



## ロボティクス産業における次世代統合システムの革新的展望：産業構造の根本的変革に向けた包括的分析報告書

Yu Murakami, New York General Group  
2025年12月

### 第一章：序論と問題意識の提示

#### 第一節：現代ロボティクス産業の歴史的位置づけ

現代のロボティクス産業は、産業革命以来の製造業の歴史において、第四次産業革命と呼ばれる大規模な構造転換の中核を担う存在として位置づけられている。一九六一年にゼネラルモーターズの工場においてユニメートが稼働を開始して以来、産業用ロボットは半世紀以上にわたり製造業の生産性向上に貢献してきた[1]。しかしながら、現在進行している変革は、従来の自動化の延長線上にあるものではなく、人工知能技術、センシング技術、通信技術の融合により、ロボットの能力と適用範囲を根本的に拡張するものである。

国際ロボット連盟の統計によれば、二〇二二年における世界の産業用ロボット稼働台数は約三百九万台に達し、過去五年間で約六十パーセントの増加を記録している[2]。この成長は、自動車産業や電機産業といった従来の主要需要産業における継続的な導入に加え、食品産業、物流産業、医療産業など、これまでロボット導入が限定期であった産業領域への展開が進んでいることを反映している。特に注目すべきは、協働ロボットと呼ばれる新たなカテゴリーの急成長であり、人間との直接的な協働作業を前提とした設計思想に基づくこれらのロボットは、従来の産業用ロボットとは異なる市場セグメントを形成しつつある。

日本のロボティクス産業は、一九八〇年代以降、世界市場において主導的な地位を維持してきた。フナック、安川電機、川崎重工業、不二越といった主要メーカーは、産業用ロボットの設計・製造において世界最高水準の技術力を有しており、特に自動車産業向けの溶接ロボット、塗装ロボット、組立ロボットにおいては、圧倒的な市場シェアを確保している。しかしながら、近年においては、中国メーカーの急速な台頭、欧州メーカーによる協働ロボット市場の開拓、そして米国企業による人工知能技術を活用した新たなソリューションの提案など、競争環境は大きく変化している。

本報告書は、このような産業環境の変化を踏まえ、日本のロボティクス産業が今後十年間においてるべき戦略的方向性について、技術的観点、市場的観点、政策的観点から包括的な分析と提言を行うものである。本報告書の特徴は、理論的な可能性の探求にとどまらず、現場における実装可能性と経済的持続可能性を重視した現実的なアプローチを採用している点にある。

### 第二節：問題意識と本報告書の目的

ロボティクス産業が直面している課題は多岐にわたるが、本報告書においては、以下の五つの問題領域に焦点を当てる。

第一の問題領域は、技術的進歩と実用化の乖離である。研究開発段階においては目覚ましい成果が報告される一方で、これらの技術が実際の製造現場において広く活用されるまでには、依然として大きなギャップが存在している。このギャップを埋めるためには、技術的な課題の解決だけでなく、導入・運用を支援するエコシステムの構築が必要である。

第二の問題領域は、中小企業における自動化の遅れである。日本の製造業において中小企業が占める割合は事業所数で九十九パーセント以上、従業員数で約七十パーセントに達しており、これらの企業における生産性向上は、日本経済全体の競争力に直結する課題である。しかしながら、中小企業におけるロボット導入率は大企業と比較して著しく低く、この格差を縮小するための施策が求められている。

第三の問題領域は、人材不足である。ロボットシステムの設計、導入、運用には、機械工学、電気工学、情報工学、そして対象産業の知識を併せ持つ複合的な人材が必要であるが、このような人材は極めて希少である。また、ロボット導入に伴い従来の作業が自動化される一方で、ロボットの運用・保守を担う人材への需要は増大しており、労働市場における構造的なミスマッチが生じている。

第四の問題領域は、国際競争力の維持・強化である。日本のロボティクス産業は、長年にわたり世界市場をリードしてきたが、中国をはじめとする新興国メーカーの追い上げは急速であり、特に価格競争力においては厳しい状況に直面している。この競争環境において日本企業が優位性を維持するためには、技術的差別化と新たな価値創出が不可欠である。

第五の問題領域は、社会的受容性である。ロボットの活用領域が製造業から医療、介護、サービス業へと拡大する中で、ロボットと人間の関係性に対する社会的な議論が必要となっている。特に、雇用への影響、安全性、プライバシーといった問題については、技術開発と並行して社会的なコンセンサスを形成していくことが重要である。

本報告書の目的は、これらの問題領域に対する現状分析を踏まえ、具体的かつ実行可能な施策を提言することにある。提言にあたっては、技術的実現可能性、経済的持続可能性、そして社会的受容性の三つの観点からの検証を行い、産業界、教育機関、政府の各主体が取るべき行動を明確化する。

### 第三節：報告書の構成

本報告書は、以下の構成により議論を展開する。

第二章においては、ロボティクス産業を支える技術的基盤の現状と課題について詳細な分析を行う。センシング技術、制御技術、人工知能技術、そしてこれらを統合するシステム技術について、現在の到達点と残された課題を明らかにする。

第三章においては、市場構造の変容について分析する。従来型産業用ロボット市場の成熟化、協働ロボット市場の急成長、サービスロボット市場の可能性と不確実性について、定量的なデータに基づく現状把握と将来予測を行う。

第四章においては、本報告書の中核となる革新的提言を提示する。モジュラー型ロボットアーキテクチャの標準化、デジタルツイン技術を活用した導入・運用支援、人材育成エコシステムの構築、中小企業向けロボット導入支援制度の拡充、そして次世代技術への戦略的投資について、具体的な施策内容と実装方法を詳述する。

第五章においては、提言の実装に向けたロードマップを提示する。短期、中期、長期の時間軸に沿って、各施策の実施時期と達成目標を明確化する。

第六章においては、本報告書の結論を述べるとともに、今後の展望について論じる。

## 第二章：技術的基盤の現状と課題

### 第一節：センシング技術の高度化とその実用的限界

ロボットが環境を認識し、適切な行動を選択するためには、高精度かつ信頼性の高いセンシング技術が不可欠である。現在のロボティクスにおけるセンシング技術は、視覚センシング、触覚センシング、力覚センシング、そして位置・姿勢センシングの四つの領域において、それぞれ著しい進歩を遂げている。

視覚センシングについては、二次元カメラ、三次元深度カメラ、そしてライダーといった多様なセンサーが実用化されており、これらを組み合わせることにより、ロボットは周囲の環境を詳細に把握することが可能となっている。特に、深層学習に基づく画像認識技術の発展により、物体の検出、分類、姿勢推定といったタスクにおいて、人間に匹敵する、あるいは人間を凌駕する性能が達成されている[3]。産業用途においては、外観検査、ピッキング、組立といった作業において、視覚センシングに基づく自動化が広く実用化されている。

しかしながら、実環境における視覚センシングの堅牢性については、依然として重大な課題が残されている。製造現場においては、照明条件の変動、粉塵や油煙による視界の遮蔽、金属表面の反射、透明物体や鏡面物体の認識困難性など、研究開発環境では想定されなかった多様な問題が発生する。これらの問題に対しては、複数のセンサーを組み合わせたマルチモーダルセンシング、環境条件の変動に対して頑健な認識アルゴリズムの開発、そして照明や背景の制御といった環境側の対策が講じられているが、すべての状況に対応可能な汎用的な解決策は確立されていない。

触覚センシングについては、近年の柔軟電子素材の発展により、ロボットハンドの把持力制御において顕著な改善が見られる。従来の産業用ロボットは、把持対象物の形状と重量が既知であることを前提として、あらかじめプログラムされた把持力で対象物を把持していた。しかしながら、多品種少量生産環境においては、把持対象物の特性が多様であり、個々の対象物に適した把持力を動的に調整する能力が求められる。触覚センサーを搭載したロボットハンドは、把持時の接触状態をリアルタイムで検知し、滑りの予兆を検出して把持力を調整することにより、繊細な対象物の損傷を防ぎつつ確実な把持を実現することができる。

触覚センシング技術は、食品産業や医療機器製造など、繊細な取り扱いを要求される分野において特に高い価値を発揮している。例えば、果物や野菜の選別・包装作業においては、対象物の熟度や硬さに応じた適切な把持力の調整が品質維持の観点から重要であり、触覚センサーの活用により自動化の適用範囲が拡大している。

しかしながら、触覚センサーの実用化においては、耐久性とコストの問題が依然として課題となっている。製造現場においては、ロボットハンドは繰り返しの把持動作により摩耗し、また、油脂や粉塵への曝露により性能が劣化する。現在の触覚センサーは、このような過酷な使用条件に対する耐久性が

十分ではなく、定期的な交換が必要となる場合が多い。センサーの交換コストと交換作業に伴う生産停止時間は、ロボットシステムの総保有コストの重要な構成要素となっており、導入判断における障壁となっている。

力覚センシングについては、六軸力覚センサーが産業用ロボットの標準的な装備として普及しつつある。力覚センサーは、ロボットのエンドエフェクタに作用する力とトルクを検出し、この情報に基づいて制御を行うことにより、接触を伴う作業の自動化を可能にする。例えば、部品の嵌合作業においては、位置決め誤差を力覚フィードバックにより補正することで、高精度な組立を実現することができる。また、研磨や面取りといった加工作業においては、一定の押付力を維持しながら工具を移動させることにより、均一な加工品質を達成することができる。

力覚センシングの課題としては、センサーの分解能と応答速度のトレードオフ、そして環境ノイズへの感度が挙げられる。高精度な力制御を実現するためには、微小な力の変化を検出できる高分解能のセンサーが必要であるが、このようなセンサーは振動や温度変化といった環境ノイズの影響を受けやすい。製造現場においては、周囲の機械設備からの振動や、作業に伴う温度変化が避けられないため、これらのノイズを適切にフィルタリングしつつ、必要な信号を抽出する信号処理技術が重要となる。

位置・姿勢センシングについては、ロボット自身の関節角度を検出するエンコーダに加え、外部環境に対する絶対位置を検出すための技術が発展している。自律移動ロボットにおいては、ライダーやカメラを用いた同時位置推定・地図構築技術が実用化されており、事前に地図情報を与えることなく、未知の環境においても自己位置を推定しながら移動することができる[4]。

しかしながら、位置推定の精度と信頼性については、環境条件に大きく依存する。特徴点の少ない環境、動的に変化する環境、そして広大な環境においては、位置推定の誤差が蓄積しやすく、長時間の運用において位置のドリフトが問題となる場合がある。この問題に対しては、複数のセンサーを統合したセンサーフュージョン、定期的な位置校正、そして環境側へのマーカー設置といった対策が講じられているが、完全な解決には至っていない。

### 第二節：制御システムの進化と統合における課題

ロボット制御システムは、過去数十年間にわたり継続的な進化を遂げてきた。従来の産業用ロボットにおいては、位置制御が主流であり、あらかじめ教示された軌道に沿ってエンドエフェクタを移動させることが基本的な制御目標であった。この制御方式は、対象物の位置と形状が既知であり、環境が静的である場合には高い精度と再現性を発揮するが、環境の変動や予期せぬ接触に対する適応能力は限定的であった。

これに対し、力制御およびインピーダンス制御の発展により、ロボットは環境との物理的相互作用を考慮した柔軟な動作が可能となった。インピーダンス制御においては、ロボットのエンドエフェクタと環境との間の力学的関係を、仮想的なばねとダンパーのモデルにより規定する。これにより、接触時には適切な反力を発生させつつ、非接触時には位置制御に近い動作を実現することができる。この制御方式は、協働ロボットにおける人間との安全な相互作用、そして接触を伴う組立・加工作業の自動化において、不可欠な技術となっている。

制御システムのソフトウェア化も、重要な進化の方向性である。従来の産業用ロボットにおいては、制御ソフトウェアはロボットメーカーが提供する専用のものに限定されており、ユーザーによるカスタマイズの余地は限られていた。しかしながら、近年においては、ロボットオペレーティングシステムに代表されるオープンソースのソフトウェアプラットフォームが普及し、研究機関や先進的なユーザー企業において、制御アルゴリズムの開発やシステム統合が活発に行われている[5]。

ソフトウェア化の進展は、ロボットシステムの柔軟性と拡張性を高める一方で、新たな課題も生まれている。第一に、ソフトウェアの品質保証の問題がある。安全性が要求される産業用ロボットにおいては、制御ソフトウェアの信頼性は極めて重要であるが、オープンソースソフトウェアの品質保証体制は、商用ソフトウェアと比較して必ずしも十分ではない。この問題に対しては、形式検証、網羅的テスト、そして運用実績に基づく信頼性評価といった手法が適用されているが、ソフトウェアの複雑性が増大する中で、完全な品質保証を達成することは困難である。

第二に、サイバーセキュリティの問題がある。制御システムのネットワーク化が進む中で、ロボットシステムもまたサイバー攻撃の対象となりうる状況が生まれている。産業用ロボットへの不正アクセスは、生産停止による経済的損失だけでなく、ロボットの誤動作による人身事故のリスクをも伴う。この問題に対する産業界の認識は高まりつつあるものの、具体的な対策の実装は十分に進んでいない。

第三に、リアルタイム性の確保の問題がある。ロボット制御においては、センサーからの情報取得、制御演算、アクチュエータへの指令出力という一連の処理を、ミリ秒オーダーの周期で繰り返し実行する必要がある。この要求を満たすためには、リアルタイムオペレーティングシステムの使用、通信遅延の最小化、そして計算資源の適切な配分が必要である。人工知能技術を制御システムに統合する場合には、推論処理の計算負荷とリアルタイム性の両立が特に困難な課題となる。

制御システムの統合においては、異なるメーカーの機器を組み合わせてシステムを構築する際の相互運用性が課題となっている。現在の産業用ロボット市場においては、各メーカーが独自のインターフェースと通信プロトコルを採用しており、異なるメーカーのロボット、センサー、周辺機器を統合するためには、個別のインターフェース開発が必要となる場合が多い。この状況は、システムインテグレーションのコストを増大させるとともに、ユーザーのベンダー選択の自由度を制限している。

### 第三節：人工知能技術の実装状況と実用化における障壁

人工知能技術、特に機械学習および深層学習技術のロボティクスへの応用は、過去十年間で急速に進展した。画像認識、音声認識、自然言語処理といった認知的タスクにおいて、深層学習は従来手法を大幅に凌駕する性能を達成しており、これらの技術をロボットに搭載することにより、ロボットの認知能力は飛躍的に向上している。

画像認識においては、畳み込みニューラルネットワークに基づく物体検出・認識技術が、産業用途において広く実用化されている。外観検査においては、良品と不良品を識別する分類タスク、そして不良箇所を特定するセグメンテーションタスクにおいて、深層学習モデルは熟練検査員に匹敵する、あるいはそれを上回る精度を達成している。ピッキング作業においては、多様な形状の物体が混在する状況においても、個々の物体を認識し、適切な把持位置を推定することが可能となっている。

動作計画においては、強化学習に基づくアプローチが注目を集めている。従来の動作計画手法は、環境のモデルを明示的に与え、このモデルに基づいて最適な軌道を計算するものであった。これに対し、強化学習に基づくアプローチは、試行錯誤を通じて最適な動作を学習するものであり、モデル化が困難な複雑なタスクへの適用可能性を有している。シミュレーション環境において学習したポリシーを実ロボットに転移する技術も発展しており、実環境での学習に伴うコストとリスクを低減することが可能となっている。

しかしながら、人工知能技術の産業現場への実装においては、研究段階では顕在化しなかった複数の障壁が存在している。

第一の障壁は、学習データの収集と管理である。高性能な機械学習モデルの構築には、大量かつ多様な教師データが必要である。しかしながら、製造現場における異常事例は本質的に希少であり、十分なデータを収集することが困難である。また、製造条件の変更や製品の切り替えに伴い、学習データの再収集と再学習が必要となる場合があり、この運用負荷は無視できない。

この問題に対しては、いくつかのアプローチが提案されている。シミュレーション環境において合成データを生成し、これを学習に活用するアプローチは、データ収集コストを大幅に削減できる可能性を有している。しかしながら、シミュレーションと実環境の間には必然的に乖離が存在し、この乖離を埋めるための技術、いわゆるシミュレーションから実環境への転移学習は、依然として活発な研究領域である。また、少量のデータから効率的に学習するメタ学習や、既存のモデルを新たなタスクに適応させる転移学習も、データ効率の向上に寄与する技術として期待されている。

第二の障壁は、判断根拠の説明可能性である。製造業においては、品質管理の観点から、すべての工程における判断の根拠を記録し、事後的に検証可能な状態を維持することが求められる。特に、自動

車産業や医療機器産業など、製品の安全性が人命に直結する産業においては、この要求は極めて厳格である。

しかしながら、深層学習に基づくシステムは、その判断過程がブラックボックス化する傾向がある。入力データから出力結果に至る過程において、ニューラルネットワーク内部で何が起こっているかを人間が理解可能な形で説明することは、現在の技術では困難である。この問題に対しては、説明可能な人工知能と呼ばれる研究領域において、様々なアプローチが提案されているが、産業現場の要求を満たす水準には達していない。

この障壁の存在により、人工知能技術の導入に慎重な姿勢を示す企業も少なくない。特に、品質保証部門や法務部門からの懸念が、技術導入の障壁となっている事例が報告されている。

第三の障壁は、継続的な性能維持である。製造環境は時間とともに変化する。原材料のロット変動、設備の経年劣化、季節による温湿度の変化など、様々な要因により、当初の学習データが想定していた条件から逸脱することが避けられない。この環境変化に対して、人工知能システムの性能を維持するためには、継続的な性能監視と、必要に応じた再学習の仕組みが必要である。

性能監視においては、人工知能システムの出力結果を継続的に評価し、性能劣化の予兆を検出することが重要である。しかしながら、この評価を自動化することは容易ではなく、人間による確認作業が必要となる場合が多い。また、再学習においては、新たなデータの収集、モデルの更新、そして更新されたモデルの検証という一連のプロセスを、生産を停止することなく実施する必要がある。この運用体制の構築には、専門的な知識と人材が要求される。

### 第四節：システム統合技術の現状

個々の要素技術の進歩に加えて、これらを統合してロボットシステムとして機能させるシステム統合技術もまた、重要な技術領域である。現代のロボットシステムは、ロボット本体、センサー、エンドエフェクタ、制御装置、安全装置、そして周辺設備を含む複雑なシステムであり、これらの要素を適切に統合することにより、初めて所期の機能を発揮することができる。

システム統合においては、機械的統合、電気的統合、通信統合、そしてソフトウェア統合の四つの層を考慮する必要がある。機械的統合においては、各要素の物理的な取り付け、位置決め、そして干渉回避が課題となる。電気的統合においては、電源供給、信号配線、そしてノイズ対策が課題となる。通信統合においては、異なる通信プロトコルを使用する機器間のデータ交換が課題となる。ソフトウェア統合においては、異なるソフトウェアモジュール間のインターフェース整合と、システム全体としての動作検証が課題となる。

現在の産業用ロボット市場においては、システム統合は主としてシステムインテグレーターと呼ばれる専門企業により担われている。システムインテグレーターは、ユーザーの要求を分析し、適切な機器を選定し、これらを統合してシステムを構築する。また、導入後の保守・サポートもシステムインテグレーターの重要な役割である。

しかしながら、システム統合のコストと期間は、ロボット導入の障壁となっている。特に、カスタマイズ性の高いシステムにおいては、設計・製作・調整に長期間を要し、コストも高額となる。また、システムインテグレーターの技術力には企業間で差があり、ユーザーが適切なシステムインテグレーターを選定することも容易ではない。

この問題に対しては、モジュラー化と標準化によるシステム統合の効率化が有効なアプローチである。標準化されたインターフェースを持つモジュールを組み合わせてシステムを構築することにより、カスタム設計の範囲を縮小し、統合コストを削減することができる。また、事前に検証されたモジュールの組み合わせを使用することにより、システム全体の信頼性を向上させることも期待できる。

## 第一節：従来型産業用ロボット市場の成熟化と競争激化

従来型産業用ロボット市場、すなわち自動車産業を中心とした溶接、塗装、組立、搬送用途のロボット市場は、成熟期に入りつつある。主要自動車メーカーの生産ラインにおけるロボット導入は既に高い水準に達しており、新規導入の余地は限定的である。国際ロボット連盟の統計によれば、自動車産業における産業用ロボットの導入密度は、日本、ドイツ、韓国といった主要自動車生産国において、従業員一人あたり千台を超える水準に達している[2]。

この成熟市場においては、既存設備の更新需要と、新興国における新規工場建設に伴う需要が主たる成長ドライバーとなっている。設備更新需要については、産業用ロボットの平均使用年数が十年から十五年程度であることを考慮すると、一九九〇年代から二〇〇〇年代にかけて導入された大量のロボットが、今後順次更新時期を迎えることになる。この更新需要は、市場規模の維持に寄与するものの、爆発的な成長をもたらすものではない。

新興国市場については、中国が最大の成長市場として注目されている。中国における産業用ロボットの年間導入台数は、二〇二二年において約二十九万台に達し、世界全体の約五十二パーセントを占めている[2]。この成長は、中国製造業の自動化投資の拡大を反映しているが、同時に、中国国内メーカーの台頭という競争環境の変化をも伴っている。

中国ロボットメーカーは、過去十年間で急速に技術力を向上させており、特に価格競争力においては、日本および欧州メーカーを凌駕する水準に達している。中国政府の産業政策による支援も、中国メーカーの競争力強化に寄与している。この状況において、日本メーカーは、高付加価値製品への特化、あるいはサービスを含めた総合的なソリューション提供への転換を迫られている。

成熟市場における競争においては、ハードウェアの性能差別化が困難になる中で、ソフトウェアの重要性が増大している。プログラミングの容易さ、シミュレーション環境の充実度、他システムとの連携性、そして予知保全機能といったソフトウェア面での優位性が、購買決定における重要な要因となっている。また、導入後のサポート体制、トレーニングプログラム、そして継続的なソフトウェアアップデートといったサービス面での差別化も、競争優位の源泉となりつつある。

## 第二節：協働ロボット市場の急成長と構造的課題

協働ロボット市場は、ロボティクス産業における最も活発な成長領域となっている。協働ロボットは、人間との直接的な協動作業を前提として設計されたロボットであり、安全柵なしで人間と一緒に空間で作業することが可能である。この特性により、従来の産業用ロボットでは対応困難であった作業領域への展開が可能となっている。

協働ロボット市場の成長を牽引しているのは、中小製造業における自動化需要である。従来、ロボット導入は大規模な設備投資と専門的な技術者の確保を必要としたため、中小企業にとっては現実的な選択肢ではなかった。しかしながら、協働ロボットは、以下の特性により、中小企業の自動化ニーズに応える製品として急速に普及している。

第一に、安全柵不要による設置面積の削減である。従来の産業用ロボットは、人間との接触による事故を防止するため、安全柵により隔離された空間内で運用される必要があった。この安全柵は、相当の設置面積を必要とし、特に床面積に制約のある中小企業においては、導入の障壁となっていた。協働ロボットは、接触検知機能と低速・低出力設計により、安全柵なしでの運用が可能であり、既存の生産ラインへの追加導入が容易である。

第二に、直感的なプログラミングインターフェースによる専門技術者への依存度低減である。従来の産業用ロボットのプログラミングには、専門的な知識と経験が必要であり、プログラミング作業はロボットメーカーまたはシステムインテグレーターに依頼することが一般的であった。これに対し、協働ロボットの多くは、ダイレクトティーチングと呼ばれる直感的なプログラミング方式を採用している。ダイレクトティーチングにおいては、人間がロボットのアームを直接手で動かし、所望の動作を教示する。この方式により、専門的なプログラミング知識を持たない現場作業者でも、基本的な動作の教示が可能となっている。

第三に、比較的低廉な導入コストである。協働ロボットの本体価格は、従来の産業用ロボットと比較して低く設定されている場合が多く、また、安全柵や専用の設置工事が不要であることから、総導入コストを抑制することができる。これにより、投資回収期間が短縮され、中小企業にとっても投資判断が容易となっている。

しかしながら、協働ロボット市場の急成長は、同時に複数の構造的課題を顕在化させている。

第一の課題は、安全性に関する規制と実運用の乖離である。協働ロボットは、国際安全規格に準拠した設計がなされており、人間との接触時に傷害を与えないよう、動作速度と出力が制限されている[6]。しかしながら、この制限は、生産性の観点からはトレードオフを伴う。安全規格に準拠した運用を行う場合、ロボットの動作速度は大幅に制限され、従来の産業用ロボットと比較して作業時間が長くなる場合がある。

この問題に対しては、作業内容に応じた安全モードの切り替えが一つの解決策となる。人間がロボットの作業領域に接近していない場合には高速モードで動作し、人間の接近を検知した場合には低速モードに切り替えるという運用により、安全性と生産性の両立を図ることができる。しかしながら、この運用を実現するためには、人間の位置を正確に検知するセンシングシステムの導入が必要であり、追加のコストが発生する。

第二の課題は、導入後のサポート体制である。協働ロボットの主要な顧客層である中小企業は、社内に専門的な技術者を抱えていないことが多く、導入後のトラブル対応や生産品目変更に伴う再プログラミングにおいて、外部サポートへの依存度が高い。しかしながら、協働ロボットメーカーおよび販売代理店のサポート体制は、急速な販売台数の増加に追いついていない場合がある。

特に、地方に立地する中小企業においては、サポート拠点からの距離が問題となる。トラブル発生時の対応に時間と労力を要し、生産停止が長期化するリスクがある。また、定期的なメンテナンスや技術相談においても、サポートへのアクセスが制限される。

第三の課題は、投資対効果の検証困難性である。協働ロボットの導入効果は、単純な人件費削減だけでなく、品質向上、作業者の負担軽減、生産の柔軟性向上など、多面的な効果を含んでいる。しかしながら、これらの効果を定量的に評価することは容易ではなく、導入を検討する企業が投資判断を行う際の障壁となっている。

特に、作業者の負担軽減や労働環境の改善といった効果は、金銭的価値への換算が困難である。また、生産の柔軟性向上は、将来の生産品目変更時に初めて顕在化する効果であり、導入時点での評価が難しい。このような不確実性は、特にリスク回避的な傾向を持つ中小企業経営者にとって、投資決定の障壁となる。

## 第三節：サービスロボット市場の可能性と不確実性

サービスロボット市場は、物流、医療、農業、建設、清掃、警備など、多様な産業領域において成長の可能性を秘めている。国際ロボット連盟の定義によれば、サービスロボットは、製造業以外の用途に使用されるロボットであり、プロフェッショナルサービスロボットとパーソナルサービスロボットに大別される[2]。

物流分野は、サービスロボット市場において最も成熟した領域の一つである。倉庫内の搬送作業を自動化する自律移動ロボットは、電子商取引の拡大に伴う物流需要の増大と、倉庫作業員の確保困難という二つの要因に後押しされ、急速に普及している。

自律移動ロボットの技術は、過去十年間で大きく進歩した。同時位置推定・地図構築技術の発展により、事前に詳細な地図情報を共有することなく、ロボット自身が環境を認識しながら移動することが可能となった。また、複数のロボットを協調させて効率的に作業を行なうフリート管理技術も発展しており、大規模な倉庫においても、多数のロボットを同時に運用することが可能となっている。

物流分野における自律移動ロボットの導入は、投資対効果の観点からも正当化される水準に達している。人件費の上昇と労働力確保の困難化が進む中で、ロボット導入による省人化効果は明確であり、投資回収期間も比較的短い。また、ロボットは二十四時間稼働が可能であり、繁忙期における柔軟な対応も容易である。

医療分野においては、手術支援ロボットが既に確立された市場を形成している。ダヴィンチに代表される手術支援ロボットは、低侵襲手術の実現に貢献しており、泌尿器科・婦人科・消化器外科など、多様な診療科において活用されている[7]。手術支援ロボットの市場は、今後も継続的な成長が見込まれており、特に新興国における普及拡大が期待されている。

一方、介護・リハビリテーション分野におけるロボット活用は、技術的可能性と社会的受容性の両面において課題を抱えている。高齢者介護におけるロボット活用は、介護人材不足への対応策として期待されているものの、被介護者との身体的接触を伴う作業においては、安全性と心理的受容性の両面で慎重な検討が必要である。

介護ロボットの開発においては、移乗支援、排泄支援、見守り、コミュニケーションなど、様々な機能を持つ製品が提案されている。しかしながら、これらの製品の普及は限定的であり、介護現場における実際の活用は進んでいない。この背景には、製品の価格、操作の複雑さ、既存の介護ワークフローとの適合性、そして介護職員の心理的抵抗など、複合的な要因が存在している。

農業分野においては、収穫作業の自動化を目指すロボットの開発が進められている。労働集約的な収穫作業の自動化は、農業の生産性向上と労働力不足への対応の両面から期待されている。特に、イチゴ・トマト・キュウリといった施設園芸作物の収穫ロボットは、研究開発が活発に行われている領域である。

しかしながら、農業用収穫ロボットの実用化には、複数の技術的課題が存在している。第一に、農産物の多様性への対応である。同一品種であっても、個々の果実の形状、大きさ、色、熟度は異なり、これらの変動に対応した認識と把持が必要である。第二に、屋外環境または半屋外環境における堅牢性である。温室内であっても、照明条件、温湿度、粉塵などの環境条件は変動し、これらに対する耐性が求められる。第三に、経済性である。農業経営の規模と収益性を考慮した場合、導入可能な価格帯には制約があり、この制約の中で十分な性能を実現することが求められる。

建設分野においては、測量、墨出し、溶接、塗装、検査など、特定の作業に特化したロボットの実用化が進みつつある。建設業界は、深刻な人手不足と高齢化に直面しており、自動化への需要は確実に存在している。また、建設作業には危険を伴うものも多く、ロボット化による安全性向上も期待されている。

しかしながら、建設現場は、製造業の工場と比較して環境の変動が大きく、ロボット導入の難易度は高い。建設現場は、工事の進捗に伴い日々変化し、また、屋外環境における天候の影響も受けれる。このような非構造化環境において安定して動作するロボットの実現には、高度なセンシング技術と適応的な制御技術が必要である。

#### 第四章：革新的提言と実装戦略

##### 第一節：モジュラー型ロボットアーキテクチャの標準化

本報告書における第一の提言は、ロボットシステムのモジュラ化と、モジュール間インターフェースの標準化である。この提言は、現在のロボット産業が抱える相互運用性の欠如という根本的な問題に対処するものである。

現在のロボット産業においては、各メーカーが独自のアーキテクチャを採用しており、異なるメーカーの製品を組み合わせてシステムを構築することが困難である。例えば、あるメーカーのロボットアームに、別のメーカーのエンドエフェクタを取り付ける場合、機械的なアダプター、電気的なイン

ターフェース変換、そして通信プロトコルの変換が必要となる場合が多い。これらの変換作業は、システムインテグレーションのコストを増大させるとともに、システムの信頼性を低下させる要因ともなる。

モジュラー型アーキテクチャの標準化により、ロボットシステムを構成する各要素、すなわちアキュエータモジュール、センサーモジュール、制御モジュール、エンドエフェクタモジュールなどを、異なるメーカーの製品から選択して組み合わせることが可能となる。これにより、ユーザーは自社のニーズに最適な構成を選択することができ、また、特定のメーカーへの依存度を低減することができる。

標準化の対象となるインターフェースは、以下の四層に分類される。

第一層は機械的インターフェースである。モジュール間の物理的な接続方法、取り付け穴の位置寸法、位置決め機構などを標準化する。これにより、異なるメーカーのモジュールを物理的に接続することが可能となる。

第二層は電気的インターフェースである。電源供給の電圧と電流、信号線の配置、コネクタの形状などを標準化する。これにより、異なるメーカーのモジュール間で電力と信号を受け渡すことが可能となる。

第三層は通信インターフェースである。モジュール間のデータ通信に使用するプロトコル、メッセージフォーマット、タイミング仕様などを標準化する。産業用イーサネット規格を基盤としつつ、ロボットシステムに特化した上位プロトコルを定義することが考えられる。

第四層はソフトウェアインターフェースである。モジュールの機能を呼び出すためのアプリケーションプログラミングインターフェース、モジュールの特性を記述するためのデータフォーマット、そしてシステム構成を記述するためのモデリング言語などを標準化する。ロボットオペレーティングシステムとの互換性を確保することが、実用的な観点から重要である。

この標準化を推進するためには、産業界における合意形成と、標準化機関による規格策定が必要である。日本においては、日本ロボット工業会を中心とした業界団体が、この役割を担うことが期待される。また、国際的な標準化においては、国際標準化機構における活動を通じて、日本発の標準を国際規格として確立することが重要である。

標準化の推進においては、既存製品との互換性の確保が課題となる。既に市場に存在する大量のロボットシステムを、一夜にして新たな標準に移行させることは現実的ではない。したがって、標準化は段階的に進め、既存システムとの共存期間を設けることが必要である。また、標準規格への準拠を促進するためのインセンティブ、例えば補助金や税制優遇措置の活用も検討に値する。

モジュラ化の経済的効果は、複数の経路を通じて実現される。第一に、システムインテグレーションコストの削減である。標準化されたインターフェースにより、カスタム設計の範囲が縮小し、統合作業の効率が向上する。第二に、モジュールの量産効果である。標準化されたモジュールは、複数のシステムで共通に使用されるため、生産量の増大による単価低減が期待できる。第三に、保守・交換の効率化である。標準化されたモジュールは、故障時の交換が容易であり、また、予備部品の在庫管理も効率化される。

##### 第二節：デジタルツイン技術を活用した導入・運用支援サービスの展開

第二の提言は、デジタルツイン技術を活用したロボット導入・運用支援サービスの展開である。デジタルツインとは、物理的なシステムの仮想的な複製をコンピュータ上に構築し、シミュレーションと実システムを連携させる技術である[8]。この技術をロボットシステムに適用することにより、導入検討段階から運用段階に至るまで、様々な価値を提供することが可能となる。

導入検討段階においては、デジタルツイン技術により、ロボット導入効果の事前評価が可能となる。現在、ロボット導入を検討する企業が直面する課題の一つは、導入前に効果を正確に予測することが困難であるという点である。ロボットの動作速度、作業精度、稼働率などの技術的パラメータと、生産量、品質、コストなどの経営的指標の関係は複雑であり、単純な計算では予測が困難である。

デジタルツイン技術を活用することにより、実際の生産環境を仮想的に再現し、ロボット導入後の生産プロセスをシミュレーションすることが可能となる。このシミュレーションにより、生産性向上効果、品質改善効果、省人化効果などを定量的に評価することができる。また、複数の導入シナリオを比較評価し、最適な構成を選定することも可能となる。

導入段階においては、デジタルツイン技術により、システム設計と調整の効率化が可能となる。従来のロボットシステム導入においては、実機を用いた調整作業に長期間を要することが一般的であった。特に、複雑なシステムにおいては、各要素間の干渉や、予期せぬ問題の発生により、調整時間が当初の計画を大幅に超過することも珍しくなかった。

デジタルツイン技術を活用することにより、実機の導入前に、仮想環境においてシステムの動作を検証することが可能となる。ロボットの動作軌道、センサーの配置、周辺設備との干渉などを、仮想環境において事前に確認し、問題を発見・修正することができる。これにより、実機導入後の調整期間を短縮し、早期の本稼働を実現することができる。

運用段階においては、デジタルツイン技術により、予知保全と運用最適化が可能となる。物理的なロボットシステムから収集されるセンサーデータを、仮想モデルにリアルタイムで反映させることにより、システムの現在状態を正確に把握することができる。また、仮想モデル上でシミュレーションを実行することにより、将来の状態を予測することも可能となる。

予知保全においては、センサーデータの傾向分析と仮想モデルによるシミュレーションを組み合わせることにより、故障の予兆を早期に検出することができる。これにより、計画外の停止を回避し、設備稼働率を向上させることができる。また、保全作業を計画的に実施することにより、保全コストの最適化也可能となる。

運用最適化においては、仮想モデル上で様々な運用パラメータを変更してシミュレーションを実行し、最適な運用条件を探索することができる。例えば、生産品目の切り替え順序、ロボットの動作速度、作業の割り当てなどを最適化することにより、生産性の向上やエネルギー消費の削減を実現することができる。

デジタルツイン技術の実装においては、三次元モデリング、物理シミュレーション、データ統合基盤の三つの技術要素が必要である。三次元モデリングにおいては、ロボットシステムと周辺環境の形状を正確に再現する必要がある。物理シミュレーションにおいては、ロボットの動力学、センサーの特性、対象物の物理特性などを正確にモデル化する必要がある。データ統合基盤においては、実システムから収集されるデータを仮想モデルに反映させ、また、シミュレーション結果を実システムの制御に活用するための通信基盤が必要である。

これらの技術は、個別には既に実用化されているものであるが、ロボットシステムに特化した形で統合し、使いやすいサービスとして提供することが、普及の鍵となる。特に、中小企業がデジタルツイン技術を活用するためには、専門的な知識がなくても利用可能な、クラウドベースのサービスとして提供することが有効である。

### 第三節：人材育成エコシステムの構築

第三の提言は、ロボット技術者の育成に向けたエコシステムの構築である。ロボット産業の成長を制約する最大の要因の一つは、専門人材の不足である。この問題に対処するためには、教育機関、産業界、政府が連携した包括的な人材育成の仕組みを構築することが不可欠である。

ロボットシステムの設計、導入、運用には、複合的なスキルセットが必要である。機械工学の知識は、ロボットの機構設計と力学解析に必要である。電気工学の知識は、アクチュエータの選定と駆動回路の設計に必要である。情報工学の知識は、制御ソフトウェアの開発とシステム統合に必要である。さらに、対象となる産業分野の知識、例えば製造プロセスや品質管理の知識も、実用的なシステムを構築するためには不可欠である。

このような複合的なスキルを有する人材は極めて希少であり、その育成には長期間を要する。現在の大学教育においては、機械工学、電気工学、情報工学は別々の学科として編成されていることが一般的であり、これらを横断する教育プログラムは限定的である。また、産業分野の知識については、大学教育ではほとんど扱われず、就職後の実務経験を通じて習得することが一般的である。

人材育成エコシステムの構築においては、以下の施策が重要である。

第一に、大学における横断的カリキュラムの整備である。機械工学、電気工学、情報工学の基礎を幅広く学びつつ、ロボティクスという応用分野において統合的な知識とスキルを習得するカリキュラムを設計する必要がある。このカリキュラムにおいては、講義による理論学習だけでなく、実際のロボットシステムを用いた実習が重要な役割を果たす。また、産業界との連携によるインターンシップや共同プロジェクトを通じて、実践的な経験を積む機会を提供することも重要である。

第二に、産業界における継続的な技術研修の提供である。ロボット技術は急速に進歩しており、大学で習得した知識だけでは、長期にわたり第一線で活躍することは困難である。産業界においては、従業員に対する継続的な技術研修の機会を提供し、最新技術の習得を支援することが必要である。また、ロボットメーカー・システムインテグレーターは、顧客企業の技術者に対するトレーニングプログラムを充実させ、ロボットシステムの効果的な活用を支援することが期待される。

第三に、既存従業員に対するリスクリング支援である。ロボット導入により従来の作業が自動化される一方で、ロボットの運用・保守を担う人材への需要は増大する。この構造変化に対応するために既存従業員がロボット関連のスキルを習得するための支援体制が必要である。特に、製造現場で長年の経験を積んだ熟練作業者は、製造プロセスに関する深い知識を有しており、この知識とロボット技術のスキルを組み合わせることにより、高い付加価値を発揮することが期待できる。

第四に、初等・中等教育段階からの裾野拡大である。ロボット技術の裾野を広げるためには、初等・中等教育段階からのプログラミング教育やロボット工作活動の普及が重要である。これらの活動を通じて、将来のロボット技術者の母集団を拡大することが、長期的な産業発展の基盤となる。また、ロボット技術に対する社会全体の理解を深めることにより、ロボット活用に対する心理的障壁を低減する効果も期待できる。

人材育成エコシステムの構築においては、政府の役割も重要である。教育機関と産業界の連携を促進するための政策的枠組み、人材育成プログラムに対する財政的支援、そして資格制度の整備などが、政府に期待される役割である。特に、ロボットシステムの安全性に関わる技術者については、一定の資格要件を設けることにより、技術水準の確保と社会的信頼の向上を図ることが考えられる。

### 第四節：中小企業向けロボット導入支援制度の拡充

第四の提言は、中小企業向けのロボット導入支援制度の拡充である。日本の製造業において中小企業が占める割合は極めて高く、これらの企業における自動化の進展が、産業全体の生産性向上に直結する。しかしながら、中小企業におけるロボット導入率は大企業と比較して著しく低く、この格差を縮小するための施策が求められている。

中小企業がロボット導入を検討する際に直面する課題は、資金面だけでなく、技術的な知見の不足、適切なソリューションを選定するための情報不足、そして導入後の運用体制の構築困難性にも及んでいる。これらの課題に包括的に対応するためには、資金支援に加えて、技術的なコンサルティングサービスの提供が必要である。

資金支援については、現行の補助金制度や税制優遇措置を拡充し、ロボット導入に特化した支援メニューを設けることが考えられる。特に、初期投資の負担を軽減するためのリース制度や、成功報酬型の料金体系を採用したロボットサービスの普及促進が有効である。また、投資回収期間の短縮を図るために、導入効果の高い用途への優先的な支援も検討に値する。

技術的なコンサルティングサービスについては、公的機関または業界団体が、中小企業のロボット導入を支援するコンサルタントを派遣し、現場の課題分析から適切なソリューションの選定、導入後のフォローアップまでを一貫して支援する体制の構築が望まれる。このコンサルタントは、ロボット技術

に関する専門知識だけでなく、中小製造業の経営課題に対する理解も必要であり、その育成には一定の時間を要する。

情報提供については、中小企業がロボット導入の効果を事前に体験できる場として、ショールームや実証施設の整備が有効である。これらの施設において、実際のロボットシステムを操作し、自社の課題に対する適用可能性を評価することにより、導入に対する心理的障壁を低減することができる。また、同業他社における導入事例の共有も、導入検討の参考となる重要な情報である。

導入後の運用支援については、リモートモニタリングとリモートサポートの仕組みが有効である。ロボットシステムの稼働状況をリモートで監視し、異常の予兆を早期に検出することにより、トラブルの未然防止を図ることができる。また、トラブル発生時には、リモートでの診断と、可能な場合にはリモートでの復旧支援を行うことにより、対応時間を短縮することができる。

中小企業向け支援制度の設計においては、地域性への配慮も重要である。地方に立地する中小企業は、サポート拠点からの距離が問題となりやすく、都市部の企業と比較して不利な状況に置かれている。この格差を是正するためには、地方における支援拠点の整備や、地域の工業技術センターとの連携強化が必要である。

#### 第五節：次世代技術への戦略的投資

第五の提言は、次世代ロボット技術の研究開発に対する戦略的投資である。現在のロボット産業において、日本は依然として世界有数の地位を占めているものの、この優位性を将来にわたり維持するためには、現行製品の改良にとどまらず、次世代技術の開発に対する積極的な投資が不可欠である。

重点的な投資領域としては、以下の三つが挙げられる。

第一の領域は、人工知能技術とロボティクスの融合である。人工知能技術の進歩は、ロボットの認知能力と適応能力を飛躍的に向上させる可能性を有している。特に、以下の技術課題は、次世代ロボットの競争力を左右する重要な研究領域である。

少量の教師データから効率的に学習する技術は、産業現場への人工知能技術の実装において重要な課題である。製造現場における異常事例は本質的に希少であり、大量のデータを収集することが困難である。この制約の下で高性能なモデルを構築するためには、メタ学習、転移学習、そしてシミュレーションから実環境への転移といった技術の発展が必要である。

実環境の変動に対して頑健な認識・制御技術は、ロボットの実用性を高める上で不可欠である。研究開発環境と実運用環境の間には、照明条件、温湿度、振動、粉塵など、様々な差異が存在する。これらの環境変動に対して安定した性能を発揮する技術の開発は、ロボットの適用範囲を拡大する上で重要である。

人間との自然な協調を実現する技術は、協働ロボットの発展において重要な研究領域である。人間の意図を推定し、適切に応答する技術、人間の動作を予測して衝突を回避する技術、そして人間とロボットの間で効率的にタスクを分担する技術などが、この領域に含まれる。

第二の領域は、新素材・新機構の開発である。従来のロボットは、剛体リンクと回転関節を基本構成要素としており、この構成は高い精度と再現性を実現する一方で、柔軟性や適応性には限界があった。新素材と新機構の開発により、従来のロボットでは対応困難であった領域への展開が可能となる。

ソフトロボティクスは、柔軟な素材を用いてロボットを構成する研究領域であり、繊細な対象物の把持、狭隘な空間への進入、人間との安全な接触など、従来のロボットでは困難であった作業への適用が期待されている[9]。

バイオミメティクスは、生物の運動原理に学ぶ研究領域であり、歩行、飛行、遊泳など、多様な移動様式の実現に貢献している。特に、不整地における移動能力は、建設、農業、災害対応など、屋外環境で活動するロボットにとって重要な能力である。

マイクロロボティクスは、微小スケールでの操作を可能にする研究領域であり、医療、バイオテクノロジー、精密製造など、微細な対象を扱う分野への応用が期待されている。

第三の領域は、ロボットと人間の共生を支える技術の開発である。高齢化社会において、ロボットは単なる生産設備ではなく、人間の生活を支援するパートナーとしての役割を担うことが期待される。この文脈において、以下の技術は社会的に重要な研究領域である。

人間の意図を理解し、適切に応答するコミュニケーション技術は、サービスロボットの発展において重要である。音声認識、自然言語理解、そして非言語コミュニケーションの理解を統合し、人間との自然な対話を実現する技術の開発が求められている。

人間の能力を拡張するウェアラブルロボット技術は、高齢者や障害者の自立支援、そして労働者の身体負荷軽減において重要である。外骨格型のパワーアシストツールは、既に一部の用途において実用化されているが、装着の容易さ、長時間使用時の快適性、そして多様な動作への対応など、改善の余地は大きい[10]。

これらの研究開発投資においては、产学連携の強化が重要である。大学や公的研究機関における基礎研究の成果を、産業界における実用化に結びつけるためには、両者の間の人材交流と共同研究の促進が必要である。また、研究成果の事業化を支援するスタートアップ支援制度の充実も、イノベーションエコシステムの構築において重要な要素である。

## 第五章：実装に向けたロードマップ

### 第一節：短期的施策（一年以内の実施事項）

短期的に実施すべき施策は、主として既存の枠組みの中で比較的迅速に着手可能なものである。

モジュラー型アーキテクチャの標準化については、産業界における議論の開始が短期的な目標となる。具体的には、日本ロボット工業会を中心として、標準化に関するワーキンググループを設置し、技術的な検討と業界内の合意形成を進めなければならない。このワーキンググループにおいては、標準化の対象範囲、技術的要件、そして既存製品との互換性確保の方策について、詳細な検討を行う。また、国際標準化機構における関連規格の動向を調査し、国際的な整合性を確保するための戦略を策定する。

デジタルツイン技術を活用した導入・運用支援サービスについては、先進的なユーザー企業との共同実証プロジェクトの開始が短期的な目標となる。このプロジェクトにおいては、デジタルツイン技術の実用性を検証するとともに、サービス提供に必要な技術基盤とノウハウを蓄積する。また、サービスの事業モデルについても検討を行い、持続可能なビジネスとしての成立可能性を評価する。

人材育成については、産業界と教育機関の連携強化に向けた対話の場の設置が短期的な目標となる。この対話の場においては、産業界が求める人材像と、教育機関が提供可能なカリキュラムとのギャップを明確化し、その解消に向けた具体的な計画を策定する。また、インターンシップ制度の拡充や、共同研究プロジェクトの立ち上げについても、具体的な検討を行う。

中小企業向け支援制度については、既存の補助金制度の拡充と、技術コンサルティングサービスの試行的な提供が短期的な目標となる。補助金制度については、ロボット導入に特化した支援メニューの創設や、採択要件の緩和などを検討する。技術コンサルティングサービスについては、モデル地域を選定して試行的に実施し、サービス内容と提供体制の最適化を図る。

次世代技術への投資については、重点投資領域の選定と、研究開発プロジェクトの企画が短期的な目標となる。国内外の技術動向を調査し、日本が競争優位を確保しうる領域を特定する。また、产学連携による大型研究プロジェクトの企画を行い、必要な予算措置を講じる。

## 第二節：中期的施策（三年以内の実施事項）

中期的には、短期的に着手した施策の本格的な展開と、その成果の社会実装が目標となる。

モジュラー型アーキテクチャの標準化については、標準規格の策定と、これに準拠した製品の市場投入が中期的な目標となる。標準規格は、業界団体による自主規格として策定し、その後、日本産業規格としての制定を目指す。また、標準規格に準拠した製品を開発するメーカーに対するインセンティブの提供や、標準規格の普及促進活動を行う。

デジタルツイン技術を活用した導入・運用支援サービスについては、商用サービスとしての提供開始が中期的な目標となる。短期的な実証プロジェクトの成果を踏まえ、サービス内容と価格体系を確定し、本格的な事業展開を行う。また、サービス提供に必要な人材の育成と、技術基盤の整備を並行して進める。

人材育成については、大学における横断的カリキュラムの本格的な運用開始と、産業界におけるリスキリングプログラムの体系的な展開が中期的な目標となる。大学においては、ロボティクスを専門とする学科やコースの新設、あるいは既存学科における関連科目の充実を図る。産業界においては、ロボット技術者の継続教育プログラムを体系化し、資格制度との連携も検討する。

中小企業向け支援制度については、支援体制の全国展開と、支援内容の充実が中期的な目標となる。短期的な試行の成果を踏まえ、技術コンサルティングサービスを全国の主要地域において提供可能な体制を構築する。また、ショールームや実証施設の整備を進め、中小企業がロボット導入を検討する際の情報アクセスを改善する。

次世代技術への投資については、大型研究プロジェクトの本格的な推進と、初期成果の創出が中期的な目標となる。産学連携による研究開発を推進し、論文発表や特許出願などの形で研究成果を蓄積する。また、研究成果の事業化を見据え、スタートアップ企業の創出支援や、既存企業への技術移転を促進する。

## 第三節：長期的施策（五年以上の時間軸での取り組み）

長期的には、中期的な施策の成果が社会に広く浸透し、ロボティクス産業の構造的な変革が実現することが目標となる。

モジュラー型アーキテクチャについては、標準規格に基づくエコシステムの確立が長期的な目標となる。多様なメーカーが標準規格に準拠したモジュールを提供し、ユーザーがこれらを自由に組み合わせてシステムを構築できる環境が実現する。また、日本発の標準規格が国際規格として採用され、グローバル市場における日本企業の競争力強化に寄与する。

デジタルツイン技術については、ロボットシステムのライフサイクル全体を通じた活用が一般化することが長期的な目標となる。設計段階におけるシミュレーション、導入段階における仮想検証、運用段階における予知保全と最適化が、標準的なプラクティスとして定着する。また、デジタルツインを介したロボットシステムの遠隔監視・制御が普及し、運用効率の向上とサポートコストの削減が実現する。

人材育成については、ロボット技術者の量的・質的な充実が長期的な目標となる。大学教育と産業界の連携が深化し、実践的なスキルを持つ人材が継続的に輩出される。また、既存従業員のリスキリングが進み、ロボット導入に伴う労働市場の構造変化に円滑に対応できる体制が整う。

中小企業におけるロボット活用については、導入率の大幅な向上が長期的な目標となる。支援制度の充実と技術の成熟により、中小企業にとってもロボット導入が現実的な選択肢となり、製造業全体の生産性向上が実現する。また、ロボット導入を契機とした中小企業のデジタルトランスフォーメーションが進み、競争力の強化につながる。

次世代技術については、研究開発成果の実用化と新市場の創出が長期的な目標となる。人工知能技術との融合により、より高度な自律性を持つロボットが実現し、従来は自動化が困難であった作業領域

への展開が可能となる。また、ソフトロボティクスやウェアラブルロボットなどの新技術が実用化され、医療、介護、生活支援など、人間の生活に密着した領域におけるロボット活用が一般化する。

産業構造の観点からは、ロボット本体の製造だけでなく、ソフトウェア、サービス、データを含む総合的なソリューション提供が、産業の主要な価値創出源となることが予想される。この構造変化に対応するためには、従来のハードウェア中心のビジネスモデルからの転換が必要であり、この転換を成功させた企業が次世代の産業リーダーとなる。

## 第六章：結論

本報告書においては、ロボティクス産業の現状分析を踏まえ、今後の発展に向けた五つの提言を行った。すなわち、モジュラー型ロボットアーキテクチャの標準化、デジタルツイン技術を活用した導入・運用支援サービスの展開、人材育成エコシステムの構築、中小企業向けロボット導入支援制度の拡充、そして次世代技術への戦略的投資である。

これらの提言は、いずれも技術的な実現可能性と経済的な持続可能性を考慮した現実的なものである。モジュラー型アーキテクチャの標準化は、既に他の産業分野において成功事例があり、ロボット産業への適用も技術的には十分に可能である。デジタルツイン技術は、個々の要素技術は既に実用化されており、これらを統合してサービスとして提供することが課題である。人材育成については、教育機関と産業界との連携強化という、従来から認識されてきた課題に対する具体的な施策を提示した。中小企業向け支援制度については、既存の政策枠組みの拡充という、比較的実現可能性の高いアプローチを採用了。次世代技術への投資については、日本が競争優位を確保しうる領域を特定し、重点的な資源配分を提言した。

また、これらの提言は、短期・中期・長期の時間軸に沿った段階的な実装を想定しており、産業界、教育機関、政府の各主体が、それぞれの役割を果たすことにより実現可能である。産業界は、標準化への参画、人材育成への協力、そして次世代技術への投資において、主導的な役割を担うことが期待される。教育機関は、カリキュラムの改革と産業界との連携強化において、積極的な取り組みが求められる。政府は、政策的枠組みの整備、財政的支援、そして国際標準化活動への参画において、重要な役割を果たすことが期待される。

ロボティクス産業は、日本の製造業の競争力を支える基盤産業であるとともに、高齢化社会における労働力不足への対応策としても重要な役割を担っている。製造業においては、生産性向上と品質確保の両面において、ロボットの活用は不可欠である。また、医療、介護、物流、建設など、労働力不足が深刻化する産業領域においても、ロボットによる作業の自動化と人間の能力拡張は、社会的に重要な課題である。

本報告書で提示した施策の実行により、日本のロボティクス産業が持続的な成長を実現し、社会的課題の解決に貢献することを期待する。産業革命以来、機械は人間の肉体労働を代替してきた。そして今、人工知能とロボティクスの融合により、認知的な作業の一部もまた自動化の対象となりつつある。この変化は、労働の本質と人間の役割について根本的な問い合わせを投げかけている。ロボティクス産業の発展は、単なる技術的・経済的な課題ではなく、人間と機械の関係性を再定義する社会的な営みでもある。この認識のもと、技術開発と社会的対話を両輪として、持続可能なロボット社会の実現に向けた取り組みを進めていくことが求められる。

## 参考文献

- [1] Nof, S. Y. (Ed.). (1999). Handbook of Industrial Robotics (2nd ed.). John Wiley & Sons.

- [2] International Federation of Robotics. (2023). World Robotics 2023: Industrial Robots. IFR Statistical Department.
- [3] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.
- [4] Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). *Probabilistic Robotics*. MIT Press.
- [5] Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R., & Ng, A. Y. (2009). ROS: an open-source Robot Operating System. *ICRA Workshop on Open Source Software*, 3(3.2), 5.
- [6] International Organization for Standardization. (2016). ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices — Collaborative robots. ISO.
- [7] Lanfranco, A. R., Castellanos, A. E., Desai, J. P., & Meyers, W. C. (2004). Robotic surgery: a current perspective. *Annals of Surgery*, 239(1), 14-21.
- [8] Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85-113). Springer.
- [9] Rus, D., & Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 521(7553), 467-475.
- [10] Dollar, A. M., & Herr, H. (2008). Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 144-158.

All rights reserved

New York General Group, Inc.