขวา อีกทั้งยังแสดงผลการตรวจจับช่องทางเดินรถในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ อีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1. ระบบของงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถจำแนกประเภทช่องทางเดินรถในขณะที่มีเงาพาดผ่านมาก ๆ ได้ดีนัก เพราะระบบนี้ใช้เทคนิคการหาขอบภาพเป็นปัจจัยสำคัญในการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถ ดังนั้นเพื่อพัฒนาระบบให้สามารถใช้งานแม้มีเงาพาดผ่านช่องทางเดินรถ ควรคิดค้นวิธีการแบบใหม่เพื่อให้สามารถแยกเงาออกจากช่องทางเดินรถได้
2. เพื่อให้ระบบสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย จำเป็นต้องทดสอบบนสภาพถนนในประเภทต่าง ๆ เพื่อให้ระบบสามารถครอบคลุมตามสภาพถนนต่าง ๆ ได้
3. ประสิทธิภาพของการตรวจจับช่องทางเดินรถสามารถปรับปรุงได้ โดยการพิจารณาปรับปรุงแก้ไขเทคนิคการจำแนกประเภทช่องทางเดินรถและสาเหตุต่าง ๆ ที่มีผลทำให้เกิดความผิดพลาด ซึ่งอาจจะทำการออกแบบให้สามารถรองรับการแปรผันของสภาพถนนให้ได้มากยิ่งขึ้น และลดขนาดของเมตริกซ์พารามิเตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เวลาคำนวณของระบบรวมไปถึงการพิจารณาปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ของเงื่อนไขให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้นด้วย

รายการอ้างอิง

- Beauvais, M. and Lakshmanan, S. (2000). CLARK: a heterogeneous sensor fusion method for finding lanes and obstacles. **IVC**(18), No.5: 397-413.
- Dickmanns, E.D. and Zapp, A. (2000). A curvature-based scheme for improving road vehicle guidance by computer vision. **Proc. SPIE conf. on Mobile Robots**, Vol. 727: 161-169.
- Pomerleau, D.A. (1989). ALVINN: An Autonomous Land Vehicle in a Neural Network. **CMU-CS-TR**: 89-107.
- Kenue, S.K. (1989). LANELOK: detection of land boundaries and vehicle tracking system using image processing techniques. **Proc. SPIE Mobiles IV**: 221-244.
- Lakshmanan, S. and Kluge, K. (1996). LOIS: a real-time lane detection algorithm. **Proc. Of the 30th Annual Conference on Information Science and System**.
- McCall, J.C. and Trivedi, M.M. (2004). An Integrated, Robust Approach to Lane Marking Detection and Lane Traking. **Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium**.
- Franke, U. et al. (2001). From door to door-principles and applications of computer vision for driver assistant systems. **Intelligent Vehicle Technologies, Butterworth - Heinemann**.
- Hu, Z. and Uchimura, K. (1999). Action - based road horizontal shape recognition. **SBA Control & Autonomous**, Vol.10 no.02
- Wanga, Y., Teoha, E.K. and Shen, D (2004). Land detection and tracking using B-Snake. **Image and Vision Computing** 22: 269-280
- Apostoloff, N. and Zelinsky, A. (2002). Vision In and Out of Vehicle: Integrated Driver and Road Scene Monitoring. **Proceedings of the International Symposium of Experimental Robotics** (ISER2002), Italy.
- Hong, T-H., Rasmussen, C. Chang, T. and Shneier, M. Road Detection and Tracking for Autonomous Mobile Robots. **Proc.IEEE Intelligent Vehicle Symposium**.
- Lowe, D.G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. **International Journal of Computer Vision**.

- Wohler, C. and Anlauf, J.K. (1999). A Time Delay Neural Network Algorithm for Estimating Image-pattern Shape and Motion. **Image and Vision Computing Journal**, 17: 281-294.
- Gavrila, D. and Philomin, C. (1999). Real-time object detection for smart vehicle. **Proc. of IEEE Int. Conf. on Computer Vision**: 87-93.
- Leeuwen, M.B.V. and Groen, F. (2005). Vehicle Detection with a mobile camera. **IEEE Robotics and Automation Magazine**: 37-43.
- Kluge, K and Lakshmanan, S. (1995). A Deformable-Template Approach to Lane Detection. **Proceedings of the Intelligent Vehicles 95**: 54-59.
- Kluge, K.C. (1994). Extracting road curvature and orientation from image edge points without perceptual grouping into feature. **Proc. Intell. Vehocles Symp**: 109-114.
- Risack, R. et al. (1998). Robust lane recognition embedded in a real-time driver assistance system. **Proc. of the 1998 IEEE Conf. on Int. Veh**: 35-40.
- Jeong, P. and Nedevesch, S. (2005). Efficient and Robust Classification Method Using Combined Feature Vector for Lane Detection. **IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology**, Vol.15, No.4: 528-537.
- Wang, Y., Shen, D. and Teoh, E. (2000). Lane detection using spline model. **Pattern Recognition Letters** 21: 677-689.
- McClean, G.F. and Kotturi, D. (1995). Vanishing point detection by line clustering. **IEEE Trans. PAMI** 17(11): 1090-1095.
- Apostoloff, N. and Zelinsky, A. (2003) Robust based lane tracking using multiple cues and particle filtering. **In Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Sysposium**: 558-563

.

ภาคผนวก ก

ภาพรูปแบบถนนประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพรูปแบบถนนประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ ก.1 ภาพรูปแบบถนนประเภทต่าง ๆ

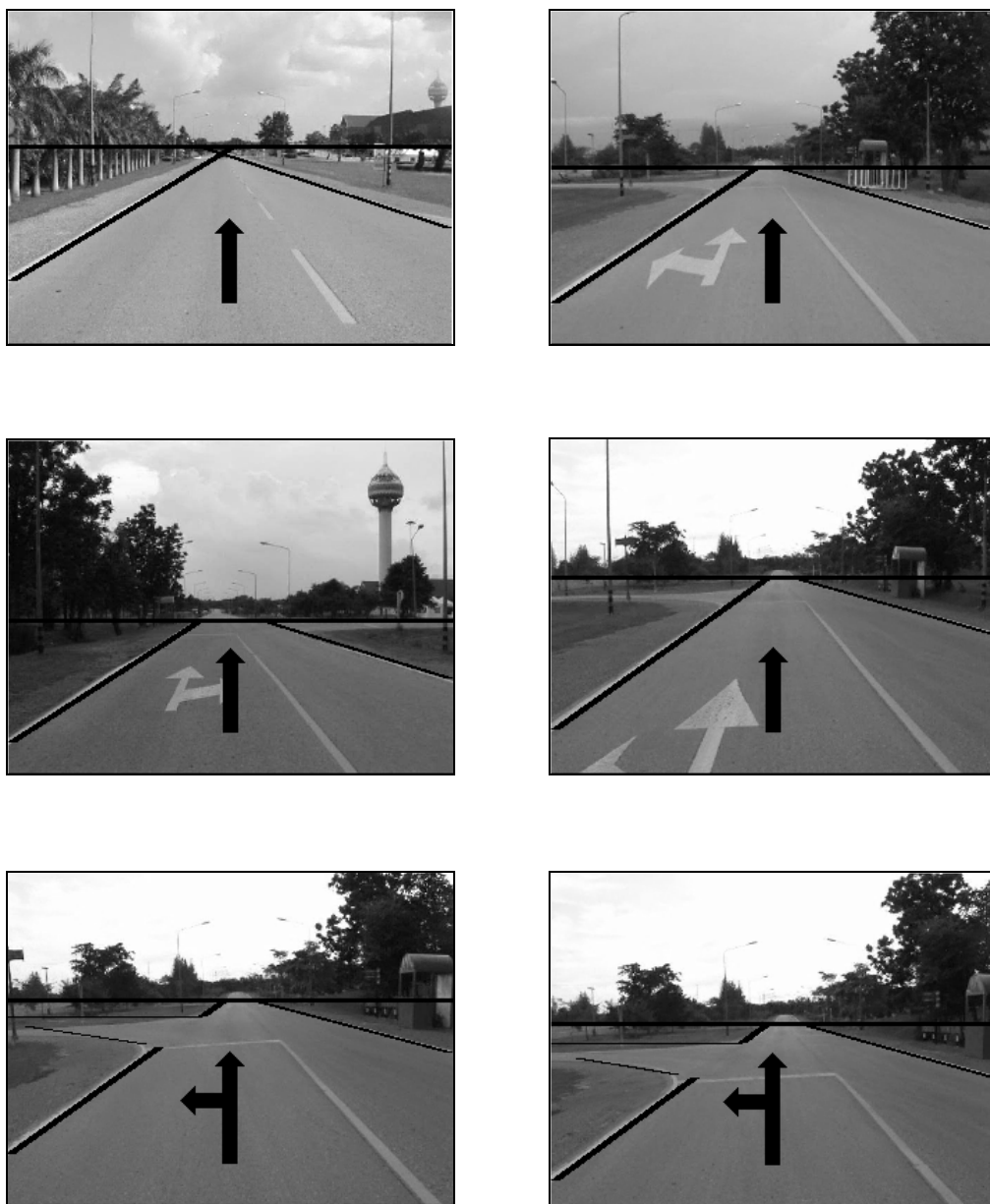


รูปที่ ก.1 ภาพรูปแบบถนนประเภทต่าง ๆ (ต่อ)

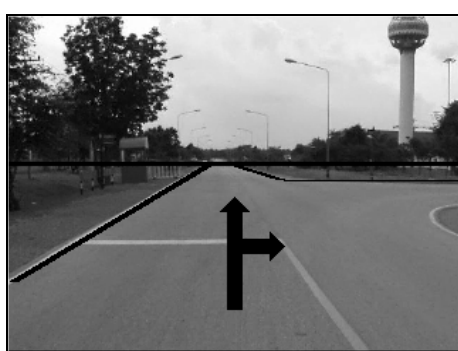
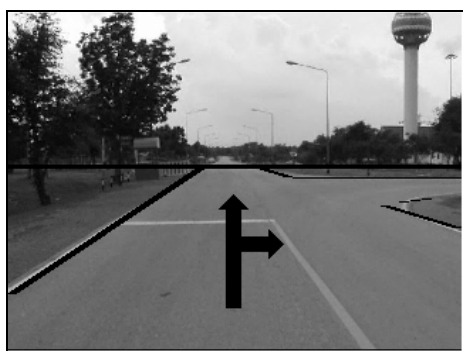
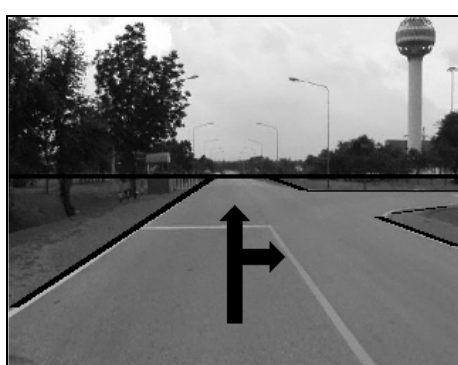
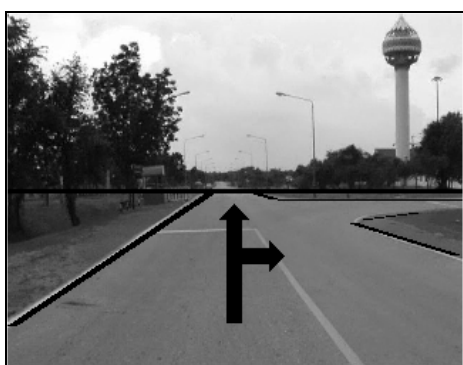
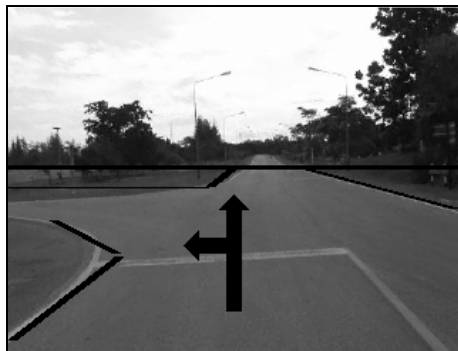
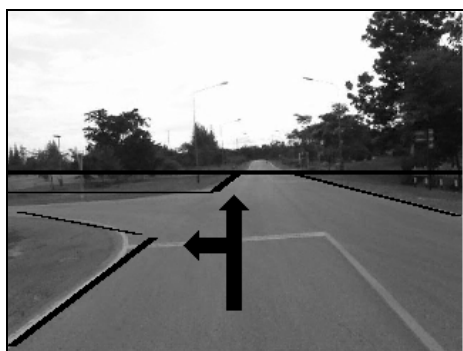
ภาคผนวก ข

ภาพผลการทดสอบระบบ

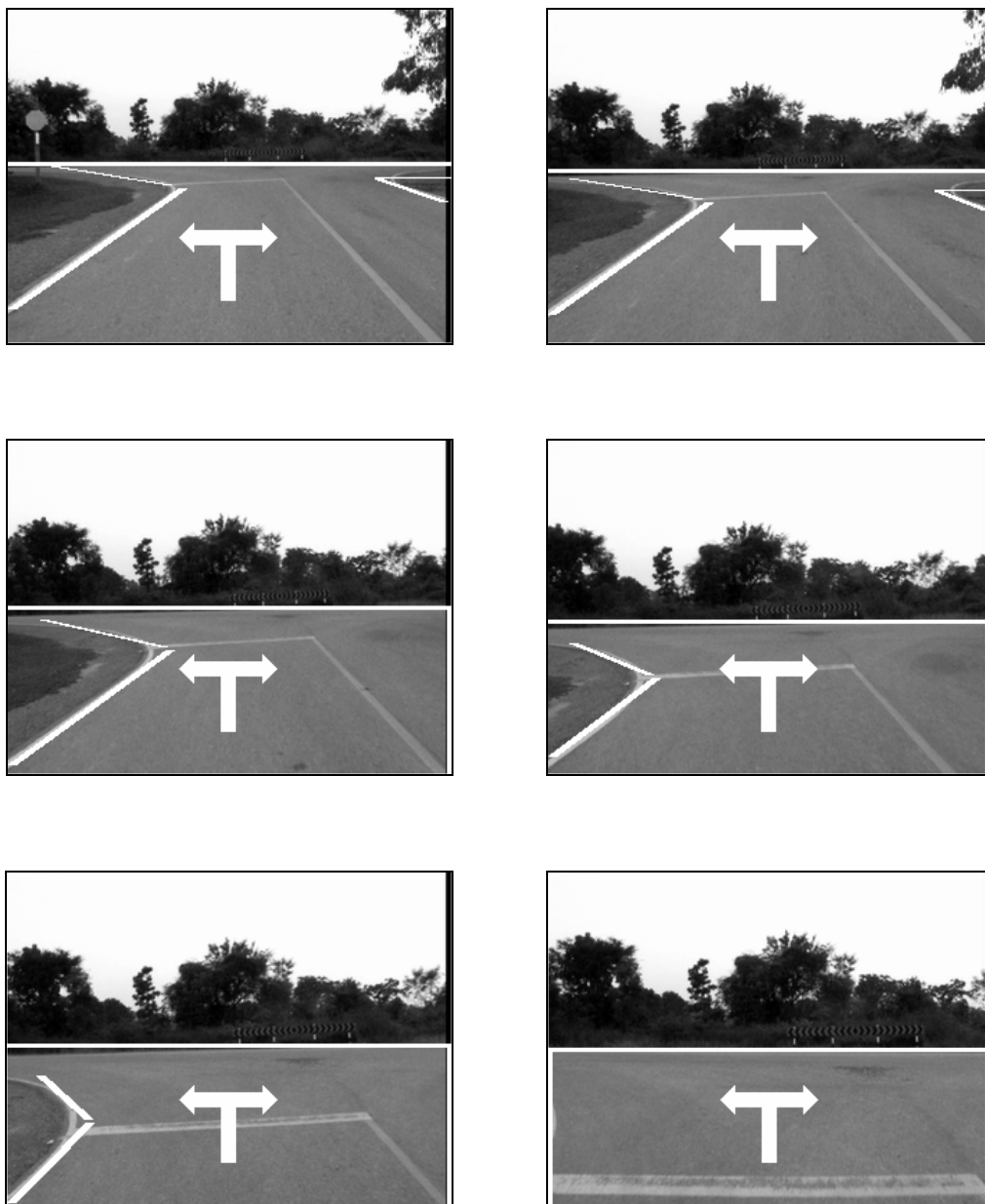
ภาพผลการทดสอบระบบ



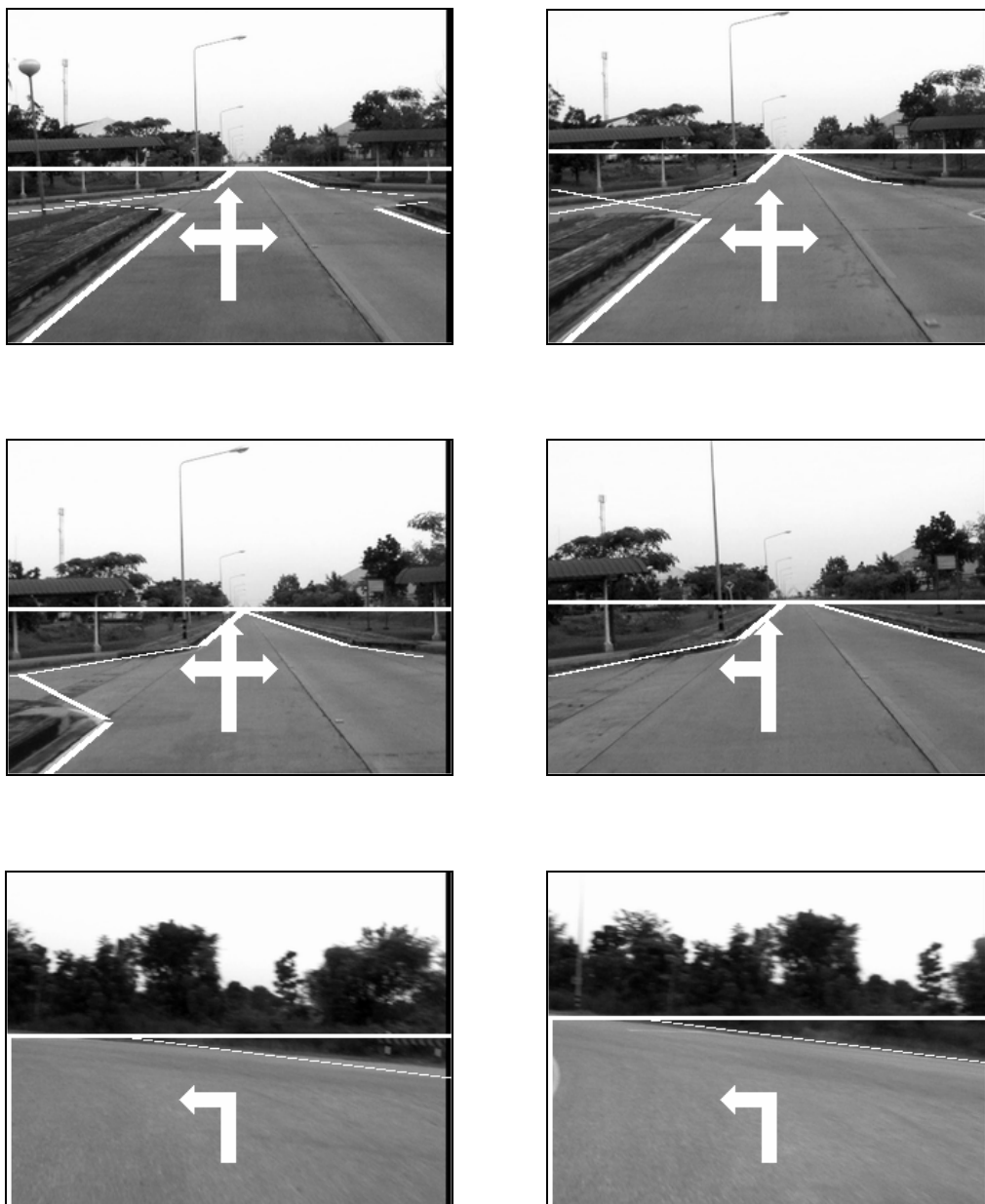
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ



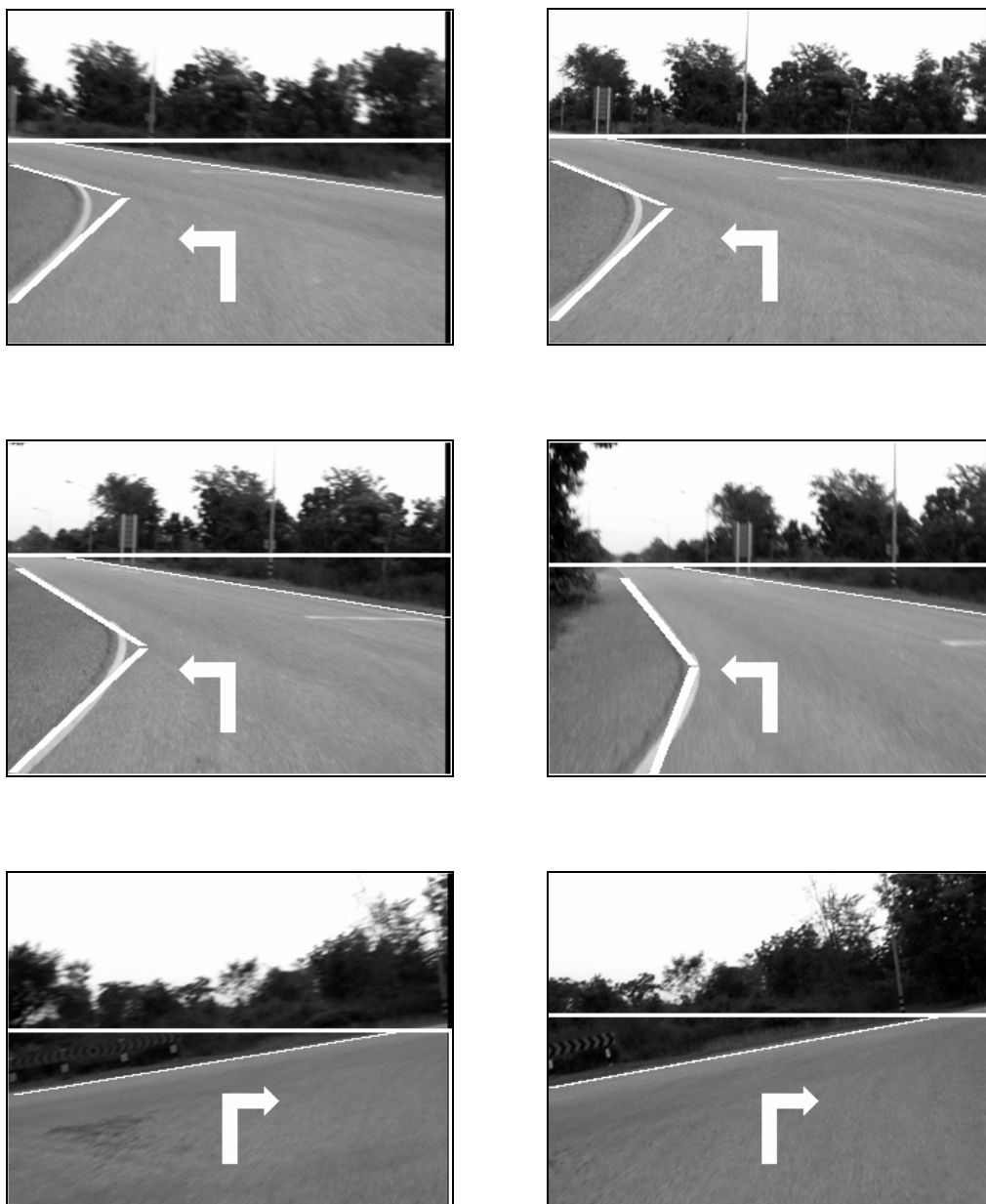
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ (ต่อ)



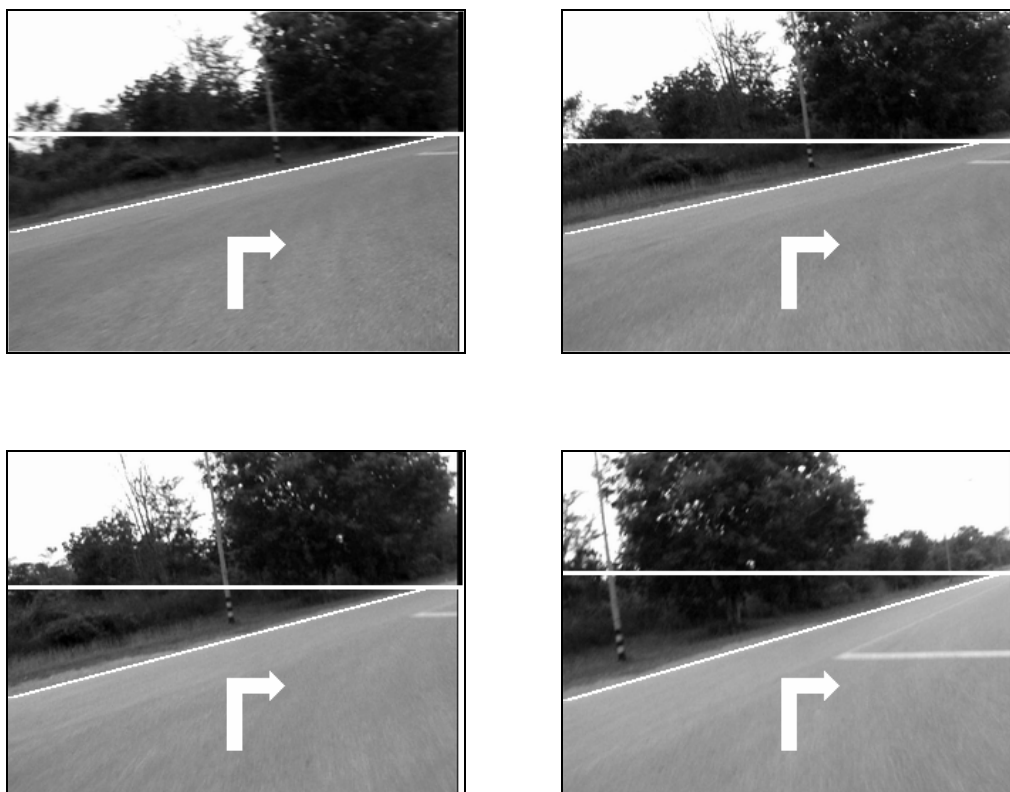
รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ (ต่อ)



รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ (ต่อ)



รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ (ต่อ)



รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบระบบ (ต่อ)

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

เฉลิมพล หลงจาด (2550). การตรวจจับช่องทางเดินรถและการนำวิถีแบบอัตโนมัติโดยใช้แบบจำลองเทียบเคียงรูปแบบ. การประชุมวิชาการทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์., หน้า 8.

Longjard, C. (2007). Automatic Lane Detection and Navigation using Pattern Matching Model. Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Image Processing. Beijing, China:48-53.

ประวัติผู้เขียน

นายเฉลิมพล หลงจาด เกิดเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2524 ที่เขตบางขุนเทียน จังหวัด กรุงเทพมหานคร เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษา ที่โรงเรียนวัดด่านสำโรง จังหวัดสมุทรปราการ ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนมัธยมด่านสำโรง จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนนครขอนแก่น จังหวัดขอนแก่นและสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2545 หลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานที่บริษัท อู่เชิดชัย จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรโรงงาน จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท

ขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ (2) ปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 (4) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 (5) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (6) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 (7) ปฏิบัติการระบบควบคุม และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา ดังรายชื่อที่ปรากฏในภาคผนวก ค ทั้งนี้ผู้เขียนมีความสนใจในงานทางด้านการประมวลผลสัญญาณภาพ การมองเห็นของคอมพิวเตอร์