

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20373

研究課題名（和文）不安定な搭乗型機器上でのヒューマノイドの拡張型バランス安定化と移動形態の可変構成

研究課題名（英文）Extended balance stabilization for humanoid robot on unstable vehicles and transformable configuration for locomotion modes

研究代表者

木村 航平（Kimura, Kohei）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：50839230

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ヒューマノイドロボットが不安定な搭乗型機器に乗るための、(1)不安定なヒューマノイドと不安定な搭乗型機器の両方を安定化させる拡張型バランス安定化の実現、移動ロボットの機動性を拡張するための、(2)不安定な二脚ロボットに対する車輪を活用した安定的な移動方策の確立、脚や車輪等の移動のための要素を複合的に組み合わせることによる、(3)同一機体で移動形態を可変とするロボット構成の開発、の成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、従来のヒューマノイドロボット単体のみを対象としたバランス安定化から、ロボット自身の安定化に加えて足場の不安定な搭乗面までも安定化することが可能となった点にある。また、本研究の社会的意義は、人間の身体を模したロボットが人間のために作られた不安定な乗り物を扱えるようになった点、不安定な二脚ロボットがより安定した移動方策を獲得した点、1台で複数の移動形態に変化可能となったことで実世界に混在している多様な移動環境に適応可能となる点、にある。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have achieved the following results: (1) realization of extended balance stabilization to stabilize both unstable humanoid and unstable vehicles in order that the humanoid robot can ride on unstable vehicles, (2) establishment of stable locomotion approach utilizing wheels for unstable biped robots to extend mobility of mobile robots, and (3) development of robot configurations with transformable locomotion modes in the same body by combining elements for mobility such as legs and wheels.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボティクス ヒューマノイド 制御

1. 研究開始当初の背景

人間の身体的構成を模したヒューマノイドロボットの大きな特長は、人間のために作られた道具や機器をそのまま利用可能な点である。その中でも特に人間が乗って移動する搭乗型機器を扱えるようになることで、ヒューマノイドの機動性の拡張が期待できる。これまでに、ヒューマノイドが三輪車・四輪車・車椅子などの安定的に自立可能な搭乗型機器を操る行動実現がなされてきたが、一輪車のような不安定な搭乗型機器に乗って、不安定なヒューマノイドと不安定な搭乗型機器の両方を安定化させるためには解くべき課題が存在した。また、移動ロボットの機動性を拡張するための別のアプローチとして、機体自体に脚や車輪等の移動のための要素を複合的に組み込んだ上で、安定性の向上を図る移動方策や、同一機体で移動形態を可変とする構成を新たに創り出す必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、前述の背景における課題を解くために、以下に示す細分化された研究目的を設定する。

- (1) 不安定な搭乗型機器上でのヒューマノイドの拡張型バランス安定化の実現
- (2) 不安定な二脚ロボットに対する車輪を活用した安定的な移動方策の確立
- (3) 移動形態の可変構成を適用したロボットの開発

(1)について、従来のヒューマノイドのバランス安定化は、不安定な足場環境上においてロボットのみを対象としたバランス制御を実現するものであるが、本研究ではロボットのバランス安定化と搭乗する不安定な足場環境の安定化の両者を制御する拡張型バランス安定化を実現することを目的とする。(2)について、従来の二脚ロボットは移動時に遊脚を伴うことで転倒のリスクが存在するが、本研究では二脚ロボットの足部に車輪を導入し、車輪を活用することで遊脚を作らない安定性を高めた移動方策を確立することを目的とする。(3)について、従来のロボットの移動形態は1つに固定されて設計されることが多いが、本研究では脚車輪ロボットに限らず、多様な移動形態に変形可能なロボットの構成法を探り、その開発を進めることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、研究の目的(1)～(3)に対して、それぞれ以下に示す方法で研究を遂行する。

- (1) ヒューマノイドの系と不安定な搭乗型機器の系を低次元化し、一般化された運動モデルを立てる。ヒューマノイドの系は引用文献①の倒立振子としてモデル化し、不安定な搭乗型機器の系はシーソーとしてモデル化を行う。運動モデルに従い、ヒューマノイドのZMPに相当する台車の位置を制御入力とすることで平衡状態への安定化を図る。汎用性を高めるため、異なる種類の搭乗型機器の上にヒューマノイドを乗せて安定化の検証を行う。また、床から不安定な搭乗面への乗り込み動作も導入し、その後の拡張型バランス安定化までをシーケンシャルに実現するための実機検証も行う。
- (2) 二脚ロボットの足部に車輪を取り付ける設計を行い、車輪を転がして足部を滑らせることで遊脚を作らずに移動する方策を提案する。片方の足裏およびもう一方の車輪の接地面により形成される支持多角形の内部において、重心をどのように投影させれば安定余裕を最大化することが可能か移動計画を考える。加えて、移動時に直面し得る障害物に対するロバスト性を持たせるために、転倒防止の機能や障害物の押し退け移動も導入する。
- (3) 身体の構成が組み替え自在な小型ロボット構成キットを用いて、複数の移動形態に切り替え可能なロボットハードウェアの構成法を提案する。コントローラ等による人間からの移動形態の変化指令の他に、予期しない外乱が加わった場合に倒れても自律的に起き上がり可能な形態変化をセンサ情報も活用して実現する。さらに、脚移動や車輪移動などの水平面における移動に限らず、鉛直面に対して面の形状に応じて移動方策を可変とする登攀構成の技術の提案も試みる。

4. 研究成果

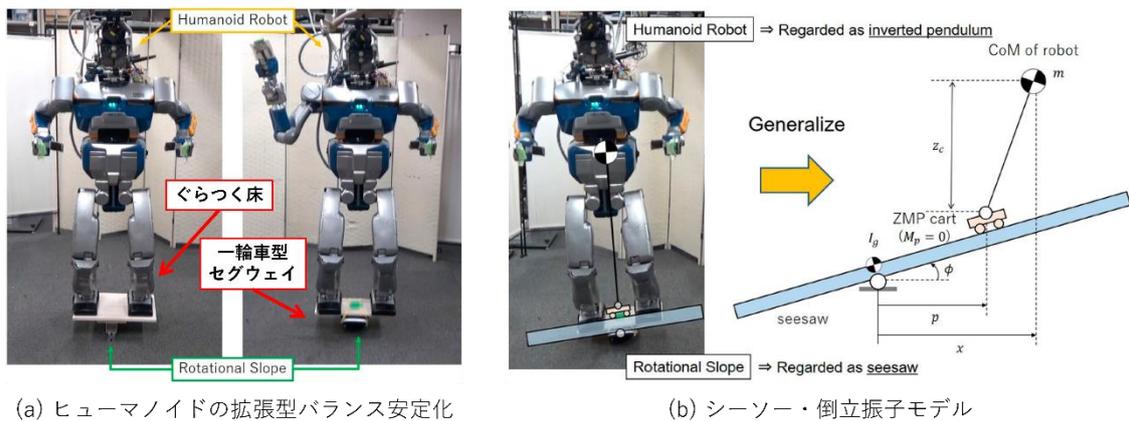
研究の目的(1)～(3)に対応する研究成果について、それぞれ以下で説明する。

- (1) 等身大のヒューマノイドロボットが、ぐらつく床および一輪車型セグウェイの上に乗る、ロボット自身のバランス安定化と搭乗型機器の安定化を同時に実現する図1-(a)に示す拡張型バランス安定化が成果として得られた。ヒューマノイドロボットの系を引用文献①を基に線形倒立振子に低次元化し、ぐらつく床や一輪車型セグウェイなどの不安定な搭乗型機器の系を新たにシーソーのモデルとして低次元化することで、異なる搭乗型機器の上でのバランス安定化が汎用的に対応可能となっている。本提案モデルをシーソー・倒立振子モデルと呼び、図1-(b)に示されるようなモデル化がなされている。

シーソー・倒立振子モデルの制御システムにおける入力は、ヒューマノイドロボットの目標 ZMP の位置であり、モデル上ではシーソーの上を移動する台車として表現される。したがって、台車の位置指令により倒立振子の重心とシーソーの傾斜角を平衡状態に制御する問題として置き換えることができる。ロボットの重心位置・計測 ZMP 位置・シーソーの傾斜角を状態変数とした平衡点近傍での状態方程式に対して、状態フィードバックによる制御系を設計することで安定化を達成させている。

また、不安定な搭乗面への乗り込みとその後の拡張型バランス安定化をシーケンシャルにつなぐことが可能となった。図2-(a)のようにぐらつく床に乗り込んでヒューマノイド自身のバランス安定化を行うだけでなく、その後に不安定なぐらつく床を水平に安定化制御することができている。図2-(b), (c)の通り、各状態変数は平衡点に収束しており、今後この拡張型バランス安定化を応用することで、不安定な乗り物への乗り込みとその安定化を逐次的に実現することが期待できる。

本成果は査読付き国際雑誌論文に筆頭著者として採択されており、当該論文ではヒューマノイドロボットによる一輪車型セグウェイの運転操作の研究成果も示されている。また、同研究内容は計測自動制御学会システムインテグレーション部門研究奨励賞を受賞した。



(a) ヒューマノイドの拡張型バランス安定化

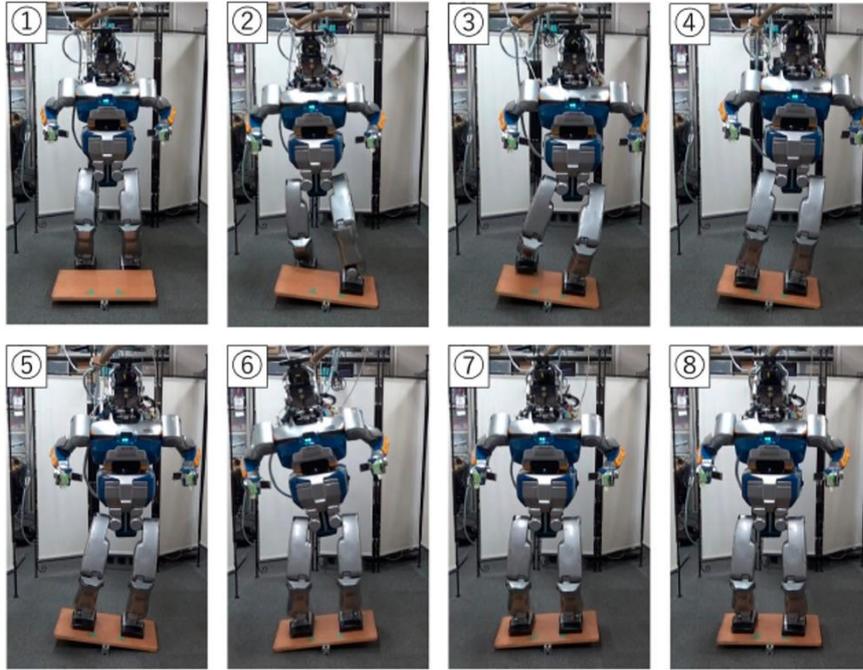
(b) シーソー・倒立振子モデル

図1：拡張型バランス安定化とシーソー・倒立振子モデル

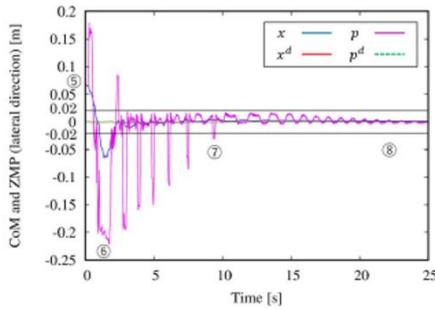
- (2) 二脚ロボットの足部に車輪を取り付けて、車輪を転がして足部を滑らせることによる遊脚の存在しない移動法を提案した。図3に遊脚を作らないことの利点を整理した。図3-(a)のように、遊脚の代わりに車輪を接地させることで支持多角形を拡張でき、片足支持と比較してより安定的な移動計画を立てることが可能である。図3-(b)のように、遊脚は障害物に対する躓き転倒の要因となる一方、遊脚を作らないことで躓きによる転倒モーメントを小さく抑えることができ、ロバスト性が担保される。図3-(c)のように、拡張された支持多角形内に重心を投影すると片足支持と比較して体幹重心の横揺れを抑えることが可能であり、狭隘空間等で壁と衝突することなく移動できる効果が得られる。

以上の利点を踏まえて、遊脚の存在しない移動法を実現するために、図4-(a)に示す安定余裕最大化を提案した。安定余裕最大化は、拡張された支持多角形内で重心位置をどの点に投影させれば安定余裕が最大となるかを計画する手法である。支持多角形の内部に収まるような、安定余裕を半径とする最大の円の中心を求める問題として置き換えることができ、線形計画問題を解くことで解が得られる。

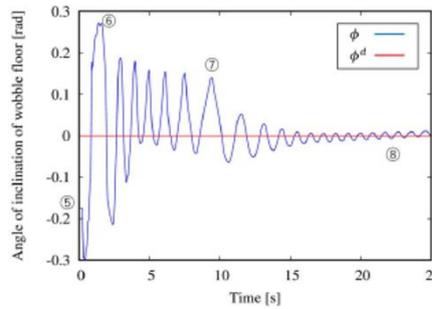
安定余裕最大化により生成された重心の移動計画に従うことで、図4-(b)に示すような遊脚を伴わない二脚ロボットの移動が可能となった。図4-(b)では、経路に存在する障害物を押し退けながら移動を実現しており、一般的な遊脚を伴う二足歩行では躓いて転倒してしまう問題を解決することができた。上記の脚車輪ロボットは、足裏に受動車輪を1つ取り付けるだけで実現可能な構成であり、追加のアクチュエータや駆動モジュールが不要な点が特長である。



(a) ぐらつく床への乗り込みとその後の拡張型バランス安定化



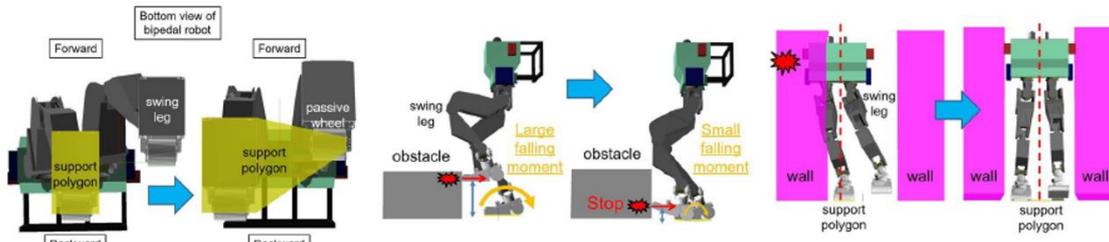
(b) 重心位置 x と ZMP p の変化



(c) 搭乗面の傾斜角 ϕ の変化

図 2：不安定な搭乗面への乗り込みとその後の拡張型バランス安定化の逐次実行

本成果は査読付き国際雑誌論文に筆頭著者として採択されており、図 4-(b)で示した障害物に対する押し退け以外にも、重量のある障害物に直面した場合の転倒防止機能や、狭隘空間の通り抜け移動などの研究成果が示されている。また、同研究内容は日本ロボット学会第 10 回ロボティクスシンポジウム研究奨励賞を受賞した他、受動車輪の活用だけでなく駆動車輪を足部に導入した人搭乗型の脚車輪モビリティの研究成果として、ロボティクス分野の査読付きトップカンファレンスである国際学会 IROS に共著論文として採択・発表されている。



(a) 支持多角形の拡張

(b) 躓きに対するロバスト性

(c) 体幹の横揺れの防止

図 3：遊脚を作らない移動法における特長



(a) 安定余裕最大化

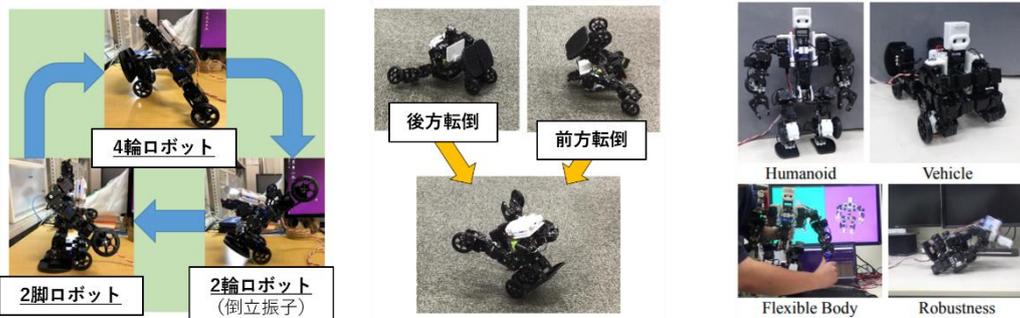
(b) 障害物を押し退けながら移動

図 4：安定余裕最大化とそれに基づく障害物の押し退け移動

- (3) 同一機体で複数の移動形態に変形可能な小型ロボットの構成を図5のように陽に実現した。図5-(a)は、自身の移動形態を4輪・2輪・2脚の3相間で切り替え可能な形態変化ロボットであり、4輪による車輪移動、2輪による超信地旋回、2脚による歩行が可能である。これらの移動形態の変化指令はコントローラ等による人間からの操縦により実現されるが、図5-(b)のように、予期しない外乱が加わり、後方や前方に転倒した場合は指令無しで自律的に起き上がりが可能な形態変化を実現する。自律的な形態変化は、ロボットの背面に搭載された姿勢センサモジュールを基に実行され、どの方向に転倒したかの判断処理や、転倒の落下時間の計測から2輪倒立振子の制御パラメータを逐次学習する等の成果が得られた。図5-(c)は、上述の技術を応用した人型と乗り物型に形態変化可能なトランスフォーマーロボットの開発の成果であり、図5-(a), (b)の背面に搭載されたセンサを両手先・両足先に分散配置させることで、四肢のたわみの状態も把握可能な構成となっている。

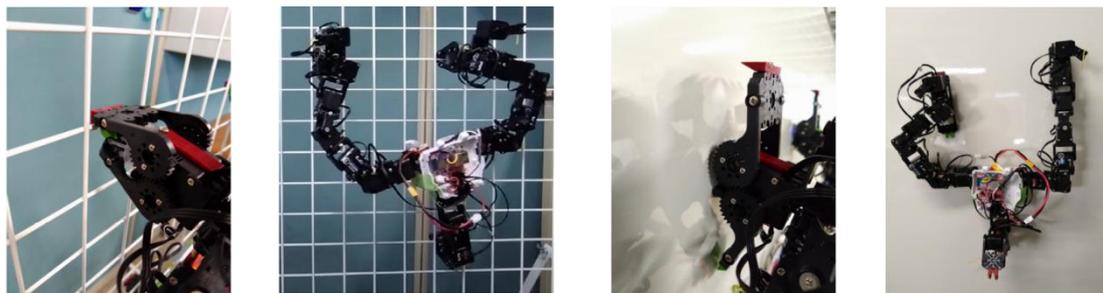
図5は主に水平面での脚移動や車輪移動を対象とした可変構成であるが、図6は鉛直面の環境に応じて移動形態を可変とするエンドエフェクタ構成を取り入れた登攀ロボットの開発の成果となっている。提案したエンドエフェクタは吸盤併用グリッパと呼び、図6-(a)のようにフェンスのような格子状の面に対してはグリッパによる把持を活用した登攀移動、図6-(b)のように壁面のような掴み所の無い面に対しては吸盤による吸着を活用した登攀移動、を切り替えられる可変構成となっている。

本成果における図5に示した研究成果は、ロボティクス分野の査読付きトップカンファレンスである国際学会 ICRA に共著論文として採択・発表されており、図6に示した研究成果は、特許出願（吸着グリッパおよび登攀ロボット，特願 2023-015844）として発明の成果が得られた。



(a) 移動形態を4輪・2輪・2脚で切り替え可能なロボット (b) 倒れても自律的に起き上がり可能な形態変化 (c) 人型と乗り物型に形態変化可能なトランスフォーマーロボット

図5：移動形態の可変構成を適用した小型ロボット



(a) グリッパによる把持を活用したフェンスの登攀移動 (b) 吸盤による吸着を活用した壁面の登攀移動

図6：鉛直面の形状に応じた移動形態の可変構成
(同一のエンドエフェクタで異なる面の登攀を実現)

<引用文献>

- ① S. Kajita et al., “Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking”, 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010), pp. 4489-4496, 2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kohei Kimura, Kei Okada, Masayuki Inaba	4. 巻 35
2. 論文標題 Extended balance stabilization control for humanoid robot on rotational slope based on seesaw-inverted-pendulum model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1116-1130
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2021.1959398	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木村 航平	4. 巻 124
2. 論文標題 ロボットが乗り物を操るために	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会誌	6. 最初と最後の頁 46-46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jsmemag.124.1233_46	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kimura Kohei, Imaoka Noriaki, Noda Shintaro, Kakiuchi Yohei, Okada Kei, Inaba Masayuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Locomotion approach of bipedal robot utilizing passive wheel without swing leg based on stability margin maximization and fall prevention functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40648-020-00182-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Tasuku Makabe, Naoki Hiraoka, Shintaro Noda, Tomoki Anzai, Kohei Kimura, Mirai Hattori, Hiroya Sato, Fumihito Sugai, Yohei Kakiuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba
2. 発表標題 Design and Development for Humanoid-Vehicle Transformer Platform with Plastic Resin Structure and Distributed Redundant Sensors
3. 学会等名 In Proceedings of The 2022 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Noriaki Imaoka, Kohei Kimura, Shintaro Noda, Yohei Kakiuchi, Masayuki Inaba, Takeshi Ando
2. 発表標題 A transformable human-carrying wheel-leg mobility for daily use
3. 学会等名 In Proceedings of The 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柿沼 龍, 滝澤 優, 末廣 尚士, 工藤 俊亮, 木村 航平
2. 発表標題 3肢ロボットによるフェンス及び壁面の移動
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023講演論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木村 航平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 シーソー・倒立振りモデルに基づくヒューマノイドロボットの回転傾斜面における拡張型バランス安定化制御
3. 学会等名 第26回ロボティクスシンポジウム予稿集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 真壁 佑, 永松 祐弥, 木村 航平, 菅井 文仁, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 腰部軸を備えた用途適応三輪車型パーソナルモビリティロボットの開発
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 真壁 佑, 木村 航平, 服部 未来, 佐藤 裕弥, 菅井 文仁, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 小型多種ロボット構成キットによる4輪走行トランスフォームヒューマノイドの設計と行動実現
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 真壁 佑, 服部 未来, 木村 航平, 佐藤 裕弥, 菅井 文仁, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 小型多種ロボット構成キットで利用可能な接合部組込み複合センサモジュールの開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 航平, 今岡 紀章, 野田 晋太郎, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 安定余裕最大化と転倒防止機能に基づく二脚ロボットの受動車輪を活用した遊脚の存在しない移動法
3. 学会等名 第25回ロボティクスシンポジウム予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 裕弥, 木村 航平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 倒立振り子への状態遷移が可能な小型ヒューマノイドの転倒復帰機能を利用した目標角の自動設定
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 吸着グリップおよび登攀ロボット	発明者 木村 航平, 柿沼 龍	権利者 国立大学法人電気通信大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-015844	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

ぐらつく床や一輪セグウェイの上でバランスをとる制御 受動車輪を活用した遊脚の存在しない二脚ロボットの移動 https://www.robolab.uec.ac.jp/~kimura/research.html 形態変化ロボット https://www.robolab.uec.ac.jp/ja/project/transformable/ フェンス及び壁面移動ロボット https://www.robolab.uec.ac.jp/ja/project/three-limbed-climbing-robot/
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------