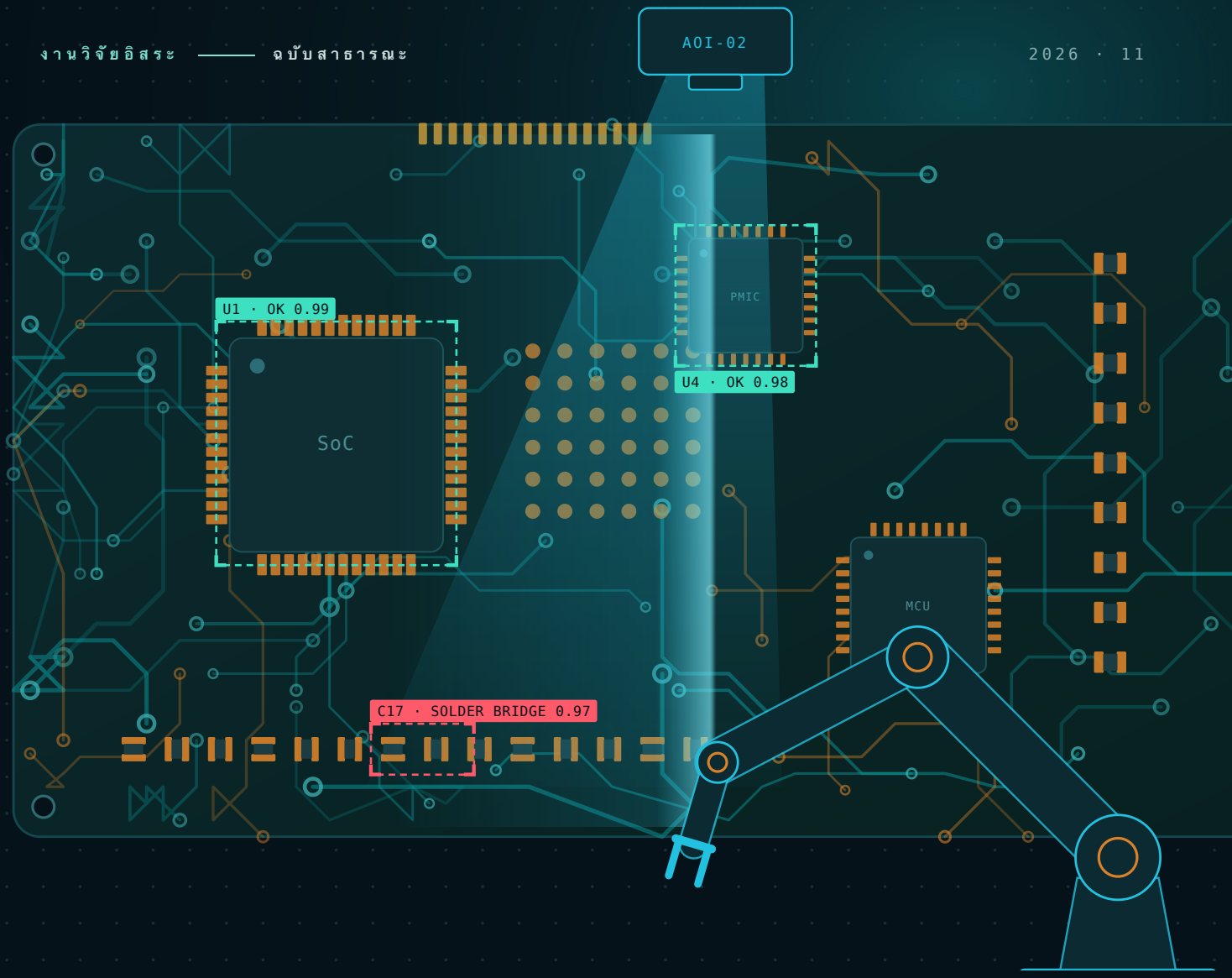


การผลิตอิเล็กทรอนิกส์ · การตรวจสอบด้วย AI × หุ่นยนต์

การตรวจสอบด้วยสายตาด้วย AI และแขนหุ่นยนต์ในโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

การประเมินปี 2026

การกำหนดค่าหลัก · ความเป็นไปได้ในแต่ละภูมิภาค · การติดตั้งภายในองค์กร · โมเดลครู–นักเรียน
ผลตอบแทนจากการลงทุน · การแข่งขัน · สิ่งที่มีเพียงโครงการนำร่องเท่านั้นที่จะตอบได้

ข้อค้นพบสำคัญ

การตรวจสอบด้วย AI คุ้มค่าที่จะทำ แต่ในขอบเขตจำกัด ส่วนแขนหุ่นยนต์แบบ embodied ยังรอได้

Tan Shuai
tanshuai.comi@tanshuai.com

ข้อมูล ณ วันที่ 11 พฤศจิกายน 2026
จีนแผ่นดินใหญ่ · ไต้หวัน · เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ · สหรัฐอเมริกา

สารบัญ

สารบัญ



◆ **บทสรุปผู้บริหาร** — 4
คุ้มค่าที่จะทำ แต่ในขอบเขตจำกัด ตอนนี้ และกับพันธมิตร

01 **สายการผลิตในปัจจุบัน** — 7
โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ใช้งานอะไรในปัจจุบัน และอะไรที่เป็นไปได้ทางเทคนิค

02 **ภายในองค์กร** — 14
การรัน AI ภายในโรงงาน: ห้องปลอดฝุ่น, air gap, ฮาร์ดแวร์ และ quantization

03 **ครูและนักเรียน** — 23
ครูและนักเรียน: โมเดล frontier ติดป้ายข้อมูลตรวจสอบล่วงหน้าได้ สำหรับแขนหุ่นยนต์ ครูที่แก้จริงยังคงเป็นคน

04 **ต้นทุนและการคืนทุน** — 31
ต้นทุนและการคืนทุน: การตรวจสอบด้วย AI คืนทุนในไม่กี่เดือน การป้อนเครื่องจักรในหลายปี แขนหยิบชิ้นงานไม่เคย

05 **ตลาดและการแข่งขัน** — 38
ตลาด การแข่งขัน และวิธีที่ผู้ซื้อจ่ายเงิน

06 **embodied AI** — 46
embodied AI: แรกสุดมันเปลี่ยนวิธีสอนหุ่นยนต์ ภายหลังเปลี่ยนวิธีที่มันเคลื่อนไหว

07 **คำถามที่ยังไม่มีคำตอบ** — 51
สิ่งที่เอกสารสาธารณะตอบไม่ได้ และวิธีที่โครงการนำร่องจะหาคำตอบ

◆ **เกี่ยวกับผู้เขียน** — 53
Tan Shuai

แท็กความน่าเชื่อถือในเนื้อหา

- **verified** แหล่งข้อมูลอิสระตั้งแต่สองแหล่งขึ้นไป หรือเอกสารปฐมภูมิอิสระสองฉบับ ตรงกัน
- **single source** แหล่งข้อมูลเดียวเท่านั้น รวมถึงเอกสารปฐมภูมิ
- **vendor claim** เผยแพร่โดยผู้ขายผลิตภัณฑ์หรือบริการ
- **estimate** การคำนวณหรือการอนุมานของผู้เขียนจากข้อมูลที่อ้างอิง

วิธีอ่านรายงานนี้

ตัวเลขสำคัญมีแท็กความน่าเชื่อถือ **verified** หมายถึงแหล่งข้อมูลอิสระสองแหล่งขึ้นไปตรงกัน หรือเอกสารปฐมภูมิอิสระสองฉบับตรงกัน **single source** หมายถึงมีแหล่งเดียวเท่านั้น (รวมถึงเอกสารปฐมภูมิ) **vendor claim** หมายถึงเผยแพร่โดยผู้ขายผลิตภัณฑ์หรือบริการ แม้จะถูกกล่าวซ้ำอย่างกว้างขวาง **estimate** หมายถึงการคำนวณหรือการอนุมานของฉันเองจากข้อมูลที่อ้างอิง โดยมีอินพุตที่อ้างอิงแหล่งที่มา “Primary” อธิบายประเภทของแหล่ง (รายงานประจำปี เอกสารเสนอขายหลักทรัพย์ ระเบียบ มาตรฐาน สถิติทางการ) ไม่ได้เปลี่ยนระดับความน่าเชื่อถือ เมื่อแหล่งขัดแย้งกัน ตัวเลขจะถูกแสดงเคียงข้างกันโดยไม่เฉลี่ย การแปลงสกุลเงินใช้อัตรากลางของธนาคารประชาชนจีนวันที่ 9 พฤศจิกายน 2026 ที่ $1 = RMB 6.7188 (Xinhua) และสำหรับไต้หวันใช้อัตราของ SMBC ในวันเดียวกันที่ $1 = NT$32.12 (SMBC) ข้อมูลแรงงานและเงินอุดหนุนของจีนแผ่นดินใหญ่ใช้เขตสามเหลี่ยมปากแม่น้ำจูเจียงซึ่งการผลิตอิเล็กทรอนิกส์หนาแน่นที่สุด (ข้อมูลค่าจ้างทางการจากเซินเจิ้น) โดยมีเขตสามเหลี่ยมปากแม่น้ำแยงซีสำหรับเปรียบเทียบ คำกล่าวอ้างจากการสัมภาษณ์ในอุตสาหกรรมถือเป็นข้อกล่าวอ้างที่ต้องตรวจสอบ ไม่ใช่ข้อเท็จจริง คำถามที่เอกสารสาธารณะตอบไม่ได้ถูกรวบรวมไว้ในบทที่ 7

รูปภาพ

รูปภาพ



01	ที่ AI เข้ามาในพื้นที่โรงงานวันนี้	6
02	ไลน์ SMT ปริมาณมาก: คนนั่งหลัง AOI	8
03	ประมาณ 97–99% ของสัญญาณแจ้ง AOI เป็นการแจ้งผิด	9
04	กล้องเอนกประสงค์ไม่ใช่ AOI	10
05	การติดตั้งแบบแอร์แกป	14
06	โซนสะอาดและ ESD กำหนดที่วางคอมพิวต์	15
07	ขีดจำกัดความเร็วตามการใช้งาน	17
08	คอมพิวต์ออนเพร็ม: หน่วยความจำ ราคา และสิ่งที่ซื้อถูกกฎหมายในจีนแผ่นดินใหญ่	18
09	เวิร์กสเตชันใหญ่หนึ่งเครื่องไม่เป็นผู้ช่วยที่แชร์ได้	19
10	ควอนไทซ์: 8-bit ปลอดภัย, 4-bit ขึ้นกับสูตร, 3-bit และต่ำกว่าร่วง	20
11	ตัวเลือกครู: คะแนนทั่วไปเพิ่มเท่าตัวในรุ่นเดียว	24
12	"มีข้อบกพร่องหรือไม่?" ยังยากสำหรับโมเดลทั่วไป	25
13	ไปป์ไลน์ครู–นักเรียนสองแบบ	26
14	ชุดทองคำต้องใหญ่แค่ไหน	27
15	เวลาแฝงนโยบายเอดจ์	28
16	นักเรียนหุ่นยนต์: ใกล้ระดับผลิตก็ต่อเมื่อสถานีมีโครงสร้าง	29
17	ค่าใช้จ่ายต่อปีของคนตรวจหรือขนย้ายหนึ่งคน	32
18	บันไดราคา	33
19	ระยะคืนทุนตามภูมิภาค	35
20	ทำไมการคัดแผ่นเสียไม่คุ้มทุน	36
21	ภาษีสหรัฐฯ ต่อหุ่นยนต์ AOI และคอมพิวเตอร์เอดจ์	37
22	ขนาดตลาดต่างกันเกินสิบเท่า	39
23	ล่างขึ้นบน: 40,000 ไลน์ → ให้บริการ 16,000 → ≈RMB 320M ครั้งเดียว	40
24	หน้าต่างปรับปรุงประมาณห้าปี	40
25	ลิ่มตรวจซ้ำถูกล้อมสามด้าน	41
26	มาร์จิ้นอยู่ในฮาร์ดแวร์ที่ทำเป็นผลิตภัณฑ์	42
27	ผู้ซื้อจ่ายอย่างไร	43
28	วันขายคงค้าง	44
29	สแต็ก AI เอ็มบอดีด	46
30	สิ่งที่การติดตั้งหุ่นยนต์ในโรงงานเปิดเผยจริง	47
31	แรงงานทดแทนสุทธิต่อหุ่นยนต์	48
32	ไทม์ไลน์มาตรฐานและกฎระเบียบ	49

คุ้มค่าที่จะทำ แต่ในขอบเขตจำกัด ตอนนี้ และกับพันธมิตร

ข้อค้นพบสำคัญ

ข้อตัดสิน: สำหรับโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ สิ่งที่สุกงอมในปี 2026 และสิ่งที่โรงงานยินดีจ่ายคือการตรวจสอบด้วย AI และการตรวจสอบเฉพาะทางบนภาพ AOI บวกกับการป้อนเครื่องจักรด้วยหุ่นยนต์แบบโปรแกรม ไม่ใช่ "โมเดลขนาดใหญ่ที่มองแผ่นวงจรบวกกับหุ่นยนต์ embodied ที่หยิบมัน"

0.46–0.65 ปี
ระยะเวลาคืนทุนของการตรวจสอบด้วย AI ในสหรัฐอเมริกา ไต้หวัน และเซินเจิ้น ที่ 50,000 RMB ต่อสายการผลิต

≥95% · <20 PPM
ความครอบคลุมและการเล็ดรอดของการตรวจสอบด้วย AI ภายในองค์กรของ EMS ชั้นนำ: มาตรฐานสำหรับการขายให้ EMS ระดับ 1

100–700 ล้าน RMB
ตลาด retrofit ของบุคคลที่สามที่ให้บริการได้ในจีนแผ่นดินใหญ่ แบบครั้งเดียว ในช่วงเวลาประมาณห้าปี

0 คะแนน
คะแนน benchmark ข้อบกพร่องทางอุตสาหกรรมที่เผยแพร่สำหรับโมเดลเรือธงเดือนพฤศจิกายน 2026: เป็นครู ไม่ใช่ผู้ตรวจสอบ

1.1–1.5 ปี
ระยะเวลาคืนทุนของเซลล์หุ่นยนต์ร่วม (cobot) สำหรับป้อนเครื่องจักรสองกะ ในสหรัฐอเมริกา ไต้หวัน และเซินเจิ้น

0.003–0.14 FTE
แรงงานที่แขนหุ่นยนต์หยิบชิ้นงานช่วยประหยัดต่อกะบนสายการผลิต SMT: ไม่คุ้มทุนเลย

การตรวจสอบ
ROI

การเรียนรู้เชิงลึกแบบ supervised ที่ใช้กับภาพซึ่ง AOI ที่มีอยู่แล้วผลิตออกมาสามารถลดสัญญาณเตือนผิดพลาดหรือชั่วโมงตรวจสอบลงได้ 60–90% (vendor claims) DBG ซึ่งเป็นบริษัท EMS ขนาดใหญ่ รายงานในรายงานประจำปีว่าระบบภายในของบริษัทครอบคลุมชิ้นส่วนที่ถูกตั้งธงมากกว่า 95% โดยมีอัตราเล็ดรอดต่ำกว่า 20 PPM และลดการตรวจสอบโดยมนุษย์ลงมากกว่า 85% นั่นคือมาตรฐานที่ผลิตภัณฑ์ของบุคคลที่สามต้องทำได้เพื่อขายให้ EMS ระดับ 1 ที่ราคา 50,000 RMB ต่อสาย การตรวจสอบด้วย AI คืนทุนภายในหนึ่งปีในจีนแผ่นดินใหญ่ ไต้หวัน และสหรัฐอเมริกา (เซินเจิ้น 0.65 ปี ไต้หวัน 0.53 สหรัฐฯ 0.46) เซลล์หุ่นยนต์ร่วมป้อนเครื่องจักรใน 1.1–1.5 ปี และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ใน 2–6 ปี ขณะที่แขนหุ่นยนต์ที่เพิ่มเข้าไปในสาย SMT เพียงเพื่อหยิบแผ่นวงจรเสียออกไม่คุ้มทุนที่ไหนเลย เพราะที่อัตราผลผลิตผ่านครั้งแรกสูงกว่า 90% การหยิบใช้แรงงานเพียง 0.003–0.14 คนต่อกะ estimate

โมเดล
หุ่นยนต์

โมเดลขนาดใหญ่แบบ multimodal ยังไม่สามารถเป็นผู้ตรวจสอบหลักได้ ณ วันที่ 11 พฤศจิกายน 2026 ไม่มีโมเดลเรือธงใด (Claude Fable 5.2, GPT-6.x, Gemini 4, Qwen3.8 และอื่นๆ) มีคะแนนที่เผยแพร่บน benchmark ข้อบกพร่องทางอุตสาหกรรมหรือ PCB ใดเลย และในการแข่งขัน PCBA ของ ACM MM 2026 ระบบห้าอันดับแรกซึ่งฝึกจากภาพสายการผลิตจริง 6,600 ภาพ ได้คะแนนเพียง 77–82 ในโจทย์ "มีข้อบกพร่องหรือไม่" โมเดล frontier สามารถติดป้ายล่วงหน้าและคัดแยกได้ สำหรับแขนหุ่นยนต์ ครูที่แท้จริงยังคงเป็นการสาธิตโดยมนุษย์ การเรียนรู้แบบ reinforcement บนหุ่นยนต์จริง และการจำลอง: นักเรียนทำได้ 90–99.4% ที่สถานีแบบยึดจับและมีโครงสร้าง แต่ทำได้เพียง 30–80% บนสายพานที่เคลื่อนที่ ชิ้นส่วนที่ไม่เคยเห็น และผลิตภัณฑ์ใหม่ เอเจนต์ frontier ทำภารกิจหุ่นยนต์จริงแบบ quasi-static ได้ 104 จาก 108 ภารกิจ ที่ 280 วินาทีต่อภารกิจ

ภายในองค์กร
การติดตั้ง

การติดตั้งแบบ air-gapped ในโรงงานที่สะอาดและควบคุมได้นั้นทำได้จริงอย่างเต็มที่ พื้นที่ SMT ทั่วไปมักเป็นพื้นที่ป้องกัน ESD มากกว่าจะเป็นห้องปลอดฝุ่นที่จัดระดับ กล่อง Jetson หรือ NPU ในประเทศแบบไร้พัดลมวางที่สายการผลิตและเซิร์ฟเวอร์ GPU อยู่ในห้องเซิร์ฟเวอร์ ภายใต้การจำแนกการส่งออกของ NVIDIA เอง Jetson Thor และ DGX Spark สามารถขายให้โรงงานทั่วไปในจีนแผ่นดินใหญ่ได้โดยไม่ต้องมีใบอนุญาตสหรัฐฯ ส่วน DGX Station ไม่ได้ ความ

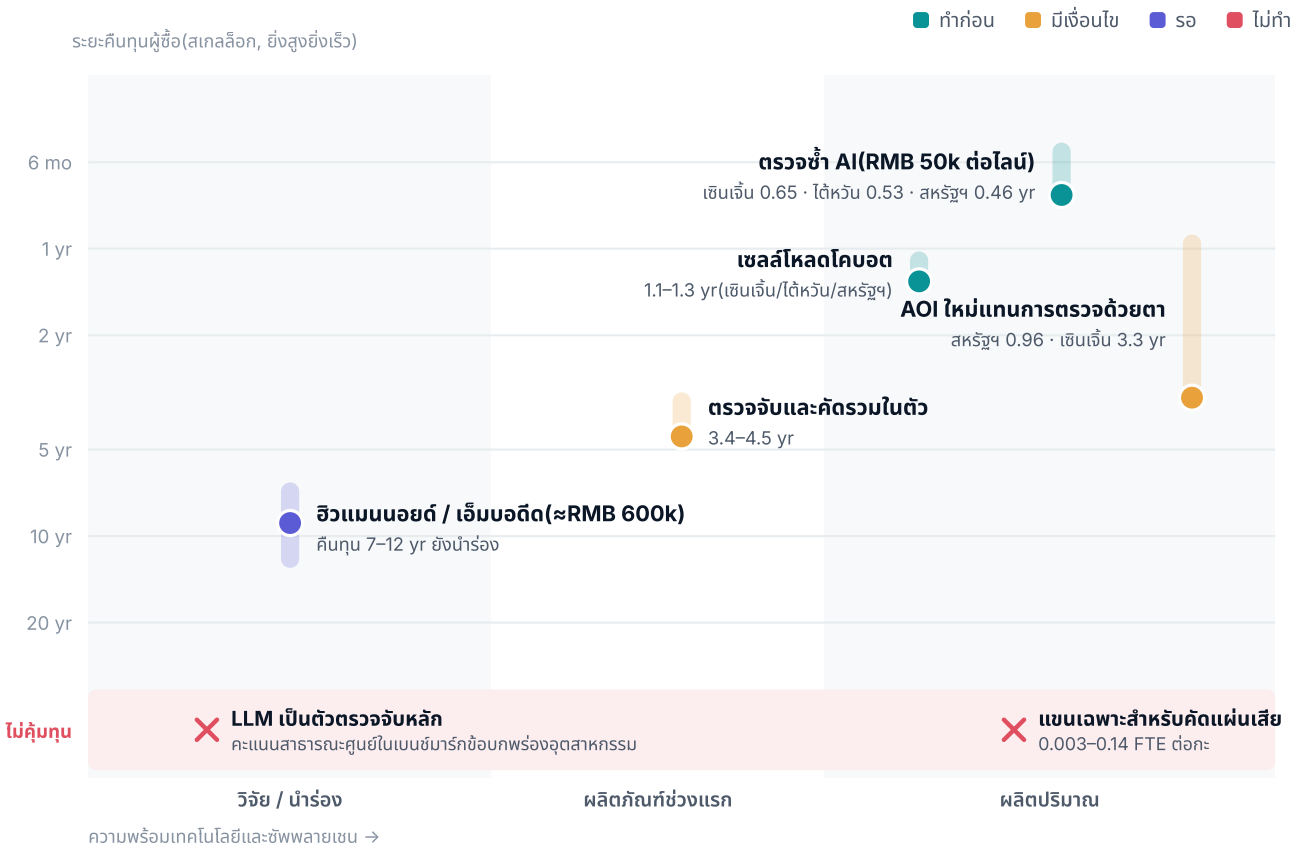
แม่นยำค่าเริ่มต้นคือ 8-bit ส่วน 4-bit แบบ quantization-aware จากผู้ขายใช้ได้โดยมีเงื่อนไข 3-bit และต่ำกว่านั้นใช้ไม่ได้

ตลาด
การแข่งขัน

ตลาดมีจริงแต่จำกัด จีนแผ่นดินใหญ่มีสาย SMT ประมาณ 35,000–46,000 สาย และ AOI แบบ inline ประมาณ 26,000–66,000 เครื่องที่ยังไม่ใช้ AI ตลาดที่ให้บริการได้สำหรับการ retrofit โดยบุคคลที่สามอยู่ที่ประมาณ 100–700 ล้าน RMB แบบครั้งเดียว ในช่วงเวลาประมาณห้าปี และผู้ผลิต AOI ได้เริ่มสร้างฟังก์ชันตรวจสอบลงในเครื่องใหม่แล้ว estimate การแข่งขันแข็งแกร่งอยู่แล้ว ช่องว่างของการตรวจสอบถูกปิดล้อมโดยผู้ผลิต AOI ทีม EMS ภายในองค์กร และผู้ขายแพลตฟอร์ม และกำไรอยู่ที่ฮาร์ดแวร์ที่ถูกทำให้เป็นผลิตภัณฑ์

คำถาม	ข้อตัดสิน	ตัวเลขสำคัญ (แหล่งที่มาและระดับความน่าเชื่อถืออยู่ในแต่ละบท)
1 โรงงานอิเล็กทรอนิกส์กระแสหลักใช้งานอะไรอยู่ในปัจจุบัน?	สาย SMT ปริมาณมากคือ “3D SPI + AOI ก่อนและหลังการรีโฟลว์ + X-ray แบบสุ่มตัวอย่าง + ICT/FCT + การซ่อมและการตรวจสอบด้วยสายตา” โดยมีการตรวจสอบโดยมนุษย์อยู่หลัง AOI ทุกเครื่อง AI เข้าสู่การตรวจสอบสามทาง: สร้างโดยผู้ผลิต AOI สร้างภายในโดย EMS ชั้นนำ หรือเพิ่มโดยบุคคลที่สาม การประกอบและการหยิบจับใช้แขน, SCARA และ AMR ที่มีการรับรู้แบบเรียนรู้และการเคลื่อนไหวแบบโปรแกรม embodied AI ยังอยู่ในขั้นนำร่อง	Takt ≈13–22 วินาทีต่อแผ่น ODM รายหนึ่งตั้งงบ AOI 30.6 ล้าน RMB สำหรับ 18 สาย ≈3–5 AOI ต่อสาย ≈97–99% ของสัญญาณเตือน AOI เป็นสัญญาณผิดพลาด
2 เทคโนโลยีไปได้ไกลแค่ไหน เงินซื้อ “คนเป็นศูนย์” ได้หรือไม่ และแต่ละภูมิภาคใช้อะไรได้บ้าง?	การตรวจสอบอยู่ในระดับอุตสาหกรรมในรูปแบบ “ตัวตรวจจับเฉพาะทาง + การตรวจสอบด้วย AI + คนจำนวนหนึ่ง” แม้แต่เงินไม่จำกัดก็ไม่ถึงคนเป็นศูนย์ จีนแผ่นดินใหญ่ใช้เฉพาะโมเดลในประเทศหรือ open weights ในประเทศ โรงงานเอกชนในไต้หวันใช้ได้เกือบทุกอย่าง แต่ fab และโครงสร้างพื้นฐานวิกฤตไม่รวมแบรนด์จีนแผ่นดินใหญ่ในทางปฏิบัติ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีข้อจำกัดน้อยที่สุด สหรัฐฯ มีครบทั้งระบบบวกกับภาษีและการรับรอง	การตรวจสอบด้วย AI ลดสัญญาณเตือนผิดพลาดหรือชั่วโมงตรวจสอบ 60–90% vendor claims กล้อง 4K เหนือทั้งแผง ≈78 µm ต่อพิกเซล เทียบกับ 8–20 µm ของ AOI แขนที่ผลิตในจีนแผ่นดินใหญ่จ่ายภาษีสหรัฐฯ รวม ≈40% เครื่องมือประเภท AOI ≈37.5%
3 ทำงานภายในองค์กรในห้องปลอดฝุ่นและโรงงาน air-gapped ได้หรือไม่ บนฮาร์ดแวร์ใด เร็วและแม่นยำพอหรือไม่?	ได้ ข้อจำกัดอยู่ที่กระบวนการ ไม่ใช่การคำนวณ กล่องไร้พัดลม ≤100 W ที่สายการผลิต เซิร์ฟเวอร์ GPU ในห้องเซิร์ฟเวอร์ Thor สำหรับสถานี Mac Studio หรือเครื่องในประเทศสำหรับ Q&A ของโรงงาน ไม่มี DGX Station ในจีนแผ่นดินใหญ่ ความเร็วดีเมื่อขนาดโมเดลตรงกับงาน ใช้ 8-bit ใช้ 4-bit แบบ quantization-aware จากผู้ขายโดยมีเงื่อนไข และไม่ใช้ 3-bit เด็ดขาด	≈0.5 วินาทีต่อภาพตัดสำหรับโมเดลวิชัน 8B บน Thor estimate ชุดพัฒนา Thor ราคา 59,104 RMB ในจีน DGX Station ราคา $123–140k ได้ 139 tokens/s รวมสำหรับผู้ใช้ 32 คนบนโมเดล 743B
4 โมเดลเรือธงใหม่ล่าสุดทำหน้าที่เป็นครูได้หลายสิบรอบและถูก distill เป็นนักเรียนในพื้นที่ได้หรือไม่ รวมถึงการผลิตแบบยืดหยุ่นและแขนหุ่นยนต์?	การตรวจสอบ: ติดป้ายล่วงหน้าและคัดแยก ยอมรับป้ายจากครูโดยอัตโนมัติเฉพาะชั้นที่มี “ข้อบกพร่อง ≥299 รายการ พลาดเป็นศูนย์” บนชุดข้อมูลอ้างอิง หุ่นยนต์: ครูยังคงเป็นการสาธิตโดยมนุษย์ RL บนหุ่นยนต์จริง และการจำลอง นักเรียนเข้าใกล้ระดับการผลิตเฉพาะที่สถานีแบบมีโครงสร้าง	ไม่มีโมเดลเรือธงเดือนพฤศจิกายนใดมีคะแนนข้อบกพร่องทางอุตสาหกรรม นักเรียนทำได้ 97.8% บนคอนเนกเตอร์ที่ฝึกมา 29–67% บนชิ้นที่ไม่เคยเห็น 37–59% บนสายพานที่เคลื่อนที่ โมเดล frontier ควบคุมข้อต่อโดยตรง 0–5.5%
5 ต้นทุนเท่าไร และ ROI ตามภูมิภาคเป็นอย่างไร?	การตรวจสอบด้วย AI คืนทุนภายในหนึ่งปีในจีนแผ่นดินใหญ่ ไต้หวัน และสหรัฐฯ หุ่นยนต์ร่วมป้อนเครื่องจักร 1.1–1.5 ปี เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ 2–6 ปี แขนหยิบชิ้นงานบนสาย SMT ไม่คุ้มทุนเลย	กล่องตรวจสอบ 50,000 RMB ต่อสาย: เซินเจิ้น 0.65 ปี ไต้หวัน 0.53 สหรัฐฯ 0.46 เวียดนาม 2.2 estimate ราคาส่วนเสริมจากบุคคลที่สามที่ยอมรับได้ ≈10–30k RMB ต่อสายแบบครั้งเดียว หรือ 5–10k RMB ต่อปี
6 คู่แข่งแข็งแกร่งพอแล้วหรือยัง และควรเริ่มตอนนี้หรือรอ?	อุปสงค์ยังไม่อิ่มตัว แต่อุปทานหนาแน่น AI จาก OEM จำกัดช่วงเวลา retrofit ให้เหลือประมาณห้าปี เข้าสู่ตลาดตอนนี้ด้วยผลิตภัณฑ์ที่แคบผ่านพันธมิตรช่องทาง โดยไม่ต้องเผชิญหน้ากับผู้ขายแพลตฟอร์มโดยตรง รอข้อมูลการผลิตปี 2027–2028 ก่อนเดิมพันกับ embodied AI	≈26–66k AOI แบบ inline ที่ไม่มี AI ในจีนแผ่นดินใหญ่ลดลง 8–12% ต่อปี estimate ผู้ขายวิชัน AI ชั้นนำมีรายได้ปี 2025 ที่ 1.086B RMB และขาดทุนสุทธิ 991M RMB รายได้ 3C ของบริษัทจดทะเบียนที่เทียบเคียงได้ใกล้เคียงที่สุดลดลง 79.9% เมื่อเทียบปีต่อปีในช่วงมกราคม–พฤษภาคม 2026

FIG 01 **ที่ AI เข้ามาในพื้นที่โรงงานวันนี้*การตรวจซ้ำด้วย AI ของการแจ้งผิด AOI และการโหลดเครื่องด้วยโคบอตโตแล้วและคืนทุนเร็ว; แขนคัดเฉพาะและ LLM เป็นตัวตรวจหลักไม่คุ้มที่จะทำ***



แหล่งที่มา: การคืนทุนจากโมเดลผู้เขียน(บทที่ 4); แกนความพร้อมเป็นดุลยพินิจผู้เขียน

สิ่งที่ควรสร้างและไม่ควรสร้าง

	ข้อแนะนำ
สร้าง	การตรวจสอบด้วย AI และการจำแนกข้อบกพร่องบนภาพ AOI สำหรับ EMS ขนาดกลางที่มี AOI รุ่นเก่าหรือหลายยี่ห้อและไม่มีการอัปเกรด AI จากผู้ผลิต AOI การตรวจสอบที่ SMT AOI ครอบคลุมได้ไม่ดี (through-hole และการบัดกรีด้วยมือ การเคลือบ conformal coating สายเคเบิล คอนเนกเตอร์ และ FPC ลักษณะภายนอกขั้นสุดท้ายและสกรู) เซลล์โหลดและขนถ่ายด้วยหุ่นยนต์ร่วมในจุดที่มีการหยิบจับชิ้นส่วนทุกชิ้น (ฟิกซ์เจอร์ทดสอบ ถาด การบรรจุ) โดยมีการตรวจสอบเป็นส่วนเสริม ชุดข้อมูลอ้างอิงและโหมด shadow บนสายการผลิตจริงเป็นพื้นฐานของทุกคำกล่าวอ้าง
ไม่ควรสร้าง	แพลตฟอร์ม “AI บวกแขนหุ่นยนต์” แบบทั่วไป LLM แบบ multimodal เป็นผู้ตรวจสอบหลัก แขนหุ่นยนต์บนสาย SMT เพียงเพื่อหยิบแผ่น NG ออก (อุปกรณ์แยก NG หรือบัฟเฟอร์ทำได้) หุ่นยนต์มนุษย์และหุ่นยนต์แบบบริการ โมเดล frontier ในลูปควบคุมหรือฟังก์ชันความปลอดภัย กองหน่วยความจำ GPU ที่สถานีเพื่อรันโมเดล “ขนาดเต็ม” การขายตรงให้ fab โครงสร้างพื้นฐานวิกฤตของไต้หวัน หรือโรงงานอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการป้องกันของสหรัฐฯ
ทำงานร่วมกับใคร	ผู้ผลิตและผู้จัดจำหน่าย AOI (ช่องทางและอินเทอร์เฟซภาพ ผู้จัดจำหน่ายนำรายได้มา 46.68% ของรายได้ปี 2025 ของ Sinic-Tek) ผู้ผลิตหุ่นยนต์ร่วม (แขนที่ผ่านการรับรองและฟังก์ชันความปลอดภัย) บริษัท EMS ที่มี 10–40 สาย (การขยายแบบต่อเนื่องและเงินมัดจำ) ผู้ติดตั้งในพื้นที่ในไทยและที่อื่น (เพื่อปฏิบัติตามกฎ local-linkage ของ BOI)

สายการผลิตในปัจจุบัน

01 โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ใช้งานอะไรในปัจจุบัน และอะไรที่เป็นไปได้ทางเทคนิค

สายการผลิตปริมาณมาตรฐาน: AOI หลายเครื่อง, X-ray แบบสุ่มตัวอย่าง, การตรวจสอบแบบรวมศูนย์, 13–22 วินาทีต่อแผ่น

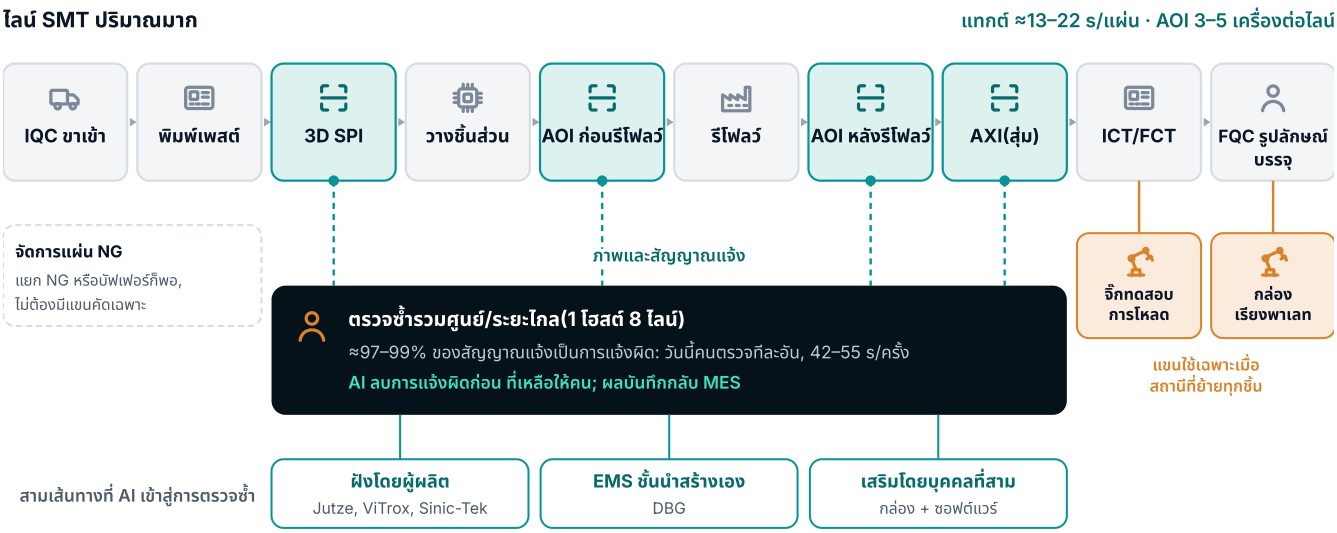
เอกสารปฐมภูมิจาก ODM ที่จดทะเบียนแสดงให้เห็นว่าสายการผลิตปริมาณในปี 2025–2026 มีลักษณะอย่างไรจริง เอกสารเสนอขายหลักทรัพย์ฮ่องกงของ Longcheer (ข้อมูลถึง 30 กันยายน 2025) ระบุการตรวจสอบคุณภาพ SMT ของบริษัทว่าเป็น “การตรวจด้วย X-ray, การตรวจน้ำยาประสาน (SPI), การตรวจด้วยสายตาอัตโนมัติ (AOI), การทดสอบการทำงานของ PCBA และการตรวจด้วยสายตา” กระบวนการของบริษัทคือ AOI ก่อนการรีโฟลว์, AOI หลังการรีโฟลว์, X-ray แบบสุ่มตัวอย่าง, แผ่น NG ไปที่สถานีซ่อม SMT แล้วจึงตรวจด้วยสายตาขั้นสุดท้าย โรงงานใน Huizhou, Nanchang และ Vietnam มีสาย SMT 34, 24 และ 8 สาย และสายการประกอบขั้นสุดท้าย 67, 60 และ 13 สาย (Longcheer H-share prospectus) single source, primary filing โรงงานแล็ปท็อปปี 2023 ของ Huaqin วางแผนสาย SMT 18 สายด้วยงบ AOI 30.6 ล้าน RMB หรือประมาณ 1.7 ล้าน RMB ต่อสาย ซึ่งที่ราคา 3D AOI ในประเทศเท่ากับ AOI สามถึงห้าเครื่องต่อสายสำหรับการตรวจก่อนและหลังการรีโฟลว์ของแผ่นสองหน้า (Huaqin A-share prospectus) primary filing + estimate ดังนั้นสายปริมาณจึงมักมีจุดตรวจสอบสองถึงสี่จุด ไม่ใช่จุดเดียว

เครื่องจักรมีความอัตโนมัติสูงอยู่แล้ว: Huaqin รายงานอัตราอัตโนมัติ 96% บนสาย SMT ของบริษัท (Huaqin H-share prospectus) single source คนที่เหลืออยู่ในงานตรวจสอบ ซ่อม ตรวจด้วยสายตา ทดสอบ และประกอบขั้นสุดท้าย และไม่มีบริษัทใดเผยแพร่ว่ามีผู้ตรวจสอบกี่คนต่อสาย (บทที่ 7)

การประมาณอิสระสามแหล่งตรงกันที่ takt **13–22 วินาทีต่อแผ่น** (เอกสารสิ่งแวดล้อมปี 2026 สำหรับห้าสายใน Hebei (Hebei SMT project EIA) สายแล็ปท็อปของ Huaqin และกรณี iFactory) หรือ 7–11 วินาทีต่อด้านสำหรับแผ่นสองหน้า estimate ส่วนที่ยากของสายแบบ high-mix ไม่ใช่ปริมาณแต่เป็นการเปิดตัวผลิตภัณฑ์ใหม่และการเปลี่ยนรุ่น และการเปลี่ยนรุ่นทุกครั้งคือการเริ่มต้นเย็นอีกครั้งสำหรับโมเดล AI

ด้านซอฟต์แวร์ สถานีตรวจสอบของผู้ผลิต AOI เองรวมศูนย์อยู่แล้ว: ซอฟต์แวร์สถานีซ่อมของ Sinic-Tek ให้ “โฮสต์หนึ่งเครื่องควบคุมอุปกรณ์ของสาย SMT แปดสาย” (Sinic-Tek prospectus) single source, primary, 2022 และหลังจาก Jabil ติดตั้งการควบคุม AOI ระยะไกล ViTrox V-ONE ในปี 2026 วิศวกรหนึ่งคนสามารถจัดการ AOI 5–8 เครื่องจากระยะไกลเทียบกับ 1–2 เครื่องในพื้นที่ (AtlasPCB) vendor claim ผลิตภัณฑ์ตรวจสอบ AI ของบุคคลที่สามเสียบเข้ากับสถานีกลางนี้ผ่านการส่งออกภาพและผลลัพธ์ของ AOI (IPC-CFX, IPC-HERMES-9852 หรือรูปแบบของผู้ขายเอง) ตัว AOI เองกำลังเพิ่ม AI อย่างรวดเร็ว: Yamaha กล่าวว่าการตัดสินด้วย AI ใช้เวลาประมาณหนึ่งวินาทีต่อครั้ง ช่วยผู้ตรวจสอบหลังภาพ NG 30 ภาพ และกลายเป็นคุณภาพ “สูงมาก” หลัง 1,000 ภาพ (DirectIndustry/Yamaha) vendor claim

FIG 02 **ไลน์ SMT ปริมาณมาก: คนนั่งหลัง AOI*แรงงานกระจุกที่จุดตรวจซ้ำหลังการตรวจด้วยแสงอัตโนมัติ นั่นคือจุดที่ AI เข้ามา***



แหล่งที่มา: เอกสารสาธารณะและวัสดุผู้ผลิต(Huaqin, DBG, Sinic-Tek และอื่นๆ); รวบรวมโดยผู้เขียน

ขั้นตอน	ผลิตภัณฑ์และเทคโนโลยีกระแสหลัก	ผู้จำหน่ายตัวแทน	AI ไปถึงไหนแล้ว
หลังการพิมพ์	3D SPI (แสงโครงสร้าง, moiré, บางรุ่นใช้ laser triangulation)	Koh Young, Sinic-Tek, TRI	การตัดสินน้ำยาประสานด้วย AI ของ OEM ในการผลิตจริง Jutze กล่าวว่าบางรุ่น “เป็น AI เต็มรูปแบบ”
หลังการวางชิ้นส่วนและการรีโฟลว์	2D/3D AOI พร้อม LED หลายมุมหลายสีและแสงโครงสร้าง 8–20 µm ต่อพิกเซล กล้อง 8–12 MP	Koh Young, Omron, Saki, TRI, ViTrox, Mirtec, Jutze, Sinic-Tek และอื่นๆ	การตรวจสอบด้วย AI ของ OEM (Jutze ในการผลิตจริง, ViTrox V510Ai, Sinic-Tek กับ Tencent) EMS ชั้นนำสร้างเอง (DBG) ส่วนเสริมจากบุคคลที่สาม
ข้อต่อแบบ bottom-terminated และซ่อนอยู่	X-ray แบบสุ่มตัวอย่างหรือ inline (AXI)	—	Hikvision อ้างว่าโมเดล Guanlan ตัดสิน void ใน X-ray ผิดน้อยกว่า 1% ของเวลา vendor claim
การตรวจสอบและซ่อม	สถานีตรวจสอบรวมศูนย์ (โฮสต์หนึ่งเครื่อง แปดสาย), การตรวจสอบระยะไกล, สถานีซ่อม	ซอฟต์แวร์ของผู้ผลิต AOI, ViTrox V-ONE	AI ปิดสัญญาณเตือนผิดพลาด คนจัดการส่วนที่เหลือ
การตรวจด้วยสายตา, IQC, FQC	ส่วนใหญ่ใช้คน บางรุ่นเป็นเครื่องตรวจลักษณะภายนอกด้วย AI พร้อมหุ่นยนต์โหลด	SmartMore และอื่นๆ	เครื่องตรวจลักษณะภายนอกในการผลิตจริง ไม่มีข้อมูลจำนวนคนสาธารณะสำหรับ IQC/FQC
การหยิบจับและการป้อนเครื่องจักร	แขนหกแกนและหุ่นยนต์ร่วม, SCARA, AMR, การนำทางด้วยวิชัน 2D/3D	FANUC, ABB, Yaskawa, KUKA, UR, Dobot, JAKA, Elite; Mech-Mind, Hikrobot	การรับรู้แบบเรียนรู้บวกการเคลื่อนไหวแบบโปรแกรมในการผลิตจริง VLA และหุ่นยนต์มนุษย์ยังอยู่ในขั้นนำร่อง
ข้อมูลและระบบ	MES, IPC-CFX, IPC-HERMES-9852	—	ผลลัพธ์เขียนกลับไปยัง MES การรองรับในอุปกรณ์รุ่นเก่าไม่สม่ำเสมอ

แหล่งที่มาของตาราง: เอกสารข้างต้นและ (Koh Young, Jutze 2025 annual report, Sinic-Tek 2025 annual report, ViTrox, Sohu on Hengtianyi, Xinhua on Hikvision)

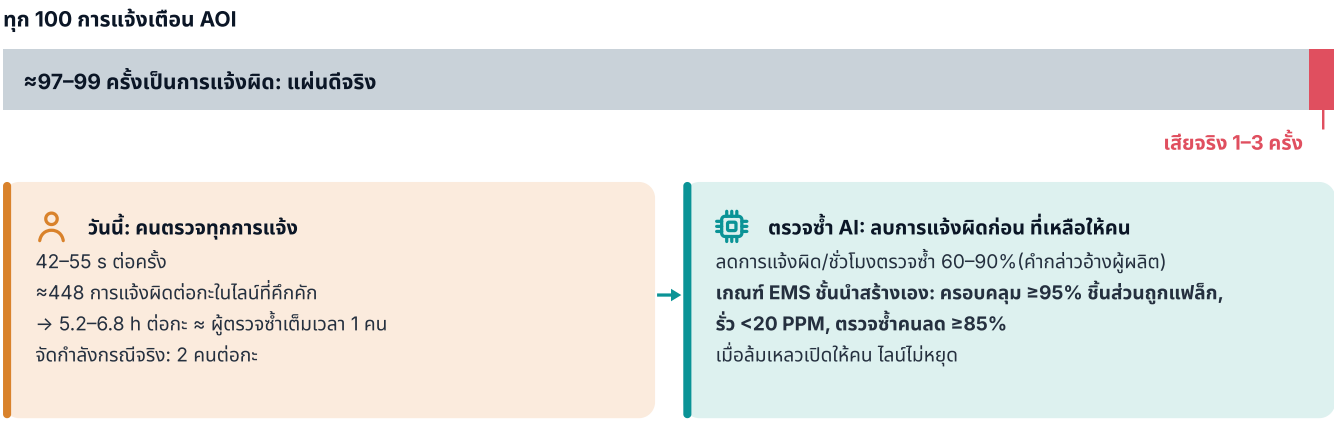
คนนั่งอยู่หลัง AOI เพราะสัญญาณเตือนส่วนใหญ่ผิดพลาด

ห่วงโซ่การตรวจสอบบนสาย SMT/PCBA กระแสหลักคือ: 3D SPI หลังการพิมพ์สำหรับน้ำยาประสานหาย ไม่เพียงพอ หรือเกิน การเชื่อมติดและการเยื้อง AOI หลังการวางชิ้นส่วน (ไม่บังคับ) และหลังการรีโฟลว์สำหรับชิ้นส่วนหาย เคลื่อน หมุน กลับด้าน หรือ tombstone และปริมาณบัดกรี X-ray เมื่อมี BGA หรือชิ้นส่วนแบบ bottom-terminated อื่นๆ จากนั้นจึงทดสอบ in-circuit หรือ flying-probe การทดสอบการทำงาน และการตรวจด้วยสายตาด้วยมือ AOI ทุกเครื่องมีที่นั่งตรวจสอบและสถานีซ่อมอยู่ด้านหลัง (Sinic-Tek prospectus, JLCPCB)

verified AOI หลังการรีโฟลว์พบได้บ่อยที่สุดและคุ้มค่าที่สุด แต่เห็นเฉพาะรูปทรงและพื้นที่ ข้อต่อ void และการเปียกใต้ BGA ต้องใช้ X-ray หรือการทดสอบทางไฟฟ้า (JLCPCB)

แรงงานอยู่ในงานตรวจสอบเพราะสัญญาณเตือนส่วนใหญ่ผิดพลาด EMS ในสหราชอาณาจักรรายหนึ่งบันทึก **สัญญาณผิดพลาด 54,019 ครั้ง เทียบกับข้อบกพร่องจริง 544 รายการใน 917 หมายเลขชิ้นส่วน หรือประมาณ 99% ของสัญญาณเตือน** (arXiv 2505.03576) single source, preprint ที่โรงงาน Rastatt ของ Siemens **97.5% ของแผ่นที่ AOI ปฏิเสธเป็นแผ่นดี** (Siemens case study) vendor claim สายที่คับคั่งมีสัญญาณผิดพลาดประมาณ 448 ครั้งต่อกะที่ 42–55 วินาทีต่อครั้ง คือ 5.2–6.8 ชั่วโมงต่อกะ หรือประมาณผู้ตรวจสอบเต็มเวลาหนึ่งคน (iFactory) vendor claim; hours are an estimate

FIG 03 **ประมาณ 97–99% ของสัญญาณแจ้ง AOI เป็นการแจ้งผิด*วันนี้คนยืนยันทุกสัญญาณ; การตรวจซ้ำ AI ลบการแจ้งผิดก่อนและส่งที่เหลือให้คน***



แหล่งที่มา: กรณีศึกษา Siemens, iFactory (คำกล่าวอ้างผู้ผลิต), รายงานประจำปี DBG 2025; ชั่วโมงตรวจซ้ำประมาณโดยผู้เขียน

จาก "ชั่วโมงตรวจสอบต่อกะ = แผ่น × สัญญาณผิดพลาดต่อแผ่น × วินาทีต่อครั้ง" ผู้ตรวจสอบหนึ่งคนครอบคลุมสายปริมาณได้ประมาณ 0.7–1 สายด้วย AOI แบบ rule-based เมื่อ AI กำจัดสัญญาณผิดพลาด 60–90% เวลาตัดสินอย่างเดียวจะทำให้คนหนึ่งคนครอบคลุมได้ 2–14 สาย แต่การเดิน การจัดการบัฟเฟอร์ NG และการส่งต่อเพื่อซ่อมจำกัดการครอบคลุมในพื้นที่ไว้ที่สองถึงสี่สายที่อยู่ติดกัน เฉพาะการตรวจสอบแบบรวมศูนย์หรือระยะไกลเท่านั้นที่เข้าใกล้เพดานทางทฤษฎี estimate; seconds per call come from one source เนื่องจาก AOI กระแสหลักสแกน 60–80 cm² ต่อวินาที (Yunheng 2026 AOI guide) แผ่นขนาด 20×15 ซม. ใช้เวลา 4–5 วินาที AI จึงต้องประมวลผลเฉพาะบริเวณที่ถูกตั้งธงไม่กี่จุดภายในหนึ่ง takt ไม่ใช่สแกนแผ่นใหม่

สิ่งที่ใช้ได้ผลในการผลิตแล้ว: การจำแนกแบบ supervised บนภาพของ AOI เอง

รูปแบบที่พิสูจน์แล้วคือการจำแนกด้วย deep learning แบบ supervised บนภาพจาก AOI ที่โรงงานมีอยู่แล้ว ส่วนเสริมของ Fujitsu บน AOI ของ ADLINK ในไต้หวันลดสัญญาณผิดพลาดได้ **มากกว่า 90%** (Fujitsu case) OKI ใช้ AI ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2026 เพื่อลดการยืนยันด้วยมือหลัง AOI ลงประมาณ **80%** ในธุรกิจ EMS ของตัวเอง (Circuits Assembly) Siemens รายงานการวิเคราะห์ด้วยมือลดลง 60% ประหยัด €160,287 ในปีแรก และคืนทุนในแปดเดือน (Siemens case study) all vendor claims สองสิ่งที่เหมือนกันในกรณีเหล่านี้: แทบไม่มีใครเผยแพร่อัตราการเล็ดรอด และทั้งหมดยังคงมีคนจัดการสัญญาณเตือนที่เหลือ กรณีเดียวที่ให้ตัวเลขการเล็ดรอด (จาก 0.8% เป็น 0.3% เทียบกับสัญญา 0.5%) มีความไม่สอดคล้องภายใน (iFactory) AI ลดชั่วโมงตรวจสอบ ไม่ใช่ลดงานตรวจสอบเอง

การตรวจสอบด้วย AI เคลื่อนจากส่วนเสริมของบุคคลที่สามไปสู่ฟีเจอร์ของ OEM และระบบภายใน ซึ่งเปลี่ยนสิ่งที่ผู้มาใหม่ถูกวัดเทียบ Jutze ในรายงานประจำปี 2025 ระบุ "การอัปเกรด 3D AOI" ว่าอยู่ในการผลิตปริมาณ และกล่าวว่า "ใช้อัลกอริทึม AI เพื่อขจัดการตรวจสอบด้วยมือที่ปลายการตรวจสอบ" (Jutze 2025 annual report) Sinic-Tek พัฒนา "ระบบตรวจสอบด้วยมือช่วยด้วย AI แบบ multimodal" ตั้งแต่ปี 2019 และกำลังร่วมพัฒนากับ Tencent ใน 3D AOI แบบบน-ล่าง เป้าหมายครอบคลุมข้อบกพร่อง 99.5%+ และความแม่นยำในการรู้จำ 98% (Sinic-Tek 2025 annual report) vendor claims in primary filings บริษัท EMS ขนาดใหญ่สร้างเอง รายงานประจำปี 2025 ของ DBG ระบุ "การตัดสินด้วย AI สำหรับการตรวจด้วยสายตา" เป็นโครงการที่เสร็จสมบูรณ์ซึ่ง "ครอบคลุมชิ้นส่วนที่ AOI ตั้งธงมากกว่า 95%" โดยมี "อัตราการเล็ดรอดต่ำกว่า 20 PPM" และ "ลดการตรวจสอบด้วยมือมากกว่า 85%" ตรวจสอบย้อนกลับได้ทั้งหมด (DBG 2025 annual report) single source, primary นั่นคือตัวเลขโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ตัวเดียวที่ฉันพบซึ่งให้ความครอบคลุม การเล็ดรอด และการลดลงพร้อมกัน **ผลิตภัณฑ์ของบุคคลที่สามที่ขายให้ EMS ระดับ 1 ต้องเทียบเท่ากับ DBG ที่ความครอบคลุม 95% การเล็ดรอด 20 PPM และการลดลง 85%** ต่ำกว่าระดับ 1 มาตรฐานคือการลดลง 50–85% ที่ผู้ขายโฆษณา

การตรวจจับความผิดปกติ (anomaly detection) ที่ฝึกเฉพาะชิ้นดีนั้นเร็ว (EfficientAD-S ใช้ 2.2 ms ต่อภาพ (EfficientAD, WACV 2024)) แต่อ่อนแอกับความผิดปกติเชิง “ตรรกะ” เช่น ชิ้นส่วนหายหรือผิด และวิธีที่ดีที่สุดเฉลี่ยต่ำกว่า 60% AU-PRO บน MVTec AD 2 ที่ยากกว่า (MVTec AD 2) single source ชิ้นส่วนหายและผิดควรตรวจเทียบกับ CAD และ BOM ดีกว่า

เพดานในทุกราคา: เครื่องจักรหลายชั้น คนน้อยมาก แต่ไม่ใช่ศูนย์

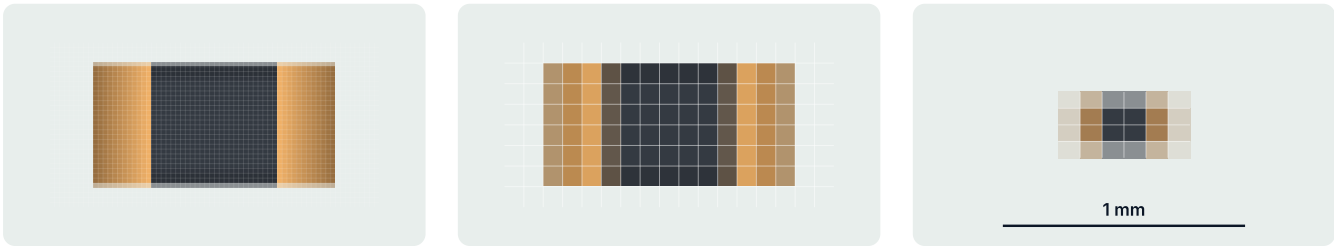
ฉันไม่พบโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ใดที่ยกเลิกการตรวจสอบด้วยมือทั้งหมดและเล็ดรอดเป็นศูนย์ แนวปฏิบัติสำหรับผลิตภัณฑ์ IPC-A-610 Class 3 (ความน่าเชื่อถือสูง) ยังคงให้ผู้ตรวจสอบที่ผ่านการฝึกตัดสินกรณีเส้นแบ่งที่เกณฑ์อัตโนมัติจำแนกไม่ได้ และผู้ประกอบ PCB รายหนึ่งเรียก “การตรวจอัตโนมัติแทนการลงนามโดยมนุษย์ได้” ว่า “ความเข้าใจผิดที่พบบ่อย” (PCBCart) single source พื้นฐานมนุษย์ก็ต้องแก้ไขเช่นกัน: อ้างการศึกษาของ Sandia ปี 2012 ผู้ตรวจสอบด้วยสายตาหนึ่งคนจับข้อบกพร่องได้ดีที่สุดประมาณ **80%** และสองคนต่อเนื่องกันประมาณ 96% (Instrumental) single source, cited by a vendor คำกล่าวอ้างที่ป้องกันได้คือ “AI บวกวงจรตรวจสอบโดยมนุษย์เล็กๆ ดีกว่าการตรวจด้วยมือล้วน” ไม่ใช่ “AI แทนการตรวจสอบ”

เมื่อไม่มีข้อจำกัดงบ เพดานคือ 3D SPI, 3D AOI, X-ray, การตรวจสอบด้วย AI และสถานีตรวจลักษณะภายนอกด้วย AI ซ้อนกัน โดยเหลือคนเฉพาะกรณีเส้นแบ่ง ผลิตภัณฑ์ใหม่และการเปลี่ยนรุ่น ประเภทข้อบกพร่องใหม่ และการลงนามของลูกค้า โรงงานเรือธงรายงานการตรวจด้วยมือลดลง 85–92% (I-Connect007, 2021, WiAdvance) vendor claims การประมาณเพดานแบบไม่จำกัดงบของฉันคือแรงงานตรวจสอบอยู่ที่ 8–15% ของปัจจุบัน estimate การประกอบขั้นสุดท้ายยังต้องใช้แรงงานมาก: การทำปุ่ม iPhone 16 แบบอัตโนมัติถูกยกเลิกเพราะอัตราข้อบกพร่องสูง (9to5Mac) single source

กล้องความละเอียดสูงทั่วไปไม่ใช่ AOI

AOI ในการผลิตถ่ายภาพทีละ tile ที่ 8–20 µm ต่อพิกเซล ด้วยกล้อง 8–12 MP แสงหลายมุมหลายสีที่โปรแกรมได้ และ 3D แบบแสงโครงสร้าง (Koh Young, Saki) verified อุตสาหกรรมสังเกตมานานแล้วว่าชิ้นส่วน 01005 ครอบคลุมเพียงประมาณ 8×16 พิกเซลที่ 25 µm ต่อพิกเซล ซึ่ง “อาจไม่เพียงพอ” สำหรับการตัดสินที่เชื่อถือได้ (Circuits Assembly, 2007) ด้วยเลขคณิตเดียวกัน estimate กล้อง 4K เหนือแผง 300 มม. ได้ประมาณ **78 µm ต่อพิกเซล**: ชิ้นส่วน 0402 ระบบอิมพีเรียลมีประมาณ 13×6 พิกเซล เพียงพอสำหรับการมีอยู่และการเยื้องหยาบ แต่ไม่พอสำหรับรูปทรงข้อต่อ และ 01005 มีประมาณ 5×3 พิกเซล แทบมองไม่เห็น การได้ 15 µm ต่อพิกเซลทั่วทั้งแผงต้องใช้ประมาณ 330 เมกะพิกเซล นั่นคือเหตุผลที่ AOI เลื่อนกล้องไปทั่วแผ่น เมื่อใครพูดว่า “0402” ให้ตรวจสอบว่าหมายถึงแบบไหน: 0402 ระบบเมตริกคือ 01005 ระบบอิมพีเรียล ซึ่งไกลเกินกล้องมุมกว้างใดๆ

FIG 04 ***กล้องเอนกประสงค์ไม่ใช่ AOI*** ***กล้อง 4K บนแผ่น 300 mm ให้ ≈78 µm/px: ชิ้น 0402 เหลือ ≈13×6 px และ 01005 หายไป***



AOI: 8–20 µm/px
0402 ≈100×50 px

กล้อง 4K ดูแผ่น 300 mm: ≈78 µm/px
0402 เหลือ ≈13×6 px:
พอระบุได้แค่ว่ามีหรือไม่และการเยื้องชัด

กล้องตัวเดิมดู 01005
≈5×3 px: มองไม่เห็นจริง

แหล่งที่มา: Circuits Assembly; การคำนวณผู้เขียนสำหรับแผ่น 300 mm และเซนเซอร์ 4K กริดพิกเซลเป็นภาพประกอบ

บนสายที่มี AOI อยู่แล้ว ตำแหน่งที่ดีที่สุดของ AI คือบนภาพของ AOI เฉพาะสายที่ไม่มี AOI หรือสถานีปลายสายเท่านั้นที่สมเหตุสมผลกับสถานีกล้องปิดพร้อมแสงควบคุม กล้องความละเอียดสูงแบบเปิดเหนือสายเสี่ยงต่อแสงและเงาจากสภาพแวดล้อมมากที่สุด (CSDN)

การประกอบและการหยิบจับ: การรับรู้แบบเรียนรู้บวกการเคลื่อนไหวแบบโปรแกรมอยู่ในการผลิตแล้ว

รายงานปี 2026 ของ IFR กล่าวว่า “แมชชีนวิชันสำหรับการตรวจสอบและการนำทางหุ่นยนต์นั้นสุกงอมและอยู่ในระดับอุตสาหกรรม” ขณะที่ “physical AI ทั่วไปและการเรียนรู้จากการจำลองและประสบการณ์ยังไม่อยู่ในระดับอุตสาหกรรม” (IFR World Robotics 2026 executive

summary) single source, primary อิเล็กทรอนิกส์คือผู้ซื้อหุ่นยนต์รายใหญ่ที่สุด (ติดตั้ง 142,235 หน่วยทั่วโลกในปี 2025 คิดเป็น 59% ของการติดตั้งทั้งหมดในจีน (IFR, IFR China release)) แต่จีนมีหุ่นยนต์เพียง 166 ตัวต่อคนงานการผลิต 10,000 คน เทียบกับ 307 ในสหรัฐฯ (IFR, April 2026) รูปแบบในการผลิตคือการรับรู้แบบเรียนรู้บวกการเคลื่อนไหวแบบ deterministic การเคลื่อนไหวแบบเรียนรู้ครบวงจรใกล้ระดับการผลิตเฉพาะที่สถานีแบบมีโครงสร้าง (บทที่ 3 และ 6)

แต่ละภูมิภาคใช้อะไรได้บ้าง

จีนแผ่นดินใหญ่พึ่งพาโมเดลในประเทศและ local weights ในไต้หวัน อัตลักษณ์ของลูกค้าเป็นตัวตัดสิน ในสหรัฐฯ ภาษีและการรับรองเป็นตัวตัดสิน

องค์ประกอบ	จีนแผ่นดินใหญ่	ไต้หวัน (โรงงานเอกชน)	เอเชียตะวันออกเฉียงใต้	สหรัฐอเมริกา
Claude (ทุกช่องทาง)	● ไม่มีให้ใช้	● มีเงื่อนไข: ผู้จำหน่ายต้องไม่ถูกถือหุ้นใหญ่หรือควบคุมโดยบุคคลหรือนิติบุคคลในจีนแผ่นดินใหญ่ ฮ่องกง หรือมาเก๊า	● เช่นเดียวกัน	● เช่นเดียวกัน
GPT และ Gemini cloud	● ไม่มีให้ใช้	● ใช้ได้	● ใช้ได้ (รายชื่อประเทศยังไม่ได้ตรวจทีละประเทศ)	● ใช้ได้
โมเดล cloud จีน (Qwen, DeepSeek, Doubao, GLM, Kimi)	● ใช้ได้ (โมเดลที่ยื่นจดทะเบียนแล้ว การให้บริการต้องจดทะเบียน)	● ถูกกฎหมาย แต่โฮสต์ในจีนแผ่นดินใหญ่ไม่ค่อยผ่านการตรวจสอบความปลอดภัยของลูกค้า ถูกห้ามในภาครัฐ รัฐวิสาหกิจ และโครงสร้างพื้นฐานวิกฤต	● ถูกกฎหมาย (โหนดระหว่างประเทศ)	● ถูกกฎหมาย แต่มีการตรวจสอบเข้มงวด
local open weights ที่มาจากจีน (Qwen, GLM, DeepSeek)	● ตัวเลือกแรก การติดตั้งในโรงงานเอกชนไม่ต้องยื่นจดทะเบียนโมเดลหรืออัลกอริทึม (การอ่านของสำนักกฎหมาย)	● ใช้ได้ (ภาครัฐถูกจำกัด)	● ใช้ได้	● มีเงื่อนไข: การตรวจสอบแหล่งกำเนิด
local open weights ที่ไม่ได้มาจากจีน (เช่น Gemma 4)	● ใช้ได้	● ใช้ได้	● ใช้ได้	● ใช้ได้
โมเดลวิชันแบบ non-generative ดั้งเดิม	● ใช้ได้ (นอกกฎ generative AI)	● ใช้ได้	● ใช้ได้	● ใช้ได้
Jetson Thor/T5000/T4000, DGX Spark	● ใช้ได้: NVIDIA จำแนกเป็น 5A992.c ไม่ต้องมีใบอนุญาตสหรัฐฯ สำหรับโรงงานพลเรือนทั่วไป Spark มี SKU สำหรับจีน ราคาช่องทางสูงกว่าราคาประกาศสหรัฐฯ ประมาณ 40–60%	● ใช้ได้	● ใช้ได้	● ใช้ได้
RTX 5090, RTX PRO 6000, DGX Station	● ไม่มีให้ใช้: สองรายการแรกเป็น 4A090.a, DGX Station 5A992.z ทางเลือกถูกกฎหมายคือ 4090D, 5090 D V2, RTX PRO 5000 72GB, RTX 6000D, L20 (4A994.l)	● ใช้ได้	● ใช้ได้ แต่ผู้ซื้อที่มีสำนักงานใหญ่หรือถือหุ้นจากจีนนับเป็นจีน มาเลเซียต้องมีใบอนุญาตสำหรับการส่งออกและถ่ายลำ	● ใช้ได้
Mac Studio M5 Ultra 512 GB	● ใช้ได้ (ร้าน Apple China)	● ใช้ได้	● สันนิษฐานว่าใช้ได้	● ใช้ได้
Huawei Ascend และตัวเร่งความเร็วจีนอื่นๆ	● ใช้ได้	● ความเสี่ยงสูง	● ความเสี่ยงสูง	● ใช้ไม่ได้ในทางปฏิบัติ

องค์ประกอบ	จีนแผ่นดินใหญ่	ไต้หวัน (โรงงานเอกชน)	เอเชียตะวันออกเฉียงใต้	สหรัฐอเมริกา
แขนตายตัว, AOI, กล้องอุตสาหกรรมที่ผลิตในจีนแผ่นดินใหญ่	● ใช้ได้	● นำเข้าได้ ตั้งแต่วันที่ 1 ธันวาคม 2025 ทางการสามารถดำเนินการโดยตรงต่อแบรนด์จีนแผ่นดินใหญ่และหน่วยงาน รัฐวิสาหกิจ มูลนิธิบางแห่ง และผู้ให้บริการโครงสร้างพื้นฐานวิกฤตอาจถูกจำกัดหรือห้ามใช้	● ใช้ได้	● ถูกกฎหมาย แต่ภาษีรวมประมาณ 40% สำหรับแขน 37.5% สำหรับเครื่องมือประเภท AOI และกล้อง 25% สำหรับ edge computer
AMR และ mobile manipulator ที่ผลิตในต่างประเทศ	● ใช้ได้	● ใช้ได้	● ใช้ได้	● รุ่นใหม่ต้องได้รับการอนุมัติแบบมีเงื่อนไขจากกระทรวงกลาโหมสหรัฐฯ
กล้อง Hikvision และ Dahua	● ใช้ได้	● ภาคเอกชนใช้ได้ ภาครัฐห้าม	● ใช้ได้	● การอนุมัติ FCC ใหม่ถูกปิดกั้น ห้ามสำหรับผู้รับเหมารัฐบาลกลาง
ความปลอดภัยและการรับรองหุ่นยนต์	● GB 11291.1-2011 และ GB 11291.2-2013 บังคับ อยู่ระหว่างแก้ไขตั้งแต่เดือนเมษายน 2026 การรับรอง CR เป็นแบบสมัครใจ GB/T 39404-2026 ครอบคลุมความปลอดภัยไซเบอร์ของตัวควบคุม	● ใช้รั้วเป็นค่าเริ่มต้น การทำงานร่วมแบบไร้รั้วต้องเป็นไปตาม CNS 14490 หรือ ISO 10218 พร้อมการประเมินเป็นลายลักษณ์อักษร	● ตามลูกค้าและปลายทางการส่งออก ยืนยันเป็นลายลักษณ์อักษรก่อนจัดส่ง	● อุปกรณ์ไฟฟ้าต้อง “approved” (ในทางปฏิบัติคือเครื่องหมาย NRTL หรือการประเมินภาคสนาม) UL 1740 กำหนดให้เซลล์หุ่นยนต์เป็นไปตาม ISO 10218-2 ตั้งแต่วันที่ 11 สิงหาคม 2025
Fab และโรงงานผลิตภัณฑ์ควบคุม	—	● สัญญาจัดซื้อของ TSMC กำหนด SEMI E187 อุปกรณ์จีนแผ่นดินใหญ่กำลังถูกถอดออกจาก fab 2 nm	—	● ข้อมูลทางเทคนิคของ ITAR รวมถึง “ภาพถ่าย” นโยบายปฏิเสธต่อจีน ผู้จำหน่ายที่ถูกควบคุมจากจีนแผ่นดินใหญ่ไม่สามารถให้บริการโรงงานอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการป้องกันได้ในทางปฏิบัติ

แหล่งที่มาของตาราง: (Anthropic supported regions, OpenAI supported countries, Gemini availability, CAC interim measures on generative AI, NVIDIA export classification data, eCFR 15 CFR 774, NVIDIA China DGX Spark, Apple China, Covington on new BIS rules, Greenberg Traurig, June 2026, Fulcrum, Tom’s Hardware on Ascend guidance, Taiwan BOFT import list, Taiwan Cyber Security Management Act history, Taiwan review rules for products endangering national cybersecurity, Taipei Times, USITC HTS chapter 99, Latham & Watkins, IPVM, China national standards platform, GB 11291.2, Intertek UL 1740 update, eCFR 22 CFR 126.1)

จีนแผ่นดินใหญ่: ระบบครบชุด แต่ทั้งโมเดล frontier แบบปิดและเครื่องเดี่ยวที่แข็งแกร่งที่สุดก็เข้าไม่ได้ โมเดล cloud ในประเทศที่จดทะเบียนแล้ว local open weights (Qwen ภายใต้ Apache-2.0, GLM และ DeepSeek ภายใต้ MIT) โมเดลวิชันดั้งเดิม และ AOI กล้อง และหุ่นยนต์ร่วมในประเทศล้วนใช้ได้ การจำแนกการส่งออกของ NVIDIA เองระบุชุด Jetson AGX Thor โมดูล T5000/T4000 และ DGX Spark เป็น 5A992.c ดังนั้นโรงงาน EMS หรือ PCBA ทั่วไปไม่ต้องมีใบอนุญาตสหรัฐฯ ขณะที่ RTX 5090 และ RTX PRO 6000 (4A090.a) และ DGX Station (5A992.z, TPP 58,484) ซื้อไม่ได้ในจีนแผ่นดินใหญ่ (NVIDIA export classifications, eCFR) primary; the legal reading is mine and not legal advice RS China ระบุชุด Thor ราคา 59,104 RMB รวมภาษี ประมาณ 1.4 เท่าของราคาประกาศสหรัฐฯ (RS China)

สำนักกฎหมายสี่แห่งเห็นตรงกันว่าการติดตั้งในโรงงานเอกชนเพื่อใช้เองไม่ต้องยื่นจดทะเบียนโมเดลหรืออัลกอริทึม ขณะที่บริการ multi-tenant แบบโฮสต์อยู่ในเขตสีเทา (Covington, FPF, JunHe) verified: consistent readings, no official ruling GB 11291.1-2011 และ GB 11291.2-2013 ยังคงเป็นพื้นฐานความปลอดภัยหุ่นยนต์ที่บังคับ และอยู่ระหว่างแก้ไขตั้งแต่วันที่ 28 เมษายน 2026 GB/T 39404-2026 ว่าด้วยความปลอดภัยไซเบอร์ของตัวควบคุมมีผลวันที่ 1 พฤศจิกายน 2026 (revision plan 20262542, GB/T 39404-2026) single source, primary จนกว่า GB 11291 ใหม่จะมา (2028–2029 estimate) ให้ออกแบบตาม ISO 10218:2025 และเก็บเอกสารการปฏิบัติตาม GB 11291 ไว้

ไต้หวัน: โรงงานเอกชนใช้ได้เกือบทุกอย่าง อัตลักษณ์ของลูกค้าเป็นตัวตัดสิน Frontier API, open weights และอุปกรณ์จีนแผ่นดินใหญ่ล้วนถูกกฎหมาย (data.gov.tw) แต่ตั้งแต่พระราชบัญญัติการจัดการความปลอดภัยไซเบอร์ที่แก้ไขมีผลวันที่ **1 ธันวาคม 2025** ทางการสามารถดำเนินการโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์ที่เป็น “แบรนด์จีนแผ่นดินใหญ่” และจำกัดที่หน่วยงานรัฐ รัฐวิสาหกิจ และผู้ให้บริการโครงสร้างพื้นฐานวิกฤต (Laws & Regulations Database, review rules) verified รายชื่อผู้ให้บริการโครงสร้างพื้นฐานวิกฤตเป็นความลับ และ TSMC ได้เขียน SEMI E187 ลงในสัญญาจัดซื้อ (CNA) และมีรายงานว่ากำลังถอดอุปกรณ์จีนแผ่นดินใหญ่ออกจาก fab 2 nm (TrendForce) single source EMS เอกชน การประกอบ และโรงงาน PCBA ขนาดเล็กเปิดกว้าง fab สาธารณูปโภคในนิคม และลูกค้าที่เกี่ยวข้องกับรัฐปิดในทางปฏิบัติ ผู้จำหน่ายที่ถูกควบคุมจากจีนแผ่นดินใหญ่ควรออกแบบให้เป็นไปตาม E187 ส่ง software bill of materials เสนอการอัปเดตแบบออฟไลน์ และไม่เชื่อมต่อระยะไกลจากจีนแผ่นดินใหญ่เด็ดขาด

เอเชียตะวันออกเฉียงใต้: ข้อจำกัดน้อยที่สุด ปัญหาคือการคืนทุนช้าและบริษัทแม่จีน ทุกอย่างใช้ได้ แต่แนวทางของสหรัฐฯ วันที่ 31 พฤษภาคม 2026 กำหนดให้มีใบอนุญาตในการส่งออกสินค้าคอมพิวเตอร์ขั้นสูงไปยังนิติบุคคลที่มีสำนักงานใหญ่หรือถือหุ้นจากจีน แม้ผู้รับปลายทางจะอยู่ในประเทศที่สาม (Greenberg Traurig) single source และมาเลเซียมีใบอนุญาตของตัวเองสำหรับชิปขั้นสูง (Fulcrum) อุปสงค์กำลังย้ายมาที่นี่: TrendForce คาดว่าไทย เวียดนาม และมาเลเซียจะเข้าใกล้ 50% ของกำลังการผลิต SMT ของ server-ODM ในปี 2026 (TrendForce) single source, a 2023 forecast

สหรัฐอเมริกา: ระบบครบชุด ในราคาของภาษี การรับรอง และข้อมูลควบคุม ภายใต้ chapter 99 ของตารางภาษีสหรัฐฯ แขนหุ่นยนต์ที่ผลิตในจีนแผ่นดินใหญ่จ่ายภาษีรวมประมาณ 40% เครื่องมือประเภท AOI และกล้องประมาณ 37.5% และ edge computer 25% ผลิตในมาเลเซียหรืออินโดนีเซียประมาณ 10–12.5% ในเวียดนาม ไทย หรือฟิลิปปินส์ 12.5–15% ในไต้หวัน 10% โดยคอมพิวเตอร์ 0% นอกจีนแผ่นดินใหญ่ (USITC HTS chapter 99, Great Lakes Customs Law) primary schedule + estimate ประกาศของ USTR วันที่ 10 พฤศจิกายนขยายข้อยกเว้น Section 301 เก่า 178 รายการถึงวันที่ 9 มกราคม 2027 ซึ่งไม่มีรายการใดครอบคลุมหุ่นยนต์ เครื่องมือตรวจสอบ กล้อง หรือคอมพิวเตอร์ (Federal Register 2026-22925) verified

OSHA กำหนดให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานที่ทำงานต้อง “approved” (ในทางปฏิบัติคือเครื่องหมาย NRTL หรือการประเมินภาคสนามประมาณ $3,000 ถึง $20,000+ ต่อเซลล์) และตั้งแต่วันที่ 11 สิงหาคม 2025 UL 1740 นำเซลล์หุ่นยนต์ทั้งเซลล์มาอยู่ใต้ ISO 10218-2 (eCFR 1910.399, Intertek, Industrial Monitor Direct) อิเล็กทรอนิกส์เพื่อการป้องกันปิดสำหรับผู้จำหน่ายที่ถูกควบคุมจากจีนแผ่นดินใหญ่ในทางปฏิบัติ: ITAR ถือว่าภาพถ่ายการผลิตเป็นข้อมูลทางเทคนิคและใช้นโยบายปฏิเสธต่อจีน (eCFR 22 CFR 120.33, eCFR 22 CFR 126.1) เซลล์ที่ส่งไปสหรัฐฯ ควรใช้แขนตายตัว กล้องที่ไม่ถูกจำกัด และโมเดลในพื้นที่หรือ US-cloud โดยประกอบขั้นสุดท้ายในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในจุดที่เปลี่ยนแหล่งกำเนิดจริง

ในงบใดก็ตาม เพดานแตกต่างกันตามภูมิภาคแต่ไม่มีที่ไหนถึงคนเป็นศูนย์ estimate จีนแผ่นดินใหญ่สามารถซ้อน 3D SPI ในประเทศ, 3D AOI, X-ray, การตรวจสอบด้วย AI และทีม AI ภายในเพื่อลดแรงงานตรวจสอบลงเหลือ 8–15% แต่เมื่อไม่มีโมเดล frontier แบบปิดหรือ DGX Station Q&A ด้วย LLM ทั่วทั้งโรงงานต้องรันบน local open weights และการคำนวณในประเทศ (โมเดลขนาดเต็มสำหรับผู้ใช้จำนวนมากต้องใช้เซิร์ฟเวอร์ Ascend แปดการ์ดอย่างน้อยสองเครื่อง) ไต้หวันและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ใช้สิ่งที่ดีที่สุดได้ทั้งหมดในทางเทคนิค รวมถึง frontier API และ DGX Station แต่ถูกจำกัดโดยอัตลักษณ์ลูกค้า แบรนด์จีนแผ่นดินใหญ่ และใบอนุญาตของบริษัทแม่จีน สหรัฐฯ ไม่มีข้อจำกัดทางเทคนิค ในราคาของภาษี การรับรอง NRTL และการแยกบุคลากรสำหรับข้อมูลควบคุม ทุกที่ คนยังคงอยู่สำหรับกรณีเส้นแบ่งผลิตภัณฑ์ใหม่และการเปลี่ยนรุ่น ประเภทข้อบกพร่องใหม่ และการลงนามของลูกค้า

ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ขายข้ามภูมิภาคต้องมี model stack สองชุด: ชุดจีนแผ่นดินใหญ่บนโมเดลในประเทศที่จดทะเบียนแล้วหรือ local open weights และชุดต่างประเทศบน frontier API บวกโมเดลในพื้นที่ที่ไม่ใช่แหล่งกำเนิดจีน นโยบายของ Anthropic ที่มีผลวันที่ 12 พฤศจิกายน 2026 ตัดสินจากความเป็นเจ้าของและการควบคุม ดังนั้นผู้จำหน่ายที่ถูกควบคุมจากจีนแผ่นดินใหญ่ไม่สามารถสร้างบน Claude ได้แม้ผ่านบริษัทย่อยในต่างประเทศ แพลตฟอร์ม cloud หรือผู้จำหน่ายต่อ (Anthropic) single source, primary

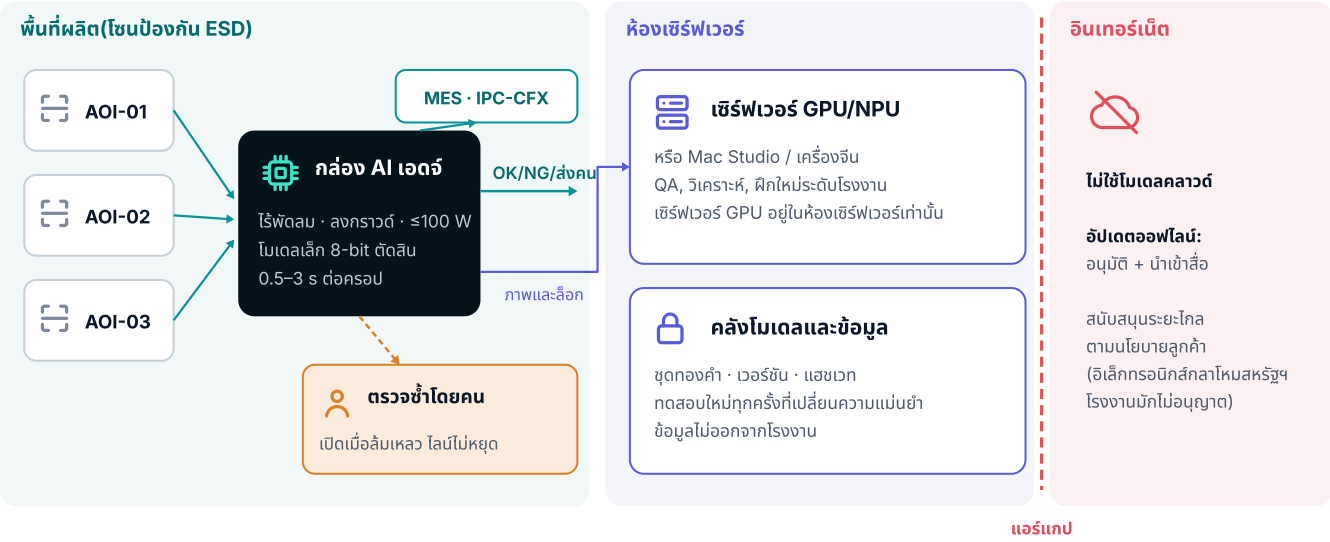
ภายในองค์กร

02 การรัน AI ภายในโรงงาน: ห้องปลอดฝุ่น, air gap, ฮาร์ดแวร์ และ quantization

ในโรงงาน air-gapped ข้อจำกัดคือกระบวนการ ไม่ใช่การคำนวณ

การตรวจสอบด้วยวิชันแบบออฟไลน์เต็มรูปแบบเป็นเรื่องปกติ ข้อจำกัดอยู่ที่กระบวนการ คู่มือปี 2024 ของ MIIT จีนว่าด้วยความปลอดภัยของระบบควบคุมอุตสาหกรรมกำหนดให้มีการแบ่งโซน ไฟร์วอลล์หรือ data diode การบำรุงรักษาระยะไกลแบบมีเวลาจำกัดและมีการตรวจสอบ สื่อที่สแกนแล้ว และแพตช์ที่ทดสอบแล้ว (guide text) single source ลูกค้าเซมิคอนดักเตอร์เพิ่ม SEMI E187 และ E188 ซึ่ง TSMC เขียนลงในสัญญาจัดซื้อในปี 2023 (SEMI, TXOne) verified ผลลัพธ์กลับไปยัง MES ผ่าน IPC-CFX และอัตลักษณ์แผ่นเดินทางผ่าน IPC-HERMES-9852 (Hermes standard) กับดักที่พบบ่อยคือไลเซนส์ที่สมมติว่ามีเครือข่าย: โหมดออฟไลน์ของ Roboflow แคช weights บนสัญญาเช่า 30 วัน (Roboflow) ผลิตภัณฑ์ออฟไลน์ต้องมีการเปิดใช้งานแบบออฟไลน์ การอัปเดตที่ลงนามบนสื่อที่สแกนแล้ว software bill of materials การควบคุม USB บันทึกการตรวจสอบในพื้นที่ และ CFX adapter

FIG 05 ***การติดตั้งแบบแอร์แกป กล่องเล็กที่ไลน์ตัดสิน; ห้องเซิร์ฟเวอร์ตอบคำถาม; เมื่อล้มเหลวตกกลับให้คนและข้อมูลไม่ออกจากโรงงาน***



แหล่งที่มา: การสังเคราะห์ผู้เขียน(บทที่ 2)

โมเดล frontier แบบปิดในทางปฏิบัติไม่เข้าห้องเซิร์ฟเวอร์ของโรงงาน Gemini มีให้แบบ air-gapped เฉพาะผ่าน Google Distributed Cloud สำหรับรัฐบาลและองค์กรขนาดใหญ่ (Google Cloud) Foundry Local ของ Microsoft เปิดโมเดลขนาดใหญ่เฉพาะ “ลูกค้าที่ผ่านคุณสมบัติ” และไม่ระบุโมเดล GPT ใด (Microsoft) Claude มีเฉพาะใน cloud region ของรัฐบาล ไม่มีการติดตั้งภายในองค์กร (Claude for government) ทั้งสามไม่มีให้ใช้ในจีนแผ่นดินใหญ่ อุปกรณ์โรงงานต้องออกแบบรอบ open weights โมเดล frontier อย่างมากก็แค่ติดป้ายหรืออธิบายภาพที่สำนักงานใหญ่แบบออฟไลน์ เมื่อลูกค้าอนุญาตให้นำภาพที่ไม่ระบุตัวตนออกมาได้

ฮาร์ดแวร์ห้องเซิร์ฟเวอร์ควรถือเป็นเกรดสำนักงาน: Mac Studio ถูกกำหนดอุณหภูมิ 10–35 °C และ DGX Spark 5–30 °C โดยมีรายงานการปิดตัวจากความร้อนภายใต้การอนุมานต่อเนื่อง (Apple, NVIDIA forum) verified สายการผลิตใช้กล่องอุตสาหกรรมไร้พัดลม เช่น PC อุตสาหกรรม Jetson T4000 ที่กำหนดอุณหภูมิ −25 ถึง 60 °C (AAEON) vendor claim เนื่องจากชั่วโมง downtime หนึ่งชั่วโมงทำให้โรงงานขนาดใหญ่เสียหาย $36,000 ถึง $2.3 ล้าน (Siemens True Cost of Downtime 2024) vendor survey ทุกขั้นตอน AI บนสายต้อง **fail open**: เมื่อเกิดข้อผิดพลาดใดๆ จะถอยกลับไปยังกระบวนการ AOI บวกคนที่มีอยู่

โซนสะอาดและ ESD: พื้นที่ SMT ทั่วไปเป็นพื้นที่ป้องกัน ESD ไม่ใช่ห้องปลอดฝุ่นที่จัดระดับ

สิ่งที่จำกัดตำแหน่งของเครื่องคำนวณคือไฟฟ้าสถิตและการไหลของอากาศ ไม่ใช่ระดับความสะอาด พื้นที่ประกอบ SMT ส่วนใหญ่ “ไม่ถูกควบคุมอนุภาคอย่างเป็นทางการ” และโรงงานระดับโลก “อาจถึงหรือเข้าใกล้ ISO 8” (Circuitnet expert panel) single source PCBA ทางการแพทย์และโมดูลกล้องมักอยู่ใน ISO 7 แผ่นดิบและการจัดตำแหน่งแสงอยู่ใน ISO 5–6 ในพื้นที่ (PCBSync) single source ผู้สร้างห้องปลอดฝุ่นเสนอ ISO 7–8 สำหรับ SMT ทั่วไป (Angstrom Technology) vendor claim

ข้อกำหนดสากลคือการควบคุม ESD: ANSI/ESD S20.20-2021 กำหนดให้ตัวนำแยกอยู่ต่ำกว่า 35 V และเก็บฉนวนสนามแรงห่างจากอุปกรณ์ไวต่อไฟฟ้าสถิตอย่างน้อย 30 ซม. (ANSI, ESDA, Desco) verified Fab วางเครื่องคำนวณใน sub-fab หรือศูนย์ข้อมูล ในชั้นวางระบายความร้อนด้วยของเหลวที่เป็นไปตาม SEMI S2/S8/F47 (Prodrive) vendor claim

การที่อุปกรณ์จะเข้าเขตสะอาดได้หรือไม่ถูกทดสอบเรื่องการปล่อยอนุภาคภายใต้ ISO 14644-14 หุ่นยนต์มีใบรับรองดังกล่าว (Fraunhofer IPA) แต่ฉันไม่พบ PC อุตสาหกรรม กล่อง edge AI หรือเซิร์ฟเวอร์ GPU ใดที่มี CE, FCC และ IEC 60068 แสดงว่ากล่องทนต่อสภาพแวดล้อมได้ ไม่ได้แปลว่าเข้าเขตป้องกัน ESD ได้ ผู้ประสานงาน ESD ของลูกค้าเป็นผู้ตรวจสอบ เซิร์ฟเวอร์ GPU ไม่เคยอยู่บนสาย: DGX Station ดึงไฟ 1,292 W ที่ GPU ในการทดสอบ (StorageReview)

FIG 06 **โซนสะอาดและ ESD กำหนดที่วางคอมพิวต์*โถง SMT ทั่วไปเป็นพื้นที่ป้องกัน ESD ไม่ใช่คลีนรูม เซิร์ฟเวอร์ GPU และ NPU อยู่ในห้องเซิร์ฟเวอร์***



แหล่งที่มา: ANSI/ESD S20.20, IEC 61340-5-1, ISO 14644, มาตรฐาน SEMI และวัสดุผู้ผลิต; รวบรวมโดยผู้เขียน

โซน	สภาพแวดล้อมทั่วไป	เครื่องคำนวณที่สาย	เซิร์ฟเวอร์ GPU/NPU
พื้นที่ SMT/PCBA ทั่วไป (คอนซูเมอร์, อุตสาหกรรม)	พื้นที่ป้องกัน ESD ภายใต้ S20.20 หรือ IEC 61340-5-1 มักไม่ใช่ห้องปลอดฝุ่นที่จัดระดับ (เทียบเท่า ≈ISO 8) ความชื้นสัมพัทธ์ 40–60%	กล่องไร้พัดลมในเคสโลหะต่อสายดิน (Jetson T4000/Thor, กล่อง NPU จีน) ข้าง AOI หรือที่นั่งตรวจสอบ จอมอนิเตอร์และตัวเรือนพลาสติกอยู่นอกพื้นที่หรือห่างจากแผ่น ≥30 ซม.	ห้องเซิร์ฟเวอร์หรือชั้นวาง IT ที่มีเครื่องปรับอากาศ
การแพทย์, โมดูลกล้อง, อิเล็กทรอนิกส์ EV (ห้องปลอดฝุ่น ISO 7–8)	ห้องปลอดฝุ่นบวกการป้องกัน ESD	ไร้พัดลม ปิดผนึก IP65/66 ผิวเรียบเช็ดง่าย ขอข้อมูล ISO 14644-14 หรือใบรับรอง IPA	นอกห้องปลอดฝุ่น เชื่อมเครือข่ายเข้ามา
แผ่นดิบ, wire bond, สถานีแสง (ISO 5–6 ในพื้นที่)	mini-environment	มีเฉพาะกล้องและไฟภายใน กล่องเครื่องคำนวณอยู่ภายนอก	ห้องเซิร์ฟเวอร์
ห้องปลอดฝุ่น fab (ISO 5 และสะอาดกว่า)	แผน ESD และ electrostatic-attraction เฉพาะ fab อุปกรณ์เป็นไปตาม SEMI E78 ความปลอดภัยไซเบอร์ตาม SEMI E187/E188	เฉพาะตัวควบคุมที่รวมกับเครื่องมือและผ่านคุณสมบัติ fab ไม่มี PC เสริมที่มีพัดลม	ชั้นวางระบายความร้อนด้วยของเหลว sub-fab หรือศูนย์ข้อมูล fab

ตารางนี้เป็นการสังเคราะห์ของฉันจากแหล่งข้างต้น estimate สำหรับผลิตภัณฑ์ หมายถึงกล่องไร้พัดลมข้างสายต่ำกว่า 100 W เคสโลหะต่อสายดินป้องกัน อินพุต DC 12–24 V ทำงานช่วงอุณหภูมิกว้างที่การไหลของอากาศจริงในตู้ และรายงานการปล่อยอนุภาค ISO 14644-14 พร้อมสำหรับลูกค้าที่ ISO 7 และสะอาดกว่า การออกแบบใดที่ “เซิร์ฟเวอร์ GPU หนึ่งเครื่องให้บริการสี่สาย” จะวางเซิร์ฟเวอร์ในห้องเซิร์ฟเวอร์และเหลือเพียงกล่องเล็กหรือกล้องที่สาย

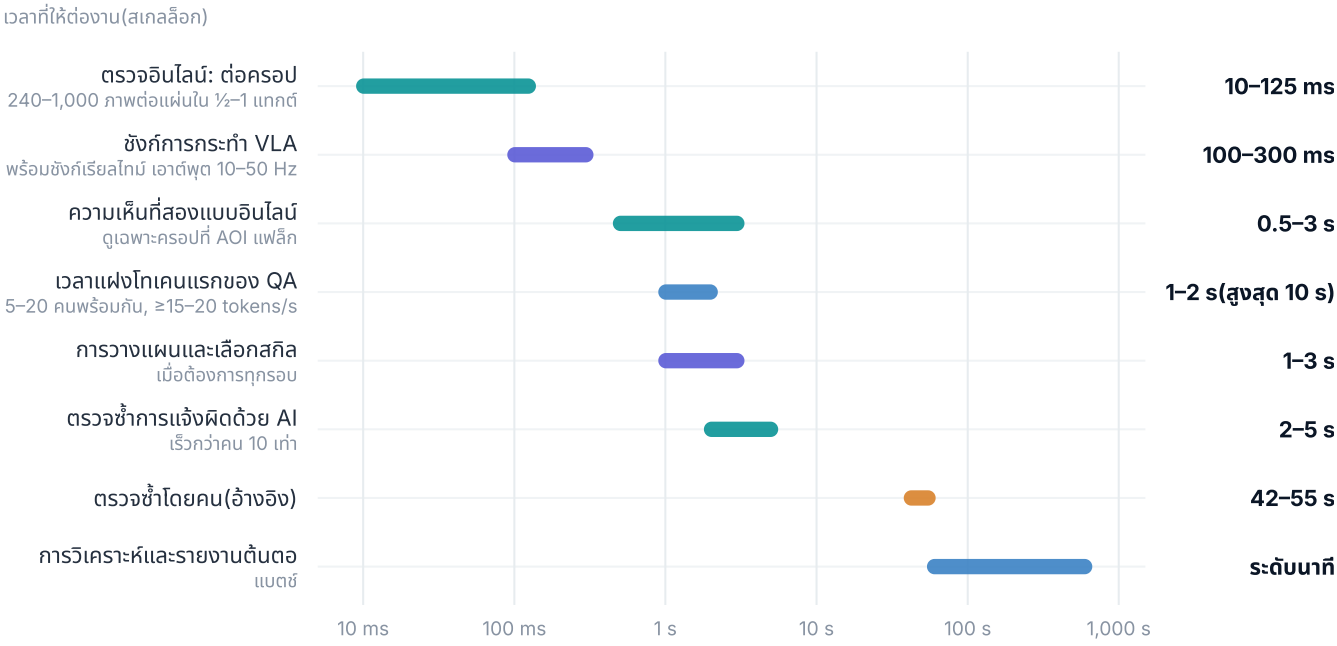
ขีดจำกัดความเร็วตามการใช้งาน: ความแม่นยำยากกว่าความเร็ว

โรงงานและผู้ขายแทบไม่เคยเผยแพร่เป้าหมาย latency หรือ availability ของ AI เกณฑ์ด้านล่างได้มาจาก takt เวลาตรวจสอบของมนุษย์ อัตราการควบคุมหุ่นยนต์ และงานวิจัยปฏิสัมพันธ์ estimate :

การใช้งาน	ขีดจำกัดความเร็ว	ขีดจำกัดความแม่นยำ	Availability
การตรวจ inline ทุกชิ้นส่วน	ภายใน ½–1 takt: 240–1,000 ภาพตัดใน takt 10–30 วินาที, 8–100 ภาพตัดต่อวินาที	การเล็ดรอดไม่แย่กว่า “AOI บวกคน” ในปัจจุบัน (ตัวอย่างสัญญา <0.5%)	Fail open ไม่หยุดสาย เป้าหมาย ≥99.9% (ไม่มี SLA สาธารณะ)
ความเห็นที่สองแบบ inline เฉพาะภาพตัดที่ AOI ตั้งธง	ธง (ปกติ ≤5–20 ต่อแผ่น) ภายใน ½ takt: 0.5–3 วินาทีต่อภาพตัด	เช่นเดียวกัน ฝึกจากภาพของสายเอง	ถอยกลับไปตรวจโดยมนุษย์
การตรวจสอบสัญญาณเตือนผิดพลาดด้วย AI	2–5 วินาทีต่อครั้ง เร็วกว่าคน 42–55 วินาที มากกว่าสิบเท่า	การเล็ดรอดไม่แย่กว่าผู้ตรวจสอบมนุษย์	การเสื่อมถอยเพิ่มคน ไม่เคยหยุดสาย
การควบคุมหุ่นยนต์ (VLA)	100–300 ms ต่อ action chunk พร้อม real-time chunking เอาต์พุต 10–50 Hz	ความสำเร็จ ≥99% เพื่อเหนือกว่าการเคลื่อนไหวแบบโปรแกรม	ระบบความปลอดภัยอิสระจากโมเดล
การวางแผนหุ่นยนต์และการเลือก skill	1–3 วินาทีเมื่อจำเป็นทุกรอบ ≤1 นาทีถ้าเฉพาะเมื่อมีข้อยกเว้นหรือเปลี่ยนรุ่น	เอาต์พุตต้องเป็นโค้ดที่ตรวจสอบได้หรือ skill ID	ถอยกลับไปยังโปรแกรมตายตัว
Q&A (SOP, การสอบถาม MES)	first token ควร ≤1–2 วินาที มากสุด 10 วินาที ≥15–20 tokens/s ต่อผู้ใช้ ผู้ใช้พร้อมกัน 5–20 คน	การอ้างอิงแม่นยำ ซื่อตรงต่อบริบทที่ยาว	เกรด office-IT (≈99–99.5%)
การวิเคราะห์และรายงาน root-cause	นาทีถือว่าใช้ได้ (batch)	สูงสุด ซื่อตรงต่อบริบทที่ยาว	เกรด office-IT

Physical Intelligence วัดการอนุมาน 97 ms สำหรับ VLA ระดับ 3B (ประมาณ 108–139 ms พร้อมเครือข่ายและการประมวลผลล่วงหน้า) พบว่า real-time chunking รักษา throughput ไม่เปลี่ยนแปลงแม้เพิ่ม delay ถึง 200 ms และทำงานละเอียด เช่น จุดไม้ขีดหรือเสียบสายเครือข่าย ที่มากกว่า 300 ms (Physical Intelligence) vendor research งานวิจัยปฏิสัมพันธ์กำหนดขีดจำกัดการรักษาแนวคิดที่หนึ่งวินาที และความสนใจที่สิบวินาที (NN/g) ความแม่นยำคือส่วนที่ยาก: Qwen3-VL-8B แบบเปิดเฉลี่ยเพียง 56.8 zero-shot ในห้าชุดข้อมูลความผิดปกติทางอุตสาหกรรม (IndusAgent) single source ไม่มีฮาร์ดแวร์ใดช่วยโมเดล vision-language ที่ไม่ถูกปรับจูนบนภาพของสายเอง

FIG 07 **ขีดจำกัดความเร็วตามการใช้งาน*ตรวจอินไลน์เป็นมิลลิวินาที, QA เป็นวินาที, วิเคราะห์เป็นนาที คนใช้ 42–55 s ต่อครั้ง***



แหล่งที่มา: การสังเคราะห์ผู้เขียน(บทที่ 1–2)

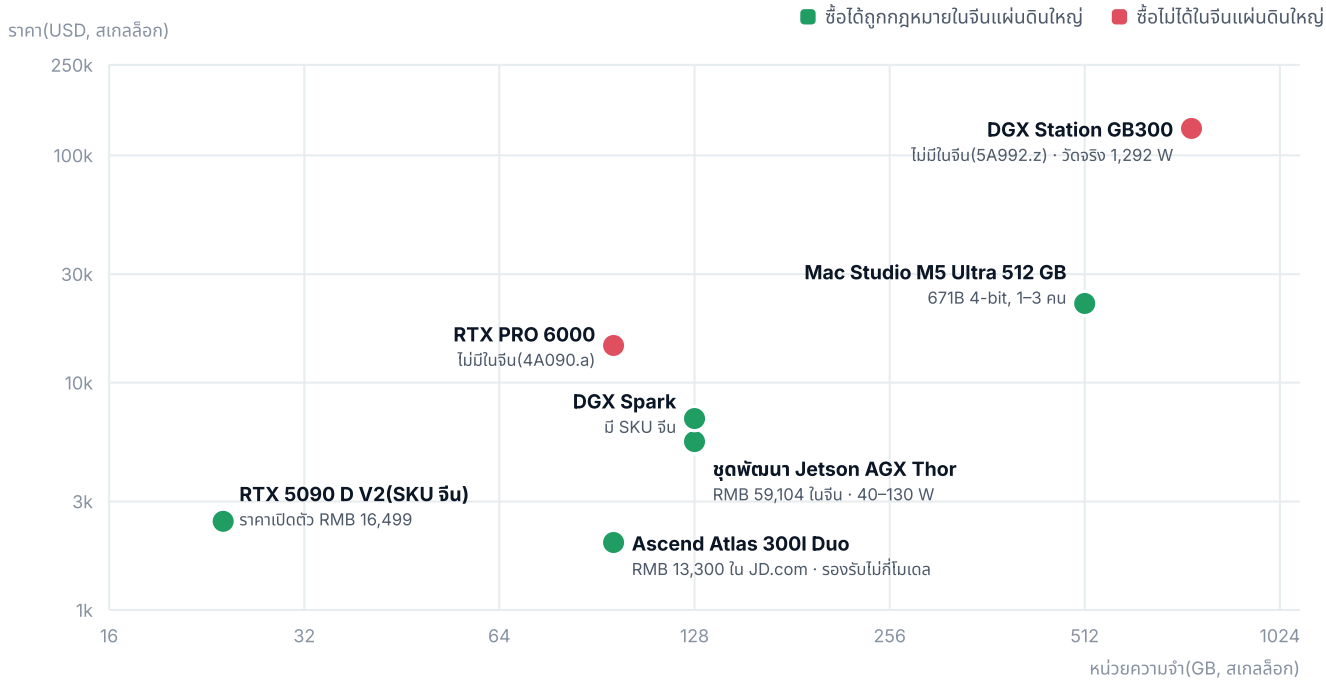
ฮาร์ดแวร์: Thor สำหรับสถานี Mac Studio หรือเครื่องในประเทศสำหรับ Q&A ของโรงงาน และไม่มี DGX Station ในจีนแผ่นดินใหญ่

อุปกรณ์	หน่วยความจำและแบนด์วิดท์	ราคา (พฤศจิกายน 2026)	เหมาะกับอะไร	จีนแผ่นดินใหญ่
Jetson AGX Thor dev kit / T5000 / T4000	128 GB LPDDR5X, 273 GB/s; 40–130 W	$3,499 ตอนเปิดตัว → $5,499 (กรกฎาคม 2026); T5000 $4,999, T4000 $2,999; RS China dev kit 59,104 RMB รวมภาษี	โมเดลวิชัน 2–8B ตรวจภาพตัดซ้ำ VLA ระดับ 3B แบบเรียลไทม์	● ใช่ (5A992.c ไม่ต้องมีใบอนุญาตสำหรับโรงงานพลเรือน)
DGX Spark	128 GB, 273 GB/s	$3,999 → $4,699 → $6,950; รุ่นจีน ASUS GX10 ชิปเดียวกัน 32,999 RMB บน JD (ตุลาคม 2025)	MoE 8–35B หลายผู้ใช้	● ใช่ (5A992.c, รุ่นจีน, ช่องทางที่ได้รับอนุญาต)
RTX PRO 6000	96 GB GDDR7	≈$8,565 → $13,250 (มิถุนายน 2026) → ≈$16,005 ราคาเฉลี่ย eBay ในเดือนพฤศจิกายน	FP8 27–35B หลายผู้ใช้ MoE ระดับ 120B ที่ 4-bit	● ไม่ (4A090.a)
Mac Studio M5 Ultra 512 GB	512 GB unified, 1.2 TB/s; 480 W sustained สูงสุด	จาก $22,299 ในสหรัฐฯ ≈173–186k RMB โดยประมาณในจีน	DeepSeek 671B ที่ 4-bit สำหรับผู้ใช้ 1–3 คน	● ใช่
DGX Station GB300	748 GB (HBM3e 252 GB ที่ 7.1 TB/s + LPDDR5X 496 GB ที่ 396 GB/s); วัดได้ 1,292 W ที่ GPU	ราคาตลาด $123–140k ในเดือนพฤศจิกายน (≈830–940k RMB ก่อนภาษี) $95–117k ในเดือนสิงหาคม	การทำงานพร้อมกันสูงบน MoE 120–235B ที่พอดี HBM ผู้ใช้น้อยบนโมเดล 433–743B	● ไม่ (5A992.z, TPP 58,484)
Huawei Atlas 300I Duo	96 GB LPDDR4X, 408 GB/s	13,300 RMB จากผู้ค้า JD	การตรวจแบบ batch ปริมาณน้อย โมเดลที่รองรับน้อย	● ใช่ (ในประเทศ)
Huawei Atlas 800I A2 (8 × Ascend 910B 64 GB)	8 × 64 GB HBM	ไม่ได้รับข้อมูล DeepSeek เต็มต้องใช้สองเครื่องที่ W8A8 สี่เครื่องที่ BF16	Q&A และการวิเคราะห์หลายผู้ใช้ทั่วทั้งโรงงาน	● ใช่ (ในประเทศ)

อุปกรณ์	หน่วยความจำและแบนด์วิดท์	ราคา (พฤศจิกายน 2026)	เหมาะกับอะไร	จีนแผ่นดินใหญ่
RTX 5090 D V2 (รุ่นจีน)	24 GB	16,499 RMB ตอนเปิดตัว (สิงหาคม 2025) ขึ้นตามราคาหน่วยความจำ	โมเดลวิชัน 8B, VLA ขนาดเล็ก	● ใช่

แหล่งที่มา: (NVIDIA China Thor, NVIDIA Thor launch, CNX on price rises, NVIDIA export classification data, RS China, Implicator, IThome on ASUS GX10, Tom's Hardware RTX PRO 6000, GPU Poet, Apple specifications, TechRadar, IThome on M5 Ultra China pricing, Wccftech, StorageReview, CyberPowerPC, monitors.com, Tom's Hardware DGX Station, vLLM-Ascend support matrix, China Telecom Cloud, Huawei Atlas 800I A2, TweakTown) ราคาในจีนแผ่นดินใหญ่ของ Mac Studio 512 GB ถูกประมาณจากส่วนต่างราคารุ่นในสหรัฐฯ และมีความเชื่อมั่นต่ำ estimate

FIG 08 **คอมพิวต์ออนเพร็ม: หน่วยความจำ ราคา และสิ่งที่ซื้อถูกกฎหมายในจีนแผ่นดินใหญ่*การจัดหมวดส่งออกตัดสินรายชื่อก่อนเบนช์มาร์ก***



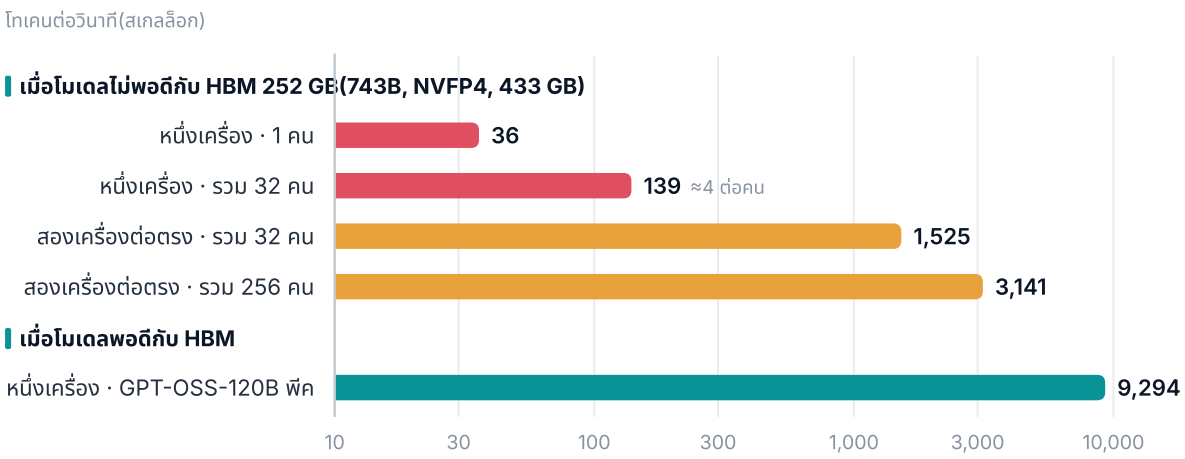
แหล่งที่มา: การจัดหมวดส่งออก NVIDIA, Apple, RS China, JD.com และราคารีวิว(พ.ย. 2026)

Jetson Thor ทำให้การติดตั้งระดับสถานีเป็นไปได้ การทดสอบ TensorRT Edge-LLM ของ NVIDIA แสดง Qwen3-VL-8B (NVFP4) prefill 2,048 tokens ใน 104.5 ms และ decode 44.4 tokens/s บน Thor (TensorRT Edge-LLM) vendor claim สำหรับภาพตัด AOI และคำตอบ 20 tokens นั่นคือประมาณ 0.5 วินาทีด้วยโมเดล 8B และ 0.2 วินาทีด้วย 2B หรือ 8.5–21 ภาพตัดต่อวินาทีแบบ batch estimate ความยาวเอาต์พุต ไม่ใช่จำนวนพารามิเตอร์ เป็นตัวกำหนด latency ดังนั้นการ constrained decoding ไปยัง class token หรือ JSON สั้นๆ เป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบ GR00T N1.7 (3B) รันที่ 25.1 Hz บน Thor (Jetson AI Lab) vendor claim Orin NX ใช้ประมาณ 1.8 วินาทีต่อภาพตัด และ Atlas 300I Duo มี p95 สูงกว่า 23 วินาที เหมาะเฉพาะงาน batch (CSDN) single source ในจีนแผ่นดินใหญ่ ให้ตั้งงบผลิตภัณฑ์ NVIDIA สูงกว่าราคาประกาศสหรัฐฯ 40–60% estimate

Mac Studio 512 GB ทำให้โมเดลขนาดเต็มบนเครื่องเดียวเป็นไปได้ สำหรับผู้ใช้ไม่กี่คน M5 Ultra (สิงหาคม 2026) มีสูงสุด 512 GB ที่ 1.2 TB/s จากประมาณ $22,299 (Apple, TechRadar) DeepSeek 671B ที่ 4-bit (≈380–404 GB) decode 17–20 tokens/s บน M3 Ultra (Pinggy) verified และประมาณ 25–29 บน M5 Ultra พรอมปต์ยาวคือจุดอ่อน: พรอมปต์ retrieval 10,000 tokens ใช้ประมาณ 17–70 วินาที estimate เกินขีดจำกัดปฏิสัมพันธ์ 10 วินาที

DGX Station เป็นเครื่องเดี่ยวที่แข็งแกร่งที่สุด แต่ไม่มีในจีนแผ่นดินใหญ่ และแพงกว่า Mac ห้าถึงหกเท่า GB300 ที่จัดส่งมี **748 GB** ซึ่งเป็น HBM เร็วเพียง 252 GB (Wccftech, Tom's Hardware, Aug 2026) verified การทดสอบอิสระแสดงเอาต์พุตประมาณ 9,300 tokens/s บน GPT-OSS-120B ซึ่งพอดี HBM แต่โมเดล 743B ที่ล้นไปยัง LPDDR5X ให้ผู้ใช้ 32 คนได้รวมเพียง 139 tokens/s ประมาณคนละ 4 สองเครื่องเชื่อมต่อกันได้ 1,525 (StorageReview, Aug 2026, StorageReview, Oct 2026) single source ราคาตลาดขึ้นถึง $123–140k ในเดือนพฤศจิกายน (CyberPowerPC, monitors.com) ในจีนแผ่นดินใหญ่ ตัวเลือกที่เป็นจริงสำหรับงานเดียวกันคือ Mac Studio เซิร์ฟเวอร์ CPU+GPU แบบ KTransformers (KTransformers) vendor test หรือเซิร์ฟเวอร์ Ascend ในประเทศ

FIG 09 **เวิร์กสเตชันใหญ่หนึ่งเครื่องไม่เป็นผู้ช่วยที่แชร์ได้*เมื่อโมเดลไม่พอดีกับหน่วยความจำแบนด์วิธสูง ผู้ใช้พร้อมกัน 32 คน ได้แค่ ≈4 tokens/s ต่อคน***



แหล่งที่มา: StorageReview(ส.ค.และต.ค. 2026); ServeTheHome การทดสอบอิสระแหล่งเดียว

การขาดแคลนหน่วยความจำทำให้ชิ้นส่วนเดียวกันขยับราคา 20–100% ในหนึ่งปี (DGX Spark จาก $3,999 เป็น $6,950 (TechRadar)) ดังนั้นใบเสนอราคาอุปกรณ์ควรอ้างอิงดัชนีมากกว่ากำหนดตายตัว

ตัวเร่งความเร็วในประเทศรันโมเดลขนาดเต็มได้ การบำรุงรักษาซอฟต์แวร์คือคอขวด Ascend 910B มี HBM 64 GB แต่ vLLM-Ascend ทำเครื่องหมาย DeepSeek V3/R1 ว่า “ไม่ได้รับการบำรุงรักษาอีกต่อไป” และรองรับโมเดลเพียงไม่กี่ตัวบนการ์ดเล็ก (vLLM-Ascend) single source, primary และโมเดลใหม่แต่ละตัวใช้เวลาปรับหนึ่งถึงสองเดือน (Caijing/Anue) ให้จัดส่งเวอร์ชันโมเดลที่แช่แข็งและผ่านการตรวจสอบแล้ว การให้บริการ DeepSeek 671B เต็มแก่ผู้ใช้ 20–100 คนต้องใช้เซิร์ฟเวอร์ Atlas 800I A2 แปดการ์ดอย่างน้อยสองเครื่อง (China Telecom Cloud) verified แต่การประมูลสาธารณะสำหรับ LLM appliance ในจีนรวมเพียง 27.5 ล้าน RMB ในเดือนมกราคม–กันยายน 2025 (C114) single source : โรงงานจ่ายเพื่อการบูรณาการและบริการ ไม่ใช่กล่องคำนวณ

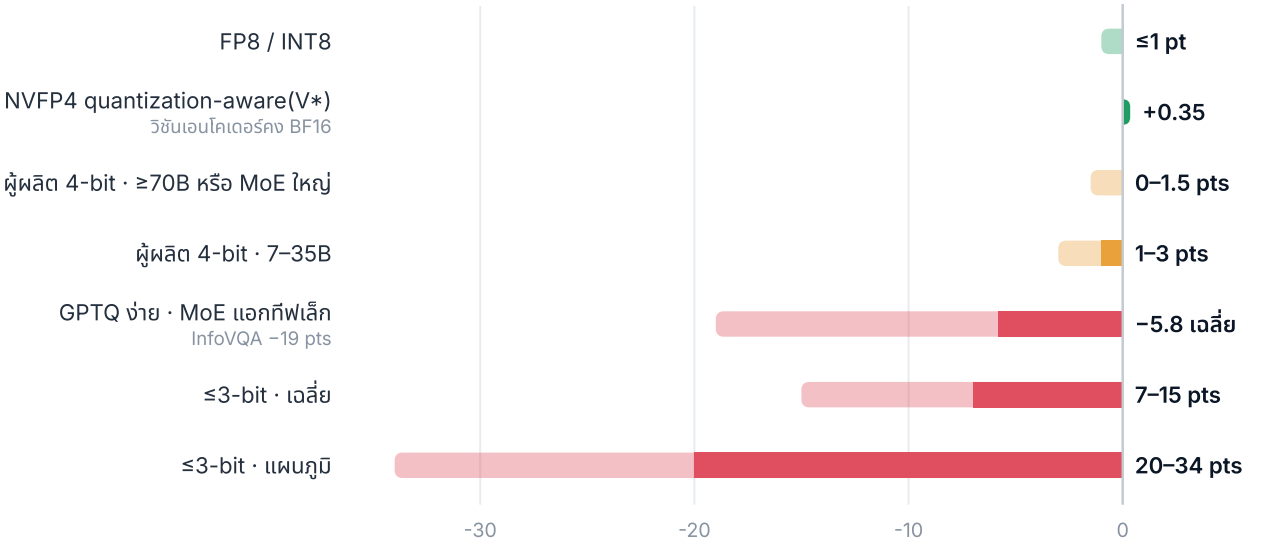
Quantization: 8-bit ปลอดภัย 4-bit ขึ้นอยู่กับสูตร 3-bit และต่ำกว่านั้นใช้ไม่ได้

8-bit (FP8 หรือ INT8) แทบไม่สูญเสียสำหรับโมเดล vision-language (Red Hat, Hugging Face) verified ที่ 4-bit การสูญเสียขึ้นอยู่กับขนาดและสูตร: build AWQ ของ Qwen 72B เสียคะแนน MMMU ต่ำกว่าหนึ่งจุด ขณะที่ 7B เสีย 2.8 (Qwen AWQ) verified และงานที่ต้องรายละเอียดมากตกมากกว่านั้น (GPTQ 4-bit แบบ naive ทำให้ Qwen3-VL-30B-A3B เสีย 19 คะแนนบน InfoVQA (VEQ)) ที่ 3-bit และต่ำกว่า การสูญเสียเฉลี่ย 7–15 คะแนน และแผนภูมิเสีย 20–34 (VLMQ) verified เกิน 64k tokens 4-bit เสียสูงสุด 59% แย่กว่าในอินพุตที่ไม่ใช่ภาษาอังกฤษ (arXiv 2505.20276) เก็บ vision encoder ไว้ที่ FP16/BF16

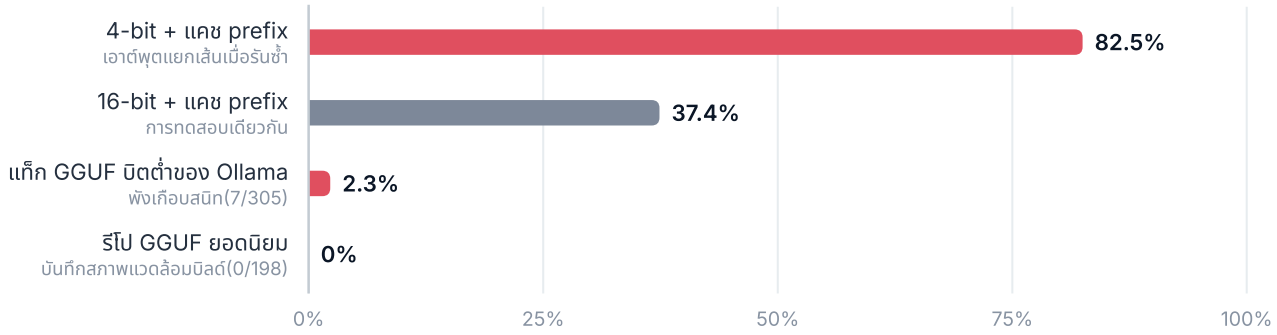
FIG 10 **ควอนไทซ์: 8-bit ปลอดภัย, 4-bit ขึ้นกับสูตร, 3-bit และต่ำกว่าร่วง*ความผิดพลาดทางวิศวกรรมในสแตกเสิร์ฟเสีย ความแม่นยำกว่าตัวควอนไทซ์เอง***

ความแม่นยำ: 8-bit ปลอดภัย, 4-bit ขึ้นกับสูตร, ≤3-bit ตกรอบ

คะแนนเปลี่ยนเทียบความแม่นยำเต็ม(จุด)



ความล้มเหลวทางวิศวกรรมใหญ่กว่าความคลาดเคลื่อนควอนไทซ์



แหล่งที่มา: NVIDIA Nemotron model card, VLMQ, VEQ, arXiv 2609.05881, 2610.19498, 2609.04748 และอื่นๆ

คำเตือนสองข้อสำคัญกว่า ประการแรก **ณ วันที่ 11 พฤศจิกายน 2026 ไม่มีการศึกษาหรือ model card ใดวัด quantization บนภาพข้อบกพร่อง PCB/SMT** ดังนั้นต้องตรวจสอบซ้ำบนชุดข้อมูลอ้างอิง ประการที่สอง ความผิดพลาดของ serving stack มักใหญ่กว่าความผิดพลาดของ quantization: โมเดลเดียวกันได้คะแนนต่ำกว่าประมาณ 30 คะแนนภายใต้ Ollama เมื่อเทียบกับ implementation อ้างอิง (SiliconBench) 7 ใน 305 แท็กโมเดลโค้ดทางการของ Ollama เสียหายโดยพื้นฐานแม้ไฟล์จะสมบูรณ์ (arXiv 2609.05881) ไม่มีใน 198 repositories GGUF ที่เป็นที่นิยมที่บันทึก build ของตน (arXiv 2610.19498) และด้วยการใช้ prefix-cache ซ้ำ 82.5% ของ episode ต่างกันที่ 4-bit เทียบกับ 37.4% ที่ 16-bit (arXiv 2609.04748) single sources 4-bit แบบ quantization-aware จากผู้ขายเกือบไม่สูญเสียในงานละเอียด (NVIDIA Nemotron 3.5) vendor claim แต่ VLA 4-bit เสีย 1.5–4.3 คะแนนภายใต้ perturbation และรันช้ากว่าบน Thor (LoopQ) single source จัดการโมเดล quantization เหมือนเกจใหม่: ปัก hash ของ weights บันทึก build รีเซ็ต prefix caching และตรวจสอบซ้ำหลังการเปลี่ยนแปลง precision, engine หรือ template

ความแม่นยำ	≥70B dense หรือ ≥100B MoE	7–35B	≤4B หรืองานที่ต้องรายละเอียด	คำตัดสิน
FP8 / INT8	ปลอดภัย (≤1 คะแนน)	ปลอดภัย	ปลอดภัย ค่าเริ่มต้นสำหรับการตรวจสอบ	ใช้
4-bit AWQ/GPTQ (สูตรผู้ขาย, vision encoder FP16)	0–1.5 คะแนน	1–3 คะแนน GPTQ naive บน MoE active น้อย −5.8 เฉลี่ย −19 บน InfoVQA	2–3 คะแนน ตรวจสอบงานละเอียดก่อน	มีเงื่อนไข

ความแม่นยำ	≥70B dense หรือ ≥100B MoE	7–35B	≤4B หรืองานที่ต้องรายละเอียด	คำตัดสิน
NVFP4 (สูตรผู้ขาย)	≈0.3–1 คะแนนต่ำกว่า FP8 (ข้อมูลผู้ขาย)	build แบบ quantization-aware เกือบไม่สูญเสียบน V*, OCRBench	ไม่มีข้อมูลสาธารณะ	มีเงื่อนไข (เลือก build แบบ quantization-aware)
GGUF Q4_K_M	ยังไม่ทดสอบ	ความแปรปรวนสูงในงานโดเมน	ไม่เหมาะกับข้อความเล็กหรือข้อบกพร่อง	ไม่เหมาะกับการตัดสินรายละเอียด
GGUF Q5_K_M และสูงกว่า	สันนิษฐานว่าปลอดภัย	เกือบไม่สูญเสียในการทดสอบสองครั้ง	พื้นขั้นต่ำสำหรับรายละเอียดบน llama.cpp	ใช้
≤3-bit (รวมโมเดล 1T ที่บีบเป็น 1.8–2 bits บนเครื่องเดียว)	ไม่เหมาะกับการตัดสินใจ	ไม่	ไม่	ไม่

การกำหนดค่าแบบใดเหมาะกับงานใด

การกำหนดค่า	การตรวจ inline	การตรวจสอบสัญญาณเตือนผิดพลาดด้วย AI	การวางแผนและควบคุมหุ่นยนต์	Q&A และการวิเคราะห์
ตัวตรวจจับเฉพาะทางหรือโมเดลความผิดปกติ (YOLO, RF-DETR, กลุ่ม PatchCore), INT8/FP16, กล่อง edge NPU หรือ GPU ใดก็ได้	● ใช่: ผู้ตัดสินหลัก, 2–12 ms ต่อภาพตัด	● ใช่ (classifier ที่ปรับจูนบนสาย)	● เฉพาะการรับรู้	—
โมเดลวิชัน 2–4B, NVFP4/AWQ/FP8 พร้อม vision encoder FP16 บน Thor/T4000 หรือ DGX Spark	● มีเงื่อนไข: ตรวจภาพตัดที่ AOI ตั้งธงซ้ำที่ 0.2–0.3 วินาทีต่อภาพ	● มีเงื่อนไข, ต่ำกว่า 1 วินาทีหลังปรับจูน	● แกน VLA (VLA 2–3B ที่ ≈40–130 ms ต่อ chunk)	● อ่อน
โมเดลวิชัน 7–9B (Qwen3-VL-8B, MiniCPM-V 4.5, GLM-4.6V-Flash), FP8 หรือ 4-bit จากผู้ขาย บน Thor, Spark หรือการ์ด 24–32 GB	● มีเงื่อนไข: ≈0.5 วินาทีต่อภาพตัดที่ตั้งธง	● ใช่: 0.5–1 วินาทีต่อครั้ง คุ้มค่าที่สุด	● การวางแผนและการเลือก skill (1–3 วินาที) ไม่ใช่ในลูปควบคุม	● Q&A SOP พื้นฐานสำหรับผู้ใช้หนึ่งหรือไม่กี่คน
MoE 26–35B (Gemma-4-26B-A4B, Qwen3.6-35B-A3B), NVFP4/FP8	● ไม่ (หนักเกิน)	● ใช่ เป็นตัวอธิบายหรือสำหรับกรณียาก	● การวางแผน	● ใช่ (ผู้ใช้ 8 คนบน Spark, first token ≈0.1 วินาที)
MoE 106–241B ที่ 4-bit บน Mac Studio, RTX PRO 6000 หรือ Spark	● ไม่	● ไม่	● การวางแผนออฟไลน์	● ใช่ สำหรับผู้ใช้หนึ่งหรือไม่กี่คน
DeepSeek 671B หรือ Kimi K2.x 1T ที่ 4-bit บน Mac 512 GB, เซิร์ฟเวอร์ KTransformers หรือ DGX Station	● ไม่	● ไม่	● เฉพาะการสร้างโปรแกรมออฟไลน์	● มีเงื่อนไข: ผู้ใช้ 1–3 คนและพรอมปต์สั้น พรอมปต์ยาวใช้ 16–170 วินาที
อะไรก็ตามที่ ≤3-bit; GGUF Q4_K_M สำหรับงานละเอียดโมเดลเล็ก; Ollama สำหรับผู้ใช้จำนวนมาก	● ไม่	● ไม่	● ไม่	● ไม่

แหล่งที่มา: ข้อมูล TensorRT Edge-LLM, Jetson AI Lab, Apple ML Research และ KTransformers ข้างต้น และ (DGX Spark tests, RTX PRO 6000 tests, Hardware Corner on Atlas, Ultralytics YOLO26, RF-DETR) **community and vendor tests, mostly single source**

ดังนั้นสำหรับความกังวลสองข้อที่พบบ่อย: **ไม่จำเป็นต้องช้า** หากโมเดลตรงกับงาน (โมเดลวิชันขนาดเล็กและกลางบน Thor หรือ Spark ตรงตามงบ inline และการตรวจสอบทุกอย่าง โมเดล 671B–1T อยู่นอกสาย) และ **quantization ไม่จำเป็นต้องทำให้ผิด** ด้วย FP8/INT8 เป็นค่า

เริ่มต้น หรือ 4-bit สูตรผู้ขายที่สูงกว่า 7B ที่ตรวจสอบบนชุดข้อมูลอ้างอิง ความเสี่ยงที่ใหญ่กว่าคือความแม่นยำ zero-shot ทางอุตสาหกรรม ของโมเดลทั่วไปที่ประมาณ 57 คะแนน และความผิดพลาดของ serving stack ให้คำขอตรวจสอบมี batch size คงที่และคิวของตัวเอง (temperature 0 ไม่สามารถทำซ้ำบิตได้ภายใต้ batching (vLLM documentation)) เก็บ N+1 hot standby และทำให้ทุกขั้นตอนบนสาย fail open

ครูและนักเรียน

03 ครูและนักเรียน: โมเดล frontier ติดป้ายข้อมูลตรวจสอบล่วงหน้าได้ สำหรับแขนหุ่นยนต์ ครูที่แท้จริงยังคงเป็นคน

ผู้สมัครครูเดือนพฤศจิกายน 2026: วิชันทั่วไปดีขึ้นเป็นสองเท่า คะแนนข้อบกพร่องทางอุตสาหกรรมหายไป

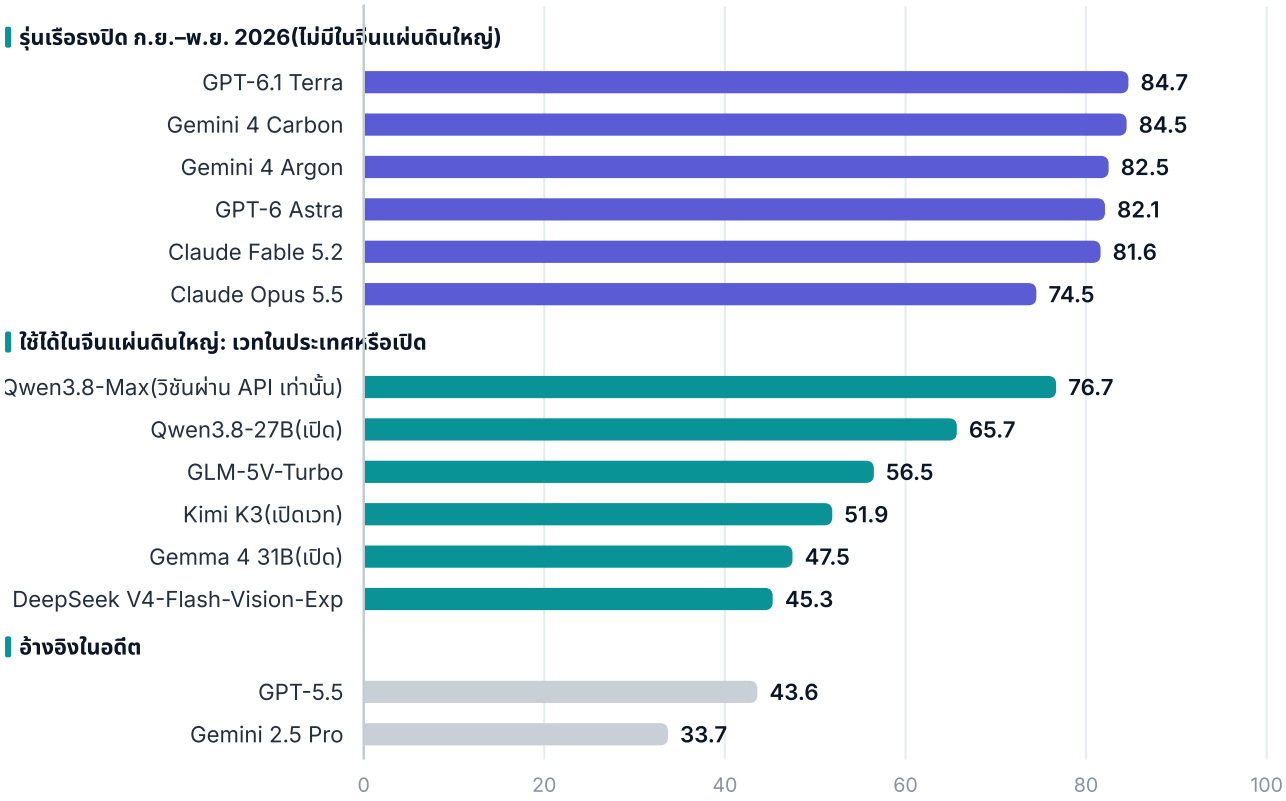
โมเดล frontier แบบปิดทุกตัวที่อาจทำหน้าที่เป็นครูได้ในเดือนพฤศจิกายน 2026 รับภาพ: Claude Fable 5.2 (มีให้ใช้ทั่วไปวันที่ 9 พฤศจิกายน $8/$40 ต่อล้าน tokens) และ Opus 5.5 ($4/$20) (Anthropic, Claude models overview) verified GPT-6 Astra ($10/$50) และ GPT-6.1 Terra ($1/$5) (OpenAI pricing) และ Gemini 4 Argon และ Carbon ซึ่งเปิดเป็นระยะ (Google Carbon) ที่ใช้ได้ในจีนแผ่นดินใหญ่คือ Qwen3.8-Max (วิชันผ่าน API) และโมเดลเปิด เช่น Qwen3.8-27B, Kimi K3, GLM-5V-Turbo, DeepSeek V4-Flash-Vision-Exp และ Gemma 4 (Roboflow blog, Hugging Face)

ช่องว่างสำคัญต้องกล่าวอย่างตรงไปตรงมา: ไม่มีโมเดลใดเหล่านี้มีคะแนนที่เผยแพร่บน MMAD, MVTec AD 2, VisA, Real-IAD, UniPCB หรือชุดข้อมูล PCB/SMT ใดเลย MMAD ยังไม่มี leaderboard (MMAD GitHub) และรายงานความผิดปกติทางอุตสาหกรรมใหม่ล่าสุดสองฉบับ (สิงหาคม–กันยายน 2026) ยังใช้ Gemini 2.5 Pro และ Claude Sonnet 4 เป็น baseline ทั่วไปใหม่ล่าสุด (InspectorGPT, Anomaly-LR) การค้น full-text ของ arXiv วันที่ 11 พฤศจิกายนพบศูนย์ผลลัพธ์สำหรับ “Fable 5.2” หรือ “Gemini 4 Carbon” ในบริบทนี้ (arXiv API) single source, absence of evidence สิ่งที่ใกล้เคียงที่สุด:

- โมเดล frontier ใหม่ล่าสุดที่มีคะแนน MMAD คือ GPT-5.5: 69.95% ในโจทย์ “มีข้อบกพร่องหรือไม่” และ 76.20% เฉลี่ยเจ็ดภารกิจบนเซตย่อย 500 ภาพ เทียบกับ 95.24% และ 86.65% สำหรับผู้เชี่ยวชาญมนุษย์ (AnomalyClaw) single source GPT-4o ได้ 68.63% และ 74.92% ในปี 2024 (MMAD, ICLR 2025) หรือความคืบหน้าประมาณ 1.3 คะแนนในสองปี
- บน LDU-Bench ภาพรีวิว SEM จริงจาก IC lithography และ benchmark อิเล็กทรอนิกส์เดียวที่มีโมเดลปี 2026 การคัดแยกดีหรือเสียทำได้ดีพอใช้ (macro F1 0.932 สำหรับ GPT-5.4, 0.884 สำหรับ GLM-5V-Turbo, 0.876 สำหรับ Claude Opus 4.6, 0.504 สำหรับ Gemma 4 31B) แต่การจำแนกสัณฐานข้อบกพร่อง 11 แบบได้เพียง 0.20–0.41 (LDU-Bench) single source
- ในการประเมินวิชันอิสระของ Roboflow (อัปเดต 10 พฤศจิกายน 2026) object-detection mAP@50 คือ 84.5 สำหรับ Gemini 4 Carbon, 84.7 สำหรับ GPT-6.1 Terra และ 81.6 สำหรับ Fable 5.2 เทียบกับ 33.7, 43.6 และ 38.6 สำหรับ Gemini 2.5 Pro, GPT-5.5 และ Claude Opus 4.8 (Roboflow Vision Evals) single source, independent evaluator, private datasets

FIG 11 **ตัวเลือกครู: คะแนนทั่วไปเพิ่มเท่าตัวในรุ่นเดียว*แต่ไม่มีเรือธง 2026 ตัวไหนมีคะแนนสาธารณะในเบนช์มาร์กข้อบกพร่องอุตสาหกรรม***

Roboflow ตรวจจับทั่วไป mAP@50



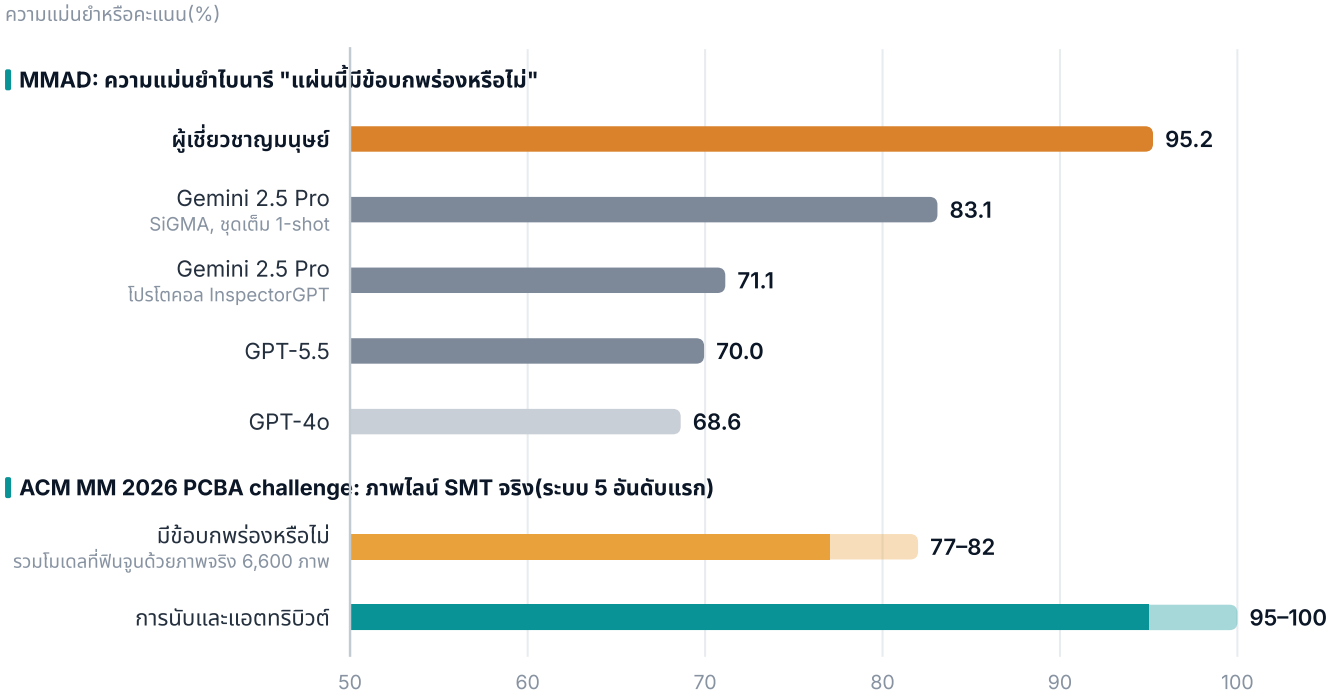
เบนช์มาร์กข้อบกพร่องอุตสาหกรรม(MMAD, MVTec AD 2, VisA, Real-IAD, UniPCB): ศูนย์คะแนนสาธารณะจากเรือธง 2026
คะแนนตรวจจับทั่วไปเพิ่มเท่าตัวในรุ่นเดียว แต่ไม่แทนการตัดสินข้อบกพร่อง; ต้องทดสอบบนชุดทองคำของโรงงาน

แหล่งที่มา: Roboflow Vision Evals; บันทึกรุ่นโมเดล; MMAD, MVTec AD 2 และหน้าเบนช์มาร์กอื่น(ณ 11 พ.ย. 2026)

ผู้สมัครครู (พ.ย. 2026)	ราคาต่อ M tokens (เข้า/ออก)	Roboflow detection mAP@50 / counting	benchmark ข้อบกพร่องทางอุตสาหกรรม	ใช้ได้ในจีนแผ่นดินใหญ่
Claude Fable 5.2	$8 / $40	81.6 / 86.5	ไม่มี	● ไม่
Claude Opus 5.5	$4 / $20	74.5 / 80.6	ไม่มี	● ไม่
GPT-6 Astra	$10 / $50	82.1 / 80.2	ไม่มี	● ไม่
GPT-6.1 Terra	$1 / $5	84.7 / 80.2	ไม่มี	● ไม่
Gemini 4 Carbon	$2 / $10 (โปรโมชัน)	84.5 / 90.1	ไม่มี	● ไม่
Qwen3.8-Max (วิชันผ่าน API เท่านั้น)	$2 / $6	76.7 / 81.1	ไม่มี	● ใช่
Qwen3.8-27B (เปิด)	ในพื้นที่	65.7 / 64.9	ไม่มี	● ใช่
GLM-5V-Turbo	$1.20 / $4.00	56.5 / 48.6	LDU-Bench triage 0.884	● ใช่
Gemma 4 31B (เปิด)	ในพื้นที่	47.5 / 51.4	LDU-Bench triage 0.504	● ใช่ (local weights)
อ้างอิง: GPT-5.5 / GPT-4o	—	43.6 / 68.0 (GPT-5.5)	MMAD binary 69.95% / 68.63%	● ไม่
ผู้เชี่ยวชาญมนุษย์	—	—	MMAD binary 95.24%	—

รายงานใหม่ยังทดสอบรุ่นก่อนหน้า แต่ชี้ทางเดียวกัน บนเซต MMAD เต็ม ผู้เชี่ยวชาญมนุษย์ได้ 95.2% ในโจทย์มีข้อบกพร่องหรือไม่ และ Gemini 2.5 Pro ได้ 83.1% (SiGMA) แต่โมเดลเดียวกันได้เพียง 71.14% ในรายงานอีกฉบับ (InspectorGPT): โปรโตคอลการทดสอบขยับคะแนนพอๆ กับรุ่นของโมเดล ในการแข่งขัน CVPR 2026 VAND 4.0 โมเดล vision-language สำเร็จรูปสูงสุดที่ 61.88 AP เทียบกับ 90.84 สำหรับวิธีแบบ supervised และผู้จัดสรุปว่ามัน “ยังไม่สามารถแทนที่ classifier ที่ปรับจูนแล้วได้” (VAND 4.0) single source ใน การแข่งขัน ACM MM 2026 PCBA ห้าอันดับแรกได้ 76.92–82.47 ในโจทย์มีข้อบกพร่องหรือไม่ ขณะที่ประเภทชิ้นส่วนและการนับขาได้ 95–99.5 (arXiv 2609.21276) single source : การรู้จำง่ายกว่าการตัดสินมาก

FIG 12 ***"มีข้อบกพร่องหรือไม่?" ยังยากสำหรับโมเดลทั่วไป โมเดลทั่วไปที่ดีที่สุดตามหลังผู้เชี่ยวชาญมนุษย์เกิน 12 จุดบน MMAD; ระบบที่จูนแล้วทำได้ดีกว่าบนภาพไลน์จริง***



แหล่งที่มา: MMAD; SiGMA; InspectorGPT; ACM MM 2026 PCBA challenge

ข้อสรุปสามข้อตามมา การมองเห็นและการนับดีขึ้นเป็นสองเท่าในหนึ่งรุ่น แต่การตัดสินความผิดปกติเคลื่อนช้า ขึ้นกับโปรโตคอลอย่างมาก และมาพร้อมอคติเชิงระบบ โมเดลใหม่ได้กำไรเท่าไรวัดได้เฉพาะบนภาพของโรงงานเอง ภายในขอบเขตการฝึก ผู้เชี่ยวชาญ 7B ที่ปรับจูนแล้วยังชนะโมเดลทั่วไป (Anomaly-LR, UniPCB) และข้อมูลสายจริงทำให้คะแนนดิ่ง: บนแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบแล้ว AUROC ระดับภาพตกจาก 97–98 บน MVTec AD เหลือ 31.5–78.6 (arXiv 2606.01992) single source สำหรับบริษัทจีนแผ่นดินใหญ่ ครูที่แข็งแกร่งที่สุดที่ใช้ได้คือ Qwen3.8-Max ซึ่งอยู่ต่ำกว่า frontier ระดับโลกประมาณ 8 คะแนน

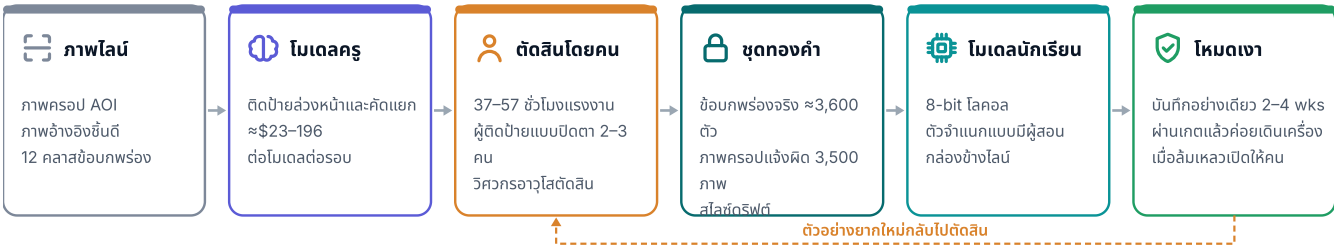
การรันหลายสิบหรือหลายร้อยรอบ: เงินไม่ใช่ปัญหา คุณภาพของป้ายคือปัญหา

เงินไม่ใช่ปัญหา ที่ราคาประกาศเดือนพฤศจิกายน 2026 ภาพหนึ่งเมกะพิกเซล 1,000 ภาพมีค่าใช้จ่ายประมาณ $3 (GPT-6.1 Terra) ถึง $32 (GPT-6 Astra) ต่อรอบ และหนึ่งร้อยรอบบน 100,000 ภาพประมาณ $32,000–135,000 ก่อนส่วนลด batch estimate (Claude vision docs, OpenAI vision guide, Roboflow Vision Evals) สำหรับป้ายง่ายๆ คนมีค่าใช้จ่ายพอๆ กับ Terra ข้อได้เปรียบของครูคือความเร็วและขนาด ไม่ใช่ราคา NDA ของลูกค้ามักเก็บภาพผลิตภัณฑ์ไว้ในโรงงาน ดังนั้นชุดข้อมูลอ้างอิงจึงถูกติดป้ายในสถานที่

อุปสรรคที่แท้จริงคือคุณภาพ และการเพิ่มรอบไม่แก้ความผิดพลาดเชิงระบบ Roboflow รันทุกภารกิจสามครั้งและคะแนนขยับเพียง ±0.1–1.4 คะแนน (Roboflow) ดังนั้นโมเดลส่วนใหญ่ทำผิดซ้ำ และการโหวตข้างมากช่วยมันไม่ได้ รอบช่วยได้เฉพาะเมื่อแต่ละรอบเพิ่มข้อมูล: ภาพอ้างอิงดีหนึ่งหรือสองภาพเพิ่มประมาณ 3–4 คะแนน มากกว่านั้นไม่เพิ่มอะไร (AD-Copilot) การให้โมเดลโต้แย้งกับภาพอ้างอิงดีหลายรอบเพิ่ม AUROC ข้ามโดเมน 6.23 คะแนนสำหรับ GPT-5.5 และ 2.95 บน MMAD โดยสูงสุดหลังเรียกประมาณสามครั้ง (AnomalyClaw) single sources “นักเรียนที่ฝึกจากป้ายของครูเข้าใกล้ป้ายมนุษย์” พิสูจน์แล้วเฉพาะบนภาพธรรมชาติ: ResNet-101 ที่ฝึกจากป้าย Qwen3-VL ของ COCO และ Objects365 ได้ผล 95.7–99.4% ของผลจากป้ายมนุษย์ และผู้เขียนกล่าวว่าข้อมูลโดเมนยังไม่ถูกทดสอบ (arXiv 2602.20972) single source

FIG 13 **ไปป์ไลน์ครู–นักเรียนสองแบบ*สำหรับการตรวจ โมเดลฟรอนเทียร์ติดป้ายล่วงหน้าและคนตัดสิน; สำหรับแขนหุ่นยนต์ ครูจริงยังเป็นเดโมมนุษย์***

ตรวจ: โมเดลฟรอนเทียร์ติดป้ายล่วงหน้า, คนตัดสิน, ชุดทองคำกั้น

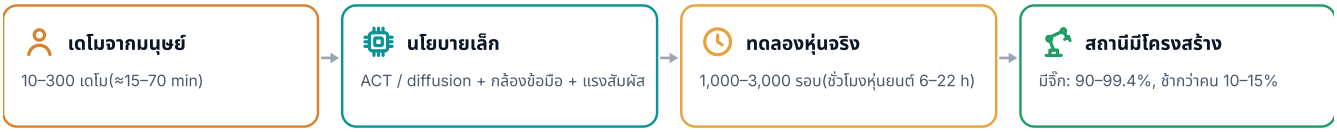


เกณฑ์รับป้ายของครูอัตโนมัติ

ต่อคลาส: ข้อบกพร่อง ≥299 ตัว, ไม่พลาด(recall ≥99% ที่ความเชื่อมั่น 95%), ความสอดคล้องกับค่าจริงไม่แย่กว่าคนต่อคน; ไม่งั้นครูแค่ติดป้ายล่วงหน้า

ควบคุมแขน: ครูยังเป็นเดโมมนุษย์, RL หุ่นจริง และซิม

โมเดลฟรอนเทียร์ช่วยเฉพาะออฟไลน์: เขียนโปรแกรมและเปลี่ยนรุ่น



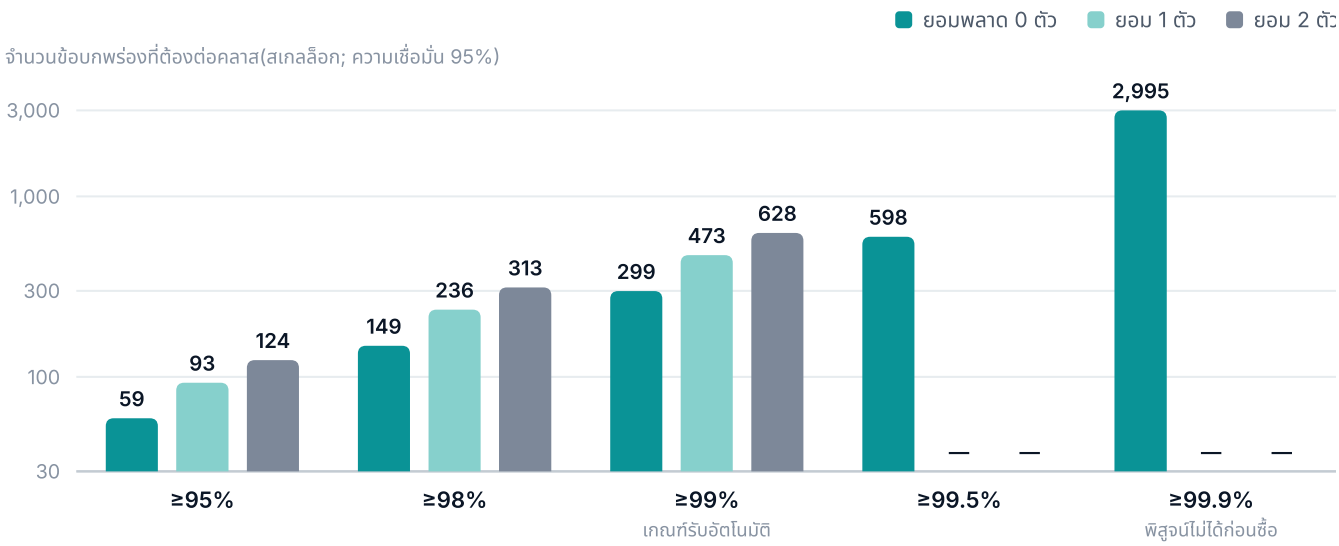
แหล่งที่มา: การสังเคราะห์ผู้เขียน(บทที่ 3); ต้นทุนและขนาดตัวอย่างเป็นค่าประมาณ

โปรโตคอลที่ใช้การได้ estimate :

1. **รวบรวมชุดข้อมูลอ้างอิงจากคลัง AOI ของโรงงานและแผ่น NG ที่เก็บไว้** แบ่งชั้นเป็นคลาสข้อบกพร่องจริง 12 คลาส (หาย, เยื้อง, tombstone, ขั้วกลับ, ชิ้นส่วนผิด, เชื่อมติด/ลัดวงจร, บัดกรีไม่เพียงพอ, บัดกรีเกิน, ลูกบัดกรี, ขาลอย/วงจรเปิด, ชิ้นส่วนเสียหาย, วัสดุแปลกปลอม) และสาเหตุสัญญาณผิดพลาดสี่แบบ (เงา, ฟลักซ์, ซิลค์สกรีน, ค่าคลาดเคลื่อน) บวก “drift slice” ที่มีข้อบกพร่องอย่างน้อย 300 รายการจากสายที่สองหรือแสงต่างกัน สีแผ่นต่างกัน หรือหมายเลขชิ้นส่วนต่างกัน
2. **ติดป้ายแบบ blind ด้วยผู้ตรวจสอบที่ผ่านการฝึก IPC-A-610 สองหรือสามคน** โดยวิศวกรอาวุโสเป็นผู้ตัดสิน และ X-ray การทดสอบทางไฟฟ้า หรือภาพตัดขวางเป็นตัวชี้ขาดตัวอย่างที่คลุมเครือ ยอมรับคำนิยามคลาสเฉพาะเมื่อความเห็นตรงกันของผู้ตรวจสอบถึง κ ≥0.75 (≥0.90 สำหรับคลาสวิกฤต) ความเห็นตรงกันของมนุษย์บนสัญฐานข้อบกพร่องอิเล็กทรอนิกส์ 11 แบบใน LDU-Bench มีเพียง 0.727 ดังนั้นบางคลาสต้องถูกรวมหรือนิยามใหม่ ข้อตกลงคุณลักษณะแบบ AIAG (ประสิทธิผล ≥90%, พลาด ≤2%, สัญญาณเตือนผิด ≤5%, κ >0.75; >0.90 สำหรับการปล่อย) เป็นขั้นต่ำที่สมเหตุสมผล (Fabrico, iFactory)
3. **กำหนดขนาดด้วยขอบเขต binomial แน่นอน (Clopper–Pearson) ด้านเดียวที่ 95%** (binomial confidence intervals, rule of three:

Recall ที่ต้องพิสูจน์	พลาดได้ 0	พลาดได้ 1	พลาดได้ 2
≥95%	ข้อบกพร่อง 59	93	124
≥98%	149	236	313
≥99%	299	473	628
≥99.5%	598	—	—
≥99.9%	2,995	—	—

FIG 14 **ชุดทองคำต้องใหญ่แค่ไหน*การพิสูจน์ recall 99% โดยไม่พลาดต้องมีข้อบกพร่อง 299 ตัวต่อคลาส; 99.9% พิสูจน์ไม่ได้ก่อนซื้อ***



แหล่งที่มา: ช่วงความเชื่อมั่นทวินามแบบแม่นยำ(95%)

ข้อบกพร่องหกสิบรายการต่อคลาสเพียงพอสำหรับการคัดกรองผ่าน/ไม่ผ่าน ต้องใช้ 300 รายการเพื่อตัดสินเรื่องการยอมรับอัตโนมัติ เซตเต็มประมาณข้อบกพร่อง 3,600 รายการบวกภาพตัดสัญญาณผิดพลาด 3,500 รายการ ใช้เวลาติดป้ายและตัดสินประมาณ 37–57 ชั่วโมงแรงงาน และการรันผู้สมัครครูบนเซตนี้มีค่าใช้จ่าย $23–196 ต้นทุนจริงคือการรวบรวมสองถึงหกสัปดาห์ กำหนดโดยคลาสที่หายากที่สุด estimate ส่งภาพตัด AOI แบบชิ้นส่วนเดียว ไม่ใช่ทั้งแผ่น โดยเป้าหมายอย่างน้อย 42–48 พิกเซล (arXiv 2610.09313)

1. **ยอมรับป้ายจากครูโดยอัตโนมัติเฉพาะคลาสที่มีการพลาดเป็นศูนย์บนข้อบกพร่องอ้างอิง ≥299 รายการ** ความสอดคล้องโมเดล–ความจริงไม่แย่กว่าความสอดคล้องมนุษย์–มนุษย์ และเคลียร์สัญญาณผิดพลาดได้อย่างน้อย 50% คลาสวิกฤต เช่น ไฟฟ้าลัดวงจร ชิ้นส่วนหายขั้วกลับ และชิ้นส่วนผิด ต้องใช้ 99.5–99.9% (ข้อบกพร่อง 598–2,995 รายการ) มิฉะนั้นสิ่งที่ AI เคลียร์ด้วยความเชื่อมั่นสูงไม่ได้จะไปหาคน อัตราการเล็ดรอดต่ำกว่า 0.1% ของข้อบกพร่องไม่สามารถพิสูจน์ได้ก่อนซื้อ (ข้อบกพร่อง 2,995 รายการพลาดเป็นศูนย์ 0.01% ต้องใช้ 29,956) ดังนั้นสายยังคงมีการสุ่มตัวอย่างโดยมนุษย์ของการเรียกที่ AI เคลียร์ ICT/FCT ปลายทางเป็น backstop และ SPC สำหรับการเล็ดรอด ป้ายที่ตรวจสอบแล้วจึงถูก distill ไปยัง detector หรือ classifier ทั่วไป และตรวจสอบซ้ำทุกผลิตภัณฑ์ใหม่

เงื่อนไขและกฎข้อมูลก็เป็นตัวตัดสินครูเช่นกัน Anthropic ห้ามใช้บริการของตนเพื่อฝึกโมเดลที่เป็นคู่แข่ง (Anthropic commercial terms) OpenAI อนุญาตให้เอาต์พุตฝึก classifier ภายในที่ไม่ได้ขายให้บุคคลที่สาม (OpenAI business terms) DeepSeek อนุญาตให้ distill อย่างชัดเจน (DeepSeek terms) primary terms ไม่มีรายใดนิยาม “โมเดลคู่แข่ง” ดังนั้นการใช้เชิงพาณิชย์ต้องตรวจสอบทางกฎหมาย และกฎข้อมูลของลูกค้ามักเก็บภาพไว้ในสถานที่ ค่าเริ่มต้นที่ปลอดภัยที่สุดคือครูแบบ open-weight ที่รันในพื้นที่ โดยใช้โมเดล cloud frontier เฉพาะเมื่อลูกค้าอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร

นักเรียนด้านการตรวจสอบ: เล็กและเร็ว คอขวดคือเลนส์ ข้อมูล และการตรวจสอบ

นักเรียนไม่ใช่คอขวด: YOLO26n ใช้ 3.80 ms ต่อภาพใน INT8 บน Orin Nano Super ราคา $249–399 (Ultralytics) vendor test NVIDIA รายงาน 98.51% บนคลาสข้อบกพร่อง PCB สามคลาสหลังปรับ foundation model บนภาพประมาณ 600 ภาพ (NVIDIA) vendor claim และข้อบกพร่องสังเคราะห์เพิ่มคะแนน mAP เพียง 0.9–2.5 (arXiv 2605.04635) ข้อจำกัดคือเลนส์ ข้อมูลสายจริง การตรวจสอบ และไลเซนส์: Ultralytics YOLO เป็น AGPL-3.0 หรือไลเซนส์องค์กร (Ultralytics) ดังนั้นผลิตภัณฑ์ปิดต้องมีไลเซนส์หรือใช้ detector แบบ Apache-2.0 เช่น RF-DETR

นักเรียนด้านหุ่นยนต์: สถานีแบบมีโครงสร้างใกล้ระดับการผลิต งานยืดหยุ่นและไดนามิกยังไม่

ในเดือนพฤศจิกายน 2026 มีครูหุ่นยนต์สามแบบ และมีเพียงแบบเดียวที่กลายเป็นนักเรียนในพื้นที่ได้: VLA แบบเปิดที่ปรับจูนได้ (π0/π0.5, GR00T N1.7, X-VLA, RDT2, SmolVLA) โมเดลหุ่นยนต์แบบปิด (π0.6/π0.7 ผ่าน beta API, Gemini Robotics 2 สำหรับผู้ทดสอบที่ได้รับความไว้วางใจ) ไม่สามารถติดตั้งในสถานที่ได้ (The AI Insider, DeepMind) โมเดลทั่วไปแบบ frontier ช้าและอ่อนในการจัดการละเอียด: ในการทดสอบของ Artificial Analysis ได้ 46–69 ด้วยอัตราความสำเร็จการจับ 28–45% และประมาณ 30 นาทีต่อภารกิจ “ช้าและแพงเกิน

ไปสำหรับการใช้งานเชิงการผลิตใดๆ" (AA-Robotics) GPT-6 Astra ทำช่องเสียบความแม่นยำสำเร็จเพียง 2 ครั้งใน 20 (RoboCurve) และการควบคุมข้อต่อโดยตรงได้ 0–5.5% บน LIBERO ที่ 0.2–0.4 Hz เทียบกับประมาณ 83 Hz ที่ต้องการ (Anthropic) verified across three sources คะแนน 64.9% ของ Fable 5.2 บน benchmark จำลอง RoboDojo เป็นการรันภายใน (Anthropic) vendor claim

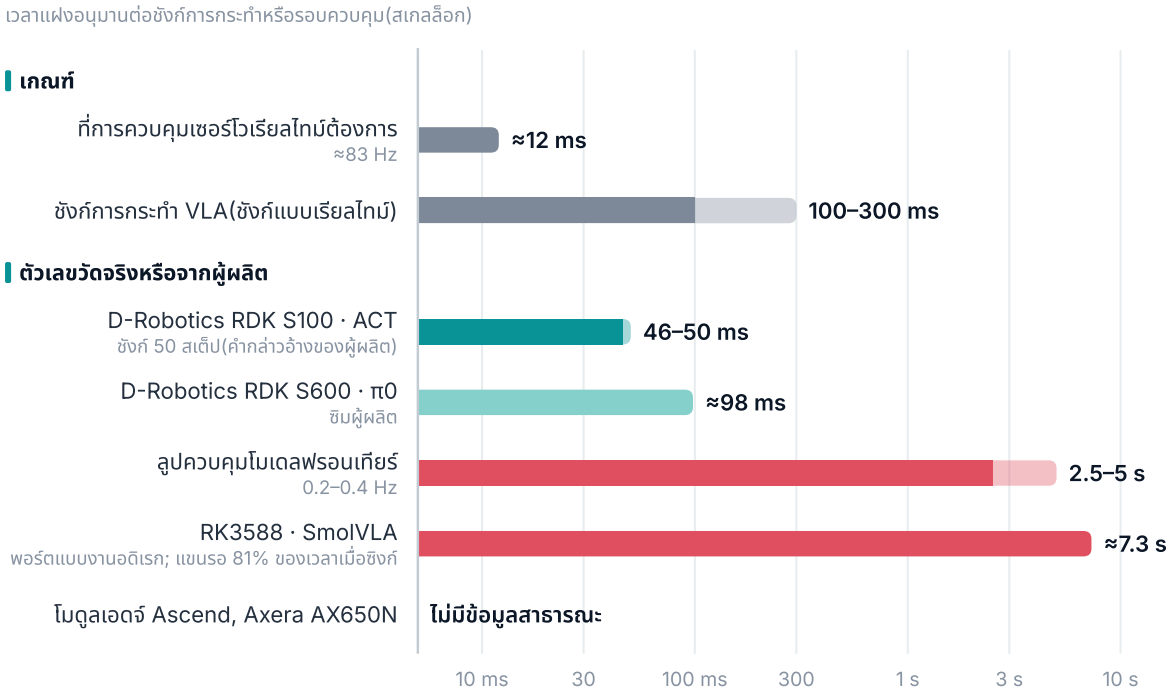
การศึกษาของบุคคลที่สามตั้งแต่เดือนตุลาคมเห็นพ้องกัน: ประมาณ 33–44% บน LIBERO-10 สำหรับสามเอเจนต์ชั้นนำ (arXiv 2610.30051) เอเจนต์อ้างความสำเร็จเกินจริงใน 24–39% ของงานย่อย (arXiv 2611.08209) และ 104 จาก 108 ภารกิจหุ่นยนต์จริงแบบ quasi-static สำหรับ Opus 5.5 แต่ที่ 280 วินาทีต่อภารกิจและไม่มีการเสียบหรือประกอบ (AMP1) single sources โมเดล frontier อยู่ในออฟไลน์: เขียนโปรแกรม จัดเรียงภารกิจ และร่างเกณฑ์ความสำเร็จ

คุณภาพของนักเรียนมีขอบชัดเจน: ดีภายในขอบเขตการฝึก พังนอกขอบเขต π0.7 "มักเกิน 90%" บนภารกิจที่เห็นและได้ 60–80% บนภารกิจที่ไม่เห็น (π0.7 paper) vendor research ContactDP ได้ 97.8% บนคอนเนกเตอร์ที่ฝึก แต่ 28.6–66.7% บนชิ้นที่ไม่เห็น (ContactDP) การเปลี่ยนกล้องหรือท่าทางเล็กน้อยทำให้ 95% ตกลงต่ำกว่า 30% ใน LIBERO-Plus (LIBERO-Plus, CVPR 2026) การจับแบบเรียนรู้จากสายพานที่เคลื่อนที่สูงสุดที่ 58.89% (ForeTime-VLA) single sources งานที่วิชันติดตามแบบดั้งเดิมทำในการผลิตมานานหลายปี

หลักฐานใกล้ระดับการผลิตทั้งหมดมาจากสถานีแบบมีโครงสร้าง การสาธิตโดยมนุษย์ และการแก้ไขบนหุ่นยนต์จริง Neuromeka เก็บ state machine และการเคลื่อนไหวที่สอนไว้ล่วงหน้า และเรียนรู้เฉพาะการจับ การเสียบสายเคเบิล และการบัดกรี แต่ละอย่างจากข้อมูลไม่ถึง 20 นาที: สำเร็จ 322 จาก 324 ในการผลิต ช้ากว่าคน 12.8% (Neuromeka) single source, vendor Fraunhofer ได้ 92.8% ในคอนเนกเตอร์สี่แบบจากข้อมูลการสาธิต 68 นาที (Fraunhofer) HIL-SERL ของ Berkeley สำเร็จ 100 จาก 100 ครั้งในการเสียบ RAM, SSD และ USB หลัง RL บนหุ่นยนต์จริง 1–2.5 ชั่วโมง (HIL-SERL) AgiBot รัน 18–20 วินาทีต่อขั้นภายใน takt 20 วินาทีบนสายทดสอบแท็บเล็ต (IThome) vendor claim

การ distill ซื้อความเร็ว ไม่ใช่ความสามารถทั่วไป: π0.5 รันที่ 0.70 Hz บน Jetson Orin ดิบ และ 10.30 Hz หลังการจัดตารางแบบ asynchronous (EagleVLA) การ distill แบบ layer ทำให้จากประมาณ 3 Hz เป็นประมาณ 10 Hz (Shallow-π) verified นักเรียนสืบทอดเฉพาะสิ่งที่ครูครอบคลุม ผลิตภัณฑ์ใหม่แต่ละตัวยังต้องการข้อมูลภารกิจ

FIG 15 **เวลาแฝงนโยบายเอดจ์*นโยบาย ACT เล็กวิ่งใน ≈50 ms บนบอร์ดเอดจ์; VLA ที่พอร์ตลงชิปงานอดิเรกใช้ 7.3 s***

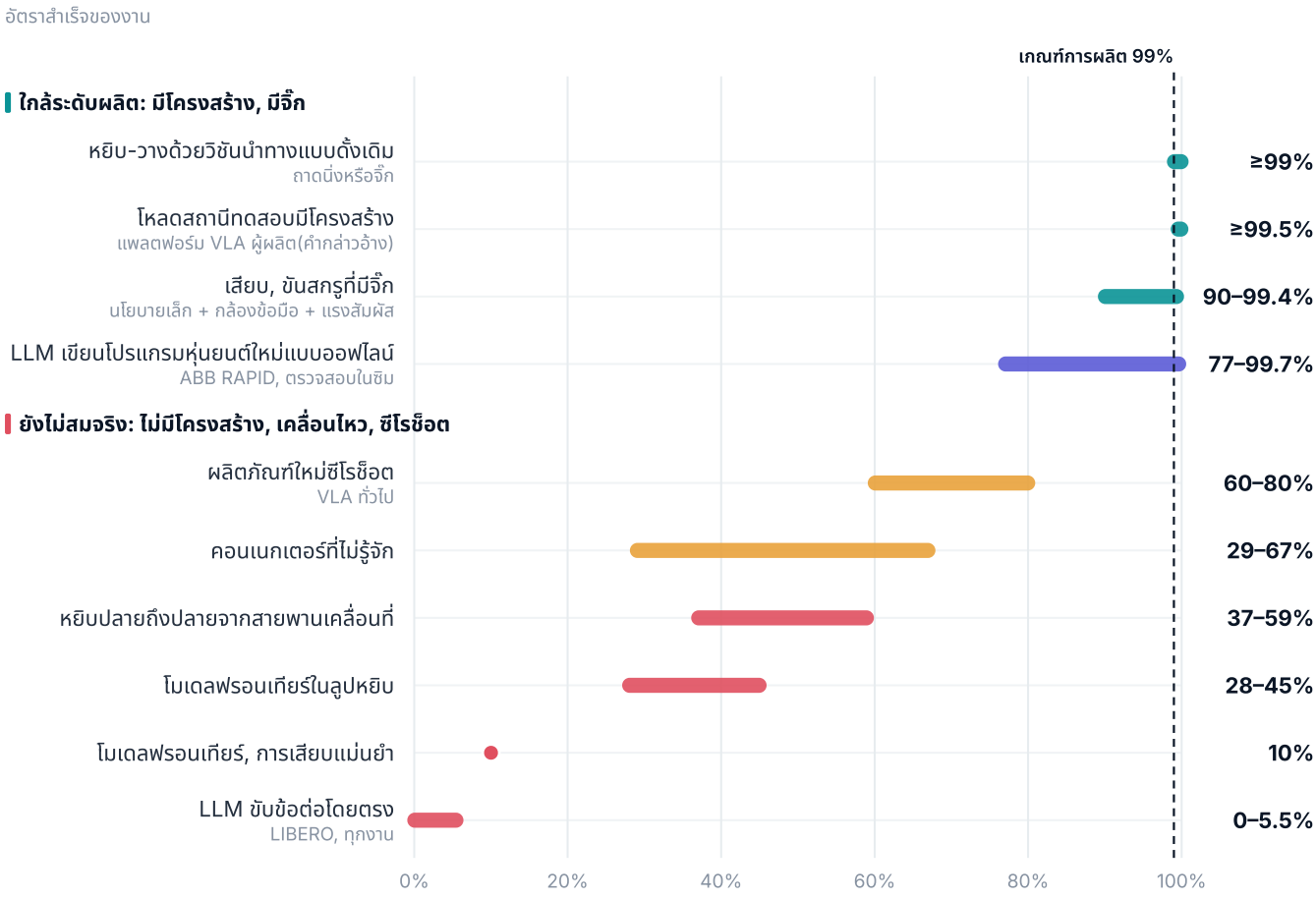


แหล่งที่มา: เอกสารและฟอรัม D-Robotics(ตัวเลขผู้ผลิต); พอร์ตชุมชน GitHub; งานวิจัย Anthropic

บนชิป edge จีน นโยบายแบบเรียนรู้เดียวที่วัดได้คือนโยบาย ACT บน RDK S100 ของ D-Robotics ที่ 46–50 ms ต่อ chunk 50 ขั้น โดยไม่เผยแพร่อัตราความสำเร็จ (D-Robotics RDK S docs) vendor claim พอร์ตงานอดิเรกของ SmolVLA บน RK3588 ใช้ประมาณ 7.3 วินาทีต่อ chunk (GitHub) Quantization ไม่ได้ซื้อความเร็วฟรี: ไม่มี build π0.5 แบบ 4-bit ใดเร็วกว่า 16-bit ที่ batch size 1 (LoopQ) การสาธิตมีราคาแพง (Reuters รายงานประมาณ 300 ครั้งต่อการเคลื่อนไหวที่ใช้ได้หนึ่งครั้งสำหรับ teleoperator มือใหม่

(Notebookcheck)) และการตรวจสอบแพงกว่า: การพิสูจน์อัตราความล้มเหลว ≤0.1% ที่ความเชื่อมั่น 95% ต้องใช้ความสำเร็จต่อเนื่องประมาณ 3,000 ครั้ง หรือ 17–22 ชั่วโมงหุ่นยนต์ estimate ไม่มีนโยบายการจัดการแบบเรียนรู้ใดมีการรับรองความปลอดภัย

FIG 16 **นักเรียนหุ่นยนต์: ใกล้ระดับผลิตก็ต่อเมื่อสถานีมีโครงสร้าง*สถานีมีจิ๊กได้ 90–99%+; งานไม่มีโครงสร้าง เคลื่อนไหว และซีโรช็อตยังไม่สมจริง***



แหล่งที่มา: บทความและวัสดุผู้ผลิตอ้างในบทที่ 3; บางตัวเลขเป็นคำกล่าวอ้างผู้ผลิต

ภารกิจอิเล็กทรอนิกส์	นักเรียนที่ใช้ได้	ความสำเร็จที่คาดหวัง	ความเร็วเทียบกับคน	ต้นทุนต่อการเปลี่ยนรุ่น	คำตัดสิน 2026–2028
หยิบวางแบบ high-mix, kitting, การป้อนเครื่องจักร (ถาดหรือฟิกซ์เจอร์นิ่ง)	การรับรู้แบบเรียนรู้บวกการเคลื่อนไหวแบบโปรแกรมหรือวางแผน	≥99% ด้วยการนำทางวิชันดั้งเดิม	เท่ากับสถานีทั่วไป	ชั่วโมง	ทำได้แล้วตอนนี้
คอนเนกเตอร์แบบยึดจับ, การเสียบ FFC และสายเคเบิล, การขันสกรู, การบัดกรี	state machine + นโยบาย BC/diffusion/ACT ขนาดเล็ก + กล้องข้อมือ + แรง/ทอร์ก (ดีที่สุดถ้ามีสัมผัส) + การแก้ไขโดยมนุษย์	90–99.4%	ช้าลง 10–15%	10–300 การสาธิต (≈15–70 นาที) + การรันตรวจสอบ 1,000–3,000 ครั้ง (6–22 ชั่วโมงหุ่นยนต์)	ทำได้ แต่หนักด้าน R&D ใช้เวลาเป็นเดือนสำหรับสถานีแรก
การดูแลสถานีทดสอบแบบมีโครงสร้างและการคัดแยก OK/NG	แพลตฟอร์ม VLA ของผู้ขาย + digital twin + RL บนหุ่นยนต์จริง	≥99.5% vendor claim, conflicting	18–20 วินาทีต่อขั้น ภายใน takt 20 วินาที	retraining ≤4 ชม. + สอบเทียบ 15 นาที	ทำได้บนแพลตฟอร์มผู้ขาย
การเขียนโปรแกรมเปลี่ยนรุ่น	LLM เขียนหรือแก้โปรแกรมหุ่นยนต์แบบออฟไลน์ ตรวจสอบในการจำลอง	77–99.7% บนการเขียน RAPID ของ ABB ใหม่	ไม่กระทบ takt	นาทีถึงชั่วโมงต่อโปรแกรม	ทำได้เป็นเครื่องมือวิศวกรรม

ภารกิจอิเล็กทรอนิกส์	นักเรียนที่ใช้ได้	ความสำเร็จที่คาดหวัง	ความเร็วเทียบกับคน	ต้นทุนต่อการเปลี่ยนรุ่น	คำตัดสิน 2026–2028
การหยิบแบบเรียนรู้ครบวงจรจากสายพานที่เคลื่อนที่	นักเรียน VLA	37–59%; ≤37% บนสายพานเร็ว	—	≥458 การสาธิตต่อการตั้งค่า	**ไม่ก่อนปี 2028 ใช้การติดตามตั้งเดิมบวกการรับรู้แบบเรียนรู้**
ผลิตภัณฑ์ใหม่โดยไม่มีข้อมูลใหม่ (zero-shot)	VLA ทั่วไป	60–80%; คอนเนกเตอร์ที่ไม่เห็น 29–67%	—	—	**ไม่สมจริง**
Frontier LLM ในลูปขับแขน	เอเจนต์ GPT-6, Claude, Gemini	การจับ 28–45%; การเสียบความแม่นยำ 10%	≈30 นาที หรือ 280 วินาทีต่อภารกิจ เทียบกับ ≈20 วินาที	—	**ไม่สมจริง**
สายรัดสายไฟแบบเดินสายอิสระและการประกอบยืดหยุ่นหลายขั้น	—	ไม่มีหลักฐานการผลิตปี 2026	—	—	**ไม่ก่อนปี 2028**

แหล่งที่มา: การศึกษาข้างต้นและ (University of Passau on RAPID rewriting, GraspVLA, Komax) **mostly single source and vendor data** ในปี 2026–2028 คุณค่าของโมเดลขนาดใหญ่ต่อหุ่นยนต์คือการเป็น prior ที่ฝึกไว้ล่วงหน้าและโปรแกรมเมอร์ออฟไลน์ ไม่ใช่สิ่งที่ “สอน” นักเรียน ทุกกรณีใกล้ระดับการผลิตที่ฉันพบ (Neuromeka, AgiBot ที่ Longcheer, Fraunhofer, ContactDP) พึ่งพาการสาธิตโดยมนุษย์ การตรวจจับแรงหรือสัมผัส การจำลองหรือ digital twin และ supervised RL ไม่มีรายใดพึ่งพาป้ายจากโมเดล frontier

ต้นทุนและการคืนทุน

04 ต้นทุนและการคืนทุน: การตรวจสอบด้วย AI คืนทุนในไม่กี่เดือน การป้อนเครื่องจักรในหลายปี แขนหยิบชิ้นงานไม่เคย

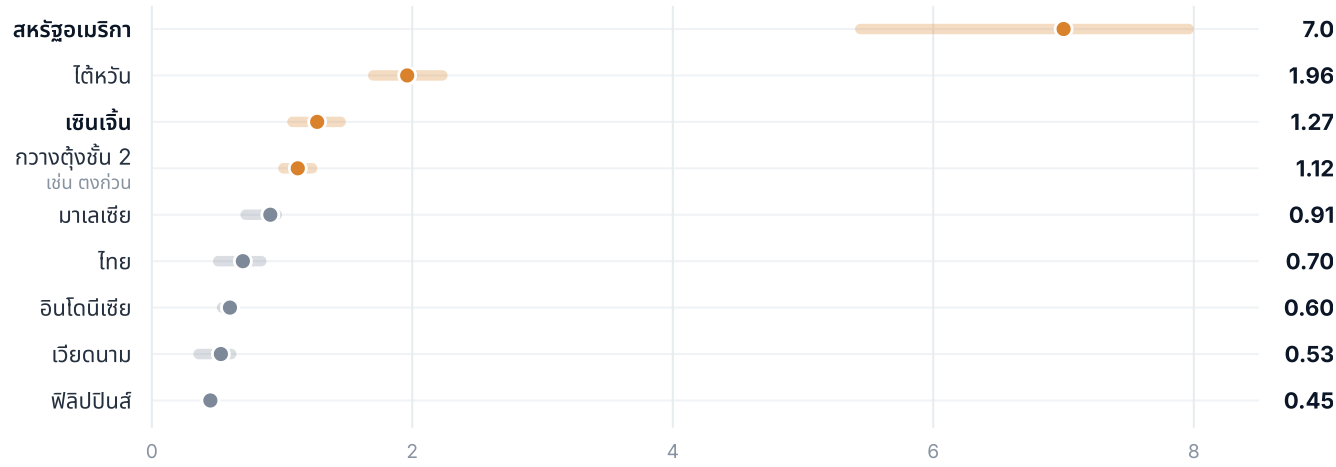
ต้นทุนแรงงาน: สหรัฐฯ ประมาณ 5.5 เท่าของเซินเจิ้น ไต้หวันประมาณ 1.5 เท่า เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ส่วนใหญ่ต่ำกว่าครึ่ง

ผลตอบแทนจากการแทนแรงงานเริ่มจากต้นทุนแรงงาน แนวทางค่าจ้างทางการของเซินเจิ้นกำหนดมัธยฐานปี 2024 สำหรับผู้ตรวจสอบคุณภาพการผลิตที่ **74,074 RMB** ต่อปี ค่าจ้างคิดเป็น 86.92% ของต้นทุนแรงงานรวมในการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นต้นทุนรวมอยู่ที่ประมาณ 85,000 RMB การสำรวจปี 2025 ของ JETRO กำหนดต้นทุนรายปีของคนงานโรงงานจีนที่ $12,667 หรือประมาณ 85,100 RMB ต่างกัน 0.2% (Shenzhen wage guidance, JETRO 2025) verified

ภูมิภาค	ต้นทุนรวมรายปีของผู้ตรวจสอบหรือผู้หยิบจับหนึ่งคน (ต่ำ / ฐาน / สูง)	หลักเกณฑ์
จีนแผ่นดินใหญ่, เซินเจิ้น	70k / **85k** / 100k RMB ($10.4k / **12.7k** / 14.9k)	มัธยฐานทางการ × 1.15 ตรงกับ JETRO verified
พื้นที่ค่าจ้างชั้น 2 ของกวางตุ้ง (ตงก่วน ฯลฯ)	65k / **75k** / 85k RMB	มัธยฐานกวางตุ้ง 2023 × 1.15 บวกการขึ้นค่าจ้างสองปี estimate
สามเหลี่ยมปากแม่น้ำแยงซี (ซูโจว, คุนซาน, อู๋ซี)	เท่ากับเซินเจิ้น	ไม่มีหลักฐานว่าแรงงานตรวจสอบถูกกว่า ค่าจ้างขั้นต่ำสูงสุดของเจียงซูสูงกว่าเซินเจิ้นประมาณ 5.6% estimate
ไต้หวัน	$16.6k / **19.6k** / 22.7k (534k / **630k** / 729k NT$)	การสำรวจค่าจ้างตามอาชีพของกระทรวงแรงงานบวกต้นทุนตามกฎหมาย ≈1.18 JETRO เป็นปลายสูง estimate
มาเลเซีย	$6.8k / **9.1k** / 10.0k	JETRO และค่าจ้างขั้นต่ำ estimate
ไทย	$4.7k / **7.0k** / 8.8k	เช่นเดียวกัน
อินโดนีเซีย	$5.0k / **6.0k** / 6.3k	เช่นเดียวกัน
เวียดนาม	$3.2k / **5.3k** / 6.5k	เช่นเดียวกัน
ฟิลิปปินส์	$4.0k / **4.5k** / 4.9k	เช่นเดียวกัน
สหรัฐอเมริกา	$54k / **70k** / 80k	มัธยฐานผู้ตรวจสอบ BLS พฤษภาคม 2025 $48,570 ÷ ค่าจ้างที่ 65.5% ของค่าตอบแทน estimate

แหล่งที่มา: (JETRO 2025, Guangdong wage guidance, Wuxi HR bureau, Taiwan occupational wage survey, PTS News, BLS OEWS, BLS ECEC)

FIG 17 ***ค่าใช้จ่ายต่อปีของคนตรวจหรือขนย้ายหนึ่งคนรวมทุกอย่าง สหรัฐฯ ≈5.5× เซินเจิ้น และไต้หวัน ≈1.5×***



แหล่งที่มา: แนวทางค่าจ้างทางการเซินเจิ้น, กระทรวงแรงงานไต้หวัน, JETRO, BLS; ค่าประมาณผู้เขียน

การแก้ไขสามประการกำหนดหลักเกณฑ์ ประการแรก เซินเจิ้นปรับเพิ่มฐานเงินสมทบกองทุนบำนาญจาก 4,775 เป็น 5,521 RMB ต่อเดือนในเดือนกรกฎาคม 2026 (Shenzhen Bendibao) single source ดังนั้นผู้ตรวจสอบเซินเจิ้นในปี 2026 มีแนวโน้มต้นทุน 80–90k RMB ประการที่สอง ตำแหน่งไม่ใช่คน: สองกะ 12 ชั่วโมงต้องใช้คนประมาณ 2.0 (หกวันต่อสัปดาห์) ถึง 2.4 (ตลอดปี) ในสามเหลี่ยมปากแม่น้ำจูเจียง ประมาณ 2.7–3.1 ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ภายใต้เพดานล่วงเวลา และ 4.2–4.5 สำหรับ 24×7 ในสหรัฐฯ และไต้หวัน estimate การตรวจสอบด้วย AI มักให้ผู้ตรวจสอบหนึ่งคนครอบคลุมสองถึงสี่สาย ดังนั้นการประหยัดที่เป็นจริงคือ **คนเต็มเวลา 0.5–1.5 คนต่อสาย ไม่ใช่หนึ่งคนต่อสายต่อกะ** ประการที่สาม ผู้ซื้อในไต้หวัน เวียดนาม และมาเลเซียไม่ได้ไล่ตามแค่ต้นทุน: ในการสำรวจของ JETRO บริษัท 61.1% ในไต้หวัน 48.2% ในเวียดนาม และ 44.9% ในมาเลเซียกล่าวว่าการจ้างงานยากขึ้นในช่วงสองปีที่ผ่านมา เทียบกับ 18.6% ในจีนแผ่นดินใหญ่ (JETRO 2025) single source

ราคาอุปกรณ์: ฐานสี่แบบที่ไม่ควรนำมาเฉลี่ย

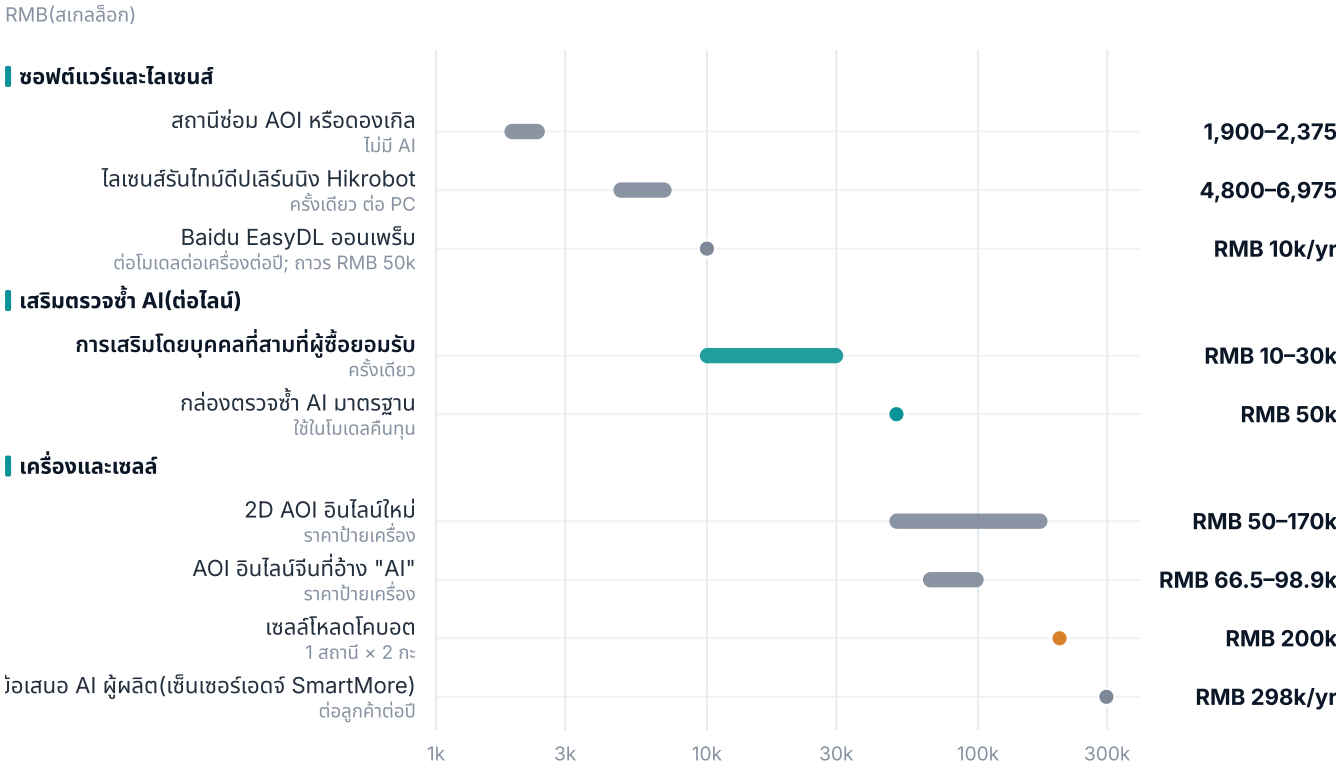
ราคา AOI ต่างกันส่วนใหญ่เพราะวัดคนละสิ่ง รายการออนไลน์ (พฤศจิกายน 2026 ปนกันระหว่างใหม่ ใช้แล้ว และเช่า) อยู่ที่ประมาณ 17–80k RMB สำหรับ 2D แบบออฟไลน์หรือตั้งโต๊ะ 50–170k RMB สำหรับ 2D inline และ 80–475k RMB สำหรับ 3D inline สูงถึง 700k RMB สำหรับ 3D เกาหลี (1688 inline AOI, 1688 offline AOI, 1688 3D AOI) single source, list prices การประมูลเดือนพฤศจิกายน 2025 กำหนดเพดาน 3D AOI หนึ่งเครื่องบวก 3D SPI หนึ่งเครื่องที่ 800k RMB (tender notice) เอกสารเสนอขายหลักทรัพย์ของ Sinic-Tek บ่งชี้ 428–512k RMB ต่อ 3D AOI ในปี 2019–2022 และประมาณ 340–470k RMB ตามรายงานปี 2025 (Sinic-Tek prospectus, Sinic-Tek 2025 annual report) primary + estimate ผู้ขายต่างประเทศประเมิน $3,000–20,000 สำหรับ 2D ตั้งโต๊ะ $30–70k 2D inline $50–90k 3D เริ่มต้น และ $100–200k+ 3D ระดับสูง โดยเครื่อง inline เดียวกันที่ $30–50k ในจีน (Averroes) vendor estimate from a seller of competing AI software

การตรวจสอบด้วย AI เองไม่มีราคา RMB สาธารณะ ผู้ขายเสนอราคาเป็นรายกรณีหลังการประเมินหน้างานฟรี (Sohu on Hengtianyi) และการค้นหารายการอีคอมเมิร์ซ การประมูล บทความผู้ขาย และสื่อไต้หวันไม่พบราคาสาธารณะ (1688, 51SMT) จุดยึด: ประมาณ €27k ต่อสายที่บ่งชี้โดยกรณี Siemens estimate $21,924 ราคาประกาศสำหรับโมดูลเครือข่ายตรวจสอบระยะไกลของผู้จัดจำหน่ายสหรัฐฯ (Manncorp) vendor list price ประมาณ 298k RMB ต่อลูกค้าต่อปีสำหรับ edge AI sensors ของ SmartMore ในปี 2025 (36Kr) single source 2D AOI inline ในประเทศที่ขายเป็น “AI” ประกาศราคา 66.5k RMB (1688 inline AOI) และ NG buffer สำหรับการตรวจซ้ำด้วยมือประมาณ 50k RMB (1688 AOI review) ดังนั้นเพดานของส่วนเสริมตรวจสอบจากบุคคลที่สามอยู่ที่ประมาณ 10–30k RMB ต่อสาย หรือค่าธรรมเนียมรายปีใกล้เคียงกัน สูงกว่านั้นผู้ซื้อจะเปลี่ยนเครื่องเป็น AOI ในประเทศที่มี AI ในตัวแทน estimate

จุดยึด	ราคา (RMB)	ซื้ออะไร	แหล่งที่มา
สถานีซ่อม AOI หรือซอฟต์แวร์ dongle (TRI รุ่นเก่า, Zhenhuaxing)	≈1,900–2,375	คีย์ไลเซนส์ ไม่มี AI	1688 list price
runtime วิชัน deep-learning ทั่วไป (Hikrobot VisionMaster dongle)	≈4,800–6,975 ครั้งเดียวต่อ PC	แพลตฟอร์ม ลูกค้าสร้างและบำรุงรักษาโมเดลเอง	1688 list price

จุดยึด	ราคา (RMB)	ซื้ออะไร	แหล่งที่มา
การติดตั้ง Baidu EasyDL ภายในองค์กร	10,000 ต่อโมเดลต่ออุปกรณ์ต่อปี หรือ 50,000 ตลอดชีพ	บริการอนุมานแบบแพ็กเกจ	Baidu AI docs 2022 price page
AOI inline ในประเทศที่ขายเป็น “AI”	66,500–98,900 ต่อเครื่อง	การเปลี่ยนเครื่อง	1688 list price
edge AI sensors ของ SmartMore	≈298,000 ต่อลูกค้าต่อปี	โซลูชันผู้ขายครอบคลุมหลายเครื่อง	36Kr single source

FIG 18 **บันไดราคา*จากไลเซนส์ซอฟต์แวร์ไม่กี่พัน RMB ถึง RMB 200–300k สำหรับเซลล์หุ่นยนต์หรือข้อเสนอ AI ผู้ผลิต***



แหล่งที่มา: รายการ 1688, เอกสาร Baidu AI(ราคาปี 2022), 36Kr, สัมภาษณ์อุตสาหกรรม(ไม่ยืนยัน)

ค่าธรรมเนียมรายปีแบบ Baidu โดยมีเซิร์ฟเวอร์อนุมานหนึ่งเครื่องสำหรับหนึ่งถึงสี่สายและโมเดลหนึ่งถึงสี่ตัวต่อเครื่อง บ่งชี้ค่าสมาชิก 2.5–40k RMB ต่อสายต่อปี ตามจริงประมาณ 5–10k RMB ที่ 20% ของไลเซนส์ตลอดชีพ ค่าสมาชิกและการซื้อเท่ากันในปีที่ห้า โครงสร้างที่น่าเลียนแบบ estimate ผู้ซื้อคุ้นเคยกับค่าซอฟต์แวร์เกือบศูนย์: รายได้ “อื่นๆ” ทั้งหมดของ Sinic-Tek (อะไหล่ บริการ เช่า อุปกรณ์เสริม) คือ 7.65% ของยอดขายปี 2025 ประมาณ 2,300–3,100 RMB ต่อเครื่องที่ติดตั้งต่อปี (Sinic-Tek 2025 annual report) primary + estimate ค่าสมาชิก AI 5–10k RMB ต่อสายต่อปีคือสองถึงห้าเท่าของที่ผู้ซื้อจ่ายค่าซอฟต์แวร์ AOI ในปัจจุบัน ดังนั้นต้องอ้างอิงจากชั่วโมงตรวจสอบที่ปล่อยออกมา (ประมาณ 75–90k RMB ต่อคนเต็มเวลาต่อปี) ไม่ใช่เปรียบเทียบกับค่าซอฟต์แวร์ที่มีอยู่

สำหรับแขนหุ่นยนต์ ราคาเฉลี่ย cobot ของจีนลดลงเหลือประมาณ 58,600 RMB ในปี 2025 (GGII) estimate และราคาเฉลี่ยหกแกนของ Dobot ลดลง 19.1% ในปีนั้นเมื่อรุ่นถูกกว่าได้ส่วนแบ่ง (Huxiu) verified แม้ราคาประกาศของรุ่นเดียวกันจะขึ้น 5–15% ในปี 2026 (Sina Finance) ในสหรัฐฯ FANUC CRX-10iA ประกาศที่ $51,434 (Vention) และการรวบรวมระบุ UR7e ที่ $30–48k (cobotcost) estimate แขนคิดเป็นเพียง 40–50% ของเซลล์สหรัฐฯ (Standard Bots) ในจีน กล้อง กริปเปอร์ ความปลอดภัย และวิศวกรรมสูงเป็นสองถึงสี่เท่าของแขน 40k RMB ดังนั้นให้ตั้งงบต้นทุนวิศวกรรมสัมบูรณ์มากกว่าตัวคูณ estimate

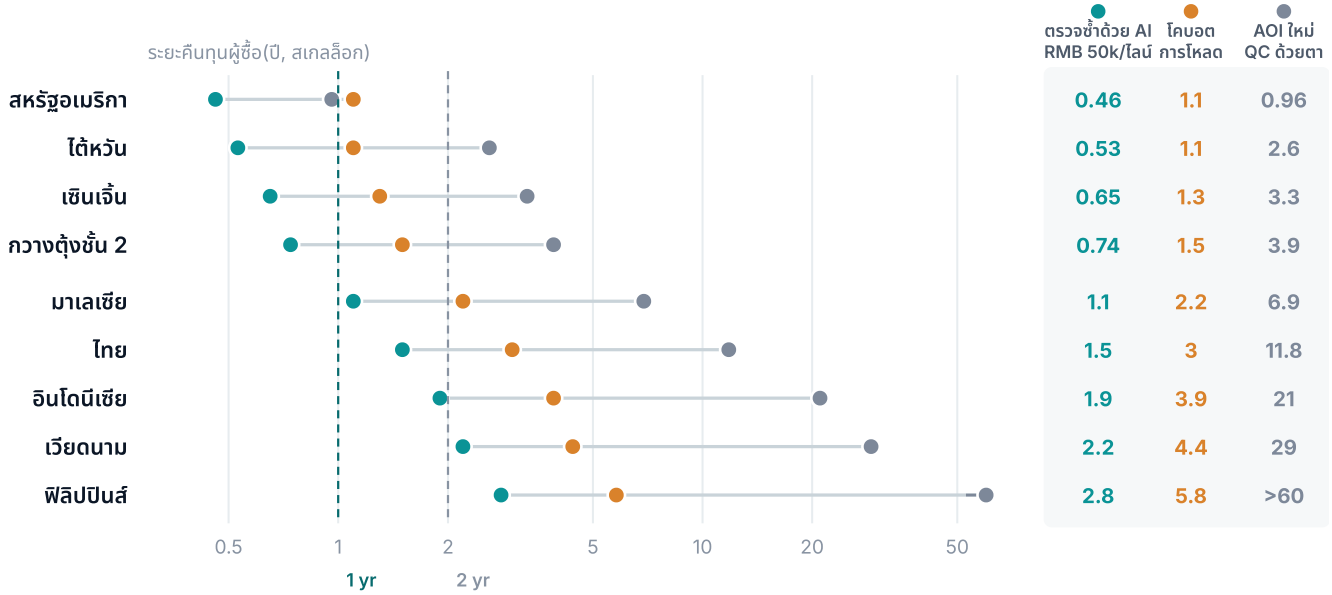
การคืนทุน: การตรวจสอบในไม่กี่เดือน การป้อนในหลายปี การหยิบไม่เคย

การคืนทุนอย่างง่าย = เงินลงทุน ÷ (คนที่ประหยัดได้ × ต้นทุนแรงงานรวม − ต้นทุนการรันรายปี) สำหรับสายสองกะโดยไม่มีเงินอุดหนุนหรือภาษี อุปกรณ์ไต้หวันราคา 1.3 เท่าของจีน เวียดนาม มาเลเซีย และไทย 1.15 เท่า อินโดนีเซียและฟิลิปปินส์ 1.2 เท่า และสหรัฐฯ ที่ราคาต่างประเทศ estimate

สถานการณ์	เงินลงทุน (จีน / สหรัฐฯ)	คนที่ประหยัดได้	ต้นทุนการรันรายปี
(a) กล่องตรวจสอบ AI หรือกล่องกล้อง AI	50k RMB / $30k ต่อสาย	1.0 ต่อสาย	15%
(b) AOI inline 2D ใหม่แทนการตรวจด้วยสายตาด้วยมือ (เหลือผู้ตรวจสอบ 0.5 คนต่อกะ)	200k RMB / $60k	1.0	12%
(c) เซลล์โหลดหุ่นยนต์ร่วม (หนึ่งสถานี × สองกะ)	200k RMB / $140k	2.0	8%
(d) เซลล์ตรวจจับและหยิบรวม (การตรวจ 1.0 + การหยิบ 0.07)	300k RMB / $200k	1.07	8%
(e) แขนหุ่นยนต์ที่เพิ่มเฉพาะเพื่อหยิบแผ่น NG ออก	150k RMB / $100k	0.07	8%

ภูมิภาค	(a) การตรวจสอบ AI	(b) AOI ใหม่	(c) เซลล์หุ่นยนต์ร่วม	(d) ตรวจจับและหยิบ	(e) แขนหยิบชิ้นงาน
เซินเจิ้น	0.65 ปี (0.54–0.80)	3.3 (2.6–4.4)	**1.3** (1.1–1.6)	4.5 (3.6–5.9)	ไม่เคย
กวางตุ้งชั้น 2	0.74	3.9	1.5	5.3	ไม่เคย
ไต้หวัน	0.53	2.6	1.1	3.6	ไม่เคย
มาเลเซีย	1.1	6.9	2.2	9.2	ไม่เคย
ไทย	1.5	11.8	3.0	15	ไม่เคย
อินโดนีเซีย	1.9	21	3.9	25	ไม่เคย
เวียดนาม	2.2 (1.6–4.5)	29	4.4	34	ไม่เคย
ฟิลิปปินส์	2.8	>60 (ต้นทุนรัน ≈ เงินออม)	5.8	≈100	ไม่เคย
สหรัฐอเมริกา	0.46	**0.96**	**1.1**	3.4	ไม่เคย

FIG 19 ***ระยะคืนทุนตามภูมิภาค ตรวจซ้ำ AI คืนทุนในไม่กี่เดือนที่สหรัฐฯ ไต้หวัน และเซินเจิ้น และ 1–3 ปีในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้; โคบอตโหลดเป็นปี***



	ตรวจซ้ำด้วย AI RMB 50k/ไลน์	โคบอต การโหลด	AOI ใหม่ QC ด้วยตา
สหรัฐอเมริกา	0.46	1.1	0.96
ไต้หวัน	0.53	1.1	2.6
เซินเจิ้น	0.65	1.3	3.3
กวางตุ้งชั้น 2	0.74	1.5	3.9
มาเลเซีย	1.1	2.2	6.9
ไทย	1.5	3	11.8
อินโดนีเซีย	1.9	3.9	21
เวียดนาม	2.2	4.4	29
ฟิลิปปินส์	2.8	5.8	>60

แขนเฉพาะคัดแผ่นเสีย: ไม่คุ้มทุนทุกภูมิภาค
เมื่อยิลด์ผ่านแรกเกิน 90%, การคัดใช้แค่ 0.003–0.14 FTE ต่อกะ

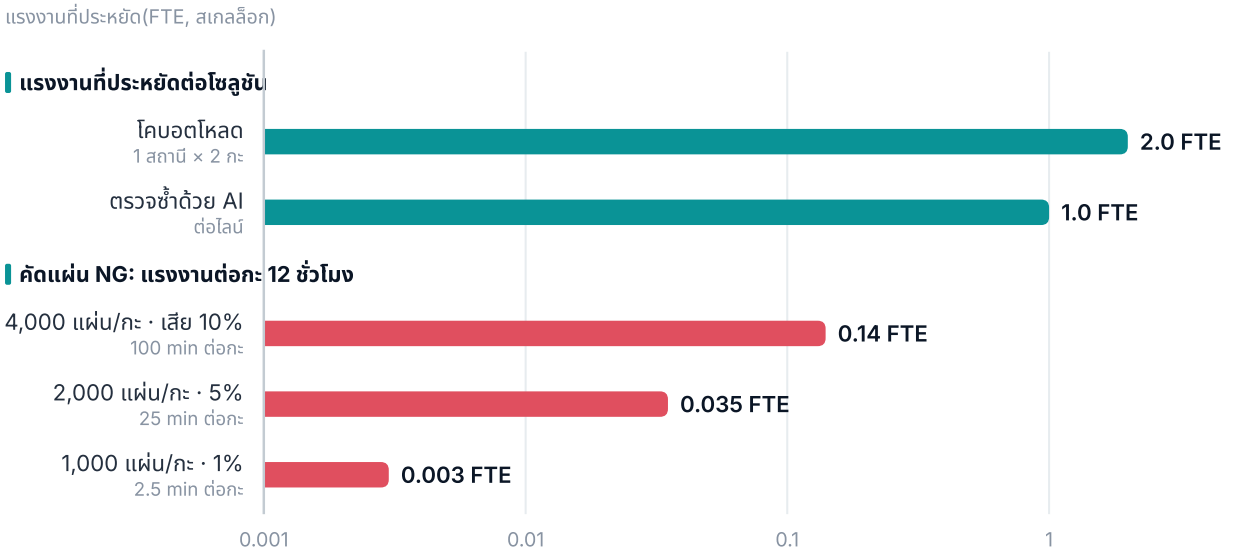
แหล่งที่มา: โมเดลผู้เขียน: กล่องตรวจซ้ำ AI RMB 50k/ไลน์; เซลล์โหลดโคบอต RMB 200k หรือ $140k, สองกะ

ค่าทั้งหมดเป็นการประมาณจากอินพุตข้างต้น ความไว: ลดคนที่ประหยัดได้ลงครึ่ง การคืนทุนทุกอย่างเพิ่มเป็นสองเท่า รันหนึ่งกะ (b)–(d) เพิ่มเป็นสองเท่า ค่าเสื่อมปีแรก 100% ในสหรัฐฯ ทำให้คืนทุนสั้นลงประมาณ 20% ขณะที่ภาษีต่ออุปกรณ์จีน ญี่ปุ่น หรือเกาหลีทำให้ยาวขึ้นประมาณ 10–40% เงินอุดหนุนท้องถิ่น 15% ในจีนทำให้สั้นลงประมาณ 15% ฉันไม่พบการสำรวจอิสระเรื่องเกณฑ์การคืนทุนของผู้ซื้อ ผู้ขายกล่าวว่า AOI คืนทุน “ปกติใน 9–18 เดือน” (Averroes) และกรณี Siemens อ้างแปดเดือน vendor claims ฉันใช้หนึ่งและสองปีเป็นเส้นคัดกรอง โมเดลไม่รวมกำไรเชิงคุณภาพ (การรับประกัน การคืนสินค้า) และต้นทุนการลาออกและการฝึกอบรม ดังนั้นจึงอนุรักษ์นิยม

ส่วนที่สวนทางสามัญสำนึกของ “ตรวจจับและหยิบ” คือแรงงานอยู่ในการตรวจสอบ ไม่ใช่การหยิบแผ่น NG จริงไม่กี่แผ่นออกจากสาย ที่ 15 วินาทีของการจัดการต่อแผ่น NG estimate :

แผ่นต่อกะ	อัตราข้อบกพร่อง	เวลาหยิบต่อกะ 12 ชั่วโมง	คน
1,000	1%	2.5 นาที	0.003
2,000	5%	25 นาที	0.035
4,000	10%	100 นาที	0.14

FIG 20 **ทำไมการคัดแผ่นเสียไม่คุ้มทุน*เมื่อยิลด์ผ่านแรกเกิน 90% การคัดใช้แค่ 0.003–0.14 คนต่อกะ***



แหล่งที่มา: ค่าประมาณผู้เขียน

กรณีฐาน (2,000 แผ่นต่อกะ ข้อบกพร่อง 5% สองกะ) คือ 0.07 คน มูลค่าประมาณ 6,000 RMB ต่อปีในเซินเจิ้น น้อยกว่าต้นทุนการรันรายปีของแขนประมาณ 12,000 RMB ดังนั้นไม่คุ้มทุนที่ไหนเลย แม้แต่กรณีแย่ที่สุด (4,000 แผ่นต่อกะ ข้อบกพร่อง 10%) ใช้เวลาประมาณ 13 ปีในเซินเจิ้น และ 9 ปีในสหรัฐฯ estimate หากกังวลเรื่องการหยุดสายเพื่อหยิบ NG diverter หรือ buffer conveyor มาตรฐานแก้ได้โดยไม่ต้องมีแขน คนในอุตสาหกรรมพูดว่า “เมื่ออัตราผลผลิตผ่านครั้งแรกสูงกว่า 90% ให้หยุดสายแล้วหยิบแผ่นออกด้วยมือ” และ **นั่นถูกสำหรับการหยิบ แต่ไม่ถูกสำหรับการตรวจสอบ** การออกแบบผลิตภัณฑ์บนสาย SMT จึงเป็น “ตรวจสอบบวกทำเครื่องหมายหรือแยกออก” โดยเก็บแขนหุ่นยนต์ไว้สำหรับจุดที่หยิบจับชิ้นส่วนทุกชิ้น (การโหลดฟิกซ์เจอร์ทดสอบ การจัดการถาดและแม็กกาซีน การบรรจุ) ซึ่งการตรวจสอบกลายเป็นส่วนเสริมที่แทบไม่มีต้นทุน และสถานการณ์ (c) มีผล

เงินอุดหนุน ภาษี และภาษีศุลกากรขยับการคืนทุน 15–25% แต่ไม่เปลี่ยนลำดับ

จีนแผ่นดินใหญ่: การสนับสนุนส่วนใหญ่ลดต้นทุนการเงิน เครื่องเดี่ยวไม่ค่อยเข้าข่ายโดยตรง เงินอุดหนุนเงินกู้ระดับชาติจ่ายดอกเบี้ย 1.5 จุดนานสูงสุดสองปีใน 14 ห่วงโซ่ลำดับความสำคัญ (Yicai) verified ประมาณ 9,000 RMB บนเครื่อง 300k RMB รางวัลอัปเกรดของกวางตุ้งสูงสุด 20% ต้องมีโครงการจดทะเบียนพร้อมอุปกรณ์ใหม่อย่างน้อย 7 ล้าน RMB และไม่รวมเซินเจิ้น (Guangdong rules) และตงก่วนจ่ายจริง 4.42% ในเดือนกรกฎาคม 2026 (Dongguan allocation) single source, primary อุปกรณ์ตรวจสอบ AI ได้รับการอนุมัติเฉพาะเป็นอุปกรณ์ “พร้อมซอฟต์แวร์ประกอบ” ภายในโครงการจดทะเบียนของผู้ซื้อ ดังนั้นกรณีฐานจึงสมมติว่าไม่มีเงินอุดหนุน

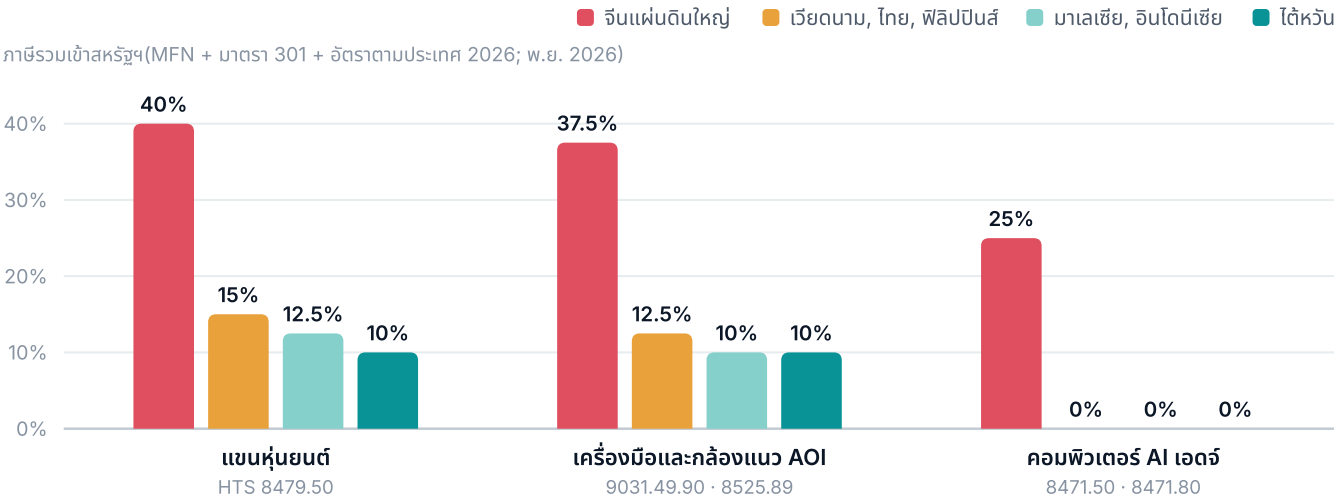
ไต้หวัน: สิทธิประโยชน์ไปที่ผู้ซื้อ ภายใต้มาตรา 10-1 ของกฎหมายนวัตกรรมอุตสาหกรรม ซึ่งแก้ไขในเดือนพฤษภาคม 2025 เพื่อรวม AI ผู้ซื้อสามารถเครดิต 5% ของการใช้จ่ายปี 2025–2029 กับเครื่องจักรอัจฉริยะหรือ AI ใหม่ (รวมการตรวจสอบแบบ CNN/DNN) ต่อภาษีเงินได้ปีนั้น หรือ 3% ต่อปีเป็นเวลาสามปี (Statute, credit rules) verified เงินช่วยเหลือฝั่งผู้จำหน่ายปิดสำหรับทุนจีนแผ่นดินใหญ่ (MOEA) single source

เอเชียตะวันออกเฉียงใต้: เฉพาะมาเลเซียและไทยให้รางวัลการซื้อระบบอัตโนมัติ capital allowance อัตโนมัติ 200% ของมาเลเซียบน 10 ล้าน RM แรกมีมูลค่าประมาณ 24% ของ capex สำหรับผู้ซื้อที่มีกำไร (MIDA, PwC Malaysia) verified BOI ของไทยให้การยกเว้นภาษีสามปีสูงสุด 50–100% ของการลงทุนอัปเกรด โดยเพดานสูงกว่าเมื่อมีผู้จำหน่ายระบบอัตโนมัติไทยเกี่ยวข้อง (BOI) single source, primary ดังนั้นการเข้าตลาดไทยทำงานได้ดีที่สุดกับผู้ติดตั้งในพื้นที่ เวียดนาม อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์ให้รางวัลการสร้างโรงงานมากกว่าการซื้อระบบอัตโนมัติ (Vietnam Law Magazine, PwC Philippines)

สหรัฐอเมริกา: ค่าเสื่อมทำให้คืนทุนสั้นลง ภาษีศุลกากรทำให้ยาวขึ้น สินทรัพย์ที่ซื้อหลังวันที่ 19 มกราคม 2025 ได้รับค่าเสื่อมปีแรก 100% ถาวร หรือ tax shield ของรัฐบาลกลางประมาณ 21% สำหรับผู้ซื้อที่มีกำไร (IRS Notice 2026-11) single source, primary การสอบสวน Section 232 ต่อหุ่นยนต์และเครื่องจักรอุตสาหกรรมสิ้นสุดวันที่ 28 ตุลาคม 2026 ด้วยการเจรจาแทนภาษีใหม่ และจะประเมินใหม่ภายใน 180 วัน (White House, Mayer Brown) verified การประกอบขั้นสุดท้ายในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ลดภาษีเสริมต่อแขนและเครื่องมือประเภท AOI จากประมาณ 37.5–40% เหลือ 10–15% (บทที่ 1)

ภูมิภาค	เครื่องมือหลัก	ผลต่อการคืนทุนของผู้ซื้อ estimate
จีนแผ่นดินใหญ่	เงินอุดหนุนเงินกู้ 1.5 จุดนานสูงสุดสองปี รางวัลอัปเกรดระดับมณฑลและเมือง (กวางตุ้งต้องมีโครงการจดทะเบียน ≥7M RMB ตงก่วนจ่ายจริง 4.42%) มาตรการเซินเจิ้น 2026–2029 (อัตราไม่เปิดเผย)	ประมาณ 0–5% สำหรับเครื่องเดี่ยว 4–15% ภายในโครงการใหญ่
ไต้หวัน	เครดิตมาตรา §10-1, 5% หรือ 3% × 3 ปี	สั้นลงประมาณ 5% หากผู้ซื้อจ่ายภาษีเพียงพอ
มาเลเซีย	capital allowance อัตโนมัติ 200% (10M RM แรก)	สั้นลงประมาณ 15–25% สำหรับผู้ซื้อที่มีกำไร
ไทย	การยกเว้นภาษี BOI สามปีสูงสุด 50–100% ของการลงทุน	สั้นลงประมาณ 15–25% สำหรับผู้ซื้อที่มีกำไรนอกช่วง tax holiday
เวียดนาม, อินโดนีเซีย, ฟิลิปปินส์	สิทธิประโยชน์ภาษีเงินได้สำหรับการสร้างโรงงาน ค่าเสื่อมอุปกรณ์เพิ่ม 20% ในฟิลิปปินส์	แทบไม่มีสำหรับการซื้อระบบอัตโนมัติรายการเดียว
สหรัฐอเมริกา	ค่าเสื่อมปีแรก 100% ภาษีรวม ≈37.5–40% ต่ออุปกรณ์จีนแผ่นดินใหญ่	ค่าเสื่อมสั้นลง ≈20% ภาษีศุลกากรยาวขึ้น ≈10–40%

FIG 21 ***ภาษีสหรัฐฯ ต่อหุ่นยนต์ AOI และคอมพิวเตอร์เอดจ์แขนผลิตในจีนแผ่นดินใหญ่เสีย ≈40%; ส่งจากเอเชียตะวันออกเฉียงใต้หรือไต้หวัน 10–15%***



แหล่งที่มา: USITC ตารางภาษีบท 99; Federal Register; USTR(พ.ย. 2026)

ตามภูมิภาค: ในจีนแผ่นดินใหญ่ กล่องตรวจสอบ AI คืนทุนในไม่กี่เดือน และเซลล์หุ่นยนต์ร่วมใน 1.3–1.5 ปี ขณะที่ AOI ใหม่ที่ซื้อเพื่อลดแรงงานอย่างเดียวใช้ 3–4 ปี และตรวจจับและหยิบรวม 4.5–5.3 ปี ทั้งคู่เกินเส้นคัดกรองสองปี ไต้หวันทำได้ดีกว่าเซินเจิ้นเล็กน้อย (0.53 ปีสำหรับการตรวจสอบ 1.1 สำหรับเซลล์หุ่นยนต์ร่วม) และการจ้างงานที่นั่นยากกว่า ในมาเลเซียและไทย กล่อง AI ใช้ 1–1.5 ปี และเซลล์หุ่นยนต์ร่วม 2–3 ปี เร็วขึ้นประมาณ 15–25% ด้วยสิทธิประโยชน์ภาษีท้องถิ่นสำหรับผู้ซื้อที่มีกำไร ในอินโดนีเซีย เวียดนาม และฟิลิปปินส์ เฉพาะกล่อง AI ที่ถูกมากเท่านั้นที่คืนทุนภายใน 2–3 ปี อุปสงค์ที่นั่นมาจากข้อกำหนดคุณภาพของลูกค้าและการขาดแคลนแรงงานมากกว่า ในสหรัฐฯ ทุกตัวเลือกยกเว้นแขนหยิบชิ้นงานล้วนคืนทุนใน 0.2–3.4 ปี โดยมีภาษีศุลกากร การประเมิน Section 232 ใหม่ และการรับรอง NRTL เป็นตัวแปรหลัก

05 ตลาดและการแข่งขัน
ตลาด การแข่งขัน และวิธีที่ผู้ซื้อจ่ายเงิน

ขนาดตลาด: ตัวเลขที่เผยแพร่ต่างกันเป็นเท่าตัว มีเพียงการนับจากล่างขึ้นบนเท่านั้นที่มีประโยชน์

ตัวเลขตลาดทุกตัวต้องอ่านพร้อมขอบเขตของมัน ตลาดแมชชีนวิชันของจีนอยู่ที่ 18.15 พันล้าน RMB ในปี 2024 (Zhiyan) verified โดย 3C อิเล็กทรอนิกส์เป็นผู้ซื้อรายใหญ่ที่สุด การประมาณระดับโลกของแมชชีนวิชันต่างกันประมาณสามเท่า และของ AOI ประมาณ 6.5 เท่า (MarketsandMarkets, Vision Systems Design/Interact Analysis, Zhiyan) นับจากล่างขึ้นบนจากรายได้ของ Koh Young, TRI, Jutze, Sinic-Tek และ ViTrox อุปกรณ์ตรวจสอบ SMT ระดับโลกอยู่ในอันดับ $1–2 พันล้าน estimate

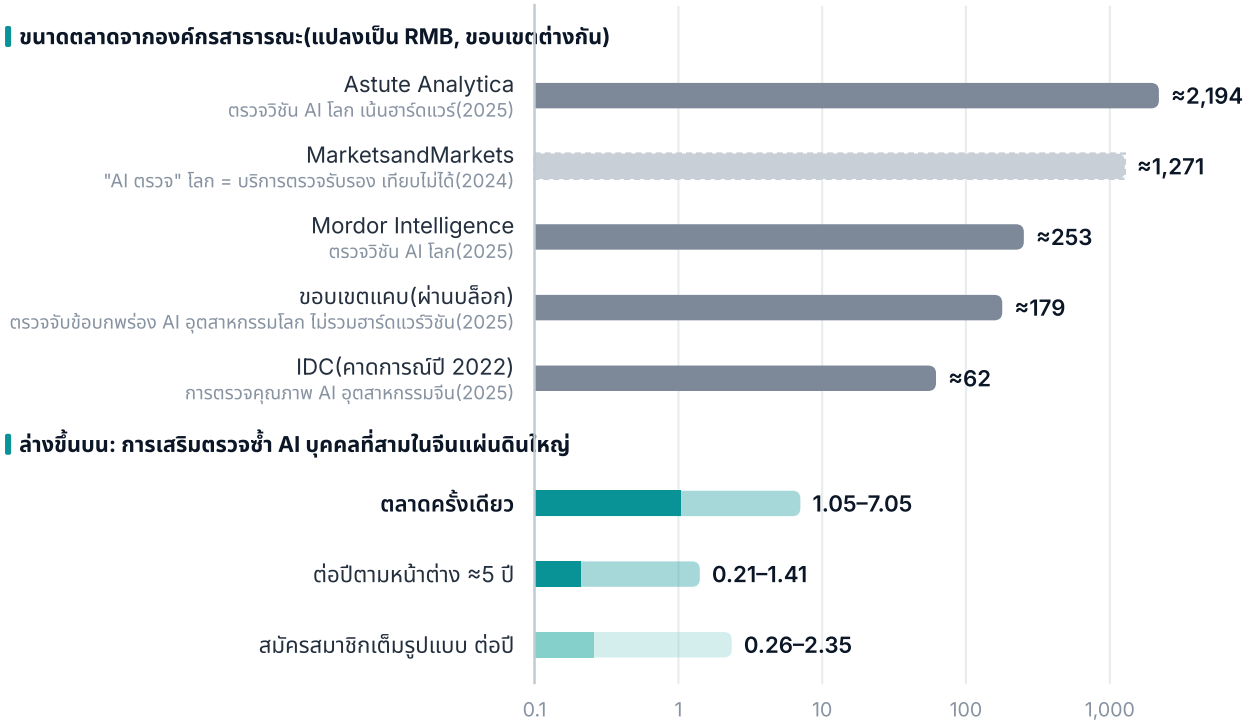
ไม่มีตลาดเดี่ยวสำหรับ “ซอฟต์แวร์ตรวจสอบด้วยสายตาด้วย AI” ตัวเลขที่เผยแพร่ต่างกันมากกว่าสิบเท่าและทั้งหมดรวมฮาร์ดแวร์หรือบริการ:

ขอบเขต	ผู้เผยแพร่	ตัวเลข
“การตรวจจับข้อบกพร่องทางอุตสาหกรรมด้วย AI” ระดับโลก (แคบ ไม่รวมฮาร์ดแวร์วิชัน)	บริษัทไม่ระบุชื่อ ผ่านบล็อก iFactory	$2.66 พันล้านในปี 2025, CAGR 8.6% ถึง 2035, อิเล็กทรอนิกส์ 34%
“การตรวจสอบด้วยสายตาด้วย AI” ระดับโลก	Mordor Intelligence	$3.76 พันล้านในปี 2025, $12.8 พันล้านในปี 2031, CAGR 22.67%
“การตรวจสอบด้วยสายตาด้วย AI” ระดับโลก (ส่วนใหญ่เป็นฮาร์ดแวร์)	Astute Analytica	≈$32.66 พันล้านในปี 2025
“การตรวจสอบด้วย AI” ระดับโลก (บริการทดสอบและรับรอง เทียบกันไม่ได้)	MarketsandMarkets	$18.92 พันล้านในปี 2024
“การตรวจสอบคุณภาพอุตสาหกรรมด้วย AI” ของจีน	IDC, พยากรณ์ทำในปี 2022	$958 ล้านในปี 2025 (≈6.2 พันล้าน RMB), 91.5% ในสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ และอีกสองอุตสาหกรรม

แหล่งที่มา: (iFactory, GII/Mordor, GII/Astute, MarketsandMarkets, IDC) **each single source, mostly paid-report summaries**

FIG 22 **ขนาดตลาดต่างกันเกินสิบเท่า*มีแค่ขอบเขตแคบและการนับล่างขึ้นบนเท่านั้นที่มีประโยชน์ต่อการตัดสินใจ***

RMB 100M(สเกลล็อก; USD ที่ 6.7188)



แหล่งที่มา: Mordor Intelligence, Astute Analytica, MarketsandMarkets, IDC(2022), iFactory; ค่าประมาณล่างขึ้นบนผู้เขียน

นับจากล่างขึ้นบน มีการนับสาย SMT สาธารณะเพียงรายการเดียว: New Venture Research ประมาณ 73,231 สายทั่วโลกในปี 2020, 47% อยู่ในจีน (19% ในปี 2000), ประมาณ 70% ระดับสูงและ 30% ระดับล่าง (EMSNow, NVR SMT2020 summary) single source, 2020 ปัจจุบัน NVR เป็นของ IPC และข้อมูลใหม่กว่าต้องจ่ายเงิน (NVR) เติบโต 3–5% ต่อปีด้วยส่วนแบ่งจีน 40–47% ให้ประมาณ 87,000–98,000 สายทั่วโลกในปี 2026 และ 35,000–46,000 ในจีนแผ่นดินใหญ่ (ฐาน 40,000) estimate

อินพุต	ต่ำ	ฐาน	สูง	หลักเกณฑ์
สาย SMT จีนแผ่นดินใหญ่ (2026)	35,000	40,000	46,000	ฐาน NVR 2020 × การเติบโต × ส่วนแบ่ง
ส่วนแบ่งที่ยังไม่ใช้การตรวจสอบ AI	75%	80%	85%	ช่วงเวลา retrofit ด้านล่าง
ส่วนแบ่งที่บุคคลที่สามเข้าถึงได้ (ไม่ใช่ภายใน ไม่ผูกกับ AI ของ OEM จ่ายเงินได้)	40%	50%	60%	สมมติฐาน: ≈30% สายระดับล่างบวกสายระดับสูงหลายยี่ห้อบางส่วน ไม่รวมการสร้างภายในแบบ DBG
สายที่ให้บริการได้	**10,500**	**16,000**	**23,500**	ผลคูณ
ราคาครั้งเดียวต่อสาย	10k RMB	20k RMB	30k RMB	บันไดราคาและเพดาน (บทที่ 4)
ตลาดครั้งเดียวที่ให้บริการได้ (ฐานติดตั้ง)	**105M RMB**	**320M RMB**	**705M RMB**	ผลคูณ
ต่อปีในช่วงเวลาประมาณ 5 ปี	21M RMB	64M RMB	141M RMB	ช่วงเวลาหด 8–12% ต่อปี
ค่าสมาชิก (2.5k / 5k / 10k RMB ต่อสายต่อปี, ใช้เต็ม)	26M RMB ต่อปี	80M RMB ต่อปี	235M RMB ต่อปี	จุดยึดค่าธรรมเนียมรายปีแบบ Baidu

FIG 23 **ล่างขึ้นบน: 40,000 ไลน์ → ให้บริการ 16,000 → ≈RMB 320M ครั้งเดียว*ตลาดเฉพาะตรวจซ้ำ AI บุคคลที่สามในจีนแผ่นดินใหญ่มีจริงแต่เล็ก***



ผู้เล่นใหม่ได้ 2–5% ของไลน์ที่ให้บริการใน 3 ปี: ≈320–800 ไลน์, ≈RMB 2–5M ต่อปี
แบบสมัครสมาชิก(RMB 5k ต่อไลน์ต่อปี)ได้รายได้ประจำ RMB 1.6–4M, แค่ 0.3–2.3% ของคาดการณ์ IDC

แหล่งที่มา: NVR(ฐาน 2020); ค่าประมาณผู้เขียน

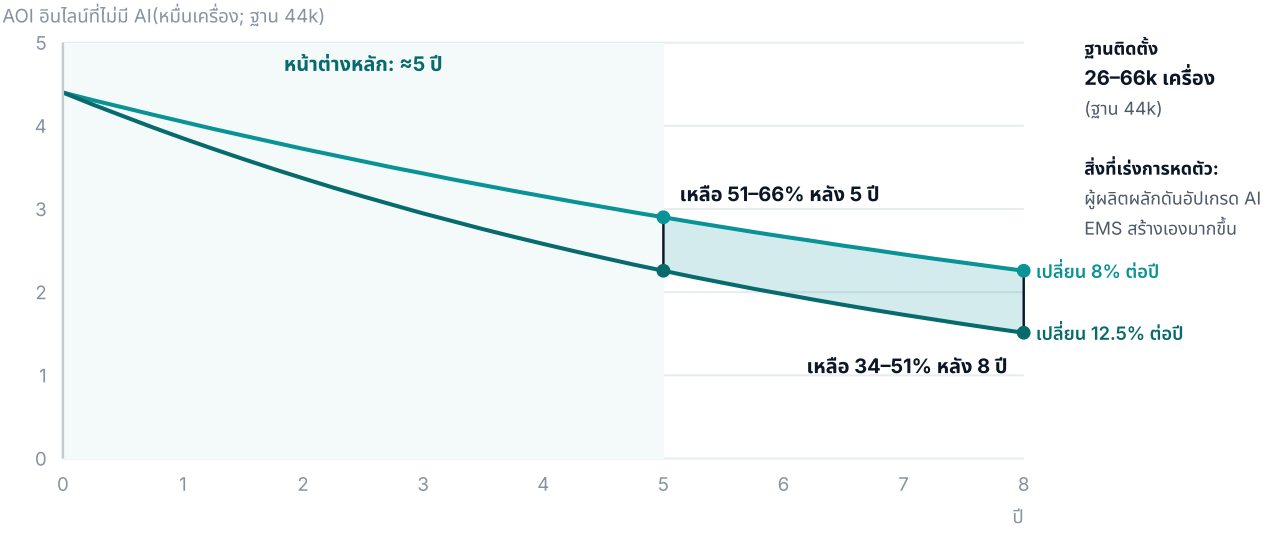
ทั้งหมดนี้เป็นการประมาณ ไม่มีการวัดส่วนแบ่งหรือราคาเป็นการสาธารณะ ช่องนี้มีค่าเพียง 0.3–2.3% ต่อปีของการพยากรณ์ของ IDC สำหรับการตรวจสอบคุณภาพอุตสาหกรรมด้วย AI ทั้งหมดของจีนในปี 2025 (ประมาณ 6.2 พันล้าน RMB) ผู้มาใหม่ที่ชนะ 2–5% ของสายที่ให้บริการได้พื้นฐานในสามปีจะมีประมาณ 320–800 สาย: รวม 6.4–16 ล้าน RMB ที่ 20,000 RMB ต่อสาย หรือประมาณ 2–5 ล้าน RMB ต่อปี หรือรายได้ประจำ 1.6–4 ล้าน RMB ต่อปีที่ 5,000 RMB ต่อสาย estimate เพียงพอสำหรับหน่วยธุรกิจภายในบริษัท ไม่ใช่บริษัทเดี่ยวระดับ venture แต่ละ 1,000 สายที่ติดตั้งในไต้หวัน เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หรือสหรัฐฯ มีค่าประมาณ 3–15 ล้าน RMB ครั้งเดียวที่ราคาจีนแผ่นดินใหญ่ ราคาสูงกว่าในไต้หวันและสหรัฐฯ แต่ผู้ซื้อที่นั่นใช้ 3D AOI ของ OEM พร้อมตัวเลือก AI บ่อยกว่า estimate

ช่วงเวลา retrofit ประมาณห้าปี

ไม่มีผู้ผลิต AOI ใดเผยแพร่อายุเครื่อง EMS คิดค่าเสื่อมอุปกรณ์ 3–10 ปี (DBG 2025 annual report) และ AOI รุ่นเก่าสูญเสียการอัปเดตซอฟต์แวร์และอะไหล่หลังสิ้นอายุการใช้งาน (I-Connect007) single source ฉันใช้ 8–12 ปี (ฐาน 10)

ที่ 1.0–1.65 AOI inline ต่อสาย จีนแผ่นดินใหญ่มี AOI inline ประมาณ 35,000–78,000 เครื่องในการใช้งาน (ฐานประมาณ 55,000) สอดคล้องกับยอดจัดส่งที่ทราบ (Circuits Assembly, Sinic-Tek 2025 annual report) ไม่มีแหล่งใดวัดว่ามีกี่เครื่องที่รันการตรวจสอบ AI สมมติว่าเครื่องในประเทศมีให้ตั้งแต่ประมาณปี 2023 และ 40–60% ของการส่งมอบล่าสุดใช้มัน **AOI inline ประมาณ 26,000–66,000 เครื่องในจีนแผ่นดินใหญ่ (ฐานประมาณ 44,000) ไม่ได้รัน AI** estimate หากเครื่องใหม่ทุกเครื่องมี AI มากับเครื่อง กลุ่มนี้จะหด 8–12.5% ต่อปี: เหลือ 51–66% หลังห้าปี และ 34–51% หลังแปดปี เร็วกว่าหากผู้ผลิต AOI ผลักการอัปเกรด AI ไปยังเครื่องใหม่กว่า **โอกาสส่วนใหญ่อยู่ในห้าปีข้างหน้าหรือราวๆ นั้น** โดยแกนกลางคือ EMS ขนาดกลางที่รัน 2D AOI ในประเทศรุ่นเก่า หลายยี่ห้อ และไม่มีเส้นทางอัปเกรด AI

FIG 24 **หน้าต่างปรับปรุงประมาณห้าปี*AOI อินไลน์ที่ไม่มี AI หด 8–12.5% ต่อปีเมื่อถูกเปลี่ยนหรืออัปเกรด***

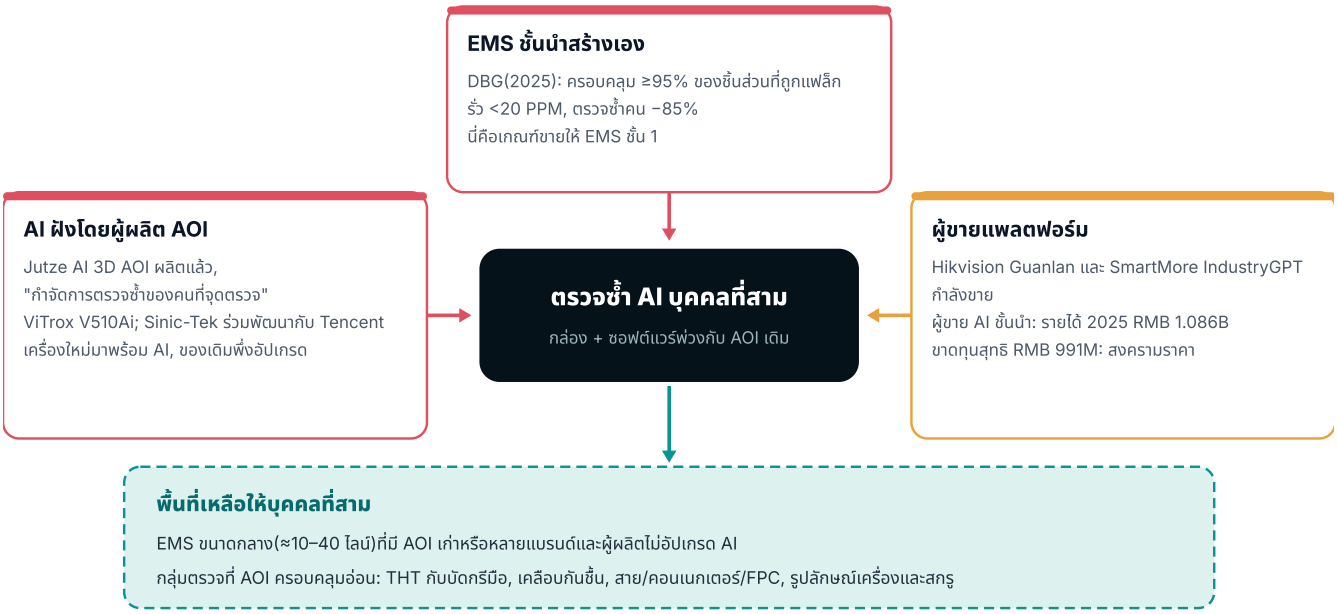


แหล่งที่มา: ค่าประมาณผู้เขียน; ฐานติดตั้งและส่วนแบ่งไม่ได้รับการยืนยันอิสระ

คู่แข่งแข็งแกร่งอยู่แล้ว: ช่องว่างของการตรวจสอบถูกปิดล้อม

ช่องว่างของการตรวจสอบ AI ถูกบีบจากสามทิศทาง ผู้นำ AOI และวิชันกำลังสร้าง AI ลงในแพลตฟอร์มใหม่: Jutze "ใช้อัลกอริทึม AI เต็มรูปแบบ" (Jutze investor relations, June 2026) รายได้ AI อุตสาหกรรมของ OPT เติบโต 96.77% ในปี 2025 (OPT 2025 annual report) single source, primary และ ViTrox อ้างความแม่นยำสูงสุด 95% สำหรับการตรวจสอบอัตโนมัติ (ViTrox) vendor claim ผู้ผลิตรายใหญ่สร้างเอง (iThome) และบริษัท AI ที่มีทุน venture ขายในวงกว้าง: ลูกค้า edge-sensor ของ SmartMore เพิ่มจาก 65 เป็น 251 ในสองปี (36Kr) single source Hikvision ขายโมเดล Guanlan สำหรับการตรวจสอบ (Xinhua) และการรวม "ตา สมอง และมือ" มีให้แล้วจาก SmartMore, Hikrobot และ Mech-Mind (36Kr, Securities Star)

FIG 25 ***ลิ่มตรวจซ้ำถูกล้อมสามด้าน พื้นที่ของบุคคลที่สามอยู่ใน EMS ขนาดกลางและกลุ่มตรวจที่ AOI ครอบคลุมอ่อน***



แหล่งที่มา: รายงานประจำปี Jutze, Sinic-Tek และ DBG; วัสดุสาธารณะ Hikvision และ SmartMore; รวบรวมโดยผู้เขียน

พื้นที่เหลือสำหรับผู้มาใหม่แคบ: EMS ขนาดกลางที่มี 2D/3D AOI รุ่นเก่าและไม่มีการอัปเกรด AI จากผู้ผลิต สายที่ผสม AOI หลายยี่ห้อ (ผู้ขาย retrofit รายหนึ่งรองรับ Omron, VI, Koh Young และ Mirtec แล้ว (Sohu on Hengtianyi)) ช่องที่ SMT AOI ครอบคลุมได้ไม่ดี เช่น ข้อต่อ through-hole และการบัดกรีด้วยมือ conformal coating สายเคเบิล คอนเนกเตอร์ และ FPC และลักษณะภายนอกขั้นสุดท้ายและสกรู และโรงงานเล็กที่จ่าย AOI ราคา 230–280k RMB ไม่ไหว

บริษัทจดทะเบียนที่เทียบเคียงได้ใกล้เคียงที่สุดให้คำเตือน Weiyi Zhizao ซึ่งขายอุปกรณ์ตรวจสอบ AI และหุ่นยนต์ เห็นรายได้ 3C ลดลง 79.9% เมื่อเทียบปีต่อปีในช่วงมกราคม–พฤษภาคม 2026 ยอมรับ "การแข่งขันที่รุนแรงและแรงกดดันด้านราคา" เลื่อนการจดทะเบียนฮ่องกงวันที่ 25 ตุลาคม 2026 และเปิดเผยโครงการ 15 โครงการที่ถูกยุติก่อนเสร็จ โดย 12 โครงการเป็นโครงการหุ่นยนต์ embodied (Weiyi Zhizao prospectus, postponement notice) single source, primary AInnovation สิ้นปี 2025 ด้วยการตั้งสำรองลูกหนี้ 29.8% (AInnovation 2025 annual report) ช่องตรวจสอบ 3C หนาแน่น และอำนาจต่อรองราคาต่อสายอ่อนแอ

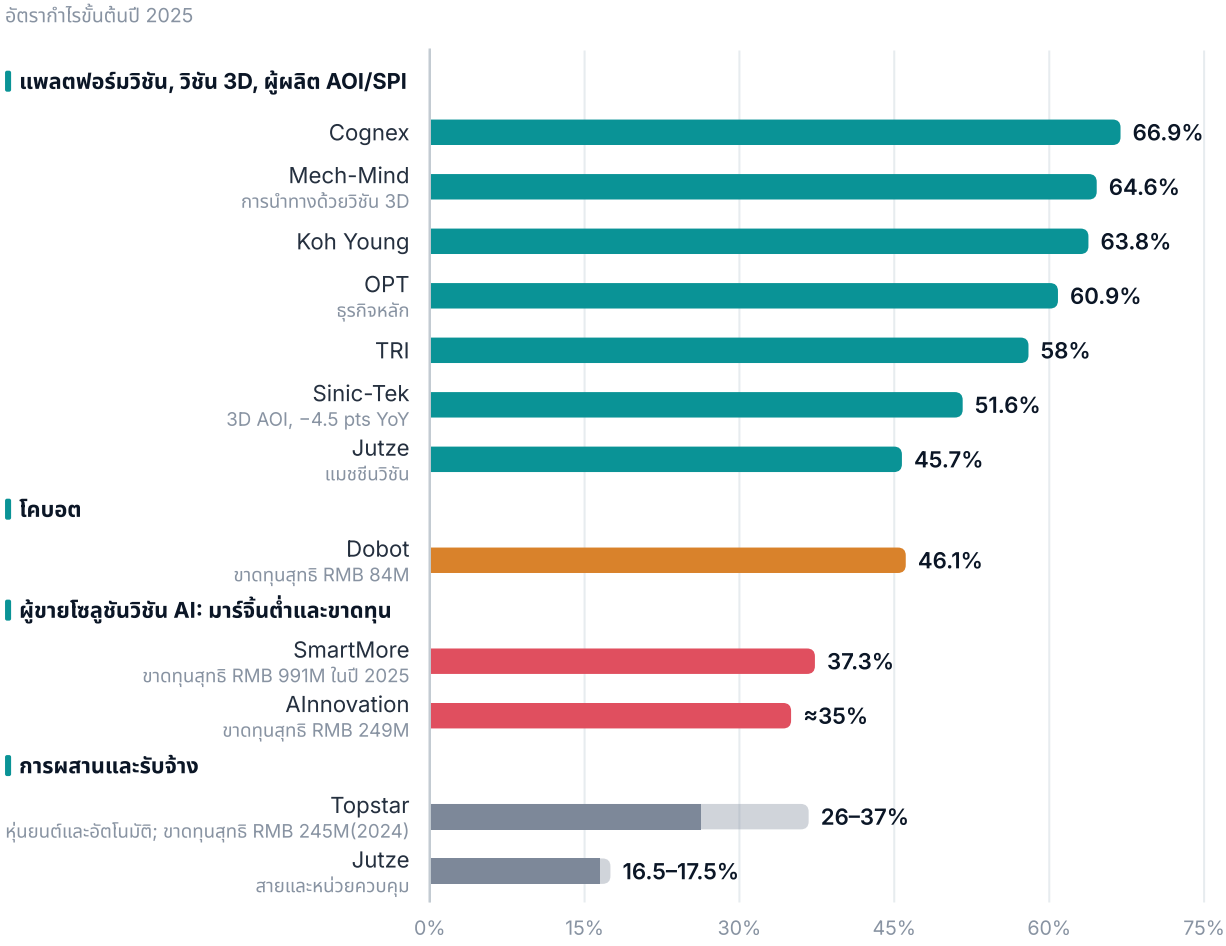
กำไรอยู่ที่ฮาร์ดแวร์ที่ถูกทำให้เป็นผลิตภัณฑ์

ตำแหน่งในห่วงโซ่	บริษัทตัวแทนและอัตรากำไรขั้นต้นปี 2025	กำไรและการเก็บเงิน
แพลตฟอร์มวิชัน	Cognex 66.9%	มีกำไร กำลังขายรายได้มาร์จิ้นต่ำ ≈$22M
อุปกรณ์ AOI/SPI	Koh Young 63.8%; TRI 58%; OPT ธุรกิจหลัก 60.85%; Sinic-Tek 3D AOI 51.62% (−4.53 จุด YoY); Jutze แมชชีนวิชัน 45.74%	มีกำไร จำนวนวันลูกหนี้ 139 (Jutze) ถึง 247–274 (OPT)
การนำทางด้วยวิชัน 3D	Mech-Mind 64.6%	—

ตำแหน่งในห่วงโซ่	บริษัทตัวแทนและอัตรากำไรขั้นต้นปี 2025	กำไรและการเก็บเงิน
ผู้ขายโซลูชันวิชัน AI	SmartMore 37.3%; AInnovation ≈35%	ขาดทุน: SmartMore ขาดทุนสุทธิ 991M RMB ในปี 2025, AInnovation 249M RMB
หุ่นยนต์ร่วม	Dobot 46.1%	Dobot ขาดทุนสุทธิ 84M RMB รายได้ UR จาก $326M (2022) เป็น ≈$232M (2025, พยากรณ์)
การบูรณาการระบบ	Topstar robotics and automation 26.2–36.7%	ขาดทุนสุทธิ 245M RMB (2024) จำนวนวันลูกหนี้ 180–240
ฮาร์ดแวร์ตามสัญญา	Jutze สายเคเบิลและหน่วยควบคุม 16.5–17.5%	—

แหล่งที่มา: (Cognex, StockAnalysis on Koh Young, Fugle on TRI, OPT 2025 annual report, Sinic-Tek 2025 annual report, Jutze 2025 annual report, Jiemian on Mech-Mind, 36Kr on SmartMore, Yicai on SmartMore, TMTPost, DoNews on AInnovation, The Paper on Dobot, The Robot Report on UR, Jiemian on Topstar)

FIG 26 ***มาร์จิ้นอยู่ในฮาร์ดแวร์ที่ทำเป็นผลิตภัณฑ์แพลตฟอร์มวิชันและผู้ผลิตอุปกรณ์ได้กำไรขั้นต้น 46–67%; ผู้ขายโซลูชัน AI 35–37% และขาดทุน***



แหล่งที่มา: รายงานประจำปีหรือเอกสารเสนอขาย 2025

ผู้มาใหม่รักษามาร์จิ้นได้เฉพาะเมื่อเปลี่ยนการตรวจสอบเป็นผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์ หรือซอฟต์แวร์ การปรับจูนทีละโครงการผลักมาร์จิ้นลงเหลือประมาณ 35% พร้อมการขาดทุนต่อเนื่อง กลไกก็ไม่เป็นผลดีกับบริษัทเล็ก: รายได้ถูกรับรู้เฉพาะหลังการยอมรับหน้างาน เงินล่วงหน้าน้อย (Jutze, OPT) โครงการนำร่องมักฟรี (A3/Mindtrace) และเจ้าของแบรนด์มักกำหนดอุปกรณ์ตรวจสอบบนสายของโรงงานรับจ้างผลิตของตน

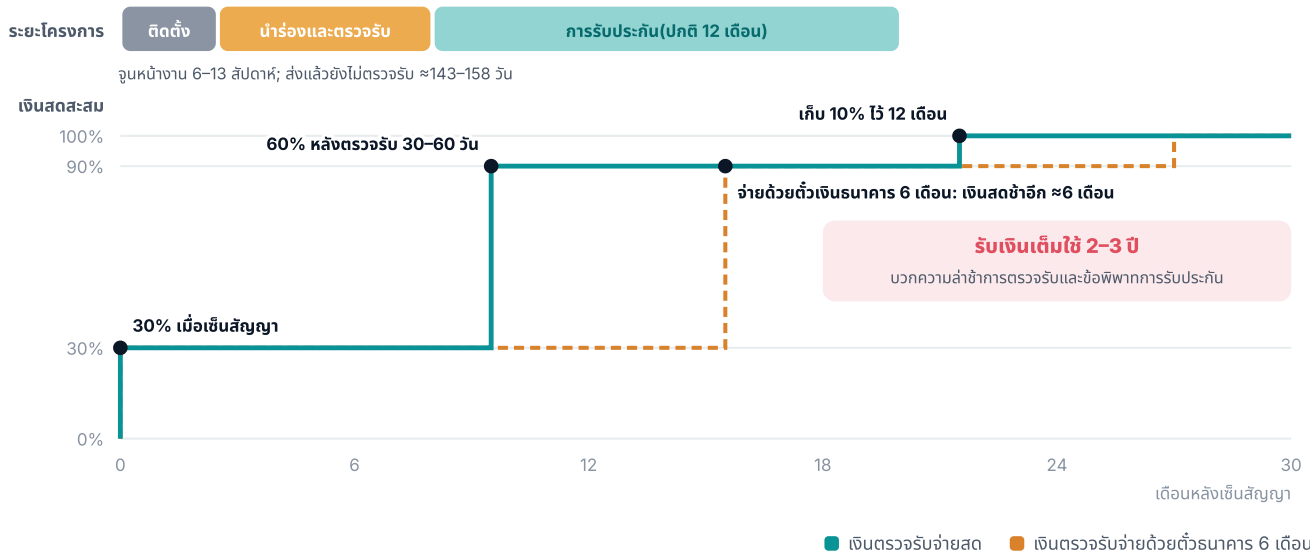
วิธีที่ผู้ซื้อจ่าย: 30% ตอนเซ็น 60% หลังการยอมรับ 10% เก็บไว้หนึ่งปี

เงื่อนไขการชำระเงินที่โรงงานอิเล็กทรอนิกส์จีนแผ่นดินใหญ่ใช้กับอุปกรณ์ตรวจสอบระบุไว้ในสัญญาผู้ซื้อที่ระบุชื่อ 13 ฉบับที่เปิดเผยในคำตอบการสอบถามการจดทะเบียนของ Sinic-Tek (Sinic-Tek inquiry reply 8-1-1) single source: one primary filing, several independent buyers, 2020–2022 :

ผู้ซื้อ (ปี)	ตอนเซ็น	การส่งมอบ	การยอมรับ	เงินเก็บหรือยอดคงเหลือ
หน่วย Hikvision (2021)	30% ภายใน 15 วัน	—	65% ภายใน 30 วันหลังการยอมรับขั้นสุดท้าย	เงินเก็บประกัน 5% จ่าย 12 เดือนหลังการยอมรับ ส่วนหนึ่งจ่ายเป็นตั๋วรับรองธนาคาร 6 เดือนขึ้นไป
Nanchang Huaqin (2020–2021)	30% ภายใน 10 วันทำการ	—	60% ที่ 60 วันหลังการยอมรับ	10% หลังประกันหนึ่งปี
Guangdong Yinuo (2021, 3D AOI)	30% ภายใน 10 วันทำการ	—	60% ภายใน 30 วัน	10% หลังรันสามเดือนไร้ข้อผิดพลาด
Xiamen Hongxin, Jingmen Hongyi (2022)	30% ภายใน 10 วันทำการ	—	60% ภายใน 30 วันทำการหลังการยอมรับขั้นสุดท้าย ตั๋วธนาคาร 6 เดือน	10% หลังประกันหนึ่งปี
AKM Panyu, Suzhou (2021–2022)	30% ภายใน 7–10 วันทำการ	—	60% หนึ่งเดือนหลังการยอมรับและออกใบกำกับ ตั๋วธนาคาร 180 วัน	10% หลัง 360 วัน
BYD Precision, Shenzhen, Huizhou (2020)	—	30% เมื่อถึง	70% หลังการยอมรับและออกใบกำกับ	ทั้งหมดเป็นตั๋วพาณิชย์ 6 เดือน
Shenzhen H&T (2020)	—	—	90% หลังการยอมรับและออกใบกำกับ	10% หลังใช้หกเดือนไร้ข้อผิดพลาด

เอกสารปฐมภูมิอื่นแสดงโครงสร้างเดียวกัน: โครงการใหญ่ของ Mech-Mind จ่าย 30% ตอนเซ็น 30% ก่อนส่งมอบ 30% หลังการยอมรับ และเงินเก็บประกัน 10% ใน 12–15 เดือน (Mech-Mind prospectus) GKG กล่าวว่าเงินเก็บในอุตสาหกรรมอุปกรณ์ปกติ 5–10% ของสัญญา จ่ายหนึ่งปีหลังการยอมรับ (GKG inquiry reply) single sources, primary ดังนั้นบรรทัดฐานคือประมาณ 30% ตอนเซ็น (20–30% เป็นศูนย์ที่บางโรงงานเช่น BYD) 60–65% หลังการยอมรับ (จ่าย 30–60 วันต่อมา มักเป็นตั๋วธนาคารหรือพาณิชย์ 6 เดือน ซึ่งเลื่อนเงินสดที่ใช้ได้ออกไปอีกครึ่งปี) และเงินเก็บ 5–10% เป็นเวลา 3–12 เดือน (12 พบบ่อยที่สุด) verified across several contracts

FIG 27 ***ผู้ซื้อจ่ายอย่างไร30% เมื่อเซ็น, 60% หลังตรวจรับ, 10% เก็บหนึ่งปี: รับเต็มใช้ 2–3 ปี***



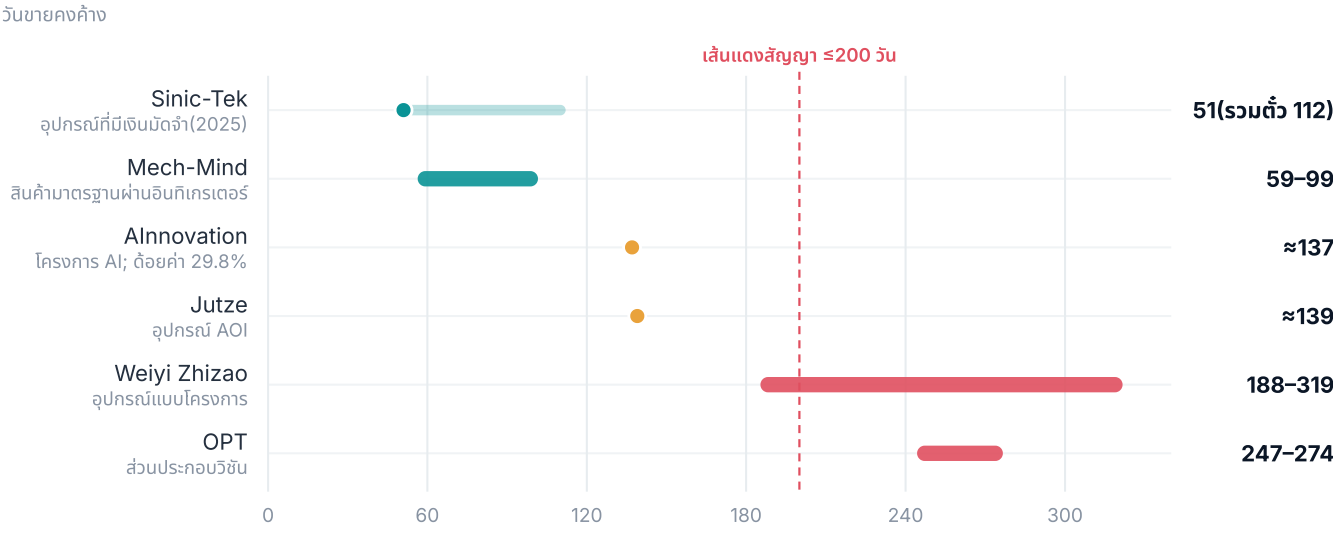
แหล่งที่มา: คำตอบสอบถาม Sinic-Tek, Mech-Mind, GKG, JT และอื่นๆ; แผนผังเงื่อนไขทั่วไป เวลาประมาณ

การยอมรับและการทดลองช้าและเป็นค่าใช้จ่ายของผู้ขาย สินค้าที่จัดส่งแล้วแต่ยังไม่ถูกรับของ Sinic-Tek หมุนประมาณ 143–158 วัน เพราะลูกค้า EMS และแบรนด์ใหญ่ต้องการการทดสอบบูรณาการทั้งสายและการทดลองขยายเวลา (Sinic-Tek inquiry reply 8-1-2) โครงการ AI ของ Weiyi ใช้ 4–8 เดือนจากการประเมินถึงการติดตั้ง (Weiyi Zhizao prospectus) single sources, primary ไม่มีข้อมูลการแปลงสำหรับโครงการนำร่องตรวจสอบ AI Sinic-Tek แปลงเครื่องสาธิตเป็นยอดขายโดยตรงเพียงประมาณ 18–19% ฉันวางแผนหนึ่งในสามถึงหนึ่งในห้าสำหรับโครงการนำร่องฟรี และประมาณ 80% สำหรับโครงการนำร่องที่จ่ายเงินหลังคัดกรอง estimate

บริษัท	โมเดลธุรกิจ	Days sales outstanding
Sinic-Tek (2025)	อุปกรณ์พร้อมเงินมัดจำ	≈51 (≈112 รวมตั๋ว)
Mech-Mind	ผลิตภัณฑ์มาตรฐานผ่านผู้ติดตั้ง	59–99
Jutze	อุปกรณ์ AOI	≈139
AInnovation (2025)	โครงการ AI	≈137 ณ สิ้นปี พร้อมการด้อยค่า 29.8%
Weiyi Zhizao	อุปกรณ์แบบโครงการ	188–319
OPT	ชิ้นส่วนวิชัน	247–274

แหล่งที่มา: รายงานประจำปีและเอกสารเสนอขายหลักทรัพย์ข้างต้น ลูกหนี้ (รวมสินทรัพย์สัญญา) ÷ รายได้ × 365 primary + estimate

FIG 28 ***วันขายคงค้างสินค้ามาตรฐาน 51–99 วัน; อุปกรณ์แบบโครงการ 188–319 วัน***



แหล่งที่มา: เอกสารบริษัท; ลูกหนี้(รวมสินทรัพย์สัญญา) ÷ รายได้ × 365

ไลเซนส์ตรวจสอบ AI ที่ขายผ่านผู้ผลิต AOI หรือผู้ติดตั้งควรเก็บเงินเหมือน Mech-Mind ที่ 60–100 วัน การขายโครงการโดยตรงเหมือน Weiyi ที่ 190–320 วัน เมื่อรวมเป็นไทม์ไลน์เงินสด: โครงการนำร่องฟรีหนึ่งถึงสามเดือน การผ่านคุณสมบัติที่ ODM ขนาดใหญ่สูงสุดประมาณสิบสองเดือน การสร้าง การส่งมอบ และการยอมรับสามถึงเจ็ดเดือน 30% มาถึงตอนสั่งซื้อ 60% ประมาณสี่ถึงเก้าเดือนหลังจากนั้น และ 10% สุดท้ายประมาณ 16–21 เดือนหลังจากนั้น **จากโครงการนำร่องแรกที่ EMS ขนาดใหญ่จนถึงการชำระเต็มจำนวนอาจใช้เวลาสองถึงสามปี** EMS ขนาดกลางที่ไม่มีการประมูลอย่างเป็นทางการสามารถลดเวลาผ่านคุณสมบัติเหลือไม่กี่สัปดาห์ estimate เกณฑ์การยอมรับในสัญญาที่เปิดเผยครอบคลุมเฉพาะการบูรณาการทั้งสาย throughput (โครงการไต้หวันรายหนึ่งกำหนด 100 หน่วยต่อชั่วโมง) และการรันไร้ข้อผิดพลาดหลายเดือน ไม่มีฉบับใดระบุอัตราการเล็ดรอดหรือสัญญาณเตือนผิดพลาด (Anda inquiry reply) single source, primary เกณฑ์การยอมรับเป็นลายลักษณ์อักษรสำหรับการตรวจสอบ AI ต้องตกลงกันก่อนโครงการนำร่อง

รูปแบบความล้มเหลวสี่แบบ

ความล้มเหลวที่บันทึกไว้แบ่งเป็นสี่รูปแบบ: จัดส่งก่อนผลิตภัณฑ์น่าเชื่อถือ (Rethink (The Robot Report)) ชั้นซอฟต์แวร์บนฮาร์ดแวร์ของผู้นำที่ระบบนิเวศของผู้นำแทนที่ในภายหลัง (READY Robotics (The Robot Report)) เงินหมดที่ก้นวัฏจักร (Dextrous Robotics (Robots & Startups)) และบริษัทโมเดลจบด้วยการถูกซื้อตัว (Covariant (GeekWire)) บทเรียน: ทำให้เป็นผลิตภัณฑ์แบบแคบแทนการ

ปรับจูนทีละโครงการ เก็บเงินทุนหมุนเวียนสำหรับรายได้แบบรอการยอมรับและการเก็บเงินยาว ให้บริการในพื้นที่สำหรับโรงงานที่รัน 24 ชั่วโมง และอย่าขยายก่อนผลิตภัณฑ์พิสูจน์แล้ว

จังหวะเวลา: การตรวจสอบไม่ได้อะไรจากการรอ ฮาร์ดแวร์แขนถูกลง

ข้อโต้แย้งสำหรับการรออ่อนแอ ฮาร์ดแวร์ไม่ถูกลงในปี 2026: ผู้ผลิตหุ่นยนต์ขึ้นราคา 5–15% บางผลิตภัณฑ์ 25–50% (Sina Finance) single source และชุด NVIDIA ขึ้นเป็นครั้งที่สาม (36Kr) VLA ระดับการผลิตจะไม่มาในกรอบเวลานี้ (IFR, Instrumental) ขณะเดียวกันการเปลี่ยน AOI ทุกครั้งถอดเป้าหมาย retrofit ออกหนึ่งรายการ และการติดตั้ง AI ของ OEM ทุกครั้งล็อกข้อมูลและกระบวนการของสาย ความสามารถของโมเดลกำลังเป็นสินค้าโภคภัณฑ์ สิ่งที่หายากคือการเข้าถึงโรงงานและข้อมูลโรงงานที่ติดป้ายแล้ว การสนับสนุนในพื้นที่ก็มีกรอบเวลา: กฎ “AI pioneer city” ปี 2026 ของเซินเจิ้น พร้อมสูงสุด 2 ล้าน RMB สำหรับโครงการสาธิตการประยุกต์ AI และบัตรกำนัลโมเดลครอบคลุม 30% ของการซื้อ มีผลถึง **30 มิถุนายน 2027** (Yicai, May 2026) terms single source

สิ่งที่ยังถูกลงเร็วคือหุ่นยนต์มนุษย์และมือคล่องแคล่ว (มือลดจากประมาณ 50,000 RMB เหลือต่ำกว่า 10,000 ในสองปี (Sina Finance)) และ cobot ระดับเริ่มต้นเมื่อส่วนผสมผลิตภัณฑ์เลื่อนลง นั่นเป็นเหตุผลให้เลื่อนส่วน embodied ไม่ใช่ส่วนการตรวจสอบ **โดยรวม: การตรวจสอบตอนนี้ ในฐานะผลิตภัณฑ์ที่แคบ เซลล์หุ่นยนต์ตอนนี้ ผ่านพันธมิตรและการบูรณาการ embodied AI ทีหลัง โดยมีเพียงสถานี R&D วันนี้**

embodied AI

06 embodied AI: แรกสุดมันเปลี่ยนวิธีสอนหุ่นยนต์ ภายหลังเปลี่ยนวิธีที่มันเคลื่อนไหว

สิ่งที่เปลี่ยนคือการรับรู้และการเขียนโปรแกรม การเคลื่อนไหวคงเป็นแบบ deterministic

ผู้นำแขนหุ่นยนต์ทุกรายทำการตลาด “physical AI” แต่สิ่งที่จัดส่งจริงแบ่งเป็นสามชั้น: การรับรู้แบบเรียนรู้โดยไม่ต้องสอน (AI Masterless Vision ของ FANUC จัดส่งมกราคม 2027 (FANUC) การเลือกการจับแบบนิวรัลของ KUKA (KUKA)) โมเดลขนาดใหญ่ที่เขียนโปรแกรมและวางแผนภารกิจ (iiQWorks.Copilot ของ KUKA ซึ่งเตือนว่าโค้ดที่ AI สร้างควรตรวจสอบใน digital twin (KUKA) Yaskawa กับ Gemini Robotics-ER ซึ่ง “generative AI ตัดสินว่าต้องทำอะไร” และหุ่นยนต์ตัดสิน “เคลื่อนไหวอย่างไร” (Yaskawa)) และแพลตฟอร์มคอมพิวเตอร์และข้อมูล (AI Accelerator ของ UR พร้อม Jetson Orin (Universal Robots)) vendor claims ไม่มีผู้นำรายใดเผยแพร่อัตราความสำเร็จการผลิตของฟีเจอร์ AI ของตน และผู้นำญี่ปุ่นจับมือกับ Google, SoftBank, Microsoft และอื่นๆ แทนการสร้าง VLA แบบ frontier เอง (FANUC news index): ชั้นนโยบายแบบเรียนรู้จะมาจากบริษัทโมเดล แขนและตัวควบคุมที่ผ่านการรับรองมาจากผู้ผลิตแขน

FIG 29 **สแต็ก AI เอ็มบอดีด *โมเดลใหญ่วางแผนออฟไลน์, นโยบายเล็กวิ่งในเซลล์, การเคลื่อนไหวและความปลอดภัยคงดีเทอร์มินิสติก***

ชั้น	ทำอะไร และหลักฐานไปถึงไหน	สเกลเวลา · ใครถือ
การวางแผน L4	**โมเดลฟรอนเทียร์(ออฟไลน์)** เขียน/แก้โปรแกรมหุ่นยนต์ออฟไลน์, เปลี่ยนรุ่น, อธิบายความผิดปกติ เขียนโปรแกรม ABB RAPID ใหม่ที่ 77–99.7%, แจกจ่ายหลังตรวจในซิม ลูปควบคุมเพียง 0.2–0.4 Hz: ไม่อยู่ในเรียลไทม์	**วินาทีถึงนาที** ยักษ์โมเดล
สกิล / นโยบาย L3	**ACT, นโยบาย diffusion, VLA ขนาดเล็ก** สถานีมีโครงสร้างพร้อมจิ๊ก 90–99.4% ชิปเอดจ์: Jetson Thor, D-Robotics RDK, Ascend, Rockchip	**ซังก์การกระทำ 100–300 ms** ผู้ขายชิป · ผู้ผลิตหุ่นยนต์
ควบคุมการเคลื่อนไหว L2	**คอนโทรลเลอร์หุ่นยนต์** วิถี, เซอร์โว, ควบคุมแรง, ตรวจจับชน โค้ดดีเทอร์มินิสติก; นโยบายเรียนรู้แค่ตั้งเป้า	**ระดับมิลลิวินาที(เรียลไทม์ต้อง >83 Hz)** ผู้ผลิตหุ่นยนต์
ความปลอดภัย L1	**PLC นิรภัย, สแกนเนอร์, จำกัดแรงและความเร็ว** รับรองตาม ISO 10218-1/-2:2025 และกฎท้องถิ่น ไม่มี ML ในฟังก์ชันความปลอดภัย: EU ทบทวนโดย notified body ตั้งแต่วันที่ 20 ม.ค. 2027	**ฮาร์ดเรียลไทม์** หุ่นยนต์รับรอง + อินทิเกรเตอร์

โอกาสของธุรกิจเล็กอยู่ที่การผสานและฮาร์ดแวร์เซนซิ่ง: ใส่การรับรู้แบบเรียนรู้และนโยบายเล็กเข้าเซลล์หุ่นยนต์ที่รับรองแล้ว ทีละสถานี

แหล่งที่มา: การสังเคราะห์ผู้เขียน(บทที่ 3 และ 6); ISO 10218:2025; กฎเครื่องจักร EU

ห่างจากงานไร้โครงสร้าง ยืดหยุ่น และแบตช์เล็กแค่ไหน: สถานีแบบมีโครงสร้างใน 1–3 ปี การประกอบยืดหยุ่น 5 ปีขึ้นไป

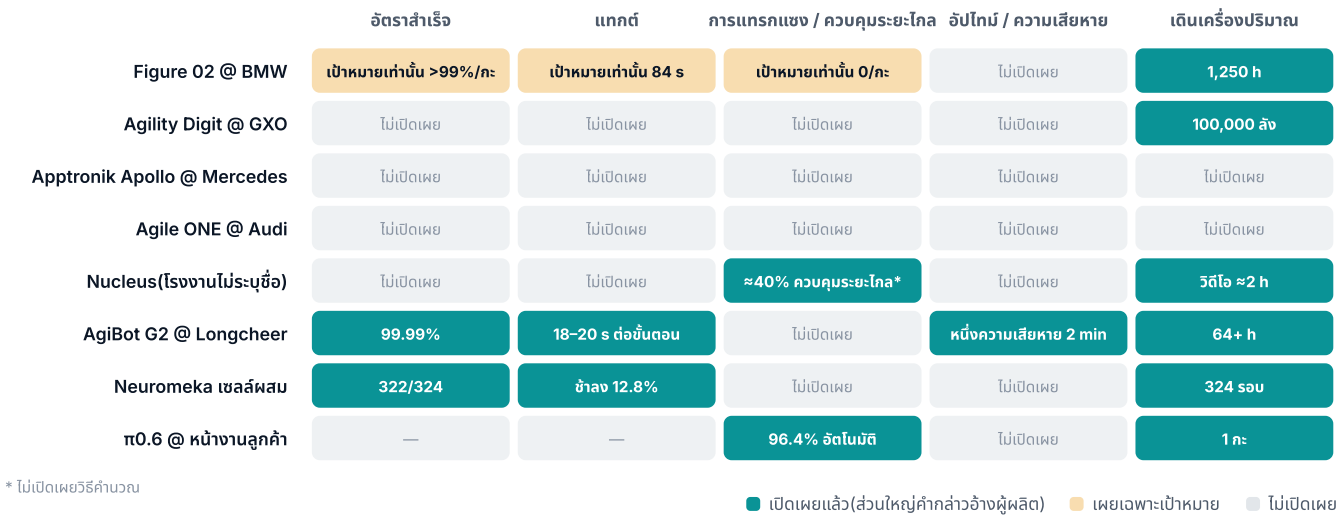
ตัวเลขโรงงานจริงเริ่มปรากฏ แต่รายงานโดยผู้ขาย แคบ และมาจากสถานีแบบมีโครงสร้าง หุ่นยนต์มนุษย์แปดตัวของ AgiBot บนสายทดสอบขั้นสุดท้ายของแท็บเล็ต Longcheer บันทึก 64,828 ภารกิจที่ 99.99% ในกว่า 64 ชั่วโมง (AgiBot, Yicai Global) vendor and customer แต่นี่คืองานดูแลที่แขนทั่วไปพร้อมวิชันทำได้ UBTech กล่าวว่า Walker S2 ทำงานที่ 30–50% ของประสิทธิภาพมนุษย์ (Irish Times/FT) single source 11 เดือนของ Figure 02 ที่ BMW Spartanburg ผลิตตัวเลขปริมาณ (1,250+ ชั่วโมง, 90,000+ ชิ้นส่วน) ขณะที่ตัวเลข cycle ความสำเร็จ และการแทรกแซงเป็นเป้าหมาย ไม่ใช่ผลลัพธ์ (Figure, BMW Group) verified, numerators only Nucleus กล่าวว่าประมาณ 40% ของวิดีโอโรงงานของมันเป็น teleoperated (Interesting Engineering) vendor claim และการสืบสวนของ Reuters อ้าง

ประมาณ 20% ของผลผลิตคนงานสำหรับหุ่นยนต์มนุษย์จีนบางรุ่น (Notebookcheck) single source ไม่มีการติดตั้งใดเผยแพร่อัตราความสำเร็จ รอบเวลา และอัตราการแทรกแซงพร้อมกัน และไม่มีรายใดถูกตรวจสอบ แต่สามสิ่งนี้คือสิ่งที่การคำนวณการคืนทุนต้องการพอดี

การติดตั้ง	อัตราความสำเร็จ	Takt	การแทรกแซงหรือ teleoperation	Uptime หรือช่วงความล้มเหลว	การรันปริมาณ
Figure 02 @ BMW Spartanburg	เป้าหมายเท่านั้น (>99% ต่อกะ)	เป้าหมายเท่านั้น (84 วินาที)	เป้าหมายเท่านั้น (0 ต่อกะ)	ไม่เปิดเผย (ปลายแขนคือจุดล้มเหลวหลัก)	1,250 ชม.
Agility Digit @ GXO	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย	100,000 tote
Apptronik Apollo @ Mercedes-Benz	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย
Agile ONE @ Audi	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย
Nucleus (โรงงานไม่ระบุชื่อ)	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย	≈40% teleoperated (วิธีไม่เปิดเผย)	ไม่เปิดเผย	วิดีโอ ≈2 ชม.
AgiBot G2 @ Longcheer	99.99% ของ 64,828 ภารกิจ	18–20 วินาทีต่อขั้น	ไม่เปิดเผย	ความผิดพลาดสื่อสารหนึ่งครั้ง กู้คืน ≈2 นาที	64+ ชม.
เซลล์ไฮบริด Neuromeka	322/324	ช้ากว่าคน 12.8%	ไม่เปิดเผย	ไม่เปิดเผย	324 รอบ
Physical Intelligence π0.6 ที่หน้างานลูกค้า	—	—	อัตโนมัติ 96.4% ตลอดกะ	ไม่เปิดเผย	หนึ่งกะ

แหล่งที่มา: บทนี้และบทที่ 3 mostly vendor claims

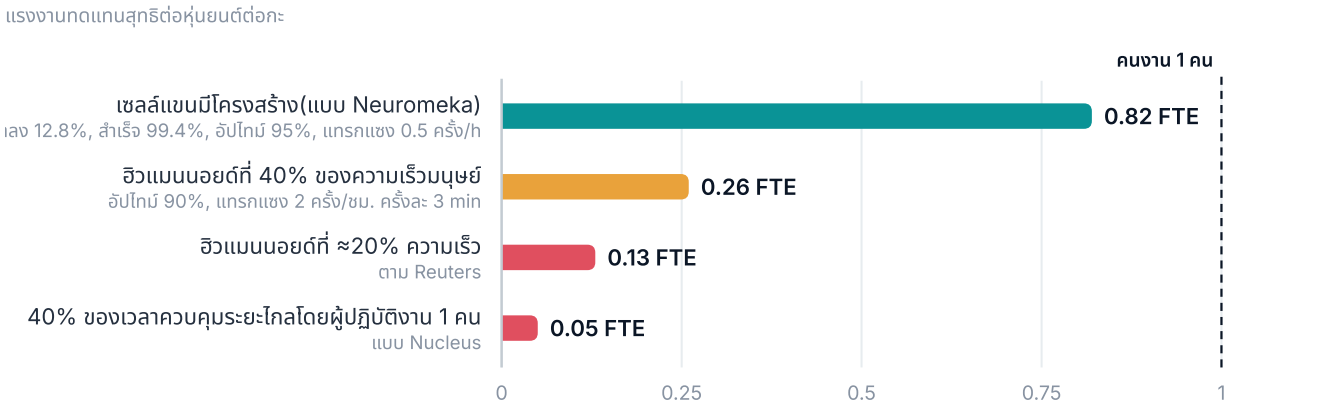
FIG 30 ***สิ่งที่การติดตั้งหุ่นยนต์ในโรงงานเปิดเผยจริง ส่วนใหญ่เปิดเผยแค่จำนวน; ไม่มีใครเปิดเผยอัตราสำเร็จ แทกต์ และอัตราแทรกแซงพร้อมกัน***



แหล่งที่มา: วัสดุสาธารณะจาก BMW, Figure, Agility, Mercedes-Benz, Audi, AgiBot, Neuromeka, Physical Intelligence และอื่นๆ

Teleoperation สำคัญต่อเศรษฐศาสตร์มากกว่าอัตราความสำเร็จ คนสุทธิที่ถูกแทนต่อหุ่นยนต์ต่อกะ ≈ (รอบมนุษย์ ÷ รอบหุ่นยนต์) × uptime × ความสำเร็จ ลบเวลาการแทรกแซงและ teleoperation estimate, my formula สถานีแบบมีโครงสร้างแบบ Neuromeka (ช้ากว่า 12.8%, ความสำเร็จ 99.4%, uptime 95%, การแทรกแซง 0.5 ครั้งครั้งละ 2 นาทีต่อชั่วโมง) แทนคนประมาณ 0.82 คน หุ่นยนต์มนุษย์ที่ 40% ของความเร็วมนุษย์ uptime 90% และการแทรกแซง 3 นาทีสองครั้งต่อชั่วโมงประมาณ 0.26 ที่ 20% ของ Reuters ประมาณ 0.13 และหากผู้ควบคุมหนึ่งคน teleoperate 40% ของเวลาแบบ Nucleus ประมาณ 0.05 แทบไม่มีอะไร ที่ประมาณ 600k RMB ต่อหุ่นยนต์มนุษย์และ 85k RMB ต่อคนต่อปีในจีนแผ่นดินใหญ่ สามรายหลังคืนทุนข้ามทศวรรษ เฉพาะสถานีแขนแบบมีโครงสร้างเท่านั้นที่มีการคืนทุนสมจริง (บทที่ 4) estimate

FIG 31 ***แรงงานทดแทนสุทธิต่อหุ่นยนต์เซลล์แขนมีโครงสร้างทดแทน ≈0.82 คน; ฮิวแมนนอยด์ที่ควบคุมระยะไกล 40% ของเวลา ≈0.05***



แหล่งที่มา: ค่าประมาณตามสูตรผู้เขียน

ห่างจากสถานีแบบมีโครงสร้าง โมเดลทั่วไปยังได้ 40–90% ในภารกิจใหม่: Gemini Robotics 2 ได้ 74.2% ใน pick-and-place แบบแล็บ 78.9% ใน tool kitting และ 44% ในการผูกถุง (eesel/DeepMind) บน RoboChallenge Table30 ซึ่งเป็นภารกิจหุ่นยนต์จริง 30 ภารกิจ π0.5 ได้ 43.7% และโมเดลเปิดที่ดีที่สุด 50.3% (RoboChallenge, QbitAI)

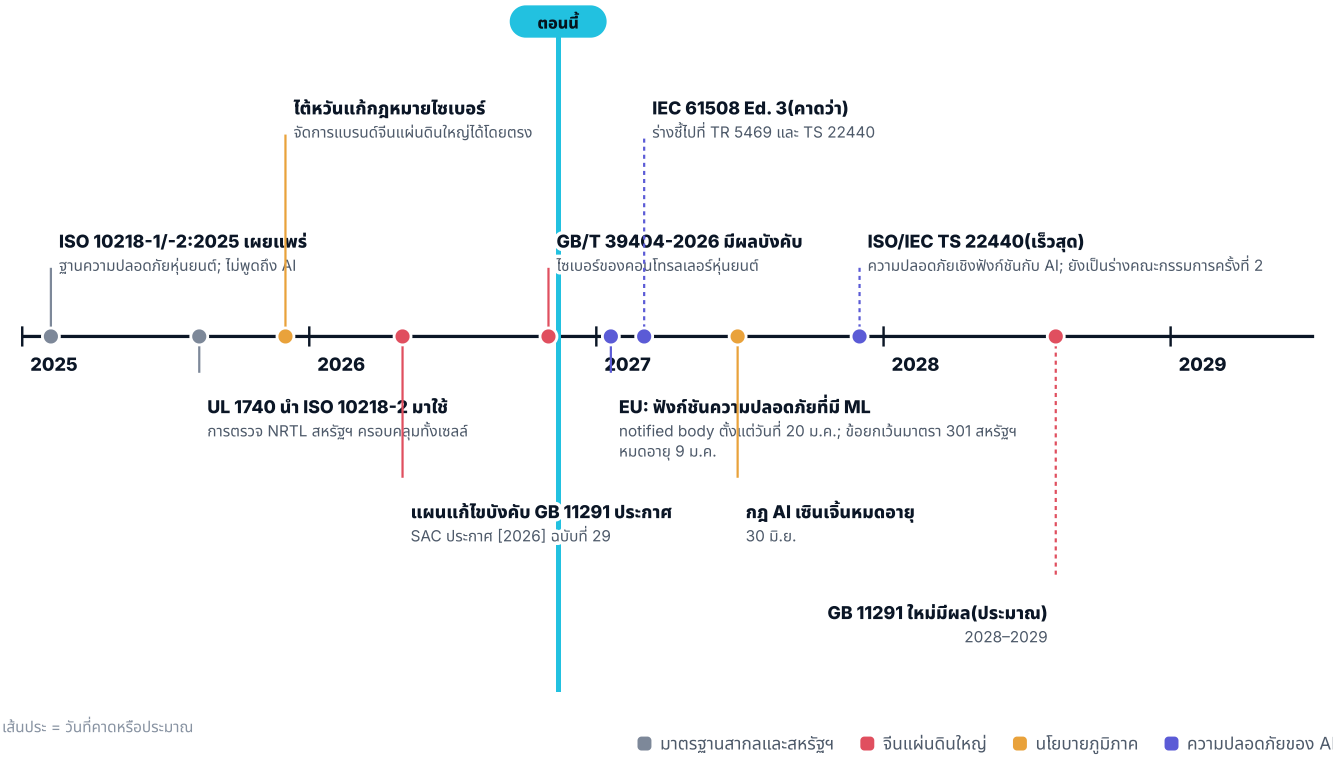
การพยากรณ์ภายนอกต่างกัน แต่ไม่มีรายใดสนับสนุนการใช้อย่างแพร่หลายในสองปี IFR กล่าวว่า physical AI ทั่วไป “ยังไม่อยู่ในระดับอุตสาหกรรม” และหุ่นยนต์มนุษย์ส่วนใหญ่ “ยังเป็นต้นแบบหรือโครงการนำร่อง” (IFR) Interact Analysis ประมาณว่ามีเพียงประมาณ 10% ของหุ่นยนต์มนุษย์ที่ผลิตในปี 2025 เข้าสู่การใช้งานจริง โดยจุดเปลี่ยนเชิงพาณิชย์ “หลังปี 2032” (automation.com) UBS เห็นว่า “EV moment” ของหุ่นยนต์มนุษย์ไม่น่าเป็นไปได้ก่อนปี 2030 (Yicai Global) ผู้รู้ในจีนประมาณอีกสองถึงสามปีก่อนการใช้งานระดับโรงงาน (Gasgoo) single sources การตัดสินของฉัน estimate : ในโรงงานอิเล็กทรอนิกส์และยานยนต์ที่มีทรัพยากรพร้อมและผู้ขายหน้างาน **งานสถานีแบบมีโครงสร้าง** (การดูแล การคัดแยก OK/NG การเสียบแบบยึดจับ) จะถึง ≥99% ที่ความเร็วใกล้เคียงมนุษย์ในประมาณ 1–3 ปี **kitting ชิ้นส่วนผสม** ด้วย VLA ทั่วไปในประมาณ 3–5 **สายรัดสายไฟแบบเดินสายอิสระและการประกอบยืดหยุ่นหลายขั้น** มากกว่า 5 ปี การคืนทุนของหุ่นยนต์มนุษย์ไม่ทำงานในวันนี้: Walker S2 ที่ประมาณ 600k RMB (10jqka) single source ที่ 30–50% ของประสิทธิภาพมนุษย์สองกะ เท่ากับคนงานประมาณ 0.6–1.0 คน การคืนทุนอย่างง่าย 7–12 ปีที่ต้นทุนแรงงานจีนแผ่นดินใหญ่ก่อนการบูรณาการ การบำรุงรักษา และ downtime estimate

จุดที่มันติดขัด

จุดเชื่อม	หลักฐานในปี 2026
ข้อมูล	อุตสาหกรรมประมาณว่าต้องการข้อมูลจริงคุณภาพสูงอย่างน้อย 10 ล้านชั่วโมง และเก็บได้เพียงประมาณ 500,000 ชั่วโมงเมื่อต้นปี 2026 (Gasgoo) Reuters รายงานประมาณ 500,000 ชั่วโมง เทียบกับประมาณ 100 ล้านชั่วโมงที่ต้องการ (Notebookcheck) teleoperator มือใหม่ต้องใช้ประมาณ 300 ครั้งต่อการเคลื่อนไหวที่ใช้ได้หนึ่งครั้ง โรงงานไม่แชร์ข้อมูลกระบวนการ นโยบายที่ฝึกจากการจำลองดิ่งลงบนหุ่นยนต์จริง
ความน่าเชื่อถือ	สถานีแบบมีโครงสร้าง 98–99.99% (vendor claims นิยามความล้มเหลวไม่ชัดเจน) โมเดลทั่วไป 40–90% ในภารกิจใหม่ คอนเนกเตอร์ที่ไม่เห็น 29–67%
ความเร็ว	หุ่นยนต์มนุษย์ที่ 30–50% ของความเร็วมนุษย์ (UBTech) บางรุ่นประมาณ 20% (Reuters) เอเจนต์ frontier ประมาณ 280 วินาทีต่อภารกิจหุ่นยนต์จริงแบบ quasi-static ลูปควบคุม LLM ที่ 0.2–0.4 Hz เทียบกับประมาณ 83 Hz ที่ต้องการ (Anthropic)
ต้นทุน	Walker S2 เฉลี่ยประมาณ 600k RMB การคืนทุน 7–12 ปี estimate
การรับรองความปลอดภัย	ISO 10218-1/-2:2025 ทำให้ functional safety ชัดเจนขึ้นและดูดซับข้อกำหนดการทำงานร่วม แต่ไม่พูดถึง AI (The Robot Report) ISO/IEC TS 22440 (functional safety และ AI) ยังเป็น committee draft รอบสองในเดือนพฤศจิกายน 2026 (ISS, ISO Open Data) คำแนะนำ IEC 61508-3 ไม่สนับสนุน AI เหนือ SIL 1 (Analog Devices) ภายใต้ระเบียบเครื่องจักรของสหภาพยุโรป ฟังก์ชันความปลอดภัยที่ใช้แมชชีนเลิร์นนิงต้องประเมินโดย notified body ตั้งแต่วันที่ 20 มกราคม 2027 (EUR-Lex)
มือและเครื่องมือ	มือคล่องแคล่วทำได้ประมาณ 30 N (≈3 กก.) ต่อนิ้ว เทียบกับประมาณ 10 กก. สำหรับมือมนุษย์ (Gasgoo) การเปลี่ยนเครื่องมือยังเป็นแบบมือ
การบูรณาการ	เซ็นเซอร์อ่านผิด โปรโตคอลไม่ตรง และลิงก์ MES หน้างาน อัตราการแทรกแซงแทบไม่เคยเปิดเผย

ความหมายด้านความปลอดภัยตรงไปตรงมา: มาตรฐานไม่ห้ามและไม่รับรองนโยบายแบบเรียนรู้ ISO 10218-1/-2:2025 ไม่พูดถึง AI ISO/IEC TS 22440 (functional safety และ AI) ยังอยู่ขั้น committee draft และไม่น่ามาก่อนปลายปี 2027 หรือ 2028 estimate ISO/IEC TR 5469:2024 เป็นเพียงคำแนะนำ แนะนำ fallback แบบไม่ใช้ AI ข้อจำกัดเชิงกำกับดูแล และการโหวตซ้ำซ้อน IEC 61508 ฉบับ 3 คาดในต้นปี 2027 (ISO Open Data, BSI, 61508 Association) verified ยังไม่มีมาตรฐานที่เผยแพร่ใดเสนอเส้นทางที่ยอมรับในการรับรองการรับรู้ด้วยแมชชีนเลิร์นนิงเป็นฟังก์ชันความปลอดภัย กฎภูมิภาคก็กำลังเคลื่อน: จีนกำลังแก้ไข GB 11291 (มีผลประมาณ 2028–2029) (revision plan 20262543) UL 1740 นำ ISO 10218-2 เข้าสู่การตรวจสอบ NRTL ของสหรัฐฯ ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2025 สหภาพยุโรปกำหนดให้ประเมินฟังก์ชันความปลอดภัยที่ใช้แมชชีนเลิร์นนิงโดย notified body ตั้งแต่วันที่ 20 มกราคม 2027 และไม่มีหุ่นยนต์มนุษย์ใดรับรองการใช้งานแบบไร้รั้วในโรงงาน ขณะที่ ISO 25785-1 ยังเป็นร่าง (i-SCOOP) สถาปัตยกรรมที่ป้องกันได้: แมชชีนเลิร์นนิงตัดสินเฉพาะกระบวนการ (“ชิ้นส่วนใด” “แผ่นนี้ดีหรือไม่”) ขณะที่ชั้นความปลอดภัย deterministic ที่ผ่านการรับรอง (โดยทั่วไป PL d / Category 3) และ PLC ความปลอดภัยตัดสินความเร็ว แรง และการหยุด ปฏิบัติต่อคำกล่าวอ้าง “AI กล้องเพื่อความปลอดภัยแบบไร้รั้ว” ว่าไม่ได้รับการพิสูจน์ จนกว่าใบรับรอง PL d หรือ SIL 2 จะระบุองค์ประกอบแมชชีนเลิร์นนิง

FIG 32 **ไทม์ไลน์มาตรฐานและกฎระเบียบ*เส้นทางการรับรอง AI ในฟังก์ชันความปลอดภัยจะไม่ลงตัวก่อน 2027–2029***



แหล่งที่มา: ISO, IEC, UL, EUR-Lex, SAC และฐานข้อมูลกฎหมายระดับชาติ

ชั้นใดคือโอกาส: โมเดลเป็นของยักษ์ใหญ่ กล่อง edge เป็นของผู้ผลิตชิป บริษัทเล็กเป็นของการบูรณาการและฮาร์ดแวร์เซ็นเซอร์

ชั้นโมเดลต้องการทุนและข้อมูลและเป็นของยักษ์ใหญ่ (AgiBot ฝึก GO-2 ด้วย “หลายหมื่นชั่วโมง” (iFeng Tech) โมเดลที่แข็งแกร่งที่สุดปิดหรือ cloud-only) ชั้นกล่อง edge เป็นของผู้ผลิตชิป: Jetson Thor เป็นมาตรฐานโดยพฤตินัย และในจีนแผ่นดินใหญ่ บอร์ด RDK ของ D-Robotics (D-Robotics) และ co-processor ของ Rockchip (CSDN) แข่งขันกัน ส่วนใหญ่ไม่มีผล VLA ที่เผยแพร่

บริษัทเล็กมีช่องเปิดสองทาง หนึ่งคือฮาร์ดแวร์เซ็นเซอร์ที่ซื้อความน่าเชื่อถือโดยตรง: การสัมผัสยกความสำเร็จการเสียบของ ContactDP จาก 58.7% เป็น 97.8% และเซ็นเซอร์แรง/ทอร์กและกล้องข้อมือทำงานคล้ายกัน ชุดเก็บข้อมูลก็ขายได้ (10jqka) แม้มือ เซ็นเซอร์ และแขนล้วนราคาลดลง อีกทางคือชั้นการบูรณาการระหว่างผู้ผลิตแขนและบริษัทโมเดล เป็นเจ้าของข้อมูลภารกิจ ขอบเขตความปลอดภัย และลิงก์ MES ของแต่ละสถานี ซึ่งผู้ผลิตแขนไม่ขายเป็นผลิตภัณฑ์ในวันนี้ คู่แข่งแบ่งเป็นสี่กลุ่ม: ผู้นำแขน (FANUC, Yaskawa, KUKA, ABB, UR, JAKA, Dobot และอื่นๆ) บริษัทวิชันบวกแขน (Mech-Mind, Hikrobot, SmartMore) บริษัท embodied AI (AgiBot, UBTech, Unitree, Galbot, Figure, Physical Intelligence, Google DeepMind, NVIDIA) และผู้เข้าร่วมจากชิปยานยนต์

การยอมรับของผู้ซื้อ: ไม่มีตัวเลขใดที่ไม่มีตัวหาร

เนื่องจากไม่มีผู้ขายใดเผยแพร่อัตราการแทรกแซง ช่วงความล้มเหลว หรือจำนวนความสำเร็จระยะยาว สิ่งเหล่านี้จึงต้องอยู่ในเงื่อนไขการยอมรับของสัญญา ในเชิงสถิติ รอบการผลิตต่อเนื่อง 3,000 รอบโดยไม่มีความล้มเหลวพิสูจน์อัตราความล้มเหลวสูงสุด 0.1% ที่ความเชื่อมั่น 95% ความล้มเหลว 10 ครั้งใน 3,000 พิสูจน์เพียง ≤0.57% การพิสูจน์ ≤1%, ≤0.5%, ≤0.1% และ ≤0.01% โดยไม่มีความล้มเหลวต้องใช้ 299, 598, 2,995 และ 29,956 รอบ estimate, exact binomial ตามมาตรฐานนั้น 322/324 ของ Neuromeka มีช่วง 95% สองด้านที่ 97.8–99.9% และไม่พิสูจน์ ≥99% ความล้มเหลวประมาณ 6 ครั้งใน 64,828 ภารกิจของ AgiBot บ่งชี้ 99.98–100% แต่เฉพาะเมื่อนิยาม “ความล้มเหลว” แบบที่ผู้ซื้อนิยาม estimate นี่คือข้อกำหนดการยอมรับที่ฉันจะตั้งต่อเซลล์แขนหุ่นยนต์หรือ embodied ใดๆ เกณฑ์อิงจากเป้าหมายของ Figure ที่ BMW และกรณี Neuromeka และ AgiBot และเป็นการตัดสิน ไม่ใช่มาตรฐาน estimate :

รายการ	กำหนดให้	เกณฑ์ผ่านที่แนะนำ
นิยาม	นิยามที่ลงนามของ cycle, ความสำเร็จ, ความล้มเหลว (ความสำเร็จบางส่วน การจับใหม่ การหล่น การเล็ดรอดคุณภาพ), การแทรกแซง (สัมผัส, teleoperation ระยะไกล, reset, e-stop) และวิธีคำนวณ autonomy	นิยามมาก่อนเมตริกใดๆ ไม่มีเปอร์เซ็นต์ใดที่ไม่มีสูตร
การแทรกแซงและ teleoperation	ต่อชั่วโมงหุ่นยนต์ ตามประเภทและระยะเวลา เวลาเฉลี่ยระหว่างการแทรกแซง นาที teleoperation เป็นสัดส่วนของเวลารัน ผู้ควบคุมต่อหุ่นยนต์	สถานีแบบมีโครงสร้าง ≤0.5 การแทรกแซงต่อชั่วโมงหุ่นยนต์ (ห่างกัน ≥2 ชม.) teleoperation เป็นศูนย์ระหว่างการยอมรับ
ความสำเร็จระยะยาว	≥3,000 รอบการผลิตต่อเนื่องใน ≥3 กะ ≥2 หมายเลขชิ้นส่วน และความแปรผันแสงและอุปทานปกติ ความล้มเหลวถูกจำแนก ขอบล่างแบบแน่นอน	ขอบล่าง ≥99.5% สำหรับสถานี inline ที่หยุดสาย ≥99.0% ออฟไลน์ การเล็ดรอดคุณภาพรายงานแยก
รอบเวลา	P50/P90/P99 ต่อชิ้นส่วนรวมการกู้คืน เทียบกับรอบมนุษย์ที่จับเวลาอย่างน้อย 30 รอบที่สถานีเดียวกัน	≤1.15 × P50 ของมนุษย์ หรือภายใน takt ของสาย
Uptime และความผิดพลาด	ชั่วโมงรัน บันทึก downtime ความผิดพลาดตามชิ้นส่วน เวลาเปลี่ยนชิ้นส่วน	uptime ≥95% ใน ≥2 สัปดาห์ MTTR ≤20 นาทีพร้อมอะไหล่หน้างาน
การกู้คืน	การจัดความผิดพลาดแบบสคริปต์: การหล่น การบังแสง การเปลี่ยนแสง สายพานหยุด MES หรือเครือข่ายเสียหาย ไฟดับ e-stop	การกู้คืนอัตโนมัติ ≥90% กลับสู่การผลิตภายใน 2 นาที
การเปลี่ยนรุ่น	ชั่วโมง การสาธิต ทักษะผู้ควบคุม และต้นทุนการเก็บข้อมูลต่อหมายเลขชิ้นส่วนหรือฟิกซ์เจอร์ใหม่	สถานีแบบมีโครงสร้าง: ≤1 กะ และ ≤100 การสาธิตต่อหมายเลขชิ้นส่วนใหม่
ความปลอดภัย	แขนและเซลล์ตาม ISO 10218-1/-2:2025 การประเมินความเสี่ยงเซลล์ กฎท้องถิ่น (GB 11291 ในจีนแผ่นดินใหญ่ CNS 14490 บวกการประเมินเป็นลายลักษณ์อักษรในไต้หวัน ANSI/A3 R15.06-2025 และ UL 1740 ในสหรัฐฯ)	ไม่มีฟังก์ชันความปลอดภัยที่ใช้แมชชีนเลิร์นนิง ชั้นความปลอดภัยที่ผ่านการรับรอง (โดยทั่วไป PL d / Cat 3) จำกัดความเร็วและแรง ไม่มีหุ่นยนต์มีขาแบบไร้รั้วจนกว่า ISO 25785-1 จะเผยแพร่และถูกประเมิน
การคำนวณและพฤติกรรมออฟไลน์	ฮาร์ดแวร์อนุมาน latency P99 พฤติกรรมไม่มีเครือข่าย การกำหนดเวอร์ชันโมเดล การตรวจสอบซ้ำหลังการอัปเดตทุกครั้ง	การอนุมานที่วิกฤตต่อ takt ไม่พึ่งพา cloud การยอมรับใหม่เต็มรูปแบบหลังการเปลี่ยนโมเดล, quantization หรือ engine
หลักฐาน	วิดีโอและบันทึกดิบที่ไม่ได้ตัดต่อตลอดช่วงการยอมรับทั้งหมด มีทีมคุณภาพของลูกค้าหรือบุคคลที่สามเป็นพยาน	ไม่มี highlight reel หรือสรุปเฉพาะฝั่งผู้ขาย
เงื่อนไขเชิงพาณิชย์	milestone การชำระเงินผูกกับเมตริกการยอมรับ บทลงโทษ availability เมื่อคิดเงินต่อชั่วโมงหุ่นยนต์ กฎความเป็นเจ้าของข้อมูลและการเข้าถึงระยะไกล	การชำระเงินขั้นสุดท้ายและเงินเก็บปล่อยเฉพาะหลังการยอมรับ 3,000 รอบและ ≥4 สัปดาห์ของการรันที่เสถียร
เศรษฐศาสตร์	คนสุทธิที่ถูกแทน = อัตราส่วนความเร็ว × uptime × ความสำเร็จ − เวลาการแทรกแซง − สัดส่วน teleoperation	ปฏิเสธข้อเสนอใดที่การแทนสุทธิไม่รองรับการคืนทุนที่อ้าง

แหล่งที่มา: (Figure, Neuromeka, Yicai Global, i-SCOOP) เกณฑ์เป็นข้อเสนอแนะของฉัน

คำถามที่ยังไม่มีคำตอบ

07 สิ่งที่เอกสารสาธารณะตอบไม่ได้ และวิธีที่โครงการนำร่องจะหาคำตอบ

คำถามที่แหล่งสาธารณะตอบไม่ได้แบ่งเป็นห้ากลุ่ม: การตรวจสอบด้วย AI ขายได้เท่าไรจริงและผู้ซื้อยินดีจ่ายเท่าไร ผู้ผลิต AOI รวม AI และอัปเกรดเครื่องเก่าอย่างไร AOI ที่ติดตั้งแล้วอายุเท่าไรและมีกี่เครื่องที่รัน AI แล้ว การตรวจสอบใช้กี่คนและกี่ชั่วโมงต่อสายจริง และโครงการนำร่องแปลงอย่างไรและผู้ซื้อจ่ายอย่างไร เหนือกว่านั้นคือโมเดลใหม่ล่าสุด build แบบ quantization และแขนหุ่นยนต์ทำงานอย่างไรจริงภายใต้เงื่อนไขของโรงงานที่กำหนด แต่ละข้อสามารถเปลี่ยนเป็นการทดสอบพร้อมเกณฑ์ชัดเจน เกณฑ์ด้านล่างเป็นกฎการตัดสินใจที่ฉันได้มาจากหลักฐานในรายงานนี้ estimate คำนวณใหม่เมื่อข้อมูลโรงงานแรกเข้ามา

คำถามเปิด	วิธีหาคำตอบ	ผลลัพธ์ที่ดีเป็นอย่างไร
ราคาและความยินดีจ่ายสำหรับการตรวจสอบ AI	คำขอใบเสนอราคามาตรฐาน (เช่น สี่สายผสม 2D รุ่นเก่าและ 3D รุ่นใหม่ สองกะ ประมาณ 2,000 แผ่นต่อกะ คลาสข้อบกพร่อง 12 คลาส ภายในองค์กรเท่านั้น บูรณาการ MES หรือ IPC-CFX) ส่งให้ผู้ขายบุคคลที่สามหลายราย แบบสำรวจความไวต่อราคาสี่คำถามกับโรงงาน EMS 20–30 แห่ง	ใบเสนอราคาส่วนใหญ่อยู่ใน 40–120k RMB ครั้งเดียว หรือ 20–40k ต่อปีสำหรับสี่สาย อย่างน้อยครึ่งของโรงงานยอมรับ 10–30k RMB ต่อสายโดยคืนทุนภายใน 12 เดือน
การรวม AI และการอัปเกรดเครื่องเก่าของผู้ผลิต AOI	สัมภาษณ์แบบมีโครงสร้างสั้นกับผู้ผลิตและผู้จัดจำหน่าย AOI ประมาณหนึ่งโหล	การตรวจสอบ AI เป็นมาตรฐาน ตัวเลือก หรือไม่มีในรุ่น 2025–26 เครื่องก่อนปี 2020 อัปเกรดได้หรือไม่และราคาเท่าไร
อายุของ AOI ที่ติดตั้งและสัดส่วนที่รัน AI	สำรวจหน้างานโรงงาน EMS ประมาณ 30 แห่ง แบ่งชั้นตามขนาดและภูมิภาค พร้อมรายการอุปกรณ์ที่ตรวจสอบภายใต้ NDA	อายุมัธยฐาน AOI ≥5 ปี และ ≥60% ไม่มี AI หมายความว่ากลุ่ม retrofit มีจริง
แรงงานและชั่วโมงตรวจสอบ	สัมภาษณ์และบันทึกสัญญาณเตือน AOI การตรวจสอบ การซ่อม และกะ 2–4 สัปดาห์ที่โรงงานสองแห่งขึ้นไป พร้อม work sampling	ผู้ตรวจสอบ ≥1 คนต่อสายต่อกะ และ ≥3 ชั่วโมงตรวจสอบต่อสายต่อกะ โดยอย่างน้อย 0.5 FTE ต่อสายที่โรงงานยินดีจัดใหม่
ประสิทธิภาพของการตรวจสอบ AI เอง	ชุดข้อมูลอ้างอิงบวกโหมด shadow บนสายจริง (บทที่ 3): ข้อตกลงข้อมูลในสัปดาห์ 0 พื้นฐานและการติดป้ายในสัปดาห์ 1–2 รัน shadow ในสัปดาห์ 2–4 รัน assisted (ไม่บังคับ) ในสัปดาห์ 4–8	สัญญาณผิดพลาดหรือชั่วโมงตรวจสอบลด ≥50–60% ขอบเขตการเล็ดรอดต่อคลาสไม่แย่กว่าพื้นฐานมนุษย์ พลาดเป็นศูนย์ในคลาสวิกฤต latency p95 ≤½ takt fail-open อัตโนมัติไปหาคน
คุณภาพป้ายจากครูของโมเดล frontier	รันผู้สมัครสองหรือสามตัวบนชุดข้อมูลอ้างอิงเดียวกัน สามแบบของพรอมป์แต่ละตัว ภาพอ้างอิงดีหนึ่งภาพ ภาพตัดชิ้นส่วนเดียว ≥42–48 px	ยอมรับอัตโนมัติเฉพาะคลาสที่มีการพลาดเป็นศูนย์บนข้อบกพร่อง ≥299 รายการและข้อตกลงระดับมนุษย์ มิฉะนั้นติดป้ายล่วงหน้าและคัดแยกเท่านั้น
build แบบ quantization	เปลี่ยนเฉพาะความแม่นยำ ปัก hash ของ weights template preprocessing decoding engine และ batch size ปิดหรือรีเซ็ต prefix caching ตรวจสอบว่า build อ้างอิงสร้างผลลัพธ์ผู้ขายซ้ำได้ ให้คะแนนคู่บนชุดข้อมูลอ้างอิงและ drift slice	ไม่มีการพลาดใหม่ในคลาสวิกฤต ≤1 การพลาดใหม่ในข้อบกพร่อง 1,000 รายการ clearance ลด ≤2 คะแนน การตัดสินใจเหมือนกัน ≥99.5% ในสามรอบ มิฉะนั้นถอยกลับไป FP8/INT8
ฮาร์ดแวร์ข้างสาย ความสะอาด และ ESD	กล่องผู้สมัครแต่ละรุ่น ≥2 หน่วยทดสอบความเครียดที่สองเท่าของอัตราสัญญาณเตือนที่คาด แช่ 72 ชั่วโมงที่การไหลของอากาศจริงในตู้ ตรวจ ESD โดยผู้ประสานงานของลูกค้า ทดสอบ ISO 14644-14 สำหรับลูกค้า ISO 7 และสะอาดกว่า	p95 ≤½ takt ไม่มี crash หรือ throttle ตลอด 72 ชั่วโมง ลงนาม ESD รายงานอนุภาคในคลาสที่ถูกต้อง
เงื่อนไขการชำระเงิน กฎโครงการนำร่อง และการแปลง	ข้อการชำระเงินจากสัญญาอุปกรณ์ตรวจสอบล่าสุดที่โรงงานที่สำรวจ สัมภาษณ์กฎโครงการนำร่อง เกณฑ์การยอมรับ และเวลาผ่านคุณสมบัติ	ประมาณ 30/60/10 โดยเงินสดภายใน 60 วันของการยอมรับ โครงการนำร่อง ≤8–12 สัปดาห์ พร้อมเจ้าของการลงนามที่ระบุชื่อ แปลง ≥1 ใน 3 กรอบครอบคลุม ≥5–10 สายในปีแรก

คำถามเปิด	วิธีหาคำตอบ	ผลลัพธ์ที่ดีเป็นอย่างไร
ข้อมูล, IT และความรับผิด	สัมภาษณ์และทบทวนสัญญากับที่ปรึกษากฎหมาย	กล่องในพื้นที่เชื่อมต่อและเข้าถึงข้อมูลได้ ความรับผิดจำกัดเฉพาะข้อบกพร่องซอฟต์แวร์
การปฏิบัติตามกฎภูมิภาคก่อนไปต่างประเทศ	ไต้หวัน: สถานะลายลักษณ์อักษรของลูกค้าภายใต้พระราชบัญญัติการจัดการความปลอดภัยไซเบอร์ การประเมินตนเอง E187 สหรัฐฯ: คำวินิจฉัยศุลกากรว่าเซลล์ถูกจำแนกอย่างไร ใบเสนอราคา NRTL การตรวจ ITAR เอเชียตะวันออกเฉียงใต้: คุณสมบัติ local-linkage ของ BOI และ allowance ของมาเลเซีย บริษัทแม่ของลูกค้า จีนแผ่นดินใหญ่: ขอบเขต CCC สำหรับ PC และพาวเวอร์ซัพพลายที่รวมมา	ลูกค้าไม่ใช่หน่วยงานที่ถูกควบคุม และการคืนทุน ≤2 ปีเมื่อรวมภาษีและการรับรอง
การยอมรับของหุ่นยนต์หรือเซลล์ embodied	ตารางการยอมรับ 12 รายการในบทที่ 6: นิยามที่ลงนาม ≥3,000 รอบการผลิตต่อเนื่องใน ≥3 กะและ ≥2 หมายเลขชิ้นส่วน การฉีดความผิดพลาดแบบสคริปต์ รอบมนุษย์จับเวลา ≥30 รอบ มีพยาน	ขอบล่าง ≥99.5% inline (≥99.0% ออฟไลน์) รอบ ≤1.15 × มนุษย์ ≤0.5 การแทรกแซงต่อชั่วโมงและ teleoperation เป็นศูนย์ uptime ≥95% MTTR ≤20 นาที การกู้คืน ≥90%
นโยบาย ACT และ VLA บนชิป edge จีน	สี่สัปดาห์: พอร์ตและ micro-benchmark (การอนุมาน ≥1,000 ครั้ง การกระจาย latency พลังงาน แช่ 60 นาที) การจำลองวงปิดพร้อมฉีด latency ที่วัดได้ A/B หุ่นยนต์จริงเทียบกับ GPU การทนทาน 8–24 ชั่วโมง (≥3,000 รอบ)	ACT chunk p95 ≤100 ms VLA ≤300 ms ความสำเร็จหุ่นยนต์จริงภายใน 3 คะแนนของ GPU และรอบ ≤1.2 × มนุษย์ มิฉะนั้นเก็บนโยบายบน Jetson หรือ GPU
ราคา cobot, AMR และการบูรณาการ	ใบเสนอราคาทีละรุ่นจากผู้จัดจำหน่าย cobot หลายราย และใบเสนอราคาเซลล์เต็มจากผู้ติดตั้งสองหรือสามรายสำหรับการโหลดฟิกซ์เจอร์ทดสอบ (หนึ่งสถานี สองกะ)	เซลล์เต็ม ≤200k RMB และคืนทุน ≤1.5 ปีสองกะในเซินเจิ้น
จำนวนสาย SMT ในไต้หวัน เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และสหรัฐฯ	ข้อมูล IPC (เดิม New Venture Research) หรือฐานติดตั้งของผู้จัดจำหน่ายอุปกรณ์ในพื้นที่	มีสายที่ให้บริการได้เพียงพอต่อภูมิภาคเพื่อรองรับวิศวกรรมแอปพลิเคชันในพื้นที่

จากทั้งหมดนี้ สี่ข้อตัดสินตัวเลขที่ไวที่สุดในรายงานนี้: ราคาที่ผู้ซื้อจะจ่าย แรงงานที่การตรวจสอบ AI ปล่อยออกมาจริง การตรวจสอบ AI พลาดไม่มากกว่าคนจริงหรือไม่ และเงินสดกลับมาเร็วแค่ไหน สิ่งเหล่านี้คุ้มค่าที่จะหาคำตอบก่อนความมุ่งมั่นสำคัญใดๆ โดยโรงงานที่พิจารณาซื้อหรือโดยผู้จำหน่ายที่พิจารณาผลิตภัณฑ์

ลำดับโครงการนำร่องที่ได้ผลสำหรับทั้งสองฝ่าย

สำหรับโรงงาน และสำหรับผู้ขายที่ต้องการการอ้างอิงที่น่าเชื่อถือ ลำดับเหมือนกัน:

1. **สัปดาห์ 0–2: ตกลงเรื่องข้อมูลและนิยาม** ลงนามข้อตกลงข้อมูล กำหนดคลาสข้อบกพร่องและสิ่งที่นับเป็นการเล็ดรอด และบันทึกพื้นฐาน: สัญญาณผิดพลาดต่อแผ่น วินาทีตรวจสอบต่อครั้ง การเล็ดรอดที่พบปลายทาง
2. **สัปดาห์ 1–4: สร้างชุดข้อมูลอ้างอิง** จากคลัง AOI และแผ่น NG ที่เก็บไว้ ติดป้ายแบบ blind และตัดสิน (บทที่ 3)
3. **สัปดาห์ 2–4 (หรือนานกว่า): โหมด shadow** โมเดลบันทึกการตัดสินใจของมันขณะที่คนตัดสินเหมือนเดิม เปรียบเทียบทีละคลาส
4. **สัปดาห์ 4–8: การรัน assisted ในกะสุ่ม** โดยโมเดลเคลียร์เฉพาะคลาสที่ผ่านเกณฑ์ และอย่างอื่นทั้งหมดไปหาคน
5. **การยอมรับ เป็นลายลักษณ์อักษร ก่อนขยาย:** ผลลัพธ์ต่อคลาส latency พฤติกรรม fail-open และใครเป็นเจ้าของโมเดลและป้าย ขยายทีละสาย และตรวจสอบซ้ำทุกผลิตภัณฑ์ใหม่ เวอร์ชันโมเดล quantization หรือการเปลี่ยน engine

ข้อจำกัดของรายงานนี้

นี่คืองานวิจัยแบบ desk research ฉันไม่ได้สัมภาษณ์ปฐมภูมิกับโรงงานสำหรับฉบับนี้ ข้อมูลสายจำนวนมากมาจากผู้ขายและไม่ถูกตรวจสอบอิสระ เว็บไซต์รัฐบาล ฐานข้อมูลการประมูล และแพลตฟอร์มสรรหาหลายแห่งเข้าถึงไม่ได้ ดังนั้นอัตราเงินอุดหนุนอัปเกรดปี 2026 ของเซินเจิ้น แนวทางค่าจ้างสามเหลี่ยมปากแม่น้ำแยงซี ราคาซื้อขายของการตรวจสอบ AI ผู้ตรวจสอบต่อสาย และอัตราการแปลงโครงการนำร่องเป็นการประมาณหรือเทียบเคียง แต่ละรายการปรากฏข้างต้นเป็นคำถามเปิด อัตราแลกเปลี่ยนเป็นอัตรากลางของธนาคารประชาชนจีนวันที่ 9 พฤศจิกายน 2026 ($1 = RMB 6.7188) และสำหรับไต้หวัน อัตราของ SMBC ในวันเดียวกัน ($1 = NT$32.12) เงินด่งเวียดนามใช้ข้อมูลเดือนพฤษภาคม 2026 เกณฑ์ทั้งหมดเป็นกฎการตัดสินใจที่ได้มาจากหลักฐานที่อ้างอิง ไม่ใช่มาตรฐาน

เกี่ยวกับผู้เขียน

Tan Shuai

Tan Shuai เป็นนักเทคโนโลยีและผู้ก่อตั้งที่มีประสบการณ์กว่ายี่สิบปีครอบคลุมชิป ฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ระบบ และสิทธิบัตรที่ได้รับ 20 ฉบับ ผลงานของเขาพาเขาไปทั่ว Silicon Valley, New York, Chicago, Taiwan, พื้นที่ Greater Bay Area (Shenzhen และ Hong Kong), Vietnam และ Malaysia โดยมุ่งเน้นการผลิตขั้นสูงและซัพพลายเชนมาเป็นเวลานาน ปัจจุบันเขาทำงานเป็นนักวิจัยและนักพัฒนา AI โดยมุ่งเน้นว่า AI ถูกนำไปใช้บนพื้นโรงงานจริงอย่างไร

เขายินดีพูดคุยกับผู้ที่ทำงานด้าน AI ในการผลิต ไม่ว่าจะสร้างทีม มองหาพันธมิตร หรือแลกเปลี่ยนบันทึก: i@tanshuai.com · tanshuai.com

หมายเหตุและข้อจำกัดความรับผิดชอบ

รายงานนี้เป็นงานวิจัยแบบ desk research อิสระจากเอกสารสาธารณะที่มีถึงวันที่ 11 พฤศจิกายน 2026 จัดทำขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลเท่านั้น ไม่ใช่คำแนะนำด้านการลงทุน กฎหมาย ภาษี หรือวิศวกรรม ชื่อผลิตภัณฑ์ ราคา การเปิดตัวโมเดล การจำแนกการส่งออก ภาษีศุลกากร และระเบียบเปลี่ยนเร็ว ตรวจสอบสิ่งที่คุณพึ่งพากับแหล่งปฐมภูมิ ตัวเลขที่ทำเครื่องหมาย vendor claim หรือ estimate ควรอ่านเช่นนั้น ชื่อบริษัทและผลิตภัณฑ์เป็นของเจ้าของและใช้เพื่อการระบุตัวตนเท่านั้น ไม่มีบริษัทใดตรวจสอบหรือสนับสนุนรายงานนี้

© 2026 Tan Shuai คุณอาจแชร์รายงานนี้โดยไม่ดัดแปลงพร้อมระบุที่มา

การผลิตอิเล็กทรอนิกส์ · การตรวจสอบด้วย AI × หุ่นยนต์

การตรวจสอบด้วยสายตาด้วย AI และแขนหุ่นยนต์ในโรงงานอิเล็กทรอนิกส์: การประเมินปี 2026

ตัวเลขสำคัญทุกตัวมีแหล่งที่มาและแท็กความน่าเชื่อถือ: verified, single source, vendor claim หรือ estimate สิ่งที่เอกสารสาธารณะไม่สามารถตอบได้ถูกรวบรวมไว้ในบทที่ 7 พร้อมวิธีที่โครงการนำร่องจะหาคำตอบในแต่ละคำถาม

Tan Shuai
tanshuai.comi@tanshuai.com

ฉบับสาธารณะ · ข้อมูล ณ วันที่ 11 พฤศจิกายน 2026

