

# 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

Real-time joint angle estimation for a humanoid robot to imitate human motion using particle filter

高橋泰岳 榊原洸太

Yasutake TAKAHASHI and Kouta SAKAKIBARA

福井大学

University of Fukui

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

## Abstract

An inexpensive camera with depth sensor enables us to observe joint positions of the 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. This paper proposes a particle-filter-based joint angle estimation method for the humanoid robot to imitate human demonstration. The method provides a realistic solution of the estimated sequence of the joint angle for the humanoid robot imitation in real-time.

## 1 はじめに

近年、人間と同じ環境で活動する自律ロボットの研究や開発が進められている。ロボットが人間と同じ環境で活動するためには、ロボット自らが人間の環境に適応していくことが求められるが、人間の環境においてロボットに必要とされる動作をあらかじめ全て設計しておくことは非常に難しい。そこで、人間の動作をロボットに提示して、ロボットに学習をさせる模倣学習の研究 [Inamura 04] が行われている。

従来の人型の自律ロボットの模倣学習の研究において、人間の動作を模倣させるためのロボットの関節角が既知と

して学習が行われてきた [奥澤 11][Peters 11][谷口 09] が、人間とロボットのリンク構造は一致しないため、一般的にその仮定を満たすのは難しい。近年では安価な深度センサが低価格で入手できるようになり、これを利用した簡易モーションキャプチャシステムを用い、リンク姿勢を簡単に取得出来るようになった。ヒトのリンク姿勢からロボットの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することが出来る。

ノイズの多いヒトのリンク姿勢の時系列データからロボットの関節角時系列を一意に求めることは一般的には難しい。例えば、リンク姿勢誤差と関節角の変化が最小となる関節角の時系列を全探索で求める手法 [臼井 13] が考えられるが、ノイズを含めて最適解を求めるため不自然な解を提示したり、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。そこで、本報告で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、実験を通してその有効性を検証する。

## 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  $\Sigma_r$  を設定し、観測されたカメラ座標系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。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。

$$\varphi^j = \frac{\mathbf{p}_l - \mathbf{p}_m}{\|\mathbf{p}_l - \mathbf{p}_m\|} \quad (1)$$

$p_l$  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. ロボットのリンク構造を図 3 に示す.  $s$  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.  $\sigma$  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.

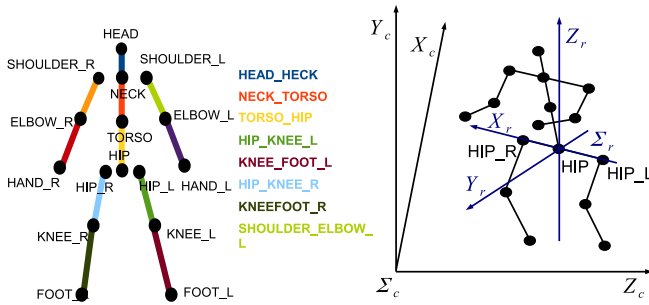


図 1: KINECT で取得する関節とリンク  
図 2: カメラ座標系とロボット座標系

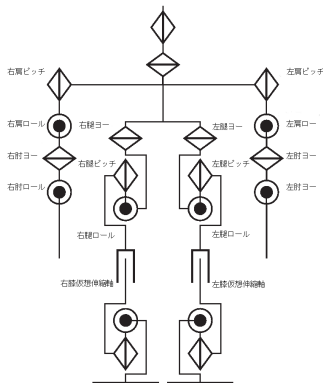


図 3: 人型ロボットのリンク構造

### 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  $\Theta_t$  with probability  $\propto w^{[m]}$
- 8: add  $\theta_t^{[m]}$  to  $\Theta_{t+1}$
- 9: **end for**
- 10: return  $\Theta_{t+1}$

### 3 検証実験

ここでは提案手法の有効性を示すため 2 つの実験を行った. まず, 人間の動作を KINECT で撮影し, 得られたリンク姿勢からパーティクルフィルタを用いてロボットの関節角の推定を行い, その推定結果を検証した. 図 4 に推定した関節角の時系列をそれぞれ示す. 約 0.2 秒までは推定ができていないが, その後は安定して推定している. 図 4(d) の赤線は右足股関節のピッチ軸を制御する関節の角度を表しているが, ヒトのキック動作に合わせて, 右足が前後に振られる様子が確認できる. また, 他の部位においても同様に関節の動きを推定出来ている. 推定したロボットの関節角を用い, シミュレータ上でロボットを動かす. この一連の作業をリアルタイムで行えることを確認した. この実験より, 人の動作認識の推定においてリアルタイムに処理し, かつ想定するロボットの実行可能な関節角時系列を出力することが確認された.

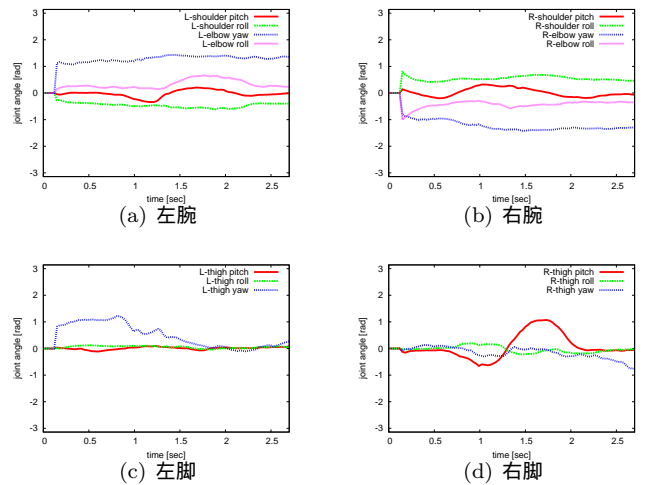


図 4: ヒトのキック動作の観察から推定したロボットの関節角の時系列データ

次に、同一の人型ロボットを2台用意し、片方のロボットのリンクを動かしてそのリンク姿勢を別のロボットに観測させた。観測するロボットはパーティクルフィルタを用いて関節角の推定を行い、推定した関節角がオリジナルのロボットの関節角度とどの程度あっているのかを検証をした。図5と図6はそれぞれ動作を呈示する人型ロボットの関節角と模倣をさせた人型ロボットの関節角を示す。姿勢が一意に決定できる時は正しく推定が行われていることが確認できる。図6(a), 図6(b)では、それぞれのヨー角(青線)が大きく乱れているが、これは動作を呈示するロボットの腕がまっすぐに伸び、ヨー角について一意に求められないからである。腕を曲げるなどしてヨー角が一意に求められた後は、比較的安定して推定できることがわかる。リンク姿勢が冗長自由度により一意に同定できない関節角については誤差が大きいが、時系列上で一意に同定できる時間であればその時点で真値に近づいていることが確認された。

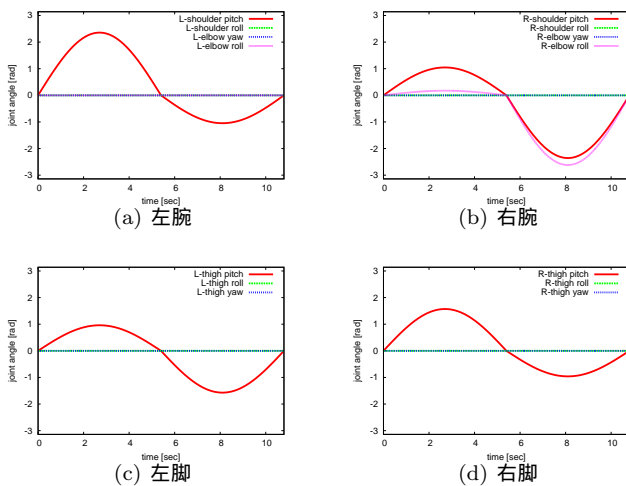


図 5: リンクを動かした人型ロボットの関節角

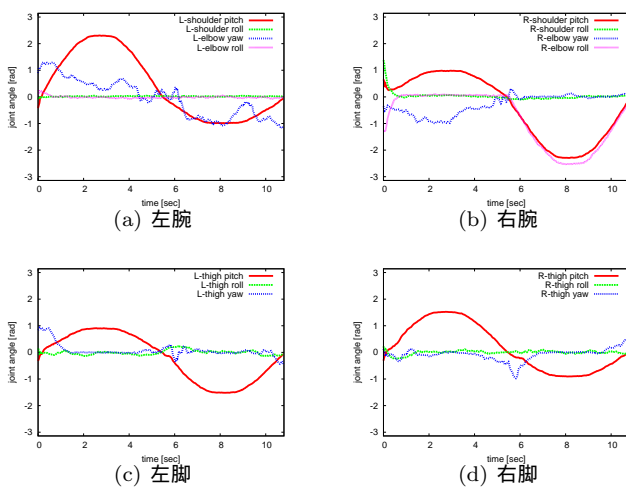


図 6: 模倣をさせた人型ロボットの関節角

#### 4 おわりに

本報告では、KINECT で観測したヒトの動作中の関節の時系列データを用い、人型ロボットがその動作を模倣するためにパーティクルフィルタを用いて関節角の推定を行う手法を提案した。実験より、動作模倣に必要な関節角の推定をリアルタイムに行えることが確認できた。また、リンク構造の冗長性によって一意に関節角が求まらない場合でも、時系列を考慮したアルゴリズムになっているため、妥当な関節角を提示できることを示した。今後はリアルタイムに推定した関節角時系列データを用いた模倣学習に発展させる。

#### 参考文献

- [Inamura 04] Inamura, T., Toshima, I., Tanie, H., and Nakamura, Y.: Embodied symbol emergence based on mimesis theory, *Int. J. Robotics Research*, Vol. 23, No. 4, pp. 363–377 (2004)
- [Peters 11] Peters, J., Mulling, K., Kober, J., Nguyen-Tuong, D., and Kromer, O.: Towards Motor Skill Learning for Robotics, *Robotics Research*, Vol. 131, No. 70, pp. 469–482 (2011)
- [白井 13] 白井 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)
- [奥澤 11] 奥澤 悠樹, 加藤 昇平, 加納 政芳, 伊藤英則: 運動の知識化に基づく模倣ロボットの運動認識と応用生成, *電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌*, Vol. 131, No. 3, pp. 655–663 (2011)
- [谷口 09] 谷口 忠大, 岩橋 直人: 複数予測モデル遷移の N-gram 統計に基づく非分節運動系列からの模倣学習手法, *日本知能情報ファジィ学会誌*, Vol. 21, No. 6, pp. 1143–1154 (2009)