

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22760184

研究課題名（和文）

ムカデ型多脚歩行ロボットにおける分散型事象駆動制御系の設計

研究課題名（英文）

Parameter design in decentralized event-driven walk control for centipede-like multi-legged robot

研究代表者

稲垣 伸吉 (INAGAKI SHINKICHI)

名古屋大学・工学研究科・講師

研究者番号：80362276

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、複雑な環境下を探索することができるムカデ型多脚歩行ロボットの実現である。そのために、その歩行制御法である分散型事象駆動制御法「接地点追従法」の制御パラメータ、およびロボットの構造パラメータの設計法を確立した。その設計法は形式検証を利用した手法であり、複雑な設計対象にもかかわらず設計仕様を満たすパラメータ群を現実的な時間で導出できる。本研究では、物理シミュレーションと実機を用いた実験を通してその有用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this research is to realize a centipede-like multi-legged robot which can explore in complex irregular terrains. In order to realize the purpose, we developed a methodology capable of designing both control parameters of decentralized event-driven walk control, called Follow-the-Contact Point (FCP) gait control, and construction parameters of the robot itself. The design method is based on formal verification and can derive group of parameters which can satisfy design specifications in realistic time in spite of the complex design object. In this research, we verified its usefulness through experiments using a physical simulator and an actual robot.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：知能機械学、機械システム、ロボティクス、多脚歩行、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、被災者の探索などのために複雑な環境を自律的に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」(図1)は、

冗長自由度により高い環境適応能力を持つ蛇型ロボットと、脚先の接地点配置の計画(接地点計画)による高い不整地踏破能力を持つ歩行ロボットの、両方の長所を併せ持つと期待できる。

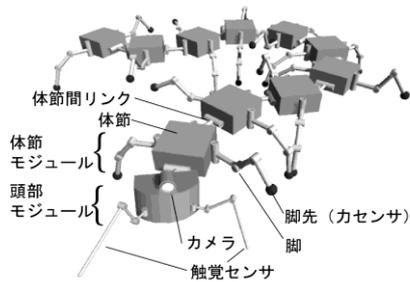


図1：ムカデ型多脚歩行ロボット

このようなロボットを実現する上でその冗長多自由度に伴う制御の困難さを解決するには分散制御法が必要である。その一つの方法が生物の神経系を模倣した生物模倣制御であるが、複雑な不整地の歩行を実現できていない。申請者はこれに対し、ムカデ型多脚歩行ロボットの不整地歩行を実現できる分散型事象駆動制御法「接地点追従法」を新たに提案し、コンピュータシミュレーションによりその有用性を示してきた。

接地点追従法は『先頭部で計画した接地点を最前脚から後脚へと次々に受け渡す』という概念をルールベースの分散制御アルゴリズムによって実現した制御法である。図2のように、各脚の制御アルゴリズム（制御オートマトン）が隣接する脚の状態によって制御モードを切り換え、それらが並列して実行されるロボット全体が制御される。

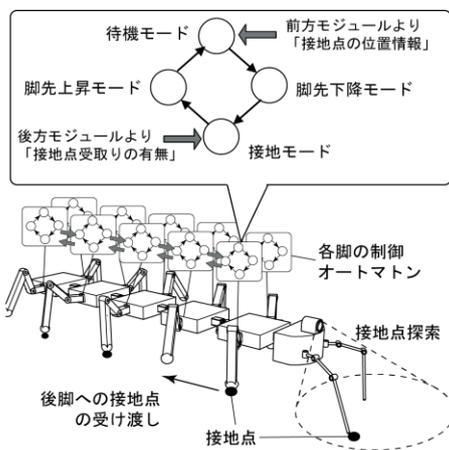


図2：接地点追従法の概要

そして、ロボット先頭において環境を探索し接地点を適切に設定することで、進行方向の制御と不整地踏破が可能となる。接地点追従法は生物模倣制御によらない斬新な分散制御法であり、これまで実現できなかった高い運動性能の実現できる。その一方で、ムカデ型多脚歩行ロボットのような冗長多自由度の制御対象においては、制御パラメータ（接地点間隔、接地脚の速度、脚先軌道など）

の設計はロボットの構造パラメータとも関連することから設計者の試行錯誤に依存しており、実現できる運動性能の見積もりが難しいという問題があった。そのため、これらのパラメータを自動的にかつ効率的に導出できる新たな設計手法が必要であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、接地点追従法における制御パラメータおよびロボットの構造パラメータの設計法の確立を行ない、コンピュータシミュレーションと実機実験による評価を通してムカデ型多脚歩行ロボットの整地・不整地におけるより高い運動性能を実現することである。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) 接地点追従法の制御アルゴリズムとロボットの挙動を同時に表現することができるモデルの構築方法を明らかにし、そのモデルの下に制御パラメータを設計する方法を明らかにする。具体的には、各脚の制御オートマトンを合成したオートマトンにロボットの挙動を対応させたハイブリッドオートマトンを構築し、近年組込みシステム分野で発展しているモデル検証法などを用いた動作の計算論的検証法を用いて制御パラメータの設計法を構築する。
- (2) (1)において導出したパラメータに対する、ムカデ型多脚歩行ロボットの運動性能の評価方法を明らかにする。
- (3) 上記2点の成果により十分な運動性能を実現した上で、将来的に被災地や人類未踏地で探査活動をするロボットを開発するために、ロボット自身の自律的行動能力、もしくは操作者を介した半自律的行動能力を実現する方法を明らかにする。

3. 研究の方法

上記の研究目的を実現するために、具体的に以下の5項目に取り組む形で研究を実施した。

- (1) ロボットと制御アルゴリズムの大域的挙動のモデル化、
- (2) 計算論的検証法に基づく制御パラメータの導出、
- (3) 物理シミュレータの環境作成と運動性能評価法の確立、
- (4) 実機開発と実験による運動性能評価、
- (5) 自律的接地点計画法の確立。

3年間を掛けてこれらの研究項目を取り組んだ。実施項目(1)(2)は研究目的(1)のためであり、本研究の根幹として3年間を通して取り組んだ。項目(3)(4)は研究目的(2)のためであり、それぞれ1年目2年目に実施した。実施項目(1)(2)と実施項目(3)(4)はお互いの

結果をフィードバックし合うことで、それぞれを錬磨していった。次いで研究目的(3)のために、実施項目(5)を最終年度に行った。

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) 形式検証 (モデル検査) 手法を用いたムカデ型多脚歩行ロボットの制御・構造パラメータの設計【研究目的(1)、実施項目(1)(2)】

分散制御に関わる制御パラメータ、およびロボットの構造パラメータは、システムの大域的挙動が設計者の目的通りになるように、適切に設定される必要がある。そこで本研究では形式検証 (モデル検査) を用いて、制御・構造パラメータを設計する方法を提案した。

形式検証の一つであるモデル検査は、検証対象を状態遷移系 (モデル) で表し、論理式で記述された仕様を満足するかどうかを網羅的に検証する方法である。近年、ソフトウェアやハードウェアの設計の分野で発展しており、そのためのツールが多数公開されている。本研究ではそのツールを利用したパラメータ設計ツールを開発した。以下にその概要を記す。

まず、接地点追従法に基づく各脚の動作を図3のように時間オートマトンにより表現した。ムカデ型多脚歩行ロボット全体の動作は各脚の時間オートマトンを結合したもととしてモデル化される。次いで、ロボットが継続的に歩行できるための仕様を論理式で記述した。形式検証ツールを用いることで、時間オートマトンに現れるパラメータが仕様を満たすかどうかを自動的に調べることが出来る。そして、この形式検証ツールを利用して、モデル検査を用いて接地点追従の歩行制御を持つムカデ型多脚歩行ロボットが継

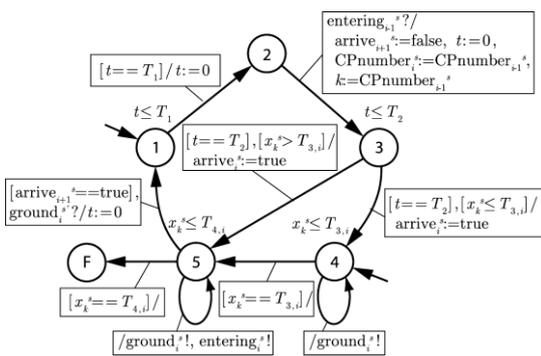


図3: 1本の脚 (中間脚) の動作を表す時間オートマトン

続的に歩行できるためのパラメータの範囲を求める手法を提案した (図4)。

図5は図4に従い、パラメータを検査した結果の例である。仕様を満たす場合は○が、満たさない場合は×が記されている。図5上

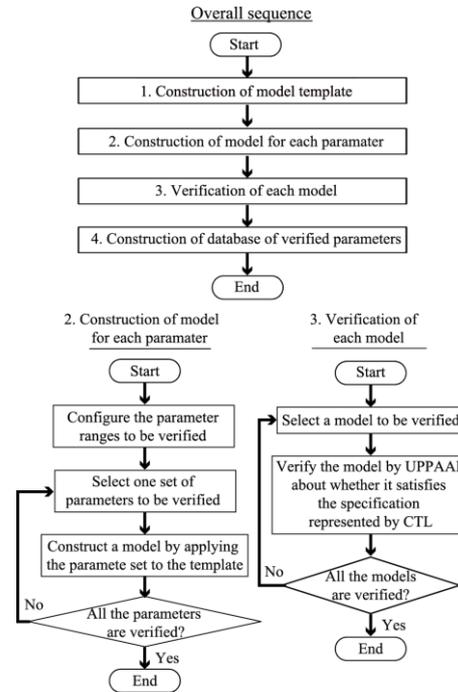


図4: パラメータ設計のフローチャート

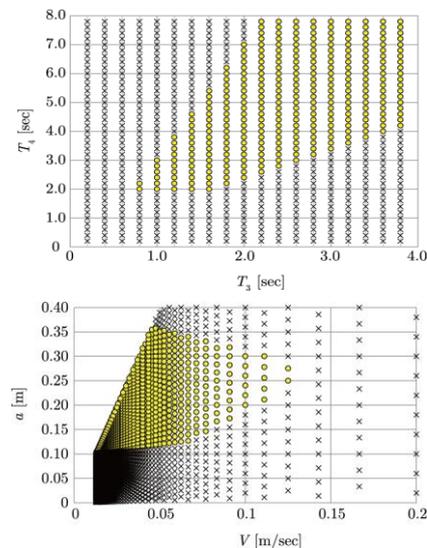


図5: パラメータが仕様を満たすかの検査結果の例 (上: 時間オートマトンでのパラメータ、下: 制御・構造パラメータ)

は時間オートマトン内のある二つのパラメータについて導出したものである。この二つ以外にも同時に多数のパラメータを検査しているが、図に描画するために他のパラメータを固定した場合を示している。図5下はオートマトン上のパラメータを実際の制御・構造パラメータに変換したものである。ロボットを設計、制御する際は、仕様を満たすパラメータの組みを選択すれば良い。また、提案手法による導出結果は物理シミュレータおよび実機を用いた実験により、妥当性が実証されている。

(2) ムカデ型多脚歩行ロボットの物理シミュレータおよび実機 (Mukade1) の開発と実験【研究目的(2)、実施項目(3)(4)】

形式検証手法によるパラメータの導出手法は、ロボットの動作を抽象化したモデル(抽象モデル)に基づくものであった。そのため、その有用性を示すためには、ロボットの動作を抽象化しない現実世界(に近い環境)での検証も必要となる。そこで本研究では、ムカデ型多脚歩行ロボットの実機および物理シミュレーションの開発を行い、実験による検証を行った。まず、実機について説明する。

図6は開発したムカデ型多脚歩行ロボット(Mukade1)である。上図は全体の写真、下図は各体節を構成するモジュールである。各体節は同じモジュールから構成されている。

接地点追従法を実現する上で要求される計算能力は、脚2本の脚先の位置制御(運動学, 逆運動学), 前後のモジュールとの通信, 体節間リンク(受動関節)の角度情報の獲得だけであり, これらは比較的安価で低機能なマイコン(8bit, 8MHzマイコン)で実現できた。そのため, モジュール自体を小型化することが出来た(10脚構成時: 長さ650mm, 幅237mm, 股下高さ35mm)。

機械構造の設計においては, 前後の脚間で脚先の接触により接地点の交換を行えるように脚先の構造をスリム化する一方で, 脚の可動範囲を広くするために2重のリンク機構を導入した。また, 各脚の接地状態の検出のために, 脚先と地面との間に力センサもしくは接触スイッチの配置が必要であるが, 先

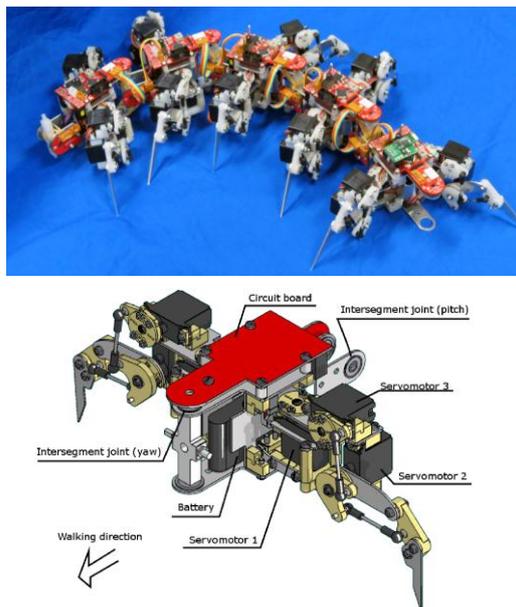


図6: ムカデ型多脚歩行ロボット: Mukade1 (上: 10脚構成時の全体の写真, 下: モジュールのCAD画像)

の理由により脚先に配置することは望ましくなかったため, 脚の根本において脚先が地面から受ける力を検出する機構にした。

そして, Mukade1を歩行させてデータを取得し, 歩行性能(地面との滑りの様子や不整地登破能力)を評価した。

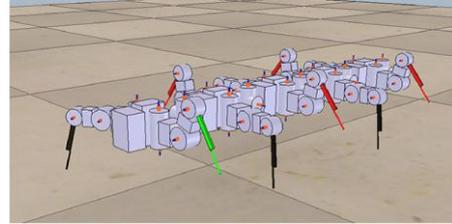


図7: ムカデ型多脚歩行ロボットの物理シミュレータ(8脚構成時)

次に, 物理シミュレーションについて説明する。本研究では実験の再現性の確保のため, またロボットの構造パラメータの変化に対する歩行性能を評価するために, 物理シミュレーションも用いる必要があった。図7は開発した物理シミュレータのスクリーンショットである。設計対象となる構造パラメータ以外は, 実機のサイズに合わせた。

図8は研究成果(1)の手法によって導出されたパラメータ(上図太線上の値)を用いてシミュレーションのロボットを歩行させた場合の, 脚先の地面との滑りを表したものである。滑りの発生は, 設計時に指定した仕様を満たさないことを意味しており, 形式検証により仕様を満たすと判定されたパラメータは, 物理シミュレーションでも仕様を満たすことが示された。

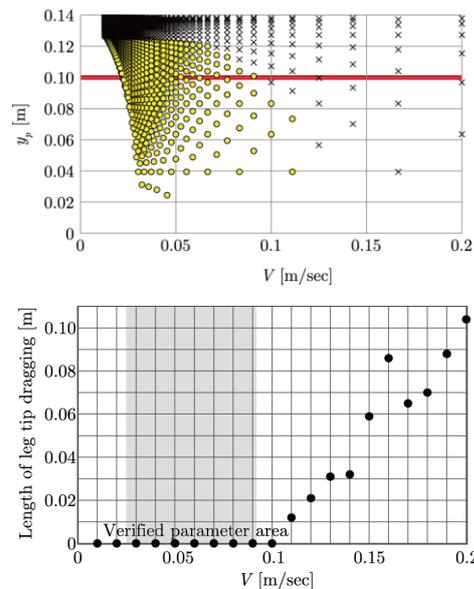


図8: 形式検証により導出されたパラメータ(上)と, 上図の太線で示したパラメータでの実験による脚先の滑り(下)

(3) 触角センサを用いた接地点計画手法の開発【研究目的(3)、実施項目(5)】

接地点追従法は、先頭脚の接地点を計画するだけで擬似的に全ての脚を接地点計画に基づいて動作させられるという利点がある。しかし、そのための先頭脚の接地点計画はまだ提案されていない。接地点計画を行うには歩行する環境の地形情報を取得することと、得られたデータの中から適切に接地点を選択することが重要となる。また、接地点計画は高速に行われる必要があり、簡単な情報処理で接地目標点が求められることが望ましい。そこで本研究では、能動触角センサを用いて、環境の探索を行い、接地点計画を行う手法を開発し、物理シミュレーションによりその有用性を示した。

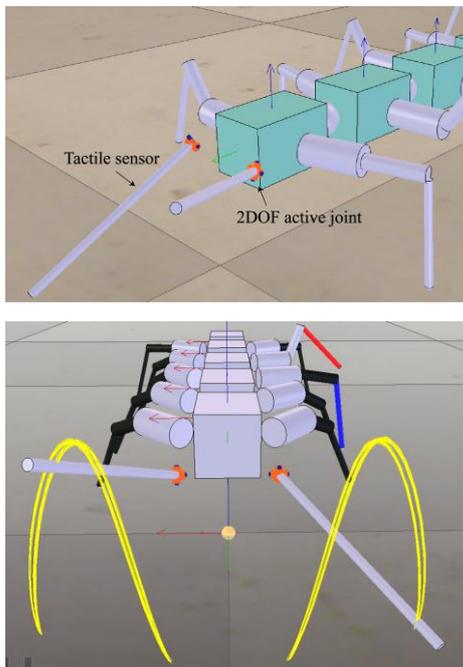


図9：能動触角センサ(上)とその動作パターン(下)

図9は想定した能動触角センサである。根元に2自由度の能動関節を持ち、触角自体を剛体とした。触覚センサは物体との衝突時にその触覚上での位置を知ることが出来る。能動触角センサの能動関節の制御は、実際の昆虫の動作を参考に、周期的運動を描くように設計した。触覚は周期運動の中で物体と接触した位置を、触覚の局所座標系で検出し、ある一定時間その座標系をロボットの移動速度を元に更新しながら維持する。

図10はロボットを段差がある環境において歩行させたときの、ある時点における接地点の位置を矢状面から見た図である。接地点の座標はあくまで触覚の局所座標系のものであるため、必ずしも障害物上に位置していないが、おおまかな障害物の形状を示すことが出来る。また、これらのデータから次に

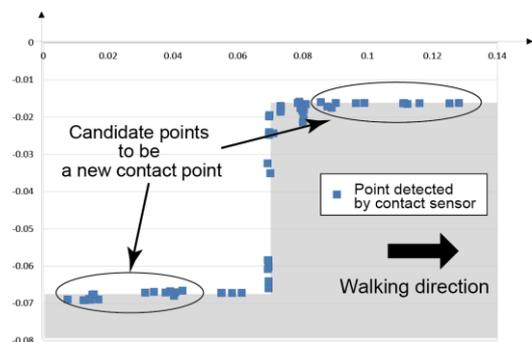


図10：触角センサが検出した接触点と次の接地点となる候補

先頭の脚が接地する接地点を、なだらかな地形上にある接触点から選択する。具体的には、各接触点に対して近傍の接触点の高さの分散が最も小さくなる点を選出する。なお、触角センサの制御と接地点の探索に関わるパラメータの設計には研究成果(1)を用いた。

図11は階段状の障害物を登破させた場合の実験結果である。中図は当該環境を上方から見た図であり、下側から上側へロボットは歩行する。一定時間歩行する試行を複数回行い、その際の最終位置と、それらの中から最長、最短となる経路を示した。下図は到達距離と進行方向の分散を示しており、明らかに、触角センサを用いた場合の方が、障害物の登破に成功する回数が多く、提案手法の有用性を示すことが出来た。

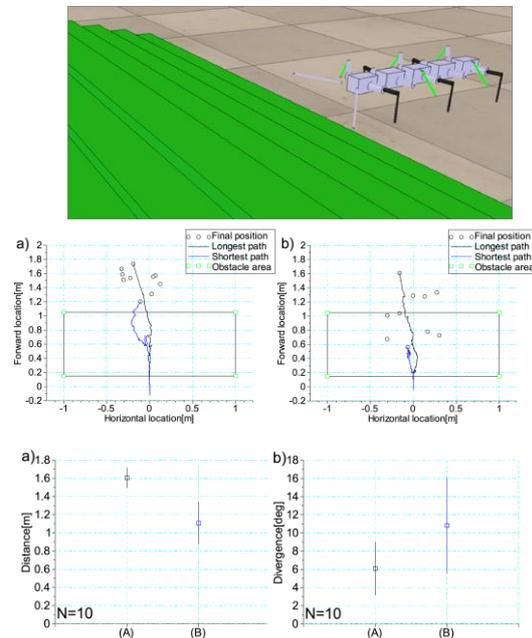


図11：階段状の障害物に対する登破実験(上：物理シミュレーションのスクリーンショット、中：上方から見たロボットの到達点、下：到達距離と進行方向の分散、左中・左下：能動触角センサ有り、右中・右下：能動触角センサ無し)

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1件)

- ① 稲垣伸吉、丹羽智哉、鈴木達也、受動体節間関節を持つムカデ型多脚歩行ロボットの接地点追従法による分散歩行制御、計測自動制御学会論文集、査読有、Vol. 47、2011、pp. 282-290

[学会発表] (計10件)

- ① 岸俊道、稲垣伸吉、鈴木達也、ムカデ型多脚歩行ロボットのための触角センサを用いた接地点計画手法、ロボティクス・メカトロニクス講演会2013、2013. 5. 23、つくば国際会議場(茨城県)
- ② 稲垣伸吉、鈴木達也、ムカデ型多脚歩行ロボットの分散制御における形式検証を用いた大域的パラメータ設計、第25回自律分散システム・シンポジウム、2013. 1. 25、仙台(宮城県)
- ③ 野村 啓介、稲垣伸吉、鈴木達也、形式検証を用いたムカデ型多脚歩行ロボットの制御パラメータの導出、第51回計測自動制御学会離散事象システム研究会、2012. 6. 1、宮崎県婦人会館(宮崎県)
- ④ 野村 啓介、稲垣伸吉、鈴木達也、歩行可能条件と形式検証に基づくムカデ型多脚歩行ロボットのパラメータ群の導出、2012 ロボティクス・メカトロニクス講演会、2012. 5. 27、浜松(静岡県)
- ⑤ 稲垣伸吉、鈴木達也、ムカデ型多脚歩行ロボットの分散モジュールの開発～接地点追従法の実装にむけて～、第24回自律分散システム・シンポジウム、査読無、2012. 1. 27、神戸ファッションマート・コンベンションルーム(兵庫県)
- ⑥ 近藤悠太、稲垣伸吉、鈴木達也、反射を組み込んだ接地点追従法によるムカデ型多脚歩行ロボットの分散歩行制御～引っ掛かりの解消による不整地踏破能力の改善～、第23回自律分散システム・シンポジウム、査読無、2011. 1. 30、北海道大学(北海道)
- ⑦ Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki, Follow-the-Contact-Point Gait Control of Centipede-Like Multi-Legged Robot to Navigate and Walk on Uneven Terrain, 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, 2010.10.21、Taipei International Convention Center (台湾)
- ⑧ Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki, Navigation Control and Walking Control on Uneven Terrain for Centipede-Like Multi-Legged Robot Based on FCP Gait

Control, 13th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2010), 2010. 9. 1, 愛知工業大学(愛知県)

- ⑨ 黄可濱、稲垣伸吉、鈴木達也、時間オートマトンによる多脚歩行ロボットの動作検証、平成22年電気学会産業応用部門大会、2010. 8. 24、芝浦工業大学(東京都)
- ⑩ 稲垣伸吉、鈴木達也、分散型歩行制御によるムカデ型多脚歩行ロボットの高機動性の実現、ロボティクス・メカトロニクス講演会2010、2010. 6. 15、旭川(北海道)

[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・講師
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

研究分担者なし