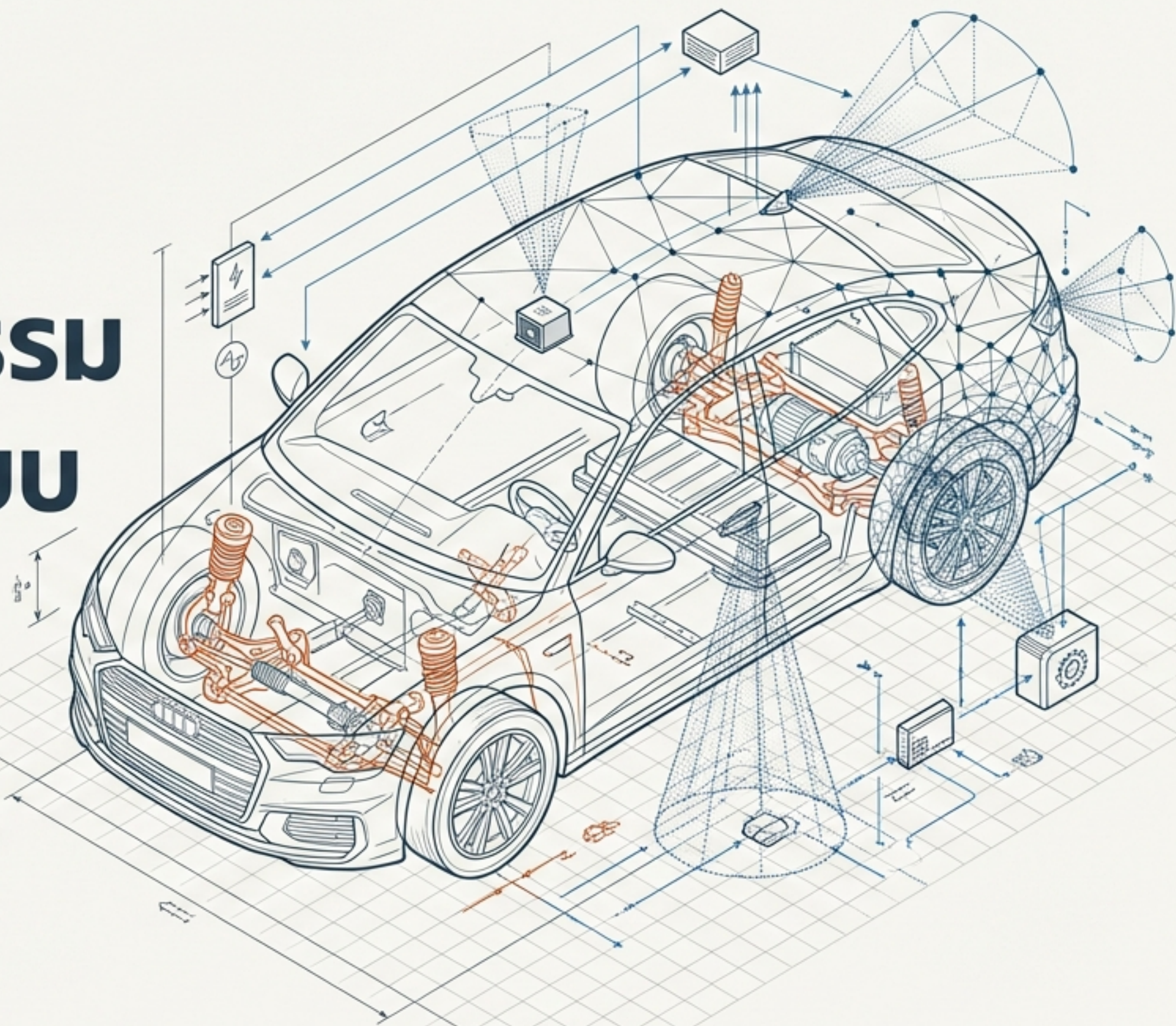


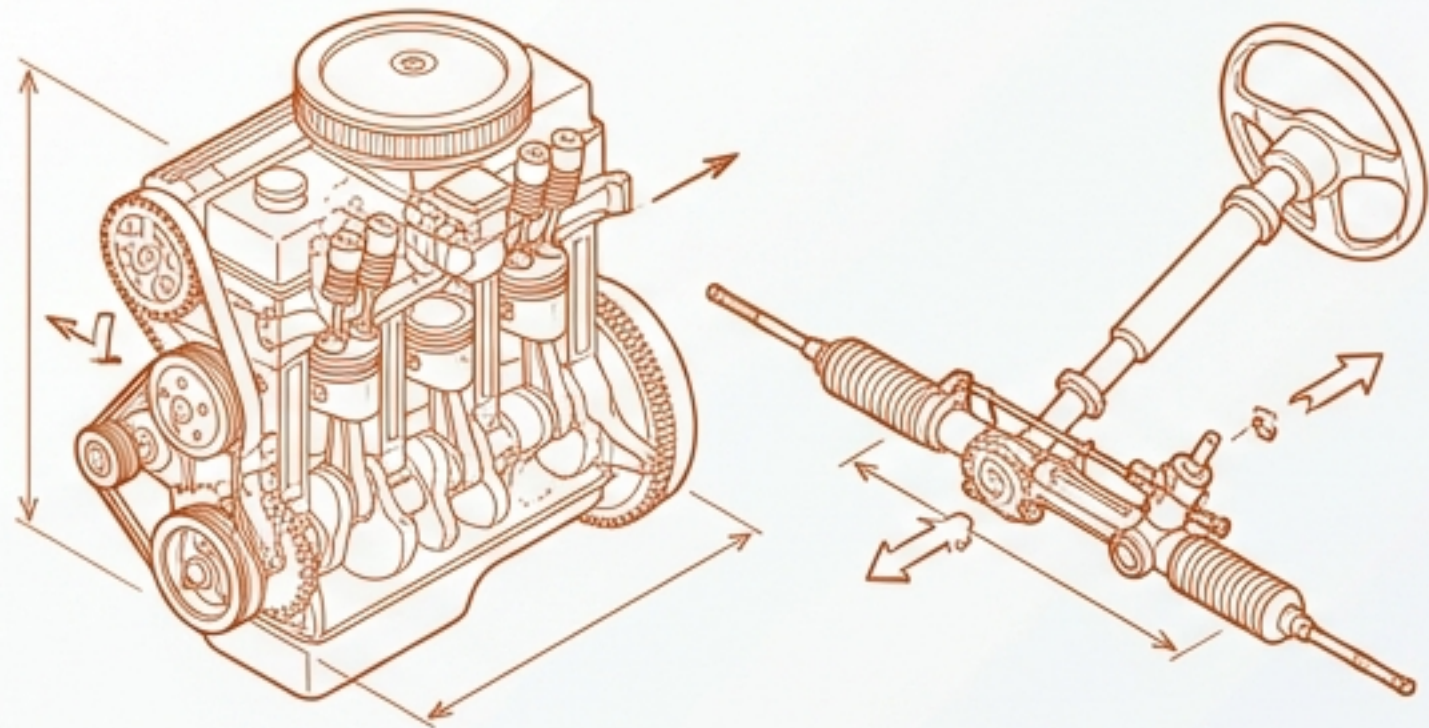
พิมพ์เขียวแห่งไซเบอร์เนติกส์

บทที่ 1: สถาปัตยกรรม และพื้นฐานของระบบ หุ่นยนต์อัตโนมัติ

บทที่ 1.1: ประวัติและสถาปัตยกรรม
ระดับสูงของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ

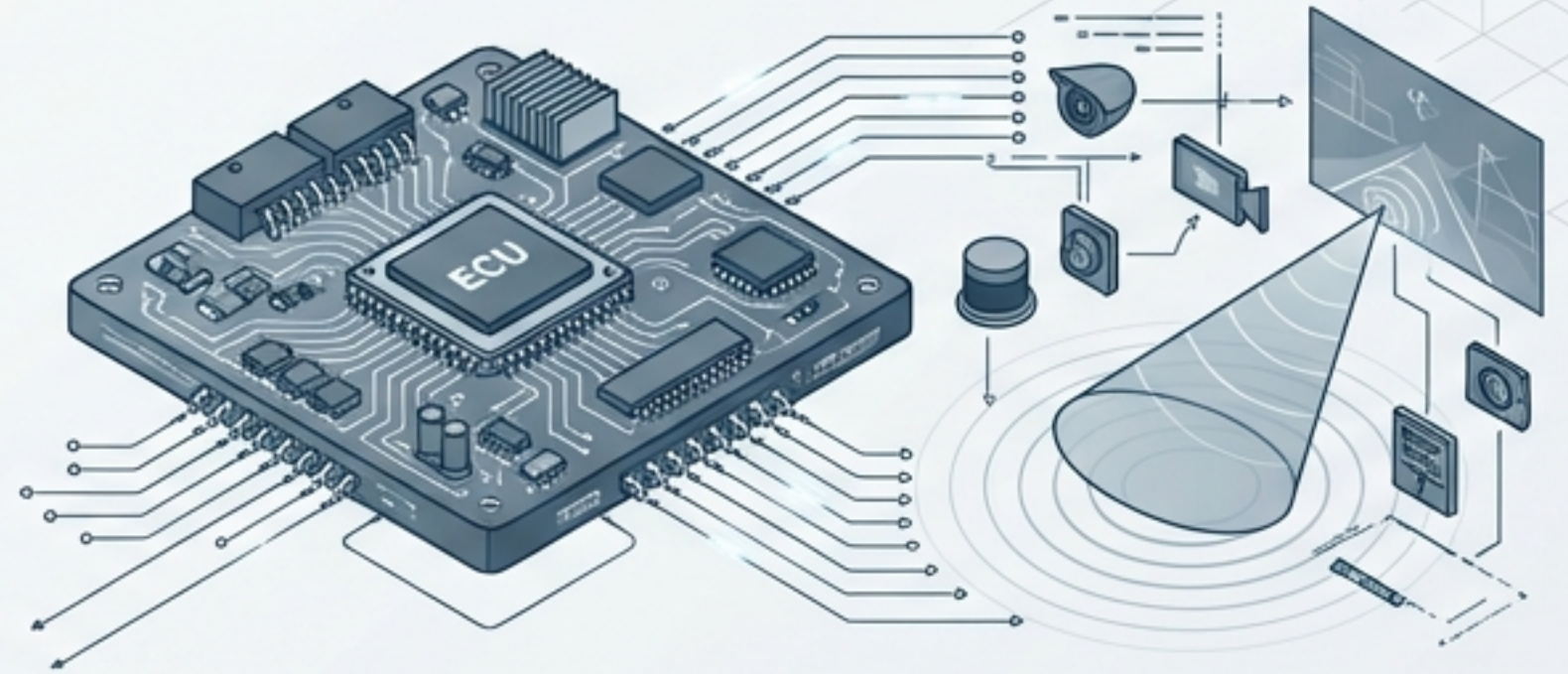


จากยานยนต์กลไก สู่ หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัจฉริยะ



ยุคดั้งเดิม (Mechanical Era)

- ควบคุมด้วยแรงทางกล (Mechanical Force)
- ผู้ขับขี่เป็นศูนย์กลาง 100%
- ทำงานแบบโดดเดี่ยว (Isolated)

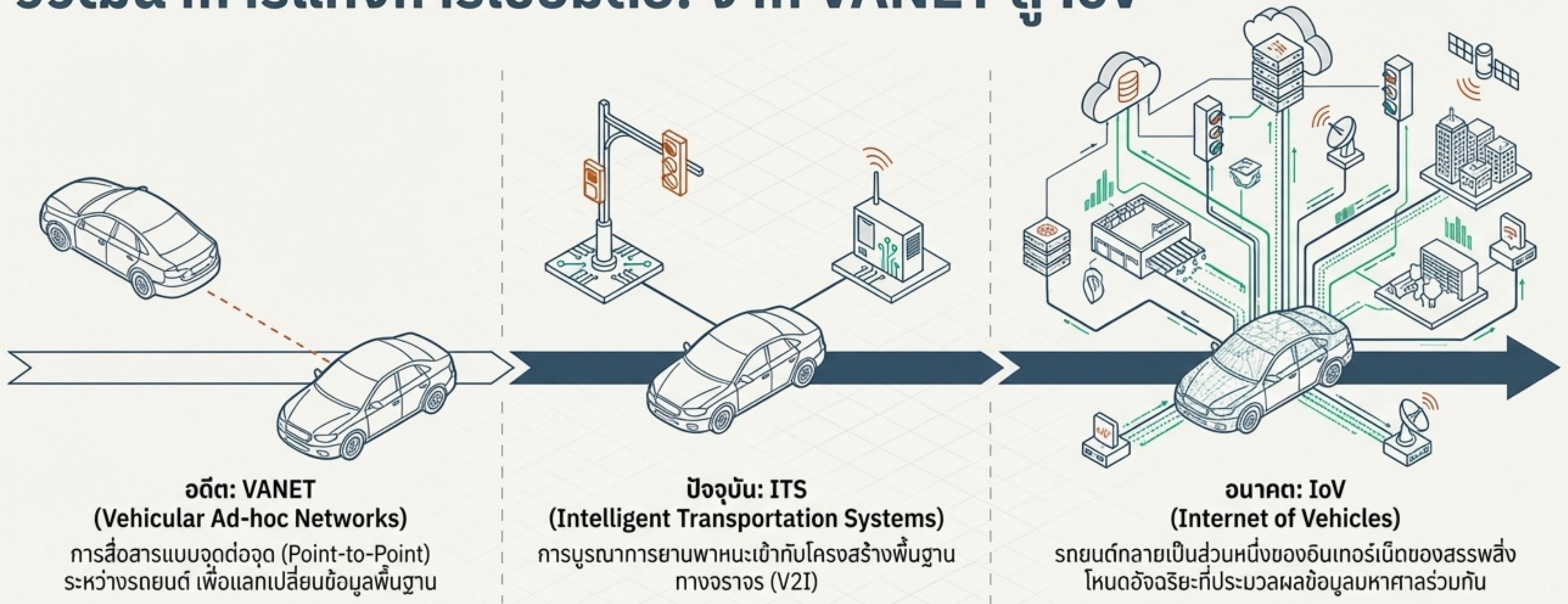


ยุคปัจจุบัน (Robotics Era)

- ควบคุมด้วยข้อมูล (Data-Driven)
- การประมวลผลอัลกอริทึม (Algorithmic Processing)
- ตัวรถคือโหนดคอมพิวเตอร์เคลื่อนที่ (Mobile Computing Node)

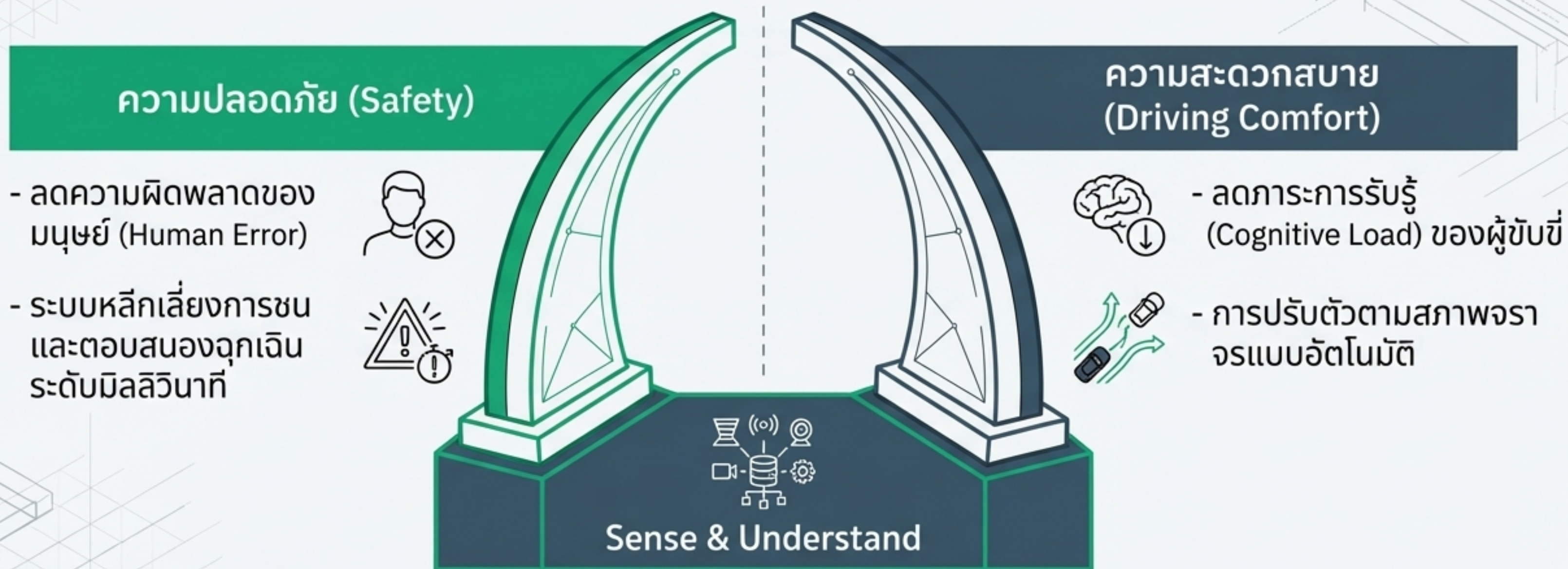
ยานยนต์สมัยใหม่ไม่ใช่เพียงพาหนะ แต่คือระบบหุ่นยนต์อัตโนมัติ (Autonomous Robotic System) ที่มีความสามารถในการรับรู้และตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมได้แบบเรียลไทม์

วิวัฒนาการแห่งการเชื่อมต่อ: จาก VANET สู่ IoV



Radar as the Enabling Technology
ตามที่เสนอของ Jonah Gamba (2020) เทคโนโลยีเรดาร์คือหัวใจสำคัญที่ทำให้วิวัฒนาการนี้เป็นจริง โดยทำหน้าที่เป็นดวงตาที่ไม่ย่อท้อต่อสภาพแวดล้อม

เป้าหมายสูงสุดของสถาปัตยกรรมหุ่นยนต์อัตโนมัติ



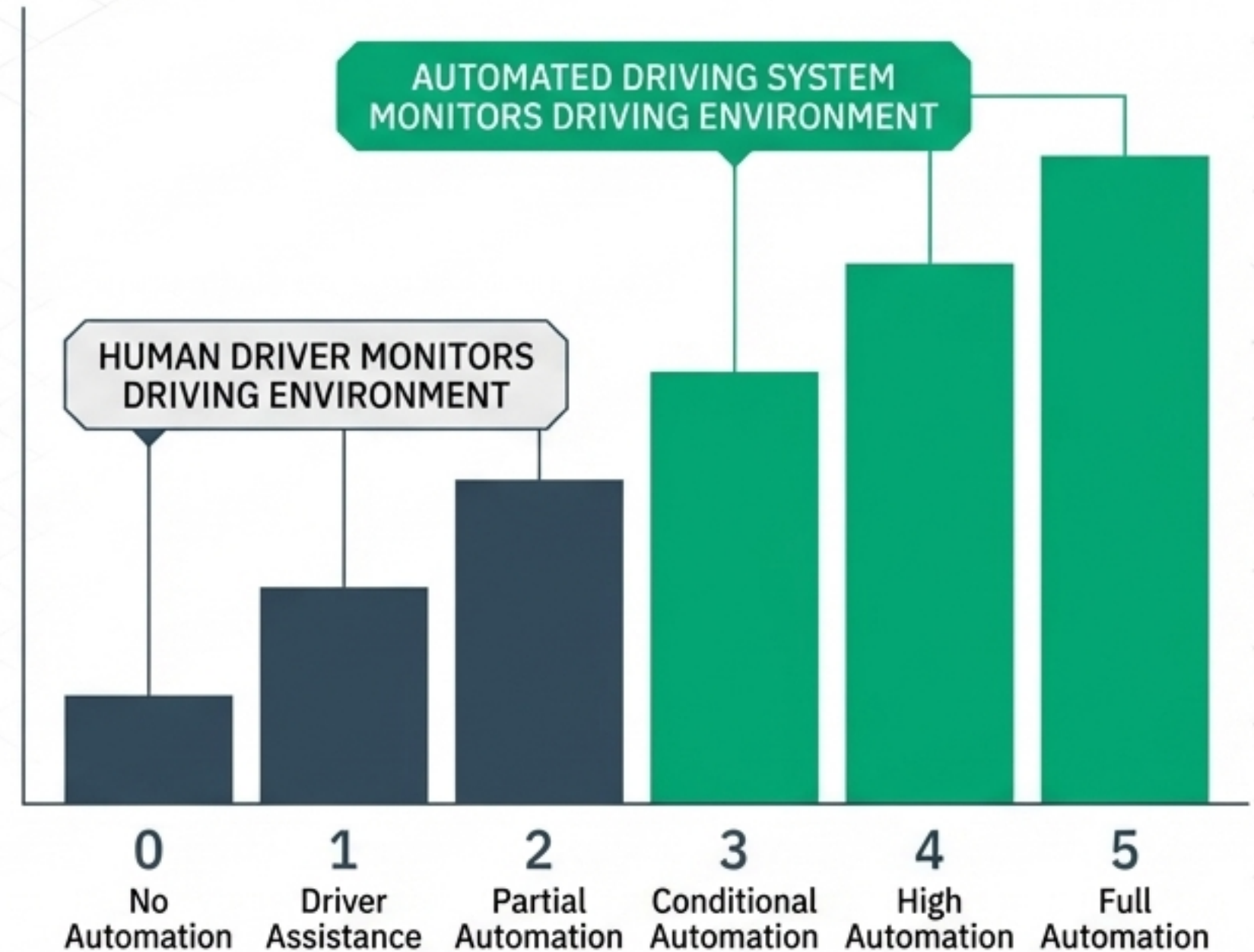
ความสำเร็จของทั้งสองเป้าหมาย พึ่งพาความสามารถของระบบในการตรวจจับ (Sensing) และ เข้าใจ (Perception) สภาพแวดล้อมรอบตัวได้อย่างแม่นยำสมบูรณ์

มาตรฐาน SAE J3016: บรรทัดฐานทางวิศวกรรมยานยนต์อัตโนมัติ

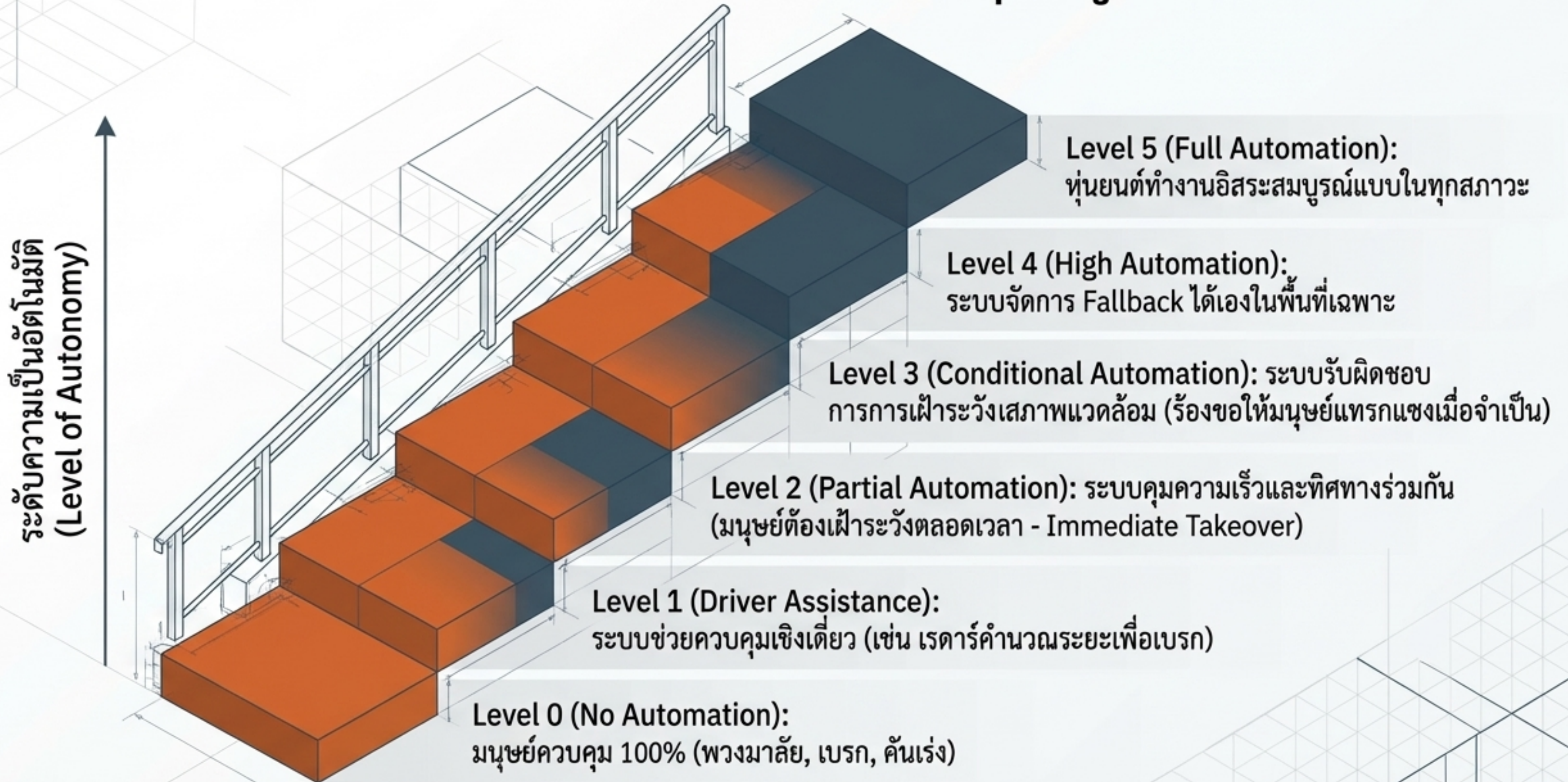
ทำไมวิศวกรจึงต้องใช้มาตรฐานนี้?

- ✓ เป็นโครงสร้างการจำแนกประเภท (Taxonomy) อย่างเป็นทางการ (Level 0 ถึง 5)
- ✓ กำหนดสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ (Hardware Architecture) และความซับซ้อนของซอฟต์แวร์
- ✓ แบ่งแยกขอบเขตความรับผิดชอบ (Responsibility Boundary) ระหว่างมนุษย์ และ ระบบอัลกอริทึมอย่างชัดเจน

ระดับการขับขี่อัตโนมัติ



การถ่ายโอนความรับผิดชอบ: จากมนุษย์สู่เครื่องจักร



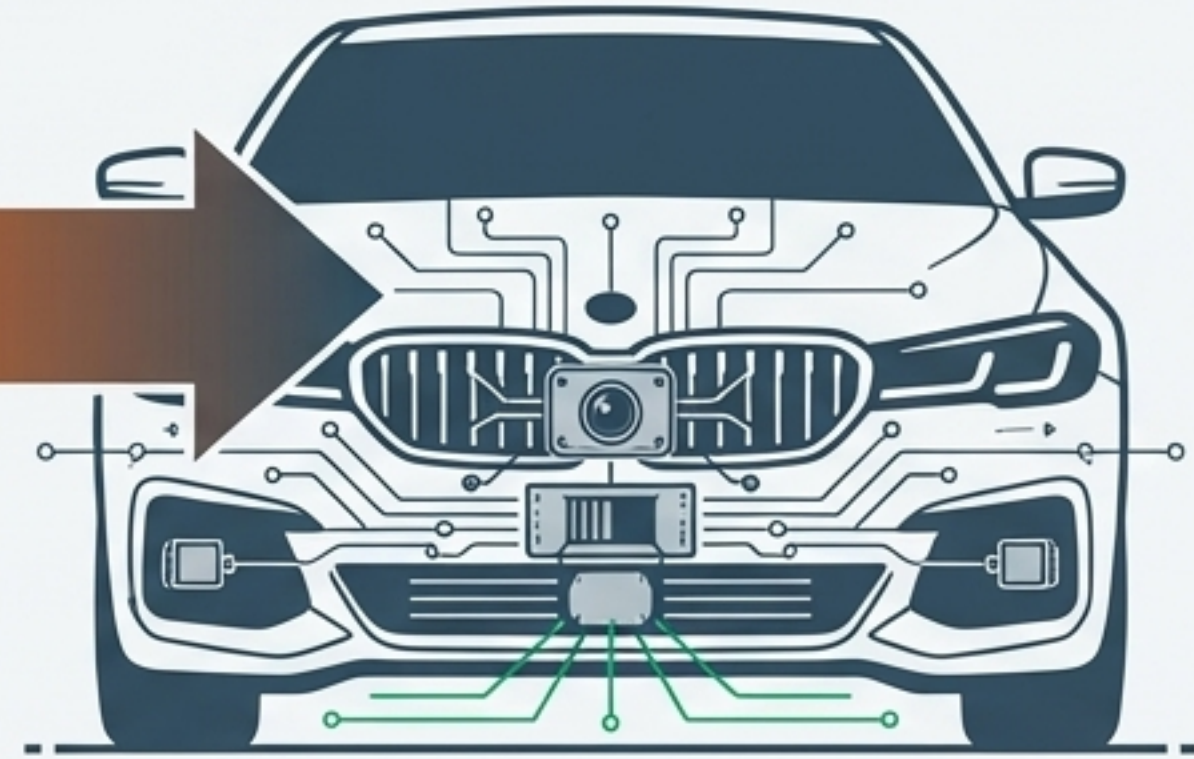
จุดเปลี่ยนสำคัญทางวิศวกรรม (The Technical Pivot)

Level 2



มนุษย์ = ผู้ประเมินสภาพแวดล้อมหลัก (Main Environment Monitor)
ระบบ = ผู้ช่วยทำตามคำสั่ง

Level 3



ระบบ = ผู้ประเมินสภาพแวดล้อมหลัก (System Monitors Environment)
มนุษย์ = ผู้รับช่วงต่อเมื่อได้รับการร้องขอ (Requested Intervene)

Key Synthesis

การก้าวข้ามจาก Level 2 ไป Level 3 ต้องการความน่าเชื่อถือของการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing Reliability) ที่เพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดด เนื่องจาก **สายตาและวิจารณ์ญาณ** ถูกย้ายไปที่เซนเซอร์โดยสมบูรณ์

ปลายทางแห่งวิวัฒนาการ: SAE Level 5



อิสระสมบูรณ์แบบ (Full Autonomy):
ทำงานได้ในทุกสภาพถนน ทุกความเร็ว
และทุกสภาวะอากาศ



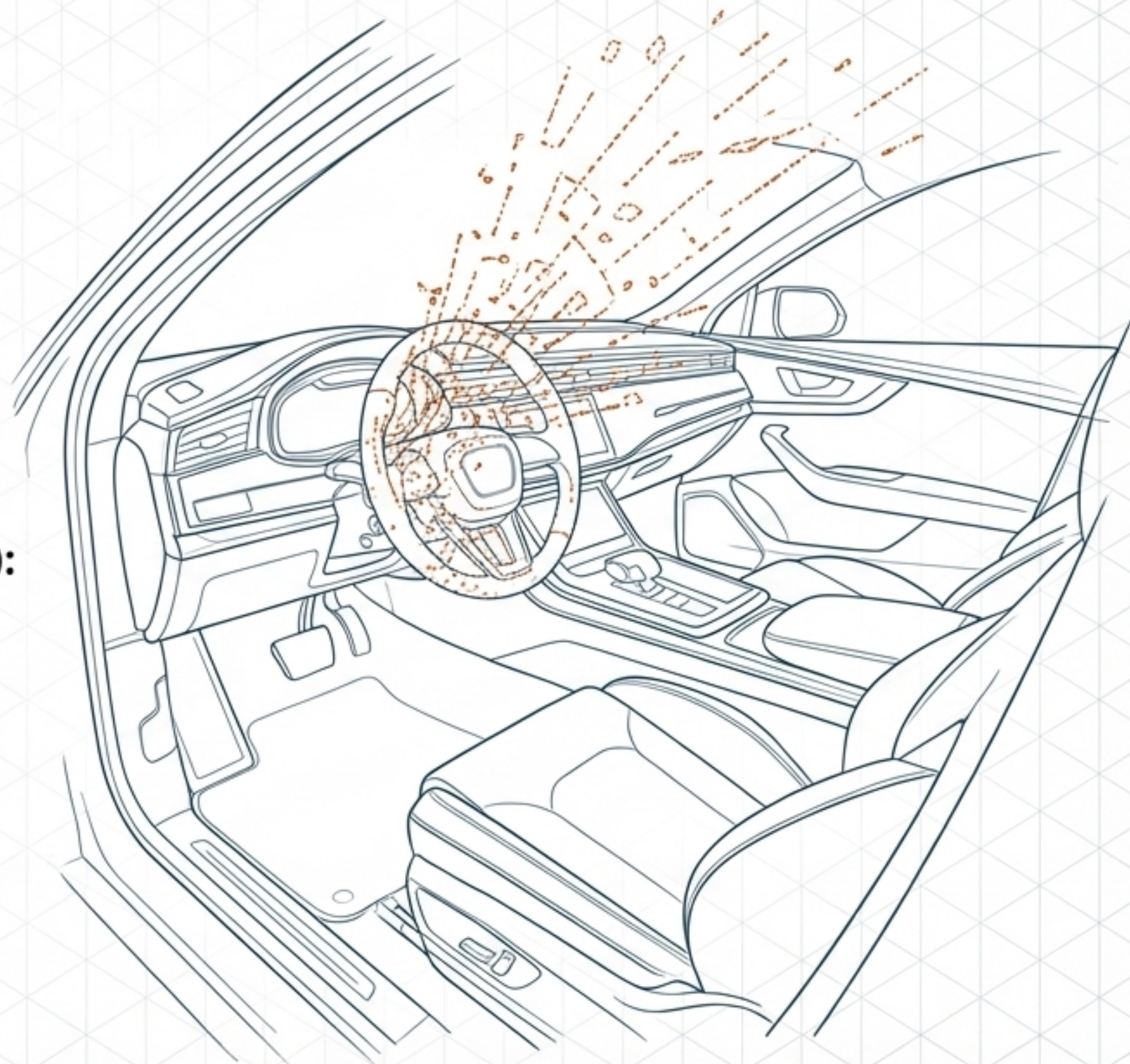
ไร้การแทรกแซง (Zero Human Intervention):
'Human driver is not required'
พวงมาลัยและเป็นเหยียบกลายเป็นสิ่งไม่จำเป็น



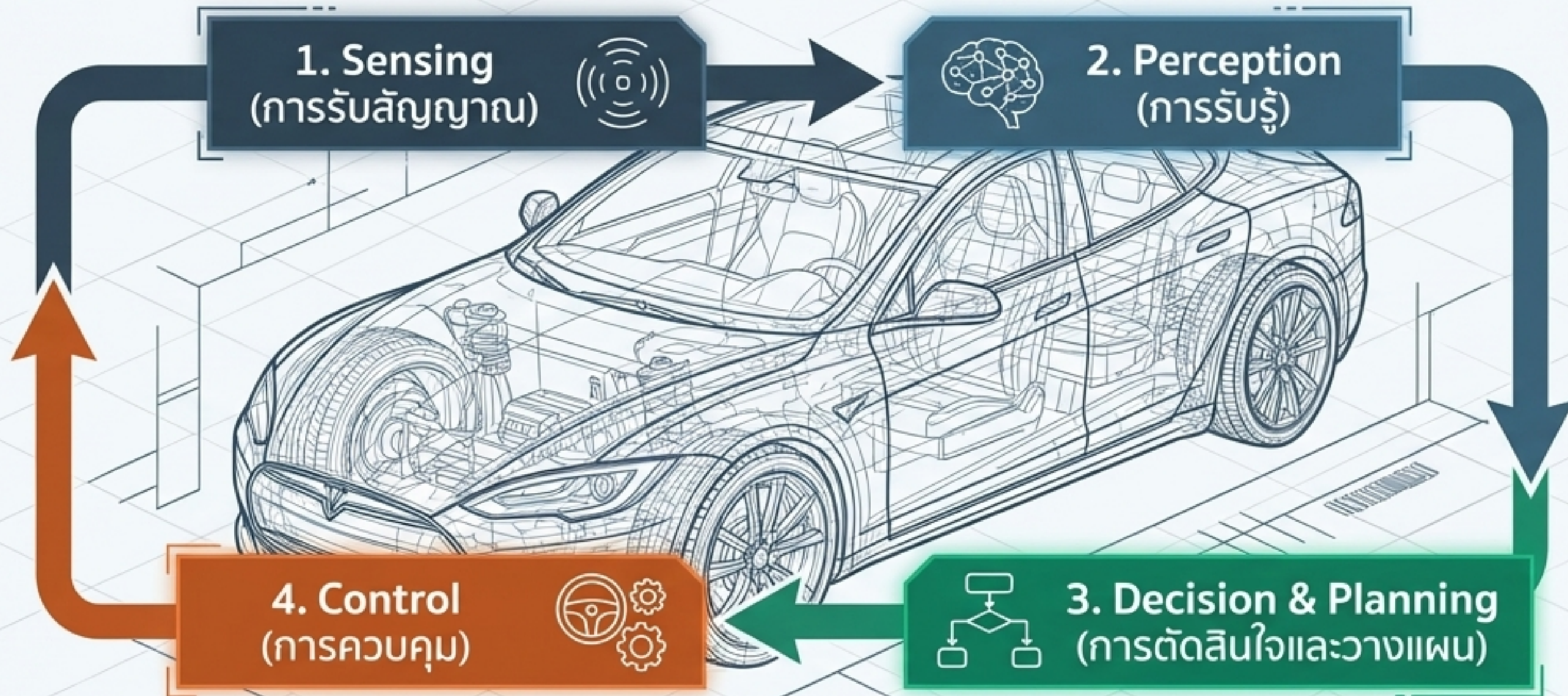
การจัดการความเสี่ยง (Minimum Risk Condition):
อัลกอริทึมจัดการสภาวะฉุกเฉินและ Fallback
ได้ด้วยตัวเองทั้งหมด



เทคโนโลยีขับเคลื่อน (The Core Enabler):
Radar และ Sensor Fusion คือองค์ประกอบหลักที่
ทดแทนประสาทสัมผัสของมนุษย์อย่างสมบูรณ์แบบ



กายวิภาคของความอัตโนมัติ (High-Level Architecture)



Key Insight

สถาปัตยกรรมแบบลำดับชั้น (Hierarchical Architecture) ที่ทำงานเป็นวงจรปิด (Closed-loop) แบบเรียลไทม์ เปลี่ยน 'ข้อมูลดิบ' ให้กลายเป็น 'แรงทางกายภาพ'

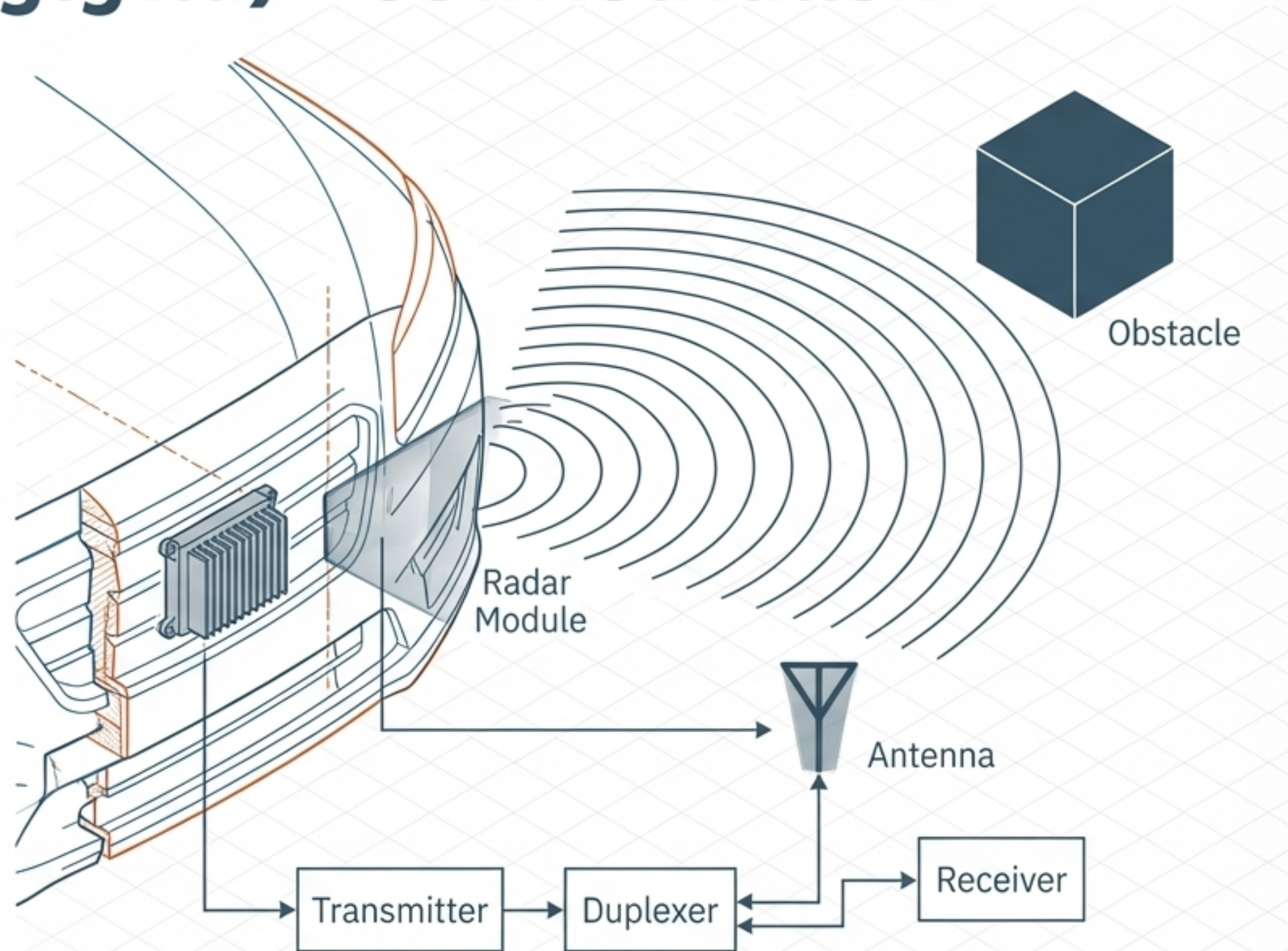
1. Sensing (การรับสัญญาณ) : ปราบการด่านแรก

หน้าที่หลัก: การปฏิสัมพันธ์ทางกายภาพกับโลกภายนอก (Physical Interface)

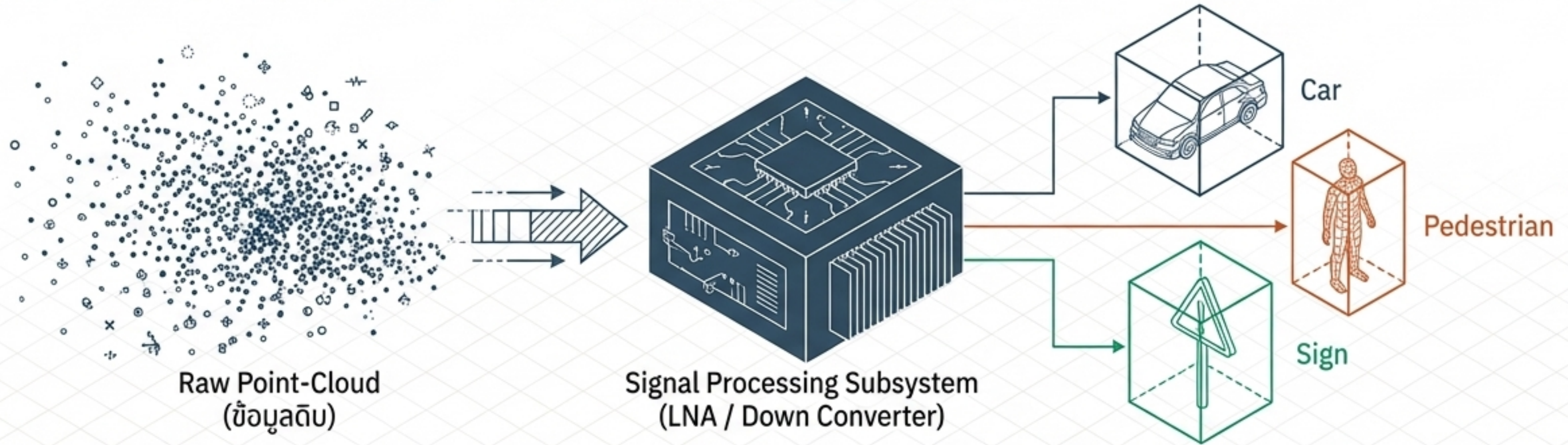
กลไก: ใช้สายอากาศ (Antenna) ในการส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves)

เป้าหมาย: สกัดข้อมูลดิบ (Raw Data) พื้นฐาน เช่น การมีอยู่ของวัตถุ และการสะท้อนกลับ

เซนเซอร์หลัก: Radar (ย่านความถี่มิลลิเมตร), LiDAR, CMOS Camera



2. Perception (การรับรู้): แปลงสัญญาณสู่ความหมาย



หน้าที่หลัก: การตีความ (Interpretation) ข้อมูลดิจิทัล

การแปลงข้อมูลดิบเชิงกายภาพให้เป็นข้อมูลที่มีความหมายต่อระบบ
(Converting raw physical data into meaningful information for the system)

กระบวนการทางวิศวกรรม: การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing Subsystem) อย่างเข้มข้น

การกรอง, การขยาย, และการปรับสภาพสัญญาณเพื่อสร้างโมเดล 3D
(Filtering, amplifying, and conditioning signals to generate 3D models)

ผลลัพธ์: การตรวจจับวัตถุ (Object Detection) และการจำแนกประเภท (Classification) - เช่น การแยกแยะความแตกต่างระหว่างยานพาหนะ คนเดินเท้า หรือโครงสร้างพื้นถนน

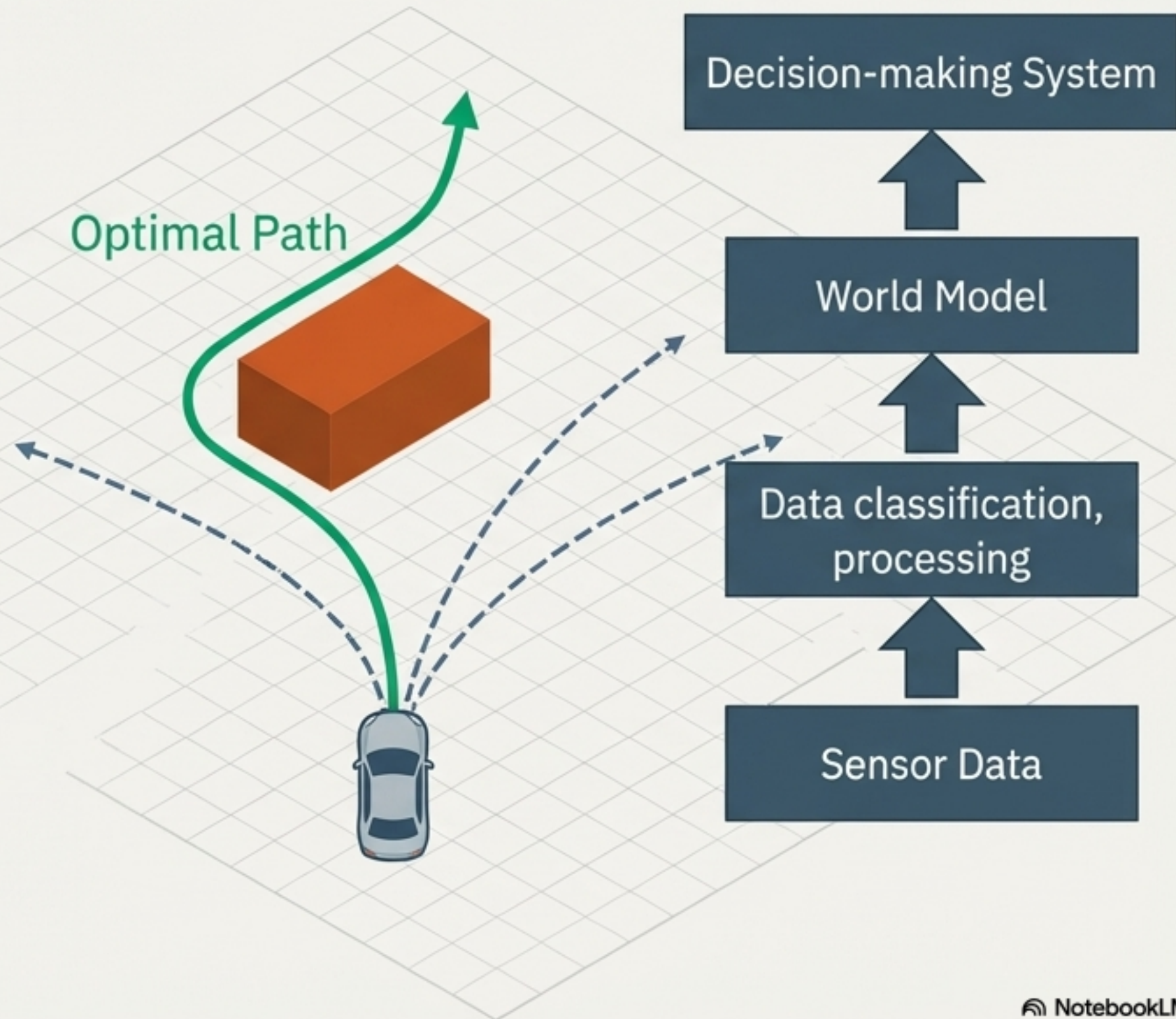
การระบุตำแหน่งและประเภทของวัตถุอย่างแม่นยำ
(Precise identification of object location and type)

ความท้าทาย: การกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise & Clutter) เพื่อสร้างความแม่นยำสูงสุด (High Semantic Density)

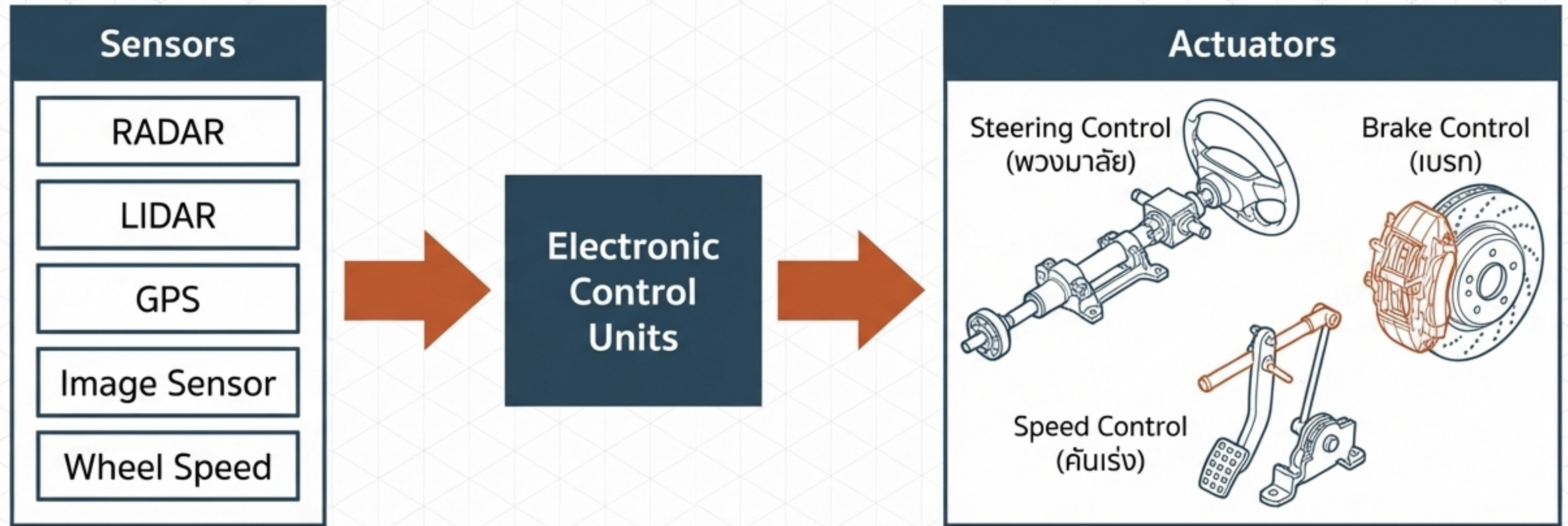
การจัดการกับสิ่งแวดล้อมที่ไม่แน่นอนและการลดความผิดพลาดในการตีความ
(Managing uncertain environments and reducing interpretation errors)

3. Decision & Planning (การตัดสินใจและวางแผน)

- หน้าที่หลัก: สมอองกลเชิงกลยุทธ์ (Strategic Brain)
- กระบวนการ: นำข้อมูลคุณลักษณะ (Range, Velocity, Angle) มาสร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อม (World Model)
- การทำงาน:
 - การประเมินสถานการณ์วิกฤต (เช่น Collision Mitigation)
 - การวางแผนเส้นทาง (Path Planning) เพื่อหลีกเลี่ยงอุปสรรค
- ความท้าทาย: ต้องคำนวณและตัดสินใจแบบเรียลไทม์ (Real-time Decision Making) ภายใต้สภาวะความไม่แน่นอน (Uncertainty)



4. Control & Actuation (การควบคุมและขับเคลื่อน)

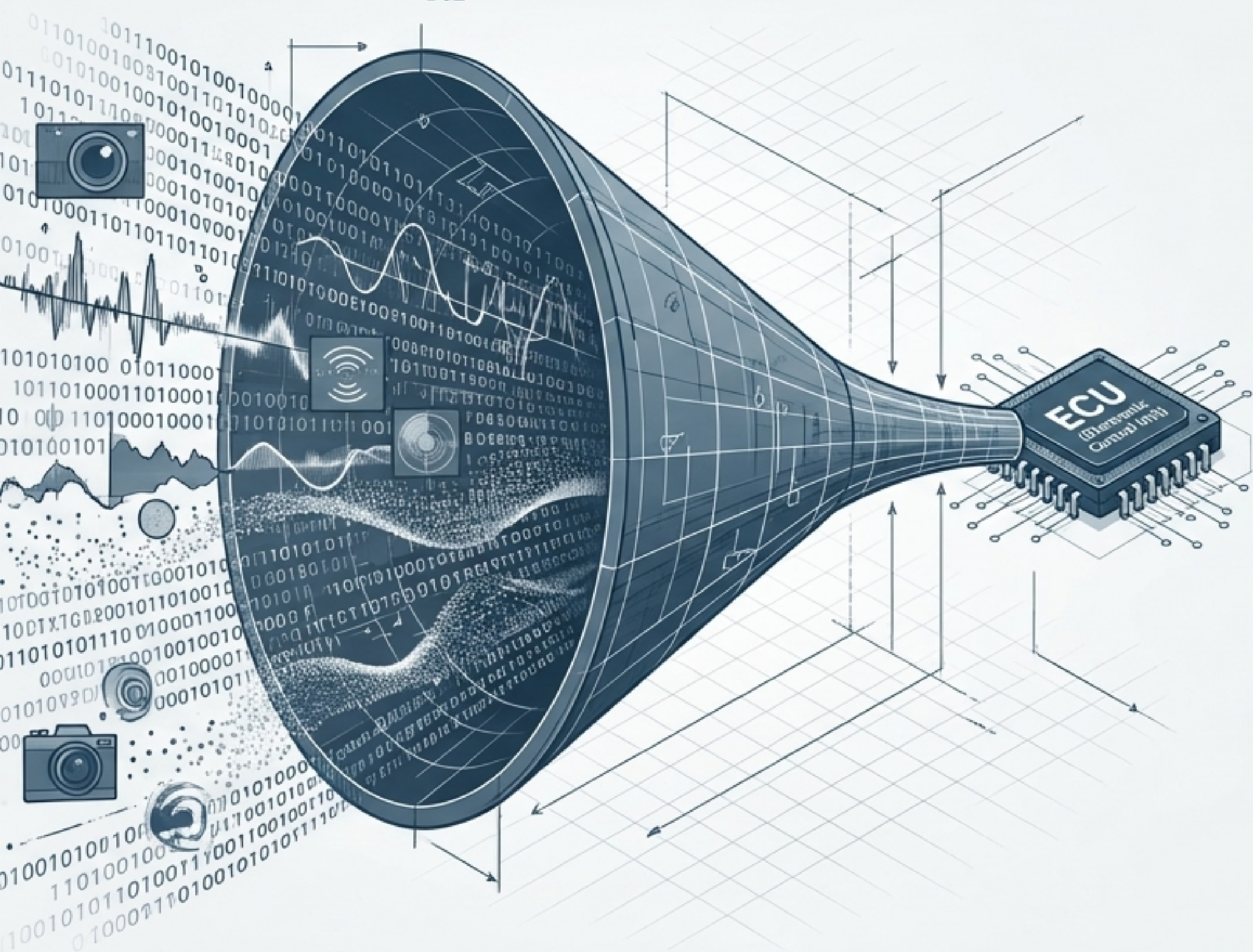


หน้าที่หลัก:
ปิดวงจรการทำงาน
(Closing the Loop)

กระบวนการ: แปลงคำสั่งเชิงตรรกะ
(Logical Commands) ให้กลายเป็น
ค่าความพยายามในการควบคุม
(Control Effort) ทางคณิตศาสตร์

การขับเคลื่อนทางกายภาพ: ส่งคำสั่งไปยัง
Actuators เพื่อสร้างการเคลื่อนที่จริง:
ควบคุมแรงบิดมอเตอร์ (Acceleration),
กำหนดองศาการเลี้ยว (Steering), และ
ระบบเบรกไฮดรอลิก/ไฟฟ้า (Braking)

ปรากฏการณ์คอขวดของ ECU (The ECU Bottleneck)



- **ข้อเท็จจริงทางวิศวกรรม:** เราไม่สามารถใส่ **Supercomputer** ขนาดใหญ่ไว้ในรถยนต์ทั่วไปได้
- รถยนต์ต้องใช้ **ECU (Electronic Control Units)** ซึ่งเป็นสมองกลที่มีขนาดกะทัดรัด
- **ปัญหา:** ปริมาณข้อมูลมหาศาลจากเซนเซอร์ (Radar, Camera, LiDAR) ไหลเข้ามาอย่างต่อเนื่อง
- **ทางออก:** วิศวกรต้องออกแบบอัลกอริทึมการประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (Highly Efficient) เพื่อให้ทำงานบนฮาร์ดแวร์ที่จำกัดพื้นที่และพลังงานได้อย่างไร้รอยต่อ

ข้อจำกัดทางวิศวกรรมในโลกความจริง (SWaP-C Constraints)

S - Size (ขนาด)

ต้องเล็กพอที่จะซ่อนในกันชน (Bumper Fascia) หรือกระจังหน้า โดยไม่ทำลายหลักอากาศพลศาสตร์

W - Weight (น้ำหนัก)

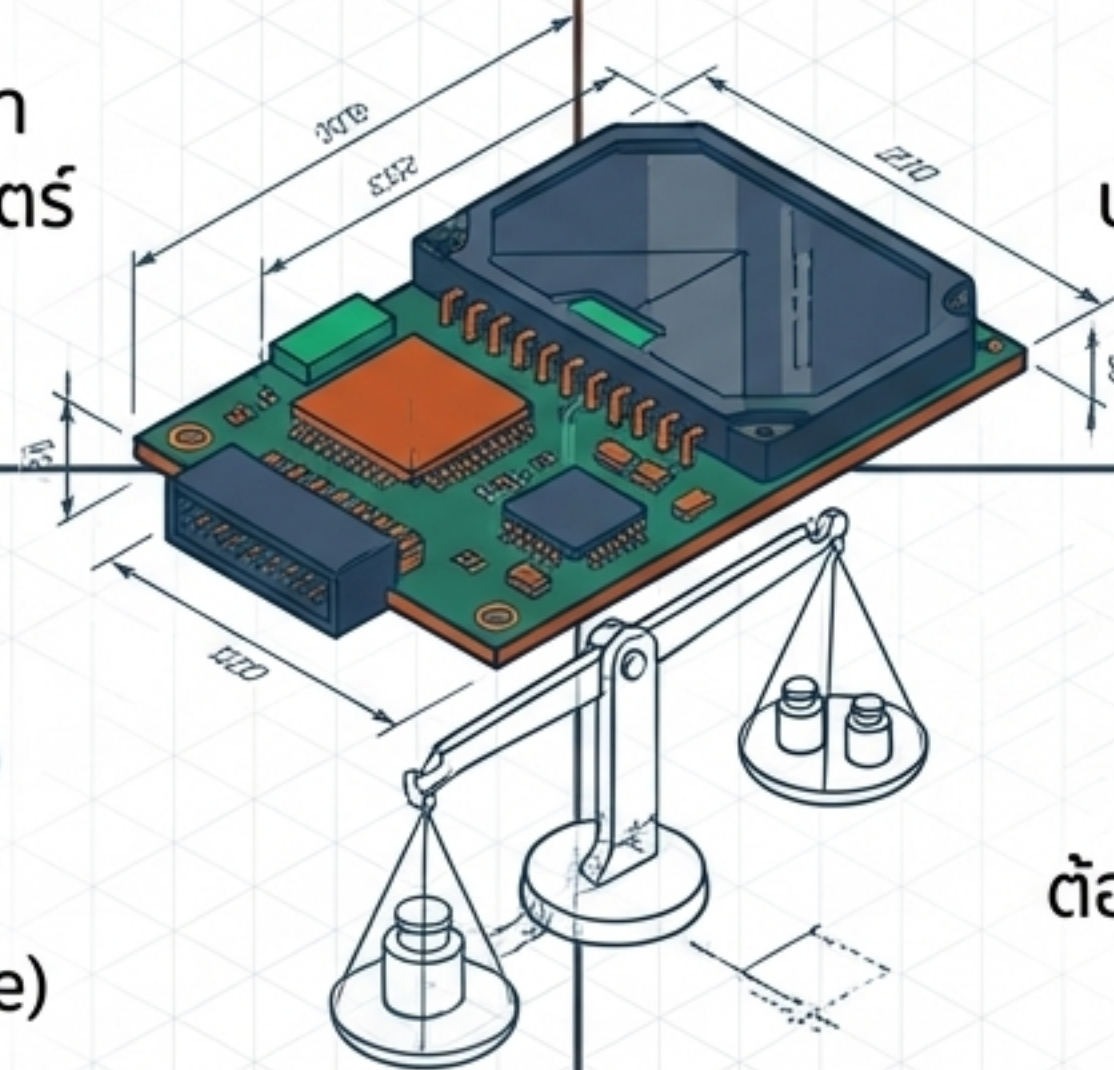
น้ำหนักรวมต้องเบา (เป้าหมายต่ำกว่า 200 กรัม สำหรับเรดาร์) เพื่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของรถ

P - Power (พลังงาน)

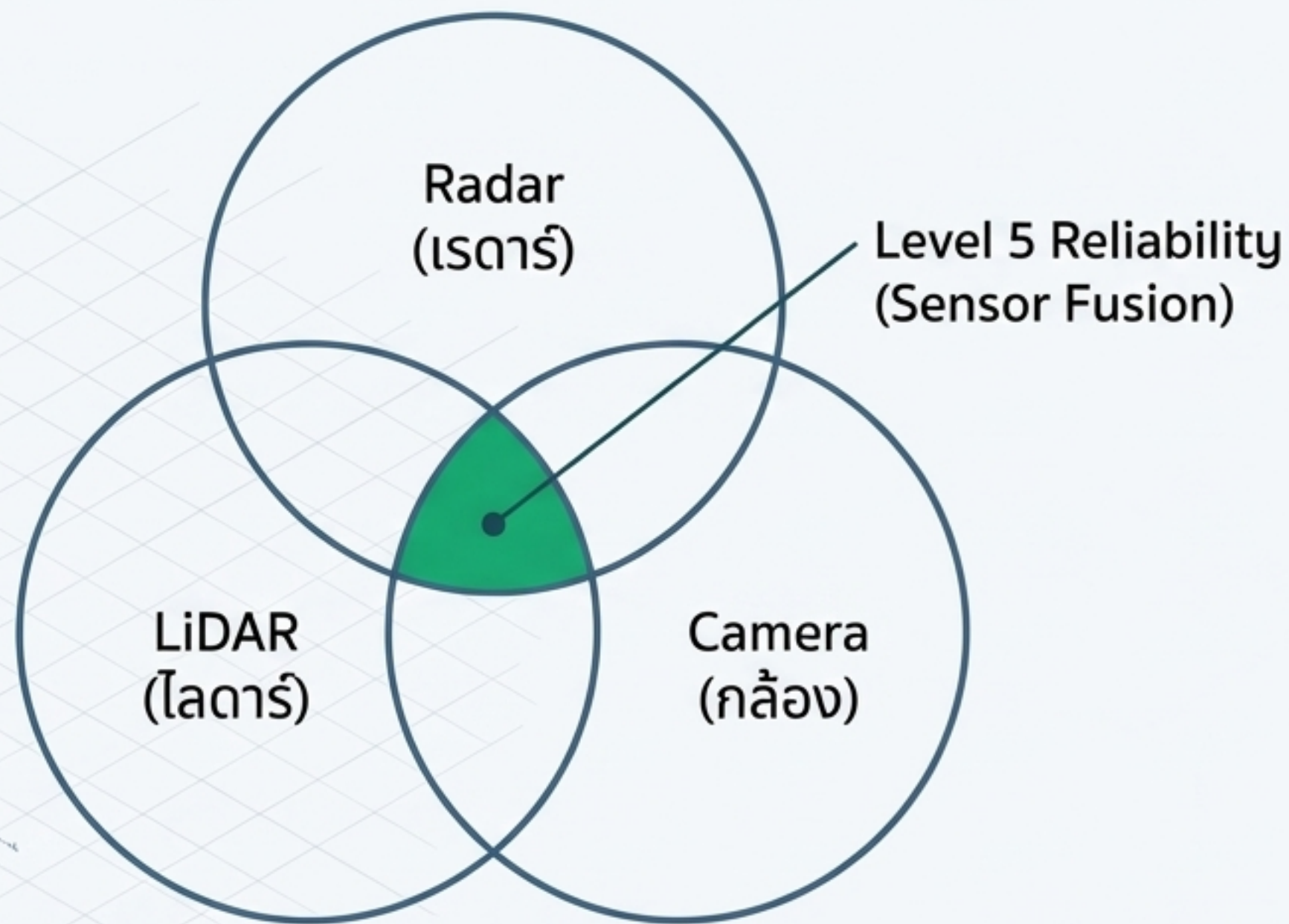
การใช้พลังงานไฟฟ้าต้องต่ำ ไม่กระทบต่อระยะทางวิ่ง (Range) ของรถยนต์ EV

C - Cost (ต้นทุน)

ต้องผลิตในระดับอุตสาหกรรมมวลชน (Mass Production) ได้ในราคาที่จับต้องได้



ความจำเป็นของการหลอมรวมเซนเซอร์ (The Imperative of Sensor Fusion)



Radar:

ทำงานได้ดีในทุกสภาพอากาศ (หมอก, ฝน)
แต่มองเห็นรายละเอียดวัตถุ (Semantics) ได้จำกัด

Camera:

ให้รายละเอียดสีและบริบทสูง (อ่านป้ายจราจรได้)
แต่ล้มเหลวในที่มืดหรือแสงสะท้อน

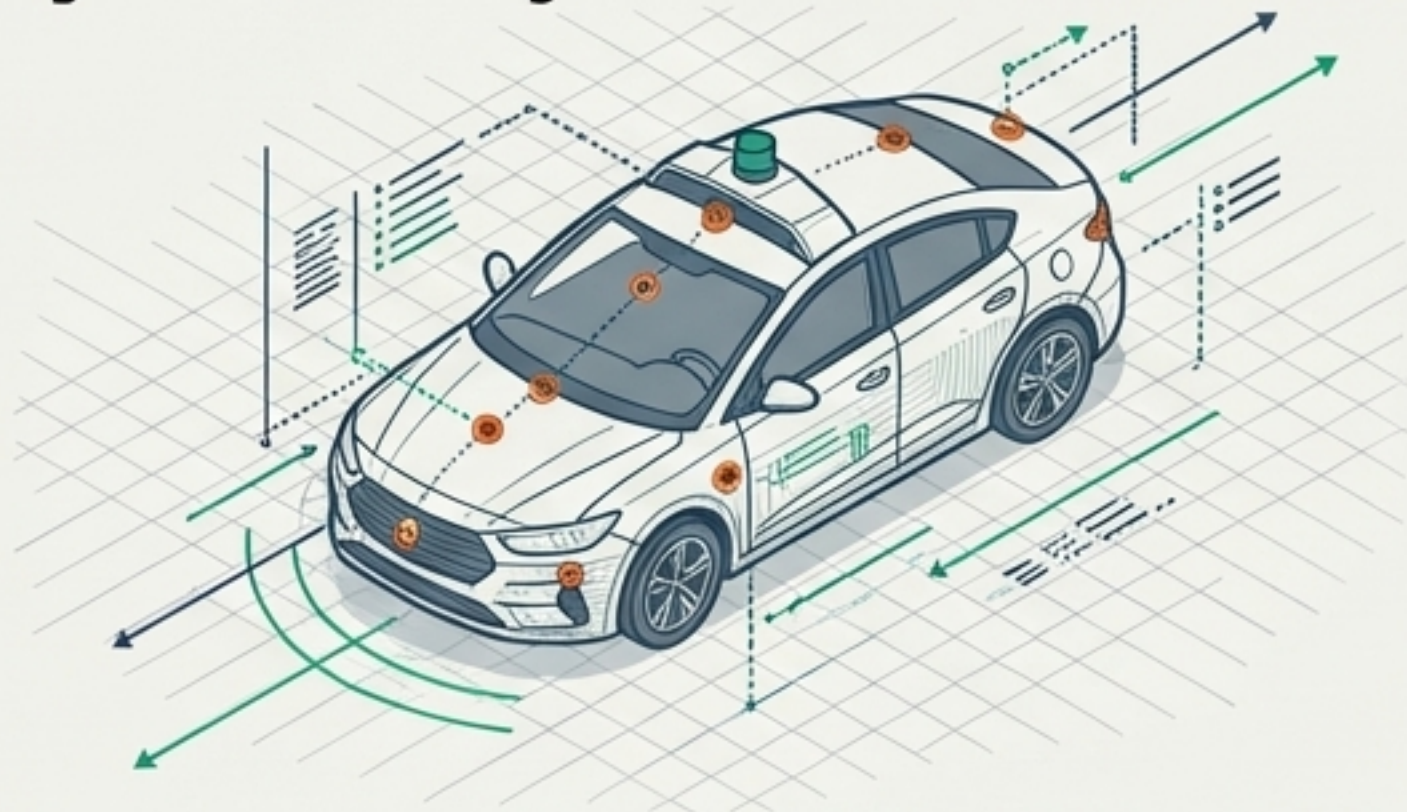
LiDAR:

ให้ความแม่นยำเชิงลึก 3 มิติสูงสุด
แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนและสภาพอากาศรุนแรง

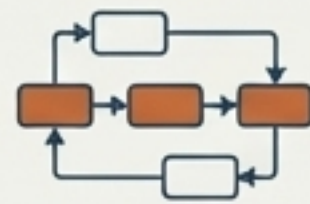
Synthesis Insight: ไม่มีเซนเซอร์ใดสมบูรณ์แบบในตัวเอง สถาปัตยกรรมระดับสูงต้องใช้ Sensor Fusion เพื่อปิดจุดบอดและสร้าง Situational Awareness ที่สมบูรณ์แบบ

บทสรุป และก้าวต่อไป (Summary & Transition)

Key Takeaways



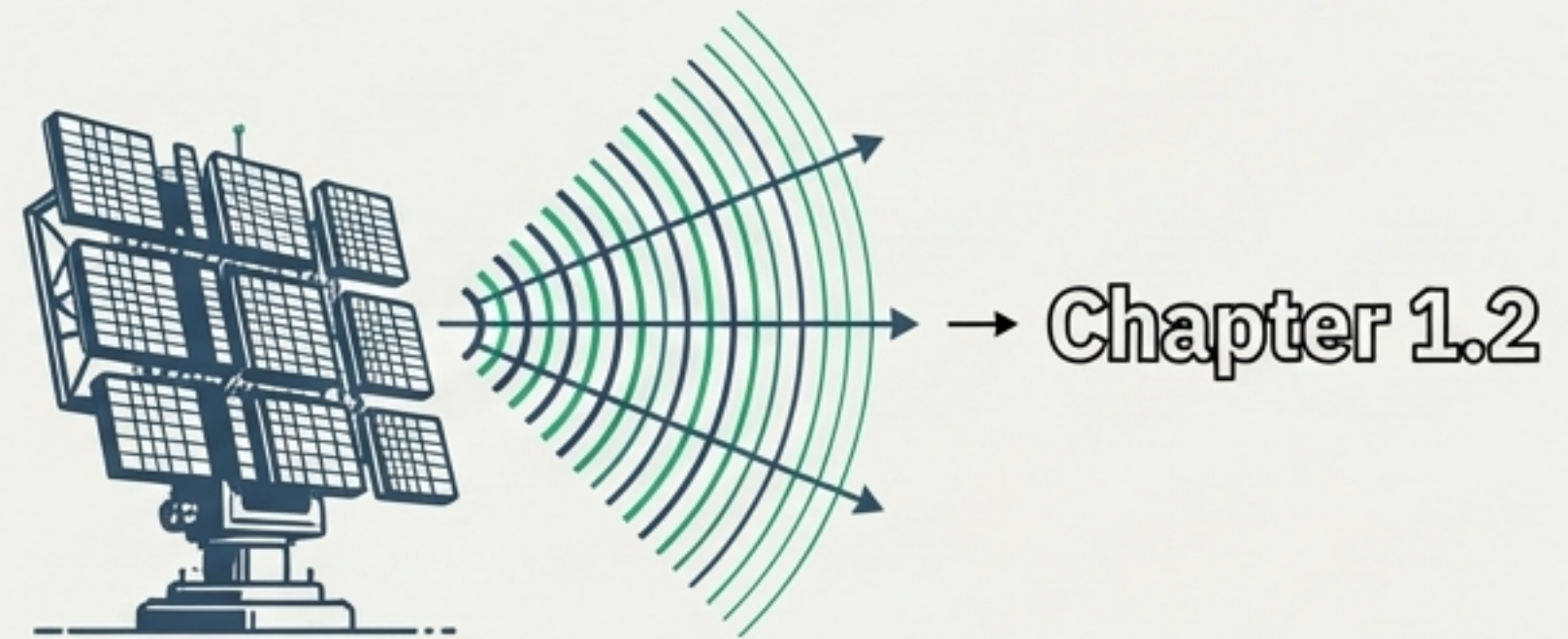
- สถาปัตยกรรมคือวงจรปิด 4 ชั้น:
Sensing -> Perception ->
Decision -> Control

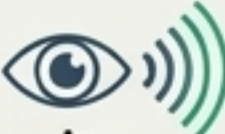


- เป้าหมายหลักคืออิสระสมบูรณ์แบบ
Level 5 ภายใต้ข้อจำกัด SWaP-C



Next Steps (เข้าสู่บทที่ 1.2)



- โครงสร้างสถาปัตยกรรมระดับสูงและกฎเกณฑ์ (SAE) ถูกกำหนดไว้แล้ว
- เนื้อหาต่อไป: เราจะทำการเจาะลึกเข้าไปใน  ดวงตา ของระบบ (Sensing Layer) ศึกษาหลักการทำงานเชิงลึกของการรับสัญญาณและการประมวลผลเรดาร์ (Radar Signal Processing) ในฐานะเทคโนโลยีแกนหลัก