

平成 30 年 5 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26700021

研究課題名(和文) 運動データベースからロボットの実世界運動制御への展開

研究課題名(英文) Motion Control of Humanoid Robots from Human Motion Database

研究代表者

高野 渉 (TAKANO, WATARU)

大阪大学・数理・データ科学教育研究センター・特任教授(常勤)

研究者番号：30512090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円

研究成果の概要(和文)：人間の全身運動データを統計モデルとして学習することによって、人間の動作と類似したヒューマノイドロボットの運動を作ることができる。学習と異なる環境においても、学習した動作の特徴を保持しながら、環境に馴染んだ運動を生成する計算論が求められる。統計モデルからの生成確率、環境との整合性を数値化し、それら2つを組み合わせた目的関数を最大とする運動データを探索する方法を考案した。ヒューマノイドロボットが多様かつ複雑性に富んだ日常生活に浸透するために必要な運動生成・制御の基盤となる。

研究成果の概要(英文)：Human whole body motions are encoded into a stochastic model, which allows for a humanoid robot to generate a human-like motion. It requires to generate the robot motion satisfying two conditions. One condition is maintaining a profile of training motions. It implies that the humanoid robot should behave as humans. Another is adapting to the external environment. The environment is varied, and the current environment should be different from that during training. The robot must perform adaptive motion to a new situation. These two conditions are measured as the likelihood of the motion generated by the stochastic model, and distance from the desired motion dependent on the environment. The combination of these two measurements designs the objective function. This project has developed an algorithm of searching for an optimal motion that maximizes the object function. This research provides the fundamental technologies that are necessary to integrate humanoid robots into our daily life.

研究分野：ロボティクス

キーワード：知能ロボット 運動計画 運動生成 統計モデル

1. 研究開始当初の背景

人間の運動計測技術とロボティクスの運動学・動力学計算アルゴリズムの高まりを背景として、人間の全身運動の記録と学習を通じて、ヒューマノイドロボットの運動知能を設計しようとする見まね学習の研究が盛んに行われてきている。記憶した動きを知識として、人間の行動を認識する研究は学習する運動データが増えるにつれて、認識できる状況範囲が広がっており、着実に実用性が向上している。一方、記憶した動きを再利用して生成されるロボットの運動は、学習した動きに類似しているものの、実環境に対して適切に働きかける動作には至っていない。工場などで使用される産業用ロボットは、周辺環境が固定された状況で単一の動きを生成すれば、タスクを遂行することができる。しかし、ヒューマノイドロボットには、日常生活で人間とともに活動することが求められており、実世界の複雑に富んだ状況に対応しながら、動きを作り出す運動生成法が必要となる。

2. 研究の目的

人間の運動データを記憶・学習した運動の数理モデルから動きを再生する方法論は考案されてきている。しかし、再生された運動は学習した動きに類似しているが、画一的であり、多様性に欠ける。人間の運動を観察してみると、同じ運動パターンでも、生成されるごとに、微妙に動きが異なる。この多様性は、様々な微妙に差異がある運動を記憶して再生してことによるのではなく、運動として身体が適応すべき実世界の複雑さに起因するものである。すなわち、記憶した運動を参照しながらも実世界の外部環境に馴染んだ運動を生成する計算法がロボットには求められる。そこで、本研究では人間の全身運動を統計モデルとして学習し、その統計モデルを利用しながらも外部環境から受ける拘束を満たすことによって、人間らしく状況に適応するロボットの運動生成を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

被験者に取り付けたマーカの位置をカメラにて計測する光学式モーションキャプチャシステムにて、人間の全身運動を計測する。その運動データを隠れマルコフモデル (Hidden Markov Model : HMM) にて学習する。HMM は統計的生成モデルであり、運動データが HMM から生成される確率を求めることによって、観測した運動を識別することやロボット自身の運動を生成することが可能となる。

(1) 環境からの幾何拘束を考慮した運動生成計算

「物体に手を伸ばす」動作を学習した HMM から、モデルに埋め込まれた運動データの分

布に基づいて運動を生成する方法が開発されている。この方法から生成される運動は学習した動きに類似しているため、目標となる物体が学習時と同じ場所に置かれている場合は、手が物体に到達する。目標物体が常に同じ場所に置かれていることは非現実的であり、物体の位置が変わると生成される運動では手が物体に到達しないことになる。学習した動きの特徴を利用しながら、手が目標物体に到達する運動を生成することが求められる。

ある全身運動データが HMM から生成される確率が高いということは、その運動が学習した動きに類似していることを意味する。すなわち、この確率が高いほど人間らしい動きを生成していることになる。また、手が目標物体に到達しなければならないといった環境から受ける目標姿勢なるものがある。この目標姿勢との距離が小さいほど、環境に適応していることになる。これら 2 つの指標を組み合わせた目的関数：(統計モデルの確率) - (目標姿勢との距離) が最大となる運動データを探索する問題を解くことによって、環境に適した人間らしい運動を生成することができる。これから求められる全身運動は、滑らかにはならず、急峻な姿勢変化が発生する。人間の運動はジャーク最小化規範に従っているという仮説に基づき、生成される運動の全時間にわたってのジャーク (負号を付けたもの) の和を目的関数に追加した。

(2) 環境を含めた運動の統計モデリング

全身運動だけでなく、物体との幾何学的関係を記述した全身運動データを統計モデルとして学習することによって、物体と身体との関係を抽出し、それを運動生成に利用する方法を開発する。全身の各関節と物体と結ぶ線分の集合であるインタラクションメッシュを図 1 に示す。各関節位置および関節と物体との距離を要素とするベクトルの時系列として運動を記述し、この運動データを HMM にて学習する。

学習した HMM からサンプリング手法に基づき各関節位置と物体との距離の時系列を生成する。この運動データは学習データに類似したものとなり、参照データとして利用する。しかし、参照データの関節位置から計算された全身の姿勢と現在の物体との位置関係は、参照データにある物体との距離を満たすものではない。そこで、参照データの関節位置との誤差、および現在の物体との距離と参照データにおける物体との距離の誤差を計算し、これら誤差の重み付け和を目的関数とする。目的関数が最小となる関節位置を計算することによって、学習した動きに類似しながらも現在の環境に適応した全身運動へ参照データを修正する。この目的関数は、関節位置の 2 次形式として表現できるため、容易に最適値を計算することができる。

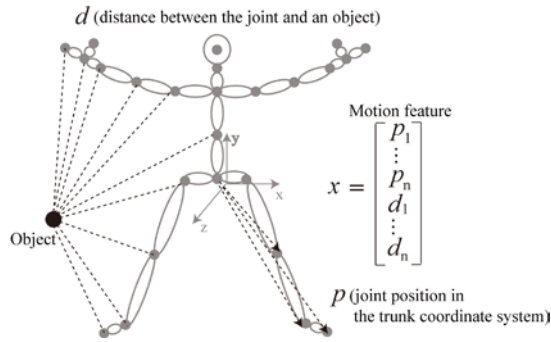


図 1. 全身と環境との関係を記述するインタラクションメッシュ

(3) 力学を考慮した運動生成から制御

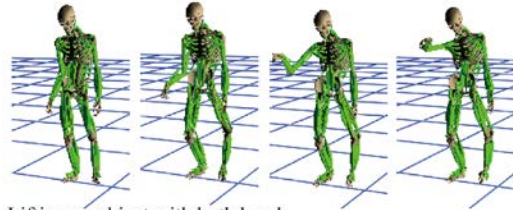
環境と接触を伴いながら運動するヒューマノイドロボットにおいて、統計モデルと幾何学的拘束条件を考慮して求められた関節位置や関節角をそのまま制御入力として利用することはできない。関節で発生するトルクと身体と外部環境の接点に発生する外力から各関節の加速度が決まり、これがロボットの運動を作り出す。この力と加速度の関係はロボットの運動方程式として表すことができる。

先述の方法で計算された全身運動から各時刻の加速度を計算する。この加速度を実現する関節トルクと外力の組合せは無限に存在する。そこで、関節トルクおよび目標接触力と外力の差を足し合わせたものを目的関数とし、運動方程式を拘束条件とした最適化問題を考える。この最適化問題は、2次形式として表すことができる。最適な関節トルクを計算し、これをロボットの入力として利用することによって、学習した動きの特徴を保持しながらも、環境に対して適切な力を働きかける運動が実現できる。

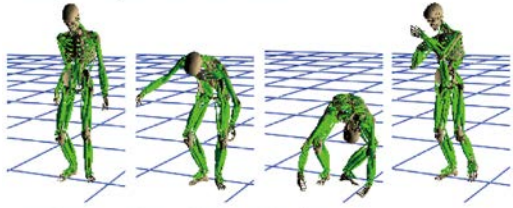
4. 研究成果

(1) 提案する運動生成の有効性を検証するために、図2に示すような「右手で物体を撫でる」、「物体を両手で持ち上げる」、「右足で物体に触れる」の動作を光学式モーションキャプチャ

Patting an object with the right hand



Lifting an object with both hands



Touching an object with the right foot

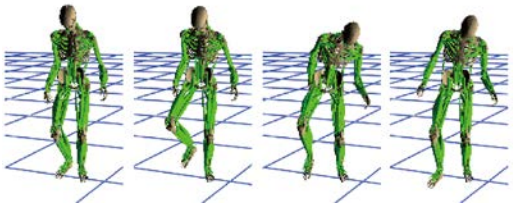


図 2. 光学式モーションキャプチャにて計測した全身運動データ

ャプチャにて計測した。各全身運動データをHMMにて学習する。このHMMを用いて、環境に応じて運動を修正しながら学習した動作に類似した全身運動を生成した。「右手で物体を撫でる」動作に対して、高い位置に置かれた物体および低い位置に置かれた物体を撫でるように運動を生成した。「物体を両手で持ち上げる」動作に対して、高く持ち上げる条件と胸の高さで持ち上げる条件を加えて運動を生成した。「右足で物体に触れる」動作に対しては、物体を足元に置いた条件と前方に置いた条件を加えて運動を生成した。図3に示すように、物体の位置を環境から受ける幾何拘束として、それを満たしながら学習した動きに近い全身運動が生成できることを確認した。

patting a high object



lifting an object up high



touching a nearby object with the foot



patting a low object



lifting an object to chest



touching a distant object with foot



図 3. 全身運動の生成結果

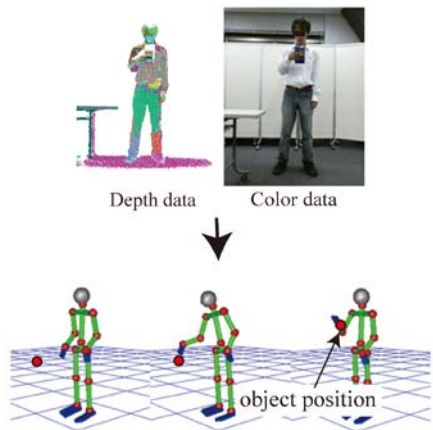


図 4. RGBD カメラを用いた運動計測

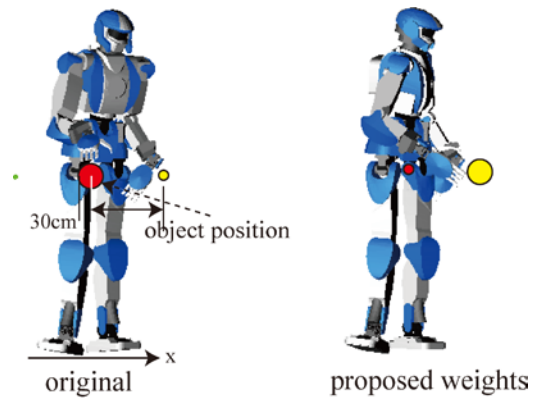


図 5. 物体との位置関係の学習を通じた運動生成

[Training motion]



Target object

[Synthesized motion]



図 6. 実機ヒューマノイドロボットを用いた運動生成の実験

(2) RGBD カメラを用いて全身運動と身体が働きかける環境中の物体の位置を計測する。図 4 のように「物体に手を伸ばして持ち上げる」動作中の全身運動と物体の位置を計測し、HMM の学習データとして用いた。学習した HMM を用いて運動生成のシミュレーション実験を行った。実験条件として、物体の位置を学習時から 30cm 左に置くことにした。図 5 に示すように、腰を振りながら右手を物体に伸ばすような運動が生成できることを確認した。

遠隔操縦にて、等身大ヒューマノイドロボットの「ボタンを押す」動作を作成し、その運動データを HMM にて学習した。学習時からボタンを 15cm 右に置いた状態で、自律的に動作を生成する実験を行った。図 6 は、学習および生成時のロボットの運動を示している。提案する手法にて、左手がボタンに到達する動作が作り出せていることを実機実験によっても確認した。

(3) 「座りながら右手を前に突き出す」運動データを HMM にて学習した。ヒューマノイドロボット前方に壁を置き、その壁から 10KN の垂直抗力を受けながら右手を突き出すように運動を制御する実験を行った。図 7 に、壁から垂直抗力を考慮せず、HMM から生成された運動を忠実に実現するような位置制御

を行った場合のロボットの運動と、壁からの垂直抗力を考慮しながら HMM から生成された運動を遂行するように全身の関節トルクを制御した場合の運動を表している。全身の位置制御の場合は、右手首が伸びた状態で壁に突き刺さる動きとなり、提案手法の場合は右肘、手首が曲がった状態で壁に触れるような運動となった。壁から受ける外力の時間変動を図 8 に示す。全身の位置制御法では、壁からの垂直抗力は大きく変動していることが見て取れるのに対して、提案手法では、壁からの垂直抗力が約 10KN を維持していることが確認できる。

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 17 件)

[1] Wataru Takano, Yoshihiko Yamada, Yoshihiko Nakamura, “Generation of Action Description from Classification of Motion and Object,” Robotics and Autonomous Systems, Vol.91, pp.247-257, 2017

DOI:10.1016/j.robot.2017.02.003

[2] Wataru Takano, Yoshihiko Nakamura, “Planning of Goal-oriented Motion from

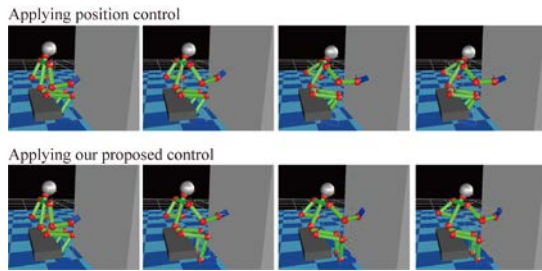


図7. 位置制御法と外力を考慮したトルク制御法を用いた場合のロボットの運動の比較

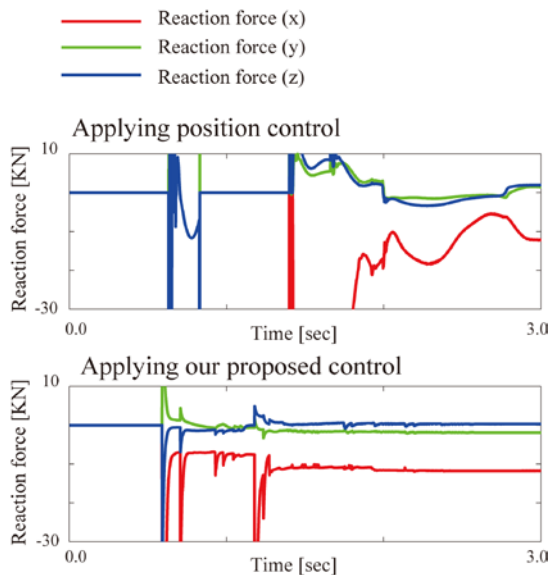


図8. 壁から受ける反力の時間変化

Stochastic Motion Primitives and Optimal Controlling of Joint Torques in Whole-body, "Robotics and Autonomous Systems, Vol.91, pp.226-233, 2017
DOI:10.1016/j.robot.2017.01.013

[3] Wataru Takano, Yoshihiko Nakamura, "Real-time Unsupervised Segmentation of human whole-body motion and its application to humanoid robot acquisition of motion symbols," Robotics and Autonomous Systems, Vol.75, PartB, pp.262-272, 2016
DOI:10.1016/j.robot.2015.09.021

[4] Wataru Takano, Yoshihiko Nakamura, "Statistical mutual conversion between whole body motion primitives and linguistic sentences for human motions," International Journal of Robotics Research, Vol.34, No.10, pp.1314-1328, 2015
DOI:10.1177/0278364915587923

[5] Wataru Takano, Tatsuhiro Jodan, Yoshihiko Nakamura, "Recursive Process of Motion Recognition and Generation for Action-based Interaction," Advanced Robotics, Vol.29, No.4, pp.287-299, 2015
DOI:10.1080/01691864.2014.977946

[学会発表] (計 26 件)

[1] Wataru Takano, "Physical Consistent Motions, Symbolic Representation, and Language," The 2nd Workshop on Machine Learning Methods for High-Level Cognitive Capabilities in Robotics, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vancouver, Canada, Sep 24-28, 2017

[2] Yusuke Goutsu, Wataru Takano, Yoshihiko Nakamura, "Motion Recognition Employing Multiple Kernel Learning of Fisher Vectors using Local Skeleton Features", The 2015 IEEE International Conference on Computer Vision, ChaLearn Looking at People : Workshop and Competitions, pp.79-86, Santiago, Chile, Dec 11-18, 2015

[3] Ikuo Kusajima, Wataru Takano, Yoshihiko Nakamura, "Extending Association from Human Motion Symbols by Using Semantics of Digital Book Library", The 14th IFToMM World Congress, OS13-128, Taipei, Taiwan, Oct 25-30, 2015

[4] Wataru Takano, Yoshihiko Nakamura, "Motion Synthesis from Stochastically encoded motion primitives for Anthropomorphic Robotic Arm," 2014 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, FA1-1, Kuala Lumpur, Malaysia, November 12-15, 2014

[5] Wataru Takano, Yoshihiko Nakamura, "Synthesis of Whole Body Motion with Pose-Constraints from Stochastic Model," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1871-1876, Hong Kong, China, May 31-June 7, 2014

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高野 渉 (TAKANO WATARU)

大阪大学・数理・データ科学教育研究センター・特任教授

研究者番号：30512090

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし