

体格の差異を考慮に入れたヒューマノイドの見まね学習

齋藤 一樹 加藤 昇平 伊藤 英則

名古屋工業大学

1 はじめに

ヒューマノイドの全身運動の設計は、多くの自由度を同時に制御する必要があるため、非常に困難である。近年、見まね学習と呼ばれる、開発者が動作を埋め込むのではなく、自律的に物理的条件を同定し人間の動作をまねて新しい行動を獲得するアプローチが多く提案されている [1]。例えば、子供 (学習者) が養育者 (動作教示者) の模範動作を観察しそれを真似る場合、両者には明らかな体格の差異があり、模範動作の単なる近似だけでは動作の再現が不可能な場合が多く、学習者は自然とその差異を吸収して自分の体格に適合した動作を獲得している。ロボットの見まね学習においても体格の差異を吸収する方法は重要である。

文献 [1] では運動学習プリミティブと呼ばれる運動生成の内部モデルが提案され、与えられた模範動作の関節軌道を運動学習プリミティブを用いて近似する学習法が提案されている。しかしながら、[1] の手法では学習時において模範動作と学習主体の間に生じる体格の差異が考慮されていない。そのため、体格の異なるヒューマノイドロボットの運動を学習するためには学習後に各関節軌道を手動で調節しなくてはならない。

そこで本稿では、運動学習プリミティブによる模範動作の学習に加えて、自分の体格に適合するために適切な関節軌道を探索することにより教示された動作を獲得する見まね学習アルゴリズムを提案する。実験では一脚あたり 6 自由度、一腕あたり 4 自由度、計 20 自由度を有するヒューマノイドロボットを用いて、学習者と動作教示者の脚部に体格差を発生させ、いくつかの体格差の下で歩行運動を学習する実験を行う。

2 学習アルゴリズム

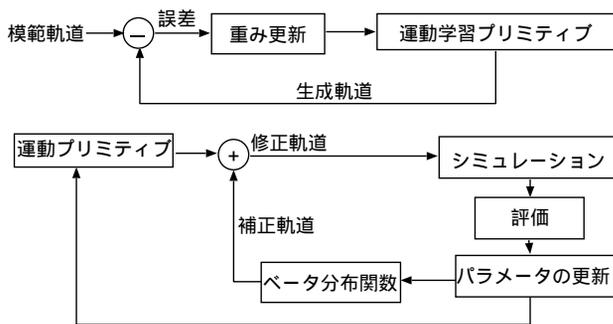


図 1: 学習アルゴリズムのブロック線図

図 1 に本稿で提案するヒューマノイドの動作の見まね学習方法の概略を示す。まず、動作教示者の示す模範

軌道を運動学習プリミティブ [1] を用いて学習する。学習後、運動プリミティブは模範軌道を近似した軌道を生成することが出来るようになる。次に、学習した模範動作を部分的に変形させ、自分の体格に合う動作を探索する。動作の変形にはベータ分布関数を用い、生成した補正軌道を運動プリミティブの生成軌道に合成することで動作の修正を実現する。

2.1 周期運動学習プリミティブ

運動学習プリミティブによって模範動作を学習することにより、運動プリミティブによって模範軌道を近似した軌道を生成する。以下に周期運動プリミティブの学習手続きを簡単に述べる。

まず、周期の位相を極座標系 (ϕ, r) で表した位相振動子系を考える。

$$\tau \dot{\phi} = 1, \quad \tau \dot{r} = -\mu(r - r_0) \quad (1)$$

ここで、 (ϕ, r) はそれぞれ振動子の位相、振幅を表す。 τ は周期、 r_0 は目標振幅、 μ は正の定数である。

運動プリミティブの出力 y は振動子の状態 (ϕ, r) および座標変換をした $\tilde{v} = [r \cos \phi, r \sin \phi]^T$ を用いて以下の式で表される。

$$\begin{cases} \tau \dot{y} = z + f(\tilde{v}, \phi) \\ \tau \dot{z} = \alpha_z(\beta_z(y_m - y) - z) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 α_z, β_z は正の定数、 y_m は出力のオフセットである。 y をロボットの関節軌道として用いる。 $f(\tilde{v}, \phi)$ はニューラルネットによる関数近似法である LWR (Locally Weighted Regression) [2] の出力である。

模範軌道の学習には、ある時刻 t における模範軌道 y_{demo} を以下の式によって f_{target} に変形し、 f_{target} を LWR によって近似する。

$$\begin{cases} f_{target} = \tau \dot{y}_{demo} - z_{demo} \\ \tau \dot{z}_{demo} = \alpha_z(\beta_z(y_m - y_{demo}) - z_{demo}) \end{cases} \quad (3)$$

運動プリミティブの特徴として、軌道生成時に式 (1) および式 (3) 中の τ, r_0, y_m を変化させることで運動の周期、振幅および振動の中心を変化させることが可能である。次節で述べる適合動作の探索において τ, r_0 を探索対象のパラメータの一部として用いる。

2.2 適合動作の探索

模範軌道の変形方法としてロボットの関節軌道 y (式 (2)) に加えてベータ分布関数を用いる。

$$Be(x) = x^{p-1}(1-x)^{q-1}, \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (4)$$

ここで、 p, q は正の定数である。この二つのパラメータを操作することで $[0, 1]$ 上に様々な凸型曲線を表すことが出来る。直観的には、 $p < q$ ($p > q$) であれば曲線の

*Humanoid Learning from Demonstration that takes difference of physique into consideration, Kazuki SAITOH, Shohei KATO, and Hidenori ITOH, Nagoya Institute of Technology, Gokisocho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan.

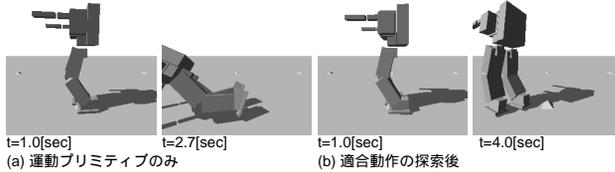


図 2: 学習した歩行の例

最大値が 0 (1) に近づく．提案手法ではこの関数を拡張した以下の式を補正軌道として用いる．

$$m \times (\hat{B}e(x/2\pi) - b) \quad (5)$$

ここで m, b は定数， $\hat{B}e(x/2\pi)$ は $(0, 1)$ 上のベータ分布を $(0, 2\pi)$ 上に写し，ピークを 1 に正規化したものである．ある時刻 t における周期運動プリミティブの出力に対し補正軌道を加算した合成軌道をロボットへ与える．

探索対象のパラメータは関節毎に式 (5) へ与えるパラメータ p, q, m, b と式 (1) に与えるパラメータ r_0, τ の 6 つがあり，関節数を N とすると合計で $N \times 6$ 個のパラメータを探索する．本手法では，最急勾配法に基づいてパラメータの近傍を探索することにより修正軌道を生成する．

3 実験

提案手法の有用性を確かめるため，数値シミュレーションによる歩行の見まね学習実験を行った．

実験に用いるロボットのモデルとして，富士通の研究用小型ヒューマノイドロボット HOAP-1 の体格を元にその脚部の長さを 1.0 倍から 1.8 倍まで 0.1 刻みに変化させたロボットを用いた．

動作教示者を HOAP-1 とし，模範軌道には，HOAP-1 の歩行時の関節角データを用いる．適合動作の探索時のパラメータの初期値は $p_i = 2.0, q_i = 2.0, b_i = 0.5, m_i = 0.0, r_{0i} = 1.0, \tau_i = 0.40$ (i は関節番号) を用い，試行回数は 1000 回とした．

適合動作の探索時 (2.2 節) における最急勾配法の評価値としては，修正軌道をロボットへ与えた場合の動作の評価値 E を考えた．

$$E = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 + w_4 f_4 \quad (6)$$

$$f_1 = |M_{step} - N_{step}| \quad (7)$$

$$f_2 = |M_{dist} - N_{dist}| \quad (8)$$

$$f_3 = \sum_t |z(t) - z_{stand}| \quad (9)$$

$$f_4 = |y| \quad (10)$$

ここで， f_1, f_2, f_3, f_4 は歩数，移動距離，重心の高さおよび直進性を評価した値である． M_{step}, M_{dist} は模範動作の歩数と移動距離であり， N_{step}, N_{dist} はそれらの実測値である． $z(t)$ は時刻 t におけるロボットの重心の高さであり， z_{stand} は歩き始めにおけるロボットの重心の高さである． $|y|$ はシミュレーション終了時のロボットの重心の左右変位である． w_1, \dots, w_4 は重み係数である．評価値 E は，より良い歩行を行うほど減少する．実験では， $w_1 = 1, w_2 = 2, w_3 = 2, w_4 = 2$ を用いた．

図 2 に，脚部の長さを HOAP-1 (動作教示者) の 1.3 倍とした場合の学習結果の動作の一例を示す．運動プリミティブによる動作の模倣のみでは，すぐに転倒してしまう (図 2(a)) が，本手法による適合動作の探索を用いた場合には転倒せずに歩行を続けている (図 2(b))．このことから，本手法による見まね学習によりロボットが自分の体格に適合した動作を獲得したことが確認できる．

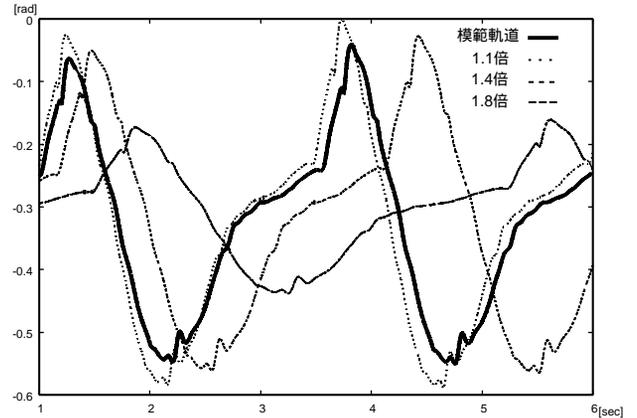


図 3: 探索後の関節軌道 (股関節の前後方向)

図 3 に脚部の長さを 1.1 倍 ~ 1.8 倍したロボットが適合動作の探索後に獲得した関節軌道 (股関節の前後方向) を示す．1.1 倍の場合は模範軌道との差異はほとんど見られないが，脚部が長くなるにつれて歩行の周期が長くなっていることが分かる．特に 1.8 倍になると周期の長期化に加えて，関節の動きが大きく抑制されている．これは脚部が長いロボットが動作教示者と同様の動作を実行した場合，重心の移動が激しく，バランスを崩しやすいため，それを回避する修正軌道を生成し，体格の差異を吸収したためと考えられる．

4 おわりに

本稿では，見まね学習の手法を改良し文献 [1] の提案した運動学習プリミティブを用いた自分の体格へ適合するために軌道を修正する機能を追加した新しい手法を提案した．また，提案手法を用いたシミュレーションにおいて体格の異なる複数のロボットの見まねによる動作の獲得を確認した．今後の課題として，体格の差異とパラメータの相関についての分析，本手法がどの程度までの体格差を許容できるかの検証および人間の歩行を模範動作とした見まね学習実験があげられる．

参考文献

- [1] J.Nakanishi, J.Morimoto, G.Cheng, S.Schaal and M.Kawato: "Learning from Demonstration and Adaptation of Biped Locomotion with Dynamical Movement Primitives" Workshop on Robot Programming by Demonstration, IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, 2003
- [2] S.Schaal and C.G.Atkeson: "Constructive Incremental Learning from Only Local Information" Neural Computation, vol.10, no.8, pp.2047-2084, 1998