

ヒューマノイドロボット

ー生成AIによる技術進展と試験導入の始まりー

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

執筆：コンシューマーイノベーション室 辻 理絵子

知財分析：知的財産室 松浦 由依

Biz Tech フォーカス 2025

なぜこの技術を取り上げるのか

AIの進展により制御の精度が大幅に向上し、従来困難だった繊細な動作が可能となった。また、製造コストも大幅に低下し、量産が視野に入るようになった。これらを受け、(米) Amazonの物流倉庫、(独) BMWの自動車工場などで試験導入が始まり、社会実装に向けた動きが加速している。まだ雌雄が決まらない段階で状況を俯瞰し、自身のビジネス領域にどのような影響が起こるのか考える契機としたい。

Summary


- 2024年はヒューマノイドスタートアップへの投資金額が過去最高を記録するなど、多額の資金が流れ込んだ。大企業も技術開発に取り組んでおり、連携する動きも活発になっている。
- 安全性やコストの問題など課題もあるが、汎用ヒューマノイドが実現した際の経済的インパクトは大きく、将来的な労働力不足の懸念がある産業や危険な作業を伴う領域などでの活用が見込まれている。

1. ヒューマノイドロボットとは

1-1. ヒューマノイドロボットの定義

ヒューマノイドロボット（以下、ヒューマノイドと呼ぶ）は、日本語では人型ロボットとも呼ばれ、厳密な定義はないが、通常、人間の形状や能力をモデルにした汎用の二足歩行ロボットのことを指す。多くは、物体をつかむ、コンテナを移動する、部品を配置するなどの工場を想定した作業から、洗濯物をたたむ、人間の話し相手をするなど家庭でのサービスを想定した作業まで、幅広いタスクに対応することを目指して設計される（図表1）。

図表1：ヒューマノイドロボットの特徴

要素	特徴	イメージ図
形状	人間に似た頭部、胴体、腕、脚を持つことが多く、サイズも人間の身長や体格に近いものが多い。関節が人間とは逆方向に曲がるなど異なる部分を持つものもある	
動作	人間のように二足で歩き、滑らかな歩行が可能。手を使って物をつかむなど細かい動作もできることが理想だが、指を持たない場合もある	
機能	人間のように自律的に判断し動作する能力が望まれる。工場作業、介護、警備、受付など、幅広いタスクに従事することを目指して設計される	

出所：各社資料から三井物産戦略研究所作成（画像はLos Angeles Times <https://www.latimes.com/business/story/2024-10-15/tesla-optimus-bots-were-remotely-operated-at-cybercab-event>（2024年12月28日最終閲覧））

人間に似た形状を持つことで社会での受け入れやすさが増し、また、人間を中心に設計された社会インフラに導入しやすいと考えられ、将来的には、人間が行う作業を補助・代替していくと見込まれる。

1-2. ヒューマノイドロボットを支える技術の進展

ヒューマノイドに関わる技術はソフトウェアからハードウェアまで多様で、総合的な技術力が必要である。その中でも近年は、AI技術が進展している。従来、現実のデータによる学習ではデータの取得に大きなコストと時間がかかっていたところ、仮想空間上で同時に多数のヒューマノイドをシミュレートし、歩行や転倒、物の移動などさまざまな動作を効率的に学習することが可能となったことで、ヒューマノイドの動作制御が大幅に改善した（図表2）。ただし、現実のすべてを仮想空間で再現することは難しく、仮想空間での学習をそのまま現実に適用すると食い違いが生じることがあるため、調整等が必要となり、現実のデータも引き続き重要である。（米）NVIDIAは、仮想空間上でロボットAIの学習が行える開発環境プラットフォーム「Isaacシリーズ」を提供しており、同社のGPU学習用ソフトウェアのCUDAが、AI開発においてGPUの優位性を確立し研究者を多く引き付けたのと同様に、ロボットAI分野でも優位性をつかもうとする意図が見える。

図表2：仮想空間での学習の様子



出所：各社資料から三井物産戦略研究所作成（画像左：NVIDIA Isaac <https://developer.nvidia.com/isaac>、右の上下とも：NVIDIAのYoutube <https://youtu.be/kr7FaZPFp6M?feature=shared>（すべて2024年12月28日最終閲覧））

また、近年はエンドツーエンド学習と呼ばれる学習手法や、大規模行動モデルといった人間の行動データからAI自ら学習する手法も発表されており、今後のさらなる進展が期待される。AI以外では、アクチュエータの変化や、センシング技術が成熟してきたこともロボットの精度向上に寄与している（図表3）。

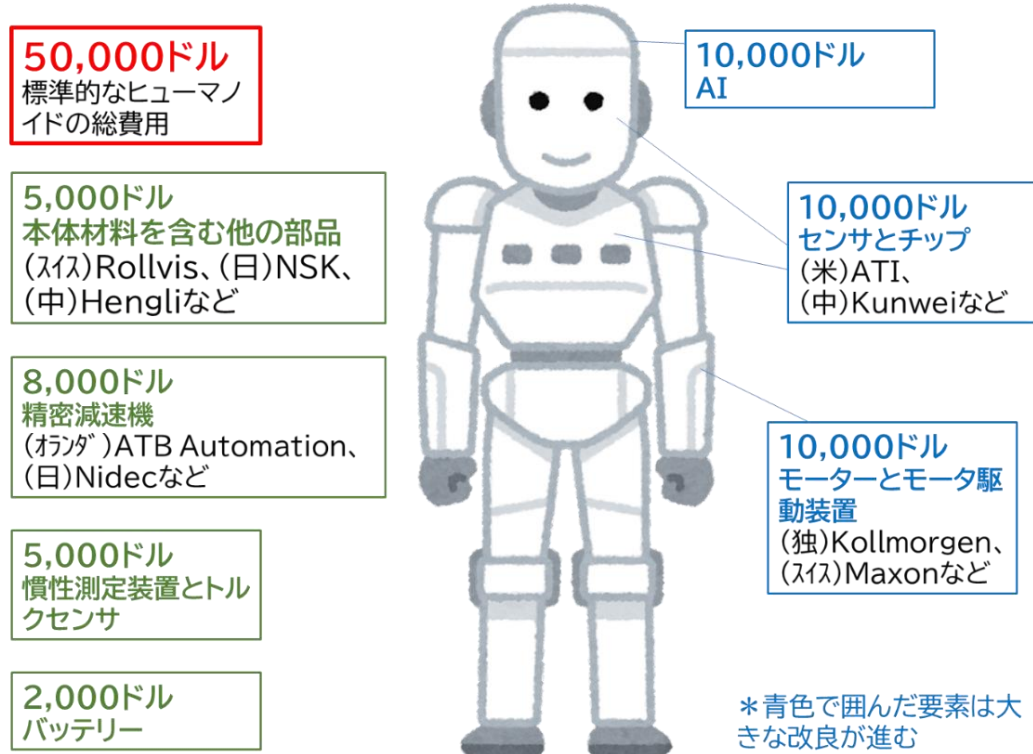
図表3：ヒューマノイドの制御精度向上に寄与する技術

要素	特徴
AI	<ul style="list-style-type: none"> ● Sim2Real: 仮想空間上での学習を現実に応用させる手法 ● エンドツーエンド学習 (end-to-end Learning、E2E学習): AI学習を、認識や動作などいくつかのステップに分けるのではなく、最初から最後まで一気に学習する手法 ● ロボット基盤モデル: 言語、画像、行動等の大量データを学習したロボット向けの基盤となるモデル ● 大規模行動モデル(LBM: Large Behavior Model): 人間の行動データを観察しそこから学習したモデル
ハードウェア	<ul style="list-style-type: none"> ● アクチュエータ: 一般には、油圧から電動への駆動系の変化により価格が低下。また、TeslaのOptimusには高精度の制御を可能とするため、ボールねじや遊星ローラーなどのリニアアクチュエータが使用されているといわれる ● センサ: LiDARやカメラなど異なる種類のセンシングデータを統合して扱えるようになった

出所：各社資料から三井物産戦略研究所作成

コスト面では、過去長らく1台の製造コストが数千万～億円レベルでかかっていたものが、2023年の推定値で5万ドル程度まで低下してきており、量産が現実的な価格に近付いてきている（図表4）。

図表4：ヒューマノイドロボットの部品とコスト（2023年の推定値）、代表的なサプライヤー



出所：Global Xの資料などから三井物産戦略研究所作成

2. 注目すべき動向

ヒューマノイドを開発する企業が膨大な資金を調達している。2024年1月～3月期のヒューマノイド関連の資金調達額は7億7,500万ドルとなり、過去の通年ベースでの資金調達額と比較して既に過去最高を記録

した¹。その大部分を占めるのが（米）Figure AIで、（米）OpenAIやNVIDIA、2024年2月にマイクロソフトやジェフ・ベゾス氏の投資会社など多くの有名組織から6億7,500万ドルを調達している。調達額ではFigure AIが突出しているものの、2024年は他にも、（米）Agility Robotics、（中）Unitree Robotics、（ノルウェー）1X Technologies、（加）Sanctuary AI、（中）Fourier Intelligence、（米）Appttronikなど、多くのスタートアップが資金を調達している（図表5）。また累積で1億ドル以上調達したスタートアップも増えており、本領域に対する注目の高さがうかがえる。

図表5：ヒューマノイドを開発するスタートアップと資金調達状況

会社名	シリーズ (直近の調達月)	推定累計調達額	推定企業価値	主な投資家
Figure AI	シリーズB (2024年2月)	8億4,500万ドル	27億ドル (2024年2月時点)	<ul style="list-style-type: none"> ● OpenAI Startup Fund ● NVIDIA ● Microsoft ● Bezos Expeditions ● Intel ● リベラ・ゲーミング・オペレーションズ(日本企業)
Agility Robotics	シリーズB (2024年7月)	1億7,800万ドル	10億ドル (2024年10月時点)	<ul style="list-style-type: none"> ● Amazon ● Sony Innovation Fund ● TDK Corporation
Unitree Robotics	シリーズC (2024年9月)	1億5,000万ドル	11億ドル (2024年9月時点)	<ul style="list-style-type: none"> ● Beijing Robot Industry Fund ● Zhongguancun Science City Science
1X Technologies	シリーズB (2024年1月)	1億4,000万ドル	4億ドル～6億ドル (2024年1月時点)	<ul style="list-style-type: none"> ● OpenAI ● Samsung Next
Sanctuary AI	シリーズA (2024年6月)	1億4,000万ドル	—	<ul style="list-style-type: none"> ● Accenture Ventures ● BDC Capital
Fourier Intelligence	シリーズD (2024年1月)	9,450万ドル	—	<ul style="list-style-type: none"> ● Softbank Investment Advisors
Appttronik	シード (2024年5月)	6,530万ドル	2億5,000万ドル (2024年8月時点)	<ul style="list-style-type: none"> ● Assembly Ventures ● BlueLake Ventures

出所：Crunchbase、PitchBookなどから三井物産戦略研究所作成

スタートアップ以外の企業もヒューマノイド開発に取り組んでいる。自社で開発に取り組む企業の例が、（米）Tesla、（中）UBTECH、（日）TOYOTAに加え、ヒューマノイド開発で長く注目を集め2020年に（韓）HYUNDAI傘下となった（米）Boston Dynamicsである。いわゆるビッグテックでは、（米）Google、（米）Meta、NVIDIAが、ヒューマノイドに関連するAI技術やロボットアームの開発等に取り組んでいる。企業間の提携も進んでおり、資本関係のあるFigure AIとOpen AIはもちろんのこと、2024年10月にはBoston DynamicsがTOYOTAの研究所であるToyota Research Instituteとヒューマノイド開発での提携を発表し、2024年12月にはAppttronikがGoogleとの提携を発表している（図表6）。現状の技術力については、繊細な手や指の制御など高度な技術力では、欧米系の企業が強いとみられる一方、大量生産に向けた動きでは中国系の企業が進んでいる。

¹ CB Insightsの発表「[Humanoid robotics in 5 charts: AI drives funding to record levels](#)」（発行日2024年3月7日、最終閲覧日2024年12月28日）による。

図表6：ヒューマノイド開発企業の主な開発提携状況

ヒューマノイド開発企業	パートナー企業	取り組み内容
Figure AI	Open AI	Open AIがFigure AIのヒューマノイド向けAIモデルを構築する
Boston Dynamics	Toyota Research Institute (TRI)	Boston Dynamicsのハードウェアに、TRIのAI技術を実装する
Apptроник	Google Deep Mind	ApptроникのロボットプラットフォームとGoogle Deep MindのAI知識を組み合わせる

出所：三井物産戦略研究所作成

ヒューマノイドは、自動車製造工場、フルフィルメントセンター、商業施設、iPhone製造工場など多様な産業での試験導入が加速している。Teslaは現場を持つため独自で試験導入を行うが、それ以外の多くのヒューマノイド開発企業は、現場をもつ企業と提携してテストしている（図表7）。

ヒューマノイド開発企業の中でも、注目の3社の事例を解説する。

1. Figure AIの「Figure 02」

BMWはFigure AIのヒューマノイドロボットFigure 02を自動車生産ラインに導入し、シャーシの組み立てや部品の運搬を実施している。2024年11月現在、導入から数カ月を経て、Figure 02の機能はアップデートされ、導入当初と比べ動作速度が400%向上した。これにより、1日当たり1,000件の自動車部品の配置を行う。







2. Agility Roboticsの「Digit」

Agility RoboticsのDigitは逆関節の脚を持つロボットで、Amazonのフルフィルメントセンターと（米）GXO Logisticsの工場に試験導入され、ボックスの運搬など、繰り返し作業を担当している。

3. Teslaの「Optimus」

Optimusは、Teslaの自動車製造工場での活用が見込まれる。2026年までに製品として販売予定で、価格は2万～3万ドルと予想される。汎用ロボットとして、買い物や芝刈り、さらにはベビーシッターまで幅広い作業を行えるよう設計されている。

図表7：主なヒューマノイドの特徴と試験導入例

開発企業 (ロボット名)	Figure AI (Figure 02)	Agility Robotics (Digit)	Tesla (Optimus)
試験導入例 (導入時期)	BMWの米国にある 自動車製造工場 (2024年8月)	Amazonの米国にある フルフィルメントセンター (2023年10月)	自社の 自動車製造工場 (予定)
従事作業	<ul style="list-style-type: none"> シャーシの組み立て、部品の運搬 1日当たり1000件の部品配置を実施 (2024年11月時点) 	<ul style="list-style-type: none"> ボックスの運搬や棚だし 	<ul style="list-style-type: none"> デモ動画には、部品の設置や運搬の様子あり
特徴 (計画含む)	<ul style="list-style-type: none"> 168cm、70kg 自由度:41 可搬重量:20kg ➢ 会話可能 	<ul style="list-style-type: none"> 175cm、65kg 自由度:32 可搬重量:16kg ➢ 指がない 	<ul style="list-style-type: none"> 173cm、57kg 自由度:42 可搬重量:20kg ➢ 環境認識に自動運転技術を活用
写真	 シャーシを組み立てるFigure 02	 ボックスを運搬するDigit	 卵を壊さずに扱うOptimus Gen2
開発企業 (ロボット名)	Appttronik (Apollo)	Sanctuary AI (Phenix)	UBTECH (Walker S1)
試験導入例 (導入時期)	Amplifierの米国にある フルフィルメントセンター (2024年12月)	Canadian Tireのカナダにある アパレル店舗 (2023年3月)	FOXCONNの iPhone製造工場 (予定)
従事作業	<ul style="list-style-type: none"> 複数の運送業者の出荷コンテナごとに品物を仕分ける 	<ul style="list-style-type: none"> 商品のピッキングや梱包、清掃、タグ付け、ラベル付け、折りたたみなど110のタスク 	<ul style="list-style-type: none"> iPhoneの組み立てプロセスにおいて労働者の健康問題を引き起こす可能性のある作業
特徴 (計画含む)	<ul style="list-style-type: none"> 173cm、73kg 自由度:— 可搬重量:25kg ➢ 胸部等のモニタで意思疎通可能 	<ul style="list-style-type: none"> 170cm、70kg 自由度:ハンドのみで21 可搬重量:25kg ➢ 筐体はカーボン製 	<ul style="list-style-type: none"> 172cm、76kg 自由度:41 可搬重量:15kg ➢ 胸部に緊急停止ボタンを備える
写真	 品物を仕分けるApollo	 品物を陳列するPhenix(第5世代)	 ボックスを運搬するWalker S1

* 自由度とは、ロボットの可動部である関節や軸の数を指す

出所：各社資料などから三井物産戦略研究所作成（画像上側左：BMWのサイト <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0444265EN/successful-test-of-humanoid-robots-at-bmw-group-plant-spartanburg?language=en>、上側中央：Agility Roboticsのサイト <http://agilityrobotics.com/products>、上側右：TeslaのYoutube <https://youtu.be/cpraXaw7dyc?feature=shared>、下側左：AppttronikのX <https://x.com/Appttronik/status/1872326657979421153/photo/1>、下側中央：Sanctuary AIのサイト <https://sanctuaryai.substack.com/p/sanctuary-ai-deploys-first-humanoid>、下側右：UBTECHのYoutube <https://youtu.be/UBbk18oZbTc?feature=shared>（すべて2024年12月28日最終閲覧））

3. 今後の展望

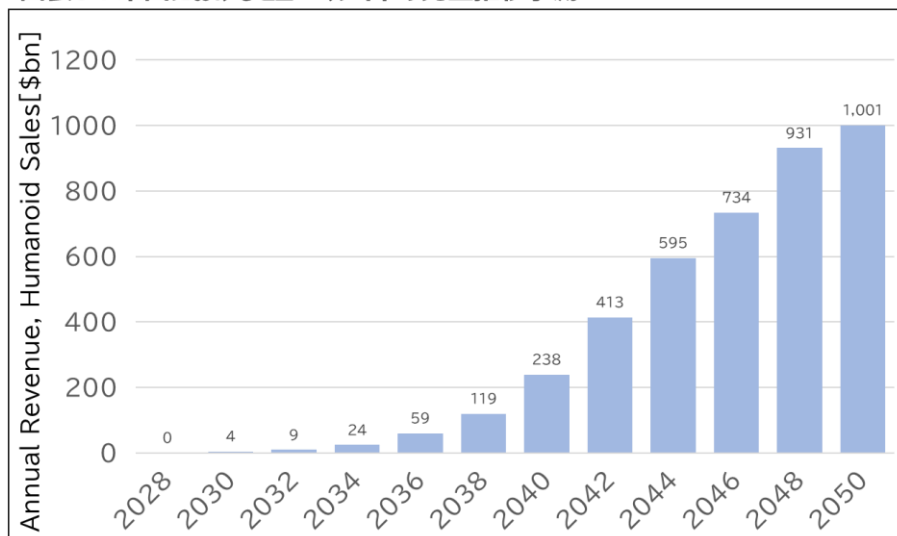
ヒューマノイドの課題としては、まず、AIモデルの解釈可能性²の向上が挙げられる。深層学習に基づくAI技術は、結果に至った理由を人間が理解するのが難しい。そのため、問題が起こった際の原因究明が困難であり、安全が求められる場面で使いにくい問題がある。また、安全性の確保も課題である。ヒューマ

² 深層学習によるAIモデルが予測や推定を行ったプロセスや結果を導き出した理由を、人間が解釈できるか否かを指す。

ノイドの重量は大人一人分ほどありつつ、人間と近距離での協業を想定していることから、もし不慮の動作をした場合に、物理的に与える影響が大きい。他には、精度のさらなる向上や、大量生産とコスト削減も課題であり、これらを克服することで、より広範な産業分野での導入が進むと考えられる。

現在は、試験導入などでその有用性が試されている段階であり、タスク特化の専用ロボットに対して当面のうちは性能とコストで劣るであろうが、現在の技術進展速度や資金流入状況に鑑みれば、今後十数年で、専用ロボットを上回ることも十分あり得る。そうなれば、汎用タスクに対応可能なヒューマノイドであれば、第2章で言及した物流、製造、小売り、医療、家庭向けに加えて、人口減少による労働力不足が問題となりつつある飲食や建設、極力人間の稼働を減らしたい防衛や災害対応といった多様な領域での導入が一気に広がる可能性がある。米国におけるヒューマノイドの人口は、2030年の4万台から、2040年には800万台、2050年には6,300万台、また売上は1兆ドルとなる予測³で、社会への浸透は思ったより早く広範なものとなるかもしれない（図表8）。

図表8：米国におけるヒューマノイドの売上推移予測



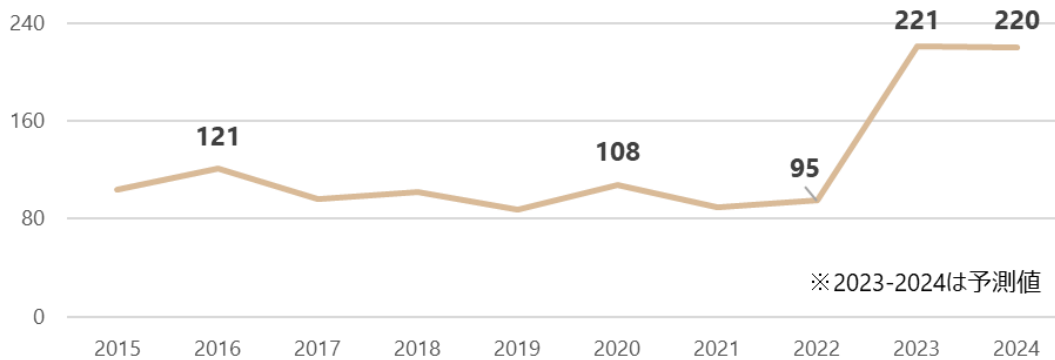
出所：Morgan Stanleyの資料から三井物産戦略研究所作成

ヒューマノイドロボットに関する知財分析

ヒューマノイドロボットに関する知財分析として、文献をAIにより解析し“Humanoid robot”のタグが付与された特許データを抽出し、技術をめぐる状況を分析した。分析対象は、グローバル特許検索ツールPatSnapを用いて検索した、2015年から2024年出願の1,121件（ファミリー件数）である。

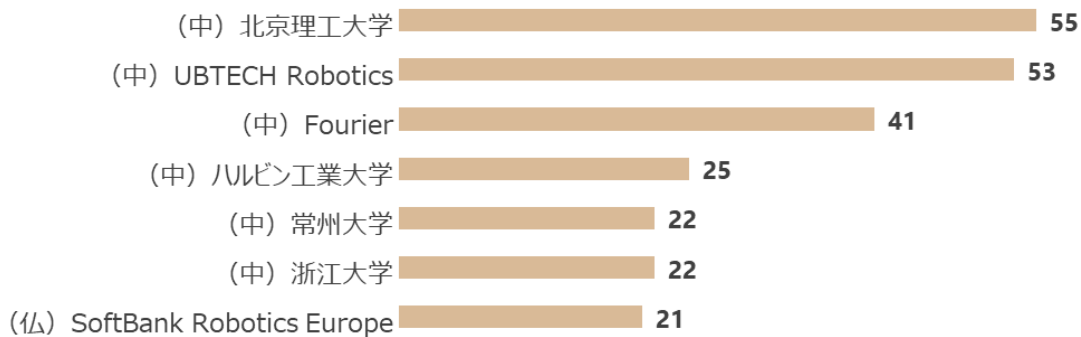
³ Morgan Stanleyのレポート「Could AI Robots Help Fill the Labor Gap?」（発行日2024年8月13日、最終閲覧日2024年12月28日）による。

図表9：ヒューマノイドロボットに関する特許出願件数/年



出所：三井物産戦略研究所作成

図表10：出願人別件数上位ランキング（2015年-2024年）



出所：三井物産戦略研究所作成

図表9に示すように、出願件数は2023年に急増しているものの、2015年から2022年までも一定の出願があり、長年にわたり研究開発が進められてきた分野であることがわかる。図表10に示すように、出願件数上位のほとんどが中国の企業・大学である。唯一ランクインした欧州企業であるSoftBank Robotics Europeは、ヒューマノイドロボットの代表的製品である「Pepper」を手がける企業として知られているが、21件の出願のほとんどは2015年になされたものであり、現在は特許上の活動を確認できない。

一方で、中国以外の企業等もヒューマノイドロボット分野で独自の技術開発を進めており、たとえば本文に登場するAgility Roboticsはロボット操作用グリッパーやロボットの移動を改善するためのシステムといった基盤技術を出願している。これらはヒューマノイドに限らず多様なロボットに適用可能な技術であるため今回の検索範囲からは外れてしまうが、同社の技術力を示す重要な特許である。また、ランキング外ではあるが、日本企業としてはヒューマノイドロボット「Friends」を開発する川崎重工の特許出願が15件確認でき、産業用途やサービス分野での活用が期待されている。このようにヒューマノイドロボット技術は中国が出願件数でリードしているものの、各国企業や研究機関がそれぞれ異なるアプローチで技術開発を進めており、今後の市場競争や新技術の登場が注目される。

図表11：技術トピック分類

技術トピック	2020年以降 増加率	出願トレンドの変化
センシング技術	68%	複合センサの統合が進み、視覚・触覚・音声データを統合した環境認識技術が重要視されている
ロボット本体	62%	耐久性や安定性重視から、モジュール化・軽量化設計が加速 製造コスト削減やメンテナンス性向上を追求
人工知能・ 学習アルゴリズム	56%	機械学習・強化学習を活用し、環境適応型アルゴリズムや自己学習機能の開発が増加
制御システム	50%	動作精度の向上に加え、協調制御やリアルタイム制御へと進展 複数ロボット間の連携が注目
駆動・アクチュエーション	41%	従来型の駆動方式（空圧・油圧）から、電動アクチュエータや柔軟駆動へのシフトが顕著

出所：三井物産戦略研究所作成

ヒューマノイドロボットに関する特許データを、技術トピック別に分類すると図表11のようになる。2020年以降の出願件数増加率が最も大きい技術トピックはセンシング技術であり、高精度な3D画像処理や環境認識に対応するアルゴリズムに関する視覚センサの発明、触覚のリアルタイム処理能力の向上を課題とした触覚センサの発明、マルチモーダルデータのリアルタイム処理を可能とするセンサ統合技術に関する発明などが出願されている。センシング技術がもたらす競争優位性としては、リアルタイム性の向上（ロボットが即時に環境を認識し、最適な動作を選択する能力が向上）、高精度な操作の実現（力覚や触覚の精密検知により、繊細な作業が可能）、人間との自然な相互作用（表情や動作を理解し、適切な応答を行う視覚・触覚統合技術）などが挙げられる。

特許データは、ヒューマノイドロボットの開発が、①労働力不足の解決、②安全性の確保、③社会受容性の向上、という社会的課題の解決を目指していることを示している。これらは、ヒューマノイドロボットの産業分野、医療・介護分野、家庭・サービス分野での普及を後押しするものといえる。

辻 理絵子 Rieko Tsuji / シニアマネージャー
専門分野：人工知能、5G通信、LPWA

松浦 由依 Yui Matsuura / シニアアナリスト
専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社および三井物産グループの統一した見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社および三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。