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（後）

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9 第3部1：BMWドイツ本国工場における内製自律搬送ロボット「STR（iw.hub）」のハードウェア設計とOpenUSD標準化エコシステム
- エグゼクティブ・サマリー
- 第1章 なぜBMWは自律搬送ロボット「STR（現 iw.hub）」を内製開発・スピンオフしたのか
  - 1.1 ブラウンフィールド工場の制約打破：床面磁気誘導AGVの硬直性と市販AMRの限界
  - 1.2 フラウンホーファーIMLとの共同開発（STR第1世代から第2世代への設計刷新）
  - 1.3 BMW i3車載用バッテリーモジュール活用の実相：「セカンドライフ構想」から「新品車載モジュール流用」への工学的転換
  - 1.4 100%子会社「IDEALworks」へのスピンオフとAgile Robots傘下への資本進化（2020年～2026年）
- 第2章 「STR / iw.hub」のハードウェア詳細諸元・駆動機構・オンボードAI電装アーキテクチャ
  - 2.1 超低床222mmプロファイルと自重比約5.7倍（1,000kg可搬）の機械構造・リフティング仕様
  - 2.2 差動駆動トラクション機構（Framo Morat × Dunkermotoren）と24時間3交代稼働の電力マネジメント

2.3 オンボードAI計算基盤（NVIDIA Jetson / iw.os）と対角LiDAR・RGB-Dセンサフュージョンによる自然特徴点SLAM

2.4 無人搬送車安全規格「EN ISO 3691-4」準拠の動的保護フィールドとハードウェア安全設計

2.5 BMW STR（iw.hub）主要技術諸元と従来型磁気AGVの比較表

第3章 パートナーFA企業との連携とオープン標準規格「OpenUSD」全面採用の戦略的狙い

3.1 BMW iFACTORYが特定FAベンダーによる垂直囲い込み（ロックイン）を拒絶した経営・技術的理由

3.2 Siemens・FANUC・KUKA・安川電機・SICK・Bosch Rexrothを統合するマルチベンダーエコシステム

3.3 MEGA NVIDIA Omniverse BlueprintとVDA 5050 v3.0.0による異機種フリート統合制御

第4章 設備・部品サプライヤーに課される「SimReady（シムレディ）アセット」の技術要件

4.1 なぜ従来の3D CAD（STEP / IGES）や未構造化USDではデジタルツインが破綻するのか

1. 言葉を2つに分けて理解する

2. 従来の3Dシミュレーションと何が決定的に違うのか？

4.2 SimReady Foundation（2026.08.0仕様・202要件）の解剖：剛体物理・運動学・非可視センサ反射・視野定義

4.3 バーチャルコミッショニングを完結させる2段階検証パイプライン（静的ルール検証とランタイム検証）

4.4 従来型3D CADデータとOpenUSD SimReadyアセットの技術仕様比較表

第5章 治具・FA標準部品・ロボットメーカーのビジネスモデルへの波及（サプライヤー生き残り要件）

5.1 「SimReady Central Library」公開（2026年10月）とAIエージェント自動選定がもたらす調達構造の激変

5.2 ステークホルダー別・生き残りに向けた技術対応プレイブック（完成車生技・ロボットFA・標準部品・機械安全）

1. 完成車メーカー生産技術・設備企画部門への提言

2. ロボット・FAシステム開発メーカーへの提言

3. FA標準部品プラットフォーマー（カタログ・EC事業経営層）への提言

4. 機械安全研究機関への提言

参照一次情報・公式発表リスト

資料10 第3部2：BMWドイツ本国工場における数百台規模の異種AMR群管理AIアルゴリズムと上位MES/ERPミリ秒同期基盤

エグゼクティブ・サマリー

第1章 異種メーカー製ロボット数百台を単一管制する「VDA 5050」標準規格と「AnyFleet」基盤

1.1 マルチベンダー混在運用を阻んでいた「3つの構造的壁」とVDA 5050の成立

1.2 VDA 5050プロトコル仕様の徹底解剖（MQTTトピック・JSON構造・QoS設計）

1.3 IDEALworks「AnyFleet（Idealworks OS）」のハイブリッド統合アーキテクチャ

第2章 交差点制御・動的優先度最適化・デッドロック完全回避の群管理AIアルゴリズム

2.1 高密度交錯環境におけるデッドロック発生メカニズムと「Base / Horizon」排他予約トークン制御

2.2 マルチエージェント経路計画（MAPF）の数理実装：時間拡張グラフ・時間窓付きA*・

CBS
2.3 納期余裕度（スラックタイム）に応じた動的優先度制御と群知能ルーティング
2.4 ローカル障害物検知からフリート全体コストマップへのサブ秒共有
第3章 上位ERP（SAP）および工場MESとのリアルタイム同期・JIT/JIS順序配膳構造
3.1 ディンゴルフィング工場の極限混流生産とJIS/JIT配膳要件
3.2 SAP S/4HANA・Apache Kafka・MES/KINEXON・AnyFleetを結ぶイベント駆動型IT/OT階層構造
3.3 塗装・組立順序の突発的入れ替わり（リシーケンス）に対する動的ディスパッチ制御
第4章 巨大工場フロアを支える産業無線インフラ（Wi-Fi 6/6E・ローカル5G）とフェイルセーフ設計
4.1 金属遮蔽・マルチパス干渉を克服するハイブリッド無線設計（産業用Wi-Fiとプライベート5G）
4.2 通信瞬断・途絶時に衝突と暴走を封じ込める3段階フェイルセーフとハートビート監視
第5章 大規模AMRフリート導入による工程間仕掛在庫（WIP）圧縮と物流省人化の定量成果
5.1 有人牽引車（タガー列車）定時巡回からオンデマンドAMR＋自律タガー最適分業への転換
5.2 BMWグループおよびVDA 5050統合運用における公開定量実績とROI構造
完成車メーカーおよびFA・ロボット開発陣への実装提言
参照一次情報・出典一覧

資料11 第3部3：BMWドイツ本国工場の塗装・車体組立ラインにおけるインラインAIビジョン検査「AIQX」と現場エッジ推論基盤
エグゼクティブ・サマリー
1. なぜ「現場（エッジ）」と「クラウド」の2階建てにしているのか？
2. 高価なAI専用機を買わずに「普通の工場用PC」で数ミリ秒判定＋モザイク処理
3. 工程のスピードに応じた「ミリ秒（現場PC）」と「コンマ数秒（クラウド）」の使い分け
4. 現場が最も感動する「ワンクリック復旧（Edge Ecosystem）」
第1章 塗装工程におけるミクロン単位のインライン全数光学検査と自動補修ロボット連動
1.1 デフレクトメトリ（位相シフト鏡面反射計測）の光学原理と走査セル構造
1.2 微細ノイズと真欠陥を判別する3Dデジタル欠陥カタログとAI分類アルゴリズム
1.3 レーゲンスブルク工場の自動補修ロボット閉ループ制御とレーザーマーキング支援
第2章 最終組立ラインにおける「AIQX」プラットフォームの全体構造とマルチモーダル拡張
2.1 混流バリアントに対するオーダー整合性検査と「Car2X」車載カメラ連携
1. 本来の意味（モビリティ・自動運転領域）
2. BMW生産ライン（AIQX連携）における「工場内Car2X」の革新性
生産技術・設備投資上のメリット
2.2 音響AI検査（Acoustic Analytics）によるマルチモーダル品質検査への拡張
2.3 BMWインラインAI検査（塗装光学系・組立AIQXビジョン・音響AI）の技術仕様比較
第3章 現場エッジ推論基盤とクラウド学習のハイブリッドIT/OTアーキテクチャ
3.1 工場フロアにおける「Edge Ecosystem」とミリ秒エッジ推論・GDPR匿名化
3.2 「現場エッジ推論＋クラウド一括MLOps」2層分離の工学的必然性と耐障害性
3.3 従来型ルールベース画像処理とAIQXエッジ推論基盤の比較
第4章 AI専門家を不要にする「現場作業員向けノーコード学習環境」とOmniverse合成データ活用

4.1 現場技術者・作業員が主導するノーコードAIセルフサービス開発フロー
4.2 OpenUSDデジタルツイン（Omniverse）と「SORDI.ai」合成データによる事前学習
1. そもそも、なぜ「実物の写真100枚」だけでは足りないのか？
2. カメラを床にネジ止めする前に「光の反射」まで実験する（FactoryExplorer）
3. 世界最大の「工場用CG写真集」SORDI.aiと、ワンクリック不良品メーカー
1. 現場の「照明のチラつき・影・汚れ」に惑わされないタフな目を作るため
2.「良品を不良と誤判定してラインを止める事故（過検出）」をなくすため
3.「世界30工場への使い回し」と「量産初日からの垂直立ち上げ」を実現するため
4. 現場が一番喜ぶ「100%ズレない自動赤ペン先生（自動アノテーション）」
5. 結論：「CGで基礎体力をつけ、実物100枚で仕上げる」黄金コンビ
第5章 品質データの上流工程フィードバック（予知品質）と生技・部品サプライヤーへの示唆
5.1 検査データの上流プロセス還流と部品製造（ランドシャット工場等）への展開・ROI評価
5.2 サプライヤー網へのAIQX開放（ZDSC Campus）と日本の完成車・光学・部材メーカーへの示唆
1. 完成車・二輪メーカーの生産技術・プロセス技術陣（ホンダ、三菱自、カワサキモータース等）への示唆
2. 3Dビジョン・光学検査・センサR&D陣（クラボウ、エトリア、TDK等）への示唆
3. 内外装樹脂・ゴム・ハーネス・金属部材メーカー（豊田合成、プロテリアル等）への示唆
参照文献・一次情報リスト
BMW Group 公式プレスリリース・技術解説（英語・ドイツ語）
AWS・NVIDIA・Intel・光学および研磨パートナー技術資料
専門技術メディア・学術および業界検証記事

資料12 第4部1：ジーリー傘下ジーカー寧波5Gスマート工場に投入された優必選「Walker S1」および華研智造（iSAGE）「4腕協調ロボット」のハードウェア解剖
エグゼクティブ・サマリー
第1章 優必選（UBTECH）の産業特化シフトと「Walker S1」の全体主要諸元・電装アーキテクチャ
1.1 展示・サービス用機体から自動車工場量産ライン特化型「Walker S」シリーズへの工学的転換
1.2「Walker S1」の主要定量スペックと工場連続シフト対応エネルギー設計
1.3 オンボード計算・360度視覚センシング構成と放熱・防塵・耐ノイズ実装
第2章 UBTECH独自「一体型関節サーボモジュール」と「力覚・触覚搭載ハンド」の機構特性
2.1 トルク密度・部位別減速方式・デュアルエンコーダ中空配線構造
2.2 第3世代5指デクスタラスハンドと6軸力覚・アレイ触覚フィードバック性能
2.3 主要コア部材の中国国産化・内製構造一覧表
第3章 華研智造（iSAGE）「全高155cm級・4腕協調ロボット」の独自機構設計と運動学的合理性
3.1 企業背景の一次資料検証と「治具レス空中協調作業」の生産技術的狙い
3.2「STAR-SageMan」のハードウェア構造・リーチ重なり設計と156cm低重心バランス
3.3 非対称動作時の反力・転倒モーメント抑制設計と「SageBrain」同期制御
第4章 二足歩行機（Walker S1）と多腕車輪機（4腕協調ロボット）のハードウェア役割分担と保守性

- 4.1 極氪工場投入ロボット比較表と工程別ハードウェア選定・日欧米設計思想対比
- 4.2 24時間稼働EV工場における関節耐久性（MTBF）・可動ケーブル保護・現場ユニット交換設計

第5章 中国国産ロボティクス部材サプライチェーンの台頭と圧倒的コスト競争力の源泉

- 5.1 日欧米独占コア部材の国産代替実態とEVサプライチェーンのスピルオーバー
- 5.2 機体BOMコスト低減の定量分析と日系ロボット・完成車・部材メーカーへの戦略的示唆

主要参照一次資料・公式発表・企業開示文献一覧

資料13 第4部2：極氪（Zeekr）寧波杭州湾5Gスマート工場におけるプライベート5G「UPF/MEC」ネットワークスライシングと異種ロボット「群知能：BrainNet」制御

エグゼクティブ・サマリー

- 1. 5GとMECの役割（ロボット制御における意味）
- 2. なぜ「約50台」でコストが逆転するのか（米国型 vs 中国型）
- 3. セミナーで強調すべき結論（生産技術への示唆）

第1章 極氪・ 寧波5G全接続スマート工場における「UPFオンプレミス配置＋MEC」とネットワークスライシング設計

- 1.1 2,000ム一級メガEV工場の生産特性と従来型Wi-Fiの構造的限界
- 1.2 「UPF下沈＋双MEC冗長構成」と5G LANの物理・論理アーキテクチャ
- 1.3 ネットワークスライシング（URLLC / eMBB / mMTC）の分離設計と優先制御
- 極氪5Gスマート工場 ネットワークスライシング＆BrainNet階層構造表

第2章 UBTECH「群脳ネットワーク（BrainNet）」による複数台ヒューマノイド群知能の構造

- 2.1 単体自律から群知能への転換：極氪工場における世界初の協同実訓とIoH基盤
- 2.2 「超級大脳」と「智能小脳」の2階層分散知能および「AI双循環体系」への進化
- 2.3 「群建群享」意味論的VSLAMと並列分散協調学習パイプライン

第3章 「ヒューマノイド＋4腕ロボット＋AMRフリート」の異種ロボット統合スケジューリングと動的タスク配分

- 3.1 「四網協同（IoT・MES・LES・RCS）」と異種ロボット統合の実態検証
- 3.2 大型部品共同運搬・精密検査におけるマルチエージェント協調制御ロジック
- 3.3 異常発生・バッテリー低下時の動的サブタスク再配分と「3分間自律ホットスワップ換電」

第4章 高密度交錯セル内での「3次元空間排他制御（干渉回避）」と5Gフェイルセーフ安全機構

- 4.1 2次元床面ロックから「3次元動的スイープボリューム」排他制御への拡張
- 4.2 5G無線品質劣化・MEC遅延増大に対する3段階フェイルセーフ安全機構

第5章 欧米方式（機体オンボード完結重視）と中国方式（プライベート5G＋MEC群知能重視）の技術・コスト比較

- 5.1 米・欧・中3極のシステム設計思想の分岐
- 5.2 フリート規模に応じたCAPEX/OPEX構造とスケーラビリティの定量評価
- 5.3 通信インフラ依存リスクの評価と日本の製造・通信・安全セクターへの戦略的示唆
- オンボード完結型AI（米国Figure等）と5G MEC群知能型AI（中国極氪×UBTECH）のシステム比較表

参照一次資料・技術文献一覧

資料14 第4部3：第4部完結・全体総括：柔軟・不定形ワークのビジョン×力制御ハイブリッド組付け技術と日本の生技・ロボット・部材サプライヤーの勝ち筋
エグゼクティブ・サマリー
1. 柔軟触覚電子皮膚（ロボットの「皮膚・指先感覚」）
2. TMR磁気センサ（ロボットの「固有感覚・関節の目」）
3. 耐複合屈曲捻回極細ケーブル（ロボットの「血管・神経束」）
4.「グローバルデファクトを握る二正面戦略」とは何か
セミナーでの強調ポイント（受講者へのメッセージ）
第1章 なぜ自動車最終組立（艤装工程）の自動化率は低かったのか：柔軟・不定形ワークの物理的難所
1.1 車体溶接の高自動化と最終艤装ライン手作業依存の非対称性
1.2 1次元柔軟物（DLO）と2次元・3次元弾性体の非線形変形モデル
1.3 従来の「位置制御6軸ロボット＋専用固定治具」アプローチが破綻した3大要因
第2章 3Dビジョン姿勢推定×力覚・触覚フィードバックの「ハイブリッド組付け制御」解剖
2.1 最先端EV工場（極氪5Gスマート工場等）における人型・多腕協調実装の実態
2.2 3D点群トポロジー追跡と双腕・多腕協調テンション制御のメカニズム
2.3 コネクタ挿入・クリップ打込みのミリ秒級ハイブリッド制御シーケンス
1. 最先端EV工場で起きている「群知能」と「4本腕」のリアル（2.1節の解説）
2. グニャグニャな電線をどう見て、どう扱うか（2.2節の解説）
3. 半嵌合・ピン折れをゼロにする「4段階・ミリ秒リレー制御」（2.3節の解説）
セミナーでのまとめ（受講者へのブリッジ）
第3章 フィジカルAI実装を支える「先端機能性部材・センシング・車体側設計（DFA）」の共進化
3.1 ロボット側の進化を支える3大コア部材技術（触覚電子皮膚・力覚/磁気センサ・内蔵極細ケーブル）
3.2 車両側の組付け容易性設計（DFA）革命：ゾーンアーキテクチャ・48V・硬質バスバー・FPC化
第4章 全14巻横断総括：日米欧中「5大フィジカルAI実装モデル」の最終比較マトリクス
4.1 5大モデルの工学的トレードオフ解析：車輪対二足、エッジ完結対クラウド群知能
第5章 日本の製造業エコシステム（5つのプレイヤー層）が取るべき実践ロードマップと勝ち筋
5.1 日本の製造業プレイヤー別 技術・事業アクションプラン一覧表
5.2 各プレイヤー層への深掘り技術・事業提言
(A) 完成車・二輪メーカーの生産技術部門（ホンダ、三菱自動車、カワサキモータース等）
(B) 国産ロボット・FAシステム開発企業（川崎重工業、エトリア等）
(C) 自動車部品（内外装・ハーネス）・3Dビジョン・機能性材料R&D企業（豊田合成、プロテリアルケーブルソリューションズ、倉敷紡績、TDK等）
(D) FA標準部品・治具プラットフォーマー（ミスミ等）
(E) 機械安全・労働安全衛生ガバナンス（労働安全衛生総合研究所等）
主要参照文献・一次公開資料一覧

資料9 第3部1：BMWドイツ本国工場における内製自律搬送ロボット「STR（iw.hub）」のハードウェア設計とOpenUSD標準化エコシステム

ドイツBMWグループは、ディンゴルフィング工場、ライプツィヒ工場、レーゲンスブルク工場をはじめとする主力製造拠点の工場内物流改革において、市販の自律搬送ロボット（AMR：Autonomous Mobile Robot）を単純購入するのではなく、フラウンホーファー物流研究所（Fraunhofer IML）と共同で超低床・1トン可搬の「Smart Transport Robot（STR）」を内製開発し、さらに2020年11月には100%出資子会社「IDEALworks GmbH」（ミュンヘン）としてスピンオフさせて商用機「iw.hub」および統合管制基盤の外販に踏み切った。

このレポートにおけるSTR（Smart Transport Robot）は、一般名詞ではなく、BMWグループがフラウンホーファー物流研究所（Fraunhofer IML）と共同で自社開発した「超低床・潜り込み型の工場内向け自律搬送ロボット（AMR）」の固有名詞（開発プロジェクト名・社内呼称）です。

具体的には、以下の4つの特徴を備えたロボットとして定義されています。

- 位置づけ（**iw.hub**の前身）：2015〜2016年からBMWが内製開発を進め、2020年11月に100%子会社「IDEALworks」としてスピンオフして外販モデル「iw.hub」という商用名称になるまでの、BMW社内における機体名称です。
- 超低床・潜り込みリフト構造：既存の自動車工場（ブラウンフィールド）で稼働している標準ローラー台車（床面からの隙間230mm未満）の下へ直接潜り込み、天面のリフティングフレームで台車ごと持ち上げて運ぶ超扁平形状（現行iw.hubで全高222mm）を持っています。
- 床面ガイド不要の完全自律走行：従来のAGVのように床面の磁気テープやQRコードに頼らず、車載のセーフティLiDARや3Dカメラを用いた自然特徴点SLAMによって、作業員や有人フォークリフトと混在する通路で障害物を自ら回避・迂回して走行します。
- 重量物搬送と車載グレード電源：第1世代（2016年・可搬550kg）から第2世代（2018年〜・可搬1,000kg）へと進化し、電源には自社の電気自動車「BMW i3」用のリチウムイオンバッテリーモジュール（48V系）を流用することで、24時間3交代稼働に耐える車載グレードの耐久性を備えています。

【YouTube】

Success Story | Idealworks' Use Case at BMW Group

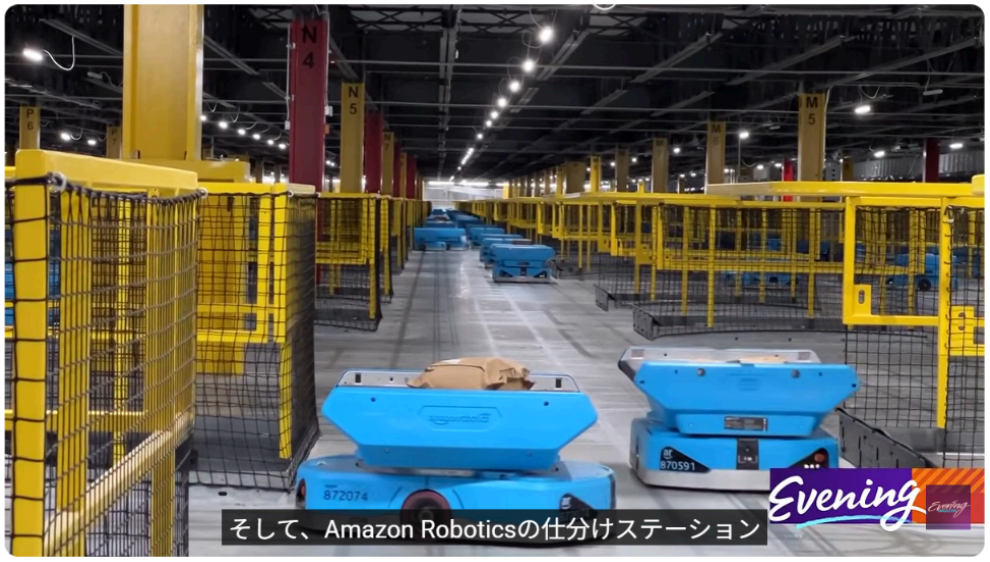


その背景には、床面磁気誘導AGVが抱えるレイアウト変更時の設備硬直性の打破と、当時の市販AMRでは満たせなかった「高さ230 mm未満の既存ローラー台車への潜り込み寸法」「最大1,000 kgの重量物搬送剛性」「秒速2.2 mの高速走行」「24時間3交代稼働の車載グレード耐久性」の同時達成を、自社の電気自動車（BMW i3）用バッテリーモジュール流用と内製エンジニアリングで解決する明確な生産技術戦略が存在する。
同時にBMWは、「BMW iFACTORY」構想の中核を成すバーチャルファクトリー基盤において、特定FA・PLMベンダー1社による独自データ形式での垂直囲い込み（ベンダーロックイン）を回避し、Linux Foundation傘下のAlliance for OpenUSD（AOUSD）が標準化を進めるオープン3D記述規格「OpenUSD」および「NVIDIA Omniverse」を全工場共通のデジタルツイン基盤に据えた。これにより、今後欧米の完成車メーカーへ産業用ロボット、搬送機器、コンベヤ、アルミフレーム架台、専用治具、標準FA部品を納入するサプライヤーには、従来の「外観形状のみの3D CADデータ（STEP / IGES等）」ではなく、質量・重心・慣性テンソル・摩擦特性・関節運動学・光学および非可視センサ反射特性を構造化スキーマとして内包した「SimReady（シミュレーション即応）OpenUSDアセット」の提供が事実上の参入要件（デファクトスタンダード）になりつつある。

関連レポート：

> なぜAmazonの3000台の倉庫物流ロボットは同時に動いても衝突しないのか？ 武庫川フルフィルメントセンター「大規模AMRオーケストレーション」と「産業用デジタルツイン」の技術的全体像【産業調査】

【YouTube】
Go inside Amazon's largest fulfillment center in Washington state



エグゼクティブ・サマリー

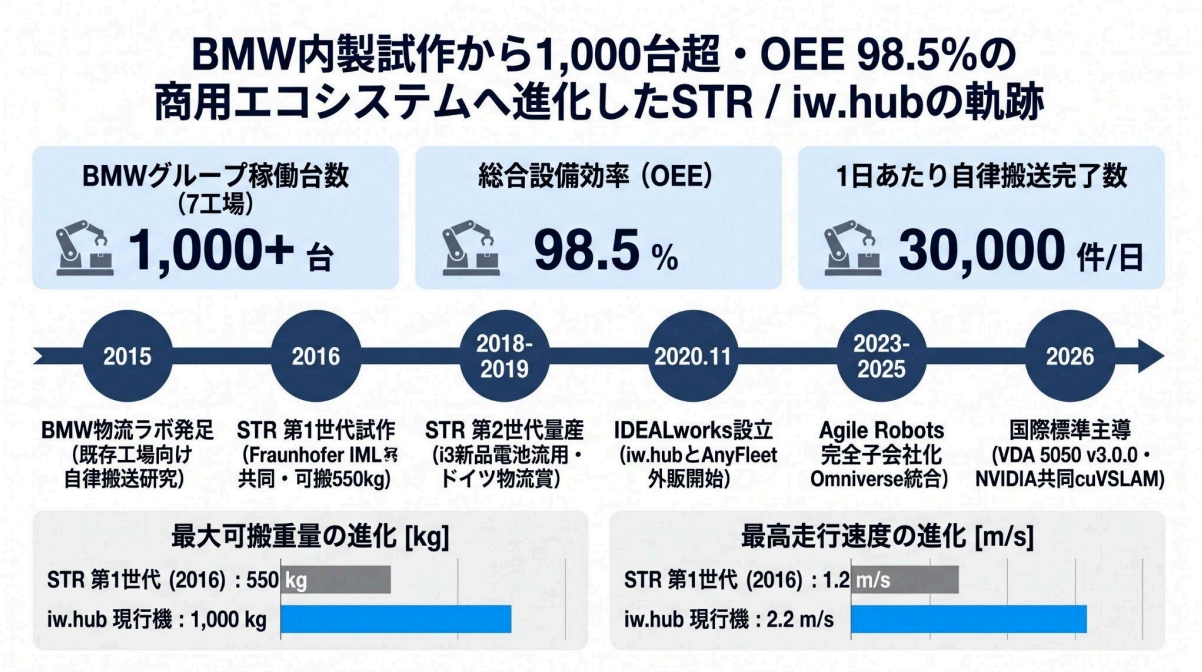
本報告書は、完成車メーカーの生産技術・設備企画部門、産業用ロボット・FAシステム開発陣、FA標準部品プラットフォーマーの経営層、ならびに機械安全研究機関に向け、BMWグループの内製AMR設計思想からOpenUSD / SimReady調達エコシステムに至る技術構造を英独の一次公開資料に基づき徹底解剖したものである。主要な結論は以下の5点に集約される。

1. ブラウンフィールド工場の制約突破を目的とした**AMR**内製とスピンオフ外販戦略：BMWが2015年から内製開発に着手した理由は、既存工場（ブラウンフィールド）の狭隘通路や有人・フォークリフト混在環境において、床面工事を一切伴わず、下部クリアランス230 mm未満の既存台車に潜り込み、最大1,000 kgの重量部品を秒速2.2 mで3交代連続搬送で

きる市販機が存在しなかったためである。また、BMW i3用リチウムイオン電池の活用では、当初構想された「使用済み車載電池のセカンドライフ転用」を返却数不足と定置型蓄電池用途への優先配分という工学的判断から棄却し、「i3用新品バッテリーモジュールの流用（48 V系）」へ切り替えることで車載品質と量産コスト優位性を確立した。さらにIDEALworksとして独立法人化（2023年にAgile Robotsが過半数出資、2025年9月に完全子会社化、BMWは長期戦略パートナー継続）させたことで、トヨタ北米拠点などの競合完成車メーカーや異業種への外販による投資回収と量産規模拡大を実現している。

2. 自重**175 kg**で可搬**1,000 kg**を実現する高密度駆動系とエッジ**AI**電装：商用機「iw.hub」は、全長1,440 mm・全幅641 mm・全高222 mmの超低床スチールフレームに、Framo Morat製カスタム遊星ハブ減速機「NG500」（減速比16:1、1輪あたり許容ラジアル荷重約500 kg、設計寿命最大30,000時間）とDunkermotoren製BLDCモータ「BG 95」（デュアルエンコーダ・保持ブレーキ内蔵）を一体化した差動駆動ユニットを搭載し、自重比約5.7倍の可搬能力を発揮する。電装面では車載エッジGPU（NVIDIA Jetson AGX Xavierおよび後継のJetson Orin）上で独自OS「iw.os」を稼働させ、対角配置のSICK製「microScan3 Pro」セーフティLiDAR 2基とLIPS製「LIPSedge AE400」RGB-D 3Dカメラを融合することで、床面マーカー不要の自然特徴点SLAM（LiDAR SLAMおよびGPU高速化Visual SLAM「cuVSLAM」）とEN ISO 3691-4準拠の動的保護フィールド制御をエッジ単体で実行する。
3. ベンダーロックインを排した**OpenUSD**共通基盤と**VDA 5050 v3.0.0**による異機種統合：BMWは建築BIM、設備CAD、Siemens製PLM / 工程シミュレータ（Teamcenter X / Process Simulate）、FANUC・KUKA・安川電機等のロボット群を単一ベンダーの独自形式に閉じ込めることを避け、非破壊レイヤー合成機能を持つOpenUSDで全工場を単一のデジタルツイン（Virtual Factory）に統合した。ハンガリー・デブレツェン新工場では量産開始（SOP）の2年以上前から仮想空間上で生産検証を稼働させている。さらに物流実行層では、IDEALworksが策定を共同主導した標準通信規格「VDA 5050（2026年3月にv3.0.0公開）」と「MEGA NVIDIA Omniverse Blueprint」を結合し、iw.hubやLinde / STILL製無人フォークリフト、ヒューマノイドを含む異機種フリートの事前シミュレーションと実機管制を直結させている。
4. 設備サプライヤーに課される**202**項目の「**SimReady**」技術仕様：NVIDIAが開始しAOUSDガバナンス下で標準化が進む「SimReady Foundation（リリース2026.08.0時点で全202要件コード）」は、単なる3D形状ではなく、Z軸アップ・メートル/キログラム実寸単位系（UN）、不可視内部形状を排除した多様体三角形メッシュ（VG）、整合的な質量・重心・慣性テンソルおよび衝突判定形状と摩擦特性（RB / PMT）、単一ArticulationRootに正規化された関節運動学とグリッパ把持定義（JT / GR）、光学PBR材質（MDL）と非可視センサ塗装反射属性（NVM）、センサ視野・パイプラインスキーマ、AI学習用セマンティックラベル（SL）の実装を定義する。アセットは静的ルール検証（simready-validate）と実シミュレータ上のランタイム検証（simready-benchmark）の2段階を通過する必要がある。
5. 「**SimReady Central**」と**AI**エージェント設計時代における日本の**FA**・部品産業の生存条件：2026年10月、NVIDIAとHugging Faceは2,000点以上の検証済みOpenUSDモデルを公開する「SimReady Central Library」を立ち上げ、FANUC（84機種以上）やComau、Robotiq等が参画した。すでにGPT-6 Astra等のAIエージェントが自然言語指示からSimReadyカタログを検索してワークセルを自動構築し、Python検証コードを生成するワークフローが実装されている。今後、ハードウェア現物と同時にSimReady準拠OpenUSDモデルを提供できない機器・治具・標準部品メーカーは、完成車メーカーの初期デジタルツイン構想段階で検討対象から外れるリスクが高く、CAD-to-SimReady自動変換基盤の構築が急務となっている。

第1章 なぜBMWは自律搬送ロボット「STR（現 iw.hub）」を内製開発・スピンオフしたのか



1.1 ブラウンフィールド工場の制約打破：床面磁気誘導AGVの硬直性と市販AMRの限界

自動車工場の部品供給物流（イントラロジスティクス）は長年にわたり、床面に埋設・貼付した磁気テープや誘導線、あるいは反射板・床面QRコードに沿って定軌道走行する無人搬送車（AGV：Automated Guided Vehicle）を主力としてきた。しかし、EV・PHEV・内燃機関車の混流生産やモデルライフサイクル短縮に伴い、組立ライン脇の部品棚（スーパーマーケット）や工程レイアウトの組み替えが頻繁に発生する現代の自動車製造において、床面インフラに依存する従来型AGVは深刻な硬直性を露呈していた。ルート変更のたびに床面磁気テープの貼り直しや設備工事、安全柵の再配置が必要となるうえ、軌道上に有人フォークリフトや仮置きパレットが存在すれば即座に停止してラインへの部品供給遅れを招くためである。
この構造的課題を打開するため、2015年、ミュンヘンのBMWグループ・ロジスティクス・イノベーション・ラボ内の少数チームは、新設工場（グリーンフィールド）ではなく、建屋柱や狭隘通路、作業員、有人フォークリフト、既存のレガシーMES / WMSが複雑に混在する既存稼働工場（ブラウンフィールド）へ無改造で投入できる自律搬送ロボットの探索を開始した。同チームが当時市場に流通していた市販AMR（主にEC倉庫や軽負荷搬送向けに設計された機体）を精査した結果、自動車工場の生産技術要件に対して以下の3点で重大なギャップが確認された。
第一の壁は、超低床潜り込み寸法と1トン級可搬能力の二律背反である。BMWのドイツ本国工場では、標準化された紫色のスチール製ローラーコンテナ（Rolluntersetzer）やパレット台車が大量に循環稼働しており、その床面下部クリアランスは23 cm（230 mm）未満に制限されていた。高さ230 mm未満の隙間に潜り込みつつ、金属プレス部品や組付ユニットを積載した最大1,000 kg（1トン）の重量キャリアを自力でリフトアップできる超薄型・高剛性な市販AMRは当時入手困難であった。第二の壁は、JIT / JIS（Just-in-Time / Just-in-Sequence）供給のタクトタイムを満たす走行速度であり、広大な工場建屋内で有人交通と混在しながら秒速2.0 m超で巡航できる機動力が求められた。第三の壁は、自動車工場特有の24時間3交代生産に耐え抜く車載グレードの機械・電装耐久性である。市販品の外部調達のみでは自社の物流革新を実現できないと判断したBMWは、ハードウェアと制御ソフトウェアの双方を自ら開発する内製化路線を選択した。

1.2 フラウンホーファーIMLとの共同開発（STR第1世代から第2世代への設計刷新）

BMWグループは最先端の自律移動アルゴリズム研究と自社の量産製造技術を融合させるため、フラウンホーファー物流研究所（Fraunhofer IML、ドルトムント）と3年間の「BMW Enterprise

Lab」共同研究枠組みを構築した。BMW側の自律搬送システム・プロジェクトマネージャーであるJosef Pilstl氏と、Fraunhofer IML側でハードウェア・ソフトウェア連携を統括したChristian Blesing氏らが中核となり、「Smart Transport Robot（STR）」の開発が推進された。
2016年に発表され、ヴァッカースドルフ（Wackersdorf）物流拠点等で初期実証された**STR第1**世代機は、高さ23 cm未満のコンテナ下への潜り込みを達成し、最大可搬重量550 kg、最高速度1.2 m/sの性能を実現した。しかし、実工場での連続稼働試験を進める過程で、試作機と量産生産設備の厳しい壁が明らかになった。Fraunhofer IMLの公式技術誌（Logistik entdecken Nr. 19）の記録によれば、第1世代機に組み込まれていた一部の汎用コンポーネントが工場の連続稼働負荷に耐えられず耐久性の課題を露呈したほか、現場部門からは1トン級の標準ユーロメッシュボックス（Gitterbox）や大型部品キャリアを搬送できるよう可搬重量の倍増が要求されたのである。
これを受けて共同開発チームは、シャシー構造・駆動系・ナビゲーション系を全面再設計した**STR第2**世代機を開発した。第2世代機は第1世代比で2倍の可搬能力（1,000 kg級）とさらなる高速化・高安定化を達成するとともに、進路上の障害物を第1世代より大幅に高速で認識・回避する新設計の工場内ルート計画・自己位置推定システムを実装した。2018年末にかけてレーゲンスブルク工場で第2世代STR 6台による集中的なパイロット稼働（および小型部品向け派生機Mini STRの試験）が実施され、BMWグループ社内で自律搬送ロボットを内製製造・継続改良する生産技術基盤が確立された。2019年には複数拠点へ100台規模の量産導入が開始され、この「Logistics Next」プログラムの成果によりBMWグループはドイツ物流協会（BVL）の「ドイツ物流賞（Deutscher Logistik-Preis 2019）」を受賞した。

1.3 BMW i3車載用バッテリーモジュール活用の実相：「セカンドライフ構想」から「新品車載モジュール流用」への工学的転換

STRの電源システム開発には、完成車メーカーならではの車載部品流用アプローチと、量産移行に伴う極めて合理的な設計変更の歴史が刻まれている。2016年の初期発表時、BMWは自社の量産EV「BMW i3」の使用済みリチウムイオンバッテリーモジュールをSTRの電源として再利用し、1シフト（8時間）分の稼働エネルギーを供給する「セカンドライフ（二次利用）活用」を掲げていた。現在でも一部の外部物流メディアや解説記事においては「BMW i3のリサイクル／再利用バッテリーを搭載」と紹介される場合が少なくない。
しかし、共同開発元であるFraunhofer IMLの一次資料は、量産化フェーズにおいてBMWと開発チームが「回収された中古EVバッテリーをSTRに搭載するセカンドライフ構想」を明確に見送り、「BMW i3用の新品バッテリーモジュールを直接搭載する設計」へと方針転換した事実を明記している。この設計決断は、以下の2つの定量・工学的理由に基づくものであった。
第一に、当時の市場環境ではBMW i3から寿命を迎えてメーカーへ返却される使用済みバッテリーの絶対数が極めて少なく、工場へ100台、さらには1,000台規模で量産配備されるSTRの生産計画に対して安定供給が成立しなかったことである。第二に、将来的に中古バッテリーの返却量が増加した場合であっても、全高222 mm・自重175 kgという厳しい空間・重量制約を持つ移動体（AMR）に劣化したモジュールを積むより、ライプツィヒ工場の風力発電設備に併設された定置型蓄電施設（Battery Storage Farm）のような中間電力貯蔵システムへ充当する方が、エネルギー効率および経済性の面で遥かに優れていたことである。結果として、EV量産ラインで厳しい自動車品質基準（耐振動性、熱安全性、高エネルギー密度）をクリアして大量生産されているBMW i3用新品バッテリーモジュール（48 V構成）をグループ内調達で流用したことにより、STR / iw.hubは一般的な産業用AMRを凌駕する連続8時間以上の重負荷稼働性能と車載グレードの信頼性・コスト競争力を獲得した。

1.4 100%子会社「IDEALworks」へのスピンオフとAgile Robots傘下への資本進化（2020年～2026年）

2019年のドイツ物流賞受賞後、外部の製造・物流企業からSTRおよびフリート管理ソフトウェアの外販を求める要望が相次いだ。BMWグループは、内製したロボティクス資産を自社工場内だ

けに閉じるよりも、独立法人として外販し、多様な業界の稼働データと量産スケールメリットを吸収する方が技術進化と投資回収の双方で合理的であると判断した。こうして2020年11月、BMWグループ100%出資子会社としてミュンヘンに「IDEALworks GmbH」が設立され、**STR**の商用モデルである「iw.hub」とクラウド管制基盤「AnyFleet（2026年3月にIdealworks OSへ改称）」の外販が開始された。BMWブランドを切り離した独立スピンオフ形態を採ったことには、競合する他の完成車メーカーやティア1部品メーカーが「ライバル社の内製設備」の導入に対して抱く心理的・取引上の障壁を払拭する狙いがあったと分析されている。
このスピンオフ戦略は着実な実績を結んだ。2021年7月にiw.hubが国際物流賞「IFOY Award 2021（AGV部門）」を受賞すると、2022年8月にはLinde Material Handling、同年10月にはSTILLという欧州マテハン最大手2社と相次いで販売・導入パートナーシップを締結し、欧州産業界への販売保守チャネルを確立した。さらにAI・ソフトウェア開発の加速とグローバル展開に向け、2023年11月にはシリーズA資金調達を通じてミュンヘンのAIロボティクス企業Agile Robots SE（AG）を過半数株主として迎え入れ、2025年9月16日にはAgile Robotsが残りの全株式を取得してIDEALworksを100%完全子会社化した（BMWグループは引き続き主要顧客兼長期戦略パートナーとして連携を継続）。
公式発表によれば、2024年時点でBMWグループ単独でも世界7工場（レーゲンスブルク、ディンゴルフィング、ミュンヘン、米国スパータンバーグ、オーストリア・シュタイヤー、英国ハムズホール、ライプツィヒ）において**1,000**台以上の**iw.hub**が稼働し、総合設備効率（OEE）98.5%、1日あたり30,000ミッションの自律搬送を処理している。外販実績においても、トヨタ北米拠点（Toyota North America）という競合完成車メーカーへの採用を実現したほか、DRÄXLMAIER、Shape Corp、MoldTecs（自動車部品）、CLAAS（農業機械）、Zalando SE（EC）、Geis Group、Noerpel（物流）へと顧客基盤を広げ、2026年4月には米国サウスカロライナ州グリーンビルに北米本社「Idealworks Inc.」を設立している。

第2章「STR / iw.hub」のハードウェア詳細諸元・駆動機構・オンボードAI電装アーキテクチャ

2.1 超低床222mmプロファイルと自重比約5.7倍（1,000kg可搬）の機械構造・リフティング仕様

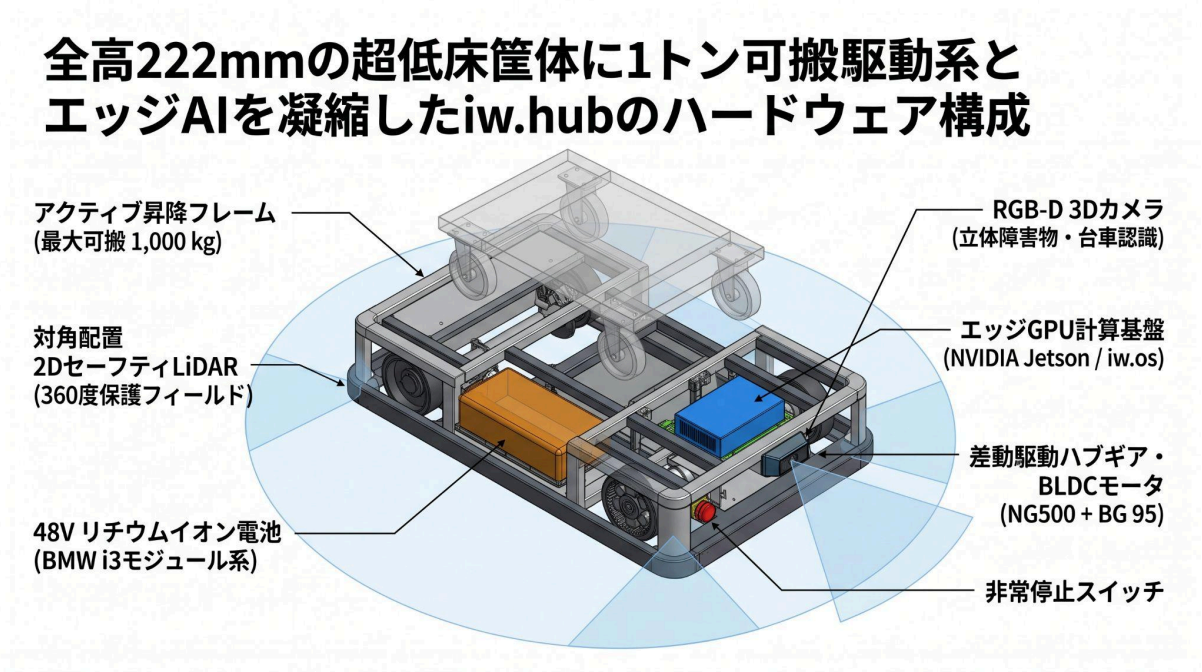
IDEALworksの公式ファクトシート（2025年9月改訂版）によれば、iw.hubの機体外形寸法は全長**1,440 mm** × 全幅**641 mm** × 全高**222 mm**（ドイツの物流エンジニアリング企業IWL AGの技術解説では220 mm / 222 mmと表記）、機体自重は**175 kg**であり、この軽量・超扁平な筐体で最大1,000 kg（2,204 lbs）の積載物を自立的にリフトアップして搬送する。自重に対する最大可搬重量の比率は約5.7倍に達し、保守時の内部アクセス性を高めたモジュール式スチールフレーム構造によって過酷な工場運用環境（周囲温度5〜45℃、45℃時最大相対湿度50%）への適合を実現している。
機体天面にはアクティブ昇降リフティングフレーム（Carrier-System）が組み込まれており、20種類以上の異なる搬送キャリアに対応する。対応フォーマットには、長辺最大1,750 mmまでの各種ローラー台車（Dolly / Rolluntersetzer）をはじめ、ユーロパレット（1,200 × 800 mm）、インダストリアルパレット（1,200 × 1,000 mm）、デュッセルドルフパレット（600 × 800 mm）、およびユーロメッシュボックス（Gitterbox）が含まれる。また、用途に応じた上部拡張モジュールとして、標準潜り込み仕様（Standard underride）、パレット自動受渡し用のパレットドック拡張（Pallet dock extension）、コンベヤラインと直結して連続移載を行うコンベヤベルト拡張（Conveyor belt extension）、走行中に積載物の向きを整列・方向転換させる標準ターンテーブル（Standardized turntable）の4形態が提供されている。
ここで生産技術者が押さえるべき公開仕様と非公開パラメータの境界が2点ある。第一に、IDEALworksの公開データシートにはリフティングフレームの正確な昇降ストローク数値（**mm**）および昇降アクチュエータの具体的駆動方式（電動スピンドル式か電動油圧式か等）は公表されていない。ただし、搬送キャリア側の必要下部クリアランスが最低220 mmと規定され、機体全高が222 mm近傍で設計されていることから、数センチメートルのショートストローク昇降によって台車キャスターを床面から浮かせ、低重心のまま安定搬送する設計であることが構造上確認できる。第二に、全高222 mmというプロファイルゆえ、**iw.hub**単体では床面に直置きされた標準パレット

やメッシュボックスの下へフォークのように直接潜り込んで持ち上げることはできない。そのため、パレット搬送時にはローラー台車と組み合わせるか、受渡し拠点に設置した専用架台「パレットドック（Pallet Dock）」と機体側のパレット拡張モジュールを介して自動移載する運用を採る（なお、床置きパレットの直接荷役や最大800 mm高さへの棚・コンベヤ移載向けには、全方向移動式の別モデル「Floor-to-Station Pallet Transport（最大可搬1,300 kg）」が製品群として別途用意されている）。

2.2 差動駆動トラクション機構（Framo Morat × Dunkermotoren）と24時間3交代稼働の電力マネジメント

足回りの走行駆動方式について、IDEALworksは研究用のヒューマノイド移動基盤（HMP）や前述のパレット搬送機では全方向移動（Omnidirectional drive）を採用する一方、主力機である**iw.hub**には構造信頼性と高速直進性に優れる「差動駆動方式（**Differential drive**）」を採用している。これにより、狭いライン脇でのその場旋回（超信地旋回）と、1,000 kg積載時における最高走行速度2.2 m/s（時速約8 km/h、4.9 mph）の機敏な走行を両立している。
全高222 mmの薄型シャシー中央左右に配置され、1トンの荷重を支えながら大トルクを伝達する中核駆動部が、ドイツの駆動機器メーカー**Framo Morat**社と**Dunkermotoren**社が共同開発した一体型トラクションドライブユニットである。Framo Morat社の公式技術発表によれば、減速機側にはホイール内部に遊星歯車機構を直接統合し独立ホイールベアリング構造とした高出力密度ハブギア「カスタムNG500」を採用している。**iw.hub**専用に最適化された16:1の減速比を持ち、車輪**1**輪あたりの許容ラジアル荷重は約500 kg（左右2駆動輪で約1,000 kgの積載質量を支持可能）に達する。外周には交換作業性に配慮したポリウレタン（PUR）ホイールを装着し、設計寿命は最大**30,000**時間という長期連続稼働スペックを確保している。このNG500に標準フランジで直結されるのがDunkermotoren製ブラシレスDC（BLDC）モータ「BG 95」であり、精密な速度・位置制御を担うデュアルエンコーダシステムと内蔵ブレーキを単一ユニット内に収めている。
サスペンションおよび傾斜路走行性能に関しては、公式発表においてスロープ（傾斜ランプ）上でも精密なリフトアップと路面追従走行が可能であることが示されている。同クラスの欧州製AMRでは駆動輪の接地圧を維持する揺動軸（Pendelachse）機構が広く用いられるが、iw.hub固有のサスペンションばね・リンク構造の詳細寸法は公開仕様書に記載されていない。
電力マネジメントでは、BMW i3用モジュールを起源とする**48 V**リチウムイオンバッテリーを内部に搭載し、高負荷運用でも連続**8**時間以上（**1**シフト相当）の稼働時間を確保している。**24**時間**3**交代稼働を支えるため、現場には**230 V**電源仕様の自動充電ステーションが配備される。統合管制システム（Idealworks OS / 旧AnyFleet）がフリート全体の稼働率と電池残量を監視し、ミッション間の待機時間に自動で中間充電（Intermediate charging）へ誘導する電力運用を行う。機体は充電ステーションへの接近時に自動で状態確認を行う仕組みを備えるが、給電インターフェースの詳細方式（接触式コンタクトパッドか非接触誘導方式か）の型番等は公式ファクトシート上では非公開となっている。

2.3 オンボードAI計算基盤（NVIDIA Jetson / iw.os）と対角LiDAR・RGB-Dセンサフュージョンによる自然特徴点SLAM



iw.hubの電装パッケージングは、高さ222 mmのスチールフレーム内部に、左右のハブギア駆動ユニットおよび48 Vバッテリーと並べて産業用エッジGPUコンピュータを収め、外装の前後対角コーナー2箇所にセーフティレーザースキャナ、前面に3D深度カメラ、シャシー側面に非常停止スイッチを機能的に配置した高密度構成を採る。すべての知覚・自己位置推定・経路生成・安全判断はクラウドではなく車載エッジ側でリアルタイム処理される。
車載ソフトウェア基盤である独自OS「iw.os」は、ナビゲーション・知覚・意思決定の各コンポーネントを個別に更新可能なモジュラー構造かつハードウェア非依存設計となっており、**ROS 2**ノードとの連携にも対応する。オンボード**AI**演算モジュールには、量産機および**2026**年公表の**IDEALworks R&D**センター実機ベンチマークにおいてNVIDIA Jetson AGX Xavierが搭載されていることが確認されているほか、**NVIDIA**とのエコシステム統合発表では後継のNVIDIA Jetson Orin（NVIDIA JetPack SDK活用）によるリアルタイム処理高速化が導入されている。
環境認識のためのマルチモーダル・センサパッケージは、IWL AGの技術仕様解説およびIDEALworks・NVIDIA関連の実機研究論文によれば以下の構成で実装されている。前後対角コーナーに配置された2基の2Dセーフティ LiDAR「SICK microScan3 Pro」が水平**360**度全方位を死角なく走査し、人物検知保護フィールド監視と**2D LiDAR SLAM**の主センサとして機能する。これに加え、機体前方に搭載された産業用**RGB-D 3D**カメラ「LIPSedge AE400」（LIPS製）が前方空間の立体障害物を捉えるとともに、ローラー台車やキャリアの下へ潜り込む際に荷姿・脚位置を3次元で動的認識してピックアップ精度を担保し、さらに内蔵IMU（慣性計測装置）とホイールエンコーダ情報が融合される。
このセンサ構成により、床面の磁気テープ、誘導線、反射板、QRコード等のインフラ追加工事を一切不要とする自然特徴点SLAM（フリーナビゲーション）が稼働する。工場本番環境で運用されている標準ナビゲーションスタック（**IW Nav**）は、**LiDAR**ベースのグローバルプランナとローカルプランナを組み合わせて動的障害物を即座に回避・迂回する。さらに**2026**年**3**月には、**IDEALworks**と**NVIDIA**が**GPU**アクセラレーションを用いた**Visual SLAM**「NVIDIA cuVSLAM」の共同ホワイトペーパーを発表（GTC 2026の基調講演でも2度紹介）し、荷物の積み替えで周囲形状が絶えず変化する複雑な倉庫・工場環境での高精度自己位置推定を実証した。加えて2026年10月には、NVIDIAの移動基盤モデル「X-Mobility / COMPASS」に世界基盤モデル「NVIDIA Cosmos」の合成データを組み合わせた学習型ナビゲーションポリシーをiw.hubの車載Jetson AGX Xavier上で直接推論実行するSim-to-Realベンチマークも公開されており、Physical AI実装の最前線となっている。

2.4 無人搬送車安全規格「EN ISO 3691-4」準拠の動的保護フィールドとハードウェア安全設計

最大荷重1,000 kgを積載し秒速2.2 m（約8 km/h）で有人作業エリアやフォークリフト動線を混在走行するため、iw.hubは無人搬送車の国際機械安全規格「EN ISO 3691-4」に準拠し、欧州CE認証および北米ANSI/RIA R15.08認証を取得している。
安全制御の要となるのが、対角2基のSICK microScan3 Proが形成する360度セーフティフィールドにおける速度・状況連動型のアダプティブ保護フィールド切り替えである。機体の現在速度（最大8 km/h）や旋回軌道、混在交通の密度に応じて保護領域を動的に伸縮させ、見通しの良い直線通路では高速搬送を維持する一方、作業員やフォークリフトの接近時・狭隘路進入時には保護フィールドと車速を連動制御して安全に減速・回避または停止する。また、床面から高さ**200 mm**未満の低位置障害物検知性能を備えるとともに、RGB-Dカメラによる3D障害物回避を組み合わせることで立体的な接触リスクを排除している。なお、ドイツ技術者協会のAGV設計指針「VDI 2510」に基づく運用要件として、幅1.20 mの積載キャリアを搬送する際は左右各0.60 mの安全余裕幅を加えた最小通路幅**2.40 m**を確保する設計基準が示されている。
ハードウェア非常停止および周囲作業員への視認性対策としては、シャシー外装に直接操作可能な非常停止スイッチを備え、駆動系にはデュアルエンコーダ監視と内蔵機械ブレーキを持つBG 95モータを採用している。また、全高222 mmの超低床機体が棚陰やフォークリフト運転席からの死角に入るリスクを補うため、オプションの視認用セーフティフラッグ（Safety flag）が用意されている。なお、EN ISO 3691-4およびCE準拠に伴う表示灯（LED発光パターン）や警告音（音圧dB値等）の具体的な個別パラメータについては公開ファクトシート上では詳細数値が記載されていないものの、学習型AIローカルプランナの実機評価時にもEN ISO 3691-4準拠のセーフティスキャナ保護回路を下位に独立介在させることで、ソフトウェア推論層に依存しないハードウェア安全担保が徹底されている。

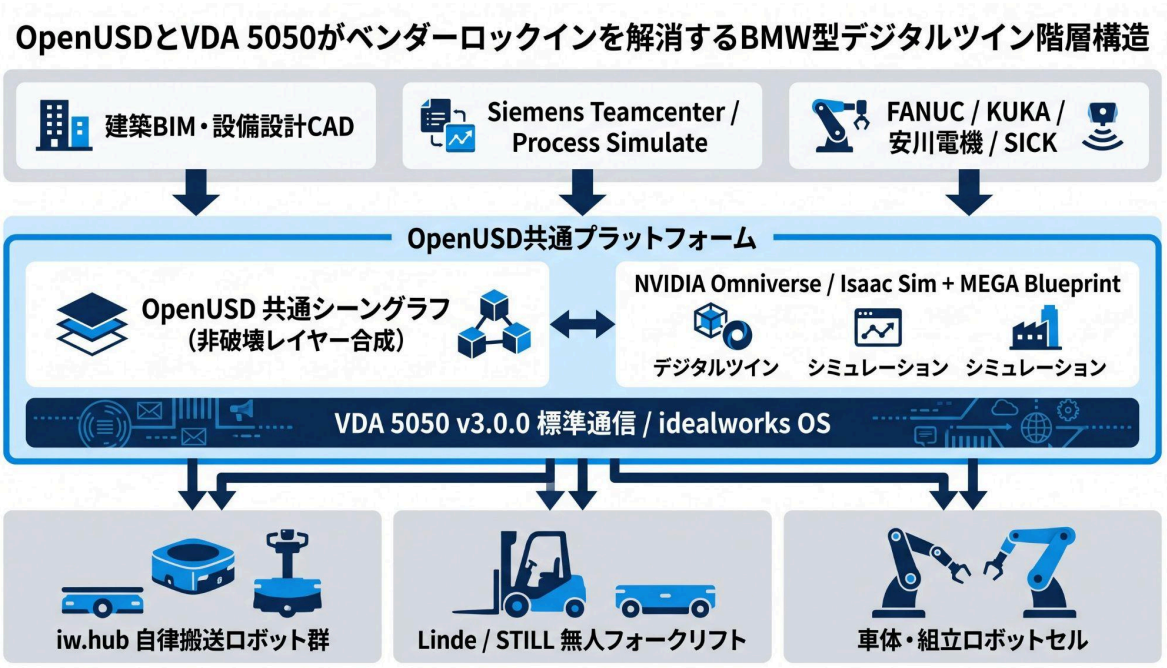
2.5 BMW STR（iw.hub）主要技術諸元と従来型磁気AGVの比較表

以下の表に、自動車工場で従来運用されてきた床面磁気誘導型AGV、BMW初期試作機（STR第1世代）、および現行商用機（STR第2世代／iw.hub）の主要技術諸元比較を整理する。

評価・技術項目	従来型床面磁気誘導AGV（車体・物流標準機）	BMW 第1世代 STR（2016年試作機）	BMW 第2世代 STR / IDEALworks iw.hub
機体寸法（全長×全幅×全高）および自重	機種依存（一般に車高が高く230 mm未満の既存低床台車への潜り込みに制約）	高さ230 mm未満のコンテナ潜り込み対応設計（詳細自重非公表）	1,440 × 641 × 222 mm・自重175 kg（モジュール式スチールフレーム）
最大可搬重量および最高走行速度	500～1,000 kg級・最高速度1.0～1.5 m/s程度（固定誘導軌道上）	最大550 kg・最高速度1.2 m/s	最大1,000 kg（自重比約5.7倍）・最高速度2.2 m/s（約8 km/h）
誘導・ナビゲーション方式および床面工事	床面磁気テープ・誘導線・QRコード追従（レイアウト変更時に床工事が発生）	センサベース自律走行（初期経路計画システム）	自然特徴点LiDAR SLAMおよびcuVSLAM（床面マーカー・施設改造不要）
駆動機構・電源および充電マネジメント	汎用産業モータ・鉛蓄電池または汎用リチウムイオン電池	汎用駆動部品（連続稼働で一部耐久課題）・BMW i3電池モジュール（8時間稼働）	差動駆動（Framo Morat NG500減速比16:1＋Dunkermotoren BG 95）・48 V i3系電池（8時間超・230 V自動充電）
オンボード計算基盤・安全規格・通信標準	PLC制御・固定保護エリアスキャナ・ベンダー固有通信プロトコル	初期組込計算機・パイロット安全仕様	NVIDIA Jetson AGX Xavier / Orin（iw.os）・SICK microScan3 Pro×2＋LIPS AE400 3Dカメラ・EN ISO 3691-4 / CE / ANSI RIA15.08・VDA 5050

第3章 パートナーFA企業との連携とオープン標準規格

「OpenUSD」全面採用の戦略的狙い



3.1 BMW iFACTORYが特定FAベンダーによる垂直囲い込み（ロックイン）を拒絶した経営・技術的理由

2022年初頭にBMWグループが提示した生産戦略マスタープラン「BMW iFACTORY」において、物理空間の自律化を担う**STR / iw.hub**と対を成すデジタル基盤が、世界の全生産拠点を仮想空間に統合する「**Virtual Factory**（バーチャルファクトリー）」である。**BMW**は**2020**年からレーゲンスブルク工場を皮切りにディンゴルフィング、ライプツィヒ、中国・鉄西（**Tiexi**）工場等の**3D**デジタル化を推進し、ハンガリーのデブレツェン（**Debrecen**）新工場の建設にあたっては、現実の量産立ち上げ（**SOP**）の2年以上前からNVIDIA Omniverse上で仮想生産を稼働させる体制を実現した。

この全社デジタルツイン構築において、BMWが下した最も戦略的なアーキテクチャ判断は、特定の**PLM / FA**ベンダー**1**社のプロプライエタリ（独自仕様）なソフトウェア環境に全データを閉じ込める垂直囲い込み（ベンダーロックイン）を排し、**Pixar Animation Studios**が開発し**Linux Foundation**傘下の**Alliance for OpenUSD**（**AOUSD**）が標準化を統括するオープン**3D**記述フレームワーク「**OpenUSD**（**Universal Scene Description**）」を共通データ基盤に採用したことである。

完成車メーカーがこの選択に至った経営・技術上の理由は3つの構造的要因に整理できる。第一に、部門別エンジニアリングデータの分断解消である。自動車工場の設計には、建築BIM、プラント設備CAD、ロボット工程シミュレータ、物流計画ツールなど多種多様なソフトウェアが関与する。従来のように中間ファイル変換を繰り返す運用では、変換のたびに運動学定義や材質・物理メタデータが欠落し、データの再作成と不整合が常態化していたが、OpenUSDは建築・プラント・物流の全データをファイル変換の劣化なしに単一3D環境へ統合できる。第二に、**OpenUSD**が備える「非破壊レイヤー合成（**Non-destructive Composition**）」機構である。レイヤー、References（参照）、Payloads（遅延読み込み）、Overrides（差分記述）を用いることで、社内の複数拠点チームおよび社外の設備サプライヤーが、互いの元データを上書き破壊することなく並列かつリアルタイムに工場レイアウトを共同編集できる。第三に、調達主導権の確保と**AI**技術の迅速な取り込みである。特定ベンダーの独自シミュレータ形式にロックインされれば将来の設備・ソフト選定が制約されるが、Pixar、Adobe、Apple、Autodesk、NVIDIA等が参画するAOUSDの実装非依存オープン規格を基盤に据えることで、世界中の最適なFA機器や最新のPhysical AI

基盤を柔軟に接続できる拡張性を担保したのである。

3.2 Siemens・FANUC・KUKA・安川電機・SICK・Bosch Rexrothを統合するマルチベンダーエコシステム

OpenUSDとNVIDIA Omniverseを共通ハブとすることで、BMWの生産技術領域には日欧の主要FA・ロボット・センササプライヤー群がオープンコネクタやAPIを介して連携する水平統合エコシステムが形成されている。
PLMおよび工程シミュレーション領域では、**Siemens**が自社の「Teamcenter X」およびロボット・ライン工程シミュレータ「Tecnomatix Process Simulate」をOmniverse APIおよびOpenUSDで接続している。ロボットアーム単体や溶接セルの緻密な動作検証を得意とするProcess Simulateと、AMR・ヒューマノイドのフリートシミュレーションや物理ベース光学レンダリングを得意とするOmniverse / Isaac SimをOpenUSDで双方向連携させることで、既存エンジニアリング資産を活かしたまま工場全体の統合検証が可能となっている。また、工場実行系（OTスタック、MES、SAP S/4HANA等）との連携においては、3D空間記述のOpenUSDと産業通信標準のOPC UA等を組み合わせた双方向コネクタ構成が産業界の標準パターンとして実装されている（なお、BMW各ライン固有のPLCラダー・フィールドバス配線詳細までは外部公開されていない）。
産業用ロボットおよび周辺機器領域では、BMWの車体工場で数多く稼働するオレンジ色の**KUKA**製ロボットをはじめ、世界で合計200万台超の設置基盤を持つ**FANUC**、**KUKA**、安川電機（**Yaskawa**）、さらにABBやComauといった主要ロボットメーカーがNVIDIA Omniverseライブラリおよび Isaac Simの活用に参画している。なかでもFANUCは、84機種以上ものロボットモデルをマルチフィジックス対応のSimReady OpenUSD資産としてIsaac Simコンテンツカタログに提供しているほか、産業メディア（PLC Matrix）の報道によれば自社シミュレータ「ROBOGUIDE」やCNC制御器とOmniverseを連携させ、IMTS 2026ではJetson Thorによるエッジ熱変位補正や自律異常復旧、協働ロボットCRXへの基盤モデル（GR00T N）統合を実演する段階に達している。
また、ノーコード教示のWandelbotsもOmniverse連携を展開し、センサ・駆動制御領域ではiw.hubにLiDARを供給する**SICK**（およびTexas Instruments、Luxonis等）が公式のRTX LiDAR / カメラOpenUSDモデルを提供し、駆動・制御大手の**Bosch Rexroth**もスマートファクトリー・エコシステムに名を連ねている。

3.3 MEGA NVIDIA Omniverse BlueprintとVDA 5050 v3.0.0による異機種フリート統合制御

このマルチベンダーOpenUSD空間を工場内物流の実運用と直結させているのが、IDEALworksの統合管制システム「Idealworks OS（旧AnyFleet）」と「MEGA NVIDIA Omniverse Blueprint」、および標準通信インターフェース「VDA 5050」の統合アーキテクチャである。以下の図版に、設計・PLM層からOpenUSD / Omniverse中核層、そしてVDA 5050を介した現場エッジ機器層へと至る3階層エコシステム構造を示す。
実工場の物流現場では、低床潜り込み型のiw.hubだけでなく、LindeやSTILLの無人フォークリフト、他社製AGV、さらにはヒューマノイドロボット（2026年3月のGTC 2026ではSICKとIDEALworksがヒューマノイドとAGVの協調オーケストレーションを初披露）が混在稼働する。この異機種混在フリートの共通言語となるのが「VDA 5050」であり、**IDEALworks**は**25**名のコアチームの一員として**3**年間・**32**回のワークショップと**243**件超のプルリクエストを共同主導し、**2026**年**3**月**19**日に最新メジャーアップデート「VDA 5050 バージョン3.0.0」のリリースを実現した。v3.0.0では従来の定軌道AGV中心の仕様から大きく進化し、自律移動AMRネイティブな動的パス共有（Path sharing）やゾーンベース交通管理機能が標準化された。
さらに2025年以降、IDEALworksは独自シミュレータ「iw.sim」および「Idealworks OS」を大規模ロボット群検証用の**MEGA NVIDIA Omniverse Blueprint**と完全統合した。これにより生産技術部門は、物理ラインに一切手を加えることなく、高精度3Dスキャンと OpenUSDアセットで構築された工場デジタルツイン内でIdealworks OSの実ミッションロジックを走らせ、ロボット機種構成、最適台数、有人作業者との交差動線、デッドロック回避を事前検証・最適化して導入立ち上げ期間（ランプアップ）を大幅に短縮できるようになっている。

第4章 設備・部品サプライヤーに課される「SimReady（シムレディ）アセット」の技術要件

4.1 なぜ従来の3D CAD（STEP / IGES）や未構造化USDではデジタルツインが破綻するのか

完成車メーカーがOpenUSDベースのバーチャルコミッショニング（仮想試運転）とPhysical AI学習を標準業務化するにつれ、生産設備・治具・搬送機器・標準部品サプライヤーが納品する3Dデータには根本的な変革が求められている。従来の設備調達で用いられてきた3D CADデータ（STEP、IGES等のB-Rep形状データ）は、設計図面の作成と静的な寸法・外観確認のみを意図したデータであり、そのまま物理・センサシミュレーションへ投入すると深刻な技術的破綻を引き起こす。

用語解説　バーチャルコミッショニング

> **OpenUSD**バーチャルコミッショニングとは、現実の工場にロボットやコンベヤを据え付ける前（建物すらまだ建っていない段階）に、「物理法則が働く仮想の**3D**工場」の中で実際の制御プログラムや**AI**を動かし、機械同士の衝突やカメラの死角、通信エラーなどのトラブル出し（試運転）を**100%**終わらせてしまう手法です。
>
> この言葉は、前半の「OpenUSD（オープン・ユーエスディー）」と、後半の「バーチャルコミッショニング（仮想試運転）」の2つに分解すると、一気にイメージが掴めます。
>
> **1.** 言葉を**2**つに分けて理解する
>
> - 後半：バーチャルコミッショニング（**Virtual Commissioning** ＝ 仮想試運転）
> - 工場用語の「コミッショニング（試運転・立ち上げ調整）」とは、機械を工場の床にボルトで固定した後、実際に電気を通して動かし、「あ、ロボットの肘が柱にぶつかる！」「センサーが光に反射して誤作動する！」といった不具合を現場で一つずつ手直しして、量産できる状態に仕上げる作業のことです。
> - 従来はこの作業に現場で数ヶ月かかり、その間は工場のラインを止めなければなりませんでした。これを現実の機械ではなくコンピュータの仮想空間の中で先に済ませてしまうのが「バーチャルコミッショニング」です。
> - 前半：**OpenUSD**（**Universal Scene Description** ＝ **3D**世界の共通言語）
> - もともと映画『トイ・ストーリー』を作ったピクサー（Pixar）が開発した、3D空間を記述するためのオープン（無料・公開）な共通ファイル規格です。いわば「3D世界のHTMLやPDF」にあたります。
> - これまでの工場設計では、建物の設計ソフト（BIM）、ファナックのロボットソフト、シーメンスの制御ソフトなど、メーカーごとにデータ形式がバラバラで、1つの画面に合体させるとデータが壊れていました。OpenUSDを使うと、世界中の違うメーカーのロボット、コンベヤ、AMR、人間作業員を、重力・摩擦・カメラの光の反射まで含めて「**1**つの仮想工場（**NVIDIA Omniverse**など）」の中にそのまま合体させることができます。
>
> **2.** 従来の**3D**シミュレーションと何が決定的に違うのか？
>
> 受講者（生技やFAメーカー）にとって一番重要な違いは、単なる「CGアニメの確認」ではなく、「本物の工場の制御盤（PLC）やAIと直接つないでテストする」という点です。

比較項	従来のやり方（現地での現	**OpenUSD**バーチャルコミッショニング

目	物合わせ）	
いつやるか	建物が完成し、ロボットや治具を床に据え付けた後（量産開始の数ヶ月前）	まだ更地で基礎工事をしている段階（BMWハンガリー新工場では量産開始の**2**年以上前に実施）
データの状態	外観の形だけの3D CAD（重さも摩擦も光の反射もない「ハリボテ」）	SimReady（シムレディ）データ（重さ、重心、滑りやすさ、LiDARレーザーの反射率まで入っている）
何が検証できるか	狭い範囲でアームが壁に当たらないか程度。現場に行くと必ず想定外のトラブルが出て削り直しになる	本物の制御機器（PLC）や群管理ソフトを仮想工場に繋ぎ、何百台ものAMRの渋滞、照明の映り込みによるAIカメラの誤判定まで事前に潰せる
手戻りコスト	現場で治具を作り直したりラインを長期停止したりして莫大な費用と時間が消える	画面上で配置をマウスでズラすだけなので、計画工数・手戻りコストが約**30%**削減される

具体的には、設計CADには外から見えない筐体内部の部品や微細形状まですべて含まれているため、そのまま変換すると数百万個の三角形メッシュとなってGPUメモリとレイトレーシング・物理演算速度を著しく低下させる。同時に、質量・重心・慣性モーメント・摩擦係数・関節の回転軸や可動域といった物理・運動学情報が欠落しているため、重力やトルクを与えた瞬間に正しい挙動を示さない。さらにRGBの見た目色しか持たないため、カメラの光学反射やLiDAR・超音波センサの反射特性も再現できない。
加えてNVIDIA公式のSimReady FAQ（2026年11月更新版）が明確に指摘している通り、「単にシミュレーション用数値を構造化せずに**USD**ファイルへ詰め込むだけ」でも問題は解決しない。たとえばケーブルの剛性や許容曲げ半径を特定ソルバー固有の無名配列（float4配列など）としてUSDに書き込んでも、他社ツールやAIエージェントはその配列の意味を解釈できず（Opaque）、

検証ツールも「数値が物理的に妥当か」を検査できない（Unvalidatable）からである。このため、OpenUSD（参照実装）とAOUSD（基本標準）の上に、産業用途別の命名・型付けされた物理属性、実寸スケール、セマンティックラベル、ジオメトリ品質基準を積層した上位規格として「SimReady（Simulation-Ready）仕様」が策定され、将来的にAOUSDのUSD Multi-Part Specificationへ統合されるロードマップが敷かれている。

4.2 SimReady Foundation（2026.08.0仕様・202要件）の解剖：剛体物理・運動学・非可視センサ反射・視野定義

SimReady仕様を機械的に実装・検証するツール基盤である「SimReady Foundation」は、最小単位の検証規則である「Requirement（要件）」、関連要件を束ねる「Capability（能力）」、機能単位の「Feature（特徴）」、そして用途別の最上位契約である「Profile（プロファイル）」の4階層で構成される。リリース「2026.08.0」時点の公式メタデータレジストリには（既存プロファイルの必須・オプション規則および計画中拡張コードを含め）合計**202**項目の要件コードが定義されており、サプライヤーが対応すべき技術要件は以下の6領域に集約される。

1. 実寸単位系・座標軸・シーングラフ階層および来歴メタデータ（**UN / HI / NP / SR**）：異なるCAD出身のアセットを混在させても物理計算が狂わないよう、ステージの上方向軸はZ軸アップ（upAxis = "Z"：要件コード UN.006）、長さ単位は1.0メートル（metersPerUnit = 1.0：UN.007）、物理剛体を含む場合の質量単位はキログラム（kilogramsPerUnit：UN.003）に厳格規定される。すべての要素は単一のXformableなルートプリム（defaultPrim）の配下に階層化され（HI.001、HI.003、HI.004）、原点(0,0,0)に正しく配置される（VG.025）。参照パスは相対パスまたはアンカー付きパスに統一し（NP.007、AA.001）、来歴（Provenance）メタデータと代表サムネイルを保持する（SR.001、SR.002、SR.004）。
2. シミュレーション最適化ビジュアルジオメトリ（**VG**）：レンダリング性能と自動コライダー生成（凸包・凸分解）の安定性を確保するため、メッシュは有効な多様体トポロジー（Manifold：VG.007、VG.014）かつ三角形分割済み（Triangulated：VG.021）であり、正確な法線ベクトル（VG.027、VG.028）を持つ必要がある。特にCADからの変換時に不可欠な品質要件が、外部から視認できない密閉内部ジオメトリの除外（VG.003）と過剰なポリゴン分割（テッセレーション密度）の抑制（VG.013）である。
3. 剛体物理プロパティと衝突判定コライダー（**UsdPhysics**：**RB / PMT / COL**）：対象物やロボットリンクには剛体定義（RB.001、RB.003）と正の質量（physics:mass：RB.007、RB.011）が必須であり、密度・重心（Center of Mass）・慣性テンソルを記述する場合は相互に物理的整合性が取れていること（RB.008）、かつスキュー（剪断歪み）変換を含まないこと（RB.009）が要求される。また、高速接触計算用の不可視コリジョン形状（purpose = "guide"：RB.010、CollisionAPI適用：RB.COL.001～004、SDF衝突近似：COL.001）を設定し、静摩擦係数・動摩擦係数・反発係数を持つ物理マテリアル（PhysicsMaterialAPI）をバインディングする（PMT.001）。さらにIsaac Sim 6.0環境では、従来のNVIDIA PhysXに加え、新物理エンジン「Newton」や「MuJoCo」に対応するマルチフィジックス属性もFeature Adapterを通じて変換・適用可能となっている。
4. 関節運動学・単一**Articulation**正規化・グリッパ把持定義（**JT / HI.009 / GR / GSP**）：ロボットや可動治具では、リンク階層で運動学チェーンを表現し（HI.009）、剛体間をジョイントで接続して可動域制限（Limits）およびドライブ剛性・減衰ゲインを設定する（JT.001）。実装上極めて重要な規則として、ロボットアーム先端にグリッパを結合したアセンブリでは、全体で**UsdPhysics.ArticulationRootAPI**を最上位の**1**箇所のみに保持し、エンドエフェクタ側に残る従属ArticulationRootを削除（剛体・ジョイント定義自体は維持）して正規化しなければならない。また、グリッパ向け仕様（GR系コード）では指パッド間の把持中心ソケット（GR.001）、進入方向軸（gripper_forward_axis：GR.002）、把持軸ライン（gripper_grip_line：GR.003）、最大開口幅メートル値（gripper_maxOpening：GR.004）が規定され、ワーク側にも把持対象ライン（GSP.001）が定義される。なお、電気・熱・流体・制御の動的挙動モデルを同梱する**FMI / FMU**（**Functional Mock-up Interface / Unit**）の**USD**マッピングも次世代拡張として試作が進められている。**5.** 光学**PBR**材質（**MDL**）・非可視センサ反射特性・センサ視野スキーマ（**VM / NVM / Sensors**）：カメラや深度センサのレイトレーシング再現に向け、外観材質を**NVIDIA MDL**による物理ベースマテリアル（粗さ、金属反射、透明体屈折等）へ変換する。これに加え、工場内**AMR**の安全・認識検証で

決定的な役割を果たすのが**LiDAR**・レーダー・超音波といった非可視センサ向け属性であり、マテリアルに**omni:simready:nonvisual:coating**（塗装なし none、塗装 paint 等の有効コーティング種別）を設定してレーザーや音波の反射特性を定義する。さらにセンサ本体アセット（Sensorプロファイル群）においては、Isaac Sim 6.0より従来のOmniGraph依存を脱し、カメラのISP前後光学パイプライン、構造化光パターン投影タイミング、RTX LiDAR全周点群取得、RTX超音波、および起点・方向・時間オフセット・視野（FoV）を定義可能なRaycast物理センサをネイティブ**USD**スキーマとして内包する仕様へと刷新されている。

5. **AI**認識・合成データ生成用セマンティックラベル（**SL / Tax**）：仮想空間でのAI視覚モデル学習（セマンティック・ビンピッキングや障害物分類等）を自動化するため、マテリアルラベル（SL.MAT.001）、Wikidata Q-Code（SL.QCODE.001）、およびCOCOやADE20K等の標準語彙に準拠した静的セマンティックラベル（SL.TIME.001）をプリムに付与する。

4.3 バーチャルコミッショニングを完結させる2段階検証パイプライン（静的ルール検証とランタイム検証）

工場建設やライン改修の前に仮想空間上でAMRの走行テスト、ロボット干渉検証、LiDAR・カメラの死角検証（バーチャルコミッショニング）を確実に遂行するため、SimReadyエコシステムではアセット単体の「静的ルール検証」と実シミュレータ上での「ランタイム実行検証」からなる**2**段階検証（**Two-Step Validation**）パイプラインを標準ワークフローとして課している。以下の複合ビジュアルに、主要Capability別の規定要件コード数と、CAD / URDF原図から検証・納品に至る5ステップの実務パイプラインを示す。
サプライヤー側でのアセット作成においては、まず自社の納入品目に対応するターゲットプロファイル（台車・治具・ラック等の静物・搬送物なら Robotics-Prop 系、ロボットやAMR本体なら Robot-Body 系、ハンド・クランプなら Robot-Gripper 系）を選定し、CAD ConverterやURDF / MJCF Importerを用いてOpenUSDへ変換したのち、前述の物理・材質スキーマを付与する。その上で以下の2段階の検証を実行する。

1. 第**1**段階：静的アセット検証（**Static Validation**）：Pythonベースの検証ルールエンジン（simready-validate CLIまたは simready.validate API）を用い、シミュレータを起動せずにUSDプリム・属性・APIを網羅検査する。ここでは存在・型・数値範囲を調べる**1**次検証（**Primary Validation**）（例：Z軸アップ UN.006、法線保持 VG.027）だけでなく、複数属性間の共依存関係や物理的整合性をチェックする**2**次検証（**Secondary Validation**）（例：質量・密度・慣性テンソルの整合性 RB.008）が実行され、違反項目は該当USDプロパティ名と要件ID付きのHTMLレポート（.metadata/<asset>_validation.html）として出力される。
2. 第**2**段階：ランタイム実行およびシーン統合検証（**Runtime Execution**）：個別の静的ルールを通過したアセットであっても、複数機器を組み合わせた工場シーン（Isaac SimやMEGA等）で動かすと、関節ゲイン不適合による発振、把持摩擦の不足、センサプリムのロボット本体からの孤立（Orphaned prims）、参照アークの不整合といった動的エラーが発生し得る。そのため、simready-benchmark ツール等を用いてターゲット物理エンジン上でライブシミュレーションを実行し（カタログ登録時は1アセットあたり約15分のベンチマークを実行）、実際の物理挙動・関節駆動・把持・視覚出力を確認することが必須とされている（ベンチマークをスキップしたアセットは公式カタログへの受理対象外となる）。

4.4 従来型3D CADデータとOpenUSD SimReadyアセットの技術仕様比較表

以下の表に、従来の設備調達で授受されてきた3D CADデータ、特定ベンダー専用シミュレータモデル、およびBMW・NVIDIAエコシステムが求めるOpenUSD SimReadyアセットの技術仕様差を比較する。

技術仕様・評価軸	従来型3D CADデータ（STEP / IGES等）	従来型特定ベンダー専用シミュレータモデル	OpenUSD SimReadyアセット（AOUSD / NVIDIA準拠）
主たるデータ目的とジオメトリ構造	設計図面・静的外観寸法確認用のB-Rep形状（内部微細部品を含む	特定ベンダー製ソフト内での簡易動作・干渉確認用メッシュ	不可視内部形状を排除し多様体三角形化したGPU物理AI・異機種統

技術仕様・評価軸	従来型3D CADデータ（STEP / IGES等）	従来型特定ベンダー専用シミュレータモデル	OpenUSD SimReadyアセット（AOUSD / NVIDIA準拠）
	過剰ポリゴン）		合検証用構造
剛体物理・運動学・把持プロパティ	非保持（質量・重心・慣性モーメント・摩擦係数・関節可動域・駆動ゲイン情報なし）	ツール独自形式で個別後付け（他社環境へ出力すると消失し互換性がない）	UsdPhysics標準保持（質量・重心・慣性テンソル・摩擦・単一Articulation・把持軸定義）
光学カメラ・非可視センサ・視野対応	不可（単なる表示色のみで光学反射やレーザー・超音波減衰の物理再現不可）	限定的（簡易的な幾何学視野コーン表示にとどまり物理ベース反射計算に非対応）	MDL物理ベース光学材質・LiDAR等向け塗装反射属性・センサ視野/ISPスキーマを標準保持
データ可搬性・階層合成・自動検証	変換時に属性消失・多部門の非破壊並列編集不可・シミュレーション検証規約なし	特定ベンダー環境へのロックイン（異機種AMR群制御やAI学習基盤との直結が困難）	AOUSD統括オープン規格・非破壊レイヤー合成・全202要件コードとランタイムによる2段階検証

第5章 治具・FA標準部品・ロボットメーカーのビジネスモデルへの波及（サプライヤー生き残り要件）

5.1「SimReady Central Library」公開（2026年10月）とAIエージェント自動選定がもたらす調達構造の激変

「ハードウェア現物とセットでSimReady準拠のOpenUSDモデルを提供できるか否か」が、先進OEM向けの付加価値からグローバルFA調達の必須条件へと移行しつつある象徴的事象が、2026年10月21日にNVIDIAとHugging Faceが公開した「SimReady Central Library」である。SimReady Central Libraryは、SimReadyプロファイル検証とランタイムベンチマークを通過した**2,000**点を超える**OpenUSD**アセット（NVIDIA公開データセット単体でも約490 GB規模）を、Hugging Face上で無料かつゲート制限なしで検索・利用できるオープンな連邦型（Federated）カタログである。ここにはすでに、ロボット・グリッパOEMとして**FANUC**（**84**機種以上）、**Comau**、**Universal Robots**、**Franka Robotics**、**Robotiq**、**Standard Bots**、インフラ・冷却設備OEMとして**Vertiv**、さらに家電・ロボティクス大手の**LG Electronics**らが公式検証済みアセットを公開している。

日本のFA機器・治具・標準部品メーカーの経営層が直視すべき構造変化は、このSimReadyカタログがフロンティア**AI**エージェント（**GPT-6 Astra**等）による自動セル設計・調達選定ワークフローと直結し始めた点にある。NVIDIAが公開した開発ワークフローでは、エンジニアが自然言語プロンプトで「倉庫またはラインのピック＆プレース工程を構築せよ」と指示するだけで、AIエージェントが以下の3ステップを自動実行する。

1. SimReady Search API（USD Search連携）にクエリを発行し、Hugging Face上のSimReady Centralから条件に合致するFANUC製ロボットアーム、互換性のあるRobotiq製グリッパ、および周辺ラック・搬送機材アセットを自動検索・選定する。
2. 選定した各OEMのOpenUSDアセットをステージへReference / Payloadとして読み込み、定義済みソケットに基づきワークセルを自動構築する。
3. Isaac Sim（PhysX等）上でタスクをシミュレーションするPythonスクリプトと再現環境構成を自動生成し、レンダリング映像を提示する。

これが設備・部品サプライヤーのビジネスモデルに与える影響は極めて大きい。BMWのデブレツェン工場のようにSOPの2年以上前からOpenUSD環境上でライン設計を固める完成車メーカーにおいては、**SimReady**準拠の**OpenUSD**モデルが存在しないロボット・台車・コンベヤ・標準部品は、初期構想段階の**AI**エージェント検索対象から完全に外れるうえ、生技エンジニア側で手作業のポリゴン削減や質量・コライダー設定を行う変換工数が敬遠され、初期スペックイン（**Design-In**）競争で著しく不利になるリスクが高い。逆に、いち早く自社カタログをSimReady化し

て供給できるメーカーは、顧客のデジタルツイン内に自社の型番が「検証済みの標準構成部品」として組み込まれ、そのまま実機発注へとつながる優位性を確立できる。

5.2 ステークホルダー別・生き残りに向けた技術対応プレイブック（完成車生技・ロボット**FA**・標準部品・機械安全）

本報告書の総括として、日本の自動車・FA産業を担う4つの主要ステークホルダーが推進すべき具体的な技術・事業対応を以下のマトリクスおよび実践指針にまとめる。

対象ステークホルダー	直面する構造的課題・リスク	最優先で構築すべき技術・調達アクション	準拠すべき主要規格・ツール群
完成車メーカー生技・設備企画（ホンダ・三菱自・カワサキモータース等）	特定PLM/FAベンダー囲い込みによるコスト高止まりと既存工場の磁気AGV硬直性	設備調達仕様書へのOpenUSD / SimReady納品要件の明文化とVDA 5050異機種AMR管制導入	OpenUSD / AOUSD・VDA 5050 v3.0.0・EN ISO 3691-4
ロボット・FAシステム開発陣（川崎重工・エトリア等）	FANUCや欧米勢のSimReady Central先行公開による海外OEM初期構想からの脱落リスク	主力機種のマルチフィジックス対応Robot-Body / Gripper資産整備とCI/CD自動検証ライン構築	SimReady Foundation 2026.08.0・PhysX / Newton・simready-validate
FA標準部品プラットフォーマー経営層（ミスミ等）	STEP/IGESのみのEC提供にとどまることによるデジタルツイン・AI自動設計圏からの疎外	パラメトリックCADから内部形状削除・質量/摩擦/MDL付与済OpenUSDを自動生成する基盤刷新	USD References / Overrides合成・VG.003 / RB.008 / PMT.001・SimReady Search API
機械安全研究機関（労働安全衛生総合研究所等）	安全柵なし高速混在AMR（2.2 m/s）および学習型Physical AI制御に対する従来型静的評価の限界	非可視センサ反射属性とSim-to-Real環境を用いた動的保護フィールド・AI安全分離検証手法の確立	EN ISO 3691-4・ANSI/RIA R15.08・omni:simready:nonvisual:coating

1. 完成車メーカー生産技術・設備企画部門への提言

AMR導入においては「市販品そのままの購入」か「ゼロからのフルスクラッチ内製」かの二択にとらわれず、自社のブラウンフィールド工場固有の物理制約（既存台車の下部クリアランス220～230 mm等）を見極めた上で、高耐久な市販標準駆動モジュール（NG500＋BG 95クラス）と自社の量産EV用新品バッテリーモジュール（48 V系）を組み合わせる車載グレード設計思想を取り入れる価値が高い。同時に、上位フリート通信をVDA 5050 v3.0.0に統一して特定**AMR**ベンダーへの依存を防ぎ、設備調達仕様書（**RFQ**）には従来の**3D CAD**図面と並べて「指定SimReadyプロファイルの検証レポートを伴うOpenUSDアセットの納品」を段階的に組み込むことが、SOP前の手戻り削減と立ち上げ短縮の要諦となる。

2. ロボット・**FA**システム開発メーカーへの提言

FANUCや欧米ロボット・グリッパメーカーがすでにSimReady Central Libraryを通じて無償・検証済みのOpenUSDモデルを世界中の開発者とAIエージェントへ配布している以上、日本のロボット・FAメーカーも早急なパイプライン整備が不可欠である。具体的には、設計CADおよびURDFからOpenUSDへの変換工程をJenkins等の社内CI/CDパイプラインに組み込み、simready-validate と simready-[span_409](start_span)[span_409](end_span)[span_411](start_span)[span_411](end_span)benchmark による自動検査を標準化すべきである。特にアセンブリ時の単一 ArticulationRootAPI 正規化ルール、グリッパの把持ソケット定義（GR.001～004）、およびPhysXと次世代Newton双方へのマルチフィジックス対応を確実に実装することが国際競争力の鍵を握る。

3. FA標準部品プラットフォーマー（カタログ・EC事業経営層）への提言

アルミフレーム架台、コンベヤ、リニアガイド、専用治具部品、搬送台車など膨大な型番と寸法バリエーションを抱えるFA標準部品プラットフォーマーにとって、SimReady対応は「2D図面から3D CADダウンロードへの移行」以来の重大な事業転換点である。数百万通りの型番を個別に手作業で変換するのは非現実的であるため、**OpenUSD**ネイティブのオブジェクト指向コンポジション（**Class / Instance**パターン）をパラメトリック**CAD**生成エンジンへ統合するアーキテクチャ刷新が推奨される。具体的には、部材の基本形状・MDL材質（アルマイト等の光学反射およびLiDAR用omni:simread[span_36](start_span)[span_36](end_span)y:nonvisual:coating）・物理摩擦係数（PMT.001）を共有クラス定義（Reference）として保持し、顧客が指定した長さやストロークに応じた質量・重心・慣性テンソル計算値（RB.008）や配置変換をインスタンス・オーバーライド（Overrides）として自動生成し、同時に不可視内部穴・微細ねじ山メッシュを自動除去（VG.003）する仕組みを構築する。ECサイト上で「STEP出力」と並べて「SimReady OpenUSD出力」を網羅的に提供できれば、世界中のデジタルツイン設計およびAIエージェント自動設計におけるデファクト標準部品インフラとしての主導権を握る公算が大きい。

4. 機械安全研究機関への提言

BMWの7工場で1,000台以上が稼働するiw.hubのように、最大1トンの重量物を載せたAMRが秒速2.2 mで有人通路を走行し、さらにcuVSLAMや基盤モデル（COMPASS / Cosmos）のようなAIアルゴリズムが実装される現場では、固定柵を前提とした静的な安全評価だけでは不十分となりつつある。機械安全研究機関には、**EN ISO 3691-4**に基づくアダプティブ保護フィールドの動的切り替え特性や床面摩擦変化時の制動距離に加え、金属治具の鏡面反射や黒色塗装部材によるレーザースキャナ減衰（omni:simready:nonvisual:coating で再現）をデジタルツイン空間上で網羅的に検証する「シミュレーション駆動型・動的リスクアセスメント手法」の研究開発が求められる。あわせて、上位のAI経路生成系に推論異常が生じた際にも、下位の独立したセーフティLiDAR保護回路とデュアルエンコーダ・機械ブレーキ系が確実に介入して安全停止を担保する「Physical AI時代の機能安全設計ガイドライン」を整備・普及させることが期待される。

参照一次情報・公式発表リスト

本報告書の執筆にあたり参照・検証した英語・ドイツ語の一次公開資料、公式仕様書、および技術論文の出典タイトルとURLは以下の通りである。

1. **Fraunhofer IML** 公式技術誌（ドイツ語一次資料）：*Logistik entdecken Magazin Nr. 19 — Gemeinsam mit der BMW Group hat das Fraunhofer IML den Smart Transport Robot (STR) entwickelt*（STR第1・第2世代の諸元進化、BMW i3セカンドライフ電池構想の見送り理由と新品モジュール採用、レーゲンスブルク工場パイロット詳細） — https://www.iml.fraunhofer.de/content/dam/iml/de/documents/OE%20983/Presse/Logistik%20entdecken/Logistik_entdecken-19_WEB.pdf
2. **BMW Group PressClub** 公式発表（**STR**導入・**IDEALworks**設立・**Agile Robots**出資）：*BMW Group introduces self-driving robots in supply logistics* — https://www.press.bmwgroup.com/portugal/article/detail/T0257791PT/bmw-group-introduces-self-driving-robots-in-supply-logistics ／ *BMW Group founds company: IDEALworks GmbH to develop and distribute innovative robots and management software for logistics solutions* — https://www.press.bmwgroup.com/latin-america-caribbean/article/detail/T0322476EN/bmw-group-founds-company:-idealworks-gmbh-to-develop-and-distribute-innovative-robots-and-management-software-for-logistics-solutions?language=en ／ *idealworks: Tochtergesellschaft der BMW Group gewinnt Agile Robots AG als Mehrheitseigner* — https://www.press.bmwgroup.com/austria/article/detail/T0437751DE/idealworks:-tochtergesellschaft-der-bmw-group-gewinnt-agile-robots-ag-als-mehrheitseigner?language=de
3. **IDEALworks GmbH** 公式製品仕様・ファクトシート・沿革・ニュースリリース：*iw.hub Autonomous Mobile Robot* — https://www.idealworks.com/en/robotics/iw-hub ／ *Fact Sheet iw.hub (September 2025)* — https://www.lotsofbots.com/media/robots/assets/

Fact_Sheet_iw.hub_Z2yyAJT.pdf ／ *iw.os Autonomous Operating System* — https://www.idealworks.com/en/automation-infrastructure/iw-os ／ *Automotive Manufacturing Solutions (EN ISO 3691-4)* — https://www.idealworks.com/en/industries/automotive-manufacturing ／ *Idealworks History (2015–2026)* — https://www.idealworks.com/en/history ／ *Idealworks Newsroom (VDA 5050 3.0.0, cuVSLAM, Agile Robots Acquisition)* — https://www.idealworks.com/en/news

4. 駆動機構・センサ構成・オンボード**AI**電装に関する技術資料・論文：Framo Morat 公式発表 *Compact, flexible, powerful – Hub gears from Framo Morat (NG500 & Dunkermotoren BG 95)* — https://franz-morat.com/en/company/press/article/compact-flexible-powerful-hub-gears-from-framo-morat ／ IWL AG 技術解説 *iw.hub – Technische Spezifikationen (SICK Microscan3 Pro, LIPS AE400, VDI 2510)* — https://www.iwl.de/blog/iw-hub/ ／ IDEALworks 公式発表 *Idealworks Robotics Ecosystem to Integrate NVIDIA AI, NVIDIA Omniverse, and NVIDIA Isaac (Jetson Orin)* — https://www.idealworks.com/en/news/idealworks-robotics-ecosystem-to-integrate-nvidia-ai-nvidia-omniverse-and-nvidia-isaac ／ 実機ベンチマーク論文 *Physical AI for Intralogistics: Benchmarking the NVIDIA Sim-to-Real Ecosystem for Cosmos-Enhanced COMPASS Navigation on Industrial Mobile Robots* — https://arxiv.org/html/2610.28432v2
5. **BMW iFACTORY × NVIDIA Omniverse / MEGA Blueprint** 公式発表：BMW Group PressClub *BMW Group auf der NVIDIA GTC: Produktion im künftigen Werk Debrecen läuft schon virtuell* — https://www.press.bmwgroup.com/switzerland/article/detail/T0411470DE/bmw-group-auf-der-nvidia-gtc:-produktion-im-kuenftigen-werk-debrecen-laeuft-schon-virtuell?language=de ／ *BMW Group and NVIDIA take virtual factory planning to the next level* — https://www.press.bmwgroup.com/united-kingdom/article/detail/T0329571EN_GB/bmw-group-and-nvidia-take-virtual-factory-planning-to-the-next-level?language=en_GB ／ IDEALworks 公式発表 *Transforming Automation with Idealworks' AnyFleet and Mega NVIDIA Omniverse Blueprint* — https://www.idealworks.com/en/news/anyfleet-mega-nvidia-omniverse-blueprint
6. **NVIDIA OpenUSD / SimReady Foundation / SimReady Central** 公式仕様書・ドキュメント：*NVIDIA Omniverse SimReady FAQ (Updated Nov 2026)* — https://docs.omniverse.nvidia.com/simready/latest/simready-faq.html ／ *SimReady Non-Visual Materials Requirement (omni:simready:nonvisual:coating)* — https://docs.omniverse.nvidia.com/kit/docs/asset-requirements/1.7.1/capabilities/nonvisual_sensors/nonvisual_materials/requirements/material-coating.html ／ *NVIDIA Isaac Sim 6.0.0 Release Notes* — https://docs.isaacsim.omniverse.nvidia.com/6.0.0/overview/release_notes.html ／ *Manipulator Articulation Setup Workflow* — https://docs.isaacsim.omniverse.nvidia.com/latest/robot_setup_tutorials/tutorial_manipulator_workflow.html ／ *SimReady Foundation 2026.08.0 Requirement Coverage (202 Codes)* — https://docs.rigyd.com/simready-validation/full-coverage/ ／ *Announcing SimReady Central: An Open Library of Simulation-Ready 3D Assets for Robotics and AI Factories (Oct 21, 2026)* — https://huggingface.co/blog/nvidia/simready-central-assets-robotics-ai-factories

資料10 第3部2：BMWドイツ本国工場における数百台規模の異種AMR群管理AIアルゴリズムと上位MES/ERPミリ秒同期基盤

自動車の完成車組立工場において複数メーカーの自律搬送ロボット（AMR）および無人搬送車（AGV）を同一フロアで高密度に混在稼働させる際、最大の技術的障壁となる「交差点でのデッドロック（立ち往生）」と「上位生産順序変更への追従遅れ」に対し、BMWグループは欧州標準通信規格「VDA 5050」とスピンオフ企業IDEALworksの統合管制基盤「AnyFleet（現Idealworks OS）」を組み合わせた階層型アーキテクチャによって実用解を確立している。デッドロック回避の核心は、機体単体の自律障害物回避のみに委ねるのではなく、VDA 5050が規定する「Base（進入許可済み排他領域）」と「Horizon（進入未許可の将来予定経路）」の2段階グラフ解放機構、および2026年3月公開のVDA 5050 Version 3.0.0で本格導入された空間ゾーン制御（zoneSet）を用い、中央群管理システムが時間拡張グラフ上で空間・時間トークンを動的に排他割り当てする設計にある。
一方、日産約1,350台規模（年間約28万台、2026年4月時点公式実績）のBEV・PHEV・ICE完全混流生産を行うディンゴルフィング工場等における上位同期では、基幹系SAP S/4HANAおよびSAP EWM（倉庫管理）と現場エッジの間をApache Kafkaによるイベントストリーミング基盤で非同期疎結合化している。車体位置追跡（IPS-i／KINEXON OS）や設備PLC（OPC UA）からのリアルタイム実績トリガーを秒～サブ秒単位でIdealworks OSのREST APIへ連携し、MQTT上のVDA 5050メッセージ（orderUpdateIdによる走行中ルート書き換えやinstantActionsによる即時キャンセル）へ変換することで、突発的な塗装・組立順序の入れ替わり（リシーケンス）に対してもライン停止を最小化する動的JIS（Just-in-Sequence）配膳を実現している。なお、本報告書ではVDA公式仕様書・BMWおよびIDEALworks等の公開一次情報に基づく確定事実と、対外非公表のプロプライエタリ領域（AnyFleet内部ソルバーの具体的なソース実装や工場内管理会計上の個別償却月数など）に対する標準数理モデル・工学推論を明確に区分して論じる。

エグゼクティブ・サマリー

完成車メーカーの生産技術・物流企画部門やFA・ロボットシステム開発陣が工場内物流の自動化をスケールさせる際、初期パイロットの数台～十数台規模では顕在化しなかった問題が、100台を超えた段階で一斉に噴出する。用途別に最適な機体（1,000 kg級ロールコンテナ搬送用アンダーライドAMR、重量パレット用自律フォークリフト、長距離牽引用タガー列車など）を複数ベンダーから導入した結果、メーカー固有のフリート管理システム（FMS）が乱立し、共通通路での鉢合わせやERP/MES連携インターフェースの多重開発コストが自動化投資の採算（ROI）を圧迫する現象である。
BMWグループはこの構造的課題を打破するため、ドイツ自動車工業会（VDA）およびドイツ機械工業連盟（VDMA）と連携してオープン通信規格「VDA 5050」の策定を主導するとともに、内製開発したSmart Transport Robot（STR、現iw.hub）およびクラウド／エッジ統合群管理ソフト「AnyFleet（現Idealworks OS）」を擁するIDEALworks GmbHを2020年にスピンオフさせた。IDEALworksの公開事例によれば、BMWグループ全体では600～700台以上のiw.hubが稼働し（2026年11月のBMW公式発表ではディンゴルフィング工場単体でも約250台のSTRに加え、自動フォークリフト、小型仕分け機Splitbot、約20台以上の自律タガー列車が協働）、1日あたり約30,000回の搬送ミッションをシステム可用性98%という高水準で遂行している。また、位置測位基盤ベンダーKINEXON社の公開実績によれば、リアルタイム位置測位（RTLS）とSAP EWM/DMを統合した接続型イントラロジスティクス基盤はBMWグループ世界14工場へ展開され、1日5,000万件超（毎秒1,000件超）の自動テレグラム処理を通じて生産ライン停止の60%削減と年間1,000万米ドル以上の運用コスト削減を達成している。

用語解説　iw.hub

「**iw.hub**（アイダブリュー・ハブ）」は、**BMW**グループの物流子会社である**IDEALworks**（アイディールワークス）社が開発・提供する、工場・倉庫向けの自律走行搬送ロボット（AMR：Autonomous Mobile Robot）です。

BMWが自社の自動車製造工場（ドイツのディンゴルフィング工場やライプツィヒ工場など）での超高密度な部品搬送を自動化・最適化するために、長年にわたり内製で開発・改良を重ねてきた機体がベースになっています。現在は、スピンオフしたIDEALworks社を通じて、BMWグループ外の製造・物流企業にも広く外販されています。

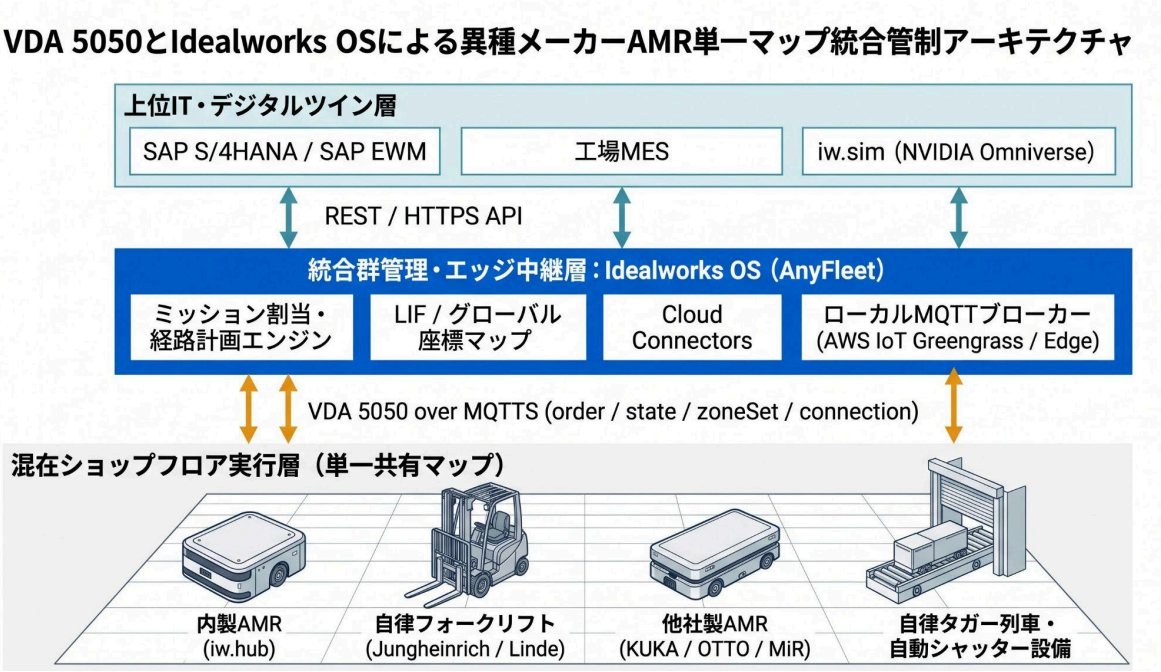
用語解説　自動テレグラム処理

「自動テレグラム処理（オートマチック・テレグラム・プロセッシング：英: Automatic Telegram Processing）」とは、工場や倉庫、鉄道などの産業用自動化（FA：ファクトリーオートメーション）システムにおいて、「テレグラム（電文・データパケット）」と呼ばれる軽量かつ規格化されたパケットデータを、システムの介入や遅延を最小限に抑え、リアルタイムで自動的に解析・選別・転送・実行する一連の処理メカニズムのことです。

特に、BMWドイツ本国工場のような「数百台規模の異種AMR群管理システム（VDA 5050）」や上位の「ERP/MES連携基盤」においては、ミリ秒（ms）～秒単位の超高速・高頻度な通信を捌くための極めて重要なバックボーン技術となっています。

本巻では、マルチベンダー統合を支えるVDA 5050（v2.1および最新のv3.0）のMQTT/JSONプロトコル設計、交差点デッドロックを予防するマルチエージェント経路計画（MAPF）とスラックタイム優先度制御、SAP S/4HANAからAMRエッジコントローラに至るミリ秒～秒単位のIT/OT同期パイプライン、過酷な金属遮蔽環境を克服するWi-Fi／プライベート5Gと3段階フェイルセーフ機構、そして工程間仕掛在庫（WIP）圧縮とフリート投資22%削減の定量メカニズムを5章構成で徹底解剖する。

第1章 異種メーカー製ロボット数百台を単一管制する「VDA 5050」標準規格と「AnyFleet」基盤



1.1 マルチベンダー混在運用を阻んでいた「3つの構造的壁」とVDA 5050の成立

自動車工場のイントラロジスティクスでは、単一メーカーのロボットだけで全工程の搬送要件を満たすことは物理的にも経済的にも現実的ではない。ロールコンテナや台車の下に潜り込んで最大1,000 kgを搬送する低床アンダーライド型AMR（IDEALworks製iw.hub等）、高所ラックやコンベヤへパレットを荷役する自律フォークリフト（Jungheinrich製やLinde Material Handling製等）、重量コンポーネントを運ぶ高可搬プラットフォーム（KUKA製、Rockwell Automation傘下のOTTOシリーズ、DS AutomotionやEK Robotics等の欧州AGV群）、さらには建屋間・長距離幹線を高効率に巡回する自律タガー列車（autonome Routenzüge）が、それぞれの適材適所で導入されるためである。
VDA 5050登場以前、ロボットメーカー各社は自社機体専用のクローズドなマスター制御システム（独自FMS）をセットで納入していたため、現場には3つの深刻な課題が生じていた。第一に「交通競合とデッドロック」である。異なるベンダーのFMS同士は互いの機体の将来経路や交差点進入タイミングを交渉できないため、共有通路で鉢合わせによる膠着が頻発するか、それを避けるためにベンダーごとに走行レーンを物理的に分離せざるを得ず、貴重な工場床面積が浪費されていた。第二に「上位IT統合コストの肥大化」である。SAP EWMや工場MESに対してベンダーFMSの数だけ個別のポイント・ツー・ポイント接続を開発・保守する必要があり、車種追加やレイアウト変更のたびにシステム改修リスクが増大していた。第三に「フリート全体の稼働率低下（局所過負荷と遊休の並存）」である。特定ベンダーの機体群がピーク負荷で滞留している隣で他社機群が待機していても、単一の司令塔が存在しないため搬送能力を相互融通できなかった。
このベンダーロックインを解消するため、ユーザー側を代表するドイツ自動車工業会（VDA）とメーカー側を代表するドイツ機械工業連盟（VDMA）が共同ワーキンググループを結成し、BMWグループやIDEALworksが中核として策定を推進したのがオープン通信インターフェース規格「VDA 5050」である。同規格はGitHub上で公開開発されており（不一致がある場合の公式な正本はVDA発行のPDF仕様書と規定）、2020年6月のVersion 1.1、2025年1月のVersion 2.1.0を経て、2025年～2026年3月にかけてメジャーアップデートとなる最新リリース「VDA 5050 Version 3.0.0」が正式公開された。v2系までは磁気テープや仮想軌道に沿う誘導型AGVを前提とした色合いが強かったのに対し、破壊的変更を含むv3.0.0ではSLAMを用いて自由走行するAMR（Freely Navigating Mobile Robots）の計画経路共有や空間ゾーン制御、動的コリドー逸脱要求が標準仕様として本格統合されている。

1.2 VDA 5050プロトコル仕様の徹底解剖（MQTTトピック・JSON構造・QoS設計）

VDA 5050の本質は、単一の中央マスター制御システム（Master Control / Fleet Manager）と各移動ロボット間の「通信トランスポートとJSONメッセージ契約」を厳密に標準化する点にあり、ロボット内部のモータ制御やSLAMアルゴリズム自体を代替するものではない。すべての通信は軽量なPublish/Subscribe型プロトコルであるMQTT（最低互換要件MQTT 3.1.1以上、実運用ではTLS暗号化とクライアント証明書認証を伴うMQTTS）の中央ブローカーを介して非同期に中継される。
ローカルMQTTブローカーにおける標準トピック階層は、interfaceName/majorVersion/manufacturer/serialNumber/topic の5階層で構成される。v1系・v2系では uagv/v2/Idealworks/Robot001/order のようにプレフィックスに uagv を用いていたが、v3.0.0以降は vda5050/v3/Idealworks/Robot001/order へと命名規則が変更された（AWS IoT等のクラウドMQTTブローカーを利用する際は、クラウドプロバイダ固有のトピック構造に合わせてプレフィックスを個別適合させることが許容されている）。すべてのJSONペイロードは共通ヘッダとして、トピックごとに送信順で1ずつインクリメントされる連番 headerId（uint32）、ISO 8601 UTC形式のミリ秒タイムスタンプ timestamp（YYYY-MM-DDTHH:mm:ss.fffZ）、プロトコルバージョン version、メーカー名 manufacturer、機体固有シリアル番号 serialNumber を保持する。
生産技術・通信設計の観点から極めて重要なのが、VDA 5050におけるMQTT QoS（Quality of

Service）レベルの意図的な使い分けである。数百台のAMRが金属遮蔽の多い工場内を移動しながら高頻度通信する環境において、全メッセージに到達確認（QoS 1やQoS 2）を課すと、ミリ秒単位の電波瞬断が発生するたびにブローカーと機体間でACK待ち・再送キューの滞留が連鎖し、かえってリアルタイム制御を阻害する。そのためVDA 5050（v2.0以降およびv3.0）では、通信オーバーヘッドを最小化する目的で、死活監視を担う connection トピックのみに **QoS 1**（**At Least Once**：最低**1**回到達） を義務付け、それ以外の order、instantActions、state、visualization、factsheet 等の通常制御トピックにはすべて **QoS 0**（**Best Effort**：再送なし） を指定している。QoS 0によるパケット欠落リスクに対しては、トランスポート層ではなくアプリケーション層のステートマシン（orderId と orderUpdateId の連番検証、および state メッセージ内の nodeStates / edgeStates によるエコーバック確認）で確実に検知・再送制御を行う設計思想が貫かれている。なお、送信周期について規格書自体は機体 factsheet 内の timing パラメータ（minOrderInterval、minStateInterval、defaultStateInterval）およびシステムインテグレータによる設定と規定しており、一般的な産業実装では state が状態変化時の即時送信＋約1秒周期のハートビート、visualization が5～10 Hz（100～200 ms周期）程度で運用される。

トピック名	通信方向	MQTT QoS	送信周期・トリガー	主要JSONフィールドと制御上の役割
order	マスター制御 → 機体	QoS 0	オーダー割当・Base拡張時に随時送信（minOrderInterval以上）	orderId、orderUpdateId、zoneSetId、nodes配列、edges配列を含み、走行経路グラフ（直線またはNURBS曲線）と荷役アクションを指示
instantActions	マスター制御 → 機体	QoS 0	緊急介入・即時制御イベント発生時に非同期送信	通常オーダーキューをバイパスして即時実行すべきcancelOrder、startPause、stopPause、initPosition、充電開始やホーン吹鳴等を伝達
state	機体 → マスター制御	QoS 0	状態変化時に即時送信＋defaultStateIntervalI周期（実運用約1秒）	nodeStates、edgeStates、lastNodeId、agvPosition、loads、actionStates、batteryState、errors、safetyState等の全稼働ステータスを報告
visualization	機体 → 監視UI・マスター	QoS 0	インテグレータ設定の高頻度周期送信（一般的な実装で5～10 Hz）	重いstateから分離された高頻度の現在座標・速度・計画軌跡データであり、デジタルツインや管制ダッシュボードの滑らかな描画に特化
connection	機体・ブローカー →マスター	QoS 1	接続・切断・スリープ遷移時およびMQTT Last Will発	ONLINE、OFFLINE、HIBERNATING

トピック名	通信方向	MQTT QoS	送信周期・トリガー	主要JSONフィールドと制御上の役割
			火時	（v3.0追加）、CONNECTION_BROKENを通知し、異常切断時はブローカーの遺言機能で即座に途絶を検知
factsheet	機体 → マスター制御	QoS 0	機体初期登録時・構成変更時・マスターからの要求時に送信	機体寸法・積載上限・対応アクション・supportedZones（v3.0）・配列長制約・timing周期パラメータを記述した機械可読スペック表
zoneSet	マスター制御 → 機体	QoS 0	v3.0新設：マップ初期化時および動的交通規制の更新時に配信	BLOCKED、RELEASE、SPEED_LIMIT、PENALTY、COORDINATED_REPLANNING等の空間ルール領域を一元配布し自由走行AMRの挙動を統制
responses	双方向（要求応答）	QoS 0	v3.0新設：機体からのedgeRequestやゾーン進入要求に対する応答時	障害物回避のためのコリドー逸脱要求やRELEASEゾーン進入要求に対し、GRANTED承認やleaseExpiry（有効期限）付きリースを返却

現場導入における重要な留意点として、VDA 5050は「繋げば即座に動くプラグアンドプレイソフト」ではない。第一に、VDA 5050は通信インターフェースであり機能安全を一切含まないため、非常停止や対人衝突防止は国際規格 **EN ISO 3691-4** に準拠して機体側のセーフティレーザースキャナと安全PLCで独立完結させる必要がある。第二に、自己位置推定（SLAM）用の環境地図は依然として各ロボットのオンボードナビゲーションスタックが保持するため、複数ベンダー機を統合する際は、共通のグローバルプロジェクト座標系（メートル単位のX・Yおよびラジアン単位の姿勢角theta）への座標系アライメントや、標準レイアウト交換フォーマット **LIF**（**Layout Interchange Format**）を用いたトポロジー定義の統一、さらにはメーカー独自拡張アクションの事前検証が不可欠となる。

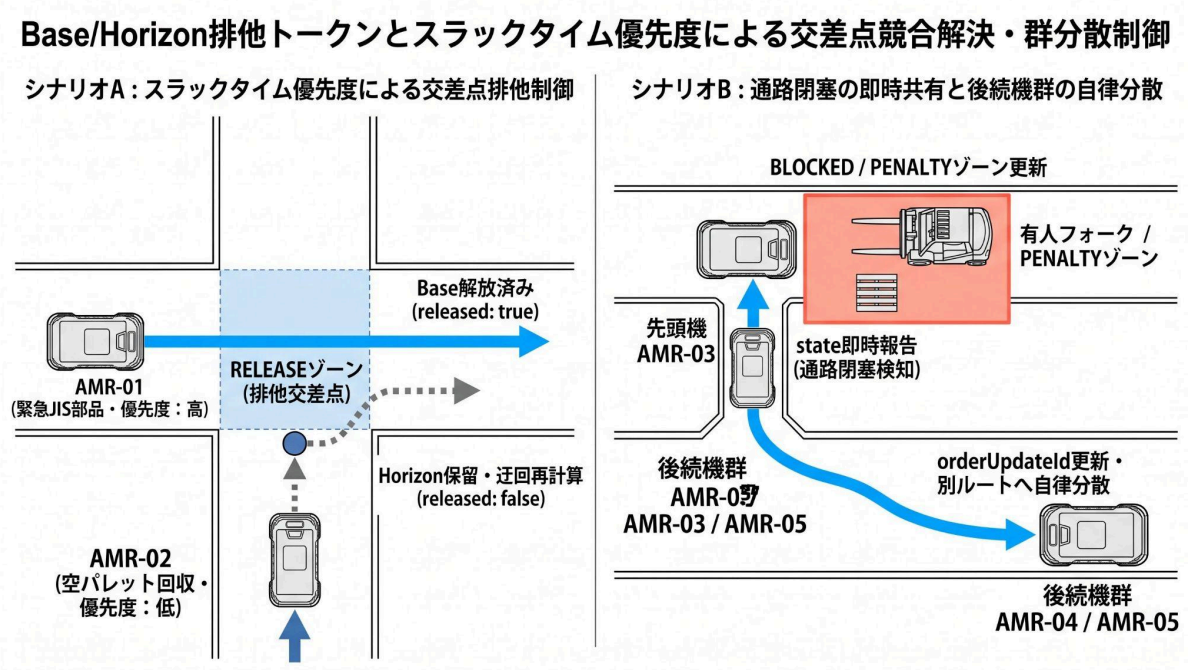
1.3 IDEALworks「AnyFleet（Idealworks OS）」のハイブリッド統合アーキテクチャ

BMWグループは2015年にフラウンホーファーIML（ドルトムント）と共同で自律搬送ロボット「STR」の開発に着手し、2016年のヴァッカースドルフ工場での10台パイロット運用を経て、2020年11月に100%子会社としてミュンヘンに **IDEALworks GmbH**（Industry Driven Engineering for Autonomous Logistics）を設立した（2023年にはミュンヘン発のロボティクス企業Agile Robotsが過半数株式を取得し、BMWグループを最大顧客・戦略パートナーとする共同推進体制へ発展）。スピンオフに伴いSTRは「**iw.hub**」へ改称され、その頭脳であるベンダーフリー群管理プラットフォーム「**AnyFleet**」は現在、周辺IoT設備や上位ITまでを統合オーケストレーションする

「**Idealworks OS**（**iw.os**）」へと進化している。
Idealworks OS（AnyFleet）のシステムアーキテクチャは、エンタープライズIT層、統合群管理・エッジ中継層、そして混在ショップフロア実行層の3層をシームレスに結ぶ「クラウド／エッジ・ハイブリッド構成」を採っている。最上位のIT・デジタルツイン連携では、HTTP/HTTPSおよびRESTベースのOpen Integration APIを通じてSAP S/4HANA / SAP EWM、工場MES、WCSと双方向接続し、複数拠点にまたがるミッション追跡（100%のトレーサビリティ）、稼働率KPI、ヒートマップ分析、過去ログのリプレイ機能を提供する。同時に、NVIDIA Omniverseベースのデジタルツイン基盤「**iw.sim**」と直結しており、仮想空間上で検証したミッション設定やマップ変更をそのまま実機フロアへ展開できる。
中段の統合群管理および工場内エッジ中継層では、ミッション割当・経路計画エンジンとLIF対応グローバル座標マップが稼働し、現場の産業用エッジコンピュータ（ADLINK製DLAP-401等）上のAWS IoT Greengrassランタイムおよびローカル MQTTブローカーを介して、ミリ秒～サブ秒の応答性が求められるMQTTS上のVDA 5050制御メッセージや、高速自動シャッター・自動ドア・コンベヤ・呼び出しボタン等の周辺IoT機器とのインターロックを処理する。
下段のショップフロア実行層における他社製ロボット統合（なおBMWは各工場内のメーカー別内訳台数は非公表としている）では、ネイティブにVDA 5050をサポート・認証取得している機体（IDEALworks公式統合実績にあるJungheinrich、MiR、Linde Material Handling、2026年春にIdealworksとのVDA 5050相互運用認証を完了したOTTO 100/600/1200/1500シリーズ、ならびにKUKA等のVDA 5050対応機）はエッジMQTTブローカーへ直接収容し、独自APIを持つサードパーティ製AMR/AGVに対しては「**Cloud Connectors**」およびLIFレイアウト取込機能を介して単一の共通座標マップ上へ統合している。さらに手動フォークリフトの位置情報も取り込むことで、有人・無人混在フロア全体の空間可視性を維持する。なお、中核機体であるiw.hub自体は、BMW i3のバッテリーモジュールを応用したリチウムイオン電池（1シフト最大8時間以上連続稼働）とSICK製セーフティLiDARを搭載し、オンボードのNVIDIA Jetson AGX Xavier（および後継のADLINK製エッジボード）上でFoundriesFactoryベースのセキュアOTA対応Linuxと自律航法スタック「iw.brain」を駆動させている。
表**1-2**：従来型ベンダー個別**AGV**運用と**VDA 5050**統合群管理の比較表

比較評価軸	従来型ベンダー個別AGV運用（サイロ型）	VDA 5050＋AnyFleet統合群管理	生産技術・物流現場への定量・定性インパクト
通信プロトコルと管制構成	ベンダーごとに独自FMSと専用無線プロトコルが乱立し相互通信不能	単一マスター（Idealworks OS）からMQTT＋JSON（VDA 5050）で全機一元管制	ベンダーロックインを排除し用途別最適機体の後付け混在が可能
交差点・狭小通路の空間効率	他社機と交渉できず物理的な専用レーン分離や固定優先ルールが必要	Base/Horizon解放制御とzoneSetにより異種メーカー機が同一通路を安全共有	通路重複を解消しブラウンフィールド工場のライン脇スペースを有効活用
上位ERP/MES統合負荷	FMSの数だけSAP EWMやMESへの個別カスタム接続開発と保守が発生	Idealworks OSの単一REST API窓口のみを上位ITと統合すれば完結	IT/OTシステム統合工数と障害切り分けポイントを大幅に削減
フリート台数効率（負荷平準化）	各ベンダーのピーク需要ごとに余剰バッファ機体を個別保有する必要あり	時間帯の異なる工程間ピーク需要を統合フリート全体で相互融通	3ベンダー統合モデル試算で必要機体数を18台から14台へ約22%圧縮
インフラ改修コスト	磁気テープや床面誘導ループ埋設が必要でライン変更時の工事費が多大	LiDAR SLAM自由走行と標準Wi-Fi/5G・電源のみで既存床のまま導入可能	設備立ち上げ期間を短縮し3シフト連続稼働でのレイアウト変更に即応

第**2**章 交差点制御・動的優先度最適化・デッドロック完全回避の群管理**AI**アルゴリズム



2.1 高密度交錯環境におけるデッドロック発生メカニズムと「Base / Horizon」排他予約トークン制御

数百台のAMRが稼働する自動車組立工場において、最も警戒すべきシステム障害は「デッドロック（循環待機による膠着）」である。ロボット単体の機能として「LiDARで障害物を検知して滑らかに停止・回避する」ことは今や基本性能に過ぎず、単機のローカル回避性能がいかに優秀であっても群としてのデッドロックは防げないどころか、10秒後のデッドロックを誘発する引き金になり得る。例えば、単一車幅しかない狭小通路の両端から2台のAMRが同時に進入した場合や、十字路の4方向から4台のAMRが同時に交差点へ進入した場合、各機の安全スキャナが互いを障害物と認識して停止し、「前方の機体が退くのを互いに待ち続ける閉ループ（Wait-For Graphにおける有向閉路）」が形成される。一度この状態に陥れば、自動回復または作業者による手動退避介入を行わない限り周辺の物流が停止する。
VDA 5050とIdealworks OS（AnyFleet）は、この資源割当問題を「鉄道の閉塞区間（インターロック）制御」を動的化した **Base**（解放済み区間）と**Horizon**（予定区間）の**2**段階グラフトークン方式によって構造的に封じ込めている。マスター制御が送信する order メッセージ内の各ノード（nodes）およびエッジ（edges）には、通過順序を追跡し同一オーダー内で同じノードを複数回通過する場合も識別できる番号 sequenceId（uint32、開始ノードは sequenceId = 0 で常に到達可能かつ解放済み）とともに、真偽値フラグ released が付与される。
このうち **Base**領域（**released: true**）は、他機との空間的・時間的競合がないことをマスター制御が確認し、当該機体に対して排他的走行許可トークンを付与した確定経路部分である。典型的な実装では、現在位置から前方約6メートル程度、あるいは競合する交差点や合流点の「手前の待機ノード」までがBaseとして切り出される。対して **Horizon**領域（**released: false**）は、Baseの先につながる目的地までの計画経路（ルックアヘッド）である。機体はHorizon情報を参照して将来の右左折やNURBS曲線軌道の速度計画を準備できるが、**released: false** のエッジおよびノードへ物理的に進入することは**VDA 5050**仕様上厳格に禁止されている。
機体が走行を進め、通過完了したノードを state メッセージの lastNodeId / lastNodeSequenceId（および残りの nodeStates / edgeStates）として報告すると、マスター制御は前方の交差点の空き状況を判定した上で、同一 orderId のまま orderUpdateId（uint32、新規オーダー時は0から開始し更新ごとに増加）をインクリメントした更新 order メッセージを送信し、それまでHorizonだった交差点通過ノード群を released: true（Base）へと動的に拡張する。なお、現在の値より低い orderUpdateId が届いた場合はエラーとして拒絶される整合性ルールが定められている。交差点が他機に占有されていれば orderUpdateId によるBase拡張が保留さ

れるため、機体は交差点手前のBase終端ノードで減速・待機し、交差点内部での鉢合わせが予防される。
さらに **VDA 5050 Version 3.0.0** では、固定軌道に縛られない自由走行型AMRを精密統制するため、中央マスターが一元配布する **zoneSet**（空間ゾーンセット）と **corridor**（動的逸脱コリドー）が導入された。誘導走行機が障害物を局所回避するために規定エッジから一時逸脱する際は、[span_113](start_span)[span_113](end_span)[span_116](start_span)[span_116](end_span)[span_119](start_span)[span_119](end_span)corridor 属性の左右境界内で、releaseRequired: true の場合はマスターへ edgeRequest を送信し、requestStatus = GRANTED の承認リースを得てから回避を行う。またゾーン判定には、積載物を含めた機体外郭形状で評価する「Contour-based（輪郭基準）」と、機体の運動学中心で評価する「Kinematic Center-based（中心基準）」の2種類が定義され、機体は自身の factsheet（typeSpecifications.supportedZones）で対応能力を宣言する。

ゾーン区分	VDA 5050定義タイプ	対象機体への空間制約ルール	デッドロック・渋滞回避における用途
アクセス排他制御	BLOCKED / RELEASE	BLOCKEDは進入完全禁止、RELEASEはマスターからの事前進入承認取得を必須化	荷役ステーション前や狭小ボトルネックへの同時複数機進入を排他ロックし膠着を防止
走行挙動・協調強制	LINE_GUIDED / SPEED_LIMIT / COORDINATED_REPLANNING / ACTION	自由走行の抑制（軌道追従強制）、最高速度制限、中央協調再計画への移行、特定動作実行を強制	高密度交錯エリアでの自由蛇行を禁じ中央経路計画ソルバーの精密軌道制御下へ編入
ルーティング誘導	PRIORITY / PENALTY	経路計画上の空間通過コストを増減（優先誘導またはペナルティ付与）	有人作業混雑エリアや一時滞留区間の通行コストを引き上げ別通路への分散を促進
進行方向制約	DIRECTED / BIDIRECTED	ゾーン内の許容走行方向を単一方向（一方通行）または双方向に制限	狭小通路を論理的一方通行化して対向鉢合わせ（循環待機サイクルの芽）を設計段階で排除

2.2 マルチエージェント経路計画（**MAPF**）の数理実装：時間拡張グラフ・時間窓付き**A*・CBS**

ここで公開事実と数理アルゴリズムの実装構造を明確に切り分ける。IDEALworksやBMWはIdealworks OS内部の経路計画エンジンのプロプライエタリなソースコードを対外公開していないが、VDA 5050準拠の商用生産システムにおける標準実装および産業用AGV/AMR制御研究が示す通り、実稼働する大規模工場FMSでは学術的なフルMAPFソルバー（全機同時CBS等）をそのまま数百台全体へ常時適用することはせず、計算速度とデッドロック予防を両立する階層型アルゴリズムを採用する。なぜなら、厳密最適解を求める **CBS**（**Conflict-Based Search**：競合ベース探索）単体は機体数に対して計算量が指数関数的に増大し、秒単位の再計画レイテンシ要件を満たせないためである。したがって、数百台規模の商用群管理は以下の3段階の数理モデルで実装される。
第1段階は 時間拡張グラフ（*Time-Expanded Graph*）上の時間窓付き探索（*Time-Windowed A / Dijkstra*）* である。工場の走行トポロジーグラフ G = (V, E) に対し、離散または連続時間軸 T を掛け合わせた3次元構造（空間 x 時間）を構築する。マスター制御は全機体の予約済み時空間占有テーブルを保持し、各ノード v およびエッジ e について他機の外郭輪郭（Contour）が占有していない安全な空き時間窓 [t_start, t_end] を管理する。その上で優先度順（Priority-based Planning）に各機体の評価関数 f(n, t)[span_255](start_span)[span_255](end_span)[span_261](start_span)[span_261](end_span) = g(n, t) + h(n)（g(n, t) は移動時間・旋回コスト・PENALTYゾーン重みの累積値、h(n) は目的地までの最短距離ヒューリスティック）を最小化する時空間パスを算出することで、同一ノード同時占有および単線エッジでの対向すれ違い競合を構築段階で排除する。

第2段階は **Wait-For Graph**（待機依存グラフ）における閉路予防（**Cycle Prevention**） である。デッドロックの検知自体は待機依存グラフの有向閉路探索で容易に行えるが、発生後の回復よりも「閉路を最初から形成させないルーティング制約」が決定的に重要となる。具体的には、工場レイアウトの通路を極力 DIRECTED（一方通行ループ）として構成した上で、やむを得ず双方向通行（BIDIRECTED）や袋小路の荷役ステーションへ進入させる際には、「単線区間を抜けた先の退避可能ノードまでを一括で時空間予約できる場合のみ入口のBaseを解放する」という多ノード一括ロック規則を適用する。
第3段階が、高密度ボトルネック領域（VDA 5050 v3.0の CO[span_232](start_span)[span_232](end_span)ORDINATED_REP[span_256](start_span)[span_256](end_span)[span_262](start_span)[span_262](end_span)LANNING ゾーンや主要十字路周辺）に限定した 局所**CBS**（**Localized Conflict-Based Search**）および計画経路共有 である。単純な優先度順計画では、高優先度機が狭小交差点を占有することで周囲の複数機が大きく迂回・停止させられる局所非効率が生じる場合がある。対象ゾーン内で競合する数台規模のサブグループに限定して上位競合木（Constraint Tree）を展開し、「機体Aにノードvを時刻tで禁止する制約枝」と「機体Bに禁止する制約枝」の双方で下位単機探索を再評価することで、グループ全体の総遅延時間を最小化する協調通過順序をサブ秒で導出できる。

2.3 納期余裕度（スラックタイム）に応じた動的優先度制御と群知能ルーティング

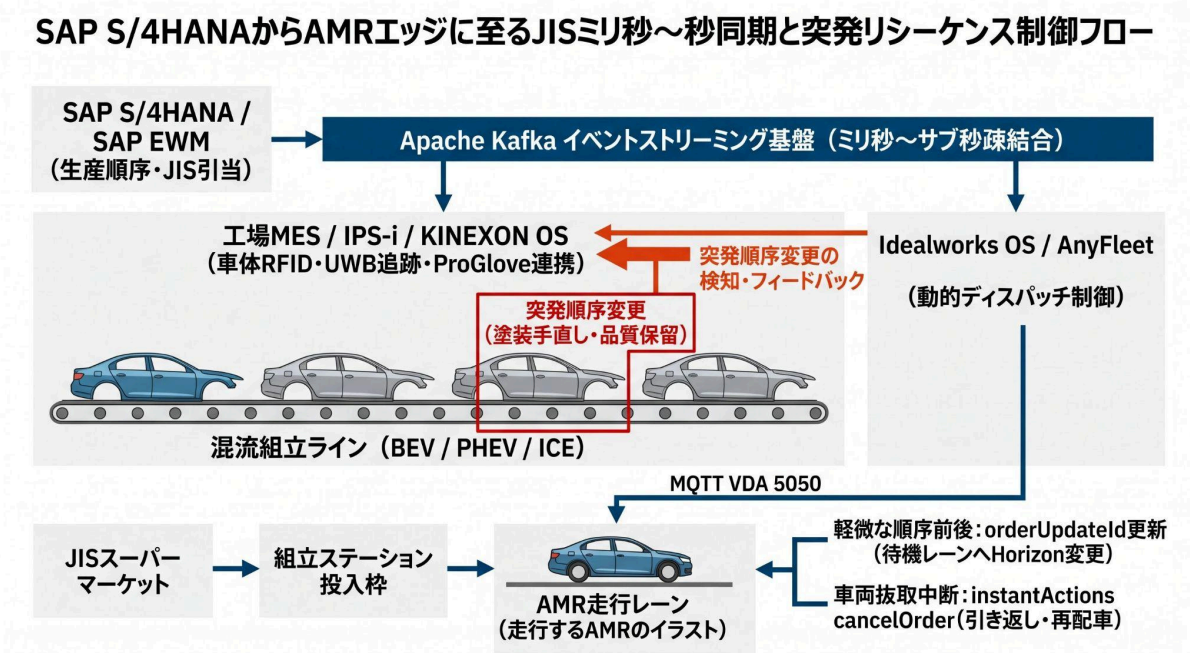
実際の混流組立フロアでは、主に2種類の動的競合シナリオが常時発生する。第1は「ライン停止直前の緊急JIS部品を運ぶAMR」と「空パレット・空容器回収中のAMR」が交差点で鉢合わせる優先権競合（シナリオA）、第2は有人フォークリフトや歩行者が通路を突発的に塞いだ際の後続フリート全体の渋滞回避（シナリオB）である。
シナリオAの優先度最適化において、上位生産計画と連携した群管理システムは、各搬送ミッション i に対して 動的スラックタイム（納期余裕度） **T_slack_i** を常時評価する。プレーンテキスト数式で表せば以下の通りである。
T_slack_i = (T_deadline_i - t_now) - T_est_travel_i
ここで T_deadline_i は上位MES/SAPから指定された組立ステーション投入デッドライン時刻、t_now は現在時刻、T_est_travel_i は現在位置からステーションまでの推定残り走行時間である。機体 i の通過優先度スコアは、基本タスク区分（JIS順序部品 ＞ JIT補給部品 ＞ 空容器回収 ＞ 充電回送）と T_slack_i の減少関数として動的に更新される。T_slack_i が安全閾値を割り込んだ緊急機（AMR-01）が交差点（RELEASE ゾーン）へ接近すると、たとえ空パレット回収機（AMR-02）が先に交差点手前へ到達しつつあっても、マスター制御はAMR-02の次エッジを released: false（Horizon保留）のまま据え置いて手前の停止ノードで待機させるか、orderUpdateId を更新して別通路へ迂回させ、AMR-01に対して交差点通過の Base（released: true）を優先解放する。さらにBMWの工場で稼働するKINEXON OSやIdealworks OSのスマートインフラ連携機能により、高優先度オーダーを保持した車両の接近に合わせて工場内の物理信号機の青切り替え、視覚アラームの作動、高速自動ゲートの事前開放までが自動実行される。
また、こうした数百タスク・混在フリートの「動的割当および経路再計算（時間枠制約付き配送計画問題：VRPTW）」を高速化する技術動向として、GPU並列数理最適化エンジンの統合が進んでいる。ここで公開事実を正確に整理すると、BMWグループおよびIDEALworksはNVIDIAの主要開発パートナーであり、工場全体のデジタルツイン構築やAMRのテスト・学習に **NVIDIA Omniverse** および **Isaac Sim** を採用しているほか、IDEALworksは複数ロボット群のトラフィック・タスク最適化シミュレーションに向けて **Mega NVIDIA Omniverse Blueprint**（iw.sim）を導入し、VDA 5050フレームワーク上でのピッキング・搬送・配置タスクの最適化を推進していることが公式確認されている。一方、NVIDIAがOmniverse / Isaac Simと統合提供しているGPU最適化エンジン「**NVIDIA cuOpt**」は、従来のCPUソルバーでは数分～数時間を要していた混在フリートの動的ルート再計算を並列コアエンジンによって秒～分単位以下へと劇的に短縮する基盤であり（製造・鉄道分野では川崎重工業やSyncTwin等も採用）、デジタルツイン空間での事前レイアウト検証からリアルタイム配車最適化への活用が広がっている。BMW/IDEALworksの本番AnyFleetサーバ内部でcuOpt APIが直接呼び出されているか否かは公式には非開示であるが、Omniverse / Isaacエコシステム上で物理シミュレーションとVDA 5050群制御を直結するアーキテクチャは両社の開発中核に位置付けられている。

2.4 ローカル障害物検知からフリート全体コストマップへのサブ秒共有

シナリオB（有人フォークリフトや作業者による通路閉塞）においては、「機体エッジのミリ秒反応」と「中央管制のサブ秒～秒単位の群分散」が連携して機能する。まず先頭機（iw.hub）のオンボード層では、BMW TechOffice Munich・IDEALworks・Microsoft・NVIDIAが共同構築した製造業向け合成データパイプライン（Omniverse上で工場内のコンテナ、台車、ラック、産業車両をリアルに再現して学習データを生成）で訓練されたAI認識モデルがJetson AGX Xavier上で稼働している。BMWグループの公式発表によれば、このAIナビゲーション改良によりフォークリフト、タガー列車、従業員などの障害物を迅速かつ明確に識別し、人間と物体に対して異なる反応を適用しながら 数ミリ秒以内 にローカルの代替ルートを計算する。通路幅に余裕があれば、VDA 5050の corridor 許容幅内（またはv3.0の edgeRequest 承認下）で局所回避して通過を継続する。
しかし、荷役中の有人フォークリフトが通路を完全に塞ぎローカル回避が不能となった場合、以下の3ステップでフリート全体の群知能ルーティングが発動する。

1. イベント駆動による即時 **state** 報告：先頭機（AMR-03）は安全停止すると同時に、定周期を待たず即座にVDA 5050 state メッセージで停止座標・滞留ステータス（または経路閉塞情報）をMQTTブローカーへパブリッシュする。
2. グローバル通行難易度（コストマップ）と **zoneSet** の動的更新：これを受信したIdealworks OSは当該通路エッジの通行重みコストを大幅に引き上げるとともに、VDA 5050 v3.0環境下では当該領域を PENALTY または BLOCKED に指定した更新 zoneSet を配信する。
3. 後続機群の **Horizon** 一斉書き換えによる自律分散：当該通路を将来の予定経路（Horizon）に含んでいた後続機群（AMR-04、AMR-05等）を即座に抽出し、並行する空き通路を経由する新ルートを再計算した上で、orderUpdateId をインクリメントした更新 order メッセージを一斉送信する。これにより後続機群は閉塞箇所の手前の分岐点から別ルートへ滑らかに分散し、玉突き渋滞の発生が未然に回避される。

第3章 上位ERP（SAP）および工場MESとのリアルタイム同期・JIT/JIS順序配膳構造



3.1 ディンゴルフィング工場の極限混流生産とJIS/JIT配膳要件

バイエルン州ニーダーバイエルンに位置する **BMW**グループ・ディンゴルフィング工場（**Plant 02.40**）は、敷地面積300ヘクタール超・従業員約18,000名を擁する同グループ欧州最大の生産拠点である。2026年4月更新の公式ファクトシートによれば、同工場では2025年実績で年間約280,000台、1日あたり約1,350台（従来の公称ピーク1,500台規模に対し、大型ラグジュアリー車・EV混流構成における実稼働日産台数）の完成車が生産されている。同工場の最大の特徴は、世界屈指の柔軟性を持つ混流生産（Mixed-Model Production）にある。BMW 4シリーズ、5シリーズ、7シリーズ、8シリーズ、Mモデル、完全電動のBMW iXに加え、2026年11月からは「ノイエ・クラッセ（Neue Klasse）」の次世代電子アーキテクチャやBMW Panoramic iDriveを搭載した第8世代BMW 3シリーズ・セダンも組立ホール50（Assembly Hall 50）の共有ラインで量産開始された。すなわち、純電気自動車（BEV）、プラグインハイブリッド（PHEV）、内燃機関（ICE）の異なる駆動方式と膨大な個別オプション仕様（半年間連続稼働しても完全に同一仕様の車両が重複しないレベルの多様性）が、単一ライン上を任意の混流比率で流れていく。
この混流組立を維持するため、ディンゴルフィング工場には約600社のサプライヤーから毎日400～450台超の入荷トラック（出荷便を含めた工場全体の動的トラック管制システムDLSS下では約600台/日）が到着し、1日あたり **13,000**個以上の部品コンテナ が処理される。部品供給方式は、コックピットモジュールやシート、高電圧バッテリー等を車両の組立通過順序（「真珠の首飾り：Pearl Chain」）通りに1台分ずつ並べて供給する **JIS**（**Just-in-Sequence**：順序配膳） と、工場内スーパーマーケットから消費実績に応じてコンテナ単位で補充する **JIT**（**Just-in-Time**）に大別される。現在ディンゴルフィング工場では、入荷物流から組立ライン供給に至る工程において、約250台のSTR（iw.hub）、自動フォークリフト、Splitbot、および約20台以上の自律タガー列車が連携稼働している。

3.2 SAP S/4HANA・Apache Kafka・MES/KINEXON・AnyFleetを結ぶイベント駆動型IT/OT階層構造

日産1,350～1,500台規模を2～3シフト稼働で換算すると、組立コンベヤのタクトタイムは約50～60秒に1台となる。一方、基幹ERPであるSAPシステムは業務トランザクションの一貫性を保証する設計であり、本来ミリ秒～サブ秒で動く数百台のロボットと直接ポイント・ツー・ポイント通信する用途には向かない。BMWグループはSAP SEとの共同開発の下、クラウドベースのモダンな **SAP S/4HANA** アーキテクチャおよび **SAP EWM**（倉庫管理）・**SAP DM**（デジタル製造）によるデジタル生産物流の標準化をBMW iFactory全体で進めているが、このエンタープライズIT層とショップフロアOT層の間をリアルタイムで橋渡ししているのが、**Apache Kafka**（イベントストリーミング基盤）、**IPS-i**／**KINEXON OS**（リアルタイム位置・実績管理）、**OPC UA**、そして **MQTT**（**VDA 5050**）を組み合わせたイベント駆動型アーキテクチャである。なお、BMWは各階層間の内部ネットワーク遅延SLAの厳密なミリ秒数値を対外公表していないが、公開されている各システムの処理周期・スループット仕様を統合すると以下の5階層構造として整理できる。

表**3-1**：**BMW** 自律物流**IT/OT**統合アーキテクチャ階層表

階層名	主要システム・規格	通信プロトコル・制御周期	担当機能
Level 4：基幹生産・倉庫計画層	SAP S/4HANA / SAP EWM / SAP DM / DLSS	REST / OData / SAP標準連携（秒～分周期・イベント駆動）	車両受注仕様からのBOM展開、JIS/JIT要求生成、スーパーマーケット在庫引当、入荷トラック枠管制
Level 3.5：イベントストリーミング基盤	Apache Kafka（Confluent等） / Apache Flink	Kafka TCPイベントストリーム（サブ秒リアルタイム結合）	IT層とOT層の非同期疎結合化、ロボット・設備イベントとオーダー・ロット情報の移動中相関処理と履歴再生
Level 3：製造実行・位置追跡層	工場MES / BMW IPS-i / KINEXON OS / ウェアラブル端末	OPC UA / RFID・UWB・vSLAM電文（毎秒1,000電文超）	車体通過順序の確定追跡、ProGlove・スマートウォッチ作業者通知、空容器・部品消費トリガーの即時発火

階層名	主要システム・規格	通信プロトコル・制御周期	担当機能
Level 2：統合群管理オーケストレーション層	Idealworks OS（AnyFleet） / iw.sim	上位：REST/HTTPS、下位：VDA 5050 over MQTTS（サブ秒～約1秒）	異種AMRへの最適ミッション割当、時間拡張グラフ経路計画、Base/Horizon排他制御、動的ディスパッチ変更
Level 1～0：エッジ設備・機体オンボード層	ローカルMQTTブローカー / ラインPLC / iw.brain / 安全PLC	MQTT / OPC UA / 内部制御バス（数ミリ秒～100ミリ秒）	コンベヤ・自動ゲート連動、LiDAR SLAM自己位置推定、ミリ秒単位のローカル障害物回避とISO 3691-4安全停止

通常のJIS/JIT同期パイプラインは以下のように流れる。車体が塗装工程を経て組立ラインへ投入される際、RFIDとOPC UAを組み合わせたBMWの **IPS-i** 基盤および **KINEXON OS** が車体位置と順序をリアルタイム捕捉する。Apache Kafkaのイベントバックボーンがこの車体進行イベントをSAP S/4HANA / SAP EWMの部品表・搬送オーダーとストリーム結合し、工場内スーパーマーケットへピッキング指示を配信する。スーパーマーケットの作業者はProGloveスマートグローブスキャナ（ProGlove社の公開実績によればディンゴルフィング工場で1スキャンあたり4秒、施設全体で1日4,000分のスキャン時間を削減）を用いてJIS台車への順序格納を完了させる。この完了イベントがREST/HTTPS API経由でIdealworks OSへ渡されると、最近傍の空きAMR（iw.hub等）へVDA 5050の order が即時配信され、組立ステーション到着時にはラインサイドPLCとのOPC UA連携による荷役と、作業者のスマートウォッチへの特殊仕様車接近アラーム（Exotics Alarm）振動通知が同期実行される。

3.3 塗装・組立順序の突発的入れ替わり（リシーケンス）に対する動的ディスパッチ制御

JIS（順序配膳）方式における最大の運用リスクは、塗装手直しや品質検査保留などによって組立ライン上の車体順序が突発的に入れ替わった（リシーケンスが発生した）瞬間、すでに搬送途上にあるJIS部品の並び順と実車の順序にズレが生じ、ライン停止を引き起こすことにある。BMWのイベント駆動型IT/OT基盤では、車体のライン抜取や順序前後をMES／IPS-iが検知した際、Apache KafkaおよびIdealworks OSを通じて搬送途中のAMRへリアルタイム介入を行う閉ループ制御を構成している。

VDA 5050プロトコルの仕様上、この搬送途中での動的ディスパッチ変更は事象の深刻度に応じて2通りのメッセージシーケンスで厳密に処理される。

第1のケースは「数台分の軽微な順序後ろ倒しや投入ステーション変更」である。対象車両が数タクト遅れて復帰する場合、すでにスーパーマーケットを出発したAMRがそのまま組立ステーションの荷役枠へ進入すると、繰り上がった後続車両の部品搬入を妨げてしまう。このとき Idealworks OSは、当該AMRが現在走行中の Base（すでに released: true となっている直近数メートルの確定区間）は維持したまま、同一 orderId で orderUpdateId をインクリメントした更新 order メッセージを送信する。このメッセージにより、Base 終端ノード以降の Horizon が「ステーション直行」から「ライン手前の待機バッファレーン（一時退避ノード）」へと動的に差し替えられる。AMRは急停止することなく滑らかに待機レーンへ進入し、繰り上がった車両用の別AMRにステーションを先に通過させた後、対象車両の接近に合わせて再度 orderUpdateId 更新を受けて荷役を完了する。

第2のケースは「品質保留による車両の完全抜取と引き返し（リパック）」である。対象車両がラインから除外され、積載しているJIS台車をスーパーマーケットへ戻して順序を組み直す必要がある場合、Idealworks OSは通常オーダーキューをバイパスする instantActions トピックで **cancelOrder** コマンドを即時送信する。VDA 5050仕様（Section 6.6.3.2）に基づき、cancelOrder を受信したAMRは速やかに減速・安全停止し、待機中（WAITING）または実行中（RUNNING）であったすべてのアクション状態を FAILED として state メッセージでマスター制御へ報告した上でアクティブなオーダーキューをクリアする。マスター制御はその state 完了報告を確認した直後に、引き返し先（スーパーマーケットのリシーケンスエリア）を目的ノードとする新しい orderId（orderUpdateId: 0）を当該AMRへ発行すると同時に、順序繰り上がりによって納期余

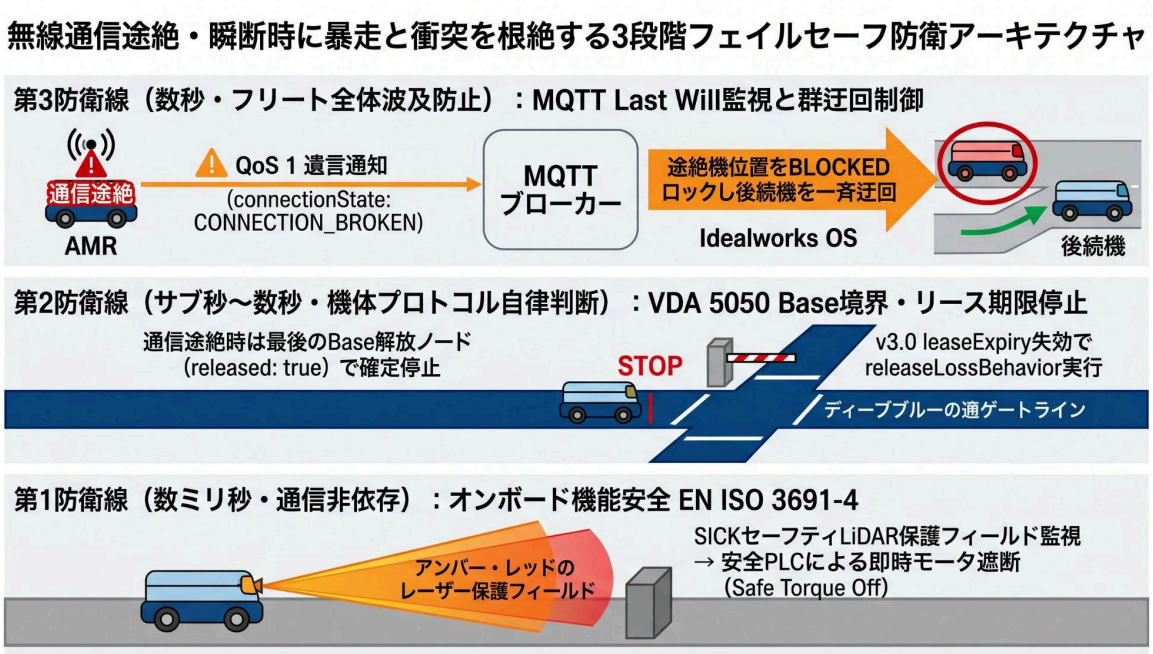
裕度 T_slack が短縮された後続車両担当AMRの優先度を最高ランクへ引き上げて急行させる。

第4章 巨大工場フロアを支える産業無線インフラ（Wi-Fi 6/6E・ローカル5G）とフェイルセーフ設計

4.1 金属遮蔽・マルチパス干渉を克服するハイブリッド無線設計（産業用Wi-Fiとプライベート5G）

数百台のAMRが秒間数回～10回（state＋高頻度 visualization）のMQTTパケットを送受信しながら移動し続ける巨大組立建屋は、無線通信にとって極めて過酷な環境である。車体ボディや高さ数メートルの鋼鉄製部品ラック、頭上のコンベヤ群が電波を遮蔽（シャドウイング）してラック裏や建屋コーナーにデッドスポットを生むほか、溶接・プレス設備のノイズや金属面での多重反射（マルチパス干渉）が通信品質を絶えず変動させる。
この課題に対しBMWグループは、既存建屋へ迅速に展開できる 産業用**Wi-Fi** と、超高信頼・低遅延が求められる領域向けの プライベート**5G**（ローカル**5G**）キャンパスネットワーク を併用するハイブリッド戦略を採っている。まずIDEALworksのiw.hubは、ブラウンフィールド工場への導入障壁を最小化するため、標準的な工場Wi-Fi接続と電源コンセントのみで稼働できるよう設計されている。BMWは個別工場内のWi-Fiアクセスポイント機種や6 GHz帯（Wi-Fi 6E）のチャネル設計詳細は対外非公表としているが、一般的な大規模工場Wi-Fi 6（IEEE 802.11ax）環境における高速ローミング制御に加え、プロトコル層でVDA 5050が通常トピックをすべて **MQTT QoS 0**（TCP/MQTT再送待ちによるブロッキングの排除）と規定していることが、AP間ローミング時のわずかな瞬断に対する高い耐性を生んでいる。さらに近年のVDA 5050準拠アーキテクチャでは、建屋内の無線カバレッジ強度マップ自体を群管理の経路計画変数として明示的に組み込み、電波品質の低いエリアの通過を避ける手法も研究・実装されている。
その上でBMWグループは、移動体のシームレスなハンドオーバーと高いQoS保証を実現するため、ライプツィヒ工場、ディンゴルフィング工場、ランツフート工場、デブレツェン工場（ハンガリー）、スパータンバーグ工場（米国）、瀋陽工場（中国）等の主要拠点に プライベート**5G**キャンパスネットワーク を展開している。ドイツ国内では、ライプツィヒ工場においてドイツテレコムおよびエリクソンと共同でキャンパスネットワークを構築するとともに、ボーダフォンおよびノキアと5G屋内測位実証を実施し、ディンゴルフィング工場においてもミュンヘン工科大学（TUM）等との連携プロジェクト（「Autonomous and Connected Logistics」等）を通じてAMRおよび自動搬送システムへの5G適用を進めてきた。基地局主導でセル間ハンドオーバーを制御する5Gは、端末主導のWi-Fiローミングで起きやすい「弱い旧APへのしがみつき（スティッキークライアント）」を起こさず、2026年のライプツィヒ工場（Hexagon製AEONパイロット）やスパータンバーグ工場における次世代ロボット導入でも、ラック背面やコーナー部を含むホール全体の5Gカバレッジ強化が重要インフラ施策として実施されている。

4.2 通信瞬断・途絶時に衝突と暴走を封じ込める3段階フェイルセーフとハートビート監視



どれほど高密度にWi-Fiや5G基地局を配置しても、産業システムにおいては「無線通信の瞬断やパケット欠落は必ず発生する」という前提で安全設計を行わなければならない。最大1,000 kgの部品台車を積載して走行中のAMRが交差点手前で突如通信途絶に陥った際、衝突とデッドロック波及をいかにして防ぐのか。VDA 5050とEN ISO 3691-4に基づくBMWのアーキテクチャは、作動タイムスケールの異なる **3**段階のフェイルセーフ防衛線 によって安全を担保している。
| 防衛階層 | 担当サブシステム・規格 | 作動タイムスケール | 異常検知メカニズムと安全縮退挙動 | | :--- | :--- | :--- | :--- | | 第1防衛線：ハードウェア機能安全 | SICKセーフティLiDAR＋機体搭載安全PLC（EN ISO 3691-4準拠） | 数ミリ秒〜数十ミリ秒 | 無線や上位OSと完全独立して速度連動保護フィールドを常時監視し、人や障害物侵入時は安全PLCが駆動トルクを直接遮断（Safe Torque Off非常停止） | | 第2防衛線：プロトコル境界自律停止 | 機体側VDA 5050クライアント（Base境界制御・v3.0 leaseExpiry） | サブ秒〜数秒 | 通信切断時もメモリ上のオーダーを保持して最後のBase解放ノード（released: true）までのみ走行し、未解放の交差点手前で確実に自律停止 | | 第3防衛線：ブローカー死活監視と群隔離 | MQTTブローカー（Keep-Alive＋Last Will）＋Idealworks OS | 数秒（Keep-Aliveタイムアウト直後） | ハートビート途絶を検知したブローカーがQoS 1でCONNECTION_BROKEN遺言を自動配信し、中央管制が途絶機位置をBLOCKEDロックして他機を一斉迂回 |
第1防衛線は通信に一切依存しないオンボード機能安全である。VDA 5050は安全機能をメッセージに含めない原則を採っており、各機体はEN ISO 3691-4に準拠したSICK製等のセーフティレーザースキャナと安全コントローラを搭載している。万一通信が切れた状態で作業者が飛び出しても、車載レーザーの保護フィールド侵入検知から数ミリ秒〜数十ミリ秒でハードウェア安全回路がモータ駆動電源を直接遮断（Safe Torque Off：STO）して物理衝突を回避する。
第2防衛線が、無線途絶時の交差点誤進入を防ぐ **VDA 5050**の**Base**境界自律停止ルール である。VDA 5050仕様（Section 6.2）により、機体がMQTTブローカーから切断された場合でも、機体はそれまでに受信していたオーダー情報をメモリに保持し、すでに排他確保されている 最後の解放済みノード（**released: tru[span_87](start_span)[span_87](end_span)[span_92](start_span)[span_92](end_span)e** の**Base**末端）まで走行を完遂した時点で確実に停止する。未解放の Horizon（交差点内部や合流点）へはマスターからの新たな orderUpdateId 解放が届かない限り進入できないため、通信途絶機が赤信号の交差点へ暴走進入することはプロトコル構造上起こり得ない。さらにVDA 5050 v3.0.0では、動的コリドー逸脱（edgeRequest）やゾーン進入リースに有効期限 **leaseExpiry** が設けられており、通信断によって期限が切れた瞬間、機体は事前定義された **releaseLossBehavior**（規定軌道への復帰またはその場での安全停止・手動介入待機）を自律実行する。
第3防衛線が、立ち往生機による二次渋滞を防ぐ **MQTT Last Will and Testament**（遺言機能）

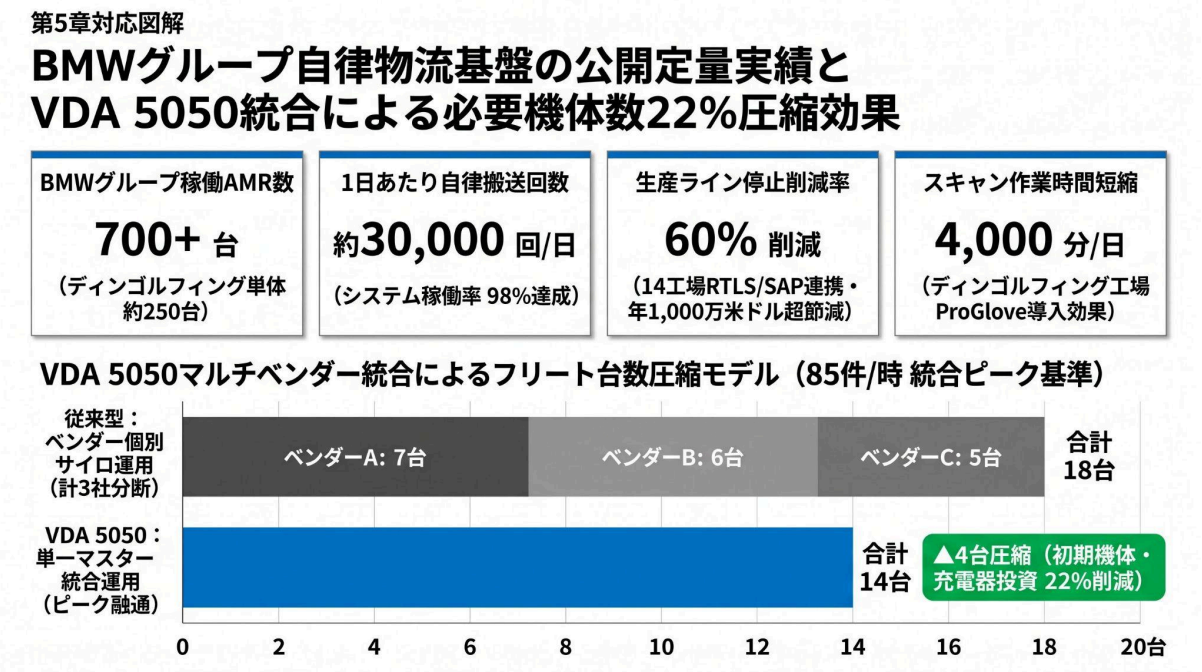
と群隔離制御 である。すべてのAMRは接続開始時にMQTTブローカーへ異常切断時の「遺言メッセージ」を登録している。機体からのMQTT Keep-Aliveハートビートが規定秒数途絶えると、ブローカーが機体に代わって connection トピックへ **connectionState: "CONNECTION_BROKEN"** を **QoS 1**（最低**1**回到達保証） で即座にパブリッシュする（計画的な省電力待機であるv3.0の HIBERNATING や正常切断 OFFLINE とは明確に区別される）。Idealworks OSはこの CONNECTION_BROKEN を受信した瞬間に当該機体の最終報告座標および占有していた Base 区間を BLOCKED（通行不能）としてロックし、後続の全AMRに対して迂回ルートを再計算・配信することで、通信途絶機の後ろに後続機が滞留する連鎖麻痺を遮断する。

第**5**章 大規模**AMR**フリート導入による工程間仕掛在庫（**WIP**）圧縮と物流省人化の定量成果

5.1 有人牽引車（タガー列車）定時巡回からオンデマンド**AMR**＋自律タガー最適分業への転換

従来の自動車組立工場における構内物流は、人間のドライバーが運転する牽引車（エレカ／タガー列車：Routenzüge）が複数台の台車を連結し、一定時間おきに決まったルートを巡回する定時ミルクラン方式が主流であった。しかし、BEV・PHEV・ICEの完全混流によって搭載部品のバリエーションが急増したディンゴルフィング工場のような環境では、定時巡回方式は「次回巡回までの消費変動に備えて多種大量の部品箱をライン脇に常時仮置きしなければならず、ライン脇の仕掛在庫（WIP）と占有床面積が限界に達する」「連結長の長いタガー列車は大回りの幹線通路しか通れず、サブライン奥への手押し運搬が発生する」「3シフト連続稼働でのドライバー確保が困難になる」という3つの限界に直面していた。
BMWグループはこの課題に対し、すべての搬送手段を単一種類のロボットへ置き換えるのではなく、「高頻度・小口オンデマンド配膳を担うアンダーライド**AMR**（**iw.hub**）」と「長距離・大ロット幹線を担う自律タガー列車（**autonome Routenzüge**）および自動フォークリフト」の適材適所のハイブリッド自動化 へと転換した。iw.hubは最大1,000 kgのロールコンテナやパレットドックの下に潜り込み、狭い組立セルやドアサブ組立ゾーンの真横まで直接進入できる。これにより部品供給は「定時まとめ運び」から、WMS/MESの消費イベントに連動して必要な1コンテナだけをオンデマンドで直行搬送する連続フロー（Continuous Flow）へと移行した。小口高頻度補充への移行によってライン脇に滞留させる仕掛在庫バッファが最小化され、創出されたライン脇スペースを第8世代3シリーズ（ノイエ・クラッセ技術採用車）向けのコックピット事前組立設備変更や電動コンポーネント搭載工程へと柔軟に振り向けることが可能となっている。同時に、建屋間や入荷エリアからの長距離大量輸送や高電圧バッテリー搬送には、ディンゴルフィング工場で約20台以上稼働する自律タガー列車（既存牽引車をメーカー非依存で自律化するレトロフィットキットを含む）を投入し、工場全体の物流動線と輸送エネルギー効率を最適化している。

5.2 BMWグループおよび**VDA 5050**統合運用における公開定量実績と**ROI**構造



BMWグループは個別工場の内部管理会計における単機あたりの厳密な投資回収月数やWIP削減床面積の絶対平方メートル値は対外非公表としているが、BMWグループ公式発表、IDEALworks・KINEXON・ProGlove各社の公開導入実績、およびVDA 5050統合によるフリート圧縮の数理モデルを総合すると、大規模AMR群管理の定量成果と投資回収（ROI）メカニズムは極めて明確に裏付けられる。

ROIを牽引する第1の定量要素は、実運用での高稼働率と圧倒的なミッション処理密度である。IDEALworksの公開事例（2024年4〜5月時点）によれば、BMWグループ全体（レーゲンスブルク、ディンゴルフィング、ミュンヘン、スパータンバーグ各工場で稼働し、さらにライプツィヒ、シュタイアー、ハムズホール、デブレツェンへ展開）で 約**600〜700**台以上の**iw.hub** が3シフト環境を走行し、1日あたり 約**30,000**回 の搬送ミッションを 可用性**98%** で完遂している（ディンゴルフィング工場単体でも2026年11月時点で約250台のSTRが稼働）。3シフト工場ではロボット1台が3名分の有人搬送工数を代替するため、98%の高可用性によって予備機比率を最小化できることが直接的な省人化ROIを高める。

第2の要素は、上位IT/RTLS同期による生産ライン停止損失の削減である。KINEXON社の公開導入実績によれば、BMWグループ14工場でのSAP EWM/DM連携および自動搬送トリガー運用により、部品供給遅れや誤配膳に伴う 生産ライン停止を**60%**削減 し、グループ全体で 年間 **1,000**万米ドル以上 の運用コスト節減を達成している（加えてディンゴルフィング工場ではProGlove導入により1日4,000分のスキャン作業時間を短縮）。1分あたりのライン停止損害が極めて大きい完成車工場において、この稼働安定化効果は搬送人件費削減と同等以上の経済価値を持つ。

第3の要素は、**VDA 5050**によるマルチベンダー容量プーリング（機体設備投資の約**22%**圧縮）である。VDA 5050の産業試算モデルが示す通り、例えば1工場内に3つの異なる搬送領域・ベンダー群が存在し、それぞれの時間あたりピーク搬送需要が40件/時、35件/時、30件/時（平均搬送サイクル8分、充電および需要波動に対する最大稼働率上限85%で設計）であったとする。ベンダー別FMSで分断運用すると、ベンダーAは 40 × 8 / 60 = 5.33 台に85%稼働率バッファを見込んで切り上げた **7**台、ベンダーBは 35 × 8 / 60 = 4.67 台から **6**台、ベンダーCは 30 × 8 / 60 = 4.0 台から **5**台 となり、合計 **18**台 の購入が必要となる。しかし実際の工場では各エリアのピーク時間帯は一致せず、工場全体の同時ピーク需要が85件/時であった場合、VDA 5050の単一マスター制御下で輸送能力を相互融通すれば、85 × 8 / 60 = 11.33 台に同じ85%バッファを適用した **14**台 で全需要を処理できる。すなわち、ソフトウェア標準化によってサイロを撤廃するだけで、購入機体数と充電ステーション数を **22%**削減 でき、さらにERP/MES連携インターフェースの開発・保守窓口も3系統から1系統へ集約される。

加えて、床面への磁気テープ・誘導ループ埋設工事が一切不要なブラウンフィールド即時導入

性、BMW i3のバッテリーモジュール流用によるハードウェアコスト抑制、Omniverse（iw.sim）による事前デジタルツイン検証とFoundriesFactoryベースのセキュアOTA一括更新による現地立ち上げ・保守費用のフラット化が重なり、初期投資（CapEx）と運用費（OpEx）の両面から早期投資回収を支える構造が完成している。

完成車メーカーおよび**FA・ロボット開発陣への実装提言**

日本の完成車メーカーおよびロボット・FAシステム開発陣が現場導入を進める上では、以下の3点を設計原則として徹底すべきである。第1に、今後のAGV/AMR調達仕様（RFP）において **VDA 5050**（誘導機混在なら**v2.1**以上、自由走行**AMR**混在なら**v3.0.0**）準拠 と factsheet / JSONスキーマおよび異常系シーケンスの実機検証を必須要件化し、特定ベンダーの独自FMSによるロックインを初期段階で防ぐことである。第2に、狭小通路でのデッドロック対策を「ロボット車載センサの回避性能」に丸投げせず、レイアウト設計段階での一方通行化（DIRECTED）と中央管制による **Base/Horizon**排他トークン解放 によって、待機依存グラフの閉路形成をトポロジー・プロトコル層で根絶することである。第3に、VDA 5050が標準化するのはロボット通信層のみであり、SAP EWMや工場MESとの業務プロセス統合は依然としてプロジェクト成否（黒字化）を左右する最重要領域であるため、ロボット実機と同等以上のエンジニアリング予算を **Apache Kafka**等のイベントストリーミング基盤と閉ループ**JIS**リシーケンス設計（**orderUpdateId / cancelOrder**）、およびデジタルツイン事前検証に配分することである。

参照一次情報・出典一覧

本報告書の作成にあたり参照した英語・ドイツ語の公式規格文書、BMWグループおよびIDEALworks公式発表、ならびに技術解説資料は以下の通りである。

1. VDA / VDMA Official Standard: *Interface for the communication between automated guided vehicles (AGV) and a master control — VDA 5050 Version 2.0.0 / 2.1.0* (January 2025) — https://www.vda.de/dam/jcr:f0c9c019-1506-4dee-998a-e92723fbf025/EN-VDA5050-V2_0_0.pdf
2. VDA / VDMA Official Standard: *VDA 5050 Version 3.0.0 Specification* (2025–2026 Release) — https://www.vda.de/dam/jcr:09f03b91-13e2-4db3-bf30-4f221710071b/VDA5050-V3.0.0-2025-03.pdf
3. VDA 5050 Official GitHub Repository & Specification Schemas — https://github.com/VDA5050/VDA5050/blob/main/VDA5050_EN.md
4. BMW Group Plant Dingolfing Official Fact Sheet: *Fact Sheet and Site Profile (Updated: April 2026)* — https://www.bmwgroup-werke.com/content/dam/grpw/websites/bmwgroup-werke_com/dingolfing/unser-werk/PR_2604_Standortportrait_BMW_DGF_EN.pdf
5. BMW Group Official Newsroom: *BMW Group starts production of the new BMW 3 Series at Plant Dingolfing* (November 3, 2026) — https://newsroom.bmwgroup.com/global/bmw-group-starts-production-of-the-new-bmw-3-series-at-plant-dingolfing/
6. BMW Group PressClub: *Focus on digitalization: BMW Group strengthens production logistics and financial processes with modern SAP architecture* (June 2025) — https://www.press.bmwgroup.com/latin-america-caribbean/article/detail/T0450591EN/focus-on-digitalization:-bmw-group-strengthens-production-logistics-and-financial-processes-with-modern-sap-architecture?language=en
7. BMW Group PressClub: *BMW Group founds company: IDEALworks GmbH to develop and distribute innovative robots and management software for logistics solutions* — https://www.press.bmwgroup.com/middle-east/article/detail/T0321401EN/bmw-group-founds-company:-idealworks-gmbh-to-develop-and-distribute-innovative-robots-and-management-software-for-logistics-solutions?language=en
8. BMW Group PressClub: *The logistics of the future: from data goggles to electric trucks / Autonomous tugger trains at Plant Dingolfing* — https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0266035EN/the-logistics-of-the-future:-from-data-goggles-to-electric-trucks?language=en

9. BMW Group PressClub: *Seven principles for AI: BMW Group sets out code of ethics for the use of artificial intelligence (Millisecond obstacle route calculation)* — https://www.press.bmwgroup.com/middle-east/article/detail/T0319353EN/seven-principles-for-ai:-bmw-group-sets-out-code-of-ethics-for-the-use-of-artificial-intelligence?language=en
10. IDEALworks Official Customer Story: *Driving Success at BMW Group: Idealworks' AMRs Revolutionize Automotive Manufacturing* — https://www.idealworks.com/en/customer-stories/driving-success-at-bmw-group-idealworks-amrs-revolutionize-automotive-manufacturing
11. IDEALworks Official Product Architecture: *Idealworks OS & Intralogistics Warehousing Solutions* — https://www.idealworks.com/en/idealworks-os , https://www.idealworks.com/en/industries/intralogistics-warehousing
12. IDEALworks Technical Blog: *VDA 5050 and the Path to Seamless Automation / Automation with the Robotics Ecosystem* — https://www.idealworks.com/en/blog/vda-5050-and-the-path-to-seamless-automation , https://www.idealworks.com/en/blog/automation-with-the-robotics-ecosystem
13. KINEXON Official Platform Documentation: *KINEXON OS — How BMW scales across 14 sites* — https://kinexon.com/products/kinexon-os
14. NVIDIA Technical Blog & The Robot Report: *Optimizing Robot Route Planning with NVIDIA cuOpt for Isaac Sim* / *NVIDIA Isaac, Omniverse Halos Aid European Robotics Developers (Mega NVIDIA Omniverse Blueprint & idealworks)* — https://developer.nvidia.com/blog/optimizing-robot-route-planning-with-nvidia-cuopt-for-isaac-sim/ , https://www.therobotreport.com/nvidia-isaac-omniverse-halos-aid-european-robotics-developers/
15. Deutsche Telekom Official Media Information & TUM Research: *New Telekom campus network on air in Leipzig (BMW Group Plant Leipzig)* — https://www.telekom.com/en/newsroom/latest-updates/media-information/2020/2/new-telekom-campus-network-on-air-in-leipzig ; *5G & AMR at BMW Plant Dingolfing* — https://mediatum.ub.tum.de/doc/1662575/1662575.pdf
16. Foundries.io Case Study: *idealworks intralogistics streamlined and strengthened* — https://www.foundries.io/insights/use-cases/idealworks-intralogistics/
17. Multi-Agent Fleet Control & Streaming Architecture Analyses: *Why Physical AI Value Depends on Data Streaming and Workflow Orchestration* (Kai Waehner, October 2026) — https://www.kai-waehner.de/blog/2026/10/27/why-physical-ai-value-depends-on-data-streaming-and-workflow-orchestration/ ; *What Is VDA 5050? AGV/AMR Interface & Fleet Pooling Analysis* — https://www.fabrico.io/blog/what-is-vda-5050-agv-amr-interface/ ; *VDA 5050 Standard for Transportation* — https://arxiv.org/html/2311.14615v1

資料11 第3部3：BMWドイツ本国工場の塗装・車体組立ラインにおけるインラインAIビジョン検査「AIQX」と現場エッジ推論基盤

ドイツBMWグループは、次世代生産マスタープラン「BMW iFACTORY（LEAN. GREEN. DIGITAL.）」の品質保証基盤として、塗装工程におけるミクロン単位の自動光学表面検査・ロボット自動補修一貫システムと、最終組立ラインにおけるグループ標準インラインAIプラットフォーム「AIQX（Artificial Intelligence Quality Next）」をドイツ本国（ディンゴルフィング、レーゲンスブルク、ミュンヘン、ライプツィヒ、ランドシャット）を含む世界30拠点以上の生産ネットワークへ展開している。本報告書は、高光沢クリアコート車体に対する直径40～50 μm級の微細塗装欠陥のインライン全数検出から4台協調ロボットによる個別サンディング・ポリッシングへの閉ループ連携、ならびに電気自動車（BEV）・プラグインハイブリッド車（PHEV）・内燃機関車（ICE）が1台ごとに異なる混流組立ラインでの「オーダー整合性検査・音響AI検査」および「産業用PC（IPC）エッジ推論＋クラウドMLOps基盤」の技術構造を、英語・ドイツ語の一次公開資料に基づき徹底解剖するものである。

分析にあたっては、BMWグループ公式発表（独・英PressClubおよびBMW Group IT公式技術解説）で裏付けられる確定事実と、共同開発パートナーおよび専門ベンダー（ISRA VISION、3M、Intel、Robotron、NVIDIA、AWS等）が公開する光学・演算仕様、ならびに社外非公開領域を厳密に区別した。**BMWグループは全社で600件以上のAIユースケースを適用し数百件を量産稼働させている一方**、AIQX単体の不良流出率や金額ベースの投資対効果（ROI）は社外非公開としている。しかし生産技術上の定量実績として、現場従業員による品質保証AI実装期間の3分の2以上（約67%）の短縮、データサイエンティスト生産性の8倍向上、OpenUSD仮想工場計画による30%の計画効率化（予測値）、およびレーゲンスブルク工場における最大1,000台/日の完全個別化ロボット塗装補修シーケンスの量産実行が公式および共同事例で確認されている。

エグゼクティブ・サマリー

本調査が明らかにしたBMWグループのインラインAI品質保証アーキテクチャの核心は、以下の5点に集約される。

第1に、塗装工程（レーゲンスブルク工場等で一貫量産化）では、鏡面反射車体に対して白黒縞模様を投影し反射像の位相歪みを解析する「デフレクトメトリ（位相シフト鏡面反射計測）」を採用し、光学パートナー（ISRA VISION）仕様で最小40～50 μmのダスト噛み込み（ブツ）やクレーターを客観データとして検出する。検出された欠陥の3次元座標・形状・サイズから車体1台ごとの「3Dデジタル欠陥カタログ」を生成し、下流ブースのAI制御ロボット4台がサンディング（研磨）、コンパウンド塗布、ポリッシング（艶出し）、さらにアタッチメントおよび研磨紙の自動交換までを自律遂行する世界初のインライン一貫自動補修を実現した。ボディ外周エッジやドア隙間際、給油口フラップなどロボットが物理的に処理できない領域のみをレーザープロジェクタで車体へ直接照射し、熟練技能員の手直しと最終目視確認を最小限に誘導する人間協調設計を採っている。

第2に、最終組立工程の「AIQX」は、従来の大型で硬直的な固定式カメラポータルを、スマートカメラ・モバイルカメラ端末・車載カメラおよび座席設置マイクへと置き換えたモジュラー型ITプラットフォームである。車両位置測位（WLAN／5G）をトリガーに、上位生産指示データ（VIN・オーダー仕様）とライブ画像を照合してモデル名レタリング（エンブレム）や装備品の異仕様・欠品を即座に検知するほか、組立て中の車両自身が生産システムと双方向通信する「Car2X」と連携し、コネクタ嵌合不良の自己診断や車載カメラによる先行車両の欠品スキャンまでも自律実行する。ディンゴルフィング工場では無人自動走行する完成車（7シリーズ等）の車室内異音を座席マイクで解析する「Acoustic Analytics（音響AI）」へとマルチモーダル化された。

第3に、IT/OTインフラ構成では「現場IPCによるミリ秒エッジ推論・匿名化」と「クラウド（AWS Cloud Data Hub／Amazon SageMakerおよびNVIDIA DGXクラスタ）による集中学習・グローバル配信」の2層ハイブリッド構造を確立している。現場OT層ではIntel OpenVINO等を実装した汎用IPCが数ミリ秒単位の高速推論と、欧州GDPRおよびドイツ労使協議会（Betriebsrat）規定に準拠するための作業員顔・機密部位のオンザフライ匿名化を実行する一方、低遅延5G／WLAN

環境下のコンベヤ工程ではAIQXクラウドでのコンマ数秒（split second）解析も併用する。さらに内製管理基盤「Edge Ecosystem」により、現場IPCのハードウェア故障時にはクラウド上のデジタルツインから予備機へワンクリックで設定を転写し即時復旧させる耐障害性を備える。

一言でいうと、この段落は「なぜBMWは工場のAI検査で『通信遅延』『プライバシー（労組問題）』『PCの故障によるライン停止』の3大トラブルを起こさずに、世界30工場へ一気に展開できたのか？」というインフラの秘密（種明かし）を語っています。

1. なぜ「現場（エッジ）」と「クラウド」の**2**階建てにしているのか？

- 用語の翻訳：
    - **OT**（**Operational Technology**）：工場の現場でコンベヤやロボット、カメラを直接動かす制御システムの世界。絶対に止まってはいけない領域。
    - **IT**（クラウド）：本社やデータセンター側で大量データを集計・分析する世界。
    - **IPC**（**Industrial PC**）：粉塵や振動、熱に耐えられる「工場用の頑丈なパソコン」。
- かみ砕いた仕組み：「AIの『勉強（重たい学習）』はクラウドの超高性能スパコン（NVIDIA DGXやAWS）で一括してやるけれど、本番ラインでの『合否判定（推論）』は、ライン脇に置いた工場用PC（IPC）にやらせる」という役割分担です。
- 生技目線でのメリット：もしすべてのカメラ映像を工場外のクラウドに送って判定していたら、外部のネット回線が少し遅れたり切れたりした瞬間に、工場のコンベヤ全体が止まってしまいます。だから「本番の合否判定は現場のPCで完結させる（＝外と切れても工場は止まらない）」、そして「賢くなった最新のAIデータだけをクラウドから世界30工場へ一斉配信する（スマホのアプリ更新と同じ感覚）」という2階建てにしています。

2. 高価な**AI**専用機を買わずに「普通の工場用**PC**」で数ミリ秒判定＋モザイク処理

- 用語の翻訳：
    1. **Intel OpenVINO**（オープンヴィノ）：インテル製の無料ツールキット。「高価なAI専用ボード（GPU）を積んでいない普通のインテルCPU搭載パソコンでも、AI画像を爆速で処理できるようにする変換ソフト」です。
    2. **Betriebsrat**（ベトリープスラート／労使協議会）とオンザフライ匿名化：ドイツの工場には非常に権限の強い従業員代表組織があり、「カメラで作業員が監視されている」となると絶対に導入許可が出ません（EUの個人情報保護法GDPRも極めて厳格です）。オンザフライとは「映像をハードディスクに保存する前、通りすがりの一瞬のうちに」という意味です。
- かみ砕いた仕組み：ライン脇のカメラ映像が工場用PCに入った瞬間、数ミリ秒（**1000**分の数秒）のうちに**2**つのことをやっています。
    1. 部品のキズや欠品の合否判定（毎分数百個のスピードに対応）。
    2. カメラに映り込んだ作業員の顔や、発表前の新車機密パーツへの自動モザイクかけ。
- セミナーでの強調ポイント：日本の工場でも「現場にカメラを入れると作業員が嫌がる」「高価なGPUサーバーを何百台も買えない」という悩みがありますが、BMWは「普通の産業用PCで、クラウドへ送る前にその場で自動モザイクをかける仕組み」を標準化したことで、労組の合意を取り付け、全工程にカメラを入れることに成功しました。

3. 工程のスピードに応じた「ミリ秒（現場**PC**）」と「コンマ数秒（クラウド）」の使い分け

- かみ砕いた仕組み：すべてを現場PCだけで処理するわけではなく、スピード要求に合わせて賢く使い分けています。
    - プレス部品の高速検査など（**1**秒間に何個も流れる）：現場のPC（IPC）で「数ミリ秒」で即座に判定。
    - 最終組立コンベヤ（クルマが約**1**分に**1**台のペースでゆっくり流れる）：工場内の超高速Wi-Fiやローカル5Gを使って、工場のAIQXクラウドへ写真を飛ばし、車両の注文データ（VIN）と突き合わせて「コンマ数秒（1秒未満）」で判定して作業員のスマホやスマートウォッチに通知します。

4. 現場が最も感動する「ワンクリック復旧（**Edge Ecosystem**）」

- 用語の翻訳：
  - **Edge Ecosystem**（エッジ・エコシステム）：BMWのIT部門が内製した「工場内の何百台ものPCを遠隔管理する仕組み」。
  - **IPC**のデジタルツイン：現場にあるPC1台1台の「中身の設定・入っているAIソフトの丸ごとバックアップ（分身）」をクラウド上に常に持っておくこと。
- かみ砕いた仕組み：工場の現場に何百台もPC（IPC）を置くと、必ず「夜勤中に1台のPCが突然壊れた！」というトラブルが起きます。従来の工場なら、IT部門のエンジニアが駆けつけてOSや検査ソフトを入れ直すまで何時間も検査が止まりました。BMWの現場では、現場の作業員が棚から「予備の空っぽの**PC**」を持ってきて線を繋ぎ、管理画面をマウスで「ワンクリック」するだけです。するとクラウドにある「壊れたPCの分身（デジタルツイン）」から設定とAIソフトが全自動で流し込まれ、IT担当者いらずで数分以内にラインがそのまま復旧します。

第4に、AI専門人材の不足と不良品教師データの枯渇に対し、BMWは「特徴あたり約100枚の良品・不良品実画像撮影とGUIマーキングのみで一晩のうちにニューラルネットワークを自動構築するノーコードAI環境」と、NVIDIA Omniverse（OpenUSD）に連動する世界最大級の産業用合成データ基盤「SORDI.ai（120クラス以上・120万枚超の自動アノテーション付きフォトリアル合成画像）」を融合させた。これにより実車が存在しない量産立ち上げ前（SOP前）の仮想カメラ検証とレア欠陥の事前学習を可能にし、現場主導での品質保証AI立ち上げ期間を3分の2以上短縮している。
第5に、インライン全数検査データは単なる合否選別にとどまらず、ミュンヘン工場塗装ブースにおける160項目以上の特徴量監視と気中ダストセンサ連動による空調フィルタの早期交換予測、車体溶接スパッタ検知による保全周期の自動調整、ランドシャット部品工場におけるEVモーター筐体の100%インラインX線CT・AI検査（42秒で2,400枚撮像・3D再構成）などの上流プロセス制御へ還流している。現在BMWは「ZDSC（Zero Defect Supply Chain）Campus」を通じたサプライヤー育成に加え、AIQX自体を外部サプライヤーへ開放・提供する検討を進めており、日本の完成車メーカー・光学機器ベンダー・内外装およびハーネス部材メーカーにとっても次世代品質保証の重要な設計指針となる。

第1章 塗装工程におけるミクロン単位のインライン全数光学検査と自動補修ロボット連動

自動車製造において塗装表面の光沢と平滑性は商品価値を左右する最重要品質項目であるが、200色を超えるボディカラーと強い鏡面反射を持つクリアコート表面から微細なダスト噛み込みやピンホールを目視で全数抽出する作業は、検査員の視覚疲労とシフト間の判定バラツキを不可避的に伴う。塗装検査システムベンダーの業界推計によれば、人間の目視検査がタクトタイム内に実質カバーできる車体表面積は60〜70%にとどまり、微細欠陥の15〜30%が見逃されて後工程や市場へ流出する課題があったとされる。BMWグループはミュンヘン工場、ディンゴルフィング工場、ライプツィヒ工場、レーゲンスブルク工場等の塗装工程に自動表面検査（AOI：Automatisierte Oberflächeninspektion）を展開してきたが、なかでもレーゲンスブルク工場（Plant Regensburg）において「自動表面検査（AOI）」「自動表面補修（AOB：Automatisierte Oberflächenbearbeitung）」「自動レーザーマーキング」の3段階を完全デジタル接続した世界初の量産一貫システムを完成させ、2022年3月より自動補修工程の量産稼働を開始、2023年5月にその全貌を公式発表した。

1.1 デフレクトメトリ（位相シフト鏡面反射計測）の光学原理と走査セル構造

焼付乾燥を終えたクリアコート塗装ボディは鏡面に近い高い正反射特性を持つため、一般的な拡散照明カメラやレーザー光切断（三角測量）方式の3Dビジョンでは、光源の強い映り込み（ハレーション）で画素飽和を起こすか、拡散反射光が返らず計測不能となる。この光学的限界を突破するため、BMWが塗装AOIで標準採用している計測原理が「デフレクトメトリ（Deflectometry：位相シフト鏡面反射計測）」である。
デフレクトメトリでは、被検査物である塗装ボディ表面そのものを「光学系の一部（大型曲面鏡）」

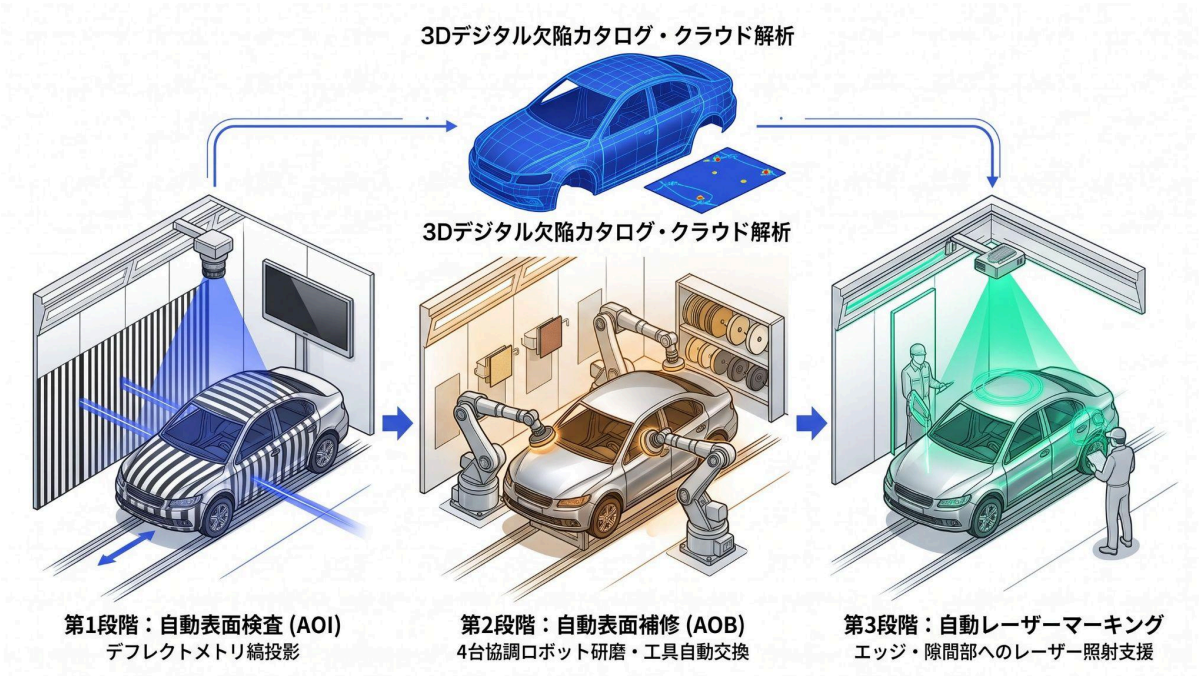
として機能させる。スクリーン光源から規則的な白黒の縞模様（ストライプパターン）を車体へ投影し、車体表面で正反射した縞パターンの虚像を高解像度カメラで撮像する。レーザー三角測量が表面の高さ変位 z を直接測るのに対し、デフレクトメトリは表面の局所的な「傾き（勾配：dz/dx および dz/dy）」に対して極めて高い光学感度を発揮する。平滑な塗膜上にわずか数十ミクロンの突起（ダスト噛み込み）や窪み（クレーター）が存在すると、その微小斜面の法線ベクトルが角度 theta だけ傾き、反射の法則によってカメラへ向かう反射光線角度は2倍の 2 * theta だけ偏向する。この光線偏向が、カメラ撮像面上の白黒縞パターンの局所的な位相歪み（縞の曲がりやコントラスト変調）として拡大観測される。
産業用デフレクトメトリの実運用で用いられる位相シフト法（Phase-Measuring Deflectometry）では、モニター上の正弦波白黒縞パターンの位相を一定のステップ（例えば4ステップ法では delta_k = 0, pi/2, pi, 3*pi/2）ずつ高速シフトさせながら、直交するX・Yの2方向について連続撮像を行う。各画素 (x, y) における k 回目の撮像輝度 I_k(x, y) は、環境光およびベースコート色由来の背景輝度を A(x, y)、鏡面反射による縞の変調振幅を B(x, y)、求める表面勾配由来の位相を phi(x, y) とすると、プレーンテキスト表記で以下の式により表される。
I_k(x, y) = A(x, y) + B(x, y) * cos(phi(x, y) + delta_k)
連続撮像した4枚の画像（I_0, I_1, I_2, I_3）から逆正接関数 atan2((I_3 - I_1), (I_0 - I_2)) を画素単位で演算することで、塗色の明暗やメタリック反射率に依存する背景輝度 A(x, y) と振幅変動を数学的に相殺し、純粋な表面勾配マップ phi(x, y) と局所曲率・散乱減衰成分を高S/N比で分離抽出できる。これがソリッドブラックからホワイト、メタリックカラーまで200色以上の混流塗装ラインにおいて、塗色ごとの照明・閾値変更なしに微細凹凸を安定検出できる光学的根拠である。なお、デフレクトメトリ自体は表面トポグラフィ（微小勾配変化）を捉える手法であり、塗膜の絶対膜厚そのものを非破壊計測するものではないが、過膜厚や粘度・フラッシュオフ不良に起因して表面に現れる「垂れ（Runs & Sags）」や「肌荒れ（オレンジピール）」の周期的うねりを高感度に定量化できる。
走査セルのハードウェア構造には、工場ラインの設計に応じて2つの実装形態が存在する。BMWレーゲンスブルク工場の公式発表で確認される第1段階（AOI）ブースでは、車体を取り囲む大型モニター群が白黒ストライプパターンを投影し、高精度カメラアレイが車体全域の反射パターンを走査するポータル／ブース構造が採られている。一方、BMWの塗装検査技術パートナーであるISRA VISION（Atlas Copcoグループ）が自動車OEM向けに展開するロボット誘導式システム（PAINTSCAN等）では、多関節ロボットアーム先端にパターン投影スクリーンと高解像度カメラを一体搭載し、車体曲面に沿って法線角度を保ちながら走査するセル構造も広く実用化されている。BMW塗装部門バイスプレジデントのRudolf Hummelsberger氏との共同取材に応じたISRA VISIONビジネスラインマネージャーのWolfgang Berggold氏によれば、同社のデフレクトメトリAOIは高い横方向空間分解能により直径 **40～50 µm**（**0.04～0.05 mm**）の極小欠陥まで検出可能である。またISRA VISION製システムの業界公開ベンチマーク値では、ロボット走査速度最大 **1,200 mm/s** で車体表面の **99%** をカバーし、1台あたり **50**秒未満 というインラインタクト内で全数検査を完了する性能が報告されている。（注：BMW自身はレーゲンスブルク工場の各ブース単体の秒単位サイクルタイムや詳細分解能数値を公式リリース上では非開示としているが、塗装仕上げライン全体として1稼働日あたり最大1,000台という高スループットをインラインで処理している。）

1.2 微細ノイズと真欠陥を判別する3Dデジタル欠陥カタログとAI分類アルゴリズム

40～50 µm級の分解能を持つデフレクトメトリを量産ラインへ適用する際、最大の壁となるのが「過検出（疑似欠陥）」の抑制である。光学系が高感度であるほど、顧客の目には全く識別できない許容範囲内の微細な塗膜うねりやメタリックフレークの微小凹凸、あるいは表面に軽く乗っただけの未固着塵までをも位相歪みとして検出してしまう。これらを無差別に補修対象とすれば下流の研磨ロボットのタクトが破綻し、健常なクリアコートを不要に削るリスクが生じる。
BMWはこの課題を解決するため、カメラ群が検出した反射縞の歪み位置データをコンピュータシステムへリアルタイム集約し、車体形状と空間座標を一致させた「車両のデジタル3D画像（3D-Abbild）」を構築している。検出されたすべての表面変化は、車体上の正確な3次元位置座標、平面サイズ、立体形状（凸型か凹型か、エッジ勾配）とともに「分類済み3Dデジタルカタログ」として保存される。

この3Dカタログデータに対し、塗装現場の熟練検査員・技能員が長年培ってきた集合的知見（どのパネル部位の、どのサイズ・形状の特徴が顧客視点での品質不良にあたり、実際に後処理が必要か）を組み込んだAI分類アルゴリズムが適用され、客観的な品質基準に基づいて「許容内の微細特徴」と「補修必須の真欠陥」を切り分ける。塗装検査システムで分類対象となる代表的欠陥には、塗装不良の中で最多を占めブース給気フィルタ劣化や清掃残りに起因する凸型の「ダスト・繊維噛み込み（ブツ）」、シリコーンや油分汚染で塗膜が弾かれる円形凹型の「クレーター・フィッシュアイ」、焼付硬化時に溶剤ガスが塗膜表皮を突き破る「ピンホール・ソルベントポップ」、過剰塗布や粘度不良による「垂れ（Runs & Sags）」、および霧化不良や温湿度変動による「オレンジピール（肌荒れ）」が含まれる。業界検証データでは、デフレクトメトリとディープラーニング分類エンジンの組み合わせにより、欠陥種別に応じて *90〜99.5%* の検出・分類精度が達成されている。
一方でHummelsberger氏は、塗装AI検査における現在進行形の技術課題として「ツートーン塗装（Multi-tone topcoats）等の高度な個別カスタム仕様車における塗色境界部の反射特性変化」および「環境負荷低減のために塗料メーカーが新規開発する水性・バイオ系等の新基材・新塗料（分子構造が従来塗膜と異なり光学的見え方が変化するもの）」を挙げている。既存データで学習済みのAIモデルに対して新規塗膜はドメインシフトを引き起こすため、BMWでは新塗料や特殊塗装の導入時にケースバイケースでの技術評価と追加データ適合を実施している。

1.3 レーゲンスブルク工場の自動補修ロボット閉ループ制御とレーザーマーキング支援



第1段階（AOI）で生成された車体1台ごとの個別表面プロファイル（要補修欠陥の3D座標・形状・サイズデータ）は、直後の第2段階「自動表面補修（Automated Surface Processing / AOB）」ブースへダイレクトに伝送され、ロボットによる自己完結型の機械補修ループを駆動する。
補修ブース内には、塗装直後の車体を四方から囲むように **4台のAI制御多関節ロボット** が配置され、周囲のトラッキングカメラが作業全体を監視している。業界技術報道によれば、同ラインの自動塗膜補修には3Mの「3M Finesse-it Robotic Paint Repair System」が導入されており、一般的なロボット研磨セルでは力覚センサ制御によって塗膜への押し付け圧力を一定に保ちながら微細除去を行う機構が採られる。BMWの公式発表によれば、この4台のロボットは以下の4ステップを車体1台ごとに完全自動で遂行する。

1. 車体別の動的パス生成：固定ティーチング軌道をなぞるのではなく、上流AOIが特定したブツや突起の正確な3D座標に基づき、必要な箇所のみへ干渉なくアプローチする最適加

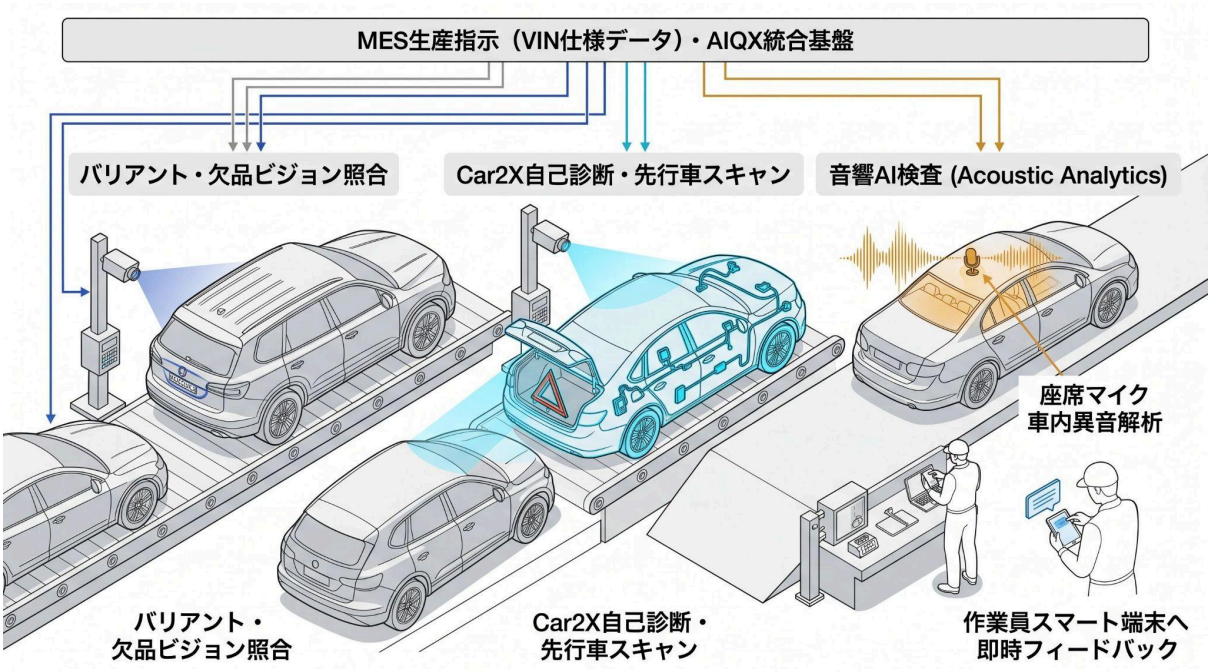
工順序と軌道をAIが車体ごとに生成する。レーゲンスブルク工場では1稼働日あたり最大1,000台が通過するため、毎日最大 **1,000**通りの固有の**AI**補修シーケンス が実行される。

2. 局所サンディング（研磨）：対象となる微小ダスト突起部のみを精密にサンディングして平滑化する。
3. コンパウンド塗布とポリッシング（艶出し）：サンディング後の微細研磨痕に対し、ロボット自らがポリッシングコンパウンド（Polierpaste）を塗布し、バフポリッシングを行って周囲のクリアコートと同等の鏡面光沢を復元する。
4. アタッチメント切替と研磨紙の自動更新：サンディングツールとポリッシングツールのアタッチメント持ち替え、および摩耗したサンドペーパー（研磨紙ディスク）の交換までをロボットがセル内で自律的に完結させる。

ここで生産技術上極めて重要な設計判断が、ロボットの物理的限界を見極めた第3段階「自動表面マーキング（Automated Surface Marking）」による人間との役割分担である。BMWの公式発表は、現行のAOIおよび研磨ロボットでは車体パネルの外周エッジ部（Kanten）、ドアやパネル継ぎ目の隙間（Fugen）から数ミリメートル以内の隣接領域、および剛性が低く繊細な給油口フラップ（フューエルフィラーフラップ：Tankklappe）を処理できないと明記している。エッジや隙間際では反射縞が途切れる上、回転パッドがエッジに掛かると接触面圧が急増してクリアコートを削り抜く危険が高いためである。
そのため最終仕上げと最終検査には熟練作業員が配置されるが、ロボットがすでに検査合格または自動補修完了した広い一般面を作業員が最初から見直す無駄を徹底排除している。天井に設置された レーザープロジェクタ が、AOIで未検査となったエッジ・隙間領域や手直しが必要な残存箇所だけをデジタル光線で車体上に直接照射・ハイライトし、作業員の見落としゼロと目視負担の極小化を両立させている。さらにBMWは、ブース内のカメラを用いて人間が行った手直し作業を自動記録し、作業員が車体と記録用コンピュータ端末の間を往復する入力作業までも不要にする機能拡張を進めている。

第2章 最終組立ラインにおける「AIQX」プラットフォームの全体構造とマルチモーダル拡張

塗装工程を経た車体が流れる最終組立ラインでは、品質保証の課題が「ミクロン級の鏡面凹凸」から「数百万通りにおよぶ混流仕様バリアントのリアルタイム照合と組付け異常の即座の摘出」へと移行する。BMWグループは平均して約1分に1台のペースで新車を生産しており、同一コンベヤ上にBEV・PHEV・ICE、140カ国以上の仕向地仕様、個別オプション装備車が連続混流している。この高密度混流ラインの全数品質保証を担うグループ共通基盤が、生産技術者・ソフトウェア開発者・データサイエンティストのグローバル混成チームがアジャイル開発で内製した「AIQX（Artificial Intelligence Quality Next）」である。



2.1 混流バリアントに対するオーダー整合性検査と「Car2X」車載カメラ連携

AIQX導入以前、BMWの組立ラインでは特定工程に大型の「固定式カメラポータル（門型検査ゲート）」を据え付け、ルールベースの画像処理で外観検査を行っていた。しかし従来型カメラポータルは高コストでライン変更への追従性に欠ける上、部品に付着したわずかなホコリや油染み、照明反射によって「ドアシル（スカッフプレート）のロゴを正しく認識できない」「良品を不良と誤判定する（疑似エラー：Pseudo-errors）」といった過検出が多発し、不要なコンベヤ停止を招いていた。
AIQXはこの固定ポータルを段階的に置き換え、コンベヤ沿いに柔軟に配置できる標準スマートカメラやモバイルカメラ、さらには組立て中の車両自身の車載カメラ・ECU群を統合したモジュラープラットフォームである。SUVやセダンなど異なる車型の車両が各ステーションを通過する際、工場内の車両位置測位システム（WLAN／5Gローカライゼーション）がリアルタイムにシャッターをトリガーし、上位MES生産指示データ（VIN別の車両オーダー仕様）と現場取得データを突き合わせる。BMWの投資家向け製造資料および公式発表によれば、AIQXは「部品装着有無（Part Installed?）」「異仕様・バリアント識別（Correct Part?）」「組付け状態・異常検知（Anomaly & Plug Variance Detection）」の3軸で検査を遂行する。
第1の部品有無・定位置装着確認では、トランク内の三角表示板（Warning triangle）や救急キット（First-aid kit）の配置、フロントガラスのワイパーカバーキャップの装着状態、ボンネット上のBMWバッジ、ドアロック機構など、人間が1日に何百台も反復目視すると見落としが生じやすいルーチン検査を完全自動化している。
第2のオーダー整合性・バリアント照合の代表例が、ディンゴルフィング工場の最終検査工程で稼働するモデル名レタリング（エンブレム）照合AIである。「X3」や「xDrive」をはじめ起こり得るすべての文字バッジの組み合わせパターンが画像データベースおよび深層学習モデルに登録されており、完成車のリア等を撮影したライブ画像と当該車両のオーダー仕様データを自動照合する。指定エンブレムの欠落や異仕様バッジの誤貼付が検知された場合、最終検査スタッフのスマートデバイス（ハンドヘルド端末やウェアラブル端末）へ即座に不一致通知が飛び、その場で是正される。さらに内装・モジュール領域では、ランドシャット工場のコックピット生産ラインにおいて**1**台あたり**30**秒間で約**50**カ所の品質特徴量 を一括自動検査する最終品質ゲートが稼働しているほか、革内装品におけるステッチ（縫い目）の欠落や縫製誤りを自動検出するAIモデルも構築されている。
第3のコネクタ嵌合確認および組付け異常検知において独自の威力を発揮するのが、AIQXとク

ラウド連携通信技術「Car2X」の統合である。**Car2X**は組立コンベヤ上を移動する車両自体をアクティブな通信主体へと変え、車両自身が「設計上意図された組立ステータス」と「実際の組立・接続ステータス」を自己比較することで、ワイヤーハーネスのプラグ接続不良（Faulty plug connections）等の差異をリアルタイムに特定し、ライン作業員へ即座に通報して後工程での手直し（リワーク）を削減する。さらにCar2XとAIQXを連携させた物体認識として、コンベヤ上の後続車両が自車に内蔵された車載カメラ（**Built-in cameras**）を起動して直前を流れる先行車両をスキャンし、例えば先行車両の開いたトランク内に三角表示板が装着されていなければAIQX光学品質制御が即座に欠品を認識して作業員と生産制御システムへアラートを発する車両間相互検査までもが実用化されている。（注：警告ラベルの多言語文字列照合、内装トリムの細かな色番識別、柔軟なワイヤーハーネスの配策ルート形状やコネクタ二次ロック爪単体の外観判定については、BMWの公開一次資料では個別の詳細仕様までは明示されておらず、ラベル位置確認へのCV＋OCR併用やCar2Xによるプラグ接続検証・AIQXバリアント検知の枠組みの中で包括的に運用されている。）

Car2X（カー・トゥ・エックス）とは、本来は公道を走行する自動車と「あらゆる外部要素（**X**＝**Everything**：他車、信号機などの道路インフラ、歩行者、クラウド等）」を無線でつなぐ通信技術（一般には**V2X**：**Vehicle-to-Everything**とも呼ばれる）ですが、BMWの生産技術（iFACTORY／AIQX）の文脈では、「製造ライン上で組み立て中の車両そのものを、工場のITシステムと双方向通信する『能動的なIoTセンサー兼検査装置』に変える独自技術」を指します。

公道向けのCar2Xと、BMWが工場のインライン検査で実用化した工場内Car2Xの違いと具体的な仕組みは以下の通りです。

用語解説　**BMWのCar2X**

1. 本来の意味（モビリティ・自動運転領域）
自動車（Car）が周囲の対象（X）とリアルタイムに情報交換し、死角の危険回避や渋滞緩和を行う技術全般です。

- **Car2Car**（車車間通信）：先行車の急ブレーキや故障停止を後続車へ即座に伝える。
- **Car2I**（路車間通信）：信号機の切り替わりタイミングや交差点の死角情報をインフラ（Infrastructure）から受信する。
- **Car2N / Cloud**（ネットワーク通信）：クラウドと地図・交通情報やOTAデータをやり取りする。

2. BMW生産ライン（**AIQX**連携）における「工場内**Car2X**」の革新性
従来の工場では、コンベヤ上の車体は「外部のカメラや検査機から一方的に検査される受動的なワーク（被加工物）」に過ぎませんでした。BMWの工場内Car2Xは、電装系・通信モジュールに電源が入った段階から組み立て途中のクルマ自身が工場のクラウド／生産制御システム（**MES**）や**AIQX**と直接対話し、以下の2つの品質検査を自律実行します。

- ① 車両自身による「自己診断・コネクタ嵌合チェック」 車両の車載ECUが「生産指示データ上の本来あるべき組立ステータス（VIN仕様）」と「いま実際に自車に接続されている部品・配線のステータス」をリアルタイムで自己照合します。ワイヤーハーネスのプラグ差し込み不足（半嵌合）や未接続があれば、下流の最終テスターに到達するのを待たず、クルマ自身が「ここのコネクタが刺さっていない」と現場作業員のスマート端末へ即座に通知し、その場での手直し（リワーク最小化）を可能にします。
- ② 車載カメラを使った「後続車による先行車の外観スキャン」 これが生産技術として最もユニークな仕組みです。近年の車両にはADAS（先進運転支援）用の高性能カメラがフロントガラス等に標準内蔵されています。コンベヤ上を流れる後続車両が自車の内蔵カメラを起動し、目の前を流れる先行車両のリアや開いたトランク内部を撮影します。その映像をAIQXへ無線伝送し、「先行車のトランク内に指定の三角表示板が載っているか」「エンブレムが正しいか」を自動判定します。

生産技術・設備投資上のメリット
工場の天井やライン脇に高価な産業用カメラポータルを何十台も新設・移設しなくても、「毎日コンベヤ上を流れてくる車両自体が最初から持っている高性能カメラと通信機能」をそのままインライン検査設

備としてタダ働き（有効活用）させられる点に最大の合理性があります。車種変更で車高や全長が変わっても、前後の車間距離さえ保たれていれば設備側の物理的な段取り替えが不要になるという、究極の設備レス・ポカヨケ機構と言えます。

2.2 音響AI検査（Acoustic Analytics）によるマルチモーダル品質検査への拡張

カメラによる視覚検査とCar2Xによる電気的接続確認をすり抜ける品質リスクとして、走行中の駆動系ノイズや車室内の微細なビビリ音・異音といったNVH（騒音・振動・ハーシュネス）不具合がある。従来これらは出荷前検査の熟練ドライバーが車内で耳を澄ます主観的な聴覚官能検査に依存していたが、BMWはAIQXの拡張可能なプラットフォーム上に音響品質検査サブ領域「Acoustic Analytics」を統合し、ディンゴルフィング工場および米国スパータンバーグ工場に展開した。
ディンゴルフィング工場における実装は、工場内自動運転技術と一体運用されている点が際立っている。組立を終えた新型BMW 7シリーズ等の完成車が、人間の運転手を乗せない 無人自動走行モード で工場内の短距離テストトラックを自律走行する間、車内のシート（座席）に装着された専用マイクロフォンが車室内で発生するあらゆる走行音・作動音を録音する。録音データは過去の膨大な音響教師データで学習された機械学習モデルによってリアルタイムに分類・解析され、顧客引き渡し前の最終チェックとして、望ましくない背景ノイズや異音異常が客観的かつ高速に自動判定される。これによりライン脇カメラによる外観バリアント照合、Car2Xによる自己診断・先行車スキャン、および完成車座席マイクによる音響解析という3つの異なる検査モダリティが、VINオーダー仕様データとスマート端末通知を軸とした単一のAIQX基盤上でシームレスに統合されている。（注：シートレール単体駆動音、ワイパーモーター異音、ドア閉まり音などの個別部品単位の周波数帯域設定や振動加速度センサ併用の有無については、BMW公式リリース上では完成車テスト走行時の車内音響収録として包括記述されており、個別アクチュエータ別の音響パラメータ詳細は非公開である。）

2.3 BMWインラインAI検査（塗装光学系・組立AIQXビジョン・音響AI）の技術仕様比較

塗装工程の光学表面検査・自動補修システムと、最終組立工程のAIQXビジョンおよび音響AIの技術仕様・対象工程の比較を以下の表に整理する。
| 比較項目 | 塗装光学系（AOI・自動補修AOB） | 組立AIQXビジョン（Car2X連携） | 音響AI（Acoustic Analytics） | | :--- | :--- | :--- | :--- | | 主対象工場と展開状況 | レーゲンスブルク工場（3段階一貫量産）やミュンヘン・ディンゴルフィング・ライプツィヒ工場 | 全グローバル完成車工場およびランドシャット部品工場やデブレツェン新工場 | ディンゴルフィング工場（7シリーズ無人走行検査等）および米国スパータンバーグ工場 | | センサ構成と計測原理 | 大型縞投影モニターと高解像度カメラによる位相シフト鏡面反射計測（デフレクトメトリ） | ライン脇スマートカメラやモバイルカメラおよび車載カメラとWLAN／5G車両測位連動 | 完成車の座席に直接装着した高精度計測用マイクロフォンによる走行時車内音響収録 | | 主な検査対象と不良モード | ダスト噛み込み（ブツ）やクレーターおよびピンホールや垂れやオレンジピール | モデル名バッジ異仕様や三角表示板・ワイパーキャップ欠品およびプラグ接続不良 | 完成車走行中の駆動系異音や車室内ビビリ音および不要背景ノイズ（NVH異常） | | 検出分解能とタクト性能 | 最小40～50 μm検出（ISRA仕様）かつ最大1,000台/日の個別補修をインライン実行 | エッジIPCで数ミリ秒～クラウド連携で1秒未満判定しコックピットは30秒で約50特徴検査 | 短距離テストコース自動走行タクト内でリアルタイム音響分類し人間の聴覚評価を代替 | | 後工程・作業者連携 | 4台ロボットが自動研磨・艶出しを完結しエッジ部のみレーザープロジェクタで作業員へ照射 | 作業員のスマート端末へ不一致アラートを即時通知しライン停止を抑えてその場で是正 | 出荷前最終品質ゲートとして客観合否を自動記録し異常車両のみを診断・手直しへ誘導 |

第3章 現場エッジ推論基盤とクラウド学習のハイブリッドIT/

OTアーキテクチャ

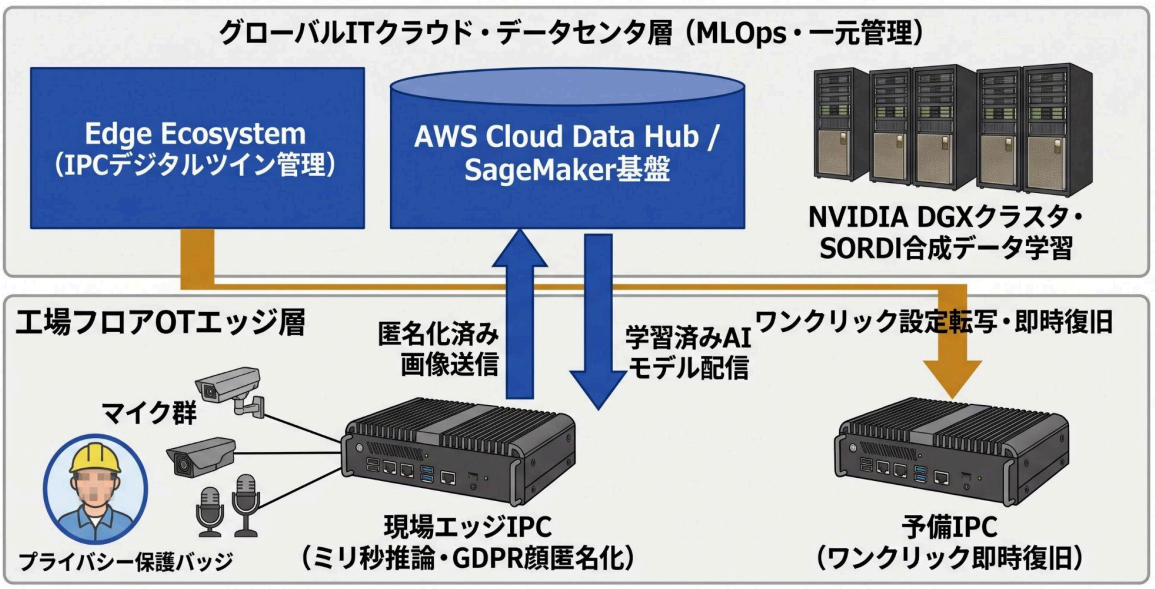
1工場あたり数百台規模のカメラ・センサ群（コンベヤ沿いの固定・スマートカメラ、作業員モバイルカメラ、車載内蔵カメラ、および全社で400台以上・1日14,000回以上の搬送を行う自律搬送ロボットSTRを含む500台超のスマート車両群のセンサ）から発生する膨大なデータストリームを、ラインタクトを遅延させずにどう捌くか。BMW Group ITが構築したアーキテクチャは、工場フロアOT（制御技術）層での高速エッジ処理と、グローバルITクラウド層での集中MLOps・デバイス管理を機能分離しつつ密結合させたハイブリッド基盤である。

3.1 工場フロアにおける「Edge Ecosystem」とミリ秒エッジ推論・GDPR匿名化

BMWの生産ラインにおける推論実行系は、工程の要求レイテンシとプライバシー制約に応じて「ローカルIPCによるミリ秒エッジ推論」と「低遅延5G／WLANを介したAIQXクラウド高速解析」の2経路を使い分けている。
高速部品検査やプレス工程、およびデータ保護が求められる現場ワークステーションでは、産業用PC（IPC）および標準デスクトップPC上でのローカルエッジ推論が実行される。BMWは産業用コンピュータビジョン企業のRobotron Datenbank-Software GmbH（ドレスデン）およびIntelと協業し、「Intel Distribution of OpenVINO ツールキット」を統合したWindows／Linux対応の推論基盤を展開した。OpenVINOのModel OptimizerとInference Engine APIにより、深層学習モデルの各層をIntel CPU、内蔵グラフィックス（iGPU）、ディスクリートGPU、および画像処理アクセラレータ（VPU）へ分割・並列割り当て（ヘテロジニアス実行）することで、高価な専用AIアクセラレータサーバを新設せずとも標準PC／IPC上で **1**画像あたり数ミリ秒（**milliseconds**）でのパターン照合・評価を実現し、ライン上で 毎分数百個の部品 を24時間連続検査する性能を引き出している。また、高度な3D点群処理やロボット制御・映像ストリーム解析を伴うエッジ領域ではNVIDIA GPU環境も適材適所で併用される。
さらに現場エッジIPCが担う極めて重要な役割が、工場フロアからITクラウド層へ画像データが送信される前段階での オンザフライ個人情報・機密匿名化 である。欧州一般データ保護規則（GDPR）およびドイツの従業員代表委員会（労使協議会：Betriebsrat）の厳格なコンプライアンス規定により、製造ラインで作業員が映り込む映像をそのまま保存・クラウド転送することは許されない。BMWはオープンソース公開も行った「BMW-Anonymization-API」を現場PC上のOpenVINO推論で稼働させ、ライブ映像・記録画像内の人間の顔や未公開の機密部品領域を数ミリ秒で自動検出し、ピクセル化（モザイク処理）を施してから上位系へ渡すデータガバナンスを徹底している。
一方、車両オーダーデータやCar2Xとの広域連携を行う最終組立コンベヤ上のAIQXステーションでは、車両測位トリガーで撮影された画像を低遅延工場ネットワーク経由でクラウドベースのAIQXプラットフォームへ直接伝送し、ディープラーニングモデルがコンマ数秒（split second）で解析して作業員のスマート端末へ結果を返す構成も稼働している。この無線・クラウド連携の検証拠点として、BMWは2022年7月にディンゴルフィング工場の研修センター内に220平方メートルの独立実証セル「Innovation Hub Dingolfing（工場内の実験工場）」を開設し、Microsoft、Intel、NTT等のパートナーとともにローカル5G網統合やWLAN位置測位の実機検証を重ね、デブレツェン新工場等のハイブリッド5Gスマートファクトリー実装へと繋げている。

3.2 「現場エッジ推論＋クラウド一括MLOps」2層分離の工学的必然性と耐障害性

エンタープライズITと工場OTの2層ハイブリッドシステムアーキテクチャ図



BMWが現場OTエッジ層（IPC群）とグローバルITクラウド層を2層分離し、内製管理基盤「Edge Ecosystem」および全30工場共通のIT調和プログラム「Shopfloor.Digital」で統合した理由は、量産工場における以下の3つのエンジニアリング要件に帰着する。
第1は 通信遅延の確定性保証と**WAN**障害時の自律稼働（レジリエンス）である。ミリ秒単位の応答を要する検査や現場機器制御において外部クラウド通信のジッタや回線瞬断に依存すれば、通信障害がそのまま工場全体のライン停止を招く。推論実行エンジンと設備制御インターフェースを工場フロアのIPCに配置することで、外部インターネットや広域回線に障害が発生しても現場単独で検査と生産を無停止継続できる。
第2は **IPC**デジタルツインによるワンクリック即時フェイルオーバー（ゼロダウンタイム保守）である。数百台のIPCを現場に分散配置する際の最大の運用リスクはハードウェア故障時の復旧時間である。BMW Group ITが開発した「Edge Ecosystem」は、工場フロアの各IPCの構成・導入アプリ・設定パラメータを クラウド上の「デジタルツイン」として一元保持 している。万一、現場の稼働中**IPC**にハードウェア障害が発生した場合、現場に**IT**専門要員がいなくとも、作業員がローカルの予備**IPC**（スペア機）を繋いで管理画面で マウスをワンクリックするだけ で、クラウド上のデジタルツインから全く同一の環境構成が予備**IPC**へ自動転送され、直ちに生産を再開できる。
第3は **AWS**および**NVIDIA DGX**を用いたクラウド一括学習と全**30**拠点への横展開（**MLOps**）である。各工場で匿名化・収集された画像・センサデータや品質履歴は、AWS上に構築された全社データレイク「Cloud Data Hub」（Amazon Kinesis Data Firehose、AWS Glue等を活用）へ集約される。AIモデルの開発・運用には、Amazon SageMaker Studioを基盤とする社内セルフサービスMLOps環境「JuMa」が整備されており、開発チームがカタログから申請するとセキュリティ基準を満たした分離AWSアカウントとSageMakerワークスペースが自動発行され、Cloud Data Hubのデータを用いた学習から本番パイプライン展開までを一気通貫で実行できる（遊休計算リソースの自動シャットダウンによるコスト最適化機能も備える）。（注：外部の技術調査文献ではBMWのエッジ・クラウド連携文脈においてAWS IoT GreengrassやAmazon SageMaker Neo、OpenShift、コンテナ技術の活用も言及されているが、BMW公式発表では内製の「Edge Ecosystem」が工場IPC群の標準オーケストレーション基盤として位置づけられている。）
さらに50万～120万枚規模の超大規模画像データセットや合成データの深層学習には、NVIDIA Hopperアーキテクチャ等を採用したオンプレミス／データセンタの「NVIDIA DGXシステム（DGX H100等）」および「NVIDIA Base Command」クラスタが稼働している。これにより従来システム比で **4～6**倍の学習パフォーマンス向上 と データサイエンティスト生産性の**8**倍向上 を達成し、1つの工場で 검증された優良AIモデルを中央オフィスから世界30拠点以上の対象IPCへ一括配信・横展開するグローバルMLOpsループを完結させている。

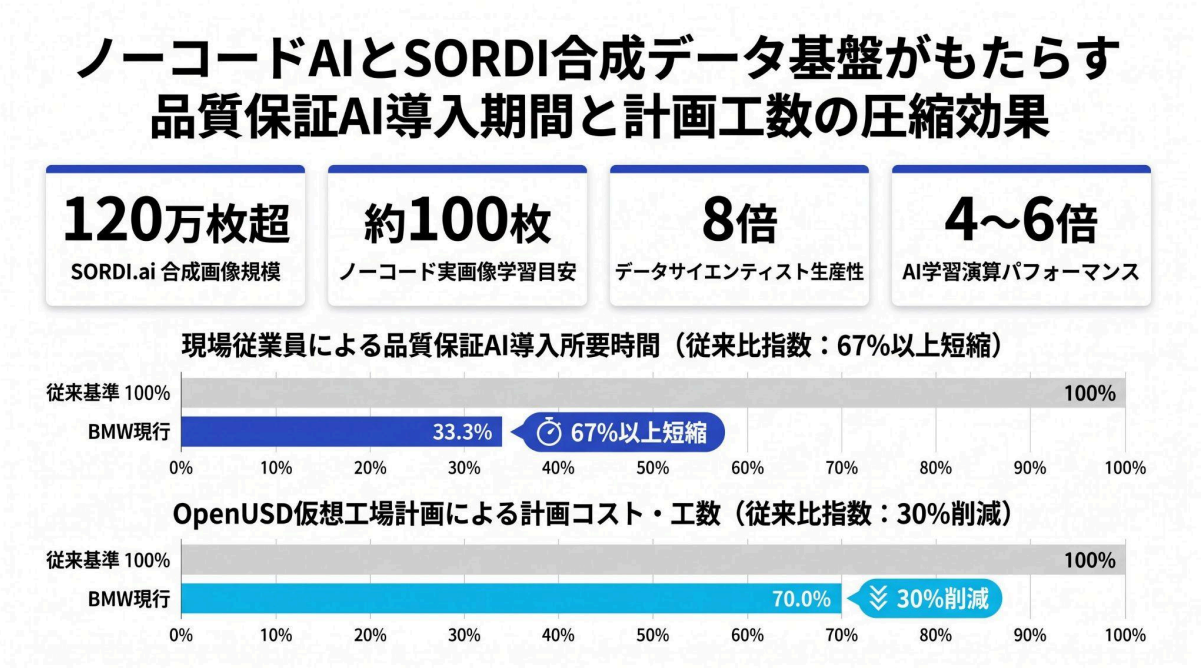
3.3 従来型ルールベース画像処理と**AIQX**エッジ推論基盤の比較

従来型の固定カメラポータル（ルールベース画像処理）と、BMWのAIQXおよびEdge Ecosystem推論基盤の構造的差異を以下の表に示す。

評価軸	従来型ルールベース画像処理（固定ポータル）	AIQX＋エッジ推論基盤（BMW現行世代）	生産技術・現場運用への効果
撮像ハードウェア構成	大型で高価な専用照明付き固定門型カメラポータルをコンベヤに恒久設置	汎用スマートカメラやモバイルカメラおよび車載内蔵カメラを柔軟に配置	設備投資額の圧縮とライン編成変更や新車種追加に対する高い俊敏性を確保
疑似欠陥（外乱）耐性	部品上の油滴や金属切粉や粉塵および照明反射を微細亀裂や欠品と誤判定	深層学習CNNが無害なプレス油滴・ホコリ・外乱反射と真の欠陥を識別	過検出による不要なライン停止と検査員による無駄な再確認工数を大幅削減
多仕様・新規検査構築	画像処理専門エンジニアが閾値や特徴抽出コードを数カ月かけて個別開発	現場作業員が約100枚の実画像撮影とGUIタグ付けのみで一晩で自動生成	品質保証AIの導入所要時間を3分の2以上短縮し多品種混流仕様へ即応
推論速度と通信耐障害性	専用画像コントローラ内で高速処理するが上位クラウドや他拠点と分断	現場IPC（OpenVINO等）で数ミリ秒推論しつつWAN障害時も自律継続稼働	ラインタクト同期の確定性とグローバル30拠点へのモデル一括配信を両立
プライバシー・労使対応	作業員が映り込む工程ではGDPRや労使協定の制約でカメラ設置が困難	エッジPC上の専用APIが数ミリ秒で顔や機密部位を自動モザイク化し送信	欧州GDPRおよびドイツ労使協議会の厳格な規定をクリアし全工程へ展開可能
現場保守・故障時復旧	機器故障時は専門IT要員が現場で再構築するまで検査機能が長期停止	クラウド上のIPCデジタルツインからワンクリックで予備機へ設定を即時転写	IT専門家不在のシフトでも実質ゼロダウンタイムで検査ステーションを復旧

第4章 AI専門家を不要にする「現場作業員向けノーコード学習環境」とOmniverse合成データ活用

グループ全体で600件以上のAIユースケースを現場定着させる上で、データサイエンティストがすべての現場工程へ出向いて個別コーディングを行う手法はスケールしない。BMWはこのスケーラビリティの壁を、「製造現場作業員によるノーコードAIセルフサービス開発」と「OpenUSDデジタルツイン（NVIDIA Omniverse）およびSORDI.aiによる合成データ事前学習」の組み合わせによって解決した。



4.1 現場技術者・作業員が主導するノーコードAIセルフサービス開発フロー

BMWは「AIの民主化（AI for everyone）」を掲げ、プログラミングやデータサイエンスの専門知識を持たないライン作業員や工程技術者が自ら検査AIを構築できる「ノーコード（No-Code）AIソリューション」を整備し、主要ツール群をGitHub（BMW-InnovationLab）上でオープンソース公開するとともに、ランドシャット工場等には全従業員がAIやPowerAppsを試作・学習できる「AI Lab」を設けている。製造現場における新規ビジョン検査AIの立ち上げは以下の4ステップで運用される。

1. モバイルカメラによる実画像撮影（特徴あたり約100枚）：現場作業員が標準的なモバイルカメラを用いて、対象部品を複数アングルから撮影する。プレス工場で成形後のボディパネルに付着した「無害な油滴・金属粉・ホコリ」と「真の微細亀裂（マイクロクラック）」を見分けさせる事例では、RobotronのMichael Baling氏が明かしている通り、良品画像約**100**枚と 油滴・粉塵または亀裂を含む画像約**100**枚（1特徴量あたり約100枚の実画像）を用意するだけで境界ケース（Borderline cases）の識別モデルを構築できる。
2. 直感的GUIによる画像マーキング（コーディング不要）：作業員は撮影した画像上で、確認したい部品や逸脱箇所を画面上で直接マーキング（タグ付け）する。UIやチュートリアルは「コンピュータゲームのようにシンプルで明快」に設計されており、従業員はコードを一切記述しない（アルゴリズムが裏側でコードを自動生成する）。
3. 高性能サーバによる夜間自動学習（Overnight Training）：画像登録が終わると、バックエンドの高性能サーバ（NVIDIA DGXクラスタ等）が約100枚の画像群からニューラルネットワークを 一晩のうちに（**Overnight**）自動計算・最適化 する。
4. シャドウモード検証とプラグアンドプレイ展開：学習完了後、本番ラインと並行稼働するシャドウモード等でテストランと閾値微調整を行って高い信頼性を確認した上で、社内「Intranet of Things」デジタルツールボックスやセルフサービスポイントから現場IPCへプラグアンドプレイで実戦配備される。

4.2 OpenUSDデジタルツイン（Omniverse）と「SORDI.ai」合成データによる事前学習

実画像100枚によるノーコード学習をさらに補完・加速するのが、実車や実部品がまだ存在しない 新車種立ち上げ前（**SOP**前） や、不良発生率が極めて低く実物の不良サンプルが集まらない レア欠陥 に対応する「合成データ（Synthetic Data）」パイプラインである。
BMWはOpenUSDとNVIDIA Omniverse Kit SDKを用いて独自のデジタルツイン基盤

「FactoryExplorer」を開発し、物理的な生産設備やカメラを床面にボルト固定する前の仮想空間上で、レイアウト最適化やロボット・ビジョンAIアプリケーションの事前開発を実行している。OmniverseのNVIDIA RTX物理ベースレンダリング（パストレーシング）により、仮想カメラの設置画角、コンベヤ移動時の死角、金属や塗装面での照明反射を忠実に事前再現できる。BMWのFelix Theurer氏は「プレス機から実際の部品が1枚も打ち出される前に、AIを用いて仮想空間上で表面欠陥を検出し評価することさえ可能になった」と述べており、設計変更指示（Change orders）や設備投資の手戻り削減を含め、工場計画プロセス全体で **30%**の効率化・コスト削減（予測値）が報告されている。
さらにAIモデルの教師データ供給源として、BMWはGoogle Cloud、NVIDIA、inmind.ai等と連携し、製造業向けとして世界最大規模のオープンソース合成データセット「SORDI.ai（Synthetic Object Recognition Dataset for Industries）」を構築した。2022年の公開当初に80万枚超であった同データセットは、現在ではVDA規格準拠のKLT通い箱、スチールラック、台車、生産設備・部品など **120**以上の固有オブジェクトクラス・**120**万枚以上のフォトリアル合成画像および数千の **3D**点群データ へと拡張されている。
SORDI.aiの合成パイプラインでは、OpenUSDとMDL（Material Definition Language）による高精度3Dアセット階層に対し、生成AIを用いたプロシージャルテクスチャ生成を掛け合わせることで、経年摩耗・擦り傷・汚れ・環境変化、さらには「革製品のステッチ（縫い目）抜けや縫製不良」のような現実では大量収集が困難な欠陥状態をボタンクリック一つで数十万枚規模で動的生成する。また最新の取り組みではNVIDIAの世界基盤モデル「NVIDIA Cosmos」を用いた合成データファクトリーも活用されている。なお、NVIDIA OmniverseのPython APIとパストレーシングを用いた産業用外観検査の学術検証（ドメインランダマイゼーションにより背景・照明・カメラ位置を変動させフルHD合成画像を1フレーム約2秒で10,000枚生成した研究）では、実画像を1枚も使わず合成データのみで学習した物体検出モデルが実ライン画像テストで100%の精度を達成し実画像学習モデルを上回るケースも実証されている（ただし強いノイズやブレ、極端な低照度画像では精度低下が生じるため光学条件の整合が重要とされる）。合成データの決定的な優位性は、手作業では膨大な工数とラベリング誤差を伴うバウンディングボックスやピクセル単位のセグメンテーション教師ラベルが、3Dエンジンから **100%**ピクセル完全精度で自動付与 される点にある。
これらの定量的成果が示す本質は、SORDI.aiによる事前合成学習（ベースモデルの獲得）と現場での実画像約100枚によるノーコード微調整が補完し合うことで、従来は数カ月を要していた外観検査AIの立ち上げリードタイムが **3**分の**1**未満（**3**分の**2**以上の短縮） へと劇的に圧縮され、新車種切り替えや設計変更に対する品質保証の即応力が別次元へ引き上げられた点にある。

このセクションは、製造現場の技術者がAI外観検査を導入するときに必ずぶつかる「2つの致命的なジレンマ」を、BMWが「CG（仮想空間）のフェイク画像」を使ってどう鮮やかに解決したかを解説しているパートです。

専門用語を翻訳しながら5つのステップでかみ砕いて解説します。

1. そもそも、なぜ「実物の写真**100**枚」だけでは足りないのか？
前のセクション（4.1）で「現場作業員が実物の写真を100枚撮ればAIが作れる」という話が出ましたが、実は工場には「どうしても実物の写真が100枚集まらない2つの場面」があります。

1. 新車種の量産立ち上げ前（**SOP**＝**Start of Production**前）：まだ工場に設備も入っておらず、プレス機で実物の部品が1枚も作られていない時期です。「量産初日からAI検査を動かしたいのに、学習させる実物の写真が存在しない」という鶏と卵の問題が起きます。
2. めったに起きない「レア不良」：日本の工場もBMWも品質が高いので、「革シートの縫い目（ステッチ）が1目だけ飛んだ」「特定の場所に変な傷がついた」といった不良品は、数万個に1個しか出ません。AIに覚えさせようにも、実物の不良品が100個集まるまで何年も待たなければなりません。

そこでBMWが出した答えが、「実物がないなら、本物そっくりの3D・CG画像（＝合成データ：Synthetic Data）をコンピュータの中で何十万枚も作って、先にAIに勉強させてしまおう」というアプローチです。

2. カメラを床にネジ止めする前に「光の反射」まで実験する（**FactoryExplorer**）

- 用語の翻訳：

    - **FactoryExplorer**：BMWがNVIDIAの「Omniverse（OpenUSD）」をベースに自社開発した、工場丸ごとの3D仮想空間ソフトです。
    - パストレーシング（物理ベースレンダリング）：単なるゲームのような綺麗なCGではなく、「照明の光が金属や塗装面に当たって、どの角度でキラッと反射（ハレーション）してカメラのレンズに入るか」という光の物理法則をそのまま計算する技術です。
- かみ砕いた仕組み：従来の生技部門は、実際にライン脇にカメラと照明をボルトで固定してから、「あ、コンベヤが動くと柱が死角になる！」「ボディの曲面で照明が白飛びしてキズが見えない！」と気づき、高額な工事のやり直し（手戻り＝Change orders）をしていました。BMWは今、現実の工場にカメラを1台も置く前に、仮想空間の中でカメラの角度や照明の位置をシミュレーションし、さらには「まだ世の中に1枚も打ち出されていない新型車のプレス部品」のキズ検査AIまで仮想空間の中で先に作ってしまいます。これで工場の計画コスト・手戻りを**30%**も削減しています。

3. 世界最大の「工場用**CG**写真集」**SORDI.ai**と、ワンクリック不良品メーカー

- 用語の翻訳：
    - **SORDI.ai**（ソルディ・エーアイ）：BMWがGoogleやNVIDIAと組んで作り、世界に無料公開（オープンソース化）した「工場の中にあるモノ専用の超巨大**CG**データ集（**120**種類以上・**120**万枚超）」です。ドイツ自動車工業会（VDA）規格の部品箱（KLT通い箱）や台車、ラックなどが網羅されています。
    - **MDL**（**Material Definition Language**）とプロシージャルテクスチャ生成：CGの表面に「鉄のザラザラ感」「革の質感」を設定した上で、生成AIなどを使って「使い古した擦り傷」「油汚れ」「縫い目のほつれ」をプログラムで自動発生させる技術です。
- かみ砕いた仕組み：現実の工場で「革シートの縫い目抜け不良」を100個わざと作ったら大損ですが、CG空間ならマウスをワンクリックするだけで、「照明の色を変え、角度を変え、汚れ方を変えた『縫い目抜け不良のCG写真』」が一晩で何十万枚でもタダで作れます（このように背景や照明をわざとランダムに変えてAIの応用力を鍛える手法をドメインランダマイゼーションと呼びます）。最近ではNVIDIAの最新AI「Cosmos」も使って、このCG量産工場をさらに強化しています。

実用的な**AI**を鍛えるために、このようなドメインダンダマイゼーションが行われている。

一言でいうと、「CGの綺麗な世界で勉強したAIが、現実の泥臭い工場ラインに出た途端に『使い物にならなくなる（パニックを起こす）』のを防ぎ、本番環境で一発で不良品を見抜けるようにするため」です。

AI・ロボティクスの専門用語では、これを「Sim-to-Real（シム・トゥ・リアル：仮想から現実へ）の壁を越えるため」と呼びます。なぜわざわざ照明や角度、汚れ方をランダムに変えたCGを何十万枚も作るのか、工場の現場目線で3つの具体的な目的に分けて整理します。

1. 現場の「照明のチラつき・影・汚れ」に惑わされないタフな目を作るため

もしCG空間で「真っ白な綺麗な照明、正面の決まった角度、新品ピカピカの革シート」の縫い目抜け写真ばかりをAIに勉強させると、AIはサボってしまい、本質ではない部分（例：「背景がこの明るさの時だけ不良品なんだな」）まで丸暗記してしまいます（これを過学習と呼びます）。

しかし現実の工場ラインでは、以下のような「ノイズ（外乱）」が毎日必ず起きます。

- 朝と夜で窓から差し込む外光の色が変わる、工場のLED照明が経年で少し暗くなる
- 作業員が近くを通ってシートに一瞬「影」が落ちる
- コンベヤの微妙な揺れで、カメラに映るシートの角度が数ミリ～数度ズレる
- 革の表面に、不良ではない「作業者の指紋の脂」や「わずかなホコリ」が付いている

CGを作る段階で、あえて照明の色・強さ・角度・汚れ方をメチャクチャに変化させた（＝ドメインランダマイゼーションした）何十万枚もの写真を見せておくと、AIは「明るさや影、ちょっとした汚れは毎回変わるから無視しよう。『糸が1本途切れている形』だけが不良の本質なんだな！」と、人間と同じ本質的な見分け方を自力で獲得します。

2.「良品を不良と誤判定してラインを止める事故（過検出）」をなくすため

生産技術の現場がAI導入で一番嫌がるのは、不良を見逃すことと同じくらい「本当は良品なのに、光の反射やホコリをキズと勘違いしてAIがブザーを鳴らし、コンベヤが何度も止まること（過検出／疑似エラー）」です。

CG側であらかじめ「ちょっと汚れただけの良品」「変な角度で光が反射している良品」と「本当に縫い目が抜けている不良品」の紛らわしいパターンを何十万通りも経験させておくことで、本番ラインでの誤報（空振り）を劇的に減らすことができます。

3.「世界**30**工場への使い回し」と「量産初日からの垂直立ち上げ」を実現するため

例えばドイツのディンゴルフィング工場と、アメリカのスパータンバーグ工場、ハンガリーの新工場では、天井の高さも照明メーカーも微妙に違います。特定工場の実物写真だけで育てたAIは、別の工場に持っていくと照明環境が違って精度がガタ落ちします。しかし、最初から「あらゆる照明・あらゆる角度・あらゆる背景」のCGで鍛え上げたAIなら、世界中のどの工場に配信しても、最初から高い精度でそのまま動く（汎用性が高い）のです。

さらにNVIDIAの最新基盤モデル「Cosmos」まで投入しているのは、単なるCGの貼り付けを超えて、「現実の物理法則に限りなく近いリアルな質感変化や光の振る舞い」をAI自身に超高速で生成させ、実車が**1**台も流れていない量産前（**SOP**前）の段階で、ベテラン検査員並みの目を完成させておくためです。

4. 現場が一番喜ぶ「**100%**ズレない自動赤ペン先生（自動アノテーション）」
ここがAI開発の実務者に最も刺さるポイント。

- 従来の苦労（手作業のラベリング）：人間の目で実物の写真1万枚を見て、「ここからここまでがキズです」とマウスで四角く囲んだり（バウンディングボックス）、ピクセル単位で塗りつぶしたり（セグメンテーション）する作業は、何百時間もかかる地獄の単純作業でした。しかも人間がやると「Aさんはここまでをキズと囲み、Bさんは囲まない」というズレ（ラベリング誤差）が必ず起き、AIの精度が落ちていました。
- **CG**（合成データ）の圧倒的メリット：CG空間では、コンピュータ自身が「いま、ここの座標に0.5ミリのキズを描いた」と最初から知っています。そのため、写真を書き出すと同時に、**1**ピクセルの狂いもない「**100%**完璧な正解ラベル」が全自動で付きます。人間が赤ペンで囲む作業が「ゼロ」になるのです。実際に、CG画像1万枚だけで勉強させたAIが、本番ラインのテストで実物写真で勉強したAIに勝って「精度100%」を出した研究事例まで出ています（ただしカメラのピンボケや極端な暗さには弱いので、現実のカメラ条件と合わせることが大事です）。

5. 結論：「**CG**で基礎体力をつけ、実物**100**枚で仕上げる」黄金コンビ
最後の段落が言っている本質は、「**CG**か、実物か」の二者択一ではなく「**2**段階ロケット」にしているということです。

1. 第**1**段ロケット（量産前）：SORDI.aiなどの「大量のCG画像」で、新車が工場を流れる前にAIの「基礎体力（ベースモデル）」を完成させておく。
2. 第**2**段ロケット（量産直後）：いざ実物が流れ始めたら、現場作業員が「実物の写真100枚」を撮ってノーコードで微調整（ファインチューニング）し、現実の照明のクセにピタッと合わせる。

この「**CG**事前学習 **×** 現場**100**枚ノーコード」の組み合わせがあるからこそ、従来なら**SIer**に頼んで数カ月かかっていた検査**AI**の立ち上げ期間が「**3**分の**1**未満（**67%**以上短縮）」になり、車種変更のたびに明日からでも**AI**検査を回せる体制ができあがっています。

第5章 品質データの上流工程フィードバック（予知品質）と生技・部品サプライヤーへの示唆

インラインAI全数検査の究極の目的は、完成後の不良品を選別排除することではなく、蓄積される高精細な検査ログと工程センサデータをリアルタイム統計解析し、不良が発生する前に上流設備条件を補正する「予知品質（Predictive Quality）」の閉ループを回すことにある。

5.1 検査データの上流プロセス還流と部品製造（ランドシャット工場等）への展開・ROI評価

BMWグループは塗装・車体溶接・部品鋳造の各工程で、インラインAI検査データを上流プロセス制御へフィードバックする運用を実装している（なお、組立工程の締付トルク値推移やプレス金型摩耗そのもののAIQX連動予測アルゴリズムについては公開資料で個別明細が開示されていないため、以下ではBMW公式発表で裏付けられる具体的な閉ループ事例を詳述する）。
第1の代表例は、複数件の特許が出願されている ミュンヘン本校工場およびレーゲンスブルク工場の塗装ブースにおけるダスト粒子予知解析 である。最新の空調設備を持つ塗装ブースでも、晴天乾燥期の継続や季節変動により吸入外気中の微細粉塵レベルが変動する。ミュンヘン工場で構築されたAIアルゴリズムは、塗装ブースおよび乾燥炉内のライブ粉塵センサ（Dust particle sensors）の計測値と、下流の自動表面検査（AOI）データベースをリアルタイム比較し、車体に関する **160**項目以上の特徴量 を常時監視する。これによりダスト濃度が上昇へ向かう初期トレンドを事前検知し、塗膜ブツ不良が多発する前に 給気ポンプ用空調フィルタの早期交換タイミングを算出・指示 するとともに、塗装前の車体表面から微細粒子を払い落とす ダチョウの羽根（**Ostrich feathers**）を用いた自動除塵設備の微調整必要性 を特定する。レーゲンスブルク工場でも全車両の3D欠陥位置・加工履歴をクラウドへ蓄積し、原因解析と上流工程への早期介入に活用している。
第2の事例は、車体溶接（**Body Shop**）およびプレス工程における制御・保全ループの閉ループ化 である。車体ラインのAIカメラが、複数のホワイトボディの「同一のスポット溶接打点」において不要な溶接スパッタ（Weld metal spray）の発生傾向を早期検知すると、設備制御系へフィードバックして制御パラメータや電極メンテナンス周期を迅速に前倒し調整するループが組まれている（あわせて車体工程ではレーザーセンサによる目標値・実測値照合も全数実施されている）。
第3の事例は、BMW最大の部品生産拠点である ランドシャット工場（**Plant Landshut**）における次世代**EV**「ノイエ・クラッセ（**Neue Klasse**）」向け中核部品のインライン**AI**全数検査 である。同工場の軽金属鋳造部門では、EVモーター用アルミ鋳造ハウジングの全数に対して完全自動のインラインX線CT（コンピュータ断層撮影）を導入し、**1**個あたり**42**秒間で**2,400**枚の個別画像を撮像して高精細**3D**モデルを再構成、AIが内部品質を全自動で解析・保証することで鋳造プロセス改善へ直結させている。また高電圧バッテリー中央制御ユニット「BMW Energy Master」のクリーンルーム生産ラインでも、AIカメラによる包括的インライン監視と100%エンドオブライン試験が統合されている。
投資対効果（ROI）の観点では、前述の通りBMWはAIQX単体の財務的ROI数値を非公表としている（産業界の同規模AI外観検査導入モデルの一般試算では初期・運用費に対し回収期間約2.5年という分析例がある）。しかしBMWの実績からは、単調で過酷な反復目視（鏡面塗装の微細ブツ探しやトランク内装備確認）からの人間検査員の解放と視覚疲労エラーの根絶、疑似欠陥による不要なライン停止の解消、そしてリワーク工数と手直しリードタイムの圧縮という明確なオペレーショナルROIが確認できる。上流フィードバックおよび部品インラインAI展開の主要実績を以下の表に整理する。

対象工場・工程	インラインAI・センサ構成	定量処理スペック・監視規模	上流プロセス制御・予知品質アクション
ミュンヘン工場（塗装工程）	ブース・乾燥炉内ライブ粉塵センサとAOI表面検査DBの統合AI	車体・工程に関する160項目以上の特徴量をリアルタイム監視	乾燥期の粉塵上昇予兆を早期検知し空調フィルタ交換前倒しとダチョウ羽根除塵機を調整

対象工場・工程	インラインAI・センサ構成	定量処理スペック・監視規模	上流プロセス制御・予知品質アクション
レーゲンスブルク工場（塗装仕上げ）	デフレクトメトリAOIと4台ロボットAOBおよびクラウド3Dカタログ	最小40～50 µm検出（ISRA仕様）で最大1,000台/日の個別補修を実行	全車体の3D欠陥位置と補修履歴をクラウド集約し因果関係解析と上流工程の早期介入を実施
ランドシャット工場（軽金属鋳造）	ノイエ・クラッセ用EVモーター筐体の全数インライン自動X線CT＋AI	1個あたり42秒間で2,400枚を撮像し3Dモデル再構成・AI自動判定	鋳造内部欠陥の全数3D自動解析により不良流出防止と鋳造プロセスの継続的最適化を実現
ランドシャット工場（内装・電装）	コックピット最終AI検査およびEnergy Masterクリーンルーム AI監視	コックピット1台あたり30秒間で約50カ所の品質特徴量を自動検査	自動梱包・自律搬送システムと直結し下流の完成車組立ラインでの手直し発生を未然防止

5.2 サプライヤー網への**AIQX**開放（**ZDSC Campus**）と日本の完成車・光学・部材メーカーへの示唆

極めて重要な戦略的動きとして、BMWグループはグループ標準となったAIQXを社内利用にとどめず、部品サプライヤーに対してもシステムとして提供する（利用可能にする）選択肢の評価を開始した と公式発表している。あわせてランドシャット工場にはサプライヤーと協働で「ゼロディフェクト思考（Zero-defect mentality）」の生産体制を築く体験型研修施設 「**ZDSC**（**Zero Defect Supply Chain**）**Campus**」 を開設し、サプライヤー各社に対してショップフロア管理、生産システム、デジタル化・AI技術の認定教育を実施している。この動向を踏まえ、日本の各エンジニアリング部門が取るべき実践的指針は以下の3点に整理される。

1. 完成車・二輪メーカーの生産技術・プロセス技術陣（ホンダ、三菱自、カワサキモータース等）への示唆

最大の要諦は、「個別工程ごとの一品一様（外部**SIer**依存）な画像検査導入から、全社共通エッジ／**MLOps**基盤＋現場ノーコード開発への転換」 である。BMWは1つの巨大AIですべてを見るのではなく、現場技術者が約100枚の写真で一晩で構築できる単機能AIチェックを多数配置し、それを「Edge Ecosystem（故障時にワンクリックで予備IPCへ環境転写できる管理基盤）」と「AIQX」で束ねることで600件超のスケールを実現した。また高外観が要求される四輪ボディや二輪燃料タンク等の鏡面塗装工程では、ボディ外周エッジや給油口周りまで無理にロボット自動研磨化して塗膜貫通リスクや設備費高騰を招くのではなく、一般面の9割以上をデフレクトメトリ連動ロボットで自己完結させ、境界領域のみをレーザープロジェクタで熟練工へ照射誘導するレーゲンスブルク方式が最も合理的な人間協調解となる。海外工場展開にあたっては、エッジIPC上でのリアルタイム顔モザイク処理（GDPR・労使対応）の標準実装も必須要件となる。

2. 3Dビジョン・光学検査・センサ**R&D**陣（クラボウ、エトリア、**TDK**等）への示唆

今後の高付加価値マシンビジョン開発では、「物理光学計測（位相シフト・デフレクトメトリ）による高**S/N**特徴抽出と、軽量ディープラーニングによる疑似欠陥分離、およびロボット加工パス出力の直列統合」 が競争力の源泉となる。鏡面・透明・金属光沢表面では照明外乱やプレス油滴・微細粉塵による過検出が最大の導入障壁となるため、40～50 µm級の局所勾配異常を光学的に確定抽出した上で、CPU／内蔵GPU（OpenVINO等）でも数ミリ秒で動作する軽量CNNで無害な付着油や正常肌目を除外し、そのまま研磨・バリ取りロボットへ3次元座標と加工条件を渡せるインターフェース設計が求められる。さらに完成車メーカー側がOpenUSD（NVIDIA Omniverse）上で設備導入前に仮想カメラ・照明シミュレーションを行う標準フローへ移行しつつあるため、自社カメラ・光学系・センサの物理特性をOpenUSD／RTXセンサモデルとして提供できる体制整備が不可欠である。

3. 内外装樹脂・ゴム・ハーネス・金属部材メーカー（豊田合成、プロテリアル等）への示唆

BMWによるAIQXのサプライヤー開放検討とZDSC Campusの推進は、今後のグローバルOEM調達において「人間による出荷前目視検査」から「サプライヤー工程内での100%インラインAI検査とデジタル品質証跡の連携」が標準要件化することを意味している。塗装グリルや加飾エンブレム等の高光沢内外装品ではデフレクトメトリによる微細ブツ・ヒケ検出が、ウェザーストリップ等のゴム成形品や素形材・特殊金属部材では成形油や離型剤・粉塵と真の微細クラックを約100枚ずつの教師画像で切り分ける過検出抑制AIが直ちに有効となる。また柔軟に変形するワイヤーハーネスやコネクタ・シール部品においては、実物試作前の3D CADデータからOmniverse上でドメインランダマイゼーション合成画像を生成して事前学習させる手法と、電気導通チェックおよびカメラによるロック状態・誤組付け検知を組み合わせたインラインポカヨケ基盤の構築が、不良流出ゼロと検査工程の抜本的省人化を両立する鍵となる。

参照文献・一次情報リスト

本報告書の作成にあたり参照・引用した英語・ドイツ語一次公開資料、BMWグループ公式発表、パートナー技術事例、および専門技術メディア記事は以下の通りである。

BMW Group 公式プレスリリース・技術解説（英語・ドイツ語）

- BMW Group Official Insights: "AIQX: Artificial Intelligence in vehicle production" (2023年11月27日) — https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2023/aiqx.html
- BMW Group Newsroom Global: "Automated surface processing at BMW Group Plant Regensburg – trio of digital paint shop processes" (2023年5月2日) — https://newsroom.bmwgroup.com/global/automated-surface-processing-at-bmw-group-plant-regensburg---trio-of-digital-paint-shop-processes/
- BMW Group PressClub Deutschland: "Automatisierte Oberflächenbearbeitung im BMW Group Werk Regensburg – digitaler Dreiklang in der Lackiererei" (T0411621DE) — https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0411621DE/automatisierte-oberflaechenbearbeitung-im-bmw-group-werk-regensburg-%E2%80%93-digitaler-dreiklang-in-der-lackiererei?language=de
- BMW Group Official Insights (DE/EN): "Automatisierte Oberflächenbearbeitung / Automated Surface Processing" (2023年11月27日 / 2024年) — https://www.bmwgroup.com/de/news/allgemein/2024/automated-surface-processing.html / https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2024/automated-surface-processing.html
- BMW Group Werk Regensburg Official Portal: "Lackiererei – Automatisierte Oberflächeninspektion (AOI) & AOB" — https://www.bmwgroup-werke.com/regensburg/de.html
- BMW Group Newsroom Global: "BMW Group applies AI solutions to increase paint shop quality" (2020年5月20日) — https://newsroom.bmwgroup.com/global/bmw-group-applies-ai-solutions-to-increase-paint-shop-quality/
- BMW Group Official Insights: "Developers of the future: BMW Group IT (Edge Ecosystem, AIQX, Acoustic Analytics, Innovation Hub Dingolfing)" (2023年1月29日) — https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2023/BMWGroupIT.html
- BMW Group PressClub: "BMW Group Plant Landshut focuses on digitalization in component production (AIQX, Inline CT, AI Lab, Shopfloor.Digital, ZDSC Campus)" (T0450172EN, 2025年5月16日) — https://www.press.bmwgroup.com/canada/article/detail/T0450172EN/bmw-group-plant-landshut-focuses-on-digitalization-in-component-production?language=en
- BMW Group PressClub Global: "BMW Group scaling artificial intelligence for data privacy in production – with innovative anonymisation algorithms" (T0328838EN) — https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0328838EN/bmw-group-scaling-artificial-intelligence-for-data-privacy-in-production-%E2%80%93-with-innovative-anonymisation-algorithms?language=en
- BMW Group Newsroom Global: "BMW Group advances the use of Physical AI in production with Figure 03 project in Spartanburg (AIQX supplier availability

assessment)" — https://newsroom.bmwgroup.com/global/bmw-group-advances-the-use-of-physical-ai-in-production-with-figure-03-project-in-spartanburg/
- BMW Group Investor Relations: "US Capital Market Event – BMW Manufacturing" (2026年) / "BMW Group Report 2025" — https://www.bmwgroup.com/content/dam/grpw/websites/bmwgroup_com/ir/downloads/en/2026/US_Capital_Market_Event_BMW_Manufacturing.pdf
- SORDI.ai Official Dataset Portal (Published by BMW Group): "SORDI.ai – The largest and most comprehensive synthetic dataset" — https://sordi.ai/dataset / https://sordi.ai/news

AWS・NVIDIA・Intel・光学および研磨パートナー技術資料

- Intel Customer Spotlight: "BMW Group: AI on Every Employee's Laptop (Robotron & Intel Distribution of OpenVINO Toolkit)" — https://www.intel.com/content/www/us/en/customer-spotlight/stories/bmw-group-openvino-customer-story.html
- NVIDIA Case Study: "Driving Innovation: NVIDIA Supports BMW Group's Leap in Production Efficiency With Generative AI (DGX Systems, SORDI, No-Code AI)" — https://www.nvidia.com/en-us/case-studies/bmw-optimizes-production-with-ai-and-dgx-systems/
- NVIDIA Case Study: "BMW Group Develops OpenUSD-Based FactoryExplorer Platform on Omniverse" — https://www.nvidia.com/en-gb/case-studies/bmw-group-develop/
- AWS Machine Learning Blog: "Accelerating AI/ML development at BMW Group with Amazon SageMaker Studio (JuMa Platform)" — https://aws.amazon.com/blogs/machine-learning/accelerating-ai-ml-development-at-bmw-group-with-amazon-sagemaker-studio/
- AWS Case Study: "BMW Group Case Study (Cloud Data Hub & Amazon SageMaker)" / "BMW Group MLOps Solution" — https://aws.amazon.com/solutions/case-studies/bmw-group-case-study/ / https://aws.amazon.com/jp/blogs/news/accelerating-industrialization-of-machine-learning-at-bmw-group-using-the-machine-learning-operations-mlops-solution/
- ISRA VISION Automotive Surface Inspection: "Surface inspection of painted and transparent parts (PAINTSCAN / Deflectometry)" — https://www.isravision.com/en-en/industries/automotive/surface-inspection-painted-and-transparent-parts

専門技術メディア・学術および業界検証記事

- Automotive Manufacturing Solutions: "Artificial intelligence – New developments in surface inspection (Quotes from Rudolf Hummelsberger, BMW & Wolfgang Berggold, ISRA VISION)" (2025年7月2日更新) — https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/digitalisation/artificial-intelligence-new-developments-in-surface-inspection/533066
- Automotive Manufacturing Solutions: "Manufacturing in the metaverse (Quote from Felix Theurer, BMW)" — https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/oems/manufacturing-in-the-metaverse/535128
- ASSEMBLY Magazine: "BMW Is Bullish on AI Technology (Mobile cameras replacing portals, overnight training)" — https://www.assemblymag.com/articles/95448-bmw-is-bullish-on-ai-technology
- ASSEMBLY Magazine: "AI-Controlled Robots Prep Car Bodies for Painting at BMW" — https://www.assemblymag.com/articles/97800-ai-controlled-robots-prep-car-bodies-for-painting-at-bmw
- Electronics Reference: "3M Embraces Automation to Address Labor Shortages in Car Manufacturing (3M Finesse-it Robotic Paint Repair System at BMW Regensburg)" — https://electronicsreference.com/3m-embraces-automation-to-address-labor-

shortages-in-car-manufacturing/
- iFactoryApp Industry Blog: "Detecting Paint Defects in Automotive Paint Shops (Deflectometry 40–50 microns, ISRA Vision <50s at 1,200 mm/s)" — https://ifactoryapp.com/blog/detecting-paint-defects-in-automotive-paint-shops
- ElementaryML Industry Guide: "The Complete Guide to Automated Vehicle Inspection Systems" — https://www.elementaryml.com/blog/the-complete-guide-to-automated-vehicle-inspection-systems
- Articsledge Industry Analysis: "Artificial Intelligence (AI) in the Automotive Industry" — https://www.articsledge.com/post/artificial-intelligence-ai-automotive-industry
- arXiv Technical Preprint: "Synthetic Data Generation Pipeline with Domain Randomization in NVIDIA Omniverse for Industrial Visual Inspection" (arXiv:2503.09354v1) — https://arxiv.org/html/2503.09354v1

資料12 第4部1：ジーリー傘下ジーカー寧波5Gスマート工場に投入された優必選「Walker S1」および華研智造（iSAGE）「4腕協調ロボット」のハードウェア解剖

エグゼクティブ・サマリー

本報告書は、吉利控股集団（Geely）傘下のプレミアムEVブランド「極氪（Zeekr：ジーカー）」の寧波杭州湾5Gスマート工場をはじめとする中国新エネルギー車（NEV）生産ラインへ投入された、優必選科技（UBTECH Robotics、香港証券取引所：09880）の産業用二足歩行ヒューマノイド「Walker S1」および全高155cm級・4腕車輪型協調ロボット（上海颯智智能科技：iSAGE製「STAR-SageMan」）の機構設計、アクチュエータ・センサ実装、ならびに中国国産サプライチェーンによるBOM（部品表）コスト低減構造を一次資料に基づき解剖したものである[1]。双腕・人型ロボット開発企業、完成車生産技術部門、および電子部品・可動ケーブル・機械要素メーカーの設計・戦略立案に直結する定量ファクトと工学的示唆を以下の3点に要約する。

第1に、UBTECHは商業展示用の「初代Walker」（身長145cm、単腕伸展可搬1.5kg）から量産工場特化型の「Walker S1」（身長172cm、重量76kg、全身41自由度、両腕連続歩行可搬15kg）へと車体・電装設計を抜本的に刷新し、さらに9ヶ月後の後継機「Walker S2」（重量70kg、全身52自由度）では約3分間の自律ホットスワップバッテリー交換を実装した[6]。その競争力の源泉は、0.2～200N·m超を網羅する自社開発サーボドライバ技術と、最大トルク250N·m（シリーズ最大300N·m）を発揮する中空配線式の一体型関節モジュール（本体28軸）、手首・足首計4個の6軸力覚センサ、および6個のアレイ式触覚圧力センサを備えた第3世代5指デクスタラスハンドの統合アーキテクチャにある[6]。極氪寧波5Gスマート工場（計画年産30万台）では数十台のWalker S1が総装・SPS計器・品質検査・ドア組立の4領域へ群投入され、2台協調での約30kg大型通箱搬送や柔軟フィルム・ハーネスの組付けを実証している[1]。

第2に、日本の技術セミナー等で「全高155cm・華研智造（ISAGE）四臂協調ロボット」として紹介される機体を中国語・英語の一次仕様書および特許公報で照合すると、上海颯智智能科技（iSAGE）が製品化した「STAR-SageMan」（基準全高1560mm・最大伸長1815mm、台車寸法900×600mm、総重量280kg、全身52自由度、各腕可搬3～16kg、反復位置決め精度±0.03mm）に該当する[3]。【★】「脚部自由度を放棄して予算と制御リソースを腕の本数と作業空間へ集中投下する」という生産技術思想のもと、**2本の腕が大型・柔軟ワークを空中で把持して動的治具として機能し、残り2本の腕が締結・コネクタ嵌合を同時実行する「治具レス空中協調作業」と280kg低重心台車による高剛性を両立させている[3]**。なお公開一次資料上、極氪寧波工場での群稼働が公式発表されているのはUBTECH「Walker S Lite / S1」であり[1]、iSAGE「STAR-SageMan」は理想汽車（Li Auto）等の自動車・部品ラインへの納入および極氪車両と並ぶ上海工業デザイン選出実績が確認される一方、極氪工場内での個別工程詳細は非公開である点を厳密に区別する必要がある[20]。

第3に、波動歯車減速機（緑的諧波：市場見積約1,320人民元）、フレームレスモーター（歩科股份：約1,200人民元）、遊星ローラーネジ（五洲新春・北特科技等）、6軸力覚センサ（坤維科技・柯力伝感）、耐屈曲ケーブル（万馬股份：動的屈曲3,000万回）の国産代替とEV部品サプライ

チェーンの参入により、主要コア部材の中国国産化率は65%以上へ達し、調達価格は輸入品比で30〜50%以上低下している[4]【★】業界統計では単機平均コスト指標が59.34万人民元から2025年に16.64万人民元（約350万円）へ約72%急落し、量産原価15万〜20万人民元（2万〜3万米ドル）が射程に入っている[29]。ただし、国産化率20%未満にとどまるハイエンド絶対値エンコーダをはじめ、連続衝撃下の減速機疲労寿命、高透磁率軟磁性材料、低ドリフト柔軟触覚センサ、極細径耐捻回ハーネスには明確な技術障壁が残っており、日系部材・機器メーカーにとって重要な参入機会が存在する[4]。

【YouTube】

UBTECH Swarm Intelligence: Walker S1 Factory Training 2.0



Walker S2 - The World's First Humanoid Robot Capable of Autonomous Battery Swapp...

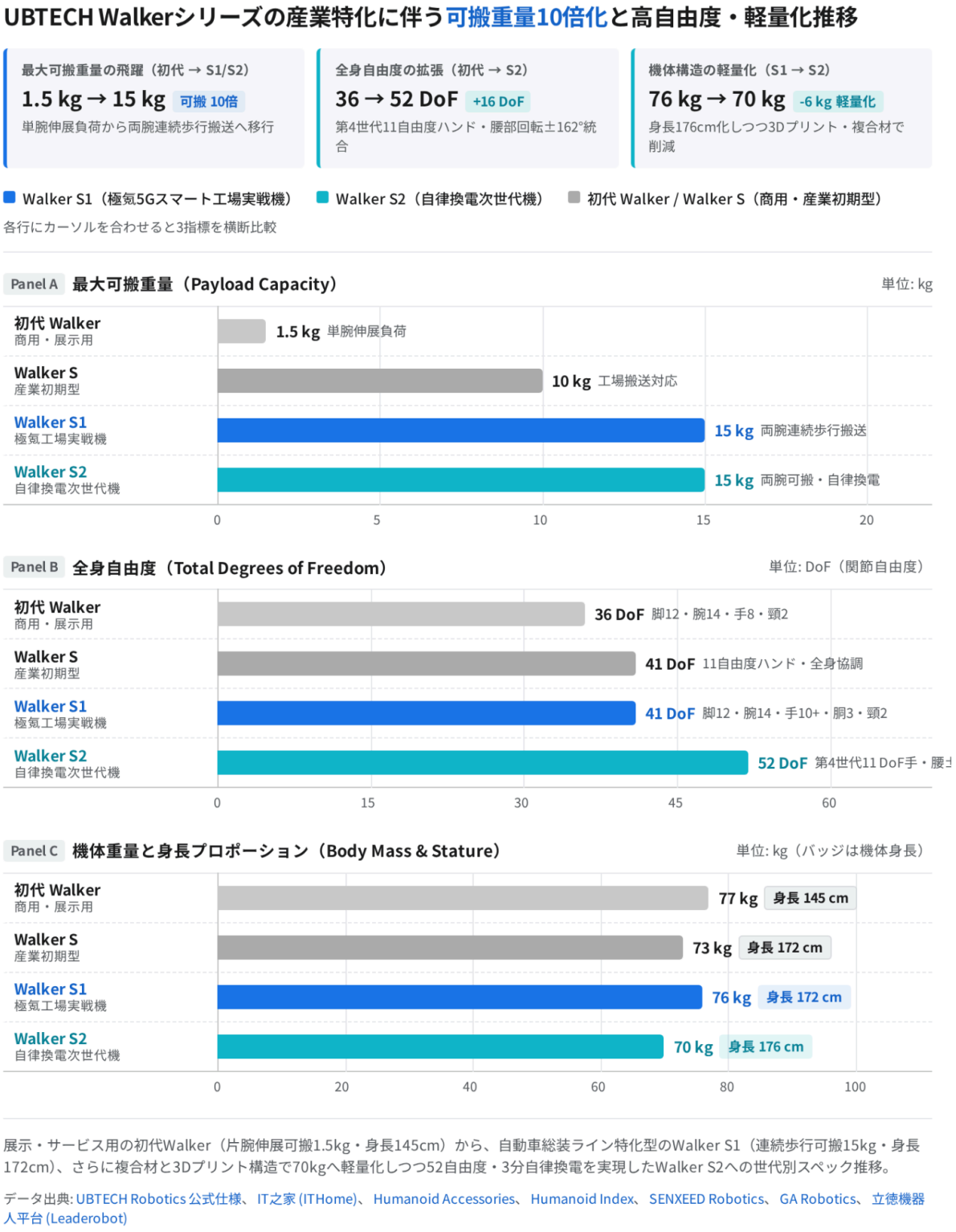


第1章 優必選（UBTECH）の産業特化シフトと「Walker S1」の全体主要諸元・電装アーキテクチャ

1.1 展示・サービス用機体から自動車工場量産ライン特化型「Walker S」シリーズへの工学的転換

2023年12月末に香港証券取引所メインボードへ「ヒューマノイドロボット第一号銘柄（09880.HK）」として上場した深圳市優必選科技（UBTECH）は、上場目論見書において売上高に対する研究開発費比率が2020年に57.9%（4.29億人民元）、2021年に63.3%（5.17億人民元）、2022年1〜9月期に61.4%（3.25億人民元）と年平均60%超に達していたことを開示している[2]。この先行投資により1,500件超の関連特許（ヒューマノイド有効発明特許数でホンダ・サムスンと並ぶ世界トップ3）を構築した同社であったが、上場前までの大型二足歩行機であった「初代Walker」（身長145cm、重量77kg、36自由度）および2021年7月発表の商用機「Walker X」（証券調査資料で身長130cm・重量63kgクラス）は、展示会での実演、商業施設での案内、家庭内サービス研究を主目的とした設計にとどまっていた[8]。象徴的な制約として、初代Walkerは機体重量77kgでありながら腕伸展時の単腕可搬重量がわずか1.5kg（単腕リーチ540mm）に過ぎず、外装の意匠性や対話演出を優先した結果、自動車工場で標準的に用いられる10〜15kg級の部品通箱（ポリボックス）を保持して歩く構造強度と熱容量を備えていなかった[8]。

しかし2024年に入り、中国国内の完成車工場における最終組立（総装）および部品構内物流の自動化需要が急速に顕在化したことで、UBTECHはハードウェア設計要件を商用サービスから自動車量産ライン仕様へと全面的に切り替えた[39]。まず産業用初号機「Walker S」（身長172cm、重量60〜73kg、41自由度、最大可搬10kg）および軽量物流モデルの「Walker S Lite」（身長135cm、2024年中盤に極氪寧波杭州湾5Gスマート工場へ初の「実習生」として投入され、入庫上料工程で21日間の連続通箱搬送を達成）を現場投入して実稼働データを収集した[10]。そこで抽出された構造剛性・可搬負荷・連続熱安定性の課題を解決し、2024年10月14日に発表された本格量産工場モデルが「Walker S1」である[6]。さらに開発期間わずか9ヶ月後の2025年7月17日には、3Dプリント構造部品と新型複合材料の採用によって機体重量を76kgから70kgへ6kg軽量化しつつ、全身52自由度および約3分間の自律ホットスワップバッテリー交換機構を搭載した「Walker S2」を発表しており、完成車工場での実訓フィードバックを数ヶ月単位で次世代車体設計へ反映する高速開発サイクルを確立している[7]。



展示・サービス用の初代Walker（片腕伸展可搬1.5kg・身長145cm）から、自動車総装ライン特化型のWalker S1（連続歩行可搬15kg・身長172cm）、さらに複合材と3Dプリント構造で70kgへ軽量化しつつ52自由度・3分自律換電を実現したWalker S2への世代別スペック推移。

データ出典: UBTECH Robotics 公式仕様、 IT之家 (ITHome)、 Humanoid Accessories、 Humanoid Index、 SENXEED Robotics、 GA Robotics、 立徳機器人平台 (Leaderobot)

UBTECHの公式製品資料によれば、Walker SからWalker S1へのハードウェア再設計において開発陣が重点攻略した産業上の技術課題は、(1)工場建屋内の外光変化や塗装面の反射、人・無人搬送車の交錯が起きる環境下での安定した視覚位置決め、(2)高負荷・高動的作業条件における全身運動バランス制御、および(3)高負荷・長時間稼働下での関節サーボモジュールの放熱設計の3点である[47]。商用ベース機であった初期Walker Sが頭部に搭載していた8インチ曲面AMOLEDディスプレイや感情表現用インターフェースを廃し、センサー一体型のコンパクトな産業

用頭部へ改めた設計変更も、耐衝撃性の向上と不要な電力・発熱源の削減を狙った合理化にほかならない[6]。

1.2「Walker S1」の主要定量スペックと工場連続シフト対応エネルギー設計

極氪寧波5Gスマート工場（敷地面積約2,000ムー、計画年産30万台、総装・SPS計器・品質検査・ドア組立の各エリア）をはじめ、BYD、一汽アウディ、一汽紅旗、東風柳汽、富士康（Foxconn）、順豊速運（SF Express）などの現場実訓へ投入された「Walker S1」の主要諸元は以下の通りである[1]。

機体寸法と質量について、身長は172cm（1.72m）、機体重量は76kgに設定されている[6]。完成車工場の生技設計において身長172cmという体格は、成人作業員の平均的なアイポイントおよび肩関節高さと一致するため、既存の総装トリムラインのコンベア高さ、SPS（Set Parts Supply）棚の部品ピッキング高さ、および車体ドア開口部へのアプローチ軌道をライン側の治具・架台改造なしでそのまま踏襲できる利点を持つ[1]。

全身自由度（DoF）は計41自由度である[50]。証券調査資料およびロボット仕様データベースを総合すると、身体・四肢の主要回転アクチュエータ数は28個で構成されており、脚部が片脚6自由度×2＝12自由度（股関節3軸・膝1軸・足首2軸）、腕部が片腕7自由度×2＝14自由度（肩3軸・肘1軸・手首3軸）、頸部が2自由度、これに体幹自由度および左右の5指デクスタラスハンドの自由度（片手5〜6能動自由度クラス）を合算して全身41自由度を形成している（公開データベースにより体幹・手指の配分表記に若干の差異があるが、総自由度41・本体主要関節28という構成で整合している）[13]。なお次世代機Walker S2では、±162度のヨー旋回と125度のピッチ前屈が可能な高トルク腰関節と第4世代11自由度ハンドを採用することで、床面0mのしゃがみ把持から高さ1.8mの高層棚作業まで対応する全身52自由度へと引き上げられている[7]。

最大可搬重量と移動性能について、Walker S1は両腕保持での連続歩行搬送負荷として15kg（標準工業用通箱のデッドリフト持ち上げでは16.3kg）を達成しており、Walker Sの10kgから50%強化された[6]。さらに極氪5Gスマート工場における「実訓2.0（群知能実証）」では、複数台のWalker S1が軌道計画・負荷同定・柔順制御（コンプライアンス制御）を連携させることで、単機定格の倍にあたる約30kgの大寸法・大重量部品通箱を2台協調で安定搬送することに成功している[1]。定格歩行速度は約3km/h（約0.83m/s、プラットフォーム最大速度表記で4〜5km/h級、後継Walker S2では2m/s＝7.2km/hへ高速化）であり、6軸IMU（慣性計測装置）と両足首の6軸力覚センサを用いた全身バランス制御により、大理石・タイル・凹凸床の踏破、最大20度の傾斜昇降、最大20cmの段差・階段昇降、および外乱衝撃に対する姿勢回復機能を備える[7]。

バッテリー容量と工場連続シフトへの対応については、公開事実と未公開領域を明確に分ける必要がある。UBTECHはWalker S1の正確なバッテリー容量（Wh値およびバス電圧）を公式テキスト仕様として開示していない（競合機比較資料でも容量非公表と明記されており、同規模の48V系・76kg級二足機からは1.5〜2.0kWh前後と推測される）[54]。公表されている1充電あたりの実稼働時間は約2時間（Walker Sの公称約2.5時間から高負荷化に伴い約2時間表記へ移行）である[10]。24時間稼働の自動車工場において2時間ごとの充電停止はライン編成上の制約となるため、Walker S1は機体インターフェースとしてギガビットEthernet、USB 3.0とともに急速充電ポートを備えており[57]、2025年3月には電力低下で停止したWalker S1に対し別のWalker S1が充電プラグを自律挿入して補電する協調給電デモを公開した[60]。さらにUBTECHは、Walker S1の現場運用で判明した有線充電のダウンタイム課題を根本解決するため、Walker S2において手動充電方式から「デュアルバッテリー搭載・ホットスワップ自律換電システム」へ移行した[9]。これは電源を遮断せずタスクも中断しないまま、ロボット自身の腕のサブミリ精度制御で背面等のバッテリー

パックを抜き差しし、約3分間で満充電パックへ自律交換する機構であり、タスク優先度に応じて換電と充電を自律選択する動的エネルギー管理を実現している[7]。

1.3 オンボード計算・360度視覚センシング構成と放熱・防塵・耐ノイズ実装

知覚センシング構成において、Walker S1は高コストかつ衝撃・振動に弱い大型機械回転式3D-LiDARに頼らず、「360度マルチモーダル純視覚・深度知覚」を中心に据えた統合型ヘッドを採用している[6]。小型化された頭部前面にはRGB-Dステレオ深度カメラおよび高解像度RGBカメラを内蔵して前方の3D立体視を担わせるとともに、頭部左右の耳の位置に広視野の「双耳魚眼カメラ（デュアル魚眼カメラ）」を配置することで、周囲360度のマルチモーダル空間認識を実現している[6]。このカメラ群からの映像ストリームを基に、UBTECHが業界に先駆けて実装した粗から密への2段階「セマンティックVSLAM（意味論的視覚SLAM）」および「クロスフィールド純視覚知覚技術」が動作する[1]。これにより、極氪工場の建屋内で時間帯による外光変動や車体塗装面の反射、作業員・AGVの頻繁な横断が発生しても、周囲への干渉を抑えて誤差2cm以内の精密ナビゲーションを維持するほか、北汽とファーウェイが共同建設した享界（Stelato）スーパー工場の総装ラインでは、純視覚方式によるインストルメントパネル（計器線）の部品検査で99%の検査正解率を記録している[10]。

オンボード計算および通信制御アーキテクチャは、タスク理解・計画を担う「大脳」と全身の動的バランス・力制御を担う「小脳」を機能分離したエンド・クラウド階層構造をとる[9]。なおUBTECHはWalker S1単体の正確な搭載SoC型番を公式スペック表で明記していないが、同社とNVIDIAの全身運動制御連携（NVIDIA SONIC等）、UBTECH参画の兄弟機「天工行者」における最大550 TOPSまでの算力拡張設計、および中国の産業用具身知能ロボットにおける標準的な双脳構成（知覚大脳に275 TOPSのNVIDIA Jetson AGX Orinクラスを搭載し複数カメラの並列推論を実行する構成）から、機体エッジ側に数百TOPSクラスのAI推論モジュールと産業用制御マザーボードを混載していることが裏付けられる[11]。機体内部のリアルタイム制御バスには初代Walker以来の実績を持つ高速フィールドバス「EtherCAT」が採用されており、全身28個の主要関節ドライバと力覚センサをミリ秒以下の定周期で同期制御する[8]。さらに極氪寧波5Gスマート工場では、工場内の5Gネットワークを介してUBTECHの群脳ネットワーク「BrainNet」および「IoH（インテリジェントネットワーク中枢）」へ接続されている[1]。DeepSeek-R1深層推論技術をベースとするヒューマノイド用マルチモーダル推論大規模モデルを上位側で稼働させることで、単機オンボード演算負荷を抑えつつネットワーク遅延100ms以内での多機タスク分解・協調スケジューリングを実現している[1]。

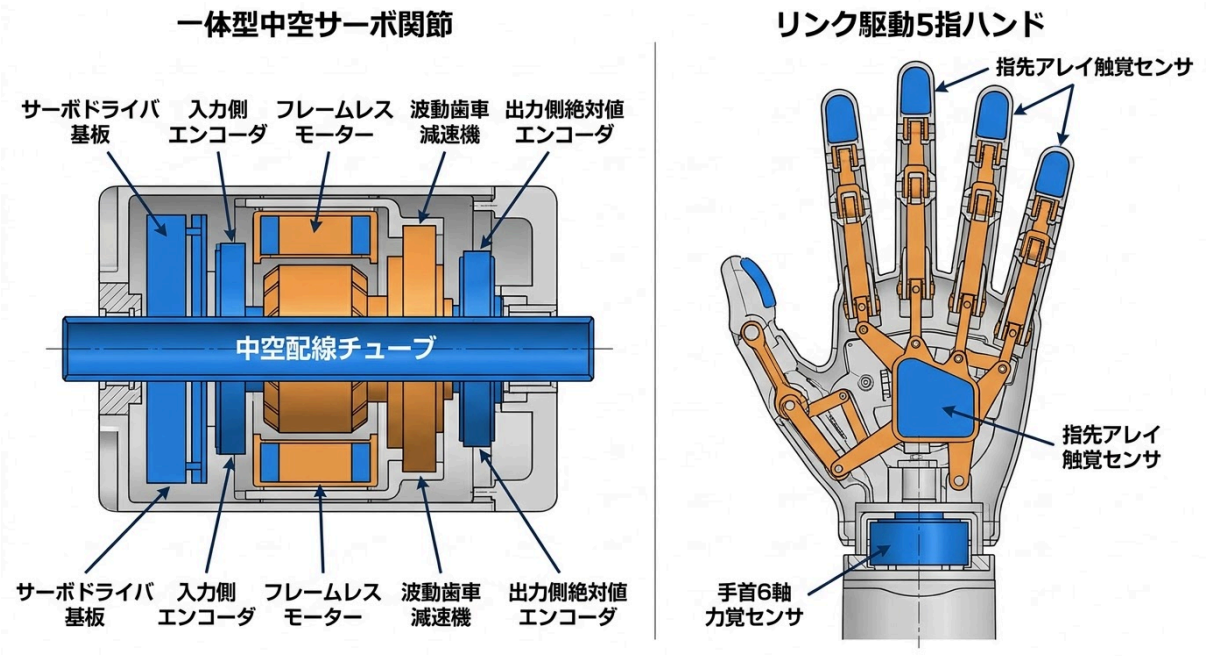
放熱・防塵・耐ノイズ（EMC）実装に関しては、UBTECH公式がWalker S1の3大重点技術課題の1つとして「高負荷・長時間稼働工況下での関節放熱問題」を明記している点が極めて重要である[47]。15kgの通箱を保持して連続歩行・屈伸を行う際、肩・肘・股関節・膝関節のモーター巻線には大電流が連続通電されジュール熱が蓄積する。Walker S1では、軽量薄肉化したアルミニウム・マグネシウム合金製の関節外殻へフレームレスモーターのステータを直接熱結合させて機体骨格全体へ熱拡散させる構造を採り、熱による減磁やトルク低下（熱ダレ）を抑制している[4]。また次章で詳述する通り、関節外殻と出力フランジ・エンドカバーで密閉空間を形成し、中空配線管の両端をOリング等でシールして内部へハーネスを通す構造により、総装・車体工場内の粉塵侵入を防ぐとともに、モーター駆動用の高速PWMスイッチングノイズがエンコーダ信号や微弱な力覚・触覚信号へ混入するのを抑制し、絶縁性能と信号整合性を担保している[69]。

第2章 UBTECH独自「一体型関節サーボモジュール」と「力

覚・触覚搭載ハンド」の機構特性

2.1 トルク密度・部位別減速方式・デュアルエンコーダ中空配線構造

ヒューマノイドの機体BOM原価の50～55%はアクチュエータ群（実行システム）が占めており、サーボ関節の内製・統合設計能力は機体コストと運動性能の両面を決定づける[4]。UBTECHは10年以上にわたる研究開発を通じて、0.2N·mの小型関節用から200N·mの大トルク関節用まで幅広いサーボドライバの自社量産を実現した世界的にも数少ない企業であり[14]、Walker S1では独自開発の革新的ロータリー駆動による一体型関節モジュール（本体主要28軸）を搭載し、最大トルク250N·m（Walker Sシリーズ仕様で最大300N·m・最大回転速度130rpm）を達成している[6]。



UBTECHの公式仕様書では、この一体型駆動ユニットの基本構成要素として「フレームレス・トルクモーター＋精密波動歯車減速機＋駆動コントローラ（サーボドライバ）＋デュアルエンコーダ」の4要素同軸統合が明記されている[8]。さらにUBTECHが保有する集成関節特許群（CN110815284B、CN112888536B「機器人及其集成関節」、CN117245687A「集成関節及機器人」）および同特許群が引用する中国の中空駆控一体化スマートモジュール関節の標準的構造（CN107398924B、CN207953918U等）、ならびにコア供給元である昊志機電・歩科股份・上海徳優智聯（UBTECH合弁）の開示技術を照合すると、その高密度実装の細部が明らかになる[70]。

円筒状の密閉ハウジング内部は軸方向に複数のキャビティへ分割されており、近位側から順に、(1)低圧サーボドライバ基板および保持用電磁ブレーキ収容部、(2)モーター出力中空軸に直結された高速入力側インクリメンタル／磁気エンコーダ、(3)高トルク密度の中空フレームレス永久磁石同期モーター（業界ハイエンドで単体トルク密度30N·m/kg、国産主力の歩科股份第4世代で18.3N·m/kg、外転子型統合設計を含む）およびホールセンサ、(4)波動歯車減速機（ウェーブジェネレータ、フレクスプライン、サーキュラスプライン）とアンギュラ玉軸受／クロスローラー軸受、そして最遠位の出力フランジ側に(5)中空マルチターン絶対値エンコーダが同軸配置されている[70]。

この設計の工学的核心は「入出力デュアルエンコーダによるフルクローズドループ制御」と「中空シャフト内部配線」にある[69]。波動歯車減速機は薄肉カップ状のフレクスプラインが弾性変形しながら噛み合うため、15kgの通箱を長いモーメントアームで保持した際に減速機自体のねじれ弾

性たわみが生じる。モーター軸側の入力エンコーダで高速なベクトル電流制御（FOC）と速度制御を行いつつ、減速機出力フランジ側の絶対値エンコーダでリンクの実角度を直接フィードバックすることで、負荷変動に伴うたわみ誤差の補正、電源再投入時の原点復帰動作（ホーミング）の省略、および入出力のねじれ角差からの関節作用トルク推定が可能になる[69]。また関節中心軸を貫通する「中空配線チューブ」は、出力フランジ・減速機内径・モーター中空軸を一直線に貫き、両端のOリングによって二重シールされている[70]。次段の関節へ向かう電源・EtherCAT通信ケーブルがすべてこの回転中心の中空管内を通過するため、外部へのケーブル露出がなく、車体開口部への挿入作業時における断線リスクと屈曲ストレスを大幅に低減している[8]。

減速方式の部位別使い分けを見ると、ゼロバックラッシと高い角度位置決め精度・軽量性が要求される上肢7軸（肩・肘・手首）や頸部には、緑的諧波や昊志機電が供給する波動歯車減速機一体型モジュールが主用される[68]。一方、歩行時の着地衝撃と最大250〜300N·mの大トルクが作用する腰部・股関節・膝関節などの重負荷部位には、耐衝撃性と高剛性に優れる遊星ギア減速機（モーター内部に2段遊星構造と共用内歯車・中空サンギアを同軸内蔵したコンパクト高トルク密度設計など）やRV減速機が適材適所で選択されている[6]。加えてUBTECHは、脚部の慣性モーメント低減と高推力化に向け、自主制御可能な「遊星ローラーネジ（行星滾柱絲杠）および一体型リニアサーボ関節」の研究開発と特許網構築（CN114043523A「人形機器人的直線関節」等）も進めている[13]。遊星ローラーネジはネジ軸周囲の複数のネジ付きローラーが線接触で荷重を分担するため、点接触のボールネジと比較して同一荷重下で体積を3分の1に縮小でき、静荷重容量3倍・寿命15倍・最高回転数6,000rpm（最高線速度2,000mm/s、最大加速度3G）を発揮する[84]。特にナットをモーターローターと一体化した「倒置型（インバーテッド）遊星ローラーネジ」は直線関節の極小化に不可欠であり、回転関節28個を主軸とする現行Walker S1から次世代プラットフォームへの進化において重要な技術オプションとなっている[13]。

2.2 第3世代5指デクスタラスハンドと6軸力覚・アレイ触覚フィードバック性能

車体総装ラインやSPS部品仕分け工程で直接ワークに触れる末端執行器として、Walker S1はUBTECH自社開発の「第3世代バイオミメティック5指デクスタラスハンド（仿人五指霊巧手）」を搭載している[11]。また手首部はエンドエフェクタ交換インターフェースに対応しており、作業内容に応じたモジュール換装も可能である[11]。

駆動メカニズムについて、テスラOptimus第3世代ハンド（22自由度）が超高分子量ポリエチレン（UHMWPE）繊維による腱ロープ駆動を採用しているのに対し、UBTECHの産業用ハンド系譜は工場現場での高負荷耐久性と把持剛性を優先し、掌内部の小型コアレスモーター・精密マイクロ遊星減速機（業界標準で直径8mm級）と「剛性リンク機構（連桿方式）」を組み合わせる設計路線を採っている（証券調査資料によれば、後継の第4世代ハンドも連桿方式・6能動自由度［従動関節を含め11自由度］を踏襲しており、Walker S1の全身41自由度レイアウトにおいても片手5〜6能動自由度が割り当てられている）[4]。剛性リンク駆動の最大のメリットは、15kgの重量部品が入った通箱のハンドルを把持して工場内を連続歩行する際にも、腱ロープ特有の初期伸びや摩耗破断、張力緩和による把持精度劣化が起きにくく、長期間にわたり安定した把持力を維持できる点にある[85]。

微細な接触力制御を担うセンシング系は、「手首・足首の6軸力覚センサ」と「指先・掌のアレイ式触覚圧力センサ」の2階層で構成される[11]。第1階層として、Walker S1は両手首に2個、両足首に2個の計4個の「6軸力覚／トルクセンサ（六維力伝感器）」を搭載している[12]。起歪体のひずみゲージにより直交3軸の並進力と3軸のモーメントを同時計測し、足首では床反力中心（ZMP）のリアルタイム制御に、手首では部品嵌合時の接触反力検知とインピーダンス／柔順制御（コンプライ

アンス制御）に用いられる[1]。極氪5Gスマート工場での2台協調による約30kg大型通箱搬送においては、2台のWalker S1が互いの手首6軸力覚センサを通じて負荷同定と内力（引っ張り・こじり）の柔順制御を同期させ、歩行振動下でも箱を傾けずに安定運搬している[1]。
第2階層として、第3世代5指ハンドには計6個の「アレイ式触覚圧力センサ（陣列式触覚圧力伝感器）」が5本の指先および掌部へ統合されている[6]。ピエゾ抵抗式MEMSや柔軟導電材料を用いた面分布圧力アレイが把持時の圧力分布と滑り兆候を精密に監視し、UBTECHのフルスタック巧緻操作戦略ライブラリと連動して把持力と指姿勢をミリ秒単位で動的調整する[1]。この力覚・触覚の融合により、極氪工場のドア組立エリアや総装ラインにおいて、金属剛体部品のみならず、自動車組立で自動化が最も困難であった「小サイズで変形しやすい軟質フィルム（保護薄膜）」「ワイヤーハーネス」「ゴム製ウェザーストリップ（密封条）」を破損や位置ズレなしに把持・装着する精密作業を実現している[1]。

2.3 主要コア部材の中国国産化・内製構造一覧表

Walker S1をはじめとする中国製産業用ヒューマノイドの関節・ハンドを構成する主要コア部材について、従来の日欧米独占サプライヤーと中国国産・UBTECH内製構造の比較を以下の表にまとめる[4]。

コア部材（**BOM**比率目安）	日欧米の従来主要メーカー	中国国産メーカー・**UBTECH**内製	単価水準とコスト低減実態	技術到達度と残存課題
波動歯車減速機（約13〜35%）	ハーモニック・ドライブ・システムズ（日本）	緑的諧波（国内シェア60%超）、昊志機電、来福諧波	緑的諧波の市場見積は約1,320人民元で安定、輸入品比30〜50%超低減	初期精度は実用域に到達、連続過負荷下の精度保持・疲労寿命は日系が優位
遊星ローラーネジ（直線系で約12〜19%）	Rollvis、GSA（スイス）、Ewellix（欧州）	五洲新春、北特科技、貝斯特、恒立液圧、拓普集団、兆豊股份	従来2,000〜3,000人民元/本超から量産試算1,080人民元/本水準へ低下	ハードターニング（以車代磨）で量産化進展、超高精度ネジ研削盤が制約
フレームレスモーター・駆動器（約16〜20%）	Kollmorgen（米国）、Allied Motion	歩科股份（Kinco）、昊志機電、偉創電気、UBTECH内製ドライバ	国産モーター約1,200元＋駆動器約300元、0.2〜200N·m駆動器を自社量産	歩科第4世代が18.3N·m/kgとSiC 100kHz駆動を達成、30N·m/kg帯を追撃

6軸力覚センサ・触覚アレイ（知覚系主軸）	ATI（米国）、Schunk（独）、AMTI（米国）	坤維科技（国内首位）、柯力伝感、宇立儀器、昊志機電、帕西尼感知	高価格帯は2万～5万人民元/個だが国産量産化で輸入比30～50%超の低減進行	柯力が±0.5%FS品を展開、一般国産品は±1.5～2.5%FSで温度ドリフトに課題
絶対値エンコーダ・耐屈曲配線（制御・電装）	Heidenhain（独）、多摩川精機（日）	禹衡光学、昊志機電、万馬股份（3,000万回屈曲ケーブル）、鑫宏業	可動ケーブルは国産EV・FA網で大幅低減、高精度エンコーダは高価格維持	ハイエンド絶対値エンコーダの国産化率は20%未満にとどまり日独勢が独占

第3章 華研智造（iSAGE）「全高155cm級・4腕協調ロボット」の独自機構設計と運動学的合理性

3.1 企業背景の一次資料検証と「治具レス空中協調作業」の生産技術的狙い

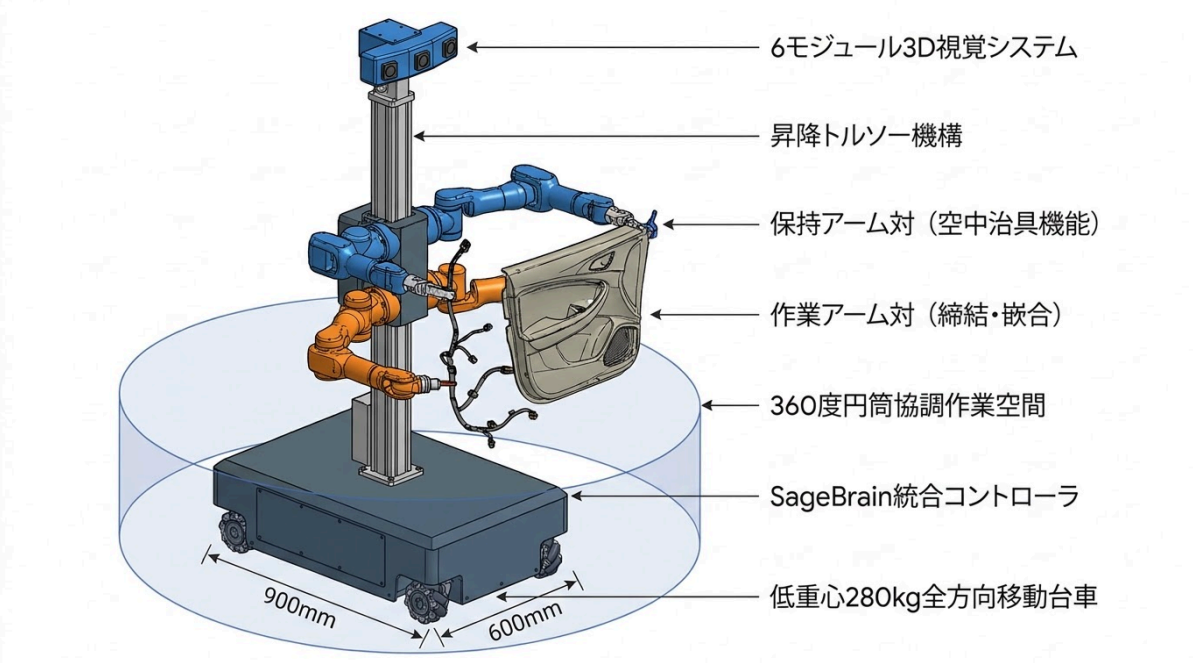
極氪5Gスマート工場を含む中国のスマート製造ラインにおける多腕ロボット導入を分析するにあたり、まず企業・製品名称に関する一次資料の厳密な照合結果を明示する。日本の技術セミナーや業界記事の一部では「全高155cm・4本の腕を持つ華研智造（ISAGE）四臂協調ロボット」と表記されているが[18]、中国語・英語の公式製品仕様書および企業登記・特許文献を調査すると、英語ブランド「iSAGE」を保有し全高155cm級・4腕協調移動ロボットを開発・製造している一次主体は、2017年11月設立（2018年本格稼働）の「上海颯智智能科技有限公司（Shanghai SAGE Intelligent Technology Co., Ltd.：颯智智能）」である[17]。創業者兼CEOの張建政（Zhang Jianzheng）博士は上海交通大学でロボット工学博士号を取得し、ファナック（FANUC）にて中国初となる自動車業界向け3Dビジョン手眼協調システム開発を主導した20年超のFA実務経験を持つ技術者である[20]。

同社が2025年7月に発表した4腕自律移動ロボット「iSAGE STAR-SageMan（四臂具身智能機器人）」は、公式英語仕様書において基準立ち姿勢全高「1560mm（156cm）」（昇降伸長時最大1815mm）、全身52自由度と規定されており、これが日本で言及される「全高155cm・ISAGE四臂協調ロボット」の実機仕様と完全に一致する[3]。（なお中国国内には、吉利汽車とも展示会等で接点を持つスマート工場・自動貼板機インテグレーターの「華研智造［Huayan Zhizao］」や、1台のコントローラで最大4本の7軸ヒューマノイドアームを騒音50dB以下で協調制御する「広東華沿機器人［Huayan Robotics］」が別途存在するため、二次情報化の過程で「華研智造」と「iSAGE（颯智智能）」が併記されたものとみられる[99]。また公開一次情報の範囲では、極氪寧波工場での群実訓を公式発表しているのはUBTECHであり[1]、iSAGEの4腕機は上海市のデザイン100選で極氪「Zeekr 9X」と並び選出され、理想汽車［Li Auto］や上海風禾沢汽車など自動車・半導体・医薬分野の世界500強・上場企業50社超への導入実績が公表されているものの、極氪工場内での個

別工程導入に関する公式開示は確認されない点を明記しておく[20]。）
ではなぜ中国の自動車・部品生産技術現場では、人間と同じ双腕ヒューマノイドだけでなく、「4本のロボットアームを備えた車輪型協調ロボット」が開発・実戦投入されているのか。その工学的根拠は、張建政CEOが明言する「見世物（パフォーマンス）用ロボットは作らない。脚部の自由度を放棄し、その予算を腕の本数と作業空間へ振り向ける」という徹底した生産技術合理性にある[21]。
自動車の総装サブラインや部品組立工程（ワイヤーハーネス検査・配策、ドアトリム・インパネモジュール組付け、精密機器組立など、製造業全体の約7割を占めるディスクリート製造の多品種変量ライン）では、人間の腕2本という身体制約が治具コストとタクトタイムの壁を生んでいる[20]。大型樹脂パネルや柔軟に変形する長尺ワイヤーハーネスを組付ける際、2本腕のロボットでは片腕でワークを支えてもう片腕で締結しようとしても、ワークの自重たわみや反力による逃げが発生する。従来はこれを抑えるために車種専用の大型受け治具（固定クランプ設備）をライン側に設置していたが、モデルチェンジのたびに巨額の治具改造費と床面積を要していた。これに対し4腕構造のSTAR-SageManは、「2本の保持アームがワークの複数箇所を空中で把持・張力保持して動的治具（空中クランプ）となり、同時に残り2本の作業アームがビス締結・コネクタ嵌合・クリップ押し込み・3D検査を実行する（治具レス空中協調作業）」を1台で完結させる[3]。さらに機体の左右両側で2腕ずつ独立した組立を同時進行させる「双工位並列作業」にも対応し、単一工程の段取り・部品交換時間を90秒へ圧縮、従来方式比で作業空間2倍、作業効率200～400%（2～4倍）、タスク処理性能5倍という大幅な生産性向上を実現している[3]。

3.2「STAR-SageMan」のハードウェア構造・リーチ重なり設計と156cm低重心バランス

公式仕様書（iSAGE Product Series Datasheet）および技術データベースに基づく「iSAGE STAR-SageMan」の具体的なハードウェア構造と運動学パラメータは以下の通りである[3]。



機体外形寸法は全長900mm×全幅600mm×全高1560mm（昇降最大時1815mm）であり、600mmという全幅は工場内の標準的な人作業通路や既存セル間を干渉なく通過できるコンパクトな設計となっている[3]。一方でバッテリーを含む機体総重量は280kgに達しており、二足歩行

機Walker S1（76kg）の約3.7倍という重厚な質量を足元の移動台車ベースに集中させている[3]。通常移動・作業時は全高を1560mm（156cm）の低重心姿勢に保ち、高所ラックへの部品出し入れや大型ワーク上部へのアプローチ時のみ電動昇降トルソーを最大1815mm（昇降ストローク255mm）まで伸長させる構造をとる[3]。電源モジュール（専用充電器SPS-6025：入力AC 220V・定格1,500W、出力DC 54.6 / 54.75V・最大25A）の仕様からは、48V系の高容量リチウムイオン二次電池パックが台車最下部にウェイト兼電源として搭載されていることが読み取れる[3]。

運動学構成としては、全身で52自由度（構成オプションにより28〜56自由度）を備える[3]。足回りには、自社開発の減速ギアボックスおよび駆動制御ユニットを用いた4輪独立駆動・全方向ステアリング機構（ステアリング角度精度±1度）と、傾斜床や微細な段差・非構造化床面に追従する下部多自由度協調機構を搭載している[20]。体幹上部には左右完全対称トポロジー（全覆蓋対称性四臂トポロジー）で4本の多関節アーム（6〜7軸構成＋多自由度エンドエフェクタ）が配置されており、機体周囲に死角のない「360度円筒形作業空間」を形成する[3]。

この4本のアームはすべて波動歯車減速機付き精密サーボと関節トルクセンサ（単軸分解能0.1N·m）を内蔵しており、各腕の可搬重量は3〜16kg、最大反復位置決め精度は±0.03mm（36Kr記事表記では±0.05mm、角度精度±1度）に達する[3]。4腕の取り付け角度とリーチ重なり設計においては、中央の昇降・旋回トルソーに対して4腕の肩基部を対称オフセット配置することで、前方・側方の協調作業ゾーンでは上下・左右のアーム可動域を深くオーバーラップさせて4腕同時アクセスを可能にしつつ、反対側の作業ゾーンへも旋回なしでリーチできる双方向性を確保している[3]。また4本の腕が密集して動く際に生じるカメラ死角（自己遮蔽）を解消するため、機体には計6個のマルチカメラ3Dビジョンモジュールと空間認識LiDARが分散配置されており、多角度からの高速3Dモデリングによってミリ単位の視覚位置補正を常時実行する[3]。

3.3 非対称動作時の反力・転倒モーメント抑制設計と「SageBrain」同期制御

4腕移動ロボットの機構設計における最大の難所は、4本の腕がそれぞれ最大16kgの負荷を持って非対称に加減速・押し込み作業を行った際、移動台車へ作用する複雑な反力・振動・転倒モーメントをいかに抑え込むかにある。公開仕様書には油圧式などの張り出しアウトリガー機構の記載はなく（90秒タクトでの迅速なステーション間移動を損なわない車輪自立方式[3]）、公開諸元および同社の特許群から以下の3層の安定化・同期メカニズムが確認できる。

第1は、機体総重量280kgと基準全高156cmによる「静的・準動的復元モーメントの確保」である。公開されている台車寸法（長さ900mm×幅600mm）と総重量（280kg）に基づく工学的静力学モデル試算を行うと、その設計意図が定量的に裏付けられる[3]。最も厳しい横方向（幅600mm側）の有効車輪トレッド半幅を保守的に0.26m、前後方向（長さ900mm側）の有効ホイールベース半長を0.38m、重力加速度を9.81 m/s2と仮定すると、280kgの機体質量による車輪接地線まわりの重力復元モーメントは、横方向で 280 × 9.81 × 0.26 ＝ 714.2 N·m、前後方向で 280 × 9.81 × 0.38 ＝ 1,043.8 N·m となる[111]。これに対し、片側2本のアームが最大可搬16kgずつ（計32kg）を体幹中心から水平距離0.85mまで最大伸展して保持し、さらに残り2本のアームが高さ1.45mで水平方向に100Nのクリップ押し込み・嵌合反力を同時に受けたという極端な非対称ワーストケースを想定しても、複合転倒モーメントは (32 × 9.81 × 0.85) ＋ (100 × 1.45) ＝ 266.8 ＋ 145.0 ＝ 411.8 N·m に収まり、横方向でも 714.2 / 411.8 ＝ 1.73（前後方向では2.53）の転倒安全率が確保される[111]。もし機体総重量が軽量双腕AMR並みの80kgであれば、横方向復元モーメントは204.0 N·m（安全率0.50）しかなく即座に転倒する計算となる[111]。すなわち280kgという大質量と156cmへの低全高化は、アウトリガーなしで4腕フル負荷時の転倒モーメントとベース傾斜を抑え

込み、±0.03mmの位置決め剛性を成立させるための構造的必然である[3]。
第2は、台車駆動軸のサーボブレーキ拘束と「力・位置ハイブリッド協調制御（力位混合協同制御）」による制振・内力逃がしである。作業停止時には4輪独立ステアリング・駆動ユニットが制動保持を行い台車の水平変位をロックする[108]。そのうえで、颯智智能が特許出願している「具身機器人双臂浮動抓取の力位混合協同制御方法」および関節トルクセンサ（分解能0.1N·m）による柔順制御が働き、2腕で保持した大型ワークに締結アームの押し込み力が加わった際、保持アーム側が微小なフローティング・コンプライアンスをもって過大な内部応力と反力ピークを吸収する[19]。さらに同社が上位の6腕機「MAHAKBOT 六臂玄甲」（111自由度）でも展開している「多腕間の動的デカップリング（動作解耦）制御」により、各腕の加減速反力が台車フレームの固有振動を励起しないよう軌道位相が協調制御されている[112]。
第3は、マルチアーム統合コントローラ「SageBrain」とリアルタイムOS「SageOS」による低遅延同期である[3]。4本のアーム・昇降腰軸・全方向台車の計52自由度を別々のコントローラで制御すると通信遅延で協調把持が破綻するため、iSAGEは知覚・判断・軌道計画・多軸サーボ制御を単一基盤へ統合した自社製コントローラ「SageBrain」を開発し、公式仕様として「ミリ秒応答（millisecond-response）」の低遅延同期を実現している（具体的な内部フィールドバス規格名は非開示だが、同社の初期制御特許に見られるマルチチャネル産業バスやEtherCAT等の1ms級定周期通信に相当する）[3]。上位層では自社開発の具身知能大規模モデル「SageCore」（外部LLMおよびVLAモデル統合対応）が2,000種超の産業スキルライブラリから作業計画を生成し、下位のSageOSが狭小空間での4腕間の動的衝突回避（安全空間の動的隔離）をリアルタイムで解きながらミリ秒周期で全軸へ指令を配信する構成となっている[3]。

第4章 二足歩行機（Walker S1）と多腕車輪機（4腕協調ロボット）のハードウェア役割分担と保守性

4.1 極氪工場投入ロボット比較表と工程別ハードウェア選定・日欧米設計思想対比

極氪寧波5Gスマート工場をはじめとする中国のスマート工場群が示す生産技術上の重要な転換点は、すべての手作業工程を二足歩行ヒューマノイド1機種で代替しようとするのではなく、現場の床面制約・要求精度・作業複雑度に応じて「二足歩行双腕機（Walker S1）」「重装車輪4腕機（STAR-SageMan）」「L4自動運転物流車・無人フォークリフト・AGV」を明確に棲み分けさせていることにある[1]。
二足歩行の「Walker S1」が選定されるのは、人間作業員向けに作られた既存設備の狭小通路、床面の配線カバーやグレーチング段差、コンベアへの追従歩行、および複数エリアを横断する柔軟性が求められる工程である[1]。極氪5Gスマート工場では、(1)SPS計器エリアでの多品種部品の協調仕分け、(2)総装ライン脇での約30kg大型通箱の2台協調運搬と無人搬送車への受け渡し、(3)車体内外装の純視覚品質検査、および(4)ドア組立エリアでの保護フィルム・ウェザーストリップ等の柔軟部品組付けに数十台のWalker S1が投入された[1]。同工場での品質検査・ドアクリップ装着実訓では、累計2.3万本の動作軌道を収集してAIモデルを3世代更新した結果、誤検出率を3%から大幅に低減させている[117]。足裏の小さな接地スペースで立ち、膝と腰を使って高所から床面近くまで作業できる二足機は、工程間を自在に行き来する「多能工」として機能する。
これに対し、車輪ベース4腕の「iSAGE STAR-SageMan」が圧倒的優位を発揮するのは、平坦な工場床が整備されたサブラインやセル生産設備において、「±0.03mmの精密位置決め」「専用受け治具の廃止（空中保持＋同時締結）」「人間の2〜4倍の高速タクト」が求められる高密度組立・

検査ステーションである[3]。脚部バランス維持のための常時電力消費がなく、移動速度で50〜200%高速、安定性で30〜80%優れる車輪ベースは、ひとたび作業位置に停止すれば280kgの固定架台と同等の剛性を発揮し、ワイヤーハーネス検査や精密モジュール組立を休むことなく並列処理できる[3]。

ここで、中国勢のこれら2形態と、欧米の二足歩行勢（Tesla Optimus、Agility Robotics Digit等）、さらに日本のトヨタ自動車が2025年12月に初公開し2026年11月の組織再編（「トヨタロボティクス」新設・未来創生センターからの実戦開発移管）で工場導入を本格化させた自社開発機「ELEY（エリー）」を比較すると、設計思想の分岐が明確になる[118]。（なおトヨタの車輪型ロボットは、2012年発表の先代生活支援機「HSR」が単腕・車輪型であった系譜から単腕型と想起される場合があるが、その後継として工場向けに新規設計された「ELEY」は、寸法478×450×高さ939〜1,619mm・質量50kgの「全方向車輪台車＋双腕＋全軸QDD［準ダイレクトドライブ］」を採用している[119]。）以下に極氪工場投入機および日欧米競合機の比較表を示す。

比較項目	**UBTECH Walker S1**（中国・二足双腕）	**iSAGE STAR-SageMan**（中国・車輪**4**腕）	欧米二足勢（**Optimus**・**Digit**等）	トヨタ **ELEY**（日本・車輪双腕 **QDD**）
移動方式・機体寸法・質量	二足歩行、身長172cm、重量76kg	4輪独立ステア台車、全高156〜181.5cm、重量280kg	二足歩行、身長150〜175cm級、重量55〜75kg級	全方向車輪台車、478×450×939〜1619mm、重量50kg
自由度構成・腕の本数	全身41自由度（双腕7軸×2＋5指ハンド×2＋双脚）	全身52自由度（対称4腕＋昇降トルソー＋全方向台車）	全身26〜40自由度超（双腕＋ハンドまたはグリッパ＋双脚）	双腕（2指グリッパ等）＋伸縮昇降機構＋全方向移動車輪（HSR単腕から進化）
関節駆動・減速設計思想	高トルク一体型関節（最大250N·m、波動歯車＋遊星等）	波動歯車精密サーボ＋全関節トルクセンサ（分解能0.1N·m）	回転関節（波動・サイクロイド）＋遊星ローラーネジ直線関節	全軸QDD（減速比10対1以下）による高逆駆動性と柔軟接触
可搬重量・位置決め精度	連続歩行搬送15kg（2台協調で約30kg）、航法誤差2cm内	各腕3〜16kg（4腕並列）、反復位置決め精度±0.03mm	約20〜25kg級（Digit 5は22.7kg反復可搬）、視覚・力覚	公式未公表（日刊自動車新聞報道では片腕1kg）、しなやか

			誘導	な力制御重視
対象工程とコア設計哲学	段差・狭小通路を含む既存人作業区での搬送・SPS・検査・柔軟組立	平滑床での治具レス空中保持＋同時締結・左右並列高タクト組立	人間1対1代替を目指す汎用二足形態（RaaS物流・車体工場）	既存狭小ライン無改修導入・床耐荷重配慮・人協働の本質安全

トヨタがELEYであえて二足歩行を選ばず、質量50kg・成人男性1人分の投影面積（478×450mm）・減速比10対1以下の全軸QDD車輪型とした理由は、日本の既存狭小工場ラインへ床耐荷重や安全柵の改修なしでそのまま投入し、人と接触しても関節がバックドライブして壊れない「本質安全」を最優先したためである（重可搬物流には北米工場でAgility製DigitをRaaS導入し、基礎AI研究ではBoston Dynamics製AtlasにTRIのLBM［大規模行動モデル］を載せるマルチトラック戦略を採る）[119]。対して中国の極氪・ UBTECH・iSAGE陣営は、新設スマート工場の広い空間と5Gインフラを前提に、15〜30kgを運ぶ高減速比・高出力二足機「Walker S1」と、280kgの高剛性4腕車輪機「STAR-SageMan」を実戦投入し、重負荷・高タクト領域から一気に自動化率を引き上げる戦略を採っている[1]。

4.2 24時間稼働EV工場における関節耐久性（MTBF）・可動ケーブル保護・現場ユニット交換設計

24時間稼働体制の量産EV工場における保守・信頼性設計について検証すると、まず公開一次資料においてUBTECH・iSAGEともに整機ベースの確定MTBF（平均故障間隔）時間は公表していない。これは2024〜2026年時点の産業用ヒューマノイドが、Walker S Liteの21日間連続実訓やWalker S1の数十台規模でのフェーズ別工場実訓を経て、関節安定性・整機構造信頼性・バッテリー稼働の検証を完了しつつ量産初期（UBTECHは2025年に約1,000台規模の量産から将来13万〜15万台能力を計画）へ移行している段階にあるためである[43]。

しかし現場での突発停止を防ぐため、ハードウェア保守設計には3つの明確な対策が織り込まれている。第1は可動ケーブルの耐屈曲・耐捻回保護である。多自由度関節が複合回転する人型・4腕機ではハーネス断線が最大の故障要因となるが、Walker S1は前述の中空シャフト貫通配線（CN207953918U / CN107398924B型の軸心配線管構造）によってケーブルを回転軸中心へ収容し、外装への露出と最小曲げ半径割れを排除している[70]。さらに電線部材側でも、中国の万馬股份（002276.SZ）や鑫宏業（301310.SZ）がヒューマノイド本体専用の超高柔性・耐捻回ケーブルを開発しており、万馬股份のロボットケーブルは産業用ドラッグチェーンで1,000万回超、ヒューマノイド関節の動的屈曲試験で「3,000万回」の寿命を達成して長寿命化を下支えしている[28]。

第2は故障時の現場ユニット交換（FRU）モジュール設計である。Walker S1は28個の主要関節がドライバ・デュアルエンコーダー体型の独立モジュールとして設計され、EtherCATと電源のデイジーチェーンで結合されているため、万一の減速機摩耗やドライバ異常時には該当する関節モジュールまたは前腕・5指ハンドアセンブリ単位で迅速に現場交換できる[8]。出力フランジ側のマルチターン絶対値エンコーダにより交換後の原点復帰調整も容易である[70]。iSAGEのSTAR-SageManもスケーラブルな「SageBlock」モジュール設計とアーム早期安全予警アルゴリズム（特許CN116708156A）を備え、特定の腕に異常兆候が出た際の予防保全とモジュール単体交換を

可能にしている[3]。第3に、Walker S2で導入された「3分間ホットスワップ自律換電」は、シフト稼働中の充電停止をなくすだけでなく、サイクル劣化したバッテリーパックを機体稼働を止めずに更新できる保守上の利点も兼ね備えている[9]。

第5章 中国国産ロボティクス部材サプライチェーンの台頭と圧倒的コスト競争力の源泉

5.1 日欧米独占コア部材の国産代替実態とEVサプライチェーンのスピルオーバー

中国勢が驚異的な速度と低コストで産業用ヒューマノイド・多腕ロボットを量産工場へ投入できている背景には、従来は日欧米メーカー（ハーモニック・ドライブ・システムズ、ナブテスコ、Rollvis、GSA、Kollmorgen、Maxon、ATI、Heidenhain等）が独占していた精密コア部材を、中国国内サプライヤーとEV（電気自動車）Tier1部品網で急速に代替した構造変化がある[4]。産業調査によれば、世界のヒューマノイド供給網における中国のシェアは80%を超え、減速機・モーター・センサ等の主要コア部材の国産化率は65%以上に達し、調達コストは輸入品比で30〜50%低く抑えられている[25]。

第1に、機体BOMの約13〜35%（単一カテゴリー最大とする分析で約35%）を占める「波動歯車減速機」では、2021年時点で日本のハーモニック・ドライブ・システムズが世界シェア約82%を握り、輸入品は1個あたり数千〜1万人民元近くに達していた[4]。これに対し、UBTECH・テスラ・小米のコアサプライヤーである「緑的諧波（Leaderdrive、688017.SH）」は国内シェア60%超・世界第2位へ成長し、2025年に年間50万台を出荷、さらに100万台規模の量産設備増強を進めている[81]。GGII（高工機器人産業研究所）の調査では、緑的諧波の同等性能品の市場見積価格は「約1,320人民元（約2.8万円）」で安定しており、UBTECHに減速機・回転執行器・6軸力覚センサ等を一括供給する「昊志機電」や「来福諧波」、腰・股関節用の高剛性RV減速機および遊星ギアを供給する自動車歯車大手「双環伝動（Shuanghuan Driveline）」との競争により、緑的諧波の粗利益率が2023年の41.14%から2026年上半期にかけ低下するほどの価格低下が進んでいる[27]。

第2に、直線関節の中核である「遊星ローラーネジ」は、2022年時点でRollvis（26%）、GSA（26%）、Ewellix（14%）など欧州勢が中国市場の過半〜8割超を独占し、1本2,000〜3,000人民元超（ハイエンド輸入品はさらに高価）のコスト障壁となっていた[133]。ここへ自動車シャーシ・熱管理大手の「拓普集団」「三花智控」をはじめ、「五洲新春」「北特科技」「貝斯特」「恒立液圧」「兆豊股份（Walker S1量産効率向上にも寄与）」「新剣伝動」が一斉に参入した[4]。高価な海外製ネジ研削盤のボトルネックを回避するため、超硬旋削やミーリングで研削工程を代替する「以車代磨」「以銑代磨」プロセスを開発し、単機14本使用時の量産想定単価を1,080人民元／本（単機あたり約1.5万人民元）水準へ引き下げつつある[84]。

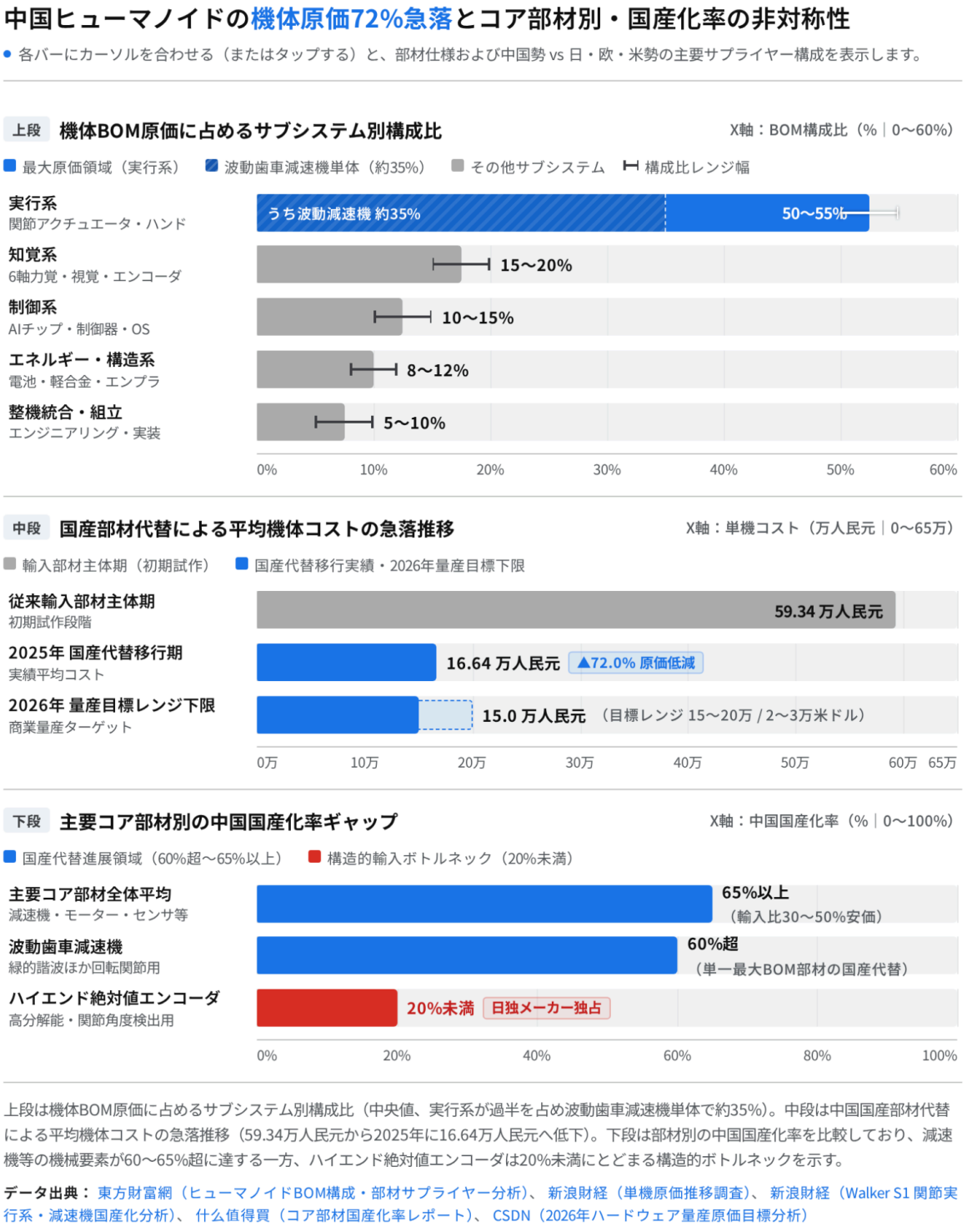
第3に、「フレームレス・トルクモーター」およびマイクロ駆動系では、米国Kollmorgen（トルク密度30N·m/kg）やスイスMaxonに対し、UBTECHの戦略パートナーである「歩科股份（Kinco、688160.SH）」が第4世代モーターでトルク密度18.3N·m/kgを実現し、SiC素子による100kHz高速スイッチング（損失40%減）技術と合わせてi-Kincoサーボモジュールを半期6.80万台出荷する規模に達している[69]。中航証券の試算では国産フレームレスモーター単価は約1,200人民元、ドライバは約300人民元まで下がっており、これにUBTECHの内製ドライバ技術や、5指ハンド向けコアレスモーター・極小遊星減速機を担う「鳴志電器」「兆威機電」「鼎智科技」「因時機器人」が結合している[4]。

第4に、「6軸力覚センサ」では、米国ATI・独Schunk・米AMTIの3社が世界シェア52.48%を占め単

価2万～5万人民元/個と高価であった領域に対し、外径36～200mm・定格30N～20kNを揃え国内シェア首位に立つ「坤維科技（Kunwei）」や、精度±0.5%FS品を供給する力学センサ最大手「柯力伝感（Keli）」、「宇立儀器」、「昊志機電」、「帕西尼感知」が量産代替を加速させている[4]。

5.2 機体BOMコスト低減の定量分析と日系ロボット・完成車・部材メーカーへの戦略的示唆

これらの国産代替と内製化が機体BOMコストへもたらした定量インパクトを整理する。中国市場におけるフルスペック産業用ヒューマノイドの販売価格は現在60万～80万人民元（約1,260万～1,680万円、一部軽量・廉価機種では16.98万人民元）であり、小ロット試作段階のBOM原価は30万～60万人民元超を要していた[4]。しかし国産コア部材の量産立ち上がりに伴い、業界統計における単機コスト指標は従来の59.34万人民元から2025年には「16.64万人民元（約350万円）」へと約72%低下しており、2026年以降の本格量産ターゲットである整機コスト2万～3万米ドル（約15万～20万人民元）が現実的な水準となっている[29]。



しかし重要な事実は、中国サプライチェーンの中でも「機械加工・モーター組立を中心に急速にコモディティ化した領域」と「高度な材料技術・超精密計測・耐久信頼性の壁により依然として輸入に依存している領域」が明確に分かれている点である[4]。以下にサブシステム別のBOM原価構成と、日本のロボット開発陣・完成車生技陣・電子部品／ケーブル／標準部品メーカーへの戦略的示唆を整理する。

サブシステム区分	BOM原価比率	主要構成コンポーネント	中国国産化実態とコスト構造	日系メーカーの技術優位・参入機会
実行システム（関節・ハンド）	50〜55%	波動・遊星減速機、遊星ローラーネジ、フレームレス・コアレスモーター	機械要素は国産化60%超、EV部品網参入で輸入比30〜50%超の低価格化	24時間稼働下の減速機疲労寿命、高飽和磁束軟磁性材、高耐久UHMWPE腱材
知覚システム（力覚・視覚・角度）	15〜20%	6軸力覚センサ、指先触覚アレイ、3D視覚カメラ、中空絶対値エンコーダ	3Dカメラと中位力覚は国産化進展、ハイエンド絶対値符号器は国産20%未満	薄型中空マルチターン磁気・光学エンコーダ（TMR等）、低ドリフト柔軟触覚材
制御システム（演算・駆動）	10〜15%	エッジAI半導体、リアルタイム制御器、SiC低圧サーボドライバ	制御器・SiCドライバは内製・国産化が進展、上位AI半導体は海外依存大	車載グレード高信頼受動部品、100kHz駆動対応ノイズ抑制磁性部品・電流センサ
エネルギー・構造・可動配線	8〜12%	リチウム電池、ホットスワップ機構、軽合金・PEEK材、耐屈曲ハーネス	EV電池・3Dプリント軽合金・万馬等の高屈曲ケーブルが量産コストを牽引	中空細径シャフト内を通る極細複合耐捻回ケーブル、無瞬断高耐久コネクタ
整機統合・標準保守要素	5〜10%	モジュール結合フランジ、Oリング密封軸受、治具レスエンドエフェクタ	実稼働EV工場への群投入とデータ収集サイクルの速さで世界の先頭を走る	現場FRU交換の再現性を高める高精度位置決め標準機械部品・軽量締結要素

日本の双腕・人型ロボット開発企業および完成車生産技術部門への示唆は明快である。第1に、アクチュエータを関節ごとに個別設計するのではなく、中空配線・デュアルエンコーダー体型モジュールとして共通プラットフォーム化し、自動車部品サプライヤーの量産工法（ハードターニングやプレス精沖等）を巻き込まなければ、中国勢の16万人民元台という原価水準には対抗できない[30]。第2に、工場導入においては「二足歩行か車輪か」「双腕か多腕か」の二元論を超え、既存狭小エリアの搬送・検査には二足機や軽量QDD車輪機を、治具費削減とタクト短縮が求められるサブラインには280kg級の高剛性4腕車輪機（空中治具＋同時締結）を割り当てる工程別ポートフォリオ設計が極めて有効である[1]。

そして日本のセンサ・磁性材料・高機能ゴム・可動ケーブル・標準機械部品メーカーにとっては、中国ヒューマノイド市場（モルガン・スタンレー予測で2030年に中国年間出荷44.6万台・市場規模150億米ドル超[30]）そのものが巨大な高付加価値部品の供給先となる。とりわけ、(1)国産化率20%未満の最大のボトルネックである中空・薄型・耐強磁界のマルチターン絶対値エンコーダ（TMR磁気式・光学式）および高精度6軸IMU[4]、(2)関節モーターのトルク密度30N·m/kg超と発熱低減を両立させる高磁束密度・低鉄損の軟磁性材料・特殊巻線[48]、(3)国産ひずみゲージ式力覚センサや初期触覚アレイが抱える温度ドリフト・経年劣化（一般国産品精度±1.5〜2.5%FS[31]）を解決する高安定エラストマー系触覚センサ・電子皮膚[10]、(4)中空管径制約下で高速差動信号と大電流を同時に通す極細径・高シールド耐捻回ハーネス[32]、ならびに(5)モジュール交換保守（FRU）を支える高精度標準機械要素において、日系部材陣の技術的優位性を直接ぶつける戦略が強く推奨される。

主要参照一次資料・公式発表・企業開示文献一覧

1. 優必選科技（UBTECH Robotics）公式製品ページ「全新一代工業版人形機器人 Walker S1」（中国語・英語）：https://www.ubtrobot.com/cn/humanoid/products/walker-s1 および https://www.ubtrobot.com/en/humanoid/products/walker-s1[48]
2. 優必選科技 公式製品ページ「Walker S2（自律ホットスワップ換電・全身52自由度）」：https://www.ubtrobot.com/cn/humanoid/products/walker-s2 および日本国内仕様資料 https://ga-robotics.co.jp/products/walker-s2/[7]
3. 優必選科技 公式製品ページ「初代 Walker 製品パラメータ（145cm・77kg・36自由度・一体型駆動ユニット・EtherCAT）」：https://www.ubtrobot.com/cn/humanoid/products/walker[8]
4. 優必選科技 企業開示ドキュメント（Walker S / S1 / S2 産業版展開）：https://owebsite-cdn.ubtrobot.com/resources/file/2026/04/15/795097191964741.pdf[40]
5. IT之家「優必選発布全新一代工業人形機器人 Walker S1（身長172cm・体重76kg・負荷歩行15kg・250N·m一体型関節・6アレイ触覚センサ公式発表）」：https://www.ithome.com/0/802/055.htm[6]
6. 華龍網（極氪公式提供報道）「優必選工業人形機器人集群進入極氪5G智慧工場実訓（BrainNet・総装／SPS／質検／車門組立エリア協調作業）」：https://www.cqnews.net/1/detail/1346488134812958720/app/content_1346488134812958720.html[1]
7. 人民日報（人民網）「優必選在極氪5G智慧工場開展多台、多場景、多任務的人形機器人協同実訓」：http://finance.people.com.cn/n1/2025/0304/c1004-40430052.html[146]
8. 極氪智能科技（Zeekr）「極氪2024可持続発展報告（寧波杭州湾5Gスマート工場公式開示）」：https://filecache.investorroom.com/mr5irasia_zeekr/174/download/%E6%9E%81%E6%B0%AA2024%E5%8F%AF%E6%8C%81%E7%BB%AD%E5%8F%91%

E5%B1%95%E6%8A%A5%E5%91%8A.pdf[147]

9. Google Patents 中国特許公報「中空式駆控一体化智能模塊化関節および優必選科技集成関節・直線関節特許引用（CN107398924B / CN110815284B / CN112888536B / CN207953918U / CN117245687A / CN114043523A）」：https://patents.google.com/patent/CN107398924B/zh および https://patents.google.com/patent/CN117245687A/zh[70]
10. Shanghai SAGE Intelligent Technology Co., Ltd.（上海颯智智能科技：iSAGE）公式英語製品仕様書「iSAGE STAR-SageMan - Quad-arm Mobile Automated Equipment（900×600×1560/1815mm、280kg、52 DOF、±0.03mm）」：https://en.sage-modi.com/ProductSeries/info.aspx?itemid=1322&lcid=15[3]
11. Shanghai SAGE Intelligent Technology（iSAGE）公式英語ニュース発表：https://en.sage-modi.com/news/info.aspx?itemid=1355&lcid=3[17]
12. APA Robot 技術仕様データベース「iSAGE STAR-SageMan Specifications（SageBrain / SageOS / 0.1 Nm単軸精度）」：https://www.aparobot.com/robots/isage-star-sageman[19]
13. 36Kr Japan「産業用AIロボット開発の中国『颯智智能（iSAGE）』資金調達および4腕・52自由度『SageMan』仕様・理想汽車等導入実績」：https://36kr.jp/453092/[20]
14. 澎湃新聞「颯智智能 全栈自研 SageCore / SageBrain 自動車部品双工位並列作業報道」：https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_34117559[105]
15. 広東華沿機器人（Huayan Robotics）公式発表「7軸人形アーム・1コントローラ最大4腕協調制御」：https://www.huayan-robotics.com/about-us/news/2563.html[99]
16. トヨタ自動車 公式技術記事「HSRからELEYへ。モノに『やさしく触れる腕』」：https://global.toyota/jp/mobility/frontier-research/44105139.html およびトヨタELEY技術・組織分析資料 https://yorozuipsc.com/uploads/1/3/2/5/132566344/1d0be387b9317c6dfa72.pdf[121]
17. 東方財富網・中国証券各社調査レポート「人形機器人BOMコスト内訳・緑的諧波／双環伝動／歩科股份／坤維科技／遊星ローラーネジ定量分析」：https://caifuhao.eastmoney.com/news/20260826151516965717000 、https://pdf.dfcfw.com/pdf/H301_AP202308121594339512_1.pdf 、https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202501051641812748_1.pdf[4]
18. 万馬股份（002276.SZ）企業開示公告「超高柔性耐捻転機器人ケーブル開発」：http://money.finance.sina.com.cn/corp/view/vCB_AllBulletinDetail.php?stockid=002276&id=12150153[32]

資料13 第4部2：極氪（Zeekr）寧波杭州湾5Gスマート工場におけるプライベート5G「UPF/MEC」ネットワークスライシングと異種ロボット「群知能：BrainNet」制御

吉利控股集団（Geely）傘下のプレミアムEVブランド「極氪（Zeekr：ジーカー）」が浙江省寧波市前湾新区（旧・杭州湾新区）に構築した5G全接続スマート工場は、中国聯通（China Unicom）のエンドツーエンド5Gハイブリッド専網（双MEC冗長構成・5G LAN）を通信基盤とし、エンドツーエンド通信遅延10 ms以下および通信信頼性99.99%の無線制御環境を敷地面積約2,000ムー規模で稼働させている。このミリ秒級のエッジ通信基盤の上で、優必選科技（UBTECH）は2025年3月、数十台規模の産業用ヒューマノイド「Walker S1」（および後続投入された「Walker S2」）を最終組立・SPS計器供給・品質検査・ドア組付け・CTU自動倉庫の各工程へ展開し、クラウド／MEC側の「超級大脳（DeepSeek-R1統合マルチモーダル具身推論モデル）」と機体側の「智能小脳（Transformerベース反射・協調制御）」を結合した世界初の複数台ヒューマノイド群知能「BrainNet（群脳ネットワーク）」の協同実訓を実施した。機体単体のオンボード演算能力に依存する米国型アプローチとは対照的に、極氪とUBTECHの実装は「工場の通信・エッジ計算インフラ側に高次元知能と空間認識を集約し、機体側の計算負荷・消費電力・部品コスト（BOM）を抑制しながら生産ライン全体の群協調を実現する」という中国独自のシステム工学解を提示している。

本報告書の読解にあたっては、一次公開資料で確認された事実と、非公開領域に対する工学的な推計・構造解析の境界を明確に区別する必要がある。第1に、通信遅延10 ms・信頼性99.99%・双MEC容災バックアップ・5G LANの構成は中国聯通および政府系機関の公式発表で裏付けられている一方、極氪工場内部におけるユーザープレーン機能（UPF）の個別ラック構成、各ネットワークスライスの割当帯域幅（MHz／Mbps）や5QI設定値、および無線遮断時の安全ウォッチドッグ閾値（ミリ秒単位の内部パラメータ）は非公開であり、本稿では3GPP Release 16/17および通信機器ベンダー白書、IEC 61784-3（ブラックチャネル安全通信原則）に基づく標準設計値・工学試算として解析している。第2に、日本の業界内で「華研智造の4腕ロボット」として言及されることがある多腕協調システムについて中国語一次資料を精査すると、溶接・検査設備インテグレータである「深圳市華研智造科技有限公司」ではなく、中国語発音（Huáyán）が同一である協働ロボット大手「広東華沿機器人股份有限公司（Huayan Robotics、1021.HK）」が「一控四臂（1コントローラ4腕制御）・機身昇降式4腕類人具身知能ロボット」を開発し、極氪・ 領克・BYD等の自動車工場へソリューションを展開している実態が確認された。ただし、同一物理セル内でWalker S1と4腕ロボットが直接手渡し協調を行う公式映像や技術論文は現時点で公開されておらず、本稿では極氪工場の「四網協同（IoT・MES・LES・RCS）」およびUBTECH系「UPilot／IoH」を介した異種フリート統合構造として厳密に解剖する。

エグゼクティブ・サマリー

極氪・ 寧波前湾5Gスマート工場における通信・群制御統合の核心は、工場ネットワークを単なる情報系パイプラインから「分散ロボット群の外部大脳兼・空間調停バス」へと昇華させた点にある。従来の自動車工場で用いられてきた産業用Wi-Fiは、車体ホワイトボディ（BIW）や大型治具による金属マルチパス反射、アクセスポイント（AP）間のローミング瞬断、およびCSMA/CA方式特有のパケット衝突ジッターを抱えており、多数の移動ロボットと高自由度ヒューマノイドのリアルタイム協調には適さない。極氪工場は中国聯通寧波分公司および吉利傘下の産業IoT企業・広域銘島（Geega）との共同構築により、オンプレミスUPF折返しを前提とする5G LANと、アクティブ／スタンバイ構成の双MEC（Multi-access Edge Computing）容災バックアップを導入し、年間計画生産能力30万台の全領域（プレス・溶接・塗装・最終組立・7,200トン一体化ダイカスト）でエンドツーエンド10 ms級・信頼性99.99%の通信基盤を確立した。

この低遅延無線網の上で稼働するUBTECHの「BrainNet（群脳ネットワーク）」および「IoH（Internet of Humanoids：人形智能網聯中枢）」は、知能の空間的・時間的分離を実現している。

MEC／クラウド層に配置された「超級大脳」は、DeepSeek-R1の深層推論技術を統合したマルチモーダル具身推論大規模モデルと、実車工場での実訓から蓄積された億単位の産業データセット（RAG検索拡張生成対応）を活用し、生産ライン単位の複合タスク分解と動的スケジューリングを非同期マクロループ（工学試算で約180 ms・約5 Hz周期）で実行する。一方、各Walker S1／S2機体側に実装されたTransformerベースの「智能小脳」および本体専用エージェント「Co-Agent（BrainNet 2.0で統合）」は、跨場域純視覚感知による「群建群享（群構築・群共有）」グローバル3次元意味論マップの生成、6軸力覚センサを用いた柔順制御（インピーダンス／アドミタンス制御）、および数百～1,000 Hz級の全身バランス・指先反射制御を担う。
【★】生産現場の運用面では、極氪既存の「IoT・MES・LES・RCS四網協同（物流スケジューリング効率20%向上）」に、最終組立ショップの50台の無人配送AGVを含む海康機器人（Hikrobot）製混行AMR群、UQI優奇の無人フォークリフト「Wali（F1200S/F3000）」を統括する「UPilot」、および華沿機器人の「一控四臂」多腕ソリューションが階層的に連携している。さらにエネルギー持続性の課題に対しては、充電待機による稼働率低下を回避するため、Walker S2において世界初の「3分間熱挿抜（ホットスワップ）自律換電システム（デュアルバッテリー無停電切替＋双腕柔順挿抜）」を実装し、7×24時間連続稼働への道筋をつけた。設備投資（CAPEX）の工学試算モデルでは、オンプレミス5G SA＋MEC GPUクラスタの初期インフラ投資（試算値95万米ドル規模）が発生するため10台規模の試験導入では米国Figure AI等のオンボード完結型が低コストとなるが、工場全体で44～50台を超え200台規模へ拡大する局面では、機体あたりの演算・放熱・センサーBOMを抑制できる5G＋MEC群知能方式が単機償却コストで約18.3%の優位性を発揮する構造となっている。

このレポート（極氪スマート工場×UBTECHの事例）における「プライベート5G」と「MEC（Multi-access Edge Computing, マルチアクセス・エッジコンピューティング）」は、一言で言えば「ロボット1台ずつに高価で重い『大脳』を積むのをやめ、工場のサーバルームに『共有の巨大大脳』を置いて、超高速無線で全員を操る仕組み」です。

セミナーの受講者（生産技術・工場DX推進陣）向けに、ポイントを3つに絞って簡潔に整理します。

1. 5GとMECの役割（ロボット制御における意味）

- **MEC**（工場内の共有**AI**サーバ）：遠方のクラウドではなく、工場の敷地内（オンプレミス）に直結配置した高性能**GPU**サーバです。大規模AIによる推論（作業計画）や、工場全体の3Dマップ統合という「重たい頭脳労働」を一手に引き受けます。工場外へデータが一切出ないため、機密保持も万全です。
- 【★】プライベート**5G SA**（超低遅延の工場専用の神経網, **SA**は**Stand Alone**）：従来の工場Wi-Fiは金属反射や移動時の瞬断（ローミング切れ）が弱点でしたが、専用5G網は往復10ミリ秒以下・信頼性99.99%でMECとロボット群を直結します。これにより、外部のMECをまるでロボット自身の頭脳のように遅延なく使えます。

2. なぜ「約**50**台」でコストが逆転するのか（米国型 **vs** 中国型）
ご提示いただいたCAPEX試算のカラクリは、「初期インフラ費（固定費）」と「機体単価（変動費）」のトレードオフにあります。

比較項目	米国型：オンボード完結（**Figure AI**等）	中国型：**5G**＋**MEC**群知能（極氪**×UBTECH**）
設計思	「**1**台ずつが賢い」（機体内に高性能GPU・大型冷却系・大	「工場全体が賢い」（重い計算は工場MECへ逃がし、機体は反射神経の

想	容量電池を満載）	小脳に集中）
初期インフラ投資	安い（既存Wi-Fi等でそのまま導入可能）	高い（最初に5G基地局＋MECサーバで約95万ドルが必要）
ロボット**1**台の価格	高い（高価な半導体・放熱・センサー部品が毎台かかる）	安い（機体の計算機・バッテリー・カメラ構成を軽量・低コスト化できる）
向いている規模	**10**台程度のテスト導入	**50**台～**200**台以上の工場本格展開

3. セミナーで強調すべき結論（生産技術への示唆）

- 少数テストなら米国型が手軽：10台のお試し導入なら、95万ドルの通信・サーバ工事が不要なオンボード完結型の方が圧倒的に安上がりです。
- 量産配備なら中国型が約**18%**安い：1台あたりの機体コスト（BOM）を約2万ドル抑えられるため、**44**～**50**台を超えた時点で初期インフラ費の元が取れます。200台規模になると、総額で約313万ドル（単機償却ベースで約18.3%）ものコスト圧縮になります。
- 工場全体の「共通インフラ」として割り勘できる：さらに極氪工場の巧みな点は、この5G＋MECをヒューマノイド専用ではなく、既存の溶接ロボット**382**台や無人搬送車（**AMR**）、**AI**外観検査の通信基盤として最初から共用していることです。工場DXの共通インフラとして5G＋MECを敷いてしまえば、後から投入するロボットは「安くて軽い機体」を何百台でも低コストに追加できる——これが中国勢のスケーラビリティの本質です。

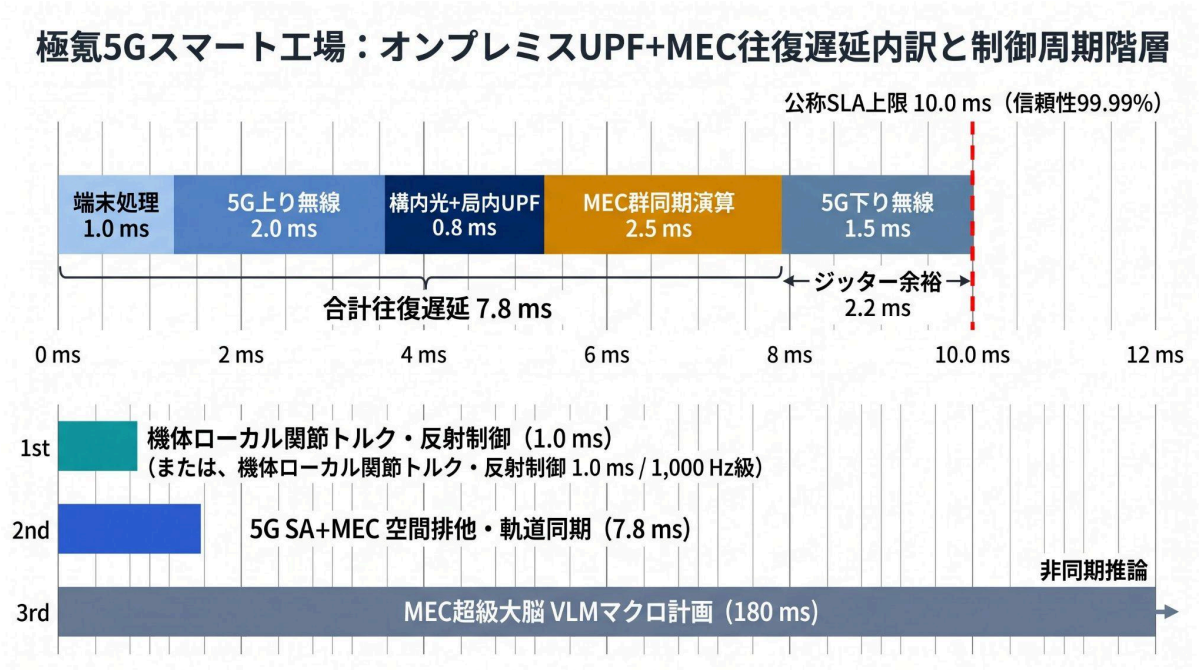
第**1**章 極氪・ 寧波**5G**全接続スマート工場における「**UPF**オ

ンプレミス配置＋**MEC**」とネットワークスライシング設計

1.1 2,000ム一級メガ**EV**工場の生産特性と従来型**Wi-Fi**の構造的限界

浙江省寧波市前湾新区（滨海六路688号）に位置する極氪5Gスマート工場は、敷地面積約2,000ム一（詳細公称値1,946ム一、約130万平方メートル、標準サッカー場181面分に相当）を有し、年間計画生産能力30万台を誇る次世代EV製造拠点である。2021年第4四半期の本格稼働開始以降、極氪001や極氪009などの多品種混流生産を担い、2025年6月16日には累計50万台目の量産車ラインオフを達成した。同工場はプレス（沖圧）、溶接（焊装）、塗装（塗装）、最終組立（総装）の4大ショップに加え、リアアンダーボディの従来80点以上の部品を一体成形する7,200トン超大型ダイカスト（一体化圧鋳）ラインを擁するフルプロセス工場である。とりわけ溶接ショップは382台の産業用ロボットが100%自動稼働し、0.5 mm精度のレーザー溶接や自動ねじ締めを24時間遂行する「黒灯工場（ダークファクトリー）」として稼働している。
このような超広域・高密度金属環境において、従来の工場無線LAN（IEEE 802.11ac/ax等のWi-Fi）は3つの構造的な通信限界を抱えていた。第1に、免許不要帯域（2.4 GHz／5 GHz）におけるCSMA/CA（搬送波感知多重アクセス／衝突回避）制御に起因する遅延変動（ジッター）である。溶接アークの電磁ノイズや多数の無線端末が競合する環境では、平均遅延が数msであってもテール遅延（99.99パーセンタイル領域）で数十～100 ms超のスパイクが発生し、移動ロボット群の協調制御ループを不安定化させる。第2に、広大な建屋間や全長数百メートルの最終組立ラインをAGV／AMRやヒューマノイドが移動する際のAP間ハンドオーバー瞬断であり、ローミング時の再認証に伴う通信途絶が計画外停止（チョコ停）の要因となっていた。第3に、車体骨格や小件自動化立体倉庫（CTU）の鋼製ラックによるマルチパス反射と電波遮蔽（シャドーイング）である。これらの課題を解消するため、極氪は中国聯通（China Unicom）寧波市分公司、および吉利控股集団傘下の産業インターネット企業・広域銘島（Geega）と共同で、エンドツーエンドの「5G企業混合専網（ハイブリッド・プライベート5G）」を構築した。同プロジェクトは2022年11月の第5回「綻放杯」5G応用コンテスト受賞（「5G助力極氪汽車邁入未来工場」）を経て、中国工業情報化部（MIIT）の「2022年度国家級工業インターネットパイロット実証（5G全接続工場クラス）」に選出されている。なお、基地局・コア網の通信機器ベンダーについて公開資料を精査すると、中国聯通は浙江省内の5Gスライシング・5G LAN・uRLLC展開において華為（Huawei）および中興通訊（ZTE）の双方と深い協業実績を持つものの、極氪寧波工場内の個別無線・コア装置における単一ベンダー比率までは公式開示されていない。

1.2「**UPF**下沈＋双**MEC**冗長構成」と**5G LAN**の物理・論理アーキテクチャ



極氪5Gスマート工場のネットワーク設計における中核は、5G Standalone（SA）アーキテクチャの制御プレーン（C-Plane：AMF/SMF/UDM等の認証・セッション管理機能）とユーザープレーン（U-Plane：現場の制御パケットや映像データが流れる経路）を分離し、ユーザープレーン機能（UPF：User Plane Function）とMECサーバを工場敷地内（オンプレミス）へ引き下ろす「UPF下沈（On-Premise UPF Breakout）」および「双MEC」設計にある。
公衆5G網をそのまま経由した場合、工場内のロボットから送信されたパケットは地域の通信局舎や上位コア網を往復するため、物理的な光伝搬遅延とルータ中継により20〜50 ms程度の遅延が避けられない。対して5Gハイブリッド専網の標準構成では、建屋天井に高密度配置された屋内分散型無線ユニット（pRRU）とベースバンド処理装置（BBU）が、敷地内サーバルームのオンプレミスUPFおよびMECへ直結される。これにより、溶接パラメータ、車体検査の高精細画像、およびロボット群の3次元空間マップ等の製造機密データは工場敷地外（キャリア公衆網）へ出ることなくローカルで折り返され、データ主権（データ不出園）とセキュリティが構造的に担保される。
さらに中国聯通は極氪工場において、単一障害点（SPOF）を排除する「双MEC容災備份（Dual-MECアクティブ／スタンバイ冗長構成）」と、3GPP Release 16準拠の「5G LAN」商用技術を統合展開した。従来のセルラー網はIPルーティング（Layer 3）を基本とするため、産業用PLCやロボットコントローラが多用するLayer 2（イーサネットフレーム直接通信やマルチキャスト同期プロトコル）を透過するには外付けARルータによるVX-LANトンネリングが必要であった。極氪工場で商用導入された5G LANは、UPF自体にLayer 2スイッチングおよび端末グループ管理機能を実装することで、「企業の既存ネットワーク組網を変更しないまま」生産ラインの有線束縛を解き、端末間（UE-to-UE、例えばPLCとロボット、またはロボット同士）の直接通信をUPF折返しで低遅延に実行することを可能にしている。
このアーキテクチャにより、極氪工場の5G専網は「エンドツーエンド通信遅延10 ms以下、通信信頼性99.99%（4つの9）」という公開指標を達成している。この10 ms以下という実効性能の内訳を、3.5 GHz帯（中国聯通主力n78バンド、サブキャリア間隔30 kHz、低遅延TDDスロット構成）およびオンプレミスUPF＋MEC折返し条件で工学試算すると、制御パケットの往復遅延（RTT）バジェットは以下の通りに分解される。

1. 端末側5G産業用モジュール／CPE処理遅延（T_ue）：約1.0 ms
2. 上り無線区間（5G NR Air Interface Uplink）伝送・スケジューリング遅延（T_ul）：約2.0 ms
3. 2,000ム一構内光ファイバ伝送およびオンプレミスUPF折返し転送遅延（T_upf）：約0.8 ms
4. オンプレミスMEC上の空間排他チェック・群軌道同期演算遅延（T_mec）：約2.5 ms
5. 下り無線区間（5G NR Air Interface Downlink）伝送・復調遅延（T_dl）：約1.5 ms

6. 合計エンドツーエンド制御往復遅延（T_rtt）: 1.0 + 2.0 + 0.8 + 2.5 + 1.5 = 7.8 ms（公称10.0 ms上限に対し2.2 msのジッター吸収マージンを確保）

1.3 ネットワークスライシング（URLLC / eMBB / mMTC）の分離設計と優先制御

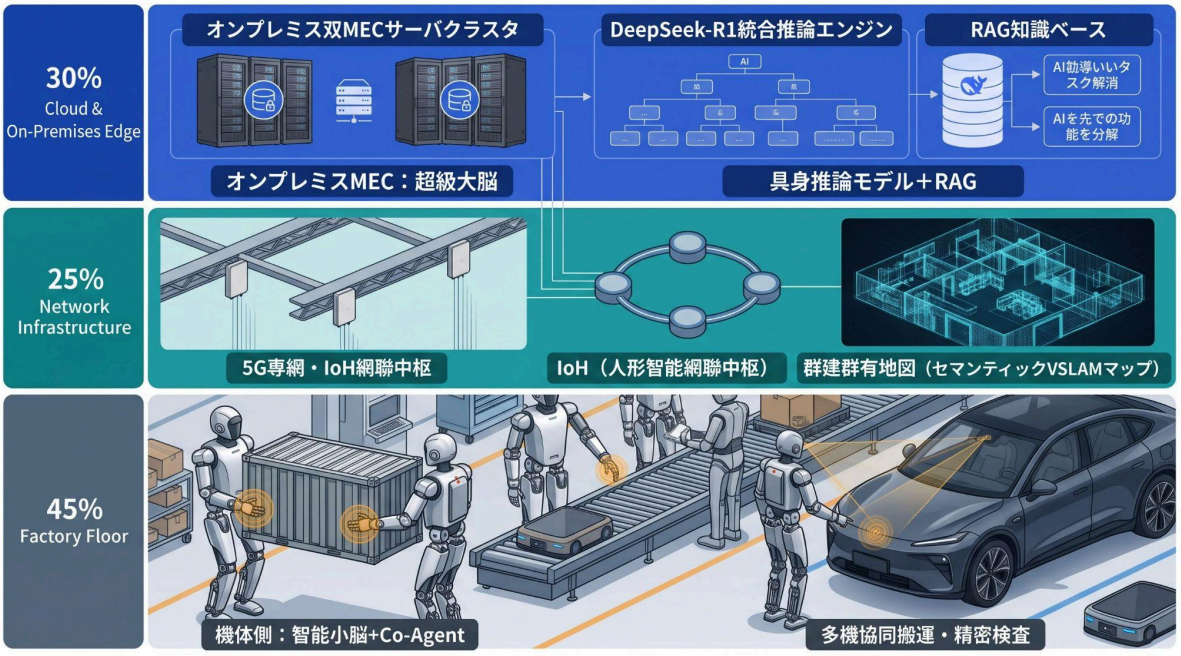
単一の5G物理網の上に、ミリ秒制御を要するレーザー溶接・移動ロボット制御、数十台のヒューマノイドのカメラ映像・3D点群伝送、および数万点の工場設備IoTセンサを混在させる場合、大容量映像のバースト送信が制御パケットを遅延させる「ヘッドオブライン・ブロッキング」のリスクが生じる。これを排除するため、5G SA専網では無線アクセス網（RANの物理リソースブロック割当）、トランスポート網、およびUPF／MECリソースを論理分割するエンドツーエンド・ネットワークスライシングが用いられる。
極氪工場において公開資料から確認されている5G実装アプリケーションは、(1) 5G＋MECによるAGV／AMR誘導および0.5 mm精度の溶接ロボット・ライン制御連携、(2) 5G＋AI作業コンプライアンス検査、5G＋ホイール（輪毂）外観検査、最終組立総拼（マレッジ）工位での5G＋ARスマートグラス遠隔保守・巡回検査、およびWalker S1によるミリ単位のエンブレム・ライト品質検査結果のリアルタイム共有、(3) 広域銘島（Geega）IIoTプラットフォームと連携した全工程の設備・環境・太陽光発電データのリアルタイム収集の3領域にわたる。極氪工場内の個別スライス帯域幅（Mbps）や具体的な5QI番号は非公開であるが、中国聯通およびZTEの産業用5Gスライシング技術仕様 に照らすと、これら3領域は以下の論理スライス分離と優先制御によって運用されていると整理できる。
第1の超高信頼・低遅延スライス（URLLCスライス）は、5G LAN機能を有効化し、PLC間のインターロック同期、AMR／無人フォークリフトのRCS制御コマンド、およびBrainNetにおける複数台ヒューマノイドの多機協同軌道・力覚同期信号（IoH制御バス）を収容する。3GPP標準の遅延クリティカルGBR（帯域保証型QoS、5QI 82〜85相当）と無線スケジューラの優先プリエンプション権を付与することで、他スライスで高負荷な映像伝送が発生している最中も10 ms以下の確定遅延と99.99%の信頼性を維持する設計となる。
第2の広帯域スライス（eMBB大上行スライス）は、消費者向け公衆網とは逆に現場からMECへのアップロード帯域を厚く確保した産業用「大上行（High-Uplink）」特性を持つ。5G＋AIホイール検査やAR遠隔保守の高精細映像に加え、数十台のWalker S1／S2が「群建群享」グローバル意味論的VSLAMマップを更新するための視覚特徴量・3D点群差分ストリーム、および「超級大脳」へ送信するマルチモーダル推論用画像フレームがこのスライスを通過する。論理スライス分離により、複数台のロボットが一斉に検査画像を送信してeMBB帯域が飽和しても、URLLC制御スライスの無線リソースは侵食されない。
第3の多数同時接続スライス（mMTCスライス）は、プレス・溶接・塗装・最終組立・ダイカストの各建屋に配置された温度・振動・自動ねじ締めトルク履歴・屋上太陽光発電（好天時に工場電力の90%以上をカバー）などの膨大なIIoTセンサやRedCap端末を収容する。ミリ秒単位の即時性よりも高密度収容を優先し、広域銘島（Geega）のデータ基盤やMES／QNS（品質管理システム）へ周期集約される。

極氪5Gスマート工場 ネットワークスライシング＆BrainNet階層構造表

階層・論理スライス区分	物理配置と通信・演算基盤	収容システム・AIモデル構成	遅延・周期・信頼性指標	主な担当タスクとデータフロー
工場MEC上位推論層（内部高速バス／eMBB連携）	敷地内オンプレミスMEC GPUクラスタ（双MEC容災冗長）	BrainNet超級大脳（DeepSeek-R1統合具身推論モデル＋億級実訓RAG）およびMES／LES	推論周期約180 ms（約5 Hz相当・工学試算値）で非同期マクロ計画を実行	生産ライン単位の複合タスク分解とロール割当および異常時の動的再配分
工場エッジ協調層（URLLCスライス＋5G LAN）	敷地内オンプレミスUPF直結（L2直接折返し・データ不出園）	IoH（人形智能網聯中枢）および四網協同（RCS／UPilot）空間調停バス	エンドツーエンド遅延10 ms以下（試算内訳7.8 ms）かつ信頼性99.99%（公開値）	異種ロボット間の軌道・負荷同期コマンド伝送と3次元動的空間占有領域の共有

階層・論理スライス区分	物理配置と通信・演算基盤	収容システム・AIモデル構成	遅延・周期・信頼性指標	主な担当タスクとデータフロー
視覚・地図共有層（eMBB大上行スライス）	屋内高密度pRRU／BBUから構内UPF経由MEC直結	跨場域純視覚感知エンジン＋群建群享グローバル意味論VSLAM＋5G AI検査	数十ms級・上り広帯域割当（URLLC制御帯域への干渉をスライス分離で遮断）	複数台Walker S1の視覚特徴量・地図統合と99%超精度の車両外観検査共有
工場設備監視層（mMTCスライス）	工場全域5Gセル＋RedCap／産業IoTゲートウェイ	広域銘島（Geega）IIoT基盤＋設備予知保全・太陽光EMS・QNS品質追跡	秒～分周期・数万点規模センサ同時接続・ベストエフォート型高効率収集	382台溶接セルや7,200トン圧鋳機および工具トルク・環境データの稼働状態集約
機体オンボード層（機体内リアルタイムバス）	各ロボット搭載エッジ演算器＋関節サーボドライバ網	BrainNet智能小脳（Transformer）＋Co-Agent＋6軸力覚・360度視覚反射系	視覚運動制御約5 ms（200 Hz級・推計）および関節トルク制御1 ms級（1 kHz級）	二足歩行バランス維持と柔順力制御および無線劣化時の即時ローカル安全保護停止

第2章 UBTECH「群脳ネットワーク（BrainNet）」による複数台ヒューマノイド群知能の構造



2.1 単体自律から群知能への転換：極氪工場における世界初の協同実訓とIoH基盤

産業用ヒューマノイドの実用化において、従来の主流アプローチは「1台のロボットに単一ステーションの定型作業を模倣学習・強化学習させる単機自律（Single-Robot Autonomy）」に留まっていた。しかし実際の完成車組立ショップや部品供給エリアでは、生産順序（シーケンス）に応じた多品種部品のピッキング、単機の可搬上限に迫る大型コンテナの共同運搬、複数部位の同時検査など、空間と時間を跨いで作業負荷が変動する「産線級（ラインレベル）の柔軟タスク」が求められる。単機自律型のロボットを無秩序に複数台配置しただけでは、タスクの重複や通路でのデッドロック、特定工程での滞留が発生し、完成車ラインのタクトタイムを維持できない。

【★】この課題を突破するため、UBTECH（優必選科技）は2025年3月3日、極氪5Gスマート工場において数十台規模の産業用ヒューマノイド「Walker S1」（身長172 cm、体重76 kg、最大可搬重量15 kg）による「ロボット軍団」を編成し、世界初の「多台・多場景・多任務（複数台・複数工程・異種タスク）」協同実訓（Practical Training 2.0）を公開した。実訓は実験室環境ではなく、稼働中の「総装車間（最終組立ショップ）」「SPS計器エリア（セットパーツ供給区域）」「質検区（品質検査エリア）」「車門装配区（ドア組付けエリア）」、さらには後続展開された「CTU（小件自動化立体倉庫）入庫上料工位（身長1.76 mのWalker Sシリーズ／Walker S2を投入）」という複数の実生産エリアに跨って遂行された。
この集団協調を物理・論理の3階層で統合するシステム構造は、最上位の「オンプレミスMECサーバルーム層（超級大脳による推論・RAG知識検索）」、中間の「工場5G専網・IoH（Internet of Humanoids：人形智能網聯中枢）通信・3次元共有地図層」、および最下位の「組立現場ヒューマノイド機体層（智能小脳・Co-Agentによる協調把持・検査実行）」として構成されている。中核ハブであるIoHは、極氪工場の5G専網上に構築されたヒューマノイド群専用のネットワーキング・時刻同期・状態管理中枢であり、個々のヒューマノイドを孤立した機械から、クラウド・エッジ間で柔軟に結合される「推論型ノード（推理型節点）」および「スキル型ノード（技能型節点）」へと再定義する役割を担っている。

2.2「超級大脳」と「智能小脳」の2階層分散知能および「AI双循環体系」への進化

UBTECH研究院の設計思想が示す通り、ロボットの高次元な意味推論（作業文脈の理解とタスク計画）と、物理世界の関節モーターを駆動する運動制御の間には「演算周波数の大きなギャップ」が存在し、階層分離なしには安定した協調制御が成立しない。BrainNetはこの周波数ギャップを吸収するため、クラウド／MEC側の「超級大脳（Super Brain）」と機体／エッジ側の「智能小脳（Intelligent Sub-brain）」を5G低遅延回線で直結した端雲協同（Cloud-Edge Collaborative）2階層アーキテクチャを採用している。
上位階層であるクラウド／MEC側の「超級大脳」は、UBTECHが独自開発したヒューマノイド向け「マルチモーダル具身推論大規模モデル（多模態具身推理大模型）」をコアエンジンとする。同モデルは「DeepSeek-R1」の深層推論（Deep Reasoning）技術をベースに開発され、さらにWalker Sシリーズが複数の自動車工場の最前線実訓で蓄積した「億単位（億級）の高品質な工業データセット」によって学習・ファインチューニングされている。加えて、現場ごとの作業手順や車種別部品仕様に即応するため、RAG（検索拡張生成）技術を組み合わせることで、専門工種（仕分け・搬送・組付け・検査）向けの迅速なスキル適応と汎化精度向上を実現している。超級大脳は「智能混合決策技術」により、「ライン全体の資材移送」といった複雑な上位オーダーを人間のような常識推論で細かなサブタスクへ分解し、意味論的VSLAM上の各機体位置や作業負荷に応じてクラウド脳とローカル脳の役割分担をリアルタイムに動的配分する。大規模マルチモーダル推論自体はMEC GPUクラスタ上でも百数十～約180 ms（約5 Hz相当）の演算時間を要するが、超級大脳は直接関節トルクを指令するのではなく非同期でサブタスク目標と協調ロールを下ろすため、推論レイテンシが歩行安定性を阻害しない設計となっている。
下位階層である機体側の「智能小脳」は、Transformerモデルをベースに構築され、「跨場域融合感知技術（クロスドメイン融合認識）」と「多機協同控制技術」を担う。Walker S1機体には、頭部の両耳魚眼カメラによる3DステレオビジョンとRGB-Dカメラを組み合わせた360度安全監視・環境認識系、ミリ単位で部品と工具を識別する6D姿勢認識、6軸力覚センサ、および触覚付き第3世代5指霊巧手（2025年7月発表のWalker S2では全身52自由度・±162度股関節旋回・片手11自由度で単指耐荷重7.5 kgの第4世代霊巧手と純RGBステレオカメラへ進化）が搭載されている。UBTECHは機体内サーボ周波数の厳密な数値を公表していないものの、50自由度超の二足歩行バランスと接触力制御を成立させるため、Transformer視覚運動ポリシーが約100～200 Hz級、下位の全身運動制御（WBC）・関節トルクサーボ系が500～1,000 Hz級で高速駆動しているものと制御工学上推計される。
さらに2025年7月に発表された「BrainNet 2.0」では、産業用ヒューマノイド本体専用のインテリジェント・エージェント技術「Co-Agent」が統合され、群レベルの協調OSであるBrainNet 2.0と個体レベルの自律脳であるCo-Agentによる「AI双循環体系（AI Dual-Loop System）」へと進化した。Co-Agentはマルチモーダル推論モデル、具身対話モデル、スキル小モデル、および人間のような思考連鎖（CoT）を統合し、各ロボットを「搬運エージェント」「分揀（仕分け）エージェント」と

いった専門職能へ変換するとともに、意図理解・タスク計画・ツール呼び出し・自律的な異常処理（Exception Handling）を単機閉ループ内で完結させる能力を付与している。

2.3「群建群享」意味論的VSLAMと並列分散協調学習パイプライン

BrainNetが従来の集中管理型ディスパッチャと決定的に異なる点は、数十台のWalker S1が工場の物理環境と高密度に相互作用する中で得た認識・操作データをリアルタイムに共有知識ベースへ集約し、群全体のスキルを同時進化させる協調学習パイプラインを備えていることである。
空間認識面では、「跨場域純視覚感知（クロスフィールド純視覚認識）」に基づく「群建群享（群で構築し群で共有する）」グローバル地図生成が稼働している。自動車の総装ショップやSPSエリアでは、パレットの仮置き、走行中のAGV、人間の作業員など動的ターゲットが常に移動しており、単一機体のカメラ視野だけでは棚裏や曲がり角の死角が避けられない。極氪工場では、複数エリアに分散したWalker S1群が各自の視覚センサで追跡した動的対象物と3次元意味論マップ（3Dセマンティック VSLAM）を5G経由でIoHへリアルタイム共有し、単一の統合グローバルマップを協同構築する。これにより、ある1台が検知した通路上の障害物や部品箱の配置変化が即座に他機体のナビゲーション経路生成に反映される。
運動スキル面では、Transformerベースの「智能小脳」が「多機並行分布式学習（複数機体による並列分散学習）」をサポートし、スキルの生成と他機体・他工程への転移（マイグレーション）を加速させている。極氪工場では、薄く変形しやすい軟質フィルム部品の精密組付けや、エンブレム・ヘッドライトのミリ単位の外観・接触検査が行われている。ある機体が現場で獲得した把持姿勢の微調整量や、力覚強化学習による二次アライメント（接触反力に応じた押し当て角度補正）の経験データは集団記憶へ集約され、並列分散学習を通じて全機体のスキルライブラリへ還元される。この結果、極氪工場での第2段階実訓では搬送速度が約25%向上し、品質検査精度は99%以上を達成して検査時間の短縮を実現した。

第3章「ヒューマノイド＋4腕ロボット＋AMRフリート」の異種ロボット統合スケジューリングと動的タスク配分

3.1「四網協同（IoT・MES・LES・RCS）」と異種ロボット統合の実態検証

完成車工場において、二足歩行ヒューマノイドのみで全物流・組立工程を代替することは合理的ではない。長距離・重量パレット搬送には車輪型AMRや無人フォークリフトが高効率であり、定点での高密度多点作業には多腕型協働ロボットが適している。極氪寧波工場の強みは、既存のスマート製造・物流システムの上に異種ロボット群を階層統合している点にある。
工場全体の基幹システムとして、極氪工場は「IoT（設備物聯網）・MES（製造実行システム）・LES（物流実行システム）・RCS（ロボット制御システム）」を連動させた「四網協同」基盤を構築しており、物流スケジューリング効率を20%向上させている。最終組立ショップ単体でも、LESのスマートスケジューリング下で50台の資材配送AGVが稼働する中国初の完全無人配送EV総装ラインを実現しており、工場全体では海康機器人（Hikrobot）のRCSが上層のLESおよびスマート倉庫管理システム（iWMS／WCS）とシームレスに接続され、複数車種・複数ナビゲーション方式のAMR混行作業を制御している。
さらにヒューマノイドと無人フォークリフトを統合する実行基盤として、UBTECHのスマート物流子会社「UQI優奇」は2024年11月、吉利汽車集団傘下の総合合物流企業「吉速物流（Jispeed Logistics）」と戦略提携を締結し、移動ロボットOS「UPilot」を軸としたフルスタック無人物流ソリューションを極氪および領克（Lynk & Co）工場へ展開している。たとえばCTU（小件自動化立体倉庫）入庫上料工位やラインサイド供給では、UPilotのタスクスケジューリングの下でUQI優奇の軽荷重無人フォークリフト「Wali（瓦力）F1200S」（または重荷重「F3000」）がパレット資材をコンベア・荷受け位置まで自動搬送し、待機していたWalker S1／S2が30斤（15 kg）のパーツボックスをクランプしてデパレタイズ（拆垛）・ パレタイズ（码垛）・ 転身・コンベア投入を行い、同時に工場WMSへ在庫実績データをリアルタイム連携する一連のリレー作業が稼働している。またBrainNet 2.0は、二足歩行のWalker S2だけでなく車輪型ヒューマノイド「Cruzr S2」や無人物流車両を含む異種ハードウェアを一元的にスケジューリングする能力を備えている。

一方、調査対象である「4腕協調ロボット」については、一次資料に基づく正確な企業・技術特定が不可欠である。中国語ピンインで同じ「Huáyán」と表記される「深圳市華研智造科技有限公司」は溶接・検査ラインのスマート製造インテグレータであるのに対し、実際に「4腕類人具身知能ロボット（四臂類人具身智能機器人）」を開発し、BYD・極氪・ 領克等の自動車工場へスマート製造ソリューションを導入しているのは、協働ロボット中国国内第2位・世界トップ5の「広東華沿機器人股份有限公司（Huayan Robotics、1021.HK）」である。華沿機器人の4腕システムは、外形寸法わずか152 mm × 69.5 mm × 112 mmの小型制御箱1台で4本の7軸人型アームを統合駆動する「一控四臂」技術と「機身昇降システム」、直径15 mmの大中空配線チャネルを備え、全関節力制御精度0.02 N·m以下・末端接触力精度0.1 N、マルチモーダルVLA大規模モデルおよびROS2ネイティブSDKを実装している。同機は4本のアームを単一複雑タスクに協調集中させるモードと独立並行作業させるモードを切り替えられ、微細組付け、視覚ランダムビンピッキング、溶接、小件仕分けに対応する。ただし一次技術評価資料が指摘する通り、同4腕機の工程オーケストレーション自体は現時点で従来型制御ロジックを基盤としており、ラインを跨ぐ動的プロセス再構成用のグラフ関係モデリングは未導入であるため、固定・準固定ステーションでの多腕協調に主眼が置かれている点、また極氪工場内でWalker S1と物理的に同一ワークを共同把持した公式記録は未公開である点は明確に区別しておく必要がある。

ロボット種別・代表機体	主要ハードウェア・感覚仕様	上位接続・管制ミドルウェア	空間移動・作業特性	極氪・ 吉利工場での主担当領域
二足歩行ヒューマノイド（UBTECH Walker S1／S2）	身長172-176 cm・可搬15 kg・360度視覚・6軸力覚・5指触覚ハンド	BrainNet（超級大脳＋Co-Agent）およびIoH／UPilot連携	人間用通路適応・双腕と全身を使った非定型3次元操作と歩行搬送	総装・SPS仕分け・CTU拆碼垛・ ドア薄膜組付け・外観検査
4腕類人具身知能ロボット（華沿機器人 四臂システム）	7軸人型臂4本・機身昇降機構・一控四臂制御箱・接触力精度0.1 N	専用四臂協同制御系＋マルチモーダルVLA＋ROS2／MES連携	単機4腕のリアルタイム同期による高密度同時作業（定型～準定型）	精密把持組付け・視覚無秩序ピッキング・溶接・小件仕分け
車輪型産業ヒューマノイド（UBTECH Cruzr S2／Y1）	車輪移動ベース＋双腕マニピュレータ＋視覚SLAMナビゲーション	BrainNet 2.0およびUPilot統合スケジューラ	平坦床面での高安定移動と棚・コンベア間の料箱移載・拆碼垛	部品入庫・工程間の中距離ビン搬送と精密ソーティング
無人フォークリフト群（UQI優奇 Wali F1200S／F3000）	軽荷重～重荷重パレット対応フォーク・レーザー／視覚誘導	UPilot OSおよびLES（吉速物流スマート物流網）	パレット単位の重量物搬送・CTU入庫コンベア前への自動供給	倉庫からラインサイドへのパレット供給とWalkerへの荷渡し
混行AMR／AGVフリート（海康機器人ほか総装50台超）	多車種対応・マルチナビゲーション平滑切替・随行配送機構	海康RCS＋LES＋iWMS／IoT（極氪「四網協同」基盤）	2次元グリッド・SLAM併用による高密度無人ライン配送	総装50台完全無人SPS配送・溶接／圧鋳部品の工程間搬送

3.2 大型部品共同運搬・精密検査におけるマルチエージェント協調制御ロジック

単一機体の可搬上限（15 kg）を超える大寸法ワークや重量パーツボックスを運搬する際、極氪工場では複数台のWalker S1が物理的に協調して運搬する「協同搬運」が実践されている。床面に固定された産業用ロボット同士とは異なり、浮遊ベース（Floating Base）である二足歩行ヒューマノイド2台が1つの剛体コンテナを両端から把持して歩行する場合、歩行位相のわずかなズレや把持位置誤差がコンテナ内部に過大な引っ張り・捻り内力を生み、バランス喪失や転倒を招くリスクがある。UBTECHの「多機協同控制技術」は、軌道計画・動的ペイロード同定・柔順制御を統合した連成計画制御システムにより、以下の3ステップでミリ秒級の同期を実現している。

1. **5G IoH**経由の協調軌道計画とロール同期：BrainNetの超級大脳が大型ワーク運搬タスクを複数台のWalker S1へ割り当て、IoH（5G URLLCスライス、遅延10 ms以下）を介して共通の目標軌道と歩行速度プロファイルを共有する。リーダー／フォロワーまたは対等協調ノードとして、各機体は進行方向・旋回タイミング・歩行フェーズを同期させる。
2. 偏荷重に対するオンライン負載弁識（**Payload Identification**）：実ラインの大寸法パーツ

ボックスは内部部品の偏りにより重心位置が不均等（偏荷重）であることが常態である。持ち上げおよび移動中、各機体は6軸力／トルクセンサと関節負荷情報から自機が分担している実荷重ベクトルをリアルタイムに同定し、全身運動制御によって体幹姿勢と把持力を動的に再配分して重心安定を維持する。

3. ローカル高周波インピーダンス／アドミタンス柔順制御：歩行に伴う上下・左右の微細な揺動や数msの無線ジッターに対しては、5G通信の折返しを待つことなく、各機体の「智能小脳」ローカルループ（数百～1,000 Hz級）における柔順制御（Compliant Control）が即座に応答する。手首・腕関節に仮想的なバネ・ダンパ特性を持たせることで、一方の機体に微小な加減速が生じた際にも内力の急増を吸収して滑らかに追従し、安定した協調搬送を成立させている。

また、車体両側やフロント部における品質検査・精密組付け工程では、「視覚全局初対準（ビジョンによる大域初期アライメント）」と「力覚強化学習二次対準（フォースセンシング強化学習による微細二次アライメント）」を組み合わせたハイブリッド制御が稼働している。6D姿勢認識でミリ単位の初期位置決めを行った後、接触局面では触覚5指霊巧手と力覚フィードバックに基づく適応制御へ移行することで、変形しやすい軟質薄膜部品を損傷・位置ずれなく組付け、エンブレムやランプ類の検査で99%超の精度を達成している。

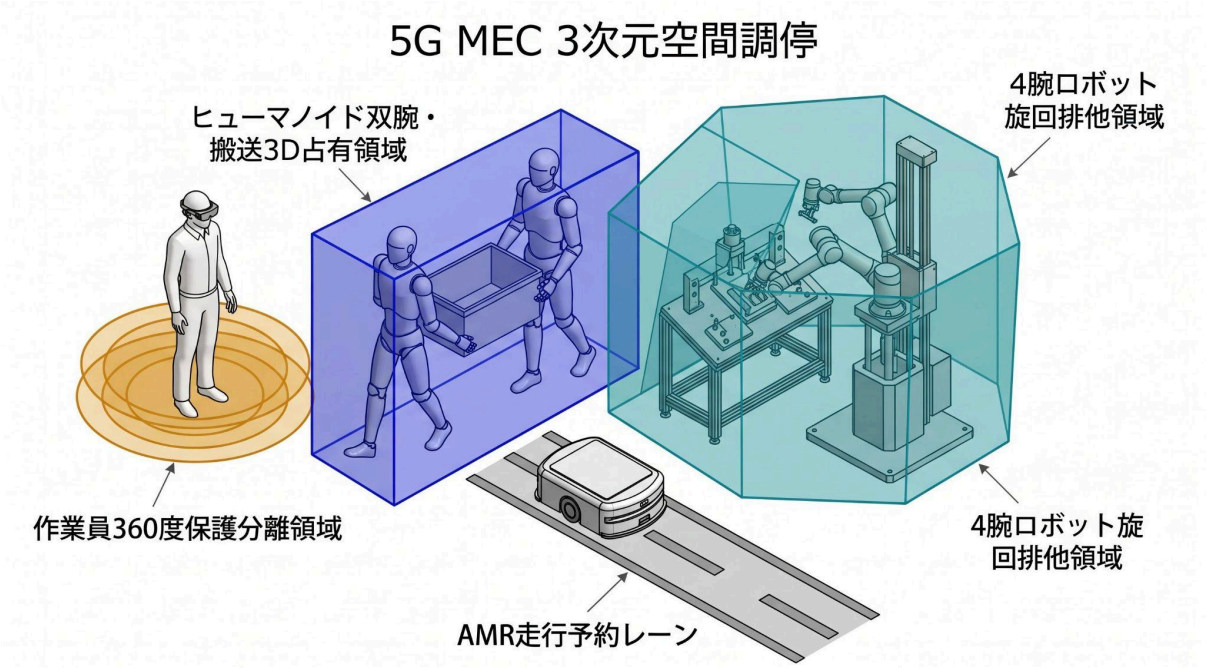
3.3 異常発生・バッテリー低下時の動的サブタスク再配分と「3分間自律ホットスワップ換電」

年間計画能力30万台の自動車生産ラインにおいて、特定ロボットの作業遅延やバッテリー低下によるラインタクト割れは許されない。極氪×UBTECHの群知能システムは、この問題に対して「ソフトウェアによる動的タスク再配分」と「ハードウェアによる3分間自律ホットスワップ換電」の両面から対処している。

ソフトウェア層では、軽微な部品位置ずれ等の現場例外はまず機体内の「Co-Agent」がローカル閉ループで自律リトライ処理を行う。しかしバッテリー残量低下や単独復旧不能な遅延が発生した場合、上位のBrainNet（超級大脳）がIoH経由で異常・負荷状態を検知し、未完了サブタスクを即座に近隣の遊休機体や別ロール機体（「仕分けエージェント」から「搬運エージェント」への動的ロール転換）、あるいはUPilot配下の無人フォークリフト・予備AMRへ再割り当てしてライン全体のスループットを維持する。

さらに、従来ヒューマノイドの最大の弱点であった「充電に伴う長時間停機や人手による電池交換コスト」を解消するため、UBTECHは極氪工場でも稼働するWalker S2において、世界初の「3分間熱挿抜（ホットスワップ）自律換電システム」を実装した。同システムは、第1にリアルタイム電力監視と動的バランス制御により2つのバッテリーの同時充放電と無停電活線挿抜（アーク放電や突入電流の抑止）を実現する「独自デュアルバッテリー電力動的バランス技術」、第2にバッテリーをエネルギー源かつ機体構造部材としてゼロクリアランス分倉に収め自己位置決めクランプで双電池／単電池モードを切り替える「標準化バッテリー倉クイック換装技術」、第3に他機や人手を介さずロボット自身が双腕の柔順制御と高精度本体位置決めによって背面バッテリーの引き抜き・充電スロット挿入・満充電池装着を完結させる「双腕協同精密換電技術」の3要素で構成される。これにより約3分間での自律エネルギー補給が可能となり、フリート全体の7×24時間連続無停止稼働を支えている。

第4章 高密度交錯セル内での「3次元空間排他制御（干渉回避）」と5Gフェイルセーフ安全機構



4.1 2次元床面ロックから「3次元動的スイープボリューム」排他制御への拡張

人間の作業員、二足歩行で移動しながら双腕を動かすWalker S1／S2、機身昇降と4本のアーム旋回を行う多腕ロボット、および床面を走行するAMR／無人フォークリフトが同一のSPS区域や最終組立セル周辺で近接稼働する場合、従来のAGV交通管制で用いられてきた「2次元床面グリッドの排他予約」だけでは衝突を回避できない。床面上のフットプリントが離れていても、高さ0.5〜1.8 mの空間へヒューマノイドが15 kgのパーツボックスを差し出したり、多腕ロボットがアームを旋回させたりすることで、低床AMRの積載物や隣のアームと上空で接触する3次元干渉リスクが生じるためである。
極氪およびUBTECHはMEC内部の空間排他アルゴリズムの詳細な数式を非公開としているが、公開されている「群建群享グローバル3次元意味論マップ」「6D姿勢認識と衝突フリー双腕協同軌道生成」「360度ステレオ＋RGB-D安全監視」、華沿機器人の「一控四臂エッジ自律軌道調整」、およびRCS／UPilotの混行スケジューリング仕様 を統合すると、現場の干渉・デッドロック回避は以下の階層構造で機能していると工学的に整理できる。
まず単一機体内のアーム間干渉（4腕ロボットの4本のアーム間、またはWalker S1の左右アーム間）については、5G通信を介さずローカルコントローラ（「一控四臂」制御箱や機体側「智能小脳」の手眼協調運動計画器）が関節角の順運動学からリアルタイムに自己干渉フリー軌道を生成する。次に複数機体が交錯する共有空間では、各ロボットの胴体・歩行揺動マージン・腕の旋回包絡面・把持ワーク形状を包含する「3次元動的バウンディングボックス（空間占有スイープボリューム）」が5G URLLC／IoH経由でMEC上の共有3次元意味論マップへ投影され、AMR群の走行予約レーン（積載高を含む3次元柱状領域）と統合調停される設計となる。狭隘通路やコンベア荷受け口で複数機体の進路が競合した際には、上位スケジューラ（BrainNet／UPilot）がライン供給緊急度や積載状態に応じた優先権を割り当て、低優先側の機体に待機ウェイポイントでの一時停止（イールド）や腕の収納姿勢を取らせることで、お見合いデッドロックとアーム干渉を回避する。また人間作業員に対しては、360度視覚監視系による保護分離距離の確保に加え、ライト表示（灯語）と音声対話によってロボットの意図と稼働状態を常時周囲へ伝達する協調安全設計が採られている。

4.2 5G無線品質劣化・MEC遅延増大に対する3段階フェイルセーフ安全機構

労働安全衛生および機械安全の観点から最も重要な検証事項は、万が一の5G無線品質劣化

（弱網）やMEC通信遅延増大・切断（断網）が発生した際、76 kgの機体重量と最大15 kgの搬送物を抱える二足歩行ヒューマノイドがいかにして安全状態へ移行するかというインターロック設計である。極氪工場の5G専網は双MEC容災バックアップと信頼性99.99%を備えるが、車体金属構造物による局所的な電波遮蔽リスクを完全にゼロとみなすことはできない。とりわけ二足歩行機は、車輪型AGVのように即座にモーター電源を遮断（STO：Safe Torque Off）すると歩行片足支持期に自重で転倒し重大な二次災害を引き起こすため、「動的バランスを維持したまま運動エネルギーを減衰させ両足支持姿勢で停止する（Active Safe Stand）」という特有の安全制御が必須となる。

極氪・ UBTECHはウォッチドッグタイマの具体的な内部ミリ秒閾値を公表していないものの、公開されているWalker S1／S2のオンボード360度視覚・6軸力覚・Co-Agent構成、華沿アームのエッジ異常検知仕様、および中国の5G産業制御における標準的な弱網・断網エッジ縮退設計 に基づくと、無線伝送路をブラックチャネル（IEC 61784-3原則）と位置づけた3段階の安全インターロック構造は以下の通りに解析される。

第1防衛線（約1～5 ms級・機体オンボード即時反射層）として、人間との近接や想定外の物理接触に対する安全保護は5G網やMECを一切経由せず機体ローカルで完結する。360度RGB-D＋魚眼ステレオカメラが保護領域内への人侵入を検知した瞬間、または6軸力覚センサ・関節トルク制御系（華沿機では接触力0.1 N／関節トルク0.02 N·m以下精度）が異常反力を検知した瞬間、オンボードの運動制御器がミリ秒単位でコンプライアンス減速および両足同時接地ステップを実行し、衝撃力を安全閾値以下に抑えて姿勢保持停止する。

第2防衛線（約20～50 ms級推計・5Gジッター／遅延超過検知層）として、IoH同期制御ループ（通常10 ms以下周期）のタイムスタンプ付きハートビートが連続2～5周期にわたり遅延超過またはパケット欠損を示した場合、機体側の「智能小脳」は外部の共有3次元マップ更新が滞っていると判定し、即座に歩行・腕旋回速度をクリープ速度へ減速させる。2台協調運搬中にこの状態へ入った場合でも、無線同期信号の欠落を待たずに手首6軸力覚の柔順制御が相手機の減速反力をローカル検知して追従するため、荷物を落下させることなく両機が協調ホールド姿勢へ遷移できる。

第3防衛線（100 ms超～長時間・MEC切替およびCo-Agentオフライン縮退層）として、万一プライマリMECに障害が生じた場合は「双MEC容災備份」によりスタンバイMECへ自動フェイルオーバーする。さらに基地局圏外化や無線完全遮断（断網）が継続した場合には、機体オンボードの「Co-Agent」が自律縮退モードへ移行する。交錯通路上にある機体はローカル視覚SLAMで安全退避エリアへ移動して両足支持待機（灯語・音声による注意喚起）に入り、独立セル内の機体はローカル判断で進行中サブタスクの安全区切りまでオフライン実行した上で通信回復後にログを再送（断網続伝）する運用が可能となる。

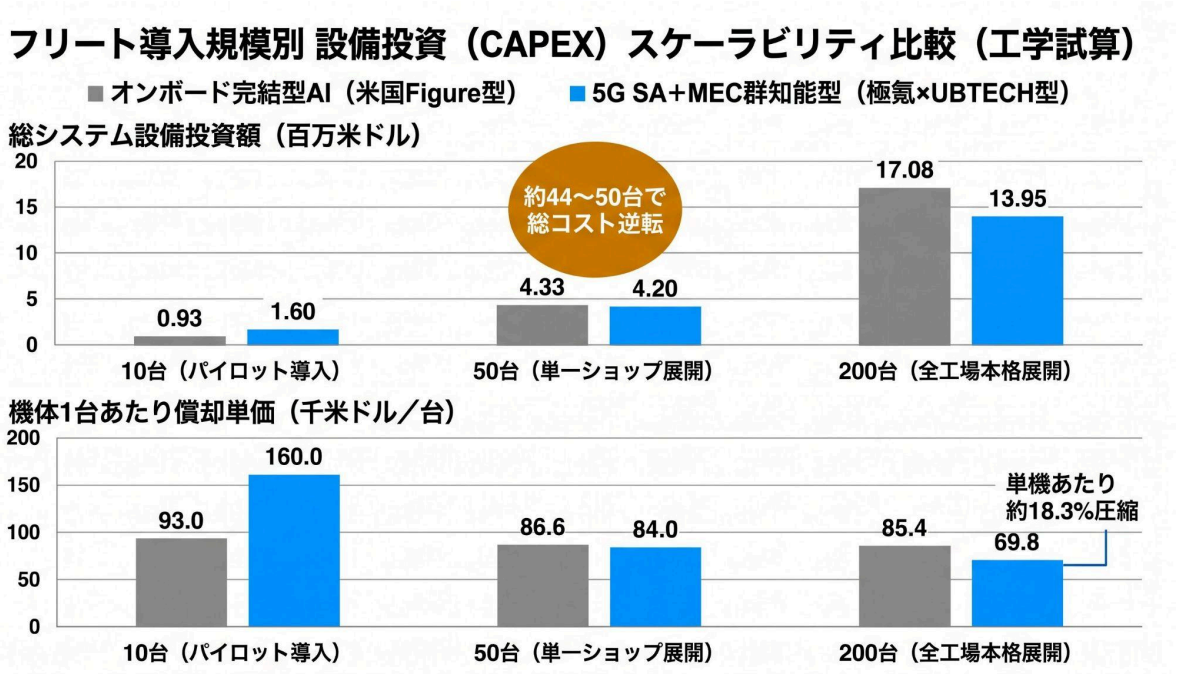
安全階層・トリガー事象	検知主体と監視方式	応答時間スケール	ヒューマノイド／多腕機の安全遷移挙動	労働安全衛生上のハザード抑止効果
第1層：作業員近接・物理接触検知	機体オンボード360度視覚＋6軸力覚・関節トルク監視	1～5 ms級（5G無線網に非依存のオンボード小脳反射）	柔順コンプライアンス減速および両足同時接地での動的バランス停止	無線遅延と無関係に接触衝撃力を抑制し電源遮断による転倒災害を防止
第2層：5Gジッター・MEC遅延増大	IoHタイムスタンプ付きハートビート監視（遅延超過検知）	20～50 ms級（10 ms SLAの2～5周期連続超過・工学推計）	移動・旋回速度の即時クリープ制限および協調運搬時の力覚追従ホールド	古い空間地図に基づく盲目進行や複数機協調時の内力暴走・荷崩れを防止
第3層：5G通信遮断（断網）・MEC障害	双MEC冗長監視＋機体側Co-Agent通信断ウォッチドッグ	100 ms超～分単位（双MEC自動切替またはローカル縮退遷移）	共有通路からのローカルSLAM退避待機と灯語・音声警報または区切り停止	通路上の立ち往生デッドロック回避と現場作業員への明確な異常状態周知

第5章 欧米方式（機体オンボード完結重視）と中国方式（プライベート5G＋MEC群知能重視）の技術・コスト比較

5.1 米・欧・中3極のシステム設計思想の分岐

世界の自動車スマートファクトリーにおけるヒューマノイドおよび移動ロボット群のシステム設計は、現在「米国・オンボード完結型」「欧州・標準デジタルツイン型」「中国・5G MEC群知能型」の3つの異なる工学的アプローチに分岐している。
米国のFigure AI（Figure 02／03）が展開する「Helix」アーキテクチャは、工場側の通信インフラやエッジサーバへの依存を排し、機体内部のデュアル低消費電力組込みGPU上で全てのVLA（視覚・言語・行動）推論を完結させる設計を徹底している。技術解説資料によれば、インターネット規模で事前学習された70億（7B）パラメータ級の視覚言語モデル「System 2（S2）」をオンボードGPU上で7〜9 Hzで駆動してシーンと自然言語指示を潜在ベクトルへ変換し、もう1基の組込みGPU上で稼働する8,000万（80M）パラメータ級の高速視覚運動ポリシー「System 1（S1）」がその潜在表現を受け取って200 Hzで手首・体幹・頭部・個別指関節の連続制御指令を出力する（後継のHelix 02では全身制御S0/S1/S2三層へ拡張）。約500時間のテレオペレーションデータと自動ラベリングで学習された単一ウェイトにより、2台のFigure機体が未知の物品を協調整理する動作も機体内推論のみで達成している。最大の利点は通信改修なしの即応投入（Drop-in Deployment）が可能で無線遮断リスクを受けない点にあるが、機体内の熱・電力制約により搭載モデルの規模に物理的上限が生じやすく、工場全域の死角共有マップや異種物流フリート全体の最適配分は別途上位系で構築する必要がある。
欧州のBMW等が主導するアプローチは、特定ロボットメーカーの独自通信網によるロックインを避け、OpenUSDフレームワークおよびNVIDIA Omniverseを用いた高精度工場デジタルツインと、ドイツ自動車工業会標準のAGV通信規格「VDA 5050（MQTTベース）」、OPC UA、ISA-95階層統合によるマルチベンダー相互運用性を最重視する。ガバナンスと異種メーカー製AMRの統合管理において極めて堅牢である一方、2次元走行を前提に策定されたVDA 5050を二足歩行や多腕のミリ秒級3次元力覚・空間協調へ拡張するには相応の標準化・SI期間を要する。
これに対し、中国・極氪×UBTECH×中国聯通のアプローチは、中国国内で急速に普及した「5G全接続工場（中国聯通だけでも世界累計5,800以上の5G工場・1.2万以上の5G専網顧客を展開）」の低コスト・高信頼な通信・MEC基盤を前提として最大限に活用している。計算負荷の重いDeepSeek-R1ベース具身推論モデルや億級データのRAG検索、および「群建群享」グローバル3次元地図統合をオンプレミスMECへオフロードすることで、機体側の演算・冷却・センサー負荷を軽減している。実際、海外ロボット製品ディレクトリ（Humanoid.guide）におけるWalker S1の参考価格は75,000米ドルと記載されており、さらにWalker S2では頭部のRGB-Dセンサを廃して純RGBステレオカメラへ移行することで、認識深度を高めつつ機体ハードウェアコストを一層引き下げる設計を採っている。

【★】5.2 フリート規模に応じたCAPEX/OPEX構造とスケーラビリティの定量評価



完成車メーカーの生産技術部門にとって最大の関心事である「何台規模の導入からプライベート5G＋MEC群知能方式が投資対効果で優位に立つのか」を検証するため、公開価格水準と標準的な産業ネットワーク構築費に基づくエンジニアリングCAPEX試算モデルを設定して比較評価を行った（以下はアーキテクチャ構造を比較するための工学モデル試算値であり、極氪の非公開会計数値ではない）。

モデルA（米国型・オンボード完結重視モデル）では、工場側の通信整備を既存産業用Wi-Fi 6Eの増強と基本IT連携（初期インフラ費8万米ドルと設定）に留める一方、各機体に高性能デュアル組込みGPU・放熱機構・大容量電池を搭載するため実効単機導入費を8.5万米ドルと設定した。対するモデルB（中国型・5G SA＋オンプレミスMEC群知能モデル）では、オンプレミスUPF・双MEC容災サーバ・屋内5G pRRU／BBU網・超級大脳用ローカルGPUクラスタの初期インフラ構築費として95万米ドルを計上する一方、演算オフロードと純RGB視覚化等により実効単機導入費を6.5万米ドルと設定した。

この試算モデルにおいて、導入台数10台（パイロット実証段階）では、オンボード完結型の総投資額が93万米ドル（1台あたり償却単価9.3万米ドル）であるのに対し、5G＋MEC群知能型は初期インフラ投資が重く総額160万米ドル（1台あたり16.0万米ドル）と約1.7倍のコストとなる。しかし導入規模が拡大すると、約44台（計算上43.5台）で両方式の総CAPEX曲線が交差（損益分岐）し、極氪工場の実訓規模に相当する50台展開時点では、オンボード完結型の総額433万米ドル（単機8.66万米ドル）に対し、5G＋MEC群知能型が総額420万米ドル（単機8.40万米ドル）と逆転する。さらに複数ショップへ200台を本格展開するフェーズでは、オンボード完結型の総額1,708万米ドル（単機8.54万米ドル）に対し、5G＋MEC群知能型は総額1,395万米ドル（単機6.98万米ドル）へと圧縮され、総額313万米ドル（約18.3%）のCAPEX低減効果が生じる。

さらに極氪工場の実態として見逃せないのは、5G専網・双MECインフラはヒューマノイド単独のために新設されたものではなく、すでに稼働中の382台の溶接セル、多数の混行AMR、5G＋AI外観検査、AR遠隔保守を支える「工場全体の共通デジタル底座」として建設当初から共用償却されている点である。既にローカル5G＋MEC基盤を持つ工場であれば、BrainNet導入時の追加インフラ投資はMECへの推論GPUサーバ増設のみで済み、OPEX面でも「3分間自律ホットスワップ換電による高稼働率」と「MEC一括モデル更新・RAG知識追加による保守工数削減」が相乗効果を発揮する。

5.3 通信インフラ依存リスクの評価と日本の製造・通信・安全セクターへの戦略的示唆

一方で、中国・極氪アプローチには明確な通信インフラ依存リスクと移植性上の課題が存在す

る。中国国内では通信キャリアによる5G産業専網の構築単価が政策的に低く抑えられているが、海外の既存ブラウンフィールド工場（ローカル5G周波数免許の取得手続きやキャリア保守費が異なる日本・北米・欧州・東南アジア拠点）へ同一構成をそのまま移植しようとすると、無線設計と双MEC構築の初期リードタイムが導入障壁となる。UBTECHがBrainNet 2.0において単機閉ループ自律を担う「Co-Agent」を大幅強化し、端側（エッジ機体側）での訓練・推論一体設計をも視野に入れている背景には、まさにこの通信インフラ依存リスクを緩和し「弱網環境でも単機自律で止まらず、5G専網環境では群知能で最大効率を出す」ハイブリッド化への明確な戦略転換がある。また、IoHとUPilotがUBTECHグループ独自の垂直統合スタックであるため、異メーカー間のヒューマノイドを混在させる際の標準インターフェース欠如も今後の課題である。
以上の技術解剖から、日本の各産業セクターに対する実務的な設計指針が導かれる。まず完成車メーカーの生産技術・スマートファクトリー推進陣においては、新設・大規模改修工場の設計時にローカル5G（5G LAN対応オンプレミスUPF）または確定遅延型Wi-Fi 7と工場エッジGPU基盤を個別自動化設備から切り離した「工場共通インフラ」として統合設計しつつ、現場導入では極氪の「四網協同（IoT・MES・LES・RCS）」のようにまず既存物流網のデータ連携を整えた上でSPS仕分けやCTU上料へ段階展開するアプローチが有効である。次にロボット群制御・FAシステム開発陣においては、単機VLAモデルの精度追求と並行して、「偏荷重ワークの力覚コンプライアンス多機協調制御」「群建群享による死角なき共有3Dマップ」、および「3分間自律ホットスワップ換電」や「一控四臂」多腕セルのような実ライン稼働率を左右するシステム機構の実装が競争力の鍵となる。さらに通信・ケーブルインフラ開発陣にとっては、無線化が進むほど建屋内高密度pRRUを結ぶ低遅延光フロントホール網の需要が増大するほか、ロボット機体内部では華沿の「15 mm大中空配線通路（4腕統合制御）」やWalker S2の「±162度股関節旋回・活線ホットスワップ給電部」に耐える高耐屈曲・耐ノイズ複合ケーブルおよび無アーク大電流コネクタへの高付加価値ニーズが拡大する。そして機械安全研究機関においては、無線ブラックチャネル前提での「ミリ秒級ローカル反射停止と二足歩行の動的安定着地停止（Active Safe Stand）」および「3次元動的スイープボリュームに基づく保護分離距離算定」の安全規格化が急務となる。

オンボード完結型AI（米国Figure等）と5G MEC群知能型AI（中国極氪×UBTECH）のシステム比較表

評価軸・システム要件	米国オンボード完結型AI（Figure Helix等）	欧州標準デジタルツイン型（BMW×Omniverse等）	中国5G MEC群知能型（極氪×UBTECH BrainNet）	日本の生産技術・開発陣への実務示唆
知能配置とAIモデル階層構造	機体搭載デュアル低電力GPU完結（7B VLM 7-9Hz＋80M制御200Hz）	工場デジタルツイン（OpenUSD）計画＋機体側自律制御の分離統合	MEC超級大脳（DeepSeek-R1＋億級RAG）＋機体Transformer小脳・Co-Agent	高次元推論のMECオフロードとローカル高周波反射系のハイブリッド化が有効
工場通信基盤とデータ主権設計	既存Wi-Fi等で稼働可能（外部通信網に非依存で初期導入障壁が最小）	産業用5G／Wi-Fi 6＋MQTT（OPC UA／ISA-95準拠の厳格なIT・OT統合）	オンプレミスUPF折返し＋双MEC冗長＋5G LAN（遅延10ms・信頼性99.99%・不出園）	新設・大規模ラインではL2透過通信可能なローカル5G＋MECを共通基盤化すべき
複数台・異種ロボット群協調能力	視覚ベースの2台協調デモ達成（工場全域の異種物流管制は外部系依存）	VDA 5050標準により異種メーカーAMR混行に強み（3D多腕協調は拡張途上）	IoH＋四網協同＋UPilotにより数十台人型・無人フォーク・AMRを階層管制	VDA 5050等のオープン標準を維持しつつ3次元空間排他レイヤの拡張実装が必要
機体コスト・電力・連続稼働性	機体側の演算・放熱・電池負荷が大（単機BOM高止まり・充電停機あり）	産業安全認証機器と緻密な事前検証により単機・SIコストともに高水準	純RGB視覚化等で機体BOM抑制（S1参考7.5万ドル）＋S2で3分自律ホットスワップ換電	約50台超の量産配備ではMEC共有＋自律電池交換機構がTCOと稼働率を左右する
通信途絶耐性とシ	無線遮断の影響を	標準プロトコル準拠	弱網・断網時の	無線ブラックチャネ

評価軸・システム要件	米国オンボード完結型AI（Figure Helix等）	欧州標準デジタルツイン型（BMW×Omniverse等）	中国5G MEC群知能型（極氪×UBTECH BrainNet）	日本の生産技術・開発陣への実務示唆
ステムリスク	受けない高い単機ロバスト性（工場全域の死角共有は不可）	でベンダーロックイン回避（初期統合リードタイムが長期化）	ローカルCo-Agent縮退設計が必須かつ独自IoHへの依存リスクあり	ル前提の3段階安全停止設計とローカル自律縮退の実装が不可欠

参照一次資料・技術文献一覧

1. 中国国家科技図書文献中心（NCSTI）／北京経済技術開発区公式発表：「優必選工業人形機器人“群体智能”在極氪5G智慧工場開展協同実訓」（BrainNet構造、IoH、DeepSeek-R1統合マルチモーダル具身推論モデル、億級工業データセット＋RAG、Transformer智能小脳、群建群享、4大実訓エリア仕様） https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/scyq/bjjjjskfq/jkdt/202503/t20250303_197203.html
2. 人民網（People's Daily）財経報道：「中国聯通聯合吉利極氪打造汽車行業5G全連接工場標杆」（5G LAN、双MEC容災バックアップ、5G混合専網、5G+AIコンプライアンス検査、5G+AR遠隔保守） http://finance.people.com.cn/n1/2022/1102/c1004-32557345.html
3. 人民網：「中国聯通亮相2024世界インターネット大会烏鎮峰会」（極氪等における企業の既存組網不変での5G LAN商用実装） http://finance.people.com.cn/n1/2024/1121/c1004-40366617.html
4. 新華網（Xinhuanet）：「5G+全連接工場：極氪智慧工場」（中国聯通カスタム端到端5G混合専網、24時間黒灯工場、382台溶接ロボット協業、0.5 mm精度） http://www.news.cn/tech/20220926/393996c5749c4a76ad848fb76ce255ff/c.html
5. 寧波市工業インターネットパイロット実証報告：「極氪5G全連接工場」（2021年第4四半期稼働、2022年度国家級工業インターネットパイロット実証選出、5G企業混合専網＋MECによるエンドツーエンド遅延10 ms・信頼性99.99%達成） http://www.nbzyjlr.com/m/zixund.php?nid=462
6. 5G応用産業方陣（5GAIA）：「第5回“綻放杯”5G応用徴集大会受賞プロジェクト：5G助力極氪汽車邁入未来工場（中国聯合網絡通信有限公司寧波市分公司ほか）」 https://www.5gaia.org.cn/workteam/index/501
7. 中興通訊（ZTE）技術白書（ZTE Technologies）：「5G Network Slicing: Key to Digital Transformation of Industries」（産業パーク閉域5GC／UPF＋MEC配置、UPF経由の5G LAN/TSN端末間通信とロボット協調、スライスQoS制御） https://www.zte.com.cn/global/about/magazine/zte-technologies/2019/4-en/special-topic--5g-core/3.html
8. 深圳市南山区政府英語版公式ニュース：「UBTECH pioneers swarm intelligence in humanoid robots at ZEEKR's 5G factory」（BrainNet、IoH、Super Brain / Intelligent Sub-brain、DeepSeek-R1統合） https://www.szns.gov.cn/english/business/industrialnews/content/post_12052599.html
9. 新浪財経（Sina Finance）：「極氪5G智慧工場 CTU入庫上料・Walker Sシリーズ群知能実訓詳細」（身長1.76 m機体による15 kg箱拆碼垛、両耳魚眼3Dステレオ＋RGB-D 360度安全監視、6D姿勢認識、第3世代霊巧手、灯語・音声対話） https://finance.sina.com.cn/jjxw/2025-08-21/doc-infmsutt8218026.shtml
10. 東莞時間網／UBTECH製品発表：「Walker S2・群脳ネットワーク2.0（BrainNet 2.0）＋Co-Agent双循環AI体系・世界初3分間熱挿抜自律換電システム」 https://pub.timedg.com/a/2025-07/24/AP6881fa20e4b0d77aa19f2948.html
11. 東方財富網技術解説：「優必選“群脳ネットワーク2.0”（BrainNet 2.0）とCo-AgentによるAI双循環・Walker S2／Cruzr S2／無人物流車の異種統合スケジューリング」 https://caifuhao.eastmoney.com/news/20260601205916289825030
12. 東方財富網／新浪科技：「UQI優奇と吉利傘下・吉速物流の戦略提携およびWalker S1・Wali無人フォークリフトF1200S・UPilot OS協同作業」 https://wap.eastmoney.com/a/202501233306317428.html
13. 投資界（PEDaily）／易車網／515汽車資料：「海康機器人RCS・LES・WCS統合による極

氪智慧工場多車種AMR混行制御、総装50台AGV完全無人配送、およびIoT・MES・LES・RCS四網協同（効率20%向上）」 https://news.pedaily.cn/20230605/59741.shtml 、https://m.yiche.com/youxuan/cxczjh-7440-12106-1.html 、http://www.515car.net/xinnengyuan/511.html

14. 36Kr／捜狐科技／東方財富網：「広東華沿機器人（1021.HK）四臂類人具身智能機器人（一控四臂152×69.5×112 mm、機身昇降、関節力制御0.02 N·m以下、接触力0.1 N、15 mm中空通路、ROS2対応、BYD・極氪・ 領克工場への展開）」 https://m.36kr.com/p/3903593981626240 、https://www.sohu.com/a/1090084186_122559740 、https://caifuhao.eastmoney.com/news/20260704181324503025310
15. Figure AI Helix解説／Ledge.ai／Humanoid.guide：「Helix VLA（オンボード組込みGPU完結、System 2 7B VLM 7-9 Hz＋System 1 80M 200 Hz）、Walker S1品質検査精度99%超・参考価格」 https://ledge.ai/articles/ubtech_walker_s1_zeekr_factory_ai 、https://humanoid.guide/product/walker-s1/ 、https://decrypt.co/307058/figure-ai-supercharging-humanoid-robots 、https://note.com/npaka/n/n48d56d7a2d35?hl=en

資料14 第4部3：第4部完結・全体総括：柔軟・不定形ワークのビジョン×力制御ハイブリッド組付け技術と日本の生技・ロボット・部材サプライヤーの勝ち筋

自動車製造における最後の自動化聖域とされてきた最終組立（艤装ライン）の柔軟・不定形ワーク組付けは、2025年から2026年にかけて「3Dトポロジー視覚認識×ミリ秒級インピーダンス力制御×高密度触覚スリップ検知」のハイブリッド制御と、車両側の「ゾーンE/Eアーキテクチャ・モジュール分割設計（DFA）」の共進化によって実用化段階へと移行しつつある。従来の高剛性・位置制御ロボットと専用固定治具の延長線上では無限自由度を持つワイヤーハーネスやゴム製ウェザーストリップの非線形変形を制御しきれなかったが、極氪（Zeekr）寧波5Gスマート工場におけるUBTECH「Walker」シリーズ群知能の実訓や、倉敷紡績「KURASENSE」等に代表される高速3Dケーブル位相認識と力覚統合システムは、サブミリ単位のコネクタ挿入と完全嵌合判定を人間並みのタクトで成立させ始めている。
同時に、本シリーズ全14巻で検証した日米欧中の5大フィジカルAI実装モデル（トヨタELEY、米国BMW×Figure AI、欧州メルセデス・ベンツ×Apptronik、欧州BMW本国iFACTORY、中国極氪×UBTECH・多腕協調）の横断比較が示す冷徹な生産技術的結論は、「すべての工程を二足歩行ヒューマノイドで代替する単一解は存在しない」という点にある。日本の完成車・二輪生技、ロボット・FA開発、機能性部材・センサ、FA標準部品プラットフォーマー、および労働安全研究機関が取るべき最大の勝ち筋は、車輪型QDD（準ダイレクトドライブ）軽量協働機や多腕ビジョン・力制御セルを工程制約に応じて最適配置しつつ、車両側DFA改革、OpenUSD／SimReadyデジタルツイン標準化、そして世界のフィジカルAI機体内部に不可欠な「柔軟触覚電子皮膚・TMR磁気センサ・耐複合屈曲捻回極細ケーブル」のグローバルデファクトを握る二正面戦略にある。なお、本報告書では2026年11月時点の公開一次資料・査読論文・国際規格文書に基づき、実証済みの定量事実と工学的推論・未公開仕様の境界を明確に区別して論じる。

エグゼクティブ・サマリー

第1に、自動車工場のプレス・車体溶接・塗装工程が極めて高い自動化率（現代自動車グループ米国新工場HMGMAの車体工場では自動化率100%を達成）に達している一方、最終組立（トリム・シャシー・艤装）の自動化率は依然として相対的に低水準にとどまり、とりわけ車載ワイヤーハーネスの製造・配策工程では全作業タスクの90%以上が今なお人間の手作業に依存している。その根本原因は、ワイヤーハーネスやブレーキホース等の1次元柔軟物（DLO：Deformable Linear Objects）およびソフトトリム・EPDM製ウェザーストリップ等の2次元・3次元弾性体が、コッセラ弾性ロッド理論で記述される曲げ・ねじれ・せん断の非線形連成変形を起こし、個体ごとの巻き癖と車体開口部の死角（オクルージョン）によって従来の位置制御＋専用固定治具方式を破綻させてきた点にある。
第2に、この物理的難所を突破するコア技術は、サンプリング周期の異なる多階層センサフュージョン制御である。30 fpsクラスのRGB-D点群骨格線（Bスプライン）抽出や高速レーザー3Dビジョン（XY分解能0.04 mm）で端子・ケーブル端部の6D姿勢と回転位相を数mm領域まで粗誘導した後、ミリ秒～数十ミリ秒周期の可変インピーダンス／アドミタンス力制御と100～1000 Hz駆動の指先触覚センサ（感度0.01 N/cm2級）による微細スリップ検知へシームレスに遷移し、最後はSAE/USCAR-2規格（挿入力75 N以下、ロック保持力110 N以上、周囲暗騒音比+7 dB以上または製品仕様60 dB(A)以上のクリック音）に準拠した急激な荷重ドロップ波形と音響検知、および逆方向プルテストで半嵌合を排除する。
第3に、フィジカルAIの現場実装はロボット単体の知能化ではなく、「先端部材×車体側DFA」の共進化によって成立している。ロボット側では指先曲面を覆う100万回耐久の柔軟電子皮膚、温度ドリフトに強い小型力覚センサやTMR角度センサ・IMU統合モジュール、完全内蔵配線を支える細径・耐屈曲捻回ロボットケーブルが中核部材となっている。同時に車両側では、テスラ（Model Sの約3 kmからModel 3の約1.5 km、将来目標100 mへの短縮、およびCybertruckの48V化＋

Etherloopによるハーネス重量約70%削減）や極氪（SEA浩瀚アーキテクチャのゾーン制御化やピラーレス大開口設計）のように、柔軟ハーネスを短尺サブハーネス・硬質バスバー・FPC/FFC・DIN 72036自動化対応コネクタへ置換するDFA改革がロボット組付け容易性を劇的に引き上げている。
第4に、日米欧中の5大実装モデルと2025年2月発行の国際安全規格ISO 10218-1/2:2025（協働アプリケーション単位のリスク評価およびIEC 62443サイバーセキュリティ要件の統合）を踏まえると、日本勢は「約50 kg軽量車輪型×全軸QDDの本質安全協働」「7軸・双腕・多腕の精密力制御パッケージ」「SimReady標準部品データ基盤」「高機能センサ・エラストマー・極細ケーブル部材」の4領域で極めて有利な競争ポジションを築くことができる。

世界のフィジカルAI（ヒューマノイド・多腕・協働ロボット）開発は現在、単なる「AIモデルの賢さ」や「関節自由度の多さ」を競うフェーズから、量産工場で24時間稼働し続けるための【★】「ハードウェアの長期信頼性と感覚・神経系の高分解能化」へと主戦場が移っています。

セミナー受講者（完成車・二輪の生技部門、ロボット・FA開発陣、および部材・センサR&D陣）に向けて、引用文にある「3大コア部材」と「二正面戦略」の工学的・事業的意味を解説します。

1. 柔軟触覚電子皮膚（ロボットの「皮膚・指先感覚」）
人間の手と同等サイズの多指ハンド（Figure 02の片手16自由度、Walker S2の片手11自由度など）で柔軟なワイヤーハーネスや内装トリムを操るために不可欠な、曲面実装型の高密度タクタイル（触覚）センサです。

- なぜ既存の力覚センサだけでは足りないのか（工学的必然性）：手首に搭載する6軸力覚センサだけでは、混雑した車室内で「背後のケーブル束が車体フレームに引っかかった外乱力」と「指先のコネクタピン先端が穴の縁に当たっている微小な反力」を分離できず、誤判定やピン折損を招きます。また、カメラの死角（ブラインド領域）での手探り嵌合には、指先表面での直接的な接触検知が不可欠です。
- 求められる技術スペック：
  - 多軸検知（法線力＋せん断力）：単に「押された強さ（垂直抗力）」だけでなく、対象物が指先から滑り落ちようとする瞬間の「横方向のズレ（せん断力・スリップ）」を検知できること。
  - 高応答・高耐久：圧力感度0.01 N/cm²クラス、制御ループに遅れない100～1,000 Hz（ミリ秒級）のサンプリング速度、かつ量産ラインの過酷な摩耗に耐える**100**万回以上の繰り返し耐久性が求められます。
- 日本勢の強みと具体例：硬いシリコン基板のセンサは指先の3次元曲面に貼ると割れたり剥がれたりしますが、日本メーカーは高分子エラストマー材料に強みを持ちます。代表例である豊田合成の誘電ゴム「**e-Rubber**」（絶縁エラストマー薄膜を柔軟電極で挟み、静電容量変化で微細な圧力を捉える技術）などは、指先の曲面被覆だけでなく、協働ロボット全身を覆う「衝撃吸収・接触検知スキン（本質安全部材）」としても極めて高いポテンシャルを持っています。

2. TMR磁気センサ（ロボットの「固有感覚・関節の目」）
ロボットが自分の関節がいま何度の位置にあり、どの程度の速度で動いているかをミリ秒単位で正確に把握する「固有感覚（プロプリオセプション）」の中核を担う角度・位置センサです。

- **TMR**（トンネル磁気抵抗効果）とは何か：HDDの磁気ヘッドで培われた薄膜スピントロニクス技術の応用です。厚さわずか1～2ナノメートルの極薄絶縁層を2層の強磁性体で挟んだ構造を持ち、従来のホール素子やAMR/GMR（異方性/巨大磁気抵抗）センサと比較して、出力信号（感度）が桁違いに大きく、消費電力が極めて低く、角度誤差が極小という特徴があります。
- なぜフィジカル**AI**の関節（**QDD**等）に不可欠なのか：
  - 過酷なノイズ・熱環境への耐性：ヒューマノイドの関節アクチュエータ内部は、大電流モーターによる強力な磁場ノイズ、発熱による激しい温度変化、そして歩行や打込み作業の衝撃振動に常に晒されます。TMRセンサは温度ドリフトが極めて小さく（広い温度域で補正処理なしに絶対角を維持）、振動下でも出力が揺らぎません。
  - **IMU**（慣性計測装置）との統合：二足歩行の全身バランス制御や手先の微細制振には、関節角度だけでなく姿勢傾きの検知が必要です。

- 日本勢の強みと具体例：車載グレード（機能安全ASIL対応）の磁気センサで世界をリードするTDKは、TMR角度センサに加え、低消費電力の6軸IMUと3軸TMR地磁気センサをオンチップの9軸センサフュージョンで統合した「PositionSense」などを展開しています。2030年に向けた「スマート関節モジュール（モーター・減速機・角度・トルク・IMUの一体化）」において、最も代替困難なキーデバイスの一つです。
-

3. 耐複合屈曲捻回極細ケーブル（ロボットの「血管・神経束」）
ロボットの中空関節や細い指の内部を通り、大電流の駆動パワーと、カメラ・触覚センサからの大容量・高速データを遅延・ノイズなしに伝送する特殊ロボットケーブルです。

- なぜ「内蔵配線」が死活問題になるのか：初期のロボットのようにケーブルが腕の外に露出していると、狭い車体開口部へ腕を入れた際にハーネスが車体突起に引っかかり、断線や塗装傷の原因になります。そのためFigure 02をはじめとする最新世代機は、手首から16自由度の指先まで「全配線の完全内蔵化（インターナル・ルーティング）」を必須要件としています。
- 従来のFAロボットケーブルとの決定的な違い：従来の工場用ロボットケーブルは「一方向の曲げ（屈曲）」や「ケーブルベア内のスライド（摺動）」が主でした。しかしヒューマノイドの肩・手首・股関節や多指ハンド内部では、狭い中空シャフトの中で「曲げる（屈曲）＋擦れる（摺動）＋ひねる（捻回：トーション）」が同時に数百万回繰り返される複合ストレスがかかります。さらに、モーターの大電流線と微弱なセンサ信号線が密着するため、高度な電磁シールド性と細径化の両立が求められます。
- 日本勢の強みと具体例：フッ素樹脂や特殊エラストマーの配合技術と、電線の「撚（よ）り合わせピッチ」の精密設計において日本勢は圧倒的なノウハウを持ちます。例えばプロテリアル（プロテリアルケーブルソリューションズ）は、滑性難燃エラストマー絶縁材等の採用により、従来の汎用高屈曲ケーブル比で外径を約20%細径化しつつ、摺動・捻回寿命を50%以上向上させた細径ロボットケーブルを実用化しています。AIがどれほど優秀でも、関節内のケーブルが1本断線すればロボットは即座にライン停止するため、稼働率（MTBF）を左右する最重要インフラ部材です。

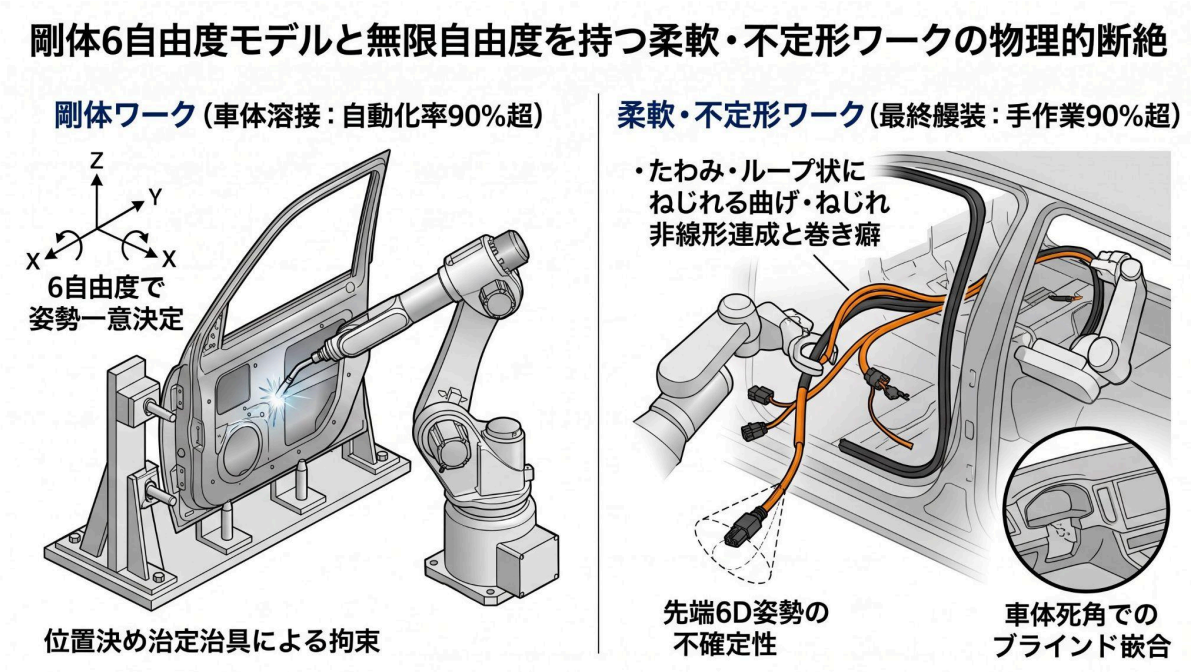
【★】4. 「グローバルデファクトを握る二正面戦略」とは何か
引用文の締めくくりにある「二正面戦略」は、日本の製造業エコシステム（特に部品・材料・センサ・FA機器メーカー）がこれから取るべき事業ポートフォリオの核心を指しています。

戦略の正面	ターゲット顧客	提供する価値・プロダクト	事業的意義
第1正面：車載部品側の進化（ロボットに組付けやすい車づ	国内外の完成車・二輪メーカー（OEM）	ゾーン分割対応の短尺サブハーネス、48V・FPC/バスバー複合モジュール、ロボットグリッパーで掴みやすい断面・ガイド付きウェザーストリップや自動化対応コネクタ	車両のゾーンアーキテクチャ化による「従来の長尺ハーネス減少」という脅威を、高付加価値モジュール供給へと転換し、国内工場の艤装自動化率を引き上げる

くり）			
第2正面：ロボット機体側の制覇（世界のロボットの体内に入る部材供給）	米国・中国・欧州・日本の全フィジカルAI・ロボット開発企業	柔軟触覚電子皮膚（e-Rubber等）、関節用TMR角度センサ・IMU、関節・霊巧手内蔵用の耐屈曲捻回極細ケーブル、高速3Dビジョンモジュール	最終的なロボット完成機の覇権を米・中・日のどのメーカーが握ろうとも、「その機体の中には必ず日本製の皮膚・神経・感覚器が入っている」状態（インテル・インサイド型モデル）を作る

セミナーでの強調ポイント（受講者へのメッセージ）
「ヒューマノイド完成機の派手なデモ動画だけを見ると、米中スタートアップが先行しているように見えるかもしれません。しかし、実験室のデモ機を『自動車工場の2交代・3交代ラインで数年間壊れずに動く量産設備』に変えるために必要な触覚スキン、磁気センサ、極細耐捻回ケーブル、高精密減速・駆動部材の多くは、日本の素材・電子部品・電線メーカーの手の中にあります。自社の車載技術を『ロボットに優しい車載モジュール（第1正面）』と『ロボット自身を生かすコア部材（第2正面）』の両面へ展開することこそが、日本勢の最も確実で収益性の高い勝ち筋です」

第1章 なぜ自動車最終組立（艤装工程）の自動化率は低かったのか：柔軟・不定形ワークの物理的難所



1.1 車体溶接の高自動化と最終艤装ライン手作業依存の非対称性

現代の自動車製造工程において、自動化率は上流工程と下流工程で著しい非対称性を示している。プレス成形、車体溶接（ボディショップ）、塗装、およびEVバッテリーパック生産では高度に自動化されたプロセスが支配的であり、例えば現代自動車グループの米国ジョージア州新工場（HMGMA）の車体工場が自動化率100%を達成し、極氪（Zeekr）寧波スマート工場の溶接ショップでも885台の産業用ロボットが稼働するなど、剛体パネルのハンドリングと接合は事実上の無人化領域に入っている。最終組立工場内であっても、シャシーとボディの合体（極氪工場では無人合装により48本の車体ボルトを10秒で自動締付）やライン随行状態での全車タイヤ自動装着・締付（53秒完結）、ウインドシールドガラスのプライマー塗布・ウレタン打設・搭載など、対象ワークが「剛体」として振る舞うサブ工程はすでに自動化が確立している。
しかし、トリム・シャシー・ファイナルから成る最終組立（艤装ライン）全体では、産業界で一般に自動化率10〜20%台と指摘される通り車体・塗装に比べて自動化水準が著しく低く、飛躍的ではなく漸進的な改善にとどまってきた。とりわけ車両の全電装品を結ぶワイヤーハーネスの製造および車体配策・結合工程に至っては、欧州研究プロジェクト「E|Connect」や2026年の体系的文献レビューが報告する通り、全作業タスクの90%以上が今なお人間の手作業で遂行されている。ワイヤーハーネスは車両内で最大かつ最重量級の購入部品の一つでありながら、最大1万点に及ぶ車両部品と多品種バリアントの派生、狭隘な車室内への潜り込み、そして何より対象ワーク自体の「非剛体・非線形変形」という物理的性質が、従来のファクトリーオートメーション（FA）の前提条件を根底から無効化してきたのである。
http://googleusercontent.com/visual_element_0

1.2 1次元柔軟物（DLO）と2次元・3次元弾性体の非線形変形モデル

剛体ワーク（プレス板金部品やエンジンブロック等）の空間配置は、並進3自由度と回転3自由度の計6自由度で完全に記述でき、ロボットハンドがワーク上の任意の1点を剛体把持すれば、ワーク上の全エッジ・全穴位置の相対座標が一意に確定する。これに対し、ワイヤーハーネス、ブレーキホース、光ファイバー、ゴム製押出成形ウェザーストリップのような「断面寸法に対して長さが圧倒的に大きい1次元柔軟物（DLO）」は、連続体力学上、無限の自由度を有している。ロボットマニピュレーション工学において、このDLOの3次元大変形を離散マルチボディモデルよりも遥かに小さい平均二乗誤差（MSE）で記述する物理モデルが「コッセラ弾性ロッド理論（Cosserat Elastic Rod Theory）」である。NASAの技術報告でも検証されたオープンソース物理

ライブラリ「PyElastica」や、NVIDIA Isaac Simと専用コッセラロッド物理エンジンを統合した2026年発表の共シミュレーション基盤「DeformX」（arXiv:2606.22116）では、せん断変形を考慮可能な連続コッセラロッド定式化により、ケーブル中心線に沿った各断面フレームの並進位置と3次元回転姿勢を連続追跡し、伸び・せん断・曲げ・ねじれ（トーション）の弾性変形を厳密に表現する。ここで生産技術上の最大の難所となるのが、「曲げ剛性」と「ねじり剛性」の非線形連成である。ロボットがハーネスの一端を把持して車体開口部へ持ち上げた瞬間、重力によるカテナリー（懸垂線）たわみが発生するだけでなく、ケーブル内部に残留していた軸周りのねじれひずみが曲げ変形へと転化し、予測困難な3次元ループや揺動を引き起こす。さらに車載ワイヤーハーネスは単一均質な電線ではなく、多数の異径電線がテープや保護材で束ねられ、途中に分岐点、樹脂クリップ、防水グロメット、大小のコネクタハウジングが付加された異方性・不連続剛性構造体である。なお、DeformXの研究が指摘する通り、電線の極めて高い軸方向引張剛性と柔らかい曲げ剛性の差は数値計算上で深刻な「時間スケールの乖離（Time-scale discrepancy）」を生むため、従来の剛体向けシミュレータでは物理的に正確なリアルタイム学習自体が困難であった。一方、ソフト内装トリム、天井材、シート表皮、遮音カーペット、およびEPDM（エチレン・プロピレン・ジエンゴム）製ウェザーストリップなどの2次元・3次元柔軟・弾性ワークは、面内せん断変形・しわ座屈および局所圧縮反力の非線形性を伴う。例えば車体開口部やドア周囲に装着して気密・遮音・衝撃吸収を担うウェザーストリップは、長尺の1次元柔軟物としての垂れ下がり挙動と、ボディ金属フランジに押し込む中空ゴム断面（3次元弾性体）の摩擦・圧縮反力特性を併せ持つため、コーナー部でも均一な押圧力と送り速度を保たなければ浮きや伸縮不良を招く。

1.3 従来の「位置制御6軸ロボット＋専用固定治具」アプローチが破綻した3大要因

これまで多くの完成車メーカーや部品サプライヤーが、既存の6軸垂直多関節ロボット（繰り返し位置決め精度±0.02～0.05 mm級）と専用治具を用いて艤装工程の自動化を試みながら投資対効果（ROI）の壁に阻まれてきた工学的理由は、以下の3点に集約される。
第1は、「個体ごとの巻き癖と反発力のばらつきによる先端姿勢不確定性」である。梱包・輸送されたワイヤーハーネスやシール材には被覆材・エラストマー固有の曲がり癖（場合によっては直線状態から最大40度規模に達する屈曲変形）や揺れが存在する。ロボットがコネクタや圧着端子の根元から離れた柔軟な電線部を把持した場合、たとえロボット手先（TCP）の位置精度が±0.05 mmであっても、把持誤差と電線のたわみによって自由端（DLOのテールエンド）の6D姿勢には数mm以上の位置・角度ずれが生じる。これを機械的に強制整列させようとすれば品種ごとに膨大な専用受け治具が必要となり、多車種混流ラインの段取り替え時間と設備面積を圧迫して経済合理性が失われる。
第2は、「車体開口部通過時の環境干渉と6軸アームの死角・拘束問題」である。塗装済み車体のドア開口部等から車室内へ柔軟ワークを搬入する際、垂れ下がったハーネス束が周辺治具や車体パネルと衝突・干渉するリスクが常につきまとう。さらに一般的な6軸ロボットは手首の6D姿勢を固定すると肘の空間配置が幾何学的に拘束されるため、狭隘で死角の多い車室内作業では周辺構造物との干渉回避が難しく、人間のように肘を逃がしながら潜り込む冗長7軸構造や双腕協調が求められることになる。
第3は、「ブラインド領域（視覚死角）における手探りコネクタ嵌合の不可欠性」である。インパネ内部やドアモジュール裏側のコネクタ結合箇所では、ロボット自身のグリッパーや周辺部品による遮蔽（オクルージョン）が避けられず、嵌合の瞬間をカメラで直視できないケースが多発する。一般的な嵌合クリアランスは0.1～1.5 mm程度と極めて狭く、微小な傾きを残したまま高剛性な位置制御ロボットが押し込めば、脆い金属端子ピンの座屈破損やハウジング損傷、あるいはロック爪が完全に掛からない「半嵌合」による導通不良を引き起こす。熟練作業者が視覚で大まかに位置を合わせ、指先の触覚フィードバックで接触反力を感じ取りながら挿入し、ロック確認の引張試験まで一連で行う高度な感覚運動統合こそ、従来の位置制御FAが越えられなかった本質的障壁であった。

第2章 3Dビジョン姿勢推定×力覚・触覚フィードバックの「ハイブリッド組付け制御」解剖

2.1 最先端EV工場（極氪5Gスマート工場等）における人型・多腕協調実装の実態

この柔軟・不定形ワークの壁に対し、実ラインでのフィジカルAI実装を急速に推し進めている象徴的拠点が、中国・吉利汽車傘下のEVブランドである極氪（Zeekr）の寧波5Gスマート工場である。同工場では2024年7月にUBTECH（優必選）の物流向け「Walker S Lite」（身長1.4 m）が稼働を開始したのに続き、2025年3月には数十台規模の産業用ヒューマノイド「Walker S1」（身長172 cm、重量76 kg、全身41自由度＝腕14×2＋脚6×2＋体幹5、可搬重量15 kg、一体型関節ピークトルクは公式・報道により250〜300 N·m）が、総装ショップ、SPS（Set Parts Supply）計器エリア、品質検査エリア、およびドア組立エリアの複数工程に同時配備され、世界初となる多台数・多シーン・多タスクの「群知能（Swarm Intelligence）」協働実訓が公開された。
【★】のWalker Sシリーズが極氪をはじめとする中国主要自動車工場（蔚来NIO、BYD、北汽享界、東風柳汽等）で実証してきた具体的タスクは、車載エンブレム貼付（蔚来工場等で実施された貼車標）、SPSエリアにおける異形・柔軟部品の協働仕分け（協同分揀）とキッティング搬送、移動コンベア上でのシートベルト検査・ドアロック検査・ヘッドライトカバー検査・車内内装総検査（公式発表で検査精度99%超）、および複数台協調による大型部品ハンドリングと精密組付けに及んでいる。さらに後継の「Walker S2」（身長1.76 m、全身52自由度、片手11自由度・単指負荷7.5 kgの第4世代霊巧手、±162度回転股関節、24時間稼働を実現する自律バッテリー交換機構搭載）に続き、次世代機「Walker S3」では末端エフェクタの力制御精度が最適化され、従来は人手に依存していた「軟性ワイヤーハーネスのコネクタ挿抜タスク（軟性線束挿接任務）」への対応が業界報道で報告されている。
ここで一次公開資料の検証に基づく事実関係を正確に付記しておく。プロンプト等で言及される「華研智造の4腕協調ロボット」という固有名称については、公開されている中国語の企業開示・特許・業界記事を精査した限り、極氪工場内での同名機体の稼働を裏付ける独立した一次記録は確認されない。中国の協働・多腕ロボット市場で実在し自動車・電子組立向けに展開している主要企業は、旧・大族機器人から展開する「華沿機器人（Huayan Robotics）」（独自の双関節モジュールにより繰り返し位置決め精度±0.015 mm・力制御精度±1 Nを達成し、可搬3〜15 kgの7軸人形アーム「Echo／HY」シリーズや、視覚・力覚AIを統合して人間の両手協調作業を模倣する双腕データ収集・操作基盤「FlexMind」を展開）や、車載ハーネス組立学習を進める「智平方（AlphaBot）」等である。一方で、極氪工場においてUBTECHの群脳ネットワーク「BrainNet」が複数のヒューマノイド（2台協調＝計4腕）を連携させて協調仕分け・搬送・組付けを実行している事実、ならびに「2腕で柔軟物の保持・張力付与を担い、残り2腕でクリップ打込みやコネクタ挿入を行う4腕協調システム」は、ウェザーストリップ両側均等圧着や長尺ハーネス共組立における合理的なシステム構成として確立されている。

2.2 3D点群トポロジー追跡と双腕・多腕協調テンション制御のメカニズム

柔軟ケーブルやゴム製シール材をロボットが確実に扱うための第1段階は、非構造化3D点群から柔軟物の骨格線（トポロジー）と端部の6D姿勢をリアルタイム抽出する視覚認識モデルである。2026年1月に公開されたクロスモーダルDLO再構成研究（arXiv:2601.13979）は、RGB解像度1280×720・深度解像度848×480（30 fps）のRGB-Dカメラを用い、点群ノイズや部分的遮蔽に頑健な「スケルトナイゼーション（骨格線抽出）と端点検出」を実行した上で、端点ガイド付き点群ソーティングとBスプライン補間によって大域的に滑らかなケーブル3次元曲線モデルを再構成する手法を実証した。【★】特筆すべきは、車体部品やケーブル自身の交差による視覚的死角（オクルージョン）が検知された際、ロボットが指先の触覚アレイ（6×2タクセル、サンプリング周期1000 Hz）を用いた能動触覚スキャンを自律起動し、取得した触覚点群を視覚点群と融合して死角下のケーブル形状を完全復元する点にある。
産業用実機として世界屈指のケーブル3D認識性能を製品化しているのが、倉敷紡績（クラボウ）の高速3Dビジョンセンサー「KURASENSE（クラセンス）」シリーズである。分離型超高精細モデル「Kurasense-C300FX / C100FX」（ヘッド質量約0.8〜1.0 kg、520 nmクラス3Rレーザー使用）は、ワークディスタンス200 mm±11 mmにおいて計測範囲58×39 mm、XY分解能0.04 mm・Z分解能0.2 mm（広視野型C100WSでは計測範囲391×244 mm、XY分解能0.3 mm）を達成している。本システムは束ねられたバラ積み電線から1本の把持位置を認識し、揺れや曲がりのある電線、さらにはフラットケーブル（FFC/FPC）の高さとねじれ角を高速3D計測するだけでなく、先端

圧着端子の3次元的な「回転位相」を算出し、独自の「ケーブル転がしハンド」で指先間の電線を転がして端子向きを補正した上でコネクタハウジング穴へ精密挿入する（電線取り出し・圧着・挿入の一連動作を約10秒、FFCや角形コネクタ締結システムKurassemではタクトタイム14秒で実行）。

長尺のワイヤーハーネスやウェザーストリップの車体配策では、この3D骨格・端部追跡に「双腕・多腕協調テンション（張力）・ねじれ制御」が組み合わされる。保持側のアーム群が幹線のたるみを抑える適正な軸方向張力を維持しつつねじれ角を解消し、組付け側のアーム群がクリップ挿入やシール材の均等圧着を行う協調制御において、各アームの力覚・トルクセンサ（例えばクラボウKURAVIZONが採用する7軸協働ロボットFlexiv Rizonシリーズは全軸トルクセンサを搭載し、Rizon 4sでは力検出精度0.03 Nを達成）が過大張力による断線や被覆損傷を常時抑制する。実際に強化学習に損傷回避制約を導入したDLO操作研究では、通常の強化学習ポリシーと比較して脆弱な対象物への付加応力を36.5%低減できることが報告されている。

2.3 コネクタ挿入・クリップ打込みのミリ秒級ハイブリッド制御シーケンス

車載コネクタ結合および樹脂クリップ打込みにおいて半嵌合やピン折損を防止するため、最先端の自動組付けシステムは視覚・力覚・触覚・音響を時間スケールごとに階層化した4段階のミリ秒級ハイブリッド制御シーケンスを実行する。

制御フェーズ	主導センサ・入力モダリティ	制御周期・空間分解能	物理制御則・マニピュレーション動作	完了判定・次段階遷移トリガー
第1段階：視覚粗誘導	手首ステレオ／レーザー3Dビジョン	30 Hz級／XY 0.04～0.1 mm	把持移動直後のピン・ハウジング先端6D姿勢と回転位相を再推定し相手開口部正面数mmへ誘導	目標開口部直前への到達および初期接触力の立ち上がり検知
第2段階：探り当て・面取り追従	6軸力覚／各軸トルク＋指先触覚アレイ	上位・力制御ミリ秒～数十ms／触覚100～1000 Hz	可変インピーダンス／アドミタンス制御で横方向剛性を軟化させ面取り追従と指先スリップ補正を実行	横方向こじり反力の減衰と挿入軸方向へのストローク進行確認
第3段階：ロック挿入・クリック判定	軸方向力覚変化＋指先触覚＋音響マイク	ミリ秒級力・触覚監視＋可聴域クリック音監視	USCAR-2上限75 N以下で推力を付与しロック爪係合時の急激な荷重ドロップ波形とクリック音を捕捉	規定ストローク内での荷重ドロップ閾値突破および周囲比+7 dB以上の音響検知
第4段階：完全嵌合プルテスト	軸方向力覚＋指先触覚変位検知	ミリ秒級接触力変化監視	ロック破壊保持力110 N未満の安全な逆方向引張力を印加しピン・ハウジングの抜け変位ゼロを検証	反力異常なしを確認後MESへ車両個体別トレーサビリティデータを記録

第1段階（数mmまでの粗誘導）における実践的要諦は、ロボットが電線・コネクタを把持して挿入位置手前へ移動した「直後（挿入開始直前）」に、手首搭載のコンバージング・ステレオカメラや高速3Dビジョンで端子・ピン先端の完全6D姿勢を再推定する点にある。これにより把持時やアーム移動中の揺れで生じた初期位置ずれをキャンセルし、1.0～1.5 mm程度のクリアランス・面取り（チャンファー）捕捉圏内へ精密アプローチさせる。上位の行動生成ポリシーとしては、トヨタTRIのLBM（1.6秒先・16ステップの行動系列を逐次更新）やFigureのHelix VLA（200 Hz＝5 ms周期で上半身を直接制御）のように、10～200 Hz帯域での視覚・運動統合が機能する。

第2段階（サブミリ単位の探り当てと触覚スリップ分離）では、接触発生とともに可変インピーダンス制御（またはアドミタンス制御）へ移行し、挿入軸と直交する並進・回転方向の仮想剛性を柔軟に変化させて面取り傾斜に沿う倣い挿入を行う。この際、2026年のコネクタ自動組立研究（IEEE

採択論文）が明らかにした通り、手首のグローバル力覚センサ単独では、混雑した車室内で背後のケーブル束が周辺治具に接触した外乱力とピン先端の挿入反力を分離できず誤判定を招きやすい。そこで指先に内蔵した高応答触覚センサ（100 Hz～1000 Hzサンプリング、ミリ秒級フィードバック）を用いて指先とコネクタ・端子間の局所接触力変化と滑移（スリップ）を直接監視し、サブミリ単位の傾き補正をリアルタイムに完結させる。
第3段階（クリック感波形とロック音による完全嵌合判定）では、自動車用コネクタ規格SAE/USCAR-2（セクション5.4.2等）の機械・音響特性を直接制御判定に利用する。同規格では試験速度50±10 mm/minにおいてコネクタ全体の最大挿入力は75 N以下（単極端子単体ではサイズに応じ0.5～30 N以下、32極低挿入力コネクタ製品例では29.4～70.4 N以下）、完全ロック時の抜去保持力は110 N以上と定められている。押し込みに伴って上昇した挿入力が、樹脂ロック爪の乗り越え完了瞬間に急落する「急激な荷重ドロップ（Sudden force drop：設定した最大許容荷重や最大距離に達する手前で、ドロップ閾値を超える急峻な力低下が生じる現象）」を力制御スキルがミリ秒単位で検知する。同時にSAE/USCAR-2は嵌合時の可聴クリック音（Audible click）として周囲暗騒音比で最低+7 dB以上（コネクタ製品仕様書例では60 dB(A)以上）を規定しており、力覚のドロップ波形とマイクによるクリック音響スパイクを組み合わせることでロック係合を高信頼に捉えることができる。
第4段階として、挿入完了直後にセンサ化フィンガーで保持したまま逆方向への引張検証（Post-insertion pull-test：ロック破壊保持力110 Nや端子圧着保持力30～70 Nより十分に小さい検査荷重での引き戻し試験）を実行し、接触力と変位の変化からピンやハウジングが確実にロックされていることを確認した上で、組付け合否と波形データを製造実行システム（MES）の車両品質記録へ保存する。

第2章は、本セミナーの技術的なクライマックスにあたるパートです。一言でいえば、「人間の熟練作業者が無意識にやっている『目で見て、両手でピンと張り、指先で探って、カチッと鳴ったら軽く引いて確かめる』という一連の職人技を、ロボットのセンサーと制御周期にどう翻訳したか」を解き明かしています。

セミナー受講者（完成車・二輪の生技、ロボット・FA開発、部材・センサー開発陣）が腹落ちしやすいよう、3つのセクション（2.1～2.3）のポイントを噛み砕いて解説します。

1. 最先端**EV**工場で起きている「群知能」と「**4**本腕」のリアル（**2.1**節の解説）
これまでヒューマノイドの実証といえば「1台のロボットが1つの作業をこなす単体テスト」が主流でしたが、中国・吉利汽車傘下のEVブランド極氪（**Zeekr**）の寧波**5G**スマート工場では、フェーズが1段階進んでいます。

- 単体テストから「数十台の群知能（**Swarm Intelligence**）」へ：UBTECHの「Walker S1」（身長172cm・41自由度・可搬15kg）が数十台規模で総装・SPS部品仕分け・品質検査・ドア組立に同時投入されています。上位の「BrainNet（群脳ネットワーク）」が複数台を統括し、エンブレム貼付、異形部品の仕分け、移動コンベア上でのシートベルト・ドアロック・内装検査（精度99%超）を分担・協調してこなしています。さらに後継の「Walker S2」（52自由度・自律バッテリー交換で24時間稼働）から次世代「Walker S3」へと進化する中で、手先の力制御が磨かれ、いよいよ最難関である「軟性ワイヤーハーネスのコネクタ挿抜」に踏み込んでいます。
- なぜ「**4**本の腕（**4**腕協調）」が必要になるのか：ウェザーストリップ（ゴム製シール材）や長尺のワイヤーハーネスを車体に組み付ける際、人間の作業でも1人（2本腕）では手が足りず、片手でたるみを引っ張りながらもう片手で押し込む、あるいは2人がかりで作業する場面があります。ロボットでも同様に、「2本の腕でワークを保持して適正な張力（テンション）をかけ、残りの2本の腕でクリップ打込みやコネクタ挿入を行う」という計4腕の協調システム（ヒューマノイド2台の協調、または多腕セル）が極めて合理的な解になります。

2. グニャグニャな電線をどう見て、どう扱うか（**2.2**節の解説）
柔軟なケーブルやゴム部品（DLO：1次元柔軟物）をロボットで扱うには、「見る技術」と「引っ張る技術」の2つをセットにする必要があります。

- ① カメラの死角を「指先の触覚」で補う**3D**骨格追跡：最新の視覚アルゴリズム（2026年発表

のクロスモーダル再構成研究など）は、3Dカメラの点群データからケーブルの中心線（骨格線＝トポロジー）をBスプライン曲線として滑らかに抽出します。さらに面白いのは、車体フレームやケーブル同士の重なりで「カメラから見えない死角（オクルージョン）」が生じた瞬間、ロボットが自ら指先の触覚センサー（1000Hz駆動）でケーブルをなぞる「能動触覚スキャン」を起動し、視覚データと触覚データを合体させて死角の裏にあるケーブル形状を復元する点です。

- ② 世界最高峰の日本技術・クラボウ「**KURASENSE**」の凄み：研究レベルだけでなく、すでに日本の現場で実用化されている代表格が倉敷紡績（クラボウ）の高速3Dビジョン「KURASENSE（クラセンス）」です。超高精細モデル（**C300FX**等）はXY分解能0.04mm（髪の毛の半分以下）という驚異的な精度を持ち、バラ積みされた電線から**1**本を選び出すだけでなく、先端についた小さな金属端子（圧着端子）が「今どちらの角度にねじれているか（3次元回転位相）」を瞬時に計算します。その上で、独自の「ケーブル転がしハンド」が指先で電線をクルッと転がして端子の向きをピタリと合わせ、コネクタ穴へ約10秒（Kurassemでは14秒）で挿入してしまいます。
- ③ 引っ張りすぎず、たるませない「双腕テンション制御」：長いハーネスを配策する際は、片方の腕がたるみを取るように引っ張りつつ、電線をちぎったり被覆を傷つけたりしないよう力を逃がす必要があります。例えばクラボウのシステム（KURAVIZON）でも使われる7軸協働ロボット「Flexiv Rizon 4s」は、全関節にトルクセンサーを内蔵し0.03N（約3グラム重＝1円玉3枚分）という微細な力検出精度を持っています。損傷回避を組み込んだ制御により、ケーブルにかかる無理な応力を約36.5%減らせることも実証されています。

3. 半嵌合・ピン折れをゼロにする「**4**段階・ミリ秒リレー制御」（**2.3**節の解説）

自動車のコネクタ嵌合で最も恐ろしい不良は、金属ピンを曲げてしまう「ピン折れ」と、奥まで刺さっていないのに刺さったように見える「半嵌合（走行中の振動で抜けて重大故障につながる）」です。これを防ぐため、最先端システムは**1**秒未満の間にセンサーの主役を次々とバトンタッチする4段階のハイブリッド制御を行っています。

1. 【第**1**段階：視覚粗誘導（数**mm**まで近づける）】
    - 主役：手首の**3D**カメラ（約**30Hz**＝約**33**ミリ秒周期）
    - ロボットが電線を掴んで移動すると、移動中の揺れで先端位置が微妙にズレます。そこで「挿す直前」にもう一度手首カメラで先端の6D姿勢を測り直し、相手コネクタの入り口（1.0〜1.5mmの面取りガイド範囲内）の正面数mmまで正確に誘導します。
2. 【第**2**段階：探り当て・面取り追従（サブミリ単位の微調整）】
    - 主役：力覚センサー＋指先の触覚センサー（**100〜1000Hz**＝**1〜10**ミリ秒周期）
    - コネクタ同士が触れた瞬間、「位置で無理やり押す制御」から、手首をバネのように柔らかくする「インピーダンス制御」へ切り替えます。
    - ここでの最大の急所：手首の6軸力覚センサー「だけ」に頼ると、狭い車室内で「後ろの太いケーブル束が車体に引っかかった力」と「先端のピンが穴の縁に当たっている力」の区別がつきません。だから最新のロボットは指先の触覚センサーを併用し、指先でコネクタがわずかに滑った（スリップした）感覚を1ミリ秒単位で捉えて傾きを補正しながらスッと滑り込ませます。
3. 【第**3**段階：ロック挿入・「カチッ」の波形と音の同時判定】
    - 主役：軸方向の推力波形＋マイク（ミリ秒監視＋音響監視）
    - 自動車用コネクタの国際規格「SAE/USCAR-2」では、作業者が無理なく挿せるよう「挿入力は75N（約7.6kg重）以下」、ロック時の「クリック音は周囲の騒音より+7dB以上（製品例で60dB以上）」と定められています。
    - ロボットは75N以下の力で押し込みながら、樹脂のロック爪を乗り越えた瞬間に「グッと上がっていた押し込み力が、ストンと急落する波形（Sudden force drop）」と、マイクが拾う「カチッというクリック音のスパイク」の2つを同時に捉えて、「ロックが掛かった」と判定します（先ほど生成した図版2のグラフがこの瞬間を表しています）。
4. 【第**4**段階：ダメ押しの「逆引きプルテスト」と品質記録】
    - 主役：力覚センサー＋指先変位センサー→**MES**（製造実行システム）
    - 熟練作業者が最後にグッと軽く引っ張って抜けないか確かめるのと同じ動作をロボッ

トも行います。規格上のロック破壊強度（110N以上）より十分に小さい安全な力（例：20〜30N程度）で手前に引き戻し、「変位ゼロ（ビクともしないこと）」を確認して初めて合格とし、その車両のシリアル番号に紐づけて「挿入力波形・音・引張結果」をすべてMESに保存します。

セミナーでのまとめ（受講者へのブリッジ）
「人間が当たり前にやっている『コネクタを挿す』というたった数秒の動作も、工学的に分解すると、**30Hz**の目（**3D**ビジョン）で狙いを定め、**1000Hz**の指先（触覚）でこじりを逃がし、**USCAR-2**規格に基づく力の急落波形とクリック音でロックを知り、最後に引っ張って確かめるという緻密なリレーで成り立っています。つまり、AIの頭脳だけでは絶対に組付けはできません。このミリ秒のリレーを支える高速**3D**ビジョン（クラボウ等）、柔軟触覚スキン（豊田合成等）、高感度センサー（**TDK**等）といった日本の部材・計測技術こそが、世界のフィジカル**AI**の成否を握っているのです」と繋ぐと、そのまま第3章（先端部材とDFAの共進化）へ極めてスムーズに入ることができます。

第3章 フィジカル**AI**実装を支える「先端機能性部材・センシング・車体側設計（**DFA**）」の共進化

3.1 ロボット側の進化を支える**3**大コア部材技術（触覚電子皮膚・力覚**/**磁気センサ・内蔵極細ケーブル）

近年の具身知能・ヒューマノイド開発の焦点は、単純な関節自由度や演算規模の競争を脱し、「ハードウェア本体の長期信頼性、触覚・力覚の分解能、および固有感覚の統合」へと完全に移行している。この進化を根底で支えるのが以下の3つの先端部材・センサ技術である。
第1は、「指先・手のひらの3次元曲面をシームレスに覆う柔軟触覚センサ（電子皮膚）」である。Figure 02の片手16自由度ハンドやWalker S2の片手11自由度ハンドのように人間の手と同等サイズの多指霊巧手で柔軟物を操るには、指尖・指腹・手掌の異なる曲率面に密着実装でき、垂直方向の圧力だけでなく「せん断力（Shear force）と滑り出し（スリップ）」を検知できる多モーダル電子皮膚が不可欠である。技術路線としては、1次元法線力のみで感度閾値が10 g程度にとどまる低コスト圧電抵抗式から、静電容量式、圧電式、磁気式、光学式（GelSight等）、および指先用超薄型「感算一体」多維触覚センサへと高度化が進んでいる。最新のロボット搭載電子皮膚は、圧力感度0.01 N/cm2、サンプリング周波数100 Hz〜1000 Hz、繰り返し寿命100万回以上、さらには温度検知機能まで統合している。日本勢では、豊田合成が開発した次世代誘電ゴム「e-Rubber」（絶縁エラストマー薄膜を2枚の柔軟電極で挟み、圧力による変形・静電容量変化を捉える高感度センサ機能と、電圧印加で伸縮振動するハプティクス機能を兼備）のような高分子材料技術が、高耐久なロボット電子皮膚や遠隔操縦者への触覚フィードバックデバイスへの展開において大きなポテンシャルを有している。
第2は、「過負荷に強い小型6軸力覚センサと、固有感覚を司るTMR磁気センサ・IMU統合モジュール」である。ロボットの手首・肘・足首に配置される力覚センサ（川崎重工業のKaleido第8世代以降は手首・足首に加え肘にも小型軽量力覚センサを搭載し前腕への力・モーメントを直接検出）には、微細なこじりを捉える分解能（協働機Rizon 4sでは0.03 N精度）とともに、周辺治具との接触衝撃に対する堅牢性と温度・経年ゼロ点ドリフトへの運用中キャリブレーションが不可欠となる。さらに全身バランス制御とQDD関節制御を数十ミリ秒周期で成立させる固有感覚の要が、関節角度センサと分散配置型IMUである。TDKがHDDヘッドの薄膜スピントロニクス技術を応用した「TMR（トンネル磁気抵抗効果）角度センサ」（厚さ1〜2 nmの極薄絶縁層を2層の強磁性体層で挟んだ薄膜素子：TAD2141等）は、ホール素子やAMR技術に比べて圧倒的な高感度・低消費電力・磁場ショック耐性を備え、広い温度領域で温度補正処理なしに安定した絶対角出力を維持し、振動環境でも出力振幅が変化しない車載ASIL対応の信頼性を実現している。さらにTDKは低消費電力6軸IMUと3軸TMR磁気センサをオンチップ9軸センサフュージョンソフトウェアで統合した「PositionSense」をヒューマノイド・フィジカルAIデバイス向けに提供しており、2030年に向けた「関節モジュールへの位置・トルク・IMU・温度・振動センサ完全統合」の中核を担って

いる。
第3は、「数百万回の多軸複合屈曲・捻回に耐える関節内蔵用極細ロボットケーブルとシールド設計」である。Figure 02が第4世代16自由度ハンドを含む全配線の「機体・手首完全内蔵化（Internal routing）」を実装した通り、狭隘な車体内部へ入るロボットでは外部露出配線の引っ掛かりを排除するため、中空関節や指内部へのケーブル内蔵が必須となっている。この内蔵ケーブルには±90度以上の屈曲・摺動・首振り・捻回（トーション）が複合して加わる上、大電流サーボ電源線と高速カメラ・触覚通信線（特性インピーダンス整合とA.C. 2000 V耐電圧等の絶縁信頼性が要求される）を高密度に収容しなければならない。この分野でプロテリアル（プロテリアルケーブルソリューションズ）等の日系メーカーは、滑性難燃エラストマー絶縁材料の採用とケーブル撚り合わせピッチの工夫により、従来の汎用高屈曲ケーブル（ORPケーブル）比で約20%の細径化を実現しつつ、従来のフッ素絶縁ロボットケーブル比で摺動・捻回ともに50%以上の耐屈曲性能向上と105度耐熱仕様を達成しており、フィジカルAI機体の稼働寿命を左右する戦略部材となっている。

3.2 車両側の組付け容易性設計（DFA）革命：ゾーンアーキテクチャ・48V・硬質バスバー・FPC化

【★】どれほどロボット側の認識・制御が高度化しても、「人間の手作業を前提に設計された総延長数kmの複雑なワイヤーハーネス」をそのままロボットで扱おうとすれば設備投資とサイクルタイムが肥大化する。いま世界のEV生産技術で進行している本質的転換は、「ハーネスおよび車体設計自体をロボットに歩み寄らせる（The harness has to move closer to the robot）」という車両側DFA（Design for Assembly）の抜本改革である。
このDFA改革を牽引してきたテスラは、「Model S」で約3 kmあったワイヤーハーネス総延長を「Model 3」で約1.5 kmへ半減させ、さらにロボットマニピュレーションに適した剛性配線システム特許とともに長期目標「100 m」を掲げた。この思想を量産車で具現化したのが「Cybertruck」で導入された「48Vミッドボルテージ冗長システム」と双方向ギガビットリング通信「Etherloop」である。従来の12V系を48V化することで同一電力に対する電流値を4分の1に下げて電線を大幅に細径化（4ゲージから10ゲージ相当への縮小等）し、物理ヒューズを半導体「デジタルeFuse」へ全面置換するとともに、アーク対策を施した水色の48V専用標準コネクタへ統一した。さらにPower over Ethernet（PoE）概念で通信と給電を統合したEtherloopが従来の1対1配線を排除した結果、ワイヤーハーネス重量は約70%削減されたと報告されている。またCybertruckの公式サービスマニュアルおよび純正部品構成からは、高電圧・中電圧幹線に10 mmソケット（締付トルク6.5～9 Nm、接触抵抗管理値0.050～0.195 mΩ）でロボットが確実にボルト締結できる「硬質バスバー（Busbar）」と、形状が平面で安定する「FFC（フレキシブルフラットケーブル）／FPCバックボーンハーネス」が積極採用されていることが確認できる。
同様のゾーンE/E統合と車体構造DFAは、極氪の純電「SEA（浩瀚）アーキテクチャ」および派生プラットフォーム「浩瀚-M」「浩瀚-S（900V高圧・48Vアクティブスタビライザー等対応）」にも明確に見て取れる。ゾーンアーキテクチャ化により、かつて車両全体に跨っていた巨大ハーネスはゾーン単位の「コンパクトな短尺サブハーネス」へと分割され、ルーフパネル、インパネ、ドア、アンダーボディ等の各モジュールへサブラインで事前自動組付けした後、メインラインではあたかもレゴブロックを組み合わせるようにゾーン間を結合する分散組立方式へと移行している。さらに極氪「MIX」（浩瀚-M採用）は、2000 MPa超高張力鋼柱を前後の電動対開きスイングドア内部に内蔵する「隠蔵式デュアルBピラー」を量産初採用し、固定Bピラーの遮蔽がない最大幅1.48 m・段差ゼロ・床面地上高390 mmの広大な側面開口空間を実現した。このピラーレス大開口は、総装ラインにおいてヒューマノイドや多腕ロボットが車体ピラーとの肘干渉なしに車室内へ直接アクセスできる極めて有利なDFA環境を提供している。加えてコネクタ業界でも、TE Connectivity等が「DIN 72036規格（Automation-Ready端子・コネクタ：0.50 mm～9.5 mm）」を標準化し、ロボットグリッパーによる一貫した精密把持を可能にする外形ジオメトリ統一と別体部品削減を進めており、製品設計とロボット制御の融合が加速している。

第4章 全14巻横断総括：日米欧中「5大フィジカルAI実装モデル」の最終比較マトリクス

本シリーズ全編で解剖してきた日米欧中5陣営の実装アプローチは、足回り機構、関節駆動方式、AI推論アーキテクチャ、安全設計、および経済性ロジックにおいて明確な戦略的分岐を示している。

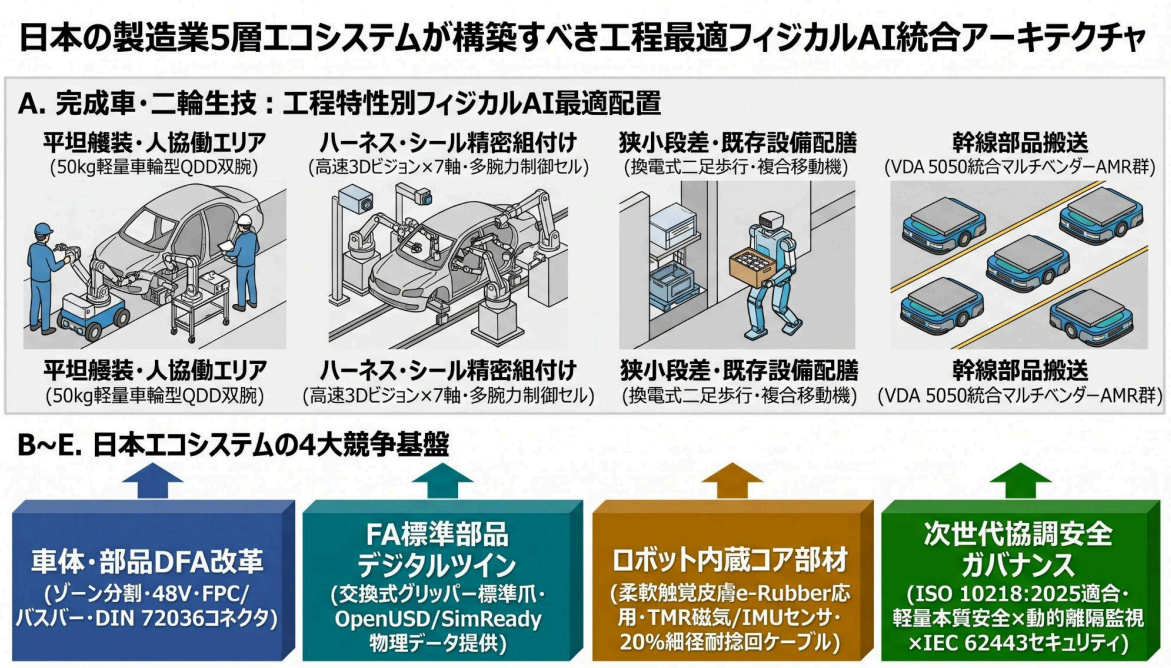
以下に、プロローグおよび第1部～第4部の検証結果を統合した「日米欧中 自動車工場フィジカルAI実装5大モデル 横断比較マトリクス表」を示す。

実装モデル・導入拠点	機体機構・駆動・インフラ	AI知能・認識・制御基盤	機械安全・連続稼働設計	対象工程・経済性評価
トヨタ「ELEY」（日本・世界60工場更新構想）	全方向移動車輪＋昇降身体＋肩甲骨軸双腕、本体約50kg超軽量、全軸低減速比QDD（10対1以下、ベルト・ワイヤ不使用）	TRI大規模行動モデルLBM（Diffusion Policyで1.6秒先16ステップ行動生成、事前学習で追加学習データ3～5分の1削減）	高バックドライバビリティで接触外力を逃がす機械的柔軟性、柵レス協働志向（工具・挟まれはISO10218:2025評価必須）、車輪で静止電力抑制	人の隣で行う艤装・非剛体倣い作業に適応、2028年以降年1兆円規模の工場・ロボット計40万台更新報道の中核候補（単体価格・可搬重量は未公表）
米国BMW（スパータンバーグ工場）×Figure AI（Figure 02／03）	二足歩行（約170cm・70kg・可搬20kg）、片手16自由度第4世代ハンド、全配線完全内蔵、2.25kWhバッテリー搭載	自社開発オンボードVLA「Helix」（デュアルNVIDIA RTX GPUでローカル推論、上半身を200Hz直接制御、ゼロショット把持対応）	ISO/TS 15066準拠の安全ゾーン運用、アンドン・MES連携、約5時間稼働・約90分自動ドッキング充電（Figure 02は2025年11月退役発表）	車体ショップ溶接治具への板金投入（ミリ単位精度、84秒サイクル中37秒投入）、11カ月で稼働1250時間超・9万部品投入・X3等3万台超に貢献（目標精度99%超、外部調査で03移行時98.7%報告）
欧州メルセデス（ケチケメート・ベルリン等）×Apptronik（Apollo／Apollo 2）	モジュール式二足歩行および車輪ベース選択可（約173cm・73kg）、高可搬質量25kg、LED・胸部表示状態伝達	遠隔操縦データ収集と自律制御の段階的統合（2026年6月発表のApollo 2をデータ収集機と位置付けApollo 3で本格商用化）	1パック4時間稼働のホットスワップ電池を5分未満で交換し継ぎ足し充電・有線給電併用で1日22時間連続稼働設計	既存ブラウンフィールド工場の狭小通路・段差環境における通い箱配膳・サブ組付け搬送、2023年時点の量産目標単価5万米ドル（現行商用価格・稼働実績数値は非公表）
欧州BMW本国・デブレツェン（iFACTORY：STR＋SimReady＋AIQX）	自社開発薄型AMR「STR」（第1世代550kg、第2世代最大1トンロールコンテナ搬送、世界800台超でフォークリフトレス化）	NVIDIA Omniverse上のOpenUSD／SimReady物理アセット（摩擦・慣性・HiLミリ秒PLC同期）＋VDA 5050群管理＋AIQX自動検査	レーザースキャナ・ソフトバンパ搭載（ISO 3691-4準拠）、量産2年以上前にデジタルヒューマン含め仮想空間で干渉・安全距離を事前検証	工場内物流の完全自律化（レーゲンスブルクで1日約1万回搬送、VDA 5050統合の業界試算で異機種フリート台数22%削減効果）とAIQX品質検査の100%自動化推進
中国極氪（寧波5Gスマート工場）×UBTECH（Walker S1／S2／S3）＋多腕協調	二足歩行（S1は172cm・76kg・41自由度・可搬15kg・関節最大300N・m、S2は52自由度・自律換電）＋工場5G網（将来5G RedCap統合）	群脳ネットワーク「BrainNet」（DeepSeek-R1具身推論「超脳」＋1億級産業RAG知識庫＋Transformer端側「スマート小脳」＋IoH網）	多機協調時の動的経路管理、S2の自律換電による24時間不間断稼働設計、S3で末端力制御を高精度化し軟性ハーネス挿抜へ拡張	総装・SPS計器仕分け・ドア組立・車内品質検査（精度99%超）等に数十台を同時投入、複数新興EV工場で1万時間超の実訓データを高速蓄積

4.1 5大モデルの工学的トレードオフ解析：車輪対二足、エッジ完結対クラウド群知能

第1の構造的対立軸は、「足回り機構とエネルギー効率・反力安定性の選択（トヨタELEY・BMW STRの車輪路線 対 米欧中の二足歩行路線）」である。Figure 02、Apollo、Walker S1のような身長170 cm級・質量70～76 kgの二足歩行機は、人間向けに作られた階段・段差・狭小通路を設備改修なしでそのまま使える利点を持つ。特に米国BMWスパータンバーグ工場におけるFigure 02の11カ月パイロット（2025年11月完了発表）では、従来の5 mm級のラフな搬送ではなく、溶接治具のロケートピンに対してミリ単位の精度（accurately to the millimetre）で3枚の板金パーツを84秒タクト中37秒以内にセットし続け、月曜から金曜の10時間シフトで累計120万歩以上を歩行し3万台超のX3生産に貢献した点は歴史的マイルストーンと評価できる。しかし二足歩行機は立位維持と歩行自体に大きな電力を消費し（Figure 02は2.25 kWh搭載で約5時間稼働に対し約90分充電が必要）、これを補うためにApptronik Apollo（5分未満の手動・簡易ホットスワップ換電）やWalker S2（自律バッテリー交換）のような複雑な換電インフラを要する。さらに75 N近いコネクタ挿入力や硬いゴム部品の押し込み反力を片腕で発生させる際、車輪ベースに比べて足裏支持多角形が小さい二足歩行機は転倒モーメント補償の演算・トルク負荷が大きい。
これに対し、トヨタELEY（寸法478×450×939～1,619 mm、質量50 kg）が採った「全方向移動車輪＋昇降機構＋全軸QDD（減速比10:1以下）」は、工場床面が平坦である限り停止時の保持電力と反力安定性で圧倒的に有利であり、万が一の接触時にも50 kgの低質量とワイヤ・樹脂ベルトを介さないQDDの高バックドライバビリティ（力の逃げ道）によって安全柵レス協働への適合性を高めている。ただし、報道された「2028年以降毎年1兆円投資・トヨタグループ15万台＋サプライヤー25万台の計40万台ロボット更新構想」は工場刷新全体の投資枠であって全数がELEYと確定したわけではなく、また低減速比QDDにおける高いモータートルク密度要求・長期信頼性・手先位置再現性、およびLBMファインチューニング時の単一タスク専用モデルに対する性能ばらつきなど、量産化に向けた技術課題も率直に指摘されている。
第2の対立軸は、「AI推論・通信・デジタルツイン基盤の設計思想」である。Figure AIは2025年2月にOpenAIとの提携を終了して自社開発VLA「Helix」へ切り替え、外部通信遅延に左右されない機体搭載デュアルNVIDIA RTX GPUでのローカル200 Hz制御と「単一工程（板金投入）への徹底集中」で早期の量産ライン稼働を成し遂げた。一方、中国・極氪×UBTECHは5Gスマート工場環境を活かし、クラウド・エッジ・端末を跨ぐ群脳ネットワーク「BrainNet」（DeepSeek-R1ベースの具身推論大模型と1億件規模の産業データRAG知識ベースを持つ「スーパーブレイン」＋Transformer端側小モデルの「スマート小脳」）によって数十台のWalker S1を面的に協調制御するアプローチを採っている。なお極氪工場のプライベート5GにおけるUPF／MEC構成の具体的な実測遅延値は一次公開資料では非開示であるものの、中国の製造工場5G導入事例ではデータ伝送遅延が従来の数十～200 msから25 ms～数ms台へ短縮された実績が報告されており、UBTECHも次期路線図に低遅延クラスタ協調用の5G RedCapモデム統合を明記している。そして欧州BMW本国（iFACTORY）は、ハンガリー・デブレツェン新EV工場（約1.4平方km）等で量産2年以上前からNVIDIA OmniverseとOpenUSD／SimReady（質量・重心・摩擦係数・衝突メッシュ・HiLミリ秒PLC同期を含む標準仕様）による完全仮想検証を実行し、現場では800台超のSTRとVDA 5050標準インターフェース、およびAIQX自動品質検査で工場全体のデータ構造を標準化する「アーキテクチャ支配戦略」を貫いている。

【★】第5章 日本の製造業エコシステム（5つのプレイヤー層）が取るべき実践ロードマップと勝ち筋



全14巻の総括から導かれる日本の製造業エコシステムの全体構想は、上下2階層の有機的統合アーキテクチャとして定義できる。すなわち上層（完成車・二輪の工場フロア）においては、全工程を単一の人型ロボットに委ねるのではなく、工程の物理的制約に応じて「平坦床・人近接艤装エリアの50 kg級車輪型QDD双腕協働機」「サブライン・狭小ハーネス配策の高速3Dビジョン×7軸・多腕力制御セル」「既存建屋・段差キッティングの換電式二足歩行／車輪複合機」「幹線部品物流のVDA 5050統合AMR群」を適材適所で使い分ける。そして下層（産業競争力基盤）において、日本勢が強みを持つ「ゾーン・FPC化等の車体DFAモジュール」「OpenUSD／SimReady対応FA標準部品」「柔軟触覚皮膚・TMR磁気センサ・極細耐捻回ケーブルの機体内蔵コア部材」「ISO 10218:2025準拠の軽量本質安全×動的監視ガバナンス」の4大基盤を構築し、自国工場の自動化とグローバルロボット市場への部材・標準供給を同時に制する構造である。

5.1 日本の製造業プレイヤー別 技術・事業アクションプラン一覧表

日本の産業界を構成する5つのプレイヤー層が直面するリスクと、短期（1～2年）・中長期（3～5年）で実行すべき具体策を「日本の製造業プレイヤー別 技術・事業アクションプラン一覧表」にまとめる。

プレイヤー層（想定企業群）	構造変化と直面リスク	短期着手施策（1～2年）	中長期の勝ち筋（3～5年）	重点KPI・標準化標的
A. 完成車・二輪生技部門（ホンダ・三菱自・カワサキモータース等）	艤装工程の人手不足深刻化と海外勢のゾーンDFA・仮想立ち上げ先行によるコスト格差	工程別選定基準の策定と単一タスク（SPS仕分け・サブハーネス結合）への車輪型協働機・3Dビジョン力制御セル試験導入	次期車台でのゾーン分割・48V・硬質バスバー／FPC・DIN 72036コネクタ採用とSimReady仮想ライン検証の全面標準化	艤装自動化率の段階的倍増、ハーネス重量・延長50%以上削減、現地立ち上げ工数30%短縮
B. 国産ロボット・FA開発（川崎重工業・エトリア等）	高減速比・位置制御単腕機の価格競争激化と米中勢のVLA／群知能データ収集速度	既存の双腕・7軸・遠隔操縦資産（duAro・Kaleido・バーチャルツイン）と高速3Dビジョン・力制御パッケージ	高トルク密度QDD関節の実用化、HMD遠隔操縦を活用した産業特化LBM学習基盤構築、分解容易設計	コネクタ力制御嵌合成功率99%超、設備コスト40%減・設置面積半減、遠隔異常復帰の迅速化

プレイヤー層（想定企業群）	構造変化と直面リスク	短期着手施策（1〜2年）	中長期の勝ち筋（3〜5年）	重点KPI・標準化標的
		の統合展開	（DFD）再生ライン外販	
C. 部材・ビジョン・センサR&D（豊田合成・プロテリアル・倉敷紡績・TDK等）	車両ゾーン化による従来型長尺ワイヤーハーネス減少とロボット搭載新部材市場の急拡大	誘電ゴムe-Rubber・細径耐捻回電線・レーザー3D視覚・TMR／IMU技術を世界のロボット開発企業へ評価キット供給	「ロボットに組付けやすい車載モジュール」と「世界中の人型機・霊巧手に内蔵される神経・皮膚部材」の二正面デファクト獲得	触覚皮膚耐久100万回超、内蔵ケーブル20%細径・捻回寿命1.5倍、関節TMR・IMU世界シェア首位
D. FA標準部品プラットフォーマー（ミスミ等）	汎用ハンド＋3Dビジョン普及に伴う「車種専用固定位置決め治具」の発注減少リスク	交換式グリッパー標準爪・二爪ハンド周辺部品・触覚取付アダプタおよびVDA 5050移載ステーション標準部品の拡充	カタログ標準部品へのOpenUSD／SimReady物理属性（質量・摩擦係数・衝突メッシュ）付与によるデジタルツイン起点の調達ロックイン	SimReady物理データ対応部品の体系的拡充、仮想ライン検証から実部品ワンクリック発注への直結
E. 機械安全・労働安全機関（労働安全衛生総合研究所等）	ISO 10218:2025改訂への現場対応遅れと二足歩行・AI自律機の転倒・通信途絶リスク	協働アプリケーション単位のリスク評価手法（ISO/PAS 5672接触圧測定・非定常作業・IEC 62443セキュリティ）の国内指針整備	日本強みの「軽量・QDD本質安全」と海外勢の「動的離隔監視・無線フェイルセーフ」を統合した移動・人型機の新国際安全基準主導	転倒運動エネルギー・動的安定性評価基準の国際標準化提案と国内労安衛則通達のアップデート

5.2 各プレイヤー層への深掘り技術・事業提言

(A) 完成車・二輪メーカーの生産技術部門（ホンダ、三菱自動車、カワサキモータース等）

完成車および二輪車の生産技術部門がまず徹底すべき原則は、米国BMW×Figure 02パイロットの最大の成功要因であった「導入初期は単一かつ計測可能なタスク（Narrow Task Scope）に絞り込み、MES作業指示連携・車両別品質記録・アンドン連携を含む運用完遂率を99%水準まで固めること」である。その上で、以下の4段階の「工程別技術選定ディシジョンツリー」に基づき設備投資を振り分けるべきである。

1. 高タクト・剛体ワーク・定位置工程（車体溶接、シャシー合装、ガラス塗布搭載、外観隙間・段差検査）：ミリ秒を争う定型高速ラインには人型機を投入せず、高剛性産業用ロボットと3D AIビジョン（全車60秒以内・±0.1 mm級のギャップ＆フラッシュ全数検査等）で自動化率100%を追求する。
2. 工場内幹線・準幹線物流（パレット・最大**1**トン級ロールコンテナ搬送）：ベンダーごとの専用フリート管理システム乱立による交差点デッドロックと遊休車両発生を防ぐため、次期AMR／AGF調達要件に「VDA 5050（MQTT／JSON通信標準、最新版v3.0.0は2026年3月公開）」準拠を指定し、単一の上位マスター制御下で車両容量をプール化する（異種3ベンダー統合の業界試算では必要台数を18台から14台へ22%削減可能）。ただし「VDA 5050対応」表記があっても実機ファームウェア間で座標系や必須フィールド解釈の微細なズレが生じる現実があるため、導入時にメーカー技術者との通信検証手順を必ず織り込む必要がある。
3. 既存建屋（ブラウンフィールド）の段差・狭小通路を含む**SPS**配膳・キッティング：建屋改修が困難で人間と同じ動線・階段を使う必要がある物流・配膳領域に限定し、5分未満のホットスワップ換電機能を持つ二足歩行機（Apollo型）または平地車輪走行＋現場立位作業の複合移動機（Kaleido移動装置型）を検討する。
4. 平坦床での人近接トリム艤装・二輪車狭小フレーム配策・サブライン精密結合：作業者の

隣で行うインライン艤装には、静止消費電力が小さく押し込み反力と接触安全性に優れる「約50 kg軽量・全方向車輪・全軸QDD双腕協働機（ELEY型）」を導入する。さらに、二輪車（カワサキモータース、ホンダ二輪等）のようにフレーム周りにワイヤーハーネスやホースが密集・露出する製品や、四輪のインパネ・ドアサブラインには、死角の少ない7軸協働アームや双腕・多腕機構に高速3Dビジョン（XY分解能0.04 mm）と繊細な力覚・触覚ハンドを統合したパッケージセル（KURAVIZON／Kurassem型）を優先配置する。

同時に生技部門は車両設計部門に対し、ゾーンコントローラによる短尺サブハーネス分割、48V・デジタルeFuse化、硬質バスバーおよびFFC/FPC幹線の採用、DIN 72036自動化対応コネクタへの統一、および車体開口部の拡大といった「ロボット組付けDFA要件」を次期プラットフォーム開発の設計審査（DR）基準として制度化しなければならない。

(B) 国産ロボット・**FA**システム開発企業（川崎重工業、エトリア等）

国産ロボット・FA開発陣は、長年培った高減速比・高剛性ロボットの圧倒的な信頼性資産を活かしつつ、フィジカルAI時代の新たな制御・設計基盤へと拡張を図るべきである。川崎重工業はすでに人間と同空間で稼働する双腕スカラロボット「duAro」（累計2,000台超販売）の量産実績に加え、2015年から開発を継続してきたロバストヒューマノイド「Kaleido」において、マグネシウム合金骨格と3Dプリント樹脂外装による軽量・高剛性化、手首・足首・肘への力覚センサ搭載、数千体並列シミュレーションによるAI強化学習、HMDを用いた直感的なリアルタイム遠隔操縦、さらには平地を車輪で効率移動し作業現場で立ち上がる移動装置構想（第9世代Kaleido 9）という極めて現実的かつ重厚な技術資産を有している。また、リコー・東芝テック・沖電気工業の生産技術を統合して2024年7月に発足したエトリア（ETRIA）は、クラウド版3DEXPERIENCE（DELMIA）上のバーチャルツインで日本の開発陣が海外量産拠点（中国・タイ等）の自動化組立ラインをリモート設計・検証し、従来ライン比で稼働率3.2%向上・設備コスト42%削減・ライン設置面積半減・現地出張立ち上げ作業時間約30%短縮という卓越した成果を上げるとともに、「分解しやすい設計（修理・再生ビジネス対応）」という循環型モノづくりを打ち出している。

両社をはじめとする国産FA勢の勝ち筋は3つある。第1は、既存の高減速比位置制御機に加え、トルク密度18 Nm/kg級・低減速比10:1以下の高耐久QDD関節モジュールと、双腕・4腕間の張力をリアルタイム調停する協調力制御パッケージを製品群に組み込むことである。第2は、Kaleido 9や遠隔操作システムSuccessorが掲げる「定常作業＝AI自律、非定常・高度作業＝遠隔人間操縦」のハイブリッド運用を、現場の異常復帰手段にとどめず「熟練者の遠隔介入時の視覚・力覚・触覚データを自動蓄積してLBM／Diffusion Policyを継続学習させるデータ収集エンジン」として外販することである。第3は、エトリアのバーチャルツイン標準化力と柔軟フラットケーブル自動組付けニーズを掛け合わせ、精密機器・車載モジュールの組立だけでなく、使用済み製品やEV部品からハーネス・コネクタを非破壊で取り外す「自動分解・リマニュファクチャリング（Disassembly）自動化ライン」のグローバル市場を先制開拓することである。

(C) 自動車部品（内外装・ハーネス）・**3D**ビジョン・機能性材料**R&D**企業（豊田合成、プロテリアルケーブルソリューションズ、倉敷紡績、**TDK**等）

日本の部材・ビジョン・センサ**R&D**企業は、「完成車メーカー向けのロボット対応モジュール供給」と「世界中のロボットメーカー向けのコア感覚・神経部材供給」という二正面市場獲得戦略を直ちに起動すべきである。車載部品側では、豊田合成が実用化を進める高リサイクル材配合ウェザーストリップや内外装品において、ロボットハンドが確実に把持・打込みできる断面剛性設計やガイド構造を組み込み、プロテリアル（プロテリアルケーブルソリューションズ）等の電線・ハーネス陣営は48V・ゾーンE/Eアーキテクチャに対応した細径通信線・バスバー複合体への高付加価値シフトを進める。

それ以上に巨大な成長余地を持つのがロボット本体向けの部材市場である。豊田合成の誘電ゴム「e-Rubber」が持つ薄膜圧力センシングとハプティクス機能は、多指霊巧手の3次元曲面に実装する100万回耐久クラスの柔軟触覚電子皮膚および協働ロボットの衝撃吸収スキンとして極めて高い競争力を持つ。プロテリアルの滑性難燃エラストマー採用・耐捻回ピッチ設計による「従来比約20%細径化・摺動捻回性能50%向上」のロボットケーブル技術は、中空QDDアクチュエータや16自由度級ハンドの完全内蔵配線における断線・ノイズ問題を解決する決定打となる。倉敷紡績は「KURASENSE」のXY 0.04 mm分解能・バラ積み電線認識・圧着端子3D回転位相算出

アルゴリズムを、双腕・ヒューマノイド手首搭載用の超小型ビジョンモジュールおよび物理シミュレータ連携ソフトウェアとしてライセンス展開できる。そしてTDKは、温度補正不要で振動・磁場ノイズに強い関節モータ用「TMR角度センサ」と、6軸IMU＋3軸TMR磁気センサをオンチップ融合した「PositionSense」を次世代関節統合モジュールの中核センサとして世界各国のロボットOEMへ標準採用させ、最終機体の勝敗に関わらず高収益を確保するポジションを確立すべきである。

(D) FA標準部品・治具プラットフォーマー（ミスミ等）

3Dビジョンと汎用多指・二爪ハンドの普及により「車種専用の大型固定位置決め治具」が削減される構造変化は、国内外3,324メーカー・2,070万点以上の商品と豊富なCADデータ供給基盤を持つミスミ等のFA標準部品プラットフォーマーにとって、ビジネスモデルを進化させる絶好の転換点となる。第1の施策は、固定治具から「ロボットエンドエフェクタ周辺の交換式モジュール標準部品」への軸足シフトである。具体的には、電線位相合わせやDIN 72036コネクタ把持に最適化された交換式グリッパー爪（二爪・多爪用フィンガー）、触覚センサ・小型3Dカメラの手首マウントブラケット、機械的コンプライアンス（フローティング）機構、およびVDA 5050搬送車の移載ドッキングターゲット部品を標準体系化し、1個からの即時手配需要を取り込む。
第2のより決定的なプラットフォーム戦略は、「全カタログ標準部品のOpenUSD／SimReady物理アセット化」によるデジタルツイン上流工程の掌握である。従来のSTEP等の3D CADデータは単なる視覚形状データであり、NVIDIA OmniverseやIsaac Sim上でフィジカルAIの把持学習やHiLライン検証を行うには、質量・重心・慣性テンソル・静止／動摩擦係数・反発係数・可動軸制限・計算最適化された衝突メッシュ（Collider）・AI認識用セマンティックラベルを含む「SimReady（USDPhysics）」仕様への変換が不可欠となる。標準部品プラットフォーマーがいち早く自社のグリッパー爪、チャック、アルミフレーム、コンベア部品群を検証済みSimReadyデータとして提供すれば、世界中のロボット開発者と完成車生技部門は仮想空間でのロボット訓練・ライン設計段階からその標準部品を組み込むようになり、仮想検証完了と同時に実機部品がそのまま一括発注される強力なエコシステム・ロックインが完成する。

(E) 機械安全・労働安全衛生ガバナンス（労働安全衛生総合研究所等）

フィジカルAIを日本の製造現場へ安全かつ迅速に社会実装するための制度的要諦が、2025年2月に発行された改訂国際安全規格「ISO 10218-1:2025（ロボット本体）」および「ISO 10218-2:2025（ロボットシステム・統合）」への的確な対応と、次世代移動・人型ロボット安全基準の主導である。労働安全衛生総合研究所の調査研究でも整理されている通り、2025年版ISO 10218は旧ISO/TS 15066を統合し、安全評価の対象を「協働ロボット単体」から「ハンド形状・保持ワーク（重量・鋭利さ・温度）・動作速度・周辺設備との挟まれ・非定常作業（トラブル復旧・段取り替え・保全）まで含めた協働アプリケーション全体（Collaborative Application）」へと拡張するとともに（接触時の力・圧力測定はISO/PAS 5672:2023準拠、停止監視の名称はMonitored standstillへ変更）、ネットワーク接続に伴う「IEC 62443対応のサイバーセキュリティ要件（Security by Design）」を新たに規定した。
一方で、現行のISO 10218:2025は据置型の産業用ロボットを基本前提としており、二足歩行ヒューマノイドや自律移動マニピュレータに固有の危険源――とりわけ「動的バランス崩壊による機体転倒（身長1.7～1.8 m・質量70～80 kgの機体が転倒した際の重力位置エネルギーは物理計算上600～1,000 J超に達し、従来の動力・力制限PFLの接触許容値を大幅に超える重大リスクとなる）」「歩行移動中のワーク・工具落下」「AIモデルの推論不確実性や5G／無線通信遅延」――を単独では扱いきれない課題が残されている。したがって日本の労働安全研究・行政機関は、国内の労働安全衛生規則第150条の4および関連通達の運用指針をアップデートしつつ、以下の3層を統合した次世代安全基準を国際標準化場裏へ提案すべきである。

1. 第**1**層（物理的本質安全設計の定量評価）：トヨタELEYのような本体50 kg以下の軽量設計、転倒危険源を構造的に排除する低重心車輪ベース、全軸QDDによる受動的バックドライバビリティ、および柔軟触覚・衝撃吸収スキンによる接触圧力低減（ISO/PAS 5672適合）をリスク低減の最上位階層として評価する基準の策定。
2. 第**2**層（移動ロボット規格と協働安全機能の動的統合）：AMR安全規格（ISO 3691-4）とISO 10218:2025の速度・離隔監視（SSM）およびMonitored standstillを組み合わせ、二足歩行・複合移動機の重心速度・踏み出し予測領域および万が一の転倒到達半径を包絡し

た「動的保護領域（Dynamic Separation Distance）」の算出・検証プロトコルの確立。

3. 第**3**層（**AI**・無線ネットワークのハードウェア・フェイルセーフとセキュリティ）：クラウド群知能（BrainNet型）やVDA 5050無線制御における通信途絶・遅延、あるいはVLA／LBM推論の異常出力に対し、機体ローカルの安全関連制御系が数十ミリ秒以内に検知して安全減速・停止（および停電時の関節保持ロック）へ移行させる独立安全監視層と、IEC 62443準拠の通信認証要件の標準化である。

日本の強みである現場起点の生産技術（DFA・カイゼン）、精密メカトロニクス、世界トップシェアの機能性部材・センサ、FA標準部品デジタル基盤、そして本質安全ガバナンスが一体となったとき、自動車最終組立「最後の聖域」の自動化は、日本の製造業エコシステムが世界のフィジカルAI時代を牽引する最強の成長エンジンとなる。

主要参照文献・一次公開資料一覧

1. 極氪（**Zeekr**）**× UBTECH**「**Walker S1/S2/S3**」・群知能**BrainNet**・中国協働ロボット関連
   - 新浪財経「国内人形機器人第一股優必選発布全球首例多台、多場景、多任務人形機器人『群体智能』協同作業案例（極氪5G智慧工場・BrainNet詳細）」(2025-03-08) https://finance.sina.com.cn/roll/2025-03-08/doc-inenxqvf4745882.shtml
   - UBTECH Robotics公式「優必選工業人形機器人汽車製造ソリューション（検査精度99%超）」 https://www.ubtrobot.com/cn/humanoid/solutions/industry
   - 財聯社「優必選人形機器人Walker S進駐蔚来汽車工場実訓（車門鎖・安全帯・貼車標等）」 https://www.cls.cn/detail/1602283
   - 澎湃新聞「優必選Walker S1在極氪5G智慧工場実現多機協同、群脳ネットワークBrainNet解説」 https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_30341296
   - Xpert.Digital「UBTECH Walker S2 技術仕様（52自由度・11自由度霊巧手・自律換電・5G RedCap路線図）」 https://xpert.digital/zh-cn/%E4%BC%98%E5%BF%85%E9%80%89%E7%9A%84walker-s2/ および 智械網（Walker S3軟性ハーネス挿抜報道） https://www.ijikai.com/k/6395.html
   - 華沿機器人（Huayan Robotics）公式技術発表「双関節モジュール・7軸人形アームEcho/HY・双腕AI基盤FlexMind」 https://www.huayan-robotics.com/humanoid-arm および https://www.geekpark.net/news/354677
2. 柔軟線状物体（**DLO**）マニピュレーション・ビジョン×力制御・コネクタ嵌合学術論文および規格
   - arXiv:2606.22116v1 "DeformX: A Co-Simulation Framework for Deformable Linear Objects Integrating NVIDIA Isaac Sim with a Cosserat Rod Engine" (2026) https://arxiv.org/html/2606.22116v1
   - arXiv:2601.13979v1 "Topology-Aware Visual Representation and Autonomous Tactile Exploration for DLO Reconstruction" (2026) https://arxiv.org/html/2601.13979v1
   - ResearchGate / IEEE (Accepted Jan 2026) "Vision and Tactile Sensing for DLO Manipulation and Pin Insertion in Robotic Connector Assembly" https://www.researchgate.net/publication/400297278_Vision_and_Tactile_Sensing_for_DLO_Manipulation_and_Pin_Insertion_in_Robotic_Connector_Assembly
   - ResearchGate (2026) "A Review of Robotic Manipulation Solutions for Deformable Linear Objects: The Case of Wire Harnesses (Co-)Assembly by Robots" https://www.researchgate.net/publication/400308082_A_Review_of_Robotic_Manipulation_Solutions_for_Deformable_Linear_Objects_The_Case_of_Wire_Harnesses_Co-Assembly_by_Robots
   - NASA Technical Reports Server (NTRS) "Cosserat Elastic Rod Theory vs. Multibody Formulation for Cable Manipulation (PyElastica)" (2024) https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240000815/downloads/Quartaro_ASCE_EarthandSpace24_v2.pdf
   - Amphenol / SAE USCAR-2 Specification "Connector Mating Force (<=75 N),

Lock Retention (>=110 N), Audible Click (>=7 dB above ambient)" https://cdn.amphenol-cs.com/media/wysiwyg/files/documentation/s-ntb-001.pdf および https://docs.rs-online.com/4ebb/A700000008647414.pdf
    - I-PEX Connector Specification "Audible Click 60 dB(A) Min & Terminal Retention Specs" https://www.i-pex.com/sites/default/files/downloads/pdf/PRODSPEC_ISH%20CONNECTOR_PSS-0034_01_EN.pdf および Robotiq Click Detection Skill https://dof.robotiq.com/discussion/1056/detect-sudden-force-drops-with-the-new-click-detection-skill
3. 車両側ゾーン**DFA・48V**アーキテクチャ・先端部材・**3D**ビジョン技術資料
    - Automotive Manufacturing Solutions "Has the wire harness finally become robot-ready?" https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/automation/has-the-wire-harness-finally-become-robot-ready/2733395
    - Assembly Magazine "Tesla Develops Robot-Friendly Wiring Architecture" https://www.assemblymag.com/articles/95127-tesla-develops-robot-friendly-wiring-architecture
    - Tesla Official Service Manual "Cybertruck 48V Mid-Voltage Architecture & Busbar Procedures" https://service.tesla.com/docs/Cybertruck/ServiceManual/en-us/GUID-8055B3C3-DBB6-434E-AC2D-26B147B72761.html および T&M解説（48V・Etherloop） https://tm-co.co.jp/glossary/the-48v-redundant-system-used-in-tesla-s-cybertruck/
    - 極氪「浩瀚-M（SEA-M）アーキテクチャ・極氪MIX 隠蔵式デュアルBピラー技術解説」 https://www.zhenyes.com/auto/2451.html
    - TE Connectivity "Automation-Ready Technology (DIN 72036 Standard)" https://www.te.com/en/products/connectors/automotive-connectors/intersection/harness-automation.html
    - 倉敷紡績（クラボウ）公式「高速3Dビジョンセンサー KURASENSE / Kurassem / KURAVIZON 技術仕様」 https://www.kurabo.co.jp/el/kurasense/
    - 豊田合成株式会社公式「次世代誘電ゴム e-Rubber 技術・ウェザストリップ製品」 https://www.toyoda-gosei.co.jp/seihin/technology/report/vol59/pdf/vol59.pdf および https://www.toyodagosei-led.jp/ja/technology_products/e-rubber/
    - 株式会社プロテリアル公式「耐屈曲・耐捻回・細径ロボットケーブル技術仕様」 https://www.proterial.com/products/electrical_wire/robot.html および https://www.proterial.com/products/electrical_wire/pdf/1_21.pdf
    - TDK株式会社公式「ロボット関節向けTMR角度センサおよび6軸IMU＋3軸TMR統合PositionSense」 https://product.tdk.com/ja/products/sensor/angle/tmr-angle/technote/menu.html および https://www.tdk.com/ja/featured_stories/entry_076-motion-sensor-positionsense.html
4. 日米欧中フィジカル**AI**実装モデル・国内**FA**標準部品・国際機械安全規格（**ISO 10218:2025**）
    - Physical AI News「トヨタELEYの公式仕様・全軸QDD・TRI大規模行動モデル（LBM）と40万台更新投資報道検証」 https://physicalainews.jp/columns/toyota-eley-lbm-factory
    - Figure AI Official Release (Nov 19, 2025) "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 Press Release https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2024/humanoid-robots.html
    - Apptronik Official Release "Apptronik Unveils Apollo" https://apptronik.com/news-collection/apptronik-unveils-apollo および RoboZaps Apollo / Apollo 2 Review (2026) https://blog.robozaps.com/b/apptronik-apollo-review
    - BMW Group Newsroom "Smart Transport Robots (STR up to 1 ton) & Plant Regensburg Logistics" https://newsroom.bmwgroup.com/global/connected-flexible-autonomous-bmw-group-expands-use-of-innovative-technologies-in-production-logistics/ 、NVIDIA Case Study (OpenUSD / FactoryExplorer) https://www.nvidia.com/ja-jp/case-studies/bmw-group-develop/ 、および Fabrico "What is VDA 5050 AGV/AMR Interface" https://www.fabrico.io/blog/what-is-vda-5050-

agv-amr-interface/
- 川崎重工業公式「ヒューマノイドロボット Kaleido 8 / Kaleido 9 の進化と社会実装アプローチ」(2024–2026) https://kawasakirobotics.com/jp/blog/20260316_kaleido9/
- ダッソー・システムズ顧客事例「エトリア株式会社：3DEXPERIENCEバーチャルツインによる自動化組立ライン最適化」 https://www.3ds.com/ja/insights/customer-stories/etria-printing-equipment
- ミスミ公式カタログ「ロボットハンド・グリッパー爪 標準部品基盤」 https://jp.misumi-ec.com/vona2/result/?Keyword=%E3%82%B0%E3%83%AA%E3%83%83%E3%83%91%E3%83%BC+%E7%88%AA
- 厚生労働科学研究成果データベース（労働安全衛生総合研究所 池田博康ほか 2025年度報告）「協働ロボットに関する国際規格ISO 10218:2025と国内制度の関係整理」 https://mhlw-grants.niph.go.jp/system/files/download_pdf/2025/202522016A.pdf および ISO 10218:2025サイバーセキュリティ解説 https://www.ubiquitous-ai.com/column/security_vulnerability_verification/revision-of-ISO-10218-evolution-of-industrial-robot-safety-standards-and-security.html