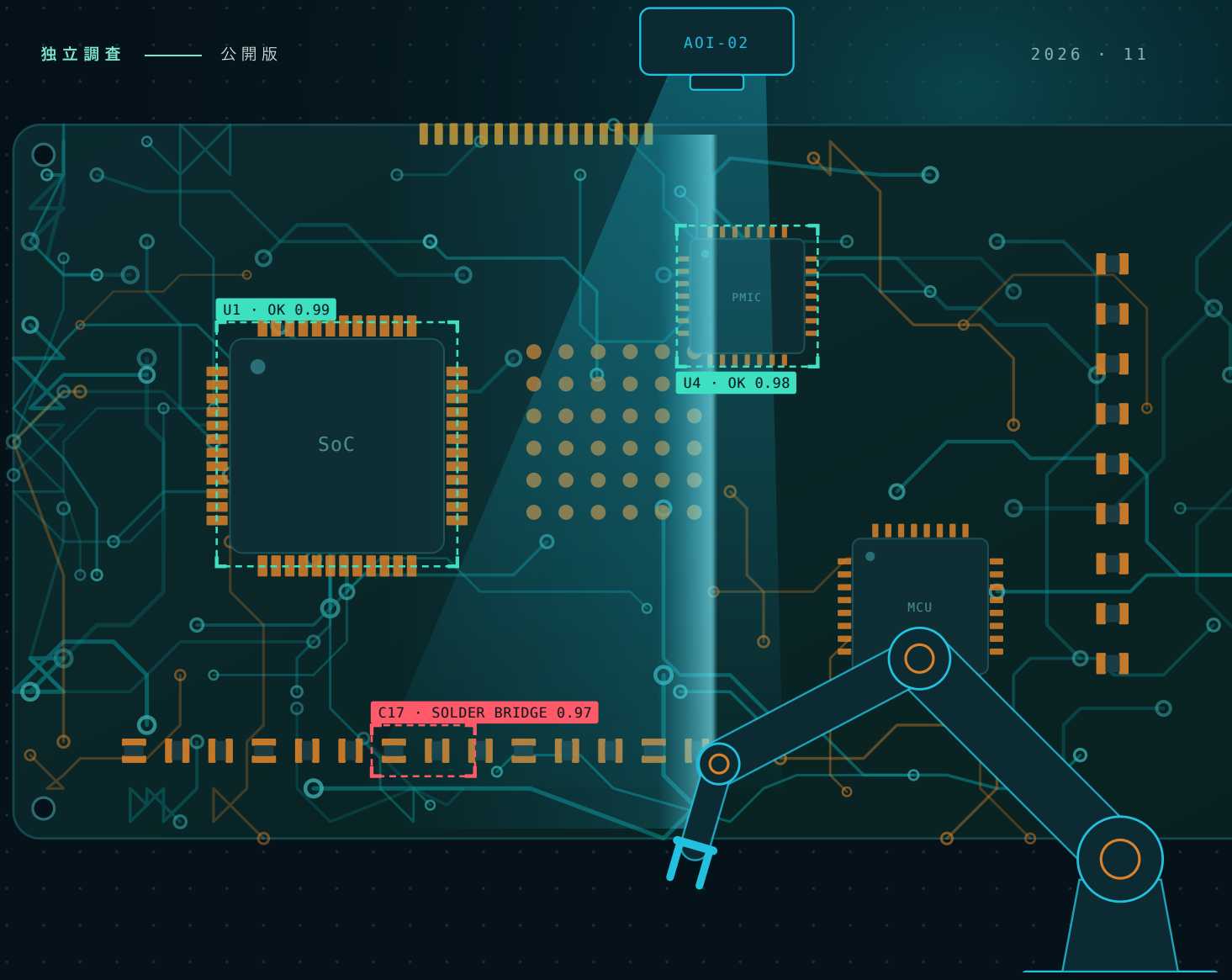


電子機器製造 · AI検査 × ロボティクス

電子機器工場におけるAI外観検査とロボットアーム

2026年評価

主流の構成 · 地域別実現可能性 · オンプレミス展開 · 教師–生徒モデル
投資回収 · 競合 · パイロットでしか答えられない問い

主要な発見

AI再判定は、限定的にだが取り組む価値がある。具現化ロボットアームは待てる。

Tan Shuai
tanshuai.comi@tanshuai.com

データ基準日：2026年11月11日
Mainland China · Taiwan · Southeast Asia · United States

目 次

目次



◆ **エグゼクティブサマリー** 6

01 **今日のライン** 7
今日の電子機器工場が動かすもの、そして技術的に実現可能なこと

02 **オンプレミス** 14
工場内でのAI運用：クリーンルーム、エアギャップ、ハードウェア、量子化

03 **教師と生徒** 23
教師と生徒：最前線モデルは検査データをプリラベルできる。ロボットアームの本当の教師は依然として人

04 **コストと回収** 32
コストと回収：AI再判定は数か月、機械搬入出は数年、ピックアウトアームは回収不能

05 **市場と競合** 39
市場、競合、そして買い手の支払い方

06 **具現化AI** 48
具現化AI：まずロボットの教え方を変え、後に動き方を変える

07 **未解決の問い** 54
公開情報では答えられない問い、そしてパイロットがどう決着させるか

◆ **著者について** 56
Tan Shuai

本文中の信頼度タグ

- verified　2つ以上の独立した情報源、または2つの独立した一次文書が一致する
- single source　一次文書を含む、ただ1つの情報源のみ
- vendor claim　製品またはサービスの販売元が公表したもの
- estimate　引用データに基づく筆者の計算または推論

本レポートの読み方

主要な数値には信頼度タグが付いている。verified は2つ以上の独立した情報源、または2つの独立した一次文書が一致することを意味する。single source は（一次文書を含む）ただ1つの情報源のみであることを意味する。vendor claim は、広く流布されていても、製品またはサービスの販売元が公表したものであることを意味する。estimate は、引用データに基づく筆者自身の計算または推論であり、その入力は出典付きである。「一次」は情報源の種類（年次報告書、目論見書、規制、規格、公式統計）を表し、信頼度クラスを変えるものではない。情報源が矛盾する場合は、数値を並記し平均は取らない。通貨換算には2026年11月9日の中国人民銀行の中心レート、$1 = RMB 6.7188（Xinhua）を、Taiwanについては同日のSMBCの裁定値、$1 = NT$32.12（SMBC）を用いる。Mainland Chinaの労働・補助金データは、電子機器製造が最も集中するPearl River Delta（公式賃金データはShenzhen）を用い、比較としてYangtze River Deltaを用いる。業界インタビューに基づく主張は、検証すべき主張として扱い、決して事実とはしない。公開情報では答えられない問いは第7章にまとめた。

図

図

01	今日の工場現場で AI が入り込む場所	6
02	量産 SMT ライン：人は AOI の後ろに座る	8
03	AOI アラームの約 97–99% は誤報	9
04	汎用カメラは AOI ではない	10
05	エアギャップ構成の展開	14
06	清浄・ESD ゾーンが計算機の設置場所を決める	15
07	用途別の速度限界	17
08	オンプレ計算：メモリ、価格、中国本土で合法的に買えるもの	18
09	大きなワークステーション 1 台は共有アシスタントにならない	19
10	量子化：8-bit は安全、4-bit はレシピ次第、3-bit 以下は失格	20
11	教師候補：汎用スコアは一世代で倍増	24
12	「欠陥はあるか」は汎用モデルには依然難しい	25
13	2 つの教師–生徒パイプライン	26
14	ゴールデンセットの必要サイズ	27
15	エッジポリシーの遅延	29
16	ロボット生徒：構造化された工程でのみ生産級に近づく	30
17	検査・搬送作業者 1 名の年間コスト	33
18	価格レンジ	34
19	地域別の回収期間	36
20	不良板のピックアウトが割に合わない理由	37
21	ロボット・AOI・エッジコンピューターの米国関税	38
22	市場規模は 10 倍以上も異なる	40
23	ボトムアップ：40,000 ライン → 対象 16,000 → 一括約 RMB 320M	41
24	改造ウィンドウは約 5 年	42
25	再判定の楔は三方から包囲される	42
26	利益率は製品化されたハードウェアにある	44
27	買い手の支払い方法	45
28	売掛債権回転日数	46
29	具現化 AI スタック	48
30	工場内ロボット導入が実際に開示するもの	49
31	ロボット 1 台あたりの純代替人員	50
32	標準と規制のタイムライン	51

主要な発見

結論：電子機器工場にとって、2026年に成熟し、工場が実際に支払うのは、AOI画像でのAI再判定とニッチ検査、それにプログラムされたロボット機械搬入出であり、「基板を見る大規模モデル＋それらを取り出す具現化ロボット」ではない。

0.46–0.65 年
US、Taiwan、Shenzhenにおける、RMB 50k/ラインでのAI再判定の回収期間

≥95% · <20 PPM
大手EMSの内製AI再判定のカバレッジと流出：ティア1 EMSへ販売するための基準

100–700 RMB M
Mainland Chinaにおけるサードパーティ後付け対応市場（一括、約5年の期間）

0 件
2026年11月の最上位モデルに関する産業欠陥ベンチマークの公表スコア：検査官ではなく教師

1.1–1.5 年
US、Taiwan、Shenzhenにおける2シフトの協働ロボット機械搬入出セルの回収期間

0.003–0.14 FTE
SMTラインの不良板ピックアウト用ロボットアームがシフトごとに削減する労力：回収は不可能

検査
ROI

既存のAOIが既に生成している画像に教師あり深層学習を適用すれば、誤報または再判定工数を60〜90%削減できる（ベンダー主張）。大手EMSであるDBGは年次報告書で、自社開発システムがフラグされた部品の95%超をカバーし、流出が20 PPM未満、人手による再判定を85%以上削減したと報告している。これこそが、ティア1 EMSに販売するためにサードパーティ製品が超えなければならない基準である。RMB 50,000/ラインでは、AI再判定はMainland China、Taiwan、USで1年以内に回収でき（Shenzhen 0.65年、Taiwan 0.53、US 0.46）、協働ロボットの機械搬入出セルは1.1〜1.5年、Southeast Asiaでは2〜6年。一方、不良基板を取り出すためだけにSMTラインに追加するロボットアームは、どこでも回収できない。直通率90%を超えると、取り出し作業はシフトあたり0.003〜0.14人分にすぎないためである estimate 。

モデル
ロボット

マルチモーダル大規模モデルは依然として主検査器にはなれない。2026年11月11日時点で、最上位モデル（Claude Fable 5.2、GPT-6.x、Gemini 4、Qwen3.8ほか）のいずれも、産業欠陥またはPCBベンチマークで公表スコアを持たず、ACM MM 2026 PCBAチャレンジでは、実ライン画像6,600枚で学習した上位5システムが「欠陥があるか」で77〜82点しか取れていない。最前線モデルができるのはプリラベルとトリアージまでである。ロボットアームについては、本当の教師は依然として人のデモ、実機での強化学習、シミュレーションである。生徒は、治具で固定された構造化された工程では90〜99.4%に達するが、移動コンベア、未知の部品、新製品では30〜80%にすぎない。最前線エージェントは準静的な実機タスク108件中104件を完了したが、1件あたり280秒かかった。

オンプレミス
展開

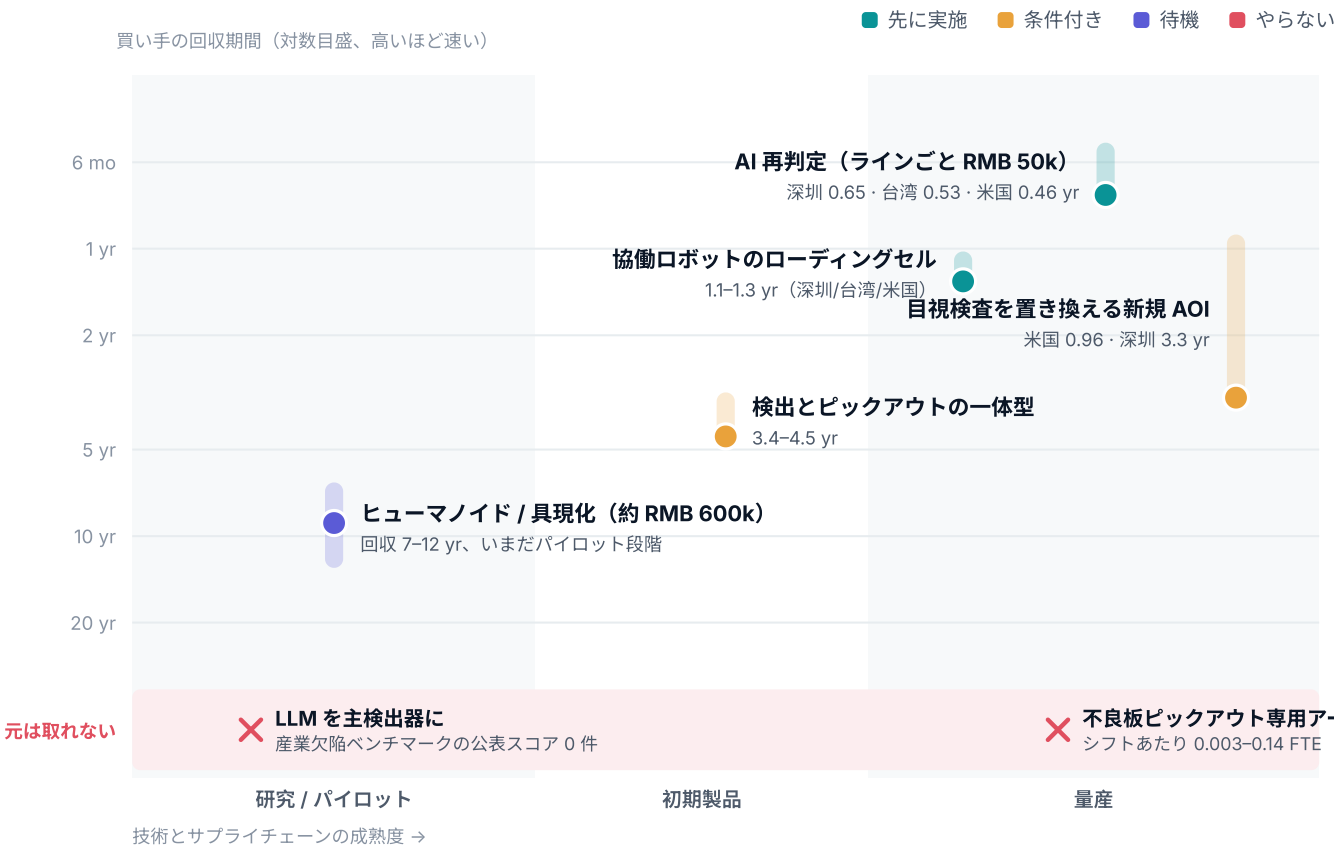
クリーンで管理された工場でのエアギャップ展開は完全に実用的である。通常のSMTホールは格付けクリーンルームではなくESD保護区域であることが多い。ファンレスのJetsonまたは国産NPUボックスをラインに置き、GPUサーバーはサーバールームに置く。NVIDIA自身の輸出分類では、Jetson ThorとDGX Sparkは通常のMainland Chinaの工場にUSライセンスなしで販売できるが、DGX Stationはできない。精度のデフォルトは8-bit。ベンダーの量子化アウェア4-bitは条件付きで使用可能。3-bit以下は論外である。

市場
競合

市場は実在するが限定的である。Mainland Chinaには約35,000〜46,000のSMTラインと、AIを実行していない約26,000〜66,000台のインラインAOIがある。サードパーティ後付けの対応市場は一括で約RMB 100〜700M、期間は約5年で、AOIメーカーは既に新機種に再判定機能を組み込み始めている estimate。競合は既に強い。再判定の楔はAOIメーカー、EMSの内製チーム、プラットフォームベンダーに包囲され、利益は製品化されたハードウェアにある。

問い	判断	主要数値（出典と信頼度は各章に記載）
① 主流の電子機器工場は今日何を動かしているか	量産SMTラインは「3D SPI＋リフロー前後のAOI＋抜取X線＋ICT/FCT＋修理・外観検査」であり、各AOIの後ろで人が再判定する。AIは3つの経路で再判定に入る。AOIメーカーによる内蔵、大手EMSによる内製、サードパーティによる追加である。組立と搬送ではアーム、SCARA、AMRが学習済み知覚とプログラムされたモーションを使う。具現化AIは依然としてパイロット段階	タクト≈13〜22秒/基板。あるODMは18ラインにRMB 30.6MのAOI予算を計上、≈3〜5台/ライン。AOIアラームの≈97〜99%は誤報
② 技術はどこまで進むか、金でゼロ人を買えるか、各地域は何を使えるか	検査は「専用検出器＋AI再判定＋少数の人」として産業グレードであり、無制限の資金でもゼロ人には到達しない。Mainland Chinaは国産モデルまたはローカルなオープンウェイトのみを使用。Taiwanの民間工場はほぼ何でも使えるが、ファブと重要インフラは実際上Mainland Chinaブランドを排除。Southeast Asiaは制約が最も少ない。USはフルスタックに加えて関税と認証	AI再判定は誤報または再判定工数を60〜90%削減 vendor claims。基板全体を撮る4Kカメラは≈78 µm/ピクセルに対し、AOIは8〜20 µm。Mainland China製アームは≈40%のUS合算関税、AOI型機器は≈37.5%
③ クリーンルームやエアギャップ工場でオンプレミス運用できるか、どのハードウェアで、十分な速度と精度か	可能。制約は計算ではなく手続き面にある。ラインには≤100 Wのファンレスボックス、GPUサーバーはサーバールーム。工程にはThor、工場Q&AにはMac Studioまたは国産アプライアンス。Mainland ChinaにDGX Stationは不可。モデルサイズがタスクに合えば速度は十分。8-bitを維持し、ベンダーの量子化アウェア4-bitを条件付きで使い、3-bitは使わない	Thor上の8Bビジョンモデルでクロップあたり≈0.5秒 estimate。Thor開発キットはChinaでRMB 59,104。DGX Stationは$123〜140k、743Bモデルで32ユーザー合計139 tokens/s
④ 最新の最上位モデルは数十ラウンドにわたる教師として機能し、フレキシブル製造やロボットアームを含めてローカル生徒へ蒸留できるか	検査：プリラベルとトリアージ。ゴールデンセットで「欠陥≥299個・漏検ゼロ」のクラスのみ教師ラベルを自動採用。ロボット：教師は依然として人のデモ、実機RL、シミュレーションであり、生徒は構造化された工程でのみ生産グレードに近づく	11月の最上位モデルは産業欠陥スコアを持たない。生徒は学習済みコネクタで97.8%、未知のコネクタで29〜67%、移動コンベアで37〜59%。最前線モデルが関節を直接駆動するのは0〜5.5%
⑤ コストはいくらか、地域別のROIはどうか	AI再判定はMainland China、Taiwan、USで1年以内に回収。協働ロボット搬入出は1.1〜1.5年。Southeast Asiaは2〜6年。SMTラインのピックアウトアームは回収不能	RMB 50kの再判定ボックス/ライン：Shenzhen 0.65年、Taiwan 0.53、US 0.46、Vietnam 2.2 estimate。許容されるサードパーティ追加価格は≈RMB 10〜30k/ライン（一括）またはRMB 5〜10k/年
⑥ 競合は既に十分強いか、今始めるべきか待つべきか	需要は飽和していないが供給は混雑。OEMのAIが後付け期間を約5年に限定する。プラットフォームベンダーと正面から戦わず、チャネルパートナーを通じて狭い製品で今参入。具現化AIへの投資は2027〜2028年の生産データを待つ	Mainland ChinaでAI未導入のインラインAOIは≈26〜66k台、年8〜12%縮小 estimate。大手AIビジョンベンダーの2025年売上はRMB 1.086B、純損失RMB 991M。最も近い上場比較企業の3C売上は2026年1〜5月に前年比79.9%減少

FIG 01 ***今日の工場現場で AI が入り込む場所。AOI 誤報の AI 再判定と協働ロボットの機械搬入出は成熟し、回収も速い。専用ピックアウトアームや LLM を主検査器にするのは割に合わない。***



出典： 回収は筆者のモデル（第 4 章）；成熟度軸は筆者の判断。

作るべきもの、作るべきでないもの

	推奨
作る	AOI画像でのAI再判定と欠陥分類。旧型または複数ブランドのAOIを持ち、AOIメーカーからのAIアップグレードがない中堅EMS向け。SMT AOIが苦手とする検査（スルーホールと手はんだ、コンフォーマルコーティング、ケーブル、コネクタ、FPC、最終外観とネジ）。全パーツを搬送する協働ロボットのローディング/アンローディングセル（テスト治具、トレイ、梱包）。検査をアドオンとして。あらゆる主張の根拠となる、実ラインでのゴールデンセットとシャドウモード
作らない	汎用の「AI＋ロボットアーム」プラットフォーム。主検査器としてのマルチモーダルLLM。NG基板を取り出すためだけのSMTライン用ロボットアーム（NG分流装置またはバッファで足りる）。ヒューマノイドとロボット・アズ・ア・サービス。制御ループや安全機能に入る最前線モデル。「フルサイズ」モデルを動かすための工程でのGPUメモリの山積み。ファブ、Taiwanの重要インフラ、US防衛電子機器工場への直販
組む相手	AOIメーカーと販売代理店（チャネルと画像インターフェース。代理店はSinic-Tekの2025年売上の46.68%をもたらした）。協働ロボットメーカー（認定アームと安全機能）。10〜40ラインを持つEMS（段階的拡大と前受金）。Thailandなどのローカルインテグレーター（BOIの現地調達規則を満たすため）

今日のライン

01 今日の電子機器工場が動かすもの、そして技術的に実現可能なこと

標準的な量産ライン：複数のAOI、抜取X線、集中再判定、1基板13〜22秒

上場ODMの一次開示資料は、2025〜2026年の量産ラインが実際にどういうものかを示している。LongcheerのHong Kong目論見書（2025年9月30日までのデータ）は、SMT品質検査を「X線検査、はんだペースト検査（SPI）、自動光学検査（AOI）、PCBA機能テスト、外観検査」と列挙している。その工程フローは、リフロー前AOI、リフロー後AOI、抜取X線、NG基板のSMT修理ステーションへの搬送、そして最終外観検査へと進む。Huizhou、Nanchang、Vietnamの工場は、SMTラインが34、24、8、最終組立ラインが67、60、13である（Longcheer H-share prospectus） single source, primary filing 。Huaqinの2023年のノートPC工場は18のSMTラインを計画し、AOI予算をRMB 30.6M、つまり1ラインあたり約RMB 1.7Mとした。これは国産3D AOI価格では、両面基板のリフロー前後検査に1ラインあたり3〜5台のAOIに相当する（Huaqin A-share prospectus） primary filing + estimate 。したがって量産ラインは通常、1つではなく2〜4の再判定ポイントを持つ。

機械は既に高度に自動化されている。HuaqinはSMTラインの自動化率を96%と報告している（Huaqin H-share prospectus） single source 。残る人員は再判定、修理、外観検査、テスト、最終組立にいるが、1ラインあたりの再判定員数を公表している企業はない（第7章）。

3つの独立した推定が、1基板あたり**13〜22秒**というタクトで一致している（Hebeiの5ラインに関する2026年の環境影響評価書類（Hebei SMT project EIA）、HuaqinのノートPCライン、iFactoryの事例）。両面基板では片面あたり7〜11秒である estimate 。高多品種ラインの難所は数量ではなく新製品導入と段取り替えであり、段取り替えのたびにAIモデルはコールドスタートとなる。

ソフトウェア面では、AOIメーカー自身の再判定ステーションは既に集中化されている。Sinic-Tekの修理ステーションソフトウェアは「1台のホストで8ライン分の設備を制御」できるとし（Sinic-Tek prospectus） single source, primary, 2022 、Jabilが2026年にViTrox V-ONEのリモートAOI制御を導入した後は、1人のエンジニアが従来のローカル1〜2台に対してリモートで5〜8台のAOIを管理できた（AtlasPCB） vendor claim 。サードパーティのAI再判定製品は、AOIの画像・結果エクスポート（IPC-CFX、IPC-HERMES-9852、またはベンダー独自フォーマット）を通じて、まさにこの中央ステーションに接続する。AOI自体もAIを急速に取り入れている。Yamahaによれば、AI判定は1回の呼び出しに約1秒かかり、NG画像30枚で検査員の補助となり、1,000枚で「非常に高い」品質になるという（DirectIndustry/Yamaha） vendor claim 。

FIG 02 **量産 SMT ライン：人は AOI の後ろに座る*自動光学検査の後、労力は再判定席に集中する。そこに AI が入る。***



出典： 公開資料とベンダー資料（Huaqin、DBG、Sinic-Tek ほか）；筆者作成。

工程	主流の製品と技術	代表的なサプライヤー	AIの到達度
印刷後	3D SPI（構造化光、モアレ、一部レーザー三角測量）	Koh Young、Sinic-Tek、TRI	OEMのペーストAI判定が量産。Jutzeは一部モデルが「完全AI」と表明
実装・リフロー後	多角度・多色LEDと構造化光を備えた2D/3D AOI、8〜20 µm/ピクセル、8〜12 MPカメラ	Koh Young、Omron、Saki、TRI、ViTrox、Mirtec、Jutze、Sinic-Tekほか	OEMのAI再判定（Jutzeは量産、ViTrox V510Ai、Sinic-TekはTencentと共同）。大手EMSは自社構築（DBG）。サードパーティのアドオン
底面端子・隠れ接合部	抜取またはインラインX線（AXI）	—	HikvisionはGuanlanモデルがX線ボイドを誤判定する率は1%未満と主張 vendor claim
再判定と修理	集中再判定ステーション（1ホスト8ライン）、リモート再判定、修理ステーション	AOIメーカーのソフトウェア、ViTrox V-ONE	AIが誤報を処理し、残りを人が処理
外観検査、IQC、FQC	主に手作業。ロボット搬送付きのAI外観機も一部	SmartMoreほか	外観機は量産。IQC/FQCの人員数は非公開
搬送と機械搬入出	6軸アームと協働ロボット、SCARA、AMR、2D/3Dビジョンガイド	FANUC、ABB、Yaskawa、KUKA、UR、Dobot、JAKA、Elite、Mech-Mind、Hikrobot	学習済み知覚＋プログラムされたモーションは量産。VLAとヒューマノイドは依然パイロット
データとシステム	MES、IPC-CFX、IPC-HERMES-9852	—	結果はMESに書き戻される。旧設備での対応はまちまち

表の出典：上記の開示資料、および（Koh Young、Jutze 2025 annual report、Sinic-Tek 2025 annual report、ViTrox、Sohu on Hengtianyi、Xinhua on Hikvision）。

人はAOIの後ろに座る。なぜならアラームの大半が誤報だから

主流のSMT/PCBAラインの検査チェーンは次のように流れる。印刷後の3D SPI（ペースト欠落・不足・過剰、ブリッジ、位置ずれ）、実装後（任意）とリフロー後のAOI（部品欠落・ずれ・回転・反転・ツームストーン、はんだ量）、BGAなど底面端子部品がある場合のX線、そしてインサーキットテストまたはフライングプローブテスト、機能テスト、手作業の外観検査である。各AOIの後ろには再判定席と修理ステーションがある（Sinic-Tek prospectus、JLCPCB） verified 。リフロ

一後AOIが最も一般的で費用対効果が高いが、形状と面積しか見えない。BGA下の接合部、ボイド、濡れ性はX線または電気テストが必要である（JLCPCB）。

労力が再判定に集中するのは、アラームの大半が誤報だからである。あるUKのEMSは、917品番にわたって実欠陥544件に対し誤報54,019件、つまり**アラームの約99%**を記録した（arXiv 2505.03576） single source, preprint 。SiemensのRastatt工場では**AOIが不合格とした基板の97.5%が良品**だった（Siemens case study） vendor claim 。忙しいラインでは、1シフトあたり約448件の誤報が発生し、1件あたり42〜55秒、シフトあたり5.2〜6.8時間、およそ常勤の再判定員1人分に相当する（iFactory） vendor claim; hours are an estimate 。

FIG 03 **AOI アラームの約 97–99% は誤報*現在は人が全アラームを確認。AI 再判定がまず誤報を除去し、残りを人に渡す。***



出典： Siemens 事例、iFactory（ベンダー主張）、DBG 2025 年次報告；再判定工数は筆者推定。

「シフトあたり再判定工数 = 基板数 × 基板あたり誤報数 × 1件あたり秒数」から、ルールベースAOIでは再判定員1人が約0.7〜1本の量産ラインをカバーできる。AIが誤報の60〜90%を除去すれば、判定時間だけなら1人で2〜14ラインとなるが、移動、NGバッファ処理、修理への引き継ぎが現実にはカバー範囲を隣接する2〜4ラインに制限する。中央またはリモート再判定だけが理論上の上限に近づける estimate; seconds per call come from one source 。主流のAOIは毎秒60〜80 cm²をスキャンするため（Yunheng 2026 AOI guide）、20×15 cmの片面は4〜5秒かかる。AIは基板全体を再スキャンする必要はなく、1タクト内にフラグされた少数の領域だけを処理すればよい。

生産で既に機能しているもの：AOI自身の画像での教師あり分類

実証済みのパターンは、工場が既に所有するAOIの画像に対する教師あり深層学習分類である。FujitsuがADLINKのAOIに追加したアドオンは、Taiwanで誤報を**90%以上**削減した（Fujitsu case）。OKIは2026年7月からAIを使い、自社EMS事業でのAOI後の手動確認を約**80%**削減した（Circuits Assembly）。Siemensは手動分析を60%削減し、初年度に€160,287を節約、回収期間8か月と報告している（Siemens case study） all vendor claims 。これらの事例に共通するのは2点である。ほぼ誰も流出率を公表していないこと、そして全員が残ったアラームに人を残していること。流出率を示す唯一の事例（0.8%から0.3%へ、契約上の0.5%に対して）は内部で矛盾している（iFactory）。AIが削減するのは再判定工数であり、再判定という仕事そのものではない。

AI再判定はサードパーティのアドオンからOEM機能や内製システムへと移っており、新規参入者が比較される基準を変えている。Jutzeの2025年年次報告書は「3D AOIアップグレード」を量産段階とし、「AIアルゴリズムにより検査端での手動再判定を排除」すると述べている（Jutze 2025 annual report）。Sinic-Tekは2019年から「マルチモーダルAI支援手動再判定システム」を開発し、Tencentと上下同時3D AOIを共同開発中で、欠陥カバレッジ99.5%以上、認識精度98%を目標としている（Sinic-Tek 2025 annual report） vendor claims in primary filings 。大手EMSは自社構築する。DBGの2025年年次報告書は「外観検査のAI判定」を完了プロジェクトとして挙げ、「AOIがフラグした部品の95%以上をカバー」、「流出率20 PPM未満」、「手動再判定を85%以上削減」、完全トレーサブルとしている（DBG 2025 annual report） single source, primary 。これは、カバレッジ・流出・削減を合わせて示す唯一の電子工場の数値である。**ティア1 EMSに販売するサード**

パーティ製品は、DBGの95%カバレッジ、20 PPM流出、85%削減に匹敵しなければならない。ティア1未満では、ベンチマークはベンダーが宣伝する50〜85%の削減である。

良品のみで学習する異常検知は高速だが（EfficientAD-Sは1画像2.2 ms（EfficientAD, WACV 2024））、欠落部品や誤部品といった「論理的」異常には弱く、最良の手法でも難しいMVTec AD 2では平均AU-PRO 60%未満である（MVTec AD 2） single source 。欠落・誤部品はCADとBOMで照合する方がよい。

いかなるコストでも到達できる上限：機械の積層、ごく少数の人、しかしゼロではない

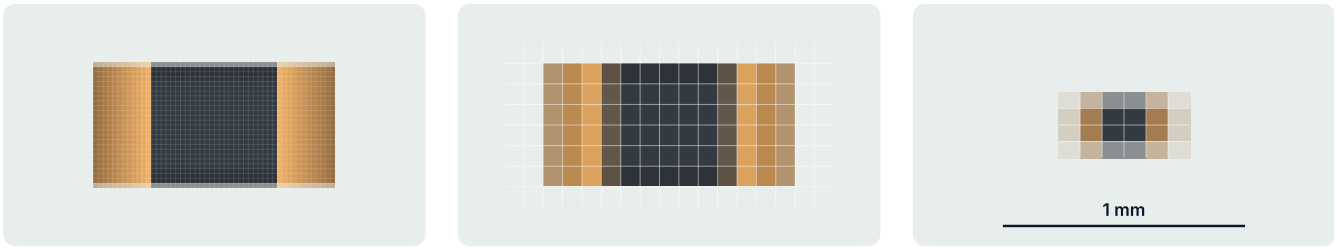
手動再判定を完全に撤廃し、流出ゼロに到達した電子工場は見つからなかった。IPC-A-610クラス3（高信頼性）製品の慣行では、自動しきい値では分類できない境界判定を訓練された検査員が下す。あるPCB組立会社は「自動検査が人間の承認を代替できる」ことを「よくある誤解」と呼んでいる（PCBCart） single source 。人間のベースラインも補正が必要である。2012年のSandia研究を引くと、単独の外観検査員が捉えられる欠陥はせいぜい約**80%**、直列2人で約96%である（Instrumental） single source, cited by a vendor 。擁護できる主張は「AI＋小規模な人の再判定ループは全手動検査を上回る」であって、「AIが検査を代替する」ではない。

予算無制限でも、上限は3D SPI、3D AOI、X線、AI再判定、AI外観ステーションを積み重ね、人は境界判定、新製品と段取り替え、新種の欠陥、顧客承認にのみ残る形である。主力工場は手動検査を85〜92%削減と報告し（I-Connect007, 2021、WiAdvance） vendor claims 、筆者の無予算上限の推定は再判定労力を現状の8〜15%とする estimate 。最終組立は依然として労働集約的である。iPhone 16のボタン自動化は高不良率のため中止された（9to5Mac） single source 。

汎用の高解像度カメラはAOIではない

量産AOIは、8〜12 MPカメラ、プログラム可能な多角度・多色照明、構造化光3Dにより、8〜20 µm/ピクセルでタイルごとに撮像する（Koh Young、Saki） verified 。業界は以前から、25 µm/ピクセルでは01005部品は約8×16ピクセルにしかならず、信頼できる判定には「不十分かもしれない」と指摘してきた（Circuits Assembly, 2007）。同じ計算で estimate 、300 mm基板全体を撮る4Kカメラは約**78 µm/ピクセル**になる。インペリアル0402部品は約13×6ピクセルとなり、有無と大きな位置ずれは判定できるが接合部形状は無理、01005は約5×3ピクセルで事実上見えない。基板全体で15 µm/ピクセルを達成するには約330メガピクセルが必要であり、だからこそAOIはカメラを基板上で動かす。誰かが「0402」と言ったら、どちらを指すのか確認すべきである。メートル法の0402はインペリアル01005であり、広角カメラでは到底捉えられない。

FIG 04 ***汎用カメラは AOI ではない。300 mm 基板を 4K カメラで見ると約 78 µm/px。0402 は約 13×6 px に縮み、01005 は見えなくなる。***



AOI：8–20 µm/px
0402 は約 100×50 px

4K カメラで 300 mm 基板全体：約 78 µm/px
0402 は約 13×6 px に縮小：有無と大きなズレのみ判定可能

同じカメラで 01005 を見る
約 5×3 px：事実上見えない

出典： Circuits Assembly；300 mm 基板・4K センサーでの筆者計算。ピクセルグリッドはイメージ。

既にAOIがあるラインでは、AIの最適な場所はAOI画像の上である。AOIがないラインやライン末端ステーションだけが、照明を制御した密閉カメラステーションを正当化できる。ライン上の開放型高解像度カメラは、周囲光と影の影響を最も受ける（CSDN）。

組立と搬送：学習済み知覚＋プログラムされたモーションは量産済み

IFRの2026年報告書は「検査とロボット誘導のマシンビジョンは成熟し産業グレードである」とする一方、「汎用物理AIやシミュレーション・経験からの学習はまだ産業グレードではない」と述べている（IFR World Robotics 2026 executive summary） single source, primary 。エレクトロニクスは最大のロボット購入者である（2025年に世界で142,235台設置、中国設置分の59%（IFR、IFR China release））。しかし中国のロボット密度は製造業労働者1万人あたり166台で、USの307台に対して低い（IFR, April 2026）。量産のパターンは学習済み知覚＋決定的モーションであり、エンドツーエンドの学習済みモーションが生産グレードに近いのは構造化された工程のみである（第3章、第6章）。

各地域が使えるもの

Mainland Chinaは国産モデルとローカルウェイトに依存し、Taiwanは顧客の主体性が決め手となり、USでは関税と認証が決め手となる。

要素	Mainland China	Taiwan（民間工場）	Southeast Asia	United States
Claude（全チャネル）	● 利用不可	● 条件付き：サプライヤーがMainland China、Hong Kong、Macauの個人・法人に過半数所有または支配されていないこと	● 同左	● 同左
GPTとGeminiクラウド	● 利用不可	● 利用可	● 利用可（国別リスト未確認）	● 利用可
中国系クラウドモデル（Qwen、DeepSeek、Doubao、GLM、Kimi）	● 利用可（届出済みモデル。サービス提供には登録が必要）	● 合法だが、Mainland Chinaホスティングは顧客のセキュリティ審査を通らないことが多い。公共部門、国営企業、重要インフラでは禁止	● 合法（国際ノード）	● 合法、厳格な審査
中国系のローカルオープンウェイト（Qwen、GLM、DeepSeek）	● 第一選択。工場内の私的展開にはモデル・アルゴリズム届出は不要（法律事務所の解釈）	● 利用可（公共部門は制限）	● 利用可	● 条件付き：原産地審査
非中国系のローカルオープンウェイト（例：Gemma 4）	● 利用可	● 利用可	● 利用可	● 利用可
古典的な非生成系ビジョンモデル	● 利用可（生成AI規則の対象外）	● 利用可	● 利用可	● 利用可
Jetson Thor/T5000/T4000、DGX Spark	● 利用可：NVIDIAは5A992.cに分類し、通常の民間工場にはUSライセンス不要。Sparkは中国向けSKUあり。チャネル価格はUS定価の約40〜60%増	● 利用可	● 利用可	● 利用可
RTX 5090、RTX PRO 6000、DGX Station	● 利用不可：前者2つは4A090.a、DGX Stationは5A992.z。合法な代替は4090D、5090 D V2、RTX PRO 5000 72GB、RTX 6000D、L20（4A994.l）	● 利用可	● 利用可だが、中国に本社を持つ、または最終的に中国に所有される買い手は中国扱い。Malaysiaは輸出・積み替えに許可が必要	● 利用可
Mac Studio M5 Ultra 512 GB	● 利用可（Apple Chinaストア）	● 利用可	● 利用可と推定	● 利用可
Huawei Ascendとその他中国アクセラレータ	● 利用可	● 高リスク	● 高リスク	● 実際上使用不可

要素	Mainland China	Taiwan（民間工場）	Southeast Asia	United States
Mainland China製の固定アーム、AOI、産業用カメラ	● 利用可	● 輸入可。2025年12月1日以降、当局はMainland Chinaブランドに直接対応でき、政府機関、国営企業、特定財団、重要インフラ提供者は使用制限・禁止されうる	● 利用可	● 合法だが、アームは合算関税約40%、AOI型機器・カメラは37.5%、エッジコンピューターは25%
外国製AMRと移動マニピュレーター	● 利用可	● 利用可	● 利用可	● 新モデルはUS陸軍省の条件付き承認が必要
HikvisionとDahuaのカメラ	● 利用可	● 民間利用は可、公共部門は禁止	● 利用可	● 新規FCC認可はブロック。連邦請負業者は禁止
ロボット安全と認証	● GB 11291.1-2011およびGB 11291.2-2013が強制、2026年4月から改訂中。CR認証は任意。GB/T 39404-2026がコントローラーのサイバーセキュリティを規定	● デフォルトはフェンス。フェンスレス協働はCNS 14490またはISO 10218と書面評価が必須	● 顧客と輸出先ごとに、出荷前に書面で確認	● 電気設備は「承認」が必須（実際上はNRTLマークまたは現地評価）。UL 1740は2025年8月11日からロボットセルにISO 10218-2の適合を要求
ファブと管理対象製品の工場	—	● TSMCの購買契約はSEMI E187を要求。2 nmファブからMainland China設備が撤去中	—	● ITARの技術データは「写真」を含む。中国への拒否方針。Mainland China系サプライヤーは実際上防衛電子工場に供給不可

表の出典：（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）。

Mainland China：完全なスタックだが、クローズドな最前線モデルも最強の単一マシンも入れない。 届出済みの国産クラウドモデル、ローカルオープンウェイト（Apache-2.0のQwen、MITのGLMとDeepSeek）、古典的ビジョンモデル、国産AOI、カメラ、協働ロボットはすべて使用可能である。NVIDIA自身の輸出分類では、Jetson AGX Thorキット、T5000/T4000モジュール、DGX Sparkは5A992.cに分類されるため、通常のEMSやPCBA工場はUSライセンス不要。一方、RTX 5090とRTX PRO 6000（4A090.a）、DGX Station（5A992.z、TPP 58,484）はMainland Chinaで購入できない（NVIDIA export classifications、eCFR） primary; the legal reading is mine and not legal advice 。RS ChinaはThorキットを税込みRMB 59,104、US定価の約1.4倍で掲載している（RS China）。

4つの法律事務所が、工場自身の使用のための私的工場内展開にはモデル・アルゴリズムの届出は不要と一致して解釈しており、ホスティング型マルチテナントサービスはグレーゾーンにある（Covington、FPF、JunHe） verified: consistent readings, no official ruling 。GB 11291.1-2011とGB 11291.2-2013は強制のロボット安全ベースラインであり、2026年4月28日から改訂中。コントローラーのサイバーセキュリティに関するGB/T 39404-2026は2026年11月1日に施行された（revision plan 20262542、GB/T 39404-2026） single source, primary 。新GB 11291が届くまで（2028～2029年 estimate ）、ISO 10218:2025に準拠して設計し、GB 11291適合書類を維持すること。

Taiwan：民間工場はほぼ何でも使える。顧客の主体性が決め手。 最前線API、オープンウェイト、Mainland China設備はすべて合法である（data.gov.tw）。しかし改正Cyber Security Management Actが**2025年12月1日**に施行されて以降、当局は「Mainland Chinaブランド」製品に直接対応でき、政府機関、国営企業、重要インフラ提供者で制限できる（Laws & Regulations Database、review rules） verified 。重要インフラ提供者のリストは非公開である。TSMCはSEMI E187を購買契約に書き込み（CNA）、2 nmファブからMainland China設備を撤去中と報じられている（TrendForce） single source 。民間EMS、組立、小規模PCBA工場は開かれているが、ファブ、パーク公益事業、政府関連顧客は実際上閉じている。Mainland China系サプライヤーは、E187に合わせて設計し、ソフトウェア部品表（SBOM）を提供し、オフライン更新を提供し、Mainland Chinaからのリモート接続を決して行わないこと。

Southeast Asia：制約が最も少ない。問題は回収の遅さと中国系親会社。 すべて使用可能だが、2026年5月31日のUSガイダンスは、荷受人（consignee）が第三国であっても、中国に本社を持つ、または最終的に中国に所有される事業体への

先端計算機の輸出にライセンスを要求する（Greenberg Traurig） single source 。Malaysiaは先端チップに独自の許可を課す（Fulcrum）。需要はここへ移動している。TrendForceはThailand、Vietnam、Malaysiaが2026年にサーバーODMのSMT能力の50%に近づくと予測していた（TrendForce） single source, a 2023 forecast 。

United States：フルスタックだが、関税・認証・管理データという代償を伴う。 US関税率表第99章では、Mainland China製ロボットアームは合算関税約40%、AOI型機器とカメラは約37.5%、エッジコンピューターは25%を支払う。MalaysiaまたはIndonesia製は約10〜12.5%、Vietnam、Thailand、Philippines製は12.5〜15%、Taiwan製は10%、コンピューターはMainland China以外で0%である（USITC HTS chapter 99、Great Lakes Customs Law） primary schedule + estimate 。USTRの11月10日付通知は178の旧Section 301除外を2027年1月9日まで延長したが、ロボット、検査機器、カメラ、コンピューターをカバーするものはない（Federal Register 2026-22925） verified 。

OSHAは職場の電気設備に「承認」（実際上はNRTLマーク、または1セルあたり約$3,000〜20,000以上の現地評価）を要求する。2025年8月11日以降、UL 1740はロボットセル全体をISO 10218-2の対象とする（eCFR 1910.399、Intertek、Industrial Monitor Direct）。防衛電子は実際上、Mainland China系サプライヤーに閉じられている。ITARは生産写真を技術データとして扱い、中国への拒否方針を適用する（eCFR 22 CFR 120.33、eCFR 22 CFR 126.1）。US向けセルは、固定アーム、制限のないカメラ、ローカルまたはUSクラウドモデルを使い、原産地を真に変える場合にSoutheast Asiaで最終組立すべきである。

いかなる予算でも、上限は地域によって異なるが、どこでもゼロ人には到達しない estimate 。Mainland Chinaは国産3D SPI、3D AOI、X線、AI再判定、内製AIチームを積み重ねて再判定労力を8〜15%まで下げられるが、クローズドな最前線モデルやDGX Stationがないため、工場全体のLLM Q&Aはローカルオープンウェイトと国産計算機で動かす必要がある（多ユーザー向けフルサイズモデルには8カードのAscendサーバーが最低2台）。TaiwanとSoutheast Asiaは技術的には最前線APIやDGX Stationを含む最良のものをすべて使えるが、顧客の主体性、Mainland Chinaブランド、中国系親会社のライセンスに制限される。USには技術的制約はないが、関税、NRTL認証、管理データの人員分離という代償を伴う。どこでも、境界判定、新製品と段取り替え、新種の欠陥、顧客承認には人が残る。

したがって、複数地域に販売する製品には2つのモデルスタックが必要である。Mainland Chinaスタックは届出済み国産モデルまたはローカルオープンウェイト、海外スタックは最前線APIと非中国系のローカルモデルである。2026年11月12日発効のAnthropicのポリシーは所有と支配で判断するため、Mainland China系サプライヤーは海外子会社、クラウドプラットフォーム、再販業者を通じてもClaudeの上に構築できない（Anthropic） single source, primary 。

オンプレミス

02 工場内でのAI運用：クリーンルーム、エアギャップ、ハードウェア、量子化

エアギャップ工場では制約は計算ではなくプロセス

完全オフラインの外観検査は日常的であり、制約は手続き面にある。中国の2024年のMIIT産業制御システムセキュリティガイドは、ゾーニング、ファイアウォールまたはデータダイオード、監査付きの期間限定リモート保守、スキャン済みメディア、テスト済みパッチを求めている（guide text） single source 。半導体顧客はさらにSEMI E187とE188を加え、TSMCは2023年に購買契約に書き込んだ（SEMI、TXOne） verified 。結果はIPC-CFXでMESに戻り、基板IDはIPC-HERMES-9852で伝送される（Hermes standard）。よくある罠は、ネットワークを前提とするライセンスである。Roboflowのオフラインモードは30日リースでウェイトをキャッシュする（Roboflow）。オフライン製品には、オフラインアクティベーション、スキャン済みメディアでの署名付き更新、ソフトウェア部品表、USB制御、ローカル監査ログ、CFXアダプターが必要である。

FIG 05 ***エアギャップ構成の展開 ライン側の小型ボックスが判定し、サーバールームが問い合わせに回答。障害時は人へフォールバックし、データは工場外に出ない。***



出典： 筆者の総合（第 2 章）。

クローズドな最前線モデルは、実際には工場のサーバールームに入らない。Geminiは政府・大企業向けのGoogle Distributed Cloudを通じてのみエアギャップ提供される（Google Cloud）。MicrosoftのFoundry Localは「適格顧客」にのみ大規模モデルを開放し、GPTモデルは名前を挙げていない（Microsoft）。Claudeはクラウド政府リージョンのみで、オンプレミス展開はない（Claude for government）。3つともMainland Chinaでは提供されない。工場設備はオープンウェイトを前提に設計しなければならない。最前線モデルはせいぜい、顧客が匿名化画像の持ち出しを許す場合に、本社でオフラインで画像にラベル付けまたは説明する程度である。

サーバールームのハードウェアはオフィスグレードとして扱うべきである。Mac Studioは10〜35 °C、DGX Sparkは5〜30 °Cが定格で、持続推論下での熱シャットダウンが報告されている（Apple、NVIDIA forum） verified 。ラインには、−25〜60 °C定格のJetson T4000産業用PCのようなファンレス産業用ボックスを使う（AAEON） vendor claim 。1時間の停止が大規模工場で$36,000〜$2.3Mの損害をもたらすため（Siemens True Cost of Downtime 2024） vendor survey 、

ライン上のAIの各ステップは**フェイルオープン**でなければならない。障害時は既存の「AOI＋人」プロセスにフォールバックする。

クリーンゾーンとESDゾーン：通常のSMTホールは格付けクリーンルームではなくESD保護区域

計算機の設置場所を制限するのは清浄度クラスではなく静電気と気流である。ほとんどのSMT組立エリアは「正式には粒子管理されていない」ものであり、世界水準の工場でも「ISO 8に達するか近づくか」である（Circuitnet expert panel） single source 。医療用PCBAとカメラモジュールは通常ISO 7、ベアダイと光学アライメントは局所ISO 5〜6にある（PCBSync） single source 。クリーンルーム施工会社はSMT全般をISO 7〜8と見積もる（Angstrom Technology） vendor claim 。

普遍的な要件はESD管理である。ANSI/ESD S20.20-2021は絶縁導体を35 V未満に保ち、強電界絶縁体を感応デバイスから少なくとも30 cm離すことを求める（ANSI、ESDA、Desco） verified 。ファブは計算機をサブファブまたはデータセンターに置き、SEMI S2/S8/F47を満たす液冷ラックに入れる（Prodrive） vendor claim 。

設備がクリーンエリアに入れるかはISO 14644-14に基づく粒子放出で試験される。ロボットはそのような認証を持つが（Fraunhofer IPA）、筆者はそれを取得した産業用PC、エッジAIボックス、GPUサーバーを見つけられなかった。CE、FCC、IEC 60068は、ボックスが環境に耐えることを示すのであって、ESD保護区域に入ってよいことを示すものではない。それは顧客のESDコーディネーターが確認する。GPUサーバーは決してラインに置かない。DGX Stationは試験でGPUだけで1,292 Wを消費した（StorageReview）。

FIG 06 **清浄・ESD ゾーンが計算機の設置場所を決める*通常の SMT ホールは ESD 保護区域でありクリーンルームではない。GPU・NPU サーバーはサーバールームに置く。***



出典： ANSI/ESD S20.20、IEC 61340-5-1、ISO 14644、SEMI 標準とベンダー資料；筆者作成。

ゾーン	典型的な環境	ライン上の計算機	GPU/NPUサーバー
通常のSMT/PCBAホール（民生・産業用）	S20.20またはIEC 61340-5-1に基づくESD保護区域。通常は格付けクリーンルームではない（≈ISO 8相当）。湿度40〜60%	接地金属筐体のファンレスボックス（Jetson T4000/Thor、中国製NPUボックス）をAOIまたは再判定席の隣に。プラスチックモニターと筐体はエリア外または基板から≥30 cm	サーバールームまたは空調付きITラック
医療、カメラモジュール、EV電子（ISO 7〜8クリーンルーム）	クリーンルーム＋ESD保護	ファンレス、IP65/66密閉、平滑で拭き取りやすい。ISO 14644-14データまたはIPA認証を要求	クリーンルーム外、ネットワーク接続
ベアダイ、ワイヤボンド、光学ステーション（局所ISO 5〜6）	ミニ環境	カメラと光源のみ内部。計算ボックスは外部	サーバールーム

ゾーン	典型的な環境	ライン上の計算機	GPU/NPUサーバー
ファブクリーンルーム（ISO 5以上）	ファブ固有のESD・静電吸着計画、設備はSEMI E78。サイバーセキュリティはSEMI E187/E188	ツール統合型・ファブ認定コントローラーのみ。ファン付きアドオンPCは不可	サブファブの液冷ラックまたはファブデータセンター

この表は上記情報源の筆者による総合である estimate。製品として必要なのは、約100 W未満のファンレスライン側ボックス、保護接地にボンディングした金属筐体、12〜24 V DC入力、実キャビネット気流での広温対応、そしてISO 7以上向けに用意できるISO 14644-14粒子放出レポートである。「1台のGPUサーバーで4ラインをまかなう」設計は、サーバーをサーバールームに置き、ラインには小型ボックスかカメラだけを残す。

用途別の速度限界：難しいのは速度より精度

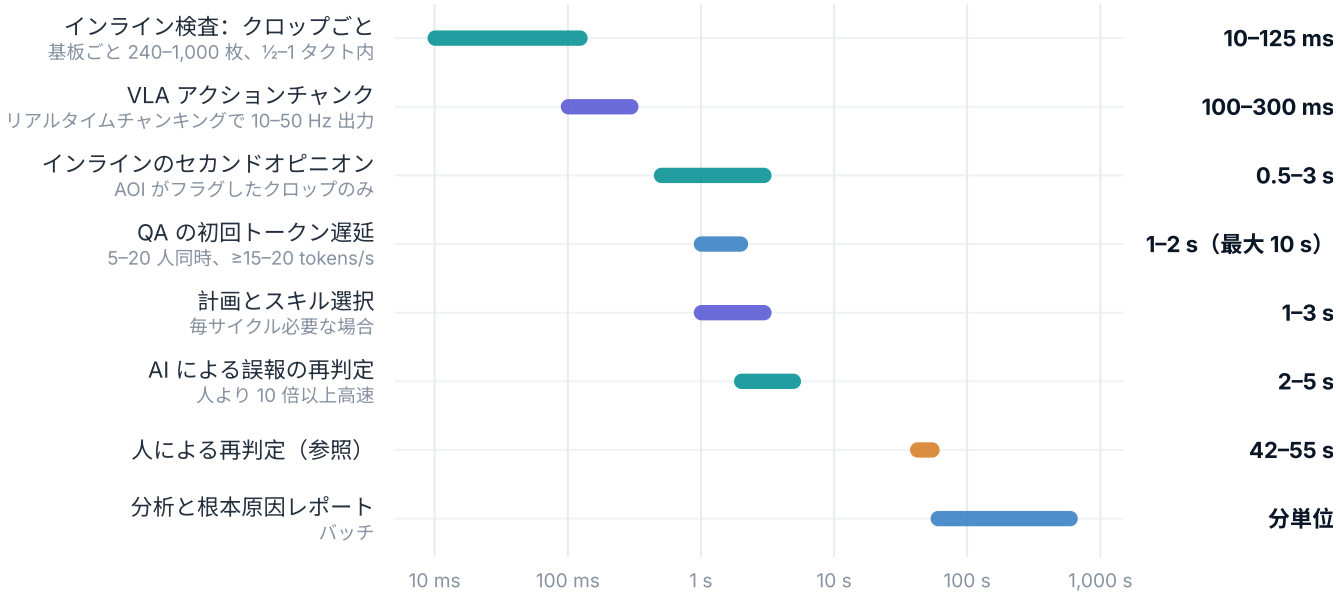
工場とベンダーはAIのレイテンシや可用性目標をほとんど公表しない。以下のしきい値は、タクト、人の再判定時間、ロボット制御レート、インタラクション研究から導いたものである estimate：

用途	速度限界	精度限界	可用性
全パーツのインライン検査	½〜1タクト以内。10〜30秒タクトで240〜1,000クロップ、毎秒8〜100クロップ	流出は現在の「AOI＋人」を上回らない（契約例<0.5%）	フェイルオープン、ライン停止不可。目標≥99.9%（公開SLAなし）
AOIフラグクロップのみのインラインセカンドオピニオン	フラグ（通常基板あたり≤5〜20）を½タクト以内。クロップあたり0.5〜3秒	同左。ライン自身の画像で学習	人の再判定にフォールバック
誤報のAI再判定	1回あたり2〜5秒。人の42〜55秒より10倍以上速い	流出は人の再判定員を上回らない	劣化時は人を追加、ライン停止はしない
ロボット制御（VLA）	リアルタイムチャンキングでアクションチャンクあたり100〜300 ms、出力10〜50 Hz	プログラムされたモーションに勝つにはタスク成功率≥99%	安全システムはモデルから独立
ロボット計画とスキル選択	各サイクルで必要な場合1〜3秒。例外・段取り替え時のみなら≤1分	出力は検証可能なコードまたはスキルID	固定プログラムにフォールバック
Q&A（SOP、MES照会）	初回トークンは理想的には≤1〜2秒、最大10秒。ユーザーあたり≥15〜20 tokens/s。同時5〜20ユーザー	正確な引用。長文脈での忠実性	オフィスITグレード（≈99〜99.5%）
分析・根本原因レポート	分単位で可（バッチ）	最高水準。長文脈での忠実性	オフィスITグレード

Physical Intelligenceは3B級VLAの推論を97 msと測定し（ネットワークと前処理込みで約108〜139 ms）、リアルタイムチャンキングにより200 msまでの追加遅延でもスループットが変わらないことを示し、マッチを擦る、ネットワークケーブルを差すといった細かいタスクを300 ms超で完了した（Physical Intelligence） vendor research。インタラクション研究は、思考の連続を保つ限界を1秒、注意を保つ限界を10秒とする（NN/g）。難しいのは精度である。オープンなQwen3-VL-8Bは5つの産業異常データセットでゼロショット平均56.8にすぎない（IndusAgent） single source。ライン自身の画像でチューニングしていない視覚言語モデルを、ハードウェアが救うことはない。

FIG 07 **用途別の速度限界インライン検査はミリ秒、QA は秒、分析は分単位。人は 1 回あたり 42–55 s。**

タスクごとの許容処理時間（対数目盛）



出典： 筆者の総合（第 1–2 章）。

ハードウェア：工程にはThor、工場Q&AにはMac Studioまたは国産アプライアンス、Mainland ChinaにDGX Stationは不可

デバイス	メモリと帯域幅	価格（2026年11月）	適した用途	Mainland China
Jetson AGX Thor 開発キット / T5000 / T4000	128 GB LPDDR5X、273 GB/s。40〜130 W	発売時$3,499 → $5,499（2026年7月）。T5000 $4,999、T4000 $2,999。RS China開発キットは税込みRMB 59,104	クロップを再チェックする2〜8Bビジョンモデル。リアルタイムの3B級VLA	可（5A992.c、民間工場はライセンス不要）
DGX Spark	128 GB、273 GB/s	$3,999 → $4,699 → $6,950。同チップのASUS GX10中国モデルはRMB 32,999（JD、2025年10月）	マルチユーザーの8〜35B MoE	可（5A992.c、中国モデル、正規チャネル）
RTX PRO 6000	96 GB GDDR7	≈$8,565 → $13,250（2026年6月）→ ≈$16,005（11月のeBay平均出品価格）	マルチユーザーの27〜35B FP8。4-bitで120B級MoE	不可（4A090.a）
Mac Studio M5 Ultra 512 GB	512 GBユニファイド、1.2 TB/s。最大持続480 W	USで$22,299から。China推定 ≈RMB 173〜186k	1〜3ユーザーでDeepSeek 671Bを4-bit	可
DGX Station GB300	748 GB（252 GB HBM3e 7.1 TB/s＋496 GB LPDDR5X 396 GB/s）。GPU実測1,292 W	11月の実売$123〜140k（関税前 ≈RMB 830〜940k）。8月は$95〜117k	HBMに収まる120〜235B MoEの高並列。433〜743Bモデルでは少数ユーザーのみ	不可（5A992.z、TPP 58,484）
Huawei Atlas 300I Duo	96 GB LPDDR4X、408 GB/s	JDの販売店でRMB 13,300	少量のバッチ再判定。対応モデル少数	可（国産）
Huawei Atlas 800I A2（8 × Ascend 910B 64 GB）	8 × 64 GB HBM	未入手。フルDeepSeekにはW8A8で2台、BF16で4台	工場全体のマルチユーザーQ&Aと分析	可（国産）

デバイス	メモリと帯域幅	価格（2026年11月）	適した用途	Mainland China
RTX 5090 D V2（中国モデル）	24 GB	発売時RMB 16,499（2025年8月）、メモリ価格でその後上昇	8Bビジョンモデル、小型VLA	● 可

出典：（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）。512 GB Mac StudioのMainland China価格はUS構成プレミアムからの外挿であり低信頼度である estimate 。

FIG 08 **オンプレ計算：メモリ、価格、中国本土で合法的に買えるものベンチマークより先に輸出規制区分が候補を決める。**



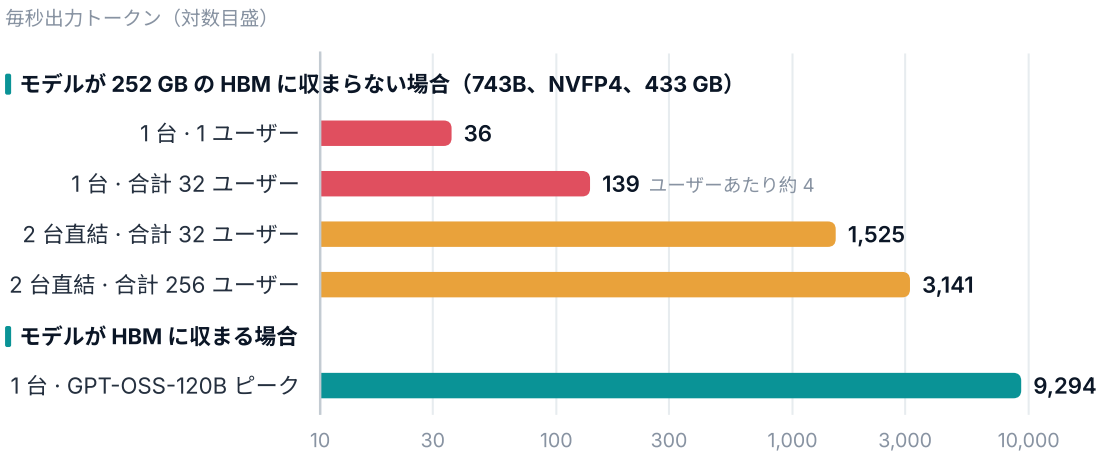
出典： NVIDIA 輸出区分、Apple、RS China、JD.com とレビュー価格（2026 年 11 月）。

Jetson Thorが工程レベルの展開を成立させる。 NVIDIAのTensorRT Edge-LLMテストでは、Qwen3-VL-8B（NVFP4）はThor上で2,048トークンのプリフィルを104.5 ms、デコードを44.4 tokens/sで行う（TensorRT Edge-LLM） vendor claim 。AOIクロップと20トークンの回答では、8Bモデルで約0.5秒、2Bで0.2秒、バッチ処理で毎秒8.5〜21クロップとなる estimate 。レイテンシを決めるのはパラメータ数ではなく出力長であるため、クラストークンまたは短いJSONへの制約付きデコードが設計の一部となる。GR00T N1.7（3B）はThor上で25.1 Hzで動作する（Jetson AI Lab） vendor claim 。Orin NXは1クロップ約1.8秒、Atlas 300I Duoはp95が23秒超で、バッチ用途にしか適さない（CSDN） single source 。Mainland Chinaでは、NVIDIA製品をUS定価の40〜60%増で予算化すること estimate 。

512 GB Mac Studioが、少数ユーザー向けならフルサイズモデルを1台で可能にする。 M5 Ultra（2026年8月）は最大512 GB・1.2 TB/sを約$22,299から提供する（Apple、TechRadar）。DeepSeek 671B 4-bit（≈380〜404 GB）はM3 Ultraで17〜20 tokens/sでデコードされ（Pinggy） verified 、M5 Ultraでは推定25〜29となる。長いプロンプトが弱点である。10,000トークンの検索プロンプトは約17〜70秒かかり estimate 、10秒のインタラクション上限を超える。

DGX Stationは最強の単一マシンだが、Mainland Chinaでは入手できず、Macの5〜6倍の価格である。 出荷中のGB300は**748 GB**だが、そのうち252 GBのみが高速HBMである（Wccftech、Tom's Hardware, Aug 2026） verified 。独立テストではGPT-OSS-120B（HBMに収まる）で約9,300出力トークン/sを記録したが、LPDDR5Xに溢れる743Bモデルでは32ユーザー合計139 tokens/s、各約4となった。2台直結で1,525に達した（StorageReview, Aug 2026、StorageReview, Oct 2026） single source 。実売価格は11月までに$123〜140kへ上昇した（CyberPowerPC、monitors.com）。Mainland Chinaでの同じ仕事の現実的な選択肢は、Mac Studio、KTransformers型のCPU＋GPUサーバー（KTransformers） vendor test 、または国産Ascendサーバーである。

FIG 09 ***大きなワークステーション1台は共有アシスタントにならない モデルがHBMに収まらないと、32人の同時ユーザーは各約4 tokens/sしか得られない。***



出典： StorageReview（2026 年 8・10 月）；ServeTheHome。単一ソースの独立テスト。

メモリ不足により同じ部品が1年で20〜100%動いた（DGX Sparkは$3,999から$6,950へ（TechRadar））ため、設備見積りは固定ではなく指数化すべきである。

国産アクセラレータはフルサイズモデルを動かせる。ボトルネックはソフトウェア保守である。 Ascend 910Bは64 GBのHBMを持つが、vLLM-AscendはDeepSeek V3/R1を「保守終了」とし、小型カードでは少数のモデルしかサポートしない（vLLM-Ascend） single source, primary 。新モデルの適応には1〜2か月かかる（Caijing/Anue）。凍結して検証済みのモデル版を出荷すること。フルDeepSeek 671Bを20〜100ユーザーに提供するには8カードのAtlas 800I A2サーバーが最低2台必要（China Telecom Cloud） verified 。しかし中国のLLMアプライアンス公開入札は2025年1〜9月でわずかRMB 27.5Mだった（C114） single source 。工場が支払うのは統合とサービスであって、計算機の箱ではない。

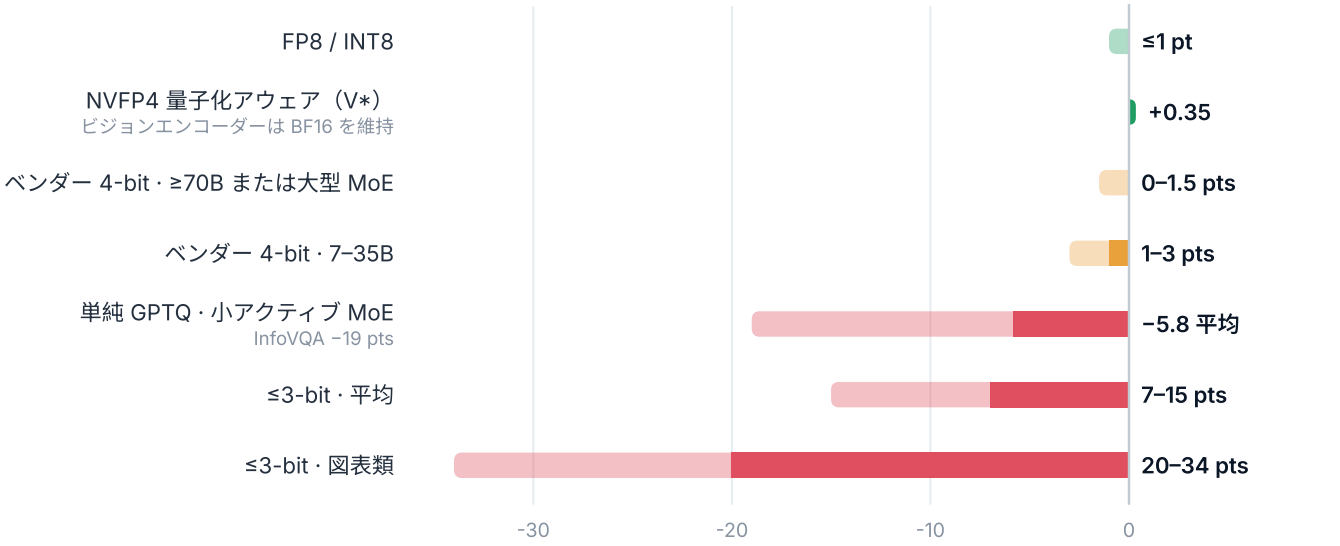
量子化：8-bitは安全、4-bitはレシピ次第、3-bit以下は論外

8-bit（FP8またはINT8）は視覚言語モデルにとって本質的にロスレスである（Red Hat、Hugging Face） verified 。4-bitでは、損失はサイズとレシピに依存する。Qwenの72B AWQビルドはMMMUで1ポイント未満の低下だが、7Bは2.8低下する（Qwen AWQ） verified 。詳細を要するタスクはさらに低下する（単純4-bit GPTQはQwen3-VL-30B-A3BのInfoVQAを19ポイント下げる（VEQ））。3-bit以下では平均損失7〜15ポイント、図表では20〜34（VLMQ） verified 。64kトークンを超えると4-bitは最大59%低下し、非英語入力で悪化する（arXiv 2505.20276）。ビジョンエンコーダーはFP16/BF16を維持すること。

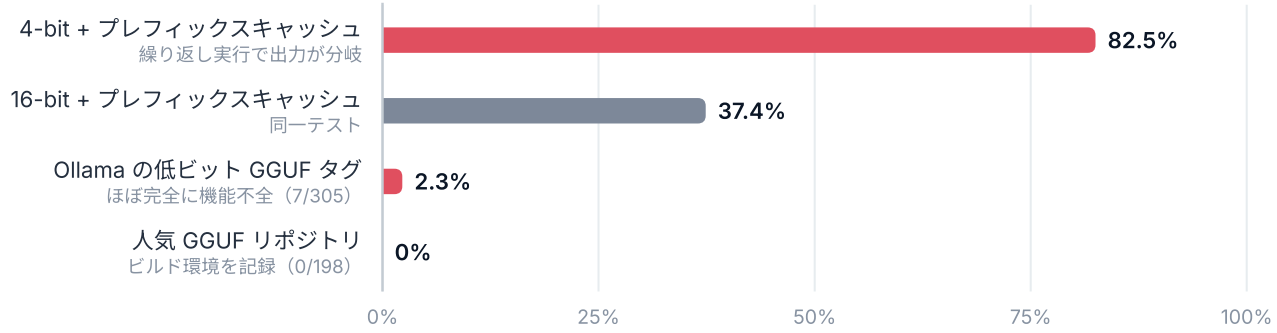
FIG 10 **量子化：8-bit は安全、4-bit はレシピ次第、3-bit 以下は失格** ***サービングスタックのエンジニアリングミスは量子化そのものより精度を損なう。***

精度：8-bit は安定、4-bit はレシピ次第、≤3-bit は失格

全精度に対するスコア変化（ポイント）



量子化誤差より大きいのはエンジニアリング事故



出典： NVIDIA Nemotron モデルカード、VLMQ、VEQ、arXiv 2609.05881、2610.19498、2609.04748 ほか。

2つの警告の方が重要である。第一に、**2026年11月11日時点で、PCB/SMT欠陥画像で量子化を測定した研究やモデルカードは存在しない**ため、ゴールデンセットで再検証すること。第二に、サービングスタックのミスは量子化誤差より大きいことが多い。同じモデルがOllamaでは参照実装より約30ポイント低く出た（SiliconBench）。Ollamaの公式コードモデルタグ305件中7件は、ファイルは無傷なのに実質的に壊れていた（arXiv 2609.05881）。人気GGUFリポジトリ198件中、ビルドを記録したものはゼロだった（arXiv 2610.19498）。プレフィックスキャッシュ再利用では、4-bitで82.5%のエピソードが分岐したのに対し16-bitは37.4%だった（arXiv 2609.04748） single sources 。ベンダーの量子化アウェア4-bitは詳細タスクでほぼロスレスである（NVIDIA Nemotron 3.5） vendor claim 。しかし4-bit VLAは摂動下で1.5〜4.3ポイント低下し、Thor上では遅くなる（LoopQ） single source 。量子化モデルは新しいゲージとして管理すること。ウェイトハッシュを固定し、ビルドを記録し、プレフィックスキャッシュをリセットし、精度・エンジン・テンプレートの変更ごとに再検証する。

精度	≥70B密または≥100B MoE	7〜35B	≤4Bまたは詳細重視タスク	判定
FP8 / INT8	安全（≤1ポイント）	安全	安全。検査のデフォルト	使用可

精度	≥70B密または≥100B MoE	7〜35B	≤4Bまたは詳細重視タスク	判定
4-bit AWQ/GPTQ（ベンダーレシピ、ビジョンエンコーダーFP16）	0〜1.5ポイント	1〜3ポイント。小アクティブMoEへの単純GPTQは平均−5.8、InfoVQAで−19	2〜3ポイント。詳細タスクを先に検証	条件付き
NVFP4（ベンダーレシピ）	FP8比≈0.3〜1ポイント低下（ベンダーデータ）	量子化アウェアビルドはV*、OCRBenchでほぼロスレス	公開データなし	条件付き（量子化アウェアビルドを優先）
GGUF Q4_K_M	未テスト	ドメインタスクでばらつき大	小さい文字や欠陥には不適	詳細判定には不適
GGUF Q5_K_M以上	安全と推定	2つのテストでほぼロスレス	llama.cppの詳細下限	使用可
≤3-bit（1台に1.8〜2 bitへ圧縮した1Tモデルを含む）	判断に不適	不可	不可	不可

どの仕事にどの構成か

構成	インライン検査	誤報のAI再判定	ロボット計画と制御	Q&Aと分析
専用検出器または異常モデル（YOLO、RF-DETR、PatchCore系）、INT8/FP16、任意のNPUまたはGPUエッジボックス	● 可：主判定器、クロップあたり2〜12 ms	● 可（ラインでチューニングした分類器）	● 知覚のみ	—
2〜4Bビジョンモデル、NVFP4/AWQ/FP8、FP16ビジョンエンコーダー、Thor/T4000またはDGX Spark	● 条件付き：AOIフラグクロップを各0.2〜0.3秒で再チェック	● 条件付き、チューニング後1秒未満	● VLAバックボーン（2〜3B VLA、チャンクあたり≈40〜130 ms）	● 弱い
7〜9Bビジョンモデル（Qwen3-VL-8B、MiniCPM-V 4.5、GLM-4.6V-Flash）、FP8またはベンダー4-bit、Thor、Spark、24〜32 GBカード	● 条件付き：フラグクロップあたり≈0.5秒	● 可：1回あたり0.5〜1秒、最も費用対効果が高い	● 計画とスキル選択（1〜3秒）。制御ループには入れない	● 1人〜数人向けの基本SOP Q&A
26〜35B MoE（Gemma-4-26B-A4B、Qwen3.6-35B-A3B）、NVFP4/FP8	● 不可（重すぎる）	● 可、説明役または難事例向け	● 計画	● 可（Sparkで8ユーザー、初回トークン≈0.1秒）
106〜241B MoE 4-bit、Mac Studio、RTX PRO 6000またはSpark	● 不可	● 不可	● オフライン計画	● 可、1人〜数人向け
DeepSeek 671BまたはKimi K2.x 1T 4-bit、512 GB Mac、KTransformersサーバーまたはDGX Station	● 不可	● 不可	● オフラインのプログラム生成のみ	● 条件付き：1〜3ユーザーかつ短いプロンプト。長いプロンプトは16〜170秒
≤3-bitのいずれも。小型モデルの詳細作業にGGUF Q4_K_M。多ユーザーにOllama	● 不可	● 不可	● 不可	● 不可

出典：上記のTensorRT Edge-LLM、Jetson AI Lab、Apple ML Research、KTransformersのデータ、および（DGX Spark tests、RTX PRO 6000 tests、Hardware Corner on Atlas、Ultralytics YOLO26、RF-DETR） community and vendor tests, mostly single source 。

そこで、2つのよくある懸念への答えはこうなる。**遅くなくてもよい**——モデルが仕事に合っていれば（ThorやSpark上の小型・中型ビジョンモデルはすべてのインライン・再判定予算を満たす。671B〜1Tモデルはラインに置かない）。**量子化で誤らせる必要もない**——デフォルトのFP8/INT8、またはゴールデンセットで検証した7B以上のベンダーレシピ4-bitで十分。より大きなリスクは、汎用モデルの約57ポイントのゼロショット産業精度と、サービングスタックのミスである。検査リクエストには固定バッチサイズと専用キューを与え（温度0はバッチ処理下でビット再現性がない（vLLM documentation））、N+1のホットスタンバイを維持し、ライン上の各ステップをフェイルオープンにする。

教師と生徒

03 教師と生徒：最前線モデルは検査データをプリラベルできる。ロボットアームの本当の教師は依然として人

2026年11月の教師候補：汎用ビジョンは倍増したが、産業欠陥スコアは存在しない

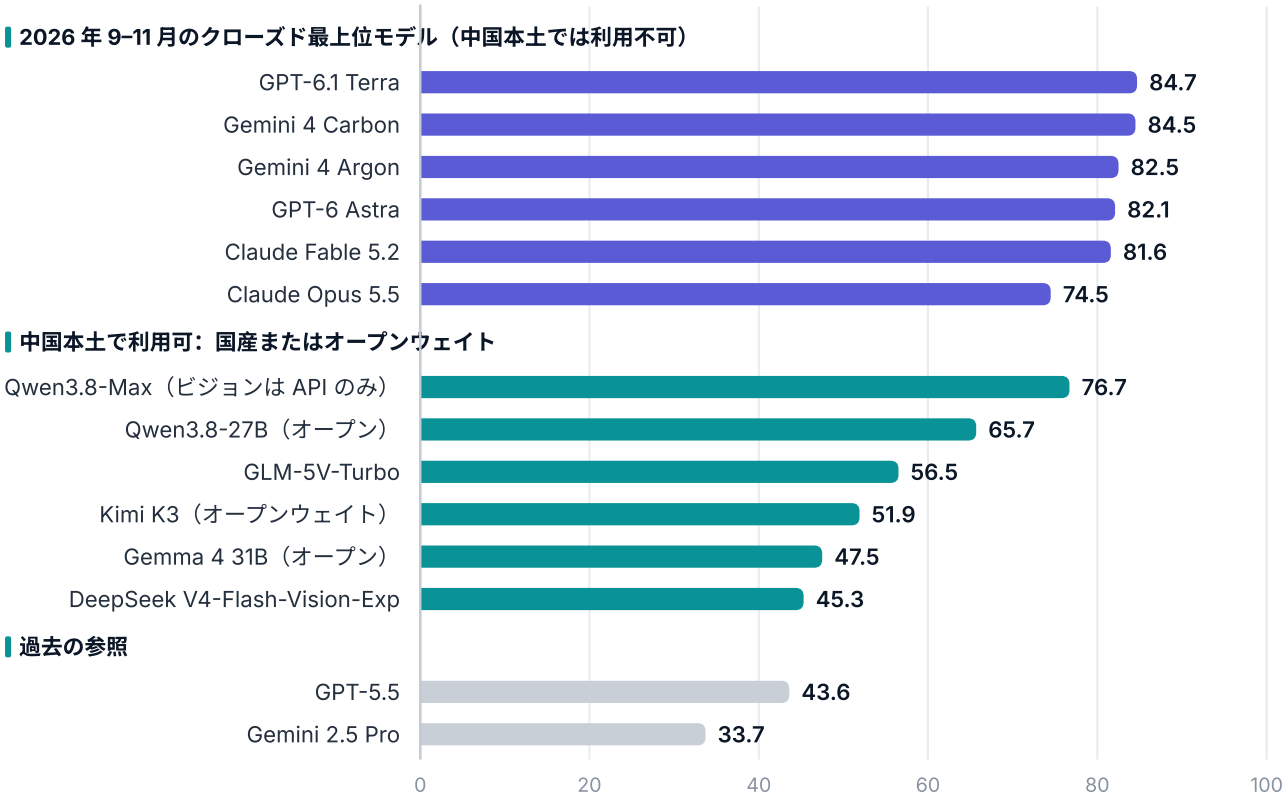
2026年11月に教師となりうるクローズドな最上位モデルはすべて画像を受け付ける。Claude Fable 5.2（11月9日一般提供、100万トークンあたり$8/$40）とOpus 5.5（$4/$20）（Anthropic、Claude models overview） verified 。GPT-6 Astra（$10/$50）とGPT-6.1 Terra（$1/$5）（OpenAI pricing）。Gemini 4 ArgonとCarbon（段階的に公開）（Google Carbon）。Mainland Chinaで使えるのはQwen3.8-Max（API経由のビジョン）と、Qwen3.8-27B、Kimi K3、GLM-5V-Turbo、DeepSeek V4-Flash-Vision-Exp、Gemma 4などのオープンモデルである（Roboflow blog、Hugging Face）。

重要なギャップを率直に述べる必要がある。これらのモデルのいずれも、MMAD、MVTec AD 2、VisA、Real-IAD、UniPCB、その他PCB/SMTデータセットで公表スコアを持たない。 MMADにはまだリーダーボードがない（MMAD GitHub）。2026年8〜9月の最新の産業異常2論文は、依然としてGemini 2.5 ProとClaude Sonnet 4を最新の汎用ベースラインとして使っている（InspectorGPT、Anomaly-LR）。11月11日のarXiv全文検索では、この文脈での「Fable 5.2」または「Gemini 4 Carbon」への言及はゼロだった（arXiv API） single source, absence of evidence 。最も近い代替は次のとおりである。

- MMADスコアを持つ最新の最前線モデルはGPT-5.5で、500画像サブセットで「欠陥か否か」が69.95%、7タスク平均76.20%に対し、人間の専門家は95.24%と86.65%である（AnomalyClaw） single source 。GPT-4oは2024年に68.63%と74.92%だった（MMAD, ICLR 2025）。2年間で約1.3ポイントの進歩である。
- LDU-Bench（ICリソグラフィの実SEMレビュー画像で、2026年モデルを含む唯一の電子機器ベンチマーク）では、良否トリアージはまずまず（マクロF1がGPT-5.4で0.932、GLM-5V-Turboで0.884、Claude Opus 4.6で0.876、Gemma 4 31Bで0.504）だが、11の欠陥形態分類は0.20〜0.41にしか達しない（LDU-Bench） single source 。
- Roboflowの独立ビジョン評価（2026年11月10日更新）では、物体検出mAP@50はGemini 4 Carbonで84.5、GPT-6.1 Terraで84.7、Fable 5.2で81.6に対し、Gemini 2.5 Proは33.7、GPT-5.5は43.6、Claude Opus 4.8は38.6である（Roboflow Vision Evals） single source, independent evaluator, private datasets 。

FIG 11 **教師候補：汎用スコアは一世代で倍増しかし *2026 年最上位モデルで産業欠陥ベンチマークの公表スコアは 1 つもない。***

Roboflow 汎用検出 mAP@50



産業欠陥ベンチマーク（MMAD、MVTec AD 2、VisA、Real-IAD、UniPCB）：これら 2026 年最上位モデルの公表スコア 0 件
汎用検出スコアは一世代で倍増したが、欠陥判定の代わりにはならない。自社のゴールデンセットで実測すべき

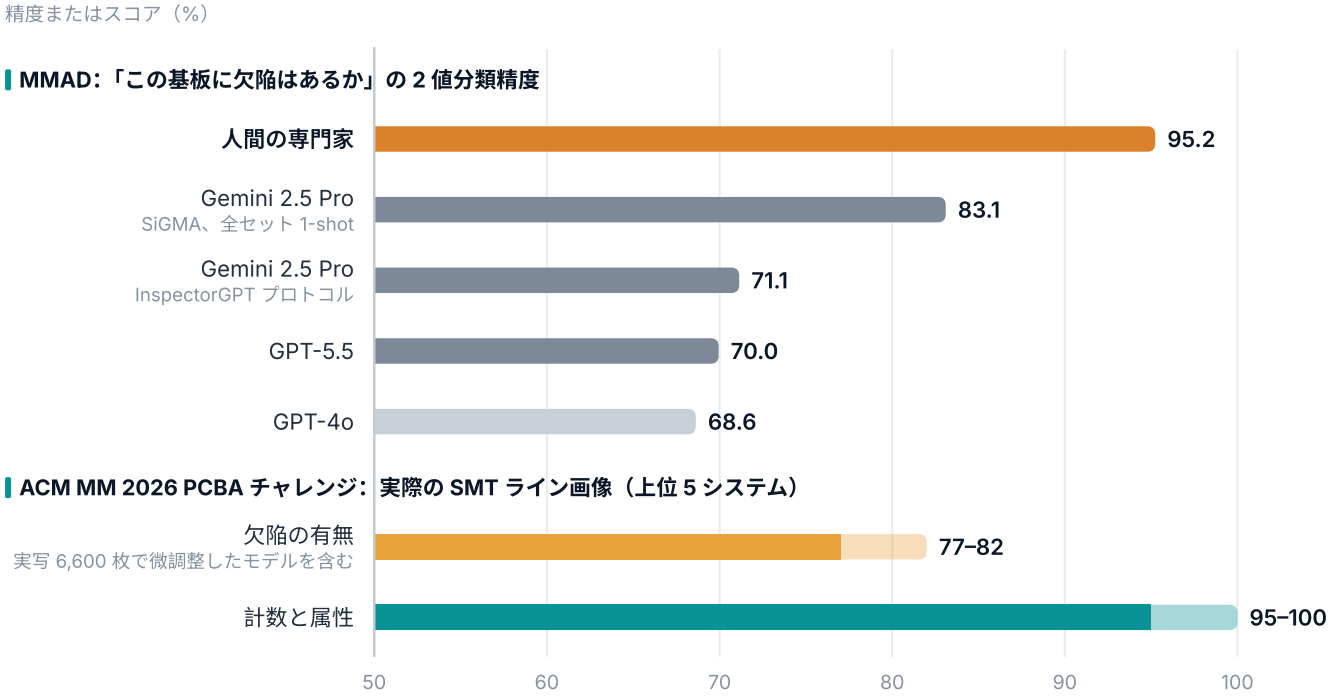
出典： Roboflow Vision Evals；モデルリリースノート；MMAD、MVTec AD 2 ほか（2026 年 11 月 11 日時点）。

教師候補（2026年11月）	Mトークンあたり価格（入力/出力）	Roboflow検出mAP@50 / カウント	産業欠陥ベンチマーク	Mainland Chinaで使用可
Claude Fable 5.2	$8 / $40	81.6 / 86.5	なし	不可
Claude Opus 5.5	$4 / $20	74.5 / 80.6	なし	不可
GPT-6 Astra	$10 / $50	82.1 / 80.2	なし	不可
GPT-6.1 Terra	$1 / $5	84.7 / 80.2	なし	不可
Gemini 4 Carbon	$2 / $10（プロモーション）	84.5 / 90.1	なし	不可
Qwen3.8-Max（ビジョンはAPIのみ）	$2 / $6	76.7 / 81.1	なし	可
Qwen3.8-27B（オープン）	ローカル	65.7 / 64.9	なし	可
GLM-5V-Turbo	$1.20 / $4.00	56.5 / 48.6	LDU-Benchトリアージ 0.884	可
Gemma 4 31B（オープン）	ローカル	47.5 / 51.4	LDU-Benchトリアージ 0.504	可（ローカルウェイト）
参照：GPT-5.5 / GPT-4o	—	43.6 / 68.0（GPT-5.5）	MMAD二値69.95% / 68.63%	不可

教師候補（2026年11月）	Mトークンあたり価格（入力/出力）	Roboflow検出mAP@50 / カウント	産業欠陥ベンチマーク	Mainland Chinaで使用可
人間の専門家	—	—	MMAD二値95.24%	—

新しい論文は依然として前世代をテストしているが、同じ方向を指している。MMAD全集では、人間の専門家は欠陥有無で95.2%、Gemini 2.5 Proは83.1%（SiGMA）だが、同じモデルは別の論文では71.14%にすぎない（InspectorGPT）。テストプロトコルがスコアを、モデル世代と同じくらい動かすのである。CVPR 2026 VAND 4.0チャレンジでは、既製の視覚言語モデルは61.88 APで、教師あり手法の90.84に対して劣り、主催者は「現時点では微調整済み分類器を代替できない」と結論した（VAND 4.0） single source 。ACM MM 2026 PCBAチャレンジでは、上位5システムは欠陥有無で76.92〜82.47、部品種別とピンカウントは95〜99.5に達した（arXiv 2609.21276） single source 。認識することは判定することよりはるかに容易なのである。

FIG 12 ***「欠陥はあるか」は汎用モデルには依然難しい最良の汎用モデルは MMAD で人間の専門家に 12 pts 以上劣る。実ライン画像ではチューニング済みシステムが優位。***



出典： MMAD；SiGMA；InspectorGPT；ACM MM 2026 PCBA チャレンジ。

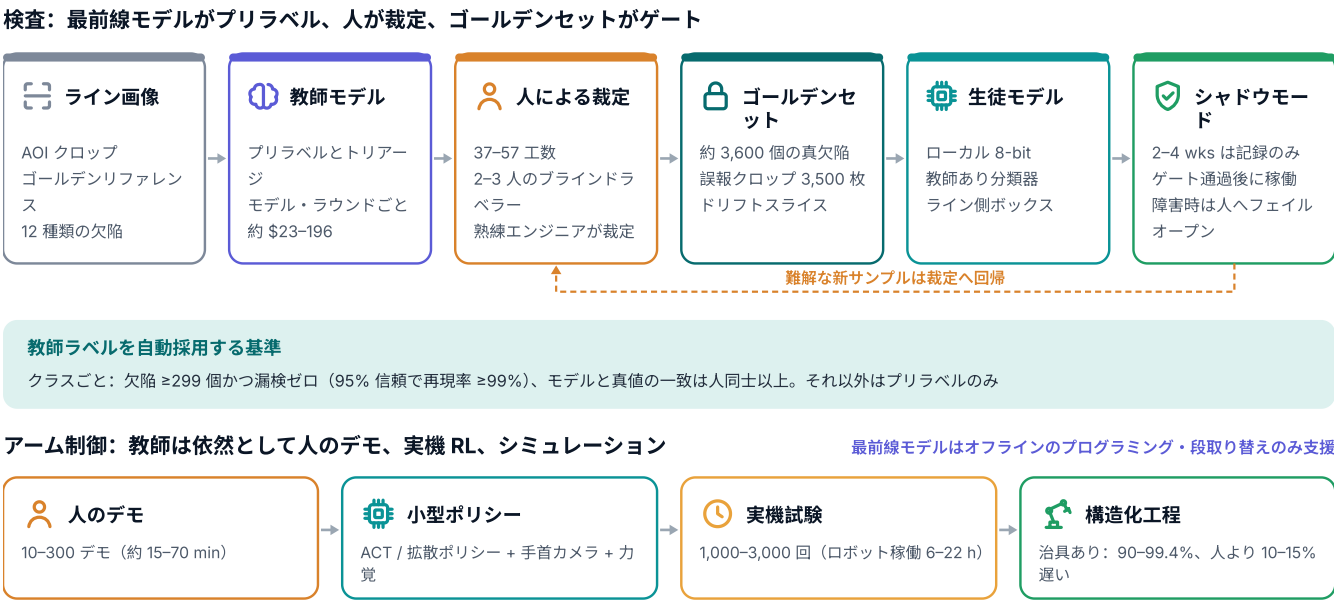
ここから3つの結論が導かれる。見ることと数えることは一世代で倍増したが、異常を判定することはゆっくりしか進まず、プロトコルに大きく依存し、系統的なバイアスを伴う。新モデルがどれだけ向上したかは、工場自身の画像でしか測れない。学習分布内では、微調整済み7Bスペシャリストが依然として汎用モデルに勝つ（Anomaly-LR、UniPCB）。そして実ラインのデータはスコアを崩壊させる。組立済み電子パネルでは、画像レベルのAUROCがMVTec ADの97〜98から31.5〜78.6に落ちた（arXiv 2606.01992） single source 。Mainland China企業にとって使える最強の教師であるQwen3.8-Maxは、世界の最前線より約8ポイント低い。

数十〜数百ラウンドの実行：問題は金ではなくラベル品質

金は問題ではない。2026年11月の定価では、100万画素画像1,000枚は1ラウンドあたり約$3（GPT-6.1 Terra）〜$32（GPT-6 Astra）で、100,000枚で100ラウンドなら一括割引前に約$32,000〜135,000である estimate （Claude vision docs、OpenAI vision guide、Roboflow Vision Evals）。単純なラベルでは、人1人分のコストはTerraとほぼ同じである。教師の利点は価格ではなく速度と規模である。顧客のNDAが通常は製品画像を工場内に留めるため、ゴールデンセットは現地でラベル付けする。

本当の障害は品質であり、ラウンドを増やしても系統的エラーは直らない。Roboflowは各タスクを3回実行するが、スコアは±0.1〜1.4ポイントしか動かない（Roboflow）。モデルは主に自分のミスを繰り返し、多数決では救えない。ラウンドは各回が情報を加える場合のみ役立つ。良質な参照画像を1〜2枚加えると約3〜4ポイント向上するが、それ以上は何も加えない（AD-Copilot）。モデルが良質な参照に対して数ターンにわたり議論すると、GPT-5.5のクロスドメインAUROCが6.23ポイント、MMADで2.95ポイント向上し、約3回の呼び出しでピークに達する（AnomalyClaw） single sources 。「教師ラベルで学習した生徒は人間ラベルに近づく」ことは、自然画像でしか示されていない。COCOとObjects365のQwen3-VLラベルで学習したResNet-101は、人間ラベル結果の95.7〜99.4%に達し、著者らはドメインデータは未検証と述べている（arXiv 2602.20972） single source 。

FIG 13 ***2つの教師–生徒パイプライン検査では最前線モデルがプリラベルし人が裁定。ロボットアームの本当の教師は依然として人のデモ。***



出典： 筆者の総合（第 3 章）；コストとサンプル数は推定。

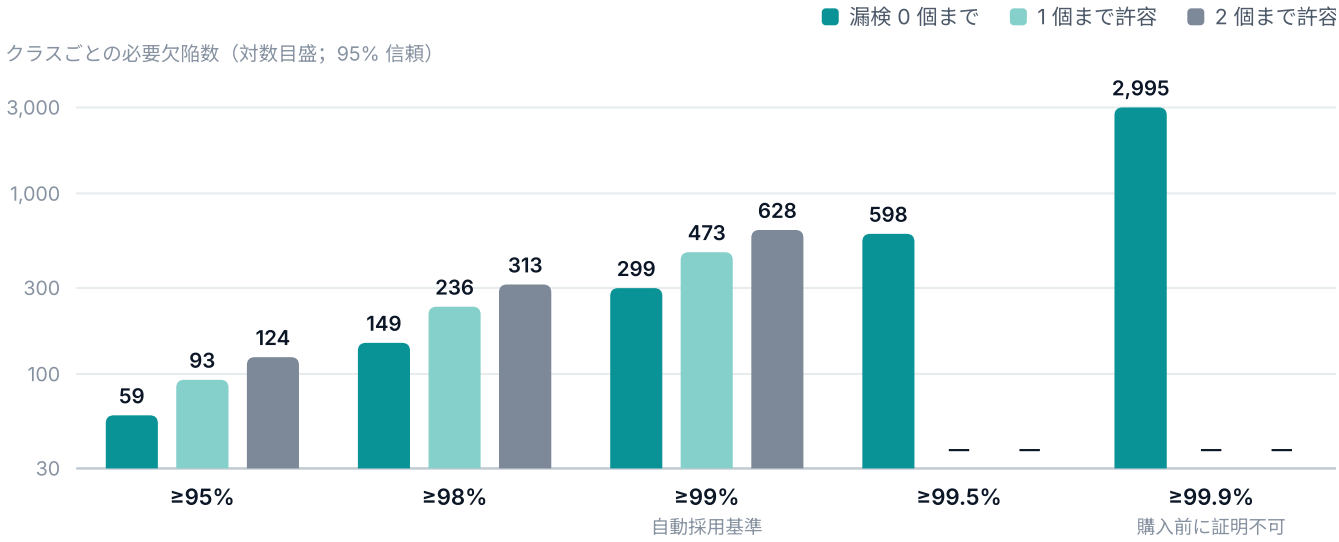
実用的なプロトコル estimate ：

1. **工場自身のAOIアーカイブと保管されたNG基板からゴールデンセットを収集する。** 12の真の欠陥クラス（欠落、位置ずれ、ツームストーン、極性、誤部品、ブリッジ/短絡、はんだ不足、はんだ過剰、はんだボール、リード浮き/断線、部品損傷、異物）と4つの誤報原因（影、フラックス、シルクスクリーン、公差）、さらに別ラインまたは異なる照明・基板色・品番からの少なくとも300欠陥からなる「ドリフトスライス」に層別化する。
2. **2〜3人のIPC-A-610訓練済み検査員でブラインドにラベル付けし**、上級エンジニアが判定し、X線・電気テスト・断面で曖昧なサンプルを確定する。検査員一致率がκ ≥0.75（重要クラスは≥0.90）に達した場合のみクラス定義を採用する。LDU-Benchの11の電子機器欠陥形態での人間一致率は0.727にすぎないため、一部クラスは統合または再定義が必要である。AIAG方式の属性一致（有効性≥90%、見逃し≤2%、誤報≤5%、κ >0.75、リリースは>0.90）が妥当な下限である（Fabrico、iFactory）。
3. **正確二項（Clopper–Pearson）片側95%信頼限界でサイズを決める**（binomial confidence intervals、[rule of three](https://en.wikipedia.org/wiki/Rule_of_three_(statistics))）：

証明する再現率	見逃し0個まで	1個まで	2個まで
≥95%	59欠陥	93	124
≥98%	149	236	313
≥99%	299	473	628

証明する再現率	見逃し0個まで	1個まで	2個まで
≥99.5%	598	—	—
≥99.9%	2,995	—	—

FIG 14 ***ゴールデンセットの必要サイズ 漏検ゼロで再現率 99% を証明するにはクラスあたり 299 個の欠陥が必要。99.9% は購入前に証明できない。***



出典： 正確な二項信頼区間（95%）。

クラスあたり60欠陥で合格/不合格スクリーニングには十分であり、自動採用を決めるには300個が必要である。全体では、約3,600欠陥＋3,500誤報クロップで、ラベル付けと裁定に約37〜57工数かかり、教師候補の実行コストは$23〜196である。実際のコストは、最稀少クラスが決める2〜6週間の収集期間である estimate 。基板全体ではなく単一部品のAOIクロップを送り、対象は少なくとも42〜48ピクセル幅とする（arXiv 2610.09313）。

1. **教師ラベルを自動採用するのは、ゴールデン欠陥≥299個で見逃しゼロ、モデルと真値の一致が人間同士の一致以上、かつ誤報の50%以上を処理できるクラスに限る。** 短絡、部品欠落、極性、誤部品などの重要クラスは99.5〜99.9%（598〜2,995欠陥）が必要である。それ以外は、AIが高信頼度で処理できないものはすべて人に回す。欠陥流出率0.1%未満は購入前に証明できない（見逃しゼロで2,995欠陥。0.01%には29,956個必要）。そのためラインは、AIが処理した呼び出しの人によるサンプリング、下流のICT/FCTをバックストップとして、流出のSPCを維持する。検証済みラベルは従来型の検出器または分類器に蒸留し、新製品ごとに再検証する。

利用規約とデータ規則も教師を決める。Anthropicは自社サービスを競合モデルの学習に使うことを禁じる（Anthropic commercial terms）。OpenAIは、第三者に販売しない社内分類器の学習に出力を使うことを認める（OpenAI business terms）。DeepSeekは蒸留を明示的に認める（DeepSeek terms） primary terms 。いずれも「競合モデル」を定義していないため、商用利用には法的レビューが必要であり、顧客のデータ規則が通常は画像を現地に留める。最も安全なデフォルトはローカル実行のオープンウェイト教師であり、クラウド最前線モデルは顧客が書面で許す場合のみ使う。

検査の生徒：小型で高速。ボトルネックは光学系、データ、検証

生徒はボトルネックではない。YOLO26nは$249〜399のOrin Nano SuperでINT8で1画像3.80 ms（Ultralytics） vendor test 。NVIDIAは約600画像で基盤モデルを適応させた後、3つのPCB欠陥クラスで98.51%を報告する（NVIDIA） vendor claim 。合成欠陥はmAPを0.9〜2.5ポイントしか加えない（arXiv 2605.04635）。制約は光学系、ラインデータ、検証、ライセンスである。Ultralytics YOLOはAGPL-3.0またはエンタープライズライセンス（Ultralytics）であるため、クローズド製品にはライセンスか、RF-DETRのようなApache-2.0検出器が必要である。

ロボットの生徒：構造化された工程は生産グレードに近い。フレキシブルで動的な作業はそうではない

2026年11月時点でロボットの教師は3種類あり、ローカル生徒になりうるのは1種類だけである。オープンで微調整可能なVLA（π0/π0.5、GR00T N1.7、X-VLA、RDT2、SmolVLA）である。クローズドなロボットモデル（ベータAPI経由のπ0.6/π0.7、信頼されたテスター向けのGemini Robotics 2）は現地に展開できない（The AI Insider、DeepMind）。最前線の汎用モデルは遅く、細かい操作が苦手である。Artificial Analysisのテストでは46〜69点、把持成功率28〜45%、タスクあたり約30分で、「生産利用には遅すぎ、高すぎる」（AA-Robotics）。GPT-6 Astraは精密スロットを20回中2回しか成功しなかった（RoboCurve）。関節を直接駆動すると、必要な約83 Hzに対し0.2〜0.4 HzでLIBEROで0〜5.5%である（Anthropic） verified across three sources 。Fable 5.2のシミュレーションRoboDojoベンチマーク64.9%は内部実行である（Anthropic） vendor claim 。

10月以降の第三者研究も一致している。3つの主要エージェントでLIBERO-10で約33〜44%（arXiv 2610.30051）。エージェントがサブタスクの24〜39%で成功を虚偽申告（arXiv 2611.08209）。Opus 5.5が準静的実機タスク108件中104件を完了、ただし各280秒で挿入や組立はなし（AMP1） single sources 。最前線モデルはオフラインに属する。プログラムを書き、タスクをオーケストレーションし、成功基準を起草する。

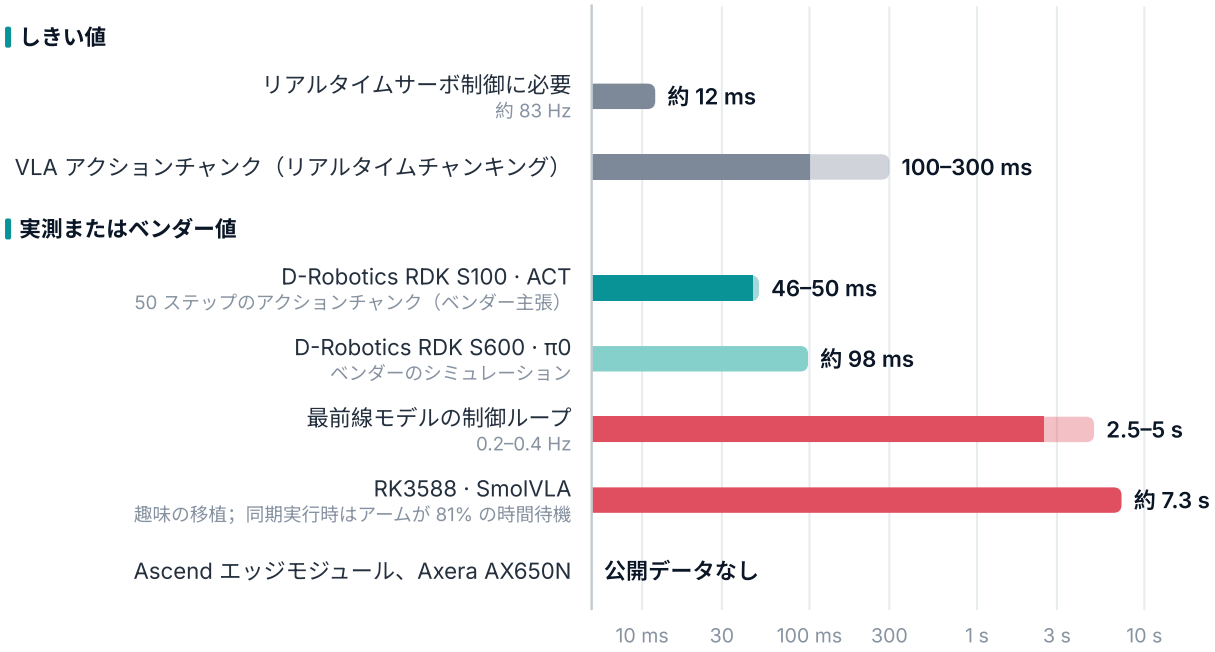
生徒の品質には明確な特徴がある。学習分布内では良いが、分布外では崩壊する。π0.7は既知タスクで「しばしば90%超」、未知タスクで60〜80%に達する（π0.7 paper） vendor research 。ContactDPは学習済みコネクタで97.8%だが未知コネクタで28.6〜66.7%（ContactDP）。わずかなカメラ・姿勢変化で95%が30%未満に落ちる（LIBERO-Plus、LIBERO-Plus, CVPR 2026）。移動コンベアからの学習把持は58.89%がピークである（ForeTime-VLA） single sources 。これは古典的なビジョントラッキングが量産で何年もやってきた仕事である。

生産に近い証拠はすべて、構造化された工程、人のデモ、実機での修正に由来する。Neuromekaは状態機械と事前教示モーションを維持し、把持、ケーブル挿入、はんだ付けのみを各20分未満のデータで学習した。324件中322件を量産で成功、人より12.8%遅い（Neuromeka） single source, vendor 。Fraunhoferは68分のデモで4コネクタにわたり92.8%を達成（Fraunhofer）。BerkeleyのHIL-SERLは1〜2.5時間の実機RL後にRAM、SSD、USB挿入で100/100成功（HIL-SERL）。AgiBotはタブレットテストラインで20秒タクト内、1ステップ18〜20秒で稼働（IThome） vendor claim 。

蒸留が買うのは速度であって汎化ではない。π0.5はJetson Orin素で0.70 Hz、非同期スケジューリング後10.30 Hz（EagleVLA）。レイヤー蒸留で約3 Hzから約10 Hzになる（Shallow-π） verified 。生徒は教師がカバーしたものだけを継承する。新製品ごとにタスクデータが必要である。

FIG 15 ***エッジポリシーの遅延小型 ACT ポリシーはエッジボードで約 50 ms。趣味用チップに移植した VLA は 7.3 s。***

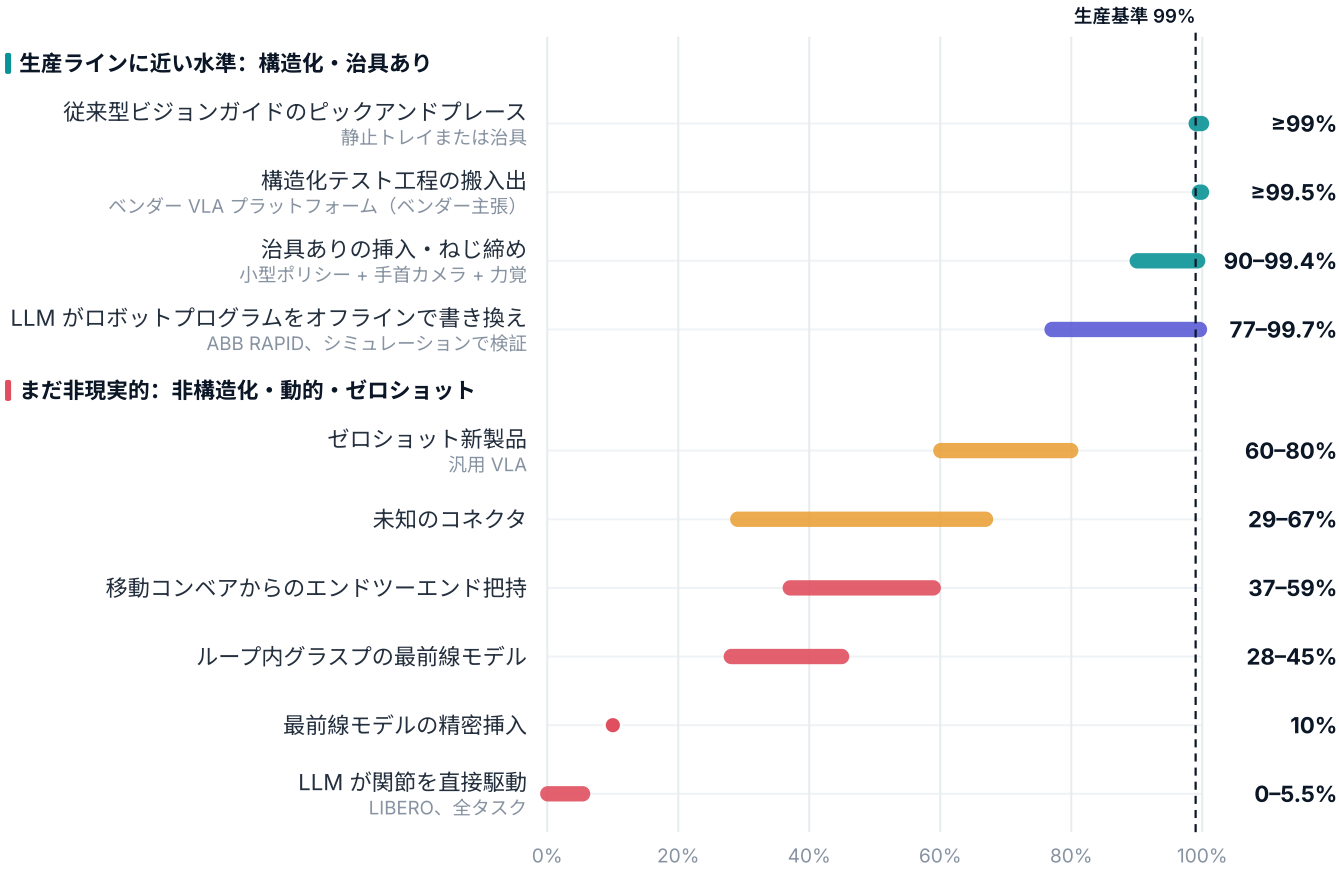
アクションチャンクまたは制御サイクルあたりの推論遅延（対数目盛）



出典： D-Robotics 文書とフォーラム（ベンダー値）；GitHub コミュニティ移植；Anthropic 研究。

中国のエッジチップでは、測定された学習ポリシーはD-RoboticsのRDK S100上のACTポリシーのみで、50ステップチャンクあたり46〜50 ms、成功率は非公開である（D-Robotics RDK S docs） vendor claim 。RK3588へのSmolVLAの趣味移植はチャンクあたり約7.3秒かかる（GitHub）。量子化は速度を無料では買えない。4-bit π0.5ビルドはバッチサイズ1で16-bitより速いものはなかった（LoopQ）。デモは高価である（Reutersは初心者テレオペレーターについて、使えるモーション1つあたり約300回の試行と報じる（Notebookcheck））。検証はさらにコストがかかる。95%信頼で失敗率≤0.1%を証明するには約3,000回の連続成功、17〜22ロボット時間が必要である estimate 。学習済み操作ポリシーで安全認証を取得したものはない。

FIG 16 **ロボット生徒：構造化された工程でのみ生産級に近づく *治具あり工程は 90–99%+。非構造化・動的・ゼロショットはまだ非現実的。***



出典： 第 3 章の論文・ベンダー資料；一部はベンダー主張。

電子機器タスク	使える生徒	期待される成功率	人との速度比較	段取り替えあたりのコスト	2026〜2028年の判定
高多品種ピックアンドプレース、キッティング、機械搬入出（静止トレイまたは治具）	学習済み知覚＋プログラムまたは計画されたモーション	古典ビジョンガイドで≥99%	従来工程と同等	数時間	現在実現可能
治具付きコネクタ、FFC、ケーブル挿入、ねじ締め、はんだ付け	状態機械＋小型BC/拡散/ACTポリシー＋手首カメラ+力・トルク（理想的には触覚）＋人の修正	90〜99.4%	10〜15%遅い	10〜300デモ（≈15〜70分）＋検証1,000〜3,000回（6〜22ロボット時間）	実現可能、研究開発が重い。初回工程は数か月
構造化テスト工程の搬入出とOK/NG仕分け	ベンダーVLAプラットフォーム＋デジタルツイン＋実機RL	≥99.5% vendor claim, conflicting	1ステップ18〜20秒、20秒タクト内	再学習≤4時間＋較正15分	ベンダープラットフォームで実現可能
段取り替えプログラミング	LLMがロボットプログラムをオフラインで作成・編集、シミュレーションで検証	ABB RAPID書き換えで77〜99.7%	タクトに影響なし	プログラムあたり数分〜数時間	エンジニアリングツールとして実現可能
移動コンベアからのエンドツーエンド学習把持	VLA生徒	37〜59%。高速ベルトでは≤37%	—	セットアップあたり≥458デモ	2028年まで不可。古典トラッキング＋学習済み知覚を使う

電子機器タスク	使える生徒	期待される成功率	人との速度比較	段取り替えあたりのコスト	2026〜2028年の判定
新データなしの新製品（ゼロショット）	汎用VLA	60〜80%。未知コネクタ29〜67%	—	—	非現実的
アームを駆動するループ内最前線LLM	GPT-6、Claude、Geminiエージェント	把持28〜45%。精密挿入10%	タスクあたり≈30分または280秒 vs ≈20秒	—	非現実的
自由経路ワイヤーハーネスと多段階フレキシブル組立	—	2026年の生産実績なし	—	—	2028年まで不可

出典：上記の研究、および（University of Passau on RAPID rewriting、GraspVLA、Komax） **mostly single source and vendor data** 。2026〜2028年、ロボットにとって大規模モデルの価値は、事前学習済みの事前分布とオフラインプログラマーとしてであって、生徒を「教える」ものとしてではない。筆者が見つけた生産に近い事例（Neuromeka、LongcheerでのAgiBot、Fraunhofer、ContactDP）はすべて、人のデモ、力・触覚センシング、シミュレーションまたはデジタルツイン、教師ありRLに依存している。最前線モデルのラベルに依存するものは1つもない。

コストと回収

04 コストと回収：AI再判定は数か月、機械搬入出は数年、ピックアウトアームは回収不能

人件費：USはShenzhenの約5.5倍、Taiwanは約1.5倍、Southeast Asiaの大半は半分未満

労働を置き換えるリターンは、まず労働のコストから始まる。Shenzhenの公式賃金ガイドは、2024年の製造業品質検査員の中央値を年**RMB 74,074**とする。電子機器製造では賃金は総労働コストの86.92%であるため、フルロードコストは約RMB 85,000である。JETROの2025年調査は中国の工場労働者の年コストを$12,667、約RMB 85,100としており、差は0.2%以内である（Shenzhen wage guidance、JETRO 2025） verified 。

地域	検査員または搬送作業者1人のフルロード年コスト（低 / 基準 / 高）	根拠
Mainland China、Shenzhen	RMB 70k / **85k** / 100k（$10.4k / **12.7k** / 14.9k）	公式中央値 × 1.15。JETROと一致 verified
Guangdong tier-2賃金地域（Dongguanなど）	RMB 65k / **75k** / 85k	Guangdong 2023中央値 × 1.15＋2年分の賃上げ estimate
Yangtze River Delta（Suzhou、Kunshan、Wuxi）	Shenzhenと同様	検査労働が安いという根拠はない。Jiangsuの最高最低賃金はShenzhenを約5.6%上回る estimate
Taiwan	$16.6k / **19.6k** / 22.7k（NT$534k / **630k** / 729k）	労働部職種別賃金調査＋法定負担≈1.18。上限はJETRO estimate
Malaysia	$6.8k / **9.1k** / 10.0k	JETROと最低賃金 estimate
Thailand	$4.7k / **7.0k** / 8.8k	同左
Indonesia	$5.0k / **6.0k** / 6.3k	同左
Vietnam	$3.2k / **5.3k** / 6.5k	同左
Philippines	$4.0k / **4.5k** / 4.9k	同左
United States	$54k / **70k** / 80k	BLS 2025年5月の検査員中央値$48,570 ÷ 報酬に占める賃金65.5% estimate

出典：（JETRO 2025、Guangdong wage guidance、Wuxi HR bureau、Taiwan occupational wage survey、PTS News、BLS OEWS、BLS ECEC）。

FIG 17 **検査・搬送作業者１名の年間コスト*総コストで、米国は深圳の約 5.5 倍、台湾は約 1.5 倍。***

QC・搬送作業者 1 名の年間総コスト（$10k；点=基準、バー=低–高）



出典： 深圳公式賃金指針、台湾労働部、JETRO、BLS；筆者推定。

基準を定める3つの補正がある。第一に、Shenzhenは2026年7月に年金拠出下限を月RMB 4,775から5,521へ引き上げた（Shenzhen Bendibao） single source 。したがって2026年のShenzhenの検査員はより確実にRMB 80〜90kかかる。第二に、ポストは人ではない。12時間2シフトにはPearl River Deltaで約2.0人（週6日）〜2.4人（通年）、残業上限のあるSoutheast Asiaでは約2.7〜3.1人、USとTaiwanの24×7では4.2〜4.5人必要である estimate 。AI再判定は通常、再判定員1人で2〜4ラインをカバーできるため、現実的な削減は**1ラインあたりフルタイム0.5〜1.5人**であって、シフトごと1ラインあたり1人ではない。第三に、Taiwan、Vietnam、Malaysiaの買い手はコストだけを追っているのではない。JETRO調査では、過去2年で採用が難しくなったとする企業はTaiwanで61.1%、Vietnamで48.2%、Malaysiaで44.9%に対し、Mainland Chinaは18.6%である（JETRO 2025） single source 。

設備価格：平均すべきでない4つの基準

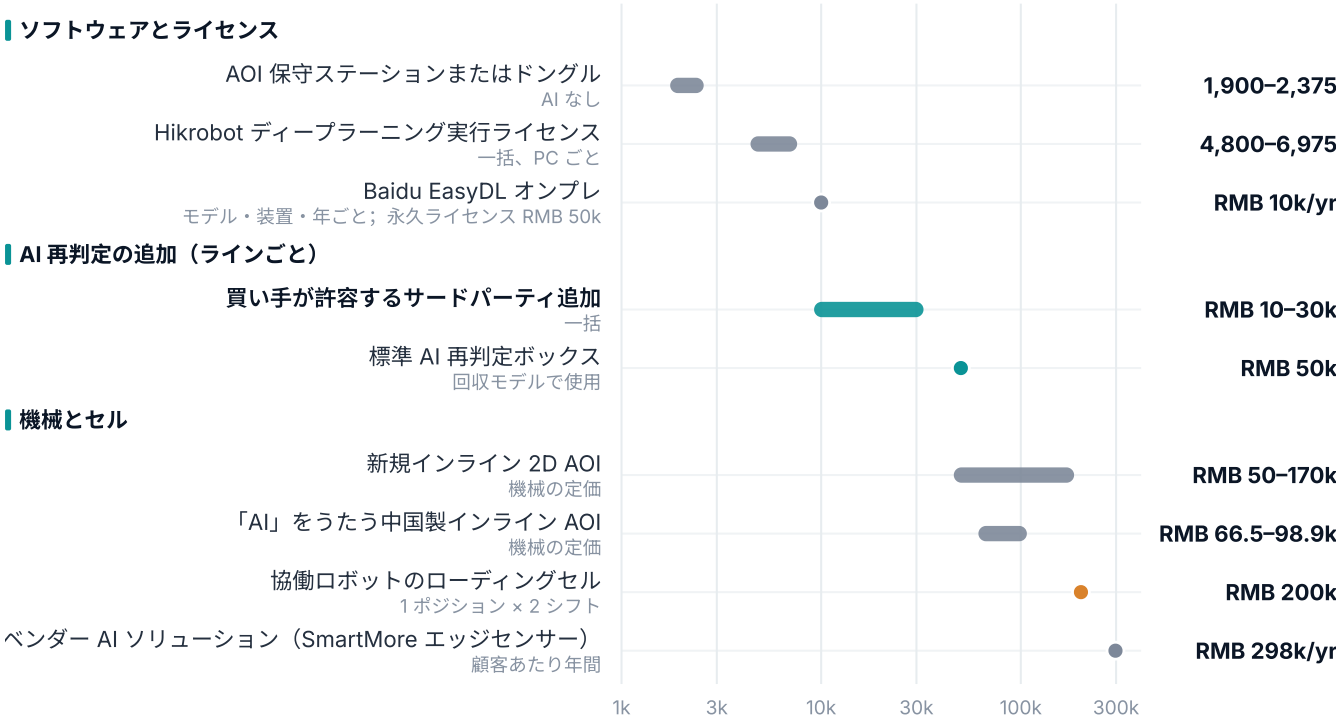
AOI価格が一致しないのは、主に異なるものを測っているからである。オンライン出品（2026年11月、新品・中古・レンタル混在）は、オフラインまたは卓上2Dで約RMB 17〜80k、インライン2DでRMB 50〜170k、インライン3DでRMB 80〜475k、韓国製3DではRMB 700kに達する（1688 inline AOI、1688 offline AOI、1688 3D AOI） single source, list prices 。2025年11月の入札では、3D AOI 1台＋3D SPI 1台がRMB 800kに上限設定された（tender notice）。Sinic-Tekの目論見書は2019〜2022年の3D AOI 1台をRMB 428〜512kと示唆し、2025年報告書では約RMB 340〜470kである（Sinic-Tek prospectus、Sinic-Tek 2025 annual report） primary + estimate 。海外ベンダーは卓上2Dを$3,000〜20,000、インライン2Dを$30〜70k、エントリー3Dを$50〜90k、ハイエンド3Dを$100〜200k+と見積もり、同じインライン機がChinaで$30〜50kとする（Averroes） vendor estimate from a seller of competing AI software 。

AI再判定自体には公開のRMB価格がない。ベンダーは無料の現地評価の後にケースバイケースで見積もる（Sohu on Hengtianyi）。EC出品、入札、ベンダー記事、Taiwanメディアを検索しても公開見積りは見つからなかった（1688、51SMT）。目安となるのは、Siemens事例から示唆される1ラインあたり約€27k estimate 、US代理店のリモート再判定ネットワークモジュールの定価$21,924（Manncorp） vendor list price 、SmartMoreのエッジAIセンサーの2025年の顧客あたり年約RMB 298k（36Kr） single source である。「AI」として販売される国産インライン2D AOIはRMB 66.5k（1688 inline AOI）、手動再検査用のNGバッファは約RMB 50k（1688 AOI review）。したがってサードパーティ再判定アドオンの上限は1ラインあたり約RMB 10〜30k、または同程度の年間費である。それを超えると、買い手はAIを内蔵した国産AOIへの買い替えを選ぶだろう estimate 。

目安	価格（RMB）	得られるもの	出典
AOI修理ステーションまたはソフトウェアドングル（旧型TRI、Zhenhuaxing）	≈1,900〜2,375	ライセンスキー、AIなし	1688 list price

目安	価格（RMB）	得られるもの	出典
汎用ディープラーニングビジョンランタイム（Hikrobot VisionMasterドングル）	一括≈4,800〜6,975/PC	プラットフォーム。モデルの構築と保守は顧客	1688 list price
Baidu EasyDLオンプレミス展開	モデル・デバイス・年あたり10,000、または永久50,000	パッケージ化された推論サービス	Baidu AI docs 2022 price page
「AI」として販売される国産インラインAOI	66,500〜98,900/台	機械の買い替え	1688 list price
SmartMoreエッジAIセンサー	≈298,000/顧客・年	複数機械にまたがるベンダーソリューション	36Kr single source

FIG 18 ***価格レンジ数千 RMB のソフトウェアライセンスから、ロボットセルやベンダー AI 提案の RMB 200–300k まで。***



出典： 1688 出品、Baidu AI 文書（2022 価格表）、36Kr、業界インタビュー（未確認）。

Baidu型の年間費は、1〜4ラインに1台の推論サーバーと各1〜4モデルを前提とすると、ライン・年あたりRMB 2.5〜40k、現実的には約RMB 5〜10kのサブスクリプションを示唆する。永久ライセンスの20%では、サブスクと買い切りは5年目に均衡し、模倣する価値のある構造である estimate。買い手はほぼゼロのソフトウェア費に慣れている。Sinic-Tekの「その他」売上（スペア、サービス、レンタル、付属品）は2025年売上の7.65%、設置機械1台あたり年約RMB 2,300〜3,100だった（Sinic-Tek 2025 annual report） primary + estimate。ライン・年あたりRMB 5〜10kのAIサブスクは、買い手が現在AOIソフトウェアに払う額の2〜5倍である。したがって、既存ソフトウェア費との比較ではなく、それが解放する再判定工数（フルタイム1人あたり年約RMB 75〜90k）で正当化しなければならない。

ロボットアームについては、中国の平均協働ロボット価格は2025年に約RMB 58,600へ下落した（GGII） estimate。Dobotの6軸平均は、安価モデルのシェア拡大により同年19.1%下落した（Huxiu） verified。ただし同じモデルの定価は2026年に5〜15%上昇した（Sina Finance）。USでは、FANUC CRX-10iAが$51,434で出品され（Vention）、まとめではUR7eを$30〜48kとする（cobotcost） estimate。アームはUSセルの40〜50%にすぎない（Standard Bots）。Chinaでは、カメラ、グリッパー、安全、エンジニアリングがRMB 40kのアームの2〜4倍に容易に達するため、倍数ではなく絶対エンジニアリングコストで予算化すること estimate。

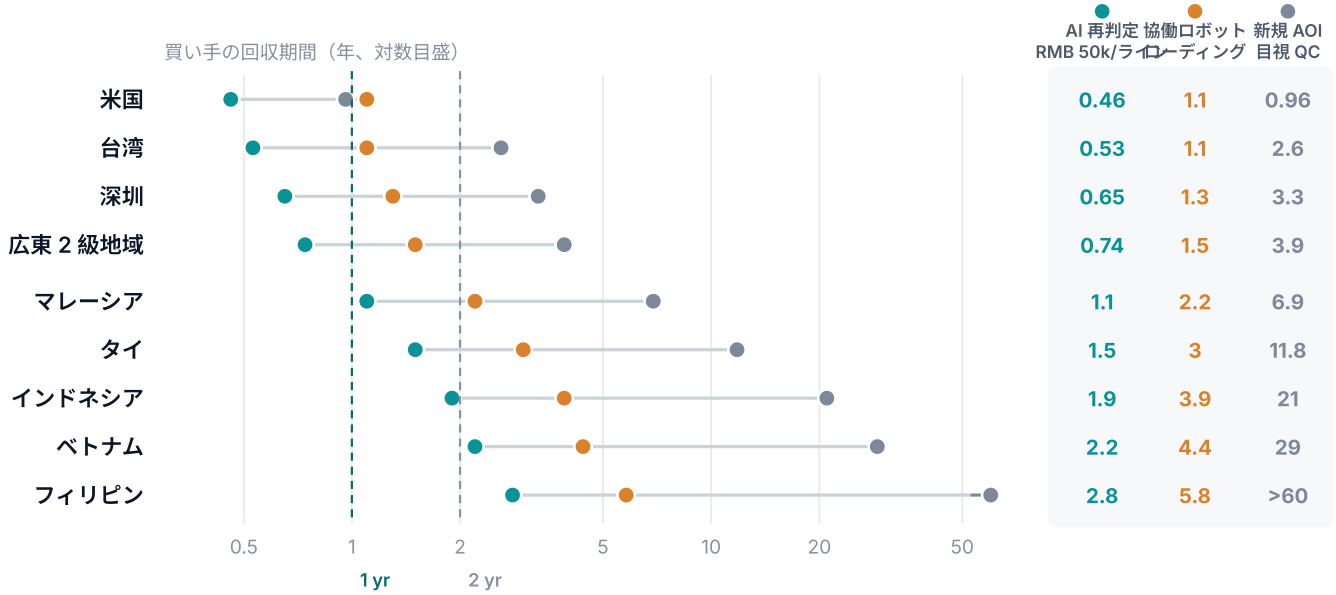
回収：再判定は数か月、搬入出は数年、ピックアウトは回収不能

単純回収 = 投資 ÷（削減人数 × フルロード人件費 − 年間運用コスト）。2シフト、補助金・関税なし。Taiwanの設備価格はChinaの1.3倍、Vietnam、Malaysia、Thailandは1.15倍、Indonesia、Philippinesは1.2倍、USは海外価格とする estimate。

シナリオ	投資（China / US）	削減人数	年間運用コスト
(a) AI再判定ボックスまたはAIカメラボックス	RMB 50k / $30k（ラインあたり）	1.0（ラインあたり）	15%
(b) 手動外観検査を置き換える新規インライン2D AOI（シフトあたり0.5再判定員が残る）	RMB 200k / $60k	1.0	12%
(c) 協働ロボットローディングセル（1工程 × 2シフト）	RMB 200k / $140k	2.0	8%
(d) 検出・ピック統合セル（検査1.0＋ピッキング0.07）	RMB 300k / $200k	1.07	8%
(e) NG基板の取り出し専用に追加するロボットアーム	RMB 150k / $100k	0.07	8%

地域	(a) AI再判定	(b) 新規AOI	(c) 協働ロボットセル	(d) 検出・ピック	(e) ピックアウトアーム
Shenzhen	0.65年（0.54〜0.80）	3.3（2.6〜4.4）	**1.3**（1.1〜1.6）	4.5（3.6〜5.9）	回収不能
Guangdong tier-2	0.74	3.9	1.5	5.3	回収不能
Taiwan	0.53	2.6	1.1	3.6	回収不能
Malaysia	1.1	6.9	2.2	9.2	回収不能
Thailand	1.5	11.8	3.0	15	回収不能
Indonesia	1.9	21	3.9	25	回収不能
Vietnam	2.2（1.6〜4.5）	29	4.4	34	回収不能
Philippines	2.8	>60（運用コスト≈節約）	5.8	≈100	回収不能
United States	0.46	**0.96**	**1.1**	3.4	回収不能

FIG 19 ***地域別の回収期間AI 再判定は米国・台湾・深圳で数か月、東南アジアで 1–3 年で回収。協働ロボット搬入出は数年。***



不良板ピックアウト専用アーム：どの地域でも元が取れない
直通率 90% 超ではピックアウトはシフトあたり 0.003–0.14 FTE のみ

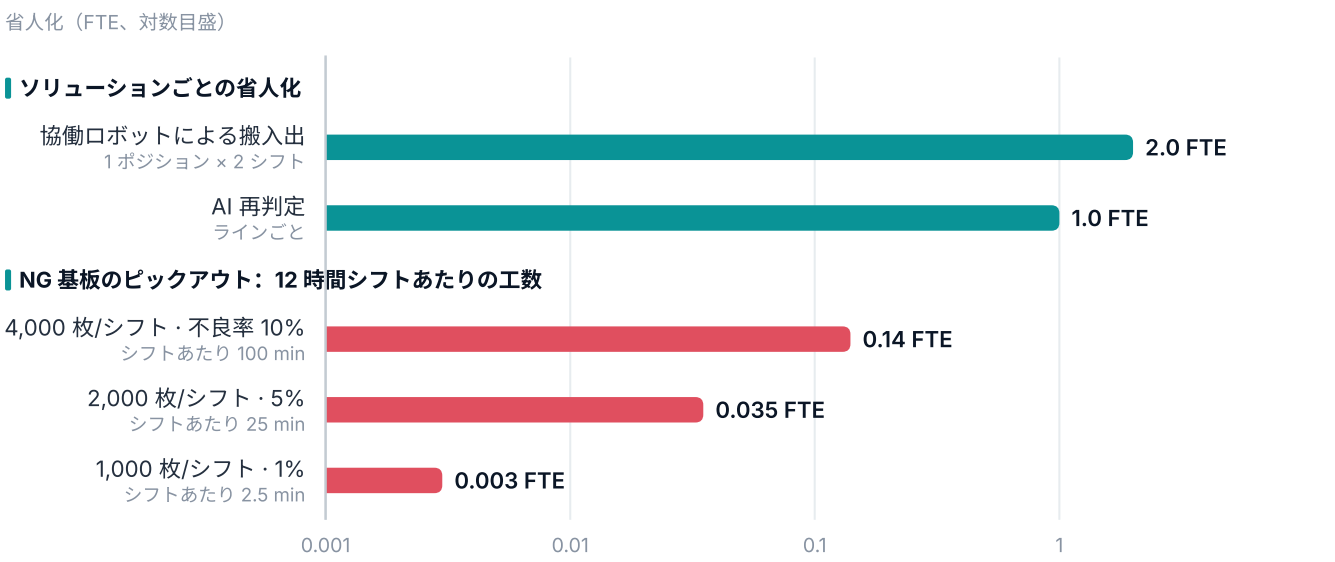
出典： 筆者モデル：AI 再判定ボックス RMB 50k/ライン；協働ロボットセル RMB 200k または $140k、2 シフト。

すべての値は上記入力からの推定である。感度分析：削減人数を半分にすると回収はおおむね2倍になる。1シフトでは(b)〜(d)が2倍。USの初年度100%償却は回収を約20%短縮し、中国・日本・韓国製設備への関税は約10〜40%延長する。中国の15%現地補助金は約15%短縮する。買い手の回収しきい値に関する独立調査は見つからなかった。ベンダーはAOIが「通常9〜18か月」で回収できると言い（Averroes）、Siemens事例は8か月を主張する vendor claims。筆者は1年と2年をスクリーニング基準に使う。このモデルは品質向上（保証、返品）と離職・訓練コストを除外しているため、保守的である。

「検出・ピック」の直感に反する部分は、労力が再判定にあり、少数の実NG基板をラインから取り出すことにはない点である。NG基板1枚あたり15秒の処理として estimate：

シフトあたり基板数	不良率	12時間シフトあたりのピッキング時間	人数
1,000	1%	2.5分	0.003
2,000	5%	25分	0.035
4,000	10%	100分	0.14

FIG 20 **不良板のピックアウトが割に合わない理由*直通率 90% 超では、ピックアウトはシフトあたり 0.003–0.14 人分のみ。***



出典： 筆者推定。

基本ケース（シフトあたり2,000基板、不良5%、2シフト）は0.07人分で、Shenzhenで年約RMB 6,000相当、アームの年間運用コスト約RMB 12,000を下回るため、どこでも回収できない。最悪ケース（シフトあたり4,000基板、不良10%）でもShenzhenで約13年、USで9年かかる estimate 。ライン停止が心配なら、標準のNG分流装置またはバッファコンベアがアームなしで解決する。業界の人は「直通率90%超なら、ラインを止めて手で基板を取り出せ」と言う。**それはピッキングについては正しいが、検査については正しくない。** したがってSMTラインの製品設計は「検査＋マーキングまたは分流」であり、ロボットアームは全パーツを搬送する場所（テスト治具ローディング、トレイ・マガジン処理、梱包）に残す。そこでは検査がほぼ無料のアドオンとなり、シナリオ(c)が適用される。

補助金・税・関税は回収を15〜25%動かすが、順位は変えない

Mainland China：支援は主に資金調達コストを下げる。単独機械が直接対象になることは稀。 全国の融資補助は14の優先チェーンで最大2年間、1.5ポイントの利息を補助する（Yicai） verified 。RMB 300kの機械では約RMB 9,000。Guangdongの最大20%のアップグレード報奨は、新規設備RMB 7M以上の登録プロジェクトが必要で、Shenzhenを除外する（Guangdong rules）。Dongguanは2026年7月に実際に4.42%を支払った（Dongguan allocation） single source, primary 。AI検査デバイスは、買い手の登録プロジェクト内で「付属ソフトウェア付き設備」としてのみ承認されるため、基本ケースは補助金なしを前提とする。

Taiwan：優遇は買い手に行く。 2025年5月にAIを含むよう改正された産業革新条例第10条の1により、買い手は2025〜2029年の新スマート機械またはAI（CNN/DNNベースの検査を含む）への支出の5%を当年の所得税から控除できる。または3年間毎年3%である（Statute、credit rules） verified 。サプライヤー側の助成はMainland China資本には閉じられている（MOEA） single source 。

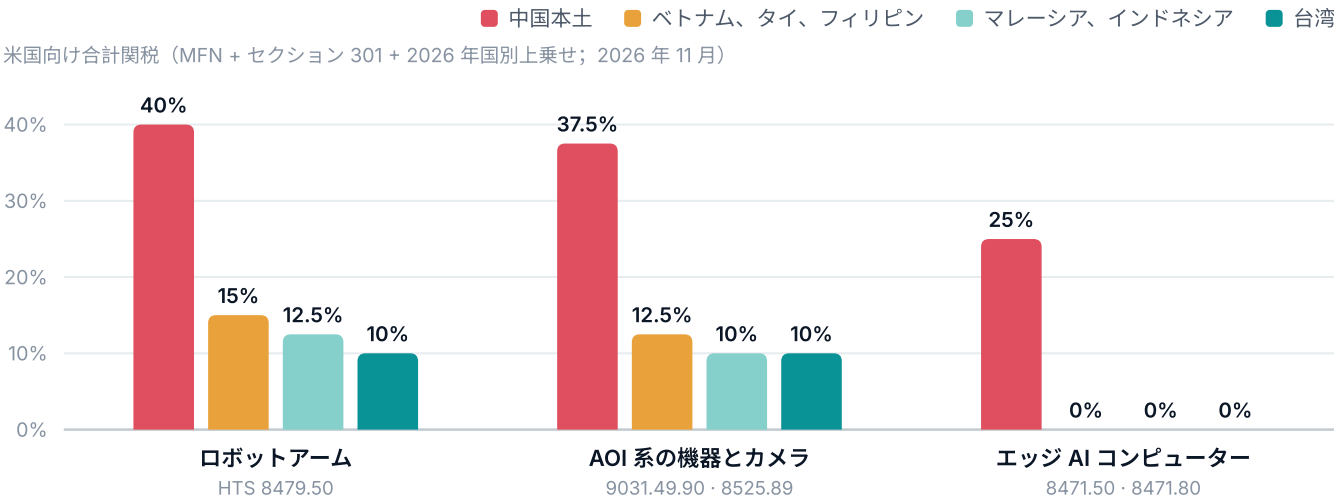
Southeast Asia：自動化購入に報いるのはMalaysiaとThailandのみ。 Malaysiaの最初のRM10Mに対する200%自動化資本控除は、利益を出す買い手にとって設備投資の約24%に相当する（MIDA、PwC Malaysia） verified 。ThailandのBOIはアップグレード投資の50〜100%まで最大3年間の免税を与え、Thaiの自動化サプライヤーが関与する場合に上限が上がる（BOI） single source, primary 。したがってThailand参入はローカルインテグレーターと組むのが最善である。Vietnam、Indonesia、Philippinesは自動化購入ではなく工場建設に報いる（Vietnam Law Magazine、PwC Philippines）。

United States：償却が回収を短縮し、関税が延長する。 2025年1月19日以降に購入した資産は恒久的な初年度100%償却となり、利益を出す買い手には約21%の連邦税シールドとなる（IRS Notice 2026-11） single source, primary 。ロボットと産業機械のSection 232調査は2026年10月28日、新関税ではなく交渉で終了し、180日以内に再評価される（White

House、Mayer Brown） verified 。Southeast Asiaでの最終組立は、アームとAOI型機器の追加課税を約37.5〜40%から10〜15%へ下げる（第1章）。

地域	主な手段	買い手の回収への影響 estimate
Mainland China	最大2年間1.5ポイントの融資補助。省・市のアップグレード報奨（Guangdongは登録プロジェクトRMB 7M以上が必要。Dongguanは実際4.42%を支払い）。Shenzhen 2026〜2029年施策（率は非公開）	単独機械では約0〜5%。大規模プロジェクト内では4〜15%
Taiwan	条例§10-1控除、5%または3%×3年	買い手が十分な税を払う場合、約5%短縮
Malaysia	200%自動化資本控除（最初のRM10M）	利益を出す買い手は約15〜25%短縮
Thailand	BOIの最大50〜100%投資の3年免税	免税期間外の利益買い手は約15〜25%短縮
Vietnam、Indonesia、Philippines	工場建設への所得税優遇。Philippinesは設備20%追加償却	単独の自動化購入ではほぼなし
United States	初年度100%償却。Mainland China製設備に合算関税≈37.5〜40%	償却で≈20%短縮、関税で≈10〜40%延長

FIG 21 **ロボット・AOI・エッジコンピューターの米国関税 *中国本土製アームは約 40%。東南アジア・台湾出荷は 10–15%。***



出典： USITC 関税率表第 99 章；Federal Register；USTR（2026 年 11 月）。

地域別に見ると、Mainland ChinaではAI再判定ボックスは数か月、協働ロボットセルは1.3〜1.5年で回収できる一方、労働削減だけを目的に購入する新規AOIは3〜4年、検出・ピック統合は4.5〜5.3年で、いずれも2年のスクリーニングを超える。TaiwanはShenzhenよりわずかに良い（再判定0.53年、協働ロボットセル1.1年）が、採用はより難しい。MalaysiaとThailandではAIボックスは1〜1.5年、協働ロボットセルは2〜3年で、利益を出す買い手には現地税優遇で約15〜25%速い。Indonesia、Vietnam、Philippinesでは非常に安いAIボックスだけが2〜3年以内に回収でき、需要はむしろ顧客の品質要件と人手不足から来る。USでは純粋なピックアウトアーム以外の全オプションが0.2〜3.4年で回収でき、関税、Section 232再評価、NRTL認証が主な変数である。

05 市場と競合
市場、競合、そして買い手の支払い方

市場規模：公表数値は桁違いに異なる。有用なのはボトムアップ集計のみ

すべての市場数値はその範囲とともに読まなければならない。中国のマシンビジョン市場は2024年にRMB 18.15Bで（Zhiyan） verified 、3Cエレクトロニクスが最大の買い手である。マシンビジョンの世界推定は約3倍、AOIは約6.5倍の開きがある（MarketsandMarkets、Vision Systems Design/Interact Analysis、Zhiyan）。Koh Young、TRI、Jutze、Sinic-Tek、ViTroxの売上からボトムアップすると、世界のSMT検査設備は$1〜2B規模である estimate 。

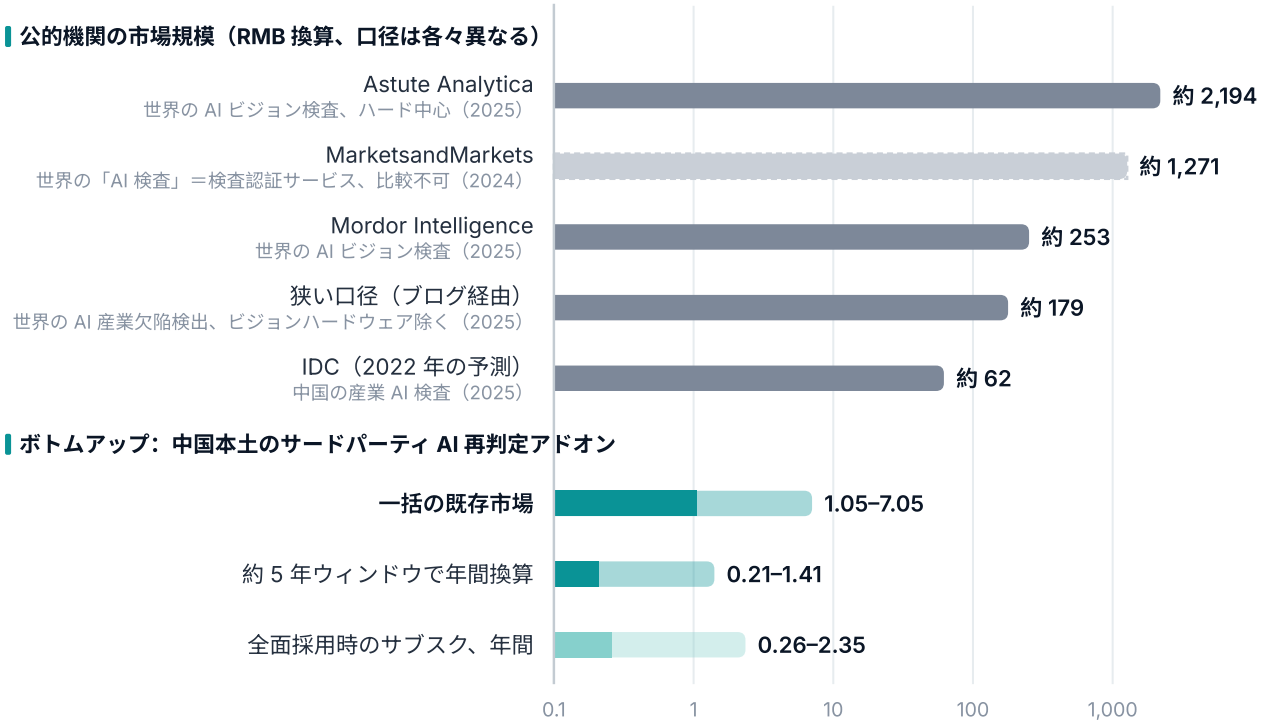
「AI外観検査ソフトウェア」の独立した市場は存在しない。公表数値は10倍以上異なり、すべてハードウェアかサービスを含む。

範囲	発行元	数値
世界「AI産業欠陥検出」（狭義、ビジョンハードウェア除く）	無名企業、iFactoryブログ経由	2025年に$2.66B、2035年までCAGR 8.6%、エレクトロニクス34%
世界「AI外観検査」	Mordor Intelligence	2025年に$3.76B、2031年に$12.8B、CAGR 22.67%
世界「AI外観検査」（主にハードウェア）	Astute Analytica	2025年に≈$32.66B
世界「AI検査」（試験・認証サービス、比較不可）	MarketsandMarkets	2024年に$18.92B
中国「産業AI品質検査」	IDC、2022年作成の予測	2025年に$958M（≈RMB 6.2B）、91.5%が通信・エレクトロニクスと他2業種

出典：（iFactory、GII/Mordor、GII/Astute、MarketsandMarkets、IDC） each single source, mostly paid-report summaries 。

FIG 22 **市場規模は 10 倍以上も異なる意思決定に有用なのは狭い口径とボトムアップ集計のみ。**

RMB 100M（対数目盛；USD は 6.7188 で換算）



出典： Mordor Intelligence、Astute Analytica、MarketsandMarkets、IDC（2022）、iFactory；筆者のボトムアップ推定。

ボトムアップでは、SMTラインの公表集計は1つしかない。New Venture Researchは2020年に世界で約73,231ライン、その47%が中国（2000年は19%）、約70%がハイエンド、30%がローエンドと推定した（EMSNow、NVR SMT2020 summary） single source, 2020 。NVRは現在IPCに属し、新しいデータは有料である（NVR）。年3〜5%成長、中国シェア40〜47%とすると、2026年に世界で約87,000〜98,000ライン、Mainland Chinaで35,000〜46,000ラインとなる（基準40,000） estimate 。

入力	低	基準	高	根拠
Mainland ChinaのSMTライン（2026）	35,000	40,000	46,000	NVR 2020基準 × 成長 × シェア
AI再判定なしの割合	75%	80%	85%	後付け期間、下記
サードパーティが到達できる割合（内製でない、OEM AIに縛られない、支払える）	40%	50%	60%	仮定：≈30%のローエンドライン＋一部の複数ブランドハイエンドライン。DBG型の内製構築を除外
対象ライン	**10,500**	**16,000**	**23,500**	積
ラインあたり一括価格	RMB 10k	RMB 20k	RMB 30k	価格レンジと上限（第4章）
一括対象市場（既存設置台数）	**RMB 105M**	**RMB 320M**	**RMB 705M**	積
≈5年の期間での年あたり	RMB 21M	RMB 64M	RMB 141M	期間は年8〜12%縮小
サブスク（ライン・年あたりRMB 2.5k / 5k / 10k、全面採用）	年RMB 26M	年RMB 80M	年RMB 235M	Baidu型年間費の目安

FIG 23 **ボトムアップ：40,000 ライン → 対象 16,000 → 一括約 RMB 320M*中国本土のサードパーティ AI 再判定ニッチは実在するが小さい。***



新規参入者が 3 年で対象ラインの 2–5% を獲得：約 320–800 ライン、年約 RMB 2–5M
サブスク（ライン・年あたり RMB 5k）では RMB 1.6–4M の経常収益、IDC の中国産業 AI 検査予測のわずか 0.3–2.3%

出典： NVR（2020 基準）；筆者推定。

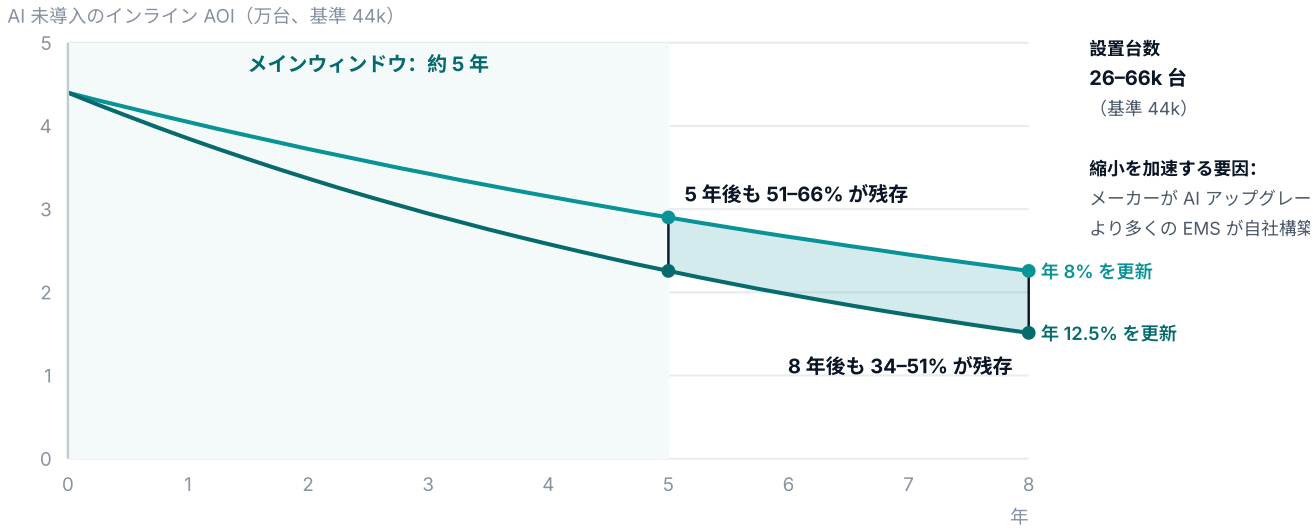
これらはすべて推定である。シェアも価格も公的に測定されていない。このニッチは、IDCの中国産業AI品質検査予測（約RMB 6.2B）の年0.3〜2.3%にすぎない。新規参入者が3年で基準対象ラインの2〜5%を獲得すると、約320〜800ライン、RMB 20,000/ラインで合計RMB 6.4〜16M、年約RMB 2〜5M、またはRMB 5,000/ラインで経常収益年RMB 1.6〜4Mとなる estimate 。これは企業内の事業部には十分だが、ベンチャー規模の独立企業には不十分である。Taiwan、Southeast Asia、USの設置1,000ラインごとは、Mainland China価格で一括約RMB 3〜15Mに相当する。TaiwanとUSでは価格が高いが、買い手はAIオプション付きのOEM 3D AOIを使うことが多い estimate 。

後付け期間は約5年

AOIメーカーで機械寿命を公表する企業はない。EMS企業は設備を3〜10年で償却し（DBG 2025 annual report）、旧型AOIは寿命後にソフトウェア更新とスペアを失う（I-Connect007） single source 。筆者は8〜12年（基準10）を使う。

1ラインあたり1.0〜1.65台のインラインAOIとすると、Mainland Chinaの稼働中インラインAOIは約35,000〜78,000台（基準約55,000）であり、既知の出荷と一致する（Circuits Assembly、Sinic-Tek 2025 annual report）。何台がAI再判定を実行しているかを測る情報源はない。国産機が約2023年から提供し、最近の納入の40〜60%が使用していると仮定すると、**Mainland Chinaの約26,000〜66,000台のインラインAOI（基準約44,000）がAIを実行していない** estimate 。すべての新機がAI搭載で出荷されると、このプールは年8〜12.5%縮小する。5年後に51〜66%、8年後に34〜51%が残り、AOIメーカーが新機種へのAIアップグレードを推進すればさらに速い。**機会の大半は今後約5年に集中する**。中心は、旧型国産2D AOI、複数ブランド、AIアップグレード経路のない中堅EMSである。

FIG 24 **改造ウィンドウは約 5 年*AI なしのインライン AOI は更新・アップグレードにより年 8–12.5% 縮小する。***

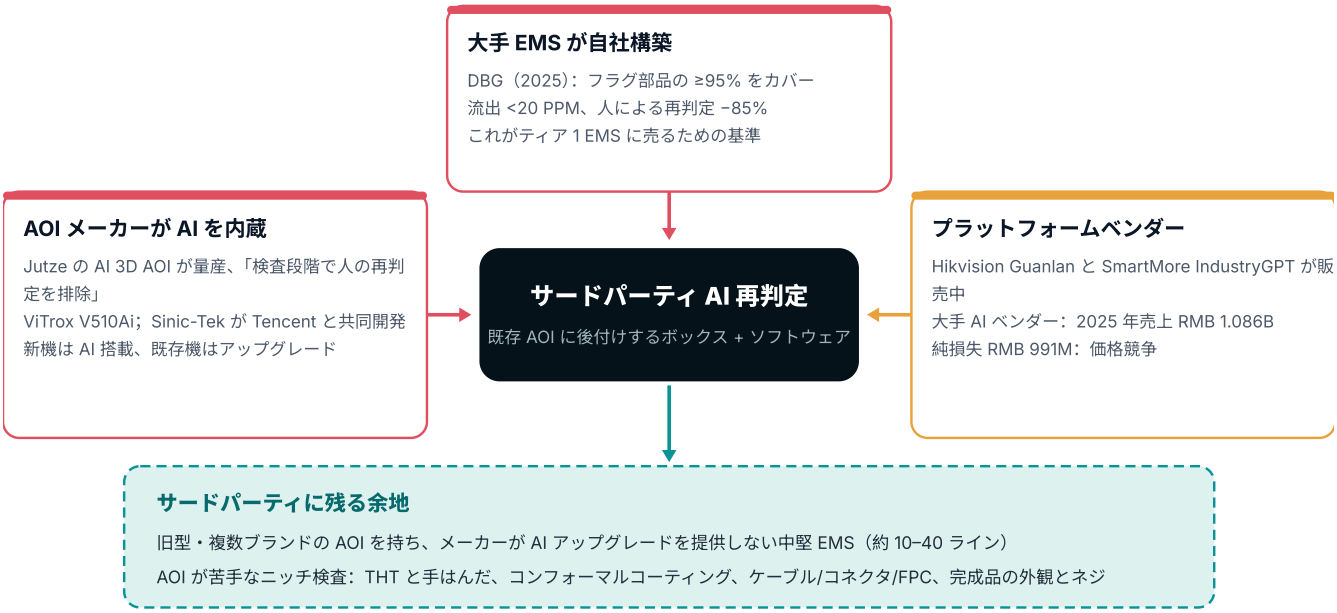


出典： 筆者推定；設置台数とシェアは独立検証なし。

競合は既に強い。再判定の楔は包囲されている

AI再判定の楔は3方向から狭まっている。AOI・ビジョンのリーダーはAIを新プラットフォームに組み込んでいる。Jutzeは「AIアルゴリズムを全面的に採用」し（Jutze investor relations, June 2026）、OPTの産業AI売上は2025年に96.77%成長した（OPT 2025 annual report） single source, primary 。ViTroxは自律再判定で最大95%の精度を主張する（ViTrox） vendor claim 。大手メーカーは自社構築する（iThome）。ベンチャー系AI企業は規模で販売する。SmartMoreのエッジセンサー顧客は2年で65社から251社に増えた（36Kr） single source 。Hikvisionは検査用にGuanlanモデルを販売し（Xinhua）、「目・脳・手」の統合は既にSmartMore、Hikrobot、Mech-Mindから提供されている（36Kr、Securities Star）。

FIG 25 **再判定の楔は三方から包囲される *サードパーティの余地は中堅 EMS と、AOI が苦手な検査ニッチにある。***



出典： Jutze、Sinic-Tek、DBG の年次報告；Hikvision・SmartMore の公開資料；筆者作成。

新規参入者に残された余地は狭い。旧型2D/3D AOIを持ち、メーカーからのAIアップグレードがない中堅EMS。複数のAOIブランドが混在するライン（ある後付けベンダーは既にOmron、VI、Koh Young、Mirtecをサポート（Sohu on

Hengtianyi))。スルーホールと手はんだ接合部、コンフォーマルコーティング、ケーブル、コネクタ、FPC、最終外観とネジなど、SMT AOIが苦手とするニッチ。そしてRMB 230〜280kのAOIを買えない小規模工場である。

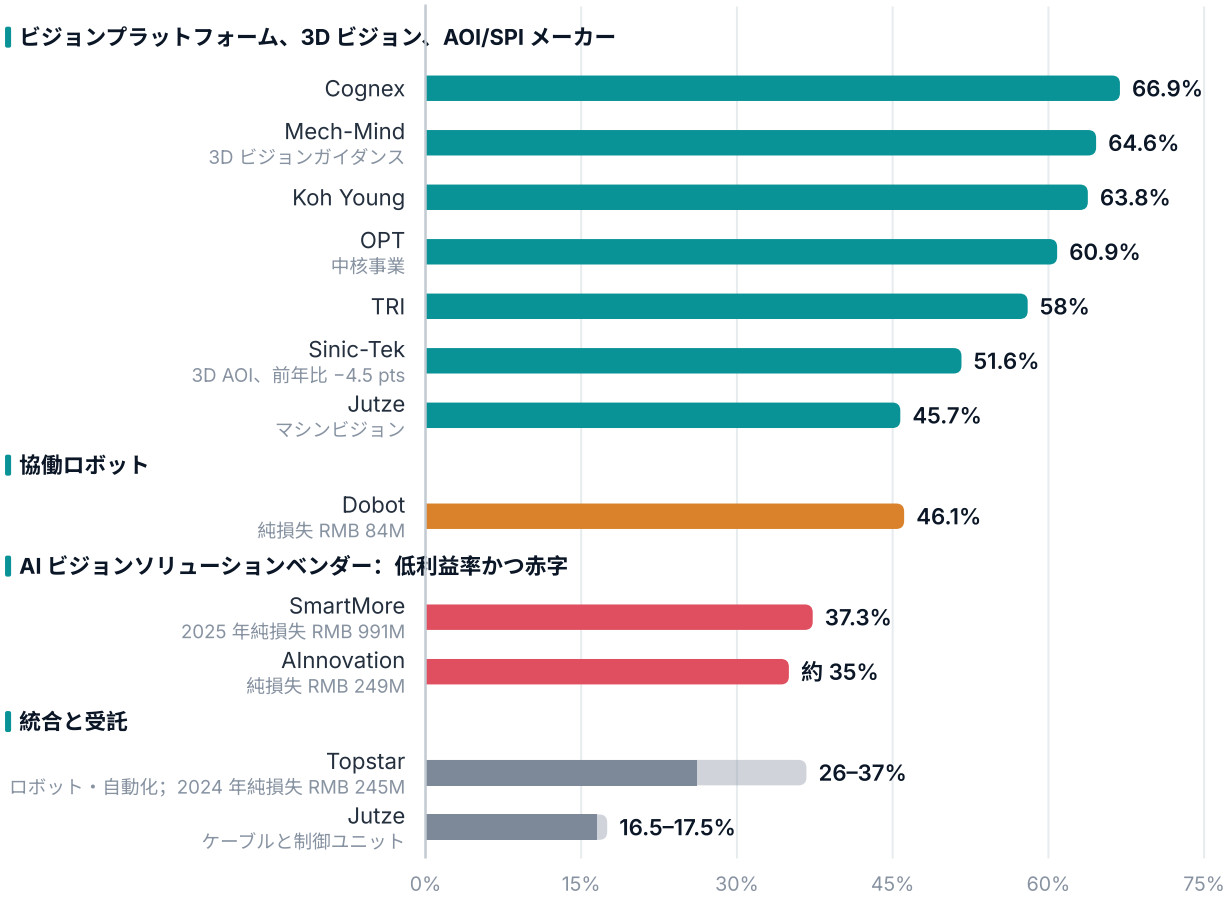
最も近い上場比較企業は警告を発している。AI検査設備とロボットを販売するWeiyi Zhizaoは、2026年1〜5月に3C売上が前年比79.9%減少し、「競争激化と価格圧力」を認め、2026年10月25日にHong Kong上場を延期し、完了前に打ち切られた15プロジェクト（うち12が具現化ロボットプロジェクト）を開示した（Weiyi Zhizao prospectus、postponement notice） single source, primary 。AInnovationは2025年末に売掛金の29.8%を引当計上した（AInnovation 2025 annual report)。3C検査の楔は混雑しており、1ラインあたりの価格決定力は弱い。

利益は製品化されたハードウェアにある

バリューチェーン上の位置	代表企業と2025年売上総利益率	利益と回収
ビジョンプラットフォーム	Cognex 66.9%	黒字。低利益売上≈$22Mを売却中
AOI/SPI設備	Koh Young 63.8%。TRI 58%。OPT中核事業60.85%。Sinic-Tek 3D AOI 51.62%（前年比−4.53ポイント)。Jutzeマシンビジョン45.74%	黒字。売掛日数139（Jutze）〜247〜274（OPT）
3Dビジョンガイダンス	Mech-Mind 64.6%	—
AIビジョンソリューションベンダー	SmartMore 37.3%。AInnovation ≈35%	赤字。SmartMore純損失RMB 991M（2025)、AInnovation RMB 249M
協働ロボット	Dobot 46.1%	Dobot純損失RMB 84M。UR売上は$326M（2022）から≈$232M（2025、予測）
システムインテグレーション	Topstarロボット・自動化26.2〜36.7%	純損失RMB 245M（2024)。売掛日数180〜240
受託ハードウェア	Jutzeケーブル・制御ユニット16.5〜17.5%	—

出典：(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 **利益率は製品化されたハードウェアにあるビジョンプラットフォーム・装置メーカーは粗利率 46–67%。AI ソリューションベンダーは 35–37% で赤字。**



出典： 2025 年年次報告または目論見書。

新規参入者が利益率を維持できるのは、検査を製品・設備・ソフトウェアに変えた場合のみである。プロジェクトごとのチューニングは利益率を約35%に押し下げ、損失が続く。力学も小企業に不利に働く。売上は現地検収後にのみ認識され、前受金は小さい（Jutze、OPT）。パイロットは通常無料（A3/Mindtrace）。ブランドオーナーはしばしば、契約製造業者のラインの検査設備を指定する。

買い手の支払い方：契約時30%、検収後60%、10%を1年保留

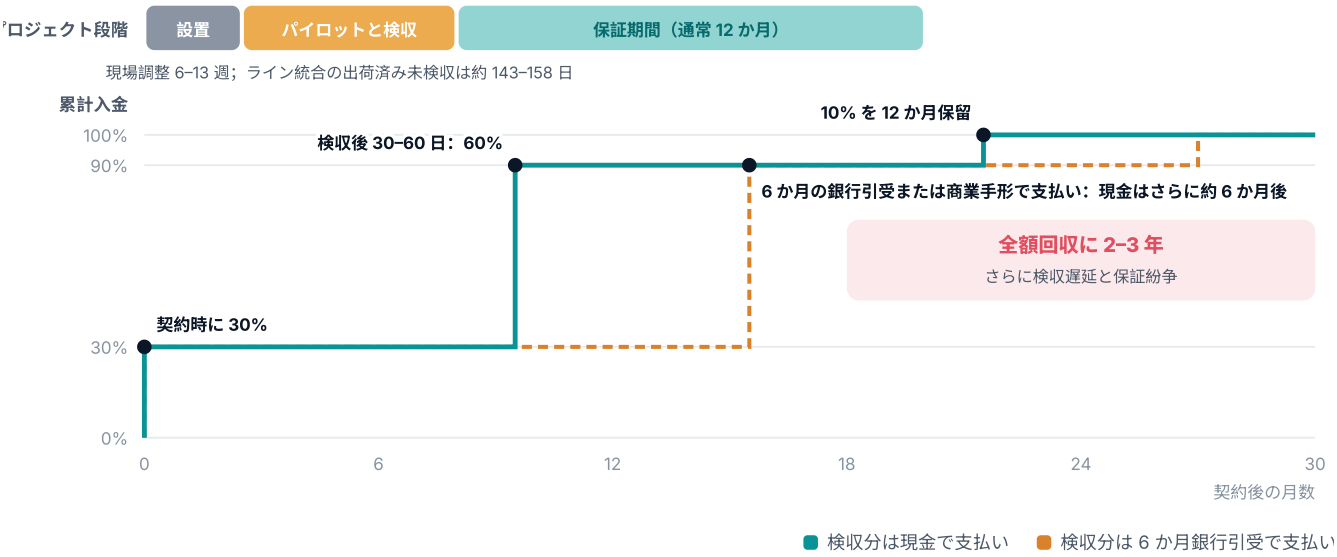
Mainland Chinaの電子工場が検査設備に使う支払条件は、Sinic-Tekの上場審査回答で開示された13の実名買い手契約に明記されている（Sinic-Tek inquiry reply 8-1-1） single source: one primary filing, several independent buyers, 2020–2022 ：

買い手（年）	契約時	納入	検収	保留または残額
Hikvision関連（2021）	15日以内に30%	—	最終検収から30日以内に65%	保証保留5%を検収12か月後に支払い。一部は6か月超の銀行引受手形
Nanchang Huaqin（2020〜2021）	10営業日以内に30%	—	検収から60日後に60%	1年保証後に10%
Guangdong Yinuo（2021、3D AOI）	10営業日以内に30%	—	30日以内に60%	3か月の無故障稼働後に10%
Xiamen Hongxin、Jingmen Hongyi（2022）	10営業日以内に30%	—	最終検収から30営業日以内に60%、6か月銀行手形	1年保証後に10%

買い手（年）	契約時	納入	検収	保留または残額
AKM Panyu、Suzhou（2021〜2022）	7〜10営業日以内に30%	—	検収・請求から1か月後に60%、180日銀行手形	360日後に10%
BYD Precision、Shenzhen、Huizhou（2020）	—	到着時30%	検収・請求後に70%	すべて6か月商業手形
Shenzhen H&T（2020）	—	—	検収・請求後に90%	6か月の無故障使用後に10%

他の一次開示も同じ構造を示す。Mech-Mindの大型プロジェクトは契約時30%、納入前30%、検収後30%、12〜15か月の保証保留10%である（Mech-Mind prospectus）。GKGは設備業界の保留は通常契約の5〜10%で、検収1年後に支払われるとする（GKG inquiry reply） single sources, primary 。したがって標準は、契約時約30%（20〜30%、BYDなど一部工場ではゼロ）、検収後60〜65%（30〜60日後に支払い、しばしば6か月の銀行または商業手形で、現金化をさらに半年遅らせる）、3〜12か月（12か月が最多）の保留5〜10%である verified across several contracts 。

FIG 27 ***買い手の支払い方法契約時 30%、検収後 60%、10% を 1 年保留：全額回収に 2–3 年。***



出典： Sinic-Tek 質問回答、Mech-Mind、GKG、JT ほか；一般的条件の概略、時期は推定。

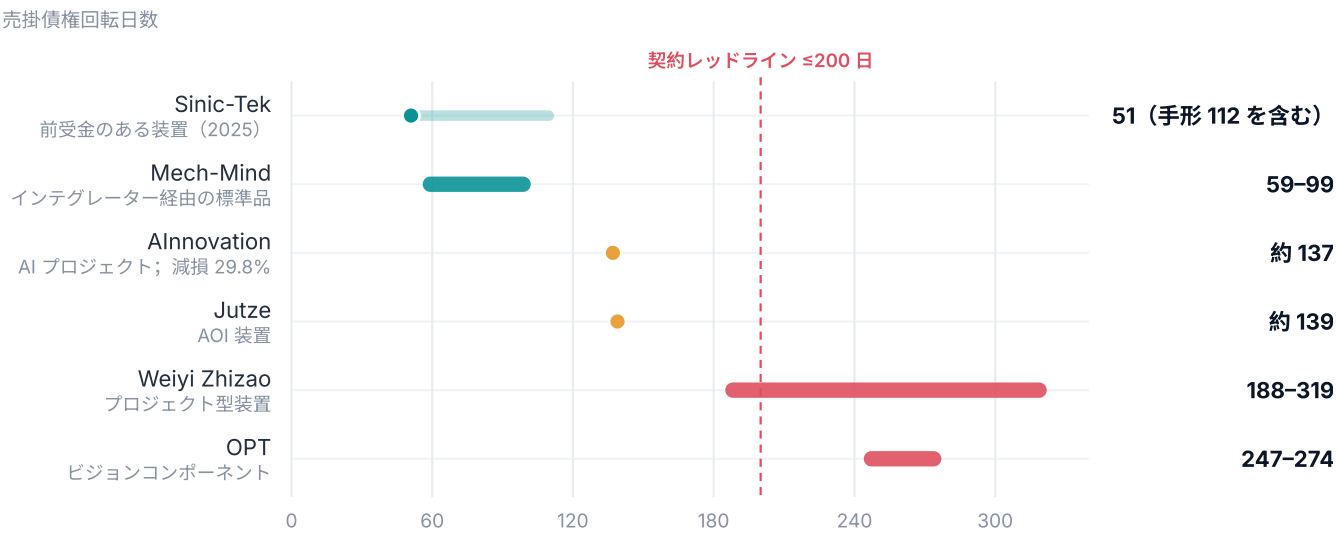
検収とトライアルは遅く、売り手の負担である。Sinic-Tekの出荷済み未検収品は約143〜158日で回転した。大手EMSやブランド顧客はライン全体の統合テストと長期トライアルを求めるためである（Sinic-Tek inquiry reply 8-1-2）。WeiyiのAIプロジェクトは評価から展開まで4〜8か月かかる（Weiyi Zhizao prospectus） single sources, primary 。AI再判定パイロットの転換データはない。Sinic-Tekはデモ機の約18〜19%しか直接販売に転換できなかった。筆者は無料パイロットは3分の1〜5分の1、有料パイロットは選別後約80%と計画する estimate 。

企業	ビジネスモデル	売掛債権回転日数
Sinic-Tek（2025）	前受金付き設備	≈51（手形込み≈112）
Mech-Mind	インテグレーター経由の標準品	59〜99
Jutze	AOI設備	≈139
AInnovation（2025）	AIプロジェクト	年末≈137、29.8%減損
Weiyi Zhizao	プロジェクト型設備	188〜319

企業	ビジネスモデル	売掛債権回転日数
OPT	ビジョン部品	247〜274

出典：上記の年次報告書と目論見書。売掛債権（契約資産含む）÷売上×365 primary + estimate 。

FIG 28 **売掛債権回転日数*標準品 51–99 日；プロジェクト型装置 188–319 日。***



出典： 企業資料；売掛債権（契約資産含む）÷ 売上 × 365。

AOIメーカーまたはインテグレーター経由で販売するAI再判定ライセンスは、Mech-Mindの60〜100日並みに回収できる。直接プロジェクト販売はWeiyiの190〜320日である。キャッシュタイムラインにまとめると、無料パイロット1〜3か月、大手ODMでの認定は最大約12か月、構築・納入・検収は3〜7か月。30%は発注時に、60%は約4〜9か月後、最後の10%は約16〜21か月後に届く。**大手EMSでの最初のパイロットから全額支払いまで2〜3年かかることがある**。正式入札のない中堅EMSでは認定を数週間に短縮できる estimate 。開示契約の検収基準はライン全体の統合、スループット（Taiwanの1プロジェクトは1時間100台を要求）、数か月の無故障稼働のみをカバーし、流出率や誤報率を指定するものはない（Anda inquiry reply） single source, primary 。AI再判定の書面検収基準はパイロット前に合意しなければならない。

4つの失敗パターン

記録された失敗は4パターンに分類できる。製品が信頼できるようになる前に出荷したケース（Rethink（The Robot Report））。リーダーのハードウェア上のソフトウェアレイヤーが、後にリーダーのエコシステムに置き換えられたケース（READY Robotics（The Robot Report））。サイクルの底で資金が尽きたケース（Dextrous Robotics（Robots & Startups））。買収採用（acqui-hire）で終わったモデル企業（Covariant（GeekWire））。教訓は、プロジェクトごとのチューニングではなく限定的に製品化すること。検収ベースの売上と長い回収に耐える運転資本を確保すること。24時間稼働する工場に現地サービスを提供すること。そして製品が実証される前にスケールしないこと。

タイミング：検査は待っても得しない。アームハードウェアは安くなる

待つべき根拠は弱い。ハードウェアは2026年に安くならなかった。ロボットメーカーは価格を5〜15%、一部製品は25〜50%引き上げ（Sina Finance） single source 、NVIDIAキットは3度目の値上げをした（36Kr）。生産グレードのVLAは期間内に到来しない（IFR、Instrumental）。一方、AOIの買い替えは1つずつ後付け対象を減らし、OEMのAI展開は1ラインずつデータとプロセスを囲い込む。モデル能力はコモディティ化しており、希少なのは工場へのアクセスとラベル付き工場データである。現地支援にも期間がある。Shenzhenの2026年「AI先駆都市」規則は、AI応用実証プロジェクトに最大RMB 2M、購入の30%をカバーするモデルバウチャーを提供するが、**2027年6月30日**までである（Yicai, May 2026） terms single source 。

依然として急速に安くなっているのは、ヒューマノイドと器用なハンドである（ハンドは2年で約RMB 50,000から10,000未満へ下落（Sina Finance））。そして製品構成のローエンド化に伴うエントリー協働ロボットである。これは、具現化部分を先送りし、検査部分は先送りしないことを支持する。**総括：検査は今、狭い製品として。ロボットセルは今、パートナーと統合を通じて。具現化AIは後で、今日は研究開発ステーションのみ。**

具現化AI

06 具現化AI：まずロボットの教え方を変え、後に動き方を変える

変わっているのは知覚とプログラミング。モーションは決定的なまま

ロボットアームのリーダーは今やすべて「物理AI」を売り込むが、出荷済みのものは3つのレイヤーに分かれる。教示なしの学習済み知覚（2027年1月出荷予定のFANUCのAI Masterless Vision（FANUC）。KUKAのニューラル把持選択（KUKA））。プログラムを書きタスクを計画する大規模モデル（AI生成コードはデジタルツインで検証すべきと警告するKUKAのiiQWorks.Copilot（KUKA）。「生成AIが何をするかを決め」ロボットが「どう動くかを決める」Gemini Robotics-ERを使うYaskawa（Yaskawa））。そして計算・データプラットフォーム（Jetson Orin搭載のURのAI Accelerator（Universal Robots））である vendor claims 。AI機能の生産成功率を公表するリーダーはいない。日本のリーダーは最前線VLAを自前で作るのではなくGoogle、SoftBank、Microsoftなどと提携する（FANUC news index）。学習ポリシーレイヤーはモデル企業から、認定アームとコントローラーはアームメーカーから来るだろう。

FIG 29 ***具現化 AI スタック大規模モデルはオフラインで計画、小型ポリシーはセル内で実行、モーションと安全は決定論的のまま。***

レイヤー	何をするか、証拠はどこまでか	時間スケール · 誰が握るか
計画 L4	**最前線モデル（オフライン）** ロボットプログラムのオフライン作成・変更、段取り替え、異常説明 ABB RAPID プログラムを 77–99.7% で書き換え、シミュレーション検証後に配信 制御ループは 0.2–0.4 Hz のみ：リアルタイムには入らない	**秒から分** モデル大手
スキル / ポリシー L3	**ACT、拡散ポリシー、小型 VLA** 治具ありの構造化工程 90–99.4% エッジチップ：Jetson Thor、D-Robotics RDK、Ascend、Rockchip	**アクションチャンク 100–300 ms** チップベンダー · ロボットメーカ
モーション制御 L2	**ロボットコントローラー** 軌道、サーボ、力制御、衝突検知 決定論的コード；学習ポリシーは目標のみ設定	**ミリ秒単位（リアルタイムには 83 Hz 超が必要）** ロボットメーカー
安全 L1	**安全 PLC、スキャナー、力と速度の制限** ISO 10218-1/-2:2025 および現地規則で認定 安全機能に ML を入れない：EU は 2027 年 1 月 20 日から公認機関の審査が必要	**ハードリアルタイム** 認定ロボット + インテグレータ

中小企業の好機は統合とセンシングハード：学習型知覚と小型ポリシーを認定ロボットセルに組み込み、1工程ずつ導入

出典： 筆者の総合（第 3・6 章）；ISO 10218:2025；EU 機械規則。

非構造化・フレキシブル・小ロット作業までどのくらいか：構造化工程は1〜3年、フレキシブル組立は5年以上

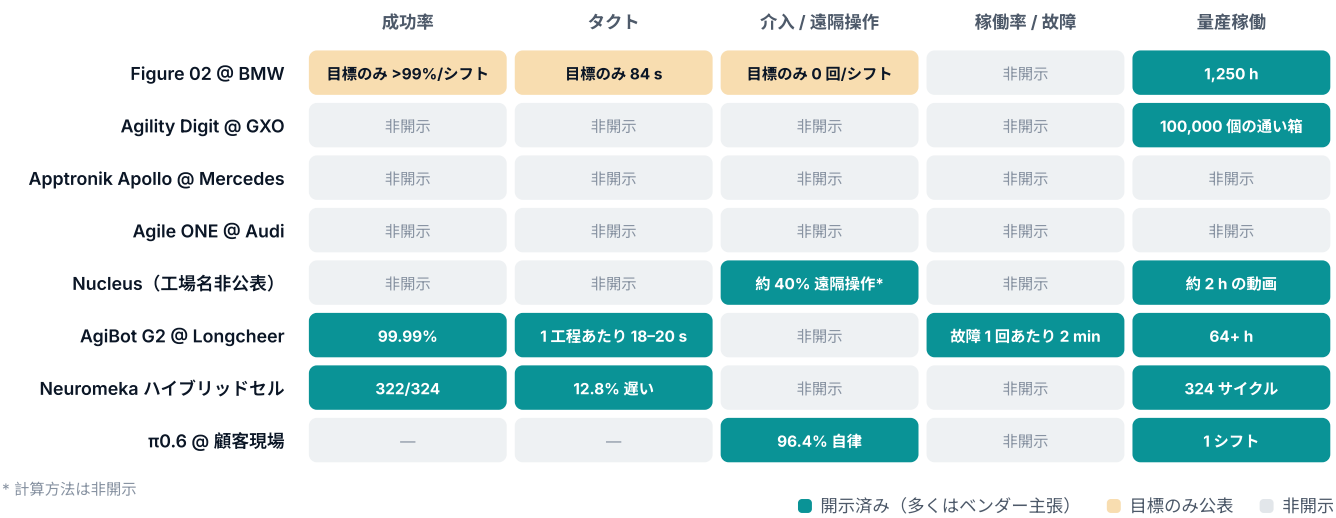
実際の工場数値が出始めたが、ベンダー報告で、狭く、構造化された工程からのものである。AgiBotの8台のヒューマノイドがLongcheerのタブレット最終テストラインで64,828タスクを64時間超にわたって99.99%で記録した（AgiBot、Yicai Global） vendor and customer 。しかしこれは、ビジョン付き従来アームでできる搬入出作業である。UBTechはWalker S2が人間の効率の30〜50%で働くとする（Irish Times/FT） single source 。Figure 02のBMW Spartanburgでの11か月は数量（1,250時間超、90,000+部品）を生んだが、サイクル・成功率・介入数は結果ではなく目標である（Figure、BMW

Group） verified, numerators only 。Nucleusは工場動画の約40%がテレオペレーションと述べる（Interesting Engineering） vendor claim 。Reutersの調査は一部の中国ヒューマノイドについて作業者1人の生産高の約20%を引用した（Notebookcheck） single source 。成功率・サイクルタイム・介入率を同時に公表する展開はなく、監査されたものもない。しかしこの3つこそが回収計算に必要なものである。

展開	成功率	タクト	介入またはテレオペレーション	稼働率または故障間隔	量産稼働
Figure 02 @ BMW Spartanburg	目標のみ（シフトあたり>99%）	目標のみ（84秒）	目標のみ（シフトあたり0回）	非開示（前腕上部が故障点）	1,250時間
Agility Digit @ GXO	非開示	非開示	非開示	非開示	100,000トート
Apptronik Apollo @ Mercedes-Benz	非開示	非開示	非開示	非開示	非開示
Agile ONE @ Audi	非開示	非開示	非開示	非開示	非開示
Nucleus（工場名非公表）	非開示	非開示	≈40%テレオペレーション（方法非開示）	非開示	≈2時間の動画
AgiBot G2 @ Longcheer	64,828タスクの99.99%	1ステップ18〜20秒	非開示	通信障害1回、復旧約2分	64時間超
Neuromekaハイブリッドセル	322/324	人より12.8%遅い	非開示	非開示	324サイクル
Physical Intelligence π0.6 @ 顧客現場	—	—	1シフトで96.4%自律	非開示	1シフト

出典：本章と第3章 mostly vendor claims 。

FIG 30 ***工場内ロボット導入が実際に開示するもの多くは台数のみ開示。成功率・タクト・介入率を同時に開示する例はない。***



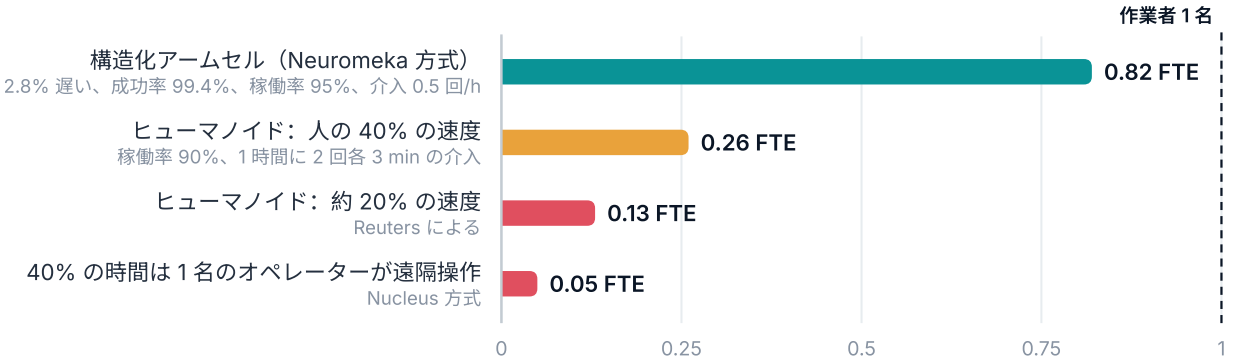
出典： BMW、Figure、Agility、Mercedes-Benz、Audi、AgiBot、Neuromeka、Physical Intelligence ほかの公開資料。

テレオペレーションは成功率以上に経済性に影響する。ロボット1台・シフトあたりの純代替人員 ≈（人間サイクル ÷ ロボットサイクル）× 稼働率 × 成功率 − 介入時間 − テレオペレーション estimate, my formula 。Neuromeka型の構造化工程（12.8%遅い、成功率99.4%、稼働率95%、1時間に2分の介入0.5回）は約0.82人を代替する。人間の40%の速度、稼働率90%、1時間に3分の介入2回のヒューマノイドは約0.26人。Reutersの20%では約0.13人。Nucleusのようにオペレータ

ーが40%の時間テレオペレーションすると約0.05人、ほぼゼロである。ヒューマノイド1台約RMB 600k、人1人年RMB 85k（Mainland China）では、最後の3つは数十年かけて回収される。現実的な回収があるのは構造化アーム工程のみである（第4章） estimate 。

FIG 31 **ロボット 1 台あたりの純代替人員*構造化アームセルは約 0.82 人分を代替。40% 遠隔操作のヒューマノイドは約 0.05 人分。***

ロボット 1 台・シフトあたりの純代替人員



出典： 筆者の数式ベース推定。

構造化工程を離れると、汎用モデルは新タスクで40〜90%にとどまる。Gemini Robotics 2は実験室のピックアンドプレースで74.2%、ツールキッティングで78.9%、袋を結ぶのは44%（eesel/DeepMind）。30の実機タスクからなるRoboChallenge Table30では、π0.5が43.7%、最良のオープンモデルが50.3%である（RoboChallenge、QbitAI）。

外部予測は異なるが、2年以内の広範な使用を支持するものはない。IFRは汎用物理AIは「まだ産業グレードではない」とし、ほとんどのヒューマノイドは「依然として試作またはパイロット」とする（IFR）。Interact Analysisは2025年生産のヒューマノイドの約10%だけが実用に供され、商業転換点は「2032年以降」と推定する（automation.com）。UBSはヒューマノイドの「EVモーメント」を2030年以前と見るのは難しいとする（Yicai Global）。中国の関係者は工場規模の使用まであと2〜3年と推定する（Gasgoo） single sources 。筆者の判断 estimate ：資源の整った電子・自動車工場でベンダーが常駐する場合、**構造化工程タスク**（搬入出、OK/NG仕分け、治具付き挿入）は約1〜3年で人間に近い速度で≥99%に達する。**混合部品キッティング**は汎用VLAで約3〜5年。**自由経路ハーネスと多段階フレキシブル組立**は5年以上である。ヒューマノイドの回収は今日成立しない。約RMB 600kのWalker S2（10jqka） single source が、2シフトで人間の効率の30〜50%なら、約0.6〜1.0人に相当し、統合・保守・停止前でMainland Chinaの人件費で単純回収7〜12年である estimate 。

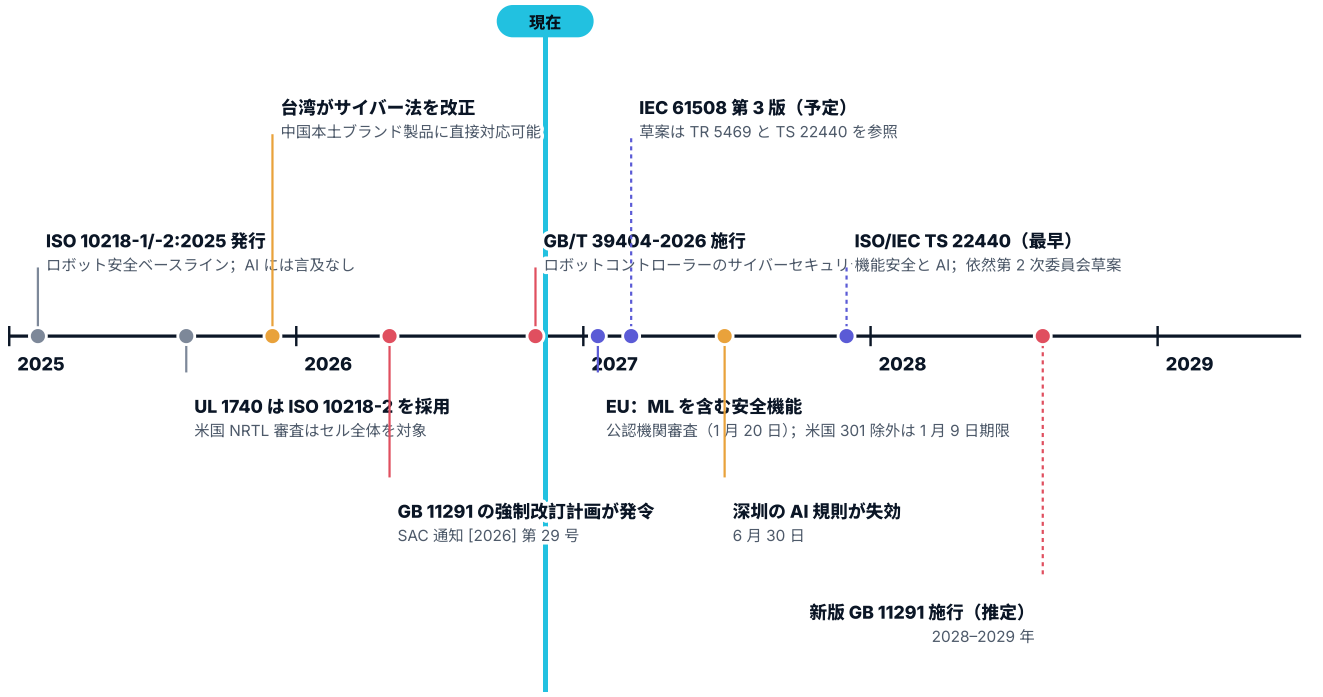
行き詰まっている場所

リンク	2026年の証拠
データ	業界は高品質実データが少なくとも1,000万時間必要と推定し、2026年初頭までに収集されたのは約50万時間のみ（Gasgoo）。Reutersは必要な約1億時間に対し約50万時間と報じる（Notebookcheck）。初心者テレオペレーターは使えるモーション1つあたり約300回の試行が必要。工場はプロセスデータを共有しない。シミュレーション学習ポリシーは実機で急激に低下する
信頼性	構造化工程98〜99.99%（ベンダー主張、失敗は未定義）。汎用モデルは新タスクで40〜90%。未知コネクタ29〜67%
速度	ヒューマノイドは人間の30〜50%の速度（UBTech）、一部は約20%（Reuters）。最前線エージェントは準静的実機タスクあたり約280秒。LLM制御ループは0.2〜0.4 Hzに対し必要なのは約83 Hz（Anthropic）
コスト	Walker S2は平均約RMB 600k。回収7〜12年 estimate
安全認証	ISO 10218-1/-2:2025は機能安全をより明示的にし協働要件を取り込むが、AIには何も言及しない（The Robot Report）。ISO/IEC TS 22440（機能安全とAI）は2026年11月時点でまだ第2次委員会草案（ISS、ISO Open Data）。IEC 61508-3ガイダンスはSIL 1超のAIに反対を助言（Analog Devices）。EU機械規則では、機械学習を含む安全機能は2027年1月20日から公認機関の評価が必要（EUR-Lex）
ハンドとツール	器用なハンドは指1本あたり約30 N（≈3 kg）に対し人間の手は約10 kg（Gasgoo）。ツール交換は依然として手動

リンク	2026年の証拠
統合	現地でのセンサー誤読、プロトコル不整合、MES連携。介入率はほぼ開示されない

安全への含意は直接的である。規格は学習ポリシーを禁止もせず、認知もしていない。ISO 10218-1/-2:2025はAIに何も言及しない。ISO/IEC TS 22440（機能安全とAI）はまだ委員会草案で、2027年末か2028年以前には出ない見込み estimate。ISO/IEC TR 5469:2024はガイダンスにすぎず、非AIフォールバック、監督上の制約、冗長投票を推奨する。IEC 61508第3版は2027年初頭の予定である（ISO Open Data、BSI、61508 Association） verified。機械学習の知覚を安全機能として認証する受け入れられた経路を提供する公表規格はまだない。地域規則も動いている。中国はGB 11291を改訂中（施行は約2028〜2029年）（revision plan 20262543）。UL 1740は2025年8月からISO 10218-2をUSのNRTL審査に取り込んだ。EUは2027年1月20日から機械学習を含む安全機能の公認機関評価を要求する。ISO 25785-1がまだ草案の間、フェンスレス工場使用で認定されたヒューマノイドはない（i-SCOOP）。擁護できるアーキテクチャは、機械学習がプロセス判断（「どの部品か」「この基板は良品か」）のみを行い、認定された決定的安全レイヤー（通常PL d / カテゴリ3）と安全PLCが速度・力・停止を決める形である。「フェンスレス安全のためのカメラAI」という主張は、PL dまたはSIL 2認証が機械学習コンポーネントを指名するまで未実証として扱うこと。

FIG 32 ***標準と規制のタイムライン 安全機能内 AI の認定経路は 2027–2029 年まで定まらない。***



出典： ISO、IEC、UL、EUR-Lex、SAC と各国規制データベース。

どのレイヤーが機会か：モデルは大手、エッジボックスはチップメーカー、中小企業は統合とセンシングハードウェア

モデルレイヤーには資本とデータが必要で、大手に属する（AgiBotはGO-2を「数万時間」で学習（iFeng Tech）。最強モデルはクローズドまたはクラウド専用）。エッジボックスレイヤーはチップメーカーに属する。Jetson Thorが事実上の標準であり、Mainland ChinaではD-RoboticsのRDKボード（D-Robotics）とRockchipコプロセッサー（CSDN）が競うが、公開VLA結果はほぼない。

中小企業には2つの入口がある。1つは信頼性を直接買うセンシングハードウェアである。触覚はContactDPの挿入成功率を58.7%から97.8%へ引き上げ、力・トルクセンサーと手首カメラも同様の働きをする。データ収集キットも売れる（10jqka）。ただしハンド、センサー、アームはすべて値下がりしている。もう1つはアームメーカーとモデル企業の間の統

合レイヤーである。各工程のタスクデータ、安全エンベロープ、MES連携を所有するもので、アームメーカーは今日これを製品として販売していない。競合は4グループに分かれる。アームリーダー（FANUC、Yaskawa、KUKA、ABB、UR、JAKA、Dobotほか）、ビジョン＋アーム企業（Mech-Mind、Hikrobot、SmartMore）、具現化AI企業（AgiBot、UBTech、Unitree、Galbot、Figure、Physical Intelligence、Google DeepMind、NVIDIA）、そして自動車用チップ参入組である。

買い手の受け入れ：分母のない数字は無意味

ベンダーは介入率、故障間隔、長期成功率を公表しないため、これらは契約の受け入れ条件に含めるべきである。統計的には、3,000回の連続生産サイクルをゼロ故障で達成すると、95%信頼で失敗率最大0.1%を証明する。3,000回中10故障は≤0.57%しか証明しない。≤1%、≤0.5%、≤0.1%、≤0.01%をゼロ故障で証明するには299、598、2,995、29,956サイクルかかる estimate, exact binomial 。その基準では、Neuromekaの322/324は両側95%区間97.8〜99.9%で、≥99%を証明しない。AgiBotの64,828タスク中約6故障は99.98〜100%を示唆するが、「失敗」が買い手の定義どおりに定義された場合のみである estimate 。これらは筆者がロボットアームまたは具現化セルに課す受け入れ要件である。しきい値はFigureのBMWでの目標と、Neuromeka・AgiBotの事例に基づくもので、規格ではなく判断である estimate ：

項目	要求	推奨合格しきい値
定義	サイクル、成功、失敗（部分成功、再把持、落下、品質流出）、介入（接触、リモートテレオペレーション、リセット、非常停止）、自律度の算出方法を署名付きで定義	定義はあらゆる指標に先立つ。数式のないパーセントは不可
介入とテレオペレーション	ロボット時間あたり、種類・時間別。平均介入間隔。稼働時間に占めるテレオペレーション分。ロボットあたりオペレーター数	構造化工程はロボット時間あたり介入≤0.5回（間隔≥2時間）。受け入れ中のテレオペレーションはゼロ
長期成功率	≥3,000回の連続生産サイクルを≥3シフト、≥2品番、通常の照明・供給変動で。失敗を分類。正確な下限	ライン停止型インライン工程は下限≥99.5%、オフラインは≥99.0%。品質流出は別途報告
サイクルタイム	同一工程での≥30回の計時人間サイクルに対して、回復込みのP50/P90/P99（部品ごと）	≤1.15 × 人間P50、またはラインタクト内
稼働率と故障	稼働時間、停止ログ、部品別故障、部品交換時間	≥2週間で稼働率≥95%。MTTR ≤20分、スペア現地配置
回復	スクリプト化した故障注入：落下、遮蔽、照明変化、コンベア停止、MES・ネットワーク断、停電、非常停止	≥90%の自律回復、2分以内に生産復帰
段取り替え	新品番・治具あたりの時間、デモ数、オペレータースキル、データ収集コスト	構造化工程：新品番あたり≤1シフト、≤100デモ
安全	アームとセルはISO 10218-1/-2:2025、セルリスク評価、現地規則（Mainland ChinaはGB 11291。TaiwanはCNS 14490＋書面評価。USはANSI/A3 R15.06-2025とUL 1740）	安全機能を機械学習で実装しない。認定安全レイヤー（通常PL d / Cat 3）が速度と力を制限。ISO 25785-1が公表・評価されるまでフェンスレス脚ロボットは不可
計算とオフライン挙動	推論ハードウェア、P99レイテンシ、ネットワークなしでの挙動、モデル版管理、更新ごとの再検証	タクト重要推論はクラウド非依存。モデル・量子化・エンジン変更後は全面再受け入れ
証拠	受け入れ期間全体の未編集動画と生ログ。顧客の品質チームまたは第三者が立会い	ハイライト映像やベンダー限定サマリーは不可
商業条件	受け入れ指標に紐付く支払いマイルストーン。ロボット時間課金の場合は可用性ペナルティ。データ所有とリモートアクセス規則	最終支払いと保留は3,000サイクル受け入れと≥4週間の安定稼働後にのみ解放

項目	要求	推奨合格しきい値
経済性	純代替人員 = 速度比 × 稼働率 × 成功率 − 介入時間 − テレオペレーション割合	純代替人員が主張する回収を支えられない提案は拒否

出典：（Figure、Neuromeka、Yicai Global、i-SCOOP）。しきい値は筆者の提案である。

未解決の問い

07 公開情報では答えられない問い、そしてパイロットがどう決着させるか

公開情報源では答えられない問いは5グループに分かれる。AI再判定が実際にいくらで売れ、買い手がいくら払うか。AOIメーカーがAIをどう抱き合わせ、旧機をどうアップグレードするか。稼働中AOIの年数と、既にAIを実行している台数。1ラインあたりの再判定に実際に何人の人が何時間かかるか。そしてパイロットがどう転換し、買い手がどう支払うか。その上に、最新モデル、量子化ビルド、ロボットアームが特定の工場条件下で実際にどう性能を発揮するかがある。それぞれを明確なしきい値を持つテストに変えられる。以下のしきい値は、本レポートの証拠から筆者が導いた判定規則である estimate 。最初の工場データが入り次第、再計算すること。

未解決の問い	決着のさせ方	良い結果の姿
AI再判定の価格と支払い意欲	標準の見積依頼書（例：旧型2Dと新型3D AOIが混在する4ライン、2シフト、シフトあたり約2,000基板、12欠陥クラス、オンプレミスのみ、MESまたはIPC-CFX統合）を複数のサードパーティベンダーに送付。20〜30工場への4問の価格感応度調査	4ラインで一括RMB 40〜120k、または年20〜40kの見積りが大半。少なくとも半数がRMB 10〜30k/ラインを受け入れ、12か月以内に回収
AOIメーカーのAI抱き合わせと旧機アップグレード	十数社のAOIメーカーと販売代理店への短い構造化インタビュー	2025〜26年モデルでAI再判定が標準かオプションか非搭載か。2020年以前の機械がアップグレード可能か、その価格
稼働中AOIの年数とAI実行割合	規模・地域で層別した約30のEMS工場の現地調査、NDA下で設備リストを確認	AOI年数の中央値≥5年、AIなしが≥60%なら後付けプールは実在
再判定の人員と工数	2工場以上でのAOIアラーム・再判定・修理・シフトログのインタビューと2〜4週間の記録、作業サンプリング	シフトあたりラインあたり専任再判定員≥1人、再判定工数≥3時間、ラインあたり0.5 FTE以上を配置転換できる
AI再判定自体の性能	実ラインでのゴールデンセット＋シャドウモード（第3章）。第0週にデータ合意、第1〜2週にベースラインとラベル付け、第2〜4週にシャドウ稼働、第4〜8週に任意の補助稼働	誤報または再判定工数を≥50〜60%削減。クラス別流出限界は人間ベースラインを上回らない。重要クラスで見逃しゼロ。p95レイテンシ≤½タクト。人への自動フェイルオープン
最前線モデルの教師ラベル品質	同じゴールデンセットで2〜3候補を実行、各3種のプロンプト表現、良質参照画像1枚、単一部品クロップ≥42〜48 px	欠陥≥299個で見逃しゼロ、人間並み一致のクラスのみ自動採用。それ以外はプリラベルとトリアージのみ
量子化ビルド	精度のみ変更。ウェイトハッシュ、テンプレート、前処理、デコード、エンジン、バッチサイズを固定。プレフィックスキャッシュを無効化またはリセット。参照ビルドがベンダー結果を再現するか確認。ゴールデンセットとドリフトスライスでペアを採点	重要クラスで新規見逃しなし。1,000欠陥で新規見逃し≤1。処理率低下≤2ポイント。3回の実行で≥99.5%一致。それ以外はFP8/INT8にフォールバック
ライン側ハードウェア、清浄度、ESD	各候補ボックス≥2台を予想アラーム率の2倍でストレステスト。実キャビネット気流で72時間ソーク。顧客コーディネーターによるESDチェック。ISO 7以上向けにISO 14644-14テスト	p95 ≤½タクト。72時間クラッシュ・スロットリングなし。ESD承認。適正クラスの粒子レポート
支払条件、パイロット規則、転換	調査工場の最近の検査設備契約の支払条項。パイロット規則、検収基準、認定時間のインタビュー	約30/60/10、検収60日以内に現金。パイロット≤8〜12週、指名された承認責任者。トライアルの≥3分の1が転換。初年度に≥5〜10ラインをカバーする枠組み
データ、IT、責任	法務担当とインタビュー・契約レビュー	ローカルボックスが接続・データアクセス可能。責任はソフトウェア欠陥に限定

未解決の問い	決着のさせ方	良い結果の姿
海外進出前の地域コンプライアンス	Taiwan：顧客のCyber Security Management Act上の書面ステータス、E187自己評価。US：セルの分類に関する税関裁定、NRTL見積り、ITARチェック。Southeast Asia：BOI現地調達とMalaysia控除の適格性、顧客の親会社。Mainland China：同梱PCと電源のCCC範囲	顧客が管理対象事業体でなく、関税・認証込みで回収が≤2年
ロボットまたは具現化セルの受け入れ	第6章の12項目受け入れ表。署名付き定義、≥3シフト・≥2品番で≥3,000連続生産サイクル、スクリプト化故障注入、≥30計時人間サイクル、立会い	下限インライン≥99.5%（オフライン≥99.0%）。サイクル≤1.15 × 人間。1時間あたり介入≤0.5回、テレオペレーションゼロ。稼働率≥95%。MTTR ≤20分。回復≥90%
中国エッジチップ上のACTとVLAポリシー	4週間。移植とマイクロベンチマーク（推論≥1,000回、レイテンシ分布、電力、60分ソーク）。測定レイテンシを注入した閉ループシミュレーション。GPUとの実機A/B。8〜24時間耐久（≥3,000サイクル）	ACTチャンクp95 ≤100 ms、VLA ≤300 ms。実機成功率がGPUの3ポイント以内、サイクル≤1.2 × 人間。それ以外はポリシーをJetsonまたはGPUに維持
協働ロボット、AMR、統合価格	複数の協働ロボット代理店からのモデル別見積り、テスト治具ローディング（1工程、2シフト）のフルセル見積りを2〜3のインテグレーターから	フルセル≤RMB 200k、Shenzhenで2シフトで回収≤1.5年
Taiwan、Southeast Asia、USのSMTライン数	IPC（旧New Venture Research）データまたは現地設備代理店の設置台数	現地アプリケーションエンジニアリングを正当化できる対象ライン数が地域ごとに存在する

このうち4つが、本レポートで最も感度の高い数値を左右する。買い手が払う価格、AI再判定が実際に解放する労働、AI再判定が本当に人間以上に見逃さないか、そしてキャッシュがどれだけ速く戻るかである。購入を検討する工場も、製品を検討するサプライヤーも、大きなコミットメントの前にこれらを決着させる価値がある。

双方に機能するパイロットの順序

工場にとっても、信頼できる実績を望むベンダーにとっても、順序は同じである。

1. **第0〜2週：データと定義に合意する。** データ契約に署名し、欠陥クラスと何を流出とみなすかを定義し、ベースラインを記録する。基板あたり誤報数、1回あたり再判定秒数、下流で見つかった流出。
2. **第1〜4週：ゴールデンセットを構築する。** AOIアーカイブと保管されたNG基板から、ブラインドでラベル付けし裁定する（第3章）。
3. **第2〜4週（またはそれ以上）：シャドウモード。** 人が従来どおり判断する一方でモデルが判断を記録する。クラスごとに比較する。
4. **第4〜8週：ランダムシフトでの補助稼働。** ゲートを通過したクラスのみをモデルが処理し、残りはすべて人に回す。
5. **スケール前の書面での受け入れ。** クラス別結果、レイテンシ、フェイルオープン挙動、モデルとラベルの所有者。ラインごとにスケールし、新製品、モデル版、量子化、エンジンの変更ごとに再検証する。

本レポートの限界

これはデスクリサーチである。本版では工場への一次インタビューを実施していない。ラインのデータの多くはベンダー由来で、独立監査されていない。複数の政府サイト、入札データベース、採用プラットフォームにアクセスできなかったため、Shenzhenの2026年アップグレード補助率、Yangtze River Deltaの賃金ガイド、AI再判定の取引価格、ラインあたり再判定員数、パイロット転換率は推定または類推であり、それぞれ上記で未解決の問いとして示した。為替レートは2026年11月9日の中国人民銀行中心レート（$1 = RMB 6.7188）と、Taiwanについては同日のSMBC裁定値（$1 = NT$32.12）である。Vietnamese dongは2026年5月のデータを使う。すべてのしきい値は、引用証拠から導いた判定規則であり、規格ではない。

著者について

Tan Shuai

Tan Shuaiは、チップ、ハードウェア、システムソフトウェアにわたる20年以上の経験と、取得済み特許20件を持つテクノロジスト兼創業者である。その歩みはSilicon Valley、New York、Chicago、Taiwan、Greater Bay Area（ShenzhenおよびHong Kong）、Vietnam、Malaysiaに及び、長年にわたり先端製造とサプライチェーンに注力してきた。現在はAI研究者・開発者として、AIが生産現場で実際にどのように使われるかに集中して取り組んでいる。

チームの立ち上げ、パートナー探し、情報交換など、製造業でAIに取り組む人々との対話を歓迎する。i@tanshuai.com · tanshuai.com

注記と免責事項

本レポートは、2026年11月11日までに入手可能な公開文書に基づく独立したデスクリサーチである。情報提供のみを目的とし、投資・法律・税務・エンジニアリング上の助言ではない。製品名、価格、モデルリリース、輸出分類、関税、規制は急速に変化する。依拠するものは必ず一次情報源で確認すること。vendor claim または estimate と記された数値は、そのように読むこと。企業名・製品名は各所有者に帰属し、識別のためだけに使用している。本レポートをレビューまたはスポンサーした企業はない。

© 2026 Tan Shuai。本レポートは、出典を明記した上で改変せず共有してよい。

電子機器製造 · AI検査 × ロボティクス

電子機器工場におけるAI外観検査とロボットアーム：2026年評価

主要な数値にはすべて出典と信頼度タグ（verified、single source、vendor claim、estimate）が付いている。公開情報では答えられない問いは第7章にまとめ、それぞれをパイロットでどう決着させるかを示した。

Tan Shuai
tanshuai.comi@tanshuai.com

公開版 · データ基準日：2026年11月11日

