

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 5月 31日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22300071

研究課題名（和文） 非周期歩容および物体操作を同時に実現する、多点接触を伴う全身運動の計画

研究課題名（英文） A unified multi-contact planning framework for simultaneous whole-body manipulation with acyclic locomotion

研究代表者 ケダー アブデラマン（KHEDDAR ABDERRAHMANE）

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 研究員

研究者番号：90572082

研究成果の概要（和文）：仮想アバターあるいはロボットが、物体操作と非周期的移動動作とを組み合わせることで多点接触動作の統一的な計画手法を構築した。具体的には、ポテンシャル場によって誘導される木グラフ構造探索を用いた接触状態遷移の動作計画と、候補となる接触状態集合の姿勢および接触状態間を結ぶ運動の最適化との、2つの動作生成手法に基づいてこれを実現した。

研究成果の概要（英文）：We achieved a multi-contact planning for virtual avatars or robots that combines manipulation and non-gaited locomotion in a unified way. We combined the duality of two basic techniques for motion generation: planning guided by potential field functions growing trees of possible contacts and optimization techniques in posture (checks the feasibility of contact-sets candidates) and motion generation for contact transitions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成22年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
平成23年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
平成24年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

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：アニメーション、デジタルヒューマン、接触動作計画

1. 研究開始当初の背景

足位置の計画は、ロボット工学・グラフィックス分野で長く研究されてきた。これに基づき、ヒューマノイドなどの多関節ロボットや、仮想デジタルキャラクターなどの人間型動作主体に、平面や斜面、階段の昇降などを行わせることができる。多くの場合、これらの動作主体の歩行動作は、問題が複雑となるため、足と手に分けられて考察し、計画の対象

とする探索空間を減少させることで対処されてきた。また、ヒューマノイドの歩行動作生成と足位置計画は、環境の移動と障害物乗り越えなどに関心が限られていた。実際、従来の動作計画の研究においても、周囲の環境は、ロボットやキャラクターが接触を避けるべき対象と考えられてきた。しかしながら、実際に人間や動物は、体の足以外の部分を使用して、二足歩行の安定性を増したり、狭隘

部や不整地など二足歩行が不可能な環境を移動したりしているという事実があるが、このことは従来研究ではほとんど考慮されていなかった。

そこで、多点接触動作の計画に正面から取り組むことを、新たな方向性として考えた。この場合には、環境のすべての構成要素（地面、家具、不整地、岩など）を、動作主体の体の各部分と接触して動作を支える対象として利用できる。本課題開始前に、静的な環境で、準静的に安定な接触姿勢を生成するという基本的なシナリオでこの考えを検証した。その結果、(i) 与えられた環境において、接触状態の系列を計画する、(ii) これらの接触状態の間を結ぶ動作主体の姿勢と動作を計算する、という次の二つの基本的な副問題に分けて検討すべきである、という結論に達し、予備的な研究を行った。本課題開始までに、机に手をつけて物体に手を伸ばす、テーブルの前で椅子に座った状態から立ち上がる、などの非常に制約が大きな問題に対しても、ヒューマノイドロボット HRP-2 で解を得ることができた。この成果が、接触動作計画をより掘り下げて研究する本研究のきっかけとなった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、込み入った環境で、動作主体の運動能力を向上させるため、多点接触動作計画の新たなアプローチを構築することである。この目的のために採用した手法は、これまでとは異なる全く新規なものであり、物体操作と非周期的移動動作を一つの多点接触動作計画の枠組みで扱うことができる。上記のロボット HRP-2 で行った、複雑なシナリオでの動作に関する研究により、問題の理解について重要な基本的知見を得ることができた。これをもとに研究を進めた結果、コンピュータグラフィックスのアニメーションとロボット動作への応用も可能な汎用的な枠組みとして、他の類似研究に比較しても大きな進展を得ることができた。特に、デジタルキャラクターの高度な動作技能の実現により、CATIA や KineoWorks といった既存の CAD ソフトウェア製品や動作計画ライブラリではまだ実装されていない、デジタルキャラクターによる製品利用性評価やメンテナンス作業導出への新たな発展が期待できる。またこれらの成果は、ゲーム産業の設計過程に対しても応用可能である。

また、本研究の成果は、未知で乱雑な環境を対象にして非周期的な多点接触動作を生成することで、災害対応ロボットにも直接利用できる。不幸にして本課題の実施中に東日本大震災が起こったが、本研究の成果の応用例として、事故で損傷した原発現場でのロボット動作の生成にも今後利用が期待される。

多点接触動作生成の従来研究で著名なものとして、スタンフォード大の Sentis と Khatib による多点接触動作制御の研究があるが、これらの研究では大域的な接触動作計画を扱っておらず、この点で本研究の新規性・独創性は高い。

3. 研究の方法

本研究は、各年度において実施される 3 つの副課題 (Work-package, 以下 WP) から構成される。WP1 では、接触動作計画の枠組みに新たな機能を追加した。その詳細については、4 章で述べる。WP2 は、物体操作と非周期的移動動作を融合する基盤理論と手法を構築した。これは、まず、(1) 動作主体の全身との接触のみを利用した物体操作、(2) 全身と環境との接触の両方を利用した物体操作、(3) 全身動作、非周期移動動作、環境との接触のすべてを利用した物体操作、の 3 段階で実現した。WP3 では、ダイナミックな動作を導入することで、接触状態間を結ぶ運動を生成する手法を導出した。

4. 研究成果

本課題で得られた主要な成果は、目的の作業を達成するための、仮想キャラクター・またはロボットの多点接触動作状態の遷移系列を計画し、これらを結ぶ動作を生成する計画器 (Multi-Contact Planner, 以下 MCP) を実現したことである。従来研究と比較して新たな点は、動作主体の (許された) どの部分が、環境の (許された) どの部分とも接触できることである。

本研究では特に汎用的に適用可能なアルゴリズムとするために注力し、特定のロボット (HRP-2) に特化していたこれまでのアルゴリズムを見直して複数の独立したモジュール (要素) に整理し、それぞれが汎用性を持ちかつ拡張可能な形で再構成した。

図 1 は、MCP の構成モジュールを示す。任

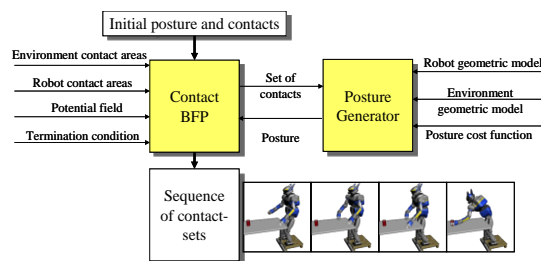


図 1 基本アルゴリズム構成

意の動作主体と環境を含む初期状態が入力として与えられると、Contact BFP”モジュールが探索木をポテンシャル関数に基づき展開していく。木の展開する各ステップで、

動作主体の各部分と環境との接触状態集合を計算する。計画器は、この接触状態集合について Posture Generator モジュールに問い合わせる。Posture Generator モジュールは、環境との望ましくない干渉がなく、かつ動作主体が安定な姿勢を計算するための最適化問題を解き、解が得られた場合にはこれを返す。

(1) WP1: 接触動作計画機能の拡張

副課題 WP1 で構築した機能は以下の通りである。

- 後述する WP2 で得られた成果に基づき、環境のすべての要素（動作主体、物体、環境）を追加し、MCP が提案する可能性がある接触状態を、物体操作や移動動作を区別することなく接触を評価できるように、Posture Generator のアルゴリズムを完全に再構築した（学会発表文献 8）参照）。



図 4 変形物体との接触

- 有限要素法を用い、弾性的な接触の生成や消滅を取り扱えるように Posture Generator を拡張した。これにより、図 3 に示すように変形物体との接触が計画できるようになった（学会発表文献 5）参照）。
- 力学に基づかない把握状態の抽象化を可能とする双方向性接触を、Posture Generator の制約として組み込める機能を実現した。その有効性を、いくつかのシナリオにて検証した。

(2) WP2: 多点接触計画の統一基盤理論の構築

副課題 WP2 では、理論的な考察と基盤の確立に主に取り組んだ。単純化した問題で検証した結果、物体操作、動作主体自体の移動、といった特定の動作、あるいはこれらを特に指定しない動作を、一つの枠組みで取り扱えることが示された。物体操作、動作主体の移動、またこれらを組み合わせた複雑な作業のいずれも、共通の基本的性質を持つことが実際に示された。これらの共通点は、このような系が、Lagrange 力学に従うこと、摩擦を含むこと、また様々な次元の接触の階層構造を持つことに由来する。この性質を利用すれば、複雑な多点接触動作計画問題を一つの枠組みで論じることができることが分かり、WP1 でのアルゴリズム再構築につながった。

図 2 は、三種類のレベルの等価性を示している。ここでは、移動と物体操作、またその

両方を含む系が、環境全体の構成要素のグラ

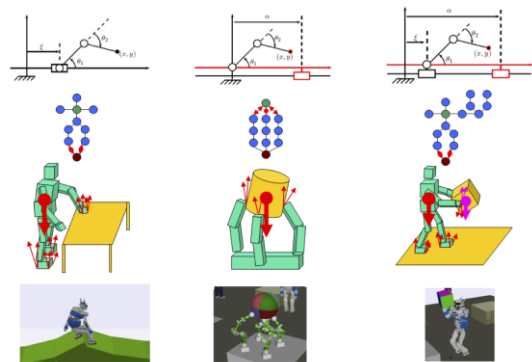


図 2 多点接触計画問題の統一的な枠組

フ構造として統一的に表現されていることがわかる。このグラフ構造は、研究代表者らが開発してきたシミュレーション環境 AMELIF 上で実装されている。

(3) WP3: ダイナミックな多点接触動作

WP3 では、2つの接触状態間を結ぶ動作の計画手法に関する研究を行った。結果として、連続する1組の接触状態集合が与えられたとき、これらを結ぶ動的に安定で、かつ自己干渉回避や不要な環境との干渉回避といった物理的・幾何的な制約を満たす軌道を求める手法を構築することができた。

この軌道計算を高速に行えれば、これまでに完全性が確立された動作計画問題の局所経路計算としてこれを組み込むことで、MCP の完全性を保証することができる。この軌道生成問題に、以下の2つのアプローチで取り組んだ。

- a) ダイナミクスを含む軌道の半無限最適化問題(SIP)として定式化する
- b) 接触・作業空間の局所的な制御器を、二次計画法を解くことで導出する

その結果、これら双方で顕著な進捗が得られ、a) の手法では、より長い時間にわたる、ダイナミックな多点接触動作を計画できた（雑誌論文 1)）。b) では、将来の接触状態の情報を用いない局所的な二次計画法を用いて制御器を構成し、ロボットが可能であることを示した（学会発表文献 6)）。

図 4 は、ヒューマノイドが椅子に座るダイナミックな軌道計画の結果を示す。最適化問題



図 3 ヒューマノイドによるダイナミックな多点接触動作の例

SIP に対しては、環境とロボットのモデルに加え、接触状態遷移列のみを入力として与えるだけで、これら間を結ぶダイナミックな軌道が生成されていることがわかる。

これまでみてきたように、本課題では、1台のヒューマノイドの多点接触動作計画手法のプロトタイプ(雑誌論文2))を出発点として展開してきた。接触系列の計画に関する研究成果は雑誌論文3)に、また動的な接触動作軌道生成に関する成果は1)に、まとめて主要なロボット工学関連の国際論文誌に採択され、本課題の新規性・独創性は国際的にも認知されている。

研究代表者らのグループでは、アメリカ DARPA により開始された、競技形式の災害対応ロボット開発プロジェクト DARPA Robotics Challenge で想定される災害時の一連の作業シナリオなどにも多点接触動作計画の一般的な枠組みを確立した本研究の成果が適用できるものと考え、検討を開始している。新たに採択された科学研究費補助金の課題で、今年度以降、これらの成果をさらに発展させ、このような災害現場などの実環境での利用や、ロバスト性の向上を目指して研究に取り組んでいく予定である。

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3件)

- 1) S. Lengagne, J. Vaillant, E. Yoshida, A. Kheddar, Generation of whole-body optimal dynamic multi-contact motions, International Journal of Robotics Research, 査読有、2013 (掲載決定)。DOI: 10.1177/0278364913478990
- 2) K. Bouyarmane, A. Kheddar, Humanoid robot locomotion and manipulation step planning, Advanced Robotics, 査読有、Vol.26, No. 10, 2012, pp. 1099-1126
DOI: 10.1080/01691864.2012.686345
- 3) A. Escande, A. Kheddar, S. Miossec, Planning contact points for humanoid robots, Robotics and Autonomous Systems, 査読有、Vol.16, No.5, 2012, pp. 428-442
DOI: 10.1016/j.robot.2013.01.008

[学会発表] (計9件)

- 1) K. Bouyarmane, J. Vaillant, F. Keith, A. Kheddar, Exploring humanoid robots locomotion capabilities in virtual disaster response scenarios, IEEE-RAS

International Conference on Humanoid Robots, pp. 337-342, 29 Nov. - 1 Dec. 2012, Osaka, Japan.

- 2) K. Bouyarmane, A. Kheddar, On the dynamics modeling of free-floating-base articulated mechanisms and applications to humanoid whole-body dynamics and control, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 36-42, 29 Nov. - 1 Dec. 2012, Osaka, Japan.
- 3) Y. Lee, S. Lengagne, A. Kheddar, Y-J. Kim, Accurate evaluation of a distance function for optimization-based motion planning, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 1513-1518, October 7-12, 2012, Vilamoura, Algarve, Portugal.
- 4) S. Lengagne, A. Kheddar, S. Druon, E. Yoshida, Emulating human leg impairments and disabilities in walking with humanoid robots, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), December 7-11, Phuket, Thailand.
- 5) K. Bouyarmane, A. Kheddar, Static posture planning for a humanoid robot on deformable contact support, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, October 26 - 28, 2011, Bled, Slovenia.
- 6) K. Bouyarmane, A. Kheddar, Using a multi-objective controller to synthesize simulated humanoid robot motion with changing contact configurations, IEEE/RSJ IROS, Sept. 25-30, 2011, San Francisco, USA.
- 7) K. Bouyarmane, A. Kheddar, Multi-contacts planning for multiple agents, IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 9 to 13, 2011, Shanghai, China.
- 8) K. Bouyarmane, A. Kheddar, Static multi-contact inverse problem for multiple humanoid robots and manipulated objects, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Dec. 6 - 8, 2010, Nashville, TN, USA (Oral), Best paper award finalist.
- 9) S. Lengagne, P. Mathieu, A. Kheddar, E. Yoshida, Generation of dynamic multi-contact motions; 2D case studies, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Dec. 6-8 2010, Nashville, TN, USA (Oral).

[その他]
ホームページ等
<https://jrlserver.muse.aist.go.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

ケダー アブデラマン

(KHEDDAR ABDERRAHMANE)

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・研究員

研究者番号：90572082

(2) 研究分担者

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・研究員

研究者番号：30358329

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・研究グループ長

研究者番号：50294533

(H24：連携研究者)

(3) 海外連携研究者

KARIM BOUYARMANE

(H22→23)

ESANDE ADRIEN