

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25280096

研究課題名(和文) Beyond multi-contact planning

研究課題名(英文) Beyond multi-contact planning

研究代表者

K h e d d a r A b d e r (Kheddar, Abderrahmane)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・国際客員研究員

研究者番号：90572082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多点接触動作計画の成果をさらに発展させる挑戦的な課題に取り組んだ。具体的には、1) 多点接触計画手法の新たな機能の構築を行った。2) 動力学を考慮した多点接触計画・制御手法を構築し、2次計画(QP)に基づく制御を用いた動作安定化制御手法を実現した。3) 競技会 DARPA Robotics Challenge などへの実際の参加を通じて、梯子の昇降、車両の乗降など複雑なシナリオにおける手法の有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In this project we achieved noticeable advances in multi-contact planning as follows:

1) We focused our developments on new functionalities to multi-contact planning, 2) We focused on extending our multi-contact planning and control with a flavor of dynamics and added stabilization with an enhanced quadratic programming (QP) controller, 3) We focused on complex demonstrators such as the ladder climbing and car ingress and participated in the DARPA robotics challenge.

研究分野：ロボティクス

キーワード：デジタルヒューマンモデル 多点接触計画 ダイナミクス 最適化

1. 研究開始当初の背景

与えられた環境下で、ロボットをある位置・姿勢から目標の位置・姿勢に遷移させる動作系列を計画する技術は「動作計画」と呼ばれ、1990年代から盛んに研究されており、産業用ロボットの組立動作の作成などに広く利用されてきた。通常は、ロボットアームなどが環境との接触を避けるように動作の計画を行うが、ヒューマノイドなどが制約のある環境で作業を行うには、人間のように手足やその他の部分と環境との接触を積極的に利用する必要がある。ロボットやデジタルアクター（これらをまとめてエージェントと呼ぶ）の手や全身による物体操作、脚による移動など複雑な接触を含む多点接触作業計画は、ラグランジュ力学に従うこと、摩擦による多層的な接触を含むという共通点を持つ。研究代表者 Kheddar らは、この共通な性質に注目し、汎用的な多点接触動作計画・制御手法を先駆けて提案し、この分野での研究を世界的にリードしてきている[1][2]。応用においても、米国で開催された災害対応ロボット競技会 DARPA Robotics Challenge (DRC) における複雑な作業などにおいて、多点接触動作計画の必要性が高まっている。

[1] A. Escande, A. Kheddar, Contact planning for acyclic motion with task constraints, In IROS 2009

[2] 7. K. Bouyarmane, A. Kheddar, Static multi-contact inverse problem for multiple humanoids and manip..., In Humanoids 2010

2. 研究の目的

本研究では、多点接触動作計画の成果をさらに発展させる挑戦的な課題に取り組むことを目指す。

具体的には、適用可能な環境の拡張など、多点接触動作計画自体の機能を向上させるとともに、より動的な全身多点接触動作のための制御手法について研究を進める。最後に、複雑な作業シナリオにおいて、実機を用いて提案した手法を検証する。

3. 研究の方法

上記の目的の達成のため、本研究では、下記の3つの課題について研究を実施する。

- 1) 多点接触計画手法の新たな機能の構築を行う。
- 2) 動力学を考慮した多点接触計画・制御手法を構築し、2次計画(QP)に基づく制御を用いた動作安定化制御手法を実現する。
- 3) DRC への実際の参加を通じて、梯子の昇降、車両の乗降など複雑なシナリオにおける手法の有効性を検証する。

4. 研究成果

以下では、前記の3課題について成果を報告する。当初の計画と異なる点があればそれについても説明を加える。

- 1) 多点接触計画手法の新たな機能の構築
この課題については、これまでの多点接触動作計画の機能を拡張し、信頼性を向上させる以下の短期的な取り組みを行った。
 - 多点接触を伴う姿勢生成器 (Posture Generator, PG) の接触モデルの高度化
 - 変形する対象物に対する多点接触動作探索
 - 滑りをともなう接触への対応
 - 汎用画像処理演算装置 (GPGPU) を用いた多点接触動作計画の計算の並列化
 - 点群データ (point cloud) からの接触支持点の自動抽出

接触モデルの高度化

これまでに構築した多点接触動作計画では、接触を含まない概略の案内経路をまず計画し、最適化に基づく制約下での逆運動学としてエージェントの姿勢を計算する PG を用いていた。解がある場合には、この PG は静的安定性、関節回転角範囲、摩擦円錐等の制約を考慮して実現可能な姿勢を解として返す。接触モデルを改良して可能な接触状態をできるだけ多く探索空間に取り入れることは、計画により解を得る確率を向上させるために重要である。

ここでは、ロボット (ヒューマノイド) の姿勢生成において、任意の交差形状を得るため、幾何的な接触形成として定式化する簡便な手法を導入した。ロボットの身体と環境に「接触パッチ」と呼ぶ凸形状の領域を定義することで、これらの接触パッチのどの2つの組み合わせの交差形状に対する接触状態を導出することができる。この形状接触モデルにより、接触させたい2つのパッチがあるときに、交差形状を含む楕円に関する変数を用いて簡単に定式化でき、を用いることで、最適化問題の制約として取り込むことが可能である (図 1)。

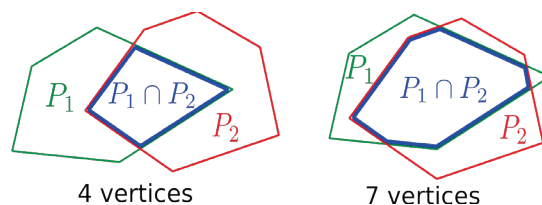


図 1 変化する接触形状の例：接触点の数は形状の姿勢によって変化し、最適化問題としての定式化が困難となる。

これにより、接触パッチが必ずしも他に完全に含まれていなくても良い姿勢を生成することができる。これにより、PG は事前に接触点の数を定義しなくても、異なる形状の間

の接触を生成できるようになり、これらの接触点は後で接触力の計算に利用できる。この手法の有効性は、これまでの手法では不可能であったヒューノイドロボット HRP-2 や ATLAS の多点接触姿勢を生成したことで示された (図 2)。

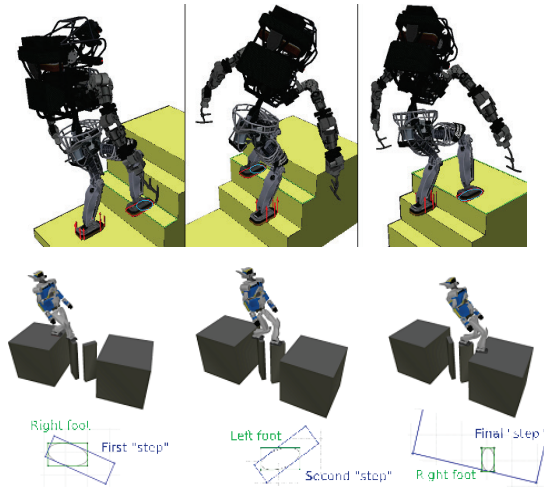


図 2: 階段を上る Atlas と、小さな支持領域を通過する HRP-2 の姿勢生成。ロボットの踵や足先が環境には接触しないなど、足の形状の中に完全に含まれない接触領域を用いた全身姿勢が PG により自動的に計算された。

変形する対象物に対する接触支持の探索

このような環境での人間の動作戦略を理解するため、異なる硬さのマットレス上を歩行する人間の動作を、床反力をスーツ型のモーションキャプチャ XSENS と靴型の力センサにより測定し、データを収集した。この研究については、課題 3) で述べる。

滑りをとまなう接触への対応

この課題に関しては、予想よりも困難なことが判明した。当初は、a) 接触計画問題はそのまま適用し、接触している身体部分の接触点変更を滑りにより実現する b) 新しい状態

を計画器に追加する、の 2 通りが考えられる。課題提案時には a) により可能と考えていたが、実験を行った結果、この方法には制限が大きく、従来手法を適用するだけではこの問題の解決がほぼ不可能なことが見いだされた。この課題は、新たに提案した科研費の課題において取り組んでいく予定である。

GPGPU による多点接触動作計画の並列化

研究代表者らはこれまでに、全身による動的な多点接触動作計画の半無限計画問題による定式化手法を提案してきた。本研究では、これを GPGPU に適用可能な問題として定式化した点で、大きな進展があった。ここでは、制約とその勾配を並列に GPU で計算し、その結果を、CPU 上で動作する非線形最適化ソルバに提供する技法を採用した。制約の連続的に充足されることを保証するため、時間区間における制約の多項式近似を用いた。各時間区間において、制約とその勾配は独立に評価することができるため、多数コアを持つ計算機アーキテクチャの利点を有効活用することができる。また、従来から多用されるロボット工学における計算 (幾何、運動学、動力学) も並列処理が有効であり、本研究の目的においてその実装を慎重に検討した。

図 3 は、最適化計算の概要を示す。図にあるように、制約を評価する計算はすべて GPU 上で処理される。ヒューノイドロボットに対するいくつかの例に適用したところ、並列 CPU 計算に比較して相当の効率化が認められた。

点群データからの接触支持点の自動抽出

実際にロボットに装備されたセンサから直接得られたデータに適用可能な形で実装することが重要である。まず、環境とそこにある物体のモデルが知られていれば、ロボットは継続的に物体を含む環境のレジストレーションを継続的に行うことができる。この場合には、接触動作の計画に 3 次元モデルを使用することができる。反対に、環境やそこにある物体のモデルが知られていない場合、

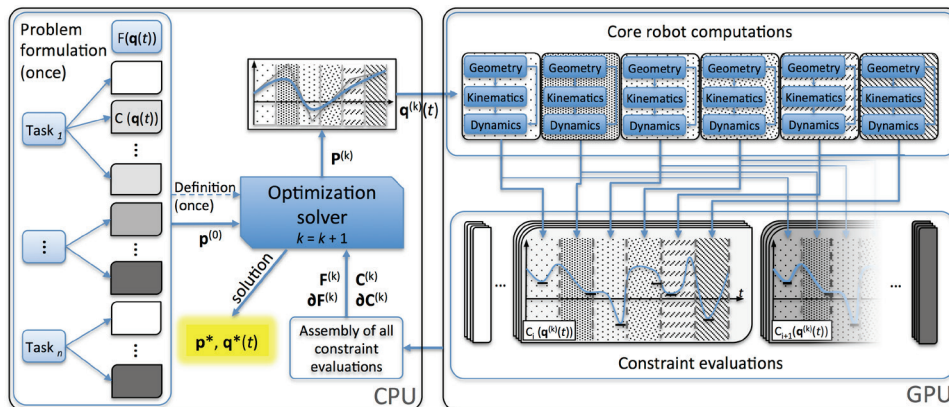


図 3 : 計算は、CPU(問題の構築、最適化ソルバ、行列の再構成)と GPU (動力学計算、制約の評価と勾配の計算) に分割される。異なる網掛け模様は、異なる時間区間、異なる色は異なる制約の種類を示している。

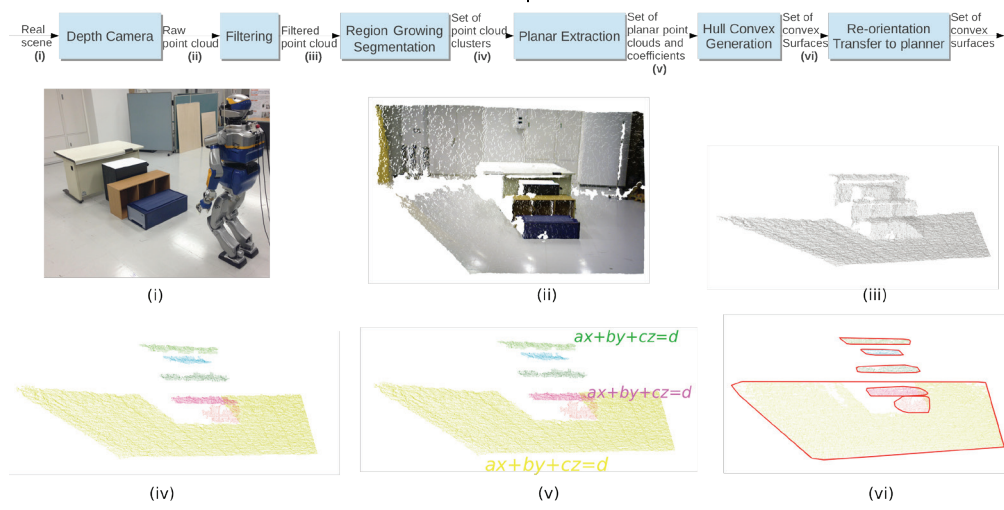


図 4: 上段は提案するアルゴリズムの主要な構成要素と処理するデータの種類を示す。下段は実環境でのロボット動作計画に使用したデータを示す。

ロボットは徐々にモデルを獲得し、多点接触動作計画を行うための知識を構築していかなければならない。本研究では、これまで研究されていなかった後者の問題に取り組んだ。環境や存在する物体の3次元モデルを事前に持たないと仮定し、これまでに構築した多点接触動作計画手法を、深さ情報を付加したカラー画像を出力する RGBD カメラにより供給される3次元点群に適用した。これにより、自己を中心としたオンラインでの多点接触動作計画を実現した。ヒューマノイド HRP-2 を用いて、様々な環境においてこの手法の有効性を検証した (図 4)。

2) 動力学を考慮した多点接触計画・制御手法を構築と QP に基づく動作安定化制御手法

この課題に対しては、計画、制御のそれぞれを主眼とした2つの基礎研究を並行して進め、主にソフトウェアとして下記の成果を得た。

- 接触空間を探索する機械学習
- 動的な多点接触計画：飛翔動作プリミティブ
- 多点接触動作安定制御
- 多数のエージェントの包括的制御手法

接触空間を探索する機械学習

機能拡張した PG を用いて多点接触計画により得られた動作は、いろいろな意味で「最適」には見えない動きが含まれていた。そこでまず、接触空間の探索のために機械学習を用いることを考えた。しかしながら、これは、それ自身で新たな一つの研究課題となるような非常に難しい問題であることが判明した。そこで、機械学習ではなく、計画器によって得られた接触遷移列を、別の最適化問題を解くことによる「フィルタリング」する手法を用いた。本研究で構築した多点接触動作計画器が、目的値に到達するために N 個の接触遷移を含む計画を出力したとしたとき、それぞれの接触遷移に、独自の変数を持つ N 体

のロボットを関連付ける手法を提案した。これらの N 体のロボットには、それぞれに接触力のすべての自由度の合計数と同じ変数を割り当てる。これを各ロボットに類似の制約が与えられた複数の PG を包含する一つの大域最適化問題ととらえて解く。この手法の最初の利点は、全ての接触遷移、つまり動作全体にわたって、コスト関数 (例えばトルクの合計など) を最適化する関数を得ることができることである。もう一つの利点は、冗長性を管理できることで、Dijkstra のグラフ探索を用いることにより制約の数を最小とする接触状態の表現を求めることができる。これにより、不必要な接触遷移を取り除き、接触遷移列全体を再配置することができた。

図 5 は、N=8 のときに得られた接触動作計画の解を示す。最後の接触遷移(h)にて反対側を向いて立つような評価関数を与えた。ソルバとしては IpOpt を RoboOptim の枠組みで適用した。動作接触列の最適化計算は、1秒 (136 回の繰り返し計算) で完了した。

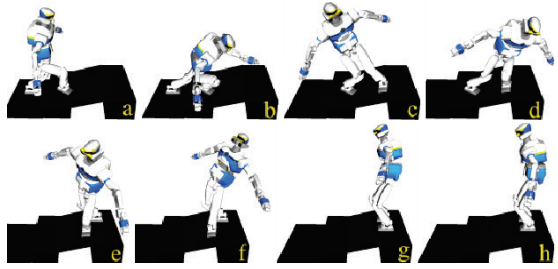


図 5 : 複数の PG のフィルタリングにより、PG により生成された姿勢が徐々に平滑化された。個別の PG であれば、反転動作は f → g の間だけに生じることとなる。

飛翔動作プリミティブによる動的接触計画と多点接触動作安定制御

ロボットの多点接触動作では飛翔動作は観測されないため、このような動作プリミティブ

ブは計画に利用できない。しかしながら、多
 多点接触動作制御に動力学的側面を導入す
 ることには重要な意味がある。実際の研究で
 は、多点接触の予見制御と安定制御を同時
 に取り扱った。特に、多点接触の予見制御は、
 長阪の多点接触動作安定制御に基づいて構
 築した。オフラインの多点接触動作計画から
 得られた接触遷移列に基づき、まず重心の動
 的な軌道を生成するためにモデル予見制御
 を用い、次にモデルベースの全身閉ループ制
 御による軌道追従を適用した。この手法では、
 所望の力に対して座標系の変更を許容し、遷
 移のタイミングを幾何的な条件のみからヒ
 ユースティックに計算した。また、図 6 に
 示すように、簡略化したモデルに対する予見
 制御と全身制御の同期についても研究を行
 った。この手法により、物体の運搬など、予
 測可能な外力も考慮しながら、さまざまな 3
 次元動作を生成することができた。出力した
 動作については主にシミュレーションで検
 証した。

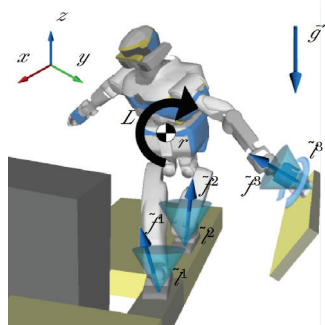


図 6 多点接触制御へのモデル予見制御と安
 定化制御の適用

多数のエージェントの包括的制御手法

また、アニメーションキャラクタ向けの 2
 次計画 (QP) に基づく作業空間での制御手
 法を、相互に作用したり、環境にある関節構
 造を持つ物体とインタラクションしたりす
 る複数のエージェントに拡張した。インタラ
 クションとしては、接触により生じる物理的
 なもの、また、協調作業に代表される高度な
 行動的なものが考えられる。ここでは、全て
 のエージェント、物体、また関節構造を持つ
 物体、環境の全ての運動方程式を単一の QP
 に統合することで、物理的・行動的なインタ
 ラクションの組み合わせにより、個々のエ
 ージェントの制御の失敗も生じうる最も汎用
 的な問題を定式化し、解くことを目指した。
 これにより、さまざまな動作や行動を、単一
 の式の表現により制御することができる。こ
 の手法により生成された動作のいくつかを
 図 7 に示す。

3) 複雑なシナリオにおける手法の有効性検証

ここでは、基礎的な問題である接触動作に
 における特徴量の決定と、いくつかの実例にお
 ける提案手法の検証に取り組む。

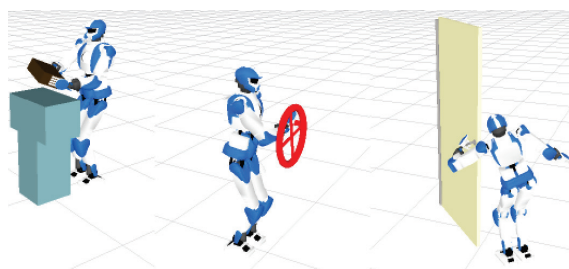


図 7 全ての物体 (箱、バルブ、ドア) も他
 のロボットと同様に個々の QP 制御を行う問
 い仮定し、単一の QP 問題としての包括的な
 モデル化によりヒューマノイドの自然な動
 作が導出された。

具体的には、

- 人間の動作における接触支持戦略の観測
- 多点接触の逆問題のアルゴリズム
- 実環境における提案手法の検証 (車両の乗
 降、梯子の昇降、不整地歩行など)

人間の動作における接触支持戦略の観測

主に、変形する物体上での人間の接触遷移
 と行動における観測を行った。特に関心があ
 るのは、歩行時に予期しない剛性の変動が起
 きたときに生じる行動である。先行研究では、
 重心の軌道、歩行のパターン、バランス維持
 のための筋活動等に注意が払われてきた。し
 かしながら、床反力については注目されてこ
 なかった。ここでは、柔軟な床面に対してど
 のように床反力を適応させるかについての
 研究を行った。従来の床に固定した床反力計
 ではなく、図 8 に示すように、6 軸の力・ト
 ルクセンサが備え付けられた靴を用いて計
 測を行った。

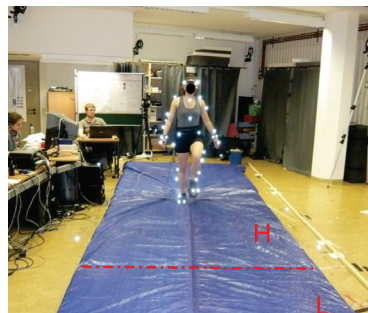


図 8 柔軟物体上を歩行する人間の測定

解析により、柔軟な床を歩行する際には、
 地面の柔軟性を利用するために、支持足の床
 反力を調整していることが見いだされた。こ
 れは、衝撃を和らげるとともに、別の面に足
 を着くまでに蓄積される機械的エネルギー
 を散逸させていると推測される。興味深いこ
 とに、この運動戦略は、剛性変化がある床面
 を最初に歩行するときすでに表れた。この
 結果は、ヒューマノイドの歩行時の安定性向
 上のために有用であると考えている。

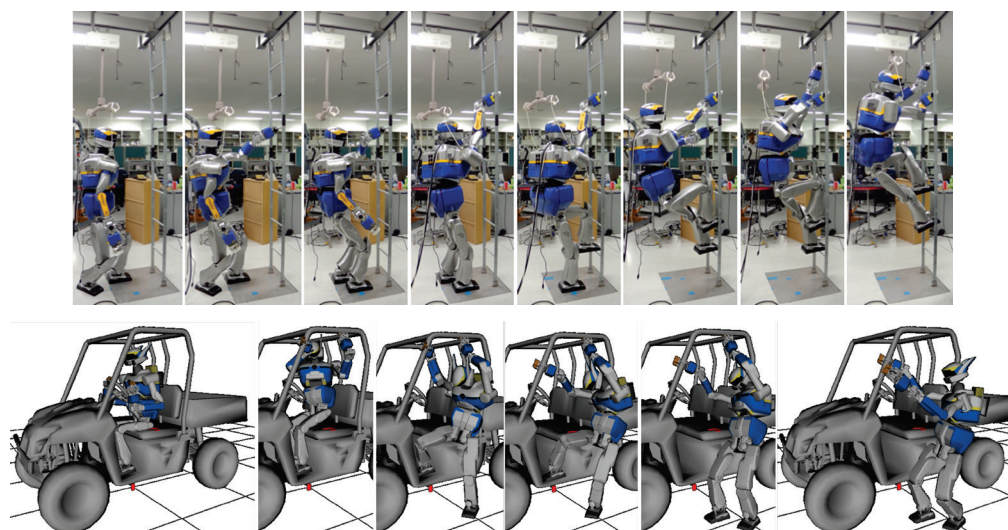


図 9 梯子の昇降と DRC 車両からの降車 (手の把持力不足のため実験は未実施)。

多点接触の逆問題のアルゴリズム

この問題の取り組みを始めたのは最近で、特に把持について現在も研究を継続中である。力センサを導入し、人間が物体を把持する際の力について多くのデータを収集し、大がかりな測定装置なしに力を予測する手法について研究を行っている。与えられた物体の把持接触形態を導出する逆問題は、今後全身についても適用可能であると期待される。

実環境における提案手法の検証

図 9 に、梯子昇降と車両乗降という挑戦的なシナリオでの検証結果を示す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① J. Vaillant, K. Bouyarmane, A. Kheddar, Multi-character physical and behavioral interactions controller, IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics (TVCG), (採択済み), 2016, doi: 10.1109/TVCG.2016.2542067).
- ② B. Chrétien, A. Escande, A. Kheddar, GPU robot motion planning using semi-infinite nonlinear programming, IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems (TPDS), (採択済み), 2016, doi: 10.1109/TPDS.2016.2521373
- ③ J. Vaillant, A. Kheddar, K. Kaneko, E. Yoshida, F. Kanehiro, 他 7 名、Multi-contact vertical ladder climbing by an HRP-2 humanoid, Autonomous Robots, Vol. 40, No 3, pp. 561-580, 2016, doi:10.1007/s10514-016-9546
- ④ K. Mombaur, A. Kheddar, 他 3 名, Model-based optimization for robotics, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 21, No. 3, pp. 24-25 and 161, 2014, doi: 10.1109/MRA.2014.2334973.

[学会発表] (計 3 件)

- ① A. Pajon, E. Mechiori, C. Monaghan, M. Giese, A. Kheddar, Adaptation of walking ground reaction forces to abrupt changes in ground stiffness properties, IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics, 2016.
- ② S. Brossette, A. Escande, G. Duchemin, B. Chrétien, A. Kheddar, Humanoid posture generation on non-Euclidian manifolds, IEEE/RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, 2015.
- ③ H. Audren, A. Kheddar, K. Kaneko, E. Yoshida, 他 2 名、Model preview control in multi-contact motion— Application to a humanoid robot, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2014.

6. 研究組織(1)研究代表者

ケダー・アブデラマン (KHEDDAR, Abderrahmane)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・国際客員研究員
研究者番号： 90572082

(2)研究分担者

金子 健二 (KANEKO, Kenji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・上級主任研究員

研究者番号： 10356800

(3)研究分担者

吉田 英一 (YOSHIDA, Eiichi)

研究者番号： 30358329

国立研究開発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

(4)研究分担者

金広 文男 (KANEHIRO, Fumio)

国立研究開発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： 73056806