獨立研究 · 公開版

電子製造 · AI 檢測 × 機器人

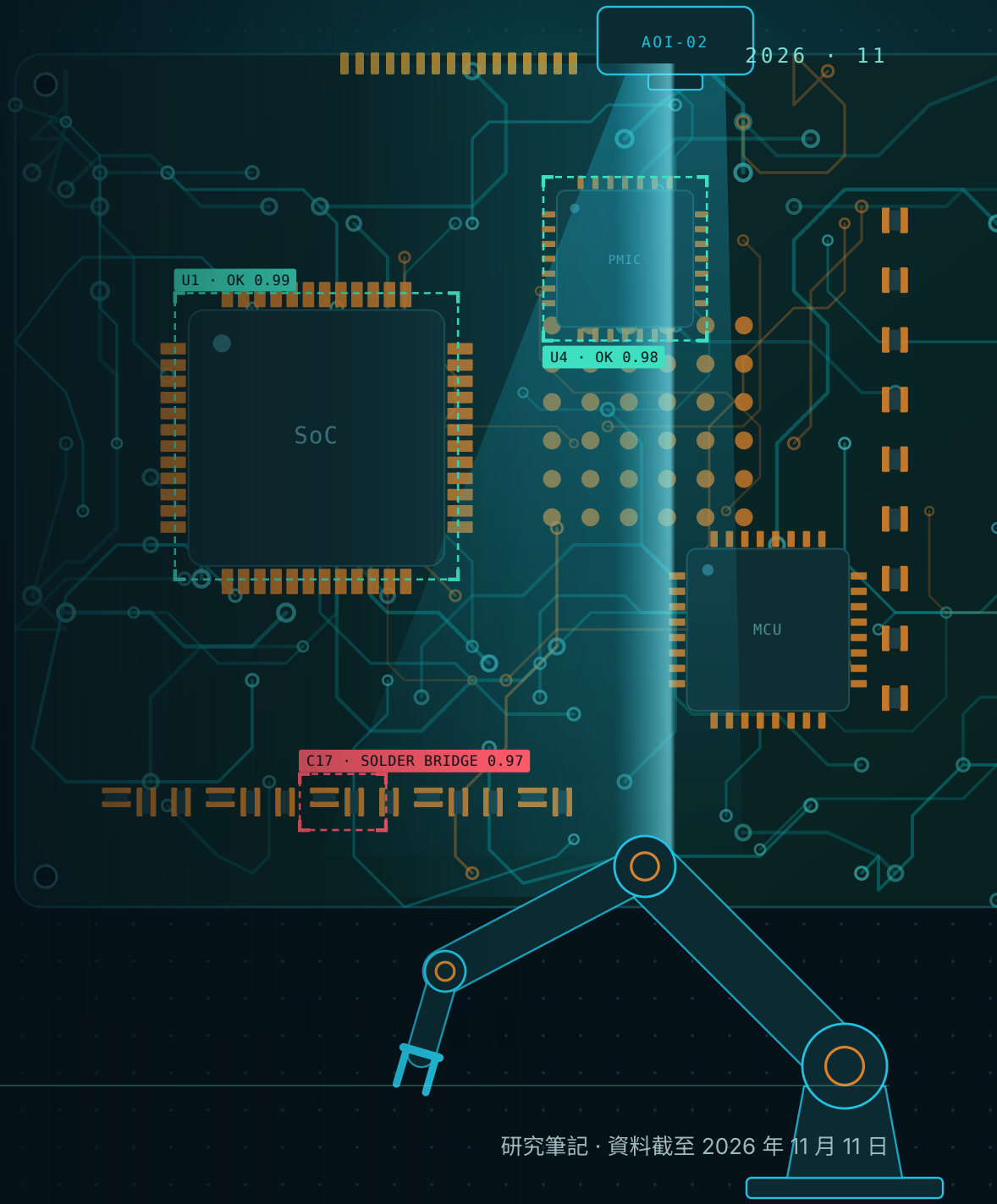
SMT 線上的 AI：

2026 年什麼會回本

電子工廠的 AI 視覺檢測與機械手臂

中國大陸 · 台灣 · 東南亞 · 美國

關鍵發現 **AI 複判值得做，但需收窄範圍。具身機械手臂可以等。**



Tan Shuai
tanshuai.comi@tanshuai.com

研究筆記 · 資料截至 2026 年 11 月 11 日



值得做，但要窄做，現在做，並與夥伴合作

關鍵發現

2026 年成熟、且廠方願意付錢的，是 AOI 影像上的 AI 複判與利基檢測，加上程式化的機器人上下料，而不是「大模型看板子 + 具身機器人揀板子」。

0.46–0.65 yr

在美國、台灣與深圳，每線人民幣 5 萬元的 AI 複判回本期

≥95% · <20 PPM

頭部 EMS 的自建 AI 複判：賣給一線 EMS 的門檻

100–700 RMB M

中國大陸可服務的第三方改裝市場，一次性，約五年窗口

0 scores

2026 年 11 月旗艦的工業缺陷基準分數

1.1–1.5 yr

兩班制協作臂上下料單元的回本期

0.003–0.14 FTE

揀出機械手臂每班節省的人力：永不回本

來源：報告執行摘要與第 4–5 章；回本與市場數字為作者估計。

六問六答

① 廠方今天跑什麼

3D SPI、迴流焊前後 AOI、抽樣 X 光、ICT/FCT。每台 AOI 後面都有人複判；節拍 ≈13–22 秒/板。

② 技術能走多遠

檢測以「檢測器 + AI 複判 + 少數人」達到工業級；花再多錢也做不到零人力。中國大陸：國產模型；台灣：由客戶決定；美國：關稅與認證。

③ 本地部署與不連網

可行；限制在於流程。產線放 ≤100 W 無風扇盒子，伺服器放機房，預設 8-bit。

④ 老師與學生

檢測：前沿模型預標註，人工裁決，金標準集把關。機械手臂：老師仍是人類示範與模擬。

⑤ 成本與回本

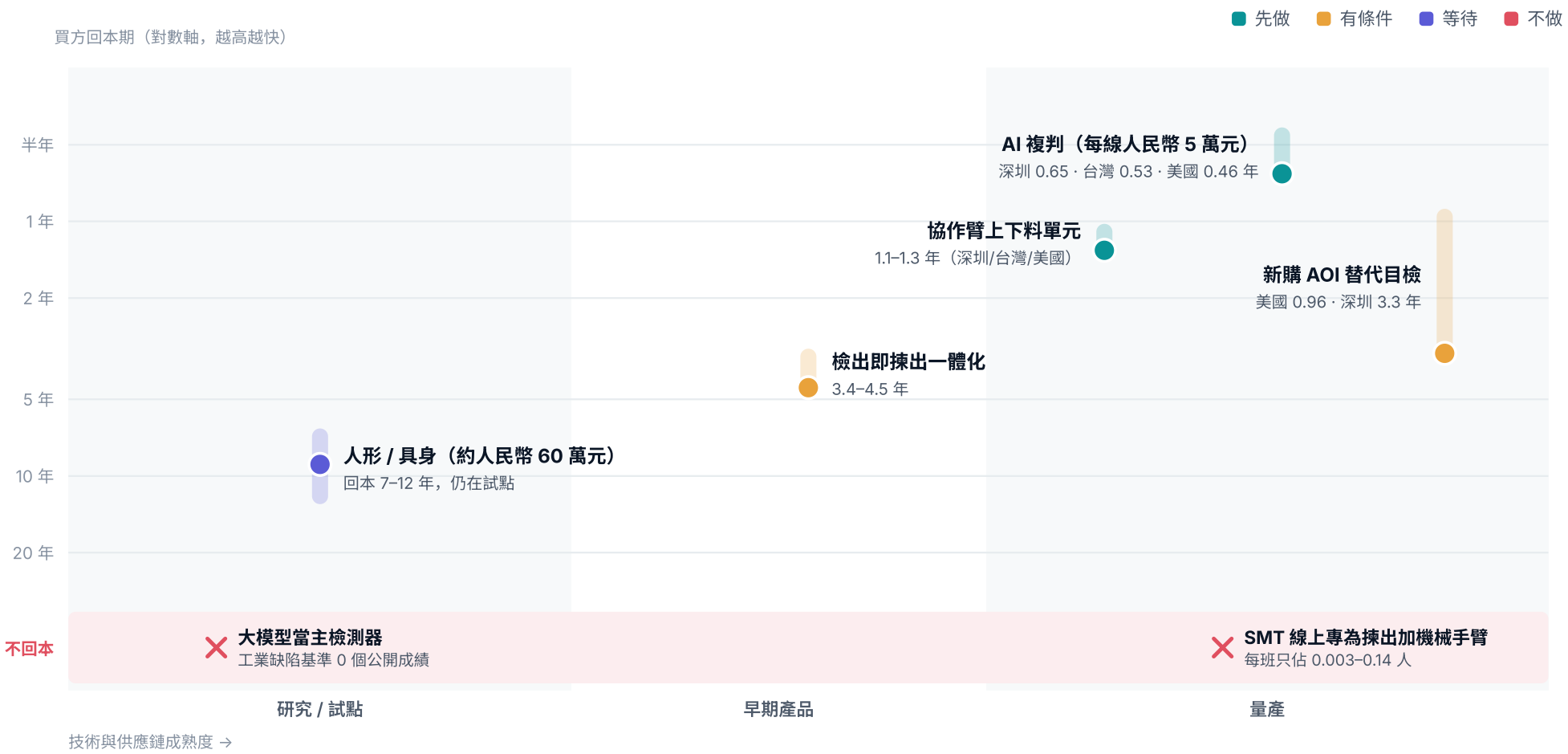
在美國、台灣與深圳，AI 複判一年內回本；協作臂上下料 1.1–1.5 年；東南亞 2–6 年；揀出機械手臂永不回本。

⑥ 現在做還是等

需求真實、供給擁擠；OEM AI 留下約五年的改造窗口。檢測現在做、窄做；具身智慧等 2027–28 年資料。

來源：報告執行摘要。

AI 今日在工廠現場適合做什麼

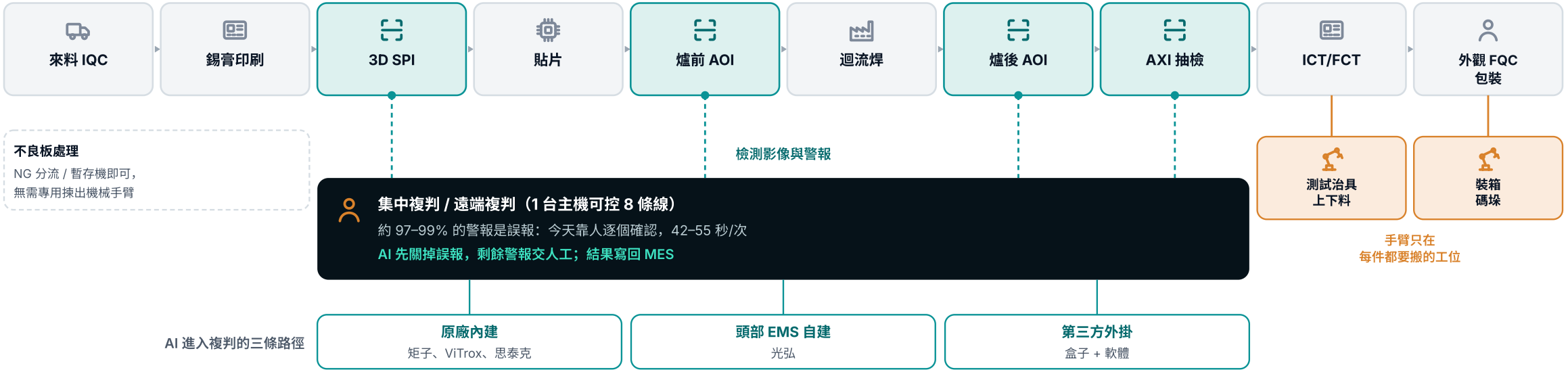


來源： 回本來自作者模型（第 4 章）；成熟度軸為作者判斷。

人坐在 AOI 後面。那正是 AI 進入的地方

一條量產 SMT 線

節拍約 13–22 秒/板 · 每線 3–5 台 AOI



來源： 公開申報文件與廠商資料（華勤、光弘、思泰克等）；由作者彙整。

約 97–99% 的 AOI 警報是誤報

AOI 每 100 次警報



今天：人工逐個複判

每次 42–55 秒

一條高產線每班約 448 次誤報

→ 每班 5.2–6.8 小時 ≈ 1 名全職複判員

案例實配每班 2 人

AI 複判：先關掉誤報，剩餘交人工

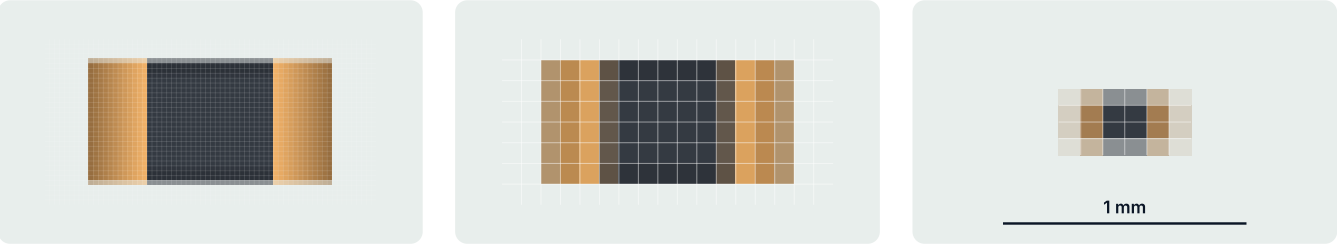
誤報或複判工時削減 60–90%（廠商說法）

頭部 EMS 自建標竿：覆蓋 ≥95% 報錯元件，漏失 <20 PPM，人工複判減少 ≥85%

失效即放行給人工，不停線

來源： 西門子案例研究、iFactory（廠商說法）、光弘 2025 年報；複判工時由作者估計。

通用相機不是 AOI



AOI：8–20 微米/像素
0402 約 100×50 像素

4K 相機看 300 mm 整板：約 78 微米/像素
0402 縮到只剩約 13×6 像素：僅夠判斷有無與明顯偏移

同一台相機看 01005
約 5×3 像素：等於看不見

- **AOI：** 每像素 8–20 µm，多角度多色光源與結構光
- **4K 相機看 300 mm 整板：** ≈78 µm/像素；0402 元件約 13×6 像素，僅夠判斷有無，不足以判斷焊點
- **01005：** ≈5×3 像素，形同看不見
- **因此：** AI 在 AOI 自己的影像上運作；它不會取代光學鏡頭

來源： Circuits Assembly；作者針對 300 mm 整板與 4K 感測器的計算。像素網格為示意。

不連網部署：小盒判定，機房回答



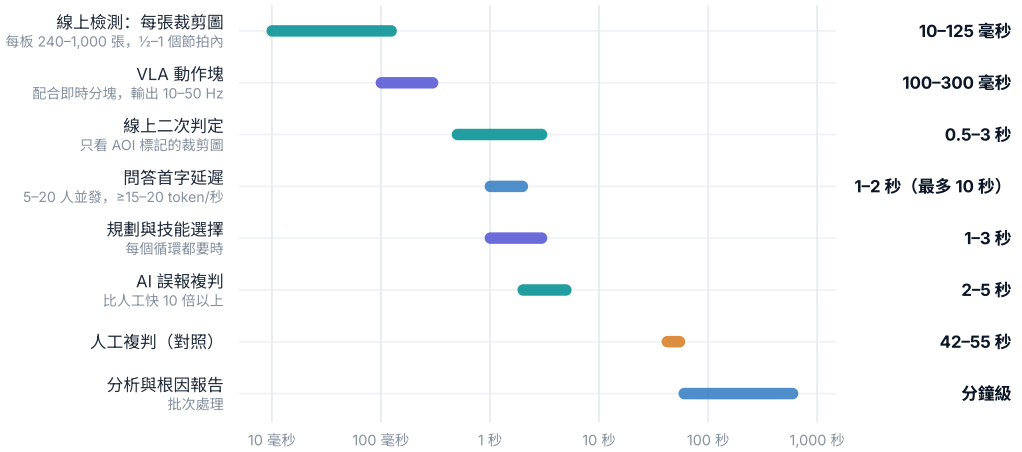
來源： 作者綜合整理（第 2 章）。

潔淨與靜電分區決定算力放哪；速度門檻取決於用途

潔淨要求 →

普通 SMT/PCBA 車間	潔淨室 ISO 7–8	局部微環境 ISO 5–6	晶圓廠 ISO 5 及更潔淨
靜電防護區（約 ISO 8 等效） 濕度宜 40–60%	醫療、鏡頭模組、電動車電子 潔淨室 + 靜電防護	裸晶片、打線、光學工位 微環境	SEMI E78 靜電 · E187/E188 網路安全 晶圓廠專項方案
線邊計算 接地金屬外殼的無風扇盒子，靠近 AOI 或複判站	**線邊計算** 無風扇、IP65/66 密封、表面易清潔；索取 ISO 14644-14 資料	**線邊計算** 只放相機和光源，處理盒放在外面	**線邊計算** 只用隨機台整合、經晶圓廠認證的控制器
GPU/NPU 伺服器 機房或空調 IT 機櫃	**GPU/NPU 伺服器** 潔淨室外，網路進潔淨室	**GPU/NPU 伺服器** 機房	**GPU/NPU 伺服器** 下層設備區液冷機櫃或資料中心

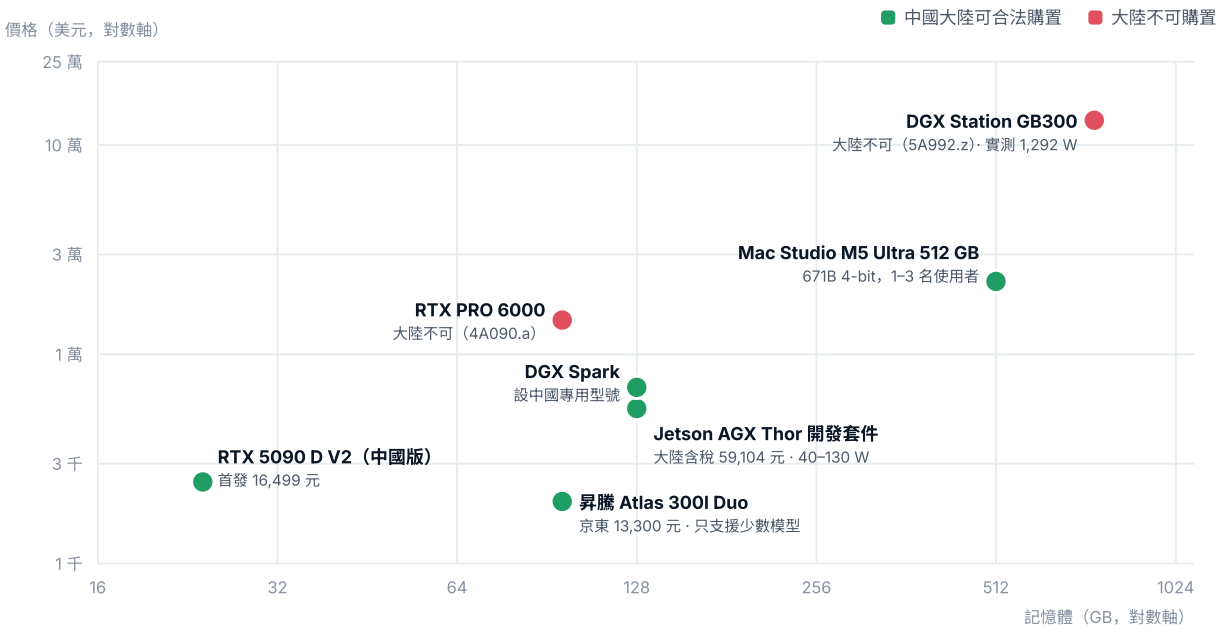
每項任務允許的處理時間（對數軸）



重點 普通 SMT 車間是靜電防護區，不是分級潔淨室：接地金屬外殼的無風扇盒子放在 AOI 或複判座旁，GPU 伺服器從不上產線。

來源： ANSI/ESD S20.20、IEC 61340-5-1、ISO 14644、SEMI 標準與廠商資料；由作者彙整。 作者綜合整理（第 1–2 章）。

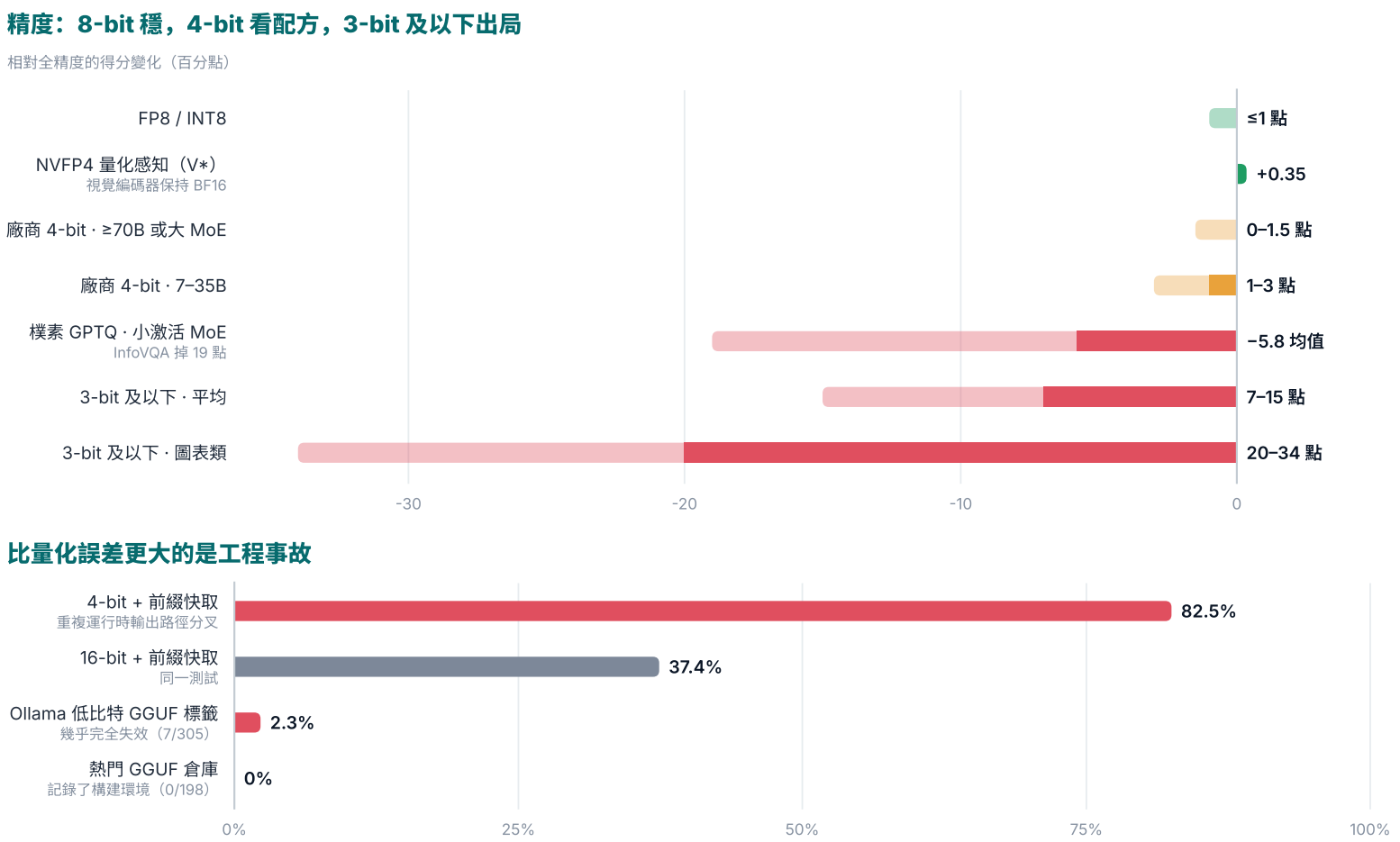
出口管制在基準測試之前就先決定了硬體候選清單



- **Jetson Thor：** 128 GB、40–130 W；在 AOI 裁剪圖上跑 2–8B 視覺模型，即時跑 3B 級 VLA；中國含稅人民幣 59,104
- **Mac Studio 512 GB：** 4-bit 的 DeepSeek 671B，供 1–3 名使用者
- **DGX Station：** 5A992.z，中國大陸不可用；743B 模型供 32 名使用者各約 4 tokens/s
- **國產加速器：** 兩台八卡昇騰伺服器，供全尺寸多人問答

來源： NVIDIA 出口分類、蘋果、RS China、京東與評測價格（2026 年 11 月）。 StorageReview（2026 年 8 月與 10 月）；ServeTheHome。單一來源獨立測試。

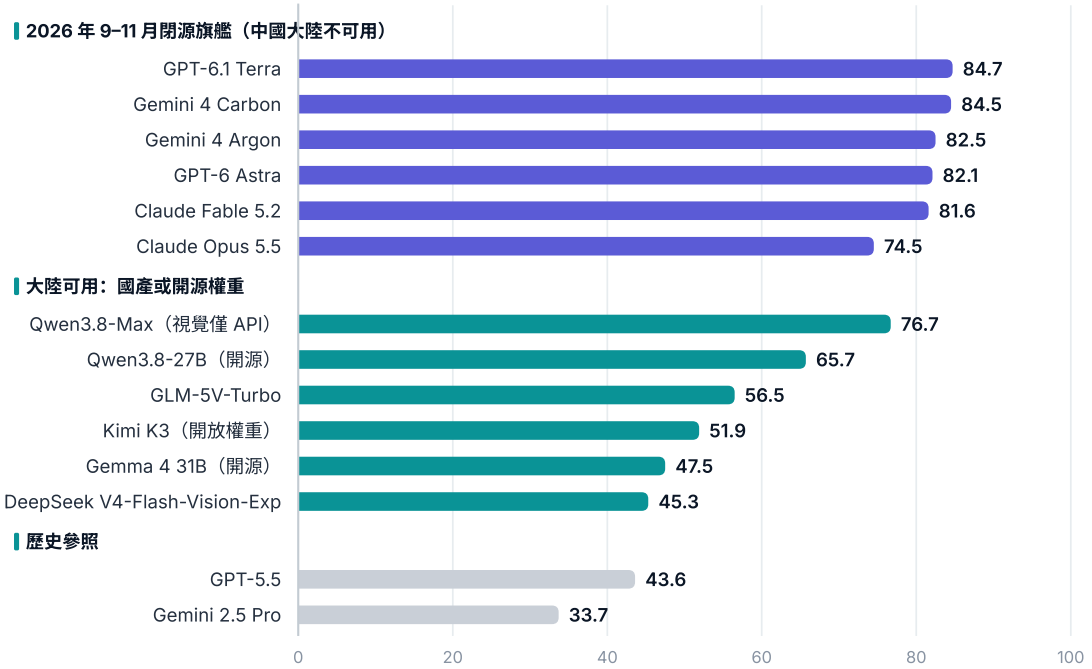
量化：8-bit 安全，4-bit 看配方，3-bit 及以下出局



來源： NVIDIA Nemotron 模型卡、VLMQ、VEQ、arXiv 2609.05881、2610.19498、2609.04748 等。

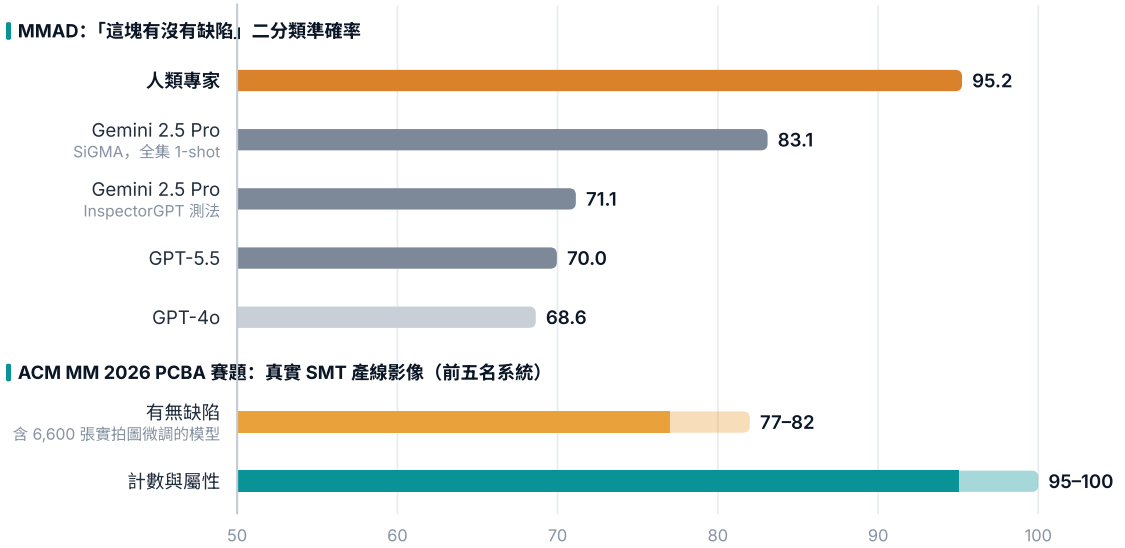
通用視覺一代翻倍；工業缺陷分數卻缺席

Roboflow 通用檢測 mAP@50



工業缺陷基準（MMAD、MVTec AD 2、VisA、Real-IAD、UniPCB）：以上 2026 年旗艦 0 個公開成績
通用檢測分數一代翻倍，但不能代替缺陷判斷；須在本廠金標準集上實測

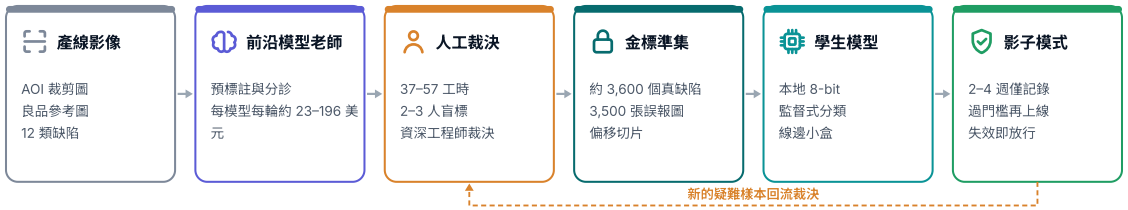
準確率或得分（%）



來源： Roboflow Vision Evals；模型發行說明；MMAD、MVTec AD 2 等基準頁面（截至 2026 年 11 月 11 日）。 MMAD；SiGMA；InspectorGPT；ACM MM 2026 PCBA 賽題。

前沿模型預標註，人工裁決，金標準集把關

檢測：前沿模型當「預標註機」，人工裁決，金標準把關



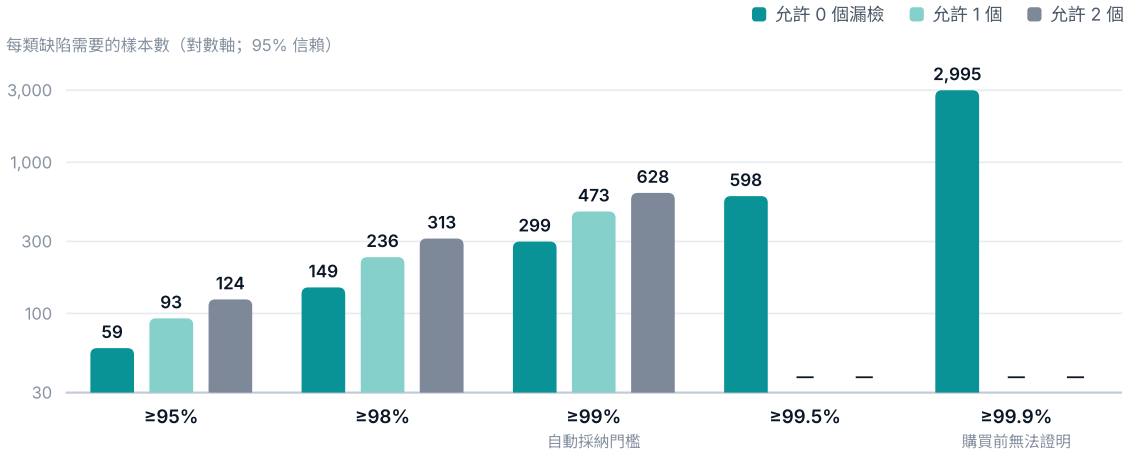
自動採納老師標籤的門檻

某類缺陷 ≥299 個且零漏檢（95% 信賴下召回 ≥99%），模型與真值的一致性不低於人與人；否則老師只做預標註

控臂：老師仍是人類示範、真機強化學習與模擬

前沿模型只在離線寫程式、換型時幫忙



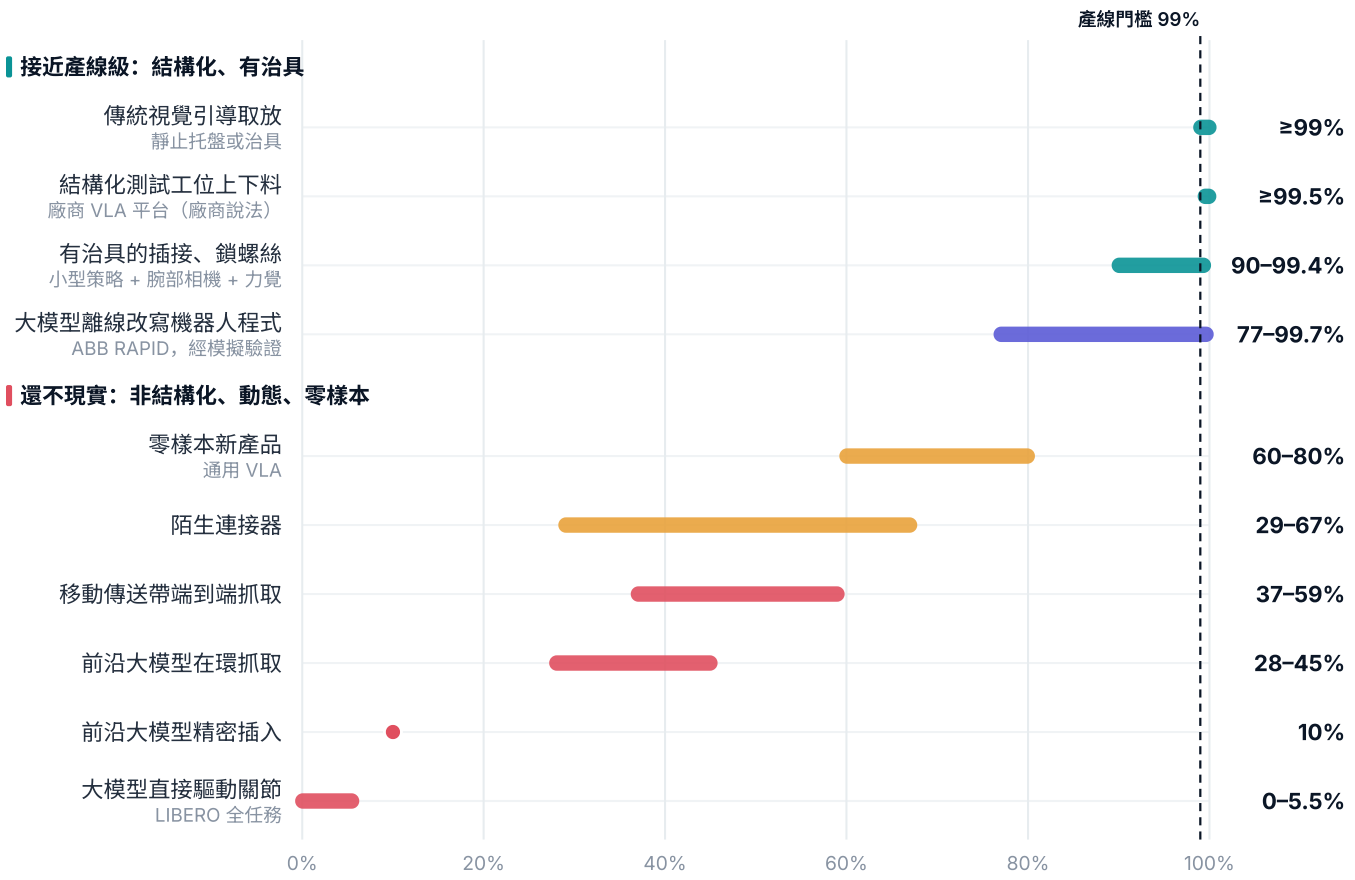


重點 僅在 ≥299 個金標準缺陷零漏檢（95% 信賴下 99% 召回）的類別自動採納老師標籤；短路、缺件、極性等關鍵類別需更高標準。

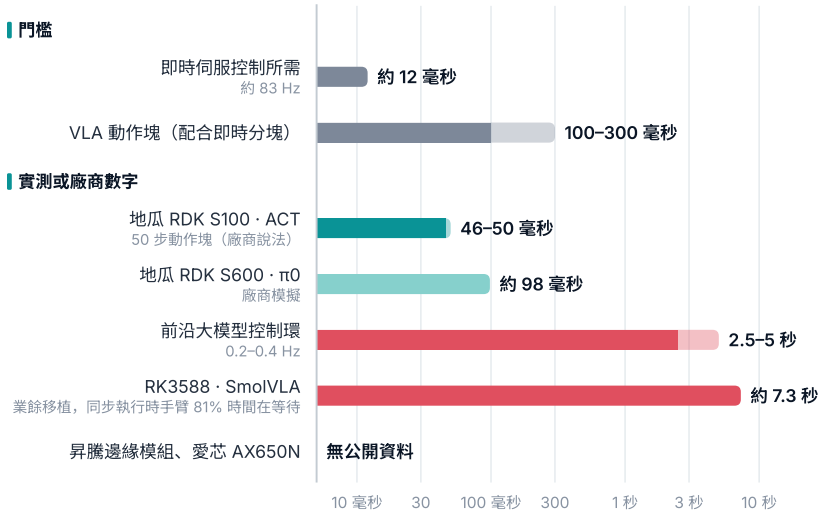
來源： 作者綜合整理（第 3 章）；成本與樣本數為估計。 精確二項式信賴區間（95%）。

機器人學生：只有工位結構化時才接近產線級

任務成功率

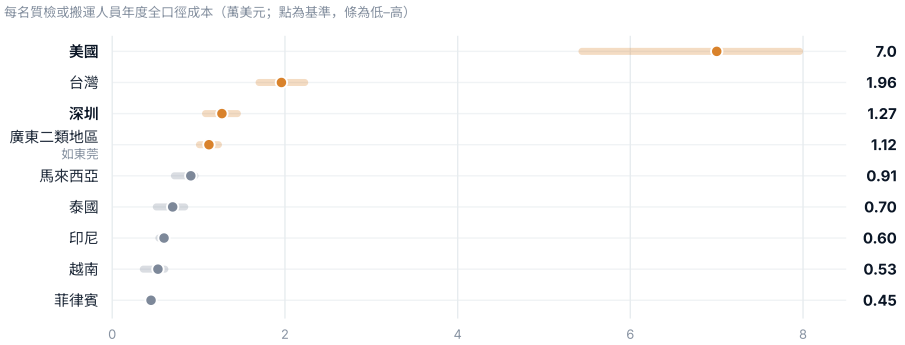


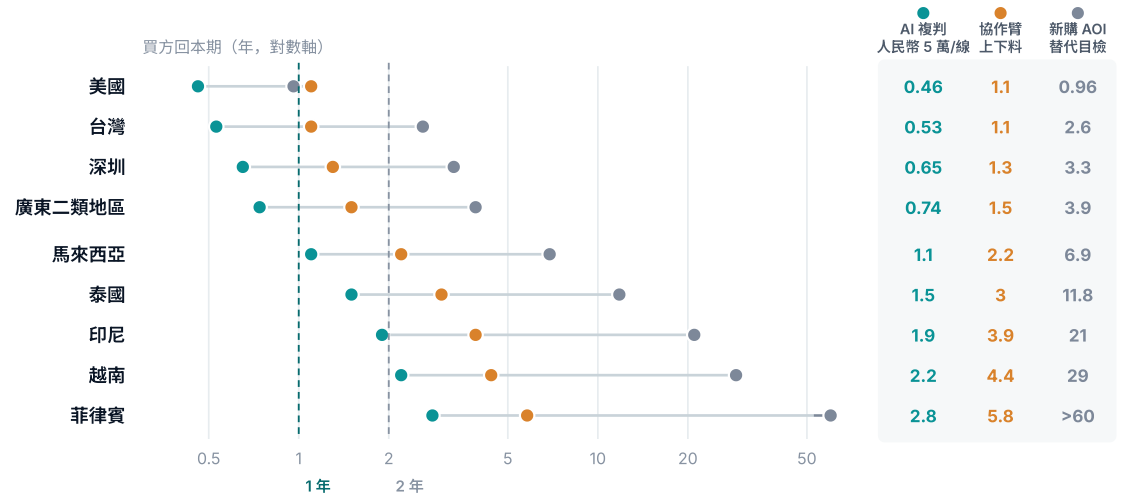
每個動作塊或控制週期的推理延遲（對數軸）



來源： 第 3 章引用的論文與廠商資料；部分數字為廠商說法。 地瓜文件與論壇（廠商數字）；GitHub 社群移植；Anthropic 研究。

AI 複判數月回本；上下料約一年回本



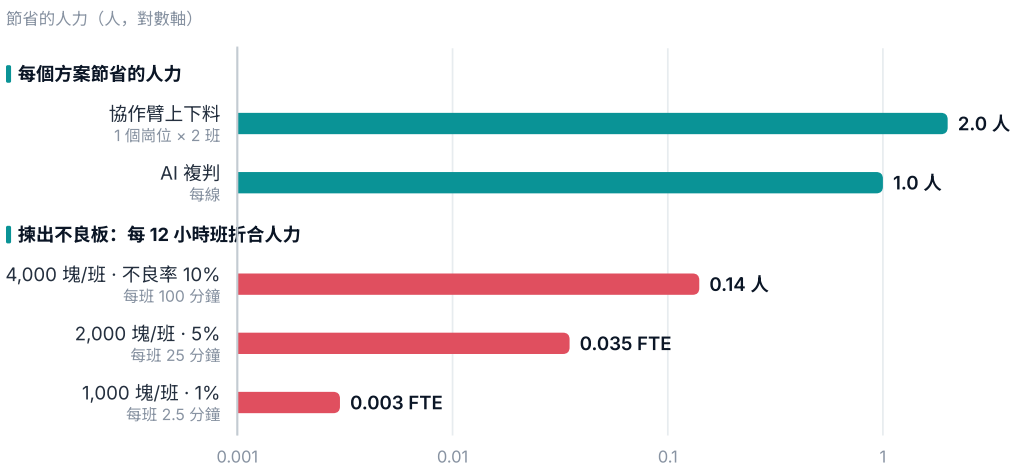


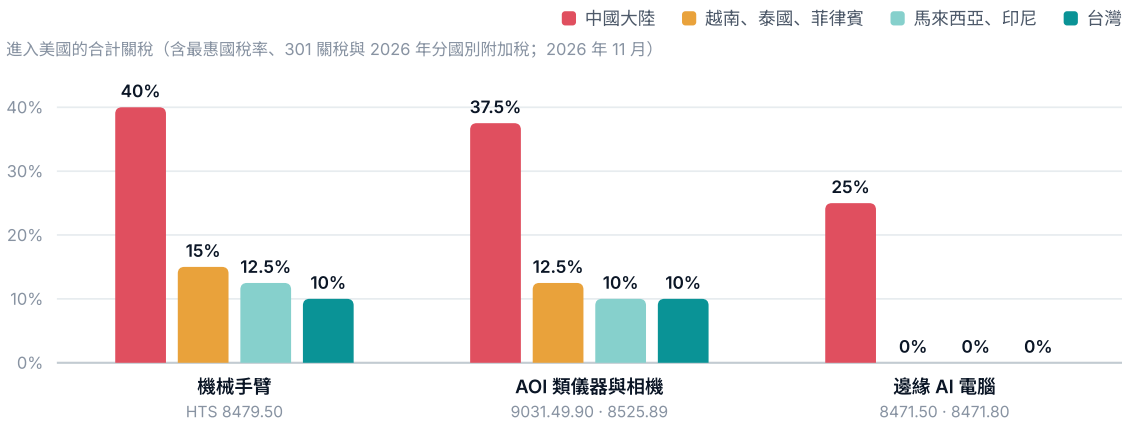
只為揀出不良板加裝機械手臂：所有地區都不回本
直通率 90% 以上時，每班揀出只佔 0.003–0.14 個人力（見圖 20）

重點 每線人民幣 5 萬元，AI 複判在美國 0.46 年、台灣 0.53 年、深圳 0.65 年、越南 2.2 年回本；兩班制協作臂上下料單元 1.1–1.5 年回本 [estimates]。

來源： 深圳官方工資指引、台灣勞動部、JETRO、BLS；作者估計。 作者模型：每線人民幣 5 萬 AI 複判盒；協作臂上下料單元人民幣 20 萬或 14 萬美元，兩班制。

揀出機械手臂永不回本；手臂產地決定其美國關稅





重點 直通率 90% 以上時，揀出 NG 板每班只佔 0.003–0.14 個人，NG 分流器或暫存機即可；大陸製手臂還要付約 40% 的美國合併關稅。

來源： 作者估計。 USITC 協調關稅表第 99 章；聯邦公報；USTR（2026 年 11 月）。

真實但很小：1.6 萬條可服務的線，一次性 ≈人民幣 3.2 億，約五年窗口

大陸 SMT 線（2026）
4.0 萬條
3.5–4.6 萬

× 80% × 50%
未啟用 AI 複判 75–85%
第三方可觸達 40–60%

第三方可服務的線
1.6 萬條
1.05–2.35 萬

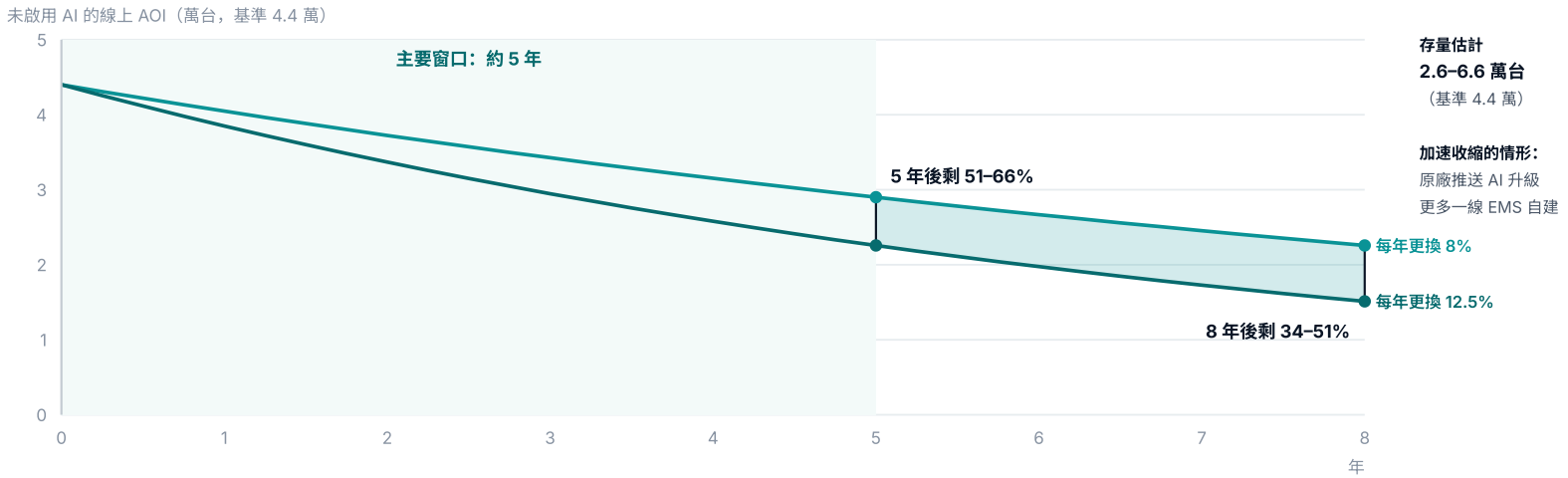
× 人民幣 2 萬元/線
每線一次性人民幣 1–3 萬元

一次性存量市場
人民幣 3.2 億元
人民幣 1.05–7.05 億

÷ 約 5 年
窗口每年縮小 8–12%

按約 5 年窗口攤
RMB 64M/yr
人民幣 0.21–1.41 億

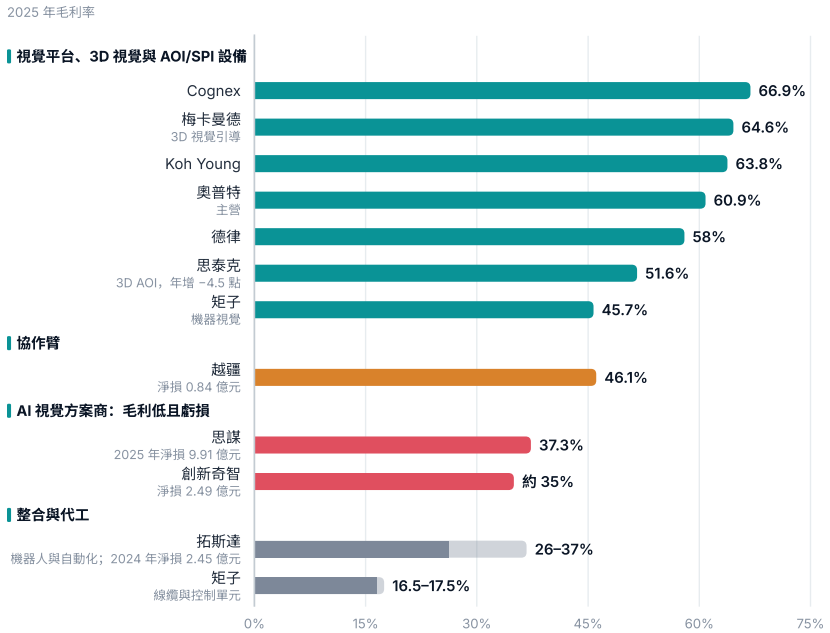
新進入者 3 年拿下可服務線的 2–5%：約 320–800 條線，每年約人民幣 200–500 萬元
訂閱制（每線每年人民幣 0.5 萬元）則為 160–400 萬元/年的經常性收入；這個細分每年只相當於 IDC 中國工業 AI 質檢預測的 0.3–2.3%



來源： NVR（2020 基準）；作者估計。 作者估計；裝機存量與份額未獨立核實。

複判楔形市場被合圍；毛利在產品化硬體

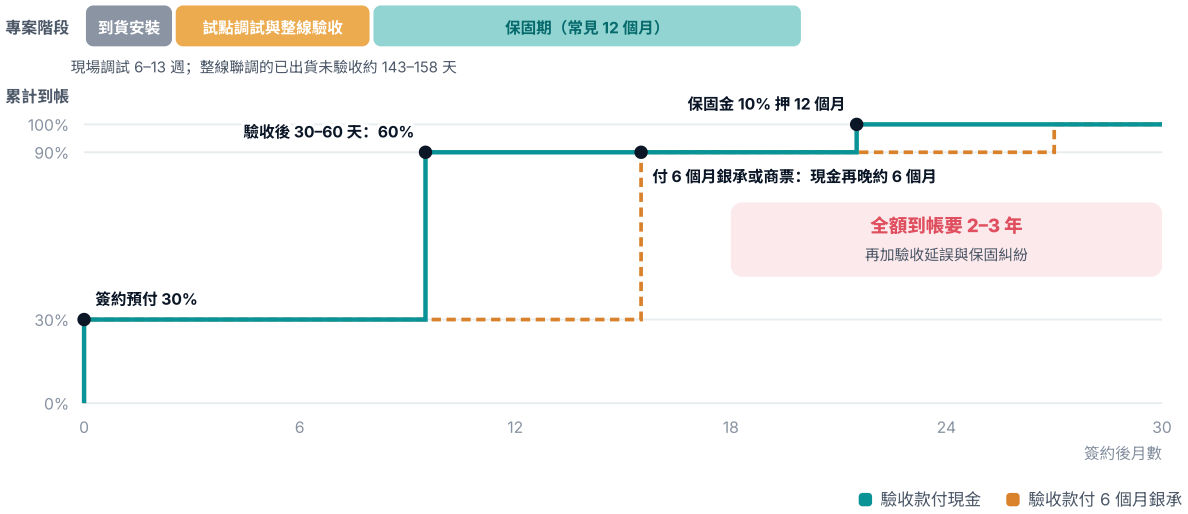


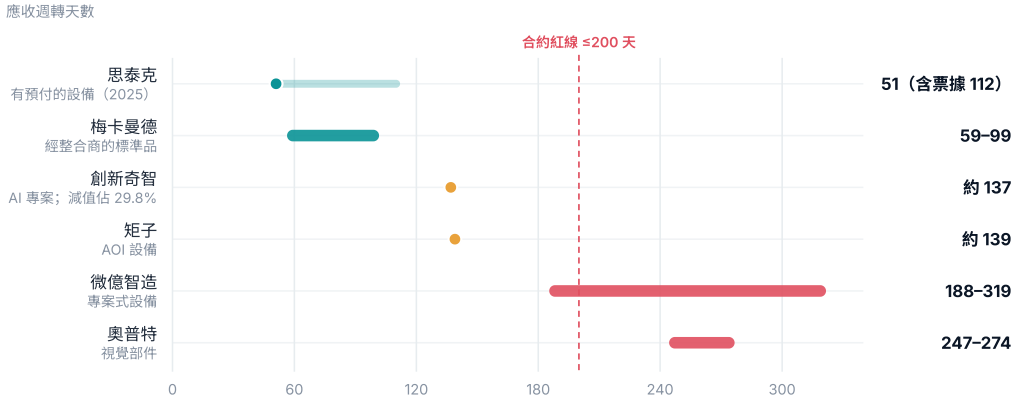


證據 頭部 AI 視覺方案商 2025 年營收人民幣 10.86 億元、淨損人民幣 9.91 億元；最接近的上市可比公司 3C 營收在 2026 年 1–5 月年減 79.9%。

來源： 矩子、思泰克與光弘年報；海康與思謀公開資料；由作者彙整。 2025 年報或招股書。

買方按 30/60/10 付款；全額到帳需兩到三年





重點 30% 隨訂單到帳，60% 約在四到九個月後，最後 10% 約在 16–21 個月後；從大型 EMS 的首次試點到全額收款可能需要兩到三年 [estimate]。

來源： 思泰克問詢回覆、梅卡曼德、GKG、JT 等申報；示意為常見條款，時程為估計。 公司申報；應收帳款（含合約資產）÷ 營收 × 365。

離線規劃，以小策略執行，運動與安全保持確定性

層級	做什麼，證據到哪一步	時間尺度 · 誰掌握
規劃層 L4	**前沿大模型（離線）** 離線寫或改機器人程式、換型、異常解釋 改寫 ABB RAPID 程式 77–99.7%，經模擬驗證後下發 控制環只有 0.2–0.4 Hz：不進即時環	秒到分鐘 模型巨頭
技能 / 策略層 L3	**ACT、擴散策略、小型 VLA** 有治具的結構化工位 90–99.4% 端側晶片：Jetson Thor、地瓜 RDK、昇騰、瑞芯微	動作塊 100–300 毫秒 晶片商 · 本體廠商
運動控制層 L2	**機器人控制器** 軌跡規劃、伺服、力控與碰撞檢測 確定性程式，學習型策略只給目標	毫秒級（即時約需 83 Hz 以上） 本體廠商
安全層 L1	**安全 PLC、掃描器、力與速度限制** 按 ISO 10218-1/-2:2025 與本地標準認證 機器學習不進安全功能：歐盟 2027 年 1 月 20 日起需公告機構評估	硬即時 認證本體 + 整合商

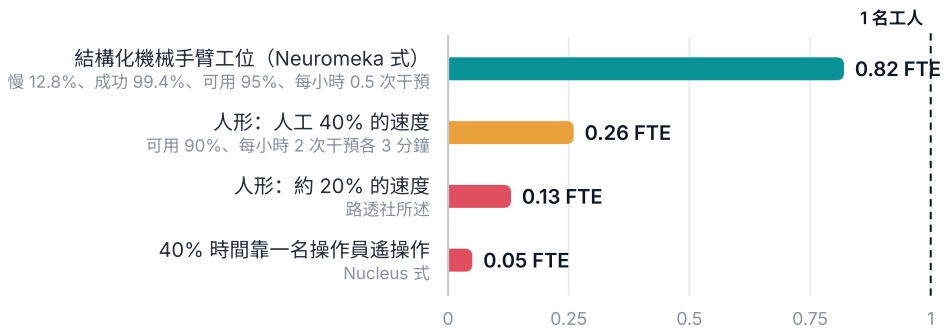
小企業的機會在整合與感測硬體：把學習型感知和小策略做進經認證的機器人單元，逐個工位落地

	成功率	節拍	干預 / 遙操作	可用率 / 故障	運行量
Figure 02 @ 寶馬	僅目標 每班 >99%	僅目標 84 秒	僅目標 每班 0 次	未揭露	1,250 小時
Agility Digit @ GXO	未揭露	未揭露	未揭露	未揭露	10 萬個週轉箱
Apptronik Apollo @ 賓士	未揭露	未揭露	未揭露	未揭露	未揭露
Agile ONE @ 奧迪	未揭露	未揭露	未揭露	未揭露	未揭露
Nucleus（未具名工廠）	未揭露	未揭露	約 40% 遙操作*	未揭露	約 2 小時影片
智元 G2 @ 龍旗	99.99%	18–20 秒/工序	未揭露	一次故障 2 分鐘	64 小時以上
Neuromeka 混合工位	322/324	慢 12.8%	未揭露	未揭露	324 個循環
π0.6 @ 客戶現場	—	—	96.4% 自主	未揭露	1 個班

* 計算方法未揭露

已揭露（多為廠商說法） 只公布目標 未揭露

每台機器人每班淨替代的人力



來源：作者綜合整理（第 3、6 章）與估計；ISO 10218:2025；歐盟機械法規；BMW、Figure、Agility、Mercedes-Benz 等公開資料。

窄做，先在廠方自己的影像上驗證，再擴展

要做

為配備舊款或多品牌 AOI 的中型 EMS，在 AOI 影像上做 AI 複判與缺陷分類；AOI 覆蓋薄弱的檢測；每個零件都要搬運的協作臂單元

不做

通用的「AI + 機械手臂」平台；以大語言模型當主檢測器；SMT 線上的揀出機械手臂；人形機器人與機器人即服務；控制環或安全功能中的前沿模型

試點

1. **第 0–2 週：** 資料協議、缺陷分類、基線
2. **第 1–4 週：** 金標準集，盲標與裁決
3. **第 2–4 週起：** 影子模式，逐類比較
4. **第 4–8 週：** 僅在通過門檻的類別上輔助運行
5. **然後：** 書面驗收，逐線擴展，每次變更都重新驗證

安全 安全功能內不放機器學習：歐盟自 2027 年 1 月 20 日起要求公告機構評估，AI 認證路徑在 2027–2029 年前不會底定。

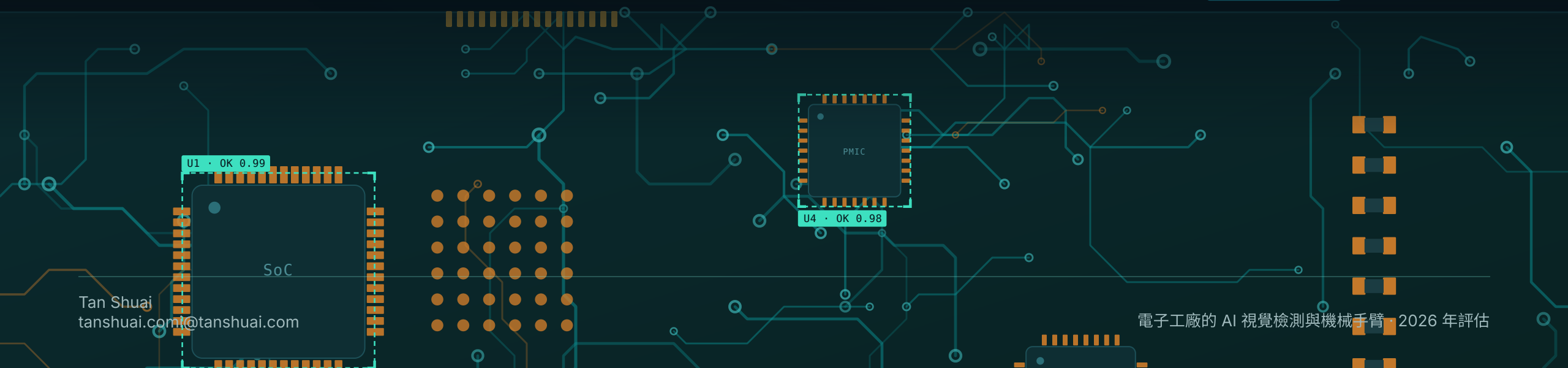
來源：報告第 6–7 章與執行摘要；ISO、IEC、UL、EUR-Lex、SAC 與各國法規資料庫。

關於作者

Tan Shuai

技術人與創辦人，擁有二十多年橫跨晶片、硬體與系統軟體的經驗，並持有 20 項已授權專利。他的工作足跡遍及矽谷、紐約、芝加哥、台灣、大灣區（深圳與香港）、越南與馬來西亞，長期專注於先進製造與供應鏈。他目前擔任 AI 研究員與開發者，專注於 AI 在工廠現場的實際應用。

完整報告（所有圖表、表格與來源）與文章都在 tanshuai.com。歡迎與從事製造業 AI 的人交流：i@tanshuai.com



Tan Shuai
tanshuai.com · i@tanshuai.com