日刊工業新聞社主催セミナー

自動車工場における「フィジカルAI・ヒューマノイド」実装技術と生技変革

～BMW・ベンツ・中国ジーカーの制御・Sim-to-Real徹底解剖～

資料集（前）

さっつーのAIエージェント
監修　今泉大輔
連絡先：
daisuke-imaizumi@sattu-ai-agent.com
さっつーのAIエージェント
https://sattu-ai-agent.com/
経営者が読むNVIDIAのフィジカルAI / ADAS業界日報 by 今泉大輔
https://blogs.itmedia.co.jp/serial/
カスタムリサーチ受注（クラウドワークス）
https://crowdworks.jp/public/employees/6480362

目次

資料1 プロローグ1：トヨタ新型協働ロボット「ELEY（エリー）」のハードウェア機構設計と本質安全思想：車輪型全方向移動・超軽量50kg・全軸QDDが拓く製造現場実装の工学解剖（第1巻）
- エグゼクティブ・サマリー
  - 「減速比10:1以下」が持つ工学的・安全上の意味
    - 1. 圧倒的な「バックドライバビリティ（逆駆動性）」の実現
    - 2.「センサーなし」で高感度な力覚検知（トルク推定）が可能になる
    - 3. 衝突時の「物理的な衝撃」を最小限に抑える（本質安全）
    - 4. ダイレクトドライブ（直接駆動）の弱点を補う、絶妙な「妥協点」
- ELEY 主要技術諸元・従来機比較一覧表
  - 1. 欧米ヒューマノイドに混在する「3つの駆動機構」とは？
    - ① サイクロイド減速機（高トルク・耐衝撃の回転関節）
    - ② 遊星ギア（中～低減速・高効率の回転関節）
    - ③ 直動機構 / リニアアクチュエータ（人間の「ふくらはぎ・太もも」に近い人工筋肉構造）

2. トヨタ「全軸QDD」vs 欧米「ハイブリッド混在方式」の比較
3. この比較から見える「設計上のトレードオフ（本質）」
第1章 なぜ二足歩行を排し「車輪型（全方向自律移動台車）」を選択したのか
1.1 静止時・待機時の消費電力削減メカニズムと連続稼働時間への寄与
1.2 アーム最大伸長・ワーク把持時の反力・転倒モーメントと静的・動的安定性
1.3 日本の自動車・部品工場の床面環境に対する全方向移動機構の走破性と位置決め精度
第2章 超軽量「約50kg」×「478×450mm」フットプリントと垂直伸縮機構の設計
2.1「奥行478mm × 幅450mm」の人間工学的意味と「建屋・レイアウト無改修」の生技メリット
2.2 全高939mm～1,619mmの垂直昇降（伸縮）機構とワークエンベロープ解析
2.3 機体総重量「約50kg」を実現した構造材・モーター配置・電装小型化の工夫
第3章 全軸準ダイレクトドライブ（QDD）と直接駆動が生む「しなやかな接触」
3.1 全軸QDD（減速比10:1以下）の機構構造と従来型高減速比方式（100:1前後）との決定的差異
3.2 高バックドライバビリティと電流制御（トルク推定）による高感度インピーダンス制御
3.3 ワイヤー・樹脂ベルトを排した直接駆動系の採用理由と設計トレードオフ
第4章 本質安全設計（Inherently Safe Design）と機械安全規格への適合アプローチ
4.1 国際機械安全規格（ISO 10218:2025 / ISO/TS 15066統合）の進化と本質安全の位置づけ
4.2 運動エネルギー（E = 1/2 mv^2）と転倒位置エネルギーの定量リスク比較
4.3 接触瞬間の受動的・能動的コンプライアンス応答とハードウェア安全設計
第5章 トヨタ生産方式（TPS）・グループ内サプライチェーンとの技術的連関
5.1 生活支援ロボット「HSR」から製造現場仕様「ELEY」への技術昇華プロセス
5.2 トヨタ生産方式（TPS）との思想的融合：「ニンベンのついた自働化」と40万台構想
5.3「トヨタロボティクス」新設とグループ内サプライチェーンの役割分担・技術連関
参照一次情報・公式リリース・専門報道一覧

資料2 プロローグ2：TRIの大規模行動モデル「LBM」による模倣学習と日米欧中のフィジカルAI実装思想の比較解剖
エグゼクティブ・サマリー
第1章 従来のプレイバック（教示再生）方式の限界と「LBM（大規模行動モデル）」のアルゴリズム構造
1.1 多品種混流ラインと柔軟物・接触タスクにおける教示再生方式の限界
1.2「Diffusion Policy」から「LBM」へ至る技術進化のメカニズム
1.3 LBMのマルチモーダル入力・ネットワーク構造・推論周期の解剖
第2章「見て真似る」模倣学習（Imitation Learning）のデータ収集パイプラインと技能伝承
2.1 熟練作業員（匠）の実演から短時間でスキルを獲得するデータ収集パイプライン
2.2 ELEYの「全軸QDD」と「肩甲骨軸」が果たすハード・AI共進化の決定的役割
2.3 未知環境変化への汎化性能とマルチタスク統合の到達点と限界
第3章 トヨタ生産方式（TPS）「自働化（ニンベンの付いた自動化）」におけるELEYとLBMの位置づけ
3.1「無人化（Dark Factory）」を否定するパートナーロボット思想と匠の技能資産化
3.2 既存ライン無改修・安全柵レス・短時間スキル入れ替えがもたらす現場カイゼン速度

第4章 日米欧中における「フィジカルAI実装思想」の激突マトリクス
4.1 なぜ海外先行勢はあえて「二足歩行」や「4腕＋5G群制御」を量産ラインへ直接投入するのか
4.2 日米欧中 フィジカルAI実装4極アプローチ比較一覧表
4.3 4極それぞれの設計思想と工学的・経営的トレードオフの深掘り
(1) 日本・トヨタ（ELEY）：「本質安全・既存狭小ライン無改修・人協働」路線
(2) 米国・BMW×Figure AI：「高負荷工程における人間作業のドロップイン置換」路線
(3) 欧州・メルセデス×Apptronik／BMWドイツ本国：「ブラウンフィールド適応と工場OS主導型自律化」路線
(4) 中国・極氪（Zeekr）×UBTECH／颯智智能（iSAGE）等：「プライベート5G＋群知能と多腕特化機による柔軟物・総装自動化」路線
第5章 治具レス・教示レス化がもたらす生産技術（生技）・FA・部材サプライチェーンへの構造的インパクト
5.1 設備投資（CAPEX）・車種切り替えリードタイム・減価償却構造の転換
5.2 安全規格・メカトロ部材・3Dデジタルツイン標準部品（SimReady）の新たな技術要件
参照一次資料・学術論文・公式発表一覧

資料3 第1部1：Figure AIの企業エコシステムと「Figure 02 / 03」ハードウェア・耐環境仕様の全貌
エグゼクティブ・サマリー
第1章 Figure AIの開発哲学、投資・提携エコシステム、および量産工場（BotQ）戦略
1.1 創業者Brett Adcock氏が掲げる「汎用ヒューマノイドの垂直統合開発」の設計思想
1.2 資本・技術提携エコシステムとOpenAI提携解消から自社VLA「Helix」への転換
1.3 Figure 02から量産設計機「Figure 03」へのDFM転換と自社工場「BotQ」構想
第2章 Figure 02およびFigure 03の全体主要諸元とオンボード計算・電力アーキテクチャ
2.1 世代別ハードウェア諸元の定量的進化と数値整合性の検証
Figure 01 / Figure 02 / Figure 03 世代別ハードウェア諸元比較表
2.2 オンボード計算基盤（SoC / デュアルGPU構成）とサーマルマネジメント
2.3 胴体内蔵型カスタムバッテリーパック（2.25 kWh～2.3 kWh）と重心・安全設計
2.4 LiDARを排した純視覚（Vision-only）6カメラシステムと音響・パームカメラ統合
第3章 車体溶接工場（Body Shop）に耐える外骨格構造と可動ケーブル完全内蔵設計
3.1 BMWスパータンバーグ工場（X3車体溶接工程）の過酷環境と稼働KPI実績
3.2 構造荷重を担う「外骨格（Exoskeleton）スキン構造」とF.03のソフト外装への進化
3.3 可動ケーブル完全内蔵（Integrated Cabling）と前腕・手首の故障教訓に基づく再設計
第4章 カスタム高トルク密度アクチュエータと関節駆動機構
4.1 関節別最適化カスタム電動アクチュエータの諸元と内製設計思想
4.2 減速機構の使い分けと特許ポートフォリオからの機構解析
4.3 二足歩行の衝撃吸収と精密板金ハンドリングを両立する剛性・コンプライアンス制御
第5章 第4世代～第5世代高自由度ハンド（16 DoF）の機構特性と触覚センシング
5.1 人間同等スケール16自由度ハンドの駆動メカニズムと可搬保持力
5.2 自動車用薄板板金（シートメタル）把持における摩擦・表面材質・コンプライアンス設計
5.3 3グラム検知高感度触覚センサとパームカメラによる閉ループ把持・滑り予測制御

参考文献・一次情報出典一覧

資料4 第1部2：BMW×Figure AIにおけるVLA基盤モデル「Helix」のエッジ推論とSim-to-Real学習パイプライン徹底解剖
エグゼクティブ・サマリー
一言補足ポイント
第1章 外部LLM連携から自社製VLA基盤モデル「Helix」への転換と非同期多階層制御アーキテクチャ
1.1 OpenAI提携解消と垂直統合VLAへの技術的転換点
1.2 「System 2 / System 1」から「System 0」を含む3階層アーキテクチャへの構造進化
1.3 車載・機体内蔵デュアルGPUにおけるオンボード完結推論と最適化の実態
第2章 純視覚入力から高自由度全身・両腕協調アクションへの変換メカニズム
2.1 外部固定センサー非依存のオンボード視覚と固有受容・触覚の統合
2.2 ステレオ視覚バックボーン、視覚固有受容、および時系列記憶による空間・姿勢推定
2.3 単一ネットワークによる冗長自由度の同時協調と終了判定
第3章 仮想空間における超並列強化学習と合成データ生成（SDG）パイプライン
3.1 GPU物理シミュレータを用いた数千～20万並列の運動ポリシー強化学習
3.2 自動車プレス板金部品の光学特性とフォトリアル合成データ生成（SDG）の設計論
第4章 「Sim-to-Realギャップ」を克服するドメインランダマイゼーションとシステム同定
4.1 スパルタンバーグ工場における物理・環境ギャップの具体要因
4.2 ドメインランダマイゼーションと実機kHz閉ループ補償・オンライン同定の融合
第5章 現場デプロイ後のデータフライホイールとフリート展開による生産技術変革
5.1 ヒヤリハット・自律補正データの回収と継続学習サイクル
5.2 単一ウェイト共有によるOTA展開と従来型FA・ティーチングとの比較検証
参照資料・一次情報出典一覧

資料5 第1部3：BMWスパータンバーグ工場の量産車体ラインにおけるヒューマノイド実装解剖：板金ハンドリング公差5mm・タクト同期・MES連携・安全設計の現場実態（第5巻・第1部完結編）
エグゼクティブ・サマリー
第1章 板金ピッキングから溶接治具ロケートピン挿入までの全動作シーケンスと公差5mm達成メカニズム
1.1 対象ワークの物理特性と3部品ローディングの全動作シーケンス
1.2 二足歩行の停止誤差（数cm）を吸収し挿入公差5mmへ収束させる階層型制御ロジック
1.3 治具着座確認（座り・浮き検知）のクローズドループ検証と世代間進化
第2章 量産タクトタイム同期と10時間連続シフト稼働・予防保全の運用実態
2.1 動作速度400%向上・成功率7倍向上の定量的内訳とタクトタイム構造
2.2 10時間シフト運用におけるバッテリー管理・充電方式の世代間比較
2.3 前腕（Forearm）故障モードの徹底解剖とFigure 03での抜本的再設計
第3章 工場上位システム（BMW iFACTORY / MES / PLC）とのリアルタイム統合プロトコル
3.1 BMW iFACTORY「統合データプラットフォーム」とフィジカルAI統合アーキテクチャ
3.2 溶接セルPLC・自動扉・6軸スポット溶接ロボットとの3層インターロックシーケンス
第4章 成功率99%の裏にある残り1%の例外・異常リカバリーとライン停止回避策

4.1 稼働ケイデンスにおける「1%の失敗」の数学的意味と異常モード分類
4.2 ミリ秒単位の自律リトライ機構（System 0 / 1 / 2 の多層フィードバック）
4.3 自律復帰不能時のエスカレーション・LOTO手順とサブアセンブリ・バッファ設計
第5章 車体工場における機械安全・労働安全クリアランスとROI評価
5.1 動的安定二足歩行ロボットの機械安全規格と「隔離ワークセル」設計の真実
5.2 電源喪失・非常停止時の「転倒ハザード（半径約2m）」とメカニカルブレーキの設計ジレンマ
5.3 専用自動機改修・人間作業員とのCAPEX/ROI比較とエルゴノミクス効果
5.4 車体板金ローディング工程における3方式比較表
参照一次資料・公式発表・専門検証記事一覧

資料6 第2部1：Apptronikの技術系譜と商用ヒューマノイド「Apollo」のモジュール機構・電力設計
エグゼクティブ・サマリー
第1章：NASA「Valkyrie」から続くApptronikの技術系譜と量産・AIエコシステム戦略
1.1 UT Austin HCRLおよびNASA「Valkyrie（R5）」からの技術的継承
1.2 EMS大手「Jabil」との量産提携とDFMA・コスト低減アプローチ
1.3 初期顧客エコシステムとGoogle DeepMind・NVIDIAとのAI技術分担
第2章：「Apollo」の全体主要諸元と「台座固定／車輪／二足歩行」を選択できるモジュラー構造
2.1 人間工学（エルゴノミクス）に基づいたボディサイズ設定と高ペイロード比の根拠
2.2 「固定台座／車輪型AMR／二足歩行」を選択できるモジュラー下半身構造
2.3 Apollo ハードウェア諸元および競合機（Figure 02 / トヨタELEY）との機構・保守・電力設計比較表
第3章：独自開発「モジュール式アクチュエータ」と力制御（Series Elastic / QDD系）の進化
3.1 リニア（直動）×ロータリー（回転）アクチュエータの適材適所配置とリンク機構
3.2 高価で複雑な初期SEAから「部品点数3分の1・量産型力制御アクチュエータ」への進化
3.3 約30のモジュール群への共通化と現場MTTR（平均修復時間）短縮アプローチ
第4章：ライン稼働を止めない「急速バッテリー交換（ホットスワップ）機構」とエッジAI演算基盤
4.1 4時間連続稼働・外付け交換式バッテリーと「7x22」稼働モデルの設計思想
4.2 ホットスワップの電気的・機械的機構と24時間3交代ラインでの予備バッテリー運用計算
4.3 オンボード計算基盤（NVIDIA Jetson）と対人コミュニケーション（HRI）の電装アーキテクチャ
第5章：人間協調を前提とした「多層セーフティゾーン（Impact Zone）」と本質安全アプローチ
5.1 73kgの機体＋25kg荷物を安全に制御する「4層セーフティアーキテクチャ」
5.2 トヨタ「ELEY」・Figure AI「Figure 02」との比較におけるApolloのポジショニング総括
参照一次資料・公式発表・技術文献一覧（URL付記）

資料7 第2部2：既存工場「Brownfield」における二足歩行スタビリティ制御と動的環境マッピング ― メルセデス・ベンツ・ベルリン工場等におけるApptronik「Apollo」の実装解剖
エグゼクティブ・サマリー
第1章 既存工場（Brownfield）特有の物理的制約と「建屋・床面無改修」導入の工学的要件

1.1 1902年創設ベルリン工場と欧州既存建屋に残存する物理的障壁
1.2 車輪型AGV/AMRの限界と「レイアウト変更ゼロ」投入の生技合理性
既存工場（Brownfield）の床面・通路環境における移動方式別（磁気AGV ／ 車輪型AMR ／ 二足歩行Apollo）走破性・安全制御比較表
第2章 不整地・段差・荷重変動に耐える「二足歩行スタビリティ制御アルゴリズム」
2.1 モデルベース制御（MPC / IHWBC）と深層強化学習の3階層ハイブリッド構造
2.2 最大25kg部品コンテナ把持時の合成重心・慣性テンソル変動と動的補償機構
2.3 油膜・粉塵による摩擦係数変化（スリップ）のミリ秒検知と外乱抑制ループ
第3章 デプスセンサ・視覚統合によるリアルタイム自己位置推定（SLAM）と3D環境マッピング
3.1 頭部・胸部センサフュージョン構成とオンボード計算基盤
3.2 鏡面反射・動的背景変化を克服するVisual-Inertial-Leg Odometry
3.3 GPU常駐型3Dボクセルマップ（Nvblox TSDF/ESDF）の高速更新と動的レイヤ分離
第4章 人・有人フォークリフト混在環境における「動的障害物回避」と協働安全制御
4.1 移動物体の軌跡予測とリアルタイム局所軌道計画（Local Planner）
4.2 機械安全規格（ISO 10218:2025 / ISO/TS 15066 / ISO 25785-1）と「倒れない非常停止」
4.3 視覚的シグナリング（胸部OLED・能動視線・協調LED）による心理的安全性とすれ違い効率
第5章 メルセデス「MO360」およびNVIDIA Omniverseデジタルツインとの事前検証連携
5.1 「MO360」データエコシステムとOpenUSD工場デジタルツインの統合
5.2 狭小通路の仮想通過性検証・Sim-to-Real学習・実機テレオペレーションの閉ループ
参照文献・一次情報リスト（巻末出典）

資料8 第2部3：メルセデス・ベンツ工場における部品キッティング・通い箱搬送工程の実務フローと「二足歩行 vs 車輪型AMR」徹底比較
エグゼクティブ・サマリー
第1章：部品キッティング・通い箱（Tote）搬送工程の具体的ワーク仕様と全作業シーケンス
1.1 導入拠点の生産特性：ベルリン・マリエンフェルデ工場とケチケメート／ジンデルフィンゲン工場
1.2 対象ワークの物理仕様：VDA 4500規格KLT通い箱と個別金属部品キット
1.3 保管ラックからPoint of Fit（組立手元）に至る全作業シーケンスとサイクルタイム分析
第2章：通い箱・部品把持における双腕協調制御とエンドエフェクタ（グリッパー／ハンド）の使い分け
2.1 線形電動アクチュエータと双腕協調インピーダンス制御・噛み込み回避ロジック
2.2 タスクに応じたエンドエフェクタのモジュール選択と治具レス化のトレードオフ
2.3 現場熟練作業員によるテレオペレーション・AR・模倣学習からの自律化移行フロー
第3章：【徹底比較】なぜ車輪型AMR単体ではなくヒューマノイドなのか？（AMRとの役割分担と連携プロトコル）
3.1 「水平幹線搬送の車輪型AMR／無人牽引車」と「垂直ラストワンメートルのApollo」の機能分担
3.2 重量級車輪モバイルマニピュレータ（SOTO／KMR iiwa）に対する物理的優位点と劣位点
3.3 トヨタ「ELEY（軽量車輪伸縮構造）」との比較と合理性が逆転する生技上の境界条件
第4章：工場上位システム（MO360 / WMS / MES）との出庫・配膳データ同期と例外処理

4.1 MO360・WMS・Fleet Connect間のデータ同期とポカヨケ（誤配膳防止）設計
4.2 異常発生時の自律リトライ手順とHuman-in-the-Loopエスカレーション設計
第5章：欧州工場における投資対効果（ROI）、身体的負荷軽減、およびドイツ労使協議会・安全基準の突破
5.1 筋骨格系疾患（MSD）による欠勤コスト低減効果と拠点別・シフト別の損益分岐点試算
5.2 ドイツ労働安全衛生規則（DGUV／BetrSichV／EU機械規則）への適合プロセス
5.3 ドイツ労使協議会（Betriebsrat）との合意形成ガバナンス
出典・参照文献一覧

資料1 プロローグ1：トヨタ新型協働ロボット「ELEY（エリー）」のハードウェア機構設計と本質安全思想：車輪型全方向移動・超軽量50kg・全軸QDDが拓く製造現場実装の工学解剖（第1巻）

エグゼクティブ・サマリー

トヨタ自動車の未来創生センター（R-フロンティア部 工場革新ロボティクスG）が開発し、2025年12月の「World Robot Summit 2025 AICHI」での実機初公開、2026年3月の機構設計思想の公式発表、同年9月の欧州統括会社（TME）投資家向け説明会における大規模行動モデル（LBM）実装実演を経て、2027年1月1日付で発足する全社直轄組織「トヨタロボティクス」の中核プラットフォームとして位置づけられた新型協働パートナーロボット「ELEY（エリー：Embodied Learning robot for Enhanced Yield）」は、欧米・中国勢が競う「高重量・二足歩行型汎用ヒューマノイド路線」に対するトヨタ生産方式（TPS）からの明確な工学的回答である[1]。ELEYの最大の特徴は、二足歩行脚部を意図的に排した全方向自律移動車輪台車、日本人成人男性の空間占有幅に合致させた奥行**478 mm** × 幅**450 mm**の極小フットプリント、床面荷取りから高所棚格納までを単一機体で網羅する全高**939〜1,619 mm**（ストローク**680 mm**）の垂直伸縮機構、従来型双腕産業機の4分の1以下（約23%）に相当する機体総重量**50 kg**、そして人間特有の肩甲骨軸を含む腕部関節への全軸準ダイレクトドライブ（**QDD**：減速比**10:1**以下）およびワイヤー・樹脂ベルトレス直接駆動方式の統合にある[1]。これにより、既存の狭小な自動車組立・部品ラインを建屋無改修かつ安全柵なしで自動化しつつ、接触瞬間の物理的逆駆動性（高バックドライバビリティ）によって作業員への衝突傷害と部品破損をハードウェアの物理特性から抑制する「本質安全設計」を具現化している[1]。

> 協働ロボット「ELEY（エリー）」などの開発において、**QDD**（準ダイレクトドライブ）の減速比が**10:1**以下であることには、ロボットが人間と安全に共存し、かつ実用的な力で作業するために極めて重要な意味があります。
>
> ここでは、その具体的な意味と、QDDに関する分かりやすい用語解説をお届けします。
>
> 「減速比**10:1**以下」が持つ工学的・安全上の意味
> 従来の産業用ロボットは、小さなモーターで大きなパワーを出すために「100:1」や「200:1」といった非常に高い減速比（ギア）を使用しています。これに対し、ELEYなどが採用する「10:1以下」という超低減速比設計には、主に以下の4つの決定的な意味があります。
>
> **1.** 圧倒的な「バックドライバビリティ（逆駆動性）」の実現
> - 意味： 外から押されたときに、関節が「スルッ」と軽く回る（外力を逃がせる）性質のことです。
> - なぜ**10:1**以下か： 減速機の摩擦や慣性力（逆駆動する際の重さ）は、減速比の「2乗」に比例して大きくなります。もし減速比が100:1であれば、外から動かすのに理論上1万倍以上の抵抗がかかり、関節はガチガチにロックされた状態（非バックドライバブル）になります。これを10:1以下に抑えることで、人間の軽いタッチや不意の衝突に対しても、ロボットが「力を受流

す」ように受動的に動く（しなやかな接触）ことが可能になります。

2. 「センサーなし」で高感度な力覚検知（トルク推定）が可能になる
   - 意味：高価で壊れやすい「6軸力覚センサー」などを関節や手先にたくさん付けなくても、ロボット自身が「今どれくらいの力で何かに触れたか」を正確に察知できます。
   - なぜ**10:1**以下か：減速比が10:1以下と非常に低いと、ギア内部の摩擦抵抗が極めて小さくなります。そのため、「関節のモーターに流れている電流値」を見るだけで、手先やアームにかかっている外力をほぼそのまま、ダイレクトに計算（推定）できます。これにより、衝突を検知して瞬時に止まる、あるいは柔らかく対象物に触れる「インピーダンス制御」が、安価かつ強靭なハードウェアのまま実現します。
3. 衝突時の「物理的な衝撃」を最小限に抑える（本質安全）
   - 意味：万が一、ロボットが動いている最中に人間とぶつかっても、大怪我をさせない物理的な安全性を担保します。
   - なぜ**10:1**以下か：減速比が高いロボットは、モーターが高速回転しているため、回転運動による「見かけの重さ（反射慣性）」が巨大になります。ぶつかった瞬間にモーターを急停止させようとしても、ギアがロックされているため、ロボットは「ただの重い鉄の塊」として人間に激突します。10:1以下のQDDであれば、衝突した瞬間にギアを通じてモーター自体が逆回転して衝撃を逃がすため、人間にかかる衝撃エネルギーを劇的に低減できます。
4. ダイレクトドライブ（直接駆動）の弱点を補う、絶妙な「妥協点」
   - 減速機を全く使わない「1:1（ダイレクトドライブ：DD）」が最も安全で滑らかですが、これを行うにはモーターを巨大・激重にする必要があり、ロボット自体の重量が跳ね上がってしまいます（これでは本末転倒です）。
   - 「**10:1**以下」というわずかな減速をかけることで、個々の関節モーター（**QDD**アクチュエータ）を数百グラム～**1kg**前後の小型・軽量サイズに抑え、結果としてロボット全体の機体総重量を約**50kg**に収めつつ、作業に必要なトルクを最大**10**倍に増幅するという、ロボット工学上の「最も優れた妥協点（スイートスポット）」がこの数値なのです。

一方で、生産技術部門および労働安全研究機関が導入評価を行う上では、報道上の見出しと一次公開事実を厳密に峻別する必要がある[5]。第一に、2026年9月に中嶋裕樹副社長兼CTOが示した「2028年以降、年間約1兆円規模を投じ世界約60工場で計40万台のロボット（トヨタ本体・グループ約15万台、仕入先サプライヤー約25万台）を更新・導入する構想」は、老朽建屋・通信・デジタルツイン・既存の非ヒューマノイド産業用ロボットやAGVの更新を含むサプライチェーン全体の刷新試算（Factory Automation 3.0）であり、**40**万台すべてが**ELEY**単一機種で占められる確定調達計画ではない[3]。第二に、2026年11月時点でトヨタ公式が確定公表しているELEYのハードウェア数値は寸法（478 × 450 × 939～1,619 mm）、機体重量（50 kg）、減速比上限（10:1以下）等に限られ、正式な定格可搬質量（日刊自動車新聞の初公開時写真キャプションでは「片腕1 kg」と記載されているがトヨタ公式スペック表では未公表）、総自由度数、繰返し位置決め精度、連続稼働時間、保護等級（IP値）、車輪操舵の内部構造は未公表である[5]。さらに開発陣自身が「①長時間稼働の信頼性、②手先を毎回同じ場所へ高精度に到達させる再現性、③学習用データ基盤」の3点を世界水準へ引き上げるべき途上課題として率直に挙げており、本報告書ではトヨタの一次公開事実と、公開諸元に基づく機構学・機械安全工学上の定量試算・推論を明確に区別して解剖する[1]。

ELEY 主要技術諸元・従来機比較一覧表

比較項目	トヨタ **ELEY**（次世代協働機）	トヨタ **HSR**（生活支援先代機）	欧米二足歩行機（**Digit / Figure 02**等）	従来型双腕産業機（**SDA10F**等）

開発主体・初公開時期	トヨタ未来創生センター・2025年12月	トヨタ自動車・2012年発表	Agility社・Figure AI社等・2023〜2026年	安川電機等の産業ロボ各社・量産普及機
平面寸法（フットプリント）	奥行478 mm × 幅450 mm（0.215 m^2）	直径430 mm円筒形（0.145 m^2）	足裏接地多角形のみ（作業占有幅約600 mm超）	架台・安全柵含め数m^2の専用セル占有
全高・垂直昇降ストローク	939〜1,619 mm（昇降幅680 mm）	1,005〜1,350 mm（昇降幅345 mm）	約1,680〜1,750 mm（膝屈伸のみで固定身長）	約1,500 mm前後（床面アンカー固定設置）
機体総重量	**50 kg（バッテリー・台車・双腕内包）**	約37 kg（単腕・家庭内低速移動仕様）	**65〜70 kg（Atlas級は約89 kg）**	本体220 kg（コントローラ・架台別）
移動機構方式	車輪式全方向自律移動台車（詳細車輪構造未公表）	車輪式全方向移動台車（段差5 mm・傾斜5度）	2脚多関節動歩行機構（段差・階段対応）	移動機構なし（移動時は大型AGV架台積載）
上半身・腕部リンク構成	双腕＋肩甲骨軸（日本人成人男性平均寸法）	折りたたみ単腕（約600 mm・肩甲骨軸なし）	双腕（16〜28自由度・肩甲骨軸なしが主流）	双腕15軸（片腕7軸×2＋腰旋回1軸）
関節アクチュエータ・減速比	全軸QDD（大トルクモータ＋減速比10:1以下）	小型高速モータ＋高減速比ギア機構	サイクロイド減速機・遊星ギア・直動機構混在	サーボモータ＋波動歯車等の高減速比（約100:1）
動力伝達・手先機構	ワイヤー・樹脂ベルトレス直接駆動＋**2本指ハンド**	関節ギア駆動＋2本指グリッパ・吸着機構	**多指腱駆動ハンド（11〜22自由度）または2本指**	タイミングベルト・中空減速機＋専用ハンド
可搬質量（ペイ	公式未公表（専門紙報道では	最大1.2 kg（把持幅最大130	両腕計16〜23 kg（プラスチック	片腕10 kg（両

ロード）	片腕1 kgと記載）	mm）	通い箱搬送等）	腕計20 kg）
安全担保アーキテクチャ	50 kg軽量＋低重心車輪＋QDD機械的逆駆動＋Guardian	37 kg軽量＋低速0.8 km/h制限＋接触センサ	全身バランス制御＋LiDAR動的制動（転倒リスク内在）	安全柵隔離またはトルクセンサ検知後の非常停止

上記の比較諸元はトヨタ自動車公式ニュースルーム、WRS 2025 AICHI出展資料、日刊自動車新聞報道、および各比較機種の公開仕様に基づく[1]。

【補遺001】トヨタが選択したQDDと欧米ヒューマノイドの駆動機構の比較

欧米の二足歩行ヒューマノイド（Agility RoboticsのDigit、Figure 02、Tesla Optimus、Apptronik Apolloなど）が「サイクロイド減速機・遊星ギア・直動機構の混在（ハイブリッド構成）」を採っているのに対し、トヨタの**ELEY**が「全軸QDD（減速比10:1以下への統一）」を採った背景には、「何を最優先に設計したか」という根本的な思想の違いがあります。

一言でいえば、欧米勢は「二足歩行の衝撃に耐え、約20kgの重い箱を持ち上げる『パワーと高剛性』」を得るために複数の駆動方式を部位ごとに使い分けており、トヨタは車輪化によって脚の負荷をなくしたことで「どの関節が人にぶつかっても物理的に力を逃がす『しなやかさと本質安全』」に全振りできた、という違いです。

まず、欧米機に使われている3つの機構の正体と役割を解説し、その上でトヨタのQDDとの違いを比較します。

1. 欧米ヒューマノイドに混在する「**3**つの駆動機構」とは？
二足歩行ロボットは、自分の体重（65〜90kg）を2本の脚で支えて歩きながら、両腕で16〜23kgの通い箱（トート）を持ち上げます。これをすべて減速比10:1以下のQDDだけで行おうとすると、モーターが巨大になるか、発熱で焼き切れてしまいます。そのため、部位の役割に応じて以下の3種類を適材適所で混在させています。

① サイクロイド減速機（高トルク・耐衝撃の回転関節）
- 仕組み：曲線状の歯（トロコイド歯形）を持つ円盤を偏心回転させて減速するギア（減速比は30:1〜100:1前後が主流）。
- 採用部位：股関節、腰、重い荷物を支える肩関節など（DigitやFigureなどで採用）。
- なぜ使うのか：従来の産業用ロボットで定番だった「波動歯車（ハーモニックドライブ）」は、薄い金属リングをたわませる構造のため、二足歩行で足が床に「ドン！」と着地した際の強い衝撃で歯が欠けやすい弱点がありました。サイクロイド減速機は同時に噛み合う歯が多く、衝撃に圧倒的に強く、小型で大パワーを出せるため採用されています。
- **QDD**との違い：減速比が高く内部摩擦も大きいため、外力で関節が逆回転しにくく（バックドライバビリティが低く）、ぶつかった際の物理的な「硬さ」が残ります。

② 遊星ギア（中〜低減速・高効率の回転関節）
- 仕組み：太陽の周りを惑星が回るように複数のギアが噛み合う、自動車のATなどでもおなじみの歯車です。

- 採用部位：素早い動きや柔軟性が必要な肘・手首、あるいは動的なバランスをとる脚の一部の軸。
- **QDD**との関係（重要）：実は、トヨタの**QDD**（減速比**10:1**以下）の中身も、一般的には「**1**段式の遊星ギア」などがベースになります。欧米機では、パワーが必要な箇所には「2段式の遊星ギア（減速比15:1〜40:1程度）」を使って力を稼ぎ、軽快さが必要な箇所にだけ低減速の遊星ギア（＝QDD相当）を使うといった使い分けをしています。

③ 直動機構 **/** リニアアクチュエータ（人間の「ふくらはぎ・太もも」に近い人工筋肉構造）

- 仕組み：モーターの回転を「遊星ローラーねじ」や「ボールねじ」で直線運動（押し引きするピストンの動き）に変換し、テコの原理で関節を曲げる方式です。
- 採用部位：膝、太もも、足首、手首のリンク機構など（Tesla OptimusやApptronik Apolloの脚部・体幹で象徴的に採用）。
- なぜ使うのか：膝や足首に丸くて重い回転モーターを直接入れると、脚の先端が重くなって歩きにくくなります。細長いシリンダー状の直動機構にすれば、人間のふくらはぎのように脚をスリムに保ったまま、自分の体重を支えて立ち上がる強大な推力を出せます。また、直立した状態では少ない電力で姿勢をロックしやすい利点もあります。
- **QDD**との違い：ねじ機構は摩擦が大きく、外から押してもほぼ逆戻りしません（非バックドライバブル）。そのため、電流値だけでは外力を正確に測れず、高価な「ロードセル（力センサー）」をシリンダーの先に必ず組み込んで、ソフトウェア制御で人工的に柔らかさを作る必要があります。また、精密な「遊星ローラーねじ」は製造コストが非常に高い部品として知られています。

2. トヨタ「全軸**QDD**」**vs** 欧米「ハイブリッド混在方式」の比較

比較項目	トヨタ **ELEY**（全軸**QDD**統一）	欧米ヒューマノイド（**3**方式の混在）
基本構成	大トルクモーター ＋ 10:1以下の低減速ギアに統一	サイクロイド ＋ 1〜2段遊星 ＋ 直動（ローラーねじ）を部位別に配置
出せる力（可搬質量）	小さい（片腕1kgクラスの小物部品・柔軟物作業に特化）	大きい（65〜90kgの自重を支えて歩き、16〜23kgの箱を運搬）
外力への柔軟性（逆駆動性）	極めて高い（どの関節に当たっても遅延ゼロで物理的に逃げる）	部位により低い〜中程度（高減速部や直動部は物理的に硬い）
力加減（力覚）の測り	モーターの電流値だけで推定可能（専用力覚センサーへの	各軸トルクセンサーやロードセルが必須（ギア・ねじ摩擦が大

方	依存小）	きいため）
安全の作り方	ハードウェアによる「本質安全」（ぶつかった瞬間に関節が負ける）	センサー＋**AI**制御による「機能安全」（接触を検知してソフトで止める）
部品共通化・コスト・保守	駆動原理が統一されシンプル、高価なローラーねじや力センサーを削減可能	関節ごとに構造・部品・制御則が異なり、精密ねじやセンサーで高コスト化

3. この比較から見える「設計上のトレードオフ（本質）」
生産技術やロボット導入の視点から見ると、両者の違いは以下の3つのトレードオフに集約されます。

1. 「パワー（可搬重量）」を取るか、「物理的な柔らかさ（安全柵レス）」を取るか 欧米機は「人間と同じように歩いて20kgの部品箱を運ぶ」ことを目指したため、どうしてもサイクロイド減速機や直動ローラーねじといった「硬くて力強い機構」を混ぜざるを得ませんでした。一方、トヨタは「重いモノの運搬は既存のAGVや専用機に任せればよく、移動は車輪、上下動は昇降コラムに負担させればよい」と割り切ったため、腕の全関節を**10:1**以下の**QDD**という「最も柔らかく安全な領域」だけで統一できました。
2. 「制御遅延ゼロの安全性」か、「センサーと演算頼みの安全性」か 直動機構や高減速比ギアは、ぶつかった瞬間の「最初の数ミリ秒（センサーが検知してモーターにブレーキをかけるまでのわずかな遅れ）」の間、硬い鉄の塊として振る舞います。対してELEYの全軸QDDは、コンピューターが計算するよりも早く、物理法則として衝突の瞬間に関節が逆回転して力を逃がすため、狭いラインで人と肩を並べて働く際の安心感が根本的に異なります。
3. 量産コストと現場での壊れにくさ（保守性） 欧米機が多用する「遊星ローラーねじ（直動機構）」や「多数の力覚センサー（ロードセル）」は、ヒューマノイドの部品コスト（BOMコスト）を押し上げる最大の要因になっており、衝撃によるセンサー故障のリスクも抱えます。トヨタの全軸QDD（＋ベルトレス直接駆動）は、力覚センサーへの過度な依存を減らし、構造をシンプルに保つことで、将来的にサプライヤーを含む数万～数十万台の現場へ普及させる際の「コスト低減」と「壊れにくさ」を見据えた設計といえます。

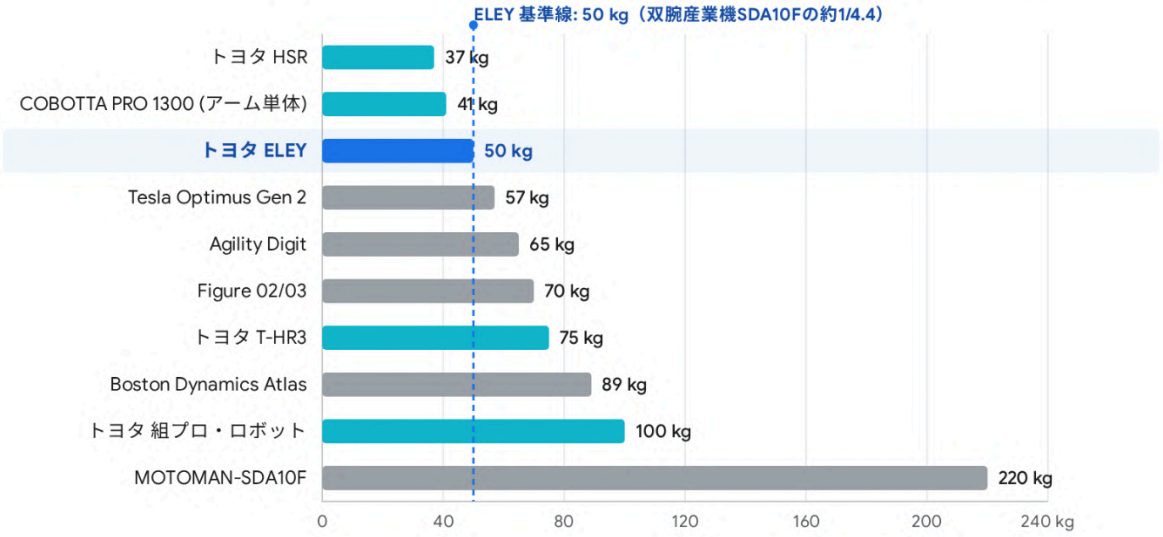
ELEYは機体総質量50 kgの軽量性を維持しつつ、先代HSR比で約2倍の垂直伸縮ストロークを実現

トヨタ系譜ロボットおよび主要ヒューマノイド・双腕産業機との機体質量・全高可動域の比較（公開仕様値）

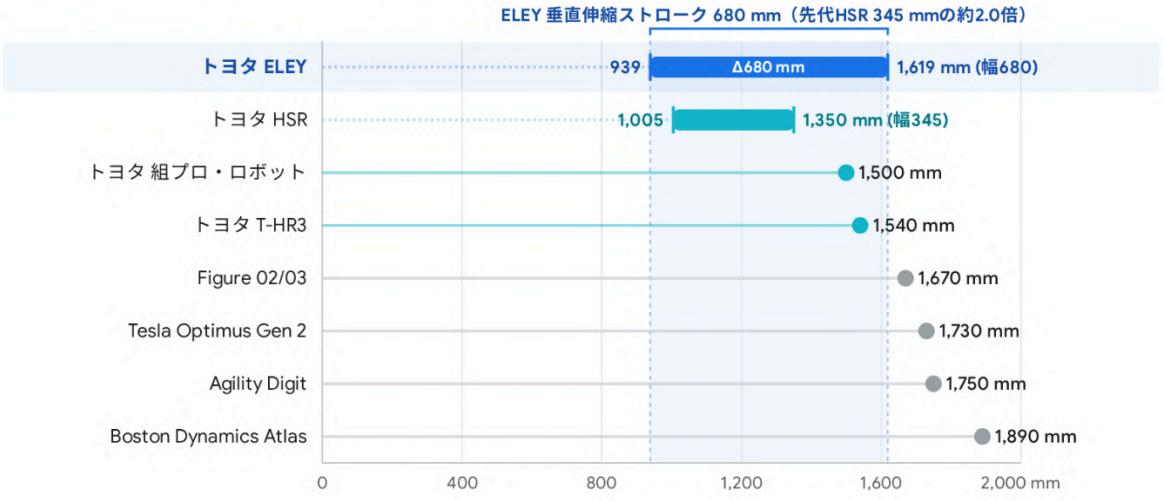
すべて表示　トヨタ系譜のみ　ヒューマノイド比較

■ トヨタ ELEY（本機）　■ トヨタ・グループ系譜　■ 外部ヒューマノイド・双腕産業機

PANEL 1 **機体総質量の比較 [kg]**　※COBOTTA PRO 1300はアーム本体単体質量（コントローラ15〜18 kg別）



PANEL 2 **全高・垂直伸縮レンジの比較 [mm]**　帯バー：垂直昇降（伸縮）範囲 ／ 丸マーカー：全高固定



上段は機体総質量（kg）、下段は全高および垂直伸縮範囲（mm）の公開仕様比較を示す。**ELEY**は双腕化・産業剛性化を果たしながら総質量を50 kgに抑え、二足歩行機（57〜89 kg）や従来型双腕産業機（220 kg）を大幅に下回る。同時に全高939〜1,619 mm（ストローク680 mm）の昇降機構により、先代HSR（ストローク345 mm）の約2倍の垂直可動範囲を獲得している。

データ出典: トヨタ自動車 未来創生センター（WRS 2025出展概要：ELEY・組プロ・ロボット）、 Toyota Global（ELEY Specifications）、 Toyota Global Newsroom（HSR Specs）、 香川友（T-HR3・HSR系譜解説）、 セレンディップ・ロボティクス（デンソーウェーブ COBOTTA PRO 1300仕様）、 OptimusK（ヒューマノイド各社仕様比較）、 安川電機 e-メカサイト（MOTOMAN-SDA10F仕様）

第1章 なぜ二足歩行を排し「車輪型（全方向自律移動台

車）」を選択したのか

1.1 静止時・待機時の消費電力削減メカニズムと連続稼働時間への寄与

欧米の完成車メーカーや米テスラが工場内への二足歩行ヒューマノイド投入を前面に掲げ、トヨタ自身もカナダ製造拠点（TMMC）において米Agility Robotics社の二足歩行機「Digit」をRaaS（Robots-as-a-Service）形態で商用試験導入（2026年2月契約、約1年の実証を経て主力工場に7台配備計画）する複線的検証を行う一方で、トヨタ未来創生センターが内製中核機であるELEYにおいて二足歩行を明確に棄却し「車輪型の全方向自律移動台車」を選択した背景には、製造ライン特有の稼働プロファイルに根ざした熱力学的・エネルギー的合理性が存在する[5]。

二足歩行ヒューマノイド（総質量65〜100 kg級、脚部だけで10〜12自由度）は、階段や不整地を踏破できる反面、平坦な工場床面上で「立ち止まって手元作業を行う」あるいは「前工程からのワーク到着を待つ」静止・待機局面においても、重力による膝折れ・転倒を防ぐために股関節・膝関節・足首関節のアクチュエータへ持続的に姿勢維持トルク（重力補償トルク）を発生させ続けなければならない[8]。電磁モータにおいて静止保持トルク T_hold を出力する際、関節角速度 omega = 0 であるため機械的仕事率（P_mech = T_hold × omega）はゼロであるにもかかわらず、巻線抵抗 R にはトルクに比例する保持電流 I_hold が流れ続け、銅損 P_copper = I_hold^2 × R がすべてジュール熱として散逸する。さらに、狭い足裏接地多角形内に重心投影点やゼロモーメントポイント（ZMP）を維持するため、慣性計測装置（IMU）と関節トルクフィードバックを用いた高速周期の動的バランス制御演算およびインバータのスイッチング損失が常時重畳する[9]。結果として、二足歩行機は非移動時にも大きなベースライン電力を消費し続け、これがバッテリー連続稼働時間の制約（例えば次世代Digitの公表仕様でも「90分稼働に対し9分急速充電」という10対1の高頻度充電運用が前提となる）および脚部アクチュエータの発熱管理上のボトルネックとなっている[5]。

これに対し、車輪式の全方向移動台車を採用したELEYでは、機体自重（50 kg、垂直抗力約490 N）を車輪軸受と剛体シャシーが構造力学的に支持するため、停止時および定点での双腕作業時において、移動台車側の姿勢維持トルクとバランス制御電力が実質ゼロ（無通電の保持ブレーキまたは極小のサーボ待機電力のみ）となる[8]。自動車工場のサブライン手組み工程、部品キッティング（順立て）工程、および検査補助工程を時間分析すると、工程間を移動している時間よりも、屋台（作業セル）の前に静止して両腕で部品を取り出し・組付け・箱詰めしている時間やタクト同期の待機時間のほうが長いケースが少なくない[8]。ELEYはこの支配的な静止・定点作業時間帯における下半身エネルギー損失を排除することで、機体重量50 kgに収まる小型・軽量バッテリーでも長時間の稼働を成立させるとともに、脚部大出力モータからの廃熱をなくして密閉防塵外装（ファンレス冷却設計）を採りやすくするという二次的な生技上の利点も獲得している[8]。

1.2 アーム最大伸長・ワーク把持時の反力・転倒モーメントと静的・動的安定性

双腕マニピュレータが生産現場で実用的な作業（部品箱の開閉、コネクタやグロメットの押し込み、治具へのワークセット等）を行う際、機体には「腕と把持ワークの重力による静的転倒モーメント」「移動加減速や急停止に伴う動的慣性モーメント」「環境へ力を加えた際の作業反力モーメント」の3つが合成されて作用する[1]。二足歩行型では足裏の狭い支持領域内でこれらの反力・外乱モーメントを受け止めねばならず、腕を前方・側方へ伸ばす動作や押し込み反力が加わる瞬間に全身のバランス制御負荷が急増し、手先の動作安定性が損なわれやすい[8]。車輪型台車は広い接地支持多角形を確保することで、この反力安定性の課題を構造的に解決している[8]。

ここでトヨタ公式の公開諸元（外形奥行 L = 478 mm、幅 W = 450 mm、機体総質量 M = 50.0 kg）に基づき、ELEYの静的・動的転倒安定性マージンを剛体静力学・動力学モデルによって定量試算する（以下は公開外形・質量値に標準重力加速度 g = 9.807 m/s^2 を適用した工学的試算である）[6]。外装カウル内側に収まる車輪の有効接地中心スパンを、前後端・左右端からそれぞれ約39〜40 mm内側へオフセットした前後半スパン d_x = 0.200 m（軸距400 mm相当）、左右半スパン d_y = 0.185 m（輪距370 mm相当）と仮定すると、機体自重が車輪接地線を支点として生み出す静的復元モーメント M_restore は以下の通り算出される[17]。

- 前後（ピッチ）方向 復元モーメント：M_restore_pitch = 50.0 × 9.807 × 0.200 = 98.1 Nm（外形端基準 d_x = 0.239 m では 117.2 Nm）[17]
- 左右（ロール）方向 復元モーメント：M_restore_roll = 50.0 × 9.807 × 0.185 = 90.7 Nm（外形端基準 d_y = 0.225 m では 110.3 Nm）[17]

これに対し、双腕（推定可動質量計 m_arm = 8.0 kg、腕部合成重心の前方距離 r_arm = 0.35 m）を前方へ最大伸長（手先距離 r_load = 0.65 m）させてワーク質量 m_load を把持した際の静的負荷モーメント M_static = (m_arm × r_arm + m_load × r_load) × g を計算すると、日刊自動車新聞報道にある片腕1 kg×2＝計2.0 kg把持時で **40.2 Nm**（静的安全率 98.1 / 40.2 = **2.44**）、仮に5.0 kgの樹脂部品箱を両腕で保持した過酷条件でも **59.3 Nm**（静的安全率 **1.65**）となり、十分な静的安定余裕を確保できる計算となる[5]。

さらに重要なのが、自律移動中に作業員の飛び出しを検知して緊急減速（例えば減速度 a = 1.0 m/s^2）した際に重畳する動的慣性モーメント M_dyn = (M + m_load) × a × h_cg である[17]。もし機体の合成重心高さ h_cg が高重心設計（h_cg = 0.75 m）であった場合、5.0 kg把持・急制動時の総転倒モーメント M_total = M_static + M_dyn は 59.3 + (55.0 × 1.0 × 0.75) = **100.6 Nm** に達し、有効復元モーメント（98.1 Nm）を上回って前輪支点での後輪浮き上がり（ピッチング転倒）を起こす領域に入る[17]。これに対し、駆動用バッテリー、全方向車輪駆動ユニット、昇降ベースフレーム、主制御電装といった重量物（機体質量の過半にあたる推定25〜30 kg）を台車底面から高さ200 mm以内に集中配置し、双腕・体幹を軽量化して全体の合成重心高さ h_cg を **0.42 m** 以下 に抑える低重心設計を採れば、2.0 kg把持・急制動時の総転倒モーメントは **62.0 Nm**（動的安全率 **1.58**）、5.0 kg把持・急制動時でも **82.4 Nm**（動的安全率 **1.19**）に収まる[17]。すなわち、ELEYの「478 × 450 mm」という成人男性並みの小面積台車で双腕作業反力と急制動安定性を両立させる工学的要件は、上半身の徹底した低慣性・軽量化と台車底部への極端な質量集中（低重心化）の組み合わせにあることが定量的に裏付けられる[8]。また、4輪以上の多輪接地系では床面の微小なうねりや荷重変化によって特定の駆動輪の接地圧が抜ける不静定問題が生じるため、HSRや院内搬送機Potaroの開発知見を継承し、台車内部にはストローク数mm〜十数mmのバネ・ダンパ懸架またはロッカーボギー等の接地追従サスペンション機構が組み込まれていると推察される（内部懸架機構の具体的仕様は公式未公表）[2]。

1.3 日本の自動車・部品工場の床面環境に対する全方向移動機構の走破性と位置決め精度

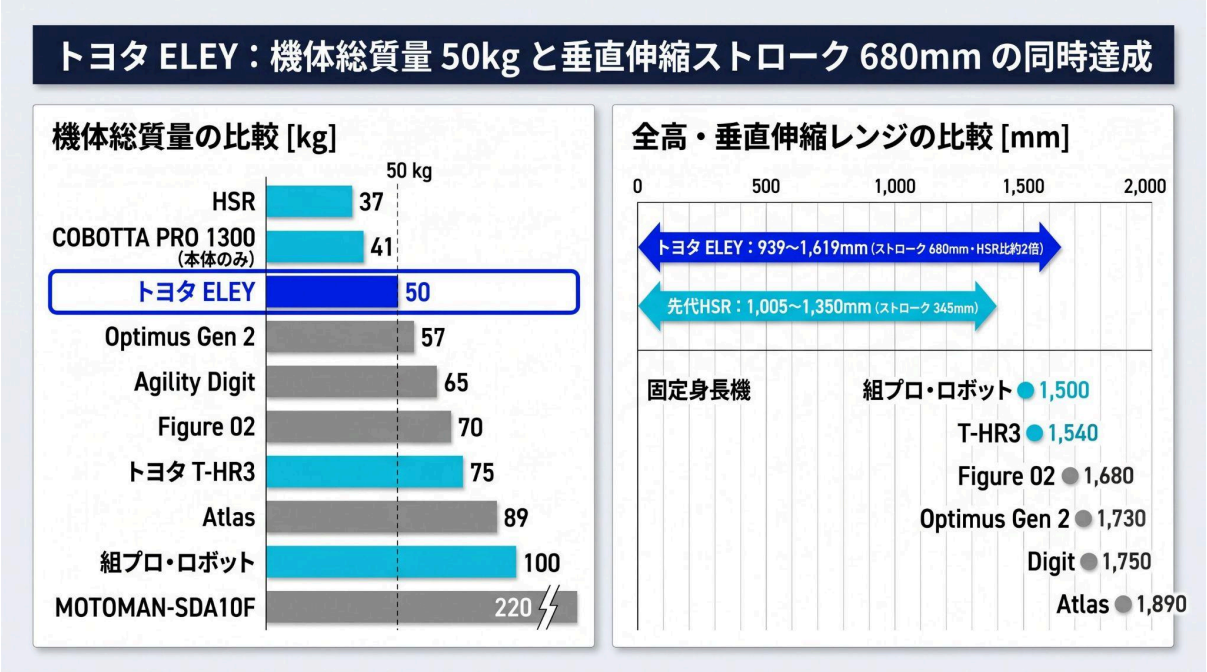
トヨタ公式発表はELEYの移動系を「全方向へ自由に動き回れる台車（omnidirectional mobile base）」と規定しているが、採用されている車輪の具体的機構（独立ステアリング駆動方式、オムニホイール方式、メカナムホイール方式等の別）および許容段差・停止精度の数値は2026年11月時点で公表されていない[2]。そこで、先代HSRの公開走行仕様（段差乗り越え5 mm、登坂角度5度[15]）および日本の自動車組立・部品工場の実床面環境を前提に、各全方向移動方式の走破性・位置決め精度・トレードオフを比較検証する。

評価軸	独立操舵・駆動方式（アクティブキャスタ等）	オムニ／メカナムホイール方式	二足歩行脚部機構	工場実装上の技術評価・**ELEY**との整合
微小段差・目地走破性	一体大径車輪（直径100〜125 mm級）により5〜10 mm段差を円滑通過	外周樽型小径ローラの段差引っ掛かりが多く5 mm超で衝撃大	足上げ制御により数cm以上の段差・ケーブル跨ぎが可能	整備された日本の工場床面（目地・塗膜段差5 mm前後）には一体車輪系が最適
グレーチング・溝耐性	接地面が連続しており排水溝蓋やエキスパンション上で安定	斜め／直角フリーローラが溝に落ち込み振動・摩耗が激しい	足先エッジが溝に掛かると足首姿勢が乱れ転倒誘発リスクあり	工場通路のピット蓋・伸縮目地上での微振動回避には一体車輪操舵系が優位
走行微振動と視覚影響	転動面が真円のため走行中の上下振動が極小でカメラ認識が安定	ローラ切替周期で微振動（チャタリング）が生じ画像ブレ要因となる	歩行周期の大きな上下動・衝撃があり移動中の精密認識が困難	LBMのカメラ視覚入力および手先制御の安定化に低振動台車が不可欠
静止作業時の水平剛性	車輪操舵角を直交（ハの字）ロックできアーム反力に高剛性	フリーローラ方向へ受動滑りしやすく反力保持に常時サーボ要	足裏摩擦頼みかつ関節コンプライアンスで体幹が揺動しやすい	部品押し込み・箱開閉時の反力受け止めにおいて独立操舵系が圧倒的に有利
機構複雑度・重量・保守	走行軸に加え操舵軸モータと旋回軸受が必要だがタイヤ寿命は長い	操舵軸不要で単純だが小径ローラ軸受への粉塵侵入・偏摩耗が早い	10〜12個の大出力アクチュエータと高負荷減速機を要し保守負担極大	長時間量産稼働の信頼性と耐油・防塵保守性の観点で一体車輪系が合理的

日本の完成車工場や部品サプライヤーの製造フロアは、安全衛生と構内物流品質（AGV・牽引

車走行）の観点からエポキシ系塗り床や強化コンクリートで平坦に整備されており、階段の昇降が必要となる工程間移動は原則として存在しない（階層間移動はエレベーターや垂直搬送機が担う）[12]。一方で現実の工場床面には、コンクリートスラブの温度伸縮目地、ピットカバーやグレーチングの隙間、配線保護用の薄型スロープ、油分やタイヤ粉による摩擦係数変動箇所が存在する。オムニホイールやメカナムホイールは外周に多数の小径フリーローラを配列する構造上、金属切粉・粉塵の軸受噛み込みやウレタンローラの偏摩耗、ローラ切り替わり時の周期的微振動が避けられず、車輪回転角からの自己位置推定（オドメトリ）も微小スリップで誤差が蓄積しやすい。これに対し、オフセット操舵差動機構や独立ステアリング駆動（スワーブドライブ）方式であれば、耐油性ソリッド車輪を用いて5〜10 mm級の微小段差や目地を滑らかに通過し、グレーチング上でも上下振動を起こさず、定点作業時には各輪の操舵角を交差させて高い水平保持剛性を確保できる（ELEYの実機台車内部の具体的車輪方式は公式未公表であるが、工場耐久要件およびHSRの開発系譜からは一体車輪操舵系が高い整合性を持つ）[12]。

さらに位置決め精度の観点で重要なのは、ELEYが「移動台車単体で±0.1 mmの絶対停止精度を出す」という従来の剛体FA設計を前提としていない点である[12]。車輪台車が作業場所へ素早く接近し、床面状態に起因する数mm〜十数mmの停止位置ズレや荷重によるわずかな姿勢変化に対しては、昇降機構が垂直高さを合わせ、肩甲骨軸を含む双腕QDDとLBMの視覚・接触制御がリアルタイムに手先位置と力を適応調整して作業を完遂する「移動・昇降・双腕の役割分担アーキテクチャ」を採用している[12]。



第2章 超軽量「約50kg」×「478×450mm」フットプリントと垂直伸縮機構の設計

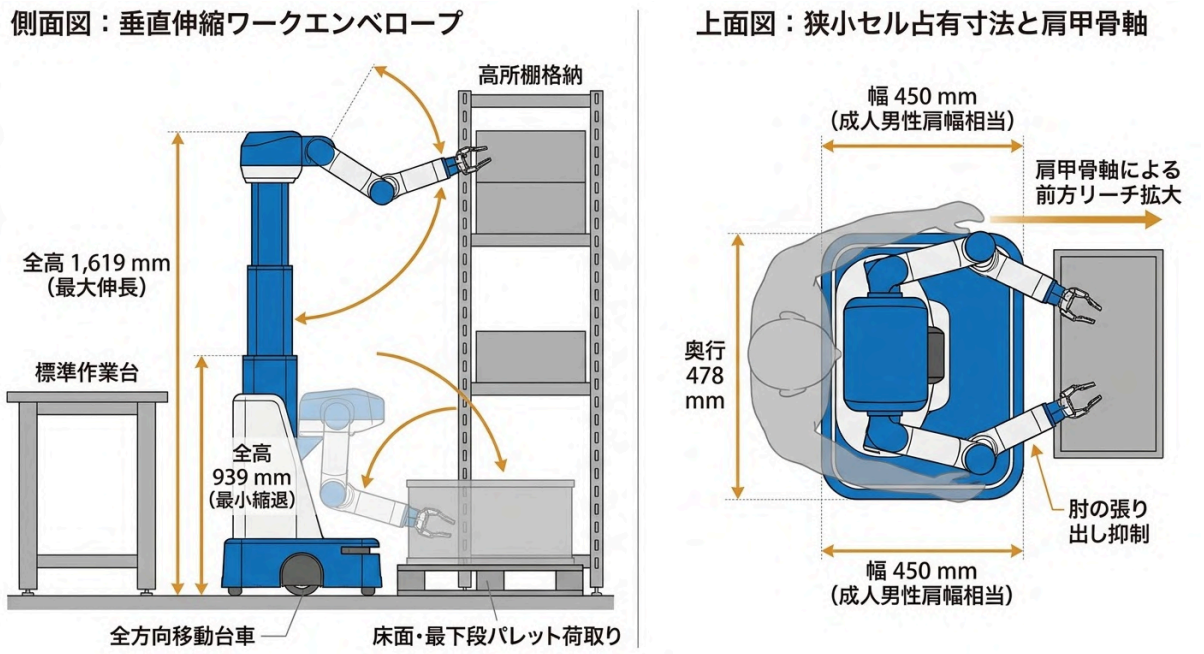
2.1 「奥行478mm × 幅450mm」の人間工学的意味と「建屋・レイアウト無改修」の生技メリット

ELEYの機体平面寸法である奥行**478 mm × 幅450 mm**（底面投影面積 0.2151 m^2）は、単なる小型化の産物ではなく、トヨタが明確に意図した「日本人平均成人男性の身体サイズへの適合」

から導出された設計値である[1]。産業技術総合研究所（AIST）の人体寸法データベースに基づく日本人成人男性の骨格上の肩峰幅平均は398 mm（青年期約400 mm）、背肩幅平均は437 mmであり[21]、さらに上腕三角筋の外側膨らみを含めた「人が空間に占める実効的な肩幅（バイデルトイド肩幅）」の成人男性平均値は **456 mm**（目安範囲420〜480 mm、平均身長171.4 cm・平均体重63.3 kg）と報告されている[24]。ELEYの機体幅 **450 mm** は、この成人男性の空間占有肩幅（456 mm）と6 mm差で一致しており、奥行 **478 mm** も成人男性が立位で前腕を構えて作業する際の胸郭厚み＋前後足幅（歩隔）の占有範囲に収まっている[8]。

この寸法設定が自動車メーカーおよび部品サプライヤーの生産技術（生技）部門にもたらす最大のメリットは、「既存の狭小な生産ラインへの建屋・設備レイアウト無改修での直接導入」である[8]。日本の自動車組立・部品工場では、長年のTPS改善（カイゼン）によって作業員のムダな歩行を削ぎ落とした結果、U字型セル屋台、サブラインの手組み組立工程、部品供給シューターが極めて高密度に配置されている[3]。例えばトヨタ自動車東日本（TMEJ）協賛の工場向けバラ積みピッキング・挿入システム『組プロ・ロボット』は奥行850 mm × 幅1,300 mm（投影面積 1.105 m^2、重量100 kg）を要し、ELEYの約5.1倍の設置面積を占める[2]。従来の産業用ロボット導入では、ロボット架台と安全柵を設置するために既存屋台を解体して通路幅を拡張し、床面にアンカーボルトを打設する「付帯設備改修コストとライン停止期間」が導入障壁となっていた[8]。

対してELEYは、豊田自動織機が安城工場の量産工程で実証した「幅約1 mの狭い通路でも人と安全にすれ違い、設備やレイアウトを変更することなく自動化する」コンセプトと同様に、人間作業員1人が通れる狭小通路と1人分の立ち作業スペースさえあれば、アンカー工事も安全柵も作業台改造も不要でそのまま配置できる[8]。さらに、ELEYの上半身に新設された肩甲骨軸（トヨタ自動車の特許第5672219号『ロボットの関節機構及びロボット』において鎖骨相当リンクと肩甲骨相当リンクで人体肩甲骨の動きを再現した機構の系譜）が、狭小セル内での干渉回避に決定的な効果を発揮する[1]。従来の固定肩関節を持つ双腕ロボットが正面の箱や狭い車内空間へ手を伸ばすと、肘が通路側（外側）へ大きく張り出して周囲の作業者や治具と干渉しやすかったが、ELEYは肩甲骨軸を前方へ送り出すことで、肘を450 mm幅の体幹近くに収めたまま手先リーチを伸ばし、押し込み作業や両手での蓋開け作業を柔軟な姿勢で遂行できる[1]。（なお、478 × 450 mmは展示資料における機体ベース寸法であり、実際に腕を広げて旋回・部品保持を行う際の実効作業空間については、現場ごとのリスクアセスメントで確認する必要がある[12]）。



2.2 全高939mm～1,619mmの垂直昇降（伸縮）機構とワークエンベロープ解析

固定身長の二足歩行ロボットが床面近くの部品を取る際には、股関節と膝関節を大きく屈曲させてしゃがみ込む必要があり、重心変動や膝アクチュエータへの大トルク負荷、さらには背後通路への臀部張り出し（干渉リスク）を伴う。対照的にELEYは、機体全高を最低 **939 mm** から最高 **1,619 mm** まで連続的に変化させる **680 mm**ストローク の垂直昇降（伸縮）機構を体幹部に内蔵している[5]。（一部報道で「全高939 mmと1,619 mmの2種類が存在する」と記された例があるが、トヨタ公式出展資料の通り、単一機体の身長が939～1,619 mmの間で伸び縮みする可伸長構造が正確な仕様である[2]）。

先代HSRの全高1,005～1,350 mm（昇降幅345 mm、肩高さ340～1,030 mm）と比較すると、ELEYは最小全高を66 mm低く抑えながら最大全高を269 mm高く伸ばし、垂直ストロークを約1.97倍へ拡張している[6]。縮退時の全高939 mm（移動台車高さを含む）という制限寸法の内部に680 mmもの直動ストロークを収容するには、1段の固定レールでは幾何学的にストロークが不足するため、高剛性リニアガイドを多段に組み合わせた入れ子式（テレスコピック）多段昇降コラム構造と、ボールねじ駆動または同期ベルト連動直動機構（無通電時保持ブレーキ付き）が採用されていると機構学的に推論される（内部直動要素の詳細は公式未公表）[12]。

この680 mmの垂直昇降と日本人成人男性スケールの双腕・肩甲骨軸の合成により、ELEYは単一機体で以下の3層の垂直作業領域（ワークエンベロープ）を継ぎ目なくカバーする[1]。

1. 最下段・床面領域（全高**939 mm**最小縮退時）：上体ごと低く沈み込むことで、床面に落ちた部品の回収や、床置きパレット・平台車（ドーリー）最下段の通い箱からの部品ピッキングを、前後フットプリント（478 mm）を一切広げずに垂直姿勢のまま安定して実行できる[2]。
2. 標準組立屋台領域（中間高**1,200～1,450 mm**時）：既存の人間用作業台や部品シューター中段に対し、人間作業員と同一の目線（頭部カメラ俯角）と肩・肘高さに合わせて正対できる[9]。これにより既存作業台の高さ改修が不要となるだけでなく、人間の作業動作とロボットの関節幾何学が一致し、フィジカルAI（LBM）による模倣学習データの転写効率が向上する[1]。

3. 高所棚格納領域（全高**1,619 mm**最大伸長時）：頭頂高が1.6 mを超え、肩甲骨軸の上方・前方可動域と腕の挙上動作を組み合わせることで、高さ**1.6 m**超のフローラック上段棚や空箱返却レーンへの格納・取り出しまで単一機体で到達可能となる[2]。

2.3 機体総重量「約50kg」を実現した構造材・モーター配置・電装小型化の工夫

双腕・肩甲骨軸・680 mm昇降機構・全方向移動台車・バッテリー・制御電装をすべて一体搭載しながら機体総重量**50 kg**に抑えた設計は、産業用ロボットの常識を覆す軽量化水準である[6]。比較として、固定設置型の双腕産業機MOTOMAN-SDA10Fは本体質量220 kg、単腕協働機COBOTTA PRO 1300でもアーム本体約41 kg＋別置きコントローラ15〜18 kg（計56〜59 kg、台車・電池含まず）、二足歩行機のAgility Digitは65 kg、Figure 02は70 kg、Boston Dynamics Atlasは89 kgである[7]。ELEYの単位床面積あたり接地荷重を計算すると 50 kg / 0.2151 m^2 = 約**232.5 kg/m^2** となり、同じスペースに立つ日本人成人男性（平均体重63.3 kg換算で約294.3 kg/m^2[24]）よりも軽く、既存工場の床耐荷重を一切気にせず導入できる[8]。

公開一次資料および未来創生センター研究陣の発表内容から、この50 kg達成を支える軽量化アプローチは以下の3点に集約される（構造材の具体的合金番手や基板仕様は公式未公表のため、公開証言に基づく機構解析を含む）[1]。

第一に、「アルミ系軽量骨格とアーム根本へのアクチュエータ集中配置」である。未来創生センターの先行研究『人にやさしいロボットアーム』および山田氏の解説において、アルミニウム等の軽量構造部材を「骨」として用い、重量物であるアクチュエータを極力アームの根本（肩・体幹側）に集約することで、腕全体の質量と慣性モーメントを引き下げる設計が採られている[1]。遠位端が軽くなれば根元関節や昇降コラムの必要支持剛性・モータ容量が連鎖的に縮小し、機体全体の軽量化が加速する。

第二に、「高トルク密度モータと10:1以下の低減速比減速機によるQDDモジュール軽量化」である。従来の産業機で大きな質量を占めていた鋳鉄・特殊鋼製の高減速比波動歯車装置や多段減速機を廃し、大トルクモータと簡素な低減速比減速機を組み合わせることで関節ユニット単体の質量を削ぎ落としている[1]。

第三に、「専用小型モータドライバー体設計、2本指グリッパー採用、および車輪化による電池質量圧縮」である。未来創生センターの回路設計者の公開証言によれば、ロボット専用の小型モータドライバ回路から内製試作しアクチュエータと一体最適化することで、別置き大型制御盤の排除と省配線化を進めている[30]。加えて、片腕あたり25個（両腕50個）もの小型アクチュエータを前腕に詰め込む多自由度5本指ハンド（Optimus Gen 3等[14]）を避けて堅牢・軽量な2本指グリッパーを採用したこと、さらに車輪台車の採用で脚部10〜12軸のアクチュエータ質量と待機電力分の大型バッテリー質量を丸ごと削減できたことが、総重量50 kg達成の決定打となっている[8]。

第3章 全軸準ダイレクトドライブ（QDD）と直接駆動が生む「しなやかな接触」

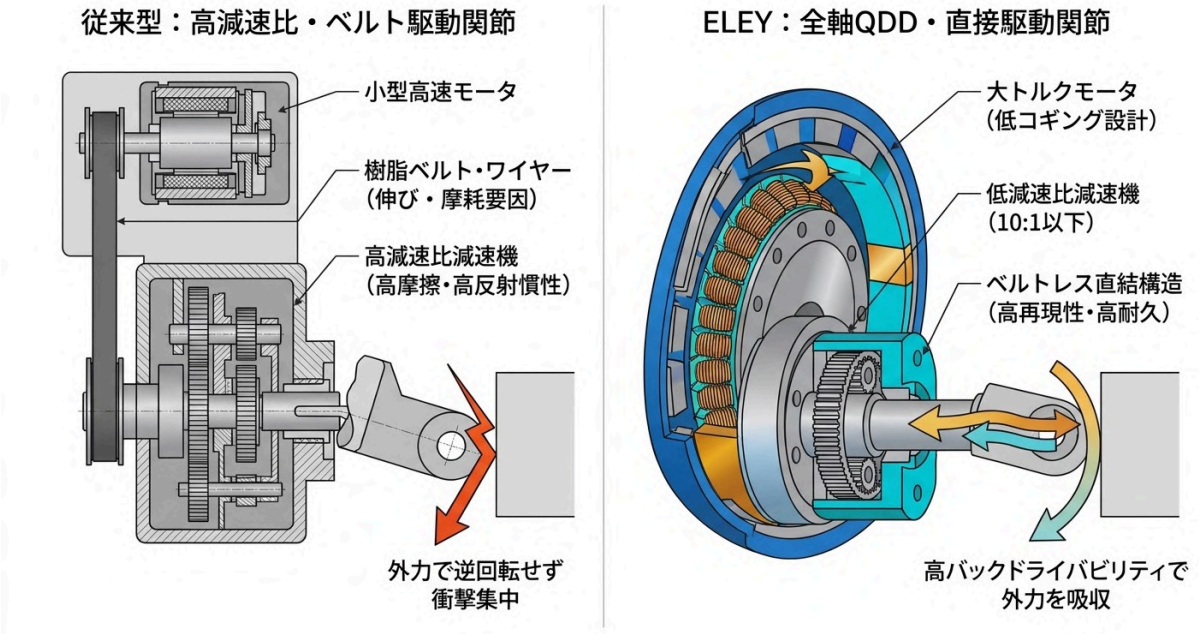
3.1 全軸QDD（減速比10:1以下）の機構構造と従来型高減速比方式（100:1前後）との決定的差異

ELEYの機構設計における最大の技術的特徴は、腕部の全関節軸に準ダイレクトドライブ（QDD：Quasi-Direct Drive、減速比10:1以下の低減速比減速機＋大トルクモータ）を採用した点にある[1]。従来の産業用ロボットおよび多くの協働ロボットでは、小型・高速回転型サーボモータと、減速

比 N = 100:1前後の波動歯車装置（ハーモニックドライブ）や精密サイクロイド減速機を組み合わせてトルクを増幅する構造が一般的であった[1]。しかし高減速比構造では関節が物理的に「硬く」なり、外力で関節を動かそうとしても逆回転しないため、HSRの研究においても「目標物を掴む際に少しでも位置がズレると想定外の力が腕にかかり、力をいなせずに故障につながる」という本質的課題を抱えていた[1]。

両方式の決定的な物理的差異は、関節出力軸から見たモータロータの等価反射慣性モーメント（J_ref）が減速比 N の二乗に比例する（J_ref = N^2 × J_m）という力学法則に現れる[17]。代表的なパラメータを用いた工学的試算で比較すると、従来の高減速比関節（減速比 N = 100、小型インナーロータモータのロータ慣性 J_m = 0.3 × 10^-4 kg・m^2）では、N^2 = 10,000倍の増幅作用によって出力軸換算の反射慣性は **J_ref = 0.300 kg・m^2** に達する[17]。対してQDD関節（減速比 N = 9、大トルク化のため大径化したアウターロータモータのロータ慣性 J_m = 1.2 × 10^-4 kg・m^2 と仮定）では、ロータ単体慣性が4倍大きくとも N^2 = 81倍にとどまるため、出力軸換算の反射慣性は **J_ref = 0.00972 kg・m^2** となり、高減速比方式の 約**31**分の**1**（約**3.2%**）まで劇的に低減される[17]。

さらに重要な一次情報として、ELEY開発担当の山田俊秀氏はトヨタ公式記事において、バックドライバビリティ（外力を加えて関節を回す際の動かしやすさ）の定義式に触れ、「ロボットアクチュエータの場合、低速（100 min^-1程度）で動作させることが多いため、コギングトルク項と慣性項の影響が特に重要になる」と明言している[1]。この発言を裏付ける研究実績として、山田俊秀氏・奥松美宏氏（トヨタ自動車）らは東海大学等との共同研究（2024年電気学会研究会論文等）において、『多極と狭ギャップを実現するハルバッハ配向アウターロータモータの磁石貼付方法の検討』および『ロボット用モータにおけるコギングトルク低減に向けた磁石形状の最適化に関する研究』を発表している[31]。ハルバッハ（Halbach）配向磁石と狭ギャップ設計を有する多極アウターロータ構造で大トルク密度を確保しつつ、磁石形状最適化によって低速域の磁気的脈動（コギングトルク）を抑え込むこれらの研究が、ELEYのQDDモータ設計の直接的な技術基盤を成していると推察される（ELEY実機モータの内部磁石配列詳細は公式未公表）[1]。



3.2 高バックドライバビリティと電流制御（トルク推定）による高感度インピーダンス制御

一般的な回転アクチュエータの逆駆動運動方程式に基づき、山田氏が指摘するコギングトルク項・慣性項および減速機摩擦項の関係をプレーンテキストで定式化すると、出力軸に外力が加わった際の逆駆動抵抗トルク T_back は減速比 N、モータ・減速機のクーロン摩擦トルク T_f、粘性減衰係数 B、コギングトルク T_cog、ロータ慣性 J_m、関節角速度 omega、関節角加速度 alpha を用いて以下の通り近似できる[1]。

T_back = N × T_f + N^2 × B × omega + N × T_cog + N^2 × J_m × alpha

高減速比（N = 100）の波動歯車装置等では、弾性歯車の噛み合い摩擦 T_f が大きい上にそれが N = 100倍に増幅されるため、外力で関節を回そうとしても大きな起動摩擦トルクに阻まれる。同時に、モータの駆動電流（q軸電流 I_q）から外力を推定しようとしても、温度や速度で非線形に変動する減速機摩擦損失に真の接触トルク信号が埋もれてしまう。そのため従来の産業用・協働ロボットでは、精密な接触作業を行うために手首先端へ高価で衝撃過負荷により破損しやすい6軸力覚センサを搭載するか、全関節軸に専用の歪みゲージ式・光学式トルクセンサを個別内蔵する必要があった[2]。

これに対し、ELEYの全軸QDD（N <= 10）では、減速機の摩擦・慣性が極小化され、摩擦増幅項 N × T_f やコギング項 N × T_cog が一桁小さく、慣性項 N^2 × J_m × alpha は約30分の1以下に圧縮される[1]。その結果、モータ電流 I_q（トルク定数 K_t）と関節出力トルク T_out の間にヒステリシスの極めて少ない透明な比例関係（T_out ≈ N × K_t × I_q）が成立する[8]。この力学的透明性により、ELEYは高価で壊れやすい先端6軸力覚センサへ過度に依存することなく、各軸モータドライバの電流制御（トルク推定）と角度変化のみから、手先だけでなく前腕や肘を含む腕全体のどの部位に外力が加わったかを高速・高感度に検知し、機械的インピーダンス（慣性・減衰・剛性）を自在に調整するインピーダンス制御や学習ベース力制御を実行できる[18]。これにより、カップを床に押し付けて置く、ドアノブを回して開ける、公差の厳しい穴へ部品をなじませながら挿入するといった「環境に触れた状態で作業を完遂する身体性」が成立している[1]。

3.3 ワイヤー・樹脂ベルトを排した直接駆動系の採用理由と設計トレードオフ

QDDのしなやかさと工場設備としての位置決め精度・耐久性を両立させるため、ELEYが断行したもう一つの設計転換が「ワイヤーや樹脂ベルトを使わない直接駆動方式（ダイレクト連結）」の採用である[1]。2023年公開の未来創生センター先行試作アームでは、先端慣性を下げるために6軸手首部にワイヤー駆動の「クォータニオンジョイント」を用いていたが、山田氏が明かした通り、先行試作では外力をいなせることを確認できた反面、「長時間稼働したときの信頼性や、目標位置に手先を確実に到達させる精度で課題が残った」とされる[1]。

物理・機構パラメータ	**ELEY** 全軸 **QDD**＋直接駆動方式	従来型 高減速比関節方式	先行試作 **QDD**＋ワイヤー・ベルト方式	量産現場・接触制御への工学的影響
減速比・反射慣性（N^2 J_m）	10:1以下・極小（従来比約30分の1）	80:1〜160:1・極大（剛体壁挙動）	10:1以下・極小（手先慣性は最小）	QDDは接触瞬間の慣性衝撃ピークを物理的に緩和可能
力覚推定とセン	相電流制御の	減速機摩擦に	ワイヤー摩擦・	壊れやすい先

サ依存度	みで高感度推定（力覚センサ依存低減）	埋没（6軸力覚／各軸トルクセンサ必須）	張力変動が外乱となり推定精度劣化	端力覚センサへの依存を減らし耐衝撃性を向上
経年劣化・バックラッシュ	直結構造のため伸び・歯飛びがなく長期安定	金属歯車摩耗は少ないが過負荷衝突で歯面損傷リスク	ワイヤー伸び・素線疲労・樹脂ベルト摩耗が不可避	量産ライン長期稼働時の張力再調整・原点ズレ保守を排除
手先到達精度・剛性	ベルト弾性たわみを排除しQDDとして高精度化（途上課題あり）	±0.02〜±0.05 mmの極めて高い繰返し位置精度	負荷時のワイヤー・ベルト弾性伸びで手先位置がズレる	直接駆動化で組立タスクに必要な手先到達精度を大幅に改善
定格可搬質量・発熱制約	遠位軸モータ自重と連続保持電流の発熱により小〜中可搬向き	小型モータで10〜20 kg超の高可搬・低発熱保持が容易	根元配置により先端軽量だがワイヤー破断強度が上限	重量物搬送は専用機に任せELEYは小物組立・柔軟物操作へ特化

量産工場の保全視点で見ると、ワイヤー駆動や樹脂タイミングベルト伝動は、何千時間・何百万サイクルにも及ぶ連続稼働において「初期なじみ伸び・クリープ変形」「摩耗粉発生」「張力低下に伴うバックラッシュ増大と手先位置ドリフト」が避けられず、定期的な張力調整や再キャリブレーションを要する[1]。ELEYがこれら柔軟伝動要素を全廃して直接駆動構成へ変更したことは、研究機から量産現場設備への移行を見据えた重大な意思決定である[1]。

同時に、全軸QDD＋直接駆動方式には明確な設計上のトレードオフも存在する[5]。減速比が10:1以下であるため、重いワークを保持し続ける際にはモータ巻線に大きな連続電流が必要となり、発熱制約によって定格可搬質量の上限が抑えられる（日刊自動車新聞が報じた「片腕1 kg」という数値は、このQDDのトルク密度・発熱トレードオフと整合的である）[5]。また高減速比機（100:1）に比べて出力軸1度あたりのモータ回転角が10分の1以下となるため、微小なトルクリップルや重力補償誤差が手先再現性に影響しやすい。山田氏が「長時間稼働の信頼性」と「手先を毎回同じ場所に高精度で到達できる再現性」を今後さらに引き上げるべき課題として挙げているのは、このQDD直接駆動特有の物理的ハードルを実現場データの短サイクル学習・改善で克服していく段階にあることを示している[1]。

第4章 本質安全設計（Inherently Safe Design）と機械安全規格への適合アプローチ

4.1 国際機械安全規格（ISO 10218:2025 / ISO/TS 15066統合）の進化と本質安全の位置づけ

製造現場で安全柵を設けず人間作業員と同一空間で協働作業を行うための国際安全規格は、**2025年2月発行**（同年**4月発効**）の改訂規格 **ISO 10218-1:2025**（ロボット本体要件）および **ISO 10218-2:2025**（ロボットシステム・統合要件）によって体系が一本化された[37]。この2025年改訂では、従来の技術仕様書 **ISO/TS 15066:2016** の内容（4つの協働運転モード、人体部位別の接触力・圧力許容値、過渡的接触・準静的接触の区分）が本規格へ統合されたほか、「協働ロボット単体ではなくハンド・ワーク・周辺環境を含めた『協働アプリケーション』としての評価」、「ロボットのクラス分類（Class I / Class II）」、「協働用途における質量低減（軽量設計）要求の追加」、およびネットワーク接続に対する「サイバーセキュリティ要件」が明確化された[39]。機械安全の原則（ISO 12100の3ステップメソッド）において、センサ監視による停止制御（機能安全）よりも上位に位置づけられるのが第1ステップの本質的安全設計（Inherently Safe Design）であり、ELEYの「50 kg軽量車輪台車＋全軸QDD」はこの軽量化と物理的衝撃緩和をハードウェア自体で体現している[9]。

4.2 運動エネルギー（**E = 1/2 mv^2**）と転倒位置エネルギーの定量リスク比較

安全柵レス環境における物理的リスクを定量比較するため、ELEY（50 kg）と二足歩行ヒューマノイド（70〜100 kg級）および従来型双腕機について、①自律移動時の並進運動エネルギー **E_k = 1/2 M v^2**、②双腕手先の過渡的衝突エネルギー **E_arm = 1/2 m_eff v_hand^2**、および③機体転倒時に放出される重力位置エネルギー **delta E_p = M g (h_com - h_floor)** を比較試算する（質量は各機の公開値、重心高さ h_com・床面残存高さ h_floor = 0.15 m・手先等価有効質量 m_eff は機構構成に基づく工学的試算値である）[14]。

機体カテゴリ（公開代表質量）	走行運動エネルギー（**v = 1.0 m/s**）	走行運動エネルギー（**v = 1.5 m/s**）	転倒時放出位置エネルギー（試算）	安全柵レス協働時の労働災害リスク評価
トヨタ ELEY（50 kg・車輪低重心）	25.0 J	56.3 J	147.1 J（原則非転倒の静的安定台車）	低エネルギーかつ無通電時も自立維持し重篤災害リスク極小
Figure 02級 二足歩行機（70 kg）	35.0 J	78.8 J（公称歩行1.33 m/s時 61.9 J）	549.2 J（推定重心高 0.95 mから転倒）	歩行スリップ・失陥転倒時に作業員下敷き・骨折リスク大
Atlas級 二足歩行機（89 kg）	44.5 J	100.1 J	785.5 J（推定重心高 1.05 mか	転倒位置エネルギーが約786

			ら転倒）	Jに達し無柵近接協働は高リスク
100 kg級 二足歩行ヒューマノイド	50.0 J	112.5 J	882.6 J（推定重心高 1.05 mから転倒）	45 kg鉄塊の2 m落下に相当する転倒エネルギーを常時内包

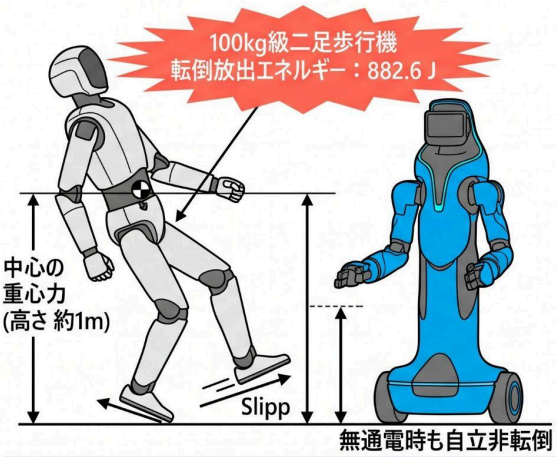
第一に、走行時の並進運動エネルギー E_k = 1/2 M v^2 において、ELEY（50 kg）は屋内移動速度 v = 1.0 m/s 時に **25.0 J**（v = 1.5 m/s 時に **56.25 J**[約**56.3 J**]）であり、100 kg級機体（50.0 J / 112.5 J）の正確に半分に抑えられる[17]。第二に、作業員の手指や体幹と近接する「腕部の過渡的接触エネルギー」を試算すると、高減速比（100:1）の従来型双腕産業機では大きな反射慣性により手先等価有効質量 m_eff が約15.0 kgに達し、手先速度 v_hand = 0.5 m/s で **1.875 J**（1.0 m/s 時で **7.500 J**）、一般的な高減速比協働アーム（m_eff ≈ 7.5 kg）でも 0.5 m/s で **0.938 J**（1.0 m/s 時で **3.750 J**）となる[17]。これに対し、根本集中配置と全軸QDDにより手先等価有効質量が m_eff ≈ 2.5 kg 程度に抑えられるELEYでは、同速度 0.5 m/s での衝撃エネルギーは **0.312 J**（1.0 m/s 時でも **1.250 J**）へと従来双腕機の **6**分の**1** に低減される[17]。
第三にして労働安全衛生上もっとも決定的な差異が、「二足歩行機の転倒時位置エネルギー災害リスク」の回避である[9]。70〜100 kgの二足歩行ロボットは重心高さ h_com が床面から約0.95〜1.05 mにあり、立っているだけで床面基準で **652〜1,030 J**（床面0.15 mまでの落下放出分で **549.2〜882.6 J**）もの重力位置エネルギーを常時保有している[17]。工場床面の油膜によるスリップ、電源喪失、演算異常、あるいは作業員との接触でバランス制御が破綻して転倒した場合、最大約883 J（質量20 kgの物体を高さ4.5 mから落下させるエネルギーに相当）が周囲の作業員を直撃し、狭小セル内では致命傷や重度圧挫傷を招く恐れがある[17]。ELEYは無通電の非常停止時にも原理的に自立姿勢を維持し、自発的なバランス喪失転倒を起こさず、万一外部車両の衝突等で横転する極限状況を仮定しても放出位置エネルギーは **147.1 J**（100 kg級二足歩行機の **6**分の**1**）にとどまる[9]。

4.3 接触瞬間の受動的・能動的コンプライアンス応答とハードウェア安全設計

ISO/TS 15066（および統合先のISO 10218-2:2025）が定める主要な身体部位の準静的接触許容力は、腹部 **110 N**、頭部・額 **130 N**、胸部 **140 N**、手・指 **140 N**、首 **150 N**、背中・肩 **210 N**、大腿部 **220 N** と厳格に制限されている[39]。トヨタが将来構想として描く計40万台規模のロボット更新・新設（特に専任の安全技術者が限られる仕入先サプライヤー現場の25万台）において安全柵レス協働を実現するには、この110〜140 Nという厳しい生体力学的閾値を確実に下回る接触安全性が必須となる[5]。

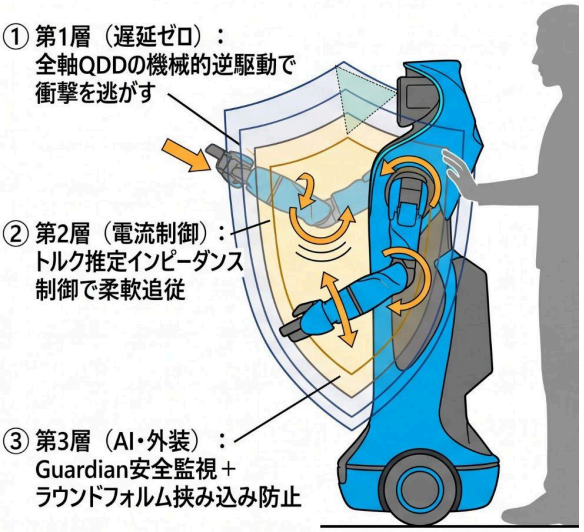
本質安全設計（Inherently Safe Design）によるエネルギー削減と多層防護

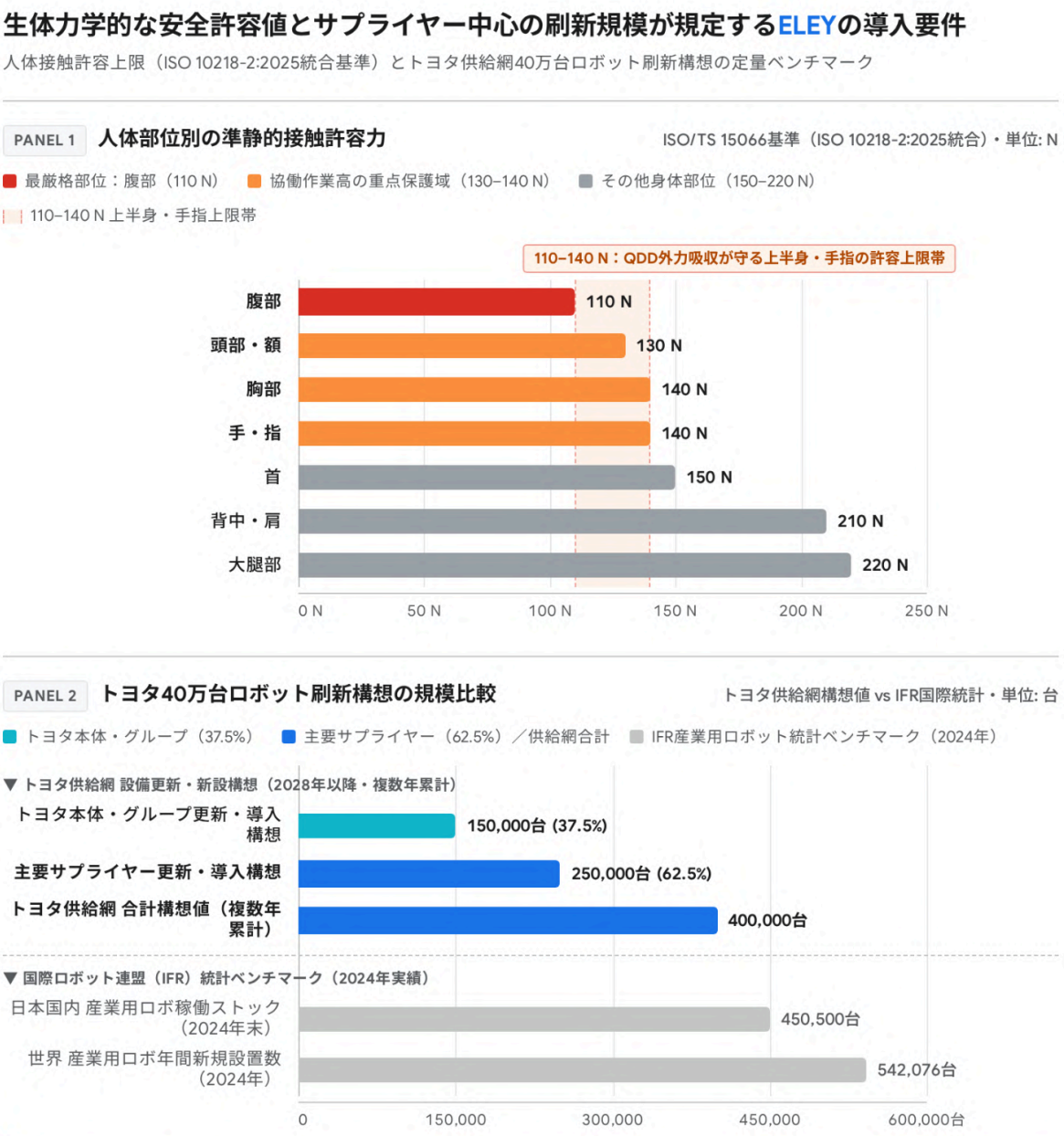
運動エネルギー・転倒位置エネルギーの定量比較



トヨタ ELEY（50kg・車輪型）：自立非転倒構造（横転試算 147.1 J）
1.0 m/s走行時エネルギー：ELEY 25.0 J vs 100kg機 50.0 J

接触瞬間の3階層コンプライアンス防護構造





従来の高減速比協働ロボットが採用する「トルクセンサで衝突を検知してからサーボ急停止させる」方式では、センサフィルタリング・安全コントローラ演算・ブレーキ作動までに数ミリ秒～十数ミリ秒の制御遅延が不可避であり、衝突直後の最初の数ミリ秒間に発生する「反射慣性由来の初期衝撃ピーク」をソフトウェアでは消去できなかった[9]。これに対しELEYは、応答時間スケールの

異なる**3**階層のコンプライアンス・安全防護構造によって外力を逃がす[9]。

1. 第**1**層：遅延ゼロ（**0 ms**）の受動的機械コンプライアンス（全軸**QDD**逆駆動）：作業員と不意に接触した瞬間、制御演算を一切待たず、低反射慣性・低摩擦のQDD関節が外力に押されて物理的に逆回転（バックドライブ）し、衝突エネルギーをロータ回転へ散逸させて初期衝撃ピークを緩和する[8]。
2. 第**2**層：高速電流制御による能動的インピーダンス応答：モータ電流変化とエンコーダ変位から接触外力を即座に検知し、設定された仮想粘弾性（コンプライアンス制御）に従って柔軟に退避・減速する[18]。
3. 第**3**層：**AI**安全制御「**Guardian**（ガーディアン）」による行動ガードレール：TRIのギル・プラット博士が提唱した「Guardian（守護神）」概念が制御基盤に組み込まれており、LBMが生成する自律動作に対しても、人間保護のガードレールとして安全監視制御が優先介入する設計思想が採られている[13]。

さらに、可動ケーブル配線・外装形状・非常停止系のハードウェア安全設計については、公開実機の特徴と量産設備化に向けた工学要件を以下の通り整理できる。第一に挟み込み防止形状（ラウンドフォルム・ピンチポイント排除）として、ELEYは作業員が親しみと安心感を持てる「柔らかさを重視した滑らかな丸み形状（ラウンドフォルム）」を採用しており、鋭利なエッジを排除して接触時の生体組織への圧力（N/cm^2）を分散させるとともに、関節屈曲部の隙間（ピンチポイント）を覆う外装構造を持つ[1]。第二に関節内部の可動ケーブル配線について、外部露出ハーネスは周辺治具への引っ掛かりや断線を招くため、ELEYの実機外観では全ケーブルがアーム外装および関節内部へ完全内蔵されている（トヨタグループ内のデンソーウェーブ『COBOTTA PRO』でも配管・配線の機内先端貫通構造と指巻き込み防止関節構造が量産確立されている[29]）。第三に非常停止系・停電時フェイルセーフ（量産化に向けた重要設計要件）として、2026年時点のELEYは研究機から工場設備への移行段階にあり、安全停止回路やブレーキ仕様の詳細は公式未公表である[5]。ただし高バックドライバビリティのQDD関節は、非常停止（Safe Torque Off）や停電でモータ励磁が完全に切れると自重で急速に垂れ下がる性質を持つため、量産仕様ではモータ巻線短絡による電磁発電制動（ダイナミックブレーキ）で腕を緩やかに減衰降下させる回路と、昇降軸・主要支持軸への無励磁作動型保持ブレーキ（COBOTTAのJ1～J5軸ブレーキ等と同等の機能安全PL d / Cat.3設計[45]）、およびISO 10218:2025が要求するOT/ITネットワーク分離等のサイバーセキュリティ対策の統合が必須となる[5]。

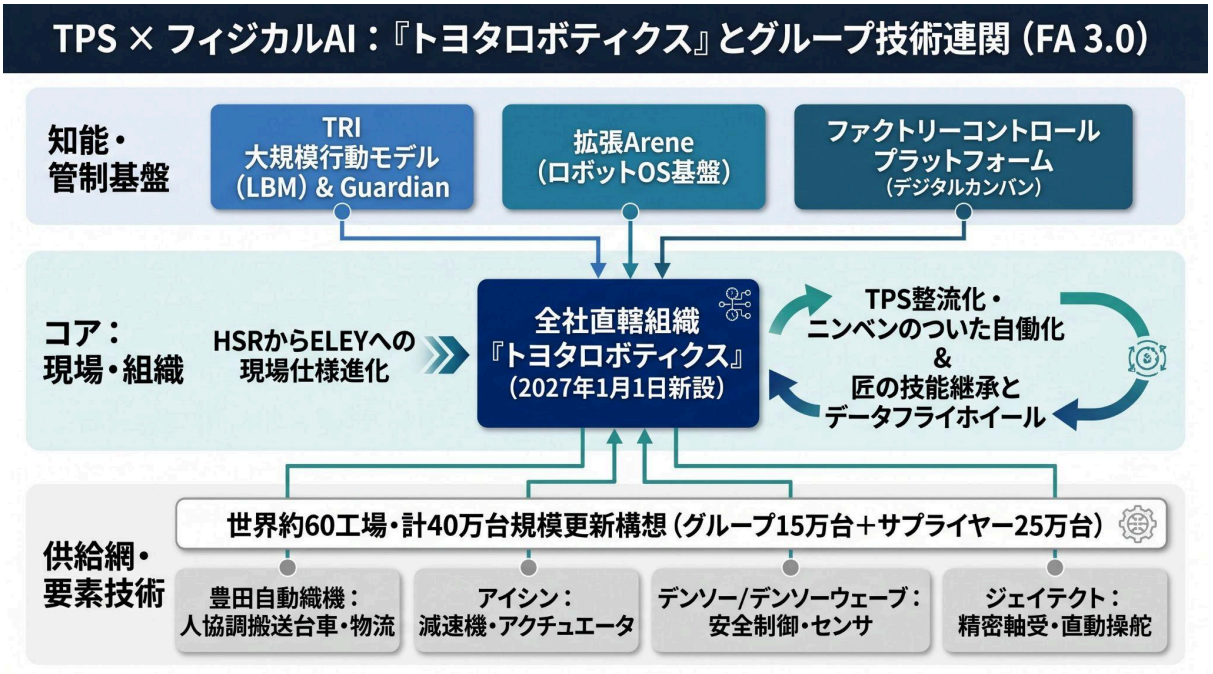
第5章 トヨタ生産方式（TPS）・グループ内サプライチェーンとの技術的連関

5.1 生活支援ロボット「HSR」から製造現場仕様「ELEY」への技術昇華プロセス

ELEYは、2012年にトヨタが発表した家庭内生活支援ロボット「HSR（Human Support Robot）」で13年以上にわたり蓄積された知見を、工場製造現場向けに発展させた直系後継プラットフォームである[1]。HSR（直径430 mm、全高1,005～1,350 mm、重量約37 kg、可搬最大1.2 kg）は世界40以上の研究機関とのコミュニティ共創を通じて自律移動マニピュレータとして鍛えられ、その自律移動認識技術はトヨタ記念病院の院内搬送ロボット『Potaro』へ、また認識・力覚挿入技術はトヨタ自動車東日本の工場ロボット『組プロ・ロボット』へと転用されてきた[1]。

このHSRの要素技術を製造現場仕様（剛性、可搬質量、耐久性、防塵性）へと昇華させるにあたり、ELEYでは4つの抜本的な機構刷新が行われている。第一に剛性と手先到達精度について、

HSRの折りたたみ単腕から日本人成人男性スケールの肩甲骨軸付き双腕へと拡張した上で、先行試作のワイヤー・樹脂ベルト伝動を排した直接駆動方式と堅牢な2本指高剛性グリッパーを採用し、「片手で箱を開けながらもう片方の手で部品を詰める」「反力を受けながら押し込む」といった接触組立タスクに必要な構造剛性を確保した[1]。第二に可搬質量について、HSRは単腕最大1.2 kgであったのに対し、ELEYの公式定格可搬質量は未公表（日刊自動車新聞報道では片腕1 kgと記載）であり、20 kg超の重量物搬送は既存の専用産業ロボットや二足歩行機Digit（可搬約16〜22.7 kg）等と役割分担しつつ、ELEYは雙腕協調による小物部品箱・柔軟物・組立作業領域を狙う設計となっている[5]。第三に耐久性について、HSRで故障原因となっていた接触時の過負荷を全軸QDDの高バックドライバビリティで物理的に逃がし、さらにベルト伸び・ワイヤー摩耗を根絶した上で、現在も長時間連続稼働の信頼性検証を進めている[1]。第四に防塵性・耐環境性について、ELEYの公式IP保護等級は現時点で未公表であるが、丸みを帯びた密閉性の高い一体外装カウルと車輪化による低発熱構成は工場内の粉塵・ミスト環境への適合に有利であり、量産設備化に向けてデンソーウェーブ『COBOTTA PRO』の防塵防滴仕様（IP54等[29]）に準ずる封止設計が詰められていく段階にあるとみられる[5]。



5.2 トヨタ生産方式（TPS）との思想的融合：「ニンベンのついた自働化」と40万台構想

2026年9月のTME投資家向け説明会における中嶋裕樹副社長兼CTOの発言は、ELEYのハードウェア設計とTPSの深い連関を明確に示している[3]。中嶋CTOは、海外工場で大型エンジンを運ぶ多数のAGVが無人で並ぶ光景を例に挙げ、「TPSの視点では物を運ぶこと自体に付加価値はなく、実際に付加価値のある加工工程で働いているAGVがわずか数機しかない実態がある」と指摘し、「まず生産工程を徹底的に整流化し、その上でニンベンのついた『自働化』を入れ、導入後もカイゼンを繰り返して工程をよりコンパクトにしていく」ことがトヨタの大前提であると強調した[3]。一度据え付けるとレイアウト変更が困難な大型固定ロボットや安全柵は、TPSの屋台改善や多品種混流の妨げとなり得る。478 × 450 mm・50 kgの車輪型で既存屋台に無改修で入り、随時配

置換えできるELEYは、まさにリーンな整流化工程に寄り添う可変自働化ユニットである[3]。さらに、現場の熟練工（「匠」）の技能や微妙な力加減を実演データ収集装置（米国特許出願US20260077488A1 / US20260054390A1 やUMI等の携帯インターフェース[16]）を通じてTRIの拡散モデル型LBMへ学習させ、Tシャツ折りたたみの実演で示されたような不定形・柔軟物の扱いまで自律化し、車載OSから拡張された「拡張Arene（アリーン）」と「ファクトリーコントロールプラットフォーム（デジタルカンバン）」でトヨタ・グループ（約15万台）および主要サプライヤー（約25万台）の生産体制をエンドツーエンド（E2E）でつなぐ構想が「Factory Automation 3.0」である[3]。国際ロボット連盟（IFR）の統計による日本国内の産業用ロボット稼働ストック（2024年末約45万500台）や世界の年間新規設置台数（2024年54万2,076台）と比較しても、数年～十数年をかけた計40万台規模の更新・新設構想は世界市場を揺るがすスケールであり、とりわけエンジニア資源の限られるサプライヤー側25万台への展開において、無改修・安全柵レス・模倣学習型のELEYの設計思想が真価を発揮する[5]。

5.3 「トヨタロボティクス」新設とグループ内サプライチェーンの役割分担・技術連関

トヨタ自動車は2026年11月5日、ロボティクスを将来の事業の柱とするため、2027年1月1日付で未来創生センターの機能を先進技術開発カンパニーおよびデジタルソフト開発センターへ統合再編するとともに、全社直轄組織「トヨタロボティクス」を新設する組織改正を発表した[4]。組織長には執行役員兼Chief Production Officer（CPO）でありモノづくり技術本部長を務める志賀武文氏が就き、まず自社・グループ・仕入先の製造現場（インナーFA）で徹底的にロボットを鍛え上げ、2030年以降の他産業・生活領域への外販事業化を目指す体制が敷かれた[4]。

ELEYの量産時における個別部品の発注先配分は2026年11月時点で公式未公表であるが、グループ各社の公開技術実績とELEYのハードウェア構成要素を照合すると、トヨタグループ内には以下の強力な役割分担・技術連関基盤が存在している[10]。

組織・グループ企業名	主要担当・保有コア技術領域	**ELEY・FA3.0**との技術的連関	代表的な公開実績・特許・製品	公開事実と推論の区分
トヨタ自動車（トヨタロボティクス・旧未来創生C）	機体全体設計・QDDモータ研究・TPS現場実装統合	ELEY開発主体および世界60工場刷新の統括推進	ELEY実機公開、肩甲骨特許第5672219号、ハルバッハモータ論文	トヨタ公式発表に基づく確定事実
Toyota Research Institute（TRI）	大規模行動モデル（LBM）・全身学習・安全制御	ELEYの頭脳となるDiffusion型LBMとGuardian安全制御供給	Tシャツ折り畳みLBM実証、Science Robotics論文、訓練装置特許出願	トヨタ・TRI公式発表に基づく確定事実

ウーブン・バイ・トヨタ（Woven by Toyota）	ロボティクス拡張OS「拡張Arene」・実証都市基盤	複数ロボットのソフト更新管理・Woven City実装連携	拡張Arene構想発表、Woven Cityロボットプラットフォーム	トヨタ公式説明会発言に基づく確定事実
豊田自動織機（Toyota Industries）	人協調自律搬送台車・重心制御・産業車両・電池	狭小通路での省スペース自律移動台車・自動充電系の技術親和性	2輪型搬送用人協調ロボ量産導入（底面積1,320 cm^2）、AiRシリーズ	各社公開実績に基づくグループ技術連関（ELEY個別採用は未公表）
アイシン・デンソー（デンソーウェーブ）・ジェイテクト	ロボット用減速機・アクチュエータ・安全制御・精密軸受	QDD低減速比減速機、PL d安全コントローラ、昇降直動・軸受基盤	アイシンKyoHA参画（ロボ減速機開発）、COBOTTA PRO、EPS・精密軸受	各社公開実績に基づく量産供給ポテンシャル推論

具体的には、豊田自動織機は2025年9月に安城工場のACインバーター量産ラインへ「底面積1,320 cm^2・厚み24 cm・高さ100 cmの2輪型搬送用人協調ロボット（慶應義塾大学・村上俊之教授と共同開発した重心推定姿勢安定制御および軽接触検知・減速停止機能を搭載）」を国内初導入したほか、トヨタL&Fカンパニーの自律走行ロボット『AiRシリーズ』等を展開しており、工場内移動台車とバッテリー・充電インフラ技術で高い親和性を持つ[25]。アイシンは車載駆動系（eAxle等）で培ったモータ・ギア技術をもとに、純国産ヒューマノイド連合「KyoHA（京都ヒューマノイドアソシエーション）」へ参画し、公式に「ロボットに適した減速機・アクチュエータの研究開発」を推進しており、QDDアクチュエータ・低減速比減速機の量産供給における有力な中核候補となる[51]。さらにデンソーおよびデンソーウェーブは車載ミリ波・視覚センサや半導体制御に加え、高速人協働ロボット『COBOTTA PRO』で自社開発した高出力小型モータ・トルクセンサ・産業安全規格対応コントローラ（CRC9）の実績を持ち[29]、ジェイテクトは電動パワーステアリング（EPS）由来の低トルクリップル制御や、垂直伸縮機構・関節支持に不可欠な精密軸受・ボールねじ技術を保有している[50]。これらグループ各社の車載品質（トヨタスタンダード）量産基盤を結集できる点こそ、単体ロボットスタートアップに対するトヨタ最大の構造的優位性である[3]。

参照一次情報・公式リリース・専門報道一覧

- トヨタ自動車 未来創生センター 公式技術記事（山田俊秀氏インタビュー）「やさしく触れることで未来を変える」（2026年3月31日公開）：https://global.toyota/jp/mobility/frontier-research/44105139.html[1]
- Toyota Motor Corporation Frontier Research（英語版公式記事）"Changing the Future with a Gentle Touch"（2026年3月31日公開）：https://global.toyota/en/mobility/frontier-research/44105171.html[27]

- トヨタ自動車 公式ニュースルーム「未来創生センター、World Robot Summit 2025 AICHI 出展について」（2025年12月5日公開、ELEY公式諸元 L 478 × W 450 × H 939〜1,619 mm 、重量50 kg記載）：https://global.toyota/jp/mobility/frontier-research/43588096.html （英語版：https://global.toyota/en/mobility/frontier-research/43588128.html ）[2]
- トヨタ自動車 未来創生センター 公式記事「ロボットと一緒に家事をする生活を目指した、『人にやさしいロボットアーム』の研究〜若手研究者とリーダーの研究にかける想い〜」（2023年1月12日公開）：https://global.toyota/jp/mobility/frontier-research/38445721.html[1]
- トヨタ自動車 公式ニュースルーム「組織改正、および役員・幹部職人事について」（2026年11月5日公開、2027年1月1日付「トヨタロボティクス」新設発表）：https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/44969952.html[4]
- トヨタイムズ（Toyota Times）「2027年3月期 第2四半期決算説明会（ロボティクス事業・FA投資・拡張Arene関連）」：https://toyotatimes.jp/toyota_news/financial_results_2027/003_2.html[48]
- トヨタ自動車 公式リリース「生活支援ロボットの実用化に向けて研究機関等と技術開発を推進するコミュニティを発足（HSR仕様公表）」（2015年7月）：https://global.toyota/en/detail/8709541 （および英国トヨタ公式リリース：https://media.toyota.co.uk/toyota-accelerates-home-helper-robot-programme-with-new-developer-community-and-working-prototype/ ）[15]
- トヨタ自動車 採用技術者インタビュー（未来創生センター ロボティクス研究ユニット モータードライバー・アクチュエータ開発）：https://recruit.toyota/interview/098/[30]
- 豊田自動織機 公式ニュースリリース「豊田自動織機、自立して動く2輪型搬送用人協調ロボットを開発 〜小型化により省スペースで人と作業、量産工程に導入〜」（2025年9月8日公開）：https://www.toyota-shokki.co.jp/news/2025/09/08/008861/index.html[25]
- 電気学会研究会論文（山田俊秀・奥松美宏［トヨタ自動車］ほか）「多極と狭ギャップを実現するハルバッハ配向アウターロータモータの磁石貼付方法の検討」（RM-24-075 / LD-24-054 / HCA-24-025）：https://ieej.bookpark.ne.jp/products/ieej-20240730x10301-007[32]
- 電気学会研究会論文（松川航大・大口英樹［東海大学］・奥松美宏・山田俊秀［トヨタ自動車］ほか）「ロボット用モータにおけるコギングトルク低減に向けた磁石形状の最適化に関する研究」：https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=202402257337306245[33]
- Car Watch（インプレス）「トヨタ、毎年1兆円を投資し工場とロボットを更新 40万台をフィジカルAIであるLarge Behavior Models搭載ロボなどに」（2026年9月18日公開）：https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/2142008.html[3]
- Car Watch（インプレス）「トヨタは人型ロボットを40万台導入するのか？ トヨタのフィジカルAIロボット『ELEY（エリー）』とLBM解説」（2026年9月19日公開）：https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/2142443.html[13]
- Car Watch（インプレス）「トヨタ製フィジカルAIロボットの強みは、トヨタ生産方式、AIモデル『LBM』、ロボットにも拡張した『拡張Arene（アリーン）』と中嶋裕樹副社長」（2026年9月22日公開）：https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/2142611.html[3]
- Car Watch（インプレス）「トヨタ、フィジカルAIロボット導入に向けた新組織『トヨタ ロボティクス』を立ち上げ 志賀武文CPOがリーダー」（2026年9月22日公開）：https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/2142609.html[3]

- Response.jp「トヨタ自動車が組織改正、『トヨタロボティクス』を新設---実用化を加速し事業の柱に」（2026年11月5日公開）：
  https://s.response.jp/article/2026/11/05/418642.html[47]
- MLQ.ai "Toyota's ¥1 Trillion Factory Automation Estimate Is Broader Than a Humanoid Robot Bet"：
  https://mlq.ai/news/toyotas-1-trillion-factory-automation-estimate-is-broader-than-a-humanoid-robot-bet/[11]
- アイデアの余白「トヨタのロボットELEYと特許出願（特許第5672219号、US20260077488A1、US20260054390A1の分析）」（2026年10月20日更新）：
  https://ideayohaku.jp/column_toyota_eley_patent.html[26]
- Physical AI News「トヨタELEYとLBMから見る工場実装の論点」：
  https://physicalainews.jp/columns/toyota-eley-lbm-factory[12]
- 香川友志 技術調査レポート「トヨタ『ELEY』と40万ロボット構想の全貌——年1兆円規模の工場刷新構想から見える『TPS×Physical AI』」（2026年9月19日公開）：
  https://note.com/kagawatomo/n/n22f7a1bb32b3[5]
- KyoHA（京都ヒューマノイドアソシエーション）公式発表「新たに株式会社アイシンが参画（ロボットに適した減速機・アクチュエータの研究開発を推進）」：
  https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000005.000173503.html[51]
- デンソーウェーブ 公式製品ページ「高速人協働ロボット COBOTTA PRO / 人協働ロボット COBOTTA（安全規格適合仕様）」：
  https://www.denso-wave.com/ja/robot/ex/cobottapro_collaborative_lineup.html および https://www.denso-wave.com/ja/robot/product/collabo/cobotta.html[45]
- 産業技術総合研究所（AIST）「日本人の人体寸法データベース」：
  https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/91-92/data/list.html[22]
- 日本機械工業連合会「協働ロボット安全ガイドブック（ISO 10218 / ISO/TS 15066解説）」：
  https://www.jmfrri.gr.jp/wp-content/uploads/2024/12/wg2_anzen.pdf[60]

資料2 プロローグ2：TRIの大規模行動モデル「LBM」による模倣学習と日米欧中のフィジカルAI実装思想の比較解剖

トヨタ・リサーチ・インスティテュート（TRI）が確立した大規模行動モデル（LBM：Large Behavior Models）と、トヨタ自動車の未来創生センターが開発し2027年1月発足の全社直轄組織「トヨタロボティクス」が社会実装を担う身体学習ロボット「ELEY（エリー）」の統合は、産業用ロボットを「座標の固定再生機」から「熟練技能（匠の技）を学習・共有する汎用フィジカルAI」へと転換する重大な技術的転機である[1]。生成AIの拡散モデルを行動空間へ応用したDiffusion Policyを基盤とするLBMは、従来の教示再生方式では自動化が困難であった柔軟物や位置ズレを伴う接触リッチ（Contact-rich）な作業を、人間の実演データからの模倣学習によって獲得する道を開いた[2]。ただし、TRIの査読付き実証研究（実機1,800回・シミュレーション4万7,000回超の評価）が示す通り、事前学習済みLBMを追加調整なしで未知タスクへ適用するゼロショット性能は依然として一貫しておらず、現時点における真の産業的価値は「従来比3分の1から5分の1の少数データ（行

動あたり数百回規模の実演、あるいは現場での1時間程度のデータ収集・処理サイクル）で未知の複雑作業へ高速適応するFew-shotファインチューニング能力」にある点は冷静に押さえておく必要がある[1]。

LBM 1.0: How Large Behavior Models Improve Robot Manipulation



さらにグローバルな自動車製造戦略を俯瞰すると、フィジカルAIの工場実装思想は単一の正解へ収斂しておらず、日米欧中の4極で鮮明な工学的・経営的コントラストを描いている[2]。トヨタが「車輪型・重量50kg・全軸QDD（準ダイレクトドライブ）」による本質安全と既存狭小ライン無改修の「人協働（ニンベンの付いた自働化）」を追求するのに対し、米国（BMW×Figure AI）は二足歩行と5本指ハンドによる「高負荷工程のドロップイン置換」、欧州（メルセデス・ベンツ×Apptronik、BMWドイツ本国）はOpenUSDデジタルツインと工場OS主導の「既存工場（ブラウンフィールド）物流自律化」、中国（極氪×UBTECH、ならびに颯智智能[iSAGE]等の多腕ロボット陣営）はプライベート5Gと群知能（Swarm Intelligence）・多腕機構による「総装・柔軟物工程の並列自動化」へと舵を切っている[6]。本報告書（全14巻シリーズ第2巻）では、公開一次資料と学術論文に基づき公開事実と工学的推論を厳密に区別しながら、LBMのアルゴリズム構造と模倣学習パイプライン、ELEYハードウェアとの共進化メカニズム、4極の実装思想のトレードオフ、および治具レス・教示レス化が生技・FA・部材サプライチェーンに迫る構造転換を徹底解剖する。

エグゼクティブ・サマリー

本巻における技術・戦略解剖の核心的結論は以下の5点に集約される。

第一に、行動生成アルゴリズムの抜本的転換である。従来の教示再生（ティーチング・プレイバック）や明示的な行動クローニング（Behavior Cloning：BC）は、同一の視覚観測に対して複数の正解軌道が存在する「マルチモーダル行動分布」において軌道の平均化破綻を起こし、速度制御の累積誤差にも脆弱であった[5]。TRIのRuss Tedrake氏らがコロンビア大学・MITと共同確立した「Diffusion Policy」およびそれを大規模マルチタスク化した「LBM」は、行動生成を条件付きデノイジング拡散過程として定式化し、16タイムステップ（実時間1.6秒分、軌道離散化周期10Hz）の連続関節軌道（Action Chunking）をReceding Horizon制御（移動ホライズン制御）で逐次再計画することで、滑らかな多関節協調と外乱への閉ループ応答性を両立させた[3]。

第二に、ハードウェアとAIモデルの不可分な「共進化」である。模倣学習において人間の「匠の技」をデータ化し現場で安定再生するには、ソフトウェアの高度化だけでは成立しない。ELEYは

日本人成人男性の平均寸法に合わせたリンク設計と「肩甲骨軸」の追加により人間とロボットの運動学的変換ギャップを極小化し、さらに全関節に減速比10対1以下の「全軸QDD」とワイヤー・樹脂ベルトを排した直接駆動構造を採用した[1]。これにより、10Hz前後のAI推論ループでは吸収しきれないミリ秒単位の接触衝撃を機械的バックドライバビリティで柔軟に受け流しつつ、産業用途で求められる手先到達再現性を確保する身体性を成立させている[1]。なお2026年秋時点でELEYの正式な可搬重量、連続稼働時間、バッテリー容量、量産価格は未公表であり、長時間稼働時の信頼性と再現性のさらなる引き上げが実生産投入への検証課題として位置づけられている[1]。

第三に、トヨタ生産方式（TPS）の「自働化」と「年間1兆円・40万台更新構想」の正確な実像である。2026年9月に中嶋裕樹副社長兼CTOが欧州投資家向けイベントで提示した「2028年以降に世界約60工場・ロボット約40万台（トヨタおよびグループ約15万台、サプライヤー約25万台）を年間約1兆円規模で更新する構想」は、ELEY単体を40万台量産する確定計画ではなく、既存の溶接ロボットやAGV等の非ヒューマノイドを含む生産設備全体の更新・新設とエンドツーエンド（E2E）データ連携（「ファクトリーオートメーション3.0」）の将来試算である[2]。さらに2026年11月5日発表（2027年1月1日付）の組織改正で、執行役員兼最高生産責任者（CPO）・モノづくり技術本部長の志賀武文氏を組織長とする全社直轄組織「トヨタロボティクス」を新設し、未来創生センターの機能を先進技術開発カンパニーとデジタルソフト開発センターへ統合したことは、フィジカルAIが「研究所の探索フェーズ」から「生産技術主導の量産ライン実装・外販事業化フェーズ」へ移行したことを明確に示している[4]。

第四に、日米欧中4極の設計思想の分岐は、各地域の工場建築資産、労働市場、通信・部品インフラの制約条件に対する合理的最適化の帰結である。米国勢が欧米パイロット単価9万～10万米ドル（商用RaaS価格で約25米ドル/時と報じられる水準）の高コストな二足歩行機をあえて車体板金・順立て工程へ投入するのは、深刻な製造労働力不足の中で「人間用アクセス空間を一切改修せずにドロップイン置換する」投資回収（業界試算で18～24カ月）が成立するためである[6]。対して欧州は既存工場（ブラウンフィールド）の物流統合を仮想工場OS（MO360やNVIDIA Omniverse）で統括し、中国は約3万5,000米ドル水準と試算される低BOMコストと遅延1ミリ秒未満のプライベート5Gを武器に、二足歩行群と4腕52自由度ロボットによる総装・柔軟物自動化を推進している[6]。

第五に、生産技術（生技）およびサプライチェーンの構造転換である。専用治具・専用自動機による「ハードウェア固定資産」から汎用フィジカルAIの「ソフトウェアスキル資産」への移行は、車種切り替えリードタイムを大幅に短縮する一方、機体の高速世代交代（例：Figure 02の11カ月稼働後の退役）に伴う減価償却・保守部品互換性リスクを顕在化させる[22]。同時に、2025年2月発行の改訂国際安全規格ISO 10218:2025および策定中の動的安定ロボット規格ISO/WD 25785-1への対応、高減速比精密減速機から低減速比QDD・可動ケーブルレス手首構造への需要シフト、そして物理属性を内包する「SimReady（OpenUSD）」3Dアセット納品対応が、FA・部材メーカーの新たな競争軸として浮上している[22]。

第1章 従来のプレイバック（教示再生）方式の限界と「LBM（大規模行動モデル）」のアルゴリズム構造

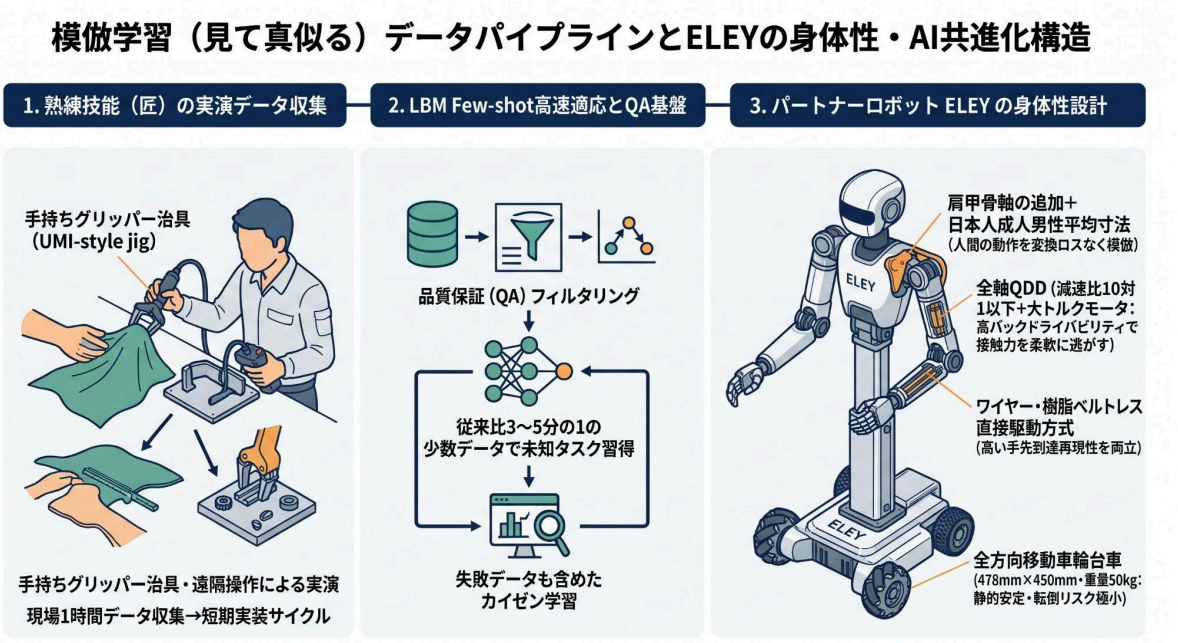
1.1 多品種混流ラインと柔軟物・接触タスクにおける教示再生方式の限界

過去40年以上にわたり自動車工場の車体溶接・塗装・重量物搬送を支えてきた産業用ロボットの基本制御原理は、空間内の目標座標点（ティーチングポイント）と補間軌道を人間がティーチン

グペンダントやオフラインソフトで明示的に記述し、高剛性サーボ系で反復実行する「プレイバック（教示再生）方式」であった[1]。スポット溶接のように、車体パネルが専用クランプ治具によって高精度に剛体固定され、ロボットが既知の固定座標に対して規定動作を繰り返す工程では、この方式は圧倒的なサイクルタイムと位置再現性を発揮してきた[2]。

しかし、自動化率が依然として低い車両組立（艤装・総装）工程や多品種混流ライン、ならびにティア1サプライヤーでの部品サブアセンブリ工程において、従来の座標指定・ルールベース記述は3つの構造的な壁に直面してきた。第一の壁は「専用治具コストと段取り替え工数の肥大化」である。教示再生ロボットはワークが毎回同一の位置・姿勢で供給されることを前提とするため、部品のラフ置きや数ミリのセット誤差を自律吸収できない[1]。結果として、ロボット本体と同等以上の設備投資（CAPEX）を要する高精度位置決め治具や専用パーツフィーダを車種・部品番号ごとに製作する必要があり、多品種混流生産における投資回収を圧迫してきた[7]。

第二の壁は「柔軟物・不定形ワークの物理モデル化困難性」である。ワイヤーハーネス、ゴムウェザーストリップ、樹脂内装トリム、布製品（シート表皮やTシャツ等）といった柔軟物は、把持・移動に伴って重力や接触力で複雑に変形する[2]。古典的な運動学モデルとif-thenルールでこれら無限に近い変形状態と例外処理（絡まり、しわ、滑り）を網羅記述することは事実上困難であった[1]。第三の壁は「接触リッチ作業における剛体制御の破綻」である。コネクタ嵌合や狭小隙間への部品挿入など周囲環境との継続接触を伴う作業では、視覚認識のわずかな誤差が高剛性・高減速比アームに過大な反力を発生させ、ワーク破損や過負荷アラーム停止・減速機故障を引き起こす[1]。力覚フィードバック制御で誤差を吸収する取り組み（トヨタ自動車東日本の「組プロ・ロボット」等）も実用化されてきたが、対象部品ごとにコンプライアンス制御パラメータや探索軌道を個別設計する生技工数が全社展開上のボトルネックとなっていた[2]。



1.2「Diffusion Policy」から「LBM」へ至る技術進化のメカニズム

ルールベース記述の限界を超えるアプローチとして、人間の実演データ（観測Otと行動atの対）からニューラルネットワークで直接ポリシー（方策）を学習する「行動クローニング（Behavior Cloning：BC）」が長年研究されてきた。しかし、従来のBC手法は実機ロボットの複雑な操作において深刻な限界を抱えていた[5]。

最大の障害は「行動分布のマルチモーダル性（多峰性）」である[5]。例えば机上のT字型ブロックを目標領域へ押し込むタスク（Push-T）において、熟練作業員は同一の初期状態からでも「左側から回り込んで押す軌道」と「右側から回り込んで押す軌道」の双方を実演データに残す[5]。平均二乗誤差（MSE）を最小化する標準的な明示的ポリシーは、左回り軌道と右回り軌道の「算術平均」を出力してしまい、ブロックの中心へ不適切に突っ込む軌道破綻を引き起こす[12]。混合ガウスモデル（LSTM-GMM）や行動離散化（BET）を導入しても特定モードへの強い偏りや試行途中のコミットメント欠如が生じ、エネルギーベースモデルを用いる暗黙的行動クローニング（IBC）は分配関数Z(a, theta)の推定に伴う学習不安定性から、実機Push-T検証（20試行）において成功率0%（最良のLSTM-GMMでも20%）に留まっていた[5]。

この壁を突破したのが、2023年にTRIのRuss Tedrake氏らのチームとコロンビア大学（Shuran Song教授、筆頭著者Cheng Chi氏ら）・MITが共同発表した「Diffusion Policy（Visuomotor Policy Learning via Action Diffusion）」である[5]。Diffusion Policyは、画像生成AIで確立されたデノイジング拡散確率モデル（DDPM）を、ピクセル生成ではなく「ロボットの行動空間（複数タイムステップにわたる関節目標角や手先TCP姿勢の時系列軌道）」の生成へと転用した[5]。

Diffusion Policyがもたらしたアルゴリズム上の革新は4つのメカニズムに集約される。第一に、確率密度関数や分配関数を直接推定する代わりに、行動分布の対数尤度勾配であるスコア関数s(at, Ot, k) = -epsilon(at, Ot, k) / sigma(k)（ノイズ除去ステップkにおいて注入されたガウスノイズepsilonに比例）をネットワークに学習させる点である[5]。推論時には純粋なガウスノイズ系列at(K)を初期値とし、観測Otを条件として確率的ランジュバン動力学（逆拡散過程）に沿って反復的にノイズを除去する[5]。これにより、複数の正解モードを平均化して潰すことなく双方の分布を正確に学習し、かつ1回のロールアウト内では単一の整合的な軌道へ安定してコミットできることが報告されている[5]。この結果、4種類のベンチマーク計15タスクで既存SOTA手法に対し平均46.9%の相対成功率向上を達成し、実機Push-T実験（136実演）では95%の成功率（ただし比較手法とは位置制御・速度制御の選択を含む制御系全体の構成差を含む）を記録した[5]。

第二に、観測情報Ot（複数カメラ画像や関節状態）を拡散生成の対象から切り離し、「条件付け（Conditioning）特徴量」として1サイクルにつき1回だけエンコードする設計を採用した点である[5]。これにより将来フレームの映像自体をデノイジングする膨大な計算負荷を回避し、実機閉ループ制御に適用可能な推論速度と行動精度を確保した[5]。第三に、時系列の高次元行動空間を一括生成できる強みを活かし、単一ステップの速度制御（誤差が時間積分されてドリフトしやすい）ではなく、遅延や外乱に対してロバストな「位置制御（関節角度・手先姿勢指令）」の潜在性能を引き出した点である[5]。

第四に、この単一タスク向けDiffusion Policyを基盤モデルへと拡張した「LBM（Large Behavior Models）」への進化である。大規模言語モデル（LLM）が膨大なテキストから次の単語を予測するように、TRIのギル・プラットCEOおよびLBM研究チームは、Diffusion Policy系のアーキテクチャを約1,700時間に及ぶ多様なロボット操作データで事前学習させ、「物理空間における行動・振る舞い（Behavior）の汎用生成モデル」へとスケールさせた[2]。固定座標を記憶するのではなく、多様な物体の把持・押し込み・受け渡しといった「振る舞いの構造」を大規模事前学習によって内部表現として獲得する点が、従来の個別タスク模倣学習との決定的な違いである[3]。

比較項目	従来型教示再生（**Playback**）	明示的・暗黙的 **BC**（従来模倣学習）	**Diffusion Policy**（**2023**）	**TRI** 大規模行動モデル **LBM**（**2025-2026**）

動作記述・学習原理	人間による座標指定とルール記述	単一行動の直接回帰またはエネルギー最小化	条件付き拡散過程による行動ノイズ除去	大規模事前学習済みマルチタスク拡散モデル
マルチモーダル軌道対応	不可（単一固定軌道のみ再生）	平均化による軌道破綻または学習不安定	スコア勾配学習により複数正解軌道を保持	多様なタスク横断で複数の操作戦略を統合保持
ネットワーク骨格	古典的PID・軌道補間器	MLP / LSTM-GMM / IBC	1D時間畳み込みU-Netまたは時系列Transformer	ViT視覚言語エンコーダ＋AdaLN条件付けDiffusion Transformer
出力形式と制御ホライズン	事前教示軌道のオープンループ再生	1ステップごとの速度・位置指令出力	8〜16ステップの行動チャンク予測と移動ホライズン再計画	16ステップ（1.6秒分）の行動チャンク出力と閉ループ再計画
新規タスク展開コスト	車種・部品ごとに膨大な教示工数と専用治具が必要	タスクごとにゼロからのデータ収集と個別学習が必要	タスク単位で100回前後の実演データ収集と個別学習が必要	約1,700時間事前学習により従来比3〜5分の1のデータで高速適応

1.3 LBMのマルチモーダル入力・ネットワーク構造・推論周期の解剖

TRIが公表した査読付き研究論文『A Careful Examination of Large Behavior Models for Multitask Dexterous Manipulation』（LBM1）および基盤となるDiffusion Policyの実装仕様から、LBMのニューラルネットワーク構造と推論ループを詳細に解剖する[3]。

まず入力層（マルチモーダル観測）について、TRIのLBM1アーキテクチャは3種類のモダリティを標準入力として統合する[3]。第1は「複数視点RGBカメラ画像」であり、双腕ステーションあたり最大6台（左右の各手首に最大2台ずつ装着された計4台のリストカメラによる手元遮蔽回避視点と、作業台全体を捉える2台の固定シーンカメラ）の視覚ストリームを取り込む[3]。第2は「ロボット固有受容感覚（Proprioception）」であり、双腕の全関節角度やグリッパー開度などの内部状態ベクトルを入力する[3]。第3は「自然言語プロンプト埋め込み」であり、実行対象タスクを言語トークンで条件付けることで、単一ネットワーク重みによるマルチタスク実行を可能にする[3]。

ここで公開事実と周辺研究の関係を正確に整理しておく必要がある。TRIが公開したLBM1論文の標準ベンチマーク構成（Franka Panda FR3双腕環境）自体には、独立した力覚・触覚センサ入力は明記されていない[3]。一方で、TRIおよび学術共同研究陣は、空気圧ソフト触覚センサ「Punyo」をはじめ、視覚触覚センサGelSight Miniを手持ちグリッパーに統合した模倣学習や、手首6軸力覚・トルク（F/T）データを1層全結合エンコーダ（64〜128次元潜在表現）で条件付け入力へ統合する接触対応型Diffusion Policyの研究を並行して発表している[31]。したがって、視覚・言語・固有受容感覚を中核とするLBM基盤の上に、用途に応じて力覚・触覚モダリティや関節コンプライアンスを拡張統合する技術路線にあると理解するのが妥当である[3]。

次にバックボーン構造について、初期のDiffusion PolicyではFiLM（Feature-wise Linear Modulation）を用いた1次元時間畳み込みU-Netと、因果アテンションマスク付きクロスアテンションを用いる時系列Diffusion Transformerの2系統が提案されていた[5]。これを大規模マルチタスク化したTRIのLBM1では、スケーリング特性に優れる「Diffusion Transformer（DiT）」構造が採用されている[3]。具体的には、最大6視点のカメラ画像と言語指示をマルチモーダルVision Transformer（ViT）視覚・言語エンコーダで統合的な観測表現へ変換し、ノイズを含む行動チャンク系列を処理するTransformerデノイジングヘッドの各層に対して、Adaptive Layer Normalization（AdaLN：適応的層正規化）を介して観測特徴量と拡散ステップ情報を注入する構造をとる[3]。

出力層と推論周期の設計においては、「Action Chunking（行動チャンク一括出力）」と「Receding Horizon制御（移動ホライズン制御）」の組み合わせが鍵を握る[3]。LBM1のデノイジングヘッドは、1回の推論で将来16タイムステップ分（実時間1.6秒間に相当、すなわち軌道離散化刻み0.1秒＝10Hz）の連続的な双腕関節行動チャンクを直接出力する[3]。なおLBM1公開資料ではミリ秒単位の実機推論レイテンシ値は明記されていないが[3]、基盤であるDiffusion Policyの検証では、学習時に100イテレーションで行うDDPMノイズ除去を、推論時に決定論的なDDIM（Denoising Diffusion Implicit Models）サンプラーへ切り替えることで、再学習なしにデノイジング反復回数を10〜16ステップへ短縮し、RTX 3080クラスのGPU上で1チャンクあたり約0.1秒（100ミリ秒）の推論レイテンシを実現している[12]。

実機制御ループでは、予測したTpステップ（例えば16ステップ＝1.6秒分）の行動軌道をすべてオープンループで実行し切るのではなく、先頭のTaステップ（例えば8ステップ＝0.8秒分）のみを下位の関節サーボコントローラへ順次送出して実行し、その間に最新のカメラ画像と関節状態を再観測して次の16ステップチャンクを再生成するReceding Horizon制御を回す[11]。予測ホライズンと実行ホライズンを分離するこの制御構造により、チャンク内部での滑らかな多関節協調（時間的一貫性）を維持しつつ、作業途中にワークが動いたりカメラが3秒間遮蔽されたりしても即座に軌道を修正する閉ループ反応性を確保できる[11]。またシミュレーション上の遅延耐性試験では、位置制御型Diffusion Policyは最大4タイムステップ（10Hz制御で0.4秒）の観測・実行遅延が生じてもピーク成功率を維持することが報告されている（ただし50Hz超の超高速閉ループ応答を要する動的タスクでは0.1秒の推論遅延が制約となり得るため、単一順伝播で生成するConsistency Policy等の高速化手法も研究されている）[11]。

第2章「見て真似る」模倣学習（Imitation Learning）のデータ収集パイプラインと技能伝承

2.1 熟練作業員（匠）の実演から短時間でスキルを獲得するデータ収集パイプライン

LBMが自動車製造現場にもたらす本質的な変革は、ロボットへの作業実装プロセスを「専門ロボットエンジニアによる座標ティーチング」から、現場の熟練技能員（匠）による「実演（デモンストレーション）データの提示」へと転換する点にある[2]。TRIのLBM1事前学習データセットの構成、トヨタの実機デモンストレーション、および公開特許群を突き合わせると、基礎事前学習から現場タスク適応へ至る二段階のデータパイプラインが明確に浮かび上がる[2]。

第1段階の「基盤モデル事前学習」において、TRIは合計約1,700時間の操作データセットを構築した[2]。その厳密な内訳は、(1) 物理的なFranka Panda FR3双腕ステーションで人間が遠隔操作収集した内部テレオペレーションデータ468時間、(2) TRI開発の物理シミュレータ「Drake」上の仮想双腕環境で収集したテレオペレーションデータ45時間、(3) カメラ付き手持ちグリッパー治具「UMI（Universal Manipulation Interface）」を用いて人間が直接収集した操作データ32時間、および(4) オープンデータセット「Open X-Embodiment」からキュレーションされた多様なロボットデータ約1,150時間である[3]。

第2段階の「現場固有スキルの獲得（ファインチューニングおよび実演転移）」では、トヨタは以下の3つのデータ収集アプローチと品質管理体制を組み合わせている。

1. ロボット指形状を模した手持ち治具（**UMI**派生デバイス）による直接実演：2026年9月にトヨタが欧州投資家向けイベントで披露したELEYのデモでは、作業員がELEYの2本指グリッパーと同形状の治具を手に装着してTシャツを折り畳む動作を実演し、ELEYが約2週間にわたり約1,500回の反復練習・学習を重ねることで、柔軟に変形するTシャツを自律的にほぼ完璧に折り畳むスキルを獲得した[2]。トヨタとTRIが2026年3月19日に公開した米国特許出願（US20260077488A1『Apparatus for collecting robot training data』）も、人間の作業動作をロボット学習用データとして直接取得する装置を規定しており、稼働中の生産ラインを長時間止めずに現場の匠の手さばきをデジタル採取する仕組みを裏付けている[39]。
2. 全身・双腕テレオペレーション（遠隔操作）インターフェースの共通化：2026年2月26日公開の米国特許出願（US20260054390A1『Methods for teleoperation of whole-body manipulation』）や、TRIとBoston DynamicsによるAtlasへのLBM実装研究が示す通り、人間の遠隔操作システム（VR・テレオペレーション器具と頭部HDRステレオカメラ映像等）とニューラルネットワークポリシーが「ロボットに対する同一の制御インターフェース」を共有するアーキテクチャが採られている[33]。これにより、移動を伴わない双腕操作モデルから全身移動操作（ロコ・マニピュレーション）への拡張も行動表現の付加のみでシームレスに実行できる[33]。
3. 現場での「**1**時間データ収集」短サイクル実装とデータ品質保証（**QA**）基盤：未来創生センターのELEY開発陣は、「データを1時間集めて処理し、ELEYに実装する」という短期サイクルでの学習プロセスを提示しており、生産現場に近い条件でELEYを稼働させ、成功例だけでなく失敗データも含めて学習データへ変換し短周期で改善を回す方針を掲げている[1]。またTRIとBoston Dynamicsの共同実証では、模倣学習ポリシーの成否が実演データの質に強く左右されるため、収集データを精査・フィルタリングしオペレータへ即座にフィードバックする「品質保証（QA）ツール群」が不可欠であったと報告されている[33]。

2.2 ELEYの「全軸QDD」と「肩甲骨軸」が果たすハード・AI共進化の決定的役割

第1巻で概観したELEYの機械・駆動系アーキテクチャは、単なる協働ロボットの軽量化設計ではなく、LBMによる模倣学習の「データ収集の忠実度」と「接触作業の再生安定性」を物理層から支えるハードウェア・AI共進化の産物である[1]。

第一の設計要件は、人間の骨格寸法との一致と「肩甲骨軸」の追加による模倣変換ロスの最小化である[1]。ELEY（名称はEmbodied Learning robot for Enhanced Yield：高い成果・生産性を目指す身体学習ロボットの頭文字）は、関節間のリンク長や腕の太さを日本人成人男性の平均寸法に合わせて設計された上、2012年発表の前身機HSRには存在しなかった「肩甲骨軸」（トヨタが2011年出願の特許第5672219号『ロボットの関節機構及びロボット』等で培ってきた鎖骨・肩甲骨相当リンク機構の系譜）を新たに組み込んでいる[1]。人間が両腕で部品を強く押し込む、遠方へリーチを伸ばす、容器の蓋をひねって開けるといった作業を行う際、実際には肩関節だけでなく肩甲骨を大きく可動させている[1]。ロボットの運動学的構造を人間に一致させておくことで、熟練工が実演した両腕の協調姿勢や押し込み動作を特異点や可動域制限で歪めることなくストレートにELEYの関節空間へ転写でき、フィジカルAIの模倣学習効率が大幅に高まる[1]。

第二の設計要件は、減速比**10**対**1**以下の「全軸**QDD**（**Quasi-Direct Drive**：準ダイレクトドライブ）」による高バックドライバビリティの実装である[1]。従来の産業用ロボットやHSRでは、小型・高速回転モータと高減速比の減速機を組み合わせて出力トルクを増幅していたが、減速機の摩擦と慣性（特にロボット関節が多用する100min-1程度の低速動作域で顕著となるモータのコギングトルク項および慣性項）が壁となり、外力を加えても関節が回らない低バックドライバビリティ状態にあった[1]。そのためHSRでは、把持目標が数ミリずれて周囲の物体と接触しただけで想定外の過大負荷が腕に作用し、機械故障を招いていた[1]。

これに対しELEYは、大トルクモータと減速比10対1以下の低減速比減速機を組み合わせたQDDアクチュエータを全軸に採用し、必要トルクを維持したまま低慣性・高バックドライバビリティを実現した[1]。公開資料ではELEY内部の電流・トルク推定アルゴリズムの詳細は明示されていないものの、生産技術・制御工学の観点から見れば、この全軸QDD構造は2つの決定的な利点をもたらすと推察される。1つ目はデータ収集面であり、減速機の摩擦ヒステリシスが極小化されているため、ダイレクトティーチングや接触実演時に熟練工の微細な力加減（ワークのしなりや嵌合時の底付き感）が機械的抵抗に阻害されず、関節角度偏差やモータ電流変動としてクリーンに反映されやすいことである[1]。2つ目はLBM再生面であり、10Hz（0.1秒刻み）の位置チャンク指令で動作するAIポリシーが視覚誤差によりワークへ接触した瞬間、AIの次周期再計画を待つまでもなくQDD関節が外力に逆らわずしなやかに回転して衝撃を逃がし、「やさしく触れるだけでなく、触れた状態を維持したまま組付け作業を完遂する」物理的コンプライアンスが成立することである[1]。

第三の設計要件は、ワイヤーや樹脂ベルトを排した「直接駆動方式」による位置到達再現性の改善である[1]。QDDを採用した先行試作アームでは、カップを床に押し付けて置く、ドアノブを引いて開けるといった接触力の吸収には成功した反面、指定位置へ手先をズレなく到達させる精度に課題が残った[1]。ELEYでは弾性伸びやバックラッシュの要因となるワイヤーや樹脂ベルトを使わない直接駆動構成へ変更することで、接触柔軟性と位置決め再現性の両立を図っている[1]。

2.3 未知環境変化への汎化性能とマルチタスク統合の到達点と限界

模倣学習モデルの実ライン適用において生技部門が最も厳しく問うのは、「照明の変動、ワーク配置のズレ、対象物形状の変化に対してどこまで止まらずに動くか（汎化性能）」と「単一モデルで何種類の作業を統合できるか」である。TRIのLBM1査読研究（計29タスク、実機1,800回・シミュレーション4万7,000回超の評価）および関連実証から確認できる客観的到達点は以下の通りである[2]。

まず**Few-shot**適応と環境変動ロバスト性については、照明変化やワーク初期位置の変動、対象物のバリエーションを含む高難度評価環境において、約1,700時間データで事前学習したLBMをファインチューニングすると、事前学習なしでゼロから個別学習したポリシーと比較して**3**分の**1**

から5分の1のデータ量で未知の長期複雑タスク（実機5種・シミュレーション5種）を習得できることが定量的に示された[2]。1つの行動あたり数百回規模の実演データ（また他社の単一タスク模倣学習事例ではHexagon AEONの20回実演やDiffusion Policyの約100〜136回実演などタスク複雑度に応じた回数）で実用域への性能ジャンプが確認されており、事前学習データの規模とタスク多様性を増やすほどファインチューニング後の総合性能が頭打ちなく滑らかに向上するスケーリング則も実証されている[3]。

次にマルチタスク統合の到達点については、ユーザー要件としてしばしば期待される「単一モデルで数百種類のタスクを無調整でこなす汎用性」に対し、公開事実は重要な技術的留保を示している。確かに事前学習コーパスにはOpen X-Embodiment由来の多様なタスク群が含まれ、LBM1の単一ネットワークは複数の既知タスク（評価スイートでは計19種の既知タスク群）を言語指示の切り替えで同時習得でき、またAtlasやELEYの実証でも剛体部品のピッキング・引き出し開閉・柔軟なTシャツ折り畳みといった異種スキルや多段階連続タスクを同一の学習枠組みで統合できている[2]。しかしTRIの厳密評価において、追加ファインチューニングを行わない事前学習モデルのまま（ゼロショット／非ファインチューニング状態）では、単一タスク特化でゼロから学習したモデルに対する優位性は一貫しなかった[2]。すなわち2026年時点の到達点は「無調整で何でもこなす魔法のゼロショットモデル」ではなく、「強力な汎用事前学習モデルをベースに、各工程で少量の実演データを追加学習させて確実に仕上げる高効率マルチタスク基盤」として捉えるのが工学的に最も正確である[2]。

第3章 トヨタ生産方式（TPS）「自働化（ニンベンの付いた自動化）」におけるELEYとLBMの位置づけ

3.1 「無人化（Dark Factory）」を否定するパートナーロボット思想と匠の技能資産化

グローバル自動車産業でフィジカルAI投資が急拡大する中、トヨタの実装哲学を他社と明確に分けているのは、トヨタ生産方式（TPS）の中核概念である「自働化（ニンベンの付いた自動化）」と、TRIのギル・プラットCEO（元DARPAロボット開発責任者）が自動運転研究以来掲げてきた「Guardian（ガーディアン：人間を排除するのではなく、いざという時に人を守り能力を拡張する協調AI）」の思想的系譜である[15]。

一部の新興EVメーカーやテック企業が完全無人化工場（Dark Factory）による人間労働の全面代替を標榜するのに対し、トヨタはELEYを一貫して「生産現場で仲間と一緒に働き、活躍できるパートナーロボット」と位置づけている[1]。2026年9月の欧州発表においても、トヨタはロボット導入を「人員削減のための代替ではなく、従業員をロボットに作業を教える訓練役（トレーナー）へと進化させ、人とロボットが協働・共存する新しいものづくりを実現する取り組み」として提示した[15]。労使協調と現場の知恵を重んじるトヨタにとって、人間は工場から排除すべきコスト要因ではなく、異常時に原因を究明し絶えず作業をカイゼンする主役であり続ける[27]。

このパートナー路線は、生産現場が直面する「労働力不足・高負荷作業の緩和」と「匠の技能伝承」という2つの構造課題を同時に解決する狙いを持つ[1]。従来のティーチング再生ロボットはスポット溶接のような固定位置作業しか記録できなかったが、LBMを搭載したELEYは、熟練工（「匠」）が数十年かけて身につけた「部品の個体差やセットの微妙な揺らぎを吸収しながら組み付ける振る舞い」そのものを学習し再現できる[2]。高齢化による熟練技能員の退職が進む中、暗黙知であった匠の技を模倣学習データとして形式知化・デジタル資産化し、国内外の拠点へ引き継ぐ戦略的意義は極めて大きい[1]。

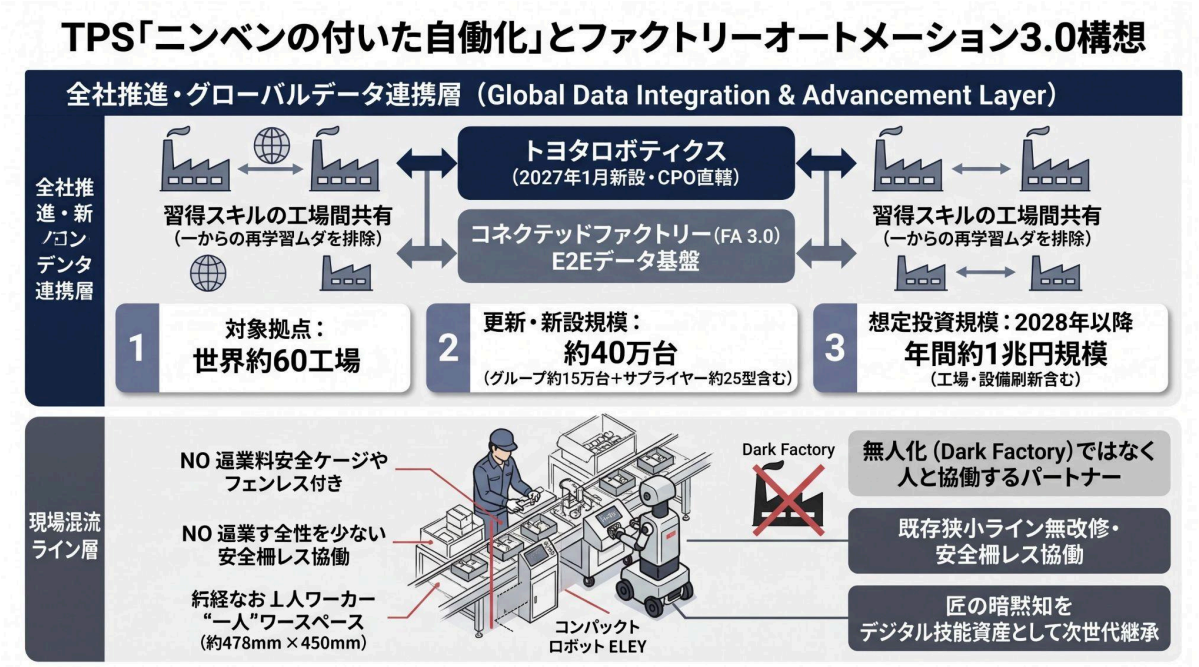
3.2 既存ライン無改修・安全柵レス・短時間スキル入れ替えがもたらす現場カイゼン速度

トヨタが2028年以降、世界約60工場およびサプライヤー網を含む約40万台のロボット更新・新設に毎年約1兆円規模（1ドル＝157円換算で約64億米ドル、工場自体の刷新費用を含む試算であり継続年数は未確定）を投じる「ファクトリーオートメーション3.0（コネクテッドファクトリー）」構想において、ELEYの仕様は徹底した現場実装効率の最大化を狙っている[2]。

第一に、既存狭小ラインへの無改修配置である。ELEYは2025年12月5日に公式発表され、同年12月12〜14日の「World Robot Summit 2025 AICHI」で実機展示された次世代モバイルマニピュレーターであり、その車輪台車の設置面積は長さ**478mm×幅450mm**と成人の立ちスペースと同等に抑えられている[9]。さらに全高939mm〜1,619mmの昇降機構と全方向移動台車により、床面の落下物回収から高所作業、片手で箱を開けながらもう片方の手で部品を収める非対称両腕作業までを1台でこなす[9]。ムダ取りによって通路幅や工程間ピッチが極限まで詰められた既存の混流組立ラインに対し、コンベア改修や建屋工事を伴わずにそのまま投入できる寸法設計である[42]。

第二に、安全柵レス協働と実用稼働率を重視した引き算設計である。本体重量50kgの軽量ボディ、電源遮断時も転倒しない車輪式台車、全軸QDDによる接触力緩和、そして報道ベースで伝えられるシンプルな2本指グリッパーの組み合わせは、安全柵なしで作業員の隣に配置しつつ、複雑な二足歩行や多指ハンドに起因する故障ダウンタイムを最小化する徹底した実用主義を体現している[2]。

第三に、「トヨタロボティクス」設立による現場起点カイゼンの全社統合と適材適所の外部連携である。トヨタは2026年11月5日、ロボットを将来の重要な事業の柱と位置づけ、2027年1月1日付で全社直轄組織「トヨタロボティクス」を新設する組織改正を発表した[4]。組織長には執行役員兼CPO（最高生産責任者）・モノづくり技術本部長の志賀武文氏が兼務で就任し、同時に未来創生センターを廃止して先進技術開発カンパニーおよびデジタルソフト開発センターへ機能を統合する[4]。研究部門の格上げではなく生産技術トップの直轄下に社内知見・人材を結集したことは、まずトヨタグループ（約15万台更新対象）とサプライヤー網（約25万台更新対象）の製造現場で実運用データを鍛え上げ、その上で他社への外販や生活支援領域へ事業を広げる明確な意思を示している[9]（なお欧米アナリストのBernsteinは、仮にトヨタが2030年に年間10万台規模の外販を実現した場合の単価を約3万4,000ユーロと試算している[47]）。さらにトヨタは自社開発の車輪型ELEYだけに固執せず、2026年2月にはカナダ生産法人（TMMC）が米Agility Roboticsと商用契約を締結して二足歩行ロボット「Digit」を物流・製造支援へ導入するなど、工程要件に応じて外部ヒューマノイドや既存の非人型産業用ロボットを組み合わせる現実的なマルチロボット戦略を推進している[2]。



第4章 日米欧中における「フィジカルAI実装思想」の激突マトリクス

4.1 なぜ海外先行勢はあえて「二足歩行」や「4腕＋5G群制御」を量産ラインへ直接投入するのか

トヨタが「車輪型・約50kg・全軸QDD・LBM模倣学習」による堅実な人協働路線を選択したのに対し、米国・欧州・中国の先行勢は、機構的複雑さやコスト、転倒対策の難度が高い「二足歩行ヒューマノイド」や、人間の身体構造を超越した「4本腕協調ロボット＋プライベート5G群制御」を相次いで量産工場へ投入している[7]。この分岐は技術力の優劣ではなく、各極が直面する「労働市場の逼迫度と労務単価」「既存工場（ブラウンフィールド）の段差・空間制約」「デジタルツイン・5G通信・低価格アクチュエータ供給網の有無」という経営環境の違いから必然的に導かれた戦略的選択である。

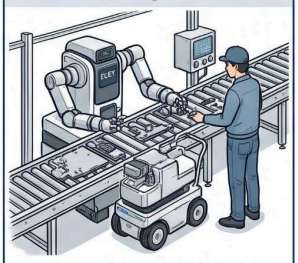
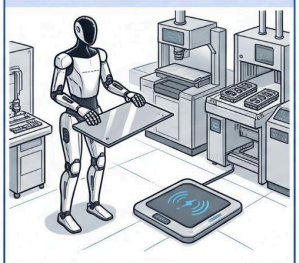
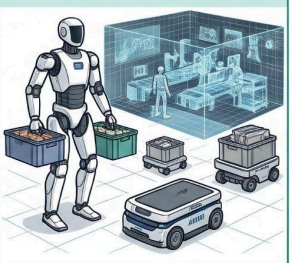
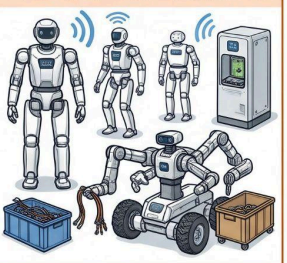
4.2 日米欧中 フィジカルAI実装4極アプローチ比較一覧表

以下に、日米欧中4極のフィジカルAI実装思想と技術・投資構造を標準プレーンテキスト表（5列）で対比する。

比較軸	日本：トヨタ（ELEY）	米国：BMW×Figure AI	欧州：MB×Apptronik・BMW本国	中国：極氪×UBTECH・iSAGE等
移動・機構方式	全方向車輪台車＋昇降機構、重量50kg、成人男性寸法双腕＋肩甲骨軸、	二足歩行（Figure 02 / 03）、高自由度5本指触覚ハンド＋掌カメラ、足裏	二足歩行 Apollo（身長173cm・72.5kg・可搬25kg・71自由度）および車	二足歩行 Walker S1/S2（3分未満自動電池交換）および4腕52自由度車

	2本指、全軸QDD＋直接駆動	無線充電、手首直接通信	輪型AEON・AMR群の併用	輪機SageMan（可搬16kg/腕）
AI学習・制御基盤	TRI製LBM（Diffusion Transformer、約1,700時間事前学習、16ステップ行動チャンク）による模倣学習	独自VLA基盤モデルHelix / Helix 02（System 2計画＋System 1高速全身制御）と実機稼働データ還流	工場OS（MBのMO360、BMWのOmniverse＋AnyFleet）主導の統合管理と少回数（20回等）模倣学習	プライベート5G（1ms未満）＋BrainNet群知能（DeepSeek-R1統合上位脳＋Transformer下位脳）およびVLA
安全担保方式	車輪式の静的安定性、50kg軽量化、全軸QDDの高バックドライバビリティによる本質安全・柵レス協働	布・フォーム製ソフト外装（Figure 03）と作業セル運用、動的安定規格（ISO/WD 25785-1）対応途上	協働力制御アーキテクチャ（Apollo）や22種センサ群（AEON）とEU機械規則を見据えた仮想検証	クロスフィールド純視覚認識と5G高信頼通信による複数機間のリアルタイム協調・干渉回避制御
主対象工程	接触を伴う部品組付け、箱開閉・ピッキング、柔軟物扱いなど熟練工の隣で行う混流組立補助工程	車体溶接治具への板金部品投入（公差5mm）や順立て（シーケンシング）・重量台車牽引等の高負荷工程	既存工場における部品キットのラインサイド配送（イントラロジスティクス）、外観検査、高電圧電池組立	総装ライン、SPS計器盤仕分け、エンブレム・灯火検査、15kgコンテナ協調搬送、ワイヤーハーネス検査
設備投資・改修要件	478×450mmの省スペース設計により既存狭小ライン無改修、2028年以降年1兆円規模で60工場・40万台更新構想	人間用アクセス空間へ無改修でドロップイン置換、単価9万～10万米ドルまたは約25米ドル/時のRaaSモデル	OpenUSD / SimReady仮想工場（SOPの2年以上前にHiL検証）への先行投資により実ライン改修の手戻りを排除	中国国内供給網による低BOMコスト（約3万5,000米ドル試算）と5Gスマート工場インフラの一体整備

日米欧中におけるフィジカルAI工場実装思想の4極比較マトリクス

日本（トヨタ ELEY）	米国（BMW×Figure AI）	欧州（MB×Apptronik／BMW本国）	中国（極氪×UBTECH／iSAGE等）
車輪型・50kg・全軸QDD	二足歩行+5本指触覚ハンド	二足歩行Apollo+車輪型AEON+AMR	二足歩行群+4腕52自由度ロボ
			
車輪型・50kg・全軸QDD	二足歩行+5本指触覚ハンド	二足歩行Apollo+車輪型AEON+AMR	二足歩行群+4腕52自由度ロボ
TRI製LBM模倣学習	独自VLAモデル Helix 02	工場OS（MO360／Omniverse）主導	プライベート5G（1ms未満）＋BrainNet群知能
本質安全・柵レス人協働	高負荷工程のドロップイン置換	既存工場の物流自律化	低BOMコスト（約3.5万米ドル試算）
既存狭小ライン無改修	単価9〜10万米ドル／RaaS約25米ドル/時	SOP 2年前の仮想試運転	総装・内装・ハーネス並列自動化

各地域の労働市場・建屋制約・通信部品インフラに最適化されたアーキテクチャ分岐

4.3 4極それぞれの設計思想と工学的・経営的トレードオフの深掘り

(1) 日本・トヨタ（ELEY）：「本質安全・既存狭小ライン無改修・人協働」路線

トヨタの設計思想は、二足歩行に伴う転倒エネルギーリスク、歩行制御の電力消費、多指ハンドの破損リスクを徹底的に排除し、そのリソースを「肩甲骨軸を備えた成人男性サイズの双腕」と「全軸QDD＋ベルトレス直接駆動」という接触マニピュレーション性能へ集中投下する合理主義にある[1]。平滑な工場床面において478mm×450mmの全方向移動台車は人間と同等の狭小スペースへ無改修で入り込め、かつ電源遮断時にも静的安定性を保つため、作業員の真横での柵レス協働が容易である[9]。一方のトレードオフとして、大きな段差や階段のある建屋には入れないこと、ならびにトヨタ自身が課題として挙げる「長時間連続稼働の信頼性」「高精度な手先到達再現性」「グループ横断の学習データ基盤整備」を量産シフトで実証し切る必要があることが挙げられる[1]。

(2) 米国・BMW×Figure AI：「高負荷工程における人間作業のドロップイン置換」路線

米国サウスカロライナ州のBMWスパータンバーグ工場におけるFigure AIの展開は、実生産ラインにおける11カ月間（本格ライン投入を含め約10〜11カ月間）の稼働実績とROI試算を公開した初期の代表事例である[6]。第2世代機「Figure 02」は月〜金曜の10時間シフトで稼働し、累計1,250時間以上のランタイム、推定120万歩以上（200マイル超）の歩行、9万点以上の板金部品ローディングを記録し、3万台超のBMW X3生産に寄与した[6]。要求された84秒サイクルタイム（うち溶接治具扉が開いてからのロード時間37秒）に対し、ラックから取り出した板金部品3点を公差5mm以内に2秒未満でセットし、シフトあたり99%超の配置精度を達成した[6]。なおBMWは本導入の目的を人員削減（レイオフ）ではなく、重量部品の反復投入に伴う作業員の筋骨格系負荷・負傷リスクを軽減するエルゴノミクス対策と位置づけている[48]。続いて2026年6月30日からは第3世代機「Figure 03」が同工場Hall 52へ配備され（業界レポートのiFactoryによれば初期40台フリート規模、約25米ドル/時のRaaS価格設定）、薄物部品の順立てピッキングと重量キャスター台車の牽引を切り替えながら遂行している[7]。

米国勢があえて高難度な二足歩行と5本指触覚ハンド（Figure 03では掌カメラと触覚センサを統

合）を採る理由は、約42万5,000人規模とされる米国製造業の労働力不足の下で、「人間用に設計された既存の溶接セル開口部や部品棚へ、安全柵や治具レイアウトの変更なしにそのまま歩いて入り込める（ドロップイン置換）」経済価値が極めて高いためである[7]。Bank of Americaの2026年分析によれば欧米パイロット機の単価は9万～10万米ドルであるが18～24カ月で投資回収が可能と試算されており、自社量産施設BotQ（初期年産1万2,000台、将来10万台構想）等の量産効果により2030年には単価1万7,000米ドル未満（回収14カ月未満）へ急落すると予測されている[6]。AIおよびSim-to-Realの観点でも重要な教訓が得られている。Figureは2025年2月にOpenAIとの提携を終了して独自VLAモデル「Helix（現Helix 02：言語・画像理解のSystem 2と高速全身制御のSystem 1で構成）」へ完全移行した[23]。シミュレーションは歩行・操作学習を加速させる一方、Figure 02の11カ月実ライン稼働は「シミュレーションだけでは決して再現できなかったハードウェア限界」として、狭い筐体に3自由度手首・中継基板・可動ケーブル・熱負荷が密集する「前腕部（Forearm）」が最大の故障ポイントであることを浮き彫りにした[6]。Figure 03ではこの知見を直ちに反映し、手首の中継基板と可動ケーブルを全廃して各モータコントローラをメイン計算機へ直結させ、足裏ワイヤレス充電と布・フォーム製ソフト外装へ再設計する高速な実機フィードバック開発を実行している[6]。

(3) 欧州・メルセデス×Apptronik／BMWドイツ本国：「ブラウンフィールド適応と工場OS主導型自律化」路線

欧州勢のアプローチは、個別ロボットのスタンドアロン性能よりも、「工場全体のデジタルOSとOpenUSD仮想空間」によって既存工場（ブラウンフィールド）の複雑な物流・組立を統合制御する点に最大の特徴がある[7]。メルセデス・ベンツは米Apptronikへ出資し、ベルリン・マリエンフェルデの「Digital Factory Campus」およびハンガリー・ケチケメート工場に二足歩行ヒューマノイド「Apollo」（報道・専門誌仕様で身長173cm、重量72.5kg、可搬重量25kg、71自由度、独自の協働力制御アーキテクチャ搭載）を試験投入した[51]。同社のデジタル生産エコシステム「MO360」と統合し、従来人間が1シフトあたり何マイルも歩き回って行っていた部品キット入りトートのラインサイド配送（イントラロジスティクス）や初期品質検査を担わせており、MANUSデータグローブ等を用いたテレオペレーション模倣学習で現場スキルを獲得させている[7]。人間向けに構築された既存建屋の通路や棚にそのまま適応し25kgの荷物を運べる点が二足歩行採用の根拠となっている[7]。

同時にBMWグループは、ドイツ本国（ミュンヘン、レーゲンスブルク、ディンゴルフィング、ライプツィヒ）およびハンガリー・デブレツェン新工場において、NVIDIA OmniverseとOpenUSD（SimReady）を核とする100万平方メートル超の仮想工場プラットフォーム「FactoryExplorer」を展開している[7]。2020年にBMW子会社として設立されたidealworks（その後Agile Robotsが買収）のクラウド群管理基盤「AnyFleet」と自律移動ロボット（AMR）「iw.hub」にNVIDIAの「Mega Omniverse Blueprint」を統合し、大規模AMR群とヒューマノイドの混在稼働をデジタルツイン上で事前検証・オーケストレーションしている[58]。さらにライプツィヒ工場では、米国スパータンバーグのFigureとは別ベンダーであるHexagon Roboticsの車輪型ヒューマノイド「AEON」（22個のセンサ、自動バッテリー交換機構を備え、20回の実演模倣学習で自律化する機体）を高電圧EVバッテリー組立・外装部品作業へ投入しており、単一機体に賭けず二足歩行と車輪型を複数大陸で並行評価する緻密なポートフォリオ戦略を採っている[2]。

(4) 中国・極氪（Zeekr）×UBTECH／颯智智能（iSAGE）等：「プライベート5G＋群知能と多腕特化機による柔軟物・総装自動化」路線

中国勢は、世界最大の産業用ロボット稼働ストック（約200万台、日本の約4.5倍）と欧米機の約3

分の1にあたる約3万5,000米ドル水準の低BOMコスト（Bank of America試算）、そして工場プライベート5Gインフラを背景に、「単機自律から群知能（Swarm Intelligence）への拡張」と「4本腕などの非人間型多自由度機構」を組み合わせた独自の量産自動化を推進している[6]。極氪（Zeekr）の寧波5Gスマート工場では、優必選（UBTECH）の二足歩行ロボット「Walker S1」が数十台規模のチームとして総装ショップ、SPS計器盤エリア、品質検査エリアへ実戦配備された[8]。その中核ソフトウェア「BrainNet（および次世代BrainNet 2.0）」と中央制御ハブ「Internet of Humanoids（IoH）」は、クラウド・エッジ（デバイス）協調推論ノードを結合し、DeepSeek-R1の深層推論技術を統合した大規模マルチモーダル推論モデルによる「スーパーブレイン（上位脳）」が複雑な生産タスクの分解・スケジューリングを担い、各機体側のTransformerベース「インテリジェント・サブブレイン（下位脳）」がクロスフィールド純視覚認識と並列分散スキル学習を実行する[8]。数十～百台規模のロボットが高密度データをリアルタイム共有するこの群知能は従来の産業用Wi-Fiでは破綻するため、制御環境下で遅延1ミリ秒未満・高可用性SLAを保証するプライベート5Gネットワークが不可欠の通信バックボーンとして機能している[20]。これにより最大15kgコンテナの協調リレー搬送や精度99%超のエンブレム・灯火検査を実現し、さらに量産が開始された後継機「Walker S2」では3分未満で自身のバッテリーを無人自動交換するシステムを搭載して24時間連続稼働を可能にした[20]。

さらに中国の自動車製造現場では、柔軟物や複雑検査に向けた多腕ロボットの導入も加速している（なお公開一次報道において極氪工場での群知能実証が確認されているのはUBTECHのWalker S1群および工場自動搬送網であり、4腕ロボットの自動車ハーネス適用は理想汽車等の中国EV工場事例や業界技術分析を通じて確認されている点を付記する）[8]。具体的には、日本の専門セミナー等で全高155cmの華研智造（ISAGE）四臂協調ロボットとして注目される系譜および中国スタートアップ颯智智能（SAGE Intelligent；iSAGE）が2025年7月に発表した「SageMan」は、車輪式移動台車と協調下肢の上に**4**本のアームと全体**52**自由度（アーム1本あたり可搬16kg、位置決め精度±0.05mm、左右対称トポロジーによる360度円筒作業空間）を備える[10]。独自OS「SAGE-OS」・コントローラ「SAGE-Brain」と視覚・力覚統合VLAモデルにより4本の腕が別工程を同時並行処理し、理想汽車（Li Auto）等を顧客として自動車ワイヤーハーネス検査や精密組立で作業効率を最大約200%向上させている（また華沿機器人［Huayan Robotics］も自社製高感度MEMS力覚センサと最小12mm大口径中空内配線を備えた7軸力制御アームを展開している）[10]。人間の身体形状に縛られず「2本の手で柔軟なハーネスを保持・展開し、残り2本の手でコネクタ挿入・検査を行う」多腕アプローチは、タクトタイム短縮を最優先するメガEV工場において強力な競争力を発揮している[10]。

第5章 治具レス・教示レス化がもたらす生産技術（生技）・FA・部材サプライチェーンへの構造的インパクト

5.1 設備投資（CAPEX）・車種切り替えリードタイム・減価償却構造の転換

専用クランプ治具と個別教示プログラムに依存した従来の自動化ラインから、「汎用フィジカルAIロボット＋模倣学習スキル入れ替え＋仮想工場事前検証」への移行は、自動車メーカーの設備投資（CAPEX）と減価償却の論理を構造的に変化させる[6]。

評価軸	従来の専用自動機・教示再生ライン	次世代フィジカル**AI**・模倣学習ライン	生技・サプライチェーンへの構造的示唆

設備投資（CAPEX）構造	車種・部品専用のクランプ治具とSIer現地教示費が過半を占めモデル末期に除却損が発生	汎用ロボット本体＋データ・仮想工場基盤へ投資しスキル更新で他車種・他工程へ転用可能	専用治具メーカーの需要縮小と汎用ハンド・データ収集治具への需要シフト
車種切り替えリードタイム	実機据付後の現物合わせ・干渉修正・PLCデバッグに数カ月規模の立ち上げ期間を要する	SimReady仮想試運転（SOPの2年以上前完了）＋短時間の模倣学習で立ち上げ期間を圧縮	現地デバッグ工数の大幅削減とバーチャルコミッショニング対応力の必須化
減価償却・保有リスク	機械寿命が10年以上と長く安定稼働するが生産変動や設計変更への転用弾力性が低い	機体世代交代が極めて速く（1〜2年周期）手指摩耗や電池劣化の保守TCOリスクが存在	一括購入（CAPEX）と時間課金RaaS（OPEX）のハイブリッド調達化

最大の財務的インパクトは、車種専用治具という「転用不能なサンクコスト」の削減と、ロボット単価の急激な下落曲線である。Goldman Sachsの調査によればヒューマノイドの製造コストは2023年から2024年の1年間で40%低下しており、Bank of Americaは現在9万〜10万米ドルの欧米導入単価が2030年までに1万7,000米ドル未満へ低下すると予測している[6]。同時にBMWがハンガリー・デブレツェン新工場（敷地約1.4平方キロメートル）で実践したように、建屋基礎工事の段階（量産開始SOPの2年以上前）にOpenUSD仮想空間上で実機PLCとミリ秒単位で同期するHardware-in-the-Loop（HiL）制御試運転とデジタルヒューマン人間工学検証を完了させ、さらに現場での微妙な個体差をLBM等の模倣学習で吸収する体制が整えば、従来のライン立ち上げで常態化していた現地での干渉削り作業や長期デバッグ工数を大幅に削減できる道が開かれる[2]。

一方で、生技・購買部門が直視すべき新たなリスクが「機体世代交代の速さに伴う減価償却リスクと消耗部品TCO（総保有コスト）」である。Figure 02がBMWでの11カ月間の稼働完了とともに全機退役プロセスへ入りFigure 03へ置き換えられた事例が示す通り、急速な進化途上にあるフィジカルAI機体を従来の産業用ロボットと同じ長期固定資産として一括購入すると、わずか数年で部品供給やAIソフトウェア互換性の壁に直面しかねない[22]。また1日に数千回の把持を繰り返す工場運用では、多指ハンドの指先・減速機・ケーブル寿命やシフト間運用のバッテリー劣化交換費が収益性を左右する[23]。このため、初期段階では時間課金型のRaaS（OPEX）契約を活用して陳腐化リスクをベンダー側と分担するか、あるいはトヨタELEYのように2本指・車輪台車・ベルトレス直接駆動によって摩耗・故障要素を極限まで削ぎ落とした高信頼設計を追求するかという調達戦略の選択が極めて重要になる[1]。

5.2 安全規格・メカトロ部材・3Dデジタルツイン標準部品（SimReady）の新

たな技術要件

治具レス・教示レス化の進展は、FA機器メーカーや部品サプライヤーに対して、安全認証、駆動・センサ部材、デジタル納品物の3領域で新たな技術対応を迫っている。

第一は、ロボット国際安全規格の全面改訂（**ISO 10218:2025**）と動的安定ロボット新規格（**ISO/WD 25785-1**）への対応である。2025年2月、産業用ロボット安全の基本規格が14年ぶりに改訂され「ISO 10218-1 / 10218-2:2025」が発行された（米国では2025年9月に新設Part 3を含む「ANSI/A3 R15.06-2025」として採択され従来のSafety-rated monitored stopがMonitored standstillへ改称、欧州では「EU機械規則2023/1230」が2027年1月20日より適用開始となる）[25]。2025年版では、従来技術仕様書（ISO/TS 15066）に記載されていた協働ロボットの動力・力制限（PFL：人体接触時の力・圧力上限）や速度・分離監視（SSM）がPart 2本編へ統合され、「ロボット単体の型式ではなく、ハンド・把持ワークを含むアプリケーション（セル）全体での協働安全評価」と「安全制御系を保護するサイバーセキュリティ対策」が明確に要求されるようになった[25]。

さらに重大な法的ギャップとして、ISO 10218は「電源遮断時に自立を維持する静的安定ロボット」を前提としており、電源喪失時にバランスを失って転倒し得る二足歩行ヒューマノイド等の動的安定ロボットを完全にはカバーしていない[25]。現在、動的安定移動ロボットのバランス制御や転倒ゾーン（Fall Zones）を規定する新規格「ISO/WD 25785-1」が策定中であり、同規格の発効まではISO 12100のリスクアセスメントに基づき領域監視インターロックやソフト外装等を個別構築する必要がある（米国OSHAの2026年時点の制裁金上限は重大違反1件あたり1万6,550米ドル、故意・反復違反で16万5,514米ドルに達する）[25]。この規格構造は、電源遮断時も転倒しない車輪型・静的安定構造かつ50kg軽量のトヨタELEYが、安全認証と現場展開スピードにおいて大きな実務上の優位性を持つことを示している[9]。

第二は、アクチュエータ・内部配線・触覚／力覚センサの構造変革である。従来主流であった高減速比の波動歯車装置等に加え、ELEYが全軸採用した「減速比10対1以下の低摩擦QDDアクチュエータ（低コギング大トルクモータ＋低減速比ギア＋ワイヤー・樹脂ベルトレス直接駆動）」や最小12mmクラスの大口径中空内配線関節への需要が拡大する[1]。またFigure 02からFigure 03への設計変更が示したように、多自由度手首における「可動ケーブル（ダイナミックケーブリング）と中継基板の廃止・メイン計算機との直接通信化」、足裏ワイヤレス充電や3分未満の無人バッテリー交換機構といった高稼働率電装技術が標準要件となりつつある[20]。さらに柔軟物・精密嵌合を担う指先触覚センサ、掌カメラ、高感度MEMS力覚センサにおいては、単なる検出分解能以上に「1日数千回の接触摩耗に耐える耐久性と、破損時に現場で短時間交換・再校正できるモジュール設計」がサプライヤー選定の決定打となる[23]。

第三は、**3D**デジタルツイン標準部品「**SimReady**（**OpenUSD**）」によるデータ納品要件の浮上である。これまで設備・部品メーカーがOEMへ提出してきた3D CADデータ（STEP、IGES、FBX等）は外観形状（ジオメトリ）のみを持つ静的な視覚メッシュであり、重力や摩擦、慣性、制御ロジックを含んでいなかった[24]。しかし自動車メーカーがNVIDIA Omniverse等を用いたバーチャルコミッショニングやフィジカルAIのシミュレーション学習を標準化するに伴い、AOUSD（Alliance for OpenUSD）が推進する「OpenUSD / SimReady」規格への準拠が強く求められるようになる[24]。具体的には非破壊レイヤー構造の上に、(1) USDPhysicsに基づく質量・重心・慣性テンソル・動摩擦および静摩擦係数・復元係数、(2) 関節の可動域・トルク限界・バックラッシュ・減衰特性、(3) 計算負荷を最適化した剛体コライダー（衝突判定形状）、および(4) カメラやLiDAR等のセンサーシミュレータが材質・対象物を識別するためのセマンティック・ラベリングを付与したアセット提供能力が、次世代FA・部材サプライヤーにとって不可欠の競争要件となる可能性が高い[24]。

参照一次資料・学術論文・公式発表一覧

1. トヨタ自動車株式会社 公式トピックス（未来創生センター）：『やさしく触れることで未来を変える（新型ロボットELEY・QDDアクチュエータ・肩甲骨軸の解説）』 https://global.toyota/jp/mobility/frontier-research/44105139.html （英語版：https://global.toyota/en/mobility/frontier-research/44105171.html ）[1]
2. トヨタ自動車株式会社 公式ニュースルーム（2026年11月5日発表）：『組織改正、および役員・幹部職人事について（2027年1月1日付「トヨタロボティクス」新設・志賀武文CPO就任）』 https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/44969952.html[4]
3. Toyota Research Institute (TRI) 大規模行動モデル査読論文・プロジェクトページ：Large Behavior Models Team, TRI, 『A Careful Examination of Large Behavior Models for Multitask Dexterous Manipulation』 (arXiv:2507.05331) https://toyotaresearchinstitute.github.io/lbm1/ および https://www.alphaxiv.org/abs/2507.05331[3]
4. TRI・コロンビア大学・MIT 共同論文：Cheng Chi, Zhenjia Xu, Siyuan Feng, Eric Cousineau, Yilun Du, Benjamin Burchfiel, Russ Tedrake, Shuran Song, 『Diffusion Policy: Visuomotor Policy Learning via Action Diffusion』 (arXiv:2303.04137 / The International Journal of Robotics Research) https://arxiv.org/abs/2303.04137 および https://diffusion-policy.cs.columbia.edu/diffusion_policy_ijrr.pdf[5]
5. TRI 公式発表：『Toyota Research Institute Unveils Breakthrough in Teaching Robots New Behaviors』 https://www.tri.global/news/toyota-research-institute-unveils-breakthrough-teaching-robots-new-behaviors および Boston Dynamics共同発表 『Large Behavior Models Positively Impact Atlas』 https://bostondynamics.com/blog/large-behavior-models-atlas-find-new-footing/[33]
6. Car Watch（2026年9月18日・22日）：『トヨタ、毎年1兆円投資し世界60工場とロボット40万台を更新 中嶋副社長が語るファクトリーオートメーション3.0』 https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/2142008.html および 『トヨタ製フィジカルAI「LBM」の強み』 https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/2142443.html[14]
7. 財経新聞（2026年9月20日）：『トヨタ、世界60工場とロボット40万台を更新へ 2028年以降に年1兆円規模』 https://www.zaikei.co.jp/article/20260920/870785.html[2]
8. 特許・知財分析資料（トヨタ肩甲骨関節機構 特許第5672219号、訓練データ収集装置 US20260077488A1、全身遠隔操作 US20260054390A1）：https://ideayohaku.jp/column_toyota_eley_patent.html[39]
9. Figure AI 公式レポート（2025年11月19日）：『F.02 Contributed to the Production of 30,000 Cars at BMW』 https://www.figure.ai/news/production-at-bmw および BMW Group 公式発表 https://newsroom.bmwgroup.com/global/bmw-group-to-deploy-humanoid-robots-in-production-in-germany-for-the-first-time/[22]
10. BMWスパータンバーグ工場 ROI・Figure 03配備分析：IndustrialSage (2026年7月23日) https://www.industrialsage.com/bmw-figure-ai-humanoid-robots-spartanburg-2026/ 、BERI https://www.beri.net/article/bmw-humanoid-robot-roi-30000-cars 、IIoT World https://www.iiot-world.com/artificial-intelligence-ml/robotics/physical-ai-deployment

-roi-humanoid-robots/ 、および iFactory
https://ifactoryapp.com/industries/manufacturing-plant/humanoid-robots-factory-floor-figure-apollo-mercedes[6]
11. Mercedes-Benz Group 公式発表：『Digital Factory Campus Berlin: AI and humanoid robots』
https://group.mercedes-benz.com/company/production/production-network/mbdfc-humanoid-robots.html および Apptronik公式発表
https://apptronik.com/news-collection/apptronik-and-mercedes-benz-enter-commercial-agreement[51]
12. NVIDIA / BMW Group / idealworks 仮想工場・OpenUSD事例：『BMW Group Develops FactoryExplorer Digital Twin Platform Using OpenUSD and Omniverse』
https://www.nvidia.com/ja-jp/case-studies/bmw-group-develop/ 、idealworks AnyFleet Mega Omniverse Blueprint統合発表
https://www.idealworks.com/en/news/anyfleet-mega-nvidia-omniverse-blueprint 、および SimReady解説 https://sattu-ai-agent.com/2026/08/20/bmw-nvidia/[24]
13. UBTECH（優必選）×極氪（ZEEKR）5Gスマート工場 群知能発表：深セン市南山区政府公式英文発表『UBTECH pioneers swarm intelligence in humanoid robots at ZEEKR's 5G factory』
https://www.szns.gov.cn/english/business/industrialnews/content/post_12052599.html および Walker S2 5G・自動バッテリー交換分析
https://www.humandro-id.com/post/ubtech-walker-s2-5g-what-the-sany-re-case-teaches-the-industry[8]
14. 颯智智能（iSAGE）4腕52自由度ロボット「SageMan」・華沿機器人（Huayan Robotics）関連報道：36Kr Japan（2026年2月12日） https://36kr.jp/453092/ および 華沿機器人公式発表 https://www.huayan-robotics.com/about-us/news/2563.html[10]
15. ロボット国際安全規格改訂解説（ISO 10218:2025 / ANSI/A3 R15.06-2025 / ISO/WD 25785-1）：『ISO 10218:2025 Explained: Essential Robot Safety Changes』
https://theresarobotforthat.com/blog/iso-10218-2025-explained/[25]

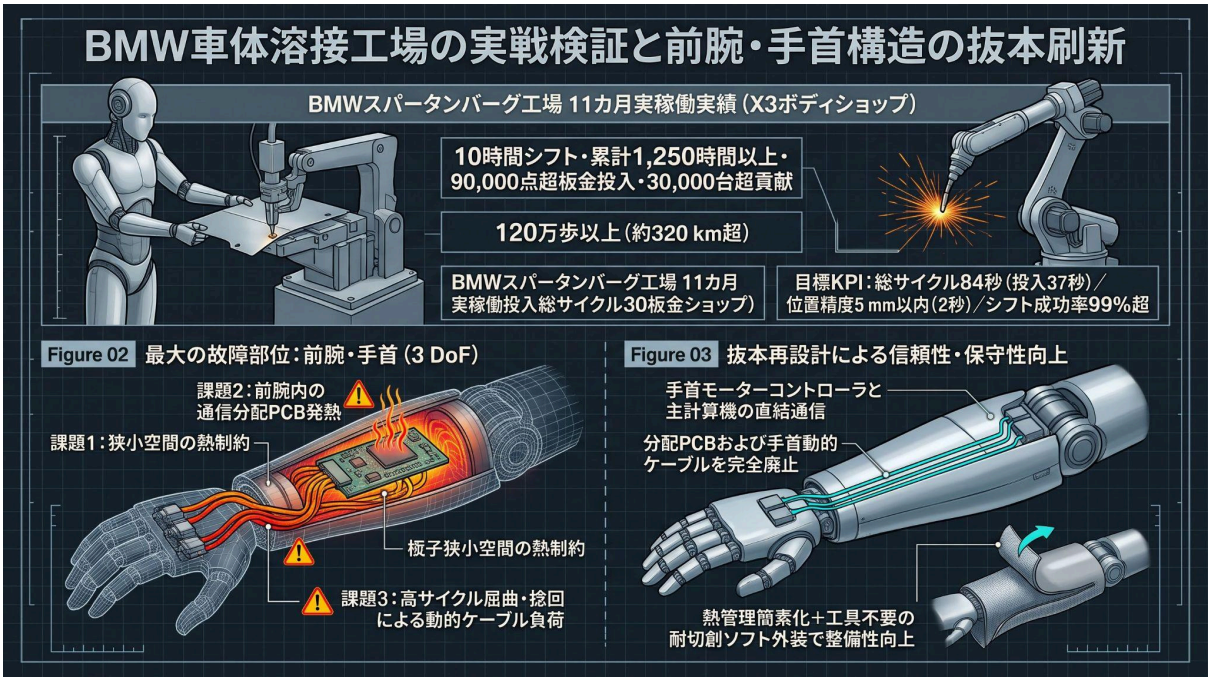
資料3 第1部1：Figure AIの企業エコシステムと「Figure 02 / 03」ハードウェア・耐環境仕様の全貌

エグゼクティブ・サマリー

米国Figure AI社は、2022年の創業（C-Corp設立）からわずか31カ月後の2024年12月に商業顧客向け第2世代機「Figure 02」の出荷へ到達し、BMWグループ・スパータンバーグ工場の車体溶接（ボディショップ）実ラインで11カ月間・累計1,250時間以上の稼働を達成して90,000点超の板金部品を投入、30,000台以上のBMW X3生産に貢献した[1]。この開発速度と現場実装の核にあるのは、創業者Brett Adcock氏が推進する「脳（AIモデル）と身体（ハードウェア）の完全垂直統合」である。同社は既存の市販汎用部品への依存を排し、カスタム電動アクチュエータ、構造統合型バッテリー、触覚センサ、電装ハーネス、組み込みソフトウェア、そして自社開発VLA（Vision-Language-Action）基盤モデル「Helix」までを一貫内製する体制を敷き、2025年2月にはOpenAIとの協業を終了して自社AIスタックへの完全移行を断行した[4]。

機体アーキテクチャは、初期プロトタイプ「Figure 01」（2023年）から産業実装機「Figure 02」（2024年8月発表、2025年11月より順次退役し2026年9月にほぼ全機退役）を経て、量産設計機「Figure 03」（2025年10月発表）へと急速に収斂した[6]。Figure 02はCNC切削加工主体の外骨格構造とケーブル完全内蔵設計、2.25 kWh胴体内蔵バッテリー、デュアルNVIDIA RTX GPUモジュールによる3倍のオンボード推論性能を確立し、車体工場の過酷なライン環境での実稼働を実証した[6]。一方、スパータンバーグ工場での実測ログは「3自由度手首を駆動する前腕部の通信分配基板および動的ケーブル配線の故障」を最大のハードウェア弱点として露呈させた。

Figure AIはこの現場データを即座にFigure 03へ反映し、手首モーターコントローラと主計算機の直結による分配基板・動的ケーブルの完全撤廃、2.3 kWh構造用バッテリーの78%コスト削減とUN38.3認証取得・足部2 kWワイヤレス充電の実装、さらにダイカスト・射出成形・プレス成形による自社量産拠点「BotQ」（初期ライン年産能力12,000台、2026年7月時点で累計1,000台製造発表）の立ち上げへと繋げている[1]。



ただし、自動車メーカーの生産技術部門やロボット・部材開発のR&D陣が同社の実力を精査する上では、公開事実と未公開・未実証領域の境界を厳格に峻別する必要がある。2025年9月のシリーズC調達により企業評価額は390億米ドルに達したものの、BMWでの取り組みは大量調達契約ではなく先行パイロットおよび新規物流工程の検証段階にとどまり、実収益と企業価値のギャップや一般家庭環境での汎用性実証途上である点は複数の分析機関が指摘している[4]。また、Figure 03の搭載SoC型番や全身自由度（DoF）、各関節の減速機構割当・減速比・連続定格トルク、外骨格の合金番手やIP保護等級、さらに3グラム検知触覚センサの検出物理原理や指先エラストマ材質といった詳細設計パラメータは企業秘密として非公開である[6]。本報告書では、一次公式資料・特許公報・BMW実稼働データに基づく確定事実と、既知の機構工学からの技術的解釈および未公開領域を明確に切り分け、全5章にわたり技術全貌を解剖する。

第1章 Figure AIの開発哲学、投資・提携エコシステム、および量産工場（BotQ）戦略

1.1 創業者Brett Adcock氏が掲げる「汎用ヒューマノイドの垂直統合開発」の設計思想

Figure AIの企業戦略およびハードウェア設計思想の原点にあるのは、創業者兼CEOのBrett Adcock氏が掲げる「AGI（汎用人工知能）をサーバー内に留めるのではなく、物理世界で人間の代わりに実作業を担う汎用ヒューマノイドとして具現化する」という事業構想である[5]。人材マーケットプレイスVetteryの売却（報告値1億1,000万米ドル）やeVTOL機メーカーArcher Aviationの共同創業を経て同社を立ち上げたAdcock氏は、世界GDPの約半分を占める人間労働の賃金プール（同氏試算で30兆〜60兆米ドル規模）をアドレス可能な巨大市場と位置づけ、単一目的の専用機ではなく人間環境へそのまま適応できる汎用プラットフォームの構築を目指している[5]。この目標を最短期間で達成するために採用された手法が、既存サプライチェーンへの依存を排した極限の「垂直統合開発」である。汎用ヒューマノイド産業の黎明期においては、二足歩行の動的衝撃耐性と人間並みの器用な手先操作を低コスト・高密度で両立できる既製部品（COTS）自体が市場に存在しない[5]。他社製産業用モーターや汎用協働ロボット用減速機、外部外注バッテリーを寄せ集めた場合、機体質量の増大とハーネス配線の肥大化、さらに各要素間の制御レイテンシが連鎖し、実際の生産ラインや家庭で実用になるサイズとサイクルタイムが成立しなくな

る。そのためFigure AIは、電動モーター・アクチュエータ、バッテリーシステム、触覚・視覚センサ、構造外装、配線ハーネス、組み込みファームウェア、制御ミドルウェア、そしてVLA基盤モデルに至る全スタックをゼロから自社設計する方針を貫いている[4]。Adcock氏も「ヒューマノイド企業は脳（AI）も身体（ハードウェア）も外部委託できない」「地球上で我々ほど多くのロボット部品を内製している組織はない」と明言している[4]。

この垂直統合思想を機能させているのが、12〜18カ月周期で次世代プラットフォームへ全面刷新する超高速イテレーション開発である[5]。Adcock氏は2022年の創業時に自己資金1億米ドルを投じて外部投資家の制約なしにシニアエンジニア約40名の精鋭体制を整え、設立から12カ月未満の2023年5月に初代機「Figure 01」のラボ内初歩行を達成、さらにC-Corp設立からわずか31カ月後の2024年12月に商業顧客向け「Figure 02」の出荷開始へと漕ぎつけた[3]。同社の開発文化は週5〜7日出社を基本とする製品出荷至上主義と評されており、「初期世代から完璧を追求するのではなく、現場に投入して得た故障モードの蓄積を次世代機の設計刷新へ即座に織り込む」という実戦主義が貫かれている[5]。

1.2 資本・技術提携エコシステムとOpenAI提携解消から自社VLA「Helix」への転換

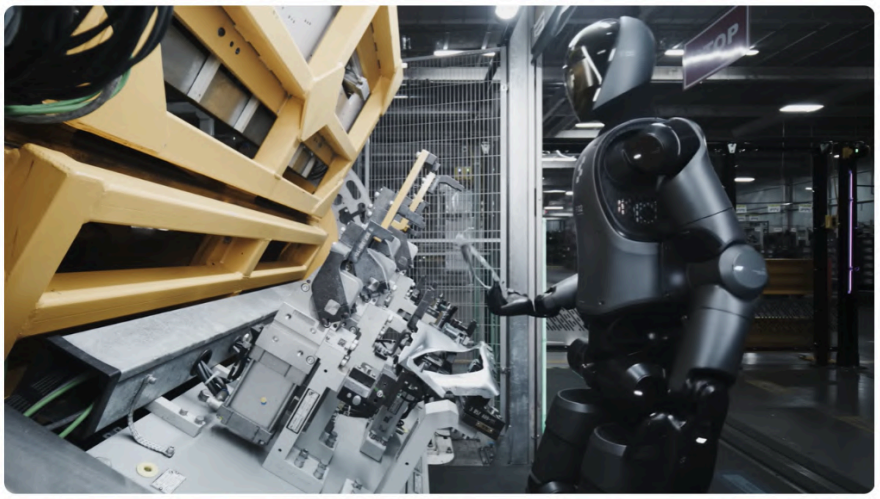
Figure AIの資本調達および企業提携は、単なる資金確保ではなく「垂直統合に必要な計算クラウド、エッジ半導体、実稼働フィールド、実環境データを株主・提携網へ直接組み込む戦略的エコシステム」として構築されている[4]。累計調達額は約19億米ドル（Forbes集計）に上り、2023年5月のシリーズA（Parkway Venture Capital主導で7,000万米ドル、同年7月にIntel Capitalが900万米ドルを追加出資）に続き、2024年2月のシリーズBでは評価額26億米ドルで6億7,500万米ドルを調達した[2]。このシリーズBにはMicrosoft、OpenAI Startup Fund、NVIDIA、Jeff Bezos氏、Intel Capital、Samsung等が参画し、MicrosoftがAI学習とデータ蓄積を担うAzureクラウド基盤を、NVIDIAが機体搭載GPUハードウェアを供給する強固な技術補完関係が成立した[2]。さらに2025年9月のシリーズCではParkway Venture Capital主導で10億米ドル超のコミットメントを獲得し、調達後評価額は18カ月間で15倍となる390億米ドルへ到達した[16]。なお、2026年10月にはNVIDIAによる10億米ドル規模の出資協議を含む新規調達交渉（調達前評価額約380億米ドル）が一部メディア（The Information）で報じられたものの、Figure AI公式からは確認されていない[4]。

実環境展開のパートナーとして決定的な役割を果たしたのが、BMW GroupおよびBrookfield Asset Managementである。BMWとはFigure 02の実機完成以前である2024年1月にスパータンバーグ工場でのマイルストーン契約を締結し、量産車の車体溶接ラインという極めて厳しい生産環境でのデータ収集機会を確保した[1]。またシリーズC投資家でもあるBrookfield Asset Managementとの提携では、同社が保有する10万戸以上の住居ユニットおよび商業・物流不動産へのアクセス権を獲得し、後述するVLA事前学習データの収集とFigure 03の先行テスト環境を確保している[16]。

Helix 2.5 30-Home Generalization



BMW Deployment Update



エコシステム戦略における最大の転換点は、2025年2月4日に発表されたOpenAIとの協業契約解消である[4]。2024年2月の提携によりFigure 01は音声対話デモ（2024年3月公開）を実現し、Figure 02も初期はOpenAIのモデルを用いて出荷された[9]。しかし提携開始から1年未満でAdcock氏は協業を打ち切り、その約2週間後の2025年2月に自社開発VLA基盤モデル「Helix」を発表した[4]。Adcock氏は2026年4月の取材等で、汎用的な大規模言語モデル（LLM）を物理ロボットへ後付け統合する手法では実機制御の低遅延化やハードウェアとの密結合が達成できず、外部プロバイダへの依存はレイテンシや事業主導権リスクを招くため「社内AIがOpenAIのロボティクス性能を凌駕した段階で提携を終了した」と主張している[20]。これに対しOpenAI側の関係者はForbes等の報道で「Figureが合意済みの成果物（deliverables）を達成できなかった」と反論しており（Figure側はこれを否定）、提携解消の裏には技術アプローチと主導権をめぐる双方の見解対立があったとみるのが客観的である[4]。

完全内製へ舵を切ったHelixは、2026年1月発表の「Helix 02」で全身バランス・力制御を担う1 kHz駆動の「System 0」と200 Hz駆動のVLAポリシー「System 1」を統合し、2026年9月の「Helix 2.5」では人間の日常作業動画ライブラリ「Index」での事前学習によって未訪問の一般家庭30軒におけるゼロショット完遂率を9%から56%へ向上させたとFigure社は報告している[4]。他方、市場アナリストからは「390億米ドルの企業評価額に対して実商用売上が極めて限定的である（revenue gap）」との慎重論も根強い[4]。BMWでの取り組みも2026年時点では大量発注契約では

なくパイロットおよび新規工程検証にとどまり、一部メディアが報じたUPSでの稼働についても独立報道（Forbes）では実運用が確認されておらず、収益化の本格実証は今後の焦点となっている[4]。

1.3 Figure 02から量産設計機「Figure 03」へのDFM転換と自社工場「BotQ」構想

Figure 02が実ラインでの機能・耐久実証を目的とした高コストな試作的量産機であったのに対し、2025年10月9日に発表されたFigure 03は、製造容易性設計（DFM, Design for Manufacturability）と家庭・商業双方での大規模普及を前提にゼロから再設計された量産プラットフォームである[6]。最大の設計転換は加工工法と部品構成の抜本的見直しにある。Figure 02の機体構造が主に少ロット向けのCNC切削加工によって製作されていたのに対し[6]、Figure 03ではメカ・エレキ両設計チームが部品点数、組立ステップ、および非必須部品を徹底的に削減し、ダイカスト成形、樹脂射出成形、板金プレス（スタンピング）、ディップ成形といった金型ベースの大量生産工法へと全面移行した[6]。同時に、単一の構成部品に構造保持・絶縁・冷却など複数機能を統合するマルチファンクション設計が徹底されている[14]。

製造コスト低減効果について、Figure AIが公式技術発表で明示している一次数値は「F.03バッテリーのコストをF.02比で78%削減した」という実績である[14]。また、TIME誌がFigure AIの説明会を基に報じた数値（Figure公式サイト上の直接公開値ではない点に注意が必要）として「Figure 03の部品製造コストはFigure 02比で90%安価になった」と伝えられており、将来の量産時目標価格帯として2万～3万米ドル（2026年10月時点で公式小売価格および受注ページは未設定）が業界アナリストや創業者発言で言及されている[5]。
このFigure 03を外部EMSへ委託せずに自社生産するため、2025年3月に発表された専用量産工場が「BotQ」である[4]。BotQは第1世代ラインとして初期生産能力年間最大**12,000**台を設計仕様とし、発表後4年間で累計**100,000**台の生産目標を掲げている[6]。実生産実績としては、独立系データベースRoboZapsが2026年7月16日時点で累計350台超の製造を確認し、その直後の2026年7月23日にはAdcock氏がBotQにおけるFigure 03の累計製造**1,000**台到達を発表した[13]。もっとも、独立アナリストが指摘する通り、この1,000台は工場での製造カウント（production count）であって有償顧客への納品台数ではなく、その多くは社内のHelixデータ収集プログラムやパートナーでの検証用途に振り向けられている点に留意すべきである[13]。BotQのライン全体は自社開発のMES（製造実行システム, Manufacturing Execution System ）を核にPLM (Product Lifecycle Management)、ERP (Enterprise Resource Planning)、WMS (Warehouse Management System)とデジタル統合されており、全サブアセンブリから最終組立までの完全なトレーサビリティを担保する[6]。さらにFigure AIはBotQ工程自体へFigureロボットを投入して組立・搬送データをHelix学習へ還流させる自己生産ループを推進しているが、製造ラインの自動化品質自体がHelixの自律成熟度に依存するという循環的リスク（circular dependency）も併存している[16]。

比較項目	**Figure 02** 世代 **(2024-2025)**	**Figure 03** 世代 / **BotQ** 量産構想 **(2025-)**	生産技術・コスト面での工学的意義
主な構造加工工法	CNC切削加工中心（試作・小ロット型）[6]	ダイカスト、射出成形、プレス成形、ディップ成形[6]	削り出し工数と材料歩留まりの劇的改善およびサイクルタイ

			ム短縮
部品構成・設計思想	機能別部品・中継基板の積層（高複雑度）[1]	部品点数削減・多機能部品統合・構造バッテリー化[6]	組立工数の圧縮とセル・トゥ・パック比率向上による小型軽量化
コスト削減実績・報道	商用初期機（公式価格非公開、外部推定8.5万～13万米ドル）[16]	バッテリー78%減（公式）、全部品90%減（TIME報道）[14]	金型投資償却に伴う量産スケーリングでの損益分岐点引き下げ
製造体制・ライン能力	少数バッチ組立（BMW実証等向け）[31]	自社工場BotQ（MES統合、年産1.2万台、4年10万台目標）[6]	外部委託を排した高速設計イテレーションと全工程トレーサビリティ
生産実績（2026年7月時点）	2025年11月より退役開始、2026年9月ほぼ全機退役[7]	BotQにて累計1,000台製造発表（社内・パイロット向け中心）[13]	実運用データ取得（フリート学習）を担保する初期量産基盤の確立

第2章 Figure 02およびFigure 03の全体主要諸元とオンボード計算・電力アーキテクチャ

2.1 世代別ハードウェア諸元の定量的進化と数値整合性の検証

Figure AIのプラットフォームは、2023年5月に初歩行した第1世代「Figure 01」、2024年8月6日に発表され2025年11月～2026年9月にかけて退役した第2世代「Figure 02」、そして2025年10月9日に発表された第3世代「Figure 03」へと短期間で刷新された[6]。各世代の主要諸元を精密に比較する際には、公式発表値と二次データベース・過去記載との間の数値差異を正確に押さえておくことが不可欠である。

寸法・質量において、Figure 01は全高1.68 m（5フィート6インチ、一部カタログで170 cm表記）、質量60 kg、可搬重量20 kg、最高速度1.2 m/s、全身自由度41と記録されている[9]。Figure 02では胴体へのバッテリー内蔵や外骨格構造、16自由度ハンドの実装に伴い重量が増加し、全高約168 cm（5フィート6インチ、一部報道で167 cm）、質量約70 kg（68～70 kg）と広く報じられた（ただし2024年8月の公式リリース本文には身長・重量・稼働時間の数値明記がなかった点に留意）[3]。続くFigure 03の公式スペックでは全高5フィート8インチ（約173 cm、1,727 mm）、質量61 kg、可搬重量20 kg、稼働時間5時間、最高速度1.2 m/sが確定値として示されている[18]。ここで注視すべき数値の揺れが2点ある。第一に、Figure AIの公式ブログがFigure 03を「Figure 02比で質量9%減」と説明している一方で、70 kgから61 kgへの変化は計算上約12.9%の軽量化となる点であり、Figure 02最終量産試作仕様の実測重量との差異（約67 kg相当）または計測状態の違いを示唆している[6]。第二に、Figure公式サイトの一部アーカイブ（figure.ai/figure）および初期技術調査では「Weight 24KG / Runtime 2HR / Speed 0.5M/S」という異常に低い数値が一時記載

されていた履歴が存在するが[19]、現在は5'8"・61 kg・20 kg・5時間・1.2 m/sが公式仕様として定着している[18]。
可搬重量や稼働時間、自由度の解釈にも厳密さが求められる。Figure 02の産業用作業ペイロードはBMW発表ベースで20 kgである一方、一部資料が「両手合わせて最大25 kgを保持可能（hand bearing strength）」とした記述からペイロード25 kgと記載する例がある[10]。また一部二次記事に見られる「20時間以上連続稼働」という表現は、工場の1日あたり複数シフト稼働条件と1充電あたりの稼働時間（約5時間と広く報道）を混同した誤記の可能性が高い[25]。さらにFigure 02およびFigure 03のいずれも、公式スペックカード上では全身の総自由度（DoF）が非公開となっており、外部サイト間で26 DoF、30 DoF、35 DoF、40+ DoFと推定値が割れている点は明確な未開示領域である[10]。

Figure 01 / Figure 02 / Figure 03 世代別ハードウェア諸元比較表

諸元項目	**Figure 01 (2023-2024)**	**Figure 02 (2024-2025)**	**Figure 03 (2025-)**	数値検証・設計変化の要点
全高	168 cm (5 ft 6 in)[9]	約168 cm (5 ft 6 in 報道)[10]	約173 cm (5 ft 8 in 公式)[18]	Figure 03で全高約5 cm拡大し作業リーチを最適化
機体質量	60 kg[9]	約70 kg (68-70 kg 報道)[19]	61 kg (公式値、02比9%減表記)[6]	部品削減とソフト外装化によりF.01水準へ再軽量化
可搬重量	20 kg[9]	20 kg (両手保持最大25 kg表記有)[10]	20 kg (公式)[18]	軽量化しつつ20 kgの産業・家庭向け可搬能力を維持
全身自由度 (DoF)	41 DoF[9]	公式非公開 (片手16 DoF公式、外部26-41)[10]	公式非公開 (外部推定30-40+)[15]	02で片手16 DoF確立、02/03とも全身DoF総数は非開示
最高歩行速度	1.2 m/s (約4.3 km/h)[9]	1.2 m/s (一部4.8 km/h報道有)[3]	1.2 m/s (公式)[18]	歩行速度よりも全身協調の安定性と作業タクトを優先

バッテリー容量	1.5 kWh未満相当推計 (バックパック式)[9]	2.25 kWh (胴体内蔵型、01比50%超増)[12]	2.3 kWh (構造胴体型、01比94%密度向上)[14]	外部背負い式から胴体構造部材への統合により重心最適化
稼働時間 / 充電	5時間 / 有線充電[9]	約5時間 / 有線約90分 (いずれも報道値)[8]	5時間 / 足部2 kWワイヤレス充電 (公式)[6]	充電端子接続作業を排除し自動ドッキング稼働を実現
外装・配線構造	露出フレーム・外部露出ハーネス[9]	荷重支持外骨格・完全内蔵ケーブル[10]	洗濯可能ソフトテキスタイル・多密度フォーム[6]	02は工場耐環境性重視、03は家庭安全性と着脱保守性を両立
計算・視覚構成	単機GPU系・標準カメラ構成[11]	デュアルNVIDIA RTX GPU (01比3倍)・RGB 6台[11]	チップ非公開・2倍FPS・1/4遅延+パームカメラ[6]	03で10 Gbps mmWaveデータオフロードと3g触覚を追加

2.2 オンボード計算基盤（SoC / デュアルGPU構成）とサーマルマネジメント

クラウド通信の遅延や工場内無線環境の影響を排除してVLM・VLA推論と全身運動制御をローカル完結させるため、Figure 02は初代機Figure 01比で3倍以上のオンボードAI推論演算能力を搭載して設計された[10]。NVIDIA社の公式技術ブログは、Figure 02が「2基目のNVIDIA RTX GPUベースモジュール」を追加実装したデュアルGPU構成であることを明記しており、これにより視覚言語推論・音声対話・運動生成をすべて機体内で処理している[8]。なお、一部の第三者比較サイトは「Dual NVIDIA Orin」および「アクティブ時消費電力450 W・アイドル時50 W」といった具体的数値を掲載しているが[33]、これらはFigure AIやNVIDIAの一次公式情報で確認された数値ではなく、現時点での確定事実は「Figure 02がNVIDIA RTX GPUベースモジュールのデュアル搭載によってFigure 01比3倍の演算・AI推論能力を獲得した」という点に限定される[11]。

Figure 03では、搭載プロセッサやSoCの具体的型番・消費電力は非公開とされている[6]。しかし、同機で稼働するHelix 02の制御アーキテクチャからは要求されるエッジ計算負荷の高さが読み取れる。Helix 02は、全身バランスと運動力学を担う学習済み全身コントローラ「System 0」を1 kHz（1ミリ秒周期）で駆動しつつ、視覚・触覚・言語入力から関節目標値を出力する「**System 1**」を200 Hz（5ミリ秒周期）で並走させている[28]。またFigure 03のビジョン処理は従来比2倍のフレームレートと1/4の低遅延化を謳っており、高帯域なセンサー入力をオンボードでリアルタイム処理する構成をとる[6]。加えて、計算基盤の外部連携機能として10 Gbpsのミリ波（mmWave）ワイヤレスデータオフロードとOTA更新用Wi-Fiを搭載し、充電スタンド待機中等にフリート全体で数テラバイト規模の実稼働データを中央学習インフラへ高速アップロードする仕組みを備えている[6]。

高密度パッケージングされた計算基板とアクチュエータの放熱（サーマルマネジメント）に関しては、主計算機モジュールの具体的な冷却機構（強制空冷か液冷か、ヒートシンクの材質・放熱経路）は公開されていないものの、2つの重要部位について明確な熱設計の開示がある。第一に、

Figure 02の前腕部（手首3自由度駆動域）が狭小空間と熱的制約によって最大の故障原因となった教訓から、Figure 03では前腕の通信分配PCBを撤去して手首モーターコントローラをメインコンピュータへ直結し、局所発熱源の排除とサーマルマネジメントの簡素化を達成している[1]。第二に、Figure 03のバッテリーパックではダイカストアルミ筐体へアクティブ冷却部品を直接統合することで熱抵抗を抑え、2 kW急速充電時にも簡素な強制対流空冷（forced convection cooling）で熱処理できる設計を実現した[14]。

2.3 胴体内蔵型カスタムバッテリーパック（2.25 kWh～2.3 kWh）と重心・安全設計

Figure 01の最大の外形的制約であった「背負い式バックパック型バッテリー」から脱却し、Figure 02では**2.25 kWh**のカスタムバッテリーパックを胴体（トルソー）内部へ完全統合した[9]。Figure 01比で50%以上のエネルギー増加（ここからFigure 01は1.5 kWh未満相当と推計される）により、約5時間（1シフト作業に準ずる稼働時間、充電約90分と広く報告）の運用基盤を確立するとともに、重量物であるバッテリーを背部張り出し位置から胴体中心軸付近へ移設したことで、二足歩行時の重心（CoG）安定性と旋回慣性モーメント、さらには狭隘な溶接セル内での背面干渉リスクを劇的に改善した[8]。

2025年7月に詳細な技術開示が行われたFigure 03の「F.03バッテリー」では、エネルギー貯蔵機構と機体骨格を完全に融合させた構造用バッテリー（Structural Battery）が実現された[14]。総容量は2.3 kWh（最大性能出力時で5時間稼働）へ微増し、F.01比でエネルギー密度**94%**向上、同時に金型量産プロセスと部品統合によってF.02比で**78%**のコスト削減を達成している[14]。高強度プレス鋼板、ダイカストアルミニウム、構造用接着剤から成る筐体自体が胴体の主荷重負担部材として機能することで高いセル・トゥ・パック比率を確保しつつ、あらゆる姿勢から**1**メートル高のコンクリート面へ落下させても耐える機械的衝撃強度を備えている[14]。

産業工場および一般家庭への導入を前提に、F.03バッテリーの安全設計は極めて多層的である[14]。個々のセルはUN・UL・IEC規格に適合する2重の内部ヒューズを備え、さらにセル間を接続するワイヤーボンド（wirebond interconnect）の幾何形状自体を過電流溶断ヒューズとして機能するよう設計している[14]。万が一単一セルで熱暴走が生じても、熱絶縁性ポッティング材と急速熱拡散設計により隣接セルへの熱連鎖（propagation）を遮断し、特許技術を含む多機能フレームアレスター（火炎防止）ベントによってパック外への火炎噴出を物理的に阻止する[14]。認証面では輸送安全基準である**UN38.3**認証の取得を完了しており[6]、米国OSHA認定試験機関（NRTL）と策定した23項目の一次試験（機械ストレス、充放電サイクル、温度ストレス、**EMI**耐性を含む）から成る**UL2271**認証についても取得手続きを進めている（2025年7月時点の公式発表では「in process」と記載、一部二次データベースでは取得済みと表記）[14]。充電方式はFigure 02の有線接続から一変し、両足裏に**2 kW**のワイヤレス誘導充電コイルを内蔵することで、ロボットが充電マット上へ自律歩行して乗るだけで無人充電が完了する運用を実現した[6]。なお、使用セルの正極材化学組成やセル形状、公称電圧（一部比較記事にある52 V表記等[47]）についてFigure AIからの公式開示はない。

2.4 LiDARを排した純視覚（Vision-only）6カメラシステムと音響・パームカメラ統合

環境認識システムにおいて、Figure AIは外部LiDARや専用深度センサを搭載せず、**6**台のオンボード**RGB**カメラ群を用いた純視覚（**Vision-only**）アプローチを一貫採用している[8]。Figure 02では頭部を含む機体各所に計6台のRGBカメラを配置し、死角のない360度周囲カバレッジと3D空間知覚を実現した[8]。プレス工場の環境では光沢のある鋼板表面がLiDARの赤外レーザーを乱反射させて深度ノイズを生みやすいこと、また可動部や高価な光学測距部品を排して「画像ピクセルから直接行動を生成する（Pixels-to-Action）」VLAモデルとデータ形式を統一できることが純視覚アプローチの合理的根拠となっている[6]。なお、6台のカメラが具体的に胸部や背面のどの位

置へ分散配置されているか、あるいは魚眼レンズやステレオペア構成をとっているかといった詳細な光学仕様・レンズ構成は一次公式資料では公開されていない。
Figure 03のビジョン系は、人間の遠隔操作（テレオペレーション）向けではなく「Helixモデルがリアルタイム制御に必要とする高密度知覚ストリーム」に最適化して再設計された[6]。Figure 02比でフレームレート**2**倍、レイテンシ**1/4**（**4**分の**1**）、カメラ**1**台あたりの視野角（**FOV**）**60%**拡大、さらに被写界深度の拡張を達成している[6]。加えて、コンテナや棚・治具の奥へ腕を差し込んだ際に頭部カメラが手先や対象物を捉えられなくなるオクルージョン問題を解消するため、左右の手のひら（パーム）に広角・低遅延カメラを各**1**基内蔵し、手元直近の視覚フィードバックを途切れさせない多重構成とした[6]。音声対話用のオーディオ系も強化され、Figure 03ではスピーカサイズをFigure 02比2倍・出力を約4倍へ増強するとともにマイク配置を最適化し、工場や家庭環境下での音声対話明瞭度を高めている[6]。

第**3**章 車体溶接工場（**Body Shop**）に耐える外骨格構造と可動ケーブル完全内蔵設計

3.1 BMWスパータンバーグ工場（**X3**車体溶接工程）の過酷環境と稼働**KPI**実績

自動車生産技術の観点からFigure AIの実力を測る上で最も信頼性の高いベンチマークは、2024年8月の数週間にわたる初期試行を経て、2025年に米国サウスカロライナ州BMWグループ・スパータンバーグ工場の稼働中ラインで実施された**11**カ月間の本格パイロット運用である[1]。BMWが検証の場として意図的に選定したのは、塗装や最終組立よりも環境負荷の厳しい車体溶接工場（ボディショップ）のBMW X3生産ラインであった[1]。
Figure AIの2025年11月19日公式総括レポートおよびBMW公式発表によれば、Figure 02は月曜～金曜の1日10時間シフトで稼働を続け、累計稼働時間**1,250**時間以上、累計移動歩数は推定120万歩以上（200マイル＝約320 km超）に到達した[1]。具体的な作業内容は、ラックやビンからプレス成形済みのシートメタル板金部品をピックアップし、スポット溶接用治具（ウェルドフィクスチャ）へ精密にセットする工程であり、投入完了後に6軸の産業用溶接ロボットが自動溶接してメインラインへ供給する協調作業であった[1]。この実ライン運用を通じてFigure 02は90,000点以上の板金部品を投入し、**30,000**台以上の**BMW X3**車両の生産に貢献している[1]。
同現場で課された3つの重要業績評価指標（KPI）は、汎用ヒューマノイドが自動車工場のタクトへ適合するための厳格なハードルを示している。総サイクルタイム要件は84秒以内とされ、そのうち溶接治具のドアが開いてから3点の板金部品を投入し終えるロード工程を**37**秒以内で完了することが求められた[1]。位置決め精度の目標はシフトあたりの3点全品正常投入成功率**99%**超（**>99%**）であり、各部品をわずか**2**秒以内で**5**ミリメートル以下の公差に収める精密嵌合が要求された（なお二次媒体の一部が99%達成と報じている一方、Figure公式総括では>99%を目標値と位置づけている点には区別が必要である）[1]。さらに人的介入（Human Interventions）の目標は、1シフトあたりの一時停止・リセット回数ゼロ回と設定された[1]。
自動車のボディショップは本来、スポット溶接電流に起因する強大な過渡電磁ノイズ（EMI）、溶接スパッタおよび酸化鉄・金属粉塵の浮遊、治具周りの輻射熱や温湿度変化、加工油が付着した鋭利な鋼板端面、さらに鋼製ラック・治具ドアとの物理接触が日常的に発生する環境である。ただし一次公開資料上で明確に確認できる環境・負荷要因は「溶接治具への板金挿入作業」「狭小な空間と熱的制約」「10時間シフトの反復稼働」「F.03バッテリーでのEMI耐性試験実施」等であり[1]、工場現場の電磁界強度実測値や粉塵濃度、機体のIP保護等級は公式には公開されていない。

3.2 構造荷重を担う「外骨格（**Exoskeleton**）スキン構造」と**F.03**のソフト外装への進化

従来のロボットが内部フレームを非構造カバーで覆う方式を採るのに対し、Figure 02は機体表面のマットブラックの外装シェル自体が構造荷重を支える外骨格（**Exoskeleton**）アーキテクチャを採用した[10]。

この外骨格構造が車体工場にもたらした工学的利点は、第一に非構造カバーの無駄を省いた高い剛性対重量比にあり、20 kg級部品保持時にも5 mmという厳しい位置決め公差を支える構造剛性を担保した[1]。第二に、外皮が荷重を受け持つことで四肢内部の中空容積が拡大し、後述するハーネス・配線類の完全内蔵スペースを確保できた点である[38]。第三に、継目の少ない滑らかな外骨格表面が、工場内の粉塵・スパッタの内部侵入および治具等との物理的接触から内部電子基板を守る保護装甲として機能した点である[10]。なお、Figure 02の主要構造部品がCNC切削加工中心で製作されていたことはFigure AI公式で明記されているが[6]、使用された具体的なアルミニウム合金種別（航空機グレードアルミの番手等）や複合材（CFRP）の適用有無・比率といった材料仕様は非公開である。

一方、次世代機Figure 03では主用途を一般家庭環境へも拡大するため、外装設計が大きく転換された。硬質なCNC金属外装を廃し、挟み込みリスクのあるピンチポイントへ多密度フォーム（multi-density foam）を配置した上で、工具不要で着脱・洗濯可能なソフトテキスタイル（軟質繊維外装）で機体を覆う構造へ変更された（外装カバーシステムに関しては特許US20250242500A1等も出願されている）[6]。ただしこれは産業用途との決別を意味しない。Figure 03は業務内容に応じて外装ガーメントを換装でき、過酷な工場現場向けには耐切創性・高耐久素材（cut-resistant and durable materials）の産業用外装を選択できる設計となっている[6]。実際、2026年6月からはBMWスパータンバーグ工場のHall 52等において、未整列コンテナからの部品選別や台車牽引を行う物流シーケンシング工程へFigure 03が投入されており、用途別に着せ替え可能な多層保護外装へと進化していることが確認できる[7]。

3.3 可動ケーブル完全内蔵（**Integrated Cabling**）と前腕・手首の故障教訓に基づく再設計

Figure 01では各関節の外部に関節跨ぎのケーブルループが露出しており、生産ラインの治具やラックへの引っ掛かり断線が重大な実用障壁となっていた[9]。Figure 02はこのリスクを根絶するため、すべての電力・通信ハーネスを関節および外骨格内部へ貫通収容する可動ケーブル完全内蔵設計（Integrated Cabling）へと移行した[10]。外部配線を皆無とすることで、工場設備との干渉による断線や機械的摩耗のリスクを構造レベルで遮断した意義は極めて大きい。

しかし、BMWスパータンバーグ工場での11カ月・1,250時間以上の連続稼働は、外部から見えない「内部配線と狭小関節の真の脆弱性」を露呈させた。Figure AIの公式総括によれば、1,250時間超の稼働において機体全体のハードウェア故障は最小限に抑えられたものの、最大のハードウェア故障発生部位（**Top hardware failure point**）となったのは「前腕部（**Forearm**）」であった[1]。

Figure AIが公式に開示した故障要因の解剖は極めて示唆に富む。前腕部は**3**自由度（**3 DoF**）の手首機構を成立させるために極めて狭い空間パッケージングと厳しい熱的制約を強いられる領域である[1]。Figure 02の前腕部には、メインコンピュータと手首アクチュエータ群との間で通信信号を分配するマイクロコントローラ搭載PCB（通信分配基板）が内蔵されており、そこから多軸に動く手首関節を跨いで動的ケーブル（dynamic cabling）が配線されていた[1]。10時間シフトで何万回もの屈曲・捻回運動を繰り返す現場環境下において、狭い前腕内の発熱蓄積と動的ケーブルへの複合屈曲・ねじり疲労が重畳し、この部分が集中的な故障ボトルネックとなったのである[1]。

可動ケーブルや電子部品のR&D観点から見れば、中空関節を通過するロボットハーネスには数百万回レベルの屈曲・捻回に耐える導体素線設計、低摩擦ジャケット、高耐久コネクタ・スリップリング、そして溶接機周辺の電磁ノイズを防ぐ柔軟なEMIシールドが求められる（Figure AIは採用ケーブル・コネクタ・スリップリングの個別メーカー名や屈曲試験回数・シールド規格値は非公

開としている）。しかし注目すべきは、Figure AIがBMWの失敗を受けてFigure 03で選んだ解決策が「より高耐久な中継ケーブルへの置き換え」ではなく、「故障する基板と動的ケーブル自体を設計から消し去る」というアーキテクチャの抜本刷新だった点である[1]。
Figure 03では手首周辺の電子設計を全面的に再構築（re-architecture）し、前腕の通信分配基板と動的ケーブルの双方を完全に廃止（eliminate）した[1]。各手首アクチュエータのモーターコントローラが中間分配基板を介さずメインコンピュータと直接通信する方式へ切り替えたことで、部品点数・接点数・発熱源を大幅に削減し、信頼性向上とサーマルマネジメントの簡素化を同時に達成した[1]。さらに現場保全における平均修復時間（MTTR）の観点でも、Figure 03の工具不要で瞬時に着脱できるソフト外装と簡素化された直結手首構造は、現場での点検アクセス性と交換容易性を高める設計意図を示している（ただし具体的なMTTR目標数値の公表はない）[1]。

評価項目 / サブシステム	**Figure 02 (BMW**スパータンバーグ実績**)**	**Figure 03 (**実運用反映後の再設計**)**	耐環境性・信頼性・**MTTR**改善効果
実戦負荷条件・KPI	10hシフト、1,250h、9万部品、5 mm公差/2秒[1]	2026年6月よりBMW物流シーケンシング実証開始[7]	溶接治具投入から不定形部品ピッキング・台車搬送へ領域拡大
外部環境防護構造	荷重支持型外骨格（CNC切削シェル、完全密閉）[6]	工具レス着脱・洗濯可能なソフトテキスタイル＋多密度フォーム[6]	03は産業用途向けに耐切創・高耐久ガーメントへの換装に対応[6]
ハーネス配線思想	関節・外骨格内への完全内蔵（露出配線ゼロ）[10]	内蔵配線の維持＋手首系の動的ケーブル排除[1]	溶接治具やラックへのケーブル引っ掛かり断線リスクを恒久排除
前腕・手首電子構造	前腕内にMCU搭載通信分配PCB＋動的ケーブル配置[1]	分配PCBおよび動的ケーブルを廃止し主計算機へ直結[1]	BMW稼働での最大故障原因（熱・屈曲疲労・実装密度）を根絶
現場保守性 (MTTR)	硬質外骨格分解を要する整備構造（詳細時間非公開）	工具レス着脱外装＋簡素化手首・側面識別ディスプレイ[1]	故障切り分けと外装・モジュールの現場交換所要時間を短縮

第4章 カスタム高トルク密度アクチュエータと関節駆動機構

4.1 関節別最適化カスタム電動アクチュエータの諸元と内製設計思想

Figure AIは油圧駆動方式を採らず、効率性・静粛性・電流ベースの力制御精度に優れるオール

電動カスタムアクチュエータ（All-electric custom actuators）の完全内製路線を一貫している[10]。同社は人間スケールの狭小なリンク内に各関節の負荷特性へ最適化した動力源を収めるため、モーター、機械要素、制御エレクトロニクス、位置・トルクセンサに至るまで自社内で一貫設計している[5]。

Figure 02の発表資料および主要技術メディア報道（New Atlas、Startupselfie等）を通じて公開されている主要関節の出力トルクおよび可動域（RoM）は、肩関節が**50 Nm**（**36.8 lb-ft**）・可動域**148**度、膝関節が**150 Nm**（**110.6 lb-ft**）・可動域**135**度、そして股関節が**150 Nm**・可動域**195**度である[12]。ただしエンジニアリング評価上極めて重要な注意点として、Figure AIはこの50 Nm / 150 Nmが瞬間最大（ピーク）トルクであるか連続定格（サーマルリミット）トルクであるかを区別して公表しておらず、肘・足首の個別トルク値およびアクチュエータ単体のトルク密度（Nm/kg）の絶対値も非公開である[19]。一方、Figure 03においては自社設計アクチュエータの世代更新により、Figure 02比で駆動速度が2倍（2x faster speeds）に達し、トルク密度（**Nm/kg**）が大幅に向上したことが公式に発表されており、ピック・アンド・プレイス作業や家事動作のタクト大幅短縮に直結している[6]。

4.2 減速機構の使い分けと特許ポートフォリオからの機構解析

Figure AIは機体スペック表上で各関節に搭載している具体的な減速機型式や減速比を開示していないものの、同社が取得・公開している米国および国際特許ポートフォリオ（Google Patents公開公報）からは、設計チームが実装・想定する駆動伝達メカニズムの全体像を特定できる。

Figure AI Inc.保有の関節・アクチュエータ関連特許（US20250269518A1、WO2025151892A1、US12611766B2、USD1137349S1、US20250312911A1等）の明細書には、ロボット関節の駆動伝達要素として遊星歯車機構（**Planetary gearboxes**）、波動歯車装置（**Strain wave gear / Harmonic drive**）、サイクロイド減速機（**Cycloidal reducers**）、ベベルギア・差動歯車システム（**Bevel gear / Differential gear systems**）、およびアクチュエータ用クラッチ機構（Clutch for an actuator）が明記されている[60]。

二足歩行ロボットの一般力学とこれらの特許開示事項を照合すると（各関節への厳密な割当と減速比が非公開である前提での工学的推論）、下肢と上肢での合理的な機構使い分けが浮かび上がる。まず股関節や膝関節（150 Nm級[12]）のように二足歩行時の接地衝撃を受け止めながら動的なバランス制御を行う脚部関節には、一般にフラットで大径のアウターロータBLDC（パンケーキ型トルクモーター）と低～中減速比の遊星歯車機構を組み合わせた準ダイレクトドライブ（**QDD**）構成が適合する[62]。低減速比の遊星歯車はロータの等価反射イナーシャを抑えて高い逆駆動性（バックドライバビリティ）を保つため、着地時の衝撃荷重で歯車を破損させず、モーター電流ループによる滑らかなコンプライアンス制御を可能にする。なお、一部第三者データベースがFigure 03のアクチュエータを「Integrated Series-Elastic（直列弾性統合型）」と記載している例もあるが[42]、Figure AIの公式技術発表には主要関節への物理的直列ばね（SEA）全面採用の記載はなく、未確認の分類として慎重に扱う必要がある。他方、肩（50 Nm[12]）・肘・手首などの上肢関節は、水平リーチ姿勢での20 kg荷重保持と2秒以内の5 mm位置決めという高い静止保持剛性・低バックラッシュ性が不可欠であるため、波動歯車装置（ハーモニックドライブ）やサイクロイド減速機、さらに手首Yaw/Wave等の3軸集積部にはUS20250269518A1記載の差動ベベルギア機構を適用するのが機構学的に合理的である[1]。

4.3 二足歩行の衝撃吸収と精密板金ハンドリングを両立する剛性・コンプライアンス制御

実生産ラインで二足歩行ヒューマノイドを成立させる核心は、「歩行時の接地衝撃を柔軟に逃がすコンプライアンス（低インピーダンス）」と「手先での高剛性・精密位置決め（高インピーダンス）」という背反する力学要求の動的両立にある。Figure AIはこの課題に対し、ハードウェアのバックドライバビリティ追求に加えて多層化された高速学習制御系を構築している。

同社の歩行制御は、Figure 01のトルク制御ベース動的歩行（2023年）からFigure 02でのシミュ

レーション強化学習（RL）ベース歩行（2024年）へと進化し、さらにHelix 02（2026年1月）において全身統合アーキテクチャへと発展した[9]。Helix 02は、全身の動的バランスと接地・衝撃吸収を担う学習済みコントローラ「System 0」を1 kHz（1ミリ秒周期）で回しつつ、上位の**VLA**ポリシー「**System 1**」が200 Hz（5ミリ秒周期）で全身の関節目標軌道を生成する階層構造をとる[28]。さらにFigureの公式技術解説によれば、機体が環境や操作対象物に加えている接触力（フォース）の物理状態がニューラルネットワークの入力状態へ直接統合されている[67]。これにより、工場床面を歩行する際には低反射イナーシャ特性と1 kHz全身制御で衝撃や微小段差を吸収し、溶接治具へ板金を挿入する局面では手先位置剛性を維持しながら、治具ピン等との接触反力を感知した瞬間に柔軟な倣い動作へシームレスに移行する制御が可能となっている[1]。

関節部位	**Figure 02** 公表トルク	**Figure 02** 可動域	特許記載・適合駆動機構	**Figure 03** 進化・未公開パラメータ
肩関節 (Shoulder)	50 Nm (36.8 lb-ft)[12]	148度[12]	波動歯車・遊星歯車・カスタムBLDC[5]	駆動速度2倍・トルク密度向上（絶対値非公開）[6]
肘・手首 (Elbow / Wrist)	非公開	手首3 DoF (02公表)[1]	差動ベベルギア・アクチュエータ軸A7 (US20250269518A1)[62]	前腕基板・動的ケーブル廃止、直結通信化[1]
股関節 (Hip)	150 Nm[12]	195度[12]	遊星歯車 / QDD適合 (US20250312911A1股関節機構)[62]	速度2倍・1 kHz全身制御 System 0対応[6]
膝関節 (Knee)	150 Nm (110.6 lb-ft)[12]	135度[12]	遊星歯車 / サイクロイド・衝撃耐性設計[62]	61 kg軽量化による脚部慣性負荷軽減[18]
足首・足部 (Ankle / Foot)	非公開	非公開	複合減速機構（詳細非公開）	足裏へ2 kWワイヤレス受電コイル統合[6]

第5章 第4世代～第5世代高自由度ハンド（16 DoF）の機構特性と触覚センシング

5.1 人間同等スケール16自由度ハンドの駆動メカニズムと可搬保持力

汎用ヒューマノイドが専用グリッパを持つ産業用ロボットアームと決定的に異なる価値を生み出す領域が「器用な手（エンドエフェクタ）」である[18]。Figure 02は、人間と同等の寸法・形状の中に**16**自由度（**16 DoF**）を集約した第**4**世代デクスタラスハンドを搭載し、人間並みの把持強度で両

手協調により最大25 kgを保持できる能力（BMW等での公式作業ペイロード定格は20 kg）を実現した[10]。なお、外部の技術データベース（Aparobot等）の解説によれば、Figure 02の第4世代ハンドは各指に統合モーターおよびセンサユニットを備え、手首周りの全配線を内部収容していたと報告されているが[8]、一般に16〜20個の小型モーターを指部へ直接配置する構成は「発熱、単指発生力の制限、コスト増大」という機構上のトレードオフを抱えやすい[69]。

Figure AIが取得したエンドエフェクタ機構特許（**US12420434B1**「Kinematics of a mechanical end effector」、2025年9月23日登録）および関連出願（WO2025151892A1等）を参照すると、同社が開発した手指リンク機構の巧みな設計が見て取れる[64]。特許US12420434B1に開示された指アセンブリは、基節（proximal）・中節（medial）・末節の各アセンブリを複数のピボット関節軸と駆動リンクで連結し、基節部にバイアススプリング（biasing spring）を組み込んで中節側への受動的復元力・コンプライアンスを与えるリンク連動機構を構成している[70]。また関連特許WO2025151892A1では、駆動ギアから屈曲軸周りのフレクションギアへ回転力を伝達するギア駆動構造と触覚センサアセンブリの統合が開示されている[64]。Figure 03では第3章で述べた手首配線の直結化・シンプル化に伴い、ハンド全体がFigure 02よりもスリムかつ柔軟な次世代（第5世代相当）へと刷新された[1]。ただし注意すべき点として、Figure 03の公式スペックではハンド単体の自由度数が非公開となっており、一部比較サイトはFigure 02を踏襲して16 DoFと表記しているが一次公式の裏付けはない[15]。

5.2 自動車用薄板板金（シートメタル）把持における摩擦・表面材質・コンプライアンス設計

車体溶接ラインで扱われるプレス成形薄板板金（シートメタル）の把持は、ロボットハンドにとって最も難易度の高い対象の一つである。プレス加工時の防錆・潤滑油膜によって表面の静・動摩擦係数が著しく低下する上、切断端面（シェアエッジ）が極めて鋭利であるため一般的なゴム製指先を容易に損傷させ、さらに薄板特有の反り・しなり（弾性変形）によって把持姿勢が狂いやすいためである。しかも溶接治具へのセット時には5 mm公差以内でピンへ嵌合させねばならず、搬送中の微小な滑りは即座にライン停止や不良につながる[1]。

この難題に対するFigure AIの設計解は、構造・材料・防護外装の3つのアプローチから確認できる。第一に、特許**US12420434B1**に明示された掌（パーム）表面の形状・粗面化設計である[70]。同特許はハウジング背面側（SB）を滑らかにする一方、ワークと接する掌側（SP）を平坦または略平坦に形成することで平板ワークとの接触面積を最大化し、ロボットの手先アプローチ角の許容幅を広げるとともに、掌表面に複数の接触エリア（contact areas 61.4）を配置して表面を意図的に粗面化・テクスチャ化することで高いグリップ性能を引き出す構造を開示している[70]。

第二に、Figure 03の公式仕様で導入された「より柔らかく順応性の高い指先（softer, more adaptive fingertips）」の実装である[6]。剛体グリッパが板金を線接触や点接触で挟む場合とは異なり、柔軟に弾性変形してワークの表面形状へ追従・密着する指先パッドは、油膜を介しても真実接触面積を大幅に増大させ、板金の反りや傾きを吸収しながら安定した保持力を生み出す[6]。

第三に、鋭利な板金エッジや摩耗環境に対する物理的保護として、Figure 03では耐切創性・高耐久素材（cut-resistant and durable materials）で作られた着脱式の保護ガーメントを外装オプションとして装着できる[6]。ただし、指先パッドに使用されている高分子エラストマの具体的材質（シリコーン、ウレタン、フッ素系等）、ショア硬度、耐油膨潤性、および交換寿命サイクルは非公開であり、機能材料メーカーの観点からは実運用耐久性の重要な評価ポイントとなる[36]。

5.3 3グラム検知高感度触覚センサとパームカメラによる閉ループ把持・滑り予測制御

受動的なゴム材料の摩擦設計に加え、能動的な把持力制御と落下防止を飛躍させたのがFigure 03の複合センシング統合である。Figure 02においてはサードパーティ技術紹介等で指先の歪みゲージ（strain-gauge）系触覚センシング実装が伝えられていたが[72]、Figure 03では長期

信頼性と耐久性を追求してゼロから自社開発した「第1世代・独自指先触覚センサ（1st-gen proprietary tactile sensors）」を搭載した[6]。
この独自触覚センサが誇る定量的ブレイクスルーは、最小検知荷重3グラム（約0.029 N、ゼムクリップ1個分の重量に相当）という極めて高い圧力感度である[6]。3グラム単位の微細な接触荷重変化を指先ごとに高頻度で捉えられることで、壊れやすいガラスや変形しやすい薄板に過剰な握力を加えて傷・歪みを生じさせることなく接触を検知できるだけでなく、Helix 02モデルが「安定した把持状態」と「対象物が滑り始める直前の予兆（impending slip）」をリアルタイムで識別することが可能となった[6]。油膜の付いたシートメタルを持ち上げる際、初期把持力が不足して微小な滑りが発生した瞬間をミリ秒オーダーで捉え、ワークが落下する前に動的に押圧力を補正する閉ループ制御が機能する（なお、この3グラム触覚センサの検出物理方式が静電容量式、ピエゾ抵抗式、光学式、磁気式のいずれであるかは非公開である）。
さらにFigure 03のハンドは、指先の3グラム触覚センシングと両手のひら内部に埋め込まれた広角・低遅延パームカメラを空間的に統合（Vision-Tactile Fusion）している[6]。自動車工場の深いパーツビンや溶接治具の奥に手を伸ばす作業では、頭部メインカメラの視界が腕や構造物で遮蔽（オクルージョン）されやすい。その際、手のひらのカメラが対象物までの最後数センチメートルを至近距離から視認して指の位置合わせを行い、接触した瞬間からは3グラム触覚センサと全身の力覚フィードバックへ制御の主軸を受け渡す[6]。この「頭部広域視覚＋手掌近接視覚＋3g触覚フィードバック」のシームレスな融合が、専用治具や吸引パッドを持たない汎用ヒューマノイドで不定形物から自動車板金までを扱うためのハードウェア上の決定的な差別化要因となっている。

機能・機構要素	第**4**世代ハンド **(Figure 02)**	次世代ハンド **(Figure 03)**	自動車板金・不定形物ハンドリングへの技術的寄与
自由度・保持力	片手16 DoF (公式)、両手最大保持25 kg 報道[10]	全身・手部DoF公式非公開 (媒体推定16 DoF相当)[15]	人間と同等スケールを維持しつつ20 kg級作業負荷に対応[36]
駆動・リンク構造	指内蔵モーター/センサ構成報告、前腕分配基板経由[1]	スリム化構造、特許US12420434B1リンク・ばね・ギア系等[70]	狭小手首の配線・発熱故障原因を除去し耐久性を大幅改善[1]
指先・掌の表面設計	テクスチャ付平坦パーム構想 (特許US12420434B1)[70]	より柔軟で順応性の高い指先パッド (材質非公開)[6]	弾性変形による真実接触面積拡大で油膜付板金の滑りを抑制
触覚センシング性能	歪みゲージ系触覚センシング報告 (分解能非公開)[72]	最小検知力3グラム (クリップ1個分) の自社製触覚センサ[6]	把持安定と「滑り予兆」をリアルタイム識別し落下を未然防止[6]
手元視覚統合	頭部・体幹側カメラ依存（パームカメラなし）[12]	両掌（パーム）に広角・低遅延カメラを各1基内蔵[6]	溶接治具や深型ビンの死角オクルージョン下でも精密嵌合を

			実現[6]

参考文献・一次情報出典一覧

本報告書の数値検証および技術記述は、以下の英語一次公式情報、企業技術解説、特許公報、および主要技術メディアの報告資料に基づいている。

1. Figure AI Official News: Introducing Figure 03 (October 09, 2025) - https://www.figure.ai/news/introducing-figure-03
2. Figure AI Official News: F.03 Battery Development (July 17, 2025) - https://www.figure.ai/news/f-03-battery-development
3. Figure AI Official News: F.02 Contributed to the Production of 30,000 Cars at BMW (November 19, 2025) - https://www.figure.ai/news/production-at-bmw
4. Figure AI Official News: F.03 at BMW - https://www.figure.ai/news/f-03-at-bmw
5. Figure AI Official News: BotQ - https://www.figure.ai/news/botq
6. Figure AI Official News: Helix 02 / Scaling Helix Logistics / Helix Accelerating Real-World Logistics - https://www.figure.ai/news/helix-02 , https://www.figure.ai/news/scaling-helix-logistics , https://www.figure.ai/news/helix-logistics
7. Figure AI Official Corporate / Product Pages: Company / Figure 03 - https://www.figure.ai/company , https://www.figure.ai/figure
8. NVIDIA Official Blog: Figure Humanoid Robot Autonomous - https://blogs.nvidia.com/blog/figure-humanoid-robot-autonomous/
9. BMW Group Newsroom: BMW Group to deploy humanoid robots in production in Germany for the first time / Humanoid robot in Leipzig (2026) - https://newsroom.bmwgroup.com/global/bmw-group-to-deploy-humanoid-robots-in-production-in-germany-for-the-first-time/ , https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2026/humanoid-robot-in-leipzig.html
10. Assembly Magazine: Humanoid Robots Complete Trial Project at BMW Assembly Plant (November 25, 2025) - https://www.assemblymag.com/articles/99678-humanoid-robots-complete-trial-project-at-bmw-assembly-plant
11. New Atlas: Figure steps closer to humanoid robots in workplace and home with F.02 (August 6, 2024) - https://newatlas.com/robotics/figure-02-humanoid-robot-launch/
12. Google Patents (Figure AI Inc.): US12420434B1 (Kinematics of a mechanical end effector) - https://patents.google.com/patent/US12420434B1/en
13. Google Patents (Figure AI Inc.): US20250269518A1 (Wrist/hand kinematics and gear systems) - https://patents.google.com/patent/US20250269518A1/en
14. Google Patents (Figure AI Inc.): US20250242500A1 (Exterior covering system for a humanoid robot) - https://patents.google.com/patent/US20250242500A1/en
15. Google Patents (Figure AI Inc.): USD1137349S1 (Clutch for an actuator for a humanoid robot) - https://patents.google.com/patent/USD1137349S1/en
16. Google Patents: WO2025151892A1 (End effector gear drive and tactile sensor assemblies) - https://patents.google.com/patent/WO2025151892A1/en
17. RoboZaps Technical Audits: Figure 01 Review / Figure 02 Review / Figure 03 Review (2026) - https://blog.robozaps.com/b/figure-01-review , https://blog.robozaps.com/b/figure-02-review , https://blog.robozaps.com/b/figure-03-review
18. Okara AI: Figure AI Valuation and Funding: How It Grew to 39B USD (2026) -

https://okara.ai/blog/figure-ai-revenue-growth
19. NewMarketPitch: Humanoid Robotics Most Advanced (July 2026) - https://newmarketpitch.com/blogs/news/humanoid-robotics-most-advanced
20. BigGo Finance: Brett Adcock on Why Figure Fired OpenAI: 'We Were Running Circles Around Them' (April 30, 2026) - https://finance.biggo.com/news/4a87798e5643704d
21. ITmedia オルタナティブ・ブログ: A Humanoid Robot in Every Home? It's Closer Than You Think w/ Brett Adcock (July 2025) - https://blogs.itmedia.co.jp/serial/2025/07/figureceo2.html
22. Ledge.ai: 人型ロボット「Figure 02」の商業版発表 ー AI搭載167cm/70kgのロボットが専用ケースに梱包され出荷開始 (2024年12月24日) - https://ledge.ai/articles/figure_02_humanoid_robot_commercial_shipping
23. BeeManaged: Figure 03 Guide for Manufacturing and Logistics (2026) - https://beemanaged.com/humanoid-robots/figure-03
24. Aparobot: Figure 02 / Figure 03 / Figure AI Company Profile (2026) - https://www.aparobot.com/robots/figure-02 , https://www.aparobot.com/robots/figure-03 , https://www.aparobot.com/companies/figure-ai

資料4 第1部2：BMW×Figure AIにおけるVLA基盤モデル「Helix」のエッジ推論とSim-to-Real学習パイプライン徹底解剖

エグゼクティブ・サマリー

米国Figure AIは、BMWグループ・スパータンバーグ工場のX3ボディショップ実ラインにおける11カ月間のヒューマノイド実稼働を経て、汎用VLA（Vision-Language-Action）基盤モデル「Helix」を中核とする独自の物理AIスタックを構築した[1]。2025年2月のOpenAIとの提携解消を契機に完全内製化されたHelixは、高次の視覚言語推論を担う7BパラメータのVLM「System 2（7〜9 Hz、約111〜143 ms周期）」と、リアルタイム視覚運動制御を担う80MパラメータのTransformer「System 1（200 Hz、5 ms周期）」を連続潜在ベクトルで結合し、単一ステージの勾配逆伝播によって同時最適化される[2]。さらに2026年1月発表の「Helix 02」では、従来の手書きC++歩行・安定化コード109,504行を完全に撤廃し、1 kHz（1 ms周期）で全身アクチュエータを駆動する10Mパラメータの全身基礎制御層「System 0」を最下層へ統合した3階層構造へ移行している[5]。これらの推論は機体内蔵のデュアルNVIDIA RTX GPUモジュール上で外部クラウドに依存せずローカル完結で実行され、数千体から20万並列を超える物理シミュレーション上のドメインランダマイゼーション（DR）と実機側のkHz級閉ループトルク制御を組み合わせることで、追加調整なし（ゼロショット）の実機展開を実現している[4]。

自動車OEMの生産技術、ロボット制御、および3Dセンシング開発陣が実ライン導入を評価する上では、公開されている実証成果と未公開・制約領域を厳密に切り分ける必要がある。BMWスパータンバーグ工場では累計90,000点以上の板金部品供給、1,250時間以上の稼働、30,000台以上のBMW X3生産への貢献、ならびに2秒以内に5 mm公差へ部品を装填する高精度作業が達成された[1]。一方で、総サイクルタイムは84秒（うち装填37秒）と専用6軸産業用ロボットより低速であり、位置決め精度99%超およびシフト単位での人手介入ゼロ回というKPI目標に対しても、計算上は99%境界値で100サイクルに1回（84秒サイクルなら約2.3時間に1回）の例外発生リスクが残存するため人手復帰プロトコルが不可欠となる[1]。さらに連続1,250時間稼働では前腕部3自由度の配電基板と動的配線が最大の故障要因となった[1]。加えて、Figure AIは搭載GPUの具体的型番、量子化精度や推論エンジン最適化の詳細、DRの数値変動幅、板金光沢・油膜に対する光学レンダリング設定を公開しておらず、本報告書では公開事実と技術的推測を明確に分離して解説する。

【補遺】

BMWスパータンバーグ工場の実証データは、自動車の量産ラインにおける「成功率99%の壁」がいかに高いかを明確に示している。Figure AIは同工場で、1サイクル84秒（うち部品装填37秒）の作業に対し、「位置決め精度99%超」および「10時間シフト中の作業員による介入（チョコ停復旧・リセット）ゼロ回」を目標に掲げた。

しかし、生産技術の視点で試算すると「精度99.0%」では量産ラインは成立しない。99.0%とは「100回に1回ミスが起きる」ことを意味する。84秒サイクルで連続稼働させた場合、100サイクル＝8,400秒（約2時間20分）に1回のペースで不具合が発生し、10時間シフト（36,000秒）あたり平均約4.3回も作業員による復旧介入が必要になる計算だ。

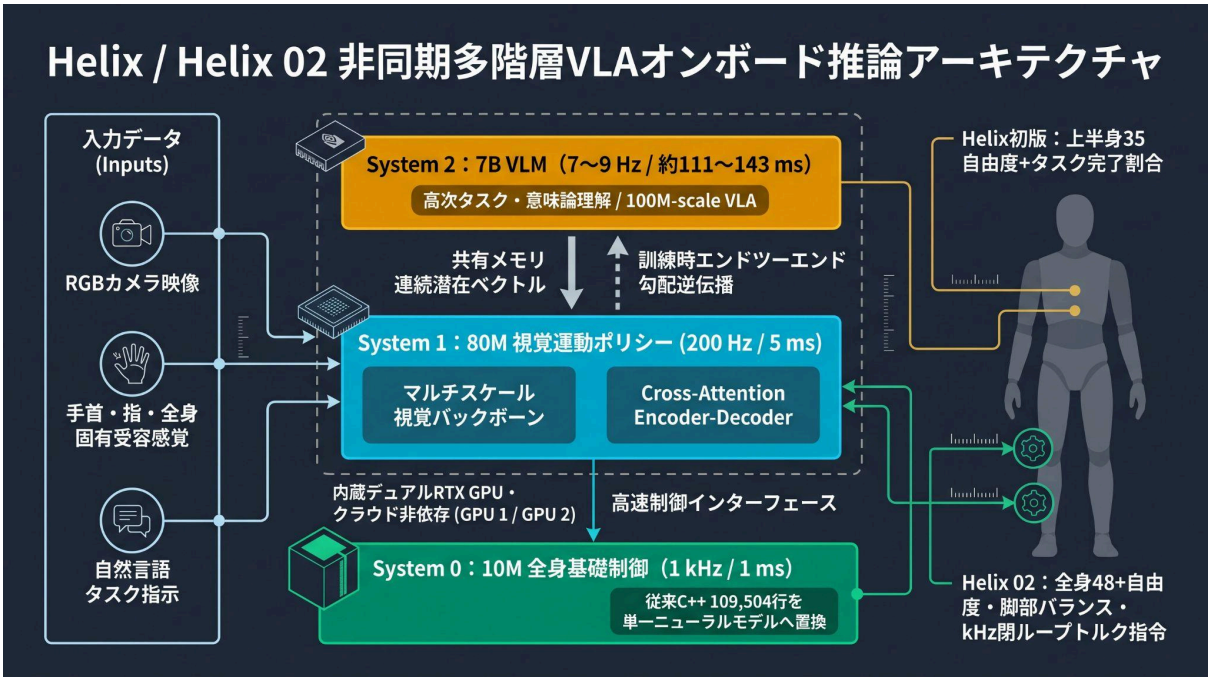
この「残り1%の壁」を突破し、介入ゼロへ近づけるために不可欠なのが、以下の**2**つの仕組みの両輪運用である。

1. 「自動カイゼンと横展開の循環」をつくる仕組み（データフライホイール） 従来の産業用ロボットでは、微妙な位置ズレやチョコ停が起きるたびに技術者が現場へ赴き、1台ずつティーチング修正や治具調整を行っていた。これに対しAIロボットでは、稼働中に発生した「わずかな位置ズレ」や「失敗しかけて持ち直した動作（ヒヤリハットと自己修正の記録）」を自動で回収し、それを教材としてAIモデルを再学習させる。更新されたAIの頭脳（重みデータ）は、スマートフォンのソフト更新のように工場内の全ロボットへ一斉配信される。「**1**台が現場で学んだコツや失敗回避策が、プログラム修正なしで全機体へ共有され、稼働するほど勝手に賢くなり続ける好循環」――これが「データフライホイール（データのはずみ車）」の本質である。
2. 例外発生を前提とした「現場復旧ルール」の設計 どれほどAIが進化しても、工場の照明変化や部品の個体差によって突発的な停止リスクは残る。そのため、異常時にライン全体を止めず即座に製造実行システム（MES）や作業員へ通知し、安全かつ数十秒で作業へ復帰させる現場側の運用設計をセットで構築することが、実ライン導入の成否を分ける。

一言補足ポイント

- 完成車メーカー生技陣向け：「ベテラン作業員が持つ『ちょっと引っかかった時に手首を逃がして入れるコツ』をデータとして吸い上げ、夜間のうちに全ロボットへ標準作業として横展開できる仕組みだと捉えてください。」
- ロボット制御・**FA**開発陣向け：「従来のように例外処理のif-then分岐やPLCラダーを際限なく書き足すのではなく、『失敗しかけてリカバリーした軌道データ』をそのまま学習データに混ぜることで、制御ポリシー自体に粘り強さ（ロバスト性）を持たせています。」
- **3D**ビジョン・センシング**R&D**向け：「現場で照明反射や油膜によって認識が揺らいだ瞬間のカメラ画像と、その時の指先触覚・関節負荷のズレこそが最も価値の高い学習データになり、それがそのまま認識精度の底上げに直結します。」

第1章 外部LLM連携から自社製VLA基盤モデル「Helix」への転換と非同期多階層制御アーキテクチャ



1.1 OpenAI提携解消と垂直統合VLAへの技術的転換点

Figure AIは、コミュニティ沿革資料および外部メディアの報道によれば2024年2月にOpenAI Startup FundやNVIDIA、Microsoft等を含む投資家群から6億7,500万USD（評価額26億USD）のシリーズB資金調達を行うとともにOpenAIとの協業を開始し、第二世代機「Figure 02」へ音声対話や高次推論の統合を進めていた[8]。しかし、その約1年後の2025年2月上旬、CEOのブレット・アドコック（Brett Adcock）氏はOpenAIとの協業契約を終了し、完全に自社開発のエンドツーエンド・ロボットAIシステムにおけるブレークスルーを達成したことを公表した[2]。後にアドコック氏がインタビューで語った転換理由は、デジタル空間のテキスト・言語モデルと物理世界のロボット制御との根本的な構造差にある[11]。

第一の技術的壁は、高自由度ヒューマノイドにおけるハードウェアとAIの共最適化（Co-optimization）の不可欠性である。アドコック氏は、ヒューマノイドの約40関節が取り得る姿勢の組み合わせが天文学的規模に達する点を挙げ、外部の純粋AIラボがモデルを訓練して「壁の向こうへ投げる」分業体制では、実機特有の関節応答、アクチュエータ剛性、接触ダイナミクスを制御できないと指摘した[11]。第二に、工場や家庭での実運用においてはクラウド通信に起因する推論レイテンシやネットワーク遮断リスクが許容されず、機体オンボード上で知覚から運動指令までを完結させる必要があった[14]。Figure AIの社内AIチームが実機検証を通じて外部パートナーを上回る物理制御モデルを確立したこと、さらにOpenAI自身も将来的にヒューマノイド開発で競合する局面へ移行したことも重なり、知覚・言語理解・高周波運動制御を単一の独自スタックに統合する「Helix」への全面転換が決断された[12]。なお、OpenAI協業期のクラウド経由推論における具体的な遅延比較値（ミリ秒単位のベンチマーク）は公開されておらず、レイテンシ改善幅の直接的な定量比較は非公開情報である。

1.2 「System 2 / System 1」から「System 0」を含む3階層アーキテクチャへの構造進化

2025年2月20日に公表された初代「Helix」は、認知科学の二重過程理論を模範とし、意味推論を司る低周波の「System 2（S2）」と、連続的な視覚運動制御を司る高周波の「System 1（S1）」を

非同期並列で動作させつつ、単一ステージでエンドツーエンド学習する2階層アーキテクチャとして設計された[4]。

S2はインターネット規模のデータで事前学習されたオープンウェイト系VLM（Vision-Language Model）をベースとする7B（70億）パラメータのモデルであり、動作周波数は7〜9 Hz（1000 ms ÷ 9〜7 Hz ＝ 約111〜143 ms周期）に設定されている[4]。S2は機体の単眼RGBカメラ画像、VLMの埋め込み空間へ射影されたロボット状態（手首姿勢および指位置）、および自然言語タスク指示を受け取り、状況理解と行動意図を単一の連続潜在ベクトル（Continuous Latent Vector）へと圧縮・出力する[4]。対するS1は80M（8,000万）パラメータのCross-Attention Encoder-Decoder Transformerであり、シミュレーション環境で事前学習された完全畳み込み型のマルチスケール視覚バックボーンを備え、200 Hz（1000 ms ÷ 200 Hz ＝ 5 ms周期）で高周波の閉ループ制御を実行する[4]。S2が出力した連続潜在ベクトルはS1のトークン空間へ射影され、視覚バックボーンから抽出された空間特徴量と系列次元に沿って結合された上でTransformerへ入力される[4]。

この2階層構造における最大の工学的ブレークスルーは、両階層が「非同期実行」でありながら「勾配の逆伝播によって結合学習」される点にある[4]。従来の階層型ロボティクスでは、上位LLMが中間目標を文字列や目標座標として離散出力し、下位コントローラがそれを受動的に追従していたため、表現の情報欠落や誤差累積が生じやすかった。Helixでは、S1の連続制御出力に対して標準的な回帰損失（Regression Loss）を適用し、訓練時にS1から連続潜在ベクトルを経由してS2側へ直接勾配を逆伝播させることで、視覚言語特徴のどの成分が5 ms刻みの把持精度に直結するかを単一ステージで同時最適化する[4]。さらに、実稼働時に生じるS2（7〜9 Hz）とS1（200 Hz）の推論レイテンシ差が訓練時のデータ分布と乖離する問題（Train-Inference Distribution Mismatch）を防ぐため、訓練データ上でS1の入力観測とS2の入力観測との間に実機の遅延ギャップに整合させた時間オフセット（Calibrated Temporal Offset）を意図的に付与している[4]。

続く2026年1月27日に発表された「Helix 02」では、それまで脚部移動と全身バランス制御のために手書き実装されていた109,504行のC++制御コードを完全に撤廃し、最下層に「System 0（S0）」を新設した3階層構造へと進化した[5]。S0は10M（1,000万パラメータの全身基礎運動モデルであり、1 kHz（1 ms周期）で全身関節のアクチュエータ指令を生成してバランス、接地、接触安定性を担う[5]。これに伴いS1の制御対象も上半身35自由度から全身へと拡張され、頭部カメラ、掌カメラ、指先触覚センサー、全身固有受容感覚のすべてを入力として、脚・体幹・頭部・腕・手首・各指を含む全身の関節目標値を200 Hzで出力する「All sensors in, all joints out」型の統合視覚運動ポリシーへと刷新された[5]。

1.3 車載・機体内蔵デュアルGPUにおけるオンボード完結推論と最適化の実態

Helixの現場実装を支える計算基盤は、外部サーバーとの通信を一切排除した機体内蔵型のエッジGPU環境である。Figure 02は初代Figure 01比で3倍のAI推論能力をもたらすデュアルNVIDIA RTX GPUベースモジュールを機体内部に搭載しており、すべての知覚・言語・行動推論をローカルで完結させる[7]。

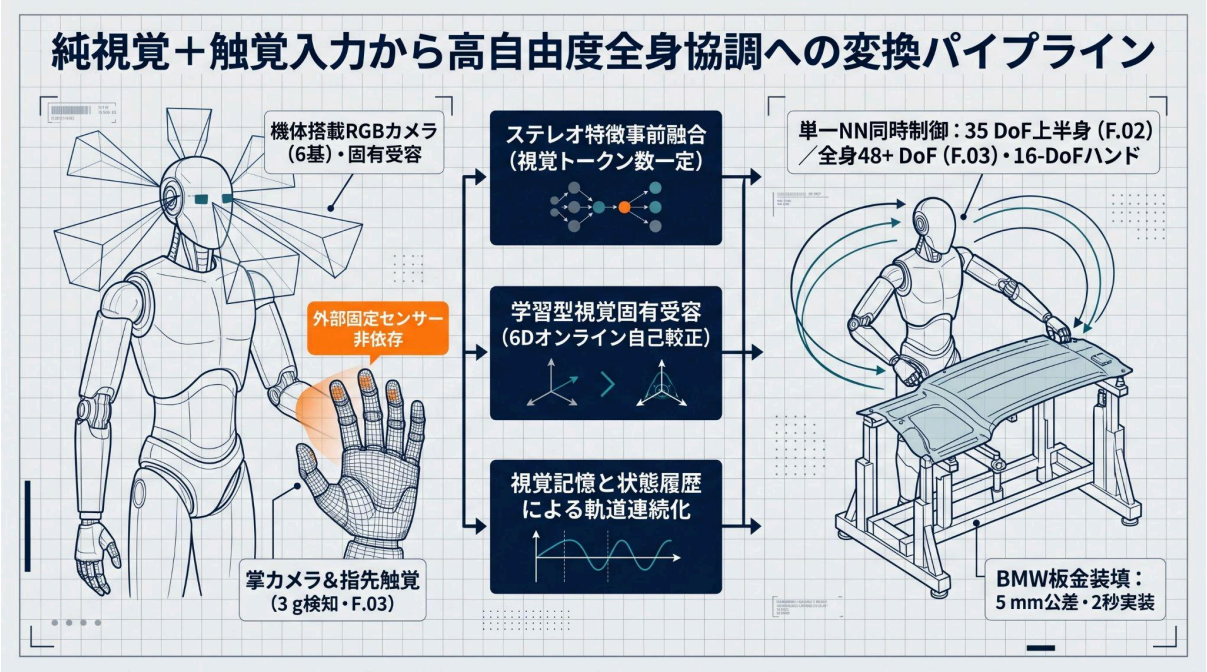
2基の低消費電力組込みGPU上では「Model Parallel Streaming Inference（モデル並列ストリーミング推論）」が採用されている[4]。一方の専用GPUはバックグラウンドプロセスとして7〜9 HzでS2を実行し、共有メモリ（Shared Memory）上の連続潜在ベクトルを最新値へ継続的に上書き更

新する[4]。他方の専用GPUはリアルタイムプロセスとして200 Hzの制御ループを維持し、最新のカメラ画像とロボット状態を取得するとともに共有メモリから最新のS2潜在ベクトルを読み出して、35自由度（Helix 02では全身自由度）の関節指令を出力する[4]。この共有メモリを介した非同期分離により、7B規模のVLMがシーンの再解釈に百ミリ秒以上を要している間も、S1側の200 Hz制御ループは阻害されず、ワークの微小変位や外乱に対して5 ms刻みで追従し続ける[4]。
一方で、低消費電力エッジGPU上で7BのVLMを7〜9 Hz、80MのTransformerを200 Hzで動作させるための低レベル計算最適化手法については、情報開示に明確な限界がある。Figure AIおよびNVIDIAの公開技術資料はデュアルRTX GPU構成と共有メモリ並列実行を明示しているものの、搭載GPUの具体的型番やVRAM容量、モデル圧縮における量子化ビット数（INT8、FP8、AWQ等の採否）、知識蒸留（Distillation）パイプラインの有無、ならびにTensorRTやKVキャッシュ最適化といった推論エンジンの内部実装詳細は一切公開されていない[4]。現在公開事実として確認できる計算負荷削減策は、高次推論を7Bモデル（低周波）に閉じ込めて200 Hzの反応ループを80Mの軽量モデルへ分離したアーキテクチャ設計[4]、および後述するステレオ画像のトークン化前融合によってTransformerへの入力トークン数を増大させない視覚表現設計の2点である[20]。また、2026年のHelix 02および第三世代機「Figure 03」についても、S0のパラメータ数（10M）は開示された一方で、拡張されたS1・S2の最新パラメータ数やFigure 03のGPUハードウェア仕様は非公開となっている[5]。

比較軸	従来型ロボット制御（**PLC**・ティーチング）	**Helix System 2**（高次**VLM**推論層）	**Helix System 1**（視覚運動ポリシー層）	**Helix 02 System 0**（全身基礎制御層）
制御周期と周波数	数ms〜サブミリ秒（確定周期・工程依存）	約7〜9 Hz（非同期バックグラウンド推論）	200 Hz（5 ms周期のリアルタイム制御）	1 kHz（1 ms周期の全身バランス・接触実行）
モデル規模と実装	PLCラダー・C++軌道生成・逆運動学ソルバ	7Bパラメータ・事前学習済みVLM基盤	80Mパラメータ・Cross-Attention Transformer	10Mパラメータ・全身基礎運動ニューラルモデル
主な入力モダリティ	リミットSW・エンコーダ・固定カメラ座標	単眼RGB画像・手首と指の状態・自然言語	単眼またはステレオRGB・S2潜在ベクトル・履歴・触覚	S1出力の全身関節目標・ベース運動・全身関節状態
出力信号と制御対象	事前教示ウェイポイント・各軸サーボ指令	タスク意図を圧縮した単一連続潜在ベクトル	35 DoF上半身または全身関節目標・完了率	全身アクチュエータへのトルク・関節制御指令

計算環境と依存性	産業用PLC・専用ロボットコントローラ	機体内蔵デュアルRTX GPUの一方（ローカル完結）	機体内蔵デュアルRTX GPUのもう一方（共有メモリ連携）	機体内蔵オンボード高周波制御ループ（クラウド非依存）
環境変動への適応性	位置ズレや未知ワークで停止し再教示が必須	未知対象や言語指示変更へゼロショットで意味適応	動的ワーク変位や個体差を視覚閉ループで自律補正	外乱・スリップ・段差を1 kHzトルクフィードバックで吸収

第2章 純視覚入力から高自由度全身・両腕協調アクションへの変換メカニズム



2.1 外部固定センサー非依存のオンボード視覚と固有受容・触覚の統合

従来の自動車製造ラインにおけるロボットピッキングでは、作業セルの架台等に固定された3D構造光カメラやレーザープロファイラでワーク位置を計測し、絶対座標系へ手先を誘導するアプローチが一般的であった。これに対しFigure 02とHelixは、外部固定カメラやモーションキャプチャマーカー、3D LiDARといった外部インフラに頼らず、機体搭載センサーのみで空間認識と操作を完結させる[2]。外部スペックデータベースの一部（Robohuman）では深度センサーやLiDARの搭載有無を「確認待ち」と記しているものの、別の仕様データベース（Origin of Bots）およびFigure AIの公開技術報告は、Figure 02が機体搭載の6基のRGBカメラ、IMU、ジャイロ、力覚センサー、関節固有受容感覚（およびkHz級トルクフィードバック）によって環境認識と操作を行う構成である

ことを明記している[2]。
さらに2025年10月発表の「Figure 03」および2026年1月の「Helix 02」では、視覚のみの限界を補うために知覚モダリティが拡張された[5]。頭部カメラの視線がロボット自身の手や腕によって遮られる自己オクルージョン（Self-occlusion）環境下でも精密作業を継続できるよう、両手のひら内部に近接視覚フィードバック用の「掌カメラ（Palm Cameras）」が内蔵され、さらに各指先にはペーパークリップの重さに相当するわずか3グラムの力を検知可能な「指先触覚センサー（Fingertip Tactile Sensors）」が組み込まれた[5]。これにより、把持状態が安定しているか、あるいは滑りが発生しかけているかを接触前に予兆検知し、密集した金属部品群の中から単一の部品を摘み上げる高難度作業が可能となっている[5]。

2.2 ステレオ視覚バックボーン、視覚固有受容、および時系列記憶による空間・姿勢推定

純視覚RGB映像から3次元の奥行きと板金姿勢を推定する仕組みは、2025年の初代Helixから物流向けアップデート（Helix Logistics / Scaling Helix Logistics）にかけて段階的に洗練されてきた[4]。
初代HelixにおけるS1は、シミュレーション環境で事前学習された完全畳み込み型のマルチスケール視覚バックボーンにより、単眼RGB画像と固有受容感覚を組み合わせて手首・指の空間位置を推論していた[4]。続くアップデートでは奥行き把握の信頼性を高めるため、S1の視覚エンコーダをマルチスケール特徴抽出ネットワークと統合された「ステレオ視覚バックボーン（Stereo Vision Backbone）」へと刷新した[20]（外部技術解説のQviroはこれを暗黙的ステレオ視覚と表現している[25]）。この際、左右2台のカメラ映像を個別にトークン化してTransformerへ供給すると計算量が倍増して200 Hz制約を圧迫するため、Figure AIはトークン化の前段階で両カメラの特徴をマルチスケールステレオネットワーク内で融合する手法を採用した[20]。これにより、Cross-Attention Transformerへ渡す視覚トークン数を一定に維持して計算オーバーヘッドを回避しつつ、局所的なエッジ情報と大域的な空間奥行きを同時に抽出している[20]。
3Dビジョンおよびfa制御の観点から特に注目すべき機構が「学習型視覚固有受容（Learned Visual Proprioception）」によるオンライン自己キャリブレーションである[20]。多関節ロボットではセンサーキャリブレーションの差異やカメラ光軸誤差、関節の応答特性ばらつきによって順運動学上の手先位置と実画像上の手先位置に機体個体差（分布シフト）が生じるため、全数に対して手動の精密キャリブレーションを実施する従来手法はフリート量産時にスケールしない[20]。そこでFigure AIは、機体搭載のオンボード視覚入力のみからエンドエフェクタの6自由度（6D）姿勢を直接推定する視覚固有受容モデルを訓練した[20]。視覚ループの内部で実際の手先位置と対象ワークの相対関係をリアルタイムに自己較正することで、機体間の個体差を吸収し、異なるロボット間でのポリシー転移（Cross-robot Transfer）を最小のダウンタイムで実現している[20]。なお、BMWスパータンバーグ工場における2秒以内・5 mm公差の板金装填においては、高度なハンド・アイ協調アルゴリズムと並行して現場調整用のカスタム・フィールドキャリブレーションツールも開発・併用されたが[1]、板金エッジ姿勢の推定に特化したCAD照合の有無や損失関数設計は公開されていない。
加えて、200 Hz動作時の時間的連続性を確保するため、「Vision Memory（視覚記憶）」と「State History（状態履歴）」がS1に導入された[24]。Vision Memoryは直近の一連のビデオフレーム列から特徴量を合成することで、現フレームで死角に入った領域や既に確認済みの面を短期記憶として保持する[24]。State Historyは直近の手・体幹・頭部姿勢の履歴ウィンドウをポリシー入力へ加えることで、固定長のアクションチャンク（Action Chunk）境界で生じがちな動作の途切れを防

ぎ、高頻度な再計画を行っても直前の運動文脈を保ったまま滑らかに軌道を修正できるようにしている[24]。

2.3 単一ネットワークによる冗長自由度の同時協調と終了判定

Figure 02は統合モーター・センサーユニットを備えた16自由度（16-DoF）の第4世代ハンドと人間同等の可動域を持つ手首を搭載しており[2]、初代Helixではこれら手首軌道、各指の屈曲および外転、体幹姿勢（リーチ範囲を広げる前傾等）、頭部姿勢・視線追従（Active Gaze）を含む35自由度（35-DoF）の上半身行動空間を、単一の80MパラメータS1ネットワークによって200 Hzで同時制御する[4]。さらにFigure 03では全身48自由度超（48+ DoF）へとハードウェア自由度が拡張され、Helix 02では脚部歩行を含む全身全関節が単一の知覚-行動ポリシーに統合された[5]。

従来のFAシステムや古典的ヒューマノイド制御では、体幹・腕の逆運動学（IK）、指の把持プランナ、頭部カメラの注視制御を個別のモジュールやステートマシンとして実装していたため、動作の継ぎ目がぎこちなくなりやすかった。Helixでは単一のTransformerが35自由度（または全身自由度）の目標指令を同一ステップで一括出力し、人間による遠隔操作データから体幹前傾・視線誘導・両腕協調の相関を学習するため、一方の手で対象を押し動かしつつ他方の手で次の対象へリーチするといった並列的な両腕協調が明示的なルール記述なしに創発する[4]。また、多段階タスクの自律的な連続実行を支えるため、Helixの行動空間には物理関節の指令値に加えて「タスク完了割合（Percentage Task Completion）」を表す合成アクションが追加されており、モデル自身が作業の完了条件を予測して次の動作フェーズへ遷移する仕組みを備えている[4]。

第3章 仮想空間における超並列強化学習と合成データ生成（SDG）パイプライン

3.1 GPU物理シミュレータを用いた数千〜20万並列の運動ポリシー強化学習

体重約70 kg[22]のヒューマノイドを実機上で転倒や衝突させながら強化学習することは、機構破損コストと実時間制約の双方から成立しない[6]。Figure AIは、GPUアクセラレートされた高忠実度物理シミュレーション環境上で数千体から20万体以上の仮想ロボットを並列稼働させ、数年分に相当する運動経験データをわずか数時間で生成・学習する強化学習（RL）パイプラインを運用している[5]。

2025年3月25日公開の「Learned Natural Walking」では、それぞれ固有の物理パラメータを持つ数千体の仮想Figure 02を並列シミュレーション内で稼働させ、多様な地形と外乱下での歩行ポリシーを獲得した[6]。この際、単純なタスク報酬だけでは非人間的でエネルギー損失の大きい歩容が学習されやすいため、基準となる歩行軌道をポリシーが生成すべき歩容の「事前分布（Motion Prior）」として設定しつつ、速度追従精度、消費電力低減、および外乱・地形変動へのロバスト性を追加の報酬項で最適化している[6]。この並列RL手法は2026年1月の「Helix 02」におけるSystem 0構築で飛躍的にスケールされ、1,000時間以上の関節レベルにリターゲットされた人間動作データと組み合わせた上で、200,000を超える並列環境（200,000+ parallel environments）上でS0の10Mパラメータモデルが完全学習された[5]。

使用している物理シミュレータの名称については、情報源による記述の違いを明確に区別しておく必要がある。Figure AI自身の公式技術ブログ（WalkingおよびHelix 02）では、特定のソフトウェア製品名を明記せず「high-fidelity physics simulator」「GPU accelerated physics simulation」と一般表現にとどめている[5]。一方で、NVIDIA連携に関する業界技術メディア（Quantum

Zeitgeist、Fierce Sensors、Robotstart、Claru等）は、Figure AIがNVIDIA OmniverseおよびIsaacプラットフォーム（Isaac Sim、Isaac Lab、Isaac GR00T基盤）を活用していることを報じており、NVIDIA自身もFigure AIの出資パートナーである[8]。Isaac LabはIsaac Sim上に構築されたオープンソースのロボット学習フレームワークであり、単一GPUクラスタ上で数千並列規模の強化学習と模倣学習を統合実行する基盤技術として位置づけられている[30]。

3.2 自動車プレス板金部品の光学特性とフォトリアル合成データ生成（SDG）の設計論

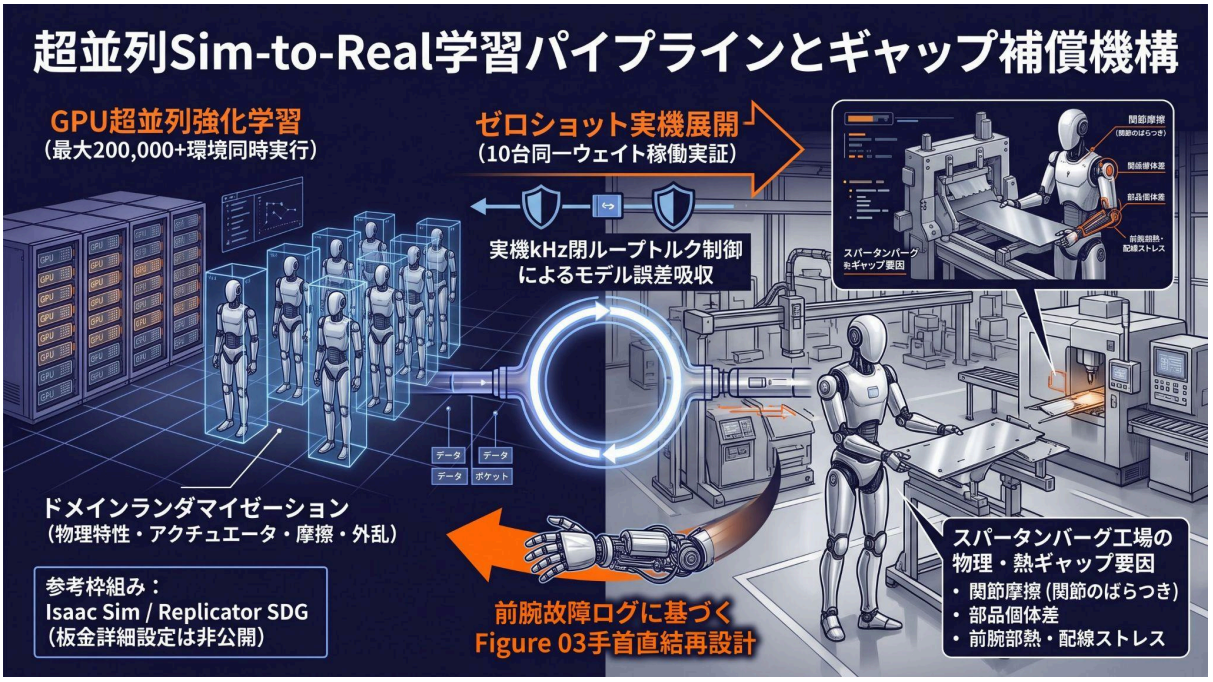
自動車ボディショップにおけるプレス板金部品の認識は、一般的な物流パッケージや家庭用品とは異なる光学的課題を伴う。無塗装鋼板やアルミパネルは複雑な3次元自由曲面と抜き穴を有し、プレス成形油や防錆油の油膜による反射特性の局所変化や、工場天井照明による強い鏡面反射（Specular Reflection）によって、エッジや穴の輪郭が背景の金属ラック・溶接治具と視覚的に同化しやすい。

ここで公開情報に基づく厳密な事実確認を行うと、Figure AIは「BMWスパータンバーグ工場の板金部品を認識させるために、どのようなフォトリアル合成データ生成（SDG）や光学レンダリング・シェーダパラメータ（金属光沢や油膜表現等）を用いたか」という詳細を一切公表していない。むしろ公開一次資料を精査すると、Figure AIの学習スタックは「運動・視覚基礎のシミュレーション事前学習」と「高品質な実機データによる操作学習」を明確に組み合わせた構成をとっている。具体的には、S0の全身運動制御は完全にシミュレーション上で学習され[5]、S1のマルチスケール視覚バックボーンもシミュレーションで事前学習される一方[4]、操作タスク（Manipulation）の訓練には、Helix初版では約500時間の実機遠隔操作データ（従来のVLAデータセットの5%未満の規模）と後方視的VLMによる自動指示ラベリング（Hindsight Auto-labeling）が用いられ[4]、さらに物流実証ではわずか8時間の厳選された実機デモデータで高精度なポリシーを立ち上げている[20]。また、外部ケース分析（iFactory）はBMW現場の初期訓練について「シミュレーション環境ではなく実際のボディショップのワークステーション上でタスク特化訓練を実施した」と記述している（ただし同記事は後述のとおり導入時期等の記載に一次情報との相違がある）[33]。

他方、Figure AIが採用していると報じられるNVIDIA Omniverse / Isaac Sim基盤における一般的なSDGツールチェーン（Isaac ReplicatorおよびIsaac GR00T Blueprint / GR00T-Teleop等）の観点からは、視覚モデルのドメインギャップを縮小する標準的な技術枠組みが整理できる[34]。

NVIDIA Isaac Replicatorは、カメラ視点、環境照明、背景・物体配置などをプログラム的にランダム変動させて深層学習用合成データセットを生成し、実機のフォークリフト等の工業対象に対する知覚汎化を実現するSDGフレームワークである[35]。またIsaac GR00T BlueprintおよびGR00T-Teleopは、Isaac Lab上での少数の人間遠隔操作軌跡から膨大な合成モーション軌跡を増幅生成するワークフローを提供する[34]。今後、BotQ施設での金属部品ピッキングのように多様な自動車・工業用プレス部品へ展開を広げる局面では、実機の少数テレオペレーションデータとIsaacベースのSDGによる光学・幾何バリエーション生成を組み合わせる設計が合理的な技術経路となる（ただしBMW板金での具体的光学シェーダ適用は未確認情報として区別する必要がある）。

第4章「Sim-to-Realギャップ」を克服するドメインランダマイゼーションとシステム同定



4.1 スパルタンバーグ工場における物理・環境ギャップの具体要因

仮想空間の理想的な剛体物理モデル上で獲得したポリシーを、スパータンバーグ工場の過酷な実環境へそのまま展開する際には、多層的な「Sim-to-Realギャップ」が阻害要因となる。公開されているFigure AIの技術総括および精密機械要素の工学的知見から特定されるギャップ要因は、大きく3つの領域に整理できる。

第一に、関節アクチュエータと機械伝達系の非線形性および機体個体差である。電動ヒューマノイドの関節はモーター、減速機、精密ギア、軸受、エンコーダで構成され、方向反転時のロストモーションを生むバックラッシュ（Backlash）、負荷時の微小変形に直結する伝達剛性（Transmission Stiffness）、歯車精度誤差による振動、軸受のアライメント変動、ならびに稼働に伴う摩擦・摩耗が不可避的に生じる[36]。さらに、製造された複数ロボット間ではセンサーのキャリブレーション誤差や関節の応答特性に微細なばらつきが存在する[20]。

第二に、実工場での長時間稼働に伴うハードウェアの熱的・機械的劣化である。Figure AIが2025年11月に公表したBMW 1,250時間稼働の事後検証では、3自由度を有する前腕部（Forearm）が最大のハードウェア故障ポイントであったことが明かされた[1]。狭小な前腕スペースに高密度実装された駆動系は熱制約が厳しく、内部でメインコンピュータと手首アクチュエータ間の通信を分配していたマイコン基板（Distribution Board）と、手首の動きに伴い屈曲を繰り返す動的配線（Dynamic Cabling）が10時間シフトの連続運用下で疲労故障を起こした[1]。こうした熱による特性変化や配線劣化は、定常状態の物理シミュレータでは再現しにくい現場ギャップの典型である。

第三に、作業環境と対象ワークの確率的変動である。工場床面の表面摩擦係数のばらつき、歩行時のつまずき・滑り・外部からの突き押し外乱[6]、あるいはビン内で互いに重なり合い、接触の瞬間に予期せず姿勢がずれる金属部品群[5]、さらには溶接治具ドア開閉タイミングの変動や2秒以内での5 mm公差挿入時に発生する接触反力などが挙げられる[1]。なお、スパータンバーグ工場における天井照明のフリッカー周波数（Hz）、関節通信バスのマイクロ秒単位のジッター分布、および板金ワーク自体の弾性しなり・質量公差の具体的実測値については、Figure AIから公表されていない。

4.2 ドメインランダマイゼーションと実機kHz閉ループ補償・オンライン同定の融合

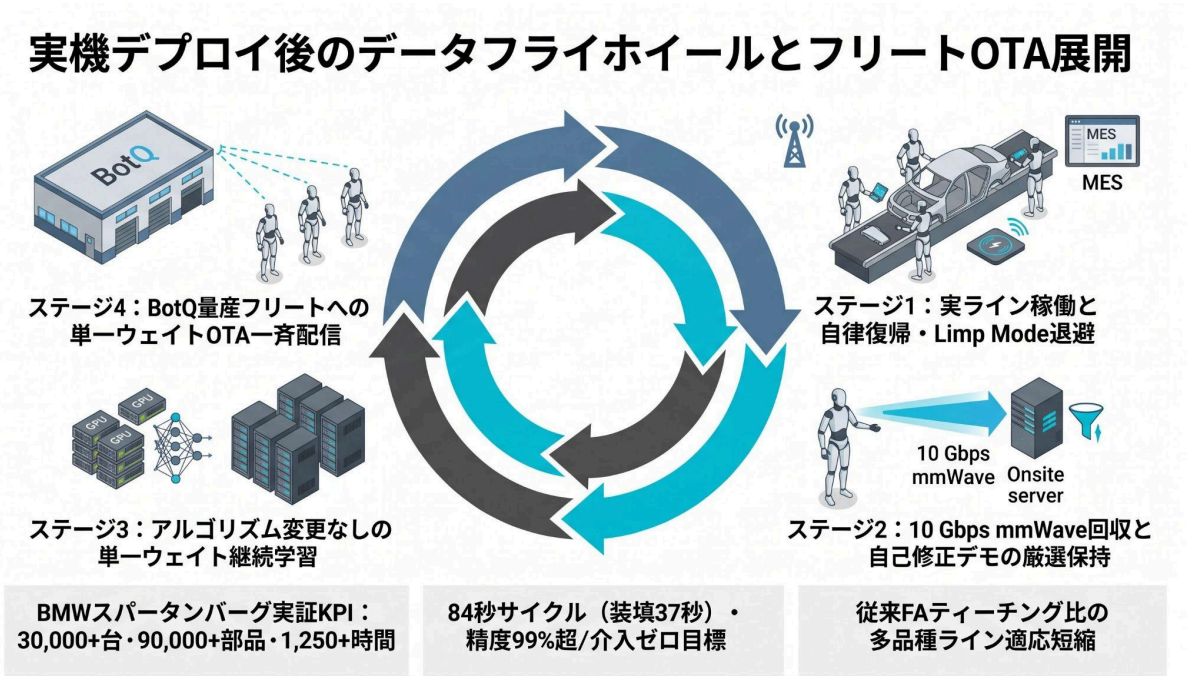
これら現実の非線形性と不確実性を克服するため、Figure AIは「シミュレーション上のドメインランダマイゼーション（DR）」のみに頼らず、「実機ハードウェア側の高周波トルク制御」「訓練時の遅延較正」「推論時の視覚自己較正」「機構ハードウェアの反復再設計」を組み合わせた多層防御アプローチを構築している[1]。

学習時のドメインランダマイゼーション（DR）について、Figure AIは「Learned Natural Walking」および「Helix 02」の公開技術報告において、並列シミュレーション内の各ロボットに対して物理特性バリエーション、多様な路面地形、アクチュエータ動特性の変動、表面摩擦係数の変化、ならびにつまずき・滑り・突き押しといった外乱シナリオを広範にランダム適用していることを明記している[5]。ただし、質量誤差や摩擦係数、関節減衰、カメラ露出等の具体的な数値変動幅（たとえば基準値の何パーセント増減かといった設計レンジ）は非公開である。

制御工学の視点から最も注目すべき設計判断は、Figure AIが「オフラインの詳細なシステム同定（Real-to-Sim同定）だけでアクチュエータ誤差を完全に消し込もうとしていない」点にある。実機のギア摩擦やバックラッシュを精密同定してシミュレータへ書き戻す作業は、機体ごとの個体差や摩耗による経年変化に追随しきれない。そこでFigure AIは、シミュレーションでDR学習したポリシーの出力指令を、実機ロボット上の「kHz級高周波閉ループ・トルク制御システム（kHz-rate Closed-loop Torque Control System）」へ直接接続するアーキテクチャを採用した[6]。実機側で1,000 Hz以上の高速トルクフィードバックを実行することで、アクチュエータのモデル化誤差（摩擦や減速機特性のズレ等）をローカルの制御ループ内でリアルタイムに補償・吸収している[6]。この「シミュレーション上のDR × 実機kHz閉ループトルク制御」の統合により、Figure AIは単一のRLニューラルネットワーク重みを10台のFigure 02実機へ一切の個別調整（Tweaks）なしでゼロショット展開することに成功した[6]。

さらに、上位の操作ポリシー（S1/S2）における時間的・幾何的ギャップに対しては、前章までに触れた2つの補償手法が実機同定の役割を果たす。第一が訓練時の「時間オフセット較正（Calibrated Temporal Offset）」であり、実機推論時のS2とS1間の遅延ギャップを訓練パイプラインに織り込むことで、非同期処理や通信遅延による位相遅れをポリシーが事前吸収する[4]。第二が「学習型視覚固有受容」および現場用の「フィールドキャリブレーションツール」であり、関節やカメラ取り付けの個体誤差を視覚閉ループ上でオンライン自己補償する[1]。そして最も根本的なReal-to-Hardwareフィードバックループとして、BMW稼働から得た前腕故障ログをFigure 03の機構設計へ直接反映し、配電基板と動的配線を完全に撤廃して各手首のモーターコントローラがメインコンピュータと直結通信する構造へ再設計することで、現場における物理ギャップそのものをハードウェア側から排除している[1]。

第5章 現場デプロイ後のデータフライホイールとフリート展開による生産技術変革



5.1 ヒヤリハット・自律補正データの回収と継続学習サイクル

BMWスパータンバーグ工場の運用実績は、量産ラインにおける「99%超の壁」の厳しさを浮き彫りにした。Figure AIは同工場において、総サイクルタイム84秒（うち装填37秒）、位置決め精度99%超（シフトあたり全3部品の正確装填率）、および作業員による一時停止やリセットを示す介入回数（Interventions）ゼロ回/シフトをKPI目標として設定した[1]。しかし計算上、仮に精度が目標境界の99.0%であったとしても、100サイクルに1回の頻度で何らかの失敗事象が発生する。84秒サイクルで連続稼働させた場合、100サイクル × 84秒 ＝ 8,400秒（140分 ＝ 約2.33時間）ごとに1回、すなわち10時間シフト（36,000秒）あたり平均約4.3回（36,000 ÷ 8,400 ＝ 4.29回）の例外リスクが残存する計算になる。したがって実生産ラインでは、稼働中の微小な位置ズレやヒヤリハットを即座に回収してモデルを進化させるデータフライホイールと、例外発生時の運用設計の両輪が不可欠となる[20]。

なお、外部の工場運用ソフトウェア企業（iFactory）によるケース分析では、BMWスパータンバーグ工場でFigure 02の約94%からFigure 03移行後に98.7%（60〜90秒タクトで約77サイクルに1回の失敗）へ改善し、MES（製造実行システム）との作業指示・品質記録統合が成否を分けたと分析されている[33]。ただし、同分析はプログラム期間を2023年11月〜2024年10月、2024年10月時点でのFigure 03切替と記載しているのに対し、Figure AI公式報告（2025年11月）およびBMW Group公式発表（2026年2月）は2025年におけるFigure 02の11カ月稼働と2025年10月のFigure 03発表・11月からのFigure 02退役を明記しており、時系列と機体世代の整合性に大きな齟齬が存在する[1]。したがって、本報告書ではFigure AIおよびBMWの一次公表値を基準とし、外部ベンダー分析の数値は参考値として明確に区別する。

データフライホイールの中核を担うのが、Figure AI独自のデータ選別（Data Curation）と自動回収インフラである。物流タスク検証（Helix Logistics）においてFigure AIは、操作者のミスに起因する低速・失敗デモを訓練データから厳格に除外する一方で、「環境の確率的変動によって失敗しかけた状況から、操作者が姿勢を立て直して自律的にリカバリーした補正動作（Corrective Behavior）」については意図的に訓練セットへ残存させた[20]。この設計により、S1ポリシーは一度の把持ズレで即座に停止するのではなく、失敗を予兆した瞬間に自律修正してタスクを完遂する

高い回復力を獲得している[20]。
実機フリートからのデータ回収ハードウェアもFigure 03で抜本的に強化された。Figure 03は「10 Gbpsミリ波（mmWave）データオフロード機能」を搭載し、フリート全体からテラバイト級の稼働データを高速アップロードして継続学習へ投入できるほか、足裏の2 kWワイヤレス充電コイルにより充電スタンドへ歩いて乗るだけで自律充電が可能である[23]。また、アドコック氏が2026年のインタビューで明かした「Limp Mode（自己トリアージ機能）」では、膝関節の通信が完全途絶する重大故障が発生してもシステムが即座に崩壊せず、該当関節を剛性固定して自力で修理ベイや充電ドックまで歩行退避できる能力をサニーベール拠点の自律運用で備えている[17]。さらに実機ログ不足を補うため、一人称視点データ収集とシミュレーション・実機展開を直結する専用施設「Helix Lab」の開設[37]、家庭環境データ収集計画「Project Go-Big」[11]、および一般ユーザーから日常作業動画を有償収集するアプリ「Figure Index」（2026年8月公開、ExplainX報道）[26]を組み合わせ、データフライホイールの回転を加速させている。

評価項目	一次公表実績値・KPI目標（**Figure AI**・**BMW**）	外部ベンダー分析・補足指標（**iFactory**等・要注記）	生産技術・信頼性工学上の教訓と**Figure 03**への反映
稼働期間と累積実績	11カ月稼働・1,250時間超・90,000部品以上・X3車両30,000台超	共有ボディショップ6車種対応・11週間で実ラインタスク開始	展示セルではなく実生産スケジュール上の連続10時間シフトで耐久性を実証
サイクルタイムと精度	総サイクル84秒（うち装填37秒）・2秒以内に5 mm公差で3点装填	生産タクト60〜90秒・F.02約94%からF.03で98.7%へ向上	専用6軸ロボット比で低速なためラインネック工程外への適材配置が前提
介入率とライン運用	位置決め精度目標99%超・人手介入ゼロ回/シフトを目標に設定	約77サイクルに1回の例外を想定しMES連携と復帰手順を整備	99%境界でも計算上2.3時間に1回の例外リスクが残るため復帰手順とMES統合が必須
機体信頼性と故障箇所	1,250時間超で全体故障は軽微だが前腕部3軸が最大故障ポイント	F.02からF.03への実ライン切替は4週間で移行完了と分析	動的配線と中間基板の疲労・発熱を解消するため手首駆動系を直結設計へ刷新

注記：外部ベンダー分析（iFactory[33]）は契約2023年11月〜30,000台達成2024年10月およびFigure 03への早期切替と記載しているが、Figure AI公式総括（2025年11月[1]）およびBMW

Group公式発表（2026年2月[36]）は2025年のFigure 02稼働と2025年11月からのFigure 02退役を明記しているため、同外部記事の時期・世代区分は一次事実と相違する参考情報として扱う必要がある。

5.2 単一ウェイト共有によるOTA展開と従来型FA・ティーチングとの比較検証

現場データとシミュレーションを循環させて更新されたHelixの重み（ウェイト）は、単一の汎用モデルとしてフリート全体へ一斉展開（OTA共有）される。Figure AIは、「タオルを畳む」「物流パッケージを仕分ける」「食洗機に食器を並べる」という全く異なるタスク群を、新しいアルゴリズム開発やタスク別の特別エンジニアリングを一切行わず、追加データの投入による同一Helixモデルの更新のみで実行できることを示した[4]。さらに2026年の「Helix 2.5」では、データ収集や事前適応を一切実施していない30軒の未知の一般住宅において、長期タスクをゼロショットで遂行する汎化性能を達成している[39]。量産拠点「BotQ」における製造能力についても、テックメディアExplainXによるアドコック氏公開データの集計によれば、2026年5月時点でFigure 03の生産ペースが1時間あたり1台（120日前の1日1台比で24倍）に達し、2026年6月20日には社内のロボット累計台数が750台を超えて人間の従業員数（約180〜250名）を上回ったとされる[26]。この量産フリートに単一ウェイトを横展開する構造により、ある現場で学習された自己修正能力が全機体へ即時波及する。

従来の自動車工場におけるPLCラダー制御、安全柵、専用ハンド治具、およびロボット言語による個別ティーチングと比較した場合、VLA基盤モデルがもたらす新車種・新部品追加時のリードタイム短縮効果は大きい。従来の混流ボディショップでは、新規モデルのパネル追加や治具変更が発生するたびに、専用位置決めクランプの機械設計変更、固定光学センサーの再設定、PLCインターロックの書き換え、および全ロボットのオフライン・オンライン再ティーチングに多大なエンジニアリング工数を要していた。これに対してHelixアーキテクチャでは、汎用動作群で約500時間[4]、特定用途の厳選デモではわずか8時間[20]のデータ蓄積とシミュレーション学習による重み更新で新規ワークへ適応できる。実際にスパータンバーグ工場においても、Figure 02の立ち上げから6カ月で工場配送・試験開始、10カ月で実ライン全面稼働へと到達しており[1]、さらにテスト時の推論速度スケーリング（Sport Mode）を用いれば、人間による遠隔操作デモを上回る実行速度を後から引き出すことも可能である[20]。

とはいえ、完成車メーカーの生技陣やFA・ロボット開発陣が導入を判断する際には、3つの現実的境界条件を踏まえる必要がある。第一に「タスクの厳格なスコープ限定とMES結合」である。スパータンバーグの商業的成功は、汎用機であっても実ラインでは「溶接治具への板金ローディング」という単一の測定可能な作業へ絞って導入し、MESとの連携体制を整えた点に起因する[1]。第二に「タクトタイムの物理限界」である。84秒総サイクル（装填37秒、挿入2秒）という速度[1]は人手代替には十分であるものの、高速スポット溶接やトランスファープレスの秒単位タクトを代替するものではないため、適用先は人手依存が残る周辺供給や多品種切替工程に限られる。第三に「産業用ロボット水準のMTBFへの距離」である。1,250時間稼働で前腕部3軸の配線・熱設計の刷新が必要となった事実は[1]、数万時間無故障で稼働する従来型6軸アームと比較した際の保守コスト課題を示唆しており、Figure 03で実施された手首直結設計やBotQでの製造コスト低減が商業採算の分岐点となる[1]。

参照資料・一次情報出典一覧

1. Figure AI — Helix: A Vision-Language-Action Model for Generalist Humanoid Control

(2025年2月20日): https://www.figure.ai/news/helix?ref=labellerr.com[4]
2. Figure AI — Helix 02: A Unified Whole-Body Loco-Manipulation VLA (2026年1月27日): https://www.figure.ai/news/helix-02[5]
3. Figure AI — Helix Logistics: Accelerating Real-World Logistics (2025年): https://www.figure.ai/news/helix-logistics[20]
4. Figure AI — Scaling Helix Logistics (2025年): https://www.figure.ai/news/scaling-helix-logistics[24]
5. Figure AI — Introducing Learned Natural Walking (2025年3月25日): https://www.figure.ai/news/reinforcement-learning-walking[6]
6. Figure AI — F.02 Contributed to the Production of 30,000 Cars at BMW (2025年11月19日): https://www.figure.ai/news/production-at-bmw[1]
7. Figure AI — Introducing Figure 03 (2025年10月9日): https://www.figure.ai/news/introducing-figure-03[23]
8. Figure AI — Helix Learns to Load the Dishwasher (2025年): https://www.figure.ai/news/helix-loads-the-dishwasher[38]
9. Figure AI — Helix 2.5: Zero-Shot 30-Home Generalization (2026年): https://www.figure.ai/news/helix-2-5-zero-shot-30-home-generalization[39]
10. NVIDIA Blog — Figure Humanoid Robot Autonomous Inference (2024年8月8日): https://blogs.nvidia.com/blog/figure-humanoid-robot-autonomous/[7]
11. NVIDIA Developer — NVIDIA Isaac Lab / Isaac Sim / Isaac GR00T / Replicator Tutorial: https://developer.nvidia.com/isaac/lab[30] / https://developer.nvidia.com/isaac/sim[42] / https://www.nvidia.com/ja-jp/industries/robotics/isaac-groot/[43] / https://www.youtube.com/watch?v=X5SdELeBhFw[35]
12. BMW Group PressClub / Plant Spartanburg — Test Deployment of Humanoid Robots at BMW Group Plant Spartanburg / Germany Pilot: https://www.visit-bmwgroup.com/en/test-deployment-of-humanoid-robots-at-bmw-group-plant-spartanburg/[44] / https://newsroom.bmwgroup.com/global/bmw-group-to-deploy-humanoid-robots-in-production-in-germany-for-the-first-time/[45]
13. Humanoids Daily — Figure CEO Escalates Critique of Tele-op Demos, Details Split from OpenAI / "I Fired Them": Brett Adcock on the OpenAI Split, Robot Self-Repair, and the Kid-Safety Test / Figure Retires the F.02 (2025〜2026年): https://www.humanoidsdaily.com/news/figure-ceo-escalates-critique-of-tele-op-demos-details-split-from-openai[11] / https://www.humanoidsdaily.com/news/i-fired-them-brett-adcock-on-the-openai-split-robot-self-repair-and-the-kid-safety-test[17] / https://www.humanoidsdaily.com/news/figure-retires-the-f-02-battle-scarred-robots-30-000-bmws-and-hard-lessons-learned[46]
14. iFactory — BMW Spartanburg Figure 02 Pilot: 30,000 X3 Lessons: https://ifactoryapp.com/industries/automotive-manufacturing/humanoid-robots-bmw-spartanburg-figure-02-pilot-lessons[33]
15. MLQ.ai — Figure AI Opens New 'Helix Lab' to Accelerate Learning for Its Humanoid

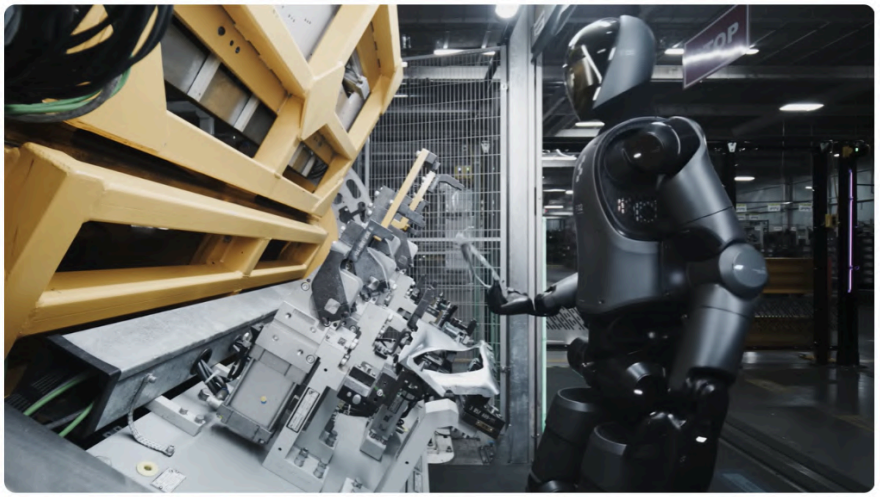
Robots:
https://mlq.ai/news/figure-ai-opens-new-helix-lab-to-accelerate-learning-for-its-humanoid-robots/[37]

16. ExplainX — Figure AI Robots Outnumber Humans Milestone 2026:
https://explainx.ai/blog/figure-ai-robots-outnumber-humans-milestone-2026[26]
17. Porite Taiwan — What Makes Humanoid Robot Joints Move Smoothly and Precisely:
https://tw.porite.com/en-US/newsc38-what-makes-humanoid-robot-joints-move-smoothly-and-precisely-key-components-and-performance-factors[36]
18. Qviro — Figure's Helix Advancing Humanoid Robotics in Logistics:
https://qviro.com/blog/figures-helix-advancing-humanoid-robotics-in-logistics/[25]
19. Fierce Sensors / Robotstart / Claru / Quantum Zeitgeist — NVIDIA Isaac & Figure AI Ecosystem Coverage:
https://www.fiercesensors.com/ai/nvidia-wants-robotics-full-stack-what-happens-humanoids[27] / https://robotstart.info/article/2025/03/04/369494.html[28] /
https://claru.ai/for/nvidia-isaac[29] /
https://quantumzeitgeist.com/startup-unveils-next-gen-humanoid-robot-with-triple-ai-computing-power/[19]
20. APA Robot / Origin of Bots / Robohuman / Rivet Index — Figure 02 Specifications & Timeline: https://www.aparobot.com/robots/figure-02[2] /
https://www.originofbots.com/robot/figure-02-by-figure-ai-inc-details-specifications-rating[22] / https://robohuman.org/product/figure-02[21] /
https://rivetindex.com/robots/figure-02[15]
21. Miraheze AI Wiki / BigGo Finance / Robot TV / Qiita — Figure AI Corporate & Ecosystem Notes: https://ai.miraheze.org/wiki/Figure[8] /
https://finance.biggo.com/news/4a87798e5643704d[12] /
https://news.robot.tv/figure-ceo-speaks-out-on-openai-split-were-going-to-be-competitors/[18] / https://qiita.com/hedgehog051/items/da3cb042fbcfff881ec6[34]

資料5 第1部3：BMWスパータンバーグ工場の量産車体ラインにおけるヒューマノイド実装解剖：板金ハンドリング公差5mm・タクト同期・MES連携・安全設計の現場実態（第5巻・第1部完結編）

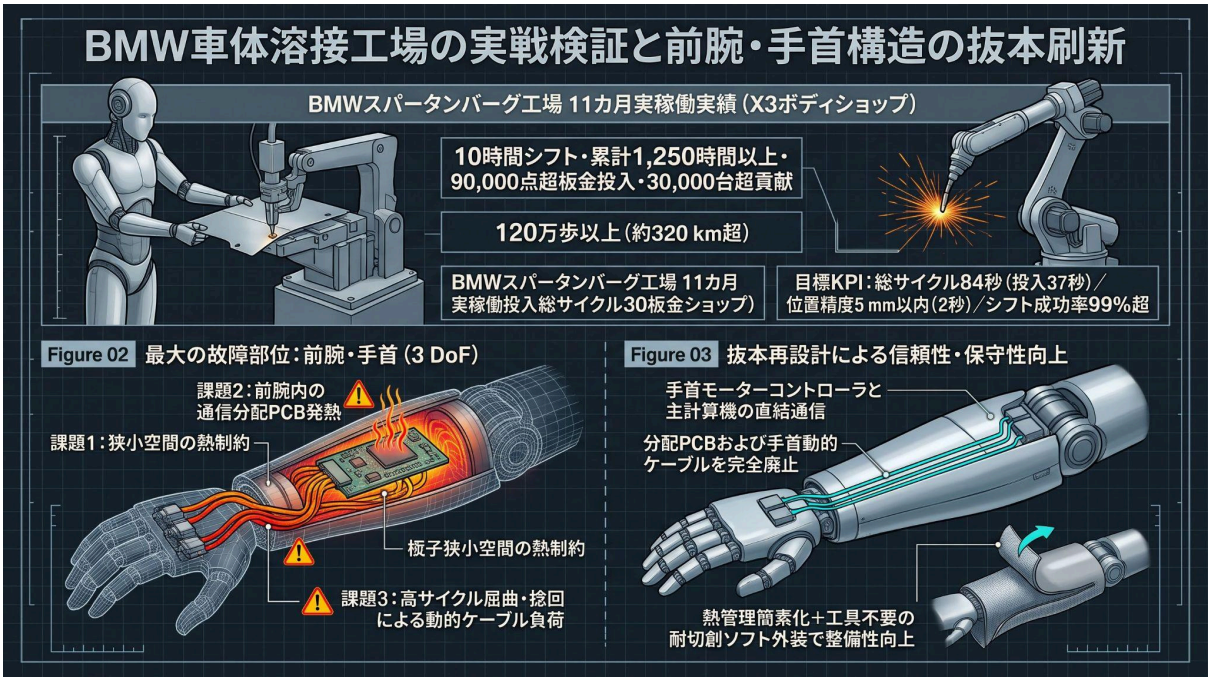
米国サウスカロライナ州のBMWグループ・スパータンバーグ工場（BMW Group Plant Spartanburg）車体工場（Body Shop）におけるFigure AI製ヒューマノイド「Figure 02」の量産ライン投入は、二足歩行ロボットが実験室レベルの概念実証（PoC）を脱し、完成車量産工場の生産技術要件の下で長期稼働した先駆的産業マイルストーンである[1]。2025年11月のFigure AI公式稼働報告および2026年2月・6月のBMWグループ公式発表によって双方から裏付けられた実績値は、月曜から金曜までの1日10時間シフト運用、累積実稼働1,250時間以上、投入板金部品90,000点以上、推定歩行120万歩以上（移動距離200マイル超）、そして量産車「BMW X3」30,000台以上の車体骨格（シャシー／Body-in-White）生産への寄与に達している[3]。本プロジェクトの生産技術的本質は、人型ロボットが工場床面を歩いたこと自体にあるのではない。1サイクル84秒（うち溶接治具ドア開放後の部品ローディング許容時間37秒）という厳格なタクト制約のなかで、1サイクルあたり3点の非対称プレス板金パネルを各2秒以内・位置決め公差5mm以内で治具ロケートピンへ挿入し、シフトあたり99%超の配置精度目標を維持した閉ループ制御と設備インターロックの成立にある[4]。

BMW Deployment Update



一方で、完成車メーカーの生産技術陣、システムインテグレーター（SIer）、および機械安全研究機関が冷静に見極めるべき「公開数値の境界線」も存在する。独立系信頼性監査データベース

HumanoidUptime（レコードID：HU-R001、2026年9月4日改訂第11版）が指摘するとおり、公表された「1,250時間以上」はロボットが稼働していた累積運転時間（Runtime）であり、計画稼働時間を分母とする技術的可用性（Availability / Uptime）、平均故障間隔（MTBF）、平均修復時間（MTTR）、正確な投入機体数、および人間による介入実数は非公開のままである[5]。また安全設計においても、Figure 02は人間作業員と無柵で混在歩行していたのではなく、自動開閉式の溶接治具ドアを備えた「隔離ワークセル（Contained Work Cell）」内で稼働し、後工程の6軸スポット溶接ロボット群や周辺作業員と物理的・電気的に分離されていた[4]。さらに、1,250時間超の反復稼働は「前腕部（マイコン分配基板および動的ケーブルの熱・実装密度限界）」を最大のハードウェア故障箇所として浮き彫りにし、この現場知見が次世代機「Figure 03」（2026年6月より同工場Hall 52の物流シーケンシング工程へ投入）における手首電装系の直結化、掌カメラと最小3g検知の指先触覚センサ追加、足裏2kW非接触充電、および1kHz全身制御モデル「Helix 02」への抜本的刷新をもたらした[4]。本報告書では、一次公開資料で確定している事実と、車体生産技術・機械安全規格に基づく工学的推論およびサードパーティ試算を明確に区別し、量産実装の深層を5つの技術領域から徹底解剖する。



エグゼクティブ・サマリー

BMWグループとFigure AIが2024年1月に締結したマイルストーン型段階導入契約は、同年夏の数週間にわたる初期実ライン試験（2024年8月6日公表）を経て、2025年に10〜11ヶ月間の本格量産シフト稼働へと移行した[3]。対象工程として選定されたのは、スパータンバーグ工場（従業員約11,000名を擁するBMW最大の米国拠点）の車体工場におけるシャシー構成用シートメタル（プレス成形板金パネル）の溶接治具ローディング作業である[5]。この作業は、薄肉でエッジを持つ金属パネルを大型物流コンテナから両手で取り出し、スポット溶接治具の位置決めピンへミリ単位の精度でセットする反復重筋・中腰作業であり、人間作業員にとって筋骨格系疲労と怪我リスクが極めて高い「エルゴノミクス上のボトルネック工程」であった[1]。

BMWスパータンバーグ工場におけるFigure 02量産稼働実績と84秒タクト構造

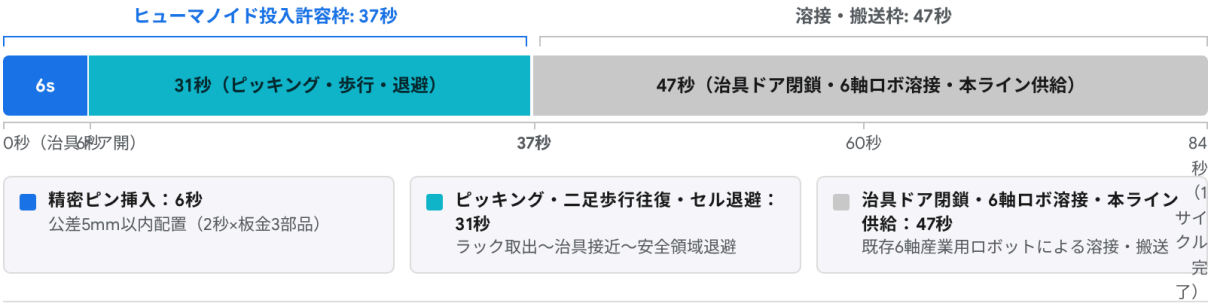
1 量産車体ライン確定稼働メトリクス（月〜金・10時間シフト）

対象工程：車体溶接セル 板金ローディング

生産寄与車両 (BMW X3)	投入板金部品総数	累積実稼働時間	シフト配置精度 / 推定歩数
30,000+ 台	**90,000+** 点	**1,250+** 時間	**>99%** / 120万歩+
量産車体ライン稼働寄与	1サイクルあたり3部品投入	BMW・Figure双方で確認済	推定移動距離 200マイル超

2 1サイクル84秒のタクトタイム構造と動作配分

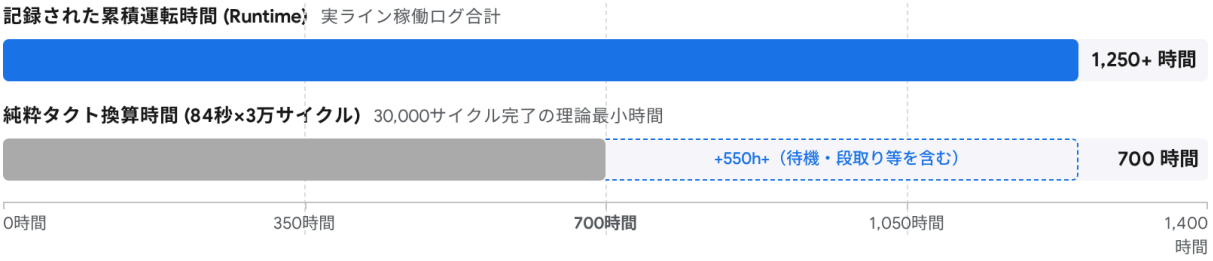
治具ピン挿入公差：5mm以内（1部品2秒）



- **精密ピン挿入：6秒**
  公差5mm以内配置（2秒×板金3部品）
- **ピッキング・二足歩行往復・セル退避：31秒**
  ラック取出〜治具接近〜安全領域退避
- **治具ドア閉鎖・6軸ロボ溶接・本ライン供給：47秒**
  既存6軸産業用ロボットによる溶接・搬送

3 累積実稼働時間（RUNTIME）と純粋タクト換算時間の監査比較

単位：時間（0〜1,400時間スケール）



> **監査注記（観測期間と稼働率の定義）：** 投入期間は**BMW発表で10ヶ月**（量産支援期間）、**Figure AI発表で11ヶ月**（導入プログラム全体）と定義範囲が異なる。また「1,250+時間」は記録された実運転時間（Runtime）であり、予定稼働時間・充電休止・保全停止・投入台数分母が非開示のため、設備総合効率や技術的稼働率（Scheduled Availability）とは等価ではない（Runtime ≠ Scheduled Availability）。

2025年の量産投入（BMW発表で10ヶ月、Figure発表で11ヶ月）における確定実績と時間内訳。1サイクルあたり板金3点を投入するため、30,000台超のX3生産寄与と90,000点超の部品投入が1対3で完全整合する。累積稼働1,250時間超はロボットの実運転記録時間であり、84秒タクト×30,000サイクルの純粋サイクル換算時間（700時間）との差分にはセル内待機やコンテナ交換等が含まれる。

Data sources: Figure AI · BMW Group · HumanoidUptime · BERI · Xpert.Digital

車体生産技術の観点から本プロジェクトの成立要件を総括すると、要諦は以下の4点に集約される。第一に、多機能な汎用デモを追わず「単一の板金ローディング工程（1サイクル3部品）」へとタスクスコープを極限まで絞り込み、着座成否が物理的に二値判定（治具に収まるか否か）できる工程を選定したことである[4]。第二に、二足歩行後の停止位置誤差を足元の絶対位置決め精度だけで解決しようとせず、200Hzで駆動する視覚運動ポリシー（Helix System 1）による上半身35自由度の閉ループ微修正によって手先公差5mmへと収束させた制御アーキテクチャである[4]。第三に、ヒューマノイドを孤立した自律機械として扱わず、BMW iFACTORYが推進する「統合データプラットフォーム（Unified Data Platform）」および現場セルのインターロック制御系へ直結したことである[3]。第四に、99%超の配置精度の裏で不可避に発生する残り1%前後の異常に対し、サブアセンブリ溶接セル特有のライン間バッファと明確な人間介入プロトコルを組み合わせ、X3メインラインの停止を回避したことである[4]。

また、2025年春に一部経済誌（Fortune等）とFigure AI経営陣の間で生じた「稼働台数・稼働時間帯」を巡る報道上の論争や、BMW広報担当者（Steve Wilson氏）による「2025年3月時点で生産時間中に稼働していたのは隔離ワークセル内の単一機体であった」という証言は、実態を正確に把握するうえで重要な検証材料を提供する[8]。公表実績を生産技術的に検算すると、30,000サイクル×84秒は純粋サイクル時間にしてちょうど700.0時間に相当し、10ヶ月間（平日約215日×10時間シフト＝約2,150シフト時間）の単一ワークセル稼働枠に対して「累積運転1,250時間超・純粋タクト稼働700時間」という数値は、1つの量産ワークセル（充電・保守交代用の予備機を含む少数体制）を段階的ランプアップから継続稼働させた記録として高い整合性を示している[4]。

第1章 板金ピッキングから溶接治具ロケートピン挿入までの全動作シーケンスと公差5mm達成メカニズム

1.1 対象ワークの物理特性と3部品ローディングの全動作シーケンス

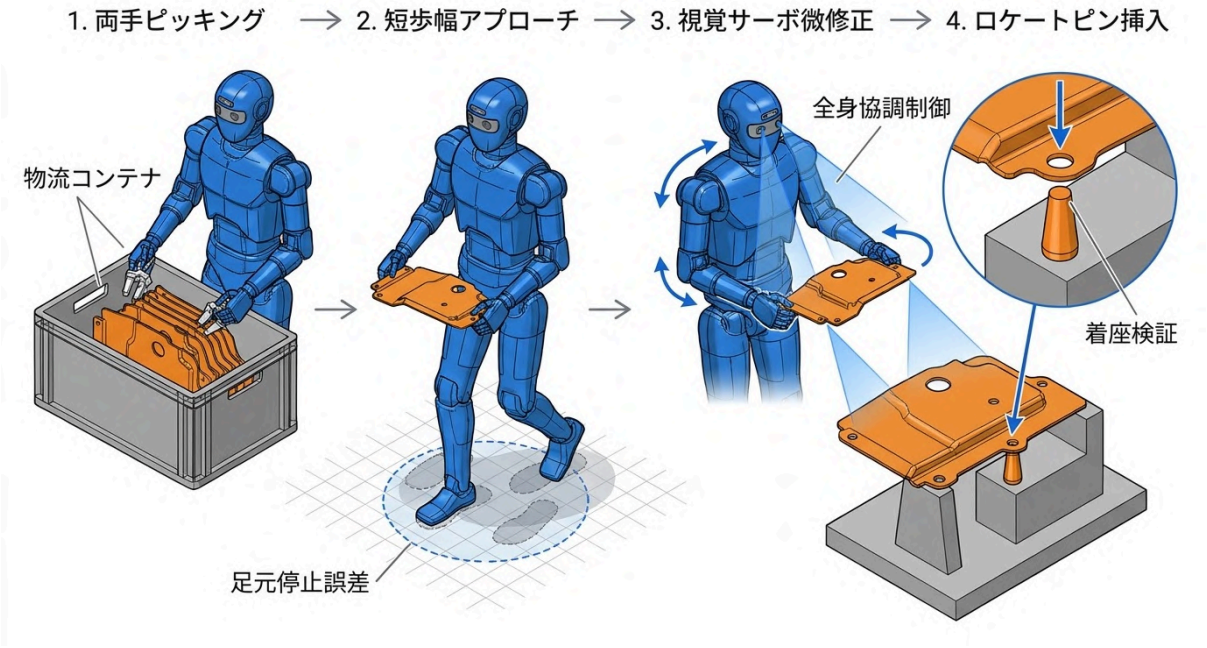
スパータンバーグ工場の車体工場でFigure 02が担当した対象ワークは、BMW X3のシャシー（車体骨格下部構造）として組み立てられるプレス成形シートメタル部品である[4]。自動車の車体骨格用板金パネルは、物流倉庫における定型段ボール箱や樹脂トートとはハンドリングの物理的難易度が根本的に異なる。対象部品は薄肉鋼板を深絞り・曲げ成形した非対称な三次元曲面形状を持ち、重心が見かけ上の中心から偏心しているうえ、トリム加工後の鋭利なエッジやフランジ面、溶接位置決め用の基準穴（ロケートホール）を有している[10]。さらにプレス加工油の微量付着による滑りやすさや薄肉特有の弾性たわみを伴うため、片手での点把持や単純な吸着パッドでは搬送中の姿勢崩れを防ぎにくい。これに対しFigure 02は、片手16自由度（4指＋対向拇指、人間同等の把持強度）を備える第4世代ハンドを用い、両手協調（Bimanual Manipulation）によってパネル両端を安定保持する方式を採用した[8]。

公開されている稼働記録、BMW広報証言、およびFigure AIのKPI定義を統合すると、1サイクル（総サイクル要件84秒、うちローディング許容時間37秒）における物理動作シーケンスは以下の7ステップで構成される[4]。

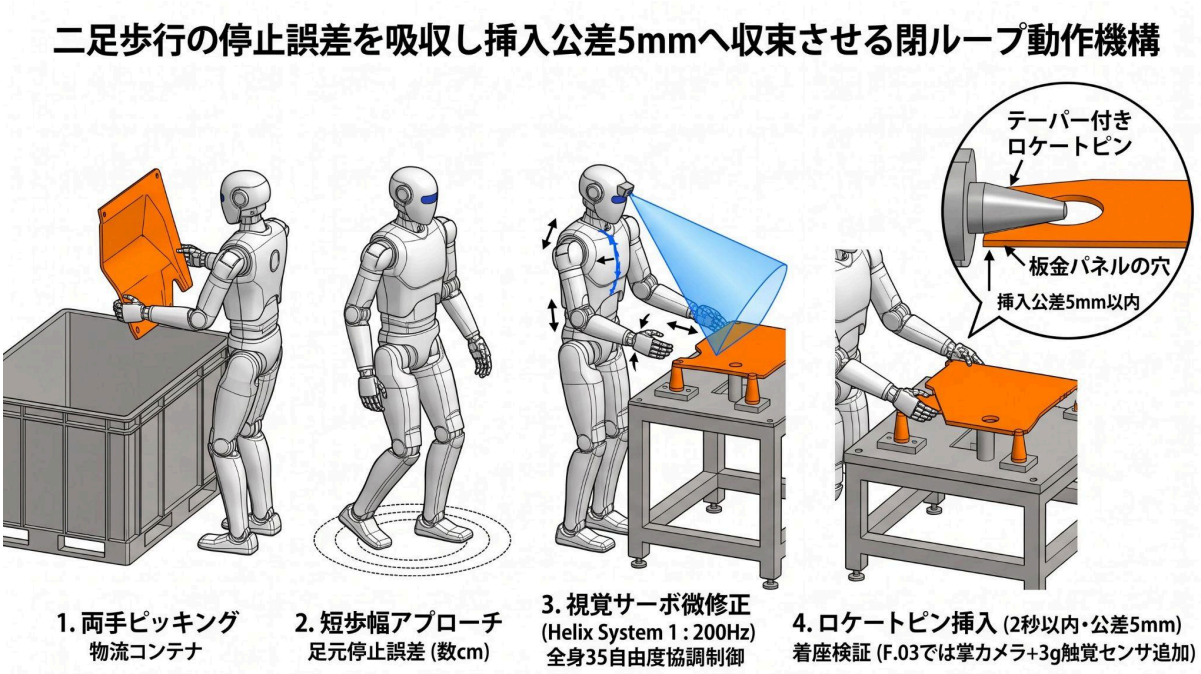
1. サイクル開始トリガーと治具ドア開放検知：前サイクルのスポット溶接とワーク払出しが完了し、6軸産業用溶接ロボットが退避すると、隔離ワークセル境界の溶接治具自動ドア（Weld-Fixture Door）が開放される[4]。このドア開放完了時点から37秒間のローディング許容枠が開始される[4]。
2. 物流コンテナへの正対とワーク空間認識：Figure 02はセル内に搬入された部品供給用の大型物流コンテナ（またはラック／ビン）へ向き直り、頭部・胴体に内蔵された6基のオンボードRGBカメラを用いて、輸送振動等で微妙に位置や角度がばらついた板金部品の三次元姿勢を認識する[8]。
3. 両手協調による切り出しとピッキング：16自由度ハンドの指先を板金パネルのエッジまたはフランジ部へ掛け、左右の手を協調させてコンテナから1枚を切り出し（Singulation）、両手でパネルの剛性軸を支える搬送姿勢へと持ち上げる[8]。
4. 二足歩行による治具正面への移動と旋回：ワークを両手で保持したまま動的バランスを維持し、二足歩行でコンテナから溶接治具（Welding Fixture）正面のセット位置まで移動する[8]。累積90,000点超（30,000サイクル超）に対し推定120万歩以上・200マイル（約322km）超という公開実績値を単純換算すると、テスト歩行等を含めた上限見積もりでも1サイクル（3部品投入）あたり約40歩（1部品往復あたり約13〜14歩）、移動距離にして1サイクル約10.7m（1部品往復あたり約3.6m）となり、狭小セル内における短歩幅のピボット旋回歩行

であったことが裏付けられる[4]。

5. 公差**5mm・2**秒以内の精密ロケートピン挿入：溶接治具の位置決めピン（ロケートピン／ポスト）および基準受け面（データム面）に対し、上半身と両手首の閉ループ微修正を行いながら、最終挿入フェーズを2秒以内・位置決め公差5mm以内で完了させる[4]。
6. 全**3**部品の連続装填完遂：1台のシャシー・サブアセンブリを構成する計3点の板金パネルについて上記ピッキングからピン挿入までを連続遂行する（Figure AIのKPI第2項目「Placement Accuracy」は、3点すべての板金部品が正確に装填されたサイクルの割合として厳格に定義されている）[4]。
7. 安全領域への退避と治具ドア閉鎖・溶接移行：3点目のセット完了後、Figure 02は治具可動域からコンテナ側の安全待機位置へ後退し、溶接治具ドアが閉鎖された後、別区画の6軸産業用ロボット群がクランプ・スポット溶接を実行して完成サブアセンブリをメインラインへ供給する（残り47秒のフェーズ）[4]。



1.2 二足歩行の停止誤差（数cm）を吸収し挿入公差5mmへ収束させる階層型制御ロジック



完成車メーカーの生産技術陣が最も厳しく問う技術的急所は、アンカーボルトで床面に剛結された反復位置決め精度±0.05〜0.1mmの産業用6軸ロボットとは異なり、毎回歩いて移動する二足歩行ロボットでいかにして溶接治具への「公差5mm挿入」を成立させたのかという点である。二足歩行ロボットが工場床面（導入ガイドライン上、床面平坦度は3mm以内の分散、照明は500ルクス以上の安定照度が求められる[15]）を移動して治具前に停止した際、足裏の接地座標およびヨー角には不可避的に数cm単位の停止位置誤差が残る。仮に足元の停止座標を基準とした従来の固定軌道再生（ティーチング・プレイバック）で腕を振り下ろせば、足元の20〜30mmのズレはそのまま板金基準穴のズレとなってロケートピンに衝突し、サイクルは即座に破綻する[10]。

Figure AIがこの問題を解決した中核アーキテクチャは、2025年2月にOpenAIとの提携を終了して自社開発へ完全移行した視覚・言語・行動（VLA：Vision-Language-Action）モデル「Helix」の非同期2階層制御と、機体間の個体差を補正する現場キャリブレーションツール（Field-Calibration Tools）の統合にある[4]。まず第1段階として、強化学習ベースの適応歩行（Adaptive Locomotion）コントローラが迅速かつ安定した足置き（Foot Placement）を行い、上半身のリーチング可動域内に治具ピンが収まる数cm精度のスタンスを素早く確立する[4]。続いて第2段階として、非同期バックグラウンドで7〜9Hz（周期約110〜140ミリ秒）で動作する70億（7B）パラメータの視覚言語モデル「System 2」が、単眼RGBカメラ画像と現在の手首姿勢・指関節位置を処理し、保持中の板金パネルと挿入先治具ターゲットの意味論的・空間的関係を単一の連続潜在ベクトルへと蒸留して共有メモリを更新する[16]。

最終的なミリ単位への誤差圧縮を担う第3段階が、共有メモリ上の潜在ベクトルを受け取って200Hz（制御周期5ミリ秒）でリアルタイム駆動する「System 1」である[16]。System 1はシミュレーション事前学習で初期化された完全畳み込みマルチスケール視覚バックボーンを持つ8,000万（80M）パラメータのクロスアテンション・トランスフォーマーであり、最新カメラ画像と固有受容覚（手首ポーズ・指位置）を5ミリ秒ごとに直接入力し、上半身全体で35自由度（両手首ポーズ、各指の屈曲・外転、頭部の視線追従・向き、および胴体の前傾・回旋姿勢）の連続目標値を一括出力する[16]。これにより、足元の停止位置が仮に25mmずれていても、System 1はカメラ画像上に映る「治具ロケートピンと板金エッジ・基準穴の相対視覚誤差」を5ミリ秒周期でゼロへ収束させる

よう、胴体のひねりと両手首軌道を連続的に補正し続ける（Visual Servoing）[4]。また、複数機体間でカメラ光軸や関節原点の個体差が生じないよう専用のフィールド・キャリブレーション・ツールが現場導入された[4]。

さらに車体溶接治具（BIW Fixture）の標準的な機械設計に照らすと、公表された「配置公差5mm」と、サードパーティ製造ITベンダー（iFactory社）のボデーショップ解説で言及される「溶接治具上の位置決め公差±1〜2mm」の関係も工学的に整合する（以下は車体治具設計に基づく工学的推論）[4]。自動車ボデーのスポット溶接用ロケートピン先端には通常、数ミリ幅の導入テーパー（チャンファー面取り）やガイドブロックが加工されている。ロボットの200Hz視覚サーボが板金の基準穴を±2.5mm（幅5mm）のピン先端キャプチャゾーンへ2秒以内に送り込めば、手首・指先の柔軟な力制御を伴いながらパネルがピンのテーパー面に沿って滑り落ち、最終的なデータム座面上では溶接品質を担保する±1mm前後の公差へと機械的に自動求心（セルフアライメント）される構造である。なお、2026年1月に発表され同年6月からスパータンバーグ工場Hall 52へ投入された次世代の「Figure 03 × Helix 02」では、従来の手書きC++制御コード109,504行を単一の1,000万（10M）パラメータ神経ネットワーク「System 0（制御周波数1kHz＝周期1ミリ秒）」に置換し、歩行と上半身マニピュレーションの境界を完全に撤廃した全身協調制御（Whole-Body Loco-Manipulation）へと進化している[10]。

1.3 治具着座確認（座り・浮き検知）のクローズドループ検証と世代間進化

板金パネルを治具ピンへ挿入した際、ピン途中で穴縁が噛み込んで斜めに浮く「片当たり（着座不良）」を見逃したまま6軸溶接ロボットがクランプ・打点を行えば、即座にパネル隙間不良や溶接不良を招く[26]。公開事実として、Figure 02のHelix（System 1）は35自由度の関節目標値と同時に、行動シーケンスの終了条件を予測する合成出力「タスク完了率（Percentage Task Completion）」を200Hzで出力していた[16]。手先の力覚・固有受容覚フィードバックとカメラ視覚を通じ、「部品が治具の定位置へ収まるか否かが二値的（Binary）に定まる」物理特性を利用して装填完了を判定していた[9]。加えて車体溶接設備側の標準品質保証機構として（工学的推論）、溶接治具の受け面には着座検知センサ（近接スイッチやエアシート確認機構）およびクランプ完了確認スイッチが組み込まれており、ロボット側の完了推論と治具PLC側の物理着座信号の双方が成立して初めて溶接工程へ移行する二重検証ロジックが組まれていたとみられる。

ただし、Figure 02のセンサ配置には車体板金作業特有の制約も存在した。Figure 02のカメラは頭部・胴体の計6基に集約されていたため、大型の板金パネルを両手で抱えて治具奥へ差し込む最終局面において、ロボット自身の前腕やワーク自体が頭部カメラの視線を遮る自己遮蔽（セルフオクルージョン）が生じやすい構造にあった[8]。この現場課題を踏まえ、後継機Figure 03では決定的なセンサ刷新が行われた（公開事実）[11]。第一に、左右の掌（手のひら）に広視野角・低遅延の「掌内蔵カメラ（Embedded Palm Cameras）」を搭載し、頭部カメラが遮蔽される至近距離の挿入時にもピン穴の噛み合いと座面密着を直接視覚監視できる冗長フィードバックを確立した[11]。第二に、ペーパークリップ1個の重さに相当する最小**3**グラムの圧力まで検知可能な自社開発の第1世代指先触覚センサ（Tactile Fingertips）と柔軟指先を採用し、把持中の滑り予兆検知のみならず、板金が治具データム面に底付きした瞬間の微小な接触反力変化を直接計測可能としている[11]。

第2章 量産タクトタイム同期と10時間連続シフト稼働・予防保全の運用実態

2.1 動作速度400%向上・成功率7倍向上の定量的内訳とタクトタイム構造

2024年の初期パイロット試験から同年11月の稼働アップデートに至る過程で、Figure 02は初期トライアル比で動作速度**400%**向上（**4**倍高速化）およびタスク成功率**7**倍向上（プロンプト等で「7倍高速化」と混同されやすいが、一次発表における400%は移動・作業速度の向上、7倍はタスク成功率・精度の改善倍率を指す）を達成し、1日あたり最大約1,000回の部品配置をこなす性能水準へ到達した[9]。二足歩行ロボットにおいて動作速度を4倍に引き上げることは、単純にモーター回転数を上げるだけでは実現できない。加減速の慣性力が増大すれば停止時の機体揺れ（セトリングタイム）が長引き、かえって5mm公差のピン挿入時間を悪化させるためである。

公表されているKPI要件「総サイクル84秒」「治具ドア開放後のロード時間37秒」「1部品あたりの5mm公差配置2秒」「1サイクル3部品装填」からタクトタイム内訳を定量分解すると、無駄排除のメカニズムが明確になる[4]。37秒のロード許容枠のうち、3部品の最終精密挿入に要する時間は計6秒（2秒×3回）であり、残る**31**秒の枠内で「コンテナからの3回分のピッキング＋計約40歩（約10.7m）以内の短歩幅往復歩行・旋回＋3点目装填後のセル安全域への退避」を完結させている計算となる[4]。すなわち1部品あたりの平均処理時間（ピック＋移動＋挿入）は約11〜12秒であり、初期PoCにありがちな「完全停止してから認識し、認識してから腕を動かす」といったステートマシン間の停止デッドタイムを削ぎ落とし、歩行減速・旋回と腕のリーチング準備姿勢を連続的にオーバーラップさせたことが速度400%向上の主因と分析できる[4]。また、治具ドア閉鎖後に6軸ロボットが溶接・払出しを行う残り47秒間（84秒−37秒）は、ヒューマノイドがコンテナ前待機位置で次サイクルの対象パネルを事前視覚認識し、かつアクチュエータの熱負荷デューティ比を平準化するインターバルとして機能する構造にある（工学的推論）。

ここで、生産技術陣が厳密に監査すべき「稼働台数・観察期間・技術的可用性」の検証事実を整理する。2025年3月〜4月、BMW広報担当のSteve Wilson氏は「生産時間中に車体工場の隔離ワークセルで稼働しているFigure 02は1台である」と説明し、またFortune誌が「単一機体かつ非生産時間帯中心の稼働ではないか」と疑問を呈した報道に対し、Figure AIのBrett Adcock CEOが虚偽報道として法的措置を示唆し反論する論争が生じた[8]。二次メディアの間でも稼働機体数を1台、2台、あるいは6台とする記述のばらつきが見られるが[1]、独立監査機関HumanoidUptime（HU-R001）の精査結果は以下の通り明確な結論を下している[5]。

第一に、期間境界についてBMWグループは「10ヶ月間の生産支援」と公表し、Figure AIはテスト・立上げを含むプログラム全体として「11ヶ月間のデプロイメント（機体立上げから6ヶ月以内に工場納入・試験開始、10ヶ月以内に実ライン毎日稼働へ移行）」と記述している[4]。第二に、BMWとFigureの双方が公式に裏付けた確定実績は「累積運転時間1,250時間以上」「投入部品90,000点以上」「30,000台超のX3生産寄与」「月〜金の10時間シフト運用」である一方、正確な投入機体総数（Fleet Size）、計画稼働時間に対する技術的可用性（Availability）、MTBF、およびMTTRは非公開である[5]。前述の通り、30,000サイクル×84秒の純粋タクト換算時間は700.0時間であり、記録された1,250時間超の運転時間（Runtime）との差分約550時間超には前後工程待ちや段取り待機中のシステム稼働時間が含まれる。また10ヶ月間（約215平日×10時間＝約2,150シフト時間）に対する1,250時間超という実績は、単一ワークセルにおける段階的ランプアップおよび充電・保守時間を除いた実稼働記録として極めて現実的な数値である[5]。

2.2 10時間シフト運用におけるバッテリー管理・充電方式の世代間比較

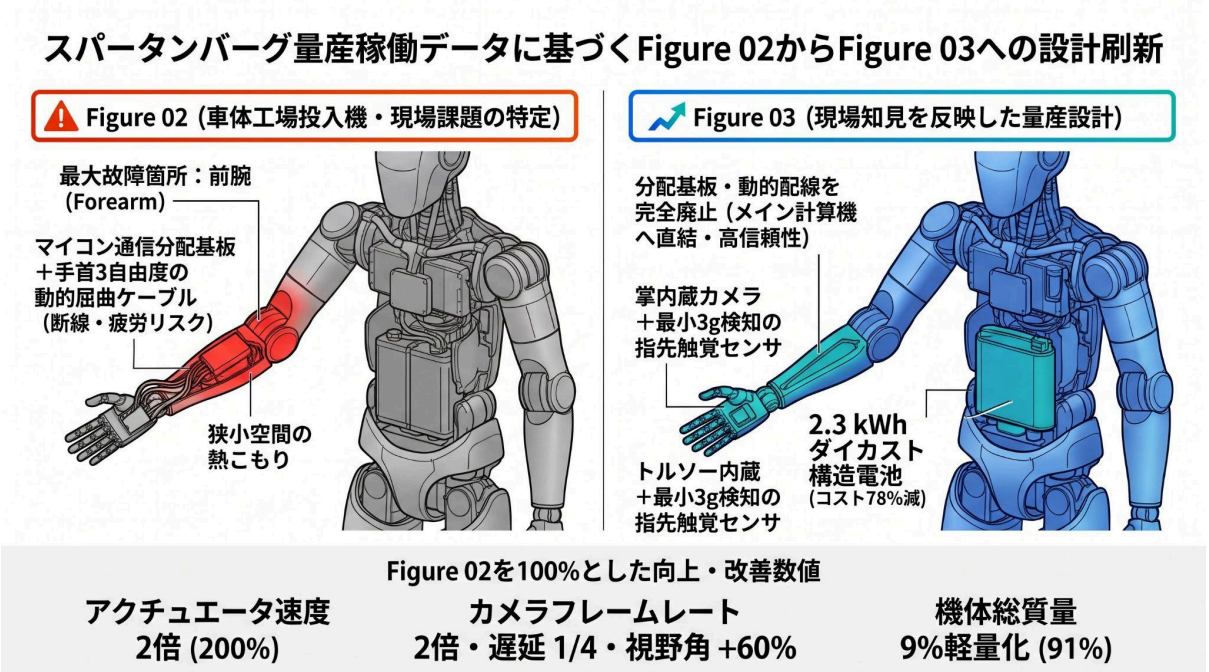
月曜から金曜の「1日10時間シフト」を現場で維持するうえで避けて通れない運用課題が、オンボードバッテリーの1充電あたり稼働時間とのギャップである[4]。Figure AIの公式発表により、Figure 02は胴体（トルソー）内部に前世代機（Figure 01）比で50%以上のエネルギー増となる

2.25 kWhのカスタムバッテリーパックを搭載していたことが確定している[21]。一部ブログ等には7.5時間や20時間といった未検証の推測値も散見されるが、実負荷を伴う産業作業での実質連続稼働時間は約**5**時間と広く報告されており、Figure AI自身もBMW完了報告書において日中の充電スケジュールやバッテリー交換有無の詳細を開示していない[4]。

したがって、実質約5時間のバッテリーパックで「10時間シフト」を成立させた現場運用としては、シフト中の昼休憩・小休憩およびコンテナ交換等のライン停止枠を活用した有線継ぎ足し充電、あるいは工場内に配備した予備機体とのシフト中交代ローテーション（ホットスワップ運用）の2方式（またはその併用）が有力な工学的運用解として導かれる[1]。特に後者の「セル内稼働は常時1台としつつ、充電・保全用に予備機をローテーションさせた」という運用構造は、BMW広報の「稼働中は1台」という説明と一部業界誌の「2台（または複数台）がプロジェクトに参加」という記述の食い違いに対しても合理的な工学的説明を与える[1]。

しかし、有線充電ケーブルの挿抜や予備機との入れ替えに人手を要する運用は、工場全体へ数十台規模で展開する際の稼働率低下要因となる。この教訓から、後継機**Figure 03**では電源・充電アーキテクチャが抜本的に刷新された（公開事実）[11]。Figure 03は高張力プレス鋼板とアルミダイカスト筐体を胴体の構造部材そのものとして統合した**2.3 kWh**バッテリーを搭載し、Figure 02比で**78%**のバッテリーコスト削減を達成しつつピーク性能で連続5時間の稼働を確保した[36]。さらにダイカスト筐体へ冷却流路を直接統合した強制対流アクティブ冷却により発熱を抑えながら**2 kW**の急速充電に対応するとともに、ロボットの両足裏に誘導受電コイルを内蔵し、床面のワイヤレス充電スタンド／マットに歩いて乗るだけで**2 kW**の自動非接触充電が開始される機構を実装した[11]。これにより人間によるプラグ挿抜を完全に廃し、ラインの微小な空き時間に自律帰還して継ぎ足し充電（オポチュニティ・チャージング）を行う高可用性運用が可能となっている[3]。

2.3 前腕（Forearm）故障モードの徹底解剖とFigure 03での抜本的再設計



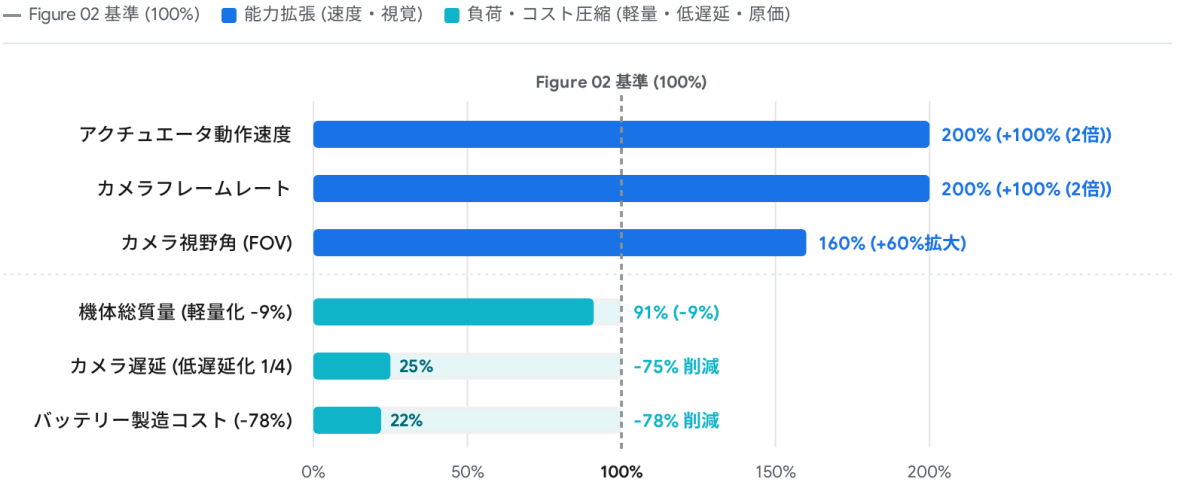
1,250時間以上・90,000点以上の板金ハンドリングという実ライン稼働がもたらした最大のエンジニアリング成果は、シミュレーションでは決して露呈しないハードウェア劣化・故障箇所の特定で

あった[4]。Figure AIは公式完了レポートにおいて、全体のハードウェア故障は最小限であったとしつつも、「前腕部（Forearm）が最大のハードウェア故障箇所（Top Hardware Failure Point）であった」と具体的に開示している[4]。

脚部の大出力関節ではなく前腕部に故障が集中した原因は、4つの過酷な複合ストレスにある[4]。第一に、人間の腕と同等の細長い円筒空間に手首3自由度の駆動機構と16自由度ハンドへの配線を収める極限の狭小パッケージング（Tight Packaging）である[4]。第二に、200Hz視覚サーボで板金荷重を支えながら2秒以内に5mm公差へねじ込むための高周波な手首3自由度微修正負荷である[4]。第三に、密閉された外装内での連続モーター・基板発熱による放熱制約（Thermal Constraints）である[4]。そして第四の決定的要因が通信・配線構造であり、Figure 02の前腕内部には胴体メインコンピュータと手首アクチュエータ群の通信を中継・分配する「マイクロコントローラ搭載プリント基板（Distribution PCB）」が内蔵され、手首関節を跨ぐ「動的ケーブル（Dynamic Cabling）」で接続されていたため、十万回規模の反復屈曲・ねじり運動と熱ストレスが重なって断線や通信障害を誘発したのである[4]。

スパータンバーグ量産稼働データに基づくFigure 02からFigure 03への設計刷新

定量性能指標 **Figure 02を100%基準としたFigure 03のスペック変化**



機構・電装アーキテクチャ **1,250時間超の車体ライン故障・運用ログを反映した主要サブシステム刷新**

	Figure 02（車体工場投入機）	Figure 03（現場知見反映・量産設計機）
1. 前腕・手首電装系	現場課題：1,250時間稼働における最大のハードウェア故障箇所（狭小実装・3自由度屈曲・熱制約）	
	マイコン分配基板＋動的屈曲ケーブル 前腕内PCBでメイン計算機〜手首アクチュエータ間通信を中継	→ **基板・動的配線廃止（メイン計算機へ直結）** 各手首モータ制御器が直接通信し、複雑性低減・信頼性向上・排熱簡素化を実現
2. 視覚・触覚センサ	現場課題：治具近傍での死角（オクルージョン）耐性と薄肉板金の微小滑り検知	
	頭部・胴体6カメラ＋関節固有受容覚 オンボードRGBカメラ6基と16自由度ハンドによるハンドアイ協調制御	→ **掌カメラ追加＋最小3g検知指先触覚センサ** 把持中の近接視覚フィードバック冗長化と、滑り発生前の事前検知を達成
3. 電源・充電・量産構造	現場課題：連続シフト対応の自動充電運用とCNC切削からの脱却（DFM量産化）	
	2.25 kWh トルソー内蔵（CNC切削主体） 機械加工主体の機体構造に2.25 kWhバッテリーパックを搭載	→ **2.3 kWh 構造一体ダイカスト＋足裏2kW無線充電** 金型量産工法（ダイカスト・プレス）へ転換し、足裏コイルによる自動非接触充電を実装

1,250時間超の車体工場稼働で最大の故障箇所となった「前腕の通信分配基板と可動配線」の教訓を反映し、Figure 03では電装直結化とダイカスト量産設計への転換が図られた。グラフはFigure 02を100%基準としたFigure 03の公表スペック変化率を示す。

Data sources: Figure AI (Production at BMW), Figure AI (Introducing Figure 03), Figure AI (F.03 Battery Development), Robozaps

この故障ログを受け、Figure AIはFigure 03の開発において前腕・手首電装系を全面的に再設計した[4]。具体的には、前腕内の分配プリント基板（**Distribution Board**）と動的ケーブル（**Dynamic Cabling**）の双方を完全に廃止し、各手首モーターコントローラが胴体のメインコンピュータと直接通信するアーキテクチャへ変更することで、部品点数削減・信頼性向上・熱管理の簡素化を同時に達成した[4]。あわせて機体構造の製造プロセスも、Figure 02のCNC切削加工主体から金型を用いたアルミダイカスト・プレス成形・射出成形（自社量産工場BotQでの製造）へと移行し、アクチュエータ速度2倍・トルク密度向上、カメラフレームレート2倍・遅延4分の1・視野角60%拡大、および機体総質量9%軽量化を実現している[11]。なお、Figure 02フリートは知的財産保護のため分解せずフィンランドでの溶解処理を経て2026年9月に退役（本社保管の少数を除く）となり、スパータンバーグ工場のプロジェクトはFigure 03へと完全に引き継がれた[4]。

第3章 工場上位システム（BMW iFACTORY / MES / PLC）とのリアルタイム統合プロトコル

3.1 BMW iFACTORY「統合データプラットフォーム」とフィジカルAI統合アーキテクチャ

ヒューマノイドが量産工場で単なるデモンストレーション機にとどまらず生産資産として機能するための絶対条件は、工場上位の製造実行システム（MES）および生産IT基盤とのリアルタイム統合である[13]。BMWグループは2026年2月の「生産におけるフィジカルAIコンピテンスセンター（Center of Competence for Physical AI in Production）」設立発表において、デジタルAIと実機ロボットを結びつけるフィジカルAIの前提基盤として「生産システム全体にわたる統一されたIT・データモデル（Unified IT and Data Model / Unified Data Platform）」を明示している[17]。

BMWグループは従来工程ごとに孤立していたデータサイロを解体し、全生産工程のデータが標準化・一貫性を保ち常時利用可能な統合データプラットフォームを構築した[17]。スパータンバーグ工場（車体工場およびX3派生モデルと将来の電動車iX5を混流組立する拡張後のHall 52）では、この基盤上に「BMW Virtual Factory」と「AIQX（Artificial Intelligence Quality Next）」が連携している[3]。BMW Virtual Factoryは計画段階から日常生産まで3Dデジタルツイン上で人間やロボットの動作シーケンスを事前検証し、部品到着前のエラーフリーなライン立上げを支える[3]。またAIQXはカメラとセンサを用いた視覚・音響品質検査の社内標準基盤であり、ライン稼働中のリアルタイム判定とスマートデバイス経由での作業者への即時フィードバックを担っている[3]。さらにサードパーティ製造ITベンダー（iFactory社）によるスパータンバーグ事例分析でも強調されている通り、ヒューマノイドの実戦配備では初日からMES統合（作業指示・車両ビルドシーケンスの受信、車両ごとの品質記録書き戻し、異常時のアンドン発報、設備保全CMMSへのデータルーティング）を組み込むことが不可欠の要件と位置付けられている[14]。

3.2 溶接セルPLC・自動扉・6軸スポット溶接ロボットとの3層インターロックシーケンス

現場のボデーショップ・セルレベルにおいて、Figure 02が既存の6軸スポット溶接ロボット群およびセル制御PLCとどのように同期していたかについては、公開事実と工学的推論の境界を明確に整理する必要がある。まず公開事実として、(1) BMWスパータンバーグ工場（Hall 52等のライン）ではシーメンス（Siemens）製PLCを中核とするFA制御アーキテクチャが採用されていること[39]、(2) Figure 02は「自動開閉式の溶接治具ドア（Weld-Fixture Door）」を備えた隔離ワークセル内で稼働し、ドア開放後に37秒のローディングを行い、その後別区画の6軸産業用ロボットが溶接してメインラインへ供給する構成であったこと[4]、(3) 無線インフラとしてデッドゾーンのないWi-Fi 6または5Gカバレッジが前提とされ、Figure 03ではさらにテラバイト規模の学習データ回収用に**10 Gbps**ミリ波（**mmWave**）高速データオフロード機能が実装されたことが判明している[11]。一方、セルPLCとFigure機体間の具体的なフィールドバス／通信プロトコル仕様（PROFINET / PROFIsafe、OPC UA、MQTT等の詳細パケット構成）は公式には非公開である。

これらの公開事実と自動車車体工場の標準制御設計を統合すると、スパータンバーグの板金ローディング設備は「上位の統合データ基盤・MES層」「中間のセル安全PLC・エッジゲートウェイ層」「下位の物理分割ワークセル層（ヒューマノイド投入区画／中央の共用溶接治具および自動開閉ドア／6軸スポット溶接区画）」という明確な3層アーキテクチャで構成され、ヒューマノイドと6軸溶接ロボットが同一空間でリアルタイムに軌道干渉を避け合うのではなく、「自動開閉式の溶

接治具ドアを物理隔壁とした決定論的な時分割ハンドシェイク（Time-Multiplexed Handshake）」によって溶接スパッタ飛散防止と衝突安全を両立させていたと結論付けられる［工学的推論を含む詳細シーケンス］[4]。

1. 車種シーケンス・投入指示の配信（統合データ基盤／**MES** → セル**PLC**・無線ゲートウェイ → ヒューマノイド）：上位システムから対象シャシーの製造オーダ（X3バリアント情報）が発行され、エッジゲートウェイ（Wi-Fi 6 / 5G上のOPC UAやMQTT等）経由でヒューマノイドへ次サイクルの待機・部品識別指令が送られる[14]。
2. 前サイクル完了と溶接治具ドア開放（**6**軸溶接ロボ → セル安全**PLC** → 自動ドア）：溶接区画側の6軸スポット溶接ロボット群が打点完了・原点退避信号をセル安全PLCへ返し、完成サブアセンブリの払出しと治具クランプ全開（アンクランプ）が確認されると、セルPLCが共用溶接治具のヒューマノイド側を仕切る自動ドアを開放する[4]。
3. 排他ロックとローディング開始トリガー（セル安全**PLC** → ヒューマノイド）：自動ドアの全開リミット確認と同時に、安全PLCのハードウェア・インターロックによって6軸溶接ロボット側の治具進入が完全ロックされ、ヒューマノイドへ「Loading Permitted（37秒カウント開始）」トリガーが送信される[4]。
4. **3**部品装填と着座信号の照合（ヒューマノイド ↔ 治具着座センサ・セル**PLC**）：Figure 02が3点の板金パネルを順次ロケートピンへ挿入し、ロボット側のタスク完了推論（Helix）と治具側の物理着座検知が一致した段階で装填完了フラグを返送する[4]。
5. 退避確認・ドア閉鎖・溶接開始と品質記録（セル安全**PLC** → 自動ドア → **6**軸溶接ロボ → **MES**）：ヒューマノイドが治具開口部の保護領域（ライトカーテン／レーザースキャナ監視域）から完全に後退したことをセルPLCが確認した後に自動ドアを閉鎖し、空圧クランプを閉じて6軸溶接ロボットへ溶接開始を許可するとともに、車両単位の投入実績を上位データ基盤へ記録する[4]。

なお、システム統合における重要な戦略的論点として「データの帰属と横展開速度」がある。スパータンバーグでの稼働を通じ、生産・品質ログはBMW側の統合データプラットフォームに生産データとして蓄積される一方、ロボットの視覚・動作テレメトリはFigure AI側のVLAモデルを鍛える学習データとして蓄積された[4]。サードパーティ分析によれば、第1ユースケースで統合基盤を確立した結果、Figure AIによる車体工場での第2ユースケース展開期間は初回の12ヶ月から30日間へと短縮されたと報告されている（ただし契約上のデータ独占権や所有権条項の詳細は非公開であり、完成車メーカー各社が今後導入契約を結ぶ際の最重要交渉項目となる）[14]。

第4章 成功率99%の裏にある残り1%の例外・異常リカバリーとライン停止回避策

4.1 稼働ケイデンスにおける「1%の失敗」の数学的意味と異常モード分類

Figure AIが設定した配置精度KPIの目標は「シフトあたり99%超の成功率（3部品すべてが正確に装填されたサイクルの比率）」であり、公式発表および関連報道ではこの99%超という水準が維持されたと報告されている[4]。またサードパーティベンダー（iFactory社）の検証記事では、具体的な参照値として「成功率98.7%」という数字も挙げられている[14]。

研究段階のデモでは99%は高い数字に見えるが、84秒タクトの自動車量産ラインで1日10時間（36,000秒＝理論最大約428サイクル）稼働させた場合、成功率**98.7%**は約**77**サイクルに**1**回（**1**シフトあたり約**5**〜**6**回）、成功率**99.0%**でも**100**サイクルに**1**回（**1**シフトあたり約**4**回）の異常・失敗が毎日発生する計算となる[14]。仮にこの残り約1%の事象が生じるたびにX3の車体本ライン全体

が停止すれば、量産設備としては到底成立しない。したがって、スパータンバーグ実装の成否を分けた隠れた核心は、コンテナ内での板金パネルの取り損ね・滑り（Mis-pick / Slip）、油膜密着等による2枚取り、歩行旋回中の保持姿勢ズレ、および治具ロケートピンへの引っ掛かり（噛み込み・浮き）といった異常モードに対し、ミリ秒単位の自律補正と人間介入エスカレーション、そして下流バッファを組み合わせた多段階の防壁を築いたことにある[10]。

4.2 ミリ秒単位の自律リトライ機構（System 0 / 1 / 2 の多層フィードバック）

従来のティーチング再生型ロボットは、ワークの傾きやピンへの微小な引っ掛かりが生じた瞬間に軌道を修正できず、過負荷アラームを出して停止する[12]。これに対し、Figure 02に搭載されたHelix（およびFigure 03のHelix 02）は、独立した「エラー復帰用分岐プログラム」を呼び出すのではなく、制御周期の異なるフィードバックループのなかで接触変動や位置ズレを暗黙的エラー修正（Implicit Error Correction）として連続吸収する設計をとっている[12]。

具体的には、最下層のアクチュエータ制御（Helix 02のSystem 0では**1 kHz**＝周期**1**ミリ秒）が板金エッジと治具ピンの接触反力に対して関節トルクと全身バランスを柔軟に順応させ、無理なこじりや機体動揺を抑え込む[12]。その上位で200 Hz（周期5ミリ秒）で回る視覚運動ポリシー（System 1）が、カメラ画像と手首・指先の状態からピンの噛み込みやパネルの傾きを5ミリ秒ごとに検知し、目標の着座状態（「タスク完了率」推論値の到達）に至るまで手首角度の微調整や差し直しを即座に実行する[12]。特にFigure 03では、3グラム感度の指先触覚センサが完全な落下に至る前の「滑り予兆（Impending Slip）」を検知して把持力を瞬時に補正し、掌カメラが死角なくピン穴のズレを捉えることで自律復帰能力が一段と強化された[11]。さらにコンテナ内で指が外れたような場合でも、7〜9 Hz（周期約110〜140ミリ秒）でシーン全体を意味論的に再解釈するSystem 2が未把持状態を認識して潜在ゴールを更新し、そのまま再ピッキング動作へと繋げる[12]。第2章で算出した通り、37秒のロード許容枠に対して通常の3部品投入は約30秒前後で収まるため、セル内には1サイクルあたり数秒間のタイムスラック（時間余裕）が存在し、軽微な持ち直しや再挿入であれば84秒タクトを逸脱せずに自律吸収できる構造となっている（ただし、90,000点超の実績のうち初回一発成功サイクルと自律リトライ経由成功サイクルの分離比率は非公開である[5]）。

4.3 自律復帰不能時のエスカレーション・LOTO手順とサブアセンブリ・バッファ設計

板金の床面落下、2枚取りによる治具不適合、あるいは37秒のロード許容時間超過など、自律制御だけでは回復不能な異常が発生した場合に備え、スパータンバーグ工場では明確な人間介入プロトコル（Human Intervention Protocol：定義されたエスカレーション、復旧、サイクル再開手順）が運用された[14]。Figure AIは第3の重要KPIとして「Interventions（人間がロボットを一時停止またはリセットしなければならなかった回数：目標はシフトあたりゼロ）」を掲げ、発生した全介入事象をログ記録して次世代機開発へ反映させた（総介入回数の実数値は非公開）[4]。現場でのエスカレーションとライン停止回避は以下の3段階で機能する[6]。

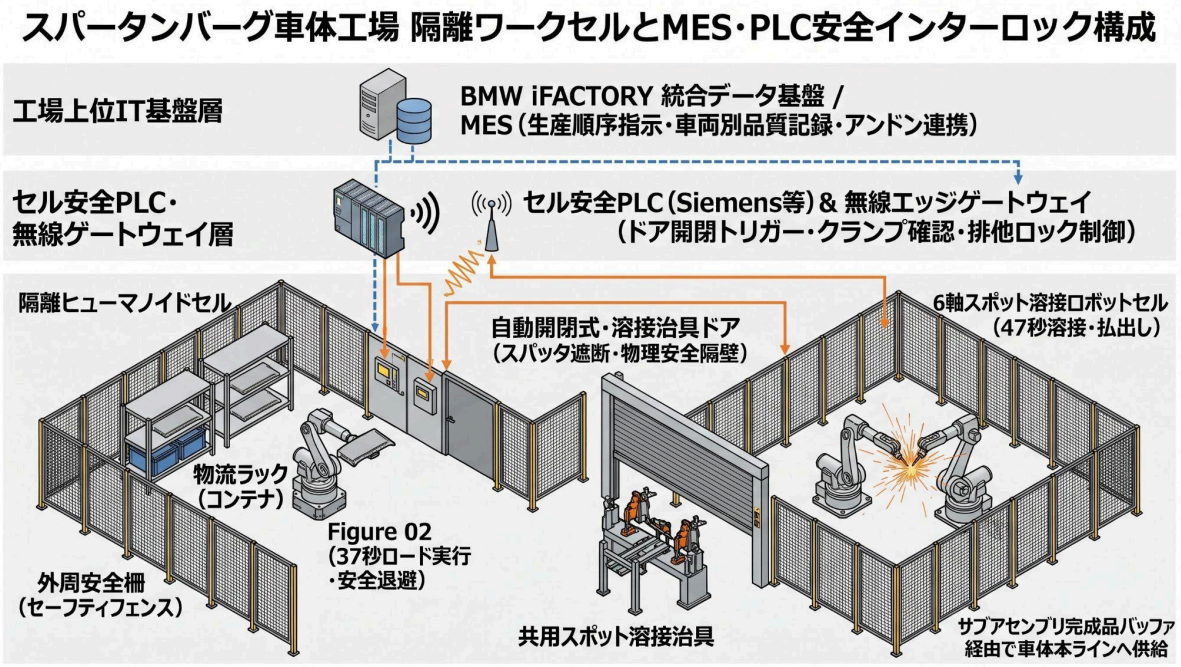
1. 安全姿勢での一時停止とアンドン自動通知：タイムアウトまたは復帰不能状態を検知すると、ロボットは無理な動作を止めて安全な姿勢で一時停止（Pause）し、上位連携層を通じてアンドン（Andon）警報およびライン監督者・保全担当者のスマートデバイスへ異常通知を発報する（公開事例分析では、従来シフトあたり作業員2名を要した工程に対し、1名の人間監督者が3台の機械を監視・例外処理する体制への移行が報告されている）[3]。
2. インターロック遮断（**LOTO**）下でのセル内進入とリセット：担当者が隔離ワークセル内へ立ち入って落下パネルの回収や治具上の部品リセットを行う際、溶接治具ドアは閉鎖ロックされて6軸溶接ロボット群から物理的に遮断される。同時にセル安全扉の開放インターロッ

ク（OSHA基準に準拠したロックアウト／タグアウトおよび安全PLC制御）によりヒューマノイドの動作が安全停止状態で拘束され、作業完了・セル退出後に規定のサイクル再開（Cycle Restart）操作が行われる[14]。

3. サブアセンブリ・デカップリング・バッファによる**X3**本ライン停止の遮断：完成車ラインの生産技術上、最も重要なレイアウト設計は、Figure 02が最終組立やボデーメインラインのコンベヤ上へ直接部品を載せていたのではなく、「オフライン／サブライン側の溶接治具へ板金をセットし、6軸ロボットが溶接したサブアセンブリ完成品をメインラインへ供給（Feed into the main line）していた」という事実である[4]。自動車ボデー工場の標準設計において、サブアセンブリ溶接セルとメインフレーミングラインの間には通常、数台～十数台分の仕掛品（WIP）を保持するストックシューターやコンベヤバッファが配置される（工学的推論）。仮に10台分（約14分相当）の完成品バッファが介在すれば、シフト中に数回、1回あたり2～3分の人間リセット介入が発生しても、下流のBMW X3本ラインへの部品供給は途切れず、工場全体のライン稼働率（OEE）への波及を遮断する設計が成立する。

第5章 車体工場における機械安全・労働安全クリアランスとROI評価

5.1 動的安定二足歩行ロボットの機械安全規格と「隔離ワークセル」設計の真実

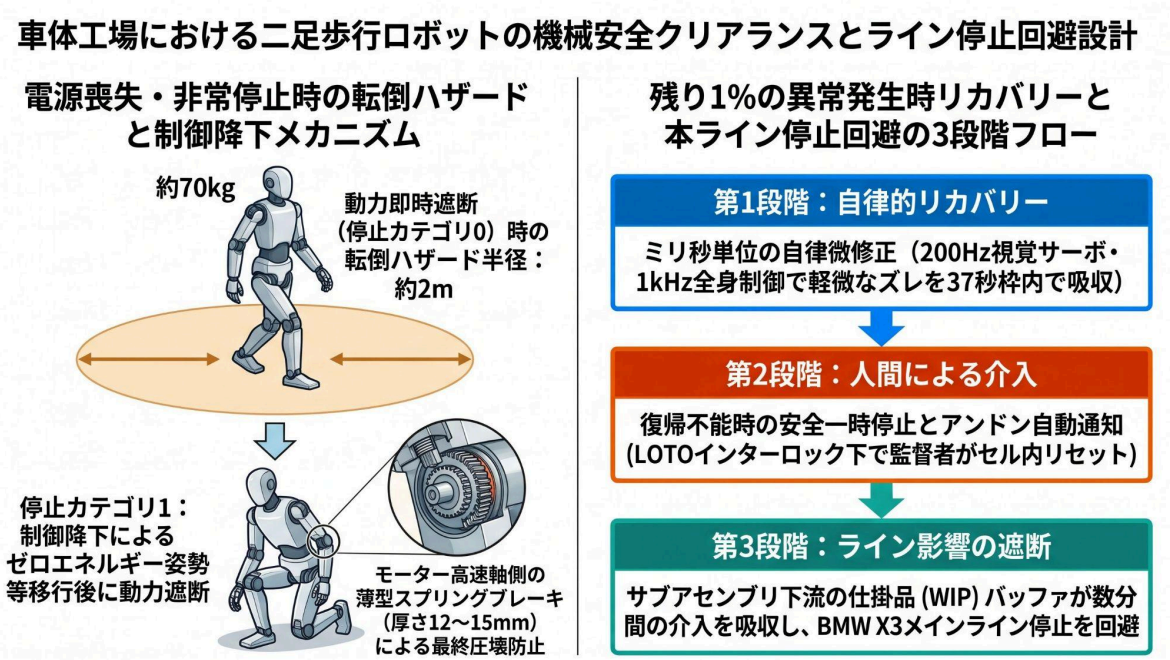


身長約168～170cm（約5フィート6インチ）、質量約70kg（154ポンド）、可搬質量20～25kg（いずれも広く報告されている機体諸元[8]）の二足歩行ロボットであるFigure 02を量産フロアで稼働させるにあたり、労働安全研究機関および安全設計者が最も重視するのは適用された安全規格と防護方式である。結論として、スパータンバーグ車体工場におけるFigure 02は、人間と防護柵なしで作業空間を共有する「協働運転」ではなく、物理的な外周安全柵・バリアと安全インターロックで区画された「制限アクセス付き隔離ワークセル（**Contained Work Cell**）」の内部で稼働してい

た[8]。これはBMW広報担当のSteve Wilson氏が「隔離されたワークセル内部の治具へ部品を配置する」と明言している事実、ならびに同業のAgility Robotics（Digit）が物流・製造現場で物理パネルやレーザーバリアによる隔離セル運用を採用して北米OSHA一般義務条項や機械安全規格への適合を図っている実態と整合する[8]。

2025年～2026年現在、産業用ヒューマノイドを取り巻く国際安全規格は大きな転換点にある[42]。固定式産業用ロボットの基盤規格である**ISO 10218-1/2:2025**（北米では**ANSI/RIA R15.06**）は2025年改訂で協働要件の統合とサイバーセキュリティ要件の追加を行い、産業用移動ロボット規格である**ANSI/RIA R15.08**は車輪式AMR等の安全を規定してきた[42]。しかし、車輪式AMRは「動力を遮断すればその場に静止する（静的に安定している）」ことを前提としているのに対し、二足歩行ヒューマノイドは能動的なバランス制御が止まると転倒するという固有の危険源を持つ[42]。このため現在、ISO/TC 299 WG 12において脚式・車輪バランス式を含む「動的安定型産業用移動ロボット（Dynamically stable industrial mobile robots）」専用の初となるType-C国際安全規格**ISO 25785-1**（現ISO/CD 25785-1、2026年末～2027年最終発行見込み。北米技術報告書は**ANSI/A3 TR R15.108**）の策定が急ピッチで進められている[43]。BMWがFigure 02の車体工場投入において「隔離ワークセル＋自動開閉式溶接治具ドア＋セル境界インターロック」という物理的空間分離（ISO 12100およびISO 13849に基づく本質的ガード設計）を採用したのは、ISO 25785-1正式発効前の過渡期において、万一の転倒時にも周辺作業員への接触リスクを物理的に排除し、立上げから10ヶ月以内で社内安全審査とOSHA適合を確実にクリアするための最も現実的なリスク低減エンジニアリングであった[4]。

5.2 電源喪失・非常停止時の「転倒ハザード（半径約2m）」とメカニカルブレーキの設計ジレンマ



機械安全工学の観点から二足歩行ヒューマノイドが突きつける最大の設計課題は、「非常停止（E-Stop）や電源喪失時における従来の停止カテゴリ0（即時動力遮断）の破綻」である[43]。固定式6軸ロボットでは、非常停止時にモーター電源を即時遮断（Category 0 Stop）し、各関節の無励

磁作動形スプリングブレーキ（Spring-Applied Holding Brake）を閉じれば、アームはその場で凍結して安全が保たれる[43]。ところが歩行中や片脚遷移中の二足歩行ロボットで動力を即時遮断して関節をロックすると、ロボットはバランスを失ってそのまま床面へ倒れ込む[43]。ISO 25785-1原案に関する業界技術指針の試算では、身長**1.7m**のヒューマノイドが秒速**1.5m**で移動中に制御を喪失した場合、速度・積載荷重・床面傾斜に応じて約**2**メートル四方に及ぶ転倒・落下ハザード領域が発生するとされる[43]。

この課題に対し、ISO 25785-1原案の要求方向性および最新の商用ヒューマノイド安全設計は以下の多層防護アプローチを採っている[11]。第一に、非常停止時には即座に電源を切るのではなく、Performance Level d（PLd）相当の安全PLCおよびFailSafe over EtherCAT（FSoE）監視下でアクチュエータ電力を短時間維持して安全に減速・停止させ、さらに保持物を置いて膝をつき重心を極限まで下げる「ゼロエネルギー姿勢（Zero-Energy Pose：電源を切っても転倒しない安定しゃがみ姿勢）」へと制御降下（Controlled Descent：停止カテゴリ1相当）した後に動力を遮断する方式である[42]。第二に、制御系自体が完全喪失した場合の最終防衛線（Last line of defense）として、関節モジュール内のモーター高速軸後端（エンコーダ隣接部・減速機前段）に厚さ12〜15mm程度の薄型スプリングブレーキを組み込み、減速比による保持トルク増幅を利用して機体の完全圧壊（Full Collapse）を防ぐ機構である（なお12関節分のブレーキを通電解放し続けるには24V/48V系で約40〜50Wの電力を要するため、吸引後に保持電圧を約4分の1へ下げる省電力制御が用いられる）[43]。

さらに二次災害防止と協働領域拡大に向け、Figure 03では外装とバッテリーの安全設計が大幅に強化された（公開事実）[3]。バッテリーに関してはOSHA認定の第三者試験機関（NRTL）と協業してヒューマノイド向けUL基準の策定を進め、**UN38.3**認証を取得するとともに**UL2271**規格に向けた**23**項目の主要試験（あらゆる向きからの高さ**1**メートル・コンクリート床面への落下衝撃試験、温度ストレス、**EMI**耐性等）に合格し、単セル熱暴走時にも外部へ火炎を出さない防爆ベント・断熱ポッティング構造を実現した[11]。また機体表面には関節の挟み込み点（Pinch Points）を保護する多密度フォーム材と、工具なしで着脱・洗濯・耐切創仕様への変更が可能なソフトテキスタイル外装を採用し、Hall 52のような物流動線近傍での安全性向上を図っている[3]。

5.3 専用自動機改修・人間作業員とのCAPEX/ROI比較とエルゴノミクス効果

完成車メーカーの生産技術・購買部門が最終的に評価するのは、「なぜ安価で高速な従来型6軸産業用ロボット＋コンベヤ改修ではなく、二足歩行ヒューマノイドを投入したのか」というCAPEX（設備投資）とROI（投資回収）の合理性である。

従来型6軸ロボット（可搬6〜20kgクラスのアーム単体価格は25,000〜55,000米ドル、50kg超の大型機は50,000〜120,000米ドル以上[51]）を用いて自動化セルを構築する場合、安全柵・周辺治具・PLC統合を含めた2シフト溶接・ハンドリングセルの総費用は一般に**110,000〜150,000**米ドル以上を要する[51]。とりわけ本工程のように、不整列な状態で大型物流コンテナに入って届く薄肉板金パネルを固定6軸アームで扱おうとすれば、床面基礎アンカー工事、大型3Dビジョン架台、専用整列ダネージ（部品受け治具）への全容器改修が必要となるうえ、人間作業員向けに設計された狭小セルを拡張するために世界最高稼働を誇るスパータンバーグ工場の**X3**生産ラインを長期停止させる莫大な機会損失が発生する[10]。これに対し、人間と同じフットプリントとリーチを持つヒューマノイドは、既存のコンテナ、通路幅、溶接治具レイアウトに一切の土木・機械改造を加えることなく「ドロップイン代替」が可能であり、将来モデルチェンジ（例：Hall 52でのX3と次世代EV「iX5」の混流や物流シーケンシングへの展開[3]）が生じても、固定設備のスクラップを伴わずソ

フトウェア学習のみで別工程へ再配置できる高い資産転用性を実証している[10]。
また人的側面において、BMWグループは本導入の目的を人員削減（本プログラムに伴うレイオフは報告されていない）ではなく、過酷な反復・中腰作業からの従業員保護（エルゴノミクス改善）と構造的労働力不足への対処と位置付けている[1]。米国製造業では福利厚生・労災保険等を含めたフル負担労務費が**1**時間あたり**30**米ドル以上（2シフト計16時間稼働換算で1ポジションあたり年間約140,160米ドル）に達し、離職1件あたり4,000～8,000米ドルの採用・訓練コストが発生する[15]。
※経済性試算に関する出典注記：Figure 02自体は企業間パートナーシップ専用機であり公式販売価格（MSRP）や契約単価は非公表である[22]。そのうえで、バンク・オブ・アメリカ（2026年分析）やゴールドマン・サックス等の業界アナリスト試算および商用RaaS（Robot-as-a-Service）ベンチマークを参照すると、欧米工場パイロットにおける現行ヒューマノイド単価は**90,000～100,000**米ドル／台（Agility社Digit等の商用RaaS料金ベンチマークでは**10～12**米ドル／時、2シフト年間約70,080米ドル）と推計され、複数シフト稼働時の投資回収期間（Payback Period）は**18～24**ヶ月と算出されている[6]。さらにセクター全体の製造コストは2023～2024年の1年間で40%低下しており、Figure AIが量産目標価格帯として20,000～30,000米ドルを掲げ、バンク・オブ・アメリカが2030年までに単価**17,000**米ドル未満への低下を予測するなか、投資回収期間は今後**14**ヶ月未満へと急速に短縮される見通しにある[6]。

5.4 車体板金ローディング工程における3方式比較表

ここまでの全5章にわたる動作精度・タクトタイム・設備統合・例外処理・機械安全・ROIの分析結果を統合し、車体板金ローディング工程における3方式の比較を以下の標準表に示す。

評価項目・技術指標	人間作業員	従来型**6**軸ロボット＋専用治具改修	**Figure**ヒューマノイド（**Figure 02 / 03**）
位置決め精度と治具挿入適応性	視覚と触覚により公差1～5mmへ柔軟に挿入可能だが疲労で終業前にミス率が上昇	機械的反復精度は±0.05～0.1mmと最高だがワーク供給位置ズレに極めて脆弱	歩行停止誤差数cmを200Hz視覚サーボで吸収し2秒以内に公差5mmへ挿入
タクトタイムと動作速度	熟練作業員でサイクル84秒枠に対し余裕あり（標準約25～35秒で3部品投入）	最速（約15～25秒で3部品投入可能）でありハイタクト本ライン直結に最適	初期比400%高速化により84秒サイクル中の37秒ロード枠を安定クリア
物流コンテナ・不整列ワーク対応	容器内の部品傾きや位置ズレをその場で判断し両手で自在に切り出し可能	高価な3Dビジョン架台や専用整列ダネージへの容器全面改修が必須となる	VLAモデル（Helix）と16自由度両手により既存物流容器から直接取り出し可能

既存狭小セルへの導入性と初期CAPEX	設備改修費ゼロだが年間労務費（米欧2シフトで約14万米ドル超）と離職費が継続発生	アーム単体は2.5〜5.5万米ドルでも基礎工事・容器改修・総セル構築費で11〜15万米ドル超	既存人間用セルへ無改造ドロップイン可能（業界推計機体費9〜10万米ドルで回収18〜24ヶ月）
車種変更・他工程への転用性	作業手順書の改訂と数時間の現場教育のみで即座に別車種・別工程へ配置転換可能	モデルチェンジ時にハンド・フィーダの再設計とPLCラダー大幅改修が発生	物理治具改修なしでVLA学習により別工程や物流シーケンシングへ柔軟に転用可能
連続稼働とエネルギー・保全管理	労務規定上の休憩・シフト交代が必須であり中腰反復作業による筋骨格系労災リスクが高い	AC電源直結で24時間連続稼働・高MTBFを誇るが定期グリスアップとケーブル保守が必要	月〜金10時間シフト運用（F.02の前腕配線課題をF.03で直結解消し足裏2kW無線充電を実装）
機械安全設計と非常停止時の挙動	安全靴・耐切創手袋等の保護具と治具自動ドア・ライトカーテンで作業者を保護	停止カテゴリ0の動力遮断と電磁ブレーキでその場に即時凍結（ISO 10218準拠の柵内隔離）	隔離セル＋自動ドアで運用しつつ制御降下（ゼロエネルギー姿勢）と薄型ブレーキで転倒防護
例外復帰（残り1%の異常対応）	落下や噛み込みをその場で自己判断し数秒で拾い直し・修正が可能	ピン噛み込み時は過負荷アラームで即座にセル停止し保全担当者の手動復旧待ちとなる	軽微なズレはミリ秒単位で自律微修正し復帰不能時はアンドン発報＋下流バッファで本ライン停止回避

参照一次資料・公式発表・専門検証記事一覧

1. Figure AI公式稼働結果レポート（2025年11月19日）: *F.02 Contributed to the Production of 30,000 Cars at BMW* — https://www.figure.ai/news/production-at-bmw[4]
2. BMW Group公式プレスリリース（2024年8月6日）: *Successful test of humanoid robots at BMW Group Plant Spartanburg* — https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0444265EN/successful-test-of-humanoid-robots-at-bmw-group-plant-spartanburg?showMedia=photo[5]
3. BMW Group公式プレスリリース（2026年6月25日）: *BMW Group advances the use of*

Physical AI in production with Figure 03 project in Spartanburg — https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0458778EN/bmw-group-advances-the-use-of-physical-ai-in-production-with-figure-03-project-in-spartanburg?showMedia=photo[3]

4. BMW Group公式発表（2026年2月27日）：*BMW Group to deploy humanoid robots in production in Germany for the first time* — https://newsroom.bmwgroup.com/emea/bmw-group-to-deploy-humanoid-robots-in-production-in-germany-for-the-first-time/（および関連公式PDF記録：*BMW Group first to deploy humanoid robots in production in Germany*, https://www.press.bmwgroup.com/global/article/attachment/T0455864EN/644966）[5]
5. Figure AI公式発表（2026年6月30日）：*F.03 Arrives at BMW* — https://www.figure.ai/news/f-03-at-bmw[10]
6. Figure AI公式技術解説（2025年2月20日）：*Helix: A "System 1, System 2" VLA for Whole Upper Body Control* — https://www.figure.ai/news/helix[16]
7. Figure AI公式技術解説（2026年1月27日）：*Introducing Helix 02: Full-Body Autonomy* — https://www.figure.ai/news/helix-02[12]
8. Figure AI公式製品発表（2025年10月9日）：*Introducing Figure 03* — https://www.figure.ai/news/introducing-figure-03[11]
9. Figure AI公式バッテリー技術解説（2025年7月17日）：*F.03 Battery Development* — https://www.figure.ai/news/f-03-battery-development[36]
10. Figure AI公式発表（2026年9月30日）：*F.02 Decommission* — https://www.figure.ai/news/f-02-decommission[37]
11. HumanoidUptime 独立信頼性監査レコード（2026年9月4日改訂第11版）：*Figure 02 × BMW (Record ID: HU-R001)* — https://humanoiduptime.com/records/figure-02-bmw/[5]
12. Humanoid Guide 機械安全・関節ブレーキ技術解説：*Joint brakes: what holds a humanoid when the power goes (ISO 25785-1 analysis)* — https://humanoid.guide/humanoid-robot-joint-brakes/[43]
13. Agility Robotics 産業安全規格・隔離ワークセルFAQ：*Safety & Workcell Integration FAQ* — https://www.agilityrobotics.com/faq[42]
14. IndustrialSage 現場検証記事（2026年7月23日）：*BMW's Figure 02 Humanoid Robots Ran for 11 Months at Spartanburg* — https://www.industrialsage.com/bmw-figure-ai-humanoid-robots-spartanburg-2026/[1]
15. EVXL 検証報道（2025年4月12日）：*Figure AI's Humanoid Robots at BMW: Real Progress or Overhyped Promise?* — https://evxl.co/2025/04/12/figure-ai-humanoid-robots-at-bmw/[8]
16. Humanoids Daily 検証報道：*Figure AI's BMW Partnership: Reports Detail Cautious First Steps for Humanoid Robots in Manufacturing* — https://www.humanoidsdaily.com/news/figure-ais-bmw-partnership-reports-detail-cautious-first-steps-for-humanoid-robots-in-manufacturing[18]
17. BERI ROI・経済性分析記事：*BMW Robots Build 30,000 Cars: 18-Month Payback, Then $90K Profit/Year* —

https://www.beri.net/article/bmw-humanoid-robot-roi-30000-cars[6]

18. サードパーティMESベンダーiFactory社 業界分析記事：*Humanoid Robots at BMW Spartanburg: 8 Operational Lessons* — https://ifactoryapp.com/industries/automotive-manufacturing/humanoid-robots-bmw-spartanburg-figure-02-pilot-lessons（およびボデーショップQC分析：https://ifactoryapp.com/industries/automotive-manufacturing/humanoid-robots-automotive-body-shop-humanoid-qc ）[14]

資料6 第2部1：Apptronikの技術系譜と商用ヒューマノイド「Apollo」のモジュール機構・電力設計

米国Apptronik社（テキサス州オースティン）の商用汎用ヒューマノイド「Apollo（アポロ）」および2026年6月に公開された次世代パイロット機「Apollo 2」は、NASAの宇宙用ヒューマノイド「Valkyrie（R5）」から続く10年以上のアクチュエータ・全身制御技術を基盤とし、メルセデス・ベンツ、GXO Logistics、Jabilの製造・物流現場で実地検証が進められている[1]。完成車メーカーの生産技術・保全企画部門、ロボット・FA開発陣、FA標準部品設計者、および機械安全研究機関が直面する「高コストで破損しやすい駆動系」「故障時の長い平均修復時間（MTTR）」「充電待機によるライン停止」「二足歩行の転倒リスクと安全認証」という4大課題に対し、Apolloは以下の工学的アプローチで解を提示している[1]。

第一に、35世代以上の反復試作を経て部品点数と組立時間を従来の約3分の1に削減した独自のリニア（直動）×ロータリー（回転）ハイブリッド力制御アクチュエータを採用し、人間の約300の筋肉を約30の駆動モジュール群へ集約・共通化することで、90%以上のエネルギー効率目標と現場での短時間ユニット交換（低MTTR）を実現している[1]。第二に、身長173cm・重量72.6〜73kgの成人男性サイズで定格可搬重量25kg（自重比34.4%）を確保しつつ、共通の上半身を「固定台座」「車輪型AMRベース（全高約213cm到達）」「二足歩行レッグ」へ換装できるモジュラー構造により、既存のAMR安全規格に準拠した早期導入を可能にしている[2]。第三に、約4時間稼働する2.0kWhの外付けホットスワップ（稼働中交換）バッテリーと機会充電・有線給電を組み合わせ、システムを再起動させずに週7日・1日22時間（7x22）の連続稼働を達成している[1]。

ただし、2026年11月時点でApolloおよびApollo 2はエンタープライズ向けのパイロットおよびデータ収集段階にあり、一般市販価格やApollo 2の詳細なスペックシート、および二足歩行システム全体の第三者安全認証は未公表である（本格商用量産機「Apollo 3」は2027年以降の投入予定）[2]。以下、公開一次資料、米国特許、創業者陣（Jeff Cardenas CEO、Nick Paine CTO、Luis Sentis教授）の論文・解説に基づき、公開事実と工学的推計を明確に区別して解剖する[9]。

Welcome to Robot Park, where Apptronik is building the future with Apollo 2



BMW Robot Vs Mercedes Robot: Figure 01 VS Apollo Apptronik robot: Which One Is Th...



エグゼクティブ・サマリー

Apptronik社の「Apollo」プラットフォームは、テキサス大学オースティン校（UT Austin）のHuman Centered Robotics Lab（HCRL）およびNASAジョンソン宇宙センター（JSC）におけるハードウェア実装・力制御研究を土台としている[3]。同社のエンジニアリングおよび事業戦略上の核心は以下の5点に要約される。

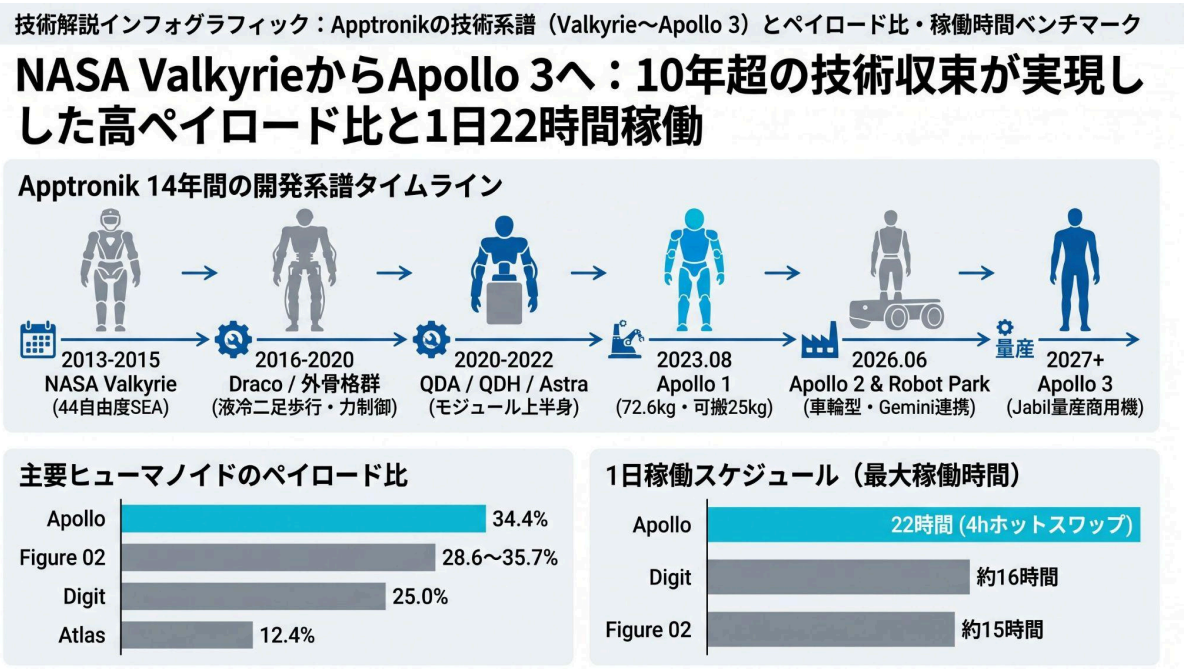
1. **NASA Valkyrie**から続く**15**機種以上の技術蓄積と**AI**・量産分業エコシステム：共同創業者のNick Paine氏（CTO）とLuis Sentis教授がDARPAロボティクス・チャレンジ（DRC）で携わっ

たNASA「Valkyrie」の直列弾性アクチュエータ（SEA）と全身協調制御（Whole-Body Control）を源流とし、双腕機「Astra」、液冷二足歩行機「Draco」、重力補償マニピュレータ「Scorpio」、外骨格「Sagittarius」「Apex」など15機種以上の知見を統合して2023年8月に初代「Apollo（Apollo 1）」を発表した[3]。2026年6月にはデータ収集・パイロット機「Apollo 2」を公開し、2027年以降の商用量産機「Apollo 3」へ向けた開発を推進している[2]。同社は自社工場建設による垂直統合を選ばず、EMS大手Jabilとの製造提携（ApolloがApolloを組み立てるフライホイール）と、Google DeepMind（Gemini Robotics 2.5 VLAモデル）およびNVIDIA（Jetson基盤・Omniverse）とのAI協業により、ハードウェアの量産性（DFMA）と安全性に経営資源を集中させている[5]。

2. 高ペイロード比（**34.4%**）と**3**形態モジュラー下半身構造：初代Apolloは身長173cm（5フィート8インチ）、重量72.6〜73kg（160ポンド）、定格可搬重量25kg（55ポンド）を達成し、自重に対する可搬重量比は約34.4%に達する[5]。さらに上半身（トルソー＋双腕）を「ライン脇への固定ペデスタル（台座）」「全高約213cm（7フィート）まで昇降可能な車輪型AMRベース（Apollo 2で展開）」「段差・階段に対応する二足歩行レッグ」の3形態に換装できるモジュラー設計を採用し、既存のAMR安全規格に準拠した車輪型での早期ライン投入と二足歩行展開を両立させている[2]。
3. 部品点数・組立時間を**3**分の**1**に削減した独自リニア×ロータリーアクチュエータ：Valkyrie時代の高価で複雑な金属バネ式SEAから脱却し、35世代以上の改良と粘弾性要素・ローラーねじ（Roller-screw）機構の採用により、バックラッシュ低減、90%以上のエネルギー効率（設計目標値）、ピーク関節トルク230Nm（外部技術カタログ値）、および従来比で約3分の1への部品点数・組立時間削減を実現した[1]。人間の約300の筋肉を約30の駆動モジュール群に標準化し、単一サプライヤー依存を排したユニット交換設計により、現場でのMTTRを短縮している[1]。
4. ラインを止めない**4**時間稼働ホットスワップバッテリーと「**7x22**」稼働モデル：充電時に約1.5時間の稼働停止が生じる内蔵固定式バッテリー機（Figure 02等）とは対照的に、Apolloは容量2,000Wh（2.0kWh・外部カタログ値）、連続稼働約4時間の外付けホットスワップ対応リチウムイオンバッテリーを採用している[7]。メイン電源やオンボード演算系を停止させずに数分以内でパック交換が完了し、Apollo 2で追加された機会充電（Opportunity Charging）および有線給電（Tethering）と併用することで、週7日・1日22時間（7x22）の稼働スケジュールを実現する[1]。
5. **4**層セーフティアーキテクチャと人間中心の**HRI**（対人協調）設計：外周の「可変ペリメータゾーン（速度制限・軌道変更）」、内側のハードウェア直結「インパクトゾーン（即時一時停止）」、1000Hz制御ループによる「関節力制御（コンプライアンス制御）」、および「物理非常停止（E-Stop）」の多層防御を構築している[1]。さらにArgodesign社と共同設計した凹面形状の頭部、E-Ink/LEDマウス、胸部デジタルディスプレイ、動作前の頭部旋回（視線誘導）により、周囲の作業員に意図と状態を直感的に伝達する[1]。

第1章：NASA「Valkyrie」から続くApptronikの技術系譜と量産・AIエコシステム戦略

技術解説インフォグラフィック：Apptronikの技術系譜（Valkyrie〜Apollo 3）とペイロード比・稼働時間ベンチマーク



1.1 UT Austin HCRLおよびNASA「Valkyrie（R5）」からの技術的継承

Apptronik社は2016年、テキサス大学オースティン校（UT Austin）のHuman Centered Robotics Lab（HCRL）からスピンアウトして設立された[3]。同社の技術的基盤は、創業者チームが2013年から2015年にかけてDARPAロボティクス・チャレンジ（DRC）においてNASAジョンソン宇宙センター（JSC）と共同開発した災害対応・宇宙用ヒューマノイド「Valkyrie（R5）」の実装経験に根ざしている[4]。

創業チームの役割分担は明確である。共同創業者兼CEOのJeff Cardenas氏は事業開発・商用化戦略を統括し、Apolloを「ロボット界のiPhone（ソフトウェア更新で数千のタスクに対応する汎用プラットフォーム）」と位置付ける[3]。共同創業者兼CTOのDr. Nick PaineはUT Austinで電気・計算機工学の博士号を取得し、大学院での「UT Series Elastic Actuator」開発およびValkyrie向けSEA設計・低層アクチュエータ制御を担当した[11]。同氏は粘弾性液冷アクチュエータ（米国特許出願公開US20170341227A1）や永久磁石ブラシレスモータ統合型ロボット関節サーボアクチュエータ（米国特許第12,308,716号、2025年5月登録）の発明者である[12]。共同創業者兼Scientific AdvisorのDr. Luis Sentis（UT Austin教授・NASA JSCコントラクター）は、DRCにおけるUT Austin×NASA JSCチームのリードを務めてNASA Elite Team Awardを受賞しており、「人間中心のロボティクス」と「全身制御ソフトウェアアーキテクチャ（Whole-Body Control）」の源流を担っている[11]。

Apptronik社は2023年8月の初代「Apollo（Apollo 1）」発表までに、NASAのSBIR（中小企業技術革新研究プログラム）契約等を通じ、累計調達資金を約2,800万米ドルに抑えながら15機種以上のロボット・外骨格を開発してきた[3]。主要試作機群の技術的貢献は以下の通りである[4]。

- **Valkyrie（44自由度・全身ヒューマノイド）**：回転型SEAと手首・足首・腰の並列直動型SEAを組み合わせた44自由度機であり、分散型モータ制御とモジュール組立性を実証する一方、量産に向けた機構簡素化の課題を明確化した[4]。
- **QDA / QDH / Astra（上半身ヒューマノイド群）**：小型アクチュエータによる双腕操作を検証した[4]。特にQDHは「上半身モジュールを異なる移動ベースと柔軟に組み合わせる」設計原

則を確立し、Astraは知覚・把持・双腕制御を統合して研究機関へ販売され、Apolloの上半身へと直結した[4]。

- **QDB / Draco II & III**（二足歩行プラットフォーム）：10自由度の液冷式二足歩行機Draco等は、リアルタイムLinuxおよびROS環境での低レベル制御アクセスを備え、外乱吸収や動的歩行制御の基礎を築いた[4]。
- **Scorpio**（モバイルマニピュレータ）および**Sagittarius / Apex**（電動外骨格）：機械式バネによる特許取得の重力補償機構で自重以上の負荷を持ち上げるScorpioや、力覚インターフェース・重力オフロードを備えた外骨格群により、高出力パッケージングと人間工学的な力制御技術を確立した[4]。

これら15機種以上の知見が2023年8月の「Apollo 1」で統合され、2026年6月30日にはオースティンの90,000平方フィートのデータ収集・訓練施設「Robot Park」の拡張とともに次世代機「Apollo 2」が発表され、2027年以降の商用量産機「Apollo 3」へと接続している[2]。



1.2 EMS大手「Jabil」との量産提携とDFMA・コスト低減アプローチ

垂直統合で自社工場を建設するFigure AIやTeslaとは対照的に、Apptronik社は2025年2月25日、世界100拠点以上の製造網を持つEMS大手「Jabil（ジェイビル）」との戦略的製造・導入提携を発表した[5]。この提携は以下の「ロボットがロボットを造る（Apollo builds Apollo）」フライホイール効果を狙っている[5]。

- **DFMA**（製造・組立容易性設計）とサプライチェーン構築：Apptronikは初期設計から単一サプライヤー依存の排除（Supply Chain Resiliency）とBOM（部品表）の簡素化を進め、最新世代アクチュエータの部品点数と組立時間を従来比で約3分の1に削減した[1]。これにJabilの量産スケールアップ知見を掛け合わせることで、顧客工場が立地する地域で迅速に量産・供給できる体制を構築している[15]。
- **Jabil**自社工場での出荷前実地検証：Jabilは受託製造パートナーであると同時にApolloの導入顧客でもある[3]。Jabil工場内の仕分け、キッティング、サブアセンブリ、およびApollo自身の組み立て工程にApolloを投入し、顧客サイトへ出荷する前に実製造環境でのバリデーションテストを行う[5]。

価格と提供モデルについて、現在Apolloには公開リスト価格は存在せず、エンタープライズ向けのパイロット契約のみで提供されている[5]。外部調査資料では初期アクセス機の推定価格は150,000〜300,000米ドルと試算されているが[26]、CEOのJeff Cardenas氏は2023年8月の発表時、量産スケール時の目標価格（Target Price）を「平均的な自動車を下回る50,000米ドル未満」に設定した[5]。また、2026年2月のシリーズA-X資金調達（5億2,000万米ドル調達、シリーズA累計9億3,500万米ドル超、企業評価額50億〜55億米ドル超）に際し、リード投資家B Capital会長のHoward Morgan氏は、2027年以降に「年間約80,000米ドル（サービス型の投資家予測値）で大量納入され、3〜4シフト稼働で高いROIを生む」との見通しを述べている[3]。同社は月額サブスクリプション型の「RaaS（Robotics as a Service）」を主軸としつつ、設備の資産保有を好む製造業向けには「直接販売（買い切り型）」も用意している[7]。なお2025年6月には、非人型を含む重工業向け自動化を担う100%子会社「Elevate Robotics」も設立した[3]。

1.3 初期顧客エコシステムとGoogle DeepMind・NVIDIAとのAI技術分担

Apptronik社は、出資者と実地導入先を一体化させる戦略（Google、メルセデス・ベンツ、日本郵政キャピタル、John Deere等が出資）をとっており、AI基盤モデルは外部のトッププレイヤーと連携して自社はハードウェアと全身制御に集中している[3]。

- メルセデス・ベンツおよび**GXO Logistics**での実地検証：メルセデス・ベンツとは2024年3月にパイロット契約を締結（2025年3月に数千万ユーロ規模の出資を受け拡大）し、ドイツのベルリン・マリエンフェルデ工場（Digital Factory Campus）、ジンデルフィンゲン工場、ハンガリーのケチケメート工場にて、組立キット搬送、部品検査、金属ブラケットの仕分けを実施している[5]。作業員がテレオペレーションやARでスキルを転移し、実ライン投入前にNVIDIA Omniverseのデジタルツイン上で検証を行っている[5]。また3PL大手のGXO Logisticsとは2024年6月に多段階R&Dプログラムを開始し、2026年半ば時点でApollo 2によるデータ収集と倉庫作業検証を展開している[5]。
- **Google DeepMind**（「**Gemini Robotics 2 / 2.5**」**VLA**基盤モデル）：2024年12月に提携を発表して以降、Apollo 2は「Gemini Robotics」の主要リファレンス機となっている[6]。2026年7月〜11月に発表されたシステムは、①動画から作業進捗や失敗を判断し高レベル計画を立てる身体性推論モデル「Gemini Robotics ER / ER 2」（重要瞬間の特定精度91.3%）、②視覚と言語を足元から指先までの全身モーター制御へ変換するVLAモデル「Gemini Robotics 2 / 2.5」、③オフライン実行・200例未満で新機体に適応する「Gemini Robotics

On-Device 2」、④カメラ映像からデジタルツインを生成する「Gemini 4 Argon」で構成される[16]。2026年11月10日の発表では、メルセデス・ベンツの稼働中ラインでApollo 2が金属ブラケットを仕分けするPoCにおいて成功率96%を記録した（従来比でタスク成功率30〜100%向上、所要時間20〜30%短縮）[16]。

- **NVIDIA基盤と自社ソフトウェア層（Artemis / Fleet Connect）**：2024年3月に発表されたNVIDIA「Project GR00T」および「Jetson Thor / Orin」のパートナーであり、初代機にはJetson AGX OrinとOrin NXを搭載する[5]。上位AIの指令を実機の全身協調動作・安全制御へ変換する自社知能制御層「Artemis」と、フリート全体の稼働監視・タスク配分・WMS/MES連携を担う運用層「Fleet Connect」が全体のシステムを統合している[1]。

第2章：「Apollo」の全体主要諸元と「台座固定／車輪／二足歩行」を選択できるモジュラー構造

2.1 人間工学（エルゴノミクス）に基づいたボディサイズ設定と高ペイロード比の根拠

2023年8月発表の初代「Apollo（Apollo 1）」の公式基本スペックは、身長173cm（5フィート8インチ、一部資料で172cm）、重量72.6〜73kg（160ポンド）、定格可搬重量25kg（55ポンド）である[5]。2026年6月発表の「Apollo 2」では詳細な数値スペックシートは未公表ながら、身長は約183cm（約6フィート）、両手での可搬重量は最大25kg（55ポンド）と報告されている[2]。

この体格と可搬重量の設定には、既存工場への後付け導入（ブラウンフィールド適応）と労働災害削減という明確な根拠がある[7]。

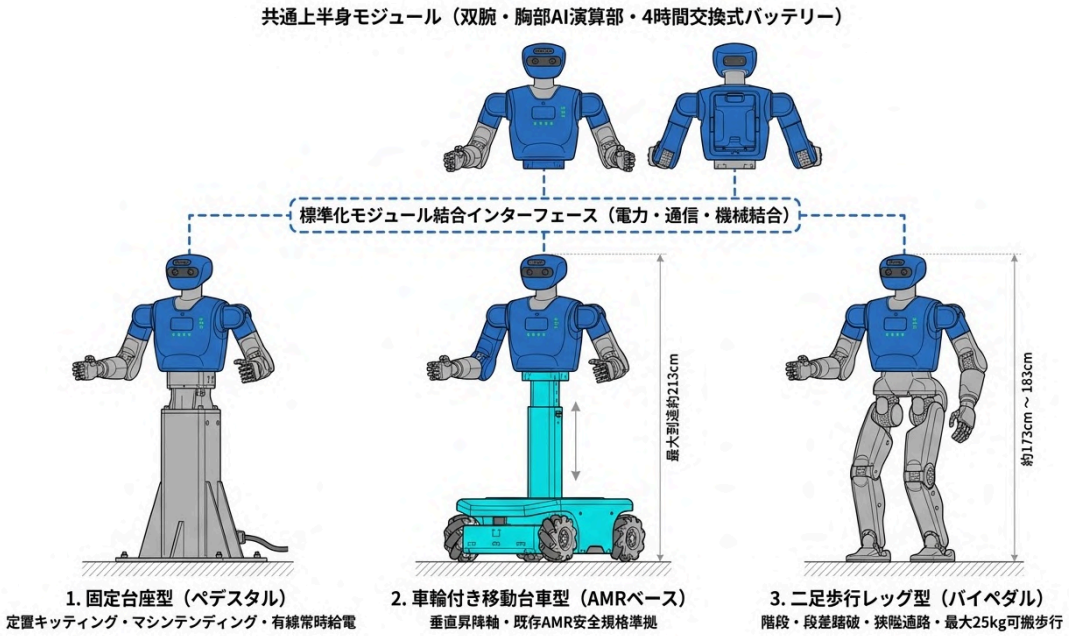
- 既存通路・ドア・棚への無改修適応：外部技術カタログ（MyRobotForLife等）のクリアランス仕様によれば、Apollo（身長173cm・幅60cm・奥行50cm）は肩・肘の最小クリアランス幅が60cmであり、標準的な76cm幅のドアを16cmの余裕をもって通過でき、幅68cm以上の通路で稼働できる[10]。直立時の手首垂直到達高さは210cm（Apollo 2の車輪型では垂直伸縮軸により約213cm / 7フィート）に達し、既存の人間用ラックや作業台を改修せずにそのまま使用できる[2]。床面荷重も本体73kg＋荷物25kg＝98kgにとどまる[10]。
- 過負荷労災の代替とペイロード比**34.4%**：Apptronik公式サイトが指摘する通り、産業現場における労働災害の約3分の1は過度な負荷（Overexertion）に起因する[7]。競合の物流二足歩行機Agility Digitの定格可搬重量が約16kg（自重64kg、ペイロード比25.0%）であるのに対し、Apolloは25kg（自重72.6kg、ペイロード比**34.4%**、腕伸長時7kg、段差21cmまでの階段で25kg搬送可能）を確保し、工場内の重量トートやケース搬送を代替する[7]。

なお、総自由度（DOF）については公開情報源により表記が異なる。Apptronik公式は全身の駆動系を「約30個の異なる筋肉グループ」に集約したと説明しているが[9]、外部技術カタログでは「36 DOF（両手12 DOF＋双腕14 DOF＋脚・腰10 DOF）」または「44 DOF」と記載される[10]。さらに、Apollo 2で5本指・片手22自由度のハンド「SharpaWave」を搭載した構成等では最大「71 DOF」と報じられており、装着するハンド／エンドエフェクタの仕様に応じて総自由度が変化する構造となっている（Apptronik公式はApollo 1/2の正確なDOF内訳を非公表としている）[2]。

2.2 「固定台座／車輪型AMR／二足歩行」を選択できるモジュラー下半身構造

Apptronik社はQDH開発時に確立した設計思想を継承し、「双腕・知覚・AI演算部・バッテリーを集約した共通の上半身（トルソー）」を、下半身の移動プラットフォーム（固定台座、車輪型ベー

ス、二足歩行レッグ）へ付け替え可能なモジュラー構造を採用している[4]。



各形態の工学的構造と顧客工場での使い分けメリットは以下の通りである。

1. ライン脇への固定ペデスタル（**Stationary Pedestal**：台座固定型）：上半身トルソーを固定台座に装着し、コンベア脇や加工機前に定置設置する形態である（初代Apolloで提示され、Apollo 2のマーケティングでは移動型2形態へ主軸が移行している）[5]。移動に伴う転倒リスクを完全に排除し、有線給電（テザリング）と組み合わせることで定位置での部品供給や仕分け作業を連続実行できる[1]。
2. 車輪付き移動台車（**Wheeled AMR Base**：車輪型ベース）：Apollo 2で本格導入された形態であり、脚の代わりに車輪型モバイルベースを結合し、最大約213cm（約7フィート）まで到達可能な垂直伸縮軸（Extending Vertical Axis）を備える[2]。ApptronikのBarry Phillips CCOが述べる通り、二足歩行の転倒解析や安全性証明が完全に成熟するのを待たず、高い安定性・移動エネルギー効率・高スループットを求める工場現場へ即座に導入できる[2]。特に既存の産業用移動ロボット（AMR）の安全規格に準拠するよう設計されているため、工場側の安全審査・リスクアセスメントを大幅に簡略化できる点が最大のメリットである[2]。
3. 二足歩行レッグ（**Bipedal Configuration**：二足歩行型）：最大歩行速度約1.2～1.5m/s（外部DB記載値、初期データでは3.4km/h）で移動する完全人型形態である[10]。車輪型では進入困難な階段（蹴上げ21cmまで）、段差、狭隘な人間用空間、トレーラー内部の荷下ろし、および膝と股関節を屈曲させて床面から荷物を持ち上げるスクワット荷役作業に対応する[7]。

2.3 Apollo ハードウェア諸元および競合機（Figure 02 / トヨタELEY）との機構・保守・電力設計比較表

Apptronik「Apollo（Apollo 1 / Apollo 2）」と、BMW工場等で検証された米国Figure AI社の二足歩行機「Figure 02」、およびトヨタ自動車（Toyota Research Institute開発）が2026年9月に公開し2028年からの工場刷新計画（グループ・サプライヤー合計40万台のロボット導入計画の一部）に含める車輪型協働ロボット「ELEY（エリー）」の比較を以下に示す[2]。

評価項目・設計領域	**Apptronik Apollo (Apollo 1 / 2)**	**Figure AI Figure 02**	トヨタ自動車 **ELEY (エリー)**
全長・質量・フットプリント	身長173cm (Apollo 2は約183cm) / 質量72.6〜73kg / 幅600×奥行500mm[2]	身長168〜173cm / 質量70kg / 人間同等の二足歩行フットプリント[19]	全高939〜1,619mm (伸縮機構) / 質量約50kg (超軽量) / 幅478×奥行450mm[42]
移動機構・モジュラー性	上半身共通で二足歩行・車輪型AMR (全高約213cm到達)・固定台座の3形態を選択可能[2]	二足歩行専用 (最大歩行速度1.2m/s、車輪や固定台座への換装機構なし)[19]	二足歩行を排した車輪型全方向自律移動台車 (停止時の消費電力ゼロ・転倒リスク排除)[42]
定格可搬重量・ペイロード比	両手最大25kg (腕伸長時7kg・階段搬送25kg) / 自重比34.4%[10]	両手最大20〜25kg / 自重比28.6〜35.7%[19]	公式非公表 (Tシャツ折り畳みや内装トリム・保護フィルム剥離、箱詰め等の軽〜中負荷作業向け)[40]
アクチュエータ・減速機構造	独自開発の力制御リニア (ローラーねじ) × ロータリー駆動 (効率90%超目標・ピーク230Nm)[1]	カスタム設計の電動ロータリーアクチュエータ (四肢内部へ配線を完全内蔵)[19]	全軸QDD (準ダイレクトドライブ・減速比10対1以下) ＋肩甲骨軸による高逆駆動性[42]
自由度 **(DOF)** とハンド機構	コア駆動系約30グループ / 全身36〜44 DOF (22自由度5本指SharpaWave装着時は最大71 DOF)[9]	本体26 DOF＋第4世代5本指ハンド片手16 DOF×2[19]	量産工場での高耐久・低コスト・稼働率を最優先した汎用2本指グリッパーハンドを採用[40]
保守性 **(MTTR)**・量産戦略	部品点数・組立時間を従来の約3分の1に削減したモジュール交換設計 / EMS大手Jabilと量産提携[7]	四肢内配線とカスタム部品による高密度統合 / 自社工場による垂直統合量産を志向[7]	2028年以降年間1兆円規模の工場刷新計画 (自社15万台・サプライヤー25万台の計40万台自動化の一部)[41]
バッテリー・給電・稼働方式	2.0kWh外付けホットスワップ式 (約4時間稼働・数分で交換)	2.25kWh胴体内蔵固定式 (約5時間稼働・充電に約1.5時間必	バッテリー駆動およびプラグイン有線給電の双方に対応 (車

	＋機会充電・有線給電で週7日×1日22時間稼働[1]	要、次世代Figure 03で足裏2kW無線充電)[19]	輪型のため静止作業時の脚部電力消費なし)[40]
オンボード演算・AI基盤	NVIDIA Jetson AGX Orin＋Orin NX (550 TOPS) / Google DeepMind Gemini Robotics 2.5＋自社Artemis[5]	デュアルオンボードGPU (前世代比3倍の推論性能) / 自社Helix VLAおよびOpenAI連携モデル[19]	TRI開発の拡散モデル系LBM (Large Behavior Model) による模倣学習 (熟練工1.8万人の匠の技を学習)[40]
安全設計・対人協調アプローチ	外周ペリメータ＋内側インパクトゾーン＋力制御＋E-Ink/LED胸部・頭部表示による4層安全設計[1]	視覚AIと全身制御による人間協調設計 (頭部に会話用マイク・スピーカー内蔵)[19]	約50kgの超軽量車体＋全軸QDDの機械的逆駆動性 (接触時にリンクが逃げる本質安全) により安全柵なしで設置[42]

第3章：独自開発「モジュール式アクチュエータ」と力制御（Series Elastic / QDD系）の進化

3.1 リニア（直動）×ロータリー（回転）アクチュエータの適材適所配置とリンク機構

ヒューマノイドのBOMコストの約30%を占めるアクチュエータにおいて、Apptronik社は35世代以上の反復試作を重ね、独自の「力制御リニア（直動）×ロータリー（回転）ハイブリッドアクチュエータ」を開発した[5]。Valkyrieの設計論文（Radford, Paine, Sentis et al.）およびApolloの公開仕様に基づく適材適所配置とリンク機構の特徴は以下の通りである[8]。

- 足首（**Ankle 2-DOF**）・腰（**Waist Pitch/Roll**）・手首（**Wrist Pitch/Yaw**）における並列リニア（直動）リンク機構：Valkyrie以来の設計系譜として、直交する2自由度が集中する足首・腰・手首には、2本の直動（リニア）アクチュエータを並列配置し、二力部材（Two-force member）とユニバーサルジョイントを介して駆動するプッシュ・プル並列リンク機構が用いられている[4]。2本のリニアアクチュエータを同相に伸縮させればピッチ動作（推力合算）、逆相に駆動すればロール（またはヨー）動作となる[14]。これにより、重いモーター質量を四肢の先端から胴体・近位側へ引き上げて反射慣性を低減し、ユニバーサルジョイント部の絶対位置磁気エンコーダで関節角度を高精度に計測できる[14]。また、足首用と腰用のリニアアクチュエータで基本設計を共通化するモジュール再利用構造が確立されている[14]。
- ローラーねじ（**Roller-screw**）直動駆動とロータリー駆動のハイブリッド配置：広い回転角を要する股関節のヨー・ロール軸や肩関節等にはフレームレスBLDCモーターによるロータリーアクチュエータを配置し、大荷重を支える関節にはローラーねじ（**Roller-screw**）を用いた力制御リニアアクチュエータを配置している[5]。外部技術カタログによれば、ローラーねじの採用によってバックラッシュと部品点数を削減しつつピーク関節トルク**230Nm**を達成し、Apptronik公式の設計目標として**90%**以上のエネルギー効率を実現している[1]。また、

試作機Draco等で用いられた液冷機構を廃し、Apolloではパッシブ・シャーシ・ヒートシンク（自然放熱構造）を採用して保守性を高めている[4]。



3.2 高価で複雑な初期SEAから「部品点数3分の1・量産型力制御アクチュエータ」への進化

関節の力制御において、減速比Nの回転減速機は反射慣性がNの2乗に比例して増大し、一方で低減速比のQDD（準ダイレクトドライブ）は高いバックドライバビリティ（逆駆動性）を持つ反面、高負荷保持時の発熱が大きくなるトレードオフがある[8]。また、NASA Valkyrieで用いられた初期のSEA（直列弾性アクチュエータ）は、金属バネ、ハーモニックドライブ、ベルト減速、32ビット変位センサー等を組み合わせた高価で部品点数の多い構造であった[8]。

ApptronikのNick Paine CTOらは、①粘弾性材料（Viscoelastic Material）を弾性要素として用い適切な剛性・減衰特性を付与する研究（米国特許出願公開US20170341227A1）[12]、②ローラーねじ直動駆動と関節内部の計測用バネ／関節力覚・トルクセンサーの統合[8]、③永久磁石ブラシレスモータ・関節・サーボアクチュエータの一体化設計（米国特許第12,308,716号）[13]を経て、従来世代比で部品点数と組立時間を約3分の1に削減した量産型アクチュエータを完成させた[5]。これにより単一サプライヤーへの依存を低減し、Jabilでのスケール量産を可能にしている[1]。

3.3 約30のモジュール群への共通化と現場MTTR（平均修復時間）短縮アプローチ

保全企画および標準部品設計の観点から注目すべきは、Apolloが人間の約300の筋肉を「約30個の異なる筋肉グループ（駆動モジュール）」に単純化し、モジュール共通化によって現場でのMTTRを短縮している点である[1]。

Valkyrieでは「設計工数を最小化するため、類似の性能要件を持つ関節間で同一のアクチュエータを再利用する（腰と足首のリニアアクチュエータの共通化、腕・脚・腰の第1関節の共通化、首と手首ロール軸の共通化）」とともに、「各腕・各脚・骨盤・胴体を独立した等価なモジュールとして扱い、迅速に組立・分解できる」設計がとられた[14]。Apolloはこのモジュラー保守思想を継承し、各関節に組込みモーターコントローラと冗長通信チャネルを持たせ、エンドエフェクタやアクチュ

エータをモジュール単位で容易に保守・交換できる設計（Simple Maintainability）を実現している[1]。また可動部の配線はシャーシ内部（IP20〜IP52相当）に収められ、関節周囲には織りファブリック（Woven Fabric）カバーを用いることで保護性と対人安全性を両立している[10]。

第4章：ライン稼働を止めない「急速バッテリー交換（ホットスワップ）機構」とエッジAI演算基盤

4.1 4時間連続稼働・外付け交換式バッテリーと「7x22」稼働モデルの設計思想

内蔵固定式バッテリー（Figure 02の2.25kWhパック等）では約5時間の稼働ごとに約1.5時間の充電停止が発生するのに対し、Apolloは**1**個あたり約**4**時間連続稼働する外付けホットスワップ（稼働させたまま交換可能）バッテリーパックを採用している[5]。外部技術カタログによればパック容量は**2,000Wh**（**2.00kWh**）、外部充電時間は約60〜120分である[10]。

CEOのJeff Cardenas氏が「標準的な作業で4時間のランタイムは顧客が求める最低基準であり、素早いパック交換によって充電待ちダウンタイムを排除できる」と説明する通り、5分未満でのパック交換によって「7x22（週7日・1日最大22時間稼働、残り2時間は保守・停止枠）」の運用スケジュールを可能にしている[1]。さらにApollo 2では、安全認証取得済み（Safety-rated）の大型バッテリーパックへとアップグレードされ、ホットスワップに加えて待機中の機会充電（Opportunity Charging）および有線給電（Tethering）の3方式に対応している[1]。

4.2 ホットスワップの電気的・機械的機構と24時間3交代ラインでの予備バッテリー運用計算

【公開事実と工学的推計の区別】Apptronik社はバッテリーが「ホットスワップ（稼働状態を維持したまま5分未満で交換可能）」であることを公表しているが、内部のバックアップ電源回路やコネクタの詳細は非公開である[5]。そのため、ホットスワップ中に胸部のメインコンピュータ（Jetson AGX Orin等）やセンサー群の電源を維持するための「内蔵バッファ電源（小型二次電池またはキャパシタ）と無瞬断切り替え回路、およびアーク防止用のシーケンシャル機械ラッチ・コネクタ」は、一般的な産業用ホットスワップ機器の設計原則に基づく工学的推計である。

一方、公開されている定量パラメータ（1日22時間稼働目標、1パック約4時間稼働、交換時間5分未満、充電時間60〜120分）に基づく24時間3交代ラインでの必要予備バッテリー運用計算は以下の通りとなる[2]。

- **1**日あたりの必要パックサイクル数：22時間 ÷ 4時間 ＝ 1日あたり5.5パック分（稼働開始時1回 ＋ ホットスワップ交換5回）となる[2]。重量物の連続持ち上げにより稼働時間が約3.5時間に短縮された場合でも[21]、22時間 ÷ 3.5時間 ＝ 約6.3パック分（交換6回/日）である。
- 機体**1**台あたりの必要バッテリー保有数：外部充電時間（1〜2時間）が放電稼働時間（約4時間）より短いため、理論上は「本体装着1個 ＋ 充電器待機1個 ＝ 計2個」でローテーションが回る[10]。重負荷時のマージンやバッテリー冷却・寿命保護を含めても、機体1台あたり計2.5〜3.0個（本体装着1個 ＋ 予備1.5〜2個）を配備すれば、充電待ちダウンタイムゼロで24時間3交代ラインを連続稼働させることができる。

POWER ARCHITECTURE & EDGE AI COMPUTE SCORECARD

充電ダウンタイムの解消：Apolloのホットスワップ機構は3交代制工場で1日22時間の生産稼働（7×22）を実現する



01 // BATTERY CAPACITY & RUNTIME

2,000 Wh 連続 4時間 稼働 / パック

バッテリー構成	着脱式 産業用リチウムイオン (2.0 kWh)
ホットスワップ機構	5分未満で交換・AI演算シャットダウン不要
給電オプション	パック交換 / 機会充電 / 有線テザー給電

02 // RECHARGE & 3-SHIFT FLEET RATIO

60 min 2〜3 パック / 機体

外部充電時間	60分（1C急速充電）/ 4時間稼働分
週間稼働スケジュール	7×22 運用（1日22時間×週7日稼働設計）
充電ドック必要壁面幅	68 cm（手動ケーブルポート接続時）

03 // EDGE AI COMPUTE & HRI

550 TOPS NVIDIA Jetson AGX Orin

AI推論・統合基盤	Apptronik Artemis / Gemini Robotics VLA
知覚センサー	頭部・手首マウント RGB-D カメラ群
対人表示 (HRI)	胸部ステータス画面（残量・進捗）＋LEDマウス

04 // CONTROL LOOP & ACTUATION EFFICIENCY

1,000 Hz 90%+ エネルギー効率

リアルタイムOS	Real-Time Linux (Point-and-Click Suite)
アクチュエータ最大トルク	230 Nm（ローラースクリュー直動・力制御）
冷却・防塵防滴・騒音	パッシブ筐体放熱 / IP52 / 推定 54 dBA

上段：自動車工場等の24時間（8時間×3シフト）稼働スケジュールにおける比較。Apptronik Apolloは2.0 kWh（2,000 Wh）バッテリーパックを5分未満でホットスワップ交換し、オンボードAI演算系を落とさずに1日最大22時間（7×22）の生産稼働を実現する。一方、内蔵バッテリー固定式（稼働5時間・充電1.5時間）では1日あたり計4.5時間の充電ダウンタイムが発生する。**下段：**Apolloの電源・急速充電ローテーション・エッジAI計算基盤・1000 Hzリアルタイム制御系の主要定量スペック。

Data sources: Apptronik Official (Apollo 2), Anton Robots Engineering Review, MyRobotForLife Technical Catalog, Humanoid Press Japan, Humanoid Accessories Comparison.

4.3 オンボード計算基盤（NVIDIA Jetson）と対人コミュニケーション（HRI）の電装アーキテクチャ

Apolloのメインコンピュータ（「Brain」）は胸部内に配置されており、初代機では**NVIDIA Jetson**

AGX Orinおよび**Jetson Orin NX**を搭載している（外部技術カタログでは推論性能**550 TOPS**、Real-Time Linux上で動作する制御ループ周期**1000Hz**と記載、Apollo 2の具体的なSoC構成は非公表）[5]。また、NVIDIAのヒューマノイド向け次世代計算基盤「Jetson Thor」（Blackwellアーキテクチャ、最大2,000 TOPS INT8 / 2,070 TFLOPS FP4、128GBメモリ、ASIL-D機能安全対応）のエコシステムパートナーにも名を連ねている[35]。

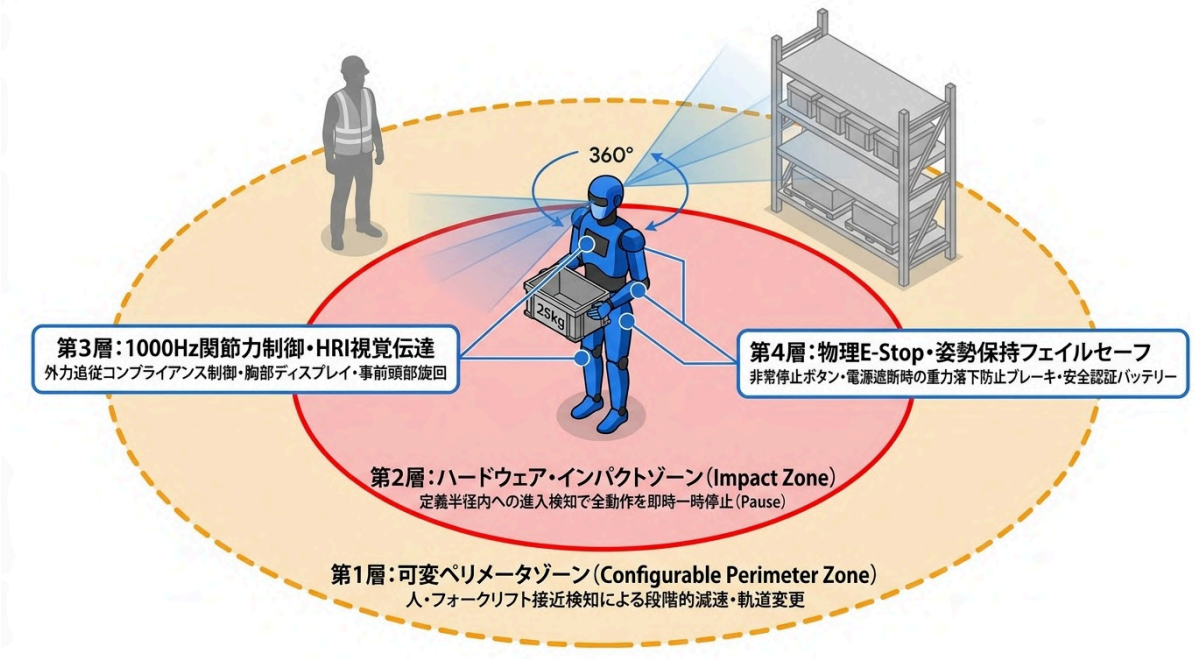
知覚センサーとして、頭部と手首にRGB-D知覚カメラを配置し、胴体には360度環境マッピング用のセンサー（深度カメラ、LiDAR、RGBカメラ、IMU、関節力覚・トルクセンサー、温度センサー）を搭載している[9]。さらに、デザインスタジオArgodesign社と共同開発した対人コミュニケーション（HRI）設計として以下の機構を備える[1]。

- 凹面（**Concave**）中空頭部と**E-Ink/LED**マウス：頭蓋骨を連想させる凸面の顔を排し、不気味の谷を防ぐ凹面・中空構造の頭部を採用した[9]。口元には電子ペーパー（E-Ink）および表現力豊かなLEDマウスと音声入出力（Apollo 2）を備え、吹き出し文字やアイコンで意図を伝達する[1]。
- 胸部デジタルディスプレイと事前頭部旋回：胸部のデジタルスクリーンに「バッテリー残量・充電状態・現在のタスク・完了予定時間・次の動作」を表示し、さらに移動前には進む方向へ意図的に頭部を旋回させる（Turning its head）ことで、周囲の作業員に次の行動を非言語で予告する[1]。

第5章：人間協調を前提とした「多層セーフティゾーン（Impact Zone）」と本質安全アプローチ

5.1 73kgの機体＋25kg荷物を安全に制御する「4層セーフティアーキテクチャ」

73kgの機体が25kgの荷物を持って人間と同じフロアで稼働するため、Apolloは油圧を排した全電動駆動とした上で、ハードウェアからAI推論にわたる多層（**4**層）セーフティアーキテクチャを実装している[1]。



1. 第**1**層：可変ペリメータゾーン（**Configurable Perimeter Zone**）：外周の作業空間に人間

や設備・障害物が進入した際、設定に応じて段階的な速度制限（Speed-scaling）や挙動変更を行う[1]。またGemini Robotics 2.5の危険回避推論により、人が近くにいる環境での安全な作業完了率は43%向上している[16]。

2. 第**2**層：ハードウェア・インパクトゾーン（**Hardware-Level Impact Zone**）：内側の定義半径（衝突ゾーン）内に物体が検知されると、ハードウェアレベルの制御によって即座にすべての動作を一時停止（Immediately Pause Movement）する[1]。
3. 第**3**層：**1000Hz**関節力制御（コンプライアンス制御）と**HRI**表示：全関節に力制御アクチュエータと力覚・トルクセンサーを備え、接触時にも外力に柔軟に従う安全性を確保している（動作音も推定約54 dBAと静粛）[1]。
4. 第**4**層：物理非常停止（**Physical E-Stop**）と安全認証バッテリー：物理E-Stopボタンと安全認証バッテリーパックを備える[2]。なお、非常停止時の具体的なブレーキ回路構造は公開資料に記載がないものの、ローラーねじの機械的特性や関節保持制御により急激な姿勢崩壊を防ぐ構造と推察される[10]。また、二足歩行システム全体の第三者安全認証（および家庭向けISO 13482認証）は未公表であり導入には個別リスクアセスメントが必要だが、車輪型ベースは既存の産業用移動ロボット（AMR）安全規格に準拠する設計となっている[2]。

5.2 トヨタ「ELEY」・Figure AI「Figure 02」との比較におけるApolloのポジショニング総括

- 対 トヨタ「**ELEY**（**50kg**・車輪型・全軸**QDD**）」：トヨタのELEYは約50kgの超軽量車輪型台車と全軸QDD（減速比10対1以下）、汎用2本指ハンドを採用し、接触時に機械的に力が逃げる本質安全によって既存ラインへ安全柵なしで導入できる[42]。ただし軽～中負荷作業に特化しているため、**20～25kg**の重量物（大型金属ブラケットや満載トート）の搬送や段差環境での荷役においては、25kgの可搬能力とモジュラー下半身（車輪型／二足歩行）を持つ**Apollo**が明確な優位性を持つ[2]。
- 対 **Figure AI**「**Figure 02**（**70kg**・純二足歩行・内蔵バッテリー）」：Figure 02は70kg・可搬20～25kg・16自由度5本指ハンドを持つ有力な競合機だが、二足歩行専用かつ胴体内蔵固定バッテリー（約5時間稼働・約1.5時間充電停止）である[19]。これに対し**Apollo**は、①**4**時間ホットスワップバッテリー＋機会充電＋有線給電による「**7x22**（**1**日**22**時間）」稼働、②部品点数・組立時間を**3**分の**1**に削減したモジュール交換設計と**Jabil**との量産体制、③車輪型**AMR**ベースを選択して既存の安全規格下で早期導入できる柔軟性において、量産工場での実用性と稼働率（OEE）を最優先したポジショニングを確立している[1]。

参照一次資料・公式発表・技術文献一覧（URL付記）

- Apptronik Official Product Page: "Apollo 2 - Where Advanced Hardware Meets Embodied AI" (https://apptronik.com/apollo/apollo-2)[1]
- Apptronik Official Technology Lineage: "Our Work - From NASA Valkyrie, QDA, Astra, Draco, Scorpio, and Exoskeletons to Apollo" (https://apptronik.com/company/our-work)[4]
- Apptronik Official Feature Release: "Meet Apollo, the iPhone of Humanoid Robots" (https://apptronik.com/news-collection/meet-apollo-the-iphone-of-humanoid-robots)[9]
- Apptronik Official Newsroom: "In the News / Apptronik Closes Additional Series A Funding" (https://apptronik.com/company/in-the-news /

https://apptronik.com/news-collection/apptronik-closes-additional-series-a-funding)[28]

- Jabil Official Investor Press Release (Feb 25, 2025): "Apptronik and Jabil Collaborate to Scale Production of Apollo Humanoid Robots and Deploy in Manufacturing Operations" (https://investors.jabil.com/news/news-details/2025/Apptronik-and-Jabil-Collaborate-to-Scale-Production-of-Apollo-Humanoid-Robots-and-Deploy-in-Manufacturing-Operations/default.aspx)[15]
- Mercedes-Benz Group Official Release: "AI and Humanoid Robots at the Digital Factory Campus Berlin (MBDFC)" (https://group.mercedes-benz.com/company/production/production-network/mbdfc-humanoid-robots.html)[29]
- NASA Valkyrie Academic Paper: "Valkyrie: NASA's First Bipedal Humanoid Robot" by Nicolaus A. Radford, Nicholas Paine, Luis Sentis et al. (https://www.researchgate.net/publication/278637918_Valkyrie_NASA's_First_bipedal_humanoid_robot)[14]
- U.S. Patent Application Publication US20170341227A1: "Viscoelastic liquid-cooled actuator" by Luis Sentis and Nicholas Paine (https://patents.google.com/patent/US20170341227A1/en)[12]
- U.S. Patent 12,308,716 (May 20, 2025): "Permanent magnet brushless motor, robot joint, servo actuator, and..." by Nicholas Paine, Apptronik, Inc. (https://trea.com/industry/electric/information/22007e3b-7e84-4ee0-beeb-0fb124319525)[13]
- Fast Company Design & Argodesign Interview (Aug 28, 2023): "This NASA-backed droid is the robot coworker you've been dreaming of" (https://www.fastcompany.com/90944684/this-nasa-backed-droid-is-the-robot-coworker-youve-been-dreaming-of)[21]
- Unite.AI Technical Report (Nov 10, 2026): "Apollo 2 Humanoids Hit 96% in Mercedes-Benz Sorting Proof-of-Concept" (https://www.unite.ai/apollo-2-humanoids-hit-96-in-mercedes-benz-sorting-proof-of-concept/)[32]
- The Robot Report: "NVIDIA announces new robotics products at GTC 2024 / Apptronik collaborates with Jabil / Mercedes-Benz testing Apollo" (https://www.therobotreport.com/nvidia-announces-new-robotics-products-at-gtc-2024/ / https://www.therobotreport.com/apptronik-collaborates-with-jabil-to-produce-apollo-humanoid-robots/ / https://www.therobotreport.com/mercedes-benz-testing-apollo-humanoid/)[25]
- MyRobotForLife Technical Catalog (Nov 10, 2026): "Apptronik Apollo Commercial Humanoid" (https://myrobotforlife.com/catalog/apptronik-apollo)[10]
- Anton Robots & RoboZaps Technical Reviews (2026): "Apptronik Apollo 2 Review & Specifications" (https://antonrobots.com/apptronik-apollo-review/ / https://blog.robozaps.com/b/apptronik-apollo-review)[2]

- Inside Deep Tech (Oct 13, 2026): "Apptronik Apollo 2 Modular Humanoid & Robot Park Full Guide" (https://www.insidedeeptech.com/apptronik-apollo-2-modular-humanoid-robot-park-full-guide/)[6]
- Humanoid Guide: "Joints and Actuators / Apollo / Figure 02 / Toyota ELEY" (https://humanoid.guide/joints-and-actuators/ / https://humanoid.guide/product/apollo/ / https://humanoid.guide/product/figure-02/ / https://humanoid.guide/toyota-reportedly-plans-400000-humanoid-factory-robots/)[8]
- ITmedia / EIF Blog Analysis on Toyota ELEY (Oct–Nov 2026): "Toyota Humanoid Robots: 400,000-Robot Bet & ELEY QDD/LBM" (https://blog.eif.am/toyota-humanoid-robots-400000-plan/ / https://blogs.itmedia.co.jp/serial/2026/11/eley40lbm.html)[40]

資料7 第2部2：既存工場「Brownfield」における二足歩行スタビリティ制御と動的環境マッピング ― メルセデス・ベンツ・ベルリン工場等におけるApptronik「Apollo」の実装解剖

1902年創設の歴史を持つメルセデス・ベンツのベルリン・マリエンフェルデ工場（Werk Berlin-Marienfelde）をはじめとする既存工場（Brownfield）において、身長1.73m・機体重量約73kgのApptronik製ヒューマノイド「Apollo（および後継機Apollo 2）」が最大25kgの部品コンテナを抱えて段差や狭小通路を転倒せずに踏破し、現場作業員と安全にすれ違える理由は、「3階層ハイブリッド全身運動制御（予測歩容計画・強化学習＋二次計画法ベース全身運動制御＋高効率電動直動フォース制御アクチュエータ）」「GPU高速化された3次元ボクセル環境マッピングと視覚・慣性・脚オドメトリ融合SLAM」「動的保護分離距離の段階的圧縮と通電立位バランス維持型フェイルセーフ」の3つの工学的統合にある。一般的な製造現場向け低床車輪型AMR（自律移動ロボット）が床面段差5〜20mmや旋回・安全余白を含む通路幅1,000mm以上の制約から床面研削や設備移設を迫られるのに対し、成人作業員と同等のフットプリントと能動的コンプライアンスを備える二足歩行機は、建屋・床面無改修（ドロップイン）での工程間部品搬送（イントラロジスティクス）を可能にする。
本報告書の技術評価にあたっては、一次公開事実と工学的推論・モデル試算の境界を厳格に区別する。メルセデス・ベンツによるベルリン工場（Digital Factory Campus）、ハンガリー・ケチケメート工場、ドイツ・ジンデルフィンゲン工場でのパイロット実証および出資・商業契約、Apolloの基本諸元、ハードウェア安全ゾーン機構、ならびに生産データ基盤「MO360」およびNVIDIA Omniverse / Google DeepMind連携は公式発表および共同実証報告により確認されている。一方、Apptronikの商用制御ソフトウェア「Artemis」の内部ソースコード、制御周期の実測値、および個別センサの型番・解像度は非公開であり、顧客工場における長期的な稼働率やサイクルタイム等の定量KPIも現時点では外部公表されていない。したがって本稿では、Apptronik共同創業者兼CTOのNicholas Paine博士およびLuis Sentis教授（テキサス大学オースティン校 Human Centered Robotics Lab：UT Austin HCRL）が発表した人型機「DRACO 3（Apptronikカスタム製造）」や「NASA Valkyrie」の査読付き学術論文群、オンボード搭載が確認されているNVIDIA Jetson Orin環境の空間認識ベンチマーク、ならびにドイツ工業規格（DIN 18202）や国際機械安全規格（ISO 10218:2025、ISO/TS 15066、策定中のISO/WD 25785-1）に基づく剛体力学・保護分離距離試算 を統合し、実機挙動の物理的・アルゴリズム的機構を解剖する。

エグゼクティブ・サマリー

自動車製造業における自動化投資の主戦場は、自動化前提で建屋と床面を設計できる新設EV専用工場（Greenfield）から、100年規模の増改築を重ねた既存工場（Brownfield）の省人化へと移行している。メルセデス・ベンツは2024年3月にApptronikとのパイロット商業契約を締結し、2025年3月には1,000万ユーロ台前半（low double-digit million-euro）の出資とともに、グループ最古のベルリン・マリエンフェルデ工場内の生産DX拠点「Mercedes-Benz Digital Factory Campus（MBDFC）」およびハンガリー・ケチケメート工場でのApollo稼働検証を公表した。さらに2026年には、ケチケメート工場およびジンデルフィンゲン工場の実稼働ラインにおいて、次世代機「Apollo 2」にGoogle DeepMindの視覚言語行動モデル「Gemini Robotics 2.5」を統合した金属ブラケット部品の順序立てキッティング（部品仕分け・供給）実証（PoC）が実施され、96%の自律タスク成功率を記録したと報告されている。
完成車メーカーの生産技術部門、二足歩行・自律制御開発陣、3Dビジョン・センシング研究陣、および機械安全研究機関の視点から抽出される技術的要諦は以下の5点に集約される。

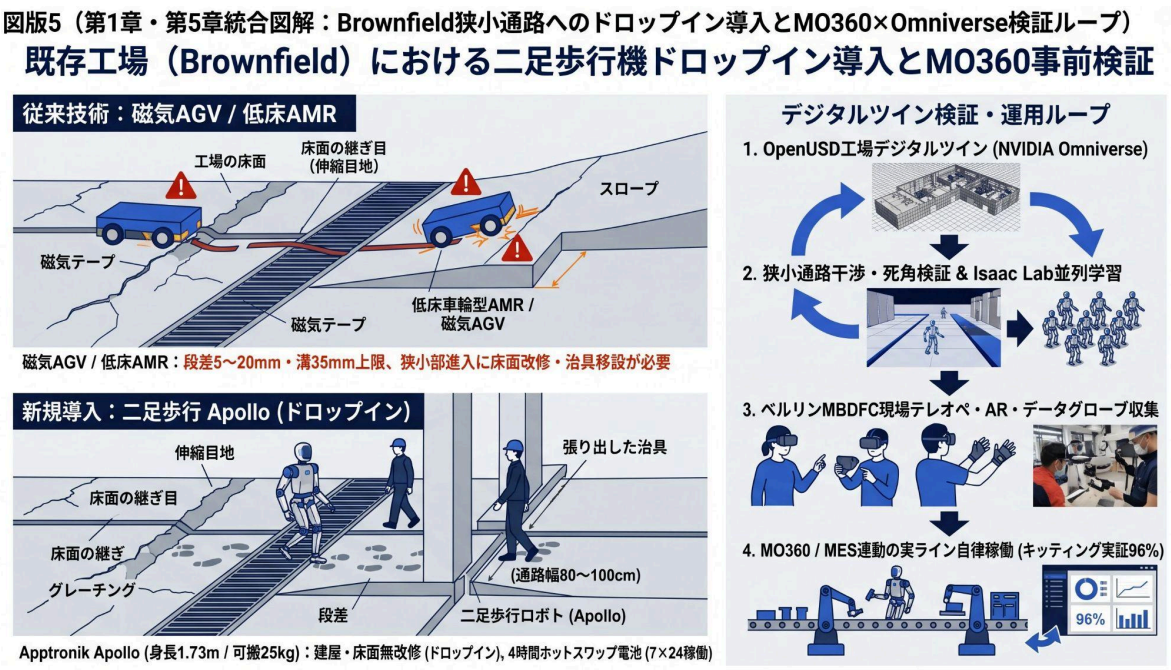
1. 建屋・床面無改修（ドロップイン）の生技合理性とモジュラー運用：ドイツ床面平坦度規格

DIN 18202に照らし高精度AGV導入時に推奨される平坦度公差（3〜5mm以下）や目地段差制限（3mm以下）を満たさない既存建屋では、車輪型ロボットの導入に床面研削・再舗装とライン停止期間を要する。Apolloは身長1.73m・重量72.6〜73kg・可搬重量25kgの人間同等サイズと4時間稼働のホットスワップ式バッテリー（週7日×1日22時間稼働対応）を備え、幅80〜100cm級の狭小通路や床面グレーチングをレイアウト変更ゼロで通過する。同時に、平滑床での高スループット搬送には車輪ベース、狭小・段差エリアには二足歩行構成を選択できるモジュラー設計を採用し、移動エネルギー効率（Cost of Transport）の物理的トレードオフを合理的に解決している。

2. **25kg**荷重変動と路面外乱を克服する**3**階層スタビリティ制御：本報告書の剛体力学モデル試算では、73.0kgの機体が胸前に25.0kgの部品コンテナを抱えると全系質量は98.0kg（+34.2%）へ増加し、前方合成重心は+20.0mmから+111.8mmへ移動してつま先端までの静的安定余裕が160.0mmから68.2mmへ半減以下となるうえ、姿勢無補償時の静的足首ピッチトルクは7.5倍（14.3Nmから107.5Nm）、ヨー軸回転慣性モーメントは2.09倍（+109.3%）に急増する。これに対し、50〜100Hzのモデル予測制御（MPC）／キャプチャポイント歩容計画および強化学習（RL）ポリシー、500〜1,000Hzの陰的階層型全身運動制御（IHWBC：二次計画法QPソルバ）、1〜10kHzの独自電動直動フォース制御アクチュエータを階層結合することで、骨盤後傾による重心引き戻し、膝伸ばし歩行（Straight-leg walking）による発熱抑制、および油膜スリップ検知時のミリ秒単位での摩擦円錐制約更新を実現している。
3. 悪視覚環境下の密結合オドメトリと**GPU**常駐型**3D**マッピング：頭部ステレオカメラ対、胸部360度環境センサ群、IMU、および関節エンコーダの脚運動学オドメトリをオンボードのNVIDIA Jetson AGX Orin / Orin NX上で統合する。塗装ボディの鏡面反射やコンベヤの動的背景変化に対し、セマンティックマスクと閉ループ軌道でドリフトを抑制しつつ、GPUメモリ常駐型3Dボクセル再構築（Nvblox等）により従来のCPUベース手法比で表面再構築最大177倍・距離場（ESDF）計算最大31倍の高速化を達成し、1〜2cm分解能での床面段差検知と動的障害物の残像（ゴースト）消去を両立する。
4. 保護分離距離（**SSM**）の動的圧縮と「倒れない非常停止」の機械安全設計：2025年改訂のISO 10218:2025（ISO/TS 15066統合）および動的安定移動ロボット向け新規格原案ISO/WD 25785-1の観点では、二足歩行機に既存の駆動電源遮断（Safe Torque Off：STO）を適用すると98kgの質量が重力崩壊して重大な転倒危険源となる。Apolloはハードウェアレベルの「可変ペリメータゾーン」と即時一時停止を行う「インパクトゾーン」を備え、対人接近時には歩行速度を1.0m/s（試算保護分離距離1.47m）から0.35m/sの微速歩容（同0.61m）へ段階的に絞り込み、最接近時には通電立位バランス維持型の安全監視停止と力制限（PFL）コンプライアンスへ移行することで狭小通路でのすれ違いを成立させる。
5. **MO360**および**NVIDIA Omniverse**による「**Digital First**」事前検証ループ：メルセデス・ベンツの生産データエコシステム「MO360」とOpenUSDベースの「NVIDIA Omniverse」工場デジタルツイン、さらに「NVIDIA Isaac Lab」および「OSMO」を連携させ、実機投入前に仮想空間上で狭小通路の干渉・死角検証と強化学習ポリシーの事前学習を実行する。現場投入後は熟練作業員によるテレオペレーション・AR・MANUSデータグローブを用いた実演データ収集をMO360上で回し、短期ポストトレーニングで実ラインへ展開する閉ループ運用を構築している。

第**1**章 既存工場（**Brownfield**）特有の物理的制約と「建屋・床面無改修」導入の工学的要件

図版5（第1章・第5章統合図解：Brownfield狭小通路へのドロップイン導入とMO360×Omniverse検証ループ）



1.1 1902年創設ベルリン工場と欧州既存建屋に残存する物理的障壁

完成車メーカーの生産技術部門が直面する最大の自動化障壁は、新設のEV専用工場（Greenfield）と既存工場（Brownfield）のインフラ格差にある。メルセデス・ベンツがApolloの中核実証拠点に据えたベルリン・マリエンフェルデ工場は、1902年に設立された同グループ最古の生産拠点であり、120年以上にわたり内燃機関やトランスミッション等のパワートレイン部品を生産してきた歴史的建屋群で構成されている。同工場は2022年にグローバル生産DXの中核拠点「Mercedes-Benz Digital Factory Campus（MBDFC）」へと転換され、約100工程（うち65工程がメルセデス初、35工程が自動車業界初、関連特許出願30件超）からなる次世代アキシャルフラックス型高性能電気モーターの量産立ち上げと並行して、MO360ソフトウェア群およびヒューマノイドロボットの実証フィールドを担っている。また、ApolloおよびApollo 2の実ライン検証が進むハンガリー・ケチケメート工場（2012年稼働、従業員約4,500名）やドイツ・ジンデルフィンゲン工場でも、次世代プラットフォーム（MMA等）と既存生産設備が共存する高密度な組立・物流環境が稼働している。

メルセデス・ベンツは各工場建屋内の詳細な通路幅員図や床面劣化計測値を外部公開していないものの、ドイツおよび欧州の建築許容差規格である「DIN 18202（Table 3 Group 3およびGroup 4の仕上床平坦度基準）」ならびに欧州産業界のAGV/AMR床面アセスメント基準を照合することで、Brownfield建屋に共通する物理的障壁を定量的に把握できる。DIN 18202は測定点間距離0.1m、1.0m、2.0m、4.0m、10m、15mの基準平均線に対する床面高低偏差の上限を定めており、AGV導入の技術ガイドラインでは、狭通路・高精度AGVに対して平坦度誤差3mm以下（標準AGVで5mm以下）、床コンクリートスラブ間の伸縮目地（エキスパンションジョイント）の幅4〜6mm以下・段差オフセット3mm以下、かつ弾性目地材が面一（フラッシュ）に充填されていることが求められる。

しかし、数十年から100年超にわたり重量加工設備や有人フォークリフトの反復荷重を受けてきた既存工場では、建屋増築部や温度伸縮目地において幅10〜35mm超の開裂や5〜15mm級の不同沈下段差が生じやすく、切削油・洗浄水用の排水グレーチングや地下ピットの縞鋼板蓋が通路を横断して局所段差と金属低摩擦面を形成する。さらに、旧建屋ホール間を結ぶ連絡通路には2〜5度（勾配3.5〜8.7%相当）の傾斜スロープが存在し、幹線通路から組立ライン脇の部品供給棚（ラインサイド）へ分岐する枝通路では、建屋の鉄骨柱や後付けの溶接・検査治具、空箱回収ラックが張り出して有効幅員が人間1人分の800〜1,000mm程度に絞り込まれているケースが多い。加えて、パワートレイン加工・組立エリア特有のミスト状油膜やタイヤ痕、金属粉塵の付着により、乾燥コンクリートの摩擦係数が局所的に急落するリスクが常態化している。

床面・空間パラメータ	高精度AGV推奨基準（DIN 18202等参照）	標準低床AMRの一般的な走破上限	築古既存工場（Brownfield）の実態環境
床面平坦度・局所段差	平坦度誤差3～5mm以下かつ目地段差3mm以下	乗り越え段差5～20mm以下（最低地上高約25～30mm）	スラブ沈下やピット蓋・敷鉄板により5～30mm級の段差が点在
伸縮目地・排水溝幅	目地幅4～6mm以下かつ弾性材の面一充填が必須	通過可能溝幅30～35mm以下（直交進入が原則）	劣化した伸縮目地や排水グレーチング格子が動線を横断
通路勾配・スロープ	原則水平（微傾斜でも停止位置精度が劣化）	登坂角度2～3度（勾配約3.5～5%）以下	増改築建屋間の連絡スロープ等に2～5度超の傾斜が残存
有効通路幅と旋回余白	パレット・リーチ型で1,600～3,600mm以上	荷姿1,000mm級プラス安全監視余白で1,200mm以上	構造柱や後付け治具の張り出しによりライン脇は幅800～1,000mm
表面摩擦・油膜汚染	乾燥かつ清浄なコンクリート仕上げ面が前提	油膜・結露面では駆動輪空転とオドメトリ破綻が発生	加工油ミストや粉塵の付着により局所的な低摩擦領域が混在

1.2 車輪型AGV/AMRの限界と「レイアウト変更ゼロ」投入の生技合理性

前掲の物理的障壁が残存するBrownfieldエリアへ従来の磁気テープ誘導式AGVや低床車輪型AMRを投入しようとすると、設備投資対効果（ROI）を悪化させる重大なボトルネックが生じる。市販されている製造・倉庫向けAMRの仕様を精査すると、可搬30～50kg級の超小型台車牽引機であれば平滑床で最小通路幅550～650mmを通過できる機種も存在するものの、段差走破能力はわずか5mm・登坂角は2度に制限される。一方、自動車部品の複数トート搬送に用いられる100～300kg可搬クラスの標準低床AMR（車体幅600～850mm、最低地上高25～30mm級）でも、乗り越え段差は5～20mm、溝幅通過能力は30～35mm、登坂角は2～3度（約5%）が物理的上限となる。小径の硬質ウレタン駆動輪が目地段差やグレーチングに進入すると、衝撃加速度による精密部品へのダメージや駆動輪スリップによる自己位置ロスト、さらには駆動輪の浮き上がり（スタック）が多発する。また、積載プロファイル（1,000mm級）にISO 3691-4（JIS D 6802）準拠の2Dセーフティレーザースキャナ防護領域を加味すると、800～1,000mm幅のライン脇狭小通路への直接進入は困難であり、幹線通路からの手押し二次運搬を残すか、生産ラインを長期停止して床面の全面ダイヤモンド研削・樹脂舗装および治具移設工事を施工するかの二者択一を迫られる。
メルセデス・ベンツがベルリン工場やケチケメート工場のイントラロジスティクス（部品スーパーマーケットから組立ライン脇へのキット部品トート配送および初期品質検査）にApptronikのApolloを投入した生産技術上の合理性は、この「建屋・床面・既存治具の改修ゼロ（ドロップイン導入）」にある。Apolloは身長1.73m（5フィート8インチ）、機体重量72.6～73kg（160ポンド）、最大可搬重量25kg（55ポンド）という成人作業員とほぼ同一の体格と両腕リーチを備えており、従来作業員が1シフトあたり数マイル歩行して運んでいた部品トートやサブアセンブリ品を、人間用に設計された狭小通路・階段・作業棚のまま直接搬送・荷役できる。なお、総自由度（DOF）の公式内訳は非公開であるが、業界技術データベース等では基本構成で44自由度、片手22自由度の5本指デクスタラスハンド（SharpaWave等）を装着した構成で最大71自由度クラス と報告されており、高所締結や車両下部のコネクタ嵌合といった高負荷エルゴノミクス工程への展開も検証されている。

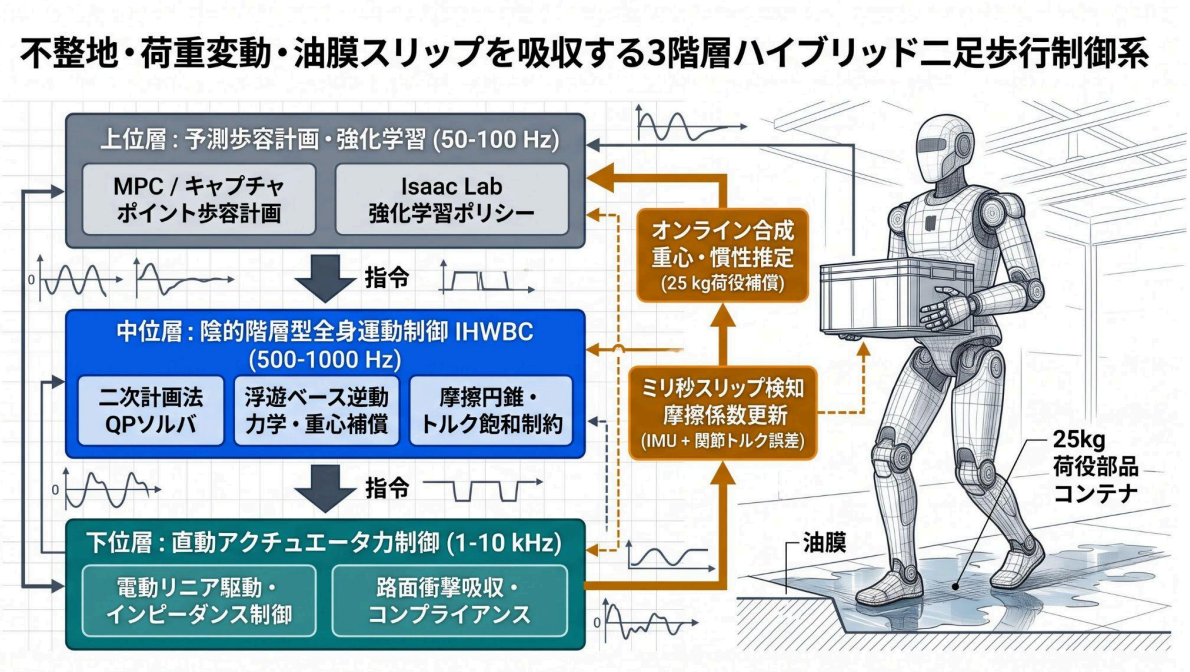
既存工場（Brownfield）の床面・通路環境における移動方式別（磁気AGV ／ 車輪型AMR ／ 二足歩行Apollo）走破性・安全制御比較表

評価項目	磁気テープ誘導式AGV	低床車輪型AMR	二足歩行機（Apptronik Apollo）
段差・目地・溝の走破性能	段差3～5mm以下かつ目地面一充填が必須で	段差5～20mmおよび溝幅30～35mmが上限で	遊脚スイング軌道生成により数cmの段差やグ

評価項目	磁気テープ誘導式AGV	低床車輪型AMR	二足歩行機（Apptronik Apollo）
	グレーチングや段差で容易にスタック	衝撃振動や駆動輪スリップが発生	レーチングおよび階段を跨いで踏破可能
狭小通路通過性と旋回性	固定軌道上の車幅プラス安全余白で1,200～3,600mmを要し障害物の自律迂回は不可	100kg級以上では荷姿プラス安全スキャナ余白を要し狭小部では大回り迂回が発生	人間同等の肩幅・歩幅により幅800～1,000mmの狭小通路やその場旋回・横歩きに対応
床面改修・インフラ工事要件	磁気テープ敷設とDIN 18202準拠の床面研削・目地補修が必須でライン変更に脆弱	磁気テープ不要だが床面平坦度確保と油膜除去および狭小部治具の移設改修が必要	建屋・床面・既存治具の改修ゼロで人間用動線と多段部品棚へそのまま投入可能
上下リーチと荷役統合性	搬送専用または高重量化した大型アーム搭載が必要で床面耐荷重要件が厳格化	車輪台車上の協働アームでは高所棚や車体下部および奥まった治具への到達が制限	身長1.73mの両腕リーチと全身屈伸協調により床面近くから高所棚まで直接荷役
適用安全規格と異常時挙動	ISO 3691-4準拠の2Dスキャナ監視で電源遮断時も車輪支持により静的に自立停止	ISO 3691-4とISO 10218の二本立て評価で非常停止時は機械ブレーキで即時停止	ISO 10218および策定中ISO 25785-1領域に跨り停止時は通電立位バランス保持が必須

もっとも、移動エネルギー効率（Cost of Transport：消費電力を機体重量と移動速度の積で除した指標）の観点では、平滑な床面においては車輪移動が二足歩行に対して明確に優位である。Apptronikはこの物理法則に逆らうのではなく、2つの実務的アーキテクチャでROIを成立させている。第一に、4時間連続稼働可能なホットスワップ（即時交換）式バッテリーパックに加え、Apollo 2では継ぎ足し充電（Opportunity charging）と有線給電（Tethering）をサポートし、充電停止時間を排して週7日×1日22時間（7×22）の稼働体制を実現した。第二に、上半身トーソを二足歩行脚にも車輪型モビリティベースにも結合できるモジュラー設計を採用し、平坦で長距離の高スループット搬送には車輪ベース、段差や狭小通路が密集する人間用空間には二足歩行構成を選択可能としている。さらに電子機器受託製造世界大手のJabilと量産・実工場導入の戦略提携を結び（目標量産単価5万米ドル未満）、サードパーティ統合報告によればアームやトーソを特殊工具なしで約20分でモジュール交換できる保守性を備えるなど、商用フリート運用を見据えた生産設計が徹底されている。

第2章 不整地・段差・荷重変動に耐える「二足歩行スタビリティ制御アルゴリズム」



2.1 モデルベース制御（MPC / IHWBC）と深層強化学習の3階層ハイブリッド構造

二足歩行ロボットの運動制御の本質は「管理された落下（Controlled falling）」であり、足首トルクのみで吸収できる外乱は床反力中心（CoP）が足裏の支持多角形エッジに達するまでに限られ、それを超える外乱に対しては胴体角運動量の調整または新たな着地位置（Footstep）の踏み出しが不可欠となる。Apptronikの商用制御プラットフォーム「Artemis」の内部コードは非公開（クローズドソース）であるが、公開されているApolloの実機特性（独自の電動直動フォース制御アクチュエータ、膝ピッチ角を制御して人間のように膝を伸ばす「close to straight-leg walking」、NVIDIA Isaac Labを用いた強化学習ポリシー訓練）と、共同創業者のNicholas Paine博士（CTO）およびLuis Sentis教授（UT Austin HCRL）がApptronik製ハードウェア「DRACO 3」や「NASA Valkyrie」で確立した制御理論群を突き合わせることで、その多階層制御構造を論理的に再構成できる。

現代の産業用二足歩行制御がBrownfieldの不整地と重荷重に耐える鍵は、モデル予測制御（MPC）・全身運動制御（WBC）の厳密な物理制約と、深層強化学習（RL）の柔軟な適応性を制御周波数ごとに役割分担させるハイブリッド構造にある。純粋な強化学習単体ではSim-to-Real転移時の摩擦制約や関節トルク飽和に対する形式的な安全保証が得られず、逆に古典的なZMP（Zero-Moment Point）規範の定高重心制御では常に膝を大きく曲げた中腰姿勢を強いられるため、立脚の膝モーターが巨大な重力保持電流を流し続けて熱制限（Thermal limit）に陥りやすい。ヒューマノイド制御文献およびUT Austin HCRLの設計系譜に基づく3階層の制御ループ構造は以下の通り整理される。

制御階層	代表的な制御周期（周波数）	主な演算アルゴリズム・ソルバ	入力情報と出力指令値・物理的役割
上位層：予測歩容計画・RL層	10〜20ms周期（50〜100Hz）	単一剛体／重心運動量MPC・3D-DCM（キャプチャポイント）および強化学習ポリシー	目標移動速度と地形情報から向こう0.1〜1.0秒の最適着地位置と目標重心軌道・床反力を生成
中位層：陰的階層型全身制御	1〜2ms周期（500〜1,000Hz）	陰的階層型全身運動制御（IHWBC）・二次計画法（QP）リアルタイム最	浮遊ベース逆動力学と摩擦円錐・トルク上限不等式制約を解き全身関

制御階層	代表的な制御周期（周波数）	主な演算アルゴリズム・ソルバ	入力情報と出力指令値・物理的役割
		適化	節の最適トルク指令を算出
下位層：アクチュエータ制御	0.1～1ms周期（1～10kHz）	分散モータードライバ位置・速度制御（1～10kHz）および力・インピーダンス制御（100～500Hz）	独自電動直動アクチュエータの出力力を高精度追従し段差早期接地や衝突衝撃を柔軟に吸収

上位層（50～100Hz、例えば全身・剛体MPC実装における80Hz前後）では、単一剛体モデル（SRB）または3次元発散運動成分（3D-DCM：3次元キャプチャポイント）を用い、予測ホライズン（約0.1～1.0秒）にわたって「次の遊脚の着地座標」と「目標床反力レンチ・重心軌道」を同時最適化する。例えば前進歩行中に横方向から175Nの衝撃外乱を受けた場合でも、次の着地位置と支持脚レンチを同一ソルバ内で再計画することで1.0～1.5秒以内にバランスを回復できることが示されている。さらにUT AustinのAhn・Lee・Sentisら（2020年）は、キャプチャポイント（Capturability）に基づく動的バランスモデルと制御バリア関数（CBF）を階層型強化学習に組み込む安全学習枠組みを提案しており、Apptronikが活用するNVIDIA Isaac Labでのドメインランダマイゼーション学習ポリシーとモデルベース予測制御が協調して不整地適応性を高めていると推察される。また、Apolloの大きな特徴である「ほぼ膝を伸ばした自然歩行（Close to straight-leg walking）」は、3D-DCM等で重心の上下動を許容しつつ立脚期の膝ピッチ角を伸展位近くへ制御することで、骨格構造で鉛直荷重を支持しアクチュエータの発熱と電力消費を大幅に削減している。

中位層（500～1,000Hz、制御周期1～2ms）では、Apptronik製ハードウェアDRACO 3の論文（Bang, Gonzalez, Ahn, Paine, & Sentis, 2023）で詳述されている「陰的階層型全身運動制御（Implicit Hierarchical Whole-Body Control：IHWBC）」が稼働する。厳密な零空間射影（Null-space projection）のみに頼る従来のWBCでは足の離接地切り替え時にトルク指令の不連続が生じやすいのに対し、IHWBCはタスク優先度（接地拘束、合成重心CoM軌道・骨盤姿勢、遊脚着地位置、両腕マニピュレーション、基準姿勢）をコスト関数内の重み行列として陰的に統合し、一般化関節加速度ベクトル q_ddot と接触反力ベクトル F_r を決定変数とする二次計画問題（QP）を毎周期解く。プレーンテキスト表記による目的関数は以下の通りである。

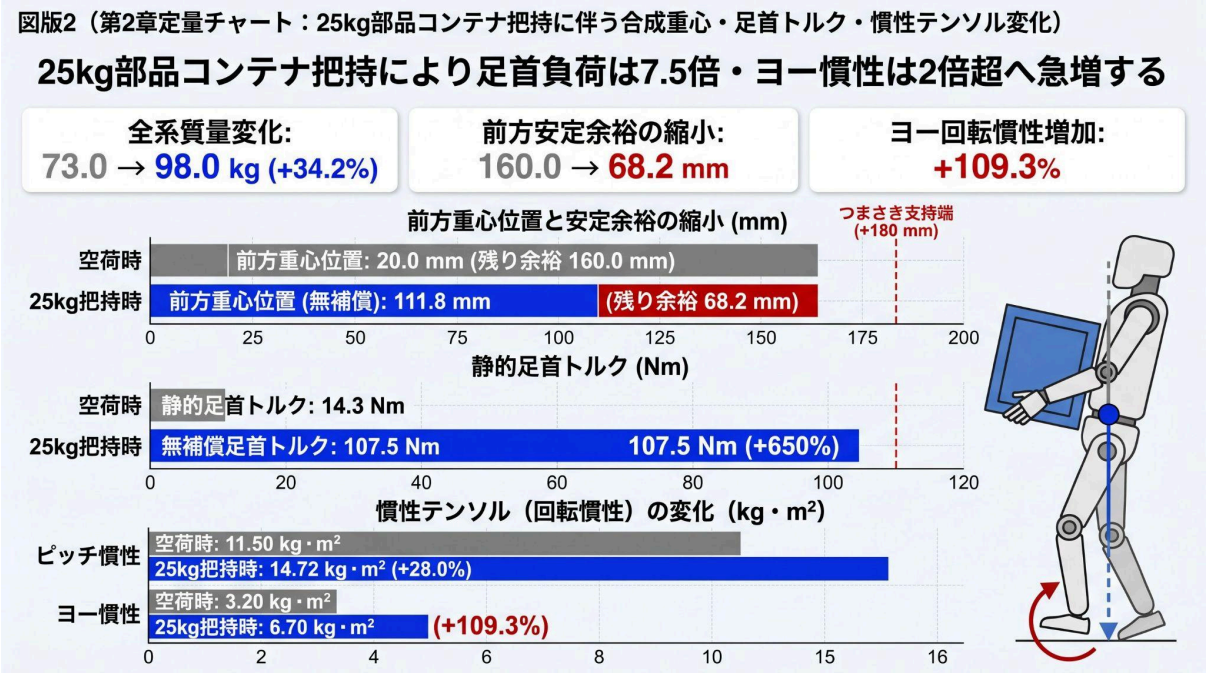
`minimize J(q_ddot, F_r) = sum_i | | J_i * q_ddot + J_dot_i * q_dot - x_ddot_i_des ||^2_(W_i) + | | q_ddot ||^2_(W_q) + | | F_r_des - F_r ||^2_(W_Fd) + | | F_r ||^2_(W_F)`

ここで J_i と x_ddot_i_des は第iタスクのヤコビ行列と目標空間加速度、W_i はタスク優先度重み行列、W_q・W_Fd・W_F は正則化および目標反力追従の重み行列を表す。この目的関数は、(1) 浮遊ベース運動方程式制約 S_f * (A * q_ddot + b + g - J_c^T * F_r) = 0（A は質量慣性行列、b はコリオリ・遠心力項、g は重力項、J_c は接触ヤコビ行列）、(2) リンク・転がり接触関節等の内部運動拘束 J_int * q_ddot + J_dot_int * q_dot = 0、(3) 床面を引っ張らず滑らせない片側接地・摩擦円錐制約 U * F_r >= 0 および最大垂直抗力制限 S_r * F_r <= F_r_max、(4) 関節加速度上限およびアクチュエータ飽和トルク制約 tau_min <= tau <= tau_max、という4つの厳格な物理制約の下で解かれる。得られた最適解 q_ddot_star と F_r_star から逆動力学式 tau = S_a * N_int_bar^T * A * q_ddot_star + N_int^T * b + g - J_c * N_int^T * F_r_star によって最終的な関節トルク指令値が算出されるため、上肢作業のために足裏の摩擦限界を破って転倒するような指令は数学的に排除される。

下位層（内部位置・電流ループ1～10kHz、例として2.5kHz駆動、外側トルク・力制御ループ100～500Hz）を担うのが、Apptronikが35世代以上の反復開発を経て完成させた独自の電動リニアアクチュエータ（直動駆動系、機体全体で約30の筋群として機能し、Apollo 2ではエネルギー効率90%以上を達成）である。Paine博士とSentis教授はUT Austin時代より直動型直列弾性アクチュエータ（Prismatic SEA：米国特許出願US20170341227A1）や粘弾性液冷アクチュエータ（VLCA）を開発してきた第一人者である。減速機出力軸の後段にバネ定数 K の弾性要素を配置するSEAは、減速機摩擦（高減速比ギアではモータートルクの20～30%を損失させる）の影響を受けずに tau = K * delta_theta で正確な関節トルクを計測でき、段差踏み抜き時の着地衝撃を受動的に吸収できる一方、力制御帯域幅が BW ≈ sqrt(K / J_load)（通常5～20Hz）に制約される。このためApollo世代の最新ヒューマノイド設計では、接地衝撃吸収と繊細な接触力制御が不

可欠な足首や手首には弾性・高精度フォース制御機構を適用し、50〜200Hzの高応答帯域が求められる股関節や膝には低反射慣性の直動アクチュエータと近位駆動配置（Proximal actuation：重量のある駆動源を体幹近くに配置し脚先端の遠位質量を低減する設計）を組み合わせることで、高帯域なバランス回復と安全なコンプライアンスを両立させている。さらに未知外乱に対するWBCオンライン・ゲイン適応制御（Lee, Ahn, & Sentis, 2021）の知見により、路面反力急変時の関節発振も抑制される。

2.2 最大25kg部品コンテナ把持時の合成重心・慣性テンソル変動と動的補償機構



工場内のキット部品搬送では、空荷歩行時と、最大25kgの金属部品が入った標準コンテナを胸前に抱えた状態とで全系の重心位置と慣性テンソルが劇的に変化する。この物理的変化を定量化するため、Apolloの公開スペック（機体質量 m_r = 73.0 kg、身長 1.73 m、最大可搬質量 m_p = 25.0 kg）に標準的な人間型剛体モデル（空荷時合成重心を足首関節軸の前方 x_r = +20.0 mm・高さ z_r = 920.0 mm、足裏支持長を踵 -80 mm からつま先 +180 mm までの 260 mm、機体ピッチ慣性 I_yy_r = 11.50 kg・m²、ヨー慣性 I_zz_r = 3.20 kg・m² と設定）および欧州自動車業界標準のVDA 4500（KLT 6428相当：奥行 0.40 m × 幅 0.60 m × 高さ 0.28 m）コンテナの胸前把持モデル（荷物重心を足首前方 x_p = +380.0 mm・高さ z_p = 1,050.0 mm と設定）を適用した剛体力学試算を行った。
この試算結果によれば、25.0kgコンテナ把持時の全系質量 m_total は 98.0 kg（+34.2%）へ増大し、前後方向の合成重心 x_com = (m_r * x_r + m_p * x_p) / m_total は +20.0 mm から +111.8 mm へと前方へ 91.8 mm 移動し、重心高さ z_com も 953.2 mm（+33.2 mm）へ上昇する。結果として、つま先支持端（+180.0 mm）までの静的安定余裕は空荷時の 160.0 mm から 68.2 mm へと半分以下に縮小する。もし骨盤や体幹の姿勢を補正せずにこの前方重心を足首関節のみで静的に保持しようとすると、足首ピッチ軸に必要な重力補償トルク m_total * g * x_com は空荷時の 14.3 Nm から実に7.5倍の 107.5 Nm へと急増し、歩行減速時の慣性力や数度の床面下り勾配が重なった瞬間に床反力中心がつま先端を突破して前方へ転倒する。さらに平行軸の定理を適用して新合成重心周りの回転慣性モーメントを算出すると、ピッチ軸慣性 I_yy が 11.50 kg・m² から 14.72 kg・m²（+28.0%）へ増加する一方、胸前遠方に25kgの質量が張り出す影響で鉛直旋回方向のヨー軸慣性 I_zz は 3.20 kg・m² から 6.70 kg・m² へと2.09倍（+109.3%）に倍増し、倒立振子固有角振動数 omega_0 = sqrt(g / z_com) の低下に伴って速度 1.0 m/s でのキャプチャポイント先行量 v / omega_0 も 306.2 mm から 311.7 mm へ伸長する。

実工場では運搬するコンテナごとに内部の部品重量や偏荷重が異なるため、固定モデルによるフィードフォワード補償では不十分である。最新の全身ロコマニピュレーション制御では、コンテナを持ち上げた瞬間の両腕・腰・脚の関節出力トルクとIMU加速度の運動方程式残差から、物理的整合性を持つ拡張カルマンフィルタ（EKF）等のオンライン推定器が手先負荷の質量・重心並進オフセット・慣性テンソル偏差をリアルタイムに同定し、MPCおよびIHWBCの剛体動力学モデル A(q)・g(q) を逐次更新する。併せて、UT AustinのAhn・Sentisら（2021年）が提案した「セントロイダル慣性ネットワーク（Centroidal Inertia Network）」のように、四肢と保持物の姿勢変化に伴う合成慣性変動をニューラル近似して軌道計画へ高速反映させる手法も基盤技術となっている。重心モデルが更新されると、MPCとIHWBCは前方へずれた合成重心を再び足首軸直上付近へ引き戻すよう、骨盤（Pelvis）の後方シフトおよび体幹ピッチ角の後傾リファレンスを自動生成し、107.5Nmに達するはずだった過大な足首負荷を股関節伸展・膝伸展・足首底屈の直動アクチュエータ群へバランス良く再配分する。同時に、2倍超に膨張したヨー慣性 I_zz に対しては、狭小通路の直角コーナー旋回時に支持脚足裏でスピン滑りが起きないよう、角加速度上限を絞るとともに遊脚スイングの角運動量を相殺方向に制御する。

2.3 油膜・粉塵による摩擦係数変化（スリップ）のミリ秒検知と外乱抑制ループ

パワートレイン生産の歴史を持つベルリン工場等の床面では、薄膜状の加工油や粉塵によって静止摩擦係数 mu が突発的に低下する。二足歩行機において立脚（Stance foot）のスリップは、トラクション喪失による直接的な転倒危険だけでなく、「支持脚は地面に固定されている」という前提でIMU姿勢角と関節エンコーダの順運動学から胴体位置・速度を積算する脚運動学オドメトリ（State estimation）に大きな累積誤差を混入させる二重の脅威となる。
トルク制御型脚ロボットにおけるミリ秒単位のスリップ検知・回復アルゴリズムは、関節トルク・フォース誤差とベース座標系での足先速度監視を組み合わせて構成される。ワールド座標系での足先速度は状態推定誤差の影響を受けて誤報（False positive）を出しやすいのに対し、胴体（ベース）座標系における支持脚足先の目標相対速度と、エンコーダ角速度およびIMUから求めた実測相対速度との重み付き偏差ノルムを監視し、接地直後の1〜2cm程度の微小な初期なじみ（過渡現象）を除外する足先変位閾値と関節トルク急減（負荷抜け）を組み合わせることで、1kHz制御ループの数サンプル（1〜4msの移動平均窓）で真のスリップ発生を検知できる。
スリップが検知された瞬間、滑動中の足裏の床反力ベクトル F は実際の路面の摩擦円錐（Friction Cone）の境界線上に位置しているため、推定された路面法線ベクトル n と実測床反力ベクトル F のなす角度（接線力と垂直抗力の比 F_t / F_n）から、その油膜路面の真の摩擦係数 mu_hat をオンライン逆算できる（QPソルバ内の内接四角錐制約に適用する際は 1 / sqrt(2) の幾何スケーリングを乗じる）。IHWBCのQP不等式制約 U * F_r >= 0 の許容摩擦係数をこの mu_hat へ即座に縮小更新すると、QPソルバは次周期（1ms後）に水平方向の蹴り出し・制動せん断力を直ちに絞り込み、床反力ベクトルを法線方向（真下への垂直荷重方向）へ立て直す関節トルクを出力するため、足裏の滑りは短時間の過渡応答で自然停止する。同時に上位MPCへ低摩擦検知フラグが送られ、次歩以降のストライド（歩幅）短縮と両脚支持期間の拡大によって水平接地反力を抑えた耐スリップ歩容へと自動遷移する。

第3章 デプスセンサ・視覚統合によるリアルタイム自己位置推定（SLAM）と3D環境マッピング

3.1 頭部・胸部センサフュージョン構成とオンボード計算基盤

床面の数cmの段差やグレーチングを踏み抜かず、かつ側方に張り出した治具や接近する作業員・フォークリフトを死角なく捉えるには、従来のAMRが用いる単一水平面の2D LiDARでは不十分であり、足元直下から遠方通路までを立体的に覆う3次元センサフュージョンが不可欠となる。Apptronikの公式資料および技術開示によって確認されているApolloのセンサ・計算機ハードウェア事実と、非公開領域を含む空間認識上の機能分担は以下の通りである。

搭載部位・モジュール	公式発表・一次資料で確認されている仕様事実	非公開事項と工学的に推定される空間認識ロール
頭部（Head）視覚系	円形の両目位置に一対のステレオデプス（立体視）カメラを搭載し進行方向へ能動旋回	解像度・FOV値は非公開だが前方約0.5〜5mの棚・部品認識と俯角での足元段差計測を担当
胸部・胴体（Torso）環境系	周囲360度の環境マップを構築し走行可能空間を判定する胴体センサ群を搭載	具体的型番は非公開（外部台帳ではLiDAR分類あり）だが水平360度の障害物・対人監視を担当
内部状態推定センサ系	機体の傾き・角速度・加速度を検出する姿勢センサ（IMU）および各関節エンコーダを内蔵	1kHz級の浮遊ベース姿勢推定と支持脚順運動学による脚オドメトリ算出の基礎データを提供
胸部メイン計算機（「脳」）	胸部内にNVIDIA Jetson AGX OrinおよびJetson Orin NXモジュールを搭載	オンボードGPU上で視覚SLAM・3Dボクセル地図生成・基盤モデル推論を低遅延でエッジ実行

ここで留意すべき点として、Apptronikはカメラの厳密な画素数・視野角（FOV）や胸部360度センサの具体的サプライヤ型番（マルチカメラ／ToF／3D LiDARの詳細内訳）を外部公表していない。また、サードパーティの生産IT統合ベンダー（iFactory）が公開したメルセデス・ベンツ向け統合アーキテクチャ報告では、欧州GDPRおよび自動車サプライヤのデータ主権要件を満たすため「生産判断におけるクラウド依存ゼロ、WAN遮断時の自律稼働、5ms未満のエッジ推論レイテンシ」という運用仕様が提示されている。一般的なステレオデプスカメラの有効測距レンジ（約5m以内）とLiDARの広域測距レンジ（約20〜30m）および魚眼・広角カメラの近傍死角解消特性 を踏まえると、Apolloは頭部の下向きチルトを含む高密度ステレオ視覚で足元直下（0.3〜1.5m）の段差と前方作業域（0.5〜5.0m）の部品コンテナを精密計測し、同時に胸部の360度センサ群で頭部の向きに依存しない全方位の通路見通しと接近移動体監視を成立させていると分析される。

3.2 鏡面反射・動的背景変化を克服するVisual-Inertial-Leg Odometry

自動車工場のBrownfield現場は、3Dビジョンおよびslamにとって極めて過酷な外乱環境である。具体的には、塗装ボディやホワイトボディ鋼板・金属治具・床面油膜による強い鏡面反射（Specular reflection）、天井クレーンや車両組立コンベヤの移動に伴う背景構造の連続的変化、そして歴史的建屋の天窓採光による昼夜・天候の照度変動が同時に発生する。鏡面反射はステレオ視差計算に誤対応を生じさせて壁角や金属面付近のデプス精度を劣化させ、移動中のコンベヤ車両から視覚特徴点を抽出してしまうと自己位置推定（オドメトリ）に深刻なドリフトが生じる。



Apptronikの内部SLAMソフトウェア名は非公開であるが、実機に搭載されているNVIDIA Jetson AGX Orin / Orin NX環境 における標準的なGPU高速化リファレンス実装（NVIDIA Isaac ROS の cuVSLAM および大局的視覚自己位置推定 cuVGL）と、UT Austin HCRLの脚状態推定手法を統合的に見ることで、ドリフト抑制のメカニズムが明確になる。第一に、ステレオ画像のみに依存せず、高周波のIMU慣性計測と支持脚の関節エンコーダ順運動学（脚オドメトリ）を密結合した「Visual-Inertial-Leg Odometry」を構成することで、強い反射光や暗部で視覚特徴が一時的に欠落した区間でもミリ秒単位の連続的なポーズ推定を維持する。第二に、JetsonのTensorコア上で稼働するリアルタイム・セマンティックセグメンテーション（Segformer等）を用いて「作業員」「フォークリフト」「コンベヤ上の移動車両」にマスクを掛け、動的オブジェクト上の特徴点をSLAMフロントエンドから除外するとともに、AIベースのステレオ視差推定（FoundationStereo等）によって金属反射面や無地壁角でのデプス欠損を補完する。第三に、部品棚と組立ラインの間（5〜10m単位のループ区間）を多角度から反復走行する閉ループ軌道（Closed-loop segments）によってループクロージャを頻繁に発火させ、長時間稼働における累積ドリフトをリセットする。

3.3 GPU常駐型3Dボクセルマップ（Nvblox TSDF/ESDF）の高速更新と動的レイヤ分離

取得した3次元デプス点群と自己位置から周囲の障害物マップをリアルタイム構築する際、従来の3Dロボティクスで広く使われてきた確率的八分木マップ「OctoMap」には、二足歩行の工場運用において看過できない限界がある。OctoMapは空間を8分木で再帰分割し、各ボクセルに対数オッズ形式で占有確率を記録（初期値0[確率0.5]に対し、表面ヒットで +0.85[確率0.7]、光線通過ミスで -0.41[確率0.4]を更新し、確率0.12〜0.97でクランピング）して空き空間を枝刈り圧縮する。しかし、CPU上でのレイキャスティング負荷が高いため実用分解能が5〜10cm（50〜100mm）程度に留まり、Brownfield床面の10〜20mm級の段差や細い手すり・ケーブルが光線の擦り抜けによって地図から消失（Holes in thin structures）しやすい。さらに、上限クランプ（対数オッズ約 +3.5）に達した停車中のフォークリフトや作業員が移動した後、そのボクセルが空き状態に戻るまでに約9回のミス観測を要するため、通路上に「消えない幽霊障害物（Ghost obstacles）」が残存して局所経路計画を阻害する問題があった。
これに対し、Jetsonプラットフォーム向けのGPUアクセラレーション型3Dマッピング基盤である「Nvblox（Millane et al., NVIDIA）」は、ブロックハッシュ化された多層3Dボクセルグリッド（LayerCake 構造）をすべてGPUメモリ上に常駐させ、CPU-GPU間のデータ転送オーバーヘッドを排除している。公開ベンチマークでは、従来のCPUベース実装（Voxblox）と比較して**3D**表面再構築で最大**177**倍、**ESDF**（ユークリッド符号付き距離場）計算で最大**31**倍の高速化を達成してお

り、TSDF（切断符号付き距離場）1cm（10mm）・ESDF 2cm（20mm）という高精細ボクセル設定であっても、10cm（100mm）格子の従来CPU手法より高速にリアルタイム処理を実行できる。1cm分解能のTSDFは足元のわずかなスラブ段差やグレーチング縁を正確に捉えて着地計画を支え、2cm分解能のESDFは全身の各リンクおよび把持コンテナから周囲の障害物までの最短距離と勾配ベクトルをkHzレートの全身衝突回避ポリシー（Riemannian Motion Policies等）へ直接供給する。
さらに動的環境への決定的な回答となるのが「静的・動的2レイヤ分離再構築」である。人物等のセマンティックマスクに該当しない静止背景のデプス点群は「静的TSDFレイヤ」へ重み付き積分して高精度な工場設備形状を構築する一方、人間などの動的クラスに属するデプス点群は独立した「動的占有格子レイヤ（OccupancyLayer）」へ振り分け、時間経過とともに占有確率を急速減衰（Decay over time）させる。これにより、通路を横断した作業員や通過したフォークリフトの残像（ゴースト）を瞬時に消去しつつ、柱や張り出し治具の精密な3Dマップを一切損なわないリアルタイム空間認識が可能となる。

第4章 人・有人フォークリフト混在環境における「動的障害物回避」と協働安全制御

4.1 移動物体の軌跡予測とリアルタイム局所軌道計画（Local Planner）

作業員が部品棚と組立ラインの間を頻繁に横断し、有人フォークリフトや牽引車が往来する工場通路では、移動障害物の速度ベクトルと数秒先の将来軌跡を予測して滑らかに減速・回避する局所軌道計画（Local Planner）が不可欠である。UT AustinのAhn・Sentisら（2018年）は早期より移動障害物環境下での二足歩行キノダイナミック経路計画（Kinodynamic planning with moving obstacles）を研究しており、現在のApollo 2では制御基盤「Artemis」に加えてGoogle DeepMindの基盤モデルによる「推論時安全ガイダンス（Inference-time reasoning guidance）」がリアルタイムの危険回避判断を支援する。DeepMindの安全性評価報告によれば、この推論時ガイダンスの導入によって障害物周辺での安全なタスク完遂率は**33%**向上し、近傍に人間が存在する環境下での安全なタスク完遂率は**43%**向上している。
局所プランナが作業員やフォークリフトとの動線交差リスクを検知した場合、車輪型ロボットのような急ロック制動は慣性モーメントによる前方転倒や荷崩れを誘発するため、上位MPCに対する目標重心速度指令をキャプチャポイント安定領域内で連続的に減衰させる。通路幅に余裕がある幹線ではESDFの距離勾配に沿って滑らかな局所迂回軌道を再生成し、幅80〜100cmの狭小通路で対向者と鉢合わせた場合には、無理なすり抜けを行わず手前の退避余白または通路端へ寄せて両脚支持の安定立位へ移行する。

4.2 機械安全規格（ISO 10218:2025 / ISO/TS 15066 / ISO 25785-1）と「倒れない非常停止」

労働安全衛生総合研究所などの機械安全研究機関および完成車メーカーの安全認証担当者が最も厳格に検証すべき課題は、二足歩行ヒューマノイドが従来の産業用ロボット安全規格の前提から外れる「動的安定機械（Dynamically stable machine）」であるという点である。
2025年2月に改訂発行された産業用ロボットの国際安全規格「**ISO 10218:2025**（米国版ANSI/A3 R15.06-2025）」では、従来の協働ロボット技術仕様書「**ISO/TS 15066:2016**」に規定されていた協働運転要件——「速度・分離監視（SSM：Speed and Separation Monitoring）」「動力・力制限（PFL：Power and Force Limiting）」「手動案内（HGC）」および従来の安全監視停止を再整理した「安全監視付き停止（**Monitored Standstill**）」——が本規格へ統合された。同改訂の最重要ポイントは、「協働ロボットという機種単体」ではなく、ハンド・保持ワーク・周辺治具・作業環境を含めた「協働アプリケーション（**Collaborative Application**）」全体を対象にISO 12100に基づくリスクアセスメントを要求した点にある。すなわち、Apollo本体のアクチュエータが力制限されていても、胸前に25kgの硬質な金属部品入りコンテナを抱えていればワーク角部との接触圧力や、幅80〜100cmの狭小通路で柱と機体の間に人体が挟まれるリスク（Crushing / Trapping hazard）をアプリケーションとして評価・低減しなければならない。
さらに決定的なギャップとして、ISO 10218は床面に固定されたアーム等の「静的に安定なロボッ

ト」を前提としており、自律移動機能は適用除外と明記されている。固定式ロボットや車輪型AMRであれば、非常停止時にモーターの駆動トルクを即座に遮断する「Safe Torque Off（STO）」を作動させればその場で静止する。しかし、毎秒数百回以上の能動制御で直立バランスを保っている二足歩行ヒューマノイドに単純なSTO（完全トルク遮断）を適用すると、機体**73kg**＋荷物**25kg**＝合計**98kg**の質量塊が瞬時に支えを失って重力崩壊・転倒し、安全停止機能そのものが周囲の作業員を押し潰す重大な危険源となる。
この規格の空白を埋めるため、国際標準化機構の **ISO/TC 299 / WG 12** 作業部会は現在、能動バランス制御を要する産業用移動ロボット向けの専用安全規格「**ISO 25785-1**（Safety requirements for dynamically stable industrial mobile robots：2025年5月に作業原案WD策定、2026年9月のミネアポリス会合等を経て開発進行中）」を策定している。ISO 25785-1の設計原則およびEN ISO 13850（非常停止）の枠組みに照らすと、停止後の基本安全状態（Safe State）は無通電崩落ではなく「通電立位バランス保持（**Standing statically with active balance / Monitored Balanced Standstill**）」として定義される。また保守作業時のエネルギー管理（Lockout / Tagout）においても、安易な電源遮断による転倒を防ぐため、関節ロックと能動バランスを維持する代替手順（Control of Hazardous Energy）または物理的保持治具への固定を文書化することが実務要件となる。
ApptronikはNASA Valkyrie開発以来の安全設計思想を反映し、ApolloおよびApollo 2にハードウェアレベルの「可変ペリメータゾーン（**Configurable Perimeter Zone**）」と、定義半径内への物体侵入時に即座に動作を一時停止する「インパクトゾーン（**Immediate-stop Impact Zone**）」、さらに直動アクチュエータの「フォース制御（**PFL**コンプライアンス）」という多層防護を実装している（ただし商用の詳細安全マニュアル数値や限界値は一般公開されていない）。なぜこの多層制御によって狭小通路でのすれ違いが可能になるのかを、ISO/TS 15066（ISO 10218:2025）のSSM最小保護分離距離 S_p(t_0) の基本式 S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r（S_h：応答時間 T_r と停止時間 T_s 中の人間移動距離 v_h * (T_r + T_s)、S_r：応答時間中のロボット進行距離 v_r * T_r、S_s：ロボット制動停止距離、C：侵入・揺動余裕、Z_d + Z_r：センサおよびロボット位置不確かさ）を用いた本報告書のモデル試算（T_r = 0.08 s、Z_d + Z_r = 0.12 m 設定）で検証する。
幹線通路を巡航歩行（v_r = 1.0 m/s、1歩減速停止 T_s = 0.45 s、C = 0.20 m）し、人物速度に未追跡時の標準保守値 v_h = 1.6 m/s を適用した場合、内訳は S_h = 0.85 m、S_r = 0.08 m、S_s = 0.23 m となり、必要保護分離距離は S_p = 1.47 m に達する。しかし、作業員が可変ペリメータゾーンへ進入した段階で360度センサが相手の実際の歩行速度ベクトル（すれ違い速度 v_h = 0.8 m/s）を追跡し、Apollo自身もストライドを詰めた微速歩容（v_r = 0.35 m/s、半歩停止 T_s = 0.25 s、C = 0.15 m）へ段階的に減速すると、S_h = 0.26 m、S_r = 0.03 m、S_s = 0.04 m まで縮小し、保護分離距離は S_p = 0.61 m へと半分以下に圧縮される。さらに幅80～100cmの通路内で作業員が0.6m以内のインパクトゾーンへ踏み込んだ瞬間には、ハードウェア安全層が移動を即時一時停止（v_r = 0 m/s の通電立位バランス保持）させて相手を通過させるか、あるいは部品の直接手渡し（ハンドオフ）タスク時には直動フォース制御アクチュエータのPFL（動力・力制限）コンプライアンスモードによって接触時の衝撃力・圧力を生体許容値以下に抑え込む。なお、万一の主電源喪失や制御異常に対しては、ISO/WD 25785-1が規定する転倒リスク管理（Fall zoneの設定）に従い、バックアップ電源と減衰制御を用いて膝を屈曲させ重心を低く落とすフェイルセーフ挙動の実装が不可欠となる。

安全制御レイヤ	検知領域・トリガ条件	ロボット運動制御の応答挙動	参照される国際機械安全規格の概念
第1層：広域軌道予測層	数m先の歩行者・有人フォークリフトの動線交差予測	推論時安全ガイダンスとMPC目標速度調整による滑らかな減速と局所迂回	ISO 12100 リスク低減および動的経路計画
第2層：可変ペリメータ層	設定可能な周辺監視領域への作業員・設備の進入	接近速度の実測追跡に連動した微速歩容（0.35m/s級）への段階的速度制限	ISO 10218:2025 / ISO/TS 15066 速度・分離監視（SSM）
第3層：インパクトゾーン層	機体直近の定義半径内への人体・物体の侵入検知	ハードウェア安全制御による即時動作一時停止と通電立位バランス保	EN ISO 13850 保護停止およびISO 25785-1 動的安定停止

安全制御レイヤ	検知領域・トリガ条件	ロボット運動制御の応答挙動	参照される国際機械安全規格の概念
		持への移行	
第4層：接触・電源異常層	物理的接触の発生または非常停止・主電源喪失異常	直動駆動系のPFL柔軟コンプライアンス応答および異常時の低重心減衰・転倒域管理	ISO 10218:2025 PFLおよびISO/WD 25785-1 電源喪失時挙動

4.3 視覚的シグナリング（胸部OLED・能動視線・協調LED）による心理的安全性とすれ違い効率

狭小通路における人とロボットの円滑な共存には、物理的な衝突回避だけでなく、作業員がロボットの「認識状態」と「次の進行方向」を一瞬で直感理解できる人間中心のインターフェース（HRI）が欠かせない。ApptronikはApolloの外観とシグナリング機構に3つの工学的工夫を凝らしている。
第一に、Apolloは通路を曲がる際や移動を開始する際、まず次に向かう方向へ意図的に頭部（ステレオカメラの「両目」）を旋回させる能動視線動作を行うため、対向する作業員は人間の歩行者に対するのと同じ感覚で進路変更を事前察知でき、すれ違い時のお見合い（回避方向の重複）が防止される。第二に、顔面のモノクロE Inkマウス（Apollo 2では表現力豊かなLEDマウスと音声対話機能へ進化）および頭部・口部・胸部の協調LEDライティングが連動し、「人物検知・減速中」「一時停止・待機中」といった安全ゾーン状態を光の色とアニメーションで周囲へ明示する。第三に、胸部中央のOLEDデジタルパネルには「現在の実行タスク」「完了予定時刻」「次のアクション」「バッテリー残量」が一覧表示されるが、Cardenas CEOが明言している通り、この胸部パネルはあえてタッチ操作機能を省いた「表示専用（**Display-only**）」設計とされている。もし胸部をタッチスクリーンにすれば、作業員が操作のためにロボットの腕の可動域（インパクトゾーン内）へ自ら接近して身体を触れさせる危険行動を誘発してしまうため、安全な分離距離を保ったまま視覚情報のみを伝達する合理的な安全設計となっている。

第5章 メルセデス「MO360」およびNVIDIA Omniverseデジタルツインとの事前検証連携

5.1 「MO360」データエコシステムとOpenUSD工場デジタルツインの統合

稼働中の既存工場（Brownfield）へ二足歩行ヒューマノイドを導入する際、実機をいきなり生産ラインへ投入して経路干渉や死角リスクを試行錯誤することは、タクトタイム遅延と安全管理の両面から許容されない。メルセデス・ベンツがこの導入障壁を解消した中核基盤が、全社生産デジタルエコシステム「**MO360**（**Mercedes-Benz Cars Operations 360**）」と、OpenUSD（Universal Scene Description）標準に基づく「**NVIDIA Omniverse**」工場デジタルツインを直結した「Digital First」生産手法である。
ベルリン・マリエンフェルデのMBDFCはMO360ソフトウェア群のグローバル開発・検証拠点であり、現在MO360には現場作業員が多言語で保守・製造ノウハウを照会できるチャットボット群、「MO360LLM Suite」、および生産データの異常検知と品質改善案を即時提示する仮想マルチエージェントAIが組み込まれている。メルセデス・ベンツはケチケメート工場においてグループ初となる「工場全体の完全デジタルツイン（Full Factory Digital Twin）」をNVIDIA Omniverse上に構築し、ラシュタット工場や北京工場を含む世界30以上の工場ネットワークへ同期展開を進めている。物理的に正確な仮想工場内で組立ラインの再設計や物流供給ルート（Supply routes）のシミュレーションを行うことで、メルセデス・ベンツは実稼働ラインを一切止めることなく検証を完了し、組立ホールの改修・立ち上げ速度を**2**倍に高め、サプライヤとの調整工数を**50%**削減する成果を上げている。

5.2 狭小通路の仮想通過性検証・Sim-to-Real学習・実機テレオペレーションの閉ループ

このMO360×Omniverseデジタルツイン環境と、Apptronikが連携するNVIDIAのヒューマノイド開発基盤（Project GR00T、Isaac Lab、計算オーケストレーション基盤OSMO）およびGoogle DeepMindの「Gemini Robotics」基盤モデル を組み合わせることで、実機投入前から実ライン自律化に至る4段階の検証・学習プロセスが構築されている。

1. **OpenUSD**工場デジタルツイン上での動線・死角・安全ゾーン事前検証：実工場建屋の3Dスキャン形状と治具レイアウトを再現したOmniverse仮想空間上で、スーパーマーケット棚からラインサイドに至る物流供給ルートをシミュレーションする。幅80〜100cmの狭小通路における25kgコンテナ把持姿勢での肘・荷物の干渉有無、柱陰や棚角の視覚的死角リスク、ならびに異常時の転倒影響ゾーンと有人動線のクリアランスを物理実装前に仮想検証し、変更管理コストと手戻りを最小化する。
2. **NVIDIA Isaac Lab**および**OSMO**による大規模並列ポリシー学習：ApptronikはNVIDIAの「Isaac Lab」およびワークフロー管理基盤「OSMO」を活用し、床面の凹凸、摩擦係数のばらつき、外乱パルス、ペイロード変化をランダム化した仮想環境で全身ロコモーションおよび協調操作ポリシーを訓練する。さらに汎用基盤モデル「Project GR00T」等を通じて、映像や実演プロンプトから周囲環境を認識して次の行動を予測する汎用スキルを獲得させる。
3. ベルリン*MBDFC*でのテレオペレーション・*AR*・データグローブによる熟練技能移転：仮想検証を経てベルリンMBDFC等の実生産環境へ配置されたApolloは、メルセデス・ベンツの熟練製造スタッフによるテレオペレーション（遠隔操作）、拡張現実（**AR**）、および**MANUS**製データグローブ（手指の精密な動きを計測するモーションキャプチャ）を通じた直接実演によって、MO360内の特定生産ユースケースに合致した現場データを収集する。これにより、仮想空間だけでは再現が難しい実工場特有の接触力学や部品受け渡しのタイミングが教師データとして蓄積される。
4. 短期ポストトレーニングによる**Sim-to-Real**ギャップ解消と**MES**連動展開：収集された実ラインデータを用いた数週間のポストトレーニングにより、従来ロボティクスの課題であった「ラボから実工場への性能低下（Lab-to-factory drop-off）」が抑え込まれる。ケチケメート工場およびジンデルフィンゲン工場の実稼働ラインで実施されたApollo 2（22自由度SharpaWaveハンド搭載）の実証では、進捗管理を担う「Gemini Robotics ER」と手腕制御を担う「Gemini Robotics 2.5」の分業により、バルク箱からの金属製ブラケット部品の自律ピッキングと車両順序トレイへの整列配置において**96%**の成功率が報告されている。実運用時にはMO360 / MESから直接作業指示を受信して自律走行し、外観・締結の初期品質チェック結果を品質管理システムへフィードバックするとともに、Apptronikの「Fleet Connect」層を通じてフリート全体の稼働状態とデータ収集が一元管理される。

以上の通り、築100年超のベルリン工場をはじめとするBrownfield環境でのApolloの実装は、単に車輪を二足に置き換えた機械的試みではない。直動フォース制御アクチュエータとIHWBC/MPCによる重荷重・低摩擦路面への動的適応、GPUメモリ常駐型3Dマッピングによる1〜2cm精度のリアルタイム空間認識、ISO 10218:2025と策定中ISO 25785-1を架橋する多層SSMおよび立位保持フェイルセーフ、そしてMO360×Omniverseによる仮想事前検証と現場テレオペレーション学習の統合であり、我が国の自動車生産技術・ロボット制御・3Dセンシング・労働安全の各分野が既存工場の自律化を推進する上での体系的な設計指針を示している。

参照文献・一次情報リスト（巻末出典）

1. Mercedes-Benz Group Official (英語公式発表): "Digital Factory Campus Berlin: AI and humanoid robots" https://group.mercedes-benz.com/company/production/production-network/mbdfc-humanoid-robots.html
2. Mercedes-Benz Group Official (独語一次発表): "Digital Factory Campus Berlin: Künstliche Intelligenz und humanoide Roboter in der Produktion" https://group.mercedes-benz.com/unternehmen/produktion/produktionsnetzwerk/mbdfc-humanoide-roboter.html
3. Mercedes-Benz Media Release (2025年3月18日公式リリース): "Mercedes-Benz accelerates the transformation of its production network by Integrating AI and humanoid robots at its Digital Factory Campus in Berlin"

https://media.mbusa.com/download-media/13892
4. Mercedes-Benz Group Official: "Mercedes-Benz Plant Berlin (Founded in 1902)" https://group.mercedes-benz.com/company/production/production-network/production-network-berlin.html
5. Mercedes-Benz Group Official: "Expansion Plant Kecskemét / Digital Factory Twin" https://group.mercedes-benz.com/company/production/production-network/extendition-plant-kecskemet.html
6. NVIDIA Official Blog: "Mercedes-Benz Shifts EV Production Into High Gear With NVIDIA Omniverse and Generative AI" https://blogs.nvidia.com/blog/mercedes-benz-ev-nvidia-omniverse-generative-ai/
7. Apptronik Official Product Architecture: "Apptronik Apollo 2 / Artemis / Fleet Connect" https://apptronik.com/apollo/apollo-2
8. Apptronik Official Press Release: "Apptronik Unveils Apollo" https://apptronik.com/news-collection/apptronik-unveils-apollo
9. Apptronik Official Feature: "Meet Apollo, the iPhone of Humanoid Robots" https://apptronik.com/news-collection/meet-apollo-the-iphone-of-humanoid-robots
10. Apptronik Official Feature: "This is Apptronik's humanoid robot, Apollo" https://apptronik.com/news-collection/this-is-apptroniks-humanoid-robot-apollo
11. Apptronik Official Press Release: "Apptronik and Mercedes-Benz Enter Commercial Agreement" https://apptronik.com/news-collection/apptronik-and-mercedes-benz-enter-commercial-agreement
12. Apptronik Official Press Release: "Apptronik Collaborates with NVIDIA" https://apptronik.com/news-collection/apptronik-collaborates-with-nvidia
13. Unite.AI (Apollo 2 & Google DeepMind Gemini Robotics 2.5 実証報告): "Apollo 2 Humanoids Hit 96% in Mercedes-Benz Sorting Proof-of-Concept" https://www.unite.ai/apollo-2-humanoids-hit-96-in-mercedes-benz-sorting-proof-of-concept/
14. iFactory Case Study (サードパーティ統合構成報告): "Apollo at Mercedes-Benz: Multi-plant pilot & MO360 Integration" https://ifactoryapp.com/industries/automotive-manufacturing/apollo-mercedes-apptronik-humanoid-automotive
15. Seung Hyeon Bang, Carlos Gonzalez, Junhyeok Ahn, Nicholas Paine, Luis Sentis: "Control and evaluation of a humanoid robot with rolling contact joints on its lower body (DRACO 3 / IHWBC)", Frontiers in Robotics and AI, 2023 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10613887/
16. Junhyeok Ahn, Steven Jens Jorgensen, Seung Hyeon Bang, Luis Sentis: "Versatile Locomotion Planning and Control for Humanoid Robots (PnC / IHWBC / Centroidal Inertia Network)", Frontiers in Robotics and AI, 2021 https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2021.712239/full
17. Jaemin Lee, Junhyeok Ahn, Donghyun Kim, Seung Hyeon Bang, Luis Sentis: "Online Gain Adaptation of Whole-Body Control for Legged Robots with Unknown Disturbances", Frontiers in Robotics and AI, 2021/2022 https://junhyeokahn.github.io/data/lee2021_gain_adaptation.pdf
18. Luis Sentis, Nicholas Paine: "Prismatic Series Elastic Actuator / Liquid Cooling Jacket", US Patent Application US20170341227A1 https://patents.google.com/patent/US20170341227A1/en
19. Joint Footstep and Contact-Force iLQR-MPC & Floating-Base WBC Formulation: arXiv:2611.04204v1 https://arxiv.org/html/2611.04204v1
20. Whole-Body Torque-Level MPC for Legged Loco-Manipulation: arXiv:2511.19709v1 https://arxiv.org/html/2511.19709v1
21. Online Inertial Parameter EKF Estimation & Whole-Body MPC under Unknown Payloads: arXiv:2610.22176v1 https://arxiv.org/html/2610.22176v1
22. Michele Focchi et al.: "Slip Detection and Recovery for Quadruped/Legged Robots

(QP Friction Cone Modulation)", ISRR https://iit-dlslab.github.io/papers/focchi15isrr.pdf
23. Slip Detection in Base Frame for Torque-Controlled Legged Robots: Sensors 2022, 22(8), 2967 https://www.mdpi.com/1424-8220/22/8/2967
24. Alexander Millane et al. (NVIDIA): "nvblox: GPU-Accelerated Incremental Signed Distance Field Mapping", arXiv:2311.00626v2 https://arxiv.org/html/2311.00626v2
25. NVIDIA Isaac ROS Documentation: "Isaac Mapping ROS (cuVSLAM & Nvblox Occupancy Map Creation)" https://nvidia-isaac-ros.github.io/v/release-4.0/repositories_and_packages/isaac_ros_mapping_and_localization/isaac_mapping_ros/tutorial_map_creation.html
26. AGVHub & CoGri (DIN 18202 床面平坦度・目地要件): "Floor Requirements for AGVs" https://agvhub.com/en/knowledge/floor-requirements/ および "DIN 18202 Flatness Tolerances" https://cogricanada.com/din-18202/
27. Synapticon (ISO/TC 299/WG 12 参加企業解説): "ISO 25785-1 Safety of Dynamically Stable Robots" https://www.synapticon.com/en/newslist/iso-25785-sicherheit-dynamisch-stabile-roboter
28. i-SCOOP Regulatory Analysis: "ISO 25785-1 explained and what it means for humanoid robot safety" https://www.i-scoop.eu/iso-25785-1-explained-and-what-it-means-for-humanoid-robot-safety/
29. ISO 10218:2025 & ISO/TS 15066 Speed and Separation Monitoring: ISO/TS 15066:2016 Specification https://cdn.standards.iteh.ai/samples/62996/37daa360128440ccbc94e9782c9e1748/ISO-TS-15066-2016.pdf および "ISO 10218:2025 Explained" https://theresarobotforthat.com/blog/iso-10218-2025-explained/

資料8 第2部3：メルセデス・ベンツ工場における部品キッティング・通い箱搬送工程の実務フローと「二足歩行 vs 車輪型AMR」徹底比較

メルセデス・ベンツがドイツのベルリン・マリエンフェルデ工場（Digital Factory Campus：MBDFC）、ジンデルフィンゲン工場、およびハンガリーのケチケメート工場で実証を進める米国Apptronik製ヒューマノイド「Apollo」および次世代機「Apollo 2」の導入目的は、既存の車輪型AMR（自律走行搬送ロボット）やAGVの代替ではない。**SAFELOG製の車輪型モバイルロボットが全世界の生産拠点ですでに3,000台以上稼働し水平幹線搬送を担うなか、最後まで自動化から取り残された「多段傾斜棚からの通い箱引き抜き」「バルク箱からの個別金属部品の順序仕分け（JISキッティング）」「狭小組立セル内の手元（Point of Fit）への配膳」というラスト数メートルの手作業領域を、既存の人間用設備（ブラウンフィールド）を無改修のまま補完することにその本質がある。**物理仕様と設備投資評価（ROI）の両面から導かれる結論は明確である。欧州自動車標準のVDA 4500規格（KLT樹脂製通い箱：最大600×400 mm、実運用上限15～25 kg）を扱う場合、既存の重量級車輪モバイルマニピュレータ（Magazino SOTO等：自重約741 kg、最小旋回円3,100～3,500 mm）は人間用の狭小通路（幅800～1,000 mm）に進入できず、車輪型7軸協働機（KUKA KMR iiwa）はアーム可搬重量が7～14 kgに制限される。一方、トヨタ自動車「ELEY（エリー）」（自重約50 kg、車輪昇降式）は平坦床での小物部品（片腕1 kg級報道）のハンドリングで高い電力効率と本質安全性を発揮するが、15～25 kgの通い箱を棚奥から引き抜く際には接地ポリゴン外への転倒モーメントが制約となる。**したがって「狭小通路×15～25 kg中重量ワーク×不整床・段差」が重なる領域において、自重約73 kg・可搬25 kgの二足歩行機Apolloの工学的合理性が成立する。**ただし、現時点でのメルセデス・ベンツにおける実機配備は10台未満のパイロット・データ収集および概念実証（PoC）段階にあり、量産ラインでの本格展開には2026年11月時点でGoogle DeepMindと達成した部品仕分け成功率96%からのさらなる信頼性向上、遠隔監視オーバーヘッドの低減、および機体価格の5万米ドル未満（Apollo 3目標）への低減が必須条件となる。

エグゼクティブ・サマリー

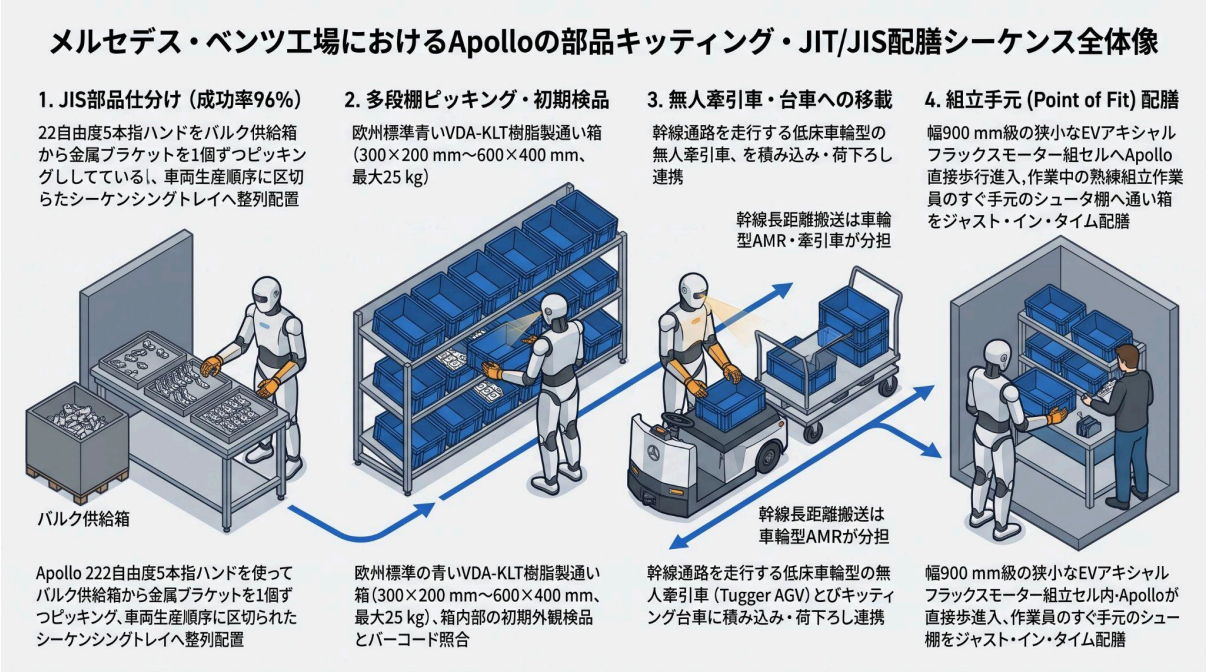
本報告書は、完成車メーカーの生産技術・物流企画部門、ロボット・FA開発陣、標準部品・治具プラットフォーム経営層、および労働安全研究機関に向け、メルセデス・ベンツ工場におけるApolloの部品キッティング・通い箱搬送実務と「二足歩行 vs 車輪型AMR」の境界条件を5つの技術・経営領域から解剖したものである。主要な調査結果は以下の4点に集約される。

1. 物理空間と反力安定性の境界条件：メルセデス・ベンツは工場内の長距離・大量水平搬送にSAFELOG製AGV／AMRを3,000台規模で運用しており、Apolloは無人牽引車（Tugger train）への積み下ろしや多段棚ピッキング、組立セル手元配膳を担当する。自重50 kg級の軽量車輪型協働機（トヨタELEY）と比較した場合、対象ワーク重量が約10～12 kgを超えて15～25 kg（大型VDA-KLT満載相当）に達する領域、床面に10 mm超の段差・レール溝・1度超のスロープが存在するブラウンフィールド領域、およびバラ積み複雑金属部品を22自由度5本指ハンドで治具レス把持する領域において、前後開脚スタンスで動的カウンターウェイトを形成できる二足歩行機の合理性が逆転する。
2. 双腕協調制御と治具レス化のトレードオフ：ApolloおよびApollo 2はNASA「Valkyrie」の系譜を継ぐ内製線形電動アクチュエータ（Apollo 2でエネルギー効率90%超）と全身統合制御「Apptronik Artemis」を備え、傾斜棚からの通い箱引き抜き時の噛み込み回避と胴体近接抱え込みを可能にする。一方、個別部品キッティングではMANUS製の電磁界方式データグローブを用いた熟練工の動作転写と、Google DeepMindの「Gemini Robotics ER / 2.5」および22自由度5本指ハンド「SharpaWave」により治具レス仕分け（PoC成功率96%）を実現した。ただし多指ハンドは摩耗・保守リスクを抱えるため、定型KLT搬送用の堅牢な簡易グリッパーとの使い分け、ならびに視覚認識・把持率を99.9%へ引き上げる「ロボ

ティクス親和型ダンネージ（仕切りトレイ）」の標準化が治具・部品メーカーの新たな商機となる。

3. 投資対効果（**ROI**）の地域差と真の導入動機：2026〜2027年の初期商用価格帯（機体CapEx約14万ユーロまたはRaaS年額約7.5万ユーロ想定）に基づく工学的試算では、人件費と筋骨格系疾患（MSD）欠勤損失が大きいドイツ拠点（ベルリン・ジンデルフィンゲン）では2直稼働で14.3ヶ月、3直稼働で9.3ヶ月でCapEx回収圏に入る。対照的に人件費の低いハンガリー拠点（ケチケメート）では初期RaaS収支は赤字（2直で年▲27,740ユーロ）となるが、慢性的な労働力不足による「完成車ライン停止リスクの回避」が先行投入を正当化しており、商用量産機（Apollo 3：目標価格5万米ドル未満／約4.8万ユーロ）の実現時に東欧拠点でも単体黒字化（3直回収9.6ヶ月）へ転換する。
4. 欧州労働安全（**EU**機械規則・**DGUV**）と労使協議会（**Betriebsrat**）の突破要件：電源喪失時に転倒リスクを伴う動的安定ロボットに対し、2027年1月20日全面適用のEU機械規則（EU）2023/1230および策定中のISO 25785-1は、AI推論層（非安全系）と決定論的な2段階安全ゾーン・制御しゃがみ込み停止（安全系）の分離を要求する。さらにドイツ事業所組織法第87条1項6号に基づく労使協議会の共同決定権を突破するには、雇用保障協定（Zukunftssicherung 2030）を前提に、機体カメラ映像を作業員の能率・行動監視に転用しない事業所協定と「高負荷・人手不足工程への限定投入」の合意が不可欠である。

第1章：部品キッティング・通い箱（Tote）搬送工程の具体的ワーク仕様と全作業シーケンス

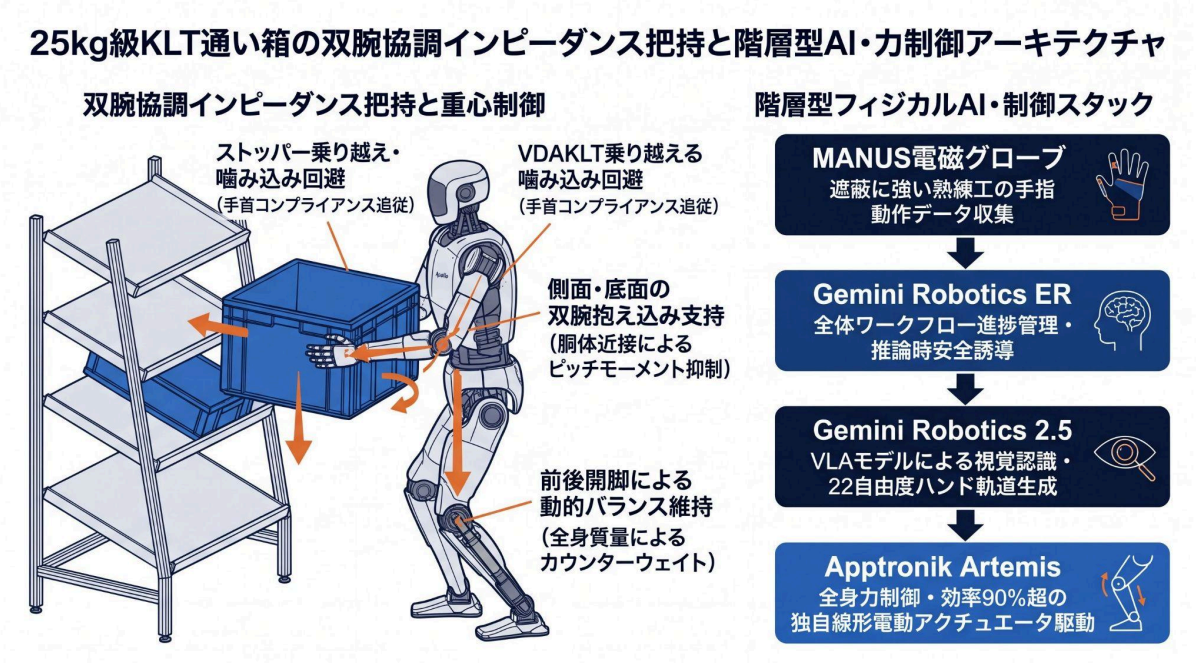


1.1 導入拠点の生産特性：ベルリン・マリエンフェルデ工場とケチケメート／ジンデルフィンゲン工場

メルセデス・ベンツにおけるApolloの実証プログラムは、2024年3月の商用パイロット契約締結、および2025年3月のメルセデス・ベンツによるApptronikへの1,000万ユーロ台（low double-digit million-euro）の出資を経て、生産特性の異なる2種類の工場群で推進されている。
第一の拠点は、同社の生産DX中核拠点であるベルリン・マリエンフェルデ工場（Mercedes-Benz Digital Factory Campus：MBDFC）である。長年にわたり内燃機関パワートレインを製造してきた同工場は、電動化移行に伴いデジタル生産基盤「**MO360**」の実証実験場、ならびに次世代高性能**EV**向けアキシャルフラックスモーター（軸方向磁束型モーター）の製造コンピテンスセンターへ

と転換された。メルセデス・ベンツ公式発表によれば、アキシャルフラックスモーターの製造は約100工程から成り、そのうち約65工程が同社にとって新規プロセス、さらに35工程はレーザー技術と接合プロセス・AIを融合した世界初の新規プロセス（30件超の特許出願を伴う）である。このように工程レイアウトの変化が速く、既存の建屋柱や狭小通路が残るブラウンフィールド環境では、固定コンベヤや大規模自動倉庫の設置が投資効率に見合わない。そのため、人間作業員向けに設計された既存の棚・通路を無改修で移動できるApollo（初代公表仕様で身長173 cm、自重72.6〜73 kg、可搬重量25 kg）が、部品・モジュールのラインサイド搬送と初期品質チェックに投入された。
第二の拠点群は、量産完成車組立を担うハンガリー・ケチケメート工場およびドイツ・ジンデルフィンゲン工場である。特にケチケメート工場は電動Cクラス等の投入により将来的に2024年比最大4倍（年間最大40万台規模）への生産能力拡張が見込まれる一方、数年にわたり深刻な現地労働力不足に直面してきた。このケチケメート工場およびSクラス・EQSを生産するジンデルフィンゲン工場では、2026年11月に公表されたGoogle DeepMind・Apptronikとの共同概念実証（PoC）として、次世代機「Apollo 2」が実稼働生産ライン（Active production lines）に投入され、車両ごとの要求順序（JIS：Just-In-Sequence）に沿った自動車用金属ブラケットの自律仕分け（キッティング）を遂行した。

1.2 対象ワークの物理仕様：VDA 4500規格KLT通い箱と個別金属部品キット



公開事実の範囲を明確にすると、メルセデス・ベンツおよびApptronikは個別部品の図面番号や容器型番までは公表しておらず、公式資料では「キッティング済み部品の通い箱（Totes of kitted parts）」「バルク供給ビン（Bulk supply bins）」「順序生産用コンテナ／トレイ（Sequencing containers/trays）」「自動車用金属ブラケット（Metal automotive brackets）」と表現している。もっとも、ドイツ自動車工業会（VDA）中核メンバーであるメルセデス・ベンツの欧州工場内物流および同工場で稼働する搬送機器では、小口部品用リターナブル通い箱としてVDA勧告4500／4504規格（KLT：Kleinladungsträger）の射出成形ポリプロピレン製コンテナが標準規格として運用されている。ApptronikがApolloの設計当初からケース・トート搬送を第一標的に据え、最大可搬重量を25 kg（55ポンド）に設定した背景は、この欧州VDA-KLTおよび北米標準トートの実運用最大重量と整合している。
対象ワークの物理仕様・寸法・重量レンジおよび把持形状の整理を以下の表に示す。

容器・ワーク区分	代表型式・対象部品	外形寸法（長さ×幅×高さ）	自重・実運用総重量レンジ	把持特徴と対象工程
小型VDA-KLT通い箱	RL-KLT 3147 / R-KLT 3214（締結部品・小型センサ類）	300×200×147 mm（内容積約5.3 L）	容器自重約0.6 kg・総重量2〜8 kg	短側面アンダーカット取っ手と外周フランジを備え多段棚ピッキングに適用
中型VDA-KLT通い箱	RL-KLT 4147 / 4280 / R-KLT 4314（中型機械部品・補機）	400×300×147〜280 mm（内容積8.7〜24.1 L）	容器自重1.1〜1.7 kg・総重量5〜15 kg	自動機用縦溝と短側面グリップ穴を備えスーパーマーケット出庫に多用
大型VDA-KLT通い箱	RL-KLT 6147 / 6280 / R-KLT 6410（サブアセンブリ・重量キット）	600×400×147〜280 mm（内容積25.4〜52.0 L）	容器自重1.8〜2.7 kg・総重量12〜25 kg	1200×800 mmユーロパレットに平面4箱モジュール積載・双腕抱え込み対象
JIS順序配膳トレイ	車種別仕切り（ダンネージ）内蔵シーケンシングトレイ	400×300 mmまたは600×400 mmモジュール準拠	実運用総重量3〜18 kg（部品点数により変動）	内部が車両順序スロットに区画され欠品・順序ズレの視覚検品対象
個別バラ積み金属部品	車体・補機固定用金属ブラケット類（複雑形状プレス・鋳造品）	約50〜250 mm角（非定型・金属光沢面）	単体重量0.1〜3.0 kg（推定レンジ）	バルク箱内にランダム堆積し5本指ハンドによる直接把持・姿勢補正が必要

VDA-KLTコンテナの機械的特徴として、底面補強リブ付きのR-KLTおよび平滑剛性底面を持つRL-KLTはいずれも上縁全周にスタッキング兼引き抜き用の剛性フランジを備え、両短側面（200 mm、300 mm、400 mm幅側）には指先やフックを掛けるアンダーカット形状の取っ手、長・短側面には自動グリッパー差し込み用の垂直スロットおよびバーコード／RFIDラベル枠が一体成形されている。容器自体の構造耐荷重は4000シリーズ等で最大50 kgに達するが、既存のKLT自動搬送ロボット（Magazino SOTO等）は1箱あたり上限20 kg（重心偏心最大3分の2まで）を制約としており、モーター構成部品等の高密度金属キットでは20〜25 kgに達するケースがある。物流特化型のAgility Robotics「Digit」（初期商用モデル可搬15.9 kg／35ポンド、2026年9月発表のDigit 5で22.7 kg／50ポンド）に対し、Apolloが25 kg（55ポンド）の可搬能力を持つ点は大型KLT運用における明確な余裕度となっている。

1.3 保管ラックから**Point of Fit**（組立手元）に至る全作業シーケンスとサイクルタイム分析

メルセデス・ベンツ工場におけるApolloの作業実務は、「ループA：バルク供給箱からの個別部品JIS順序キッティング（ケチケメート／ジンデルフィンゲン実証型）」と、「ループB：多段保管棚からのKLT通い箱ピッキング・初期検品・無人牽引車連携・組立手元（Point of Fit）へのJIT配膳（ベルリンMBDFC／イントラロジスティクス型）」の2つの連続した工程ループで構成される。一連の実行手順をステップ別に分解すると以下の通りである。

1. **JIS**順序指示の受信とワークフロー進捗追跡（ループ**A**開始）：上位システムから各車両の組立順序に対応した部品仕分け指示を受信する。ケチケメートおよびジンデルフィンゲン工場のPoCでは、基盤モデル「Gemini Robotics ER」が工程全体の進行状況を常時トラッキングし、次に処理すべきステップと配置順序を管理する。
2. バルクビンからの金属ブラケット個別把持とギャップ補正：視覚・言語・行動（VLA）モデル「Gemini Robotics 2.5」がApollo 2の両腕と22自由度5本指ハンド「SharpaWave」を制御し、バルク供給ビンから自動車用金属ブラケットをピッキングして車両順序通りのシーケンシングコンテナ（仕切りトレイ）へ格納する。トレイ内に配置漏れ（ギャップ）がある場合は視覚的に検知して即座に欠落を埋める補正動作を行い、実稼働ラインでのPoCにおいて96%の成功率を記録した。
3. 多段保管ラックからの**KLT**通い箱引き抜きとインライン初期検品（ループ**B**開始）：ベルリン工場等のスーパーマーケットエリアでは、Apolloが人間用多段棚の前へ歩行接近し、キッ

ティング済み部品の入った通い箱を両腕で棚から引き抜く。この受け渡しタッチポイントにおいて、頭部カメラのマシンビジョンを用いた受け入れ部品・サブアセンブリの初期外観品質チェック（Initial quality checks）をインライン実行し、固定検査セルへ迂回させることなくマテリアルフローを維持する。

4. 無人牽引車（**Tugger AGV**）・パレット・コンベヤへの移載連携：建屋内を長距離横断する場合は、引き抜いた通い箱をパレットへ積み付けるか、工場内を自動巡回する無人牽引車（Self-driving tugger trains）やキッティング台車、コンベヤベルトへの積み込み・荷下ろしを実行する。
5. 組立ワークステーション手元（**Point of Fit**）への**JIT**直接配膳：スーパーマーケットと組立セルが近接するエリアでは、従来人間作業員が1シフトあたり数マイル（数km）を歩いて運んでいた作業を代替し、Apolloが通い箱を保持して狭小通路を歩行し、熟練作業員がアセンブリを行う瞬間に合わせてラインサイドの手元へ直接供給する。

ここで公開事実と工学的推計を厳密に区別する必要がある。独立系稼働検証機関（HumanoidUptime、Physical AI Journal、Evlo）および専門メディア（Unite.AI）が確認している通り、メルセデス・ベンツおよび**Apptronik**は実工場における**Apollo**の**1**箱あたり搬送サイクルタイム、時間あたり処理箱数、および無人自律稼働時間比率を公表していない。公表されている速度関連の一次指標は、Gemini Robotics 2.5が200種超の評価タスク全般で従来ベースライン比**20〜30%**高速化したこと（ならびに別個のシミュレーション実験で完了時間が35秒から24秒へ短縮されたこと）、および競合のBMWスパータンバーグ工場におけるFigure 03パイロットが**84**秒のサイクルタイム目標を満たした点である。

これらの公開諸元とロボット仕様データベースに記載されたApolloの歩行速度（最大1.2〜1.5 m/s、別資料で3.4 km/h［約0.94 m/s］、対人協働時の安全実効歩行速度0.8〜1.0 m/s想定）から生産技術上の工学的サイクルタイム推計を行うと、定置での金属ブラケットJIS仕分けは1ピック＆プレースあたり約12〜20秒（4〜6点キット1トレイの組成で約60〜100秒）、また保管棚から半径10 m圏内の組立セルへのKLT直接配膳では「棚前位置決め・引き抜き（8〜12秒）＋インライン視覚検品・コード読取（3〜5秒）＋10 m往路歩行（10〜13秒）＋シューター移載（6〜10秒）＋10 m復路歩行（10〜12秒）」の合計で**1**サイクル約**40**〜**55**秒と試算される。これは完成車組立の一般的なタクトタイム（60〜90秒）に単機で追従可能な水準である一方、搬送距離が片道50 mを超えると歩行時間だけで往復100秒を超過するため、長距離区間を車輪型AMR／無人牽引車へ委ねる機能分担が不可欠となる。

第**2**章：通い箱・部品把持における双腕協調制御とエンドエフェクタ（グリッパー／ハンド）の使い分け

2.1 線形電動アクチュエータと双腕協調インピーダンス制御・噛み込み回避ロジック

最大25 kgのVDA-KLT通い箱を多段傾斜棚から安定して引き抜き、二足歩行のまま移載するには、従来の高剛性位置制御型産業用ロボットとは根本的に異なるアクチュエータ設計と全身力制御（Force Control）が必要となる。

Apptronikの駆動系技術は、2011年にテキサス大学オースティン校（Human Centered Robotics Lab）の創業者陣がNASAジョンソン宇宙センターと共同開発したヒューマノイド「Valkyrie」およびNASAとのSBIR契約による液冷アクチュエータ・準ダイレクトドライブ（QDA）研究を直接の源流とする。Apollo（全身36〜44自由度クラス）およびApollo 2（身長約182 cmへの大型化と駆動・センサ刷新が報じられる第2世代機）は、従来の産業用多関節機が多用する高減速比ギヤ＋機械式保持ブレーキではなく、13世代以上にわたり改良された特許取得済みの内製線形電動アクチュエータ（**Linear Electric Actuators**）を採用している。この独自アクチュエータは従来比で約**3**分の**1**の部品点数・組立時間と**90%**以上のエネルギー効率を達成しており、各関節の力・トルクセンサおよびIMUのフィードバックを統合制御システム「**Apptronik Artemis**」で処理することで、全身協調動作と柔軟な力制御を実現している。

公表されているApolloの力制御アーキテクチャおよびVDA-KLT用重力式フローラックの構造条件から、最大25 kgの通い箱引き抜き・抱え込みにおける双腕協調制御メカニズムを分析すると、以下の3段階の制御ロジックが機能していると解釈できる（内部インピーダンスゲイン値等は社外

非公開のため、力制御工学に基づく機構分析として記述する）。
第一段階はストッパー乗り越えとガイドレール噛み込み（引っ掛かり）回避である。前傾角3〜5度で設置されるフローラックの前端には箱の滑落を止める高さ15〜25 mmの金属製ストッパーリップがあり、左右には仕切りガイドレールが近接している。完全な位置制御で直線的に引き抜くと、棚のわずかなたわみや箱の傾きで側面がガイドレールと競り合い、過負荷による噛み込み停止が発生する。双腕協調インピーダンス制御では、両腕でKLT前縁フランジまたは取っ手を把持して鉛直上向きにリップ高さを超える持ち上げ力を発生させつつ、左右水平方向およびヨー回転方向の仮想剛性を低く設定することで、手首・腕部がガイドレールからの横反力に受動追従（コンプライアンス動作）し、引っ掛かりを自己解消しながら引き抜く。
第二段階は荷重偏心への追従と胴体近接抱え込み（**Cradling**）への遷移である。奥行600 mmの大型KLTが棚端からせり出すと最大25 kgのオーバーハング荷重が発生し、さらに箱内の金属部品が片側へ偏在している場合（VDA自動搬送要件でも最大3分の2までの重心偏心が想定される）、左右の腕に非対称なロールモーメントが作用する。左右腕の関節トルクセンサ差分から偏心量をリアルタイムに補償して支持推力を非対称配分すると同時に、引き抜き直後に「取っ手引っ張り」から「両側面挟み込み＋前腕・手掌による底面エッジ支持」へと持ち替え、通い箱を胸部正面へ密着させる。これにより肩関節へのピッチモーメントアームを最小化し、同時に片足を後方へ引く前後開脚スタンスで全身の合成重心を足裏の支持多角形内に収める。
第三段階は接触反力検知によるソフトランディング移載である。無人牽引車の荷台や組立セル脇のシューターローラーへ通い箱を置く際、箱底面の接地に伴う鉛直上向き反力の立ち上がりを腕部トルク制御系で検知してから把持内力を段階的に解放することで、落下衝撃によるキッティング済み部品の飛び出しや順序崩れを防止する。

2.2 タスクに応じたエンドエフェクタのモジュール選択と治具レス化のトレードオフ

Apolloは用途に応じて手首先端のエンドエフェクタを交換可能なモジュラー構造を備えている。メルセデス・ベンツ各拠点およびApptronikの公開記録を照合すると、単一のハンドで全工程を賄っているのではなく、対象ワークの物理特性に応じて以下の3種類のエンドエフェクタが段階的・用途別に適用されていることが確認できる。

エンドエフェクタ構成	自由度・駆動構造	確認された実装拠点・時期	主対象ワークと最大負荷	治具レス柔軟性と保守性の評価
2指平行グリッパー／トート把持パッド	1〜2自由度（高剛性リンク・面接触パッド）	初期ケース・トート搬送構成および競合比較構成	定型VDA-KLT通い箱・段ボール箱（双腕最大25 kg）	構造堅牢性と耐荷重は最高だが異形バラ部品の直接ピッキングは困難
PSYONIC Ability Hand（義手由来5本指ハンド）	多自由度5本指（柔軟フィンガー・耐衝撃設計）	ベルリン工場フロア実証（2026年2月公開事例）	複数形状部品の把持教示・軽中量キッティング作業	MANUSグローブとリアルタイム同期し人間用工具や多様な部品へ適応
SharpaWave Hand（高自由度5本指器用ハンド）	22自由度・5本指独立関節制御	ケチケメート・ジンデルフィンゲン工場PoC（2026年11月）	バルク箱内の異形金属ブラケット把持・JISトレイ整列	完全治具レスで複雑姿勢補正を実現するが機構複雑性と摩耗管理が課題

生産技術および標準部品・治具プラットフォームの視点から極めて重要なのが、「**5**本指多自由度ハンドによる治具レス化」と「量産稼働率（**OEE**）・耐荷重・保守コスト」のトレードオフである。ケチケメートおよびジンデルフィンゲン工場のJISキッティングPoCで採用された22自由度5本指ハンド「SharpaWave」は、従来であれば部品品番ごとに専用の整列パーツフィーダや空圧チャック爪、位置決め治具を設計製作しなければ自動化できなかった「バルク供給箱内の不定形金属ブラケットのピッキングとトレイ整列」を、ハンド単体の器用さとVLAモデルの視覚補正のみで完結させた。多品種混流ラインにおいて、設計変更や車種追加のたびに発生する治具新造リードタイムと段取り替えコストを排除できるメリットは大きい。
しかしその反面、ロボット信頼性工学の観点からは、狭小な手掌・指内に20個以上の小型アクチュエータと伝達機構を詰め込んだ5本指ハンドは、長時間の反復ライン作業において摩耗や故障が最も発生しやすい部位である。トヨタ自動車が「ELEY」において複雑な5本指ハンドをあえて

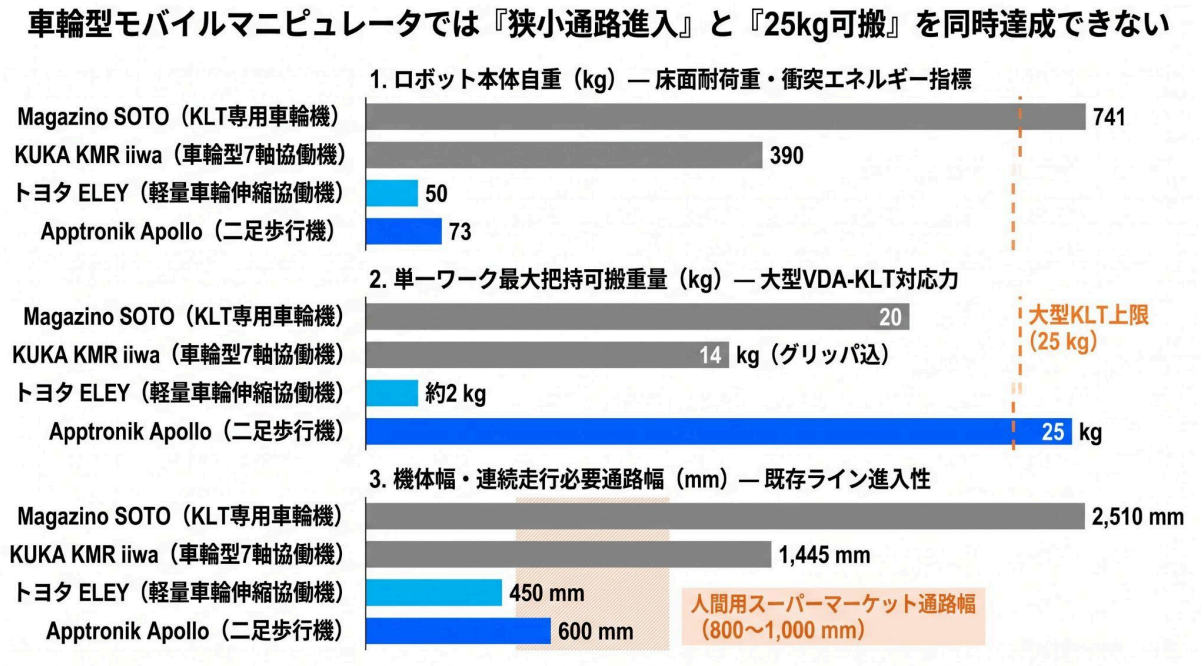
不採用とし、堅牢な「汎用2本指ハンド」に割り切ったのは、量産現場における稼働率維持と運用コスト最小化を優先したためである。また、25 kgの大型KLT通い箱を薄い樹脂フランジに指先だけを掛けて繰り返し持ち上げれば、多自由度ハンドの関節寿命を著しく縮める。したがって実運用では、(1)バラ部品のJISソーティング工程には22自由度5本指ハンド搭載機を配置し、(2)重量KLTの反復ピッキング・牽引車積み替え工程には高剛性な簡易グリッパー／フックアタッチメント搭載機を割り当てる(または手掌・前腕の面支持で荷重を受ける)機能分業、さらには(3)標準部品・治具メーカーによる「ロボットの5本指・2本指双方がアクセスしやすく視覚認識コントラストの高い標準仕切りダンネージ／KLTアタッチメント」の供給が、成功率96%から量産水準の99.9%超へ到達する鍵を握る。

2.3 現場熟練作業員によるテレオペレーション・AR・模倣学習からの自律化移行フロー

メルセデス・ベンツの工場フロアにおけるApolloの動作獲得は、専門エンジニアによるロボット言語コーディングではなく、現場の製造ノウハウを熟知したメルセデス・ベンツ従業員自身がテレオペレーション(遠隔操作)と拡張現実(AR：Augmented Reality)を通じて直接動作を教え込む「模倣学習(Imitation Learning)」のワークフローで構築されている。具体的な4段階の移行プロセスは以下の通りである。

1. **MANUS**電磁界方式データグローブによる高忠実度キネマティクス計測：2026年2月公開のベルリン工場導入事例によれば、教示オペレーターはMANUS製のデータグローブを装着し、Apolloに搭載された5本指ハンド(PSYONIC Ability Hand等)をリアルタイムで遠隔制御して目標作業を実演する。MANUSグローブは電磁界方式(Electromagnetic field-based sensing)を採用しているため、光学式カメラのような通い箱壁面・金属棚による死角(オクルージョン)欠損やIMU方式のようなドリフト誤差を生じず、複雑な産業環境下でも手指の全関節運動を一貫した高精度で記録できる。
2. 「**Robot Park**」と実工場**MO360**環境での同期データロギング：Apptronikはテキサス州オースティンに約9万平方フィート(約8,360 m²)の専用訓練施設「Robot Park」を開設して週7日体制で箱積みや仕分けの遠隔操作データを収集する「データ工場」を運営すると同時に、顧客拠点にも同様の環境を展開している。ベルリン工場では、オペレーターの遠隔操作ストリームが「工場フロアでの即時タスク遂行」と「MO360生産環境下での同期学習データセット生成」を同時に達成する二重構造となっている。
3. **3**段階の運用ステージ移行：蓄積された高品質な運動データを用いて模倣学習ポリシーを訓練することで、Apolloは(第1段階)完全遠隔操作(Full Teleoperation)から、(第2段階)人間監視下の半自律動作(Human-Supervised Autonomy)を経て、(第3段階)独立した完全自律実行(Independent Execution)へと段階的に移行する。現在、開発上のボトルネックは機体の物理性能から「いかに規律正しく高品質な実演データを収集するか」に移っている。
4. 階層型フィジカル**AI**制御スタックへの統合と現場転移：学習データはGoogle DeepMindの「Gemini Robotics ER(上位ワークフロー進捗管理・推論)」および「Gemini Robotics 2.5(VLA視覚行動生成)」の事後学習(Post-training)に統合され、下位の「Apptronik Artemis(全身力制御)」を駆動する4層制御スタックを構成する。ApptronikのJeff Cardenas CEOによれば、わずか数週間の事後学習でモデルの性能が大幅に向上し、メルセデス・ベンツの実生産ラインへ転移した際も性能低下が極めて少ない状態で自律仕分けが機能したとされる。

第3章：【徹底比較】なぜ車輪型AMR単体ではなくヒューマノイドなのか？(AMRとの役割分担と連携プロトコル)



3.1「水平幹線搬送の車輪型AMR／無人牽引車」と「垂直ラストワンメートルのApollo」の機能分担

「車輪型AMRやAGVで十分なはずの工場内物流に、なぜ二足歩行ヒューマノイドを入れるのか？」という問いに対する最も重要な前提事実は、メルセデス・ベンツは水平搬送をすでに大規模な車輪型**AGV**／**AMR**フリートで自動化しており、**Apollo**を長距離水平搬送の代替には使っていないという点にある。
メルセデス・ベンツは独SAFELOG社との長期提携の下、ジンデルフィンゲンの「Factory 56」（500台以上が稼働し2024年IFOY賞を受賞）やケチケメート拠点を含む世界中のグループ工場で、3,000台以上のSAFELOG製車輪型モバイルロボット（XS1、S3、M4、X1、GT1、L2等）を運用している。SAFELOG製AGVの産業導入事例では最大1,500 kg級の重量物搬送や約600 m規模の水平巡回供給が実証されており、Factory 56においても低床モバイルロボットがキッティング台車（Shopping basket / cart）の下に潜り込んで組立ラインへ自動搬送している。
しかし、その高度自動化されたFactory 56のシステム構成においても、搬送用のショッピングバスケットへ部品を投入する上流のスーパーマーケット側では「ピック・バイ・ライト（Pick-by-light）棚」の前で人間作業員が手作業ピッキングを行っており、また無人牽引車（Tugger train）への箱の積み下ろしや狭小セル手元への格納には依然として人手が介在していた。したがって両者の役割分担は明確に直交している。車輪型AMR／無人牽引車が「倉庫・スーパーマーケットから組立ライン受け渡し点までの数十〜数百メートルの水平・大量・高効率幹線搬送」を担うのに対し、Apolloは「スーパーマーケット内でのバルク箱JISキッティング・多段棚からのKLT引き抜き」「自律走行無人牽引車への積み込み・荷下ろし連携」「車輪台車が進入できない狭小セル内のPoint of Fitへのラスト数メートル垂直・水平配膳と初期検品」を受け持つ。
なお、物流業界の実証データとの比較において正確に区別すべき点として、3PL大手GXO Logisticsの米国ジョージア州拠点（SPANX倉庫）において「車輪型AMRからトートを受け取りコンベヤへ移載するAMR-to-Conveyorハンドオフ」で累計10万箱以上・タスク精度約98%の商用**RaaS**実績を記録しているのはAgility Roboticsの「Digit」である。ApptronikのApolloもGXOおよびEMS大手Jabil（Apolloの受託量産パートナー兼自社工場導入顧客）とパイロットを進めているが、GXO／JabilにおけるApolloの累計処理箱数やAMR連携スループットはまだ一般公開されておらず、メルセデス・ベンツでのJISソーティングや検品を含む多機能製造支援の検証が先行している段階にある。

3.2 重量級車輪モバイルマニピュレータ（**SOTO**／**KMR iiwa**）に対する物理

的優位点と劣位点

次に、「垂直ピッキングが必要であれば、二足歩行ではなく車輪型AMRに多関節アームや昇降グリッパーを搭載したモバイルマニピュレータで対応できるのではないか」という疑問を検証する。欧州自動車業界でVDA-KLT搬送専用に開発された独**Magazino SOTO**（Jungheinrich傘下）、独**KUKA KMR iiwa**、軽量車輪伸縮型のトヨタ自動車 **ELEY**、および二足歩行の**Apptronik Apollo**の公開ハードウェア諸元を比較すると、車輪型モバイルマニピュレータが抱える物理的制約が定量的に浮かび上がる。
各アプローチの物理・運用特性を整理した「工場内部品配膳・キッティングにおける4方式比較表（基準となる車輪AMR＋人間作業員を含む全5列）」を以下に示す。

比較評価項目	車輪AMR単体＋人間作業員	重量級モバイルマニピュレータ	軽量車輪協働機（トヨタELEY）	二足歩行機（Apptronik Apollo）
代表機種と移動機構	SAFELOG AGV L2等（低床車輪潜り込み）＋人間歩行	Magazino SOTO / KUKA KMR iiwa（全方向車輪）	トヨタ ELEY（全方向車輪台車＋全高939～1,619 mm伸縮）	Apptronik Apollo / Apollo 2（二足歩行または車輪選択可）
本体自重と設置投影寸法	AGV単体数十～数百kg・台車潜り込み運用	SOTO自重695～741 kg（2230×1060 mm）・KMR自重158～390 kg級	自重約50 kg・長さ478×幅450 mm（成人男性同等）	自重72.6～73 kg・幅600×奥行500×身長1,730 mm
単体把持可搬と一括搬送量	アーム無し（台車積載搬送は最大1,500 kg級事例）	SOTO単箱20 kg（最大24箱240 kg）・KMR腕7～14 kg	公式未公表（日刊自動車新聞報道で片腕1 kg・小物特化）	双腕最大25 kg（1回1箱搬送・大型KLT重量キット対応）
必要通路幅と床面制約	台車幅＋安全余裕（平坦舗装床が必須）	SOTO微速1,650 mm・最高速2,510 mm・旋回円3,100 mm・傾斜1度以下	人間同等幅通路に進入可・安全柵や床アンカー不要・平坦床前提	人間用800～1,000 mm狭小通路進入可・段差や階段に対応
稼働時間・電力効率・ハンド	誘導充電等で高稼働・ピッキングは人間の手作業	SOTO連続8～10時間稼働（充電1.6時間）・KLT専用グリッパ等	停止時姿勢維持電力ゼロ・全軸QDD＋堅牢な汎用2本指ハンド	約4時間（ホットスワップ電池で7×22運用）・5本指22自由度選択可

この比較から明らかな通り、重量級モバイルマニピュレータには「通路幅・床耐荷重の制約」と「単腕可搬重量の制約」という二律背反が存在する。Magazino SOTOは車体内部に最大8～24個のKLT（合計約240 kg）を格納し8～10時間連続稼働できる優れた準幹線ロボットであるが、空車自重約695～741 kg（満載時約1トン、床耐荷重1,000 kg/m²要件）、機体寸法2,230×1,060 mmに及び、微速（0.3 m/s）走行でも最小1,650 mm、最高速（1.5 m/s）走行には2,510～2,800 mmの通路幅と直径3,100～3,500 mmの旋回円、さらに棚側のアダプター改修を要する。人間作業員用に幅800～1,000 mmで設計された既存のフローラック通路や組立セル内部には物理的に進入できない。またSOTOの把持高さは400～1,700 mmに制限され、床直置きパレットの最下段や1箱20 kg超のKLTには非対応である。他方、メカナムホイール台車に7軸協働アーム（LBR iiwa）を載せたKUKA KMR iiwa（標準構成で全幅1,445 mm、自重約158 kg～大型構成390 kg級）は、台車積載能力こそ170～181 kgあるものの、アーム自体の定格可搬重量はエンドエフェクタ重量込みで**7 kg**または**14 kg**にとどまるため、自重3～4 kgの大型KLTグリッパーを装着すると正味10 kg超の通い箱すら持ち上げられない。
これに対し二足歩行のApollo（自重約73 kg、データベース記載寸法で幅600×奥行500 mm）は、人間と同一のフットプリントで既存の重力式傾斜棚や台車へ無改修で直接アクセスし、25 kgまでの通い箱を床面から高所まで自在に扱える決定的な優位性を持つ。一方で劣位点も明確であり、二足歩行機は立位バランス維持だけで電力を消費するため1パックあたりの稼働時間が約**4**時間に限られ（交換式バッテリーのホットスワップや有線テザリング、機会充電を組み合わせて7日×22時間体制を維持する必要があり、交換作業自体の人手または設備コストが発生する）、移動速度（最大1.2～1.5 m/s）や1回1箱という水平輸送効率では車輪型AMRに劣る。

3.3 トヨタ「ELEY（軽量車輪伸縮構造）」との比較と合理性が逆転する生技上の境界条件

日本の生産技術陣が最も注目すべき比較軸は、トヨタ自動車が自社開発した車輪移動型のヒト型協働ロボット「ELEY（エリー）」（業界報道では2028年以降グループ全体で最大40万台規模の導入計画）と二足歩行Apolloの使い分け境界である。なおApptronik自身も2026年6月発表のApollo 2において「二足歩行版」と「車輪ベース版」の双方を用意し、Cardenas CEOも「車輪型の方が安全面から先に実用化が進むが、長期的には人間が行うあらゆる物理作業を代替できる脚型が最大の潜在力を持つ」と述べている通り、両方式はイデオロギー対立ではなく明確な工学条件による適材適所の関係にある。
トヨタ公式発表および専門検証記事で確認できるELEYの仕様（自重約50 kg、長さ478×幅450 mm、全高939〜1,619 mmの昇降伸縮機構、全方向移動車輪台車、減速比10対1以下の全軸QDD、肩甲骨軸付き双腕、汎用2本指ハンド、TRI主導の大規模行動モデルLBM搭載、安全柵・床アンカー不要）を基準にすると、以下の4つの生技境界を超えた領域で二足歩行Apolloの合理性が逆転する。
第一の境界は可搬重量と引き抜き反力モーメント（約10〜12 kg超／15〜25 kg領域）である。ELEYの正式な可搬重量はトヨタ公式未公表ながら、日刊自動車新聞（2025年12月13日付）の初公開記事では「片腕の積載量は1 kg」と記されており、主に小物部品の箱出し・格納や布の折りたたみ等の軽作業キッティングが対象となる（事実、トヨタはカナダ工場での重量通い箱搬送には最大22.7 kg可搬へと強化された二足歩行のAgility Digitを別途活用している）。静力学上、478×450 mm・自重50 kgの車輪台車が高さ1,400 mmの棚奥（前方リーチ500〜600 mm）から20〜25 kgの大型KLTを引き抜けば、合成重心が直径450 mmの車輪接地ポリゴンから大きく外れて前方転倒する。車輪型でこれに耐えるには150〜300 kg級のカウンターウェイト増量か車体大型化が避けられず、ELEYの本質安全・省スペース性が損なわれる。対して73 kgの二足歩行機Apolloは、足を前後に大きく開くスタンスで支持基底長を700〜900 mmへ動的に拡大し、骨盤と上体を後方へ引いて自重73 kg全体をカウンターウェイトとして機能させることで、狭小フットプリントのまま25 kgの引き抜きを成立させる。
第二の境界は床面不整・段差・勾配（段差5〜10 mm超・傾斜1〜3度超）である。平坦なエポキシ塗装床の最新組立ラインでは、停止時の姿勢維持電力がゼロでアーム伸長時の反力安定性が高いELEYの車輪台車が圧倒的に合理的である。しかし古い多層建屋のパワートレイン工場や建屋連絡通路のように、床の伸縮目地、コンベヤピットの埋め込みレール溝、床這わせケーブルプロテクター（高さ15〜30 mm）、スロープ（車輪型SOTOの許容勾配は最大1度）が混在するブラウンフィールドでは、床改修工事を伴わずに踏破できる二足歩行が優位となる。
第三・第四の境界は足元障害物越えの棚高リーチ（**1,700 mm**超・パレット縁越え）および把持対象の複雑性である。床置きパレットの木枠端や安全車止めがある場合、車輪台車は棚面まで密着接近できないが、二足歩行機は隙間へ片足を踏み込んで深い懐アクセスが可能であり、またバラ積みの複雑形状金属ブラケットの治具レス整列では2本指ハンドのELEYに対し22自由度5本指ハンド搭載のApollo 2が優位性を発揮する。

第4章：工場上位システム（MO360 / WMS / MES）との出庫・配膳データ同期と例外処理

4.1 MO360・WMS・Fleet Connect間のデータ同期とポカヨケ（誤配膳防止）設計

メルセデス・ベンツの生産現場において、ApptronikのApolloは競合ヒューマノイドと比較しても製造ITシステムとの統合が最も深く進められており、同社のグローバル・デジタル生産エコシステム「MO360（Mercedes-Benz Cars Operations 360）」およびデジタルツイン基盤と連携している。MO360には近年「MO360LLM Suite」や「Digital Factory Chatbot Ecosystem」等のAIエージェント群が組み込まれ、工場全体の生産・物流データをリアルタイムに監視・最適化している。
公表されているMO360の「Digital First」設計思想、ならびにApptronikのフリート管理ソフトウェア「**Apptronik Fleet Connect**」と機体制御「**Apptronik Artemis**」の機能仕様を統合すると、出庫指示からポカヨケ照合・完了書き戻しまでのデータ同期は以下の4ステップで実行される（MO360

とFleet Connect間の内部通信API仕様自体は非公開のため、公開機能層に基づくシステム連携フローとして整理する）。

1. デジタルツイン事前検証とフリートディスパッチ：メルセデス・ベンツは「Digital First」アプローチにより、仮想工場（デジタルツイン）上で組立セルとロボット動線を事前検証する。実稼働時にはMO360配下のMES／WMSから発行されるJISキッティング要求やライン補充オーダーをFleet Connectが受信し、各Apollo機体の稼働状態・現在位置・バッテリー残量に応じて最適機体へタスクをオーケストレーションする。
2. バーコード／ビジョンによるコンテナ**ID**照合（第**1**段階ポカヨケ）：VDA 4500規格KLT通い箱には、1次元バーコード（Code128）、2次元コード（DataMatrix／QR）、またはRFIDによる個体識別ラベルが付与されている。Apolloは搭載されたRGBカメラおよび深度センサを用いてバーコード読み取りとラベル照合を行い、WMS指示品番との取り違えを防止する。
3. **VLA**モデルによる部品形状・**JIS**順序スロット検品（第**2**段階ポカヨケ）：個別金属ブラケットのJIS仕分け工程では、Gemini Robotics ERが車両別の要求順序を保持した状態で、Gemini Robotics 2.5がカメラ映像から部品姿勢とシーケンシングトレイ内の各スロット状態を視覚認識する。万一トレイ内に空きギャップや配置ズレがあればその場で検知・修正し、初期外観検品と順序保証を同時に完了させる。
4. 現場**HMI**通知と**MO360**へのステータス書き戻し：作業進捗率、バッテリー残量、充電・稼働ステータスはApollo 2胸部の内蔵チェストディスプレイにリアルタイム表示され、頭部・口元の連動LEDおよび音声対話機能によって周囲の作業員へ直感的に共有されると同時に、Fleet Connect経由で上位のMO360システムへ実績ログと完了ステータスが同期集約される。

4.2 異常発生時の自律リトライ手順と**Human-in-the-Loop**エスカレーション設計

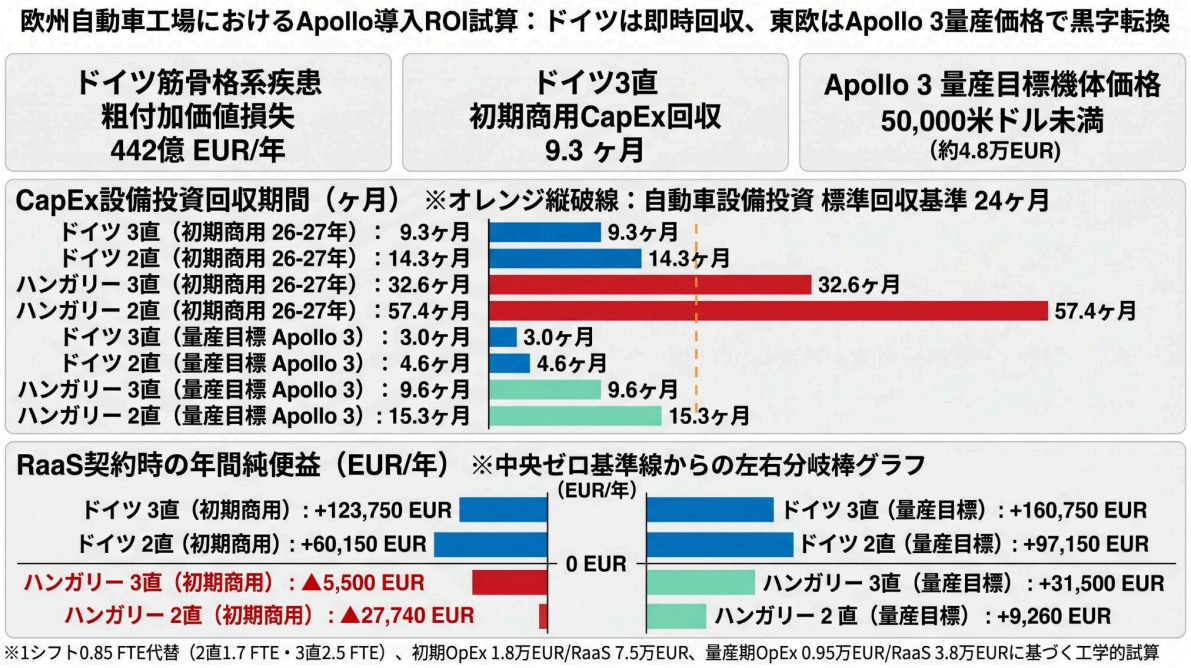
実ライン導入における最大の技術課題は例外処理（Exception Handling）である。2026年11月に報告された部品仕分けPoCの成功率96%は汎用ロボット基盤モデルとして高い到達点である一方、量産工場の基準で見れば「25回に1回（4%）の割合で未完了や異常が生じる」段階にあり、Google DeepMind自身も残りの数パーセントのギャップを埋める難しさと、単一タスクへの過剰最適化が汎用性を損なうトレードオフを指摘している。また、独立系検証レポート（Magica、Evlo、Physical AI Journal）が指摘する通り、メルセデス・ベンツにおける異常発生頻度、平均復旧時間、および遠隔監視者1人あたりの担当ロボット台数は現時点で非公開である。

公開仕様から確認できるApollo／Apollo 2の例外処理およびエスカレーション設計は、3層の防御網で構成されている。第1層は**VLA**と力制御による自律リトライであり、通い箱の位置ズレや把持スリップ、トレイ内の部品ギャップが発生した際、従来のティーチング再生機のように即座にエラー停止するのではなく、Gemini Robotics 2.5とArtemisが視覚・トルクフィードバックから把持軌道をリアルタイムに再生成して自律補正を試みる。

第2層は通路閉塞・人間接近に対する推論時安全誘導と**2**段階ハードウェア保護ゾーンである。通路上の障害物や交差する作業員に対し、Gemini Robotics 2.5は推論時のリアルタイム安全誘導（Inference-time reasoning guidance）で回避経路を選択し、従来比で障害物周辺の安全タスク完遂率を**33%**、近接する人間の周囲での安全完遂率を43%向上させた。さらにハードウェア安全層として、外側の「設定可能な周辺ゾーン（**Configurable Perimeter Zone**）」への進入で減速・動作調整を行い、内側の「衝突ゾーン（**Impact Zone**）」への侵入検知時（初期ベルリン実証では外部センサ・ライトカーテン境界も併用）に即座に動作を一時停止（**Pause**）する。加えて、言語・視覚入力への悪意ある安全回避指示に対する耐性評価（**ASIMOV-Jailbreak**ベンチマーク：**15**戦略群・**845**サンプル）でも、上位の**Gemini 4 Argon**モデルにおいて99.5%の拒絶率（従来ベースライン82%）が報告されている。

第3層は人間オペレーターへのエスカレーション（Human-in-the-Loop介入）である。供給ビンの完全欠品や自律リトライで解消できない噛み込みが発生した場合、Apolloの動作モードは「AI自律実行」からFleet Connectを通じた「テレオペレーション（遠隔操作）」または現場作業員による「マニュアルオーバーライド（手動介入）」へと切り替えられる。遠隔オペレーターがMANUSグローブ等で例外状態を解消すると同時に、その復旧操作自体がエッジケースの学習データとして蓄積される仕組みとなっている。

第5章：欧州工場における投資対効果（ROI）、身体的負荷軽減、およびドイツ労使協議会・安全基準の突破



5.1 筋骨格系疾患（MSD）による欠勤コスト低減効果と拠点別・シフト別の損益分岐点試算

欧州自動車工場のイントラロジスティクスにおいて、15～25 kgのKLT通い箱を反復的に中腰・捻転姿勢で持ち上げる作業は、筋骨格系疾患（**MSD**：**Muskel-Skelett-Erkrankungen**）による長期病欠の主要因である（**Apptronik**も全労働災害の**3**分の**1**が過負荷に起因すると指摘している）。ドイツ連邦労働安全衛生研究所（**BAuA**）の公的報告書『**2024**年労働不能による国民経済コスト』によれば、ドイツの全就業者平均の年間病欠日数は**20.8**日（総計8億8,150万日）に上り、賃金ベースの生産損失は**1,340**億ユーロ、粗付加価値（労働生産性）損失は**2,270**億ユーロに達する。なかでも「筋骨格系および結合組織の疾患（ICD-10：M00～M99）」は全疾患群で最大の**442**億ユーロの粗付加価値損失（病欠日数1億7,130万日、全体の19.4%）を生んでおり、特に製造業（鉱業・建設除く）では病欠全体の23.5%を占め、製造業就業者1人あたり年間平均4,869ユーロの付加価値損失をもたらしている。

この公的統計と公開されているヒューマノイド価格指標を基に、ドイツ拠点（ベルリン／ジンデルフィンゲン）とハンガリー拠点（ケチケメート）における定量的な損益分岐点を試算する。Apptronikは現在個別見積もり制で定価を公表していないため、以下の2フェーズの価格前提を置く。（1）初期商用フェーズ（**2026～2027**年：**Apollo 2**世代）：McKinseyの初期機体推計レンジ（15万～50万米ドル）の下限域にあたる機体CapEx **140,000**ユーロ（年間保守・電池・SW運用費OpEx 18,000ユーロ）、または投資家Howard Morgan氏が示した2027年サービス価格予測「年額約8万米ドル」に相当するRaaS年額**75,000**ユーロ（なお業界ベンチマークとしてBMWスパータンバーグのFigure 03商用契約では時給25米ドルが報じられている）。（2）量産目標フェーズ（**2027～2028**年以降：商用機**Apollo 3**世代）：Cardenas CEOが示した量産目標価格「**5**万米ドル未満（McKinseyの対人競争力閾値2万～5万米ドルとも合致）」に基づく機体CapEx **48,000**ユーロ（年間OpEx 9,500ユーロ）、または対応RaaS年額**38,000**ユーロ。

労務費・労災リスク低減便益については、ドイツ拠点を「フルロード人件費75,000ユーロ／年＋高負荷物流職場のMSD欠勤・代替要員コスト4,500ユーロ／年＝計**79,500**ユーロ／**FTE**・年」、ハンガリー拠点を「フルロード人件費26,000ユーロ／年＋MSD・採用離職コスト1,800ユーロ／年＝計**27,800**ユーロ／**FTE**・年」と設定する。歩行速度やバッテリー交換時間を考慮し、1シフト

あたりの人間代替係数を保守的に0.85 FTE（2直16時間稼働で**1.7 FTE**相当、7×22運用の3直22時間稼働で電池交換バッファを除き**2.5 FTE**相当）とした工学的試算結果は以下の通りである（算出式：CapEx回収年数 ＝ CapEx ／［年間総便益 − 年間OpEx］、RaaS年間純損益 ＝ 年間総便益 − RaaS年額）。

導入フェーズ・稼働シフト	ドイツ年間総便益（ユーロ）	ドイツCapEx回収・RaaS純益	ハンガリー年間総便益（ユーロ）	ハンガリーCapEx回収・RaaS純益
初期商用期（26〜27年）・**2直稼働（1.7 FTE代替）**	135,150ユーロ／年	回収**1.20年（14.3ヶ月）**・RaaS純益＋60,150ユーロ／年	47,260ユーロ／年	回収4.78年（57.4ヶ月）・RaaS純損▲27,740ユーロ／年
初期商用期（26〜27年）・**3直稼働（2.5 FTE代替）**	198,750ユーロ／年	回収**0.77年（9.3ヶ月）**・RaaS純益＋123,750ユーロ／年	69,500ユーロ／年	回収2.72年（32.6ヶ月）・RaaS純損▲5,500ユーロ／年
量産普及期（Apollo 3）・2直稼働（1.7 FTE代替）	135,150ユーロ／年	回収0.38年（4.6ヶ月）・RaaS純益＋97,150ユーロ／年	47,260ユーロ／年	回収1.27年（15.3ヶ月）・RaaS純益＋9,260ユーロ／年
量産普及期（Apollo 3）・3直稼働（2.5 FTE代替）	198,750ユーロ／年	回収0.25年（3.0ヶ月）・RaaS純益＋160,750ユーロ／年	69,500ユーロ／年	回収0.80年（9.6ヶ月）・RaaS純益＋31,500ユーロ／年

この試算は2つの重要な経営示唆を提示している。第一に、西欧の高コスト拠点（ドイツ）では初期商用価格のままでも自動車業界の一般的な設備投資回収基準（**24**ヶ月以内）を大幅に下回る**9.3〜14.3**ヶ月で回収できるのに対し、東欧のケチケメート工場では初期**RaaS**契約で年間**▲5,500〜▲27,740**ユーロの赤字となる。それにもかかわらずメルセデス・ベンツがケチケメートへApolloを優先投入している理由は、単純な賃金差裁定ではなく、構造的な人手不足による完成車ライン減産リスク（**1**時間のライン停止で数十万ユーロ規模の機会損失）を回避する事業継続（**BCP**）価値にある。そして**Jabil**との受託量産体制により**Apollo 3**が**5**万米ドル未満に到達した時点で、東欧拠点でも単体労務費代替だけで投資回収**9.6〜15.3**ヶ月へと黒字転換する。第二に、上記ROIは「1台が人間監視なしで自律稼働できること」を前提とした理論上限値である点に強い注意を要する。Physical AI Journalが指摘する通り、現状のパイロットのように遠隔操作（テレオペレーション）や頻繁なバッテリー交換・停止復旧に人間作業員が張り付く場合、残存する人件費の上にロボット費用が純増する「監督コストの二重払い」が生じる。Gartnerも約200件の業界PoCのうち2028年までに本番生産へ移行できる企業は20社未満と予測しており、投資採算の成立にはオペレーター1人あたり10〜20台以上を監視できる自律安定性の実証が不可欠である。

5.2 ドイツ労働安全衛生規則（DGUV／BetrSichV／EU機械規則）への適合プロセス

ドイツ国内の工場でヒューマノイドを実運用するには、製造者（Hersteller：Apptronik）のCEマーキングに加え、使用者（Betreiber：メルセデス・ベンツ）が労働保護法（ArbSchG第5条）および産業安全衛生規則（BetrSichV第3条／技術規則TRBS 1111）に基づく現場リスクアセスメント（Gefährdungsbeurteilung）を完了させる法的義務を負う。その適合プロセスは以下の4段階の安全工学要件から成る。

1. 動的安定性（転倒リスク）の評価と新国際規格「**ISO 25785-1**」の先取り適用：2025年改訂の産業用ロボット安全規格**ISO 10218-1:2025 / ISO 10218-2:2025**（旧ISO/TS 15066の生体力学接触限界値やDGUV Information 209-074 / 080の協働設計指針を統合）は移動時の転倒リスクを対象外としている。身長1.73 m・自重73 kgの機体が1.5 m/sで歩行する場合、周囲半径約**2.0 m**の転倒危険ゾーン（**Fall Zone**）が生じ、機能安全規格**ISO 13849-1**に基づく評価では管理区域でも最低**PL=c**、人との近接混在環境では最高水準の**PL=e**が転倒防止系に要求される。現在ISO/TC 299 WG 12で策定中の動的安定移動ロボット専用規格「ISO 25785-1」（2026〜2027年発行見込み）のドラフト要件に準拠し、床傾斜5度未満の管理、転倒ゾーン設定、およびホットスワップ電池交換時の熱暴走・アーク

放電防止手順を組み込む必要がある。

2. 非常停止（**Not-Halt**：**EN 60204-1**）における崩落二次災害の防止：全軸に機械ブレーキを持たないヒューマノイドに対し、EN 60204-1のカテゴリー0停止（即時電源遮断）を適用すると機体が脱力転倒して重大な挟まれ災害を引き起こす。そのため実証初期にはEN ISO 14119準拠の安全柵・ライトカーテン隔離や天井移動式安全ロープ懸架（Seilführung）を用い、柵レス運用へ移行する際は電源遮断前に制御維持下でしゃがみ込み姿勢（Zero-energy pose）へ安全に着地させてから動力を切るカテゴリー**1**制御停止の実装が必須となる。
3. **EU**機械規則（**EU**）**2023/1230**（**2027**年**1**月**20**日適用）の**AI**安全分離設計：現行の機械指令に代わり2027年1月20日から直接適用される**EU**機械規則（**EU**）**2023/1230**（なお2026年7月発効のDigital Omnibus規則［EU］2026/1744によりEU AI規則の高リスク義務適用が2027年12月～2028年8月へ延期され、機械のAI安全はこの機械規則が中核法規となる）では、附属書IパートAにより「自己進化型挙動を持つ機械学習（AI）が安全機能を担う場合」に第三者認証機関（Notified Body）の型式審査が義務付けられる。したがってVLAモデル（Gemini Robotics 2.5等）はあくまで非安全系のタスク軌道生成に限定し、対人減速・停止（Perimeter / Impact Zone）は独立した決定論的ハードウェア安全系で担保する分離設計が必須となる。
4. 「実質的な改造（**Wesentliche Veränderung**）」の回避：使用者である自動車メーカー側が独自のグリッパー変更や安全に関わるAI制御ソフト改修を行って新たな危険を生じさせた場合、使用者自身が法的な「製造者」とみなされ新規CE適合評価と製造物責任を負うため、メーカー認定モジュールの範囲内で運用管理することが求められる。

5.3 ドイツ労使協議会（Betriebsrat）との合意形成ガバナンス

ドイツの工場導入において法規制と同等の重みを持つのが、金属産業労組（IG Metall）および労使協議会（Betriebsrat／中央労使協議会Gesamtbetriebsrat：Ergun Lümali議長）との協調ガバナンスである。メルセデス・ベンツが労使紛争を招かずにベルリンおよびジンデルフィンゲン工場へヒューマノイドを導入できた背景には、制度的保障と法的共同決定プロセスの徹底がある。
最大の基盤は、2029年末（2030年）までの整理解雇を原則排除する長期雇用保障協定「Zukunftssicherung 2030」（労使協議会側は2035年までの延長と拠点別技術投資コミットメントを要求中）の存在である。雇用喪失への不安が制度的に遮断された上で、Jörg Burzer取締役（生産・品質・サプライチェーン担当）はエンジン縮小に直面していたベルリン・マリエンフェルデ工場を「MO360・AI・ヒューマノイドの世界的中核拠点」兼「次世代EVモーター拠点」へ転換し、現場従業員を単なる運搬作業者から「テレオペレーションとARでロボットを指導するAIトレーナー」へと職能高度化させる道筋を提示した。さらにロボットの担当範囲を「筋骨格系負荷の高い単調な物流運搬」や「ケチケメートのような深刻な人手不足工程」に明確に限定し、熟練組立作業そのものは人間の領域として維持する方針を一貫させている。
法手続面では、ドイツ事業所組織法第90条（§ 90 BetrVG）に基づき設備導入の初期計画段階から労使協議会へ情報開示・協議を行うとともに、最大の関門である同法第87条1項6号（§ 87 Abs. 1 Nr. 6 BetrVG）および**EU**一般データ保護規則（**DSGVO**／**GDPR**）への対応が決め手となる。カメラやセンサ、作業ログ記録機能を持つヒューマノイドは「従業員の行動や業績を監視し得る技術装置」に該当するため、労使協議会が法的共同決定権（同意権）を持つ。したがってデータ保護影響評価（**DPIA**）を実施し、「機体カメラ映像やテレオペレーション記録は部品認識・衝突回避・ロボット学習のみに使用し、周囲の従業員の作業速度査定や人事評価には一切利用しない」ことを明記した事業所協定（Betriebsvereinbarung）を締結することが、欧州工場展開の実務上の必須条件となっている。

出典・参照文献一覧

- Mercedes-Benz Group AG 公式発表（ドイツ語版）：Digital Factory Campus in Berlin — KI und humanoide Roboter (https://group.mercedes-benz.com/unternehmen/produktion/produktionsnetzwerk/mbdfc-humanoide-roboter.html)
- Mercedes-Benz Group AG 公式発表（英語版）：Accelerating transformation with AI and

humanoid robots — Proving ground for highly automated robotics in production (https://group.mercedes-benz.com/company/production/production-network/mbdfc-humanoid-robots.html)
- Apptronik 公式製品ページ：Apollo 2 — Patented Actuator Platform, Artemis & Fleet Connect (https://apptronik.com/apollo/apollo-2)
- Apptronik 公式発表：Apptronik Unveils Apollo / Manufacturing & Person-to-Goods Solutions (https://apptronik.com/news-collection/apptronik-unveils-apollo / https://apptronik.com/industries/manufacturing / https://apptronik.com/solutions/person-to-goods)
- NASA Spinoff 公式レポート（2026年1月）：Humanoid Robots Assist Assembly Lines — Valkyrie Heritage & Mercedes-Benz Tasks (https://spinoff.nasa.gov/Humanoid_Robots_Assist_Assembly_Lines)
- MANUS 公式技術ユースケース（2026年2月）：Mercedes-Benz Deploys Apptronik's Apollo at Factory Floor Using MANUS Gloves (https://www.manus-meta.com/use-cases/mercedes-benz-deploys-apptroniks-apollo-at-factory-floor-using-manus-gloves)
- Unite.AI 検証記事（2026年11月11日）：Apollo 2 Humanoids Hit 96% in Mercedes-Benz Sorting Proof-of-Concept (https://www.unite.ai/apollo-2-humanoids-hit-96-in-mercedes-benz-sorting-proof-of-concept/)
- Elektroniknet / Markt&Technik（ドイツ語・2026年11月）：Roboter besteht Probe bei Mercedes: 96 Prozent Treffer am Band (https://www.elektroniknet.de/automation/roboter-besteht-probe-bei-mercedes-96-prozent-treffer-am-band.84e37bcb-72f1-4e7f-a0af-6ba2b8603728.html)
- SAFELOG GmbH 公式発表（2025年5月・2024年6月）：SAFELOG and Mercedes-Benz expand cooperation / IFOY Award 2024 Factory 56 (https://www.safelog.de/en/blog/news/2025/05/30/mercedes-benz-cooperation/)
- Magazino GmbH 公式データシート：SOTO 2 Autonomous KLT Robot Technical Datasheet (https://www.magazino.eu/wp-content/uploads/2020/09/200707_EN_SOTO2_datasheet.pdf / https://kidmah.co.il/wp-content/uploads/2025/05/SOTO_Specsheet_EN.pdf)
- KUKA AG 製品仕様・検証レビュー：KUKA KMR iiwa Specifications & Payload Analysis (https://my.kuka.com/s/product/kmr-iiwa-omnimove/01t58000004aZCWAA2 / https://antonrobots.com/kuka-kmr-iiwa-review/)
- VDA 4500 KLT規格仕様資料：VDA Recommendation 4500 Small Load Carriers (https://logisticpackaging.com/products/standard-assortment/stackable-containers/vda-klt-containers/ / https://www.bettsistemi.com/en/original-components/workbenches/containers-cases-and-fsb-sponges/3394-rl-klt-container-vda-4500-)
- トヨタ自動車「ELEY（エリー）」技術仕様検証記事（2025年12月～2026年11月）：ITmedia エンタープライズ連載・仕様検証レポート (https://blogs.itmedia.co.jp/serial/2026/11/eley40lbm.html / https://note.com/kagawatomo/n/n22f7a1bb32b3 / https://troy-technical.jp/%E3%83%88%E3%83%A8%E3%82%BF%E8%87%AA%E5%8B%95%E8%BB%8A%E3%80%81%E8%87%AA%E7%A4%BE%E9%96%8B%E7%99%BA%E3%83%92%E3%83%88%E5%9E%8B%E3%83%AD%E3%83%9C%E3%83%83%E3%83%88%E3%80%8C%E3%82%A8%E3%83%AA%E3%83%BC/)
- 独立系稼働・商用化検証レポート（2026年7月～11月）：HumanoidUptime, Physical AI Journal, Evlo, Magica, RoboZaps, Anton Robots, Business Insider (https://humanoiduptime.com/records/apollo-mercedes-berlin/ / https://www.physicalaijournal.org/post/humanoid-robots-in-manufacturing-2026-2027 / https://evlo.ai/blog/human-in-the-loop-robotics-2026-deployments / https://magica.com/news/gemini-robotics-2-5-mercedes-factory-reliability / https://blog.robozaps.com/b/apptronik-apollo-review / https://antonrobots.com/apptronik-apollo-2-vs-agility-digit/ /

https://www.businessinsider.jp/article/2607-apptroniks-humanoid-robots-are-practicing-for-their-first-real-jobs/)
- Hungary Today / Automotive Manufacturing Solutions（ケチケメート工場労働力不足・増産計画）：Humanoid Robots Put to Work at the Mercedes Factory in Kecskemét (https://hungarytoday.hu/humanoid-robots-put-to-work-at-the-mercedes-factory-in-kecskemet/ / https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/tag/mercedes-benz)
- ドイツ連邦労働安全衛生研究所（BAuA）公式統計：Volkswirtschaftliche Kosten durch Arbeitsunfähigkeit 2024 (https://www.baua.de/DE/Themen/Monitoring-Evaluation/Zahlen-Daten-Fakten/pdf/Kosten-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- ドイツ労働安全衛生・EU機械規則・労使協議会適合解説（DGUV / IFA / Humanoid-Portal / Terra Robotics）：EU-Maschinenverordnung 2023/1230, ISO/CD 25785-1 & Betriebsrat Mitbestimmung (https://www.dguv.de/dguv-test/aktuelles/2025/2025_details_670337.jsp / https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/arbeiten-4-0/neue-technologien-stoffe/kollaborierende-roboter/index.jsp / https://robot-safety.net/humanoide-roboter-in-der-industrie/ / https://humanoid-portal.de/blog/humanoiden-roboter-im-betrieb-einsetzen/ / https://botupyourlife.com/de/guide/humanoid-robot-law/ / https://theresarobotforthat.com/blog/humanoid-robot-safety-standards-2026/)
- メルセデス・ベンツ中央労使協議会（Gesamtbetriebsrat）雇用保障報道：Zukunftssicherung 2030 / 2035 (https://www.autohaus.de/nachrichten/autohersteller/mercedes-betriebsratschef-zukunftssicherung-bis-2035-3458120)