



THAILAND
AUTOMOTIVE
INSTITUTE
สถาบันยานยนต์

หลักสูตร

พื้นฐานเทคโนโลยี ยานยนต์อัตโนมัติ และการเชื่อมต่อ

วิชาพื้นฐานเทคโนโลยี ยานยนต์อัตโนมัติ (AV)

โครงการยกระดับผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ไทย
เพื่อเตรียมความพร้อมในการเข้าสู่ห่วงโซ่อุปทานของ
อุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่
(Parts Transformation)



02-712-2414



www.thaiauto.or.th



@thaiauto

สารบัญ

บทที่ 1 สถาปัตยกรรม และระบบอิเล็กทรอนิกส์ในยานยนต์อัตโนมัติ.....	1
บทที่ 2 ความสามารถในการมองเห็นของยานยนต์อัตโนมัติ (Perception)	4
2.1 กล้อง (Camera)	5
2.2 ไลดาร์ (Light Detection And Ranging: LiDAR).....	8
2.3 เรดาร์ (Radio Detection and Ranging: RADAR)	10
2.4 อัลตราโซนิก (Ultrasonic).....	11
2.5 การรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ (Sensor Fusion).....	11
บทที่ 3 ความสามารถในการระบุตำแหน่ง (Localization).....	19
3.1 การระบุตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมนำร่อง (GNSS Localization).....	19
3.2 การระบุตำแหน่งด้วยเซนเซอร์ (Visual Localization).....	21
บทที่ 4 ความสามารถในการวางแผนเส้นทาง (Path Planning)	23
4.1 กระบวนการวางแผนเส้นทางการเดินทางโดยรวมของยานยนต์อัตโนมัติ (Global Planning)....	23
4.1.1 การวางแผนเส้นทางบนพื้นที่ว่าง (Free Space Planning).....	23
4.1.2 การวางแผนเส้นทางโดยอาศัยข้อมูลในรูปแบบกราฟ (Graph Planning)	25
4.2 กระบวนการวางแผนการเคลื่อนที่ของยานยนต์อัตโนมัติเพื่อรับมือกับสภาพแวดล้อมในบริเวณรอบยานยนต์อัตโนมัติ (Local Planning)	28
4.2.1 การวางแผนเส้นทางบนพื้นที่ว่าง (Free Space Planning).....	28
4.2.2 การวางแผนเส้นทางโดยอาศัยการจำลองเลน (Lane Sampling).....	29
บทที่ 5 ความสามารถในการควบคุมรถ (Control)	32
5.1 การควบคุมให้ยานยนต์อัตโนมัติเคลื่อนที่ตาม Waypoints (Waypoints Following)	32
5.2 การควบคุมตัวกระตุ้นในรถยนต์ (Actuator Control)	33
5.2.1 การควบคุมความเร็ว (Speed Controller).....	34
5.2.2 ระบบควบคุมคันเร่งด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Drive-by-wire).....	34
5.2.3 ระบบควบคุมเบรกด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Brake-by-wire).....	35
5.2.4 ระบบควบคุมพวงมาลัยด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Steer-by-wire).....	35

บทที่ 1 สถาปัตยกรรม และระบบอิเล็กทรอนิกส์ในยานยนต์อัตโนมัติ

ยานยนต์อัตโนมัติเป็นหนึ่งในนวัตกรรมทางเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่กำลังเปลี่ยนแปลงโลกของการขนส่ง เป็นผลจากการพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศที่เติบโตอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดย การใช้งานเทคโนโลยียานยนต์อัตโนมัติมีเป้าหมายหลักในการสร้างระบบที่สามารถทำงานได้อย่างอิสระโดยปราศจากการควบคุมจากมนุษย์ ซึ่งรวมถึงการใช้เซนเซอร์ การประมวลผลข้อมูลขั้นสูง และการใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อการตัดสินใจ โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอัตโนมัติ ส่งผลให้เกิดต่อสังคมหลายได้ อาทิ

1. เพื่อความยืดหยุ่นในการใช้ชีวิตประจำวัน: ยานยนต์อัตโนมัติสามารถเพิ่มความสะดวกสบาย และยืดหยุ่นในการเดินทางในชีวิตประจำวัน ผู้โดยสารสามารถใช้เวลาในการเดินทางไปทำกิจกรรมอื่น ๆ ได้ เช่น การทำงาน การพักผ่อน หรือการติดต่อสื่อสาร โดยไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับการขับขี่
2. เพื่อความปลอดภัยบนท้องถนน: ยานยนต์อัตโนมัติมีศักยภาพในการลดอุบัติเหตุบนท้องถนน เนื่องจากระบบอัตโนมัติสามารถตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม และสถานการณ์ฉุกเฉินได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่ามนุษย์ นอกจากนี้ ยังสามารถลดข้อผิดพลาดจากมนุษย์ที่เป็นสาเหตุหลักของอุบัติเหตุบนท้องถนน
3. เพื่อก่อให้เกิดโอกาสทางธุรกิจ: การพัฒนายานยนต์อัตโนมัติเปิดโอกาสใหม่ ๆ ทางธุรกิจ ไม่ว่าจะเป็นด้านการผลิต การบริการ การพัฒนาเทคโนโลยี และการให้บริการขนส่งแบบใหม่ เช่น รถแท็กซี่อัตโนมัติ บริการขนส่งสินค้า และการเดินทางร่วมกัน ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินธุรกิจ และลดต้นทุน

ณ ปัจจุบัน สมาคมวิศวกรรมยานยนต์ ได้ประกาศมาตรฐาน SAE J3016 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ให้คำจำกัดความของระดับความเป็นอัตโนมัติของรถยนต์ โดมาตรฐาน SAE J3016 แบ่งระดับความเป็นอัตโนมัติไว้ทั้งหมด 6 ระดับ ตั้งแต่ระดับ 0 - 5 โดย ในระดับที่ 0 - 3 ถือเป็นรถยนต์อัตโนมัติระดับต่ำ ซึ่งผู้ขับขี่ยังเป็นผู้รับผิดชอบหลักในการควบคุมรถยนต์อยู่ และในระดับที่ 4 - 5 ถือเป็นรถยนต์อัตโนมัติระดับสูง โดยระบบขับขี่อัตโนมัติจะเป็นผู้ควบคุมรถยนต์เป็นหลัก โดยมีรายละเอียดดังนี้ ดังแสดงในรูปที่ 1-1

SAE LEVEL 0 (ยานยนต์อัตโนมัติระดับ 0)

ยานยนต์ที่อยู่ในระดับนี้ จะมีเพียงระบบความปลอดภัยที่สามารถเตือนผู้ขับขี่ได้เพียงเท่านั้น ไม่มีระบบช่วยเหลือใดๆ และยานยนต์ไม่สามารถบังคับได้ด้วยตนเอง ตัวอย่างความสามารถในยานยนต์ระดับนี้ ได้แก่ ระบบเตือนการชนด้านหน้า ระบบเตือนการออกนอกเลน และระบบเตือนในพื้นที่อับสายตา เป็นต้น

SAE LEVEL 1 (ยานยนต์อัตโนมัติระดับ 1)

ยานยนต์ในระดับนี้ ผู้ขับขี่เองเป็นผู้รับผิดชอบในการขับขี่ทั้งหมด แต่มีระบบความปลอดภัยที่ออกแบบให้สามารถควบคุมความเร็ว กล่าวคือ ควบคุมคันเร่ง และเบรก และระบบที่สามารถควบคุมพวงมาลัย เพียงอย่างเดียวหนึ่งเท่านั้น ตัวอย่างความสามารถในยานยนต์ระดับนี้ได้แก่ ระบบควบคุมความเร็วแบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive Cruise control: ACC) ระบบเบรกฉุกเฉินอัตโนมัติ (Automatic Emergency Brake: AEB) ระบบแจ้งเตือนการออกนอกช่องจราจรโดยไม่ตั้งใจ (Lane Departure Warning) และระบบช่วยให้รถอยู่ในช่องจราจรโดยอัตโนมัติ (Lane Keeping Assistance: LKA) เป็นต้น

SAE LEVEL 2 (ยานยนต์อัตโนมัติระดับ 2)

ยานยนต์ที่อยู่ในระดับนี้ ผู้ขับขี่รับผิดชอบการขับขี่เป็นส่วนใหญ่ มีบางช่วงที่อาจจะสายตาหรือควบคุมได้ในช่วงสั้น ๆ โดยยานยนต์ในระดับนี้จะติดตั้งระบบช่วยเหลือในการขับขี่ที่ออกแบบให้สามารถควบคุมความเร็ว

กล่าวคือ ควบคุมคันเร่ง และเบรก และระบบควบคุมพวงมาลัยได้พร้อมกันตัวอย่างระบบ ได้แก่ ระบบ Pilot assistance ทำให้รถยังอยู่ในช่องจราจรและรักษาความเร็วและระยะห่าง ไม่ให้ชนรถคันหน้าได้ เป็นต้น

SAE LEVEL 3 (ยานยนต์อัตโนมัติระดับ 3)

ระบบสามารถขับรถยนต์แทนคนได้ในบางสภาวะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในถนนที่มีความซับซ้อนของการจราจร ไม่สูงมากนัก แต่ผู้ขับขี่จะต้องเตรียมพร้อมที่จะเข้ามาควบคุมแทนในกรณีที่ระบบต้องการ ในสภาวะที่ระบบขับอัตโนมัติไม่สามารถทำงานได้หรือเมื่อสิ้นสุดเขตถนนที่สามารถใช้งานระบบขับอัตโนมัติดังกล่าว

SAE LEVEL 4 (ยานยนต์อัตโนมัติระดับ 4)

ยานยนต์ที่อยู่ในระดับนี้ จะมีระบบขับอัตโนมัติเป็นผู้ควบคุมรถยนต์เป็นหลัก และสามารถรับมือได้ในทุกสถานการณ์ ไม่จำเป็นต้องมีผู้ขับขี่ แต่คนยังต้องนั่งอยู่ในรถโดยไม่ต้องรับภาระการควบคุมรถแต่อย่างใด นอกจากเหตุฉุกเฉินเท่านั้น ทั้งนี้ ในระดับนี้รถยนต์จะสามารถขับอัตโนมัติได้ในพื้นที่ที่กำหนดเท่านั้น

SAE LEVEL 5 (ยานยนต์อัตโนมัติระดับ 5)

ยานยนต์ที่อยู่ในระดับนี้ จะมีระบบขับอัตโนมัติเป็นผู้ควบคุมรถยนต์เป็นหลัก และสามารถรับมือได้ในทุกสถานการณ์ ไม่จำเป็นต้องมีผู้ขับขี่ และสามารถขับได้ในทุกพื้นที่ ทุกสถานการณ์ ถือเป็นระบบยานยนต์อัตโนมัติในอุดมคติ

SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION

	SAE LEVEL 0	SAE LEVEL 1	SAE LEVEL 2	SAE LEVEL 3	SAE LEVEL 4	SAE LEVEL 5
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are <u>not</u> driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in “the driver’s seat”		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	
What do these features do?	These are driver support features			These are automated driving features		
	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met		This feature can drive the vehicle under all conditions
	Example Features • automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning	• lane centering OR • adaptive cruise control	• lane centering AND • adaptive cruise control at the same time	• traffic jam chauffeur	• local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed	• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

For a more complete description, please download a free copy of SAE J3016: https://www.sae.org/standards/content/J3016_201806/

For a more complete description, please download a free copy of SAE J3016: https://www.sae.org/standards/content/J3016_201806/

รูปที่ 1-1 ระดับขั้นของระบบขับอัตโนมัติ ตาม SAE J3016

4. [ที่มา: <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>]

สิ่งสำคัญที่จะทำให้รถยนต์สามารถขับอัตโนมัติได้ รถยนต์จำเป็นต้องมีความสามารถ (Ability) เช่นเดียวกับความสามารถของผู้ขับขี่ โดย ความสามารถที่ยานยนต์อัตโนมัติจำเป็นต้องมีสำหรับการขับโดยอัตโนมัติ ประกอบไปด้วย 5 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 1-2 ดังนี้

1. Perception คือ ความสามารถในการรับรู้สิ่งต่างๆ บริเวณรอบตัวรถยนต์ผ่านเซนเซอร์ต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่รอบยานยนต์อัตโนมัติ
2. Localization คือ ความสามารถในการระบุตำแหน่งปัจจุบันของตนเอง เพื่อนำตำแหน่งปัจจุบัน ไปใช้ในการวางแผนเส้นทางการเดินทาง

3. Path Planning คือ ความสามารถในการวางแผนเส้นทาง โดยอาศัยข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอก และ ตำแหน่งปัจจุบัน เพื่อให้รถยนต์เคลื่อนที่ไปยังจุดหมายได้อย่างปลอดภัย
4. Control คือ ความสามารถในการควบคุมรถยนต์ ทำหน้าที่แปลงคำสั่งจาก Path Planning เป็น สัญญาณทางไฟฟ้าส่งไปยังระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ โดยระบบขับเคลื่อนจะต้องสามารถถูกควบคุม ด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าได้
5. Communication คือ ความสามารถในการสื่อสาร ทั้งนี้ความสามารถนี้อาจไม่ใช่ความสามารถหลักที่ ทำให้รถยนต์ทำงานได้ แต่จะช่วยเสริมให้การทำงานของรถยนต์มีความสะดวก และปลอดภัยเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1-2 ส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ

[ที่มา: <https://www.quora.com/What-is-the-most-important-component-of-a-self-driving-car>]

บทที่ 2 ความสามารถด้านการรับรู้ของยานยนต์อัตโนมัติ (Perception)

ความสามารถด้านการรับรู้ของยานยนต์อัตโนมัติ (Perception) คือ ความสามารถในการรับรู้ของยานยนต์อัตโนมัติ โดยอาศัยเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่รอบ ๆ ตัวรถในการเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อม ก่อนที่จะนำข้อมูลเหล่านั้นมาประมวลผลให้เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์เพื่อนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป โดยเซนเซอร์ในยานยนต์อัตโนมัติสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2-1 ได้แก่

1. Passive Sensor คือ เซนเซอร์ที่ไม่สามารถปล่อยสัญญาณ หรือพลังงานออกจากตัวเองได้ ตัวอย่าง Passive Sensor ที่นิยมใช้ในยานยนต์อัตโนมัติ ได้แก่
 - GNSS เป็นเซนเซอร์ที่รับข้อมูลตำแหน่งจากดาวเทียมระบุตำแหน่งเพื่อระบุตำแหน่งของยานยนต์อัตโนมัติ
 - IMU เป็นเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าทางพลศาสตร์ของยานยนต์อัตโนมัติ
 - Camera เป็นเซนเซอร์ที่รับข้อมูลคล้ายกับตามนุษย์ กล่าวคือรับข้อมูลเป็นภาพสีเช่นเดียวกับที่มนุษย์มองเห็น
2. Active Sensor คือ เซนเซอร์ที่สามารถปล่อยสัญญาณ หรือพลังงานออกจากตัวเองได้ Active Sensor แต่ละชนิดมีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ สามารถสร้างพลังงานบางอย่างเพื่อปล่อยออกไปสะท้อนกับวัตถุ และย้อนกลับเข้ามาที่ตัวรับสัญญาณของเซนเซอร์ ทั้งนี้ Active Sensor แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันตามประเภทของพลังงาน และสัญญาณที่ปลดปล่อยออกมา ตัวอย่าง Active Sensor ที่นิยมใช้ในยานยนต์อัตโนมัติ ได้แก่
 - LiDAR ทำงานโดยการปล่อยเลเซอร์ออกไปเพื่อตรวจจับวัตถุ
 - RADAR ทำงานโดยการปล่อยคลื่นวิทยุออกไปเพื่อตรวจจับวัตถุ
 - IR Camera ทำงานโดยการปล่อยแสงอินฟราเรดออกไปเพื่อสะท้อนกับวัตถุในเวลากลางคืน
 - Ultrasonic ทำงานโดยการปล่อยคลื่นเสียงออกไปเพื่อตรวจจับวัตถุ



รูปที่ 2-1 เซนเซอร์ในยานยนต์อัตโนมัติ

2.1 กล้อง (Camera)

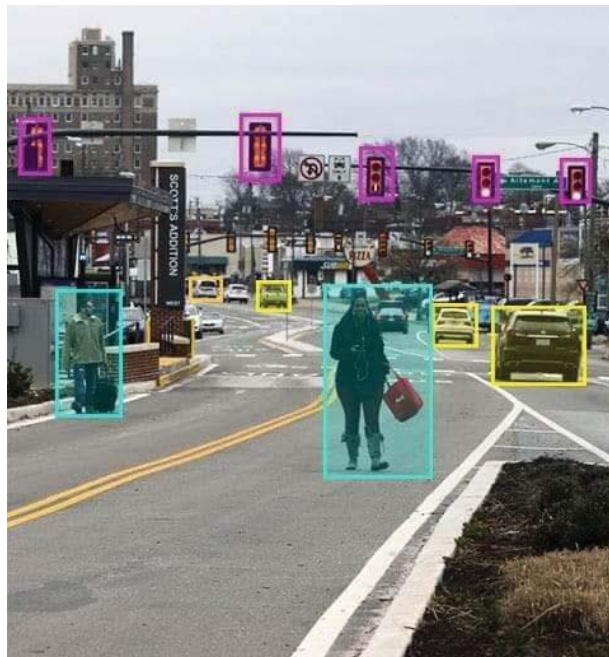
กล้อง (Camera) ถือเป็นเซนเซอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับการเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอกรถยนต์ เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากกล้องมีความคล้ายคลึงกับสิ่งที่มนุษย์มองเห็นได้มากที่สุด กล้องยังเป็นเซนเซอร์ประเภทเดียวที่สามารถตรวจจับสี และลวดลายของวัตถุได้ รวมไปถึงยังสามารถเลือกคุณลักษณะของเลนส์เพื่อปรับเปลี่ยนระยะการรับภาพของกล้องได้



รูปที่ 2-2 ตัวอย่างการใช้งานกล้องบนยานยนต์อัตโนมัติ

[ที่มา (รูปซ้าย): <https://www.wired.com/2017/03/autox-slaps-50-webcams-car-make-drive/>]

[ที่มา (รูปขวา): <https://www.independent.co.uk/tech/self-driving-car-crash-racial-bias-black-people-study-a8810031.html>]



รูปที่ 2-3 การใช้งานกล้องบนยานยนต์อัตโนมัติ

[ที่มา: <https://www.kdnuggets.com/2022/07/bounding-box-deep-learning-future-video-annotation.html>]

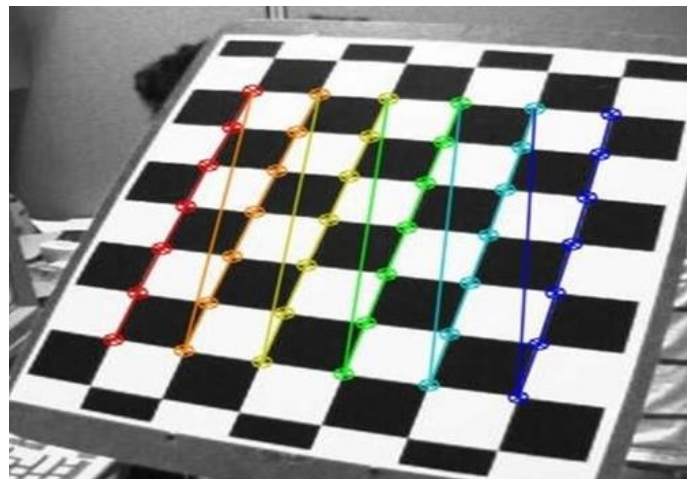
แต่อย่างไรก็ดี เนื่องจากกล้องมีชิ้นส่วนของเลนส์ ซึ่งการติดตั้งเลนส์บางประเภท ทำให้ภาพที่ได้รับจากกล้องเกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) ซึ่งการบิดเบี้ยวของภาพ เกิดจากการใช้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัสสั้น โดย

การนำพารามิเตอร์ของกล้อง มาผ่านกระบวนการ Camera Calibration จะสามารถแก้การบิดเบี้ยวของภาพได้ โดยการทำให้ Camera Calibration จะได้รับพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 กลุ่ม ได้แก่

1. Intrinsic Properties เป็น Parameter ที่ประกอบด้วยคุณสมบัติของเลนส์ที่ติดตั้งอยู่บนตัวกล้อง หมิหน้าที่แปลง 3D Point ในโลกจริง เป็น 2D Point ในภาพ
2. Extrinsic Properties เป็น Parameter ที่บ่งบอกตำแหน่งของกล้องเปรียบเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง
3. Distortion Coefficients เป็น Parameter ที่บ่งบอกถึงลักษณะการบิดเบี้ยวของภาพ



รูปที่ 2-4 การบิดเบี้ยวของภาพจากเลนส์ (รูปซ้าย) และการแก้การบิดเบี้ยวจากเลนส์ (รูปขวา)
[ที่มา: LearnOpenCV]



รูปที่ 2-5 การทำ Camera Calibration

[ที่มา: https://www.researchgate.net/figure/Calibrated-output-image-of-the-Raspberry-Pi-Camera-using-OpenCV_fig3_340252770]

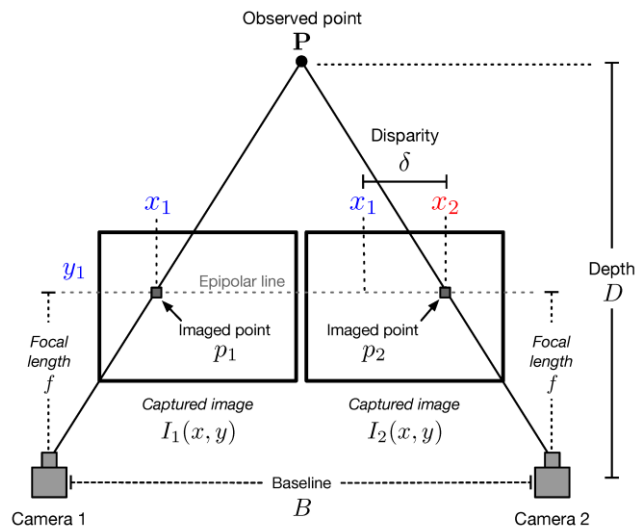
$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

2D Image Coordinates
Intrinsic properties (Optical Centre, scaling)
Extrinsic properties (Camera Rotation and translation)
3D World Coordinates

$$\text{Distortion coefficients} = (k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2 \ k_3)$$

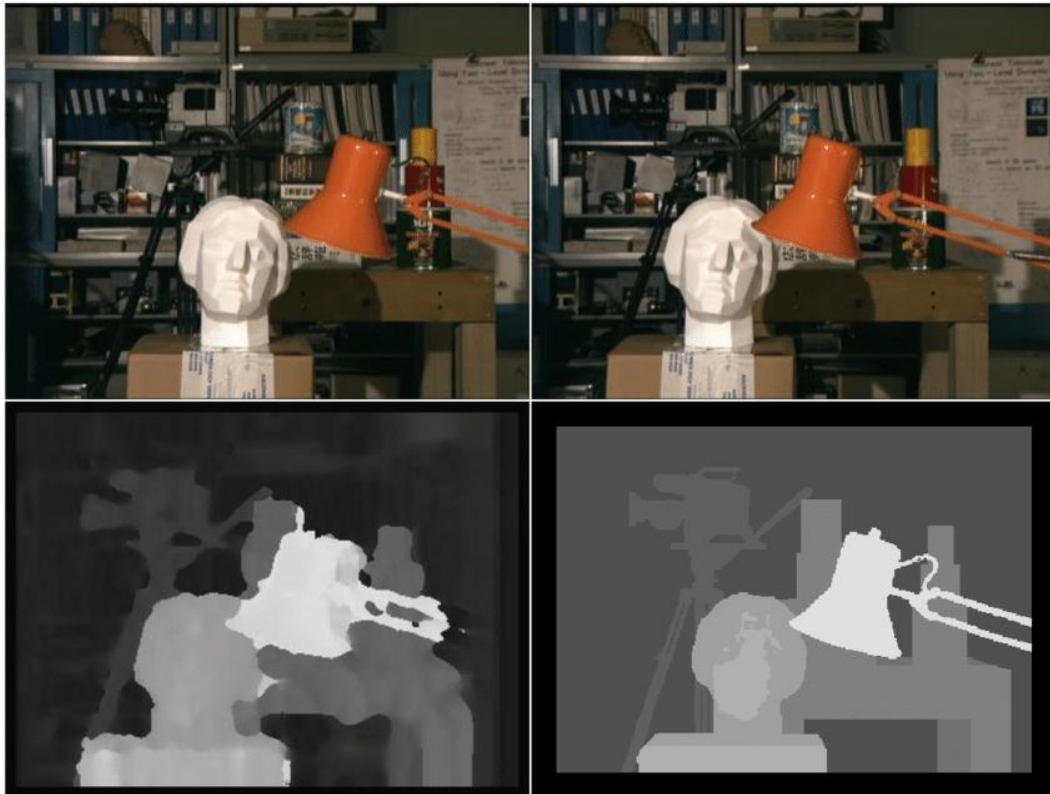
รูปที่ 2-6 สมการและตัวแปรในการทำ Camera Calibration

ทั้งนี้ การดำรงอยู่ของ Intrinsic Properties ส่งผลให้ข้อมูลที่เก็บอยู่ในภาพเป็นข้อมูล 2 มิติ ขาดข้อมูลด้านความลึกของวัตถุที่อยู่ในโลกจริง แต่อย่างไรก็ดี หากมีการติดตั้งกล้องจำนวนมากกว่า 1 ตัว เราสามารถหาค่าความแตกต่างของตำแหน่งวัตถุในภาพทั้ง 2 กล้อง และนำมาคำนวณเป็นค่าความลึกที่หายไปได้ โดยใช้เทคนิค Stereo Camera ซึ่งทำได้โดยการติดตั้งกล้องสองตัวให้มีระยะห่างระหว่างกัน และทำการบันทึกภาพของวัตถุชนิดเดียวกัน ภาพจากกล้องแต่ละตัว จะให้ตำแหน่งภาพของวัตถุที่ต่างกันไป และภาพเหล่านั้นจะถูกนำไปสร้างเป็นภาพชนิดใหม่ที่เรียกว่า Depth Map โดยภาพจาก Depth Map จะมีลักษณะเป็นภาพสีขาวดำ และข้อมูลใน Pixel จะแสดงค่าความห่างของวัตถุในภาพจากกล้องแต่ละตัว ซึ่งข้อมูลใน Depth Map สามารถนำไปคำนวณหาค่าความลึกของวัตถุในโลกจริงได้



รูปที่ 2-7 เทคนิค Stereo Camera

[ที่มา: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9050>]



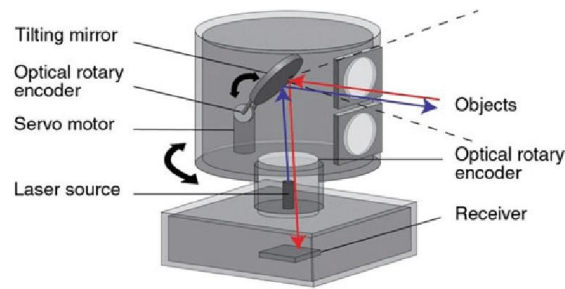
รูปที่ 2-8 Stereo Image จากเทคนิค Stereo Camera

2.2 ไลดาร์ (Light Detection And Ranging: LiDAR)

เซนเซอร์ LiDAR เป็นเซนเซอร์ที่ใช้แสงในการตรวจจับวัตถุ โดย LiDAR ที่นิยมใช้ในยานยนต์อัตโนมัติในปัจจุบัน คือ 3D LiDAR ซึ่งภายในตัวเซนเซอร์ประเภทนี้จะมีแหล่งกำเนิดแสง โดยแสงจะถูกยิงไปให้สะท้อนกับกระจกที่สามารถหมุน 360 องศาโดยรอบ ซึ่งสามารถปรับมุมเงยเพื่อให้แสงที่ยิงไปตกกระทบกับวัตถุที่มีความสูงแตกต่างกันได้ เมื่อเลเซอร์สะท้อนกลับมาจากวัตถุเข้าสู่เซนเซอร์ เลเซอร์จะถูกสะท้อนกลับไปที่ตัวรับแสง เพื่อประมวลผล และแสดงค่าวัตถุที่ตรวจจับได้ต่อไป ทั้งนี้ การจำแนกประเภท LiDAR ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน คือ การจำแนกตามจำนวนชั้น (Layer) ที่สามารถตรวจจับความสูงของวัตถุได้ เช่น LiDAR 16 เส้น คือ LiDAR ที่สามารถปล่อยแสงมาได้ 16 เส้นในแนวแกนตั้ง โดย LiDAR ที่มีจำนวน Layer มาก จะมีราคาแพงกว่า Lidar ที่มีจำนวน Layer น้อย

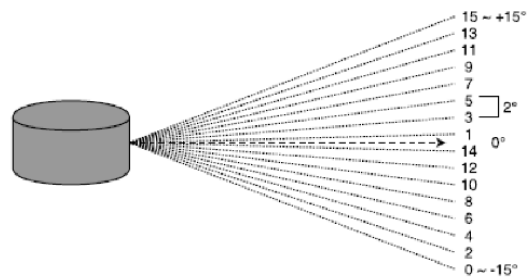


รูปที่ 2-9 เซนเซอร์ LiDAR
[ที่มา: Velodyne]



รูปที่ 2-10 กลไกการทำงานของ LiDAR

[ที่มา: <https://www.glsun.com/article-p180-types-of-lidar-technical-architecture.html>]

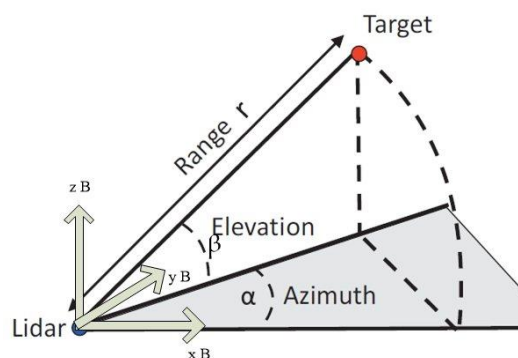


Laser sensor positions in VLP-16 scanner head

รูปที่ 2-11 การปล่อยแสงของเซนเซอร์ LiDAR

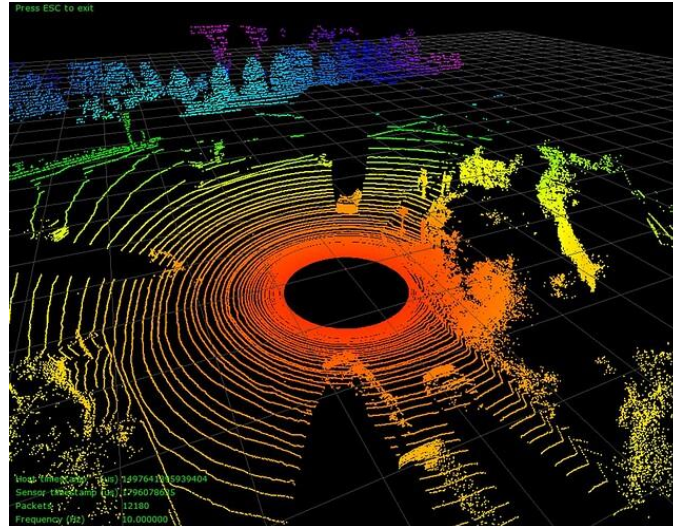
[ที่มา: International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics 2017]

ทั้งนี้ ข้อมูลที่ได้รับจาก LiDAR โดยส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย 3 ค่า ดังนี้ ระยะทาง (Range, r) มุมกวาด (Azimuth, α) และมุมเงย (Elevation, β) โดยเป็นการกำหนดตำแหน่งของเป้าหมายในพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinates) ซึ่งจำเป็นต้องใช้การคำนวณตามทฤษฎีตรีโกณมิติ (Trigonometry) เพื่อแปลงตำแหน่งวัตถุจากพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinates) ให้เป็นตำแหน่งของวัตถุในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinate) ซึ่งเป็นพิกัดที่สามารถที่มนุษย์คุ้นเคย และสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายกว่าพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinate)



รูปที่ 2-12 ข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์ LiDAR

[ที่มา: https://www.researchgate.net/figure/LiDAR-range-and-bearing-measurements-with-body-frame_fig2_354125102]

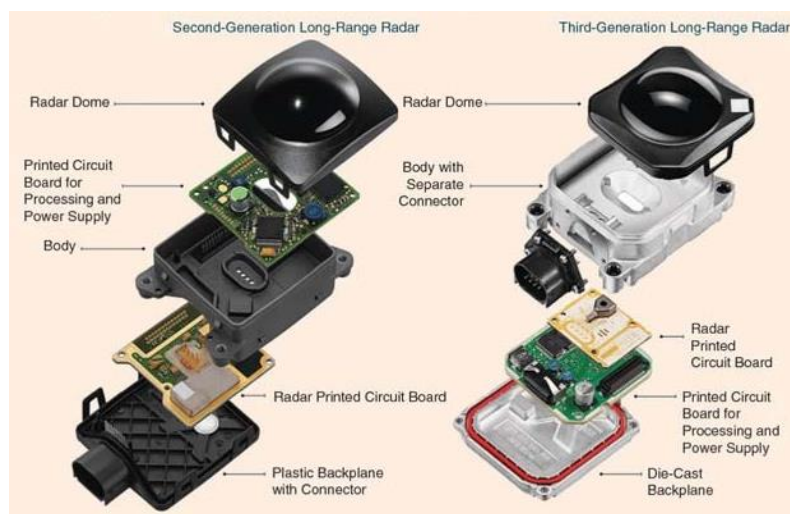


รูปที่ 2-13 Point cloud ที่ได้รับจากเซนเซอร์ LiDAR
[ที่มา: NVIDIA]

2.3 เรดาร์ (Radio Detection and Ranging: RADAR)

เซนเซอร์ Radar มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับเซนเซอร์ LiDAR แต่มีความแตกต่างกันในรายละเอียดดังนี้

1. Radar ใช้คลื่นวิทยุในการตรวจจับวัตถุ
2. Radar ใช้แผ่เสาอากาศในการปล่อยสัญญาณทำให้ได้ข้อมูลสามมิติ
3. Radar มักแยกประเภทตามระยะทางที่ตรวจจับวัตถุได้ โดย Long Range Radar สามารถตรวจจับวัตถุได้ในระยะไกล แต่จะมีมุมมอง (Field Of View) แคบ ในขณะที่ Short Range Radar สามารถตรวจจับวัตถุได้ในระยะใกล้ แต่จะมีมุมมอง (Field Of View) กว้างกว่า
4. ข้อมูลที่ได้รับจาก Radar จะเพิ่มความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุและตัวเซนเซอร์ เพิ่มเติมจากที่ LiDAR สามารถวัดค่าได้ โดยความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุและตัวเซนเซอร์เป็นผลจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler Effect) ซึ่งส่งผลให้คลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุมีความถี่เปลี่ยนแปลงไปจากคลื่นวิทยุที่ปล่อยออกไปจากตัวเซนเซอร์



รูปที่ 2-14 องค์ประกอบของเซนเซอร์ Radar

2.4 อัลตราโซนิก (Ultrasonic)

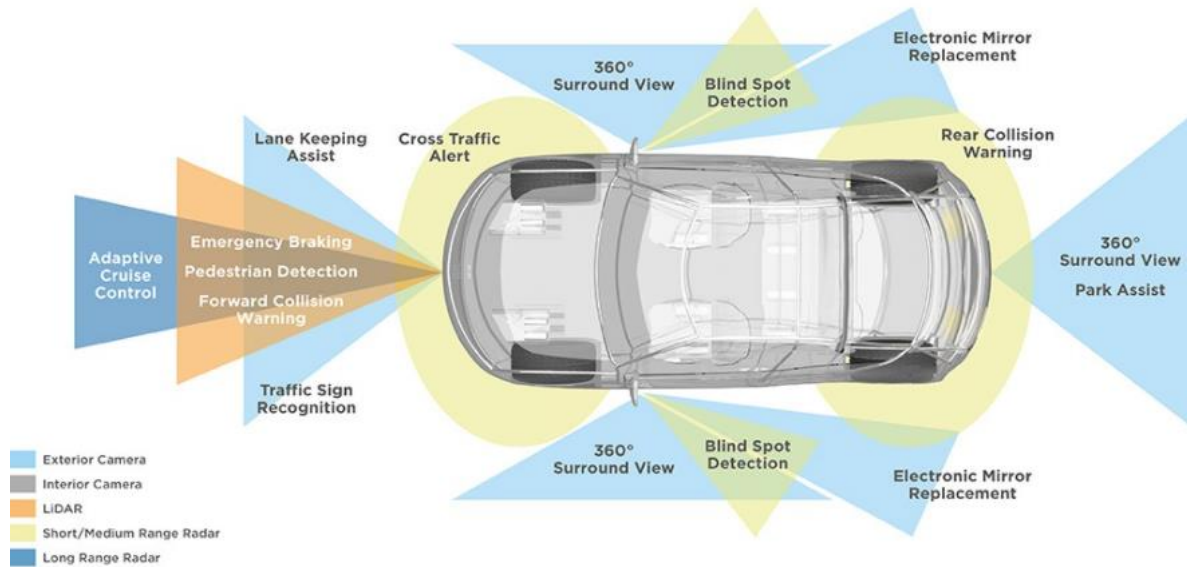
เซนเซอร์ Ultrasonic มีความคล้ายคลึงกับ Radar แต่ Ultrasonic จะปล่อยคลื่นเสียงเพื่อใช้ในการตรวจจับวัตถุ เนื่องจากการความเร็วของคลื่นเสียงนั้นช้ากว่าความเร็วของคลื่นแสง และคลื่นวิทยุ จึงส่งผลให้ระยะทางในการตรวจจับวัตถุของ Ultrasonic นั้นมีค่าต่ำมาก นอกจากนั้นการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงไม่สามารถระบุตำแหน่งได้แน่นอน จะระบุได้เพียงว่าวัตถุมีระยะห่างจากเซนเซอร์เท่าใด ไม่สามารถระบุได้ว่าวัตถุนั้นอยู่ด้านซ้าย หรือด้านขวาจากเซนเซอร์ไปเท่าไร นอกจากนี้จากความเร็วที่ต่ำของเซนเซอร์อัลตราโซนิกส่งผลให้ความเร็วของรถยนต์มีผลต่อความแม่นยำของระยะทางที่ตรวจจับได้ของเซนเซอร์อัลตราโซนิก ส่งผลให้การติดตั้ง Ultrasonic มักจะติดตั้งในจำนวนมากบนรถยนต์ เพื่อให้ครอบคลุมขอบเขตการตรวจจับของรถยนต์ทั้งหมด และการใช้งานเซนเซอร์อัลตราโซนิกในปัจจุบัน ใช้งานในขณะที่รถยนต์มีความเร็วต่ำเท่านั้น



รูปที่ 2-15 การใช้งานของเซนเซอร์ Radar

2.5 การรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ (Sensor Fusion)

เนื่องจาก เซนเซอร์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติ และลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป การเลือกใช้เซนเซอร์ที่เหมาะสม จึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการพัฒนายานยนต์อัตโนมัติ โดยปัจจัยที่ควรพิจารณาในการเลือกเซนเซอร์สำหรับใช้งานในยานยนต์อัตโนมัติ คือ ระบบที่จะนำข้อมูลจากเซนเซอร์ไปใช้งาน ลักษณะการใช้งานของยานยนต์อัตโนมัติ และข้อจำกัดด้านงบประมาณ



รูปที่ 2-16 การทำงานร่วมกันของเซนเซอร์หลายชนิดในยานยนต์อัตโนมัติ

[ที่มา: <https://www.telematicswire.net/autonomous-vehicle-mahindra-and-mahindra/>]

เซนเซอร์แต่ละชนิด ย่อมมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกันไป เมื่อผู้พัฒนาเลือกเซนเซอร์ที่ต้องการใช้งานตามปัจจัยต่าง ๆ แล้ว อาจพบว่าเซนเซอร์ที่ใช้งานมีหลากหลายชนิด ซึ่งการนำเซนเซอร์ที่ต่างชนิดกันมาประมวลผลร่วมกัน จะสามารถชดเชยข้อเสียของกันและกันได้ ตัวอย่างเช่น การทำงานร่วมกันระหว่าง เรดาร์ (Radar) เป็นเซนเซอร์ที่มีข้อจำกัดเรื่องการจำแนกประเภทวัตถุ การตรวจจับขอบของวัตถุ และการตรวจจับเส้นเลนถนน และกล้อง ที่สามารถชดเชยข้อจำกัดของเรดาร์ (Radar) นั้น จะสามารถนำระบบนี้ไปใช้งานบนจุดที่เป็นข้อจำกัดได้ แต่อย่างไรก็ตาม จะต้องมีการพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อการใช้งานร่วมกันระหว่างเซนเซอร์ทั้งสองตัว จึงจะรวบรวมข้อมูลได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพ

Sensor fusion will provide redundancy for autonomous functions.

Sensor function ratings

● Good ● Fair ● Poor

	Camera	Radar	Lidar	Ultra-sonic	Radar + lidar	Lidar + camera	Radar + camera
Object detection	●	●	●	●	●	●	●
Object classification	●	●	●	●	●	●	●
Distance estimation	●	●	●	●	●	●	●
Object-edge precision	●	●	●	●	●	●	●
Lane tracking	●	●	●	●	●	●	●
Range of visibility	●	●	●	●	●	●	●
Functionality in bad weather	●	●	●	●	●	●	●
Functionality in poor lighting	●	●	●	●	●	●	●
Cost	●	●	●	●	●	●	●
Production readiness	●	●	●	●	●	●	●

Radar and camera most likely combination in next 5–8 years, although solid-state lidar and camera* will be dominant in the long term when proven and integrated into mass-production designs

*Comparison with other technologies not yet possible due to low maturity of technology.

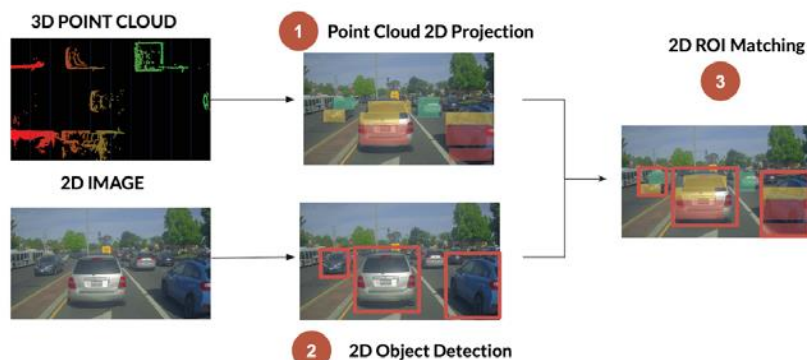
McKinsey&Company

รูปที่ 2-17 ความสามารถของเซนเซอร์แต่ละชนิด

โดยข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์แต่ละประเภทจะถูกนำมาผ่านกระบวนการรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ (Sensor Fusion) ซึ่งเป็นกระบวนการรวบรวมข้อมูลของเซนเซอร์แต่ละประเภท เพื่อให้กระบวนการตรวจจับวัตถุมีความแม่นยำมากขึ้น โดยอาศัยจุดแข็งของเซนเซอร์แต่ละชนิดเพื่อลดจุดอ่อนของเซนเซอร์อีกชนิดหนึ่ง โดยกระบวนการ Sensor Fusion เพื่อตรวจจับวัตถุสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ Early Fusion และ Late Fusion

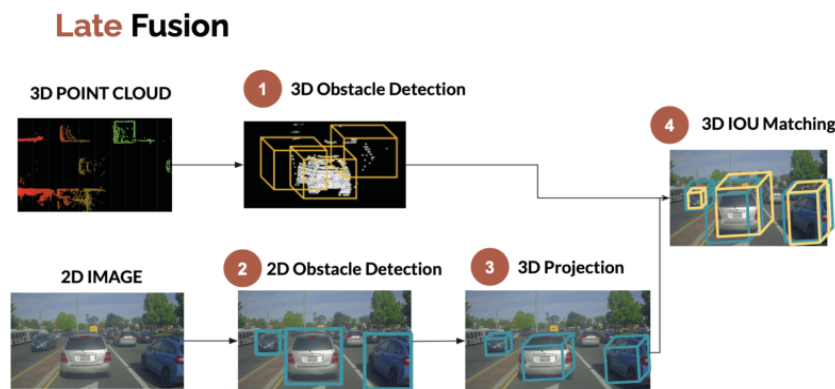
1. Early Fusion เป็นกระบวนการรวมข้อมูลดิบ (Raw Data) ของเซนเซอร์เข้าด้วยกัน ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการตรวจจับวัตถุ เช่น การนำข้อดีจากเซนเซอร์ LiDAR ที่สามารถตรวจจับระยะห่างของวัตถุได้อย่างแม่นยำ ผ่านการแปลงข้อมูลด้านระยะห่าง และฉาย (Project) ลงบนภาพที่ได้จากกล้อง ในขณะที่กล้องจะตรวจจับวัตถุ และเลือกบริเวณที่สนใจ (Region Of Interest) จากนั้นจึงนำข้อมูลระยะห่างในบริเวณนั้นบรรจุเป็นข้อมูลของวัตถุที่ตรวจจับได้ดังแสดงในรูปที่ 2-18

Early Fusion



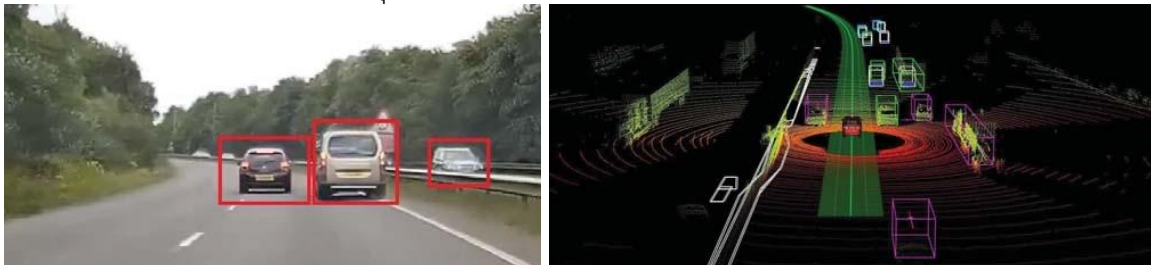
รูปที่ 2-18 การทำ Early Fusion

2. Late Fusion เป็นกระบวนการรวมข้อมูลวัตถุที่ตรวจจับได้ของแต่ละเซนเซอร์เข้าด้วยกัน ยกตัวอย่าง เช่น ข้อมูลจาก LiDAR และ กล้อง ถูกป้อนเข้าสู่ Classification Machine Learning Model ซึ่งจะได้ ข้อมูลวัตถุที่ตรวจจับได้ของเซนเซอร์แต่ละชนิดออกมา จากนั้นจึงนำมารวมกันเป็นข้อมูลวัตถุที่ตรวจจับ ได้โดยวิธี Late Fusion ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเนื่องจากการพัฒนา Machine Learning Model ในปัจจุบันส่งผลให้เซนเซอร์แต่ละประเภท มี Machine Learning Model ที่สามารถนำมาใช้ งานตรวจจับวัตถุได้อย่างสะดวก และมีความแม่นยำสูง ดังแสดงในรูปที่ 2-19



รูปที่ 2-19 การทำ Late Fusion

ยกตัวอย่างการทำ Late Fusion ระหว่างกล้อง และ LiDAR นั้นจะได้รับข้อมูลมา 2 ชุด แสดงในรูปที่ 2-20 เมื่อ ได้ข้อมูล Boundary Box ของวัตถุที่ตรวจจับได้ผ่านเซนเซอร์แต่ละชนิดแล้ว กระบวนการ Late Fusion จะนำข้อมูล Boundary Box มาพิจารณาร่วมกันว่าการตรวจสอบวัตถุโดยทั้งสองเซนเซอร์นั้นถูกต้องเหมือนกันหรือไม่ โดยมีกระบวนการที่นิยมประยุกต์ใช้ 2 วิธี คือ Intersection Over Union (IoU) และ Kalman Filter



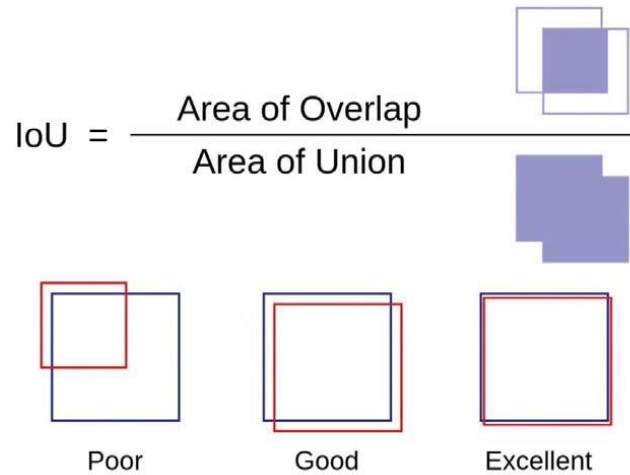
รูปที่ 2-20 ข้อมูลที่ได้จากกล้อง (ซ้าย) และ ข้อมูลที่ได้จาก LiDAR (ขวา)

ตารางที่ 2-1 ตารางแสดงค่าข้อมูลที่ได้รับจากกล้อง และ LiDAR

	Camera Detection Result Data Format	LiDAR Detection Result Data Format
Boundary Box	x, y, w, h	x, y, z, r, w, r, h
Confident Score	conf	conf
Class Confident Score	cls1_conf, cls2_conf, ...	cls1_conf, cls2_conf, ...

Intersection over Union (IoU) เป็นการคำนวณหาคะแนนความมั่นใจของข้อมูลทั้งสองประเภท ผ่านการ คำนวณพื้นที่ Boundary Box ที่ซ้อนทับกัน (Intersection) หารด้วยพื้นที่รวมของ Boundary Box ทั้งสอง กล้อง (Union) เรียกว่าค่า IoU โดยค่า IoU จะมีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อผลของการตรวจจับวัตถุมีความคล้ายคลึงกัน

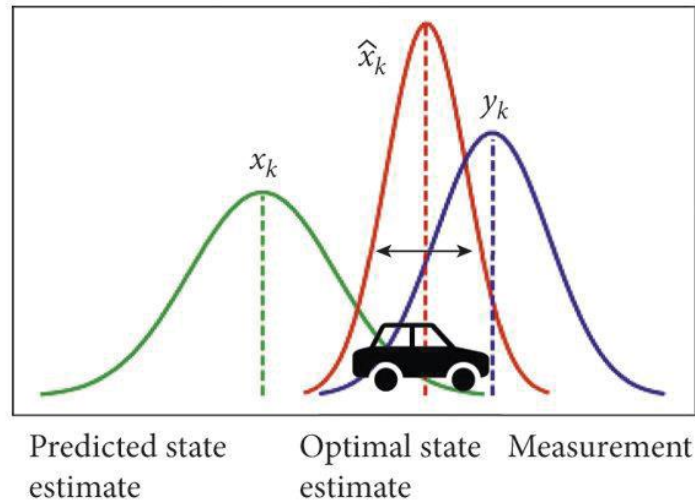
ทั้งนี้กระบวนการ Fusion ด้วยวิธีนี้จะมีข้อเสีย โดยหาค่า IoU ที่ได้ต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ข้อมูลวัตถุจะไม่ถูกนำไปพิจารณาต่อ ในทางกลับกัน หากค่า IoU ที่ได้มีค่ามากกว่าที่กำหนดไว้ต้องพิจารณาถึงกระบวนการคำนวณหาระยะห่างของวัตถุดังกล่าวให้เหมาะสมด้วย



รูปที่ 2-21 การคำนวณแบบ Intersection over Union

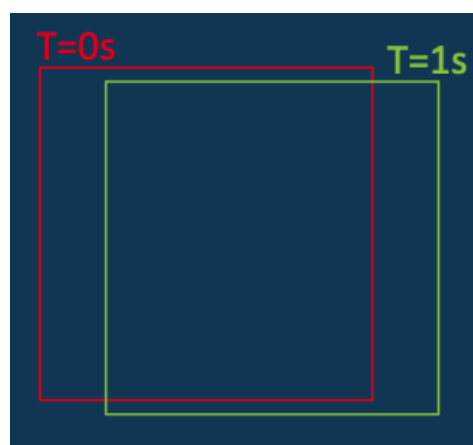
Kalman Filter ในทางทฤษฎี คือ เครื่องมือในการประมาณค่า State จากข้อมูลที่วัดได้ (Observation) และ State ที่ผ่านมาของระบบ ทั้งนี้ Kalman Filter สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการรวมข้อมูลที่วัดได้จากเซนเซอร์ 2 ประเภทได้ โดยผลที่ได้จะเป็นค่าที่ถูกปรับให้เหมาะสม (Optimized) กล่าวคือ หากใช้งาน Kalman Filter ไปเป็นระยะเวลานาน ข้อมูลที่ค่าจาก Kalman Filter จะเป็นข้อมูลที่ถูกต้องที่สุด โดย Kalman Filter จะมีกระบวนการในทางปฏิบัติดังนี้

1. แปลงข้อมูลของเซนเซอร์ทั้งสองประเภทให้อยู่ในรูปแบบเดียวกัน
2. คำนวณหาความเชื่อมั่นระหว่างข้อมูลทั้งสองชนิด (Kalman Gain) จากความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้จากชุดข้อมูลก่อนหน้า
3. คำนวณผลลัพธ์ที่ได้จากการ Fusion (Estimation)
4. คำนวณความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ (Estimate Uncertainty)
5. ทำซ้ำข้อ 1 – 4 อีกครั้งโดยใช้ข้อมูลถัดไปที่ได้รับจากเซนเซอร์



รูปที่ 2-22 ทฤษฎีการทำ Kalman Filter

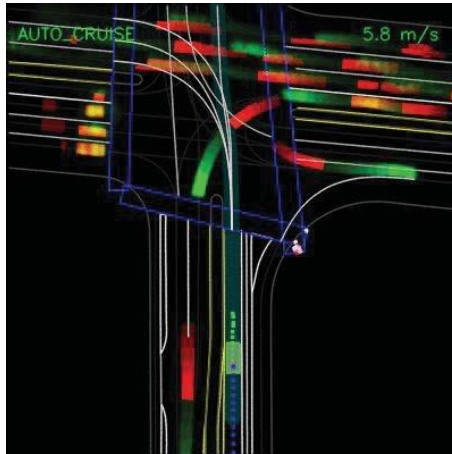
จากกระบวนการตรวจจับวัตถุ ทำให้ยานยนต์อัตโนมัติทราบถึงตำแหน่งของวัตถุ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลด้านความเร็ว และความเร่งเป็นอีกชุดข้อมูลสำคัญสำหรับยานยนต์อัตโนมัติ เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมของวัตถุแต่ละชนิด ดังนั้นกระบวนการติดตามวัตถุ (Object Tracking) จึงมีความจำเป็นในการพิจารณาว่าวัตถุที่ตรวจจับได้ในแต่ละช่วงเวลาเป็นวัตถุเดียวกันหรือไม่ ถ้าวัตถุที่ตรวจจับได้เป็นวัตถุเดียวกัน ข้อมูลตำแหน่งของวัตถุในเวลาต่าง ๆ จะสามารถนำมาคำนวณเป็นข้อมูลความเร็วและความเร่งได้ โดยกระบวนการ Object Tracking ในปัจจุบันมีการพัฒนากันอย่างมากอาทิการใช้ Machine Learning เพื่อติดตามวัตถุเป็นต้นแต่อย่างไรก็ดีกระบวนการ Intersection over Union และ Kalman Filter ที่ใช้ในกระบวนการ Sensor Fusion ยังคงได้รับความนิยม และนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการ Object Tracking อยู่ โดยการเปลี่ยนข้อมูลจากข้อมูลเซนเซอร์ต่างชนิดกัน เป็นข้อมูลที่ได้จากการรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ (Sensor Fusion) ในเวลาต่างกันแทน



รูปที่ 2-23 การทำ Object Tracking

กระบวนการสุดท้ายของ Perception Process ของยานยนต์อัตโนมัติ คือ กระบวนการพยากรณ์ตำแหน่งของวัตถุ (Object Prediction) โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการทำนายเส้นทางการเคลื่อนที่ในอนาคตของวัตถุที่ตรวจจับได้ เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาพิจารณาวางแผนการเคลื่อนที่ของยานยนต์อัตโนมัติ กระบวนการนี้

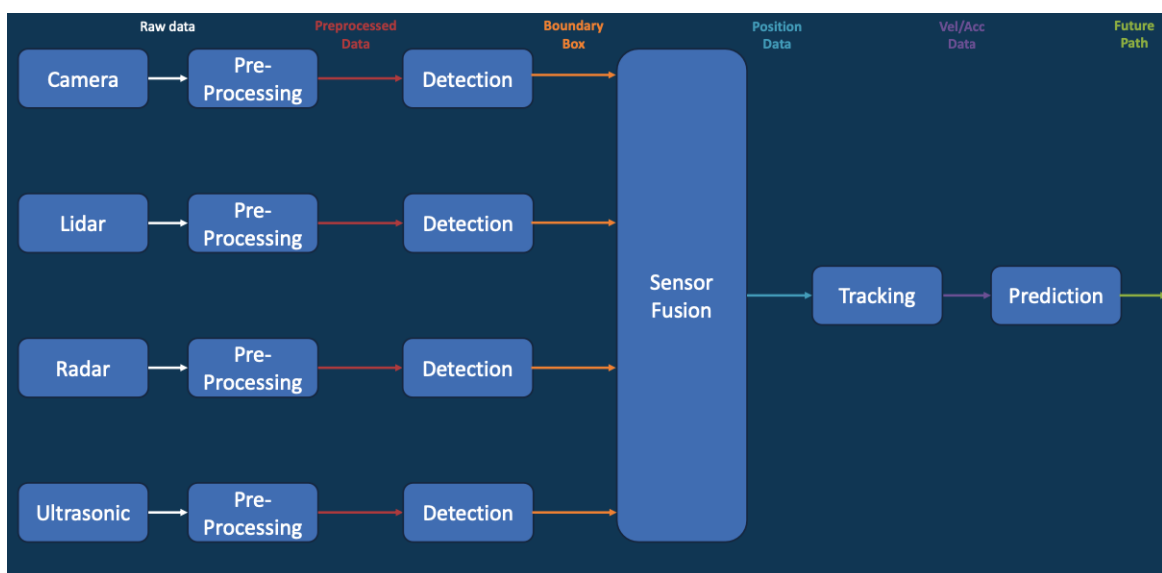
สามารถดำเนินการได้โดย การนำข้อมูลตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ที่ได้จาก Object Tracking มาคำนวณผ่านสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในอนาคต แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์มักมีสัญญาณรบกวน (Noise) ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้จาก Object Tracking นั้นมีผลกระทบของสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ด้วย กระบวนการ Object Prediction จึงมักคำนวณโดยกำหนดข้อจำกัด 3 ด้าน คือ วัตถุมีความเร็วเชิงเส้นคงที่ (Fixed Linear Velocity) วัตถุมีความเร็วเชิงมุมคงที่ (Fixed Angular Velocity) และวัตถุมีความเร่งคงที่ (Fixed Acceleration) จากนั้นผู้พัฒนาอาจนำข้อมูลที่ได้จากทั้ง 3 ข้อจำกัดมารวมกันผ่าน Kalman Filter เพื่อหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในอนาคตเป็นขั้นสุดท้ายได้



รูปที่ 2-24 การทำ Object Prediction

จากการะบวนการต่าง ๆ ที่กล่าวมาในข้างต้น สามารถสรุปกระบวนการเพื่อสร้างความสามารถในการรับรู้ของยานยนต์อัตโนมัติ ได้ ดังนี้

1. เซนเซอร์แต่ละชนิดทำหน้าที่ตรวจจับวัตถุโดยรอบของยานยนต์อัตโนมัติ
2. ข้อมูลดิบที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละชนิดจะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูล (Pre-Processing) เพื่อให้ข้อมูลของเซนเซอร์แต่ละชนิดมีความเหมาะสมที่จะนำไปดำเนินการต่อไปในขั้นตอนการตรวจจับวัตถุ
3. ข้อมูลที่ผ่านกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลของเซนเซอร์แต่ละชนิด จะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการตรวจจับวัตถุ (Detection) ที่ดำเนินการแยกกันตามความเหมาะสมของเซนเซอร์แต่ละชนิด
4. ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการตรวจจับวัตถุ (Detection) จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ (Sensor Fusion) เพื่อได้ตำแหน่งที่ถูกต้องของวัตถุที่ถูกตรวจจับได้
5. ตำแหน่งของวัตถุจะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการการติดตามวัตถุ (Object Tracking) เพื่อคำนวณหาความเร็ว และความเร่ง ของวัตถุแต่ละชนิด
6. ตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของวัตถุ จะถูกส่งไปยังกระบวนการสุดท้าย กระบวนการพยากรณ์ตำแหน่งของวัตถุ (Object Prediction) เพื่อคำนวณหาตำแหน่งในอนาคตของวัตถุแต่ละชนิด



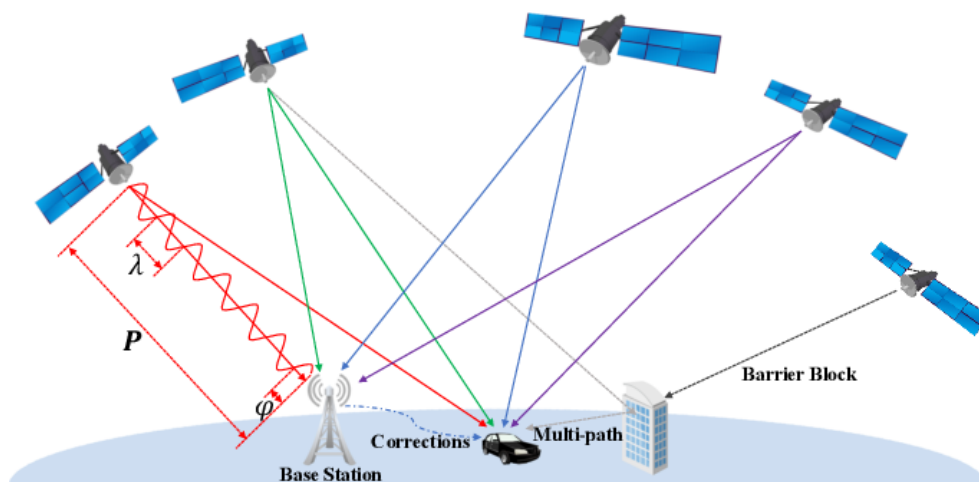
รูปที่ 2-25 ภาพรวมการทำงานของ Perception

บทที่ 3 ความสามารถในการระบุตำแหน่ง (Localization)

ความสามารถในการระบุตำแหน่ง (Localization) คือ กระบวนการที่ทำให้ยานยนต์อัตโนมัติทราบถึงตำแหน่งปัจจุบันของตัวเองซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวางแผนเส้นทางของระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยกระบวนการ Localization สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ GNSS Localization คือ กระบวนการระบุตำแหน่งด้วยระบบนำทางด้วยดาวเทียม และ Visual Localization คือ กระบวนการระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณรอบรถยนต์

3.1 การระบุตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมนำร่อง (GNSS Localization)

GNSS Localization หรือกระบวนการระบุตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมนำร่อง เป็นกระบวนการระบุตำแหน่งที่นิยมใช้งานทั่วไป อาทิเช่นการระบุตำแหน่งโทรศัพท์มือถือก็ใช้กระบวนการระบุตำแหน่งประเภทนี้ได้ อย่างไรก็ตามการระบุตำแหน่งด้วยวิธีนี้มีความแม่นยำที่ต่ำ และหากมีอาคาร หรืออุปสรรคมาบดบังสัญญาณที่ส่งมาจากระบบดาวเทียมนำร่อง ก็จะมีผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่งได้ ทั้งนี้หากต้องการให้ระบบ GNSS Localization มีความแม่นยำมากขึ้นถึงในระดับเซนติเมตร ระบบระบุตำแหน่งจำเป็นต้องได้รับสัญญาณแก้ไขจากสถานีภาคพื้น (Base Station) เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งได้ แต่อย่างไรก็ดี การสร้างสถานีภาคพื้นมีข้อจำกัด เนื่องจากแต่ละสถานีสามารถกระจายสัญญาณแก้ไขที่มีความแม่นยำได้ภายในรัศมี 50 กิโลเมตรเท่านั้น

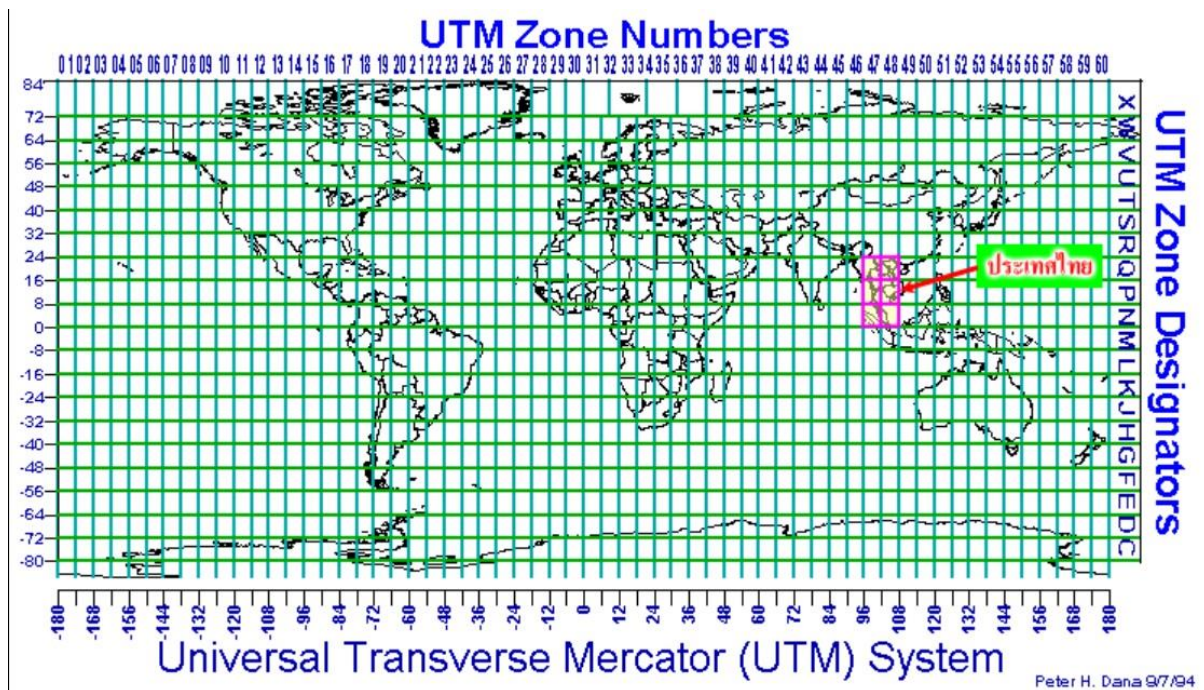


รูปที่ 3-1 การระบุตำแหน่งด้วย GNSS

อุปกรณ์รับสัญญาณ GNSS ติดตั้งอยู่ยานยนต์อัตโนมัติ จะได้รับข้อความในการระบุตำแหน่ง ณ เวลาปัจจุบันในรูปแบบของ ละติจูด ลองจิจูด และอัลติจูด แต่อย่างไรก็ตาม การประมวลผลตำแหน่งในยานยนต์อัตโนมัติ มักใช้หน่วยของการระบุตำแหน่งเป็นเมตร ซึ่งไม่สามารถใช้งานได้จากข้อมูลที่ได้รับมาจาก GNSS Localization ได้ทันที จำเป็นต้องมีการแปลงหน่วยจากละติจูด ลองจิจูด และอัลติจูด ให้เป็นตำแหน่งที่มีหน่วยเป็น เมตร โดยหนึ่งในระบบพิกัดที่นิยมใช้ คือ Universal Transverse Mercator (UTM)

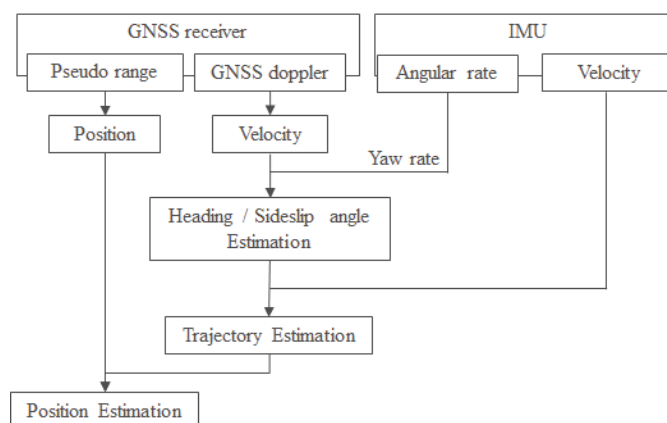
UTM Coordinate System เป็นกระบวนการแปลงค่า ละติจูด ลองจิจูด และอัลติจูด ให้เป็นหน่วยเมตร โดยมีจุดกำเนิด (Origin) อยู่ที่ละติจูด และลองจิจูดที่ (0,0) ระบบ UTM Coordinate System จะแบ่งพื้นผิวของโลกเป็นตาราง และกำหนดตำแหน่งของจุดตัดของตารางแต่ละช่องเป็นระยะห่างระหว่างจุดกำเนิด ซึ่งการ

แปลงค่าละติจูด และลองจิจูดเป็น UTM Coordinate System ทำได้โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งที่ได้รับจาก GNSS และ ตารางของ UTM Coordinate System



รูปที่ 3-2 UTM System

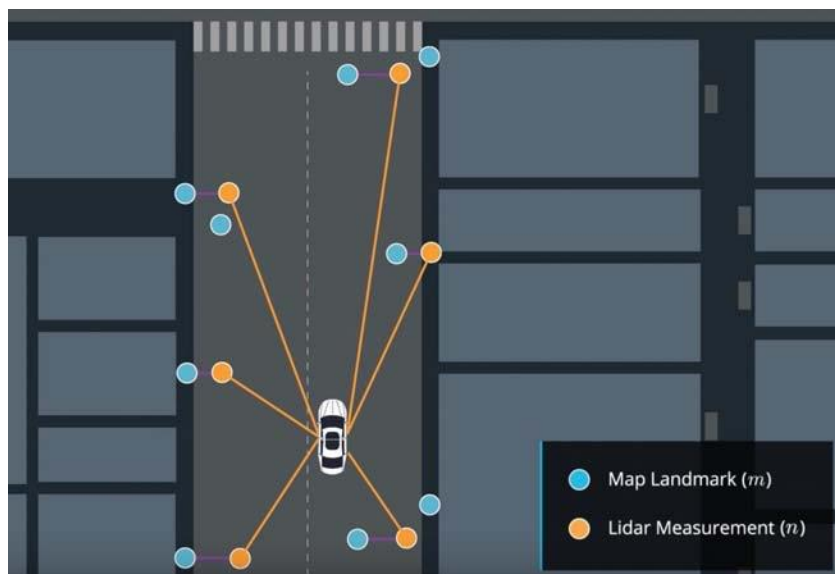
กระบวนการ Dead Reckoning เป็นอีกกระบวนการที่ช่วยชดเชยข้อผิดพลาดของการระบุตำแหน่งด้วย GNSS Localization โดยอาศัยข้อมูลด้านความเร็วเชิงเส้น ความเร็วเชิงมุม และความเร่งของรถยนต์ โดยข้อมูลด้านความเร็วเชิงเส้น ความเร็วเชิงมุม และความเร่งของรถยนต์ จะถูกนำมาคำนวณเป็นตำแหน่งปัจจุบันของรถยนต์ คล้ายคลึงกับการบวนการ Object Prediction จากนั้นระบบจะนำข้อมูลตำแหน่งที่ได้จาก GNSS Localization และที่ได้จากการคำนวณมารวมกัน (Fusion) ผ่าน Kalman Filter เพื่อหาตำแหน่งที่แม่นยำของรถยนต์อัตโนมัติ ณ ปัจจุบัน



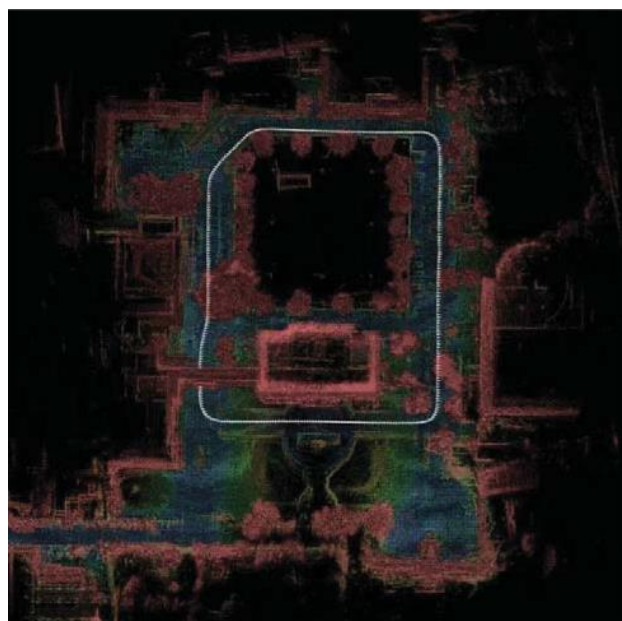
รูปที่ 3-3 กระบวนการ Dead Reckoning

3.2 การระบบตำแหน่งด้วยเซนเซอร์ (Visual Localization)

Visual Localization เป็นกระบวนการระบุตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณรอบรถยนต์ โดยเซนเซอร์ที่ได้รับความนิยมใช้ในกระบวนการนี้ คือ LiDAR เนื่องจาก LiDAR เป็นเซนเซอร์ที่ให้ข้อมูลตำแหน่งของวัตถุสัมพัทธ์กับรถยนต์ในหน่วยเมตรได้ และข้อมูลที่ได้รับมามีความแม่นยำสูง ส่งผลให้ตำแหน่งที่ได้รับจากกระบวนการนี้มีความแม่นยำสูงด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลอ้างอิง กล่าวคือ ข้อมูลแผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการนำข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์มาเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง และประเมินหาตำแหน่งของรถยนต์อัตโนมัติบนแผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) เปรียบเสมือนผู้ขับขี่ที่เป็นรถยนต์ที่อาศัยข้อมูลจากการมองเห็นสถานที่ต่าง ๆ รอบตัวรถ และนำมาเปรียบเทียบกับแผนที่ที่อยู่ในความทรงจำว่า สถานที่ต่าง ๆ ที่มองเห็น อยู่ ณ บริเวณใด ของแผนที่ ซึ่งจำทำให้สามารถพิจารณาข้อมูลตำแหน่งรถยนต์จากตำแหน่งของสถานที่ที่มองเห็นได้



รูปที่ 3-4 การ Visual Localization



รูปที่ 3-5 แผนที่ความละเอียดสูง (HD Map)

Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) เป็นกระบวนการสำคัญ ในการสร้างแผนที่ความละเอียดสูงสำหรับการใช้งานในระบบ Visual Localization ของยานยนต์อัตโนมัติ เริ่มต้นจากการกรองลักษณะสำคัญ หรือฟีเจอร์ของสภาพแวดล้อมที่ได้จากเซนเซอร์ อาทิเช่น เหลี่ยมมุมของตึก จากนั้นนำข้อมูลฟีเจอร์มาพิจารณา ณ เวลาต่าง ๆ เพื่อหาตำแหน่งของยานยนต์อัตโนมัติ ณ เวลานั้น ๆ เมื่อทราบตำแหน่งของรถยนต์ที่เปลี่ยนไป ณ เวลาต่าง ๆ แล้ว SLAM อัลกอริทึม จะนำข้อมูลดิบ หรือ RAW data ของเซนเซอร์ที่ตรวจจับได้มาสร้างเป็นแผนที่ความละเอียดสูง โดยอ้างอิงตำแหน่งของข้อมูลดิบจากข้อมูลตำแหน่ง ณ เวลานั้นของยานยนต์อัตโนมัติที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

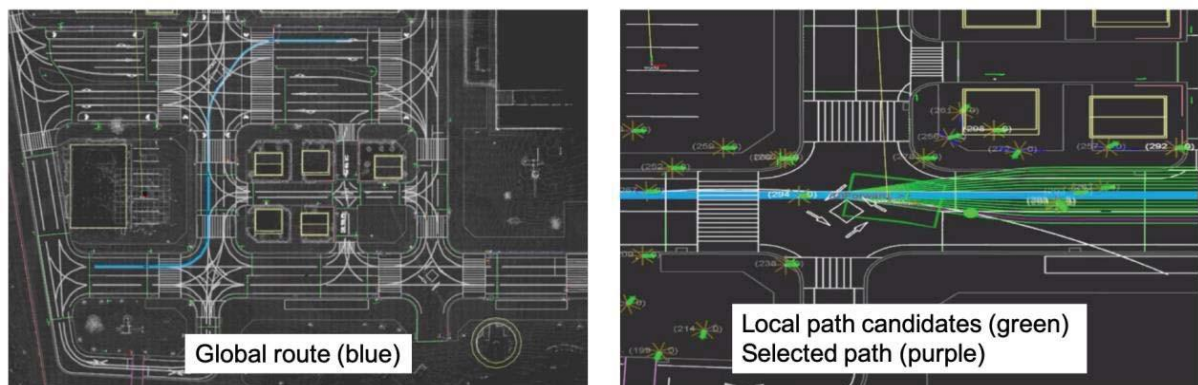
ทั้งนี้ กระบวนการสร้างแผนที่ความละเอียดสูงด้วย SLAM อัลกอริทึม เป็นกระบวนการที่อาศัยความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์ขั้นสูง ซึ่งในเชิงปฏิบัติแล้ว ผู้พัฒนารถยนต์อัตโนมัติ อาจใช้บริการผู้ประกอบการที่มีความเชี่ยวชาญด้านการสำรวจ และสร้างแผนที่ ในการสร้างแผนที่ความละเอียดสูง ที่นำมาใช้งานในยานยนต์อัตโนมัติ

บทที่ 4 ความสามารถในการวางแผนเส้นทาง (Path Planning)

ความสามารถในการวางแผนเส้นทาง (Path Planning) ของยานยนต์อัตโนมัติ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการย่อย คือ Global Planning คือกระบวนการวางแผนเส้นทางเดินทางโดยรวมของยานยนต์อัตโนมัติ และ Local Planning ซึ่งเป็นกระบวนการวางแผนการเคลื่อนที่ของยานยนต์อัตโนมัติเพื่อรับมือกับสภาพแวดล้อมในบริเวณรอบยานยนต์อัตโนมัติ



รูปที่ 4-1 Path Planning



รูปที่ 4-2 Global Planning (ซ้าย) และ Local Planning (ขวา)

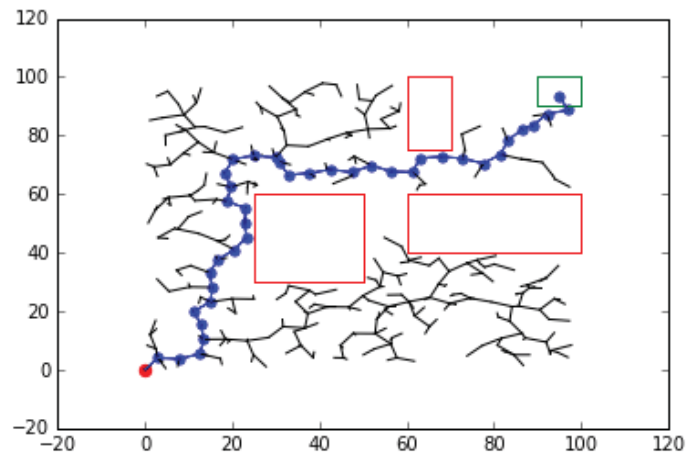
4.1 กระบวนการวางแผนเส้นทางเดินทางโดยรวมของยานยนต์อัตโนมัติ (Global Planning)

Global Planning คือ กระบวนการวางแผนเส้นทาง เช่นเดียวกันกับการวางแผนเส้นทางใน Navigation Application ที่ติดตั้งอยู่ในโทรศัพท์มือถือ หรือรถยนต์ในปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น Google Map ซึ่งเป็นกระบวนการวางแผนเส้นทางโดยรวมว่าหากรถยนต์ ต้องการที่จะเดินทางจากจุด A ไปยังจุด B จะต้องผ่านเส้นทางใดบ้าง โดย อัลกอริทึมใช้ในการ Global Planning สามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท ได้แก่ Free Space Planning และ Graph Planning

4.1.1 การวางแผนเส้นทางบนพื้นที่ว่าง (Free Space Planning)

Free Space Planning เป็นกระบวนการวางแผนเส้นทางประเภทแรกที่ถูกนำมาใช้ในยานยนต์อัตโนมัติ พัฒนาโดยศาสตราจารย์ในมหาวิทยาลัย MIT ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในขณะนั้น คือ Rapid Random Tree (RRT) โดยอัลกอริทึมนี้เป็นกระบวนการที่ยานยนต์อัตโนมัติ จะสุ่ม

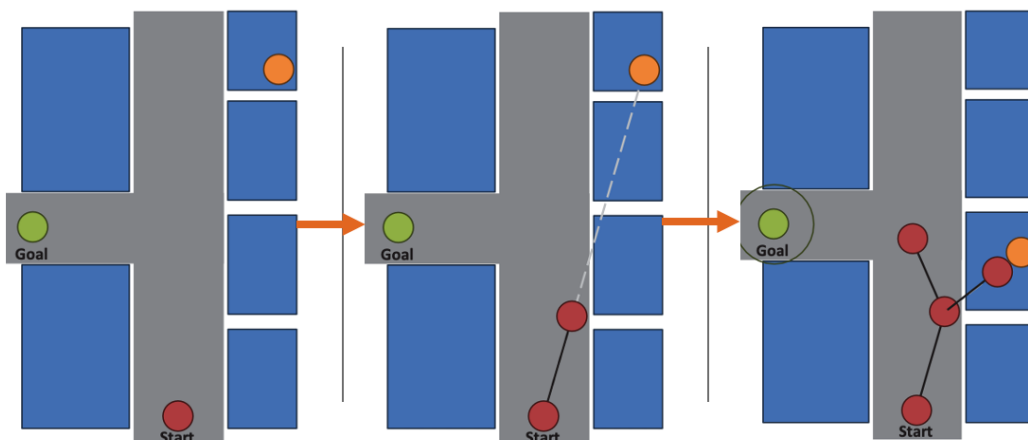
เส้นทางในระยะทางสั้น ๆ ขึ้นมาต่อกันจนเส้นทางที่จะสามารถนำทางยานยนต์อัตโนมัติไปยังจุดหมายได้ โดยเส้นทางสั้น ๆ จะถูกสร้างขึ้นมาจากการคำนวณข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของยานยนต์อัตโนมัติในระยะเวลาหนึ่ง ทั้งนี้กระบวนการนี้ยังมีข้อเสีย เนื่องจากการสร้างเส้นทางเป็นกระบวนการแบบสุ่ม ทำให้เส้นทางที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละครั้งจะไม่เหมือนกัน และมีลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง รวมทั้งหากจุดหมายมีระยะทางไกล และพื้นที่ที่อนุญาตให้ยานยนต์อัตโนมัติเคลื่อนที่ได้กว้าง กระบวนการนี้จะใช้เวลาในการค้นหาเส้นทางนานขึ้นด้วย

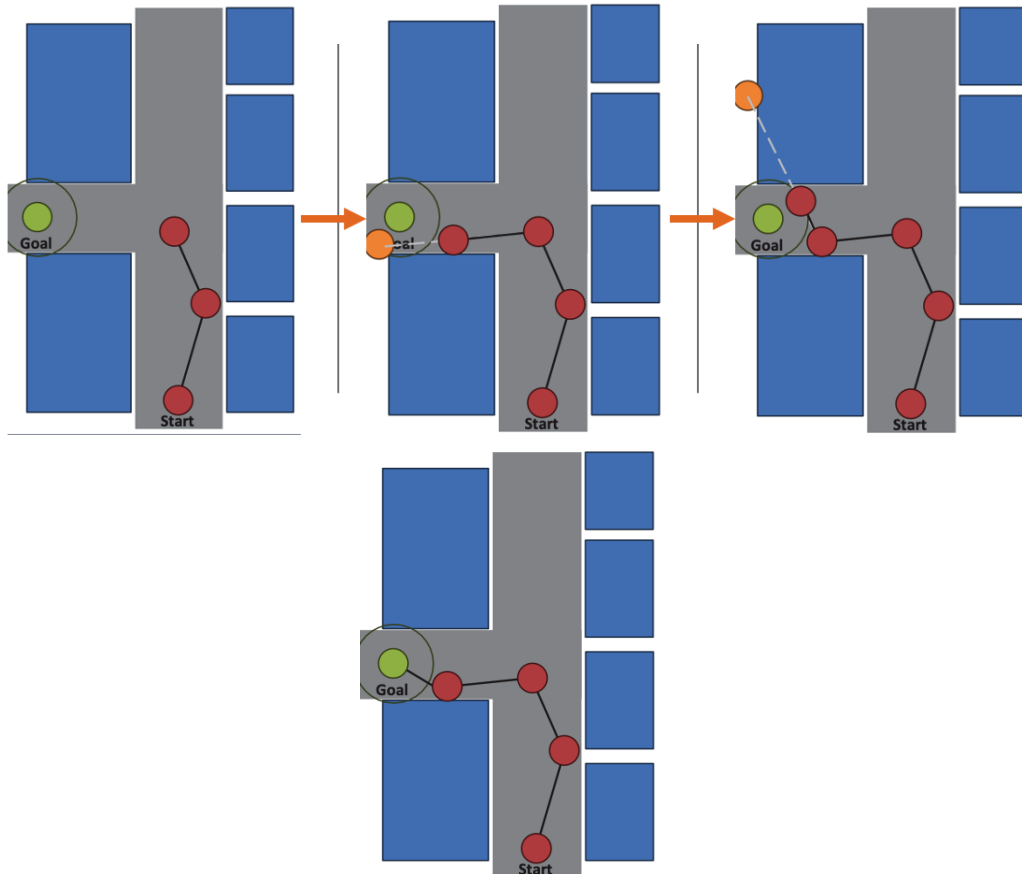


รูปที่ 4-3 การทำ Free Space Planning

ขั้นตอนการทำงานของ Rapid Random Tree (RRT)

1. สุ่มเลือกจุดบนแผนที่มา 1 จุด
2. ค้นหา Node ที่ใกล้กับจุดที่สุ่มมากที่สุด ทำการสร้างเส้นประระหว่างจุดที่สุ่ม และ Node เพื่อเป็นทิศทางอ้างอิงของเส้นทางจริง จากนั้นทำการสร้าง Node ใหม่บนเส้นปะ ในระยะที่รถยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ใน 1 หน่วยเวลา และ Node ที่สร้างใหม่จะต้องไม่ออกนอกเส้นทาง หรือสัมผัสกับวัตถุอื่นในแผนที่
3. ทำซ้ำข้อ 1 และ 2 ไปจนกระทั่ง Node ที่สร้างใหม่อยู่ห่างจากจุดสิ้นสุดต่ำกว่าระยะที่กำหนดไว้
4. เชื่อม Node ที่เป็นจุดเริ่มต้นของเส้นปะ เข้ากับจุดสิ้นสุด

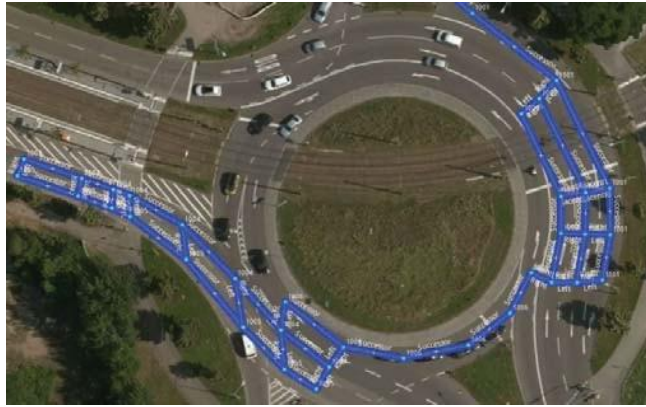




รูปที่ 4-4 ขั้นตอนการทำงานของ Rapid Random Tree (RRT)

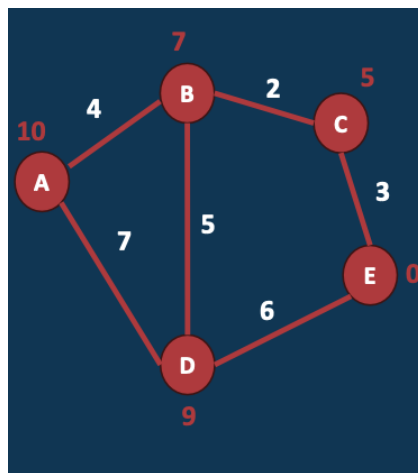
4.1.2 การวางแผนเส้นทางโดยอาศัยข้อมูลในรูปแบบกราฟ (Graph Planning)

Graph Planning เป็นการวางแผนเส้นทางโดยอาศัยข้อมูลถนนที่เก็บไว้ในรูปแบบของ Graph Structure โดย Graph Structure จะประกอบด้วยข้อมูล 2 ประเภท ได้แก่ Node ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งของจุดตัดของถนน หรือแยกต่างๆ และ Edge ซึ่งแสดงถึงถนนที่เชื่อมต่อแต่ละแยกเข้าด้วยกัน โดยใน Node และ Edge อาจบรรจุข้อมูลอื่น ๆ เพิ่มเติมได้ อาทิเช่น ความเร็วสูงสุด ทิศทางการขับขี่ และระยะทางเป็นต้น เมื่อข้อมูลของถนนถูกจัดเก็บไว้ในรูปแบบของ Graph ผู้พัฒนาจะสามารถนำ Graph Search Algorithm มาประยุกต์ใช้เพื่อหาเส้นทางได้ โดยอัลกอริทึมที่นิยมได้แก่ A* ทั้งนี้การใช้ Graph Search Algorithm บนยานยนต์อัตโนมัติ จะได้รับเส้นทางที่สะท้อนความเป็นจริงมากกว่า Free Space Planning เนื่องจากเส้นทางจะถูกวางแผนจากข้อมูลถนนที่ถูกจัดทำไว้ล่วงหน้าแล้ว



รูปที่ 4-5 การทำ Graph Planning

A* (A-star) เป็นอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกราฟ โดยทำการพิจารณาระยะทางที่เดินทางไปแล้ว และการประมาณระยะทางที่เหลือไปยังเป้าหมาย ผ่านการคำนวณค่า Cost ยกตัวอย่างเช่น การวางแผนการเดินทางจากจุด A ไปยังจุด E มีค่า Cost ที่จุดนั้น ๆ (H) และ ค่า Cost ระหว่างจุด (G) ดังแสดงในรูปที่ 4-6

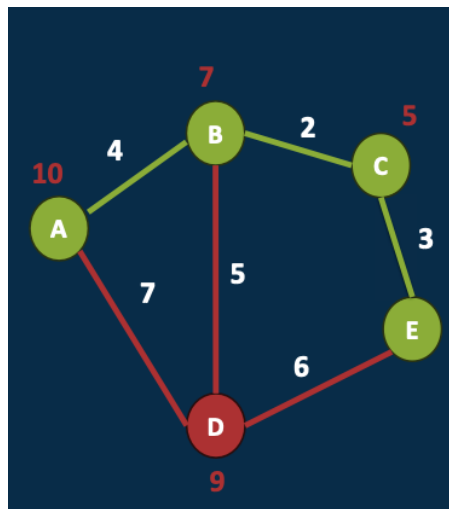


รูปที่ 4-6 สถานการณ์จำลองการวางแผนการเดินทางด้วย A*

ขั้นตอนในการทำงานของ A* อัลกอริทึมในกรณีตัวอย่าง

1. เนื่องจากจุด A เป็นจุดเริ่มต้น จึงมีค่า Cost เท่ากับ H หรือ 10 หน่วย
2. ที่จุด B เส้นทางที่มีค่า Cost น้อยที่สุดคือ จาก A ไป B คือ 11 (7+4) หน่วย
3. ที่จุด C เส้นทางที่มีค่า Cost น้อยที่สุดคือ จาก B ไป C คือ 7 (5+2) หน่วย
4. ที่จุด D เส้นทางที่มีค่า Cost น้อยที่สุดคือ จาก B ไป D คือ 14 (9+5) หน่วย
5. ที่จุด E เส้นทางที่มีค่า Cost น้อยที่สุดคือ จาก C ไป E คือ 3 (0+3) หน่วย

ดังนั้น เส้นทางที่มีค่า Cost น้อยที่สุด คือ เส้นทางจาก A ไป B ไป C และ ไป E โดยมีค่า Cost รวมกันเป็น $3+7+11+10 = 31$ หน่วย



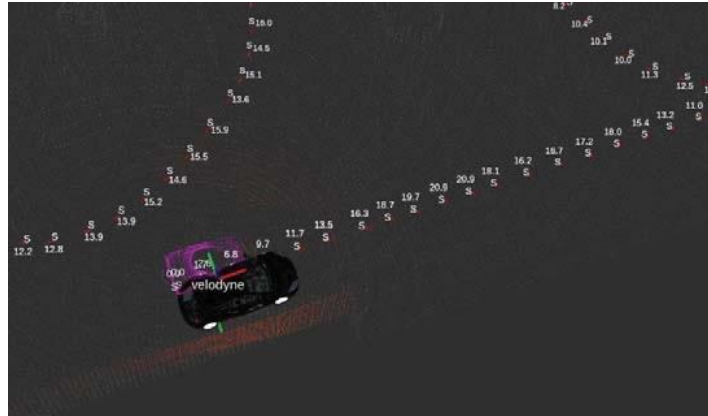
รูปที่ 4-7 การวางแผนการเดินทางด้วย A*

ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงการคำนวณการวางแผนการเดินทางด้วย A*

Node	G	H	F = G+H	Previous Node
A (Start)	0	10	10	None
B	4	7	11	A
C	2	5	7	B
D	5	9	14	B
E (End)	3	0	3	C

เมื่อกระบวนการวางแผนเส้นทางดำเนินการแล้วเสร็จ ข้อมูลเส้นทางจะถูกแปลงให้เป็นข้อมูล Waypoints เพื่อความง่ายต่อการนำไปใช้งาน โดย Waypoint คือ จุดอ้างอิงที่รถยนต์ต้องเคลื่อนที่ตาม เพื่อให้ไปถึงจุดหมาย ได้อย่างถูกต้อง Waypoint สามารถบรรจุข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการควบคุมรถยนต์ อาทิเช่น ตำแหน่งของจุด ความเร็วของรถยนต์ ณ จุดนั้น ทิศทางการขับขี และความเร็วสูงสุด เป็นต้น

3.



รูปที่ 4-8 แสดง Waypoints จากการวางแผนเส้นทางการเดินทางของยานยนต์อัตโนมัติ

4.2 กระบวนการวางแผนการเคลื่อนที่ของยานยนต์อัตโนมัติเพื่อรับมือกับสภาพแวดล้อมในบริเวณรอบยานยนต์อัตโนมัติ (Local Planning)

กระบวนการ Local Planning จะใช้ตำแหน่ง ณ ปัจจุบันของรถยนต์จากการทำ Localization และ Waypoints จากการทำ Global Planning และทำการวางแผนเส้นทางขึ้นมาใหม่ โดยเป็นการวางแผนเส้นทางในระยะทางหนึ่ง นับจากตำแหน่งปัจจุบันของรถยนต์ โดยเส้นทางใหม่ที่วางแผนขึ้นจะพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมโดยรอบ โดยอาศัยข้อมูลจากระบบเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่รอบยานยนต์อัตโนมัติ อาทิเช่น การวางแผนเส้นทางสำหรับเปลี่ยนช่องจราจรเพื่อแซงรถยนต์ที่จอดอยู่เป็นต้น โดยกระบวนการ Local Planning ที่นิยมใช้งาน คือ Free Space Planning และ Lane Sampling

4.2.1 การวางแผนเส้นทางบนพื้นที่ว่าง (Free Space Planning)

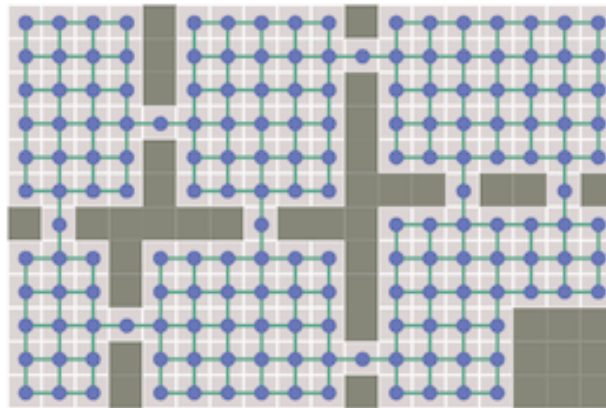
Free Space Planning สำหรับ Local Planning มีความคล้ายคลึงกับ การทำ Free Space Planning สำหรับ Global Planning แต่จะกำหนดขอบเขตการเคลื่อนที่ของรถยนต์ (Boundary) อยู่ในบริเวณใกล้เคียงรถยนต์เท่านั้น เพื่อการหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่อาจปรากฏขึ้น และวางแผนเส้นทางเดินทาง



รูปที่ 4-9 การวางแผนการเดินทางแบบ Free Space Planning

กระบวนการ Free Space Planning ของกระบวนการ Local Planning จะแตกต่างจาก Free Space Planning ของ Global Planning โดย Free Space Planning ของกระบวนการ Local Planning จะอาศัย A* Planning ในการวางแผนเส้นทาง ทั้งนี้ A* Planning ใน Global Planning จัดอยู่ในกระบวนการ Graph Planning แต่อย่างไรก็ดี ในส่วนของ Local Planning จะถูกจัดเป็น Free Space Planning เนื่องจาก

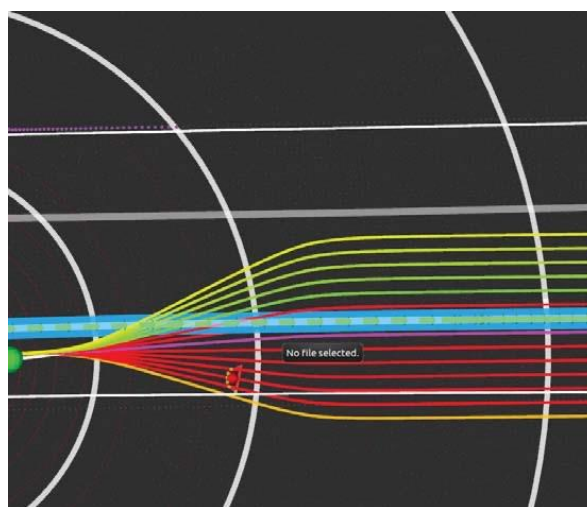
กระบวนการสร้างข้อมูล Graph Structure เป็นการสร้างจากพื้นที่ว่างบริเวณใกล้เคียงกับตัวยานยนต์อัตโนมัติ โดยแบ่ง Graph Structure ตารางในพื้นที่ใกล้เคียงกับตัวรถ และมีระยะห่างเท่า ๆ กัน ส่งผลให้ยานยนต์อัตโนมัติมีข้อจำกัดในการเคลื่อนที่น้อยกว่าการวางแผนแบบ Global Planning แต่อย่างไรก็ดี การวางแผน Local Planning ด้วยกระบวนการ A* มักต้องการทรัพยากร และเวลาในการคำนวณมาก อาจไม่เหมาะกับการใช้งานในรถยนต์ที่มีความเร็วสูง



รูปที่ 4-10 การสร้าง Graph Structure บนพื้นที่ว่าง

4.2.2 การวางแผนเส้นทางโดยอาศัยการจำลองเลน (Lane Sampling)

กระบวนการ Lane Sampling เป็นการสร้างช่องทางจราจรย่อยเพิ่มขึ้นมา ขนานกับ Waypoints ที่ได้จากกระบวนการ Global Planning โดยช่องทางจราจรที่สร้างขึ้นใหม่นั้น จะมีการคำนวณค่าใช้จ่าย (Cost) ว่าเหมาะสมที่จะให้ยานยนต์อัตโนมัติเคลื่อนที่ตามช่องทางจราจรนั้นหรือไม่ โดยการคิดค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่จะพิจารณาจาก 3 หัวข้อ ได้แก่ การขวางช่องทางจราจรโดยวัตถุอื่น ระยะห่างของช่องทางจราจรกับวัตถุอื่น และระยะห่างจาก Waypoints หลัก ทั้งนี้ ปัจจัยที่นำไปคิดค่าใช้จ่าย สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมในสภาพการจราจรในแต่ละพื้นที่ เมื่อช่องทางจราจรย่อยถูกสร้างและคำนวณค่าใช้จ่ายแล้วเสร็จยานยนต์อัตโนมัติจะเลือกเคลื่อนที่ตามช่องทางจราจรย่อยที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางและยังคงตาม Global Waypoints อยู่



รูปที่ 4-11 การทำ Lane Sampling

ตัวอย่างการทำ Lane Sampling ในรูปที่ 4-12 แสดงการเดินทางของยานยนต์อัตโนมัติ (สีเขียว) ที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ในเลนส์ แต่ตรวจจับได้ว่ามีวัตถุ (สีแดง) อยู่ด้านหน้า จึงทำการคำนวณเส้นทางออกมา 3 เส้นทาง ได้แก่ เส้นทาง A เส้นทาง B และ เส้นทาง C ใน 3 หัวข้อ ได้แก่

1. ระยะห่างของช่องจราจรกับวัตถุอื่น
2. ระยะห่างจาก Waypoints หลัก
3. การออกนอกช่องทางหลัก

ทั้งนี้ หัวข้อค่าใช้จ่ายที่นำมาเป็นตัวอย่างในการคำนวณสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท 1 ค่าใช้จ่ายจากระยะทาง และค่าใช้จ่ายเชิงตรรกะ กล่าวคือ ค่าใช้จ่ายจากระยะห่างของช่องจราจรกับวัตถุอื่น และระยะห่างจาก Waypoints หลัก เป็นการคำนวณค่าใช้จ่ายจากจากระยะหน่วยในหน่วยเมตร แต่อย่างไรก็ดีนิยมนำในการคำนวณค่าใช้จ่ายของทั้ง 2 ประเภท มีความแตกต่างกันอยู่

ในกรณีของระยะห่างของช่องจราจรกับวัตถุอื่น ถ้าระยะห่างของช่องจราจรกับวัตถุอื่นมีค่าน้อยแสดงว่าช่องทางจราจรนั้นมีความเสี่ยงที่จะเกิดการชน มากกว่าช่องทางที่ระยะห่างของช่องจราจรกับวัตถุอื่นมีค่ามาก อย่างไรก็ตาม หากระยะทางไปคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายรวม เมื่อยานยนต์อัตโนมัติเลือกช่องทางที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด อาจเลือกช่องทางจราจรที่มีระยะห่างของช่องจราจรกับวัตถุอื่นน้อย กล่าวได้ว่า ค่าใช้จ่ายจะมีลักษณะในการแปรผกผันกับระยะห่างของช่องจราจรกับวัตถุอื่น

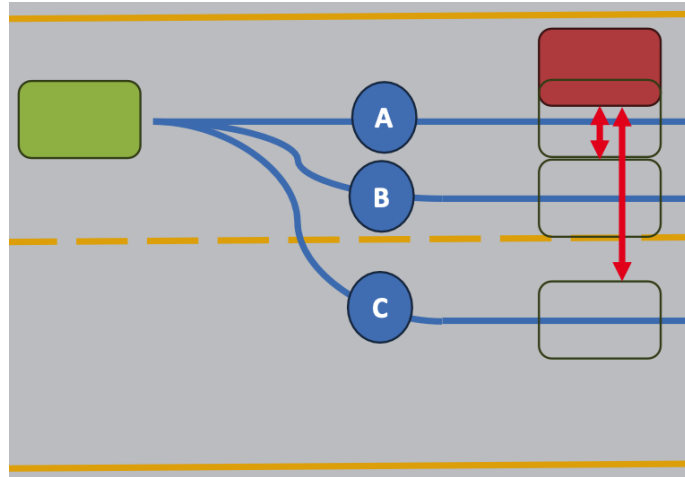
ในทางกลับกันระยะห่างจาก Waypoints หลัก ถ้ามีค่ามากแสดงว่ายานยนต์อัตโนมัติแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่หากออกจากเส้นทางอ้างอิงมากกว่า ช่องจราจรที่มีระยะห่างจาก Waypoints หลักน้อย กล่าวได้ว่า ค่าใช้จ่ายจะมีลักษณะในการแปรผันตรงกับระยะห่างจาก Waypoints หลัก

ในกรณีของการออกนอกช่องทางหลักเปรียบเสมือนค่าใช้จ่ายในเชิงตรรกศาสตร์ กล่าวคือ ค่าใช้จ่ายอยู่ในลักษณะของค่าเชิงตรรกศาสตร์ อาทิ ใช่ หรือไม่ใช่ โดยหากช่องทางจราจรออกจากช่องทางหลัก ค่าใช้จ่ายในหมวดนี้จะมีค่าเป็น 1 และในทางกลับกัน หากช่องทางจราจรอยู่ในช่องทางหลัก ค่าใช้จ่ายในหมวดนี้จะมีค่าเป็น 0

ทั้งนี้ การคำนวณค่าใช้จ่ายของช่องทางจราจรย่อยแสดงอยู่ในตารางที่ 4-2 และมีกระบวนการคำนวณดังนี้

1. เส้นทาง A
 - มีระยะห่างจากช่องจราจรกับวัตถุอื่นเป็น 0 ทำให้ Cost ของเส้นทาง A หาค่าไม่ได้ ($1/0$)
 - ระยะห่างจาก Waypoints หลักมีค่าเท่ากับ 0
 - ไม่มีการออกนอกช่องทางหลัก (0)
2. เส้นทาง B
 - มีระยะห่างจากช่องจราจรกับวัตถุอื่นเป็น 1.78 ทำให้ Cost ของเส้นทาง B เป็น $1/1.78$
 - ระยะห่างจาก Waypoints หลักมีค่าเท่ากับ 2.5
 - ไม่มีการออกนอกช่องทางหลัก (0)
3. เส้นทาง C
 - มีระยะห่างจากช่องจราจรกับวัตถุอื่นเป็น 5.74 ทำให้ Cost ของเส้นทาง C เป็น $1/5.74$
 - ระยะห่างจาก Waypoints หลักมีค่าเท่ากับ 6.53
 - มีการออกนอกช่องทางหลัก (1)

จากการคำนวณของทั้ง 3 เส้นทาง พบว่า เส้นทาง B มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นยานยนต์อัตโนมัติจะเลือกเดินทางตามเส้นทาง B



รูปที่ 4-12 ตัวอย่างการทำ Lane Sampling

ตารางที่ 4-2 ตารางการคำนวณค่าใช้จ่าย (Cost) ของ Lane Sampling

Cost	A	B	C
ระยะห่างของช่องจราจรกับวัตถุอื่น	หาค่าไม่ได้	$1/1.78$	$1/5.74$
ระยะห่างจาก Waypoints หลัก	0	2.5	6.53
การออกนอกช่องทางหลัก	0	0	1
รวม	หาค่าไม่ได้	3.11	7.7

ทั้งนี้ เมื่อผ่านกระบวนการวางแผนเส้นทางทั้งหมดแล้ว เส้นทางที่ได้รับโดยส่วนใหญ่มักจะอยู่ในรูปแบบของ Waypoints ดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังระบบควบคุมรถยนต์ เพื่อหาคำสั่งที่จำเป็นต่อการสั่งยานยนต์อัตโนมัติให้สามารถเคลื่อนที่ตาม Waypoints ที่วางแผนได้อย่างถูกต้อง และปลอดภัย

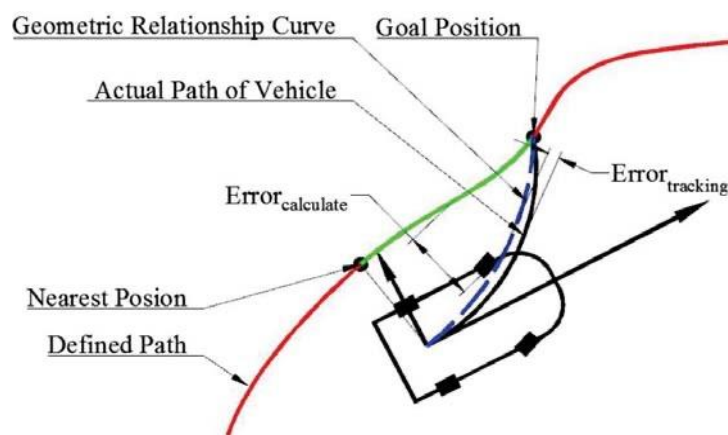
บทที่ 5 ความสามารถในการควบคุมรถ (Control)

ความสามารถในการควบคุมรถ (Control) คือ กระบวนการสั่งงานรถยนต์ให้เคลื่อนที่ตาม Waypoints ที่ได้จากระบวนการ Path Planning ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองกระบวนการย่อยคือ Waypoints Following และ Actuator Control

5.1 การควบคุมให้ยานยนต์อัตโนมัติเคลื่อนที่ตาม Waypoints (Waypoints Following)

Waypoints Following เป็นกระบวนการสำคัญที่จะทำให้ยานยนต์อัตโนมัติสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่วางแผนไว้ได้ จากนั้น ระบบจะคำนวณความเร็ว และมุมเลี้ยว เพื่อนำไปสั่งงานยานยนต์อัตโนมัติในขั้นต่อไป โดย Waypoints Following Algorithm ที่ใช้งานได้สะดวก และได้ความนิยมสำหรับยานยนต์อัตโนมัติที่มีความเร็วต่ำ คือ Pure Pursuit โดยมีหลักการทำงานดังแสดงใน คือ ทำการสมมุติจุดหมายระยะสั้น (Goal Position) ให้แก่ยานยนต์อัตโนมัติ โดยปกติแล้วจะกำหนดให้จุดหมายระยะสั้นอยู่ห่างจากยานยนต์อัตโนมัติเป็นค่าคงที่ จากนั้นคำนวณค่าองศาพวงมาลัยจาก รัศมีความโค้ง (R) ที่ทำให้รถยนต์ไปถึงจุดหมายระยะสั้น และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วที่จัดเก็บอยู่ใน Waypoint ที่ใกล้รถยนต์มากที่สุด (Nearest Point) ดังแสดงในรูปที่ 5-1 ด้วยกระบวนการดังกล่าวจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็น

1. vel_cmd คือ ความเร็วที่จัดเก็บอยู่ใน Waypoint ที่ใกล้รถยนต์มากที่สุด
2. str_cmd คือ องศาพวงมาลัยที่คำนวณจากรัศมีความโค้งของการเคลื่อนที่รถยนต์จากตำแหน่งปัจจุบันไปยังจุดหมายระยะสั้น



รูปที่ 5-1 Waypoint Following

กระบวนการคำนวณของ Pure Pursuit เพื่อหารัศมีความโค้ง (R) ดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ เป็นกระบวนการคำนวณทางเลขาคณิตเพื่อให้ได้รัศมีความโค้ง (R) ที่ระยะ Look ahead distance (L) โดยรัศมีความโค้งสามารถหาได้จากสมการ

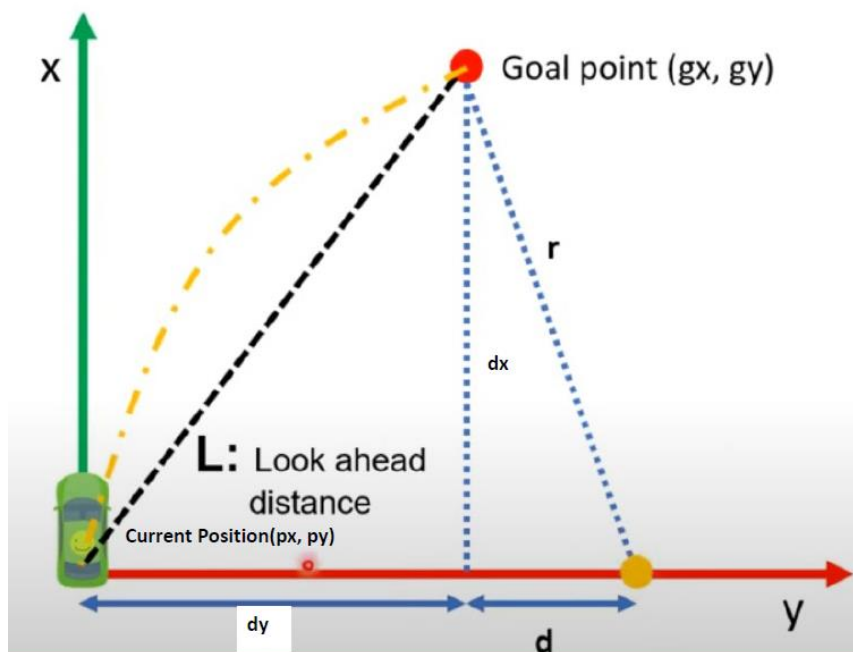
$$dx = |gx - px|$$

$$dy = |gy - py|$$

$$r = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \frac{L^2}{2 * dy}$$

ดังนั้นจะได้ว่า $r = \frac{L^2}{2 * dy}$

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถหาได้ดังแสดงในรูปที่ 5-2



รูปที่ 5-2 การคำนวณแบบ Pure Pursuit

เมื่อได้รัศมีความโค้งที่ต้องการแล้ว ในกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ องศาการเลี้ยวของล้อจะมีค่าเท่ากับองศาระหว่างเส้นตั้งฉากของจุดกึ่งกลางล้อ กับเส้นรัศมีความโค้ง ส่งผลให้สามารถหาค่าองศาการเลี้ยวได้จากสมการ

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{L}{r} \right) \quad \text{เมื่อ } L \text{ คือ ระยะฐานล้อ (Wheelbase)}$$

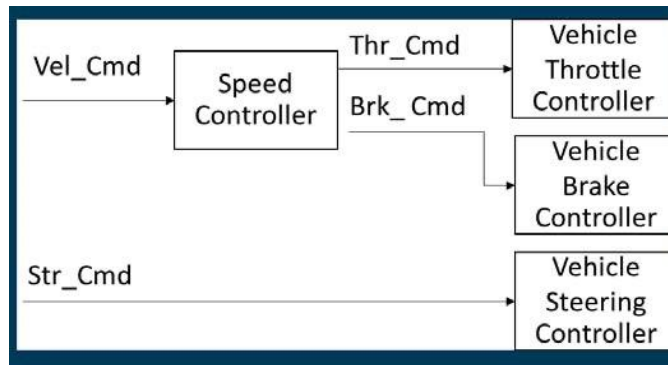
โดยค่าคำสั่งความเร็ว (vel_cmd) และคำสั่งองศาพวงมาลัย (str_cmd) จะถูกส่งไปยังขั้นตอน การควบคุมตัวกระตุ้นในรถยนต์ (Actuator Control) ต่อไป

5.2 การควบคุมตัวกระตุ้นในรถยนต์ (Actuator Control)

การควบคุมตัวกระตุ้นในรถยนต์ (Actuator Control) สามารถแบ่งออกได้เป็นการควบคุม 2 ระดับ คือ การควบคุมความเร็ว โดย Speed Controller และการควบคุมอุปกรณ์ภายในรถยนต์ (By-Wire system) 3 ระบบ ได้แก่ ระบบ Drive-by-wire ระบบ Brake-by-wire และ ระบบ Steer-by-wire

5.2.1 การควบคุมความเร็ว (Speed Controller)

การควบคุมความเร็ว (Speed Controller) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมคันเร่ง และเบรกของรถยนต์ โดยคำนวณค่าการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ จากความต่างของ vel_cmd และความเร็วในปัจจุบันของรถยนต์ก่อนที่จะได้ค่า คำสั่งความเร็ว (thr_cmd) และคำสั่งเบรก (brk_cmd) เพื่อควบคุมระบบควบคุมคันเร่งด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Drive-wire) และ ระบบควบคุมเบรกด้วยสัญญาณไฟฟ้า (Brake-by-wire) ดังแสดงในรูปที่ 5-3

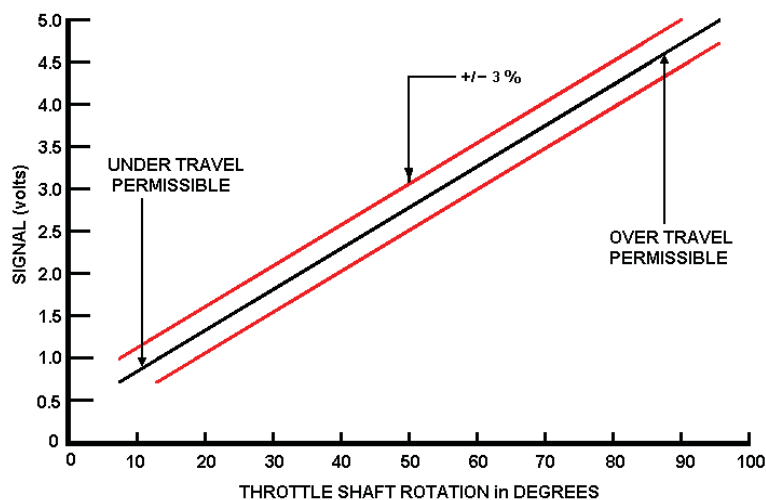


รูปที่ 5-3 การควบคุมตัวกระตุ้นในรถยนต์ (Actuator Control)

By-Wire System คือ ระบบที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของรถยนต์ด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า ด้วยกระบวนการสื่อสารแบบ CAN Protocol ซึ่งกระบวนการสื่อสารที่ได้รับความนิยมสำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในรถยนต์ โดยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของรถยนต์ประกอบไปด้วย 3 ระบบ ดังนี้

5.2.2 ระบบควบคุมคันเร่งด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Drive-by-wire)

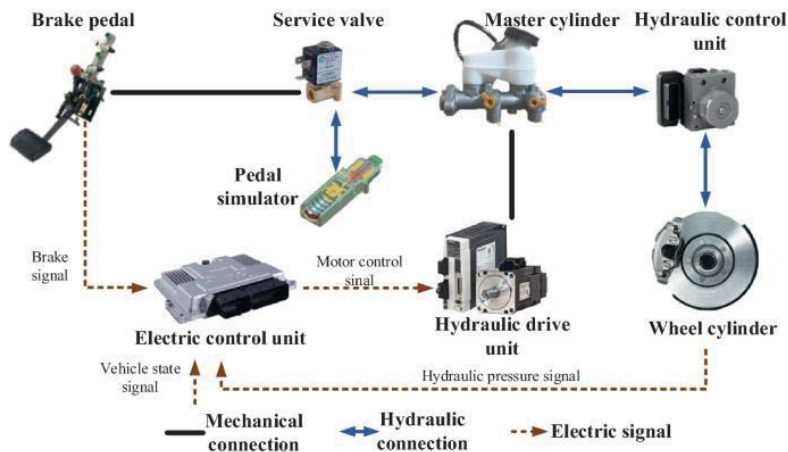
ณ ปัจจุบัน รถยนต์ส่วนใหญ่ได้หันมาใช้คันเร่งไฟฟ้าแทนคันเร่งสลิค โดย คันเร่งไฟฟ้าจะตรวจจับตำแหน่งของคันเร่งโดยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ คือ Potentiometer ซึ่งเป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ โดยสัญญาณทางไฟฟ้าที่ส่งออกมาจาก Potentiometer จะเป็นสัญญาณอนาล็อกที่มีแรงดันไฟฟ้าแปรผันตรงกับตำแหน่งของคันเร่ง กล่าวคือ แรงดันไฟฟ้าจะสูงเมื่อมีการเหยียบคันเร่งเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5-4 โดย การสั่งงานคันเร่งรถยนต์อัตโนมัติ สามารถทำได้โดยการส่งสัญญาณอนาล็อกที่มีค่าเท่ากับตำแหน่งของการเหยียบคันเร่ง



รูปที่ 5-4 ระบบควบคุมความเร็วด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Drive-by-wire)

5.2.3 ระบบควบคุมเบรกด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Brake-by-wire)

ในปัจจุบัน มีแนวโน้มที่จะใช้ Hydraulic drive unit เพื่อสร้างแรงดันน้ำมันเบรกภายในระบบเบรก แทนที่การใช้มอเตอร์กดผ้าเบรกโดยตรง ซึ่งเป็นระบบเก่าที่ออกแบบสำหรับการใช้งานกับระบบเบรกมือไฟฟ้า โดยระบบ Hydraulic drive unit จะถูกสั่งงานด้วย ECU ที่ได้รับข้อมูลการเหยียบเบรกมาจาก Potentiometer ที่ติดตั้งอยู่ที่แป้นเบรก เพื่อวัดตำแหน่งของการเหยียบเบรก โดยการทำงานของ Potentiometer ของแป้นเบรกนั้น มีลักษณะเหมือนกับ Potentiometer ของระบบ Drive-by-wire

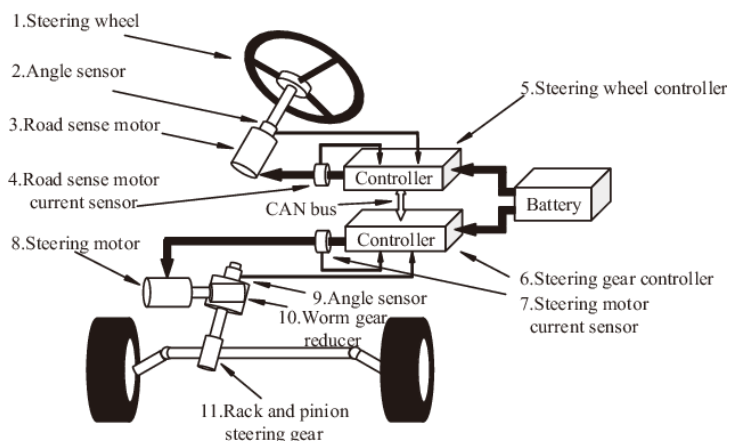


รูปที่ 5-5 ระบบควบคุมเบรกด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Brake-by-wire)

5.2.4 ระบบควบคุมพวงมาลัยด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Steer-by-wire)

ระบบ Steer-by-wire พัฒนามาจากระบบ Electric Power Steering ซึ่งเป็นอุปกรณ์ช่วยสร้างแรงเลี้ยวให้แก่ผู้ขับขี่ โดยในระบบ Steer-by-wire จะประกอบด้วย Controller 2 ตัว เพื่อทำหน้าที่ควบคุมพวงมาลัยเพื่อจำลองแรงต้านของการหักเลี้ยวพวงมาลัย และควบคุมมุมเลี้ยวที่ล้อรถยนต์ โดย Controller แต่ละตัวจะสื่อสารกันผ่าน CAN เพื่อส่งสัญญาณการเลี้ยวไปที่ Controller ที่ควบคุมการเลี้ยวของล้อได้

ทั้งนี้ กระบวนการสั่ง Electric Power Steering ให้บังคับพวงมาลัยไปยังองศาที่ต้องการผู้พัฒนาจำเป็นต้องจะต้องได้รับข้อมูลรูปแบบการส่งสัญญาณผ่าน CAN จากนั้นจึงคำนวณองศาพวงมาลัยจากคำสั่งองศาพวงมาลัย (str_cmd) เป็นค่าตัวเลขฐาน 16 ที่ระบบ Electric Power Steering ต้องการได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 5-6 ระบบควบคุมพวงมาลัยด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Steer-by-wire)