



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การหลบหลีกสิ่งกีดขวางของรถอัจฉริยะบนพื้นราบด้วยกลจักรวิทัศน์
และตัวควบคุมแบบพีไอดี

Intelligent Car Obstacle Avoidance on Horizontal Ground Using Machine Vision
and PID Controller

นายผู้วิจัย นายพุฒิพงศ์ ขุนทรง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิทิต ฉัตรรัตน์กุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ปรณัฐ วิสุวรรณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การหลบหลีกสิ่งกีดขวางของรถอัจฉริยะบนพื้นราบ
ด้วยกลจักรวิทัศน์และตัวควบคุมแบบพีไอดี

Intelligent Car Obstacle Avoidance on Horizontal Ground
Using Machine Vision and PID Controller

โดย

นายพุฒิพงษ์ ขุนทรง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พุดพิงศ์ ขุนทรง 2554: การหลบหลีกสิ่งกีดขวางของรถอัจฉริยะบนพื้นราบด้วยกลจักร
วิทัศน์และตัวควบคุมแบบพีไอดี ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D. 80 หน้า

การหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในระบบของ
รถอัจฉริยะซึ่งต้องการความน่าเชื่อถือสูงในการตัดสินใจในหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่เกิดขึ้นกับทาง
ด้านหน้าของรถ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบกลจักรวิทัศน์เพื่อแยกแยะระหว่างสิ่งกีดขวางกับสิ่งแวดล้อม
รวมถึงใช้หลักการมองภาพสองตาเพื่อหาระยะห่างของวัตถุเพื่อนำมาออกแบบพฤติกรรมหลบ
หลีกของรถอัจฉริยะที่มีรูปแบบการเคลื่อนที่การเลี้ยวแบบแอ็คเคอร์แมน โดยใช้ตัวควบคุมแบบ
พีไอดีในการควบคุมตำแหน่งของพวงมาลัยและควบคุมความเร็วของรถอัจฉริยะให้เหมาะสมกับ
การเลี้ยวอย่างมีประสิทธิภาพ

ผลที่ได้จากการทดลองระบบกลจักรวิทัศน์ของรถอัจฉริยะเห็นได้ว่าระบบสามารถหา
ระยะห่างของวัตถุได้อย่างแม่นยำส่งผลให้สามารถออกแบบพฤติกรรมการเลี้ยวของรถอัจฉริยะ
ได้อย่างเหมาะสม ตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมมุมเลี้ยวของพวงมาลัยได้อย่างแม่นยำและ
ควบคุมความเร็วของรถโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง ± 0.1 กิโลเมตร/ชั่วโมงเท่านั้น

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Putthipong Khunsong 2011: Intelligent Car Obstacle Avoidance on Horizontal Ground Using Machine Vision and PID Controller. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering.
Thesis Advisor: Assistant Professor Withit Chatlatanagulchai, Ph.D. 80 pages.

Effective obstacle avoidance is the most important factor in intelligent car system which requires good reliability in making decision to avoid obstacle at the front of the car. This research uses machine vision system to differentiate between obstacles and other environmental items and applies the principle of stereo vision to find the distance to the object in order to design the intelligent car avoiding behavior, which has Ackermann's turning pattern. PID controller is used in controlling the steering wheel position as well as controlling the car speed to be suitable for the effective turning.

The machine vision experimental results show that the system can find accurate distance to the obstacle resulting in the ability to design the appropriate turning behavior of the intelligent car. The PID controller can control the turning angle of the steering wheel accurately and can control the car speed within the ± 0.1 kilometer / hour margin only.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษา สำหรับการแนะนำสู่สาขาวิชาการควบคุม ให้คำปรึกษาทั้งด้านทฤษฎีและการปฏิบัติการ ระบบควบคุม ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการตรวจแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ปรณัฐ วิสุววรรณ กรรมการที่ปรึกษา วิชาเอก สำหรับคำแนะนำเชิงปฏิบัติการต่างๆ มาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (RDiPT), ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (Control of Robot and Vibration Laboratory, CRVLAB) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทำวิจัย รวมทั้งโครงการวิจัยพัฒนาและวิศวกรรมจากส่วนงานกลาง สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติสำหรับเงินทุน สนับสนุนในการทำวิจัย นอกจากนี้คือ บริษัท National Instruments สำหรับความรู้ต่างๆ เกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมรวมถึงงานสัมมนา และขอขอบคุณนักเขียนทุกท่านที่มอบความรู้อันมีค่าบน หนังสือ บทความวิชาการทั้งในวารสารวิชาการและงานประชุมวิชาการ

ท้ายสุดนี้ ข้าพเจ้าขอกล่าวคำว่าขอบพระคุณแก่ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอย ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจ ชี้แนะและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

พวลินพงศ์ ขุนทรง
พฤษภาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์ และอักษรย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
วิธีการ	37
ผลและวิจารณ์	61
สรุปและข้อเสนอแนะ	75
สรุป	75
ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	78
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	80

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การเปลี่ยนแปลงระยะห่างของวัตถุต่อความยาวโฟกัส	43
2	ผลการการเพิ่มค่าตัวแปรอย่างอิสระ	59
3	วิธีการปรับอัตราขยาย โดยวิธีการ Ziegler-Nichols	60
4	สรุปค่าผิดพลาดระยะทางจากการประมวลผล	66
5	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดของระยะทาง (%)	67

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงความเข้มข้นแสงเทียบค่าที่ได้จากเซลล์รับภาพ	5
2	แสดงการแทนด้วยสีจริงด้วยสีแดง สีเขียวและน้ำเงิน	7
3	ต้นแบบรถทำการทดลอง	13
4	ความผิดพลาดพาราแลกซ์	14
5	ลักษณะทางเรขาคณิตของ Binocular Stereo	15
6	การวางกล้องทั้งสองให้เกิดการตัดกันของ แกน Optical	17
7	การ Tracking ในแนวแกน Z	19
8	การ Tracking ศูนย์กลางของวัตถุด้วยมุม Pan tilt	19
9	ภาพของถนนและยานพาหนะอื่นๆซึ่งถือเป็นสิ่งกีดขวางในการเคลื่อนที่	21
10	แผนภาพบล็อกของการควบคุมพีไอดี	26
11	กราฟ PV ต่อเวลา K_p กำหนดเป็น 3 ค่า (K_i และ K_d คงที่)	27
12	กราฟ PV ต่อเวลา K_i กำหนดเป็น 3 ค่า (K_p และ K_d คงที่)	28
13	กราฟ PV ต่อเวลา K_d กำหนดเป็น 3 ค่า (K_p และ K_i คงที่)	30
14	รถอัจฉริยะต้นแบบ	33
15	อุปกรณ์เอนโคเดอร์เซนเซอร์	33
16	อุปกรณ์วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง	34
17	การ์ดรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221 (CB68)	34
18	กล้องเว็บแคมของ Logitech Pro 9000	35
19	โปรแกรม LabVIEW	35
20	ตัวอย่างหน้าจอของโปรแกรม NI Vision Assistant	36
21	ขั้นตอนการหาค่าพิกเซลจากภาพ	37
22	ขั้นตอนการหาการแยกบริเวณ (Segmentation) โดยค่า Threshold และวิธี Morphology	39
23	ขั้นตอนลำดับการทำงาน โปรแกรม NI Assistant ในการแยกบริเวณ	39
24	ภาพตัวอย่างการเขียน โปรแกรม LabVIEW ในหน้าของ Block Diagram	40
25	ทดลองระยะ 4.2 เมตร	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ทดลองระยะ 3.6 เมตร	41
27	ทดลองระยะ 3.0 เมตร	41
28	ทดลองระยะ 2.4 เมตร	42
29	ทดลองระยะ 1.8 เมตร	42
30	ทดลองระยะ 1.2 เมตร	43
31	ภาพแสดงการติดลินใจซ้ายหรือขวา ซึ่งที่ได้คือด้านซ้าย	44
32	หน้าที่ของระบบการเลี้ยว	46
33	ระบบการเลี้ยวแบบแอ็คเคอร์แมน	47
34	การเลี้ยวแบบแอ็คเคอร์แมน โดยแกนคันชักคันส่งรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู	48
35	แสดงพฤติกรรมของรถอัจฉริยะ	55
36	จำลองการเคลื่อนที่การหลบที่หลบสิ่งกีดขวาง	55
37	แสดงลักษณะการตอบสนองของระบบ	56
38	แสดงการทำงานของมอเตอร์	57
39	แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง ในระยะ 4.2, 3.6, 3, 2.4 และ 1.2 เมตร ตามลำดับ	61
40	แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง โดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 10 mm	62
41	แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง โดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 9.5 mm	62
42	แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง โดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 9 mm	63
43	แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง โดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 8.5 mm	63
44	แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง โดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 8 mm	64
45	แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง โดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 7.5 mm	64
46	แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง โดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 7 mm	65
47	แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง โดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 6.5 mm	65
48	แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง โดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 6 mm	66
49	ภาพการเลี้ยวของพวงมาลัย	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	แสดงความเร็วเริ่มต้นที่ 0 (km / h) และความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์ วงจรขั้วมอเตอร์กระแสตรง	70
51	แสดงความเร็วที่ 0.3777 (km / h) และความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์ วงจรขั้วมอเตอร์กระแสตรง	71
52	แสดงความเร็วที่ 0.754 (km / h) และความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์ วงจรขั้วมอเตอร์กระแสตรง	71
53	แสดงความเร็วที่ 1.131 (km / h) และความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์ วงจรขั้วมอเตอร์กระแสตรง	72
54	แสดงความเร็วที่ 1.508 (km / h) และความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์ วงจรขั้วมอเตอร์กระแสตรง	72
55	แสดงความเร็ว ที่ 1.508 (km / h) ความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์วงจร ขั้วมอเตอร์กระแสตรงและกลับเข้าสู่ความเร็ว 0 (km / h)	73
56	แสดงความเร็วเคลื่อนที่ถอยหลังและเดินหน้าโดยการปรับค่าและความต่าง ศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์วงจรขั้วมอเตอร์กระแสตรง	73

คำอธิบายสัญลักษณ์ และอักษรย่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์

δ_i	=	มุมเอียงของล้อใน (<i>deg</i>)
δ_o	=	มุมเอียงของล้อนอก (<i>deg</i>)
τ	=	ตัวแปรปริพันธ์หุ่น
a	=	ความเร่งของรถ ($m.s^{-2}$)
b	=	ระยะห่างระหว่างกล้อง 2 ตัว (<i>mm</i>)
c_1	=	ค่าของพารามิเตอร์ที่กำหนดคุณลักษณะรูปร่างและตำแหน่งของแบบจำลองของเส้นขอบถนน
c_2	=	ค่าของพารามิเตอร์ที่กำหนดคุณลักษณะรูปร่างและตำแหน่งของแบบจำลองของเส้นขอบถนน
c_3	=	ค่าของพารามิเตอร์ที่กำหนดคุณลักษณะรูปร่างและตำแหน่งของแบบจำลองของเส้นขอบถนน
D	=	ค่าของDisparity
D_{out}	=	สัญญาณขาออกของอนุพันธ์
e	=	ค่าผิดพลาด
f	=	ความยาวโฟกัส (<i>mm</i>)
f_v	=	ระยะของขอบเขตการมอง
H	=	ความกว้างของช่วงล้อหลัง (<i>m</i>)
h	=	ค่าความสูงของตำแหน่งติดกล้อง (<i>m</i>)
I	=	ความเข้มขึ้นของแสง
I_{out}	=	สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์
K_d	=	อัตราขยายแบบอนุพันธ์
K_i	=	อัตราขยายแบบปริพันธ์
K_L	=	อัตราขยายของล้อซ้าย
K_p	=	อัตราขยายแบบสัดส่วน
K_R	=	อัตราขยายของล้อขวา
K_s	=	อัตราขยายของพวงมาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์ และอักษรย่อ (ต่อ)

คำอธิบายสัญลักษณ์

K_u	=	อัตราขยายของตัวควบคุม
MV	=	เป็นผลรวมของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุม PID
n	=	จำนวนพิกเซลที่แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสของรถคัทน้ำกับพื้น (<i>pixel</i>)
P	=	ความกว้างของสลักลื่อน้ำ
\bar{P}	=	ความกว้างของจุดศูนย์กลางของระนาบของวัตถุถึงจุดศูนย์กลางของภาพวัตถุ
P_{out}	=	ตำแหน่งของจุดของแต่ละภาพเมื่อวัดจากศูนย์กลางของ ระนาบของวัตถุ
p	=	ตำแหน่งของจุดของแต่ละภาพเมื่อวัดจากศูนย์กลางของ ระนาบของวัตถุ
R_i	=	รัศมีการเลี้ยวของล้อหลังลื่อนอก (m)
R_o	=	รัศมีการเลี้ยวของล้อหลังลื่อนอก (m)
S_i	=	รัศมีการเลี้ยวของล้อหน้าลื่อนใน (m)
S_o	=	รัศมีการเลี้ยวของล้อหน้าลื่อนนอก (m)
T	=	ค่าของการแกว่ง
t	=	เวลา (s)
u	=	ค่าสัญญาณของตัวควบคุม
w	=	ค่าพิกเซลต่อความยาวจริง (<i>pixel / m</i>)
W	=	ความกว้างของช่วงล้อหน้า-หลัง (m)
X	=	ค่าของตัวแปรที่เราต้องการ
X_1	=	ค่าของตัวแปรต้นตัวแรกที่เราต้องการจากตาราง
X_2	=	ค่าของตัวแปรต้นตัวที่สองที่เราต้องการจากตาราง
x	=	ระยะบนทิศทางของแกน x (mm)
Y_1	=	ค่าของตัวแปรตามตัวแรกที่เราต้องการจากตาราง
Y_2	=	ค่าของตัวแปรต้นตัวที่สองที่เราต้องการจากตาราง
Z_{err}	=	ค่าความผิดพลาดจากระยะทาง
Z	=	ระยะติดตาม (m)
z	=	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของภาพ (mm)

คำอธิบายสัญลักษณ์ และอักษรย่อ (ต่อ)

คำอธิบายอักษรย่อ

AI	=	Artificial Intelligence
Corr	=	Correlation Function
DSP	=	Digital Signal Processor
LabVIEW	=	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
NI	=	National Instrument
PCI	=	Peripheral Component Interconnection
PV	=	Process Value
PXI	=	PCI Express
ROI	=	Region of Interest
SP	=	Set-point
SRIF	=	Square-root Information Filter
SSD	=	Sum of Squared Difference
OCR	=	Optical Character Recognition

การหลบหลีกสิ่งกีดขวางของรถอัจฉริยะบนพื้นราบ ด้วยกลจักรวิทัศน์และตัวควบคุมแบบพีไอดี

Intelligent Car Obstacle Avoidance on Horizontal Ground Using Machine Vision and PID Controller

คำนำ

อุบัติเหตุทางท้องถนนเป็นสาเหตุใหญ่และเกิดขึ้นได้บ่อยเป็นอันดับต้น ซึ่งทำให้คนนั้นได้เกิดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สิน ไม่ว่าจะเป็นทั้งคนขับหรือผู้รับเคราะห์ก็ตาม และมีสาเหตุใหญ่ๆ ดังนี้ คือ ความประมาทของผู้ใช้รถและถนน เพราะขาดการระมัดระวังหรือว่าอาจจะไม่ได้ปฏิบัติตามกฎของจราจรเป็นหนึ่งในสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ประสบอุบัติเหตุอย่างมากและความไม่พร้อมของผู้ขับขี่เช่นพักผ่อนไม่เพียงพออยู่ในอาการมึนเมาจากการดื่มสุราหรือรับประทานยา ที่อาจทำให้เกิดการง่วงซึม ทำให้ประสิทธิภาพการตัดสินใจนั้นด้อยลงมีผลทำให้เกิดประสบอุบัติเหตุ ซึ่งจากจากสถิติของสำนักงานตำรวจแห่งชาตินับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538 - พ.ศ. 2545 พบว่ามีคนไทยเสียชีวิตจากอุบัติเหตุจราจรสูงถึง 105,998 คน และจากสถิติของกระทรวงสาธารณสุข ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2545 มีคนไทยบาดเจ็บจากอุบัติเหตุจราจร 2,820,600 คน โดยผู้ประสบเหตุส่วนใหญ่จะอยู่ในวัยหนุ่มสาว และกว่าครึ่งของผู้ประสบเหตุ มีสาเหตุมาจากเมาแล้วขับแทบทั้งสิ้น และประเทศไทยต้องสูญเสียทางด้านเศรษฐกิจกว่าปีละแสนล้านบาท (จากข้อมูล www.sema.go.th)

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนายานพาหนะให้เข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมมากขึ้นเนื่องจากปัจจัยต่างๆ รวมถึงมีการคิดค้นรถยนต์อนาคตที่ผู้ขับนั้นไม่ต้องขับเคลื่อนด้วยตัวเองหรือที่เข้าใจกันดีว่า “รถอัจฉริยะ” โดยสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทยร่วมกับศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) จัดสัมมนา “ประเทศไทยจะพัฒนารถอัจฉริยะไว้คนขับคันแรกได้อย่างไร” เพื่อเผยแพร่ความรู้และกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีเชื่อมต่องานวิจัย อันจะสามารถขยายผลสู่เชิงอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย ทั้งยังเพิ่มศักยภาพการแข่งขันให้กับประเทศไทยโดยมีการแข่งขัน ทำให้แต่ละทีมมีวิธีการต่างๆ ในระบบอัจฉริยะนี้เช่น เครื่องรับรู้ (sensor) ต่างๆ ซึ่งมีราคาแพงมากทำให้เกิดมีการใช้ Machine Vision

Machine Vision เป็นการทำให้อุปกรณ์ประมวลผลต่างๆ มีความสามารถในการ “รับรู้” ภาพซึ่งทำให้เครื่องจักรสามารถตัดสินใจสั่งงานกลไกต่างๆ ได้ เปรียบเทียบได้กับการ “มองเห็น และการรับรู้” ของมนุษย์สามารถแยกแยะสิ่งของต่างๆ เมื่อมีวัตถุในมาขวาง โดยเมื่อมนุษย์มองเห็นสิ่งของต่างๆ จะสั่งการให้สมองสั่งการเพื่อจะตัดสินใจว่าจะทำอะไรเพื่อหลบวัตถุนั้น ซึ่งโดยปกติ นั้นมนุษย์จะสามารถทำได้โดยทันทีแต่ว่าเครื่องจักรนั้นต้องมีระบบการคิดที่ซับซ้อน เนื่องจากว่า การทำงานของสมองของมนุษย์นั้นแตกต่างจากเครื่องจักรตรงที่สมองของมนุษย์นั้นมีหน่วยย่อยๆ ซึ่งมีจำนวนมหาศาลและทำงานพร้อมกันเป็นแบบขนาน (Parallel Processing) แทนที่จะทำงานทีละขั้นตอน (Serial Processing) ซึ่งเป็นวิธีทำงานของอุปกรณ์การประมวลผลภาพในปัจจุบัน

แม้ว่า ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันนั้นจะไม่สามารถพัฒนาความสามารถในการมองเห็นได้เทียบเท่า “การมองเห็นและรับรู้” ของมนุษย์ แต่ผลที่พัฒนานี้ทำให้มีการประยุกต์ใช้งานกับการมองเห็นของหุ่นยนต์

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะศึกษาและควบคุมรถอัจฉริยะที่มีการเคลื่อนที่บนพื้นราบเท่านั้น ด้วยวิธีของกลจักรวิทัศน์ในการรับภาพและวิเคราะห์เพื่อหาระยะห่างของวัตถุซึ่งวัตถุนี้มีเพียงสีดำเท่านั้น รวมถึงการออกแบบพฤติกรรมการหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยที่มีการเคลื่อนที่ที่มีการเลี้ยวแบบแอ็คเคอร์แมน โดยใช้ควบคุมอัตโนมัติโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมตำแหน่งพวงมลัยและความเร็วของรถอัจฉริยะ โดยไม่คิดแรงเสียดทานของล้อมาเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและเข้าใจหลักการทำงานของระบบกลจักรวิทัศน์เพื่อหาระยะห่างของวัตถุกับรถอัจฉริยะ โดยใช้หลักการมองภาพสองตา
2. ออกแบบพฤติกรรมของการเลี้ยวของรถอัจฉริยะที่มีระบบการเลี้ยวแบบแอ็คเคอร์แมน
3. การควบคุมตำแหน่งของพวงมาลัยและความคุมความเร็วของรถอัจฉริยะด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

ขอบเขตการศึกษา

1. รถอัจฉริยะเคลื่อนที่บนพื้นราบและกว้างเพียงพอที่จะไม่เห็นขอบถนน
2. วัตถุที่ต้องการหลบหลีกต้องมีสี่เหลี่ยมเท่านั้นเท่านั้น
3. ลักษณะการเลี้ยวของรถอัจฉริยะที่มีระบบการเลี้ยวแบบแอ็คเคอร์แมน
4. การควบคุมตำแหน่งของพวงมาลัยและความคุมความเร็วของรถอัจฉริยะเป็นลักษณะรถยกลอยกับพื้น
5. ความเร็วของรถคือตั้งแต่ถอยหลัง 1.5 km/h ถึง เดินหน้า 1.5 km/h

การตรวจเอกสาร

1. กลจักรวิทัศน์ (Machine Vision)

Machine Vision คือวิธีการที่ทำให้อุปกรณ์ประมวลผลต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processor; DSP) มีความสามารถในการ “รับรู้” ภาพ ซึ่งรวมทั้ง การทำให้อุปกรณ์ประมวลผลนั้นๆ สามารถตัดสินใจและสั่งงานกลไกส่วนต่างๆ ได้ จากข้อมูลที่ได้จากภาพหรือกลุ่มของภาพนั้นๆ จุดมุ่งหมายสูงสุดของ Machine Vision คือ ทำให้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ประมวลผลต่างๆ มีความสามารถให้ได้เทียบเท่ากับระบบการมองเห็นของมนุษย์ ที่มีวิวัฒนาการต่อเนื่องกันมาหลายสิบล้านปี อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีในปัจจุบัน ยังคงไม่สามารถทำให้เครื่องจักรสามารถมองเห็นและรับรู้ ได้เทียบเท่ากับความสามารถของมนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น ผู้อ่านที่เป็นมนุษย์ที่มีสภาพร่างกายปกติ จะสามารถแยกแยะสิ่งของที่ต้องการจากกองสิ่งของหลายๆ อย่างได้ หรือ สามารถแยกแยะหน้าคนที่คุ้นเคยได้ จากกลุ่มคนที่อยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีฝนตก หรือหมอกกลงจัด การทำกิจกรรมดังกล่าวนี้ ผู้อ่านจะสามารถทำได้โดยแทบจะไม่ต้องใช้ความพยายามมากเท่าไรนัก ซึ่งหากต้องการใช้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ประมวลผลที่มีความสามารถที่จะทำกิจกรรมดังกล่าวได้นั้น นอกจากจะต้องใช้ความพยายามเป็นอย่างมากแล้ว ยังต้องให้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างกันระหว่างการทำงานของอุปกรณ์ประมวลผลและสมองของมนุษย์ ที่แม้ว่าอุปกรณ์ประมวลผลจะมีความเร็วในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์สูงกว่าสมองของมนุษย์มาก ดังจะเห็นได้ง่ายๆ จากการบวกเลข 20 หลักเข้าด้วยกัน จะพบว่าคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันหรือแม้กระทั่งเครื่องคิดเลขธรรมดาทั่วไป จะสามารถทำงานดังกล่าวได้โดยใช้เวลาเพียงเสี้ยววินาทีเท่านั้น ซึ่งต่างกับสมองของมนุษย์ที่เป็นหน่วยประมวลผลอย่างง่าย ๆ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากหน่วยย่อยๆ ของสมองมนุษย์เหล่านี้มีจำนวนมากมายมหาศาล และทำงานไปพร้อมๆ กัน (Parallel Processing) แทนที่จะทำงานทีละขั้นตอน (Serial Processing) ซึ่งเป็นวิธีการทำงานของอุปกรณ์ประมวลผลที่มีอยู่ในปัจจุบัน จึงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของสมองมนุษย์สูงกว่าอุปกรณ์ประมวลผลที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นอย่างมาก

แม้ว่า ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันจะไม่สามารถพัฒนาความสามารถการมองเห็นและรับรู้ ของเครื่องจักรให้ได้เทียบเท่ากับของสมองมนุษย์ แต่ผลที่ได้จากการพัฒนาความรู้เรื่อง Machine Vision ก็สามารถนำไปใช้กับระบบรักษาความปลอดภัย หรือแม้กระทั่งการประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม เป็นต้น

1.1 การดึงข้อมูลภาพ (Image Acquisition)

หากจะกล่าวอย่างง่าย ๆ แล้วกระบวนการดึงข้อมูลภาพ คือ กระบวนการที่เริ่มต้นตั้งแต่การถ่ายภาพโดยกล้อง ตลอดจนถึงการดึงภาพซึ่งเป็นข้อมูลที่อยู่ในกล้องมาสู่คอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์ประมวลผล เพื่อที่จะได้ประมวลผล และตัดสินใจสั่งงานจากผลที่ได้ต่อไป กระบวนการดังกล่าวมีรายละเอียดปลีกย่อยที่สำคัญดังนี้

1.1.1 ประเภทของกล้องที่ใช้ในงานตรวจสอบชิ้นส่วนในเชิงอุตสาหกรรม กล้องที่ใช้กับงานตรวจสอบชิ้นส่วนในปัจจุบันนั้น จะเป็นกล้องดิจิทัลซึ่งใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เรียกว่า เซ็นเซอร์รับภาพ (Image Sensor) เพื่อใช้ในการรับภาพ เซ็นเซอร์ดังกล่าวมีขนาดเล็กมากเท่าเล็บมือคนเท่านั้น ซึ่งประกอบด้วยไดโอดที่มีความไวต่อแสงเรียงตัวอยู่เป็นจำนวนมาก และในทันทีที่ทันใดที่แสงมีการตกกระทบไดโอดเหล่านี้ ไดโอดแต่ละตัวจะทำการจดจำความเข้มแสงที่ได้จดจำไว้ในไดโอดแต่ละตัว จะถูกตัดแปลงให้อยู่ในรูปข้อมูลที่เป็นดิจิทัลและเก็บไว้ในหน่วยความจำที่อยู่ในตัวกล้อง เพื่อรอส่งต่อไปให้อุปกรณ์ที่อยู่นอกกล้องต่อไป

สำหรับไดโอดนี้เรียกว่าเซลล์รับภาพ (พิกเซล pixel) ซึ่งหนึ่งเซลล์รับภาพจะให้ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบเพียงค่าหนึ่งเท่านั้น โดยทั่วไปค่าที่ได้จากเซลล์รับภาพจะมีค่า 0-255 เท่านั้น (ช่วงข้อมูลดังกล่าว สามารถแทนด้วยข้อมูลขนาด 1 byte หรือ 8 บิต ที่จะให้ความละเอียด 2^8 หรือ 256 ระดับ ซึ่งเป็นรายละเอียดของกล้องที่สามารถพบโดยทั่วไปของท้องตลาด อย่างไรก็ตาม จะมีกล้องบางประเภทที่ให้ค่าความเข้มของแสงที่มีรายละเอียดสูงถึง 16 บิตเลยทีเดียว) โดยหากค่าที่ได้มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าที่เซลล์รับภาพนั้น มีค่าความเข้มสูงสุดหรือเป็นด้านสว่าง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงความเข้มแสงเทียบค่าที่ได้จากเซลล์รับภาพ

เมื่อพิจารณากระบวนการทั้งหมด จะพบว่าเซลล์รับภาพแต่ละเซลล์นั้นจะให้ค่าความเข้มแสงออกมาเป็นตัวเลขที่อยู่ระหว่าง 0-255 เท่านั้น ซึ่งทำให้ได้ภาพที่เป็นโทนขาวดำหรือเรียกว่า Gray scale image เท่านั้น จึงมีคำถามว่ากล้องถ่ายภาพสีนั้นมีหลักการทำงานอย่างไร คำตอบก็คือว่า กล้องสีก็ยังคงใช้เซลล์รับภาพเหล่านี้เช่นกัน โดยทำการแยกสีหลักสามสี ได้แก่ สีแดง เขียว และน้ำเงิน ออกจากกัน โดยการติดตั้งตัวกรองแสงสี (Filter) แต่ละสีไว้หน้าเซลล์รับภาพแล้วทำการวัดความเข้มขึ้นของแต่ละสีนั่นเอง

1.1.2 ภาพที่อุปกรณ์ประมวลผล “มองเห็น” หลักการทำงานของกล้องก็เป็นเช่นเดียวกับระบบการมองเห็นของมนุษย์นั่นคือภาพเกิดจากการที่มีแสงมาตกกระทบวัตถุแล้วมีแสงสะท้อนจากวัตถุผ่านเลนส์เข้ามาตกกระทบเซ็นเซอร์รับภาพ (Image Sensor) ของกล้อง ซึ่งประกอบด้วยเซลล์รับภาพ (pixel) จำนวนมากเซลล์รับภาพแต่ละเซลล์ทำหน้าที่แปลงความเข้มแสงสำหรับกรณีที่เป็นกล้องขาวดำหรือแปลงความเข้มขึ้นสีของสีแดง, เขียวและน้ำเงิน สำหรับกรณีของกล้องที่ถ่ายภาพสีให้อยู่ในรูปของค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะถูกลบสัญญาณดิจิทัลด้วยตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลอีกทีหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การทำงานของเซลล์รับภาพของกล้องจะแตกต่างจากเซลล์รับภาพของมนุษย์อยู่ 2 ประการด้วยกัน คือ

ก. จำนวนเซลล์รับภาพที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นเซ็นเซอร์รับภาพของกล้องนั้นมีจำนวนน้อยกว่าของมนุษย์เป็นอย่างมาก ทำให้ภาพที่ได้จากกล้องนั้นมีความละเอียดน้อยกว่าของมนุษย์เป็นอย่างมาก ภาพที่ได้จากกล้องจึงเกิดการสุ่มจับจริงด้วยจำนวนที่จำกัดของเซลล์รับภาพ

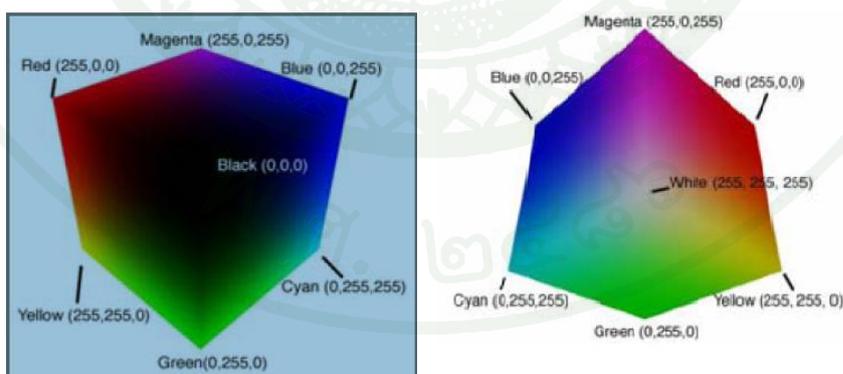
ข. ความเข้มขึ้นแสงที่ได้จากภาพจริงด้วยเซลล์รับภาพ (หรือความเข้มสีในกรณีของกล้องถ่ายภาพสี) ของเซ็นเซอร์รับภาพที่อยู่ในกล้องนั้น จะเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete value) เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ดิจิทัลซึ่งจะเป็นการสุ่มขนาดของความเข้มแสงที่ตกกระทบ (Amplitude Sampling) ไม่เหมือนกับมนุษย์ที่มีความต่อเนื่อง เนื่องจากการทำงานของสารเคมีที่อยู่ในเซ็นเซอร์รับภาพ

ข้อจำกัดดังกล่าว จึงทำให้ข้อมูลภาพ Gray Scale ที่อุปกรณ์ประมวลผลภาพมองเห็นมีลักษณะเป็นอาร์เรย์ 2 มิติ โดยที่ค่าแต่ละช่องของอาร์เรย์จะแทนความเข้มขึ้นหรือความเข้มสีที่ตกกระทบเซลล์รับภาพที่ตำแหน่งนั้นซึ่งค่าความเข้มขึ้นดังกล่าวจะเป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่องและโดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 0 ถึง 255 เท่านั้น ดังสมการที่ 1 ซึ่งเป็นตัวอย่างภาพที่มีจำนวนแถวหรือความสูงของภาพเท่ากับ m แถว และมีจำนวนหลักหรือความกว้างของภาพเท่ากับ n หลัก

$$Image = \begin{bmatrix} I(1,1) & I(1,2) & \cdot & \cdot & I(1,n) \\ I(2,1) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ I(m,1) & I(m,2) & \cdot & \cdot & I(m,n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ $I(m,n)$ คือค่าความเข้มชั้นของแสง ณ แถว m และหลัก n ของเซ็นเซอร์รับภาพซึ่งเป็นค่าไม่ต่อเนื่อง

สำหรับกรณีที่เป็นกล้องถ่ายภาพสีนั้น ข้อมูลของภาพจะเป็นอาร์เรย์มิติจำนวน 3 อาร์เรย์ด้วยกัน และโดยทั่วไปแล้วอาร์เรย์เหล่านี้จะเป็นค่าความเข้มสีของสีแดง เขียว น้ำเงินตามลำดับ ซึ่งแต่ละช่องของอาร์เรย์เหล่านี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-255 เช่นกัน ดังนั้น การแทนสีที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติของอุปกรณ์ประมวลผล จะแทนด้วยค่าความเข้มสี ณ ตำแหน่งเดียวกันของอาร์เรย์ทั้งสามมาผสมกัน สำหรับตัวอย่างสีที่เกิดจากการผสมกันของสีทั้งสามนั้น แสดงไว้ในภาพที่ 2 จะพบว่าการผสมแสงสีแดงกล่าว จะคล้ายคลึงกับวิชาศิลปะที่เป็นการผสมสีของแม่สีเข้าด้วยกันนั่นเอง อย่างไรก็ตาม การรวมตัวกันของแสงที่อยู่ในอุปกรณ์ประมวลผลนั้นเรียกว่า Additive Color System ที่หากที่การรวมกันของแสงสีต่างๆด้วยค่าสูงสุดแล้วจะให้แสงสีขาวออกมา ในขณะที่การผสมสีในวิชาศิลปะนั้นเมื่อผสมแม่สีทั้งสามเข้าด้วยกันด้วยปริมาณที่เท่าๆกันจะได้สีดำออกมา ซึ่งเรียกระบบสีนี้ว่า Subtractive Color System



ภาพที่ 2 แสดงการแทนด้วยสีจริงด้วยสีแดง สีเขียวและน้ำเงิน

- เมื่อพิจารณาจากด้านสีดำ จะพบว่าค่าของสีทั้งสามเท่ากับ 0
- เมื่อพิจารณาจากด้านสีขาว จะพบว่าค่าของสีทั้งสามเท่ากับ 255

ที่มา: cdn.researchers.in.th (2009)

ในภาพที่ 2 จะพบว่าค่าความเข้มสีของอาร์เรย์สีแดง ณ ตำแหน่ง ดังกล่าว จะมีค่าสูงสุดคือ 255 ในขณะที่ ตำแหน่งเดียวกันของอาร์เรย์อื่นๆจะมีค่าเป็น 0 ซึ่งจะพบว่าแบบจำลองการแทนสีที่เกิดขึ้นจริงด้วยการผสมระหว่างสีแดง เขียว และน้ำเงินนี้ว่า RGB Color Space ซึ่งเป็นวิธีแทนสีที่เกิดขึ้นจริงด้วยการผสมระหว่างอุปกรณ์ประมวลผลโดยทั่วไป อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันนี้มีวิธีระบุสีที่เกิดขึ้นจริงหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบก็เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะอย่างซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

สำหรับในทางปฏิบัตินั้น หากพิจารณาจากแง่ของโปรแกรม การส่งข้อมูลภาพจากกล้องมาสู่คอมพิวเตอร์จะไม่ได้อยู่ในรูปของอาร์เรย์ 2 มิติแต่จะอยู่ในรูปของ Byte Stream ที่ เป็นข้อมูลที่มีความต่อเนื่องเรียงต่อกัน โดยทั่วไปแล้ว ข้อมูลค่าแรก จะเป็นค่าความเข้มสีของเซลล์รับภาพที่อยู่มุมล่างของเซ็นเซอร์รับภาพในกรณีที่กล้องถ่ายภาพแบบ Grayscale และสำหรับกรณีที่ถ่ายภาพสีนั้น ข้อมูลค่าแรกจะเป็นสีน้ำเงินของเซลล์รับภาพที่อยู่มุมล่างขวาของเซ็นเซอร์รับภาพ ซึ่งจะตามด้วยสีเขียวและสีแดงของจุดเดียวกันเป็นลำดับต่อเนื่องกันไป ดังนั้น โปรแกรมจะต้องทำการเรียงข้อมูลที่มีความต่อเนื่องเหล่านี้ให้อยู่ในรูปอาร์เรย์ 2 มิติเสียก่อน ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการอ้างถึงตำแหน่งของข้อมูลของกระบวนต่อไปนั่นเอง

1.2 การประมวลผลภาพเบื้องต้น (Pre-processing)

การประมวลผลภาพมีด้วยกันหลากหลายกระบวนการด้วยกัน กระบวนการเหล่านี้เป็นความรู้ที่สามารถพบได้ทั่วไปในสาขาเรื่อง การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) ซึ่งจะพบว่าในสาขาวิชานี้มีความรู้เกี่ยวกับการประมวลผลภาพอยู่มากมายที่นำมาประยุกต์ใช้กับรถอัจฉริยะแบบอัตโนมัติ เช่น

1. การลดทอนสัญญาณรบกวนที่ปรากฏขึ้นในภาพ
2. การตรวจจับขอบของวัตถุที่อยู่ในภาพ
3. การแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของภาพ เช่นการหมุน การเลื่อน การย่อและขยายภาพ เป็นต้น
4. การแปลงสี (Color Space Conversion)

5. การวิเคราะห์ภาพในเชิงความถี่

6. การบีบอัดข้อมูลภาพ

จะพบว่า ระเบียบวิธี (Algorithm) ของวิธีประมวลผลภาพบางอย่างไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับงานของรถอัจฉริยะ เนื่องจากต้องการการทำงานที่รวดเร็ว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกใช้ระเบียบวิธีเฉพาะที่ง่ายและใช้เวลาการทำงานที่น้อยที่สุด ความรู้เกี่ยวกับคอนโทรลนั้นซึ่งมีอยู่แล้วในผู้ปฏิบัติงาน ก็ควรนำมาใช้เพื่อช่วยให้ระบบสามารถทำงานให้ได้เร็วที่สุดด้วยเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น

1. การระบุบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ (Region of Interest; ROI) โดยผู้ปฏิบัติงาน รวมทั้งประเภทการตรวจสอบที่ใช้กับบริเวณนั้นๆ จะพบว่า การระบุเฉพาะบริเวณที่สนใจรวมทั้งรูปแบบการวัดหรือการตรวจสอบที่ใช้เฉพาะกับบริเวณนั้นๆ จะทำให้โปรแกรมสามารถตัดการคำนวณของบริเวณที่ไม่เกี่ยวข้องออกไป ทำให้โปรแกรมสามารถทำงานได้เร็วขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์สีที่ผิดเพี้ยนซึ่งจะต้องมีการแปลงระบบสี (Color Conversion) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาการคำนวณค่อนข้างมาก หากทำการแปลงระบบสีของภาพทั้งภาพนั้นจะต้องใช้เวลาค่อนข้างมาก หากผู้ปฏิบัติงาน “ช่วย” บอกกับระบบว่า เฉพาะบริเวณใดบ้างที่ต้องการตรวจจับสีผิดเพี้ยน โปรแกรมก็จะสามารถทำการแปลงหรือคำนวณเฉพาะบริเวณที่ระบุไว้ โดยละบริเวณที่ไม่ได้ระบุไว้ ซึ่งจะทำให้ระบบที่ความรวดเร็วขึ้นมาก

2. การนำความรู้เรื่องรูปร่างของวัตถุมาใช้ เช่น การตรวจสอบบริเวณขอบของวัตถุที่เป็นส่วนของเส้นตรง หรือการหารัศมีของชิ้นส่วนหรือบริเวณที่เป็นวงกลม จะพบว่า การตรวจสอบประเภทนี้จะต้องทำการตรวจจับเส้นตรงหรือการตรวจสอบจับวงกลมนั้นๆ ให้ได้เสียก่อนๆ ที่จะพิจารณาคุณสมบัติอื่นๆ เช่น มุมมองของเส้นตรง หรือ จุดศูนย์กลางของวงกลม เป็นต้น กระบวนการตรวจจับดังกล่าวสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งวิธีที่นิยมเป็นอย่างมากในการตรวจจับเส้นตรงหรือวงกลม เรียกว่า Hough Transform ซึ่งเป็นการหาสมการของเส้นตรงหรือสมการของวงกลม โดยไม่ต้องมีข้อมูลใดๆ มาช่วย วิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่นิยมกันมากในการทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมแบบเปิด ที่มีสิ่งของไม่ทราบรูปร่างแน่นอนมาก่อนเข้ามาในระบบ อย่างไรก็ตามสำหรับระบบตรวจสอบวัตถุด้วยภาพแบบอัตโนมัติที่มีการนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่ถูกควบคุมไว้ อีกทั้งการที่รูปร่างของวัตถุและการวางตัวของวัตถุก็ถูกกำหนดไว้ตายตัวอยู่แล้วทำให้สามารถใช้วิธีการ

ธรรมดาๆ เช่น Linear Regression ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เวลาการคำนวณน้อยมาก เพื่อใช้หาสมการของเส้นตรงก็ได้เช่นกัน

1.3 ข้อดีของระบบ Machine Vision ที่เหนือกว่ามนุษย์

สามารถใช้ตรวจสอบงานที่ต้องการความเร็วสูงได้ หรือมีความสม่ำเสมอในการทำงาน

1. สามารถที่จะเพิ่มกำลังขยายของการมองเห็นได้สูง
2. สามารถทำงานติดต่อกันนาน ๆ ได้ตลอด 24 ชั่วโมง
3. สามารถทำงานซ้ำๆ รูปแบบเดียวกัน
4. ไม่ต้องการระยะเวลาในการเรียนรู้งาน
5. สามารถเปลี่ยนรูปแบบการทำงานได้ทันที ไม่ต้องศึกษาค้นคว้าใหม่
6. สามารถทำงานในสถานที่ที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้ เช่น บริเวณที่เสี่ยงต่ออันตรายต่อมนุษย์
7. สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมในรูปแบบอุตสาหกรรม เช่น ร้อน ชื้น และอื่นๆ
8. สามารถทำงานได้ในสถานที่ ๆ ชื้นงานอาจจะได้รับความเสียหาย ถ้าหากมีการสัมผัสจากมนุษย์
9. มีความต้องการที่จะวัดหลาย ๆ ค่า หรือหลาย ๆ อย่าง บนชิ้นงานเดียว

1.4 การออกแบบระบบการมองเห็น

ระบบการใช้อุปกรณ์ที่ใช้เทคนิคของ Machine Vision ในการประมวลผลภาพแบบอัตโนมัติ นั้นมักมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง สามารถใช้ได้ในการตรวจจับถนน เส้นแบ่งทาง สิ่งกีดขวางบนถนน ยานพาหนะอื่นๆ หรือลักษณะเด่นที่กำหนดจุดหมายปลายทางของการเคลื่อนที่ ภาพที่ใช้อาจเป็นภาพสีหรือภาพขาวดำก็ได้ ขึ้นอยู่กับวิธีการและข้อจำกัดทางด้านการประมวลผลข้อมูล นอกจากการใช้อุปกรณ์ Vision แล้ว การตรวจจับสิ่งกีดขวางและถนนยังสามารถใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ชนิดอื่นมาประกอบได้อีกด้วยเช่นการใช้อัลตราโซนิก และเรดาร์ เป็นต้น การใช้เซนเซอร์เหล่านี้มาประกอบในการตัดสินใจมักใช้ได้ดีในกรณีของการตรวจจับสิ่งกีดขวาง เนื่องจากเซนเซอร์เหล่านี้มีความสามารถพื้นฐานในการวัดระยะทางจากสิ่งกีดขวางโดยตรง ให้ข้อมูลออกมาได้โดยไม่ต้องผ่านการประมวลผลที่ซับซ้อนมากนักและมักจะให้ความแม่นยำสูง ในขณะที่การใช้ภาพในการวัดระยะห่างจากสิ่งกีดขวางจำเป็นจะต้องใช้วิธีที่ค่อนข้างซับซ้อน และอาจมีการตรวจจับที่ผิดพลาดได้ง่ายหากข้อมูลภาพมีความไม่ชัดเจน เช่นมีแสงเงา และการบดบังกันของวัตถุ เป็นต้น

1.5 การใช้อุปกรณ์เดียว

งานวิจัยในช่วงเริ่มต้นมักใช้อุปกรณ์เดียว หรือที่เรียกว่า แบบ Monocular ซึ่งมีข้อดีคือในการคำนวณผลนั้นค่อนข้างเร็วและค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำแต่ Monocular นั้นไม่สามารถที่จะดึงข้อมูลที่สำคัญของภาพที่ได้ออกมาคือระยะห่างหรือความลึกของวัตถุกับกล้องออกมาได้ โครงการที่สำคัญที่ผ่านมานในอดีตได้แก่งานวิจัยของ Ernst Dickmanns ในปี 1986 ที่ได้แสดงการขับเคลื่อนโดยอัตโนมัติของรถยนต์ที่อาศัยระบบประมวลผลภาพแบบ real-time ที่ความเร็ว 96 km/h บนทางด่วนในประเทศเยอรมัน Dickmanns ใช้ Kalman Filter ในการประมวลผลภาพที่เป็น sequence (Image Sequence Analysis) เพื่อควบคุมการขับเคลื่อนในเวลาจริง ความสำเร็จของโครงการนี้ทำให้มีผู้ทำงานวิจัยทางด้านการใช้ระบบการมองเห็นเพื่อช่วยในการขับขี่ยานยนต์เพิ่มขึ้นตลอดระยะยี่สิบปีที่ผ่านมาอย่างต่อเนื่อง

งานวิจัยที่ได้รับการอ้างอิงถึงอย่างมากอีกงานหนึ่งคืองานวิจัยของมหาวิทยาลัยคาร์เนกี-เมลลอน ซึ่งเป็นผู้บุกเบิกการใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับถนนที่เรียกว่าระบบ ALVINN งานวิจัยส่วนใหญ่เกี่ยวกับการตรวจจับถนนในช่วงเริ่มแรกนั้นมักให้ความสำคัญต่อการใช้อุปกรณ์หาขอบ (Edge Detection) ในการตัดสินใจและแยกแยะบริเวณถนนออกจากสิ่งแวดล้อม

อื่นๆ นอกจากนั้นยังใช้วิธีการแปลงภาพเพื่อหาเส้นตรงในภาพ เช่นการใช้ Hough Transform ขอบที่แสดงเส้นซ้าย ขวาของขอบถนนมักมีสีที่โดดเด่นเป็นที่สังเกตได้ชัดเจนและสามารถลากไปตัดกันที่จุด Vanishing ที่ Horizon row ในภาพได้ เช่นระบบ LANELOCK วิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นมาใช้ช่วงแรกนี้มักไม่ทนทานต่อการตรวจจับทางโค้งและขอบถนนซึ่งไม่มีเส้นบอกทางที่ชัดเจน

ระบบที่ได้พัฒนาขึ้นในระยะต่อมานั้นใช้เทคนิคของการ Matching มากขึ้น โดยจะพยายามจับคู่จุดเด่น (Feature) ในภาพให้เข้ากับข้อจำกัดพื้นฐานของถนน (Global Road Shape Constraint) ตัวอย่างเช่นระบบ LOIS ซึ่งใช้ Template Matching ในการจับคู่ส่วนเด่นของภาพที่อยู่ในภาพทั้งหมดกับ Template ของถนน วิธีการนี้มักทนทานต่อความไม่แน่นอนของสิ่งแวดล้อมในภาพมากกว่าวิธีการที่ใช้กันในระยะแรก แต่ทว่าก็ยังมีการตรวจจับถนนผิดพลาดในหลายกรณี เช่นเมื่อมีสิ่งกีดขวางเช่นยานพาหนะอื่นๆ ในถนน ซึ่งทำให้จุดเด่นของภาพที่ใช้ในการจับคู่กับ Template ของถนน ไม่สมบูรณ์หรือผิดพลาด (False match) ในการใช้จุดเด่น (Feature) ที่อยู่ในภาพเพื่อหาเส้นกึ่งกลางถนน (Road Skeletal Line) และขอบถนนนั้นจะเป็นการใช้การหาเส้นตรงในภาพโดยการใช้ Edge Detection ร่วมกับ Hough Transform ภายในบริเวณที่กำหนดหรือการหาจุดสัญลักษณ์ (Reflexive Spotted Lane Marker) จากการใช้ filter ที่เป็นฐานทรงกลม เช่น Steerable Filter (First-order Differentiation of Gaussian Function) ซึ่งนำเสนอโดย (McCall and Trivedi, 2004)

การสร้างแบบจำลองของถนนเพื่อใช้ในการตรวจจับถนนนับได้ว่าเป็นวิธีการที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายไม่น้อยกว่าการใช้จุดเด่นในภาพ รูปร่างของแบบจำลองของถนนสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันเส้นตรงเส้นโค้งของสมการโพลีโนเมียลอันดับสอง และ ฟังก์ชัน B-spline ในการตรวจจับถนน ภาพที่ผ่านการประมวลผลเบื้องต้นจะถูกนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์เบื้องต้นของแบบจำลองโดยใช้วิธีการคำนวณค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Technique) แบบจำลองที่ได้จะถูกอัปเดตด้วยข้อมูลภาพที่เข้ามาใหม่ในระหว่างการเคลื่อนที่ข้อดีของวิธีการนี้คือการสร้างแบบจำลองของถนนนั้นมักจะทนทานต่อสัญญาณรบกวน และข้อมูลที่ขาดหายไปได้ดีกว่าวิธีการหาจุดเด่นในภาพโดยตรง เนื่องจากการใช้แบบจำลองถนนนั้น รูปแบบเบื้องต้นได้มีการสมมุติไว้ก่อนแล้ว การใช้วิธีการ Optimization เพื่อปรับแบบจำลองจึงทนทานต่อความผิดพลาดของข้อมูลได้ดีกว่าการใช้จุดเด่นในภาพโดยตรงโดยที่ไม่มีการอ้างอิงจากแบบจำลอง

ในงานวิจัยของ Wang *et al.* (2004) ได้นำเสนอวิธีการที่เรียกว่า B-snake ซึ่งใช้ความสัมพันธ์ของ เส้นขนานใน 3D เพื่อที่จะหารูปร่างของแบบจำลองถนนใน 2D จากการใช้การคำนวณจุด Vanishing ข้อมูลที่ได้จากภาพจะถูกนำมาปรับค่าพารามิเตอร์รูปแบบจำลองของถนนซึ่ง

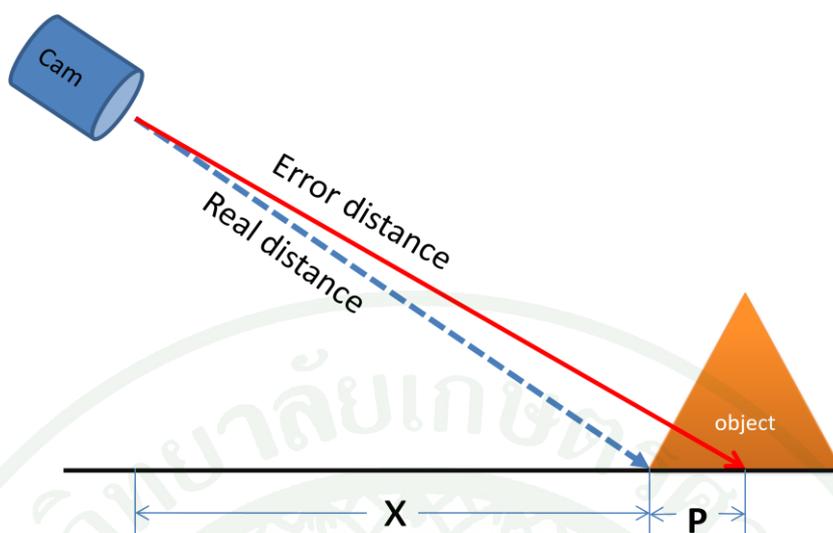
เป็นฟังก์ชัน B-spline โดยการใช้ Minimum Mean Square Error ซึ่งรายละเอียดของวิธีการนี้จะได้นำเสนอต่อไป

กิตติภูมิ และคณะ (2552) ใช้ Vision Builder AI และ LabVIEW มาวิเคราะห์การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ซึ่งผลการทดสอบปรากฏว่าสามารถหลบได้หลีกสิ่งกีดขวางได้แต่เนื่องจากใช้กล้องตัวเดียวและมีข้อจำกัดด้านสีและโฟกัสของของเลนส์ทำให้การกำหนดค่านั้นเป็นเพียงแค่ค่าคงที่เท่านั้น



ภาพที่ 3 ต้นแบบรถทำการทดลอง

กฤษฎา (2542) เสนอวิธีตรวจจับความเร็วของรถยนต์โดยการประมวลผลจากสัญญาณวิดีโอที่สนับโดยการทำงานแบบทันกาล การวัดความเร็วกระทำโดยคำนวณหาระยะทางจริงของรถที่เคลื่อนที่ไปในภาพและหารด้วยระยะเวลาการเคลื่อนที่ของรถ เทคนิคการประมวลผลภาพหลายวิธีได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาตำแหน่งของรถ โดยใช้กล้องเดี่ยว รวมถึงการแสดงค่าความผิดพลาดเมื่อใช้กล้องเดี่ยวที่เกิดจากมุมมองของกล้องเรียกว่า ค่าความผิดพลาดพาราแลกซ์ (Parallax Error) เมื่อกล้องติดตั้งบริเวณที่สูงจากระดับพื้นดินแล้วมองกลงยังสิ่งของ ภาพที่ปรากฏในกล้องนั้นบริเวณหน้ารถจะเป็นบริเวณที่อยู่ห่างจากกล้องไปเท่ากับ $X+P$ ซึ่งระยะที่แท้จริงนั้นเป็นเพียงระยะ X เท่านั้น ระยะทางที่เพิ่มมา P เป็นระยะที่เกิดจากความผิดพลาดพาราแลกซ์โดยระยะทางที่เกิดจากความผิดพลาดพาราแลกซ์นี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อตำแหน่งของวัตถุอยู่ไกลจากฐานของกล้องมากขึ้นด้วย

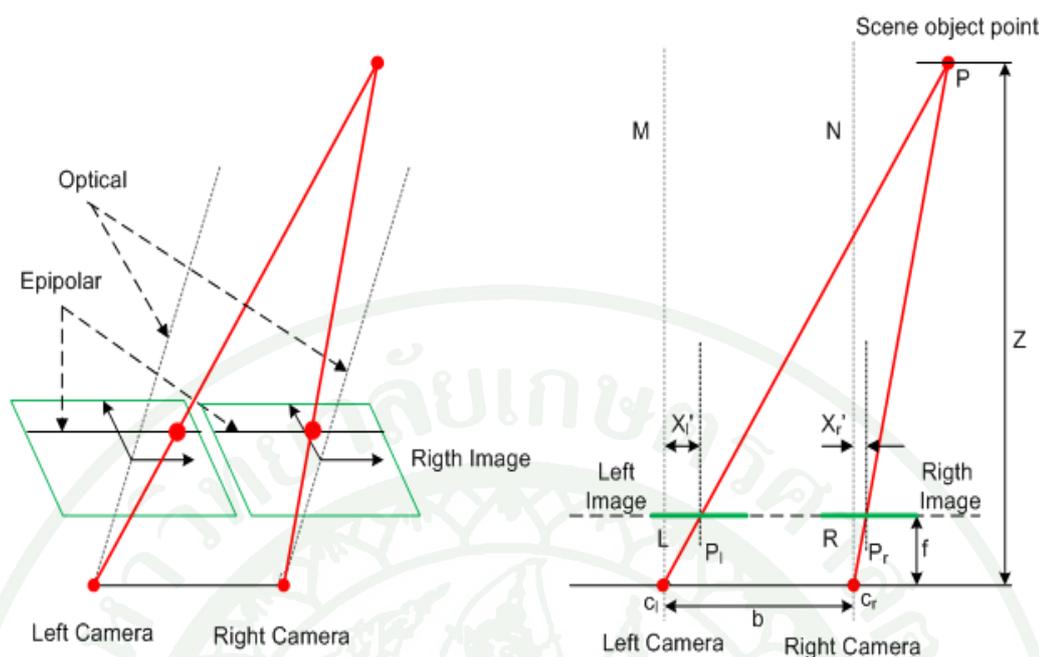


ภาพที่ 4 ความผิดพลาดพาราแลกซ์

นอกจากวิธีที่ได้กล่าวมานี้ การใช้กล้องหนึ่งตัวสามารถคำนวณระยะระหว่างกล้องกับวัตถุที่อยู่ข้างหน้าได้หากมีข้อมูลเพิ่มเติมจากเซนเซอร์ที่แสดงสถานะของยานพาหนะ เช่นการใช้ข้อมูลความเร็วล้อเพื่อที่จะสามารถบอกตำแหน่งผลต่างของกล้องที่เวลาต่างๆกันได้ การใช้ภาพซึ่งได้จากการเก็บภาพ ณ.เวลาที่ต่างกันนั้นสามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งใน 3D ของวัตถุได้โดยการคำนวณ Disparity ของภาพจากความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติในลักษณะที่คล้ายคลึงกับการใช้กล้องมากกว่าหนึ่งตัวนั่นเอง อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องอาศัยความแม่นยำของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดอื่น เช่นเซนเซอร์ตรวจจับความเร็วล้อ ทำให้ต้องอาศัยวิธีการทางด้านการ Prediction เข้ามาร่วมด้วย เช่นการใช้ Kalman Filter หรือการใช้ Particle Filter เพื่อประมาณค่าตำแหน่งของกล้องที่เวลาต่างๆกันให้มีความแม่นยำมากขึ้น ร่วมกับการใช้วิธีการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะลดค่าระหว่าง error ใน 3D model ให้น้อยที่สุดจากข้อมูลที่ได้รับเมื่อเวลาต่างๆ

1.6 การใช้กล้องมากกว่าหนึ่งตัว

ในการนำทางของรถอัจฉริยะ โดยใช้หลักการมองภาพสองตา (Stereo Vision) นั้นเป็นการนำทางซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดวงตาของมนุษย์มาก เพราะว่า Stereo Vision นั้นใช้กล้องในการจับภาพวัตถุ 2 ตัวทำให้สามารถที่จะระบุถึงระยะห่างของตัวหุ่นยนต์กับวัตถุได้ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์มากในการวางแผนการเคลื่อนที่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ไปหาเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของ Binocular Stereo นั้นแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ลักษณะทางเรขาคณิตของ Binocular Stereo

ที่มา: สยามมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี (2553)

จากรูปจะเห็นได้ว่าแบบจำลองพื้นฐานของกล้องทั้งสองจะแยกกันเพียงทิศทางแกน x เท่านั้น โดยมีระยะห่างเท่ากับระยะ Base Line: b และระนาบของภาพ (Image Plane) ของกล้องทั้งสองตัวนั้นอยู่ในระนาบเดียวกัน ดังนั้นทำให้จุดที่เราสนใจของภาพจากภายนอกปรากฏลงบนระนาบของกล้องทั้งสองที่ตำแหน่งต่างกัน ซึ่งระยะระหว่างตำแหน่งภาพบนระนาบนั้นเรียกว่า Disparity และระนาบที่ผ่านจุดศูนย์กลางของกล้องทั้งสองและจุดที่เราสนใจนั้นเรียกว่า Epipolar Plane เส้นที่เกิดขึ้นจากการตัดกันของระนาบภาพกับ Epipolar Plane นั้นถูกกำหนดให้เป็น Epipolar Line ซึ่งจากแบบจำลองของรูปที่ 5 แสดงนั้น ลักษณะจุดของภาพจากระนาบหนึ่งจะอยู่ในแถวเดียวกันกับอีกระนาบหนึ่งหมายความว่าเส้น Epipolar Line จะอยู่ที่ตำแหน่งแถวเดียวกันของระนาบภาพของกล้องทั้งสอง แต่ในการกำหนดให้เป็นแบบนี้ได้นั้นแสดงว่าต้องกำหนดให้ Vertical Disparity นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์

จากรูปที่ 2 จุด P จะปรากฏ เป็นจุด P_L และ P_R บนระนาบภาพด้านซ้าย และระนาบภาพด้านขวาตามลำดับ และกำหนดให้จุดกำเนิดของพิกัดโลกอยู่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งศูนย์กลางเลนส์ของกล้องด้านซ้าย ดังนั้นเราเปรียบเทียบสามเหลี่ยมคล้าย PMC_L และ PLC_R ดังนั้นเราจะได้

$$\frac{x}{z} = \frac{x_l'}{f} \quad (2)$$

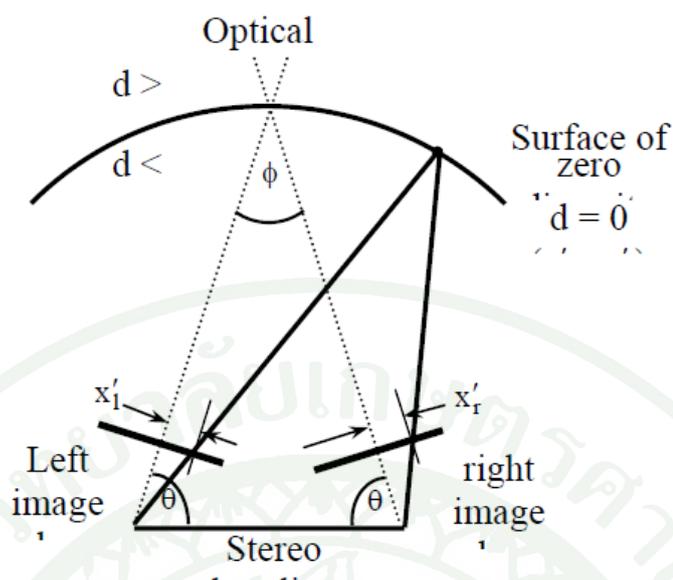
ในทำนองเดียวกัน จากสามเหลี่ยมคล้าย PNC_r และ P_rRC_r เราจะได้

$$\frac{x-b}{z} = \frac{x_r'}{f} \quad (3)$$

เรารวมสมการ (3) และ (4) เข้าด้วยกันเราจะได้

$$z = \frac{bf}{(x_l' - x_r')} \quad (4)$$

ดังนั้นเราจะหาระยะ Z หรือระยะห่างระหว่างวัตถุกับจุดศูนย์กลางของภาพได้จากค่า Disparity ของภาพนั่นเอง ในการมองของมนุษย์นั้นจะมีหลักการมองเหมือนกับหลักการของ Stereo Vision ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเพียงแต่จากหลักการที่กล่าวมา แกน Optical ของกล้องทั้งสองนั้นขนานกัน ซึ่งการมองของคนเราจะมีลักษณะการมองเหมือนกับนำกล้องสองตัวมาติดตั้งให้แกน Optical ตัดกันดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การวางกล้องทั้งสองให้เกิดการตัดกันของ แกน Optical

ที่มา: สมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย (2553)

ในกรณีนี้ ค่า Disparity จะขึ้นอยู่กับ ค่าของมุม Vergence โดยที่ทุกๆมุมจะมีพื้นผิวของค่า Zero Disparity อยู่ ดังแสดงในรูป ซึ่งวัตถุที่อยู่ไกลออกไปจากพื้นผิวนี้อาจมีค่า Disparity มากกว่าศูนย์ ส่วนวัตถุที่อยู่ใกล้กว่าจะมีค่า Disparity น้อยกว่าศูนย์ ซึ่งหลักการที่ใช้ในการหามุม Vergence ที่มีค่า Zero Disparity นั้นจะอาศัยหลักการของ Stereo Matching เข้ามาช่วย

Stereo Matching คือการหาความเหมือนกันของภาพ สองภาพ โดยทำการหาแต่ละจุดที่อยู่ทีภาพซ้าย ที่เหมือนกับจุดที่อยู่บนภาพด้านขวาเพื่อที่จะนำข้อมูลมาหาค่า Disparity ต่อไป ในการทำ Stereo matching นั้นมีลำดับการทำได้ดังนี้

1. ทำการ Filtering ภาพทั้งสองภาพเพื่อกำจัด Noise เช่น การใช้ Gaussian Filters, Median Filters
2. ทำการ Threshold และทำการหาขอบด้วยกระบวนการ Edge Detection
3. หาความเหมือนของภาพโดยใช้หลักการ Sum of Squared Difference (SSD) โดย

$$SSD[I_1(i, j), I_2(i, j)] = \sum_{i, j} [I_1(i, j) - I_2(i, j)]^2 \quad (5)$$

จากสมการที่ 6 จะพบว่าถ้าภาพ I_1 และ I_2 เป็นภาพเดียวกันหรือเป็นภาพที่คล้ายกัน จะทำให้ค่าของ SSD จะมีค่าเท่ากับ ศูนย์หรือมีค่าน้อยมาก ดังนั้นเราจะได้ Correlation Function ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ disparity ดังนี้

$$corr(I_1, I_2; d) = SSD \left[I_1 \left(i + \frac{d}{2}, j \right), I_2 \left(i - \frac{d}{2}, j \right) \right] \quad (6)$$

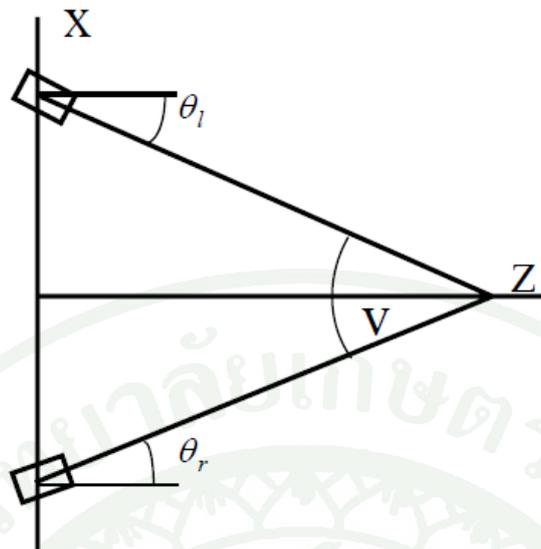
จากสมการที่ (7) เราสามารถที่จะทำการหาค่า Disparity ของภาพทั้งสองออกมาได้โดยเรากำหนดช่วงการหาของค่า Disparity ไว้โดย

$$D = \{ d_1, \dots, d_n \} \quad (7)$$

ซึ่งเราจะทำการแทนค่า Disparity แล้วทำการเลือกค่า $corr(I_1, I_2; d_n)$ ที่มีค่าต่ำที่สุด เพราะเป็นระยะห่างระหว่างภาพที่ใกล้เคียงที่สุด

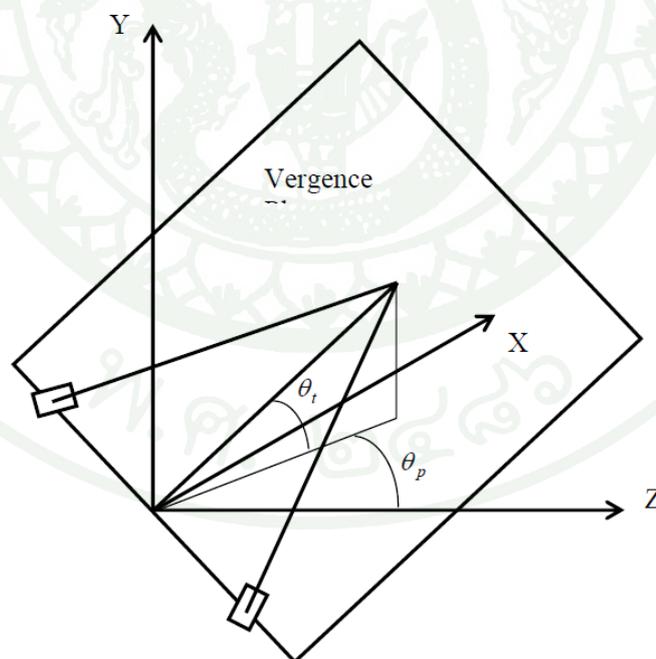
จากหลักการที่ได้กล่าวมาสามารถเปรียบเทียบกับ การมองของคนได้ว่าการที่คนเราต้องการมองวัตถุอย่างหนึ่งนั้นเราจะต้องสนใจไปที่วัตถุนั้นและปรับโฟกัสของการมองที่วัตถุนั้นให้มีความชัด โดยที่สภาวะแวดล้อมที่อยู่ห่างจากวัตถุออกไปจะมองได้ไม่ชัด ในทำนองเดียวกันกับการนำทางหุ่นยนต์ด้วยกล้องเราก็สามารถประยุกต์คุณสมบัติการมองของคนมาใช้ในการจับภาพวัตถุที่ต้องการเพื่อให้ได้ภาพที่คมชัดและสามารถนำไปทำการตีความหมายภาพได้สะดวกขึ้น

ในการหามุม Vergence ที่มีค่า Zero Disparity ที่ได้กล่าวมานั้นก็คือการ Tracking ทางความลึกของภาพนั่นเองดังภาพที่ 7 ซึ่งในการ Tracking วัตถุด้วยวิธีนี้นั้นจะต้องใช้คู่กับการ Tracking ให้จุดศูนย์กลางของภาพวัตถุนั้นให้อยู่ศูนย์กลางของระนาบภาพด้วยดังภาพที่ 8



ภาพที่ 7 การ Tracking ในแนวแกน Z

ที่มา: สมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย (2553)



ภาพที่ 8 การ Tracking ศูนย์กลางของวัตถุด้วยมุม Pan tilt

ที่มา: สมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย (2553)

การ Tracking วัตถุให้อยู่ตรงกลางของ Image plane ตลอดเวลา โดยใช้หลักการของจุด Centriod ของภาพในการหาตำแหน่ง error ที่ผิดไปจากตรงกลางคือ

$$\bar{P} = \frac{\int \int I(x, y) p \, dx dy}{\int \int I(x, y) \, dx dy} \quad (8)$$

โดยที่ P คือตำแหน่งของจุดภาพแต่ละจุดเมื่อวัดจากจุดศูนย์กลางของ Image plane
 \bar{P} คือระยะทางจากจุดศูนย์กลางของ Image plan ถึงจุดศูนย์กลางของภาพ
 วัตถุในการใช้ Stereo Vision

สำหรับการตรวจจับถนนและสิ่งกีดขวางนั้น บางงานวิจัยได้เพิ่มความสามารถของอุปกรณ์โดยการใช้กล้องที่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งรับภาพ และปรับตำแหน่งโฟกัสได้ซึ่งเรียกว่าการใช้ระบบ Active Vision ระบบ Active Vision นี้มีข้อดีในแง่ของความสามารถรับภาพได้กว้างกว่าแบบ Passive Vision แต่ก็เป็นการเพิ่มความซับซ้อนของการทำงานขึ้นอีกมากด้วยเช่นกัน ในระบบการตรวจจับถนนของกลุ่มวิจัยของมหาวิทยาลัยแห่งชาติออสเตรเลียได้ใช้การติดตั้งกล้องคู่แบบ Active เพื่อจับภาพในระยะใกล้ (Near Field) และในระยะไกล (Far Field) รวมสองชุดด้วยกัน เพื่อเพิ่มความสามารถในการตัดสินใจจากข้อมูลที่อยู่ในระยะต่างๆ ได้อย่างถูกต้องมากขึ้น

1.7 การใช้กล้องประกอบกับเซนเซอร์ชนิดอื่นๆ

ในการใช้ระบบการมองเห็นเพื่อตัดสินใจในการควบคุมยานพาหนะ โดยอัตโนมัติ นั้นงานวิจัยที่ใช้ ระบบการมองเห็นเพียงอย่างเดียวมักประสบปัญหาเกี่ยวกับความน่าเชื่อถือของข้อมูล ความแม่นยำ และการใช้เวลาในการคำนวณที่สูงมาก ดังนั้นทางแก้ไขคือการใช้เซนเซอร์ชนิดอื่นๆ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่าในการวัดข้อมูลบางชนิดเช่นระยะทางไปถึงวัตถุที่อยู่ข้างหน้า หรือระดับความสูงของถนนเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงเซนเซอร์ที่นิยมนำมาใช้ร่วมกับระบบการมองเห็นมักเป็นเซนเซอร์วัดระยะทาง (Range sensor) เช่น LaserScanner, Ultrasonic หรือ Radar เป็นต้น อย่างไรก็ตามข้อมูลจากเซนเซอร์ชนิดอื่นเช่น GPS, เซนเซอร์วัดความเร็วล้อหรือเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro Sensor) ก็มีประโยชน์ในการช่วยการทำความเข้าใจภาพเป็นอย่างมาก แต่การรวมข้อมูลจากเซนเซอร์เหล่านี้ส่วนมากได้รับการนำไปใช้ในระดัการตัดสินใจช่วยระบบ

ควบคุมการขับเคลื่อน (Intelligent Cruise Control) มากกว่าการใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ชนิดอื่นมาประกอบระบบการมองเห็นเช่นการใช้กล้องหรือโซนาร์ และเรดาร์เพื่อมาประกอบในการตัดสินใจมักใช้ได้ดีในกรณีของการตรวจจับสิ่งกีดขวาง เนื่องจากเซนเซอร์เหล่านี้มีความสามารถพื้นฐานในการวัดระยะทางจากสิ่งกีดขวางโดยตรง ให้ข้อมูลออกมาได้โดยไม่ต้องผ่านการประมวลผลที่ซับซ้อนมากนักและมักจะให้ความแม่นยำสูง ในขณะที่การใช้ภาพในการวัดระยะห่างจากสิ่งกีดขวางจำเป็นจะต้องใช้วิธีที่ค่อนข้างซับซ้อน และอาจมีการตรวจจับที่ผิดพลาดได้ง่ายหากข้อมูลภาพมีความไม่ชัดเจน เช่นมีแสงเงา และการบดบังกันของวัตถุเป็นต้น ในงานวิจัยของ Beauvais และ Lakshmanan ได้มีการใช้ข้อมูลจากเรดาร์เซนเซอร์มากประกอบกับข้อมูลภาพในการตรวจจับเส้นแบ่งทางบนถนนและสิ่งกีดขวาง โดยเรียกว่าระบบ CLARK ซึ่งพบว่าทำให้การตรวจจับนั้นมีความถูกต้องมากขึ้นกว่าการใช้ข้อมูลจากภาพเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 9 ภาพของถนนและยานพาหนะอื่นๆซึ่งถือเป็นสิ่งกีดขวางในการเคลื่อนที่

ที่มา: สยามวิศวกรรมหุ่นยนต์ไทย (2553)

ภาพที่ 9 เป็นภาพแบบ monocular ซึ่งได้จากกล้องที่ติดตั้งบนรถในการตรวจจับถนนซึ่งไม่มีขอบหรือเส้นชัดเจน เช่นถนนดินลูกรังหรือถนนในป่า นั้น งานวิจัยของ Hong, Rasmussen, Chang, และ Shneier ในปี 2004 ได้เสนอการใช้ภาพจากกล้องร่วมกับข้อมูลจาก Ladar ในการสร้าง 3D model ของถนนขึ้น โดยมีการอัปเดตจากเซนเซอร์ทั้งสองชนิดเป็นระยะเพื่อทำให้สามารถระบุตำแหน่งของยานพาหนะเมื่อเทียบกับถนนได้แม่นยำขึ้น ภาพที่ได้จากกล้องจะมีข้อมูล 2D ซึ่งจะต้องนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองถนน ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับสอง ดังสมการที่ (9)

$$x = c_1 + c_2 y + c_3 y^2 \quad (9)$$

โดยที่ c_1, c_2, c_3 เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดคุณลักษณะรูปร่างและตำแหน่งของแบบจำลองของเส้นขอบถนน ในแต่ละภาพที่ได้รับจากกล้อง การประมวลผลภาพจะกระทำที่บริเวณที่สนใจเท่านั้นเพื่อความรวดเร็วในการประมวลผล เมื่อภาพผ่านกระบวนการหาขอบภาพ ขอบภาพที่ได้จะถูกนำมาเข้ามาเปรียบเทียบกับสมการแบบจำลองถนน และใช้ Square-root Information Filter (SRIF) ในการอัปเดตสมการแบบจำลองเพื่อให้สอดคล้องกับขอบภาพต่อไป ในขั้นตอนของการหาแบบจำลอง 3D ของถนนนั้น ในงานวิจัยนี้ ถนนจะหมายถึงความถึงบริเวณที่ราบเรียบใน 3D เมื่อเทียบกับแกนเปรียบเทียบที่ได้ตั้งไว้ (วัดได้จาก Elevation Map) ด้วยวิธีการนี้ การเคลื่อนที่จะไม่จำกัดอยู่กับการติดตามจุดเด่นในภาพเช่นเส้นตรงหรือจุด แต่จะเป็นการเคลื่อนที่ในบริเวณที่ไม่มีสิ่งกีดขวางเมื่อพิจารณาจาก 3D model การ match ภาพกับข้อมูลที่ได้จาก Ladar จะกระทำใน 3D model โดยพิจารณาสีของบริเวณที่เป็นถนน ร่วมกับข้อมูล 3D ที่ได้จาก Ladar เช่น เซอร์เพื่อทำการยืนยันว่าบริเวณที่ระบุนั้นมีความน่าเชื่อถือมากน้อยเช่นใดในการระบุว่าเป็นบริเวณถนนที่พาหนะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้

ในการแข่งขัน DARPA Grand Challenge ซึ่งเป็นการใช้ระบบการมองเห็นในรถอัจฉริยะ ซึ่งต้องเคลื่อนที่ผ่านทะเลทรายที่ไม่มีถนนชัดเจน การทำงานของระบบรถอัจฉริยะส่วนใหญ่ที่เข้าร่วมการแข่งขันนั้นจะใช้ระบบกล้องร่วมกับเซนเซอร์ชนิดอื่นๆเป็นหลัก ตัวอย่างเช่นทีม TerraMax จาก Ohio State University ก็จะใช้กล้องร่วมกับเซนเซอร์อีกสามชนิดคือ scanning laser rangefinder, radar และ ultrasonic วิธีการหาเส้นทางเคลื่อนที่โดยใช้ระบบการมองเห็นของทีม TerraMax คือการใช้การหาพื้นผิวจากภาพสีเพื่อเลือกพื้นผิวที่มีความเรียบพอที่จะเป็นเส้นทางที่เคลื่อนที่ผ่านได้ก่อน จากนั้นจึงทำการกำหนดขอบของเส้นทาง หลังจากนั้นจึงใช้วิธีการ matching เส้นทางกับแบบจำลองที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดอื่นๆในระดับความละเอียดต่างๆกัน (Multiresolution) เพื่อลดเวลาในการคำนวณ ในส่วนของการตรวจจับวัตถุสิ่งกีดขวางนั้นจะใช้กล้องคู่ stereoscopic เพื่อหาตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง

1.8 การตรวจจับรถที่อยู่ข้างหน้า และสิ่งกีดขวาง

การตรวจจับรถที่อยู่ข้างหน้าจะเป็นประโยชน์ทั้งในแง่ของการช่วยขับ โดยเฉพาะการขับขี้นาพาหนะในเมือง เนื่องจากการรักษาระยะติดต่อกับรถคันหน้าจะช่วยให้ผู้ขับที่มีความระมัดระวังในการขับรถมากขึ้นเมื่อรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่มากนัก นอกจากนี้ในการขับขี้นถนน

ทางหลวง การรักษาระยะติดตามจะสามารถนำไปใช้ในการเคลื่อนที่แบบ fleet หรือการเคลื่อนที่ของรถขนส่งเป็นทีมได้เป็นอย่างดีการตรวจจับรถคันหน้าที่อยู่ในเลนเดียวกันนั้นทำได้ไม่ยากนัก โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้กล้องคู่หรือการใช้เซนเซอร์ตรวจจับระยะเข้ามาช่วย การรักษาระยะกับรถคันหน้ายังช่วยได้มากในส่วนของการสร้างสัญญาณเตือนภัย เมื่อผู้ขับขี่ติดตามรถคันหน้าในระยะประชิดเกินไปซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายในการขับขี่ได้ ระยะประชิดที่อันตรายสามารถคำนวณได้จากระยะติดตาม ความเร็วรถ และความเร่งสูงสุดในการลดความเร็วในการออกแบบระบบรถอัจฉริยะ ข้อมูลของระยะทางระหว่างรถถึงสิ่งกีดขวางเช่นรถคันหน้าจะใช้ในการตัดสินใจ เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยการ steering หรือการลดความเร็วของรถโดยการ activate braking mechanism การตรวจจับสิ่งกีดขวางที่ไม่ใช่รถ เช่นคนเดินถนน สัตว์ที่ข้ามถนน มีความสำคัญมากต่อความปลอดภัยในการขับขี่ยานพาหนะ โดยเฉพาะในเมือง การตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าสามารถทำได้โดยการตรวจจับการเคลื่อนที่จากภาพ แต่วิธีการนี้มีปัญหาเพราะรถที่วิ่งอยู่ข้างหน้า รวมถึงสิ่งแวดล้อมต่างๆก็จะมีเคลื่อนที่เช่นกัน การตรวจจับการเคลื่อนไหวและตีความว่าเป็นคน หรือสัตว์ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ตัดหน้ารถทำได้ค่อนข้างยาก เพราะต้องใช้วิธีการ feature detection ร่วมกับ pattern matching ใน database ที่มีขนาดใหญ่ ในงานวิจัยของ Gavrilu และ Philomin, 1999 ได้มีการเสนอวิธีการที่เรียกว่า Chamfer system ซึ่งเป็นการตรวจจับรูปร่างจาก model รูปร่างที่ได้รับการสอนด้วยตัวอย่างภาพจำนวนมาก วิธีนี้สามารถใช้ได้ดีในการตรวจจับคนในภาพนิ่ง แต่ต้องเสียเวลาในการคำนวณมาก จนยากที่จะนำไปใช้ได้จริงในระบบเวลาจริง Gavrilu และ Philomin ได้เสนอแนวทางในการลดเวลาในการคำนวณของ Chamfer System โดยการใช้ Multiresolution Approach ร่วมกับการค้นหา Shape Pattern ในลักษณะของ Tree Search แทนการใช้ Exhaustive Search เป็นต้น

1.9 Range Measurement

การวัดระยะระหว่างกล้องกับรถที่อยู่ข้างหน้าด้วยระบบการมองเห็น สามารถทำได้ง่ายที่สุดโดยการใช้กล้องคู่ และใช้วิธีการคำนวณหา Disparity จากภาพสองภาพเพื่อคำนวณหาระยะระหว่างกล้องและวัตถุเช่นรถ การใช้กล้องเดี่ยวเพียงอย่างเดียวเพื่อคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องและวัตถุนั้นทำได้ยากมากเนื่องจากกล้องเดี่ยวนั้นไม่สามารถอ้างอิงขนาดของวัตถุได้นอกจากจะใช้วิธีการเช่นการกำหนดความสูงของกล้อง การสมมุติขนาด ความกว้างของถนน ความเร็วรถ และเทียบประมาณขนาดของรถคันหน้าตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ตามหลักการ Perspective เพื่อคำนวณหาระยะห่างระหว่างกล้องกับขนาดรถคันหน้าที่เปลี่ยนแปลงไป วิธีการนี้อาจไม่สามารถครอบคลุมการใช้งานต่างๆไปซึ่งมีสถานะที่แตกต่างจากค่าที่ได้สมมุติขึ้นได้ ในงานวิจัยของ G.Stein, O.Mano และ A. Shashua [18] ได้แสดงการคำนวณค่าความผิดพลาดของการวัดระยะทาง Z_{err} และ

ความเร็วของรถ (V_{err}) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความเร็ว (V) ความเร่งของรถ (V) ระยะติดตาม (Z) ค่า field of view (f_v) ของกล้อง ค่าความกว้างของรถที่อยู่หน้าหน้า (W) ค่าความสูงของตำแหน่งติดกล้อง (h) และจำนวน pixel ที่แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสของรถคันหน้ากับพื้น (n) ตามสมการที่ 10 และ 11

$$Z_{err} = \frac{nZ^2}{f_v h + nZ} \quad (10)$$

$$V_{err} = Z \sqrt{\frac{2aS_{err}}{f_v W} + \frac{nZV}{f_v h}} \quad (11)$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าข้อจำกัดของวิธีการรักษาระยะระหว่างกล้องบนรถที่กำลังวิ่งอยู่กับรถคันหน้า คือระยะติดตามจะต้องสัมพันธ์กับความเร็วรถ ถ้าความเร็วรถมากๆ ระยะติดตามก็ต้องมากขึ้นตามไปด้วยเพื่อความปลอดภัยในการขับขี่ แต่ถ้าหากระยะติดตามมีค่ามากเกินไป การติดตามรถคันหน้าก็จะเกิดปัญหาในกรณีที่ดินนมีความโค้งมากๆ หรือมีระดับ elevation ที่เปลี่ยนแปลงมาก นอกจากนี้ยังมีปัญหาอีกอย่างหนึ่งคือการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของรถคันหน้าในงานวิจัยได้ใช้วิธีการตรวจจับเงาที่เกิดขึ้นใต้รถคันหน้าเพื่อทำการตรวจจับตำแหน่งของรถภายในเลน และทำการตรวจจับเหตุการณ์ที่รถมีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้วิธีทางสถิติ

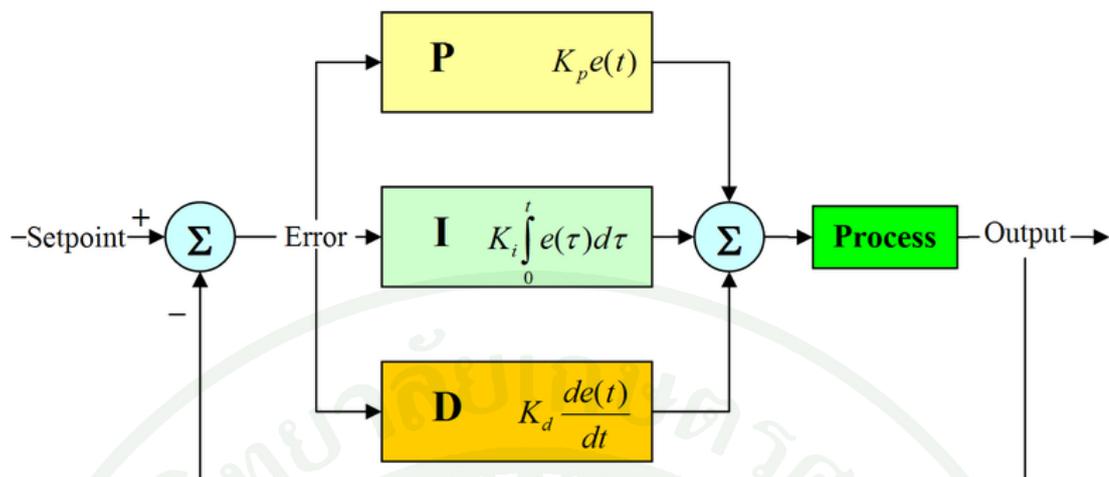
ในงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ใช้กล้องเดียวในการรับภาพจึงต้องประกอบกับการใช้เซนเซอร์วัดระยะทางอื่นๆ เช่น Ladar, Radar หรือ ultrasonic range เซนเซอร์เหล่านี้มักมีความสามารถในการวัดระยะทางสุทธิได้แม่นยำกว่าการใช้กล้องมาก แต่อาจเกิดข้อมูลที่เป็น false return หรือ noise ในสัญญาณซึ่งทำให้ข้อมูลที่ได้รับมีการผิดพลาด ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการนำเอาข้อมูลระยะทางที่ได้จากเซนเซอร์เหล่านี้มารวมกับข้อมูลจากภาพ และสร้าง 3D model ของสิ่งแวดล้อมในเวลาจริง [11] เพื่อที่จะลดความผิดพลาดของข้อมูลลงปัญหาคือเวลาการ update ข้อมูลจากเซนเซอร์แต่ละตัวจะแตกต่างจากอุปกรณ์ประมวลผลภาพ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการรวมกันของเซนเซอร์และภาพจึงมีการ update ที่ช้ากว่าการอ่านค่าจากเซนเซอร์โดยตรง

1.10 3D model

วิธีการตรวจจับสิ่งกีดขวางอีกชนิดหนึ่งที่ค่อนข้างจะถือว่า computationally expensive เกินกว่าที่จะทำงานได้ในเวลาจริงคือการนำข้อมูลที่ได้จากภาพในเวลาต่างๆ มาผ่านการทำ feature extraction และทำการติดตาม feature เหล่านี้ว่ามีตำแหน่งเปลี่ยนแปลงไปในภาพถัดไปอย่างไร โดยใช้เทคนิคของ feature tracking ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Feature ที่เปลี่ยนไปในภาพต่างๆ เมื่อนำมารวมกับข้อมูลความเร็วของการขับเคลื่อน (Estimated Camera Location) ก็จะสามารถนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลอง 3D ของสิ่งแวดล้อมได้โดยการใช้ Optimization Technique เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของตำแหน่งวัตถุใน 3D space วิธีการนี้ใช้การคำนวณสูงมากและทำได้ยากมากในเวลาจริงเนื่องจาก dimension ของข้อมูลที่ใช้ในการ Optimize นั้นใหญ่มากในระดับ 1000-10,000 พารามิเตอร์ต่อหนึ่งรอบการคำนวณ ทำให้การอัปเดตข้อมูล 3D ในแต่ละลูปใช้เวลามากจึงเกิดปัญหาการดีเลย์ของข้อมูลเกินกว่าที่จะใช้ในการตัดสินใจได้ การพัฒนาวิธีการ 3D Model Reconstruction ให้สามารถทำงานได้ในเวลาจริงต้องอาศัยวิธีการต่างๆ มาประกอบกัน เช่นการใช้เทคนิค Parallel Processing, Dimensionality Reduction และการสร้าง Predictive Model ของแบบจำลอง

2. ระบบควบคุมแบบ PID

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ



ภาพที่ 10 แผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบพีไอดี

ที่มา: วิกิพีเดีย (2553)

วิธีคำนวณของตัวควบคุมแบบ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าของระบบควบคุมแบบสัดส่วน, ปริพันธ์ และอนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน, ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งผ่านไป, และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการ

โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (overshoots) และ ค่าแกว่งของระบบ (oscillation) วิธี PID ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน

การประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ พีไอดีบางครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใดบ้าง

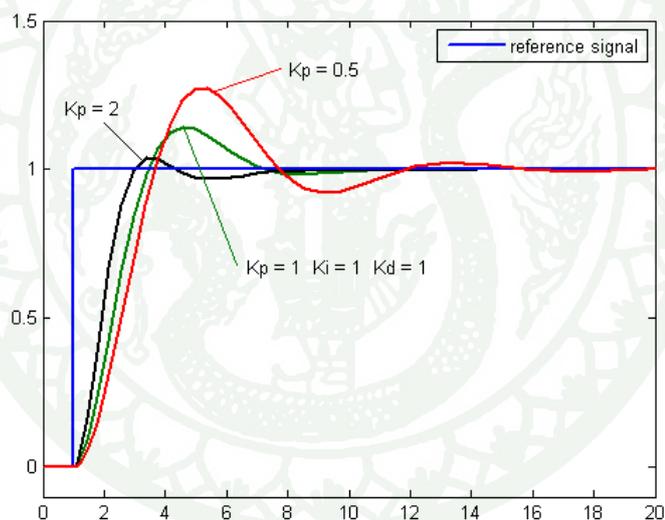
2.1 ทฤษฎี

การควบคุมแบบ PID ได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามตามสมการ:

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (10)$$

เมื่อ P_{out} , I_{out} , และ D_{out} เป็นผลของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุม PID จากแต่ละเทอมซึ่งนิยามตามรายละเอียดด้านล่าง

2.1.1 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน



ภาพที่ 11 กราฟ PV ต่อเวลา, K_p กำหนดเป็น 3 ค่า (K_i และ K_d คงที่)

ที่มา: วิกีพีเดีย (2553)

เทอมของสัดส่วน (บางครั้งเรียก *อัตราขยาย*) จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p , หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน

เทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ:

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (11)$$

เมื่อ

P_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

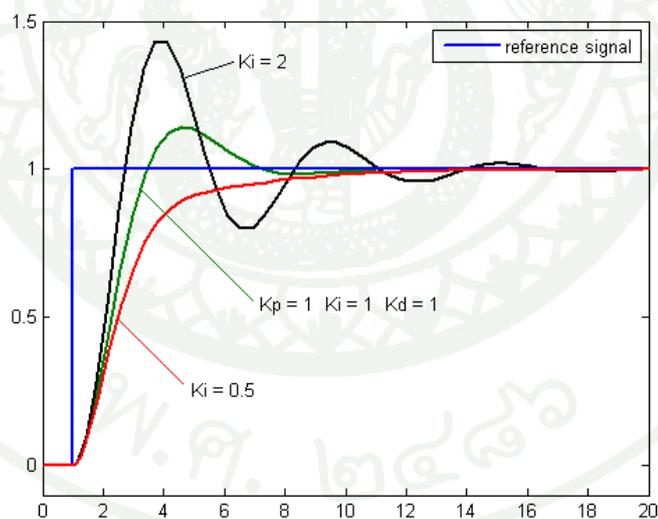
K_p คือ อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้

e คือ ค่าความผิดพลาด = $SP - PV$

t คือ เวลา

ผลอัตราขยายสัดส่วนที่สูงค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน แต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงกันข้าม ผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อกระบวนการน้อยตามไปด้วย

2.1.2 ระบบควบคุมแบบปริพันธ์



ภาพที่ 12 กราฟ PV ต่อเวลา, K_i กำหนดเป็นสามค่า (K_p และ K_d คงที่)

ที่มา: วิกิพีเดีย (2553)

ผลจากเทอมปริพันธ์เป็นส่วนส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์, K_i .

เทอมปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการ:

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (12)$$

เมื่อ

I_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

K_i คือ อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

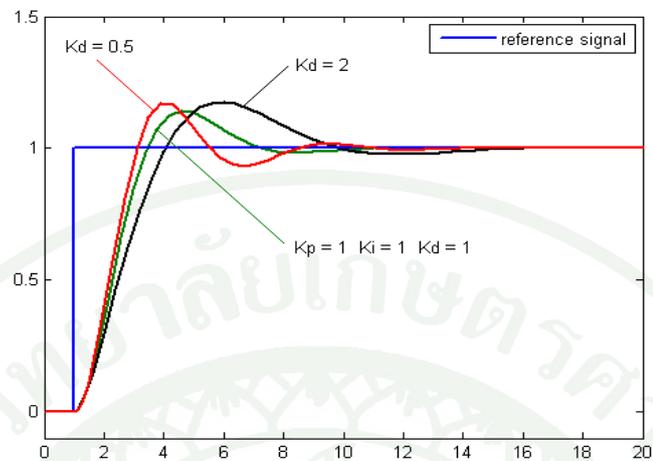
e คือ ความผิดพลาด = $SP - PV$

t คือ เวลา

τ คือ ตัวแปรปริพันธ์หุ่น

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม เทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ (ข้ามจุดที่ต้องการและเกิดการหันเหไปทางทิศทางอื่น)

2.1.3 ระบบควบคุมแบบอนุพันธ์



ภาพที่ 13 กราฟ PV ต่อเวลา, สำหรับ K_d 3 ค่า (K_p และ K_i คงที่)

ที่มา: วิกิพีเดีย (2553)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุกๆเวลา (นั่นคือ เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วย อัตราขยายอนุพันธ์ K_d ขนาดของผลของเทอมอนุพันธ์ (บางครั้งเรียก อัตรา) ขึ้นกับ อัตราขยายอนุพันธ์ K_d

เทอมอนุพันธ์เป็นไปตามสมการ:

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (13)$$

เมื่อ

D_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์

K_d คือ อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

e คือ ความผิดพลาด = $SP - PV$

t คือ เวลา

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจากเทอมปริพันธ์และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ

ผลรวม

เทอมสัดส่วน, ปริพันธ์, และอนุพันธ์ จะนำมารวมกันเป็นสัญญาณขาออกของการควบคุมแบบ PID กำหนดให้ $u(t)$ เป็นสัญญาณขาออก สมการสุดท้ายของวิธี PID คือ:

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (14)$$

จากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยเกี่ยวกับการหลบหลีกสิ่งกีดขวางของรถอัจฉริยะในปัจจุบันนั้นเป็นงานวิจัยเกี่ยวข้องกับ Stereo Vision เป็นส่วนใหญ่เพราะการประมวลผลภาพด้วย Stereo นั้นไม่เพียงแต่ให้ข้อมูลที่สำคัญคือ ระยะห่างระหว่างกล้องและวัตถุออกมาเท่านั้น ยังสามารถทำการ Segmentation ภาพออกมาได้ดีกว่าการใช้กล้องเดี่ยว (Monocular) ซึ่งทำได้ยากมากเนื่องจากกล้องเดี่ยวไม่สามารถอ้างอิงขนาดของวัตถุได้นอกจากจะใช้วิธีการเช่นกำหนดความสูงของกล้อง แต่การใช้ระบบ Stereo Vision นั้นต้องการการประมวลผลที่มีความไวสูงพอที่จะทำให้การประมวลผลภาพใกล้เคียงกับเวลาจริง (Real Time) เพราะ Stereo Vision นั้นต้องทำการประมวลผลภาพจากกล้องสองกล้องเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการ รวมถึงงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมองศาตำแหน่งของพวงมาลัยและความเร็วรถ เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอดีใช้งานอย่างแพร่หลาย จุดเด่นหลักของตัวควบคุมแบบพีไอดีคือ การหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมสามารถทำได้ง่าย โดยการลองปรับแต่งค่าในการควบคุมระบบจริงได้เลยโดยไม่ต้องใช้ทฤษฎีการควบคุมมากและยังให้ผลลัพธ์ในระดับที่น่าพอใจ

อุปกรณ์และวิธีการ

ส่วนแรกในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งแบ่งย่อยเป็นการออกแบบและจำลองระบบควบคุมผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการทดลองจริงสำหรับรถอัจฉริยะ ส่วนในวิธีการสำหรับงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และออกแบบระบบควบคุม

อุปกรณ์

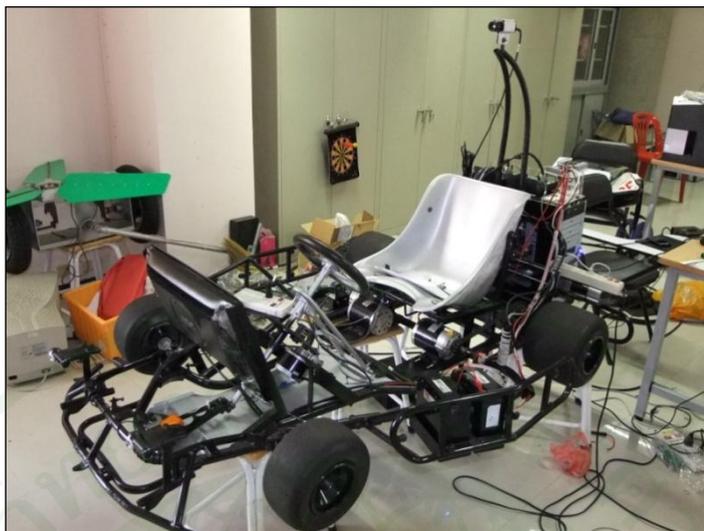
1. อุปกรณ์ในการออกแบบและจำลองระบบควบคุม

ประเด็นสำคัญในงานวิจัยนี้คือการออกแบบระบบควบคุมและการจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลโปรแกรมที่นำมาใช้คือโปรแกรม LabVIEW ซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ โปรแกรมดังกล่าวเป็นภาษาขั้นสูงที่ช่วยลดระยะเวลาในการเขียนโปรแกรมด้วยฟังก์ชันต่างๆ เช่น การออกแบบตัวควบคุม เป็นต้น

2. อุปกรณ์ในการทดลองของรถอัจฉริยะ

อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยรถอัจฉริยะ, ระบบป้อนเข้าสัญญาณซึ่งประกอบด้วยระบบควบคุมความแรงดันไฟฟ้ามอเตอร์และแหล่งจ่ายพลังงาน, ระบบป้อนกลับสัญญาณคือระบบรับค่าสัญญาณจากตัวตรวจรู้, ตัวควบคุมประกอบด้วยการ์ดรับส่งสัญญาณที่ติดตั้งภายในคอมพิวเตอร์ ตั้งโต๊ะที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมพวงมาลัยของรถยนต์และการ์ดคดลองเพื่อเป็นตัวประมวลผลภาพ

1. รถอัจฉริยะต้นแบบ เป็นรถโกคาร์ท 4 ล้อ ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าโดยเป็นการขับเคลื่อนล้อหลังหุ่นยนต์สองล้อ วัสดุโครงทำมาจากเหล็ก ภายในจะมีมอเตอร์กระแสตรง 3 ชุด โดย 2 ชุดที่ล้อหลังต่อตรงกับล้อหลังทั้งสองที่ทำงานอย่างอิสระต่อกัน เพื่อควบคุมการขับเคลื่อนของรถและอีก 1 ชุดทำหน้าที่เป็นบังคับเบรคของพวงมาลัยของรถ ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 รถอัจฉริยะต้นแบบ

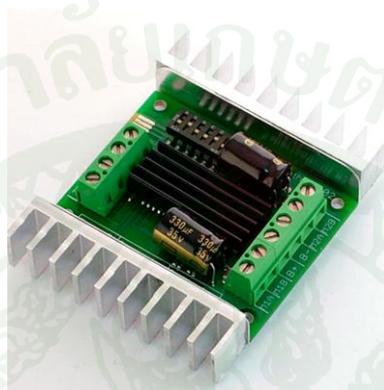
2. ตัวตรวจจับ คือ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อบอกถึงสถานะของหุ่นยนต์ ตัวตรวจจับสำหรับหุ่นยนต์สองล้อ ประกอบด้วย

เอนโคเดอร์เซนเซอร์ (Encoder) คือ อุปกรณ์วัดตำแหน่งที่ทำงานโดยอาศัยการยิงลำแสงผ่านแถบมืด-สว่างและส่งออกเป็นสัญญาณดิจิทัล การอ่านค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณถูกนำมาคำนวณเป็นอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง งานวิจัยนี้ใช้ตัวตรวจจับ Omron รุ่น E6B2 CWZ6BC มีความละเอียดเท่ากับ 360 ครั้งต่อรอบ (CPR) โดยมี 2 ชุด สำหรับการวัดอัตราเร็วของล้อซ้ายและล้อขวา เอนโคเดอร์ต่ออยู่กับมอเตอร์ผ่านปลั๊กและสายพานและมีความละเอียดเท่ากับ 2000 ครั้งต่อรอบ สำหรับการควบคุมพวงมาลัย รายละเอียดเพิ่มเติมที่ www.omron.com



ภาพที่ 15 อุปกรณ์เอนโคเดอร์เซนเซอร์

3. วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power Amplifier) ทำหน้าที่ขยายกระแสไฟฟ้า โดยอุปกรณ์นี้จะรับสัญญาณป้อนเข้าคือกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณและแรงดันต่ำ และจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณและแรงดันสูงกว่า โดยใช้พลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังมอเตอร์กระแสตรงที่ติดตั้งอยู่บนหุ่นยนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์รุ่น Sabertooth2x10 ทำหน้าที่เป็นวงจรที่รับและจ่ายไฟฟ้าโดยแปรผันตามแรงดันไฟฟ้า รายละเอียดเพิ่มเติมที่ www.dimensionengineering.com



ภาพที่ 16 อุปกรณ์วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง

4. Computer คือคอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็นตัวควบคุมของระบบ ในคอมพิวเตอร์นี้ถูกติดตั้งการ์ดไว้ 2 การ์ดนั้นคือ

รับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221 ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณ มีความเร็ว 250ks ต่อวินาทีและความละเอียด 16 บิตสำหรับอนาล็อก ความละเอียด 8 บิตสำหรับดิจิตอล และความละเอียด 32 บิต 80 เมกกะเฮิร์ต สำหรับช่องต่อเคาท์เตอร์ ต่ออยู่กับการ์ดเชื่อมต่อ (CB68) โปรแกรม LabVIEW Real-Time 8.6.0



ภาพที่ 17 การ์ดรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221 (CB68)

การ์ดคดียิ่ง NI PCI 8254 ทำให้หน้าที่ในการประมวลผลภาพที่รับเข้ามาซึ่งจะมีความ
 สारรวม FireWire และดิจิทัล I / O บนบอร์ดสามารถจาก 1 ถึง 16 กล้อง FireWire และรวม
 NI-IMAQ สำหรับ IEEE 1394 โดยมีซอฟต์แวร์ควบคุมกล้องมาด้วยรายละเอียดเพิ่มเติมที่
www.ni.com/labview

5. กล้องเว็บแคมของ Logitech Pro 9000 ทำหน้าที่เว็บแคมเป็นอุปกรณ์อินพุตที่สามารถจับ
 ภาพเคลื่อนไหวของเราไปปรากฏในหน้าจอคอมพิวเตอร์ และใช้กล้องนี้ 2 ตัวเพื่อทำให้เกิดสเตอริโอวิชัน
 (StereoVision)



ภาพที่ 18 กล้องเว็บแคมของ Logitech Pro 9000

LabVIEW Program

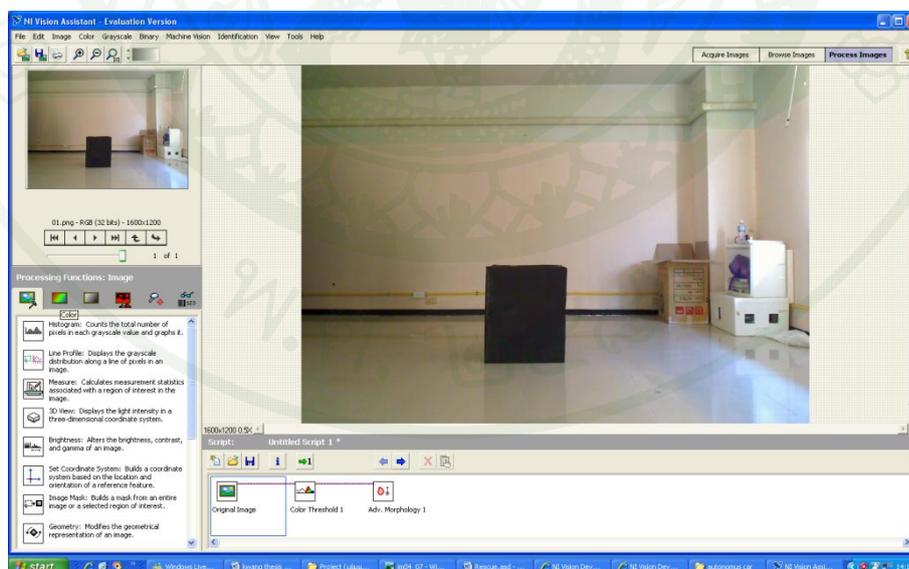


ภาพที่ 19 โปรแกรม LabVIEW

LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench คือ เครื่องมือ
 ที่ใช้ในการพัฒนา Application (โปรแกรมประยุกต์) ชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับ Visual Basic, Visual C++
 แต่จะเป็นการเขียนโปรแกรมโดยใช้รูปในการพัฒนา (Graphic-based Programming) ซึ่งจะแตกต่าง

จากแนวคิด Text based Programming เช่น Text – based จะทำงานจากบนลงล่าง แต่ LabVIEW จะทำงานแบบ Dataflow โดยสามารถเขียนเป็นสมการต่างๆ ที่ซับซ้อนได้เหมือน Text-Based เช่น ภาษา C โดยใช้ Formula Node ในการทำงานของ LabVIEW เน้นทางการติดต่อกับเครื่องมือ หรือ ทรานสดิวเซอร์ (Tranducer) ที่ใช้วัดสัญญาณทางกายภาพต่างๆ ภายนอก ในบางครั้งเราจึงเรียก LabVIEW ว่าเครื่องมือวัดเสมือน และนอกจากนี้สามารถนำประโยชน์จาก Computer Technology และ Network Technology มาประยุกต์ใช้งาน เช่น การเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูล (Database) หรือ ส่งผ่านข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต ทำให้ในหลายอุตสาหกรรมได้นำเอา LabVIEW มาประยุกต์ใช้งาน กับงานวัดควบคุม และระบบอัตโนมัติ (Automation)

สำหรับโปรแกรม LabVIEW นั้น เป็นโปรแกรมที่จะนำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของรถอัจฉริยะเนื่องจากโปรแกรมนี้นั้นมีความสามารถในการวิเคราะห์ ประมวลผลที่สูง และยังง่ายต่อการเขียนโปรแกรม เนื่องจากเป็นการเขียนโปรแกรมแบบใช้รูปภาพ (Graphical Language) สามารถเขียนการทำงานที่สลับซับซ้อนได้ง่ายและยังสามารถใช้กับอุปกรณ์ต่างๆ ได้หลายชนิดอีกด้วยและมีโมดูลที่สำคัญในงานนี้ คือ NI Vision Development Module เป็นห้องสมุดครบวงจรมีหลายร้อยขั้นตอนวิธีการประมวลผลภาพและฟังก์ชันมองเห็นของเครื่องจักรเพื่อเพิ่มภาพให้ตรวจสอบการแสดงผลให้เห็นหาคุณลักษณะระบุวัตถุและส่วนวัดขนาดของวัตถุ



ภาพที่ 20 ตัวอย่างหน้าจอของโปรแกรม NI Vision Assistant

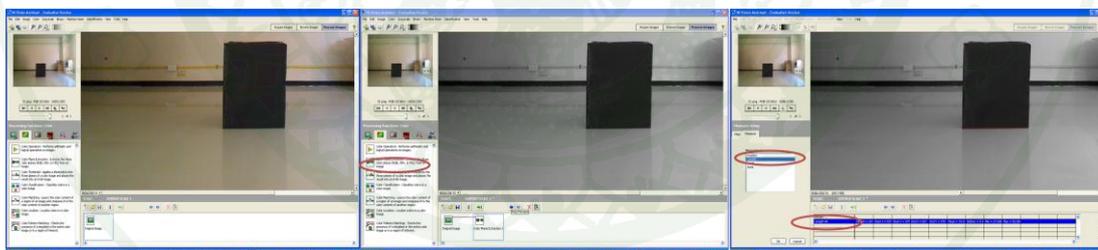
วิธีการ

วิธีการของการทดลองนั้นเราแบ่งออกเป็นสามอย่าง คือ ระบบกลจักรวิทัศน์ ระบบควบคุมการเคลื่อน และ ระบบควบคุมของการขับเคลื่อน

1. ระบบกลจักรวิทัศน์ (Machine Vision)

1.1 การสอบเทียบรูปภาพ (Image Calibration)

ส่วนนี้จะอธิบายวิธีการติดตั้งระบบภาพและสอบเทียบการตั้งค่าการถ่ายภาพเพื่อให้คุณสามารถแปลงพิกเซลพิกัดเพื่อ โลกแห่งความจริงพิกัด พิกเซลการแปลงพิกัดเพื่อ โลกแห่งความจริงพิกัดเป็นประโยชน์เมื่อคุณต้องการที่จะทำการวัดที่ถูกต้องจากการตรวจสอบภาพโดยใช้หน่วย โลกแห่งความจริงโดยจากรูปภาพที่ได้มาจากกล้อง Logitech 9000 แล้วทำการบันทึกภาพ โดยใช้โปรแกรม Ni Assistant เพื่อหาค่าระยะภาพ ต่อ ระยะพิกเซล โดยใช้คำสั่งดังภาพที่ 21 ซึ่งได้จากการบันทึกภาพของกล้อง เราจะได้ภาพที่เป็นภาพสี ให้เราเลือกคำสั่ง Color plane Extraction เพื่อให้ได้ภาพ Gray scale เมื่อได้ภาพมาแล้วให้เลือก Measure >>> length เพื่อดูค่าพิกเซล



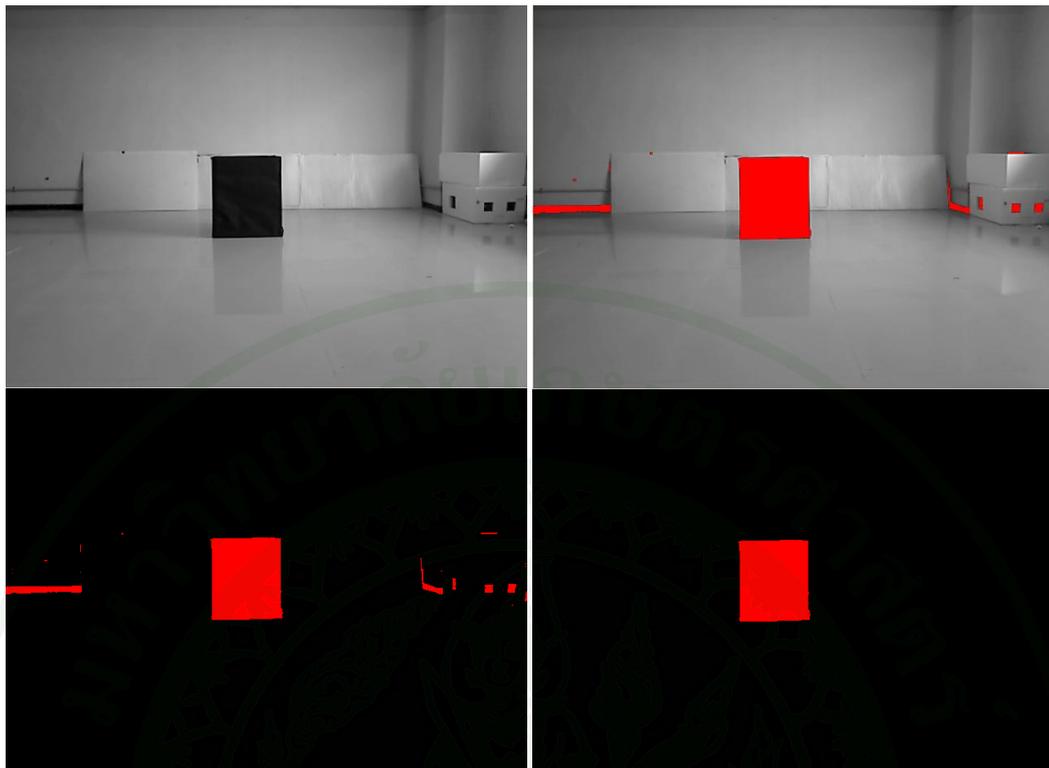
ภาพที่ 21 ขั้นตอนการหาค่าพิกเซลจากภาพ

จากภาพที่ 21 เราได้ค่าพิกเซล ซึ่งค่าพิกเซลที่ได้คือ 295 จากนั้นเราไปวัดขนาดของจริงว่าเป็นเท่าใดซึ่งกล่องนี้กว้าง 54 เซนติเมตร เพราะฉะนั้นเราจึงได้ว่าค่าพิกเซลต่อความกว้างจริง (w) คือ $295/54 = 5.4629$ พิกเซลต่อ 1 เซนติเมตร

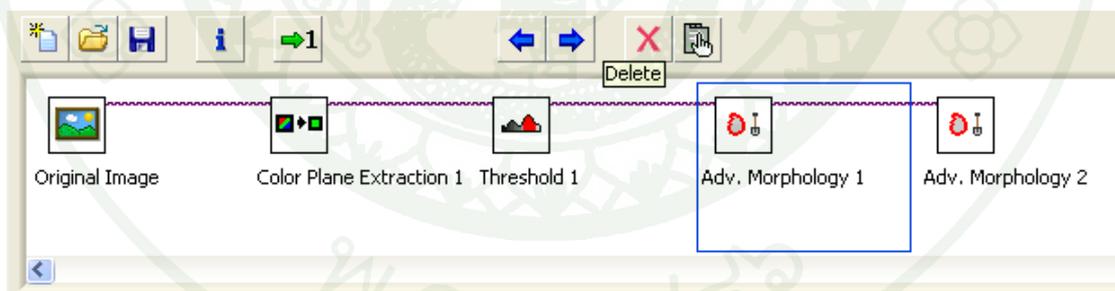
1.2 การแยกบริเวณ (Segmentation)

กระบวนการนี้เป็นการแยกบริเวณของภาพที่มีลักษณะร่วมกันออกเป็นส่วนๆ กระบวนการนี้เป็นการแยกบริเวณของภาพที่มีลักษณะร่วมกันออกเป็นส่วนๆ ซึ่งมุ่งเน้นว่า จะใช้วิธีใดหรือเงื่อนไขในการแยกวัตถุที่สนใจออกจากฉากหลัง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ จะใช้เงื่อนไขใดในการพิจารณาว่า พิกเซลที่กำลัง พิจารณายู่ นั้น จัดเป็นของของวัตถุ (Objects) ใดที่อยู่ในภาพ หรือบริเวณใดที่จัดเป็นฉากหลัง (back ground) นอกจากนี้ ยังต้องมีการคำนึงถึง การเก็บข้อมูลของวัตถุที่แยกออกมาให้ในรูปแบบใดจึงจะเหมาะสมสำหรับกระบวนการแยกภาพ

การแยกบริเวณ โดยการใช้ค่า Threshold ซึ่งเป็นค่าที่เป็นจำนวนเต็มที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 255 เช่นเดียวกับค่าค่าเข้มขึ้นแสงของพิกเซลที่อยู่ในภาพ Grayscale สำหรับการแยกบริเวณโดยการใช้ค่า Threshold นั้น จะเป็นการแปลงภาพ Grayscale ให้เปลี่ยนเป็นภาพที่มีเพียงสองระดับ (binary image) โดยการใช้เงื่อนไขว่าค่าความเข้มขึ้นแสงที่พิกเซลตำแหน่งต่ำกว่าหรือเท่ากับค่า Threshold ให้ค่าพิกเซลนั้นเป็น 0 หรือเปลี่ยนเป็นด้านมืดไป และถ้าพิกเซลใดมีค่าสูงกว่า Threshold แล้วให้พิกเซลนั้นมีค่า 255 หรือเปลี่ยนเป็นด้านสว่างไป ซึ่งการแยกบริเวณด้วย Threshold นี้ยังสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่การใช้ Threshold เดียวกันทั้งภาพ เรียกว่า Global Threshold และการแบ่งภาพออกเป็นภาพย่อยๆ ที่มีขนาดเล็กๆ ซึ่งแต่ละภาพย่อยจะมีค่า Threshold เป็นของตัวเอง หรือเรียกว่า Local Threshold ซึ่งจากการทำงานทั้งสองแบบจะมีคำถามเกิดขึ้นว่า เราจะใช้วิธีใดในการเลือกค่า Threshold ที่เหมาะสมกับทั้งภาพ หรือภาพย่อยๆ นั้นซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป และเนื่องจากการแยกบริเวณ โดยใช้ค่า Thresholds นั้น ผลที่ได้คือ บริเวณพื้นที่ที่มีค่าความเข้มขึ้นแสงใกล้เคียงกัน ซึ่งมีอีกชื่อหนึ่งว่า Area Based Segmentation



ภาพที่ 22 ขั้นตอนการหาการแยกบริเวณ (Segmentation) โดยค่า Threshold และวิธี Morphology

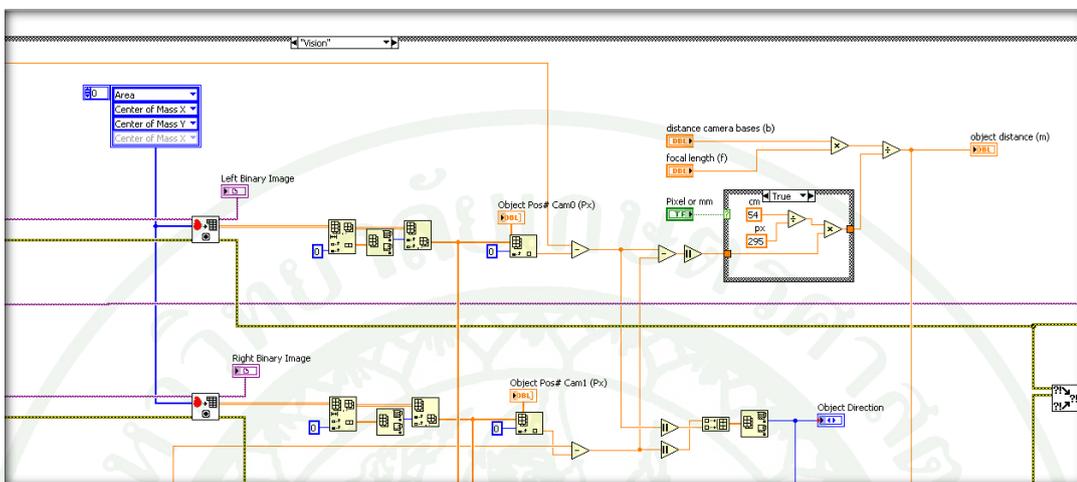


ภาพที่ 23 ขั้นตอนลำดับการทำงาน โปรแกรม NI Assistant ในการแยกบริเวณ

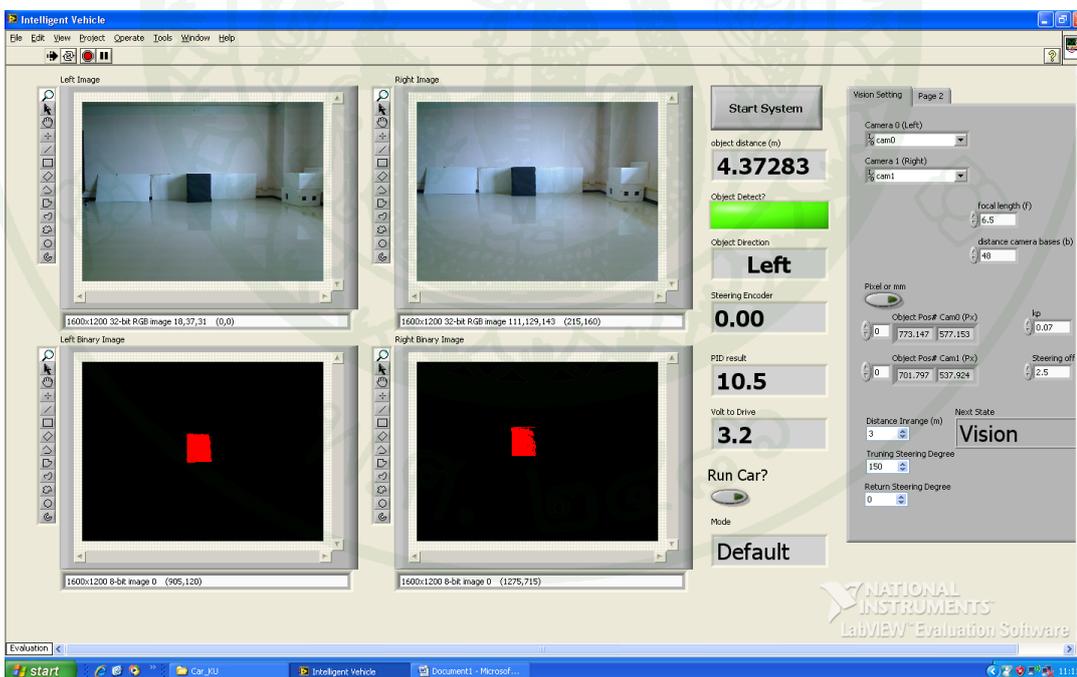
1.3 เขียนสมการ Stereo Vision ด้วย LabVIEW

นำสมการ Stereo Vision หรือสมการที่ 4 และค่า (w) ที่ได้มาเขียนโปรแกรม LabVIEW เพื่อหาค่าความยาวโฟกัสจากการทดลองจริง ซึ่งเราได้กำหนดระยะห่างของสิ่งกีดขวางในระยะ

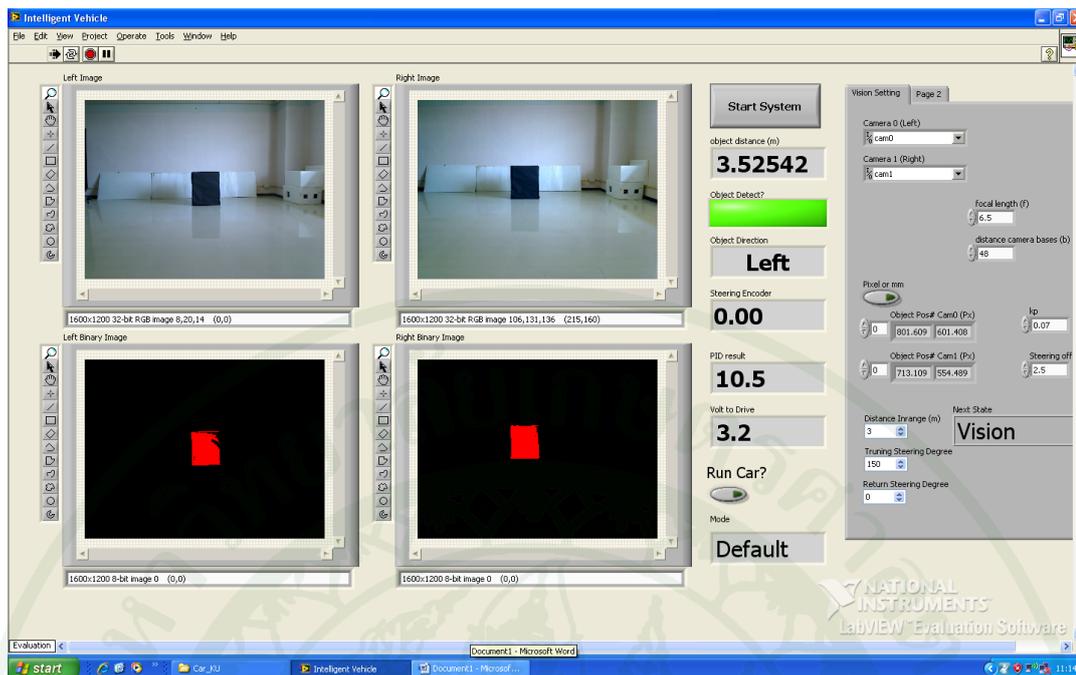
ต่างๆ ตั้งแต่ 4.2 m ถึง 1.2 m เพื่อเปรียบเสมือนรถได้ทำการเคลื่อนที่จริง และ ปรับค่าความยาวโฟกัสให้มีค่าตั้งแต่ 6-10 mm ในสภาวะแสงคงที่



ภาพที่ 24 ภาพตัวอย่างการเขียนโปรแกรม LabVIEW ในหน้าของ Block Diagram



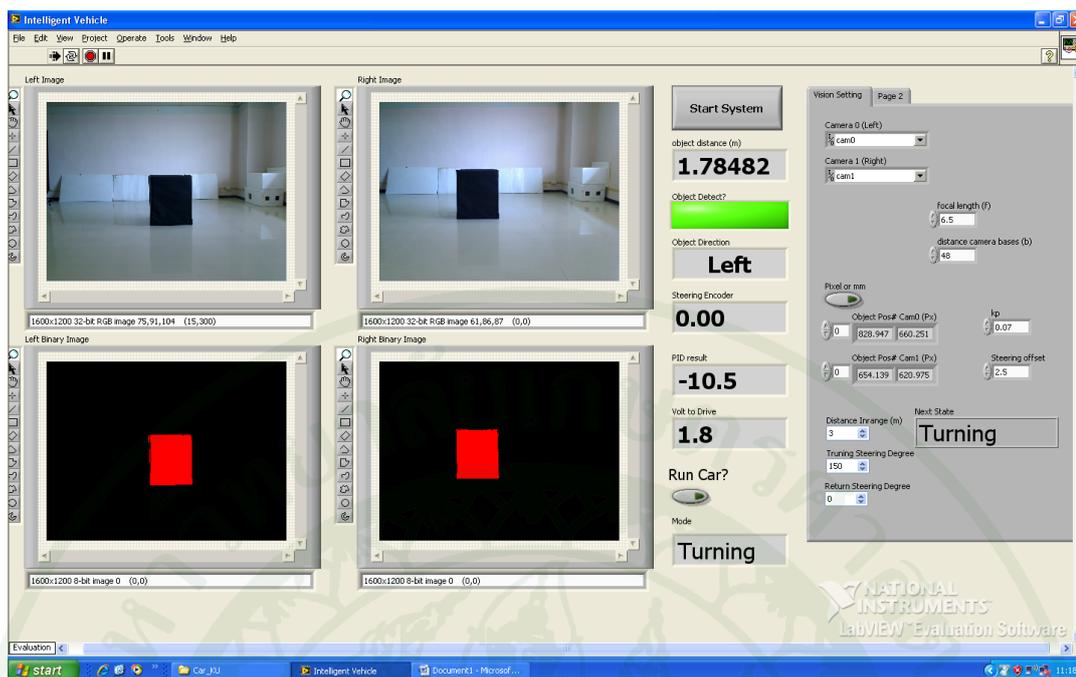
ภาพที่ 25 ทดลองระยะ 4.2 เมตร



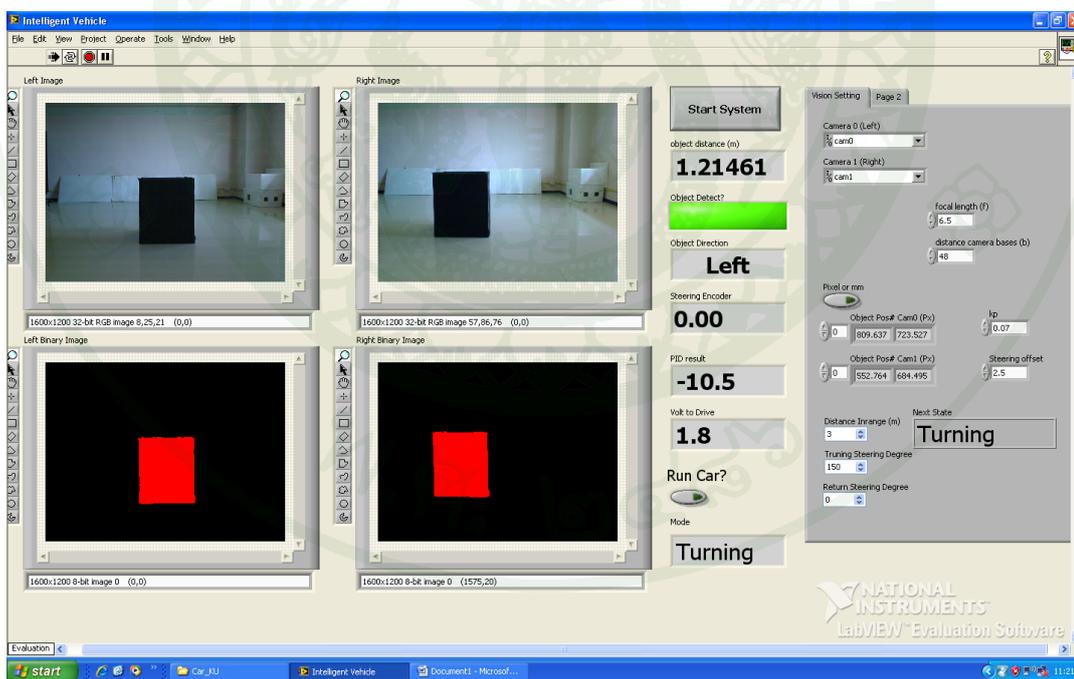
ภาพที่ 26 ทดลองระยะ 3.6 เมตร



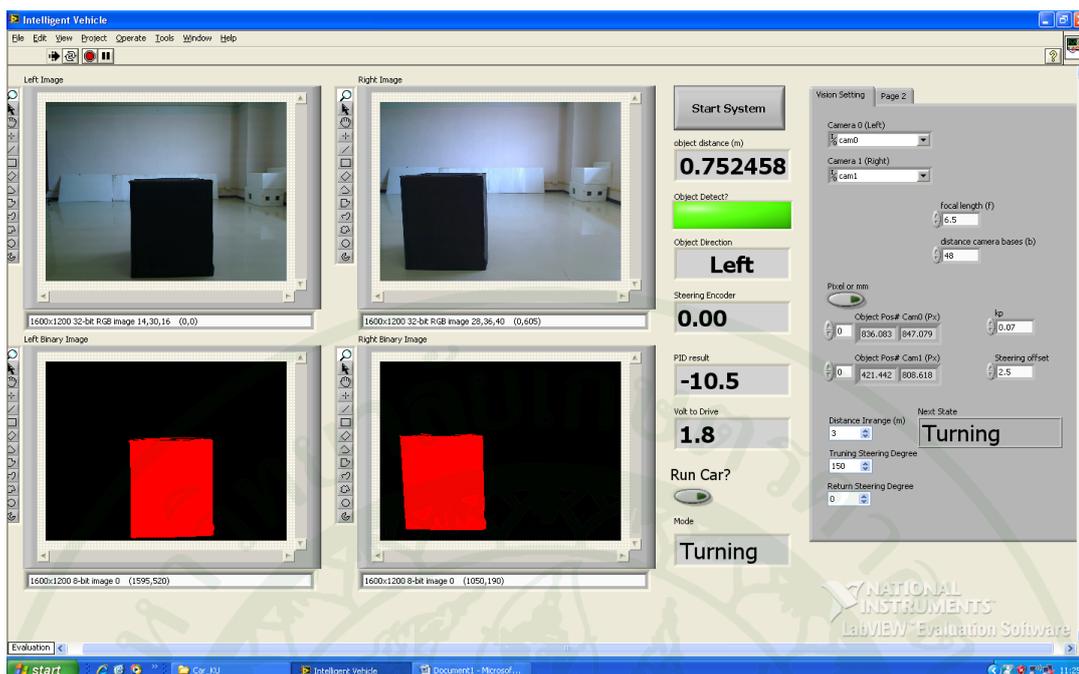
ภาพที่ 27 ทดลองระยะ 3.0 เมตร



ภาพที่ 28 ทดลองระยะ 2.4 เมตร



ภาพที่ 29 ทดลองระยะ 1.8 เมตร



ภาพที่ 30 ทดลองระยะ 1.2 เมตร

จากการทดลองเราจะได้อ่านค่าตามตารางดังนี้

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างของวัตถุต่อความยาวโฟกัส

ความยาวโฟกัส (มิลลิเมตร)	ระยะทาง(เมตร)					
	4.2 m	3.6 m	3.0 m	2.4 m	1.8 m	1.2 m
10 mm	6.48	4.8	3.8	2.75	1.88	1.13
9.5 mm	6.28	4.66	3.64	2.62	1.78	1.08
9 mm	5.95	4.42	3.5	2.48	1.69	1.00
8.5 mm	5.62	4.17	3.27	2.34	1.60	0.96
8 mm	5.36	3.95	3.07	2.20	1.51	0.9
7.5 mm	4.95	3.69	2.80	2.07	1.41	0.85
7 mm	4.63	3.43	2.70	1.93	1.32	0.79
6.5 mm	4.30	3.18	2.50	1.79	1.22	0.73
6 mm	4.00	2.96	2.31	1.65	1.13	0.68

หมายเหตุ: ตัวหนาแสดงถึงค่าระยะทางที่ใกล้เคียงมากที่สุด

ผลที่ได้ออกมา นั้น เรานำมาใช้ในระบบบังคับเดี่ยว ซึ่งผลจากระบบเดี่ยวแบบ เอนเคอร์แมน เราเลือกจะระยะปลอดภัยโดยใช้ช่วงระยะห่าง 4 เมตร ในการเลี้ยวหลบวัตถุ ซึ่งเรา ต้องกำหนดช่วงของค่าที่ใช้นั้นคือการประมาณค่าโดยใช้การ interpolate จากสูตรว่า

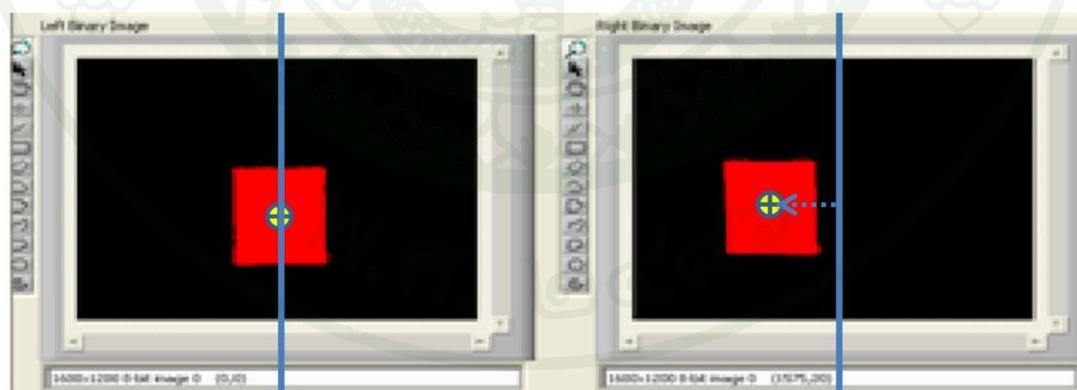
$$Y = Y_2 + \left[\frac{(X - X_2)(Y_1 - Y_2)}{(X_1 - X_2)} \right] \quad (15)$$

โดยที่

$$X_1 = 4.30, Y_1 = 6.5, X_2 = 3.69, Y_2 = 7.5, X = 4 \quad \therefore Y = 6.9918 \approx 7$$

1.4 ซ้ายหรือขวา

การเลือกว่าวัตถุอยู่น้อยซ้าย หรือขวานั้น มีการตัดสินใจโดยใช้ค่าพิคเซลที่ได้จากภาพ ซ้ายและขวา โดยเปรียบเทียบกันในแนวแกน X โดยที่ ต้องวางระดับของ Y ให้ตรงกัน เมื่อค่าจุด ศูนย์กลางของรูปใดมากกว่าค่าที่อยู่พิคเซลตรงกลางนั้นมากที่สุดด้านใด โดยที่ค่าพิคเซลนั้นคือ ค่าของแกน X นำมาหาร 2 ซึ่งค่าความละเอียดของภาพในแกน X คือ 1200 พิคเซล นำมาหารสองจะ ได้เท่ากับ 800 พิคเซล ภาพที่ต้องการนั้นคือรูปที่อยู่ซ้ายหรือขวาดังภาพต่อไปนี้

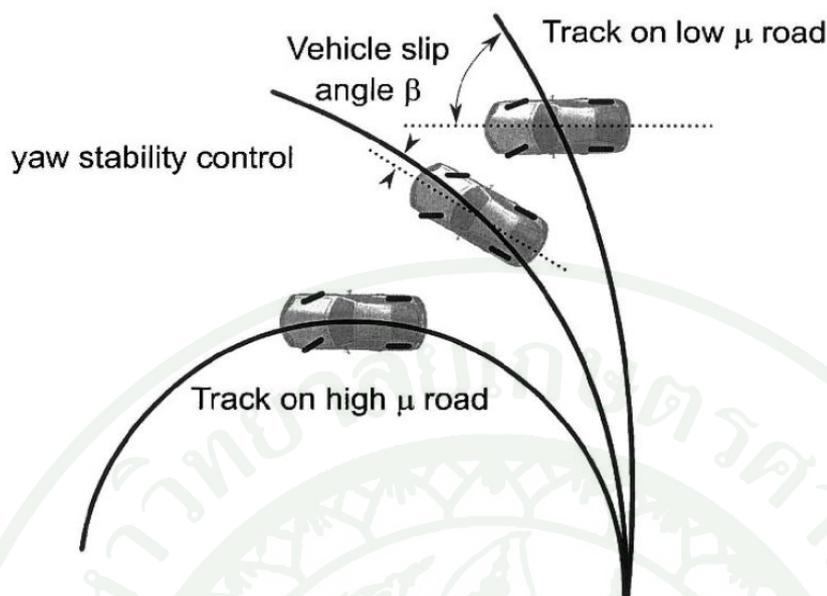


ภาพที่ 31 ภาพแสดงการตัดสินใจซ้ายหรือขวา ซึ่งที่ได้คือด้านซ้าย

2. ระบบควบคุมการเลี้ยว (Turning Control System)

ระบบควบคุมการเลี้ยวอย่างมีประสิทธิภาพ ป้องกันจากการหมุนหรือเลื้อนออกที่ถูกพัฒนา และเมื่อเร็ว ๆ นี้ถูกทำให้เป็นเชิงพาณิชย์ของบริษัทรถยนต์ ดังนั้นระบบควบคุมการเลี้ยวอย่างมีประสิทธิภาพนั้นอ้างอิง โดยการควบคุมระบบการเลี้ยวหรือระบบควบคุมการเลี้ยวอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยไฟฟ้า

ภาพที่ 32 แบบแผนแสดงถึงหน้าที่ของระบบการเลี้ยวในภาพนี้, โคล้งที่ต่ำกว่าแสดงการเคลื่อนที่ที่ซึ่งการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะปฏิบัติตามในการตอบรับของการอินพุตพวงมาลัยจากคนขับถ้านอนนั้นแห้งและมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของถนนกับยางรถยนต์ที่สูง ในกรณีนี้สัมประสิทธิ์ที่มากพอที่จะสามารถนำแรงที่ตามมาที่ต้องการจากยานพาหนะกับถนนที่โคล้ง ถ้ามสัมประสิทธิ์นั้นเล็กหรือความเร็วของรถยนต์นั้นมากเกินไป ดังนั้นยานพาหนะจะไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ตามที่ต้องการของคนขับได้ มันจะแทนที่วงจรของการเคลื่อนที่ของรัศมีที่มากกว่า (โคล้งน้อยกว่า) ดังภาพที่แสดงด้านบนของภาพที่ 34 หน้าที่ของระบบการเลี้ยวของรถยนต์เป็นสร้างความเร็วของการเลี้ยวของรถยนต์ให้มากที่สุดที่จะมาได้ที่จะเลี้ยวแบบปกติตามที่คนขับได้คาดหวังไว้ ถ้ามสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเล็กมากๆ มันอาจจะเป็นไปได้ที่จะมีการเคลื่อนที่ที่มีอัตราการเลี้ยวที่ประสบความสำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งจะสำเร็จได้โดยคนขับบนค่าที่มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ผิวหน้าของถนนที่มาก ในกรณีนี้ระบบการเลี้ยวจะแบ่งเป็นส่วนๆที่ทำให้สำเร็จ โดยการสร้างอัตราการเลี้ยวที่ใกล้เคียงเพื่อจะได้อัตราการเลี้ยวที่คาดหวังไว้ ดังภาพที่แสดงด้วยการ โคล้งของเส้นกลางในภาพที่ 34



ภาพที่ 32 หน้าที่ของระบบการเลี้ยว

หลายบริษัทศึกษาค้นคว้าและพัฒนาการควบคุมการเลี้ยวระหว่างที่ลื่นปีผ่านมาจนถึงการจำลองและทำแบบตัวอย่างของการทดลอง บางระบบการควบคุมการเลี้ยวนี้เป็นเชิงพาณิชย์ของยานพาหนะที่เป็นสินค้าด้วย ยกตัวอย่างหลายๆ อย่าง เช่น BMW DSC3 (Leffer *et al.*, 1998) และ Mercedes ESP ซึ่งถูกแนะนำในปี 1995 ระบบของ Cadillac Stabilitrak (Jost, 1996) ถูกแนะนำในปี 1996 และ the Chevrolet C5 Corvette Active Handling system ในปี 1997 (Hoffman *et al.*, 1998)

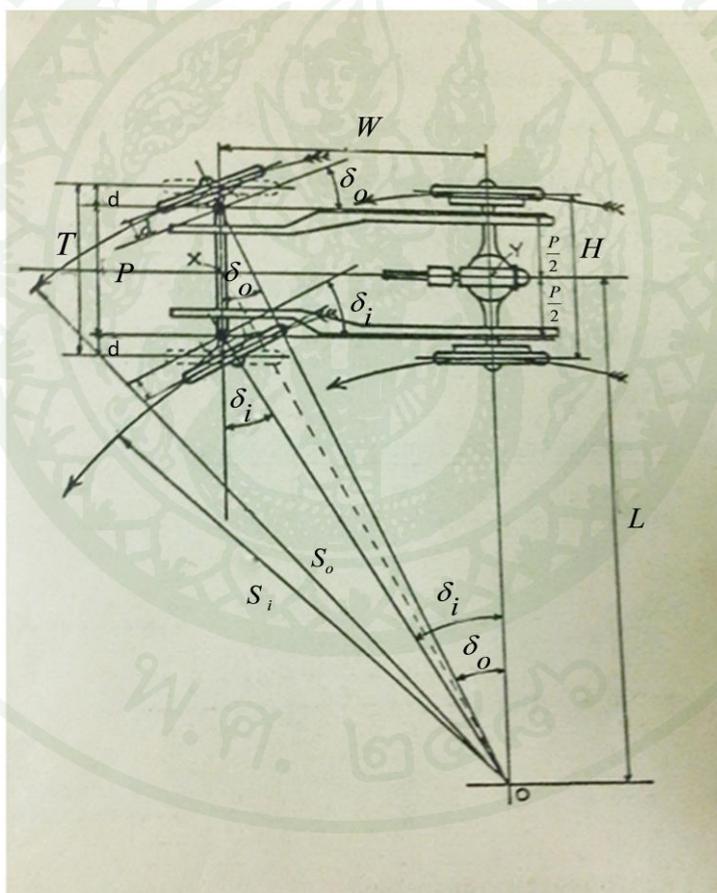
ชนิดระบบการควบคุมที่มีประสิทธิภาพทั้งสามเป็นจุดประสงค์และพัฒนาโดยการควบคุมการเลี้ยว

1. ระบบการเบรกแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Braking) ซึ่งทำให้มีประโยชน์โดยระบบ ABS บนยานพาหนะที่จะใช้ในระบบเบรกแบบดิฟเฟอเรนเชียลระหว่างล้อซ้ายและขวาที่ควบคุมการเลี้ยว
2. ระบบพวงมาลัยโดยคันชัก-คันต่ง (Steer-by-Wire) โดยถูกปรับปรุงโดยการป้อนอินพุตมุมเลี้ยวของพวงมาลัยและการเพิ่มมุมที่ถูกต้องของพวงมาลัยไปยังที่ล้อ

3. ระบบการกระจายกำลังบิด (Active Torque Distribution) เป็นการกระทำของดิฟเฟอเรนเชียลและเทคโนโลยีของล้อขับทั้งหมดและนำไปเป็นควบคุมของทั้งวงจรและการเคลื่อนที่การเลี้ยว

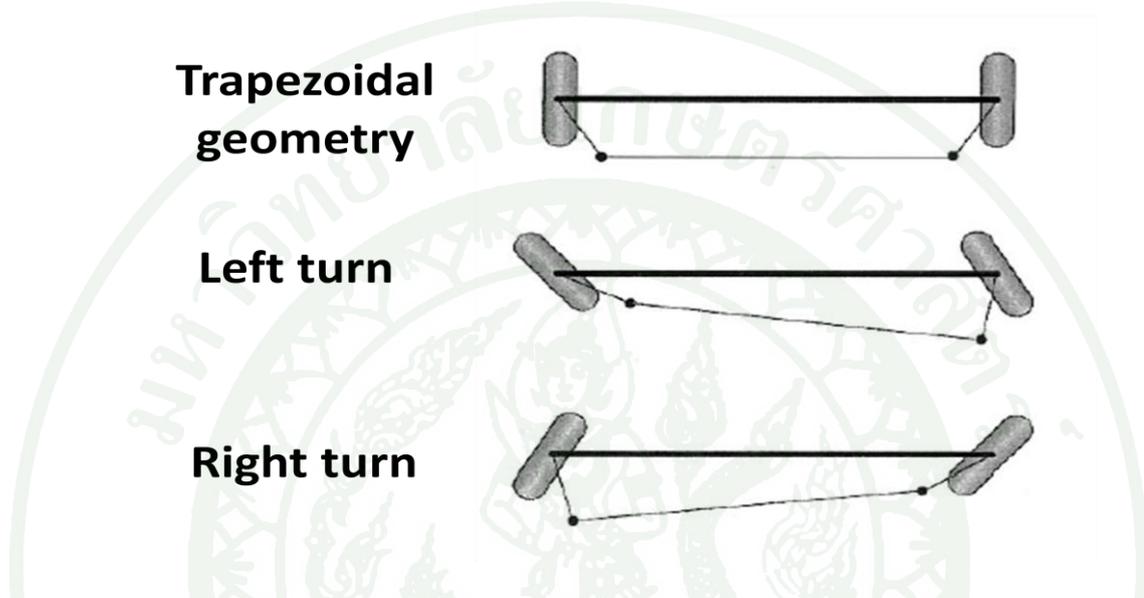
โดยมากระบบการเลี้ยวแบบดิฟเฟอเรนเชียลจะได้มาพร้อมกับงานวิจัยต่างๆ และจากการทดลองบนหลายๆการผลิตของยานพาหนะ ระบบพวงมาลัยด้วยคันชัก-คันส่งได้นำมาโดยทางนักวิจัย (Ackerman, 1994, Ackerman 1997) ระบบการกระจายกำลังบิดได้ถูกนำมาที่ผ่านเมื่อเร็วๆ นี้ และจะนำมาใช้ในรถยนต์ในอนาคต

3. รูปแบบการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของรถแบบแอ็คเคอร์แมน



ภาพที่ 33 ระบบการเลี้ยวแบบแอ็คเคอร์แมน

ระบบการเลี้ยวแบบแอ็คเคอแมน เป็นระบบการเลี้ยว ซึ่งขณะเลี้ยวรถเพลาดล้อหน้าจะไม่เคลื่อนที่ไปทั้งแกน จะมีเฉพาะชิ้นส่วนที่อยู่ด้านนอกของสลักเท่านั้นที่เคลื่อนที่ โดยการบังคับของชิ้นส่วนต่างๆที่ต่อมาจากพวงมาลัย ระบบการเลี้ยวแบบแอ็คเคอแมนนี้ใช้กับรถยนต์ปัจจุบันทั้งหมด นอกจากรถที่ใช้บังคับเลี้ยวด้วยไฮดรอลิกส์ ดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 การเลี้ยวแบบแอ็คเคอแมน โดยแกนคั่นชักคั่นส่งรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู

พิจารณาจากภาพที่ 33 จะเห็นได้ว่าจุดศูนย์กลางของการเลี้ยวของทุกล้อที่จุด O แต่มุมเลี้ยวจะมีสองมุม คือมุมเลี้ยวของล้อใน δ_i และมุมเลี้ยวของล้อนอก δ_o

การหาความสัมพันธ์ของมุมเลี้ยวและระยะต่างๆสามารถกระทำได้คล้ายคลึงกับระบบการเลี้ยวของจักรยาน คือ

ความสัมพันธ์ของมุมเลี้ยวและความยาวอื่นๆ

$$\cot \delta_i = \frac{L - \frac{1}{2}P}{W} \tag{16}$$

$$\cot \delta_o = \frac{L + \frac{1}{2}P}{W} \tag{17}$$

$$\cot \delta_o - \cot \delta_i = \frac{L + \frac{1}{2}P - L + \frac{1}{2}P}{W}$$

$$\therefore \cot \delta_o - \cot \delta_i = \frac{P}{W} \quad (18)$$

เมื่อ P = ความกว้างระหว่างสลักล้อน้ำ

W = ความยาวของช่วงล้อน้ำ-หลัง

δ_i = มุมเลียของล้อนใน

δ_o = มุมเลียของล้อนอก

ระยะระหว่างสลักล้อนถึงศูนย์กลางของยาง

$$\text{จากภาพที่ 35 } d = \frac{1}{2}(T - P) \quad (19)$$

เมื่อ d = ระยะระหว่างสลักล้อนถึงศูนย์กลางของยาง

T = ความกว้างของช่วงล้อน้ำ

P = ความกว้างระหว่างสลักล้อน้ำ

ระยะจากกึ่งกลางของตัวรถที่เพลาลังถึงจุดศูนย์กลางของการเลีย

$$\text{จากสมการที่ (16) } \cot \delta_i = \frac{L - \frac{1}{2}P}{W}$$

$$W \cot \delta_i = L - \frac{1}{2}P$$

$$L = W \cot \delta_i + \frac{1}{2}P \quad (20)$$

รัศมีการเลี้ยว

รัศมีการเลี้ยวของล้อหน้าล้อใน

$$S_i = W \operatorname{cosec} \delta_i - d = W \operatorname{cosec} \delta_i - \frac{1}{2}(T - P) \quad (21)$$

รัศมีการเลี้ยวของล้อหน้าล้อนอก

$$S_o = W \operatorname{cosec} \delta_o + d = W \operatorname{cosec} \delta_i + \frac{1}{2}(T - P) \quad (22)$$

รัศมีการเลี้ยวของล้อหลังล้อใน

$$R_i = L - \frac{1}{2}H = W \cot \delta_i + \frac{1}{2}P - \frac{1}{2}H = W \cot \delta_i + \frac{1}{2}(T - P) \quad (23)$$

รัศมีการเลี้ยวของล้อนอก

$$R_o = L + \frac{1}{2}H = W \cot \delta_i + \frac{1}{2}P + \frac{1}{2}H = W \cot \delta_i + \frac{1}{2}(T + P) \quad (24)$$

มุมเลี้ยว การหามุมเลี้ยวขณะที่มีรัศมีการเลี้ยวเท่ากับ R หาได้จากสมการที่ (22) คือ

$$S_o = W \operatorname{cosec} \delta_o + \frac{1}{2}(T - P)$$

$$\operatorname{cosec} \delta_o = \frac{R - \frac{1}{2}(T - P)}{W}$$

$$\operatorname{cosec}^2 \delta_o = \left[\frac{R - \frac{1}{2}(T - P)}{W} \right]^2$$

จากสมการทางตรีโกณมิติ

$$\operatorname{cosec}^2 \delta_o = 1 + \cot^2 \delta_o$$

หรือ

$$1 + \cot^2 \delta_o = \operatorname{cosec}^2 \delta_o \quad (9)$$

$$\therefore 1 + \cot^2 \delta_o = \left[\frac{R - \frac{1}{2}(T - P)}{W} \right]^2 \quad (25)$$

จากสมการที่ (18)

$$\cot \delta_o - \cot \delta_i = \frac{P}{W}$$

หรือ

$$\cot \delta_o = \cot \delta_i + \frac{P}{W}$$

$$\cot^2 \delta_o = \left[\cot \delta_i + \frac{P}{W} \right]^2 \quad (26)$$

แทนค่าสมการที่ (25) ใน (26)

$$1 + \left[\cot \delta_i + \frac{P}{W} \right]^2 = \left[\frac{R - \frac{1}{2}(T - P)}{W} \right]^2$$

$$\left[\cot \delta_i + \frac{P}{W} \right]^2 = \left[\frac{R - \frac{1}{2}(T - P)}{W} \right]^2 - 1$$

$$\cot \delta_i + \frac{P}{W} = \sqrt{\left[\frac{R - \frac{1}{2}(T - P)}{W} \right]^2 - 1}$$

$$\cot \delta_i = \sqrt{\left[\frac{R - \frac{1}{2}(T - P)}{W} \right]^2 - 1} - \frac{P}{W} \quad (27)$$

รถทดลองใช้การเลี้ยวแบบแอ็คเคอร์แมน ประกอบด้วยโครงสร้างที่มีค่าดังนี้

ความยาวของช่วงล้อหน้า - หลัง (W)	=	1080	มิลลิเมตร
ความกว้างระหว่างสลักล้อหน้า (P)	=	570	มิลลิเมตร
ความกว้างของช่วงล้อหน้า (T)	=	1000	มิลลิเมตร
ความกว้างของช่วงล้อหลัง (H)	=	1130	มิลลิเมตร
ระยะตั้งฉากจากจุดกึ่งกลางล้อหลังถึงจุดศูนย์กลางของการเลี้ยว (L)	=	2600	มิลลิเมตร

หารัศมีการเลี้ยวของล้อทั้งสี่และมุมเลี้ยว

$$\text{รัศมีการเลี้ยวของล้อหลังล้อใน} \quad R_i = 2035 \text{ mm}$$

$$\text{รัศมีการเลี้ยวของล้อหลังล้อนอก} \quad R_o = 3165 \text{ mm}$$

มุมเลี้ยวของล้อหน้าล้อใน หาได้จากสมการที่ (16)

$$\delta_i = 25^\circ$$

มุมเลี้ยวของล้อหน้าล้อนอก หาได้จากสมการที่ (17)

$$\delta_o = 20.52^\circ$$

รัศมีการเลี้ยวของล้อหน้าล้อใน หาได้จากสมการที่ (21)

$$S_i = 2340 \text{ mm}$$

รัศมีการเลี้ยวของล้อหน้าล้อนอก หาได้จากสมการที่ (22)

$$S_o = 2770 \text{ mm}$$

พิจารณาค่าจากการคำนวณจะเห็นได้ว่า เราได้ค่าล้อหลังล้อนอกที่มีค่าที่มีรัศมีสูงสุด เราจึงใช้ค่าที่มากที่สุดเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ซึ่งค่าที่ได้คือ 3.165 เมตร แต่เราได้เพิ่มค่าระยะทางก่อนระยะจะหักกลับไปประมาณ 1 เมตร ซึ่งค่าที่ใช้คือ 4 เมตร

ค่าการหมุนของพวงมาลัยที่ทำให้มุมล้อหน้าล้อในหมุนไป 25 องศา คือพวงมาลัยหมุนไป 40 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง โดยเราตั้งองศาของพวงมาลัยเป็นค่า 0 ที่ตรงกลาง หมุนทางซ้ายของศาเป็นค่าลบ (-) และหมุนทางขวาเป็นองศาบวก (+) โดยจ่ายความต่างศักย์ให้แก่อุปกรณ์วงจรจับมอเตอร์กระแสตรง ตั้งแต่ 0 ถึง 5 โวลต์ โดยใช้ค่า Offset เท่ากับ 2.5 โวลต์

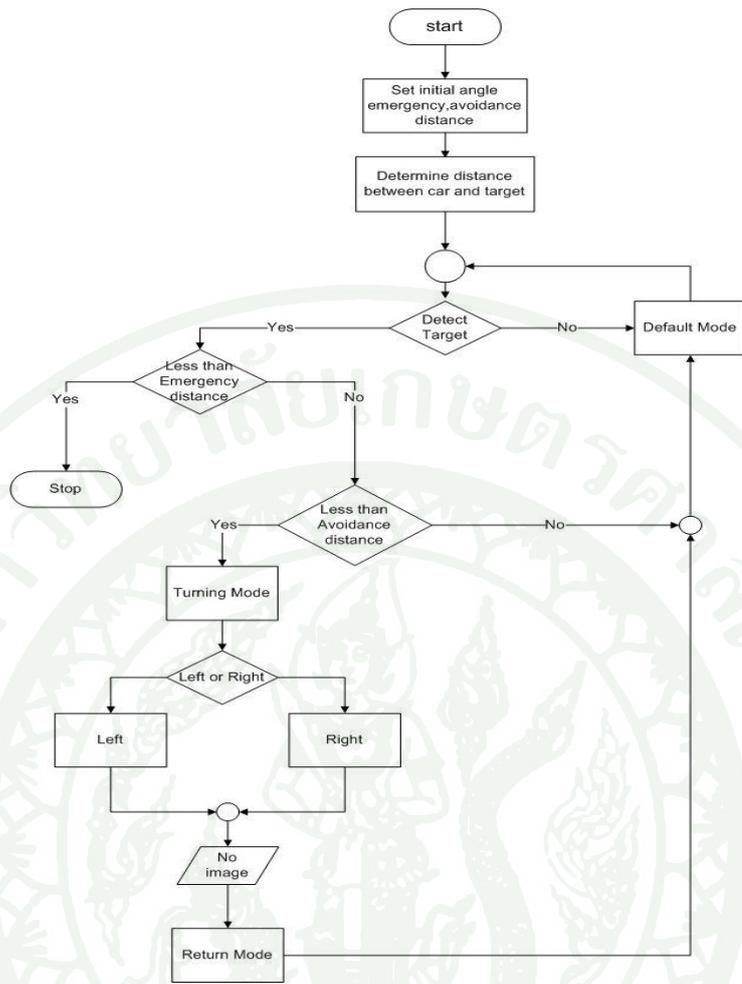
4. การออกแบบพฤติกรรมพื้นฐาน

เนื่องจากปัจจุบันนี้การวิจัยทางด้านรถอัจฉริยะมีลักษณะซับซ้อนมากมายเพื่อให้ตอบสนองกับผู้ใช้หลายหน้าที่ แต่ละส่วนจะดำเนินการตามหน้าที่และความสามารถของตัวเอง งานวิจัยนี้แบ่งได้เป็นสองลำดับคือ ลำดับขั้นทรัพยากรและลำดับขั้นพฤติกรรม

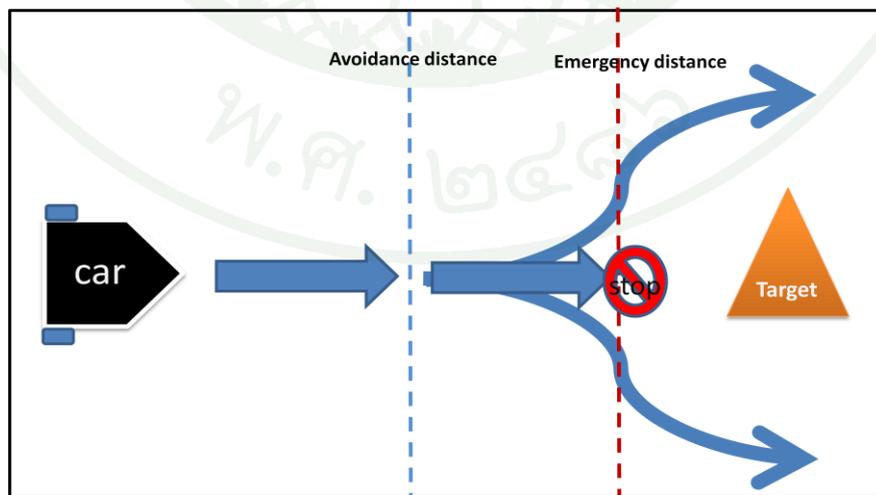
ลำดับขั้นทรัพยากร (Hardware/Resource) เป็นลำดับขั้นต่ำสุดใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ มีหน้าที่เตรียมข้อมูลดิบจากอุปกรณ์ซึ่งมีการปรับข้อมูลสม่ำเสมอ เพื่อส่งให้ลำดับขั้นที่สูงกว่า เช่น ข้อมูลจากกล้อง หรือข้อมูลจากตัวตรวจรู้ (Sensor) มีหน้าที่เตรียมประมวลผลภาพเพื่อหาค่าระยะทางระหว่างสิ่งกีดขวางกับรถที่เคลื่อนที่มีหน่วยเป็นเมตร และข้อมูลของเซนเซอร์ในการวัดรอบและตำแหน่งของพวงมาลัยและล้อ

ลำดับขั้นพฤติกรรม (Behavior/Skill) เป็นลำดับขั้นสูงกว่าตัวแทนทรัพยากรประกอบด้วยพฤติกรรมพื้นฐานต่างๆหรือความสามารถต่างๆสำหรับทำงานบางงาน เช่น การหยุดฉุกเฉิน การหลบสิ่งกีดขวาง ซึ่งมีพฤติกรรมดังนี้

1. ระบบปกติ (Default Mode) เป็นพฤติกรรมการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าตามปกติ
2. ระบบเลี้ยว (Turning Mode) เป็นพฤติกรรมเมื่อมีวัตถุเข้ามาสู่ระยะหลบวัตถุ (avoidance distance) รถจะทำการเลี้ยวเพื่อหักหลบวัตถุ
3. ระบบหมุนค่ากลับ (Return Mode) เป็นการหมุนพวงมาลัยกลับองศาเดิม เพื่อเข้าสู่ระบบปกติ
4. ระบบหยุดฉุกเฉิน เป็นพฤติกรรมที่ขึ้นกับระยะที่วัตถุที่ใกล้เกินกว่าจะหลบได้ (Emergency Distance) ในที่นี้เราตั้งไว้ที่ 1.5 เมตร ล้อของรถจะหยุดหมุนทันที



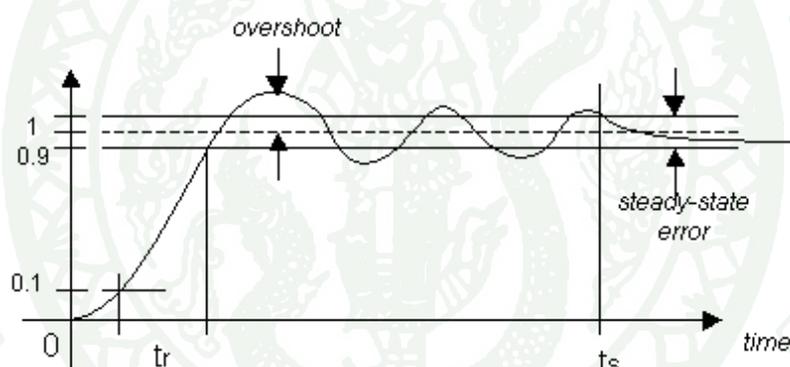
ภาพที่ 35 แสดงพฤติกรรมของรถอัจฉริยะ



ภาพที่ 36 จำลองการเคลื่อนที่การหลบที่หลบสิ่งกีดขวาง

5. ระบบขับเคลื่อน (Motion System)

เมื่อก้าวถึงการเคลื่อนที่ เรามักนึกถึงระยะทาง ทิศทาง ความเร็ว ความเร่ง ของการเคลื่อนที่ และหากเราพูดถึงการควบคุมการเคลื่อนที่ แน่นอนว่าเราต้องการควบคุมสิ่งต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การเคลื่อนที่ดังกล่าว และเป็นที่น่าทึ่งกันดี ว่าวัตถุใดๆ ใน โลกนี้มีมวล และถูกโลกดึงดูดไว้ด้วยแรง ค่าหนึ่ง เมื่อเราพยายามออกแรงเพื่อให้วัตถุใดๆ เกิดการเคลื่อนที่ จะเห็นได้ว่าเมื่อออกแรงในตอนแรก วัตถุจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทันที เปรียบเสมือนระบบควบคุมใดๆ ที่ไม่สามารถ ขับให้มอเตอร์ (รวมทั้งที่มอเตอร์เชื่อมต่ออยู่) เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการได้ทันทีทันใด ยกตัวอย่าง เช่น เรือบิน สัญญาณแบบขั้นบันไดให้กับระบบควบคุมความเร็ว (หรือระบบควบคุมตำแหน่ง) จะเห็นว่าระบบไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในทันทีเหมือนกับคำสั่งที่ป้อนเข้าไป โดยลักษณะการตอบสนองของระบบจะเป็นดังรูปภาพที่ 39



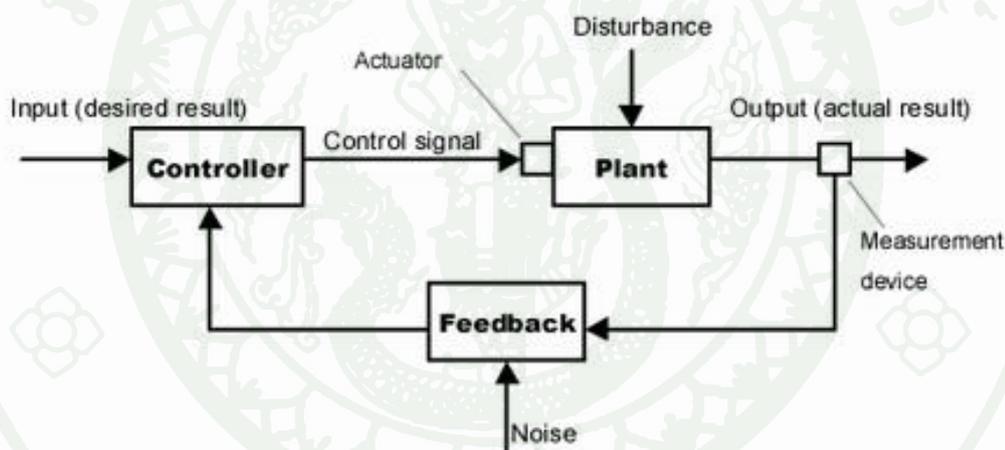
ภาพที่ 37 แสดงลักษณะการตอบสนองของระบบ

จะเห็นลักษณะการตอบสนองที่เราสนใจประกอบไปด้วย

1. เวลาในการตอบสนองต่อสัญญาณเข้า (คำสั่ง) โดยแบ่งออกเป็นสองค่าคือ
 - Rise Time, t_r
 - Settling Time, t_s
2. Overshoot
3. Steady-state Error

ลักษณะการตอบสนองของระบบที่ต้องการมักขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบที่เราต้องการควบคุม ยกตัวอย่างเช่นบาง ระบบต้องการต้องการความถูกต้องของระบบควบคุม บ้างต้องการการตอบสนองที่รวดเร็ว (จริงๆแล้วเราอยากได้ การตอบสนองที่ดี แต่ด้วยข้อจำกัดและลักษณะเฉพาะตัวของระบบที่ต้องการควบคุม เราจึงจำเป็นต้องยอมรับข้อ จำกัดและความเป็นไปได้ของการสร้างระบบควบคุม)

หากเราจำเพาะเจาะจงไปที่ระบบควบคุมการเคลื่อนที่จะเห็นว่าเราต้องการการเคลื่อนที่ที่แม่นยำ (Steady-state Error น้อยๆ) ไม่ต้องการ Overshoot รวมทั้งการตอบสนองที่ค่อนข้างเร็ว แต่ดังที่ได้กล่าวข้างต้นว่าการเคลื่อนที่ของวัตถุใดๆ (ที่เราต้องการควบคุม) มักมีแรงต้านและความเฉื่อยซึ่งมีผลต่อการออกแบบระบบควบคุม โดยที่ระบบควบคุมที่แพร่หลายในปัจจุบันใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งโครงสร้างอย่างง่ายของระบบแสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 38 แสดงการทำงานของมอเตอร์

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมคงเป็นระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งการออกแบบสามารถทำได้ทั้งแบบอนาล็อกและแบบดิจิทัล โดยแต่ละอย่างก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน เช่นเรื่อง ความละเอียดของการควบคุม การจัดสัญญาณรบกวน ความยากง่ายในการสร้าง แต่ในปัจจุบันตัวควบคุม PID มักเป็น แบบดิจิทัล เนื่องจากความสะดวก และประสิทธิภาพที่คาดเดาได้ง่าย (อัลกอริทึมที่ใช้เขียน) โดยมักถูกสร้างขึ้นโดยใช้ เครื่องมือหลายๆแบบเช่น Microcontroller, DSP, CPLD, FPGA

6. การควบคุมความเร็วมอเตอร์

เป็นที่ทราบกันดีว่าการควบคุมความเร็วของมอเตอร์สามารถทำได้โดยการควบคุมระดับแรงดันตกคร่อมตัวมอเตอร์ และ วิธีการที่นิยมใช้จะมีสองวิธีดังนี้

1. การปรับระดับแรงดันโดยใช้หลักการเปลี่ยนค่าความต้านทานของวงจร ซึ่งทำให้แรงดันตกคร่อมเปลี่ยนไปด้วย แต่จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นการสร้างความสูญเสียเนื่องจากกำลังไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้าน (พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน)

2. การปรับระดับแรงดันโดยการเปิดปิดแหล่งจ่ายไฟ โดยระดับแรงดันเฉลี่ยที่ได้จะขึ้นกับช่วงเปิดและช่วงปิด เราเรียกวิธีการนี้ว่า Pulse Width Modulation และเรียกอัตราส่วนของช่วงเปิดและช่วงปิดว่า Duty Cycle วิธีการนี้มีข้อเสียคือ หากเราเลือกความถี่ของพัลส์ไม่เหมาะสมอาจจะทำให้มอเตอร์สั่นได้

7. การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์

จริงๆ แล้วการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ก็คือ การควบคุมความเร็วนั่นเอง ยกตัวอย่างเช่น หากเราต้องการให้มอเตอร์ หมุน 10 องศา ในตอน 0-10 องศา เราต้องควบคุมให้มอเตอร์มีความเร็ว (ค่าหนึ่ง) และเมื่อถึงตำแหน่ง 10 องศาแล้วเรา จึงสั่งให้มอเตอร์มีความเร็วเป็น 0 ในขณะเดียวกัน หากเรากลับทิศทางของมอเตอร์ นั่นก็คือเราสั่งให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่เป็นลบนั่นเอง

สำหรับการใช้ระบบควบคุมป้อนกลับเพื่อควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์นั้น เราจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ในการป้อนกลับตำแหน่ง ปัจจุบันของมอเตอร์อุปกรณ์ดังกล่าวมีหลายประเภท รายละเอียดจะขอกล่าวในภายหลัง

ในการออกแบบในการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่ง เราจะต้องตั้งระบบควบคุมความเร็วก่อนและอาศัยสัญญาณผลต่างของตำแหน่ง ที่ต้องการเคลื่อนที่ไปและสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ป้อนกลับ (เรียกสัญญาณนี้ว่าสัญญาณคลาดเคลื่อนสัญญาณที่ได้นี้จะถูกป้อนเป็นสัญญาณขาเข้าของตัวควบคุม หลังจากนั้นตัวควบคุมจะประมวลผลเพื่อให้สัญญาณขับ เพื่อให้มอเตอร์ หมุนไปในตำแหน่งที่ต้องการ

จะเห็นว่าหากตำแหน่งที่ต้องการเคลื่อนที่ไปมีค่าเท่ากับตำแหน่งที่อ่านได้จากการอ่านตำแหน่งป้อนกลับสัญญาณคลาดเคลื่อนจะมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือจะไม่มีสัญญาณขับออกมาจากตัวควบคุม ทำให้มอเตอร์ไม่มีการหมุนหรือมอเตอร์มีความเร็วเป็นศูนย์นั่นเอง

8. การปรับจูนด้วยมือ

ถ้าระบบยังคงทำงาน ชั้นแรกให้ตั้งค่า K_i และ K_d เป็นศูนย์ เพิ่มค่า K_p จนกระทั่งสัญญาณขาออกเกิดการแกว่ง (oscillate) แล้วตั้งค่า K_p ให้เหลือครึ่งหนึ่งของค่าที่ทำให้เกิดการแกว่งสำหรับการตอบสนองชนิด "quarter amplitude decay" แล้วเพิ่ม K_i จนกระทั่งออฟเซตถูกตัดองในเวลาทีพอเพียงของกระบวนการ แต่ถ้า K_i มากไปจะทำให้ไม่เสถียร สุดท้ายถ้าต้องการ ให้เพิ่มค่า K_d จนกระทั่งลูปอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ถ้า K_d มากเกินไปจะเป็นเหตุให้การตอบสนองและโอเวอร์ชูตเกินยอมรับได้ ปกติการปรับจูน PID ถ้าเกิดโอเวอร์ชูตเล็กน้อยจะช่วยให้เข้าสู่จุดที่ต้องการเร็วขึ้น แต่ในบางระบบไม่สามารถยอมให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ และถ้าค่า K_p น้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดการแกว่งซึ่ง

ตารางที่ 2 ผลของการเพิ่มค่าตัวแปรอย่างอิสระ

ตัวแปร	ช่วงเวลานขึ้น (Rise time)	โอเวอร์ชูต (Overshoot)	เวลาสู่สมดุลย์ (Settling time)	ความผิดพลาดสถานะ คงตัว (Steady-state error)	เสถียรภาพ
K_p	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลง เล็กน้อย	ลด	ลด
K_i	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ	ลด
K_d	ลดลง เล็กน้อย	ลดลง เล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ตามทฤษฎีไม่มีผล	ดีขึ้นถ้า K_d มีค่า น้อย

9. วิธีการ Ziegler–Nichols

วิธีการนี้นำเสนอโดย John G. Ziegler และ Nathaniel B. Nichols ในคริสต์ทศวรรษที่ 1940 ขึ้นแรกให้ตั้งค่า K_i และ K_d เป็นศูนย์ เพิ่มอัตราขยาย P สูงที่สุด, K_u , จนกระทั่งเริ่มเกิดการแกว่ง นำค่า K_u และค่าช่วงการแกว่ง T มาหาค่าตัวแปรที่เหลือดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 วิธีการปรับอัตราขยายโดยวิธีการ Ziegler–Nichols

Control Type	Ziegler–Nichols method		
	K_p	K_i	K_d
P	$0.50K_u$		
PI	$0.45K_u$	$K_p / 0.083 T$	
PID	$0.60K_u$	$K_p / 0.5T$	$K_p P_u / 8$

จากการทดลองเราทำการปรับจูนค่าของ PID เพื่อหาค่า K_s คือค่าอัตราขยายตัวควบคุมของมอเตอร์ของพวงมาลัย K_L คือค่าอัตราขยายตัวควบคุมของมอเตอร์ล้อซ้าย K_R คือค่าอัตราขยายตัวควบคุมของมอเตอร์ล้อขวา เราจะได้

$$K_s = [K_p \quad K_i \quad K_d] = [0.005 \quad 0.001 \quad 0]$$

$$K_L = [K_p \quad K_i \quad K_d] = [0.007 \quad 0.03 \quad 0]$$

$$K_R = [K_p \quad K_i \quad K_d] = [0.007 \quad 0.03 \quad 0]$$

ผลและวิจารณ์

ผลการทดลองจะแสดงถึงการออกแบบระบบควบคุมที่ได้กล่าวไว้ ซึ่งแบ่งออกเป็นสามส่วน คือ ผลการทำงานของระบบกลจักรวิทัศน์ ผลของการเลี้ยวและผลการทดลองของขับเคลื่อนของรถทดลอง

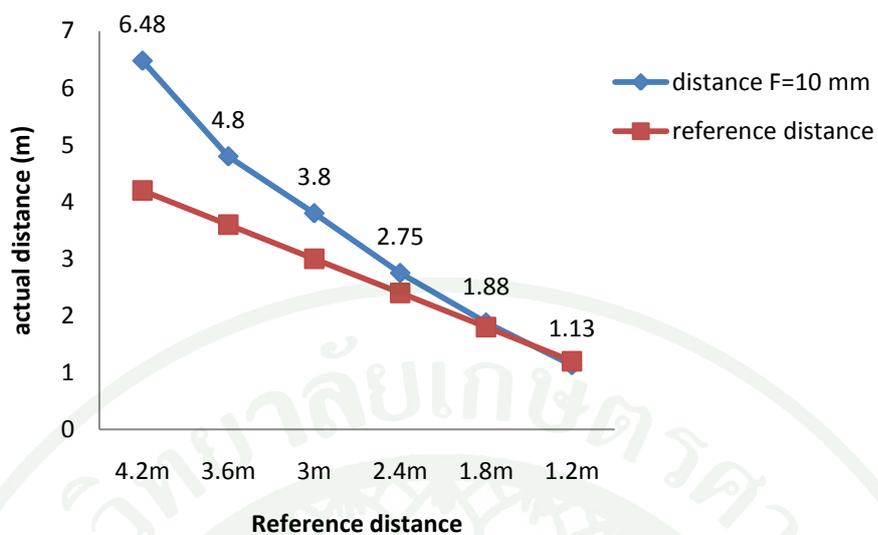
1. ผลการทดลองหาค่าระยะทางจริงจากกลจักรวิทัศน์ด้วยโปรแกรม LabVIEW

การจำลองด้วยโปรแกรม LabVIEW แบ่งหาระยะความยาวโฟกัสโดยแบ่งค่าออกเป็น ออกเป็น 9 ส่วน ตั้งแต่ 10 mm ถึง 6 mm โดยหาค่าระยะทางที่รูดห่างจากวัตถุอ้างอิง (Reference distance) เทียบกับ ระยะที่ได้จากค่าระยะทางของการประมวลผลจากสเตอริโอวิชั่นของกล้อง (actual distance)

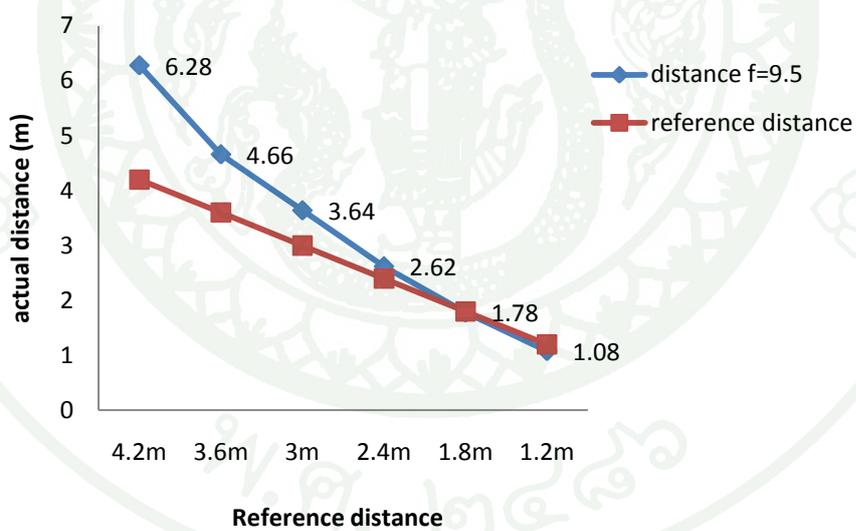


ภาพที่ 39 แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้องในระยะ 4.2, 3.6, 3, 2.4 และ 1.2 เมตรตามลำดับ

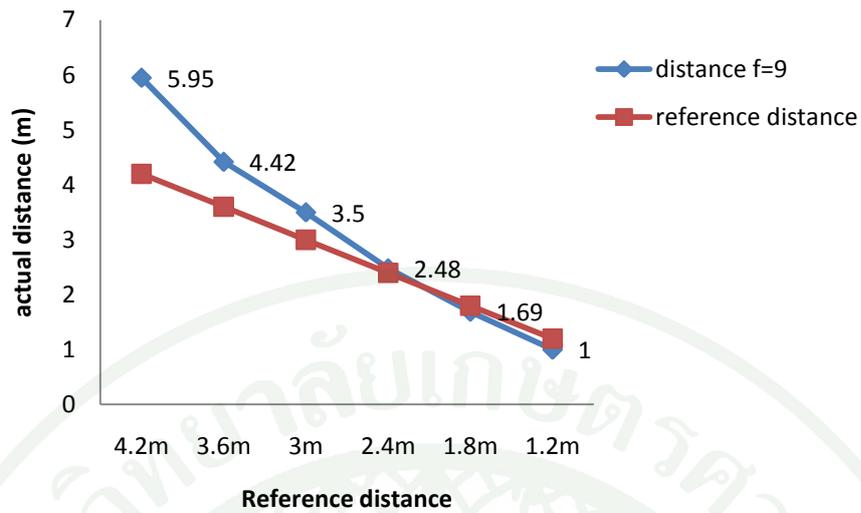
จากภาพที่ 39 แสดงการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างวัตถุ กับ ตัวกล้อง เมื่อวัตถุเคลื่อนที่เข้าหาตัวรถ เปรียบได้ดังรถเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุ ซึ่งวัตถุจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ และมีระยะห่างที่ลดลง



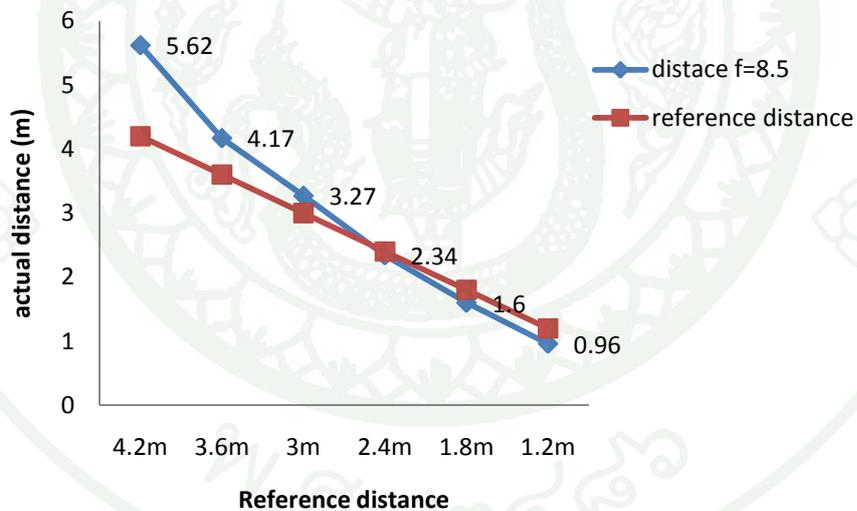
ภาพที่ 40 แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง โดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 10 mm



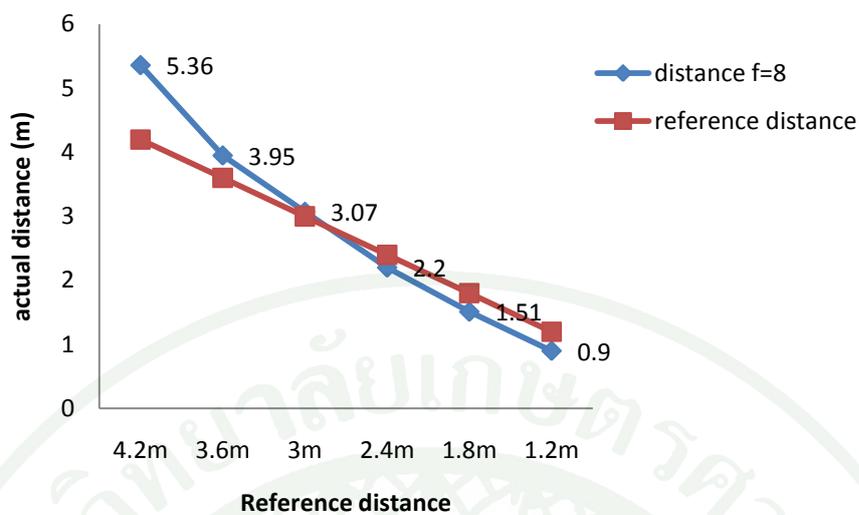
ภาพที่ 41 แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้อง โดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 9.5 mm



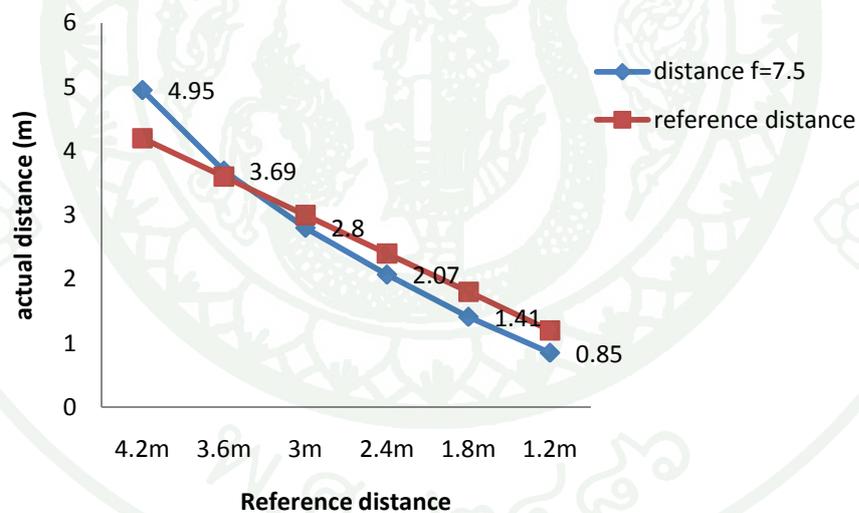
ภาพที่ 42 แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้องโดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 9 mm



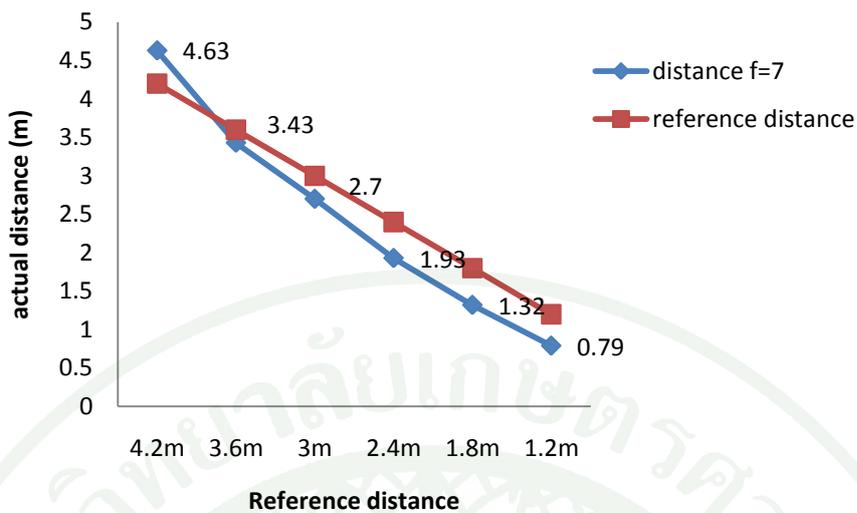
ภาพที่ 43 แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้องโดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 8.5 mm



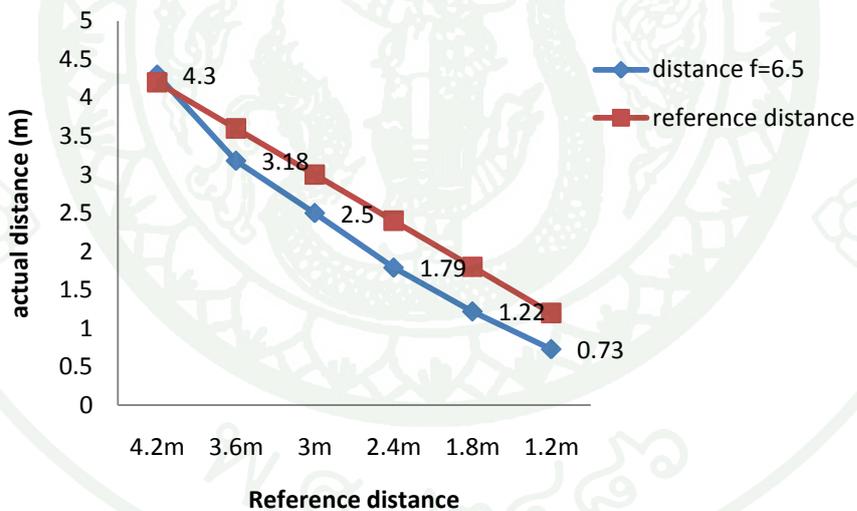
ภาพที่ 44 แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้องโดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 8 mm



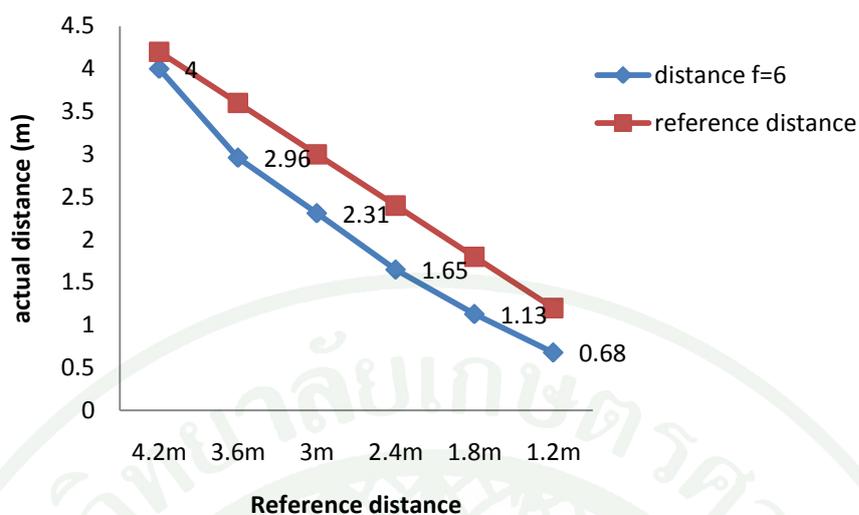
ภาพที่ 45 แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้องโดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 7.5 mm



ภาพที่ 46 แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้องโดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 7 mm



ภาพที่ 47 แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้องโดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 6.5 mm



ภาพที่ 48 แสดงระยะทางระหว่างวัตถุ กับ กล้องโดยใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 6 mm

ตารางที่ 4 สรุปค่าระยะทางที่ผิดพลาดจากการประมวลผลของระยะทาง(เมตร)

ความยาวโฟกัส (มิลลิเมตร)	ค่าระยะทางที่ผิดพลาดจากการประมวลผล(เมตร)					
	4.2	3.6	3	2.4	1.8	1.2
10 mm	2.28	1.2	0.8	0.35	0.08	-0.07
9.5 mm	2.08	1.06	0.64	0.22	-0.02	-0.12
9 mm	1.75	0.82	0.5	0.08	-0.11	-0.2
8.5 mm	1.42	0.57	0.27	-0.06	-0.2	-0.24
8 mm	1.16	0.35	0.07	-0.2	-0.29	-0.3
7.5 mm	0.75	0.09	-0.2	-0.33	-0.39	-0.35
7 mm	0.43	-0.17	-0.3	-0.47	-0.48	-0.41
6.5 mm	0.1	-0.42	-0.5	-0.61	-0.58	-0.47
6 mm	-0.2	-0.64	-0.69	-0.75	-0.67	-0.52

หมายเหตุ: ตัวหนาคือค่าระยะทางที่มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

ตารางที่ 5 เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดของระยะทาง (%)

ความยาวโฟกัส (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดของระยะทาง(%)					
	4.2	3.6	3	2.4	1.8	1.2
10 mm	54.285	33.33	26.667	14.583	4.444	5.833
9.5 mm	49.523	29.444	21.333	9.166	1.111	10
9 mm	41.666	22.777	16.666	3.333	6.111	16.666
8.5 mm	33.809	15.833	9	2.5	11.111	20
8 mm	27.619	9.722	2.333	8.333	16.111	25
7.5 mm	17.857	2.5	6.666	13.75	21.666	29.166
7 mm	10.238	4.722	10	19.583	26.666	34.166
6.5 mm	2.380	11.666	16.666	25.416	32.222	39.166
6 mm	4.761	17.777	23	31.25	37.222	43.333

ผลจากภาพที่ 40 เราได้ใช้ความยาวโฟกัส 10 mm ซึ่งระยะเริ่มต้นที่ 4.2 เมตรจากเราวัดได้ 6.8 เมตรมีค่าความผิดพลาดได้ระยะเท่ากับ 2.8 เมตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 54.258% และเมื่อระยะระหว่างวัตถุเปลี่ยนไปเป็น 3.6, 3, 2.4, 1.8 และ 1.2 m ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดลดลงจนมีค่าใกล้เคียงที่สุดคือ 1.2 m ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเพียง 0.07 เมตร ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ได้ 5.34%

ผลจากภาพที่ 41 เราได้ใช้ความยาวโฟกัส 9.5 mm ซึ่งระยะเริ่มต้นที่ 4.2 เมตรจากเราวัดได้ 6.28 เมตรมีค่าความผิดพลาดได้ระยะเท่ากับ 2.08 เมตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 49.523% และเมื่อระยะระหว่างวัตถุเปลี่ยนไปเป็น 3.6, 3, 2.4, 1.8 และ 1.2 m ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดลดลงจนมีค่าใกล้เคียงที่สุดคือ 1.8 m ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเพียง 0.02 เมตร ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ได้ 1.11%

ผลจากภาพที่ 42 เราได้ใช้ความยาวโฟกัส 9 mm ซึ่งระยะเริ่มต้นที่ 4.2 เมตรจากเราวัดได้ 5.95 เมตรมีค่าความผิดพลาดได้ระยะเท่ากับ 1.75 เมตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 41.66 และเมื่อระยะระหว่างวัตถุเปลี่ยนไปเป็น 3.6, 3, 2.4, 1.8 และ 1.2 m ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดลดลงจนมีค่าใกล้เคียงที่สุดคือ 2.4 m ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเพียง 0.08 เมตร ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ได้ 3.33%

ผลจากภาพที่ 43 เราได้ใช้ความยาวโฟกัส 8.5 mm ซึ่งระยะเริ่มต้นที่ 42 เมตรจากเราวัดได้ 5.62 เมตรมีค่าความผิดพลาดได้ระยะเท่ากับ 1.42 เมตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 33.809% และเมื่อระยะระหว่างวัตถุเปลี่ยนไปเป็น 3.6, 3, 2.4, 1.8 และ 1.2 m ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดลดลงจนมีค่าใกล้เคียงที่สุดคือ 2.4 m ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเพียง 0.06 เมตร ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ได้ 2.5%

ผลจากภาพที่ 44 เราได้ใช้ความยาวโฟกัส 8 mm ซึ่งระยะเริ่มต้นที่ 4.2 เมตรจากเราวัดได้ 5.36 เมตรมีค่าความผิดพลาดได้ระยะเท่ากับ 1.16 เมตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 27.619% และเมื่อระยะระหว่างวัตถุเปลี่ยนไปเป็น 3.6, 3, 2.4, 1.8 และ 1.2 m ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดลดลงจนมีค่าใกล้เคียงที่สุดคือ 3 m ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเพียง 0.07 เมตร ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ได้ 2.33%

ผลจากภาพที่ 45 เราได้ใช้ความยาวโฟกัส 7.5 mm ซึ่งระยะเริ่มต้นที่ 4.2 เมตรจากเราวัดได้ 4.95 เมตรมีค่าความผิดพลาดได้ระยะเท่ากับ 0.75 เมตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 17.857% และเมื่อระยะระหว่างวัตถุเปลี่ยนไปเป็น 3.6, 3, 2.4, 1.8 และ 1.2 m ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดลดลงจนมีค่าใกล้เคียงที่สุดคือ 3.6 m ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเพียง 0.09 เมตร ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ได้ 2.5%

ผลจากภาพที่ 46 เราได้ใช้ความยาวโฟกัส 7 mm ซึ่งระยะเริ่มต้นที่ 4.2 เมตรจากเราวัดได้ 4.93 เมตรมีค่าความผิดพลาดได้ระยะเท่ากับ 0.43 เมตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 10.238% และเมื่อระยะระหว่างวัตถุเปลี่ยนไปเป็น 3.6, 3, 2.4, 1.8 และ 1.2 m ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดลดลงจนมีค่าใกล้เคียงที่สุดคือ 3.6 m ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเพียง 0.17 เมตร ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ได้ 4.722%

ผลจากภาพที่ 47 เราได้ใช้ความยาวโฟกัส 6.5 mm ซึ่งระยะเริ่มต้นที่ 4.2 เมตรจากเราวัดได้ 4.3 เมตรมีค่าความผิดพลาดได้ระยะเท่ากับ 0.1 เมตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 2.380% และเมื่อระยะระหว่างวัตถุเปลี่ยนไปเป็น 3.6, 3, 2.4, 1.8 และ 1.2 m ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดลดลงจนมีค่าใกล้เคียงที่สุดคือ 4.2 m ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเพียง 0.1 เมตร ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ได้ 2.380 %

ผลจากภาพที่ 48 เราได้ใช้ความยาวโฟกัส 6 mm ซึ่งระยะเริ่มต้นที่ 4.2 เมตรจากเราวัดได้ 4 เมตรมีค่าความผิดพลาดได้ระยะเท่ากับ 0.2 เมตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 4.762% และเมื่อระยะระหว่างวัตถุเปลี่ยนไปเป็น 3.6, 3, 2.4, 1.8 และ 1.2 m ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดลดลงจนมีค่าใกล้เคียงที่สุดคือ 4.2 m ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเพียง 0.2 เมตร ซึ่งคิดเปอร์เซ็นต์ได้ 4.761 %

จากภาพที่ 40 ถึง 48 แสดงถึงระยะทางที่วัดได้จากการประมวลผลของกล้อง ซึ่งค่าที่ได้นั้นจากการเปลี่ยนแปลงความยาวโฟกัสและระยะทางซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้คือ เมื่อความยาวของระยะโฟกัสนั้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะทางที่จากการประมวลผลของกล้องเมื่อเทียบระยะจริงนั้นลดลงเนื่องจากเกิดจากตัดกันของแกน Optical ดังภาพที่ 6 ซึ่งจะมีผลต่อการเลือกความยาวโฟกัสเพื่อกำหนดพฤติกรรมการของรถอัจฉริยะ

ผลจากการแยกบริเวณของการประมวลผล สามารถแยกบริเวณระหว่างวัตถุกับสิ่งแวดล้อมออกจากกันได้โดยวิธีการการปรับค่า Thersold และ ใช้วิธี Morphology แต่ทำได้กรณีที่วัตถุมีเพียงสีค่าที่เลือกไว้เท่านั้น

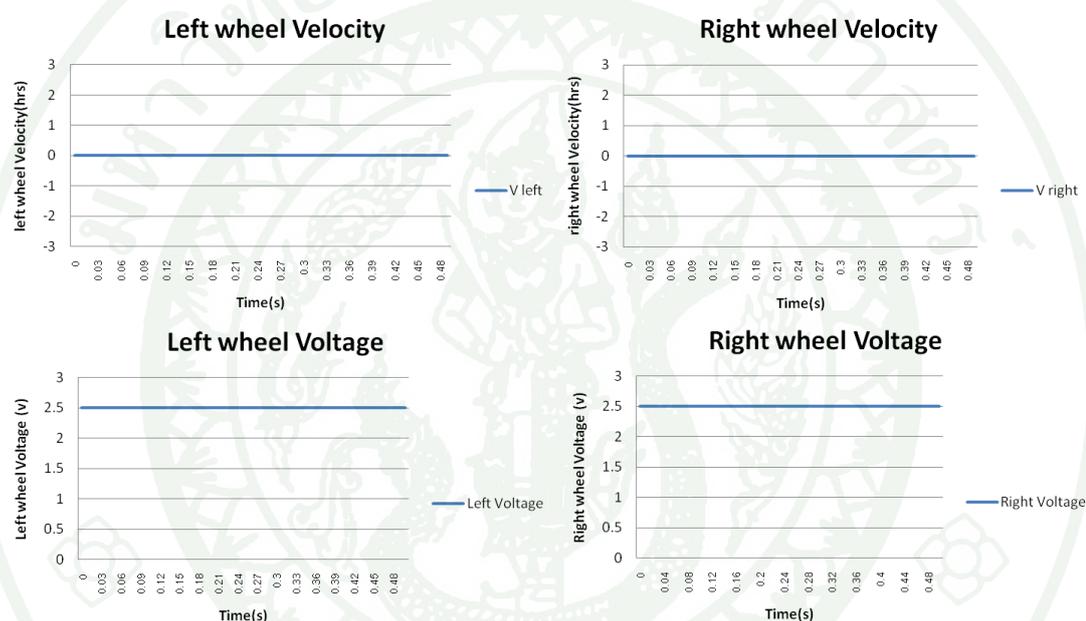
2. ผลการทดลองการควบคุมระบบการเลี้ยว



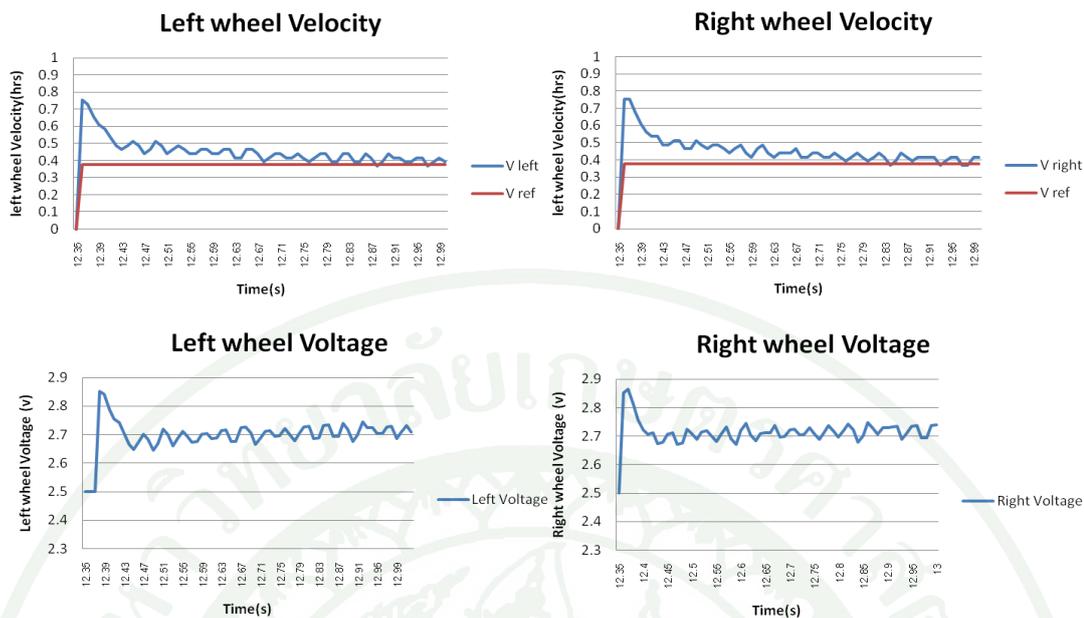
ภาพที่ 49 ภาพการเลี้ยวของพวงมาลัยผลการทดลองของระบบการเลี้ยว (Turning Mode)

ซึ่งได้ปฏิบัติตามการออกแบบตามพฤติกรรม โดยที่ผลที่ได้แบ่งออกเป็นการเลียซ้ายและเลียขวาเพื่อเลียหลบสิ่งกีดขวาง โดยเป็นควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์โดยวัดจากตัวตรวจจับ ซึ่งผลที่ได้สามารถควบคุมพวงมาลัยให้ไปตามองศาที่ต้องการคือ 40 องศาได้ ที่ทำให้เกิดมุมการเลียแบบแอ็คเคอร์แมน 25 องศาของมุมล้อหน้าล้อใน และเมื่อหลบจนไม่มีภาพจะเข้าสู่ระบบเลียกลับ (Return Mode) พวงมาลัยหมุนกลับคืนคือ 0 องศา และเข้าสู่ระบบปกติ (Default Mode)

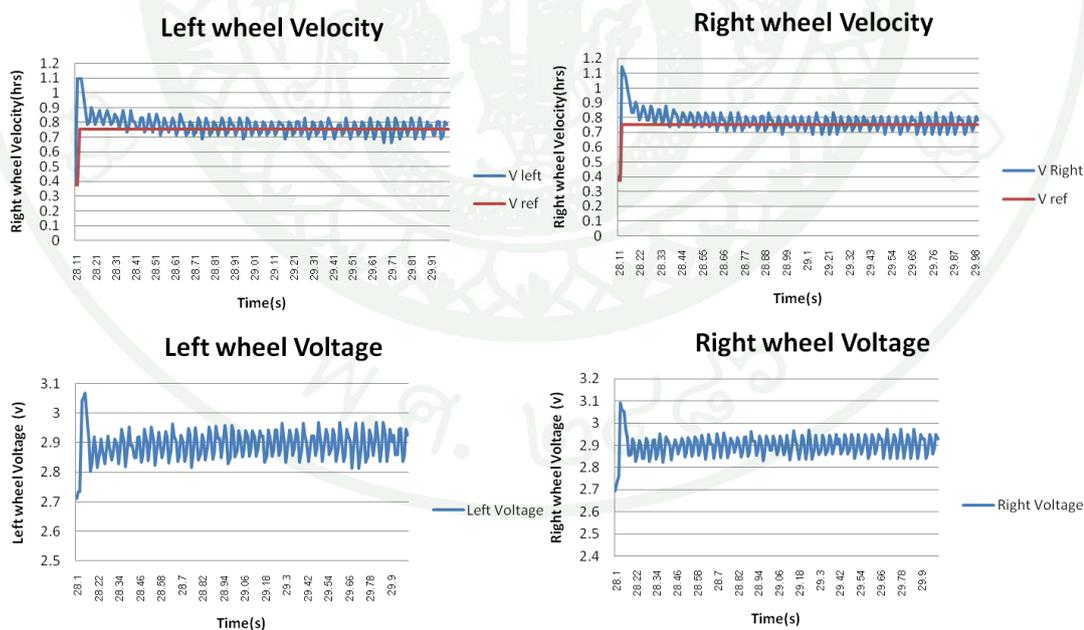
3. ผลการทดลองการควบคุมระบบการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์เซอร์โวเชิงภาพ



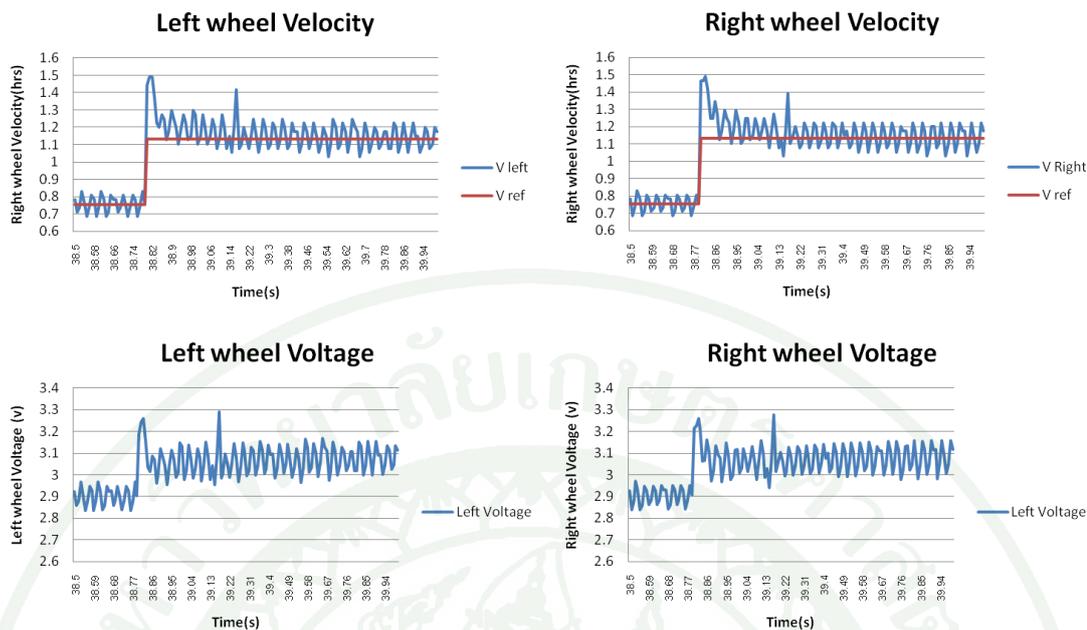
ภาพที่ 50 แสดงความเร็วเริ่มต้นที่ 0 (km/h) และความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ กระแสตรง



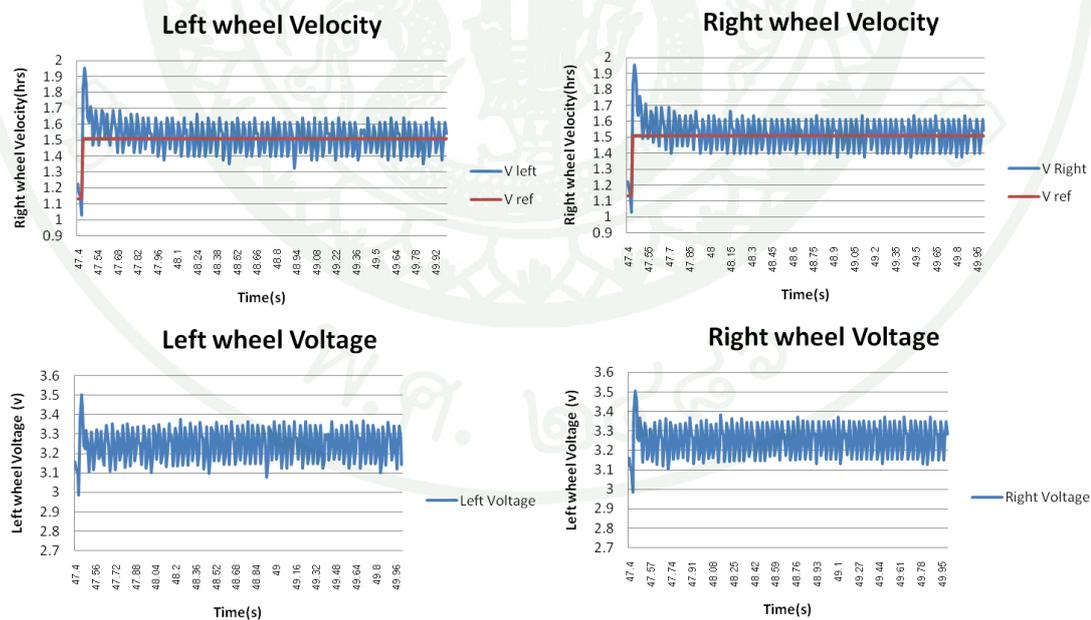
ภาพที่ 51 แสดงความเร็วที่ 0.3777 (km/h) และความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์วงจรถับมอเตอร์ กระแสตรง



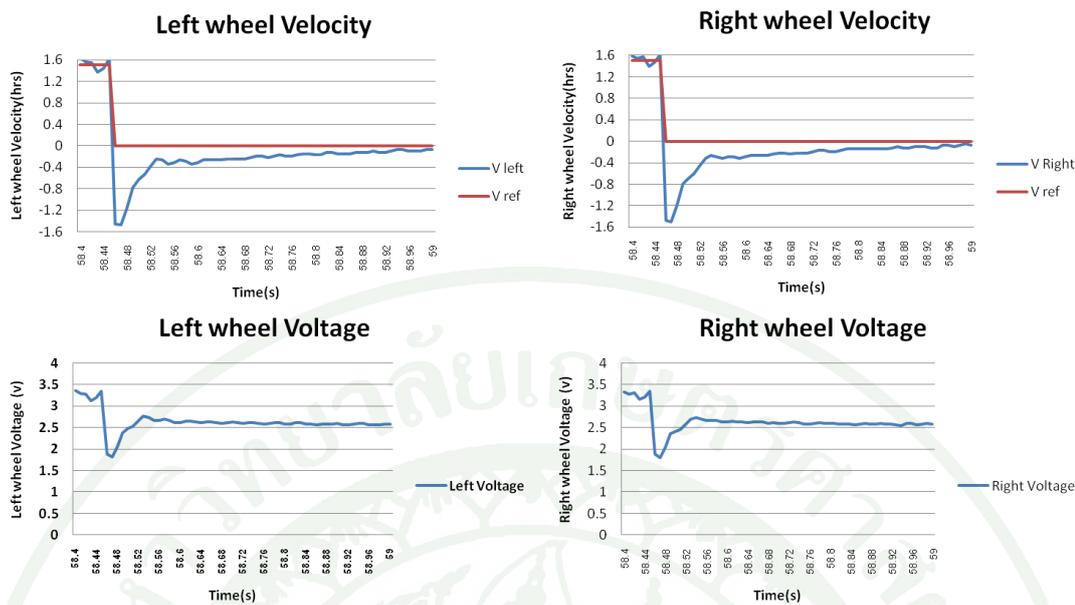
ภาพที่ 52 แสดงความเร็วที่ 0.754 (km/h) และความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์วงจรถับมอเตอร์ กระแสตรง



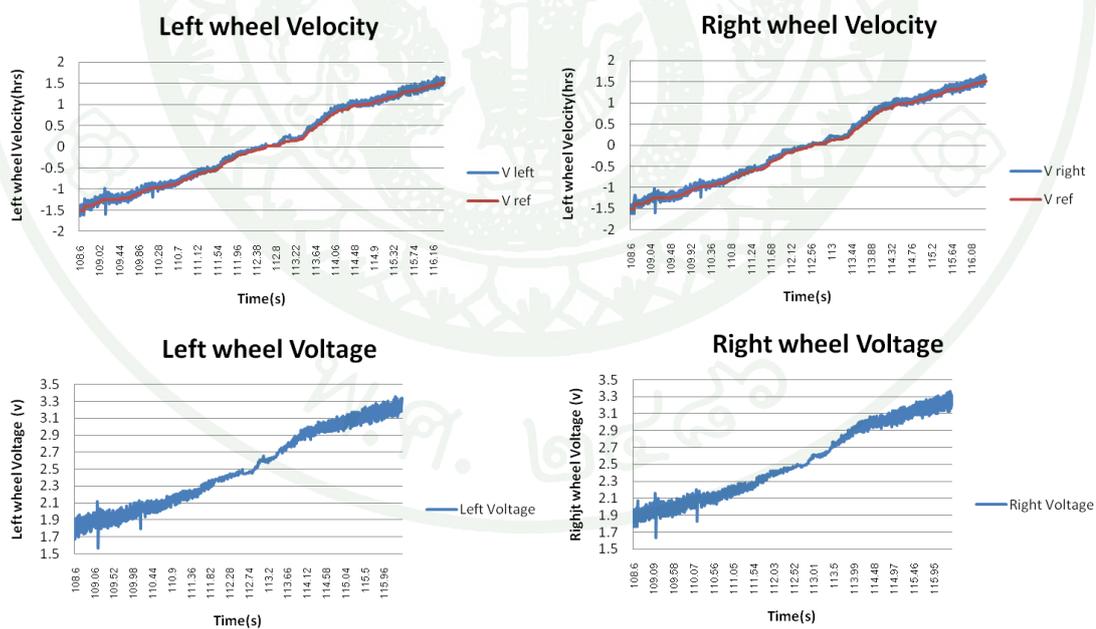
ภาพที่ 53 แสดงความเร็วที่ 1.131 (km/h) และความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์วงจรถับมอเตอร์ กระแสตรง



ภาพที่ 54 แสดงความเร็วที่ 1.508 (km/h) และความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์วงจรถับมอเตอร์ กระแสตรง

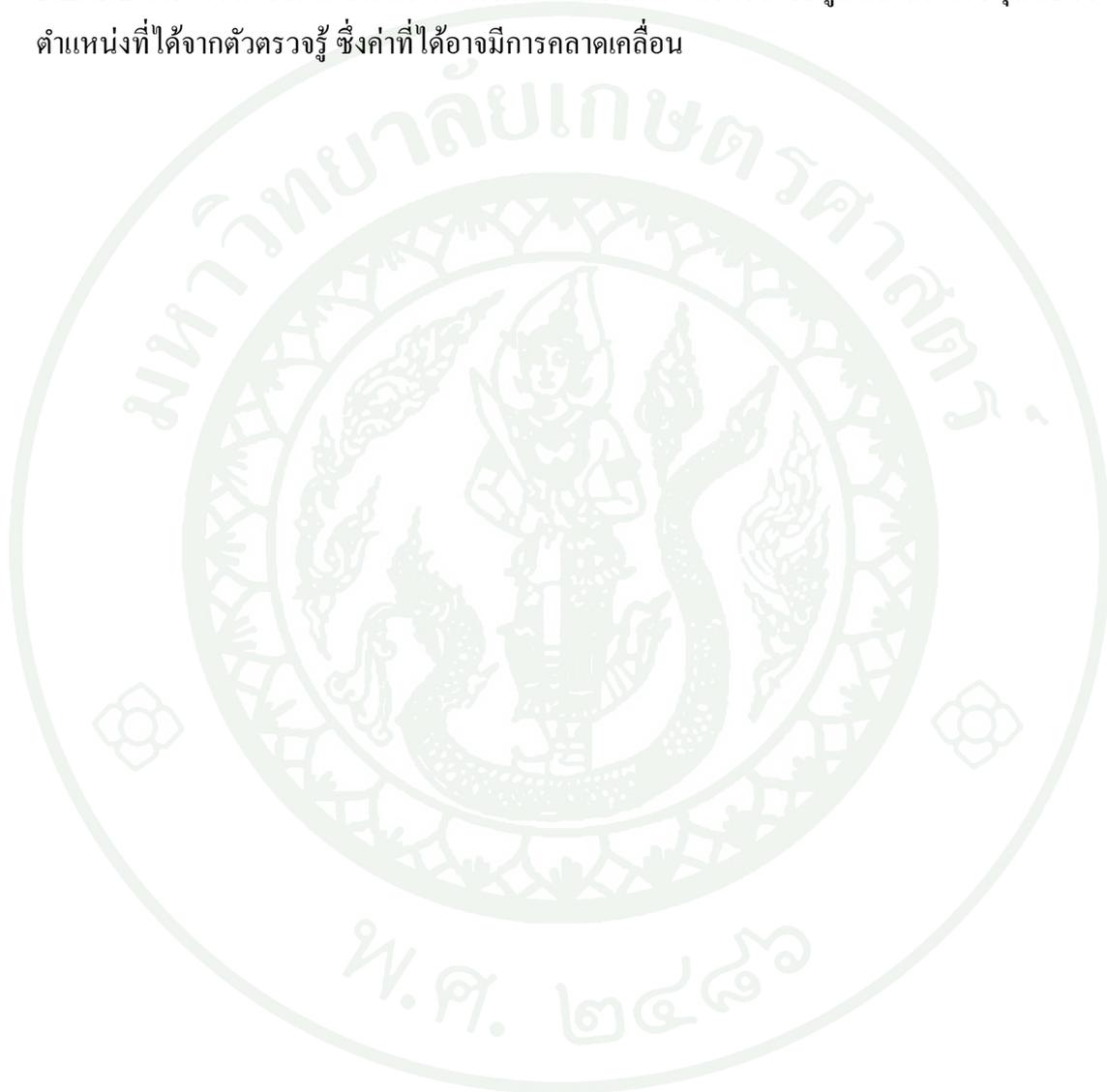


ภาพที่ 55 แสดงความเร็วที่ 1.508 (km/h) และความต่างที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ กระแสตรงและกลับเข้าสู่ความเร็ว 0 (km/h)



ภาพที่ 56 แสดงความเร็วเคลื่อนที่ถอยหลังและเดินหน้า (km/h) โดยการปรับค่าและความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง

ผลที่ได้จากการทดลอง พิจารณาจากภาพที่ 50 ถึง 56 แสดงถึงการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ณ ความเร็วต่างๆ และ การจ่ายความต่างศักย์ให้แก่อุปกรณ์วงจร ขับมอเตอร์กระแสตรง แสดงให้เห็นว่าเราสามารถระบบเข้าสู่ Steady-state Error ไม่เกิน ± 0.1 km/h แต่มีบางช่วงที่ระบบนั้นเกิดโอเวอร์ชูต และค่าที่ได้เกิดการสั่น กรณีที่ความเร็วนั้นเกิดขึ้นเป็น Step Function ถ้ายิ่งความเร็วมากขึ้น ความการสั่นมีมากขึ้นตาม เนื่องจากข้อมูลได้ผ่านการอนุพันธ์ของ ตำแหน่งที่ได้จากตัวตรวจรู้ ซึ่งค่าที่ได้อาจมีการคลาดเคลื่อน



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอสามระบบของรถอัจฉริยะคือ ระบบกลจักรวิทัศน์ ระบบเลี้ยว และระบบขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์กระแสตรง ระบบกลจักรวิทัศน์เป็นการ วิชัค้นหาระยะห่างของสิ่งกีดขวางโดยใช้ระบบกล้อง WebCam สองตัวเพื่อหาระยะความลึกของภาพ เมื่อค่าที่ได้ค่าที่แสดง ความลึกของภาพแล้วได้นำเปรียบเทียบกับค่าระยะห่างของวัตถุจริง และนำค่าเหล่านี้เข้าสู่ ระบบเลี้ยวเพื่อหาระยะปลอดภัยเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยระบบเลี้ยวของรถนี้เป็นแบบแอ็คเคอร์แมน ซึ่งใช้รัศมีการเลี้ยวของรถเป็นตัวกำหนด และมีระบบขับเคลื่อนโดยมอเตอร์เซอร์โวเชิงภาพนี้ เพื่อให้รถเคลื่อนไปข้างหน้าหรือหยุด

1. ระบบกลจักรวิทัศน์

จากการดำเนินงานวิจัยระบบกลจักรวิทัศน์จนสำเร็จ โปรแกรมสามารถที่จำทำได้ตามจุดประสงค์ กล่าวคือ โปรแกรมสามารถที่จะตรวจจับวัตถุได้ด้วยความแตกต่างของสี ระบุตำแหน่ง พิกัดอ้างอิงของวัตถุ และสามารถที่จะหาระยะลึกของวัตถุได้ แต่ในโปรแกรมส่วนการตรวจจับวัตถุ ด้วยความแตกต่างของสีนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนมาก ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการตั้งองศากล้อง หากผิดเพี้ยนไปเพียงนิด จะทำให้ตำแหน่งพิกัดเปลี่ยนไปมาก และประการถัดมาจากความสว่างของแสงไม่สามารถควบคุมให้มีความคงที่ได้ ทุกครั้งที่กล้องจับภาพ แสงจะเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ดังนั้น ทำให้โปรแกรมส่วนการตรวจจับวัตถุเห็นสีผิดเพี้ยนไป จึงส่งผลให้โปรแกรมส่วนการระบุพิกัดของวัตถุผิดพลาด และจะส่งผลต่อไปถึง โปรแกรมส่วนการวัดระยะลึกอีกด้วย

2. ระบบการเลี้ยว

เห็นได้ว่าเป็นการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุม โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งได้มุมมองสาที่ต้องการเพื่อทำพวงมาลัยหมุน และบังคับให้ล้อด้านหน้าทั้งสองที่เป็นระบบของการเลี้ยวแบบแอ็คเคอร์แมนหมุนไปยังองศาที่ต้องการ เพื่อหลบหลีกวัตถุที่ระยะปลอดภัยได้ รวมถึงการออกแบบพฤติกรรมของรถอัจฉริยะทำหน้าที่ว่าสั่งให้รถวิ่งหลบไปทิศทางใด

3. ระบบขับเคลื่อน

โดยการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงนี้ ระบบสามารถเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงความเร็ว แต่ระบบยังมีความคลาดเคลื่อนจากที่ต้องการไปบ้าง

ข้อเสนอแนะ

1. ความสว่างของแสงไม่สามารถควบคุมได้

จากการที่โปรแกรมของโครงการนี้ เขียนขึ้นโดยใช้การตรวจจับสีของวัตถุ บัจฉัยสำคัญที่มีผลต่อความผิดพลาดบัจฉัยหนึ่งคือแสงสว่าง เมื่อความสว่างของแสงไม่สามารถควบคุมได้ จะส่งผลให้กล้องจับภาพได้ภาพที่สว่างมากเกินไป หรือน้อยเกินไป การตรวจจับสีของวัตถุจะทำงานได้เลวลง ในบางครั้งอาจส่งผลให้ตรวจจับไม่เจอวัตถุใดๆเลยก็ได้ ทำให้การหาพิกัดของวัตถุเป็นไปอย่างคลาดเคลื่อน ดังนั้นถ้าเราสามารถที่จะควบคุมความสว่างให้อยู่ในอัตราเท่ากันตลอดการใช้งานได้ ก็จะลดความผิดพลาดที่เกิดในการหาพิกัดของวัตถุ ซึ่งจะส่งผลให้ความผิดพลาดในการหาระยะลึกของวัตถุลดลง

2. กล้องที่นำมาใช้มีประสิทธิภาพต่ำ

งานวิจัยนี้ การเก็บภาพที่เที่ยงตรงเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากที่สุด และในการทดลองพบว่า กล้องที่นำมาใช้ มีปัญหาใหญ่ๆอยู่สามประการ

2.1 ประการแรก การวางกล้อง ถ้าวางกล้องผิดองศาไปแม้เพียงนิด ก็จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการระบุหาพิกัดอ้างอิงของวัตถุได้มาก แต่กล้อง WebCam ไม่สามารถลือระดับสูงต่ำ และตำแหน่งซ้ายขวาได้แน่นอน ต้องใช้การประมาณเอา ดังนั้นจึงเกิดความผิดพลาดขึ้นอยู่เสมอ โดยถ้าในระยะใกล้ๆ ขนาดของความคลาดเคลื่อนจะยังไม่มีผลมากนัก แต่เมื่อในระยะไกลๆ การคลาดเคลื่อนแม้เพียง 1 มิลลิเมตร อาจมีค่าหลายพิกเซลในภาพ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นมาก

2.2 ประการที่สอง คือ ตัวปรับแสงของกล้องทั้งสองตัว ไม่ได้มาตรฐาน กล่าวคือ กล้องทั้งสองตัวจับภาพออกมาได้สีที่ต่างกัน ดังนั้นถ้าเราสามารถหาก้องที่มีคุณภาพมาใช้ในการทำงานก็จะเพิ่มความแม่นยำในการหาระยะลึกได้ดีขึ้น

2.3 ประการที่สาม คือ กล้องที่นำมาใช้ สามารถปรับโฟกัสแบบอัตโนมัติ ดังนั้น เมื่อวางวัตถุใกล้หรือไกล ในระยะที่ต่างกัน ค่าระยะทางที่ได้จะแม่นยำเพียงระยะช่วงใดช่วงหนึ่งเท่านั้น

3. การวางวัตถุได้ในสภาพแวดล้อมที่จำกัด

เนื่องจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาเพื่อรองรับการวัดระยะลึกของวัตถุนี้ มีข้อจำกัดคือ เขียนขึ้นเพื่อใช้ตรวจจับหาวัตถุที่มีสีดำเท่านั้น ดังนั้นถ้าเรานำวัตถุไปวางไว้ในสถานที่ที่มีสิ่งแวดล้อมที่มีสีดำเดียวกับวัตถุ หรือสีที่คล้ายคลึงกับวัตถุ จะทำให้โปรแกรมไม่สามารถตรวจจับเจอวัตถุได้ ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาระยะลึกของวัตถุได้

4. ควรปรับปรุงด้านคุณภาพของกล้องเพื่อที่จะให้โปรแกรมทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพื่อให้สามารถรับภาพที่มีระยะไกลขึ้น

5. ควรปรับปรุงเรื่องการตรวจจับสี เพื่อให้ทำการใช้งาน ได้กับสีของวัตถุที่หลากหลายขึ้น

6. ทำการOCR เพื่อวิเคราะห์ป้ายสัญญาณและใช้กลจักรวิทัศน์นี้จำแนกว่าสิ่งที่กีดขวางนั้นเป็นวัตถุชนิดใดและต้องหลบหรือไม่

7. อาจมีตัวตรวจรู้มาร่วมกับการทำงานของระบบกลจักรวิทัศน์เพื่อให้ได้ผลที่ดีขึ้น

8. ควรออกแบบและสร้างตัวรถให้ดีขึ้น

9. ออกแบบพฤติกรรมของรถให้อัจฉริยะมากขึ้น เช่น การใช้ การออกแบบแบบคลุมเกลือ หรือ พืชเพื่อช่วยการตัดสินใจเมื่อต้องการภาพจากรอบคันของรถ เป็นต้น

10. ควรมีตัวตรวจรู้วัดความเร็วหรือระยะทาง เช่น เพื่อให้ได้ค่าระยะทางที่แน่นอน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิตติภูมิ รัทตะวัต. 2552. **Intelligent Car**. คณะวิศวกรรมสาขาเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์. 2528. **กลศาสตร์ยานยนต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เจริญ เพชรมณี. 2547. **เรียนลัด LabVIEW**. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- วีระพล สุขสมบูรณ์ และ ธเนศ เคารพพวงศ์. **การค้นหาล้างกีดขวางโดยหลักการมองภาพสองตาในรถอัจฉริยะ REAL**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สรวุฒิ สุจิตจร. 2545. **การควบคุมอัตโนมัติ**. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- สมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย. 2553. **โครงการพัฒนารถอัจฉริยะ**. สมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย, กรุงเทพฯ.
- สุชาติ จันทร์จรมานิตย์. 2553 **Principles of Feedback Control & PID Controller**. บริษัท เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า, กรุงเทพฯ.
- อนันต์ สืบสำราญ. 2550. **การพัฒนาหุ่นยนต์การเคลื่อนที่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง**. *Mechanical Technology Magazine* 6(78): 1-8.
- วโรดม ตู้จินดา. 2550. **การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรม**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. 2548. **การควบคุมระบบพลศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อลิสา คุณาณินันท์ และ อรุณช หล่อสกุล. 2553. **ระบบการขับเคลื่อนของรถอัจฉริยะด้วยกล้อง และระบบช่วยนำทางอื่นๆ**. สำนักงานเครือข่ายวิจัยประยุกต์ทางเทคโนโลยีหุ่นยนต์และชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล.

Arthur, C.S. and E. Lee. 2010. **Adaptive Visual Servo Control of Robot**. Weiss, Carnegie-Mellon University, USA.

Chistopher, G.R. 2010. **Image Acquisition and Processing with LabVIEW**. National Instruments.

Gary W.J. and R. Jennings. 2006. **LabVIEW Craphical Programming**. 4ed. McGraw-Hill Companies, The United States of America.

Milan, S., V. Hlavac and R. Boyle. 2008. **Image Processing Analysis and Machine Vision**. Thomson Learning, Part of the Thomson Corporation., The United States of America.

Rajesh, R. 2006. **Vehicle Dynamics and Control**. University of Minnesota, USA

Thomas, K. 2003. **Image Processing with LabVIEW and IMAQ Vision**. Pearson Education, Inc. Publishing as Prentica Hall Professional Technical Reference-Upper Saddle River, New Jersey.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายพุดิพงษ์ ชุนทรง
เกิดวันที่	1 ตุลาคม พ.ศ. 2529
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ศรีราชา) พ.ศ. 2550
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยสอน