

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420217

研究課題名(和文) ムカデ型多脚歩行ロボットの適応的分散型歩行制御系の設計

研究課題名(英文) Design of adaptive decentralized walk control for centipede-like multi-legged robot

研究代表者

稲垣 伸吉 (Shinkichi, Inagaki)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80362276

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、未知で複雑な環境を移動できる多脚歩行ロボットを実現することを目標に、分散型歩行制御法「接地点追従法」を改良し、高次の運動計画と分散制御のローカルな適応的運動生成とが一貫した分散型歩行制御法を確立することを目指した。まず、高次の運動計画として深度センサを用いた接地点探索手法を開発し、ムカデ型および6脚の多脚歩行ロボットでのシミュレーションおよび実機での実証を行った。そして、運動性能の向上を目指して能動体節間関節と脚の統合的分散制御手法を開発しシミュレーションにより有用性を示した。また、多様な環境での歩行を想定した高次の運動計画と下位の運動制御の統合的なパラメータ設計手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：This research aimed to realize a multi-legged robot capable to traverse unknown and complex environment. For this purpose, originated from decentralized walking control 'Follow-the-Contact-Point' gait control, a new control method which has consistency with both high-order motion planning and local adaptive motion control was addressed. First, planning of contacting points of legs with utilizing a depth sensor was developed as the high-order motion planning and the availability was verified via experiments. Next, in order to improve the motion performance of robot, new decentralized walk control by which both the active intersegment joints and the legs are simultaneously and successfully controlled is developed. Finally, parameter design method that possible to design the parameters of the high-order motion planning and local decentralized control with ensuring availability of the robot to walk even in versatile environments is developed.

研究分野：工学

キーワード：知能機械学 機械システム ロボティクス 歩行ロボット 多脚移動 分散システム

1. 研究開始当初の背景

地震災害の多い日本においては、被災地探索などのために、崩れた家屋内や瓦礫の上など、未知の複雑な環境を移動できるロボットが求められている。その中で、ムカデ型多脚歩行ロボット（一对の脚を持つ体節から構成された多脚歩行ロボット；図1）は、冗長自由度による高い環境適応能力と、脚先の接地点配置による高い不整地踏破能力を併せ持つものとして期待されている。海外ではR.J.Fullら（UC Berkeley）、A.J.Ijspeertら（EPFL）が、国内では、青井ら（京都大学）、石黒ら（東北大学）が生物模倣型の分散型歩行制御を提案し、シミュレータと実機により検証を進めている。

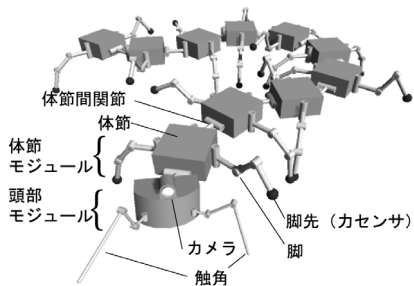


図1：ムカデ型多脚歩行ロボット

未知の複雑な不整地を移動できるムカデ型多脚歩行ロボットを実現するには、ロボット全体の望ましい挙動を局所的な運動から適応的に生成する能力（局所的適応能力）と、ロボット自身が地面上や障害物上を観測し、どこに脚先を接地するべきかを判断し、ロボット全体の運動を計画する能力（高次の運動計画能力）の、双方を兼ね揃える必要がある。しかし、ムカデ型多脚歩行ロボットにおいては、分散制御とロボット全体の運動計画を結合することの困難さから、双方の能力を備えた分散歩行制御法は実現されておらず、未知の複雑な不整地を移動する能力は実現できていない。

この問題の解決のために、本研究では、研究代表者が開発した脚の分散型制御法「接地点追従法」（図2）を改良し、自律性と高い運動性能を持つムカデ型多脚歩行ロボットの実現を目指す。接地点追従法とは、『最前脚が接地した接地点を、脚先間の接触により前脚から後脚へ次々に受け渡す』ことにより歩行を実現する制御法である。全ての脚の接地点計画は先頭脚の接地点計画に集約され、かつその計画された接地点を辿る運動は全て分散制御により実現できるという特徴を持つ。これに対し、接地点計画による高次の運動計画能力と、脚だけではなく体節間関節（リンク）も適応的に制御する手法を組み込む。さらに形式検証を利用したパラメータ設

計法を發展させ、局所的適応と高次の運動計画、歩行制御の各パラメータを統合的に設計する方法を開発する。そして、実機を開発し屋内外における実機実験を行う。

2. 研究の目的

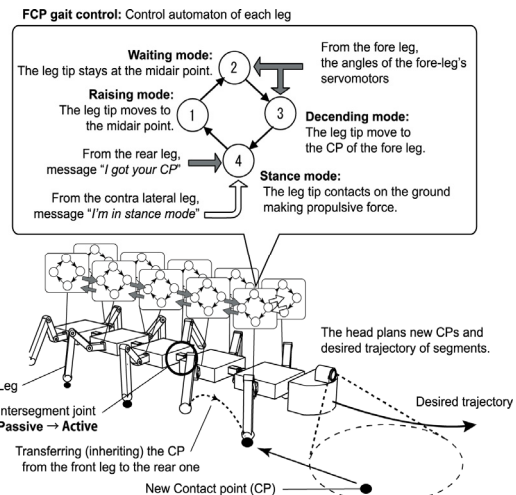


図2：接地点追従法の概要

本研究の目的は、未知で複雑な環境を移動できるムカデ型多脚歩行ロボットを実現するために、分散型歩行制御法「接地点追従法」に接地点計画による高次の運動計画能力と、脚と体節間関節の統合的制御、さらにそれらのパラメータを有機的に設計する方法を開発することで、高次の運動計画と分散制御のローカルな適応的運動生成とが一貫した分散型歩行制御法を確立することである。また、実機実験を通して、被災地探索などに対する実用性の評価を行う。具体的には、以下の項目を研究の段階的な目的と定めた。

- (1) 地点追従法の脚制御に組み込める形で、体節間関節の分散制御を実現するし、より高い環境適応性を実現するロボットの運動を実現する。
- (2) ロボットに搭載したセンサを用いて、地面上の接地候補点を探索し、適切な接地点を選択するという接地点計画手法を開発し、接地点追従法へ融合する。
- (3) 局所的適応と高次の運動計画、歩行制御を矛盾なく同時に実行できるように、制御に関わるパラメータを統合的に設計する方法を開発する。上記項目(1)と(2)によりそれぞれ実現された局所的適応と高次の運動計画、および接地点追従法により駆動されるロボットの挙動を、離散状態と連続時間ダイナミクスを含むハイブリッドオートマトンにより記述し、形式検

証を利用したパラメータ設計法に基づいてパラメータを導出する方法を開発する。

- (4) 上記の提案手法を検証するために、ムカデ型および6脚の歩行ロボットの物理シミュレーションと実機を開発する。

3. 研究の方法

上記の研究目的を実現するために、高次の運動計画と局所的運動適応、そして歩行制御が一貫した分散型歩行制御法の確立を目指し、3年間に渡り研究に取り組んだ。各年度の研究の方法は以下の通りである。

平成 25 年度

地点追従法の脚制御と共に矛盾なく実行できる体節間関節の分散制御法を確立する。具体的には脚が地面と接地する点（接地点）が移動中は地面上を動かないことを仮定し、そこに設定した座標系（接地点座標系）による表現される軌道为目标として、体節を支える脚と体節間関節を制御する手法を開発する。提案手法はムカデ型多脚歩行ロボットの物理シミュレータを用いて検証する。

平成 26 年度

前年度の研究内容を継続しつつ、接地点計画に基づく高次の運動計画を扱う。深度センサを用いてロボット前方の地面を観測して高さ情報を有するグリッドマップ (elevation map) を作成し、目的の進行方向と共に地形などを評価して最適な接地点系列を計画する。検証には6脚歩行ロボットおよびムカデ型多脚歩行ロボットの物理シミュレーションを用いる。また、深度センサと接地点計画機を有する6脚歩行ロボット実機を、3Dプリンタなどを用いて作成し実機実験する。

平成 27 年度

脚と体節の局所的制御と高次の運動計画の開発を継続しつつ、それらを統合的に設計するための抽象モデルと形式検証を利用したパラメータ設計手法を開発する。特に、従来手法ではロボットが限られた環境と動作をする場合のみを対象としていたが、多様な動作を包括的に設計できる手法に発展させる。そして、導出したパラメータの範囲をさらに物理シミュレータを用いて絞り込む。また、得られたパラメータから逆に局所的制御や運動計画にフィードバックし、それぞれの性能向上に努める。本研究では計算量等の制限などから6脚歩行ロボットを主な設計対象として研究を進めた。

4. 研究成果

本研究の成果として得られた3点のアウトリーチについて以下にまとめる。

(1) ムカデ型多脚歩行ロボットの脚と体節の統合的制御

従来研究において、接地点追従法は受動体節間関節を持つムカデ型多脚歩行を対象とし、脚のみを能動的に制御し体節間関節は受動的に動かすのみであった。しかし、受動体節間関節ではロボットの不整地登破能力といった環境適応能力を実現するのに限界があるという問題があった。そこで研究項目では、接地点追従法による脚の制御に加え、2自由度を持つ体節間関節を能動的に制御することで運動能力を向上させる方法を提案した。

提案手法では、予め計画された接地点と体節の軌道に対して、脚と体節間関節を同時に矛盾なく制御することができる。その制御の統制は脚が地面に接地する点（接地点）を原点に持つ座標系「接地点座標系」(図3)を通して、体節の目標軌道を表現し、目標軌道に沿うように脚と体節間関節を制御することで実現される(図4)。

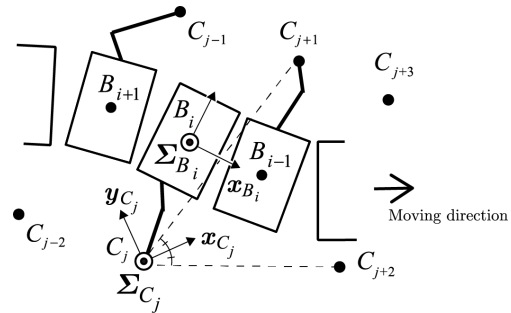


図3：接地点座標系の定義

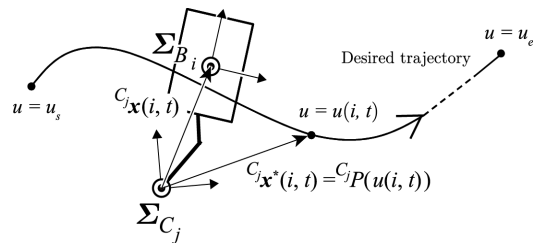


図4：接地点座標系と体節目標軌道

接地点は脚が接地している間は地面上を移動しない。また、接地点追従法では前後の脚が(理想的には)同じ接地点に接地するので、接地点は最前の体節の脚が接地してから地面上を動かない。従って、そこに接地している脚と隣接する接地点に接地している2脚との相対位置を用いることで、接地点座標系の単位方向ベクトルを定義することができる。そのため、どの脚が接地しているとしても(隣接する2接地点の相対位置が分かるという仮定の下では)接地点座標系を局所情報

のみを用いて計算することができる。そして、接地点のラベルが既知であるとすればその座標系に体節の目標軌道を埋め込むことで、次の制御周期における体節の目標位置と姿勢を接地点座標系において計算することができ、それらを実現するような脚と体節間関節の目標値を計算することができる。

提案手法を、物理シミュレータに構築したムカデ型多脚歩行ロボットに実装した様子を図5に示す。ロボットは10体節から構成され、最大斜度60度の階段状障害物を乗り越えることができた。従来のロボットでは踏破が難しい環境で有り、ムカデ型多脚歩行ロボットの有用性を示すものと言える。

なお、本実験では設計者が目標軌道と接地点は予め設定した。これらを自動的に得る手法として次の研究項目を実施した。

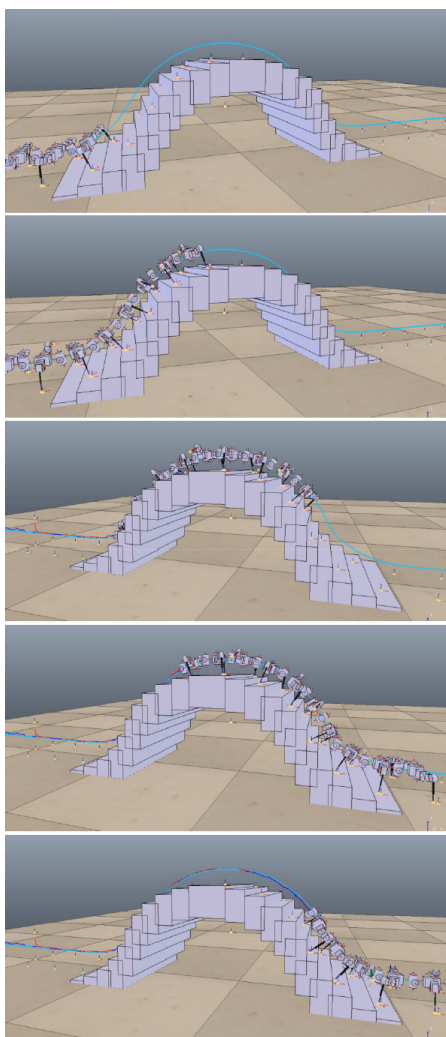


図5：ムカデ型多脚歩行ロボットのシミュレーションの様子

(2) 深度センサを用いたムカデ型(6脚)多脚歩行ロボットの接地点及び体節(胴体)目標軌道の実時間計画

未知の不整地において歩行ロボットを移

動させるためには、①地面や乗り越えるべき障害物などの移動面の観測、②接地点及び胴体軌道の計画、③歩行の実行、の3つを繰り返し実行する必要がある。これらを繰り返すことで、これまでロボットに見えていなかった環境の範囲を移動と共に観測できるようになり、また突発的な環境やロボットの状況の変化に適応することができる。しかし、多脚歩行ロボットは冗長多自由度の問題により、特に②の計画を現実的な時間で計算することが難しいという問題があった。

本研究ではこの問題を解決するために、ロボットの歩行制御を接地点追従法に限定した接地点と胴体軌道の計画の手法を提案し、計画に伴う計算時間を大幅に削減することに成功した。

図6に深度センサによる地面の観測の様子を示す。深度センサは視野内の複数の観測点とカメラとの距離を連続して測定できる。観測点はロボットの胴体座標系におけるグリッドマップに投影し、各グリッドの高さ情報に変換される。そして、グリッドマップ上において数歩先までの接地点の系列と胴体の目標軌道を最適化に基づき計算する。グリッドマップは1歩歩くことに更新され、計画もその度に行われる。

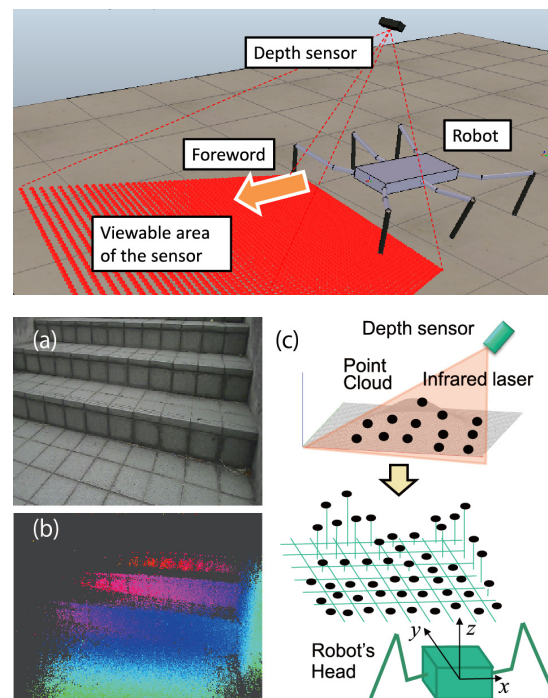


図6：(上) 搭載した深度センサによる観測 (a) 深度センサ実機のRGB画像、(b) 深度情報、(c) グリッドマップ

接地点系列の計画にはグリッドマップの各グリッドをノードとしたA*探索を用い、胴体軌道は算出した接地点系列の中間点を繋ぐベジェ曲線として計算した。最適化におけ

る評価は、

- 各接地点の平坦さ（接地のしやすさ）
- 胴体の移動コスト（最短経路）
- 目標方向への移動

を各接地点系列において計算し、重み付き加算して求めた。接地点追従法では最前脚の接地点のみを計画すれば良く、その結果計画に要する時間は数十 msec と非常に高速であった。図7に物理シミュレーションと実機実験の様子を示す。なお、ムカデ型多脚歩行ロボットにおいても同計画手法を用いて自律歩行を実現している。

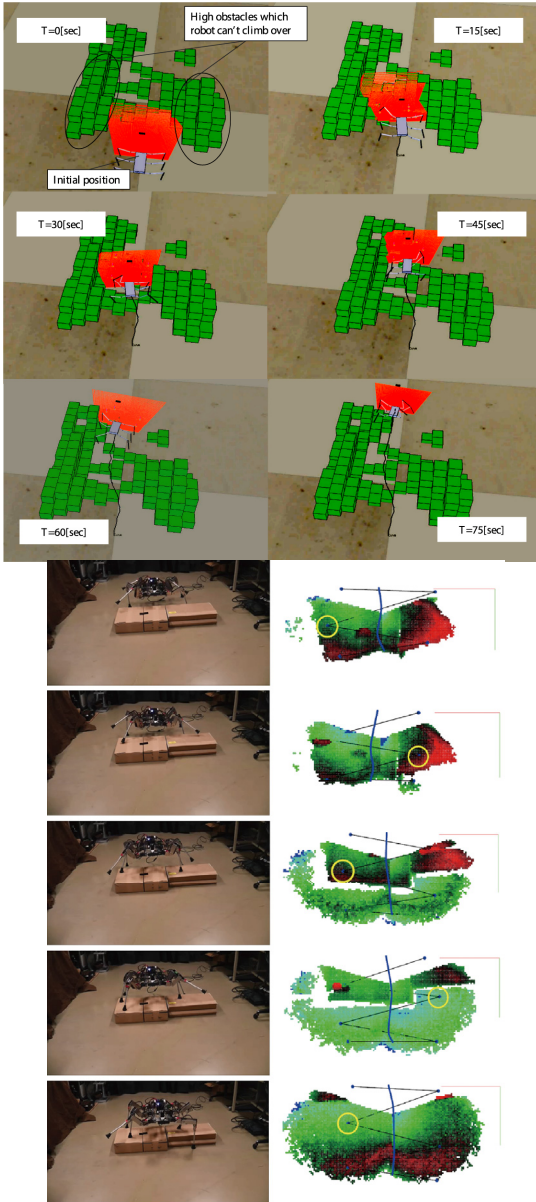
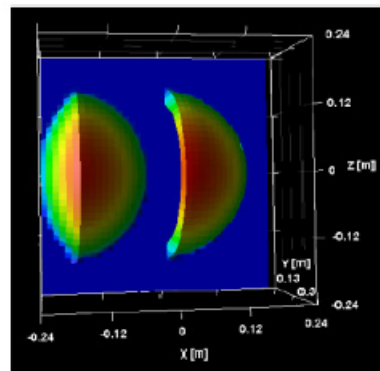
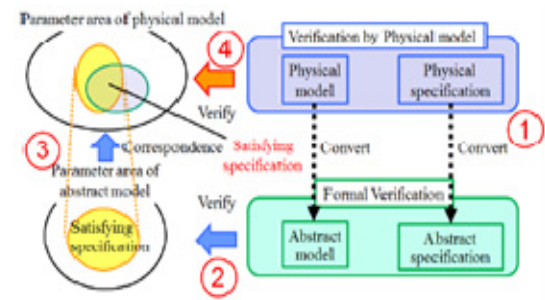


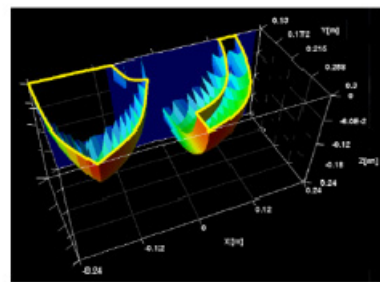
図7：6脚歩行ロボットの接地点計画；(上) シミュレーション、(下) 実機

(3) 形式検証を用いた多様な環境下で歩行する6脚歩行ロボットの歩行パラメータの設計

ロボットが継続して歩行できる制御パラメータ（接地位置や歩行速度など）を導出するには、それらパラメータとロボット全体の挙動を結びつける表現手法が必要となる。本研究では、ロボットの動作を時間オートマトンによる抽象モデルとして表し、歩行の継続を仕様とした形式検証を用いて仕様を満たすパラメータを導出する方法に取り組んだ。従来手法はロボットが直進するという限定された状況下でのパラメータしか求められなかったが、本手法では仕様を満たすパラメータの範囲自体を検証することで、様々な環境下でのロボットの動作を内包する形での検証が可能となった。図8に本手法の概略と求めたパラメータ範囲の例を示す。



(a) Side View of P_C , P_E range (Left: P_E , Right: P_C)



(b) $z=0$ Section of (a)

図8：(上) 形式検証を用いたパラメータ設計の概要、(下) 導出したパラメータ；2脚間の接地点交換可能領域を示す

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① Ryo Takahashi, Shinkichi Inagaki, Walk control of segmented multi-legged robot based on integrative control of legs and 2-DoF active intersegment joints, Advanced Robotic, 査読有, 2016, 【掲載決定】
- ② 稲垣伸吉, 接地点追従による多脚移動ロボットの歩行制御～古くて新しい分散歩行制御～, 計測と制御, No. 54, Vol. 4, pp. 265-271, 査読有, 2015
〔学会発表〕(計12件)
- ① 村田勇樹, 稲垣伸吉, モデル検査を用いた6脚移動ロボットの歩行可能なパラメータ範囲の導出, 第28回自律分散システム・シンポジウム, pp.51-56, 2016.1.21-22, 広島大学(広島)
- ② 稲垣伸吉, 2自由度能動体節間関節を持つムカデ型ロボットの歩行制御, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会, GS3-1, 2015.11.18-20, 函館(北海道)
- ③ 稲垣伸吉, 6脚移動ロボットの動作モデルにおける形式検証を用いた歩行可能なパラメータ範囲の導出, 計測自動制御学会 第21回創発システム・シンポジウム, p.43, 2015.8.30-9.1, 諏訪東京理科大学(長野)
- ④ Shundo Kishi, Shinkichi Inagaki, Graph-Search Based Footstep Planning for Multi-Legged Robots on Irregular Terrain by Using Depth-Sensor, 17th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2014), pp. 417-424, 2014. 7. 21-23, Poznan (Poland), [CLAWAR Association Best Technical Paper Award , Highly Commended Paper Award]
- ⑤ 岸俊道, 栗田啓喜, 稲垣伸吉, 接地点追従法と接地点探索に基づく6脚移動ロボットの不整地歩行と実機検証, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A2-O02, 2015.5.17-19, 京都(京都)
- ⑥ 岸俊道, 稲垣伸吉, 多脚移動ロボットの不整地歩行のための接地点探索手法, 第27回自律分散システム・シンポジウム, 1B2-3, 2015.1.22-23, 東京理科大学(東京)
- ⑦ 高橋亮, 稲垣伸吉, 脚と体節の統合的制御によるムカデ型多脚歩行ロボットの不整地歩行, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 1A1-S01, 2014.3.25-29, 富山国際会議(富山)

- ⑧ 高橋亮, 稲垣伸吉, 鈴木達也, ムカデ型多脚歩行ロボットの体節間間接と脚の統合的制御, 第26回自律分散システム・シンポジウム, 2014.1.23-24, 東京大学(東京)
- ⑨ 岸俊道, 稲垣伸吉, 鈴木達也, 深度センサとグラム探索を用いた不整地における多脚歩行ロボットの接地点計画, 第26回自律分散システム・シンポジウム, 2014.1.23-24, 東京大学(東京)
- ⑩ 野村啓介, 稲垣伸吉, 鈴木達也, ムカデ型多脚歩行ロボットにおける形式検証と物理シミュレータを用いたパラメータ設計, 第26回自律分散システム・シンポジウム, 2014.1.23-24, 東京大学(東京)
- ⑪ 岸俊道, 稲垣伸吉, 鈴木達也, 深度センサを用いたムカデ型多脚歩行ロボットの経路計画, 計測自動制御学会 中部支部学生発表会, 2013.11.28, 名古屋(愛知)
- ⑫ Shinkichi Inagaki, Ryo Takahashi, Tatsuya Suzuki, Realization of Gait Control for Centipede-Like Multi-Legged Robot by Low-Performance Processors, SICE Annual Conference, SuCT13.1, pp.1052-1055, 2013. 9. 14-17, Nagoya (Japan)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.suzlab.nuem.nagoya-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲垣 伸吉 (INAGAKI SHINKICHI)
名古屋大学・工学研究科・准教授
研究者番号：80362276

(2) 研究分担者

研究分担者なし

(3) 連携研究者

鈴木 達也 (TATSUYA SUZUKI)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号：50235967