

## 2.2.4 移動（地上）

### （1）研究開発領域の定義

ロボットの移動機能に関する研究分野であり、物理的な機構としては主に車輪機構と脚機構に大別される。車輪を用いた地上移動としては、工場内の自動搬送や、自動車の自動運転なども移動ロボットとして捉えることができる。脚ロボットには2脚ロボットや4脚ロボットがあり、また上半身に腕を持ち物体環境操作が可能な人型ロボットも含まれる。また、実際のタスクでこれらの移動機構・機能を活用するためには、与えられた軌道を追従する移動制御に加え、現在位置から目標位置までの軌道を生成する移動計画の技術が必要になる。前者は機構に依存した研究であり、後者は機構に非依存の技術となっている。このように移動にまつわる研究開発領域は、機構から制御、計画と広いものであり、さらに、この制御や計画を行うために認識や知能の研究も含まれる。

その中で、今後のロボットの活躍が期待される場面では平地と段差が混在する住宅環境、あるいは、階段やエスカレーターが存在する商業環境、車道、砂利道、あぜ道、田畑と移動する農業環境など、複合的な環境の踏破が必要とされることに注目し、特に近年の研究開発により脚型と車輪のハイブリッド機構や身体ダイナミクスを活用した脚機構により、ロボットの安定性、高速移動や不整地移動能力が飛躍的に向上し実用的になりつつある点に注目し本研究領域を概観する。

### （2）キーワード：

車輪移動、4脚歩行、2脚歩行、脚型ロボット、受動歩行、脚車輪ハイブリッド機構、身体ダイナミクスの活用、MaaS

### （3）研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

ロボットの移動機能はMaaS（Mobility as a Service）の基本機能であり、電子商取引の拡大を背景とした宅配需要の高まりと、人口減少下における配送員確保の困難さから注目を浴びている。これまではAI技術の高度化により可能になった地図生成、経路生成、自動運転制御の研究に焦点が当たってきたが、これらの知能技術がある程度成熟すると、実際の住宅環境、商業環境、農業環境などにおいて、目的地まで確実に到達してサービスとして成立させるためには、不整地も含めた環境で安定かつ高速に移動できる移動ロボットが必要不可欠である。その中で、従来の車輪型だけでなく、それを支えるリンク機構により不整地を踏破可能、あるいは安定した不整地移動が可能な脚ロボットが改めて注目を浴びている。特に、脚ロボットは理論の発展とそれを実現する計算機の高速度化により実用レベルに近づいており、さらに、従来の研究の流れとは大きく異なり身体ダイナミクスを最大限生かした二足歩行ロボットが登場する等、研究分野が活性化している状況にあり、理論的な発展が応用や事業に直結する分野として重点的に研究するべき領域である。

#### [研究開発の動向]

移動して作業するロボットにとって移動は基本機能の一つであり、その機構、制御に関する研究はロボティクスの黎明期から研究成果が蓄積されている。

車輪移動機構<sup>1)</sup>は、いわゆる自動車のようにステアリングを有し、任意の方向への移動やその場回転が行えない非ホロノミック型と、全方位移動機構を有するホロノミック型に大別できる。ホロノミック型は高い移動能力を有するだけでなく、非ホロノミック型のロボットに必要な複雑な経路計画問題が発生しないためアドバンテージは多い。その構造としてはフリーローラーを車輪円周上に取り付けたもの（特に45度に傾け

て取り付けられたものはメカナムホイールと呼ばれている)、クローラー<sup>1</sup>上に取り付けられたもの、フリーローラー自体を回転させるものがある。全方位移動は移動能力の面でアドバンテージは多いが機構が複雑化することや段差踏破力が弱い場合が多く、工場内物販運搬用ロボット等、実用化されている車輪移動ロボットのほとんどは非ホロノミック型のものである。

一方で、災害地や宇宙環境など特殊環境での移動ロボットでは段差乗り越えのための特殊機構が広く見られる。例えばロボットの左右に2個ずつ全体で4個のクローラーを配置し、さらにそのピッチ軸可動機構を付加することで段差踏破能力を上げた機構<sup>2)</sup>も提案され、災害対応ロボットや廃炉ロボットに広く採用されている。また、宇宙用ロボットでは本体が変形するロッカーボギーサスペンションや、砂地での移動能力の高い車輪機構の研究が進められている。

これらの事例はある特定の環境(平地、砂地、不整地)に対応した移動機構を採用しているといえる。一方で、平地と段差が混在する住宅環境、あるいは、階段やエスカレーターが存在する商業環境、車道、砂利道、あぜ道、田畑と移動する農業環境など、今後のロボットの活躍が期待される場面では複合的な環境の踏破が必要とされる。そこでは、後述の応用指向の脚機構の研究や脚型と車輪のハイブリッド機構<sup>3)</sup>などの研究開発が注目されている。

連続して車輪を接地可能な地表面が必要な車輪ロボットに比べ、脚ロボットは脚接地箇所を離散的に選択できるため不整地踏破性能が高い点にメリットがある。また、ロボットが運搬する物体の軌道と、ロボットの脚の設置位置や運動を分離することが可能なため、不整地においても連続して安定した運搬物体の経路を選択することも可能である<sup>4)</sup>。このような移動機構としてのアドバンテージに加え、機構や制御としての興味から古くから研究が盛んである。

脚ロボットの機構としては1960年代にGeneral Electric社が操作者と油圧アクチュエータを介して機械的に接続され、遠隔操作可能な4脚ロボットを開発している<sup>5)</sup>。一方で計算機により制御される自律型のロボットはオハイオ州立大学のMcGheeらが開発した電気モータ式の6脚ロボットが1970年代に誕生している<sup>6)</sup>。また、東工大の広瀬らは機構と制御が不可分のものであると指摘し、歩行中のエネルギー消費を効率化するためのパンタグラフ型の脚機構を提案している<sup>7)</sup>。

脚ロボットの制御では支持脚が構成する多角形上に常に重心がある静歩行と、能動的に安定性を維持する動歩行に大別される。能動的安定性自体は1950年代に倒立振子の研究がなされているが、ロボットを用いた動歩行研究は、1980年代に東大の下山らにより開発された竹馬型二足歩行ロボット<sup>8)</sup>が挙げられる。この研究では各脚は地面と点接地する構成とし、遊脚が接地する際の姿勢が安定性に重要な影響を与えることを見だし、その制御を行うことで動的歩行を実現している。さらに米国カーネギーメロン大学(CMU)のRaibertらは、ジャンプさせるホッピング、前進させるための着地位置制御、安定化させるための姿勢制御の三つの制御側からなる1本足のホッピングロボットにより2.15 [m/sec]の速度でのあらかじめ与えられた軌道に沿った移動を実現した<sup>9)</sup>。

人型ロボットの研究は1980年代に早稲田大学<sup>10)</sup>で始まり、特に1990年代に本田技研工業が自立・自律型のヒューマノイドロボット<sup>11)</sup>を発表して以来、アカデミアにおけるハード開発研究分野が活性化(韓国KAIST、Hubo、イタリアIIT WALK-MAN、iCUB、ドイツDLR TORO)するだけでなく、多くの企業の参入が相次いだ(川田工業 HRP-2、SONY Qrio、トヨタ パートナーロボット、PAL Robotics REEM-C、Aldebaran Romeo)。また、安定化制御系としては、ZMP (Zero Moment Point床反力の圧力中心)が、ロボットの支持脚から構成される支持多角形内を運動するような目標軌道をあらかじめ計算し、これを実現する制御がある。具体的な制御手法は、倒立振子モデルによる簡略化と線形化を通じて得られた微分方程式の状態空間表現を用いるもの<sup>13)</sup>、ZMPが支持多角形内に存在するといった拘束条件に対して有効な手法であ

1 ブルドーザーなどの足回りで、ゴムや金属のベルトが回って進むもの。キャタピラーともいう。

るモデル予測制御を用いるもの<sup>14)</sup>、重心加速度を入力とし、ZMPを出力する単質点モデルを用いた最適トラッキング制御として捉え、さらに、関節トルク限界などの各種の物理制約をロボットの全身動力学モデルの不等式条件とした2次計画法を解く方法<sup>15)</sup> などへと発展しており、2010年代に入るとBoston Dynamics社によるAtlas等、非常に高いダイナミックな運動性能や不整地踏破性能を有するヒューマノイドロボットが現れている。

また、2脚ロボット分野では1990年代から研究が始まった受動歩行<sup>12)</sup>の研究にも注目したい。これは、アクチュエータ、センサー、制御を用いず歩行機械のダイナミクスとスロープ環境の相互作用のみで移動するものであるが、2010年代に入るとオハイオ州立大学においてこの機構的なダイナミクスやエネルギーの効率活用を目指す考え方を踏襲し、受動柔軟性を有する脚を有し80年代の竹馬ロボットやホッピングロボットに見られるようなシンプルな制御則を指向した制御アルゴリズムを用いることで、不整地踏破性能や高速移動性能を実現する研究が進み<sup>16)</sup>、ATRIASやCassieといった、軽量でばね要素を持った鳥形脚を有するロボットが開発された。また、その成果はベンチャー企業であるAgility Roboticsへの技術移転と工場における物品運搬作業ロボットDigitとしての事業化が進んでおり、2022年にはシリーズBの資金調達<sup>2)</sup>を受ける等、期待が高まっている。

一方、4脚ロボットにおいては、2019年にBoston Dynamics社からSpotロボットが一般販売され、検査、見回り、配達、監視などの業務において事業化が進んでいる。また、2022年にはスイスのETHのスピノフであるANYbotics社も同様に見回り検査用の4脚ロボットの一般販売を行った。さらに、中国Unitree社は5,000USDを切る価格で小型の4脚ロボットを市場投入し、ニューヨーク大学やフランスのCNRSらは4脚ロボットの民主化を掲げOpen Torque-controller modular robotプロジェクトを進めている等、改めて4脚ロボットの不整地踏破性が注目され、多くの企業が参入しつつある状況にある。

また、4脚ロボットや、あるいは受動柔軟性脚を有する2脚ロボットは、モータ等の重量物が脚でなく胴体に集中する構造にあり、シンプルな制御則を適用しやすいため、近年発展の著しい深層強化学習等により歩行や不整地踏破行動の獲得が可能になりつつあり、今後、本分野における学習手法の適用がさらに広がることが期待される。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

###### • 脚車輪ロボット

脚と車輪の両方を有する新しいロボット機構の研究が注目を浴びている。Boston DynamicsのHandleは2脚ロボットの足が車輪になっており、2脚でバランスを取りながら車輪を用いた高速移動が可能である。また、韓国KAISTが開発した人型ロボットDRC-HUBO +<sup>17)</sup>は膝に車輪を有し膝をついた姿勢で車輪移動が可能であり、脚移動と車輪移動の二つのモードを有している。イタリアIITのCENTAUROも4脚車輪ロボットの下半身と双腕の上半身を持っている。また、スイスのSwiss-Mile社の4脚車輪ロボットは車輪移動、4足移動、二足移動を行っている。これらの研究は車輪ロボットの安定性、高速移動能力を有しつつ、なお脚ロボットの不整地踏破性を確保しようとする試みである。また、従来は制御が困難とされていた脚ロボットも最適化制御や非線形系計画法による解法が現れ安定な制御が可能になりつつあり、今後の発展が期待される。

###### • 身体のダイナミクスを活用した脚ロボット

オハイオ州立大学やAgility Roboticsが取り組んできた一連の、コンプライアンス性（物理的な柔軟さ）を持つ脚機構を用いた鳥形脚ロボットの歩行安定性は、Digitロボットの事業化や商品化に伴いさらに注目が

2 スタートアップに対する投資の一段階で、事業が軌道に乗り始めたことを示す。

集まり、改めて機構のダイナミクスを活用した移動機構の研究が深化すると予想される。特に、ロボットにおけるエネルギー効率についてはこれまで注目されてきていないが、移動ロボットの事業化などでは必要不可欠な視点であるだけでなく、将来の省エネ社会へ向けた重要な研究テーマである。

#### • 脚型ロボットによるMaaS (Mobility as a Service) の展開

自動運転技術を背景としたMaaSに注目が集まっており、宅配ロボット等、自動搬送サービスがAmazon、Alibaba、Baiduなどにより始まっている。一方、これらのサービスで用いられている移動ロボットは一般的な非ホロノミック型の車輪ロボットであり、階段やエスカレーター、あるいは、歩道の段差等でも踏破できない場合がある。今後、脚車輪ロボットの知見を生かし、経済性を有しつつ活動範囲を拡大できる移動ロボットが現れれば、MaaS適用範囲を大きく広げることができる。また、既に商用化が進んだ4脚ロボットSpotやANYmal、またVCより事業化の資金援助を受けている二足歩行ロボットDigitなど、今後のMaaSに向けた発展が期待される。

#### • 民生用4脚ロボット

中国のUnitree社やDeepRobotics社は5,000USD以下の比較的安価な4脚ロボットを販売し始めている。現在は愛好家や研究者向けの商品や活用法にとどまっているが、民生用ドローンの大手であるDJIが登場した2010年前後を顧みるに、これらの取り組みから4脚ロボットの市場が広がり、ホビー用から新事業展開へと発展する可能性は大きく、注目すべき活動である。

### [注目すべき国内外のプロジェクト]

#### • 災害現場や月面などで活動するロボット

2020年度から始まった内閣府ムーンショット型研究開発制度の中で「多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット」では、自然災害の減災や月面インフラ構築にも役に立つロボットの開発が目標になっている。そこでは、環境になじむロボットのハードウェアの構築が目標の一つとなっており、移動（ナビゲーション）だけでなくインフラ構築のための操作（マニピュレーション）の研究もターゲットになっている。従来の車輪や脚を持った移動ロボットだけでなく、脚車輪がたやアームも含めた新しいロボットの研究が進められている。

#### • オープンソースロボット

Open Dynamic Robot Initiativeはドイツ・マックス・プランク研究所、米国・ニューヨーク大学、フランス・LAAS/CNRSが共同して進めているプロジェクトであり、4脚ロボットのハードウェアと制御ソフトウェアをオープン化して無償で公開している。脚型ロボットは、機構設計にも制御ソフト開発にも挑戦性があり、これまでは資金の豊富な企業や、長年取り組んでいる大学研究室でしか研究しづらかったが、オープンな情報が公開され活用されることにより、研究コミュニティの活性化が期待される。

### (5) 科学技術的課題

#### • 異なる環境間で移動可能なロボット

平地と段差が混在する住宅環境、あるいは、階段やエスカレーターが存在する商業環境、車道、砂利道、あぜ道、田畑と移動する農業環境など、移動ロボットの応用場面ではその利用環境を平地、あるいは、不整地、などと限定することは難しい。従来のようにあらかじめ利用環境を決めて最適な移動機構を選択する設計手法でなく、より広い環境で利用可能な移動機構の開発が重要になる。従来のように車輪研究と脚研究と分けて考えることなく、脚車輪機構の中で、ハードウェアの複雑さと踏破能力のトレードオフを見極めた研究が必要にあるだろう。また、地上の移動だけでなく、ヒューマノイドロボットによる水中移動<sup>18), 21)</sup>や歩行と空中

移動<sup>19), 20)</sup>などの組み合わせの研究も始まりつつある。

• エネルギー効率を考慮した移動ロボット

移動ロボットは自身でバッテリーを運搬する必要があり常に活動時間の長さが課題になる。従来のような高剛性・高精度のロボットでは、必然的に重量が増してしまい、その分、活動時間が減るか、より多いバッテリーの搭載が必要になる。エネルギー効率の良い移動機構の研究は、事業化等では必要不可欠であるばかりか、将来の省エネ社会における重要な研究テーマである。また、特に脚ロボットにおいては、軽量身体や、受動歩行や身体ダイナミクスの活用など、研究すべき項目は多く残されており、今後の展開が期待される。

(6) その他の課題

• 法規制

移動ロボットはMaaSなどの分野で大きく期待されている。一方、わが国では、従来の法体系でカバーされない新しいサービスの導入に時間のかかることが多い。しかしながら、移動ロボットを用いたMaaS展開では、2001年には警察庁が「特定自動配送ロボット等の公道走行に係る道路使用許可基準」を公表しており、公道実証実験の道路使用許可の簡素化や基準の策定がスピード感をもって進められている。新産業の育成では、新しい挑戦を数多く行えるような環境が大切である。米国や中国では既に自動配送ロボットによるMaaSの事業化が進んでいることから、引き続きスピード感をもった環境整備や、許可等が必要のない体制への展開などが必要不可欠である。

• 新産業創出のための産学連携と人材育成

中国の民生用4脚ロボットや、米国の工場物品運搬作業用二足歩行ロボット、欧州の見回り検査用の4脚ロボット等など、移動ロボット技術を背景とした新産業創出では、大学の研究技術に基づいたスピノフ型のベンチャー企業が主流である。わが国においても同様の研究開発は盛んであり、その成果を社会に還元するためのスピノフ支援の体制が重要である。特に、高い人材流動性と資本流動性を有する米国とは異なる土壌を有することに留意し、国内企業の安定性と技術力を十分に生かせるような体制、例えば、大学の研究グループを企業内ベンチャーとして取り込む形や、あるいは逆に、寄付講座としてある程度の期間にわたって大学で事業化に向けた研究開発に取り込める体制の整備などが考えられる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	車輪機構、脚機構制御共に長年の研究の蓄積もあり、研究レベルは高い。また、災害対応ロボット等では震災や廃炉のフィールドもあり研究開発が進んでいる。
	応用研究・開発	○	→	災害対応ロボットでは実用化や活用が進んでいる。一方で、自動配達ロボットや脚ロボットの事業化等に関しては動きが少ない。また、従来人型ロボット研究をけん引してきた企業の脱退も相次いでいる。
米国	基礎研究	◎	↑	近年、脚ロボット研究が盛んである。特に人型ロボットの制御に関する理論的研究、受動歩行やコンプライアンス性を持つ脚機構を用いた鳥形脚ロボット、水中人型ロボット、飛行人型ロボットなど、従来にない新しい機構への取り組みも多い。
	応用研究・開発	◎	↑	脚ロボットの事業化に取り組む大学スピノフ型のベンチャー企業が生まれている。また、Ghost Roboticsなど軍用4脚ロボットを手掛ける企業が現れている。

欧州	基礎研究	◎	↗	近年、脚ロボット研究が盛んである。制御理論に基づいた脚車輪ロボットの制御や、あるいは深層学習による歩行動作研究などが行われている。
	応用研究・開発	○	↗	スイスETHを中心に4脚ロボットの事業化に積極的に取り組んでいる。
中国	基礎研究	△	→	目立った研究は見られないが、一方で数多くのベンチャー企業に人員を輩出しており、車輪・脚移動の基礎教育は手厚いように見える。
	応用研究・開発	◎	↗	UnitreeやDeep Roboticsなど民生用4脚ロボット専門企業が生まれ始めている。また、BAT企業群を中心に自動配送サービスが盛んである。
韓国	基礎研究	◎	→	KAISTを中心に二足歩行ロボットの研究が盛んである。特に、脚車輪機構や新しい発想のロボットの開発が注目を浴びている。
	応用研究・開発	△	→	脚ロボットに関する目立った事業活動は行っていないように思われる。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えていない

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## 参考文献

- 1) 山下淳, 他「ロボットの移動機構に関する研究動向『日本ロボット学会誌』21 巻 3 号 (2003) : 282-292., <https://doi.org/10.7210/jrsj.21.282>.
- 2) 広瀬茂男, 青木実仁, 三宅潤「対地適応型4クローラ走行車 HELIOS-IIの開発」『日本ロボット学会誌』10 巻 2 号 (1992) : 283-291., <https://doi.org/10.7210/jrsj.10.283>.
- 3) Marko Bjelonic, et al., "Whole-Body MPC and Online Gait Sequence Generation for Wheeled-Legged Robots," in *2021 IEEE/RISJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (IEEE, 2021), 8388-8395., <https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636371>.
- 4) Marc H. Raibert, "Legged robots," *Communications of the ACM* 29, no. 6 (1986) : 499-514., <https://doi.org/10.1145/5948.5950>.
- 5) R. A. Liston, and R. S. Mosher, "A versatile walking truck," in *Proceedings of the Transportation Engineering Conference Organized by the Institution of Civil Engineers* (the Institution of Civil Engineers, 1968), 255-268.
- 6) R. B. McGhee, "Vehicular legged locomotion," in *Advances in Automation and Robotics*, ed. G. N. Saridis, (JAI Press, 1983).
- 7) 広瀬茂男, 梅谷陽二「歩行機械の脚形態と移動特性」『バイオメカニズム』5 巻 (1980) : 242-250., <https://doi.org/10.3951/biomechanisms.5.242>.
- 8) 三浦宏文, 下山勲「竹馬型二足歩行ロボットの制御系」『日本ロボット学会誌』1 巻 3 号 (1983) : 176-181., [https://doi.org/10.7210/jrsj.1.3\\_176](https://doi.org/10.7210/jrsj.1.3_176).
- 9) Marc H. Raibert, H. Benjamin Brown Jr. and Michael Chepponis, "Experiments in Balance with a 3D One-Legged Hopping Machine," *The International Journal of Robotics Research* 3, no. 2 (1984) : 75-92., <https://doi.org/10.1177/027836498400300207>.
- 10) 高西淳夫, 他「2足歩行ロボットWL-10RDによる動歩行の実現」『日本ロボット学会誌』3 巻 4 号 (1985) :

325-336., <https://doi.org/10.7210/jrsj.3.325>.

- 11) Kazuo Hirai, et al., “The development of Honda humanoid robot,” in *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2 (IEEE, 1998), 1321-1326., <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1998.677288>.
- 12) Tad McGeer, “Passive Dynamic Walking,” *The International Journal of Robotics Research* 9, no. 2 (1990) : 62-82., <https://doi.org/10.1177/027836499000900206>.
- 13) Shuuji Kajita, Osamu Matsumoto and Muneharu Saigo, “Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs,” in *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3 (IEEE, 2001), 2299-2306., <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.932965>.
- 14) Pierre-brice Wieber, “Trajectory Free Linear Model Predictive Control for Stable Walking in the Presence of Strong Perturbations,” in *2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* (IEEE, 2006), 137-142., <https://doi.org/10.1109/ICHR.2006.321375>.
- 15) Russ Tedrake, et al., “A closed-form solution for real-time ZMP gait generation and feedback stabilization,” in *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)* (IEEE, 2015), 936-940., <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2015.7363473>.
- 16) Christian Hubicki, et al., “Walking and Running with Passive Compliance: Lessons from Engineering: A Live Demonstration of the ATRIAS Biped,” *IEEE Robotics & Automation Magazine* 25, no. 3 (2018) : 23-39., <https://doi.org/10.1109/MRA.2017.2783922>.
- 17) Hyoin Bae, et al., “Walking-wheeling dual mode strategy for humanoid robot, DRC-HUBO+,” in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (IEEE, 2016), 1342-1348., <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759221>.
- 18) Oussama Khatib, et al., “Ocean One: A Robotic Avatar for Oceanic Discovery,” *IEEE Robotics & Automation Magazine* 23, no. 4 (2016) : 20-29., <https://doi.org/10.1109/MRA.2016.2613281>.
- 19) Kyunam Kim, et al., “A bipedal walking robot that can fly, slackline, and skateboard,” *Science Robotics* 6, no. 59 (2021) : eabf8136., <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abf8136>.
- 20) Tomoki Anzai, et al., “Design and Development of a Flying Humanoid Robot Platform with Bi-copter Flight Unit,” in *2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)* (IEEE, 2021), 69-75., <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS47582.2021.9555801>.
- 21) Tasuku Makabe, et al., “Development of Amphibious Humanoid for Behavior Acquisition on Land and Underwater,” in *2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)* (IEEE, 2021), 104-111., <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS47582.2021.9555671>.

## 2.2

### 俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス