

筋駆動人体モデルを用いた動作プランニング

A planning system for multi-joint muscle driven motions

今井 涼太^{1*} 原口 誠¹
Ryota Imai¹ Makoto Haraguchi¹

¹ 北海道大学大学院情報科学研究科情報理工学専攻

¹ Computer Science Graduate school of Information Science and Technology
Hokkaido University

Abstract: 近年様々な手法で人間の動作アニメーションの生成が行われるようになった。その目的としては映画やゲームなどのキャラクターのリアルな動きの生成、スポーツ動作についてユーザにとって最適な動作を生成し動作上達のサポートをするシステムの開発など様々である。本研究では最終目標としてユーザにとって最適かつ上級者の模倣を行った動作の生成を目指す。個々の動作主体は筋骨格構造が全くの同一であるとは言えず、上級者の動作を外見的に真似ることが困難な場合も多い。本研究ではこうした事情を勘案し、個々の筋骨格パラメータを持つ二関節筋駆動モデルで、(1) その人が実行可能である、かつ (2) 上級者の動作と外形的に近い運動を生成できる筋レベルでのプランニングシステムを目指している。生成手法として、動作データ（重心位置、関節角度）のフレーム間を補間するように動作生成をおこなう。このとき、フレーム間を補間する状態の選択を行う際には、A*探索手法と同様に遷移コスト、見積もりコストを用いた探索を行う。コストには身体の各部分、体節、関節、筋肉に作用する力学的な負荷を考慮したものを採用した。また今回は筋駆動での生成を行い、実際に動作する際の筋肉の使い方を動作の見た目とともに推定した。本研究では2次元での動作を実験として生成した。

1 はじめに

人間が何らかの動作についてその習得を目指す時、だれしものが最初、上手な人の模倣をしようとするところから始まる。これは日常の動作からスポーツ動作まで様々な動作について行われている。スポーツ動作については、その動作の熟練者の動きをよく観察し、自分の体でもその動作を再現しようと試行錯誤を繰り返すことで上達を図る。

また近年では、スポーツ動作の上達のため動作解析や最適化シミュレーションから最適動作の生成を行う研究が数多くある。生成された動作と実際のユーザの動作を比較することで上達のためのコーチングを行っている。最適な動作を生成し、ユーザに見せることでの指導は有効であることは間違いないが、先ほど述べたようにスポーツ動作においては熟練者の動きを観察し、真似をすることの方が一般的である。ではその熟練者の動きをまったく同じように再現した動作を生成して比較すればよいのかといえどもまだ十分とは言えない。そもそも熟練者と動作上達を目指すユー

ザの間には、身体的特徴「寸法・重さ・筋肉量」が異なるということがあり、完全な再現は不可能であると考えられるからである。仮にそうした特徴が全く同じであったとしても、筋肉収縮のタイミングや力の加減など、筋肉の使いかたは訓練と試行錯誤が必要であり、その点において熟練者と初心者では全く異なる。

そこで本研究では最終的な目標とし、熟練者の動作に似ている、かつユーザの筋骨格構造に適した動作の生成を目指す。今回はそのために必要な動作のプランニングを多関節筋駆動で行うシステムを構築した。具体的には、動作の外形から取得した関節角データの一部（実験では初期、最終、および中間状態の関節角）をお手本動作とし、それをプランナーが仮定する筋力や骨格に関する物理パラメータに基づいた筋肉レベルでの動作で、お手本動作と外形的に類似したものを生成することが目標である。ここで、多関節筋駆動モデルを用いる理由は、運動とは複数の筋肉の協調制御の結果であり、無駄のないスムーズな動作はその帰結であるとの研究 [10] に依っている。

動作生成を行うにあたり、筋骨格に適しているか否かをコスト関数を用いて判定した。コスト関数として体節、関節、筋肉といった人間の筋骨格に作用する力学的なエネルギー変化を用い、これができるだけコス

*連絡先：〒060-0814 札幌市北区北14西9 北海道大学情報科学研究科

今井涼太・原口誠

トが小さくなる動作を生成した。

2 関連研究

2.1 同化動作生成手法

先行研究が提案した同化動作生成手法 [1] では、与えられた動作データから別の動作、または別のキャラクターがしたその動作を自動で生成する手法であった。この手法での動作生成方法の流れは、与えられている動作の特徴状態列（動作データ）から再利用可能な状態を見つけ（同定処理）、その状態間を補完する処理を行い（補足処理）、その再利用した状態を含めて生成された動作状態列の関節角度をモデルが再現可能な角度に適用する処理を行い（適用処理）、動作生成を完了としていた。

動作を生成するために必要とされるトルク・力ができるだけ最小となるようにして生成される動作をスムーズな動作（目標動作）であると定義している。探索の入力として、ある時刻でのキャラクターの状態についてを与えている。キャラクターの状態として、

- (1) 位置：キャラクターが空間内でどこにいるのか
- (2) 姿勢：キャラクターがどんな姿勢にあるのか
- (3) 接触：キャラクターはどの物体に接触しているのか
- (4) 力とトルク：キャラクターの筋肉、体節にどれくらいのトルクと力が作用しているのかを含んでいる。

1. 同定処理

規範となるお手本動作から再利用できる部分を求める。与えられている動作 $M_s = (S_1, \dots, S_f)$ から再利用可能な部分 M_R を同定する。そのために、 M_R の始まりの状態を S^* 、終わりの状態を S^{**} とした時、コスト $h(S_i, S^*)$ 、 $h(S_j, S_g)$ が最小となる動作状態を求める。これにより求めた状態を再利用可能な動作部分の先頭状態とする。

2. 補足処理

同定処理から求めた再利用できるフレームのその間を補間していく。補間の際に A*探索アルゴリズムを用いており、その見積もりコスト関数として重力、慣性力を考慮したコストを使用していた。また実コスト関数としては先の見積もりコスト関数に、隣接する体節から伝播する力を考慮していた。関節の番号を $j(1 \leq j \leq J)$ 、体節の番号を $b(1 \leq b \leq B)$ 、関節に作用するトルクを T 、力を N 、関節角度を θ 、体節の重心位置を p として

見積もりコスト関数

$$h(S, S') = \sum_{j=1}^J h_T(S, S') + \sum_{b=1}^B h_N(S, S'),$$

$$h_T(S, S') = \left| \vec{T}_j(S, S') \cdot \frac{\vec{\theta}_j(S') - \vec{\theta}_j(S)}{dt} \right|,$$

$$h_N(S, S') = \left| \vec{N}_b(S, S') \cdot \frac{\vec{p}_b(S') - \vec{p}_b(S)}{dt} \right|,$$

実コスト関数

$$g(S, S') = \sum_{j=1}^J g_T(S, S') + \sum_{b=1}^B g_N(S, S'),$$

$$g_T(S, S') = \left| \vec{T}_j(S, S') \cdot \frac{\vec{\theta}_j(S') - \vec{\theta}_j(S)}{dt} \right|,$$

$$g_N(S, S') = \left| \vec{N}_b(S, S') \cdot \frac{\vec{p}_b(S') - \vec{p}_b(S)}{dt} \right|,$$

3. 適用処理

ここまでで作成した動作について、各関節の角度を目標キャラクターでも再現できるものに変換する。そのままでは同じ動作が行えない場合のために、目標キャラクターの動作と、生成した動作の元データのキャラクターの動作について、エネルギー変化量が同程度の割合になるように修正をする。

2.2 筋肉の数理学モデル

筋肉の筋張力を推定するために筋肉の数理学モデル Hill-Stroeve モデル [12] がある。この数理学モデルでは筋肉の活性度、伸縮速度、筋肉長から筋張力を推定することができる。筋肉の活性度とは、筋肉の運動単位での活性割合を表す。これは 0 から 1 までの値をとる。筋肉がどれだけ働いているのかの指標として本研究では考える。

このモデルによって筋肉の性質である

- 筋長-筋張力の関係
筋肉は自然長のとき最大張力を発揮し、一定を超えると随意と無関係に受動的な静止張力が生じる
- 速度-筋張力の関係
筋の伸縮速度と張力の間には関係がある

$$f_i(a_i, l_i, i_i) = a_i \cdot F_{lce_i}(l_{ce_i}) \cdot F_{vce_i}(i_{ce_i}) \cdot F_{max_i}$$

ただし、

$$F_{lce}(l_{ce}) = \exp \left[- \left(\frac{l_{ce} - l_{ce0}}{l_{cesh}} \right)^2 \right]$$

$$F_{vce}(i_{ce}) = \begin{cases} 0 & (i_{ce} \leq -v_{max}(a, l_{ce})) \\ \frac{V_{sh}V_{shl}v_{max}(a, l_{ce}) + V_{ml}i_{ce}}{V_{sh}V_{shl}v_{max}(a, l_{ce}) + i_{ce}} & (0 < i_{ce}) \\ \frac{V_{sh}(v_{max}(a, l_{ce}) + i_{ce})}{V_{sh}(v_{max}(a, l_{ce})) - i_{ce}} & (otherwise) \end{cases}$$

$$v_{max}(a, l_{ce}) = V_{vm}(1 - V_{er}(1 - aF_{lce}))$$

i は筋の番号 ($i = 1, \dots, n$) であり、 l は筋長、 i は筋伸縮速度、 F_{lce_i} は「筋長-張力の関係」、 F_{vce_i} は「速度-張力の関係」をそれぞれ表す関数である。また、 a は筋活性度 ($0 \leq a_i \leq 1$)、 l_i は筋長、 l_{ce_i} は収縮要素の長さ、 l_{ce} は（腱の長さを差し引いた）筋の収縮要素の長さ、 l_{ce0} は特に筋の自然長、 l_{cesh} は筋長の可変範囲から決まるパラメータである。 V_{sh} 、 V_{shl} 、 V_{ml} は伸縮時と伸長時のパラメータであり、 V_{vm} は、等張性収縮時の最大速度、 V_{er} 筋活動状態の最大速度とする。この筋長と収縮速度は以下の式を用いて決める。

$$l_i = l_{ri} - r_{i1}(\theta_1 - \theta_{r1}) - r_{i2}(\theta_2 - \theta_{r2}) - r_{i3}(\theta_3 - \theta_{r3})$$

$$i_i = -r_{i1}\dot{\theta}_1 - r_{i2}\dot{\theta}_2 - r_{i3}\dot{\theta}_3$$

l_{ri} は筋の自然長、 r_{ij} はモーメントアーム（力の作用するラインから回転軸までの距離）、 θ_{rj} は筋自然長時の関節角度とする。なお間接トルク τ_j は、

$$\tau_j = \sum r_{ij} f_i(a_i, l_i, i_i)$$

と表される。

本来筋肉の長さや伸縮速度は本来の筋肉の構造上複雑に変化するわけであるが、今回は関節を滑車として仮定して求めた。

3 提案手法

動作生成をするために、本研究では計算機上に人型のモデルを設計し、物理エンジン (ODE: Open Dynamics Engine) を用いた動力学計算を行い動きをシミュレーションした。今回目指す模倣動作は関節の角度、そして重心位置が類似しているものを模倣動作と定義した。本研究で人体の動作を生成するとき、人体の筋肉の使い方をプランニングする手法を用いる。初期状態の人体モデルが、入力された動作データのフレームに近づくようにその中間にあたる動作フレームを生成し、目標状態までのプランニングを行う。モデルの動作を決めるために、先で述べた筋肉の数理モデルを用いてトルクを計算している。このトルクは筋肉の活性度から

求めることができるため、本研究では動作を行ううえでの筋肉の活性度をフレームごとにごとに探索することとなる。活性度から得られたトルクから動力学計算を行い、モデルがもつ加速度、速度、変位を求める。今回は活性度の変化を-0.02、0、+0.02の3パターンに制限して前回の状態での最適とされた筋肉の活性度から変化させて探索を行った。

本研究では先に述べている先行研究と同様に、状態遷移にかかるコストを動力学の観点から見たトルクと力より算出されるエネルギーコストが小さいものを自然な動作とし、さらに筋駆動によって動作生成を行うことから、その筋肉が必要としたエネルギーコストを考慮している。このコストが小さいものを本研究では「自然な動作」「筋骨格に適した動作」として定義している。なお、シミュレーションの単位時間は0.001[s]に設定した。

また本研究での状態は

- (1) 筋肉の活性度ベクトル
 - (2) 各体節の位置・姿勢
 - (3) 各体節の速度・角速度
- である。

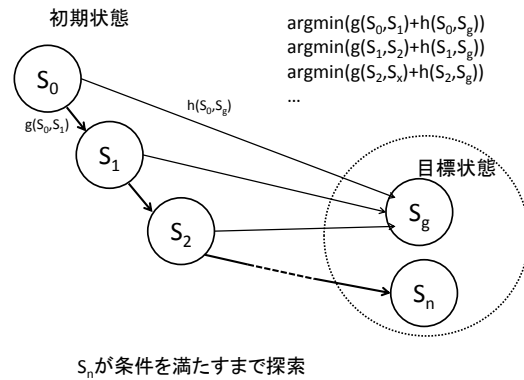


図 1: 補間動作（新しい状態の挿入）

3.1 入力データ

本研究で用いるデータについて、入力として与えるのは各体節の重心位置座標と各関節の角度である。これは計算機上のモデルと入力データの主体との間にある寸法の違いから重心位置の違いを考慮するためである。

今回は2次元での動作を考えた。各体節の体の前後・上下への動きを考えて生成した。

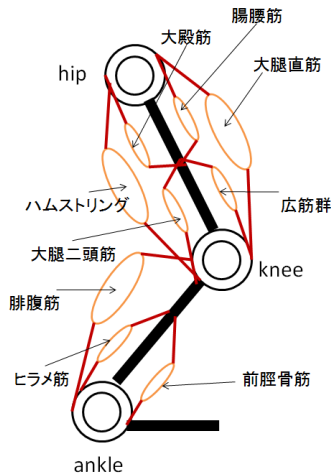


図 2: 実装した足の筋構造

3.2 筋駆動での生成

本研究では、物理エンジンをもちいて動力学計算をする。筋駆動での動作を生成するために、筋肉の数理モデルから筋張力を計算し、その筋張力から推定される関節トルクによりモデルの動きを生み出す。数理モデルから筋張力を求めるために必要な筋肉の活性度を変化させることで関節トルクを制御し、筋駆動での生成を行う。

本研究では多関節筋骨格運動を対象としている。人間のボディを計算機上に設計するに当たり、体を頭、胸元、腰回り、大腿部、下腿部、足に分けて考えた。各体節の形状は円柱 (Cylinder) で表現することとした。

実装した筋肉は、人間の動作に大きな影響を与える主たる筋肉である。いくつもの筋肉が密集している箇所は、「筋群」として1つにまとめることとした。まず股関節から膝関節までの間に、単関節筋として腸腰筋、広筋群、大腿二頭筋、二関節筋として大腿直筋、ハムストリング。膝関節から足首関節までに、前脛骨筋、ヒラメ筋、二関節筋として腓腹筋、腹筋と背筋を実装した。

3.3 コスト関数

コスト関数として、本研究では動作の結果体節にかかる力、動作を行うのに必要なトルク、筋肉の筋張力を考慮したものを用いた。体節にかかる力、必要トルクについてのコストは先行研究 [1] と同様であるが、筋肉のコストについては筋肉の番号を $m(1 \leq m \leq M)$ 、筋張力を F 、筋長を l として、

$$g_M(S, S') = \left| F_b(S, S') \cdot \frac{l_m(S') - l_m(S)}{dt} \right|$$

として、先行研究の実コストにこれを加えた。

$$g(S, S') = \sum_{j=1}^J g_T(S, S') + \sum_{b=1}^B g_N(S, S') + \sum_{m=1}^M g_m(S, S')$$

見積もりコストは先行研究と同様である。

4 動作生成実験

動作生成として、「しゃがみ込む」「立ち上がる」という動作を生成した。関節角度の変化、体節重心位置の変化が重要であろうと考えられる動作として選択した。入力として、「しゃがみ込んだ状態での各関節角度、各体節重心位置」「立ち姿の関節角度、重心位置」の2つのフレームを入力として与え、その間のフレームを補間した。なお本研究では下半身の筋肉にのみ着目したため、腕について省略したモデルを用いた。今回の実験で用いたモデルの各体節の寸法、重さについては以下のように設定した。

体節	長さ	質量
頭	半径 10cm	3kg
ボディ	85cm	35kg
太もも	40cm	13kg
ふくらはぎ	40cm	10kg
足	27cm	5kg

4.1 生成結果

生成結果として、見た目は図3図4のようになった。またこのときの筋活性度の結果は図5のようになった。

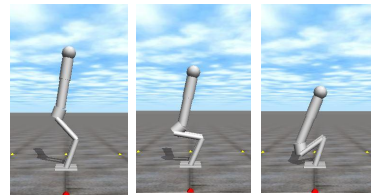


図 3: しゃがみ込み動作

4.2 考察

実験により生成された動作の見た目(図3図4)からしゃがみこむときの上体を前に倒す、立ち上がる時の上体をさらに前に倒して重心を前にすることで体が前に倒れこまないようにする動作が生成することができた。

また図5からわかるように一関節筋、二関節筋が動作をするときにどのように働いているのか、それぞれの筋肉の活性度で示すことができた。動作を起こすための姿勢、角速度制御を一関節筋と二関節筋が互いに協調しながら行っていることが見て取れる。一関節筋だけで動作を生成するよりも二関節筋も活性させて動作を行った方が結果的にコストが小さく済むことが同様に確認できた。

しかしながら今回の実験では入力として与えた中間状態(しゃがんでいるときの状態)での膝の角度より明らかに沈み込んでの動作が生成された。図5では入力データの膝の角度に到達した時間には膝を伸ばすための筋肉が活性し始めていることが分かるため、筋肉の筋張力による膝を伸ばすための関節トルクよりもその姿勢に至ったときの慣性力が大きかったと考えられる。

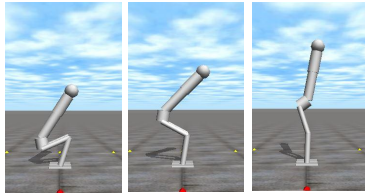


図 4: 立ち上がる動作

5 まとめと今後の課題

今回の生成手法により、動作の生成を多関節筋駆動で行うことができ、動作の見た目とその際の筋肉の活性度を推定することができた。

しかしながら今回の研究では、全身の筋肉については下半身の筋肉のみを考慮した動作生成であったために、腕の動きなど本来自然な動作を生成するために予備運動として動く体節部分の動きを生成することがなかった。計算時間の関係から省略したが、全身の筋肉を実装し全身動作の生成が求められる。

また筋肉の活性度について、その変化を $-0.02, 0, +0.02$ の3パターンに限定したために、じっくりとした力の掛け方での動作生成しかできておらず、筋肉の瞬発的な力の発揮を表現することができなかった。最終目的としてスポーツの模倣動作を生成するためには、瞬発的な筋肉の使い方が必須であるため、筋肉の活性度の変化量について考慮する必要がある。

また先の考察で述べたように、慣性力により動作が入力として与えた動作データのフレームをオーバーランしてしまったことから、入力として与えられた中間動作までの補間を動作の姿勢レベルのみで考えるのではなく、各体節の加速度・角加速度を考慮しなければならないと考えられる。

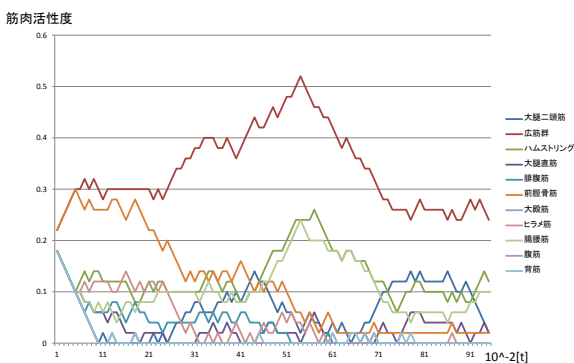


図 5: しゃがんでから立ち上がる動作の各筋肉活性度

参考文献

- [1] 本林正裕, 原口誠. 様々な特徴のキャラクタに対する同化動作生成手法. 電子情報通信学会論文誌. Vol.J87-D-II No.7. pp.1473-1486. 2004
- [2] 秋葉隆次. 二関節筋の機能を考慮した人体モデルにおける動作生成の研究. 北海道大学大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻修士論文. 2008
- [3] 辻敏夫, 池本貴志, 伊藤宏司, 長町三生. 冗長性を有する上肢多自由度運動におけるインピーダンス変換法. 電気学会論文誌. C-108. pp.471-477. 1988
- [4] 黒崎浩介, 村井昭彦, 中村仁彦. 人間の全身インピーダンスのモデリング. 第26回日本ロボット学会学術講演会. ROMBUNNO.1I3-03. 2008
- [5] 鈴木一郎, 山根克, 多屋浩嗣, 栗原一貴, 中村仁彦. 高速動力学計算法を用いた詳細人体モデルに基づく人間の力学計算. 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会. 3C14. 2002
- [6] 伊藤宏司. 身体知システム論 ヒューマンロボティクスによる運動の学習と制御. 共立出版. 2005
- [7] 出村公成. 簡単!実践!ロボットシュミレーション Open Dynamics Engine によるロボットプログラミング. 森北出版株式会社. 2009
- [8] 阿部龍蔵(著), 長岡洋介, 原康夫(編). 岩波基礎物理シリーズ 力学・解析力学. 岩波書店. 2001
- [9] Vladimir M.Zatsiorsky(著), 鳥居俊(監訳). Kinematics of Human Motion(身体動作の運動学), 有限会社ナップ. 2003
- [10] 熊本水頼. ヒューマノイド工学: 生物進化から学ぶ2関節筋ロボット機構. 東京電機大学出版局, 229ページ (2006).
- [11] Scott L. Delp, J. Peter Loan, Melissa G. Hoy, Felix E. Zajac, member, IEEE, Eric L. Topp, and Joseph M. Rosen. An Interactive Graphics-Based Model of the Lower Extremity to study Orthopaedic Surgical Procedures. IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING. Vol.37. No.8. pp.757-767.AUGUST 1990
- [12] Stroeve, S., Impedance characteristics of a neuro musculoskeletal model of the human arm I. Posture control, Journal of Biological Cybernetics. Vol.81. No.81. pp.475-494. 1999