

パーティクルフィルタを用いた人型ロボットの立脚姿勢時の安定性を考慮した実時間模倣

Real-time Imitation of Humanoid Robot based on Particle Filter with Standing Stabilization Control

近藤耀 山本将平 高橋泰岳

Yo KONDO, Shohei YAMAMOTO, and Yasutake TAKAHASHI

福井大学

University of Fukui

{ykondo,shyamamoto,yasutake}@ir.his.u-fukui.ac.jp

Abstract

This paper proposes a posture imitation method based on particle-filter-based joint angle estimation with stabilization control for a humanoid robot. An inexpensive camera with depth sensor enables us to observe joint positions of a human demonstrator with reasonable accuracy in a fast and comfortable way. In order to mimic the motion observed with the depth sensor based motion capture system by a humanoid robot, inverse kinematics should be solved to acquire the joint angle of the robot. However, It is tough to solve the inverse kinematics, in fact, to calculate the joint angles of the robot from the position of the joints of the human demonstrator, because of redundancy and difference of body link structure between a human demonstrator and a humanoid robot. The proposed method provides a realistic solution of the estimated sequence of the joint angle for the humanoid robot imitation in real-time.

法 [1, 2] があるが, 人の人間動作の妨げになるなど日常生活においてそのような装置を用いるのは困難である. そこで本研究では深度センサを利用した簡易モーションキャプチャシステムを用い, より自然な人間動作中の各関節位置を取得する. 各関節位置情報から関節角を推定することが出来ればロボットの模倣学習に活用出来る. 先行研究として臼井らは, 関節と関節を結ぶ剛体をリンクと呼び, そのリンク姿勢誤差と関節角の変化が最小となる関節角を求める手法を提案した [3]. また, 高橋と榊原はリンク姿勢から関節角の推定に柔軟な計算が行え, リアルタイムに推定を行うことができるパーティクルフィルタを用いる手法を提案した [4]. しかし, 前者は関節角の算出時に人間の特異姿勢を考慮する必要があり, 探索を全探索で行うためリアルタイムで推定を行えないなどの問題があった. 後者は, ヒトが呈示する姿勢を模倣するためのロボットの関節角をリアルタイムに推定できることを示したが, ロボットの安定性は考慮していない. 特に, 後者の手法では足首関節の推定が行われていないため, 立脚姿勢時の安定性が補償されていない. そこで, 本報告ではパーティクルフィルタを用いて関節角をリアルタイムに推定し, 立脚姿勢時の安定性を確保するための脚の各関節の関節角度制御を行う.

1 はじめに

近年, 人間との共生環境下において活動する自律ロボットの研究・開発が進められている. 人間とロボットが共生するためには, ロボットに人間の動作をあらかじめ設計しておくことが考えられるが, 人間の日常環境においてロボットに必要とされる全ての動作を事前に設計することは困難である. そこで, ロボットに人間の動作を呈示し, その動作をロボットに学習をさせる模倣学習の研究が行われている.

教示動作を取得するために従来手法では複数のカメラやマーカ, 装着型のモーションキャプチャを使用する方

2 パーティクルフィルタによる関節角の推定

Microsoft 社の KINECT センサ (以下, KINECT) を用いてモーションキャプチャを行い, マーカやセンサ類を装着せずに人間の骨格を検出し, 15 点の関節位置座標時系列データを記録する (図 1). 記録した教示動作データから関節角を推定するにあたり, ロボット座標系 Σ_r を設定し, 観測されたカメラ座標系 Σ_c における教示動作の各関節座標をロボット座標系へ変換する (図 2). リンク姿勢とは関節と関節を結ぶ剛体をリンクとし, リンクの単位方向ベクトルをリンク姿勢と呼ぶ. 本実験で使用する NAO は, Aldebaran 社が開発した身長 58cm の人型ロボットで,

図3は、NAOの関節を示したものである。Kinectから得られた人間の関節位置からリンク姿勢を考慮しパーティクルフィルタを用いてロボットの関節の角度を推定する。関節 l と m を結ぶリンク j のリンク姿勢を式(1)で定義する。

$$\varphi^j = \frac{p_l - p_m}{\|p_l - p_m\|} \quad (1)$$

p_l と p_m はそれぞれ関節 l と m のロボット座標系での位置座標で、 $\|\cdot\|$ はユークリッドノルムとする。本実験に利用するパーティクルフィルタのアルゴリズムをAlgorithm 1に示す。まず、ロボットの関節角のセットをパーティクルとし、複数用意して初期化する。3行目で各パーティクルにおける各関節角の更新を行うが、ここではガウス分布にもとづいてランダムに移動すると仮定している。Algorithm 1の4行目でヒトのリンク姿勢とロボットの関節角にもとづく尤度関数を用いる。尤度関数はロボットが制御する関節角から得られるロボットのリンク姿勢と観察したヒトのリンク姿勢の類似度とし、具体的には次式で定義する。

$$h(h\varphi_t^1, \dots, h\varphi_t^N | \theta_t) = \exp\left(-\frac{(1-s)^2}{\sigma}\right) \quad (2)$$

$$s = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N h\varphi_t^j \cdot r\varphi^j(\theta_t) \quad (3)$$

$h\varphi_t^j$ はKINECTで取得したリンク j の時刻 t における姿勢、 $r\varphi^j$ はロボットのリンク姿勢を表す。 s は人間のリンク姿勢とロボットのリンク姿勢の内積であり、尤度はその内積が1に近いほど高い値を示す。 σ は類似度関数の広がり決定する係数である。6行から9行目で尤度の高いパーティクルが優先的に保存され、尤度が低いパーティクルを排除する。

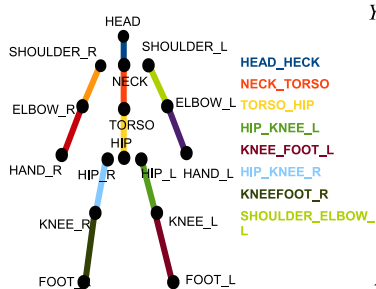


図1: KINECTで取得する関節とリンク

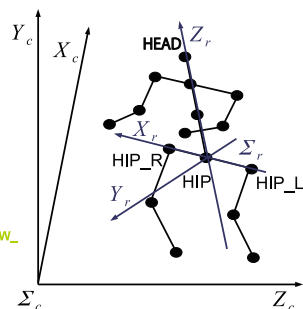


図2: カメラ座標系 Σ_c とロボット座標系 Σ_r

3 立脚時の安定性を考慮した腰・膝・足首関節角制御

立脚時の安定性を考慮し、足裏が常に水平に保たれるよう足首を制御する。図4に制御時に用いる関節角を示す。ロボットの足裏を支持面に接地させ続けるには、図4足

Algorithm 1 Particle filter

- 1: Initialize particles $\Theta_t = (\theta_t^{[1]}, \theta_t^{[2]}, \dots, \theta_t^{[M]})$
- 2: **for** $m = 1$ to M **do**
- 3: Update particles with the motion model:
 $\theta_t^{[m]} = \theta_{t-1}^{[m]} + \mathcal{N}(0, \Sigma)\Delta t$
- 4: Calculate the belief of each particle with the measurement model:
 $w^{[m]} = h(h\varphi_t^1, \dots, h\varphi_t^N | \theta_t)$
- 5: **end for**
- 6: **for** $m = 1$ to M **do**
- 7: draw m from Θ_t with probability $\propto w^{[m]}$
- 8: add $\theta_t^{[m]}$ to Θ_{t+1}
- 9: **end for**
- 10: return Θ_{t+1}

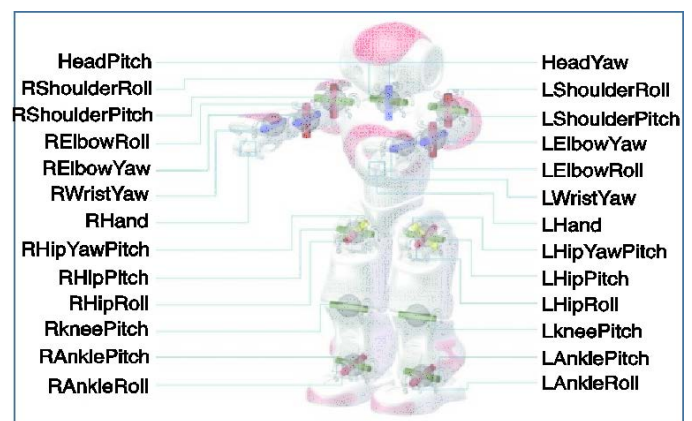


図3: 人型ロボット (NAO) の関節

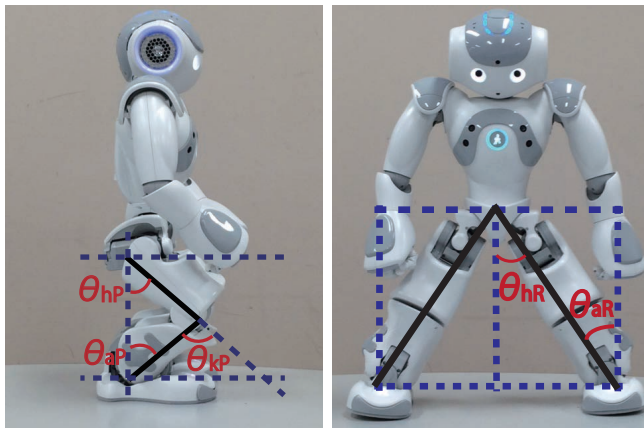
<http://qiita.com/Ryo87/items/8a17d2c8f81237f2a01f> より引用・改変

首関節のピッチ角 θ_{aP} 、ロール角 θ_{aR} 、腰関節のピッチ角 θ_{hP} 、ロール角 θ_{hR} を制御する必要がある。本実験で用いる人型ロボット (NAO) は腰関節から膝関節までの長さ、膝関節から足首関節までの長さがほぼ等しいため、腰関節、膝関節、足首関節を結ぶ三角形は、二等辺三角形と考える。足首関節のロール角は腰関節のロール角と同じ角度を維持することによって、胴体を垂直に保つ。足裏を常に水平に保ちながら、お辞儀のように腰を曲げる動作も考慮する。これらの知見をもとに設計した θ_{aP} 、 θ_{aR} の制御、 θ_{HP} (パーティクルフィルタで推定した腰関節)を用いた θ_{hP} 、 θ_{aP} の制御式を以下に示す。

$$\theta_{aR} = \theta_{hR} \quad (4)$$

$$\theta_{hP} = \frac{\theta_{kP}}{2} + \theta_{HP} \quad (5)$$

$$\theta_{aP} = \frac{\theta_{kP}}{2} + \frac{\theta_{HP}}{2} \quad (6)$$



(a) 横から見た下半身の関節角 (b) 正面から見た下半身の関節角

図 4: 立脚時安定性を確保するため制御する関節角

4 実験

ヒトの呈示する動作を KINECT で観測し，パーティクルフィルタを用いて推定した関節角の値を実機に入力し，模倣する動作を屈伸動作と左右揺動動作に分けて実験を行った．パーティクルの数は 400 個に設定した．実験方法は KINECT で取得した人間動作のリンク姿勢からパーティクルフィルタを用いて関節角を推定し，推定した関節角の値をリアルタイムに NAO に送信し，姿勢を模倣させる．

図 5, 6 に，提案手法を用いて前後・左右方向の人間の姿勢を模倣している様子を示す．足首が床面に対して水平を保つことで，安定して人間の姿勢を模倣できていることがわかる．図 7(a), 7(b) は，それぞれ図 5, 6 に示した，立脚時の安定性を考慮した脚の関節角制御の有無時の重心の時間変化を表したグラフである．どちらもパーティクルフィルタにのみで制御した方は，立脚時の安定性を考慮した関節角制御を用いた方法に比べ重心の変化が激しく，その後転倒している．立脚時の安定性を考慮した関節角制御を行う場合は，軌道が安定しバランスを崩していないことがわかる．

5 おわりに

本報告では，人型ロボットに人間の日常動作の模倣を行わせるため，大掛かりな装置を必要とする従来の研究とは異なり，容易にモーションキャプチャを行うためのモーションキャプチャシステムに KINECT を用いたことで自然な人間の日常動作を取得することができた．KINECT から得られた関節位置座標からリンク姿勢を計算しパーティクルフィルタを用いて関節角をリアルタイムに推定しロボットに模倣させた．重心の位置や ZMP を考慮せずとも，簡単な計算でリアルタイムにロボットの足首・腰関節角の制御を行い，立脚時の姿勢を安定化させることができた．今後の課題として，より多くの人間の日常動作を模倣できるようにするため，安定した片足立ちや斜面上で

人間の動作を模倣できるように制御をかけることが挙げられる．

参考文献

- [1] Jonas Koenemann, Felix Burget, and Maren Bennewitz. Real-time imitation of human whole-body motions by humanoid. In *International Conference on Robotics & Autonomous*, pp. 2806–2812, 2014.
- [2] Christopher Stanton, Anton Bogdanovych, and Edward Ratanasena. Teleoperation of a humanoid robot using full-body motion capture, example movements, and machine learning. In *Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2012.
- [3] 臼井和廉. ヒューマノイドロボットのための対話型強化学習システムの開発. 福井大学 卒業論文, 2013.
- [4] 高橋泰岳, 榊原洸太. 人間動作の観察から動作模倣を行う人型ロボットのためのパーティクルフィルタを用いた関節角度時系列推定. 第 42 回人工知能学会 AI チャレンジ研究会 (SIG-Challenge) 予稿集, pp. 21–23, 2015.05.

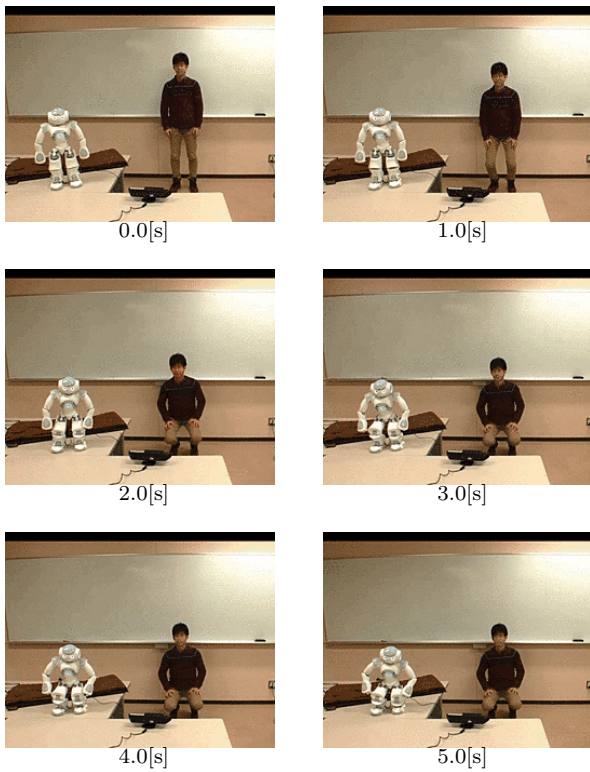
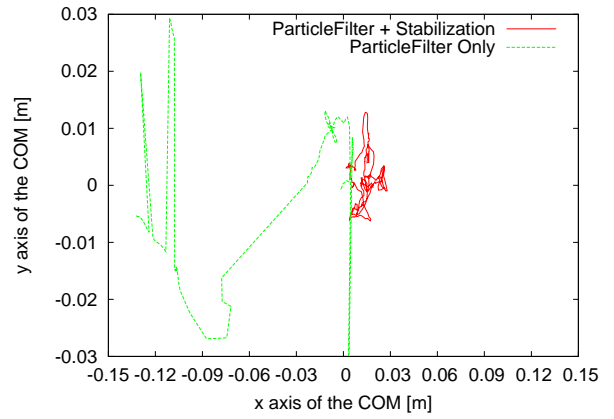


図 5: 屈伸動作の模倣



(a) 屈伸動作時の重心変化

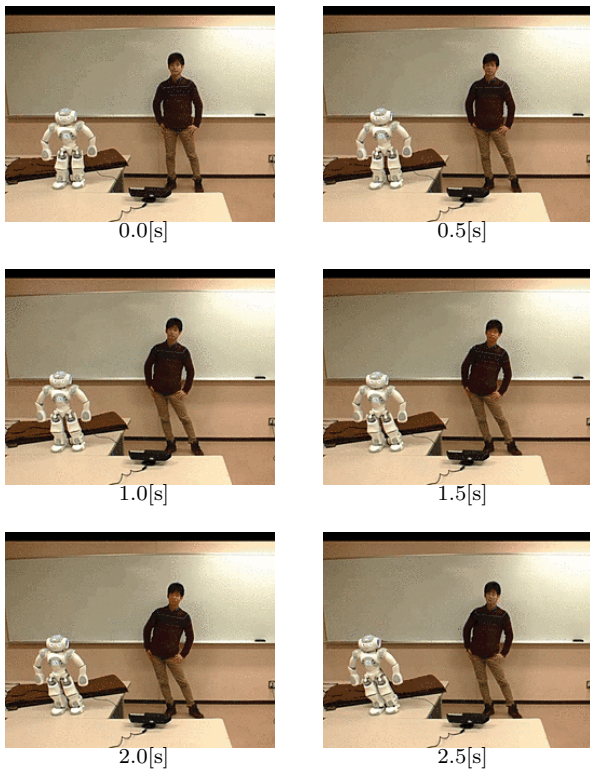
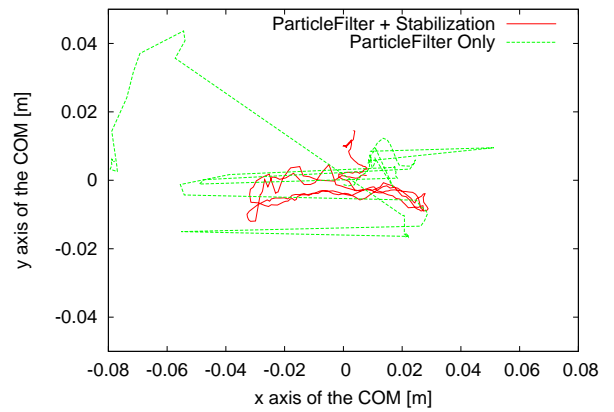


図 6: 左右揺動動作の模倣



(b) 左右揺動動作時の重心変化

図 7: 反射運動の有無における重心の変化