

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860042

研究課題名（和文） 分散アーキテクチャと離散モデリングによる多自由度ロボットの行動計画手法の開発

研究課題名（英文） Development of Motion Planning Method for Multi-DOF Robots Based on Distributed Architecture and Discrete Modeling

研究代表者

田崎 勇一 (TAZAKI YUICHI)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：10547433

研究成果の概要（和文）：本研究は動的システムの分散制御アーキテクチャと離散モデリングから成る自律的多自由度ロボットの制御手法の実現を目指す。空間の離散化による行動計画は複雑な環境に対応可能だが比較的次元の問題にしか適用できない。一方、現在広く受け入れられている階層型制御は大規模系に対して有利である反面、ロボット本来の多自由度性をフルに活かすことができない。そこで本研究では、離散近似手法とマルチエージェントのコンセプトに基づく分散制御を融合させることにより両者の利点を合わせ持つ新しい制御手法を開発する。

研究成果の概要（英文）：This research aims at the development of control methods for autonomous robots with large degrees of freedom, founded on distributed architecture and discrete modeling of dynamical systems. Motion planning based on the discretization of configuration space is able to cope with complex environments but it is applicable only to relatively small dimensions. Hierarchical architecture, which is widely accepted in the control of large-scale systems, is not able to fully exploit the multi-DOF characteristic of the robot. The goal of research is to develop a new control framework which combines the advantages of both discrete modeling and distributed control.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,130,000	339,000	1,469,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
総計	2,110,000	633,000	2,743,000

研究分野：ロボット工学，制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：動作計画 多自由度ロボット 離散モデリング

## 1. 研究開始当初の背景

知能ロボットは、多くの自由度を駆使して複雑かつ不確定な外環境において様々な作業を遂行しなければならない。多自由度知能ロボットを実現するには、環境の複雑性、状態空間の高次元化、多目的性など、乗り越えるべき多くの課題がある。複雑な環境で行動計画を行うためには、本来連続体である作業環境のグラフ構造による近似表現を構築する離散近似手法が有効であると考えられる。しかしながら、離散近似手法は本質的に大規模系へ直接適用することは難しく、理論研究で

扱われる問題（たかだか1桁自由度）と実システム（数百自由度～）との乖離ははなはだしい。一方、多自由度ロボットを含む大規模系の制御には階層的アプローチがとられる。しかしながら階層化アプローチには対象に関する深い事前知識が必要であったり、階層化により本来の自由度が最大限に活かされなくなるなどの問題がある。

これに対し、申請者らはロボットおよびその周辺環境をマルチボディモデルで表現する動作計画手法を提案してきた。本手法は従来の階層的な

法の問題点を解決することが期待されたが、ごく簡単な例題へ適用されたのみで、より深い解析や手法の一般化が求められていた。

## 2. 研究の目的

分散制御アーキテクチャと離散モデリングを骨子とする新しい多自由度知能ロボットの制御手法の開発を目指す。具体的には、

(1) マルチボディモデルにもとづく多自由度ロボットの動作計画手法の一般的枠組みを構築する

(2) 2足ロボットを離散事象システムとしてモデリングし、これを用いて周期運動を生成するための事象駆動型コントローラを実装、実機を用いた実験を通じて検証するの2点に取り組む。

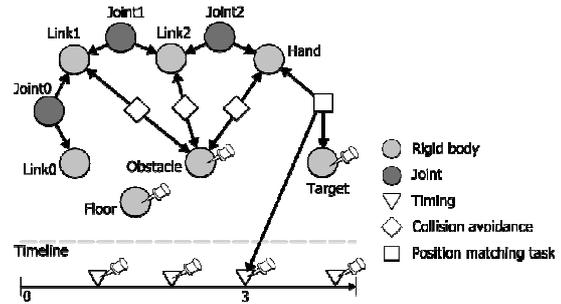
## 3. 研究の方法

動作計画手法の検証は物理シミュレーションライブラリを用いた動力学シミュレーションにより行う。一方、2足ロボットの周期運動制御については小型のヒューマノイドロボットの実機を用いて実験を行う。申請当初は海外の研究機関と協力して当該機関が保有するロボットを使用することを検討していたが、これは実現されなかった。

## 4. 研究成果

### マルチボディモデルを用いた動作計画の基本的枠組みの確立

ロボットやその周辺環境、動作目的(タスク)などの情報を単一のグラフ構造として表現するための一般的な方法論をある程度確立した。下図はロボットアームが障害物を回避しつつ目標位置へ手先をのばすタスクを表現するグラフの例である。剛体や関節などの個々の構成要素は1つのグラフノードとして表され、それらの関係性がグラフのエッジで表現される。通常マルチボディモデルと異なり動作計画を指向するため、時間軸(タイムライン)上にもノードが置かれ、これらは所定のイベントとその生起時刻を表現する。さらに、実行すべきタスクをもグラフノードとして表す。この例では「位置を一致させる」というタスクノードがロボットの手先を表すノードと目標物体を表すノードに接続されている。このようにして、様々な形態のロボットおよび周辺環境に対する複雑なタスクをグラフという統一的な構造で表現する方法が得られた。

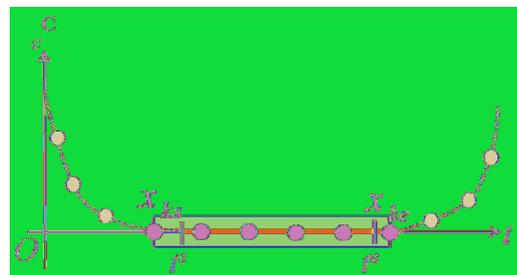


このようなグラフ構造で表現された動作計画問題は、優先度つき拘束解決問題と呼ばれる数理計画問題として定式化される。本研究では、この問題に対する計算手法を開発した。本手法はエッジでつながれたノード間の局所的な関係性のみを元に、全体的に整合性のとれた変数値の組み合わせを求める反復手法である。このため、ノードやエッジが増えても一度の反復にかかる計算時間は比例的にしか増加しないという良好な性質を持つ。また、新たな関節やタスクなどのグラフノードに対応するには、そのノードが持つ変数や隣接するノードに課す拘束条件のみをモデリングするだけで済むため、拡張性に富む。

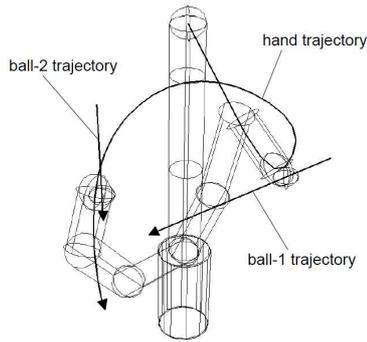
### ロボットアームのリーチング動作におけるタイミング最適化

所定のタスクを計画するにあたり、使用者が計画器に指示すべき情報量が少なく済むほど知的な動作計画であると言える。この観点から、タスクの達成時刻の計画を含めたリーチング動作計画問題に取り組んだ。これにより使用者がタスクの達成時刻を明示することなく、最適な動作タイミングを計画することが可能となる。

リーチングのようなタスクは、下図のように剛体の軌道を所定の時区間において所定の値に拘束する形で表現できる。従来は時区間の始点と終点は固定されていたが、本研究ではこれも計画変数とみなすことで、特別な仕組みを用いずにタスク達成タイミングの計画がなされることが示された。



下図はロボットアームのボールキャッチングタスクへの適用例のシミュレーション結果である。等速運動する2つのボールをキャッチする滑らかな手先軌道が計画されているのが分かる。

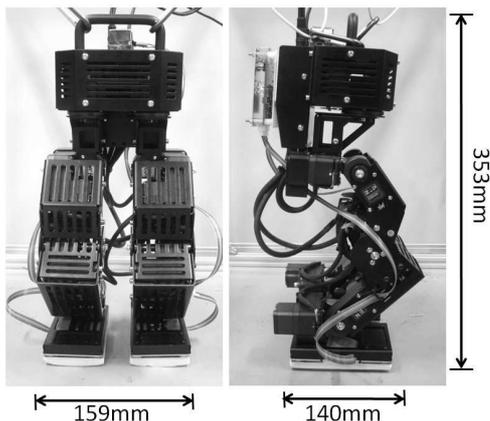


## 2 足ロボットの離散モデリングと事象駆動型周期運動制御

ロボットの運動は、物体同士の接触状態の切り替わりなどの離散的な性質を持つ。物体をつかむ、歩行するなどといった接触の切り替わりを伴うタスクを計画するには、このような離散的性質を扱うメカニズムが必要である。一方、現状の動作計画手法は、変数と拘束条件との間の局所的な関係性（勾配）のみに基づいて変数値を決定するため、このような切り替わりの計画を扱うことができない。

そこで、接触の切り替わりと伴う典型的な対象として2足歩行ロボットを考え、その離散的性質を有限オートマトンとしてモデリングし、これを応用してその場足踏み運動を実現する制御器の設計へ応用した。本テーマは、現状では動作計画手法の開発とは直接関係していないが、将来的には本テーマより得られた知見を動作計画手法の改良へフィードバックする予定である。

本研究で使用した2足ロボット e-nuvo (ZMP社)を以下に示す。



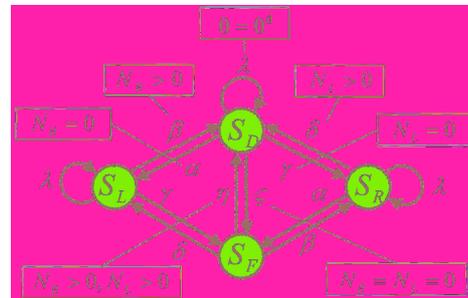
本ロボットには胴体上部に加速度・角速度センサが取り付けられ、各足の裏面四隅に圧力センサが組み込まれている。

各足と床面との接触状態に基づいて2足ロボットの運動を有限オートマトンとして表現すると右上図のようになる。図において  $S_L$ ,  $S_R$ ,  $S_D$ ,  $S_F$  はそれぞれ左足接地, 右足接地,

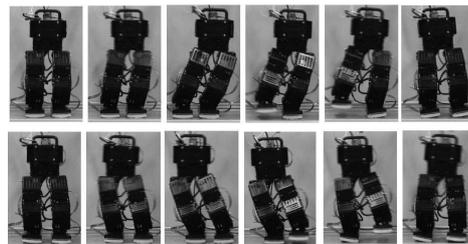
両足接地および浮遊状態を表す。状態遷移は床反力 ( $N_L$ ,  $N_R$ ) が0か正かに従って生じる。また、ロボットの関節角度  $\theta$  が目標値  $\theta_d$  へ到達した瞬間にも事象が生起する。

足踏み運動を実現するための制御器はロボットのセンサ信号を常にモニタする。オートマトンのいずれかの遷移条件が成立したら状態遷移が生じ、その瞬間にロボットに指令する目標値  $\theta_d$  および目標値への到達にかかる時間  $\tau$  が更新される。これにより事象駆動型の制御が実現される。

ロボットが継続的な足踏み運動を行うには、事象生起時のセンサ信号を  $\theta_d$  および  $\tau$  へ適切にフィードバックすることが重要である。本研究ではもっとも簡単なコントローラとして  $\theta_d$  および  $\tau$  をあらかじめ決められたいくつかの定数値の中から選ぶ方式を実装し、その妥当性を実機を用いた実験を通じて検証した。



その結果、運動のペースを決定する  $\tau$  の値が運動の継続性に大きな影響を持つことが明らかとなった。下図は適切な  $\tau$  が設定されたときに実現された足踏み運動のスナップショットである。



## 動作計画手法のソフトウェアライブラリとしての整備

本研究で開発した動作計画手法の大きな利点の1つに高い汎用性がある。そこで、開発した手法を第三者が自由に利用可能なソフトウェアライブラリとして整理し、公開する予定である。現時点ではライブラリとしてはほぼ整備完了しているので、ドキュメントの作成が完了し次第研究代表者のウェブページにて公開する計画である。

## 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)

Y. Tazaki, J. Imura; Planar Bipedal Locomotion Control Based on State-Discretization, Robotics and Autonomous Systems, Elsevier, Volume 58, Issue 5, pp.657-665, 2010. 査読有

[学会発表] (計 6 件)

- ① Y. Tazaki, J. Imura; Multiresolution Discrete Abstraction for Optimal Control, 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2010), December 15-17, 2010, Atlanta, Georgia, USA.
- ② 鈴木周一, 田崎勇一, 鈴木達也; ヒューマノイドロボットの順序動作計画におけるタイミングの最適化, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 1A1-7, 9/22-24, 2010, 名古屋
- ③ 浦濱英広, 田崎勇一, 稲垣伸吉, 鈴木達也; ハイブリッドオートマトンモデルの同定に基づく二足ロボットの周期運動制御, 第 47 回離散事象システム研究会, 8/3, 2010, 金沢学院大学
- ④ Y. Tazaki, J. Imura; Approximately Bisimilar Discrete Abstractions of Nonlinear Systems Using Variable-resolution Quantizers, 2010 American Control Conference (ACC2010), pp.1015-1020, June 30 - July 2, 2010, Baltimore, Maryland, USA.
- ⑤ Y. Tazaki, H. Sugiura, H. Janssen and C. Goerick; Decentralized Planning for Dynamic Motion Generation of Multi-Link Robotic Systems, IEEE/RSJ International Conference on Robots and Intelligent Systems, pp.1582-1587, Oct. 11-15, 2009, St. Louis, USA.
- ⑥ Y. Tazaki, J. Imura; Discrete-State Abstractions of Nonlinear Systems Using Multi-resolution Quantizer, 12th International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC' 09), pp.351-365, April 13-15,, 2009, San Francisco, CA, USA.

[その他]

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田崎 勇一 (TAZAKI YUICHI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：10547433

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし