

令和 4 年 9 月 15 日現在

機関番号：33917

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02108

研究課題名(和文)多脚移動ロボットの制約充足型統合制御

研究課題名(英文)Constraint satisfactory integrated control for multi-legged robots

研究代表者

稲垣 伸吉 (Inagaki, Shinkichi)

南山大学・理工学部・教授

研究者番号：80362276

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：災害地のような未知で複雑な不整地環境を柔軟にかつ頑健に移動することができる多脚ロボットの実現を目指し歩行制御を研究開発した。まず、環境の変化や故障を包括的に適応することが可能な歩行制御として、無限定環境における歩行の継続を制約充足する歩行制御を開発した。そして、それを中核として各脚の局所適応制御さらに没入型操作系と接地点計画を用いた半自律操作系を開発し組み込んだ。これにより優れた不整地踏破能力と共に操作者の意図した操作を実現することができた。これらの制御手法は、3Dプリンタを用いて開発した多脚(6脚・ムカデ型)ロボットの実機実験により実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

災害の多い我が国では、不整地においても優れた移動能力と人や物資を搬送できる移動手段が必要です。本研究では、そのような能力を持つ多脚ロボット(6脚以上の脚を持つ移動ロボット)の実現を目指し、根幹となる歩行制御について歩容(歩き方)制御から、環境適応、耐故障制御、運動計画、操作系と幅広く研究開発を行いました。それらの有効性は、独自開発の多脚ロボットによる実機実験によって実証され、社会での活躍に大きく近づきました。

研究成果の概要(英文)：We studied gait control to realize a multi-legged robot that can move flexibly and robustly in unknown and complex uneven terrain environments such as disaster areas. First, as a gait control that can comprehensively adapt to environmental changes and robot failures, a gait control that satisfies the constraint of continuous walking in an unconstrained environment is developed. Then, a semi-autonomous control system that uses local adaptive control of each leg, an immersive control system, and contact point planning were developed and embedded to the walk control. This system enables the robot to achieve the operator's intended operation as well as excellent traversing ability over rough terrain. These control methods were demonstrated in an actual experiment with multi-legged (hexapod and centipede-type) robots developed using a 3D printer.

研究分野：ロボティクス

キーワード：知能ロボティクス 多脚ロボット 知能機械 移動ロボット 分散制御

## 1. 研究開始当初の背景

地震災害などの現場において、未知の複雑な環境を柔軟かつ頑健に移動できるロボットが求められている。特に、6脚以上を持つ多脚移動ロボット（以下、単に多脚ロボット）は同時に接地できる脚数が多いため、複雑な地形でも柔軟に移動でき、かつ数本の脚が故障しても移動し続けられる頑健性を持つと期待されている。しかし、そのような多脚ロボットを実現する歩行制御は発見されていない。多脚ロボットの歩行制御においては、多くの脚をリアルタイムに協調しながら転倒せずに歩行を継続する必要がある。しかも、複雑な地形や脚の故障といった多様で未知の環境の変化に対応できることが求められる。

## 2. 研究の目的

あらゆる環境の変化を包括的に適応可能な多脚ロボットの歩行制御の実現を目指し、分散歩行制御である接地点追従法を、無限定環境においても歩行の継続を制約条件として充足できるように発展させる。さらに各脚における局所的な適応制御や、耐故障制御、接地点計画を組み込むことで、制約充足型統合歩行制御を開発する。そして、多脚ロボットを開発し、複雑な地形の移動と耐故障性の実験を通して有効性を検証する。

## 3. 研究の方法

- (1) 無限定環境における歩行の継続を制約充足する歩行制御を開発する。この歩行制御が以降の研究内容のベースとなる。具体的には、分散歩行制御である接地点追従法に対して、形式検証により導出される時間制約を付加する **Timekeeper** 制御を改良して組み込む方法、および脚の動作における遷移条件を改良し、命題論理により制約充足を満たすことを証明する方法の二つを適用する。
- (2) 耐故障制御のために、接地点追従における脚の隣接関係を変更する手法を開発する。具体的には、各脚の接地点の引き受けと引き渡しの関係をテーブルにし、故障などによる歩脚の変更に応じて自動的に変更する。
- (3) 複雑な地形に対応するために各脚の局所適応制御を開発する。この制御は(1)の歩行制御の歩行性能を補助する下位制御系となる。具体的には、障害物への接触と接地を検出するセンサを内蔵した脚の開発と、センシング情報に基づく脚の障害物回避や接地補助といった複数の制御を統合して歩行制御に統合する。
- (4) 操作者の意図した操作を実現するために、没入型操作系と接地点計画を用いた半自律操作系を開発する。この制御は(1)の歩行制御を智能化する上位制御系となる。前者は操作者の操作をより忠実にロボットに反映させる手法、後者は簡単な操作入力によりロボットを操作する手法である。タスクに応じてロボットに求められる性能が違うことから、対照的な二つの操作系を開発する。
- (5) 多脚（6脚・ムカデ型）ロボットを3Dプリンタと独自開発の制御回路を用いて開発し、上記の各制御手法を実装する。そして、屋内外の不整地環境において実証実験を行う。

## 4. 研究成果

- (1) 歩行制御のベースとなる接地点追従法は事象駆動型の分散歩行制御であり、制御モードの切り替えをオートマトンにより表現する。オートマトンの数学的表現を利用して、無限定環境における歩行の継続を制約充足する歩行制御を実現するために、次の二つの方法に提案し、研究成果を得た。
  - ① オートマトンの状態滞在時間に時間制約を付加する **Timekeeper** 制御（引用文献①）を改良し、接地点追従法に組み込んだ。**Timekeeper** 制御は事象駆動系の仕様の充足性を計算機的に検証する形式手法を利用した手法である。多脚ロボットの動作を時間オートマトンにより表現し、常に「3脚以上が接地する」および「デッドロックしない」という「歩行を継続するための仕様（条件）」を満足するように、接地点追従法のオートマトンにおける各状態の滞在可能時間を導出する。そして、多脚ロボットを歩行させる際に、各状態の滞在時間を守るように接地点追従法を監視し、また制御に介入する。本研究においてはさらに2点の改良を行った。一つ目は、全ての脚において共通に導出していた滞在可能時間を各脚に独立に導出した点である。二つ目は、滞在可能時間の上限値を除去できる制御の状態を検出できるようにした点である。これらによって、脚の振る舞いの幅が広がり、多脚ロボットの歩行性能の向上に繋がる。実際に、実機実験により歩行性能の向上を確認した。
  - ② もう一つは、接地点追従法のオートマトンに対して、直接的に命題論理により制約充足を満たすことを証明する方法である。つまり、接地点追従法の状態遷移条件を直接改良し、歩行を継続するための条件が満たされることを数学的に証明する方法である。接地点追従法の改良は、末尾脚の接地相から遊脚相への遷移条件に行われた。図1に6脚ロボットの不整地歩行の様子と制御モードの遷移の様子を示す。常に3脚以上が

接地しながら歩行が継続されている様子が分かる。結果的に、Timekeeper 制御を用いなくても歩行継続の条件が満たされることになったが、接地点追従法を更に変更した際は改めて証明が必要となる。今後の研究において接地点追従法を試行錯誤的に改良して行くに当たり、Timekeeper 制御により歩行継続の条件に対する充足の程度を見積もり、その後には命題論理による証明を行うことが効果的であると考えられる。

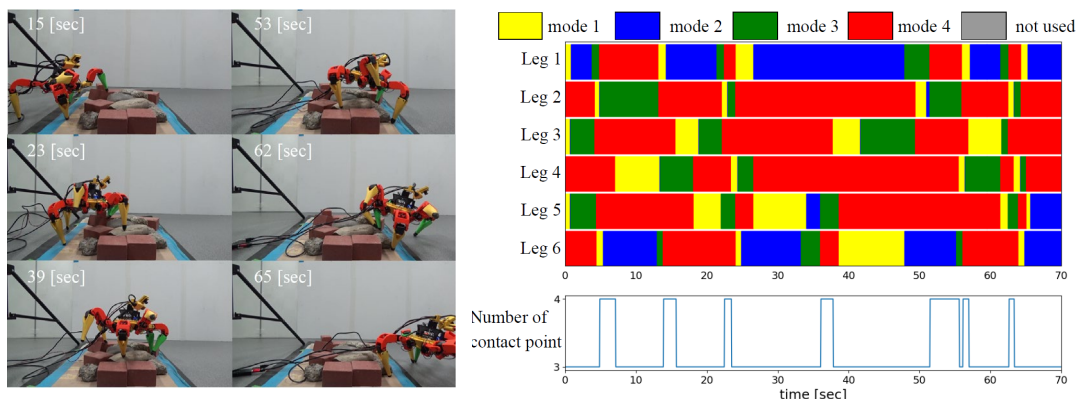


図1 改良した接地点追従法による不整地歩行（左）と制御モードの遷移（右）

- (2) 多脚ロボットの脚が故障した場合や脚で物体を把持しながら歩行するといった場合、歩行に使用する脚（歩脚）の数が変わる。そのような歩脚の減少・増加に対応することで、耐故障性と脚の多様な活用を実現することができる。そこで、前述した接地点追従法において、歩行フラグと隣接情報を新たに導入し、これらを基に遷移条件を与えることで、オートマトンの遷移条件が歩脚の減少・増加に合わせて切り替わるように改良した。具体的には、脚  $l$  が追従する脚を  $f(l)$ 、追従される脚を  $r(l)$  として隣接情報を  $A(l) = (f(l), r(l))$  と表してテーブルにする。そして、歩行フラグに合わせてテーブルを参照し、隣接状態を切り替える。このように歩行アルゴリズムには隣接情報に任意性を持たせ、操作者もしくはロボット自身が隣接情報を更新することにより、歩脚の減少・増加に対応する。図2に6脚ロボットにおいて歩脚の数を減らした際の不整地歩行実験の様子を示す。歩行性能は6脚時に比べると劣るものの、不整地歩行も行うことができる。また、歩脚の数の変更は歩行を停止することなく、シームレスに行うことができる。このような歩脚の数を変えながらの不整地歩行の実現は国内外でも例がなく、本研究の大きな成果といえる。

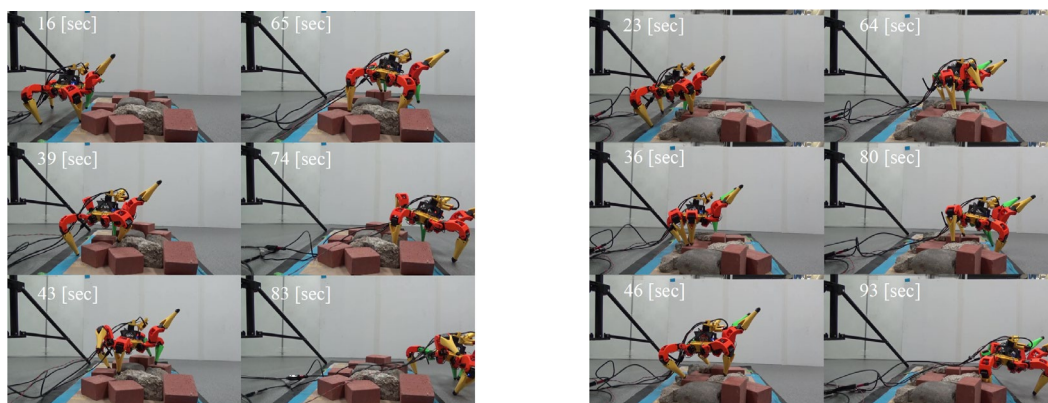
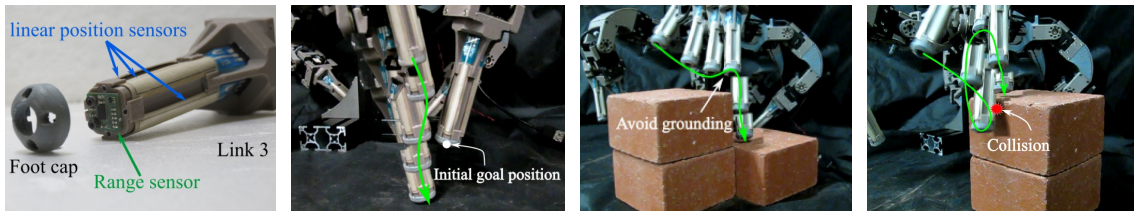


図2 歩脚の減少・増加に対応した歩行：5脚（左）、4脚（右）

- (3) 接地点追従法の歩行性能を補助するために各脚の脚先センサと局所適応制御を開発した。脚先センサは図3(a)のように、接地面との距離を測る距離センサと障害物との接触を検知する接触センサからなる。これらのセンサを搭載した独自開発の電子基板を、3Dプリンタを用いて作成した脚に実装した。そして、脚先センサから得られる情報を元に、図3(b)~(d)のような環境に適応するための各脚における局所制御を複数用意した。そして、作業空間に記述されたそれらの局所制御を、リーマンモーションポリシー（引用文献②）と呼ばれる手法によって関節空間における重み付け和を取り、関節トルクとして統合した。その結果、図4のように、これまでのように操作者が接地点を指定しなくても、適応制御がない場合では40%の踏破成功率だったものが、適応制御導入後は70%まで向上した。適応制御に加え、操作者による接地点の指示、もしくはロボット自身の接地点計画を加えることにより更なる不整地踏破率の向上が期待できる。



(a) 脚先センサ (b)脚間の自己干渉回避 (c)接地補助 (d) 障害物回避

図3 開発した脚先センサ(a)と各脚の局所制御(b)~(d)

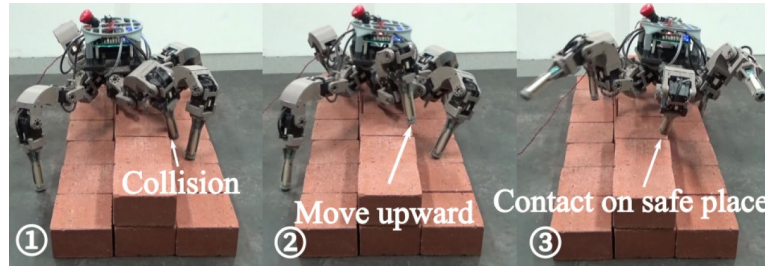


図4 脚先センサと局所適応制御を用いた際の不整地歩行

- (4) 操作者の意図した操作を実現するために、没入型操作系と接地点計画を用いた半自律操作系を開発した。図5の没入型操作系では、操作者はロボットに搭載されたステレオカメラの立体画像をヘッドマウントディスプレイ (HMD) によって見ながら、多脚ロボットの最前脚をハプティクスデバイスによって操作する。後続の脚は操作者が決めた最前脚の接地点を自動的に追従する。この操作系によって、不整地踏破能力だけでなく、最前脚によって物体を操作するという動作も実現出来た。半自律操作系は図6のように、操作者が入力する移動方向に対して、ロボットに搭載したデプスセンサの情報を用いてロボットが接地点を自律的に計画する。不整地であっても、操作者は接地面を気にすることなく、ロボットは適切な接地点を計画して選択する。没入型操作系は操作者の巧みさをロボットの動作に活用する手法であり、一方で半自律操作系はロボットの自律性に任せて操作者の負担を軽減する手法とお互いに対照的である。繊細な接地点の選択や物体の操作などは前者、単に移動を目的とするなら後者というように、ロボットに求められるタスクに応じてこれらの操作系を使い分けるといった応用が考えられる。

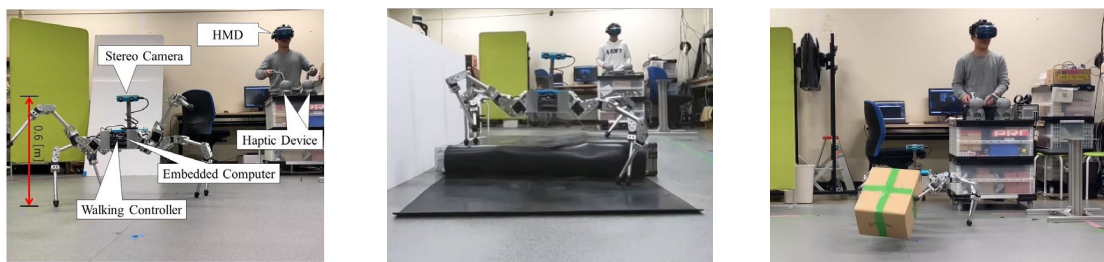


図5 ハプティクスデバイスと HMD を用いた没入型操作系

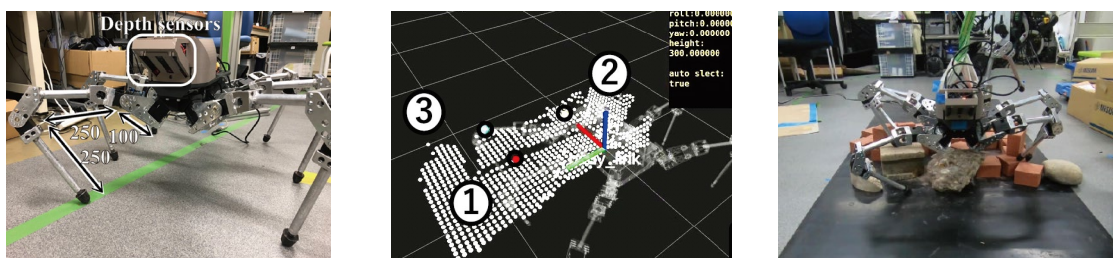


図6 デプスセンサと接地点計画による半自律操作系

- (5) 多脚ロボットを3Dプリンタと独自開発の制御回路を用いて開発した。図7はその一部である。左図の体節間関節を導入したムカゲ型は脚の動作だけでなく、体節間関節の動作と連係することにより、柔軟な動作を実現することができる。また、体節数の変更も可能である。

中図の小型6脚ロボット（全幅 50cm 程度）は研究成果(2)での脚先センサと局所適応制御を検証する為に開発した実機である。右図は中型の6脚ロボット（全幅 1m 程度）であり、本研究の延長として企業と共同研究により開発された。主に研究成果(4)の検証に用いられた。今後、このロボットを使った物体の搬送や遠隔での探査などの実タスクへの応用研究を進めていく予定である。

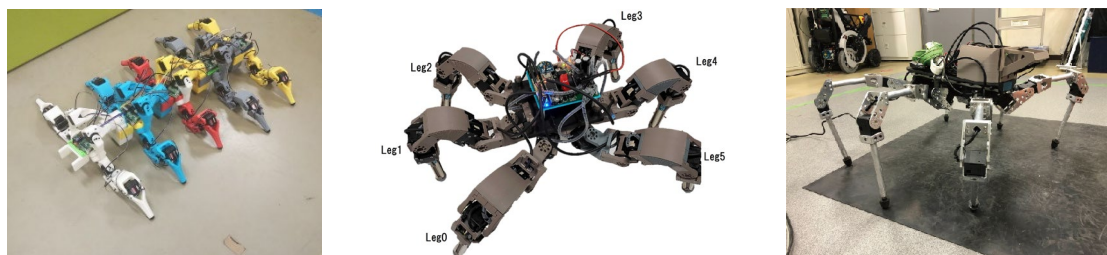


図 7 開発した多脚ロボット（左からムカデ型、小型6脚、中型6脚）

<引用文献>

- ① 村田 勇樹、稲垣 伸吉、鈴木 達也、Timekeeper 制御を用いた接地点追従式 6 脚移動ロボットの適応歩行、計測自動制御学会論文集、55 巻 1 号、2019、pp. 51-58
- ② Nathan D Ratliff, Jan Issac, Daniel Kappler, Stan Birchfield, and Dieter Fox, Riemannian motion policies, arXiv, preprint arXiv:1801.02854, 2018

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 細萱 広高, 稲垣 伸吉, 鈴木 達也	4. 巻 58-6
2. 論文標題 歩脚の減少・増加に対応可能な接地点追従式6脚移動制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuya Murai, Yuki Murata, Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Immersive Walk Operating System for Hexapod Robot with Dual Haptic Devices and Bilateral Control
3. 学会等名 the 8th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Murai, Shinkichi Inagaki, and Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Immersive Operation System for Hexapod Robot with Follow-the-Contact-Point Gait Control
3. 学会等名 IECON 2021 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 棚田 晃世, 村井 裕弥, 稲垣 伸吉, 村田 勇樹, 加藤 亮太, 鈴木 達也
2. 発表標題 リアルタイム接地点計画を用いた6脚移動ロボットの半自律歩行システムの開発
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2021
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 細萱 広高, 稲垣 伸吉, 鈴木 達也
2. 発表標題 6脚移動ロボットの接地点伝搬の切り替えによる方向転換と超信地旋回
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村井 裕弥, 稲垣 伸吉, 鈴木 達也
2. 発表標題 接地点追従型6脚移動ロボットの没入型操作系の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細萱 広高, 稲垣 伸吉, 鈴木 達也
2. 発表標題 脚間の隣接情報管理と接地点追従法による歩行に使用する脚数の減少に対応した多脚歩行制御
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井 海斗, 稲垣 伸吉, 鈴木 達也
2. 発表標題 接地点追従型多脚移動ロボットにおける脚先の接触・接地センサの開発と局所制御の統合
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 和司, 中島 明, 稲垣 伸吉, 坂本 登
2. 発表標題 多脚ロボットの転倒復帰における モデル化と脚の揺動について
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井海斗, 稲垣伸吉, 鈴木達也
2. 発表標題 多脚移動ロボットの脚先センサの開発と各脚における複数の局所制御の統合
3. 学会等名 第33回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村井裕弥, 稲垣伸吉, 鈴木達也
2. 発表標題 接地点追従法型6 脚移動ロボットにおける没入型操作系の開発と脚の冗長自由度化
3. 学会等名 第33回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細萱広高, 稲垣伸吉, 鈴木達也
2. 発表標題 接地点追従法の改良による歩行に使用する脚数の減少に対応可能な多脚歩行制御
3. 学会等名 第33回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 稲垣伸吉
2. 発表標題 接地点追従型多脚移動ロボットの脚の開発
3. 学会等名 第26回ロボティクスシンポジア（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村田祐樹、稲垣伸吉
2. 発表標題 事象駆動型統合制御「Timekeeper 制御」の改良による6脚移動ロボットの不整地歩行
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村田勇樹、稲垣伸吉、鈴木達也
2. 発表標題 目標胴体軌道に追従する3自由度能動体節間関節をもつムカデ型ロボットの歩行制御と実機検証
3. 学会等名 第32回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井海斗、村田勇樹、稲垣伸吉、鈴木達也
2. 発表標題 脚表面を被覆する接触センサの開発と接触情報に基づく事象駆動型6脚移動ロボットの反射制御の実現
3. 学会等名 第32回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Murata, Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Development of an Adaptive Hexapod Robot Based on Follow-The-Contact-Point Gait Control and Timekeeper Control
3. 学会等名 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Murata, Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki
2. 発表標題 Adaptive walk control for hexapod robot based on iterative model-checking and Timekeeper control
3. 学会等名 58th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井海斗、村田勇樹、稲垣伸吉、鈴木達也
2. 発表標題 事象駆動型分散歩行制御とTimekeeper 制御による適応型6脚移動ロボットの開発
3. 学会等名 第23回創発システム・シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井海斗、村田勇樹、稲垣伸吉、鈴木達也
2. 発表標題 3Dプリンタを用いた分布型接触センサの開発と事象駆動型6脚移動ロボットの反射制御
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村田勇樹、鈴木義久、藤井海斗、稲垣伸吉、鈴木達也
2. 発表標題 Timekeeper 制御に基づく事象駆動型6 脚移動ロボットの歩行・計画・局所適応の統合制御
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2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ロボット制御システム	発明者 鈴木達也、村井裕 弥、稲垣伸吉、村田 勇樹、加藤亮太、村	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022- 20319	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
研究協力者	鈴木 達也  (Suzuki Tatsuya)		

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
---------	---------