วิศวกรรมหุ่นยนต์ (Robotics Engineering)

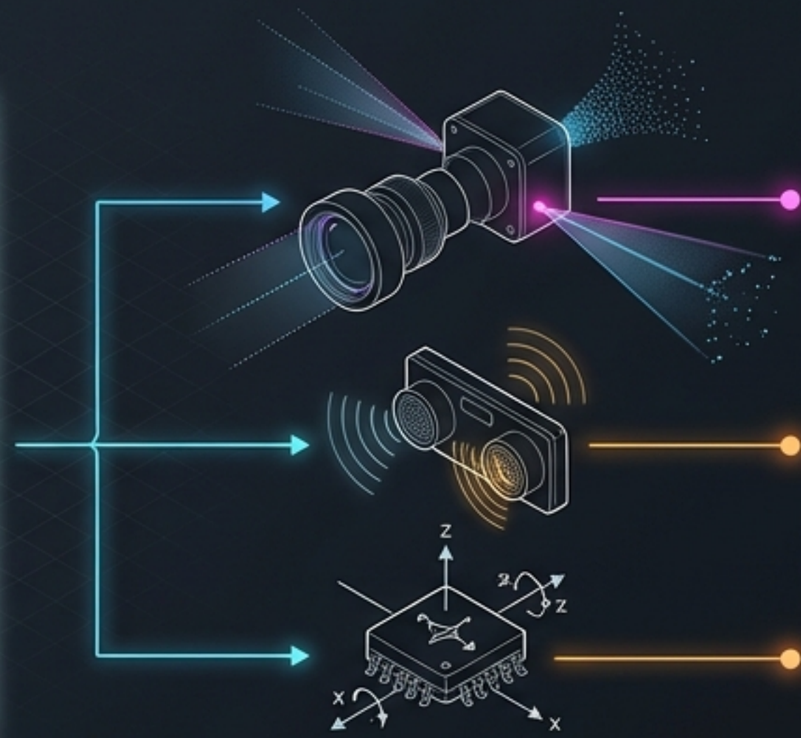
บทที่ 1.2: เจาะลึกระบบเซนเซอร์ (Sensing Layer) และการประมวลผลเบื้องต้น

ดวงตา ประสาทสัมผัส และการไขปริศนาข้อมูลของหุ่นยนต์อัตโนมัติ

NotebookLM

ดวงตาและประสาทสัมผัสของเครื่องจักร (The Eyes and Senses of the Machine)

ข้อมูลดิบจากสภาพแวดล้อมคือจุดเริ่มต้นของการทำงานทั้งหมด



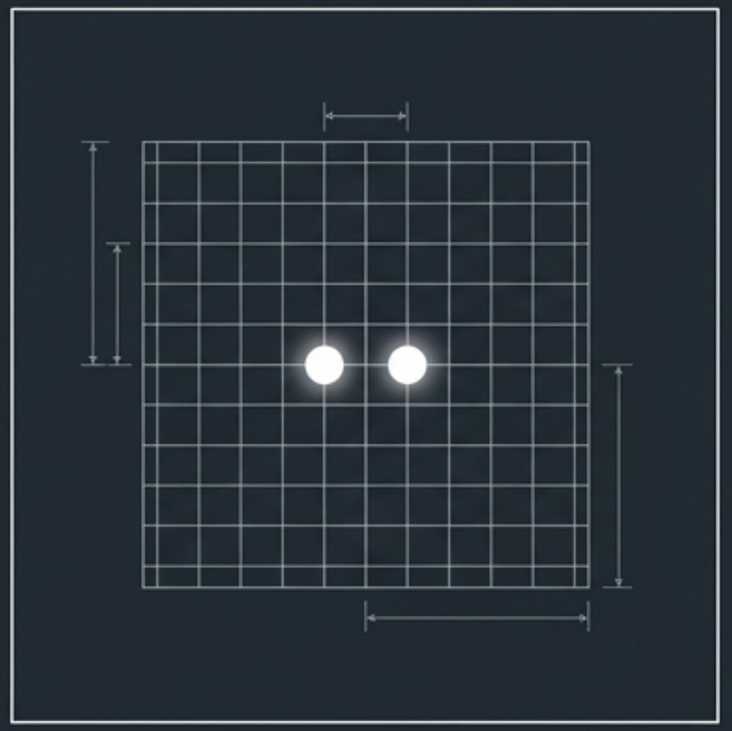
- Camera / LiDAR: การมองเห็นเชิงแสงและมิติพื้นที่
- Ultrasonic / Radar: การสะท้อนของคลื่นเสียงและคลื่นวิทยุ
- IMU: การรับรู้สภาพการเคลื่อนที่ของตนเอง (Self-state estimation)

กฎเหล็กทางวิศวกรรม: Sensing Layer คือเงื่อนไขที่ขาดไม่ได้ (Prerequisite)
หากข้อมูลเข้าผิดพลาด (Bad data in) -> การตัดสินใจจะล้มเหลวทันที (Fatal decisions out)

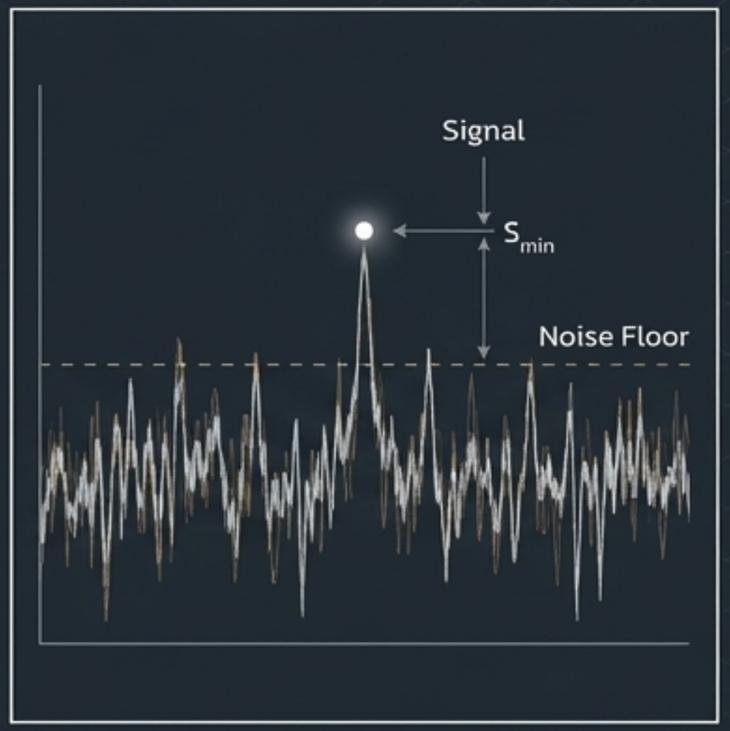
NotebookLM

ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ (Engineering KPIs): มาตรวัดความน่าเชื่อถือ

Accuracy (ความแม่นยำ) – ความถูกต้องของค่าที่วัดได้เมื่อเทียบกับความจริงเชิงขาคณิต (Ground Truth)



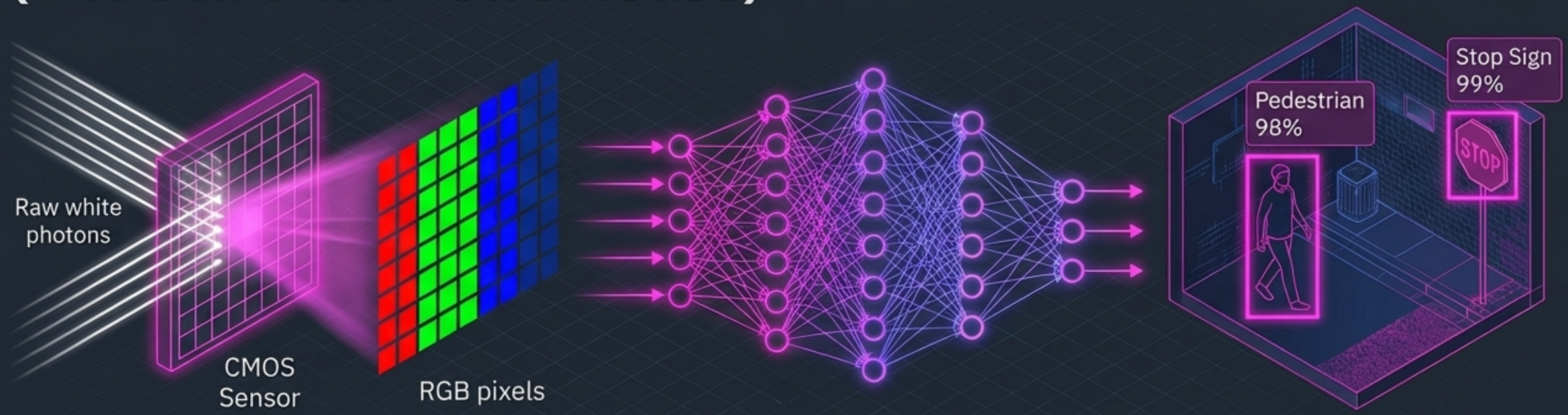
Resolution (ความละเอียด) – ขีดความสามารถในการแยกวัตถุที่อยู่ติดกันใน 3 มิติ (Range, Doppler, Angular)



Sensitivity (ความไว) – ค่ากำลังสัญญาณต่ำสุด (S_min) ที่ระบบสามารถตรวจจับได้เหนือระดับสัญญาณรบกวน (Noise Floor)

NotebookLM

Machine Vision: ขุมพลังแห่งการจำแนกอรรถศาสตร์ (The Semantic Powerhouse)



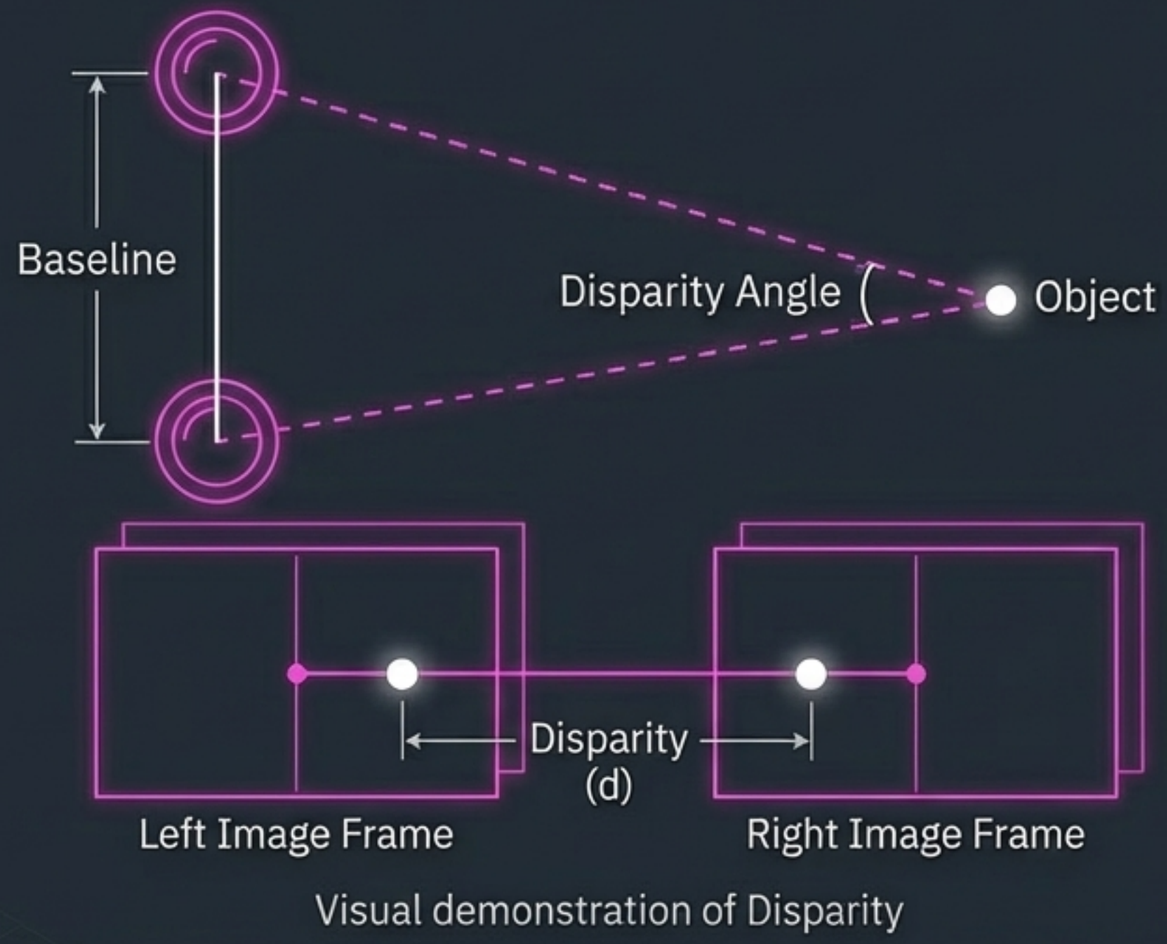
Photons –> CMOS Sensor –> RGB Pixels –> Deep Learning Network –> Classification

กล้องให้ข้อมูลที่มีความหนาแน่นทางอรรถศาสตร์ (Semantic Density) สูงที่สุด
ทำให้หุ่นยนต์เข้าใจ **‘บริบท’** (Context) ของสิ่งแวดล้อม

⚠ **ข้อจำกัดทางฟิสิกส์:** กล้องตอบได้ดีเยี่ยมว่าสิ่งนั้นคือ 'อะไร' แต่มีจุดอ่อนในการระบุว่าสิ่งนั้นอยู่ 'ที่ไหน' (ความลึก) และเปราะบางอย่างมากต่อสภาวะแสงหรือสภาพอากาศ (ฝนตกหนัก, หมอก, แสงสะท้อน)

NotebookLM

Stereo Vision: การสร้างมิติความลึกจากภาพ 2 มิติ



Visual demonstration of Disparity

การเลียนแบบดวงตามนุษย์ (3D Sensing)

- **Baseline**: ระยะห่างที่คงที่ระหว่างกล้องสองตัว
- **Disparity**: ความแตกต่างของตำแหน่งวัตถุที่ปรากฏในภาพซ้ายและขวา
- **Depth Map**: การใช้หลักการตรีโกณมิติ (Geometry) คำนวณความลึกจากค่า Disparity

ยิ่งวัตถุอยู่ใกล้ ค่า **Disparity** ยิ่งสูง -> ความแม่นยำในการวัดระยะด้วยกล้องจะลดลงในระยะไกล

NotebookLM

LiDAR: มาตรฐานทองคำแห่งมิติพื้นที่ (The Spatial Gold Standard)

Light Detection and Ranging (LiDAR) ใช้แสงเลเซอร์เพื่อสร้างโครงสร้างเรขาคณิตะของสิ่งแวดล้อมแบบเรียลไทม์

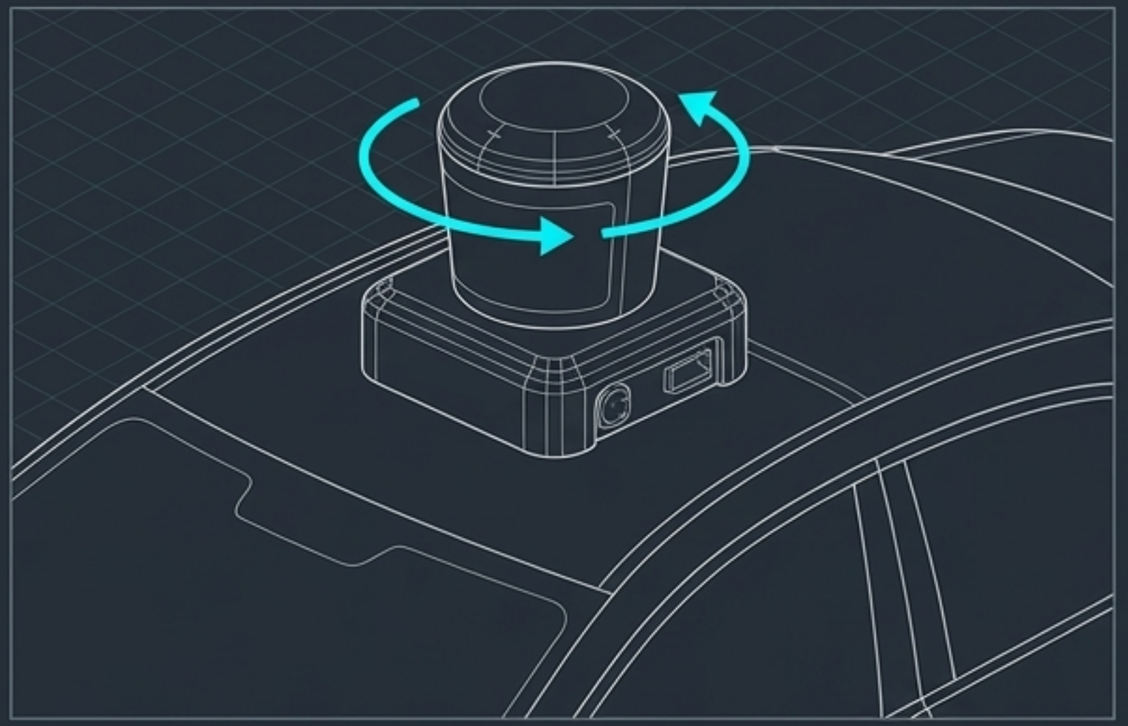
- สร้าง 3D Point Cloud ที่มีความแม่นยำสูงสุดในระยะใกล้และกลาง
- ให้ข้อมูล 'ความจริงอ้างอิง' (Ground Truth) ทางพื้นที่ที่กล้องและเรดาร์ทำไม่ได้

⚠ **ข้อจำกัดทางฟิสิกส์:** ประสิทธิภาพจะถูกลดทอนอย่างหนักเมื่อเผชิญกับอนุภาคในอากาศ เช่น ฝุ่น ควัน หมอกหนา หรือฝนตกหนัก ที่หักเหแสงเลเซอร์

NotebookLM

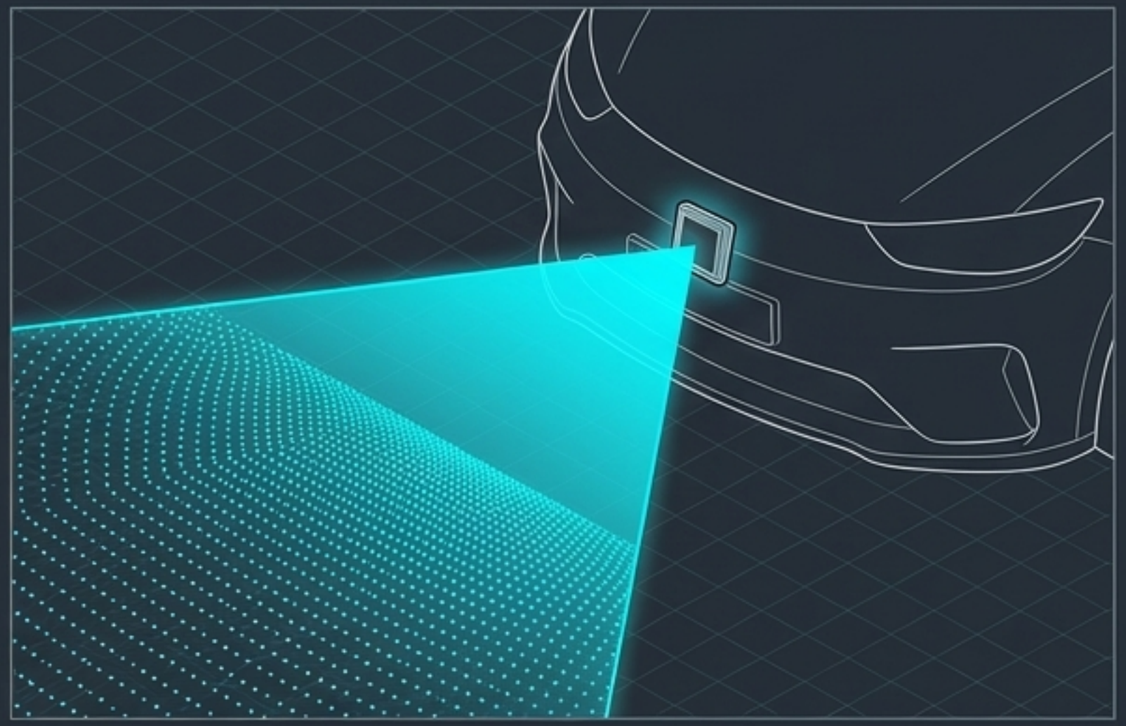
สถาปัตยกรรม LiDAR: สู่ยุคไร้ชิ้นส่วนเคลื่อนไหว (Flash vs. Solid-State)

Mechanical Spinning



- หมุนด้วยมอเตอร์เพื่อกวาดเลเซอร์ 360 องศา
- มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก และเสื่อมสภาพจากการเคลื่อนไหว (Moving parts)

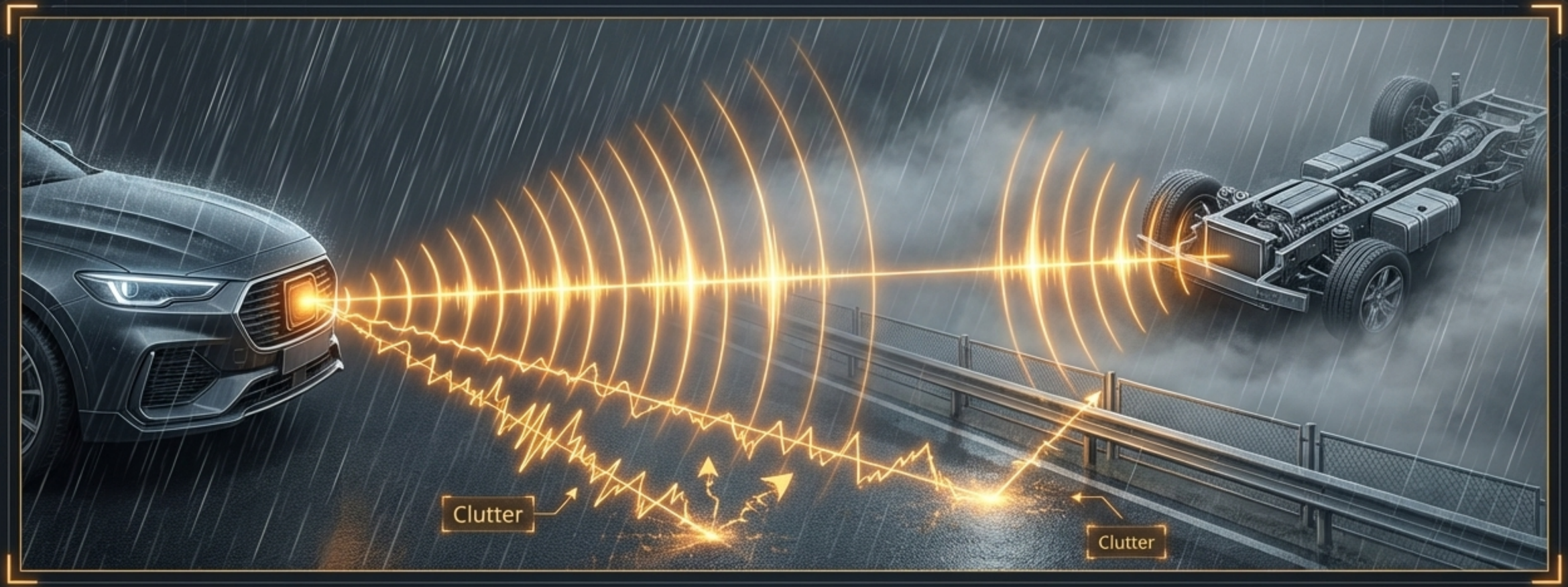
Solid-State & Flash



- Flash LiDAR: ยิงแสงครอบคลุมทั้งฉากในครั้งเดียว (เหมือนแฟลชกล้อง)
- ทนทานสูง ปรับขนาดให้เล็กเพื่อฝังในตัวถังรถยนต์ (Aesthetic integration)
- เป็นทิศทางหลักในการพัฒนาระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติในปัจจุบัน

NotebookLM

Radar Systems: ทหารผ่านศึกผู้ทนทานต่อสภาพอากาศ



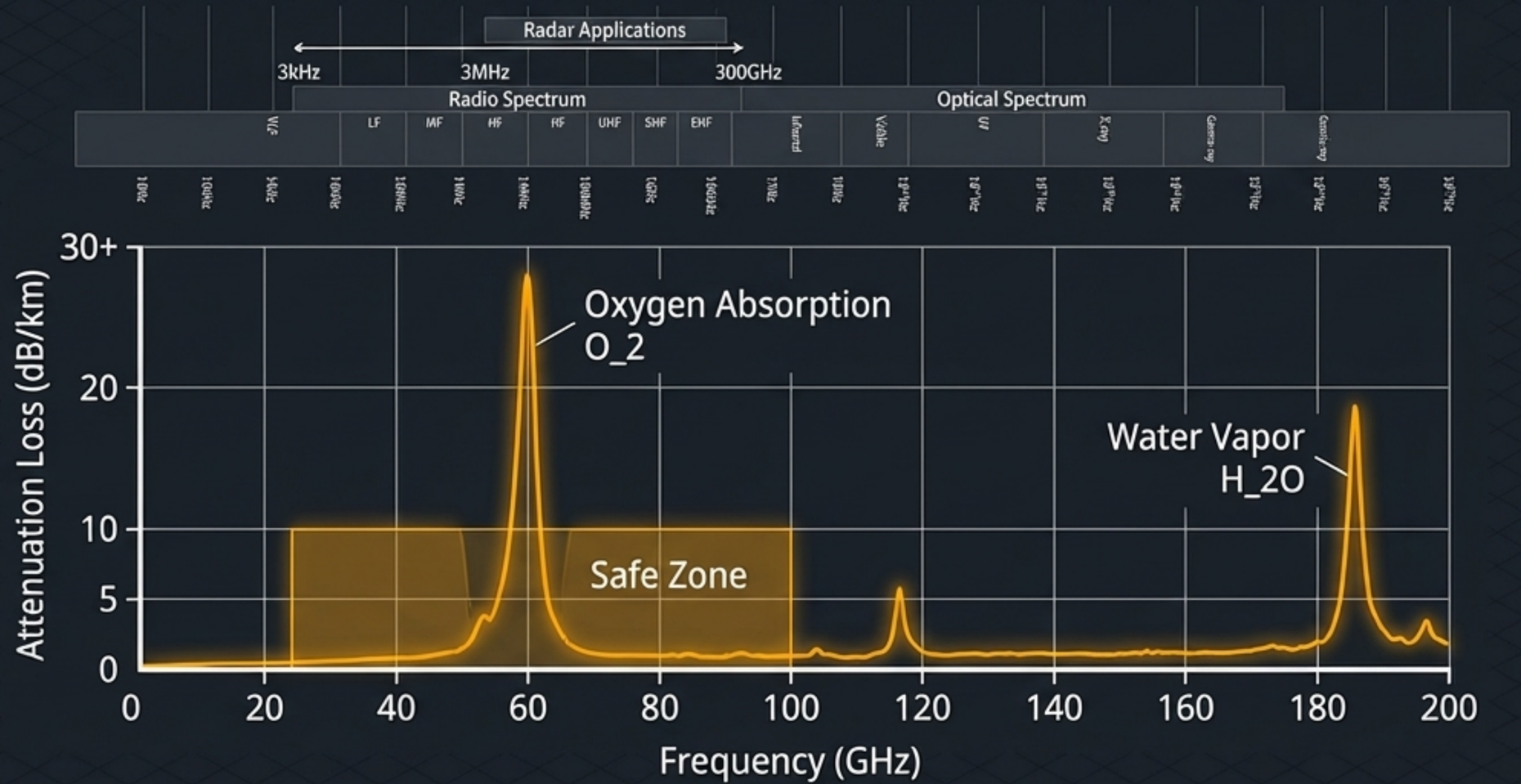
ทำงานโดยไม่สนใจสภาวะแสง สี หรือสภาพอากาศที่ย่ำแย่

- ทำงานได้ดีเยี่ยมในการวัดระยะทางไกลและความเร็ว (Doppler)
- สามารถติดตั้งซ่อนไว้หลังกันชนได้โดยไม่เสียความสวยงาม

ข้อจำกัดทางฟิสิกส์: มีความละเอียด (Resolution) ต่ำ และได้รับผลกระทบอย่างหนักจาก 'Clutter' หรือสัญญาณรบกวนที่สะท้อนจากพื้นถนนและโครงสร้างข้างทาง (Roadside structures)

NotebookLM

ฟิสิกส์ของเรดาร์: สเปกตรัม 24-100 GHz และการลดทอนสัญญาณ (Attenuation)

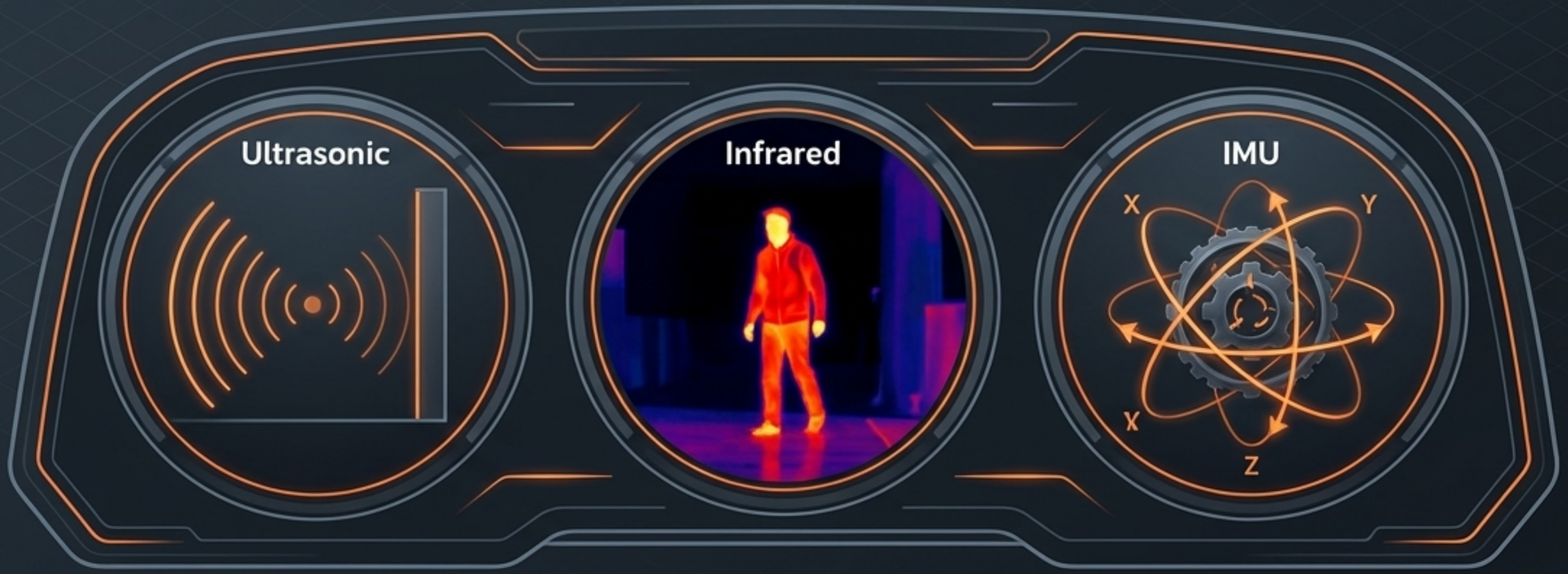


คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีจุดบอดที่ธรรมชาติสร้างขึ้น วิศวกรต้องหลีกเลี่ยงหรือประยุกต์ใช้จุดบอดเหล่านี้

- 22.24 GHz & 184 GHz: จุดสูงสุดของการดูดกลืนโดยไอน้ำ (Water Vapor)
- 60 GHz & 118 GHz: จุดสูงสุดของการดูดกลืนโดยโมเลกุลออกซิเจน (Oxygen) -> อัตราการลดทอนสูงกว่า 10 dB/km
- วิศวกรยานยนต์จึงต้องออกแบบเรดาร์ให้อยู่ในย่านความถี่ที่ปลอดภัย (เช่น 77 GHz) เพื่อระยะการตรวจจับที่ไกลที่สุด

NotebookLM

เซนเซอร์เสริม (The Supplementary Arsenal): สร้างความซ้ำซ้อนเพื่อความปลอดภัย (Redundancy)



Ultrasonic - คลื่นเสียงความถี่สูง ใช้สำหรับการวัดระยะประชิด (Short-range) เช่น ระบบช่วยจอดรถ (Parking Assistance)

Infrared - ตรวจจับความร้อน (Thermal signature) ของสิ่งมีชีวิต ทำงานได้แม้ทัศนวิสัยเป็นศูนย์ (Pitch black)

IMU (Inertial Measurement Unit) - ประกอบด้วย Gyroscope และ Accelerometer ใช้เพื่อระบุ 'สภาพของตนเอง' (Self-state estimation) เช่น อัตราการหมุนและการเคลื่อนที่ของตัวรถ

NotebookLM

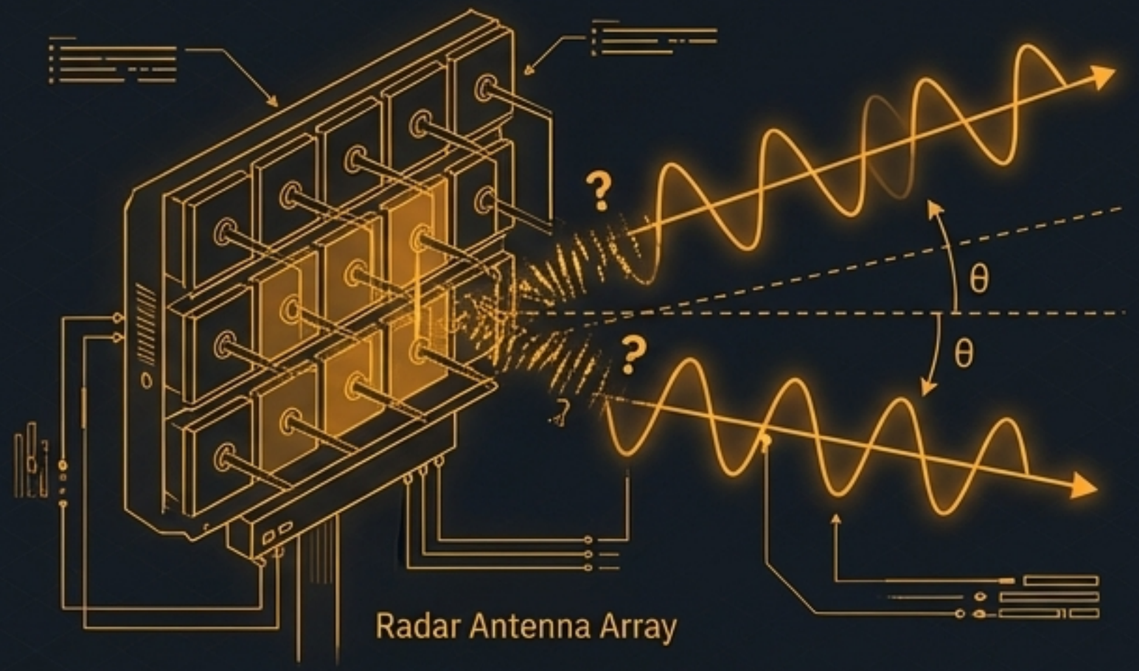
ตารางเปรียบเทียบเซนเซอร์ (The Sensor Triad Matrix)

	Radar	LiDAR	Camera
ความทนทานต่อสภาพอากาศ (Weather)	Strength	Weakness	Weakness
ความแม่นยำระยะไกล (Distance)	Strength	Moderate	Weakness
การจำแนกประเภทวัตถุ (Classification)	Weakness (Micro-Doppler only)	Moderate (3D shape)	Strength (Semantics/Color)
ทนทานต่อสัญญาณรบกวน (Clutter/Noise)	Weakness (Road clutter)	Moderate (Dust)	Moderate (Glare/Shadows)
ความง่ายในการติดตั้ง (Installation)	Strength (Behind bumper)	Weakness (Needs open roof)	Moderate (Behind glass)

บทสรุป: ไม่มีเซนเซอร์ใดสมบูรณ์แบบในตัวเอง (No single sensor is perfect).

NotebookLM

ข้อบกพร่องทางฟิสิกส์ของเครื่องจักร: Phase Wrapping และ Spatial Aliasing



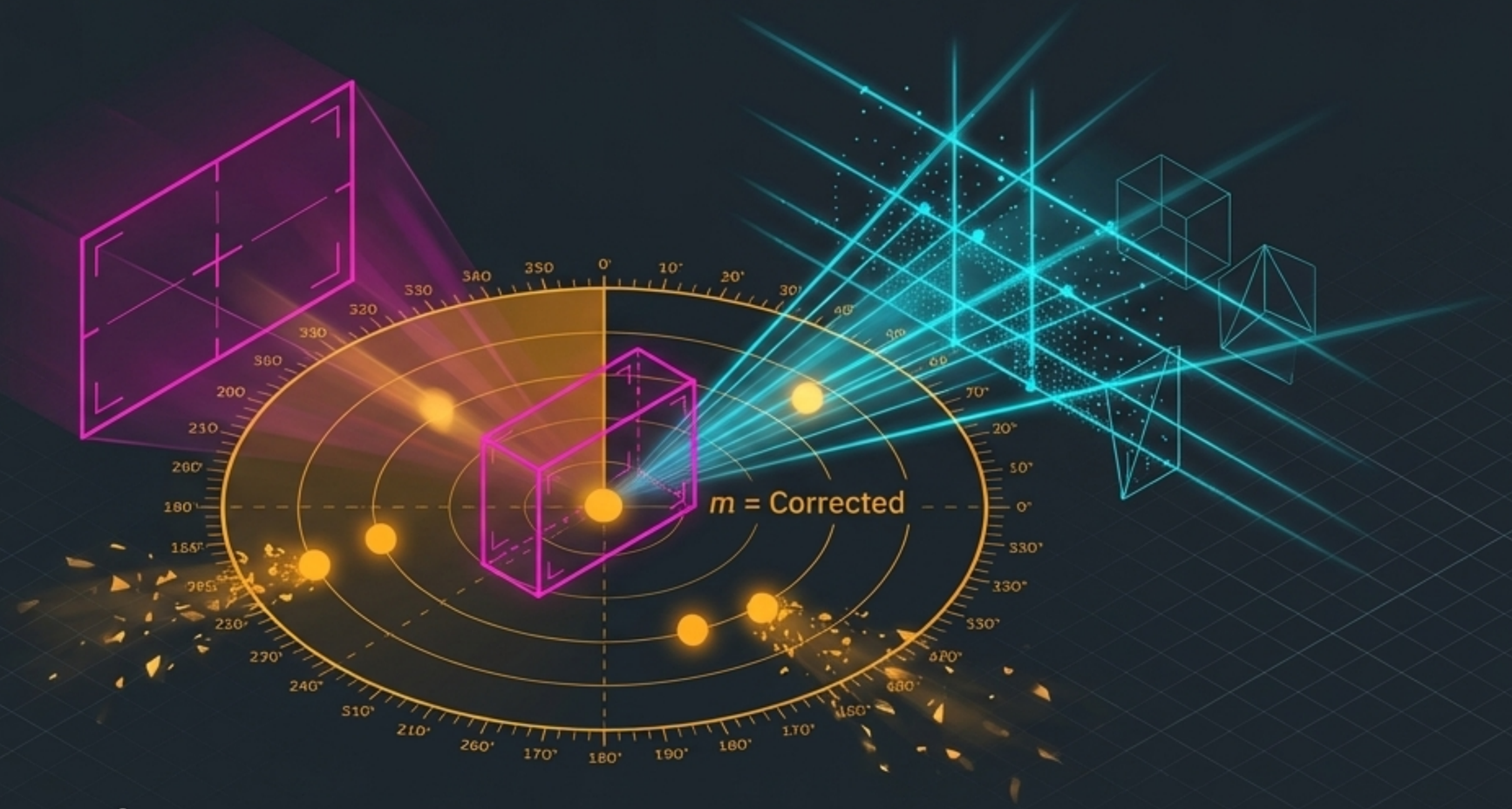
ปัญหาใหญ่ในการวัดมุมของสายอากาศแบบอาเรย์ (Antenna Array)

- **Phase Wrapping:** เมื่อคลื่นสะท้อนกลับมาซ้อนทับกัน ระบบเรดาร์ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างทางคณิตศาสตร์ระหว่างมุม **ϕ** และ **ϕ ± πm** ได้
- ผลลัพธ์ **(Spatial Aliasing):** ทำให้เกิด **'เป้าหมายผี' (Ghost Targets)** หรือ**มุมปลอม (False angles)** ปรากฏบนหน้าจอเรดาร์

⚠ หากระบบสั่งเบรกกะทันหันเพราะ Ghost Target -> จะนำไปสู่อุบัติเหตุร้ายแรง!

NotebookLM

Sensor Fusion: การไขปริศนาด้วยความจริงอ้างอิง (The Ground Truth Resolver)



การรวมข้อมูลเซนเซอร์เพื่อกำจัดความผิดพลาดเชิงฟิสิกส์

- • เรานำข้อมูลเรขาคณิตที่แม่นยำจาก Camera และ LiDAR มาใช้เป็น ‘ความจริงอ้างอิง’ (Ground Truth)
- • เทียบระยะที่ได้กับเป้าหมายเรดาร์ เพื่อหาค่า m ที่ถูกต้องในสมการ Phase Wrapping
- • เป้าหมายผี (Ghost Targets) ถูกกำจัดทันที ความน่าเชื่อถือของระบบพุ่งสูงสุด (Maximum Reliability)

NotebookLM

ความท้าทายระดับ Level 5: ขีดจำกัดทางวิศวกรรมฮาร์ดแวร์

สู่ระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ปราศจากการแทรกแซงของมนุษย์ (Zero Human Intervention)

- The Signal Processing Masterclass: ไม่ใช่แค่การเพิ่มจำนวนเซนเซอร์ แต่ต้องประมวลผลสัญญาณ (Efficient Signal Processing) อย่างชาญฉลาดที่สุด
- ข้อจำกัดเชิงกายภาพสุดขั้ว: – ฮาร์ดแวร์ (เช่น เรดาร์) ต้องมีน้ำหนัก ต่ำกว่า 200 กรัม เพื่อซ่อนหลังกันชน (Bumper fascia)
  – ประมวลผลข้อมูลมหาศาล (Sensor Fusion) ภายใต้เวลาหน่วงที่เป็นศูนย์ (Zero Latency)

NotebookLM

ทบทวนและวิเคราะห์ (Review & Reflection)

ก้าวสู่วิถีคิดของวิศวกรระบบหุ่นยนต์อัตโนมัติ

The Power Scale:
หากต้องการเพิ่มระยะตรวจจับสูงสุดของเรดาร์จาก 150 เมตร เป็น 300 เมตร วิศวกรต้องออกแบบกำลังส่ง (Transmitted Power) เพิ่มขึ้นกี่เท่า?

The 60GHz Dilemma:
ทำไมการออกแบบเรดาร์สำหรับยานยนต์ที่ความถี่ 60 GHz จึงเป็นเรื่องท้าทายอย่างมากในสภาพอากาศปกติ?

The LFMCW Ghost:
อธิบายหลักการที่ Sensor Fusion นำข้อมูลจากกล้องมาแก้ปัญหาเป้าหมายหลอก (Ghost targets) ในระบบเรดาร์ LFMCW ท่ามกลางจราจรหนาแน่น

The Perception Grid is now online. Good luck, Engineers.

NotebookLM