

## 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24年 6月 8日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300078

研究課題名（和文）多重時間スケールで適応する多自由度ロボットのノンストップ運動計画

研究課題名（英文）Non-stop motion replanning capable of multi-scale spatiotemporal adaptation for robots with many degrees of freedom

研究代表者

吉田 英一（YOSHIDA EIICHI）

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・連携研究体長

研究者番号：30358329

研究成果の概要（和文）：変化する環境に多重時間・空間スケールで多自由度ロボットの動作経路を適応させることが可能な、ノンストップ運動計画システムを確立した。まず、運動を支配する「支配自由度」を有効に利用し、経路の計画と実行を並列に行って環境変化に空間的に適応させる機能を実現した。次に、巨視的な時間計画と微視的な軌道変形を用いた時間的適応手法を構築した。時空間における階層ロードマップ構造を用いて時空間適応機能を統合し、異なる種類のロボットで有効性を実証した。

研究成果の概要（英文）： This research aims at establishing a motion planning framework that is capable of adapting the planned robot motions to a changing environment in multiple spatial and temporal scales. Spatial adaptation has first been achieved by exploiting “dominant degrees of freedom (DOF)” that governs global robot motions, together with a framework of parallel path planning and execution. Next, we devised temporal adaptation through global timing and local path deformation in order to generate adaptive motions. Those multi-scale spatial and temporal adaptation capabilities are integrated via a hierarchical roadmap data structure and applied to different types of robots to validate its effectiveness.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2010年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2011年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
総計	13,400,000	4,020,000	17,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：知能ロボティクス、モーションプランニング、多自由度ロボット、実時間計画

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットの運動計画の研究分野では、ロボットの姿勢を決めるベース位置や関節角からなるコンフィグレーション空間（以下、C-空間と呼ぶ）でランダムにサンプルした姿勢をノード、その間の干渉のない経路をエッジ

とする「ロードマップ」と呼ばれるグラフ構造を展開し、目標位置までの経路を導出する「サンプリング運動計画手法」が進展している。その汎用性と強力な探索能力から、この手法は、特に複雑な形状・多自由度ロボットの運動計画に対して数多く用いられるようになってきている。しかしながら、(i) C-空間にお

ける探索が基本である、(ii)ダイナミクスを考慮した時間軸が計画に含まれない、(iii) 知覚入力を想定しないオフライン計画である、という点で、この手法は変化する環境への適応的な運動計画・実行には困難があった。

多自由度の人間型ロボットへのサンプリング運動計画手法の適用は、準静的あるいは幾何的・運動学的に計算された経路を、ダイナミクスを考慮した軌道に変換する2段階手法により行われた。しかしながらこれらは、運動を停止した経路の「計画」とその「実行」が明確に区分けされているため、環境変化への適応性に欠けていた。逆に、環境変化に実時間で応答可能な運動計画は、移動ロボットなど少ない自由度のロボットへの適用に限られていた。

一方、多自由度ロボットシステムを少数のパラメータで制御するさまざまな手法が研究されてきた。これらの効率的な制御機構をサンプリング運動計画に組み込み、環境への高い応答性を目指すのは自然な発想である。しかし、C-空間での計画を基本とする運動計画手法と制御機構の空間的・時間的スケールの違いから、問題に特化した形でしか扱われていなかった。

## 2. 研究の目的

これらを背景に、時空間における巨視的・微視的適応という概念を導入し、汎用性の高いサンプリング運動計画を拡張し、多自由度ロボットのノンストップ運動計画手法の構築を目指す。研究の背景に示した課題(i)の解決のため、サンプリング計画手法に基づく空間的適応手法を構築し、また時間的な動作軌道の伸縮を伴う時間的適応手法により、課題(ii)を解決する。さらに、課題(iii)を解決する枠組みとして、多自由度ロボットの自由経路を階層的に表現し、オンラインで環境変化に対応可能なロードマップ機構を導入し、これを用いて空間的・時間的適応を統合的に行う運動計画手法を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 空間的適応手法の構築

多自由度ロボットシステムのC-空間を微視的な「詳細自由度」と捉え、目的を持ったコヒーレントな動作の多くは、少数の巨視的「支配自由度」により記述できることを、解析により明らかにする。サンプリング運動計画手法に基づいて適応手法を構築し、環境に変化があった場合、対応する支配自由度を同定し、計画における探索範囲を絞り込むことにより、効率的に空間的適応動作を生成する機能を実現する。

### (2) 時間的適応手法の構築

適切な時間スケールを当てはめて空間的適応動作を実行する手法を明らかにする。まず、実行中の動作を変更せずに適応動作が可能な場合には、巨視的な時間スケールで空間的適応動作に時間軸を付与する。実行中の動作の変更が必要な場合、微視的時間スケールにおいて、ダイナミクスを考慮した軌道の空間的変動範囲「実行可能軌道集合」をモデル化し、軌道変形を行う。さらに、ロボットの状態遷移に追従しつつ適切な時間スケールを選択する手法を明らかにする。

### (3) 時空間階層ロードマップ構造によるノンストップ運動計画

上記(1)、(2)の異なるスケールの適応手法と、知覚入力との統合を可能にする時空間階層ロードマップ構造を導出し、環境変動への応答性が高いノンストップ運動計画システムの構成法を明らかにする。これにより運動計画器と適応機構が継続的に情報を共有し、環境の変化に適したスケールで適応可能なシステム構成を明らかにする。構築したシステムの有効性を、異なる多自由度ロボットシステムによるシミュレーション等で明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 経路計画・実行の並列化によるノンストップ運動計画の枠組み

動作中に環境の変化が検出された場合に、オンラインで適応的に再計画を行う機能を実現する計画器には、以下の機能が求められる。

- ・ 計画された経路の実行中に障害物との干渉が予測される場合、ただちに再計画を開始し、再び干渉のない経路が得られたらその実行に移る。
- ・ 経路の再計画中は、設定した安全距離以下に障害物に接近しない限り、動作を継続する。安全距離以下に接近したときに再計画が終了していなければ動作を中止する。
- ・ 再計画中に予測される干渉が排除された場合には再計画を中止し、元の経路を継続することができる。

これらを満たすノンストップ運動計画を実現するため、図1に示す枠組みを用いることとした。上記の仕様を満たす再計画機能を実現する計画器の状態遷移図を示す①~④。これは全体として一つの枠組みであるが、ロボットが動作している状態で計画を行うことを想定し、スタートした後、**Planning**と**Execution**の2つの並列なスレッドに分かれて動作することが特徴である。

囲い文字は状態を表し、状態は、基本的に

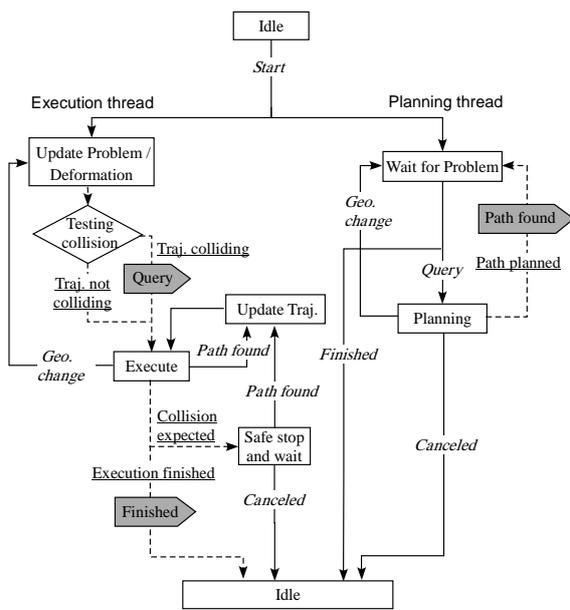


図 1 オンライン再計画の枠組み

「信号」を受け取ることで遷移する。信号の発信は、網掛け文字で示す。信号には、内部で送受信するものと、外部から受信するものを設定する。Start、Stop、Geo. change(環境変化の検出) は外部からの入力とする。他の信号(Query、Finished、Cancelled、Path found) は、内部で送受信する。ある状態にあるとき、イタリックで示す信号を受信すると矢印で示す状態に遷移する。環境に変化があった場合、Execution スレッドにおいて、外部のセンサなどで検出された情報が Geo. Change 信号として受け取られる。“Execute” 状態で軌道を実行中の場合、“Update Problem” 状態に遷移して変化した環境での障害物との干渉をチェックする。干渉が検出された場合には、“Query” 信号が Planning スレッドに送られ、再計画が開始される。

## (2) ロードマップ再利用による空間的適応手法

ノンストップで動作するオンライン再計画を実現するためには、環境の動的な変化を反映するロードマップを効率的に管理する必要がある。そこで、経験を蓄積する学習ロードマップと、変化した環境でその都度使用する作業ロードマップ 2 種類のロードマップを導入して、再計画の効率化を図る。

図 2 に、これら 2 種類のロードマップの機能を示す。図の上部が学習ロードマップ(Learning Roadmap)、下部が作業ロードマップ(Working Roadmap)である。環境の変化が検出された場合、作業ロードマップをクリアし、目標位置までサンプリング動作計画の開始する。その際、学習ロードマップから、

干渉のない局所経路をランダムに選択し、作業ロードマップに追加する。

再計画の過程で作業ロードマップに新たに追加されたエッジ(点線)は、学習ロードマップに追加され、これまでの探索経験として蓄積して次回以降の再計画に活用する。

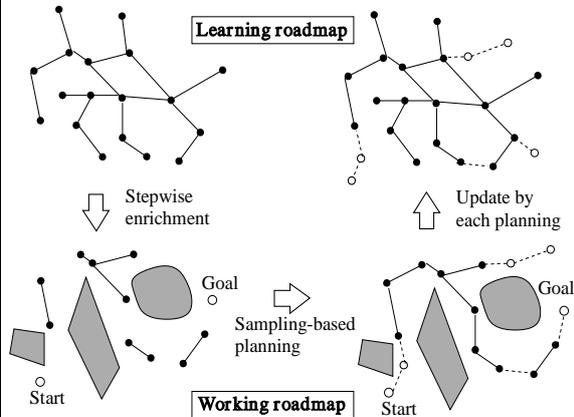


図 2 再利用可能なロードマップ構造

これを用いて、ロードマップを用いた空間的適応を行う。環境変化が検出されると、干渉が生じる経路上で、安全な停止動作を開始する経路点を推定する。次に、この点から目標位置までの干渉のない経路を、図 2 の学習ロードマップを利用して探索を効率化した作業ロードマップに基づいて再計画する。干渉のない新たな経路が導出されれば、冗長部分を削除する平滑化を行って、新たな経路を直ちに実行する。

予測される干渉地点に到達するまでに再計画が終了しない場合は、ロボットは減速して停止し、再計画により新たな経路が求められるまで、経路実行を中止する。計画に対して制限時間が設定されている場合には、一旦再計画を中止し、別途計画が要求されるまで待機する。

このようにして、継続的に更新されるロードマップを用いて、それまでに蓄積された環境に関する知識を利用して効率的に空間的適応による経路の再計画を行う。

## (3) 時間的適応手法の構築

経路と障害物の干渉が軽微な場合、再度のロードマップ更新とグラフ探索は、計算時間の点で非効率となる。

そこで、時間的な適応として、まずロボットのダイナミクスにおける制約等を考慮し、巨視的なスケールの時間軸を計画された経路に付与することにより、実行可能な軌道に変換する。さらに、微視的時間スケールで経路のトポロジーを大きく変化させずに移動

できる範囲である「実行可能軌道集合」を、局所的変形により軌道を伸縮する形で陰に表現し、応答性の高い適応動作を実現した。

具体的には、図 3 に示すように、ロボット・障害物上の最近接点をそれぞれ  $P$ 、 $Q$  とし、 $PQ$  間の距離  $d$  を用いて  $d$  が変形開始距離  $d_i$  よりも大きくなる方向  $n$  に点  $P$  を移動させるため、微小変位  $\Delta P$  を計算する。点  $P$  におけるロボット関節角変化とこの微小変位を結び付けるヤコビ行列を用いて、経路の局所的変形を導出することができる。

経路変形の計算は、干渉回避方向をロボットのヤコビ行列の逆行列を用いず求めることで高速に行うことができるうえ、ロードマップを用いる経路の再計画は必要がない限り呼び出されないため、ロードマップもコンパクトに維持することも可能である。

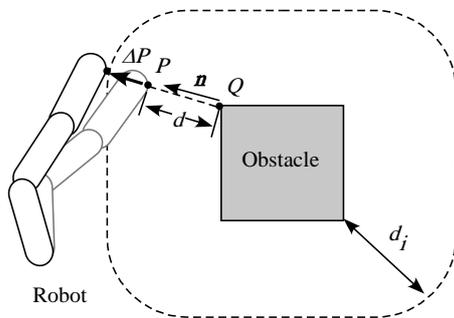


図 3 微視的経路変形による時間的適応

#### (4) 階層ロードマップによる時空間計画の統合と異なるロボットによる検証

作業空間上のエンドエフェクタの目標位置を支配自由度、またロボットのコンフィギュレーション空間を詳細自由度と捉え、(2)で導入したロードマップ構造を拡張し、微小動作を表現するヤコビ行列により結びつける階層的なロードマップの形でプロトタイプを実装した。さまざまなサンプリング運動計画アルゴリズムを利用できるように、独立に動作する計画器と制御器の実装には、オープンソースのロボットソフトウェア用インターフェースとして産総研で開発されている RT ミドルウェアを用いた。環境変化に応じてノンストップで動作する運動計画器を実装した。その汎用性を検証するため、移動ロボットや人間型ロボットのリーチング動作も例にとって、シミュレーションを行ってその有効性を確認した (図 4、図 5)。

図 4 では、左の橙色の立方体が平面上を移動するロボット、中央の紫色が連続して移動する障害物、その他は静止障害物である。ロボットの経路実行開始後、移動障害物によりロボットの経路に変形が適用され (図 4 b)、

その後障害物が隘路を塞いだ際には図 4c)、経路変形では対応できないため右側を通る経路がロードマップを更新した再探索により再計画される (図 4d)。その後ロボットは別の障害物を同様に回避し (図 4e)、最終的には図 4f に示す経路により目標位置に到達した。

図 5 は人間型ロボットに適用した例で、ロボットは図 5 a の初期状態から、立方体形状を持つ移動障害物がある環境で、上方にハンドをリーチングする動作を行う。動作開始後に当初の回避軌道 (図 5 a) 上に障害物が移動すると、ハンドをロボットから向かって左側に回避する経路が再計画された (図 5 b、c)。その後、再計画された経路と干渉する方向に障害物が移動した際にも (図 5d、f)、同様にこれを回避する軌道 (図 5 e、g) を計算し、実行してハンドを目的の位置に到達される目標が達成された (図 5 h)。

さらに環境条件を変えて複数の計画シミュレーションを行い、目標位置への経路が存在すれば最終的には導出されるというサンプリング計画手法の確率的完全性という特性が維持されつつ、オンラインで環境変化に適応した経路再計画が行われることを確認した。

以上により、異なる種類のロボットにも提案手法が適用可能なことが示され、その有効性が確認された。

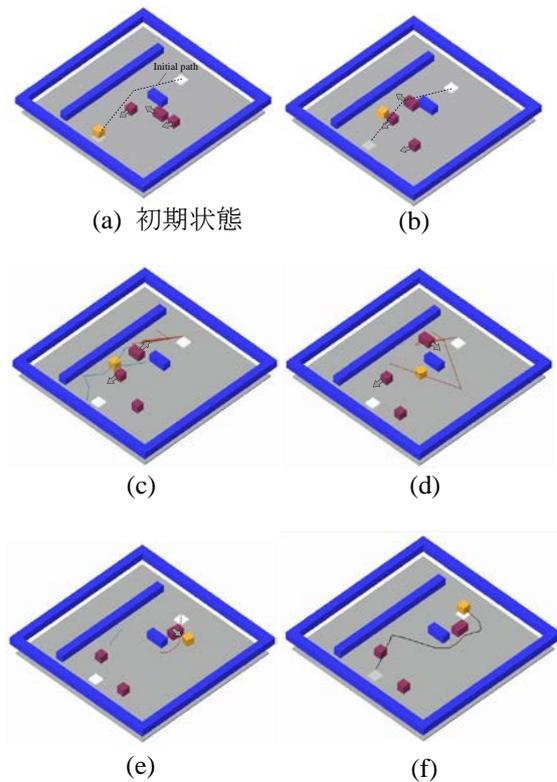


図 4 移動ロボットへの適用

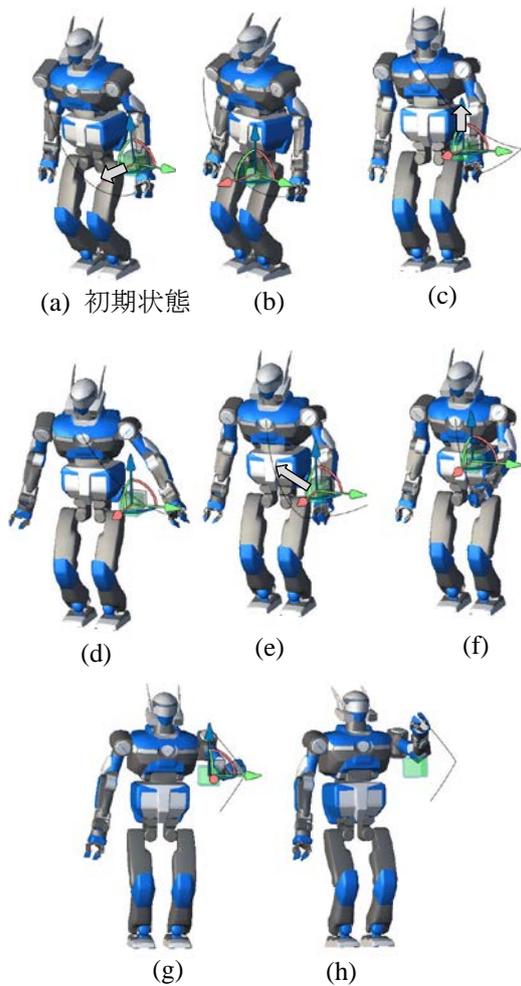


図5 人間型ロボットへの適用

## 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3件)

- ① 吉田英一、金広文男、横井一仁、P. Gergondet、“経路の変形と再探索を併用したオンライン動作再計画”、日本ロボット学会誌、査読有、29(8)、pp.716-725、2011  
DOI: 10.7210/jrsj.29.716
- ② 吉田英一、金広文男、“Reactive Robot Motion using Path Replanning and Deformation”, Proceedings of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 査読有、pp.5457-5462、2011  
DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980361
- ③ 吉田英一、横井一仁、P. Gergondet，“Online Replanning for Reactive Robot Motion: Practical Aspects”, Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 査読有、pp.5927-5933、2010  
DOI: 10.1109/IROS.2010.5649645

[学会発表] (計1件)

- ① Leo Baudouin、Nicolas Perrin、Thomas Moulard、Florent Lamiroux、Olivier Stasse、吉田英一、“Real-time Walking Path Planning with 3D Collision Avoidance”、IEEE/RSJ 2011 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2011), Workshop on Progress and Open Problems in Motion Planning, 2011年9月30日、San Francisco, USA.
- ② 吉田英一、金広文男、横井一仁、P. Gergondet、“経路の変形と再探索を併用したオンライン動作再計画”、第28回日本ロボット学会学術講演会、2010年9月24日、名古屋

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

吉田 英一 (YOSHIDA EIICHI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・連携研究体長  
研究者番号：30358329

### (2)研究分担者

金広 文男 (KANEHIRO FUMIO)  
独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員  
研究者番号：70356806

### 原田 研介 (HARADA KENSUKE)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員  
研究者番号：50294533

### (3)連携研究者

横井 一仁 (YOKOI KAZUHITO)  
独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・副研究部門長  
研究者番号：40358304