

動きの人らしさ

Humanity of Motion

○学 小林 亮 (東工大) 正 岡田昌史 (東工大)
正 土方 亘 (東工大)

Ryo KOBAYASHI, Tokyo Institute of Technology
Masafumi OKADA, Tokyo Institute of Technology
Wataru HIJIKATA, Tokyo Institute of Technology

The results of conventional researches have concluded that a human motion is generated by torque change minimization algorithm. It requires information of both initial and final position (Point-to-point control), while human motion sometimes does not have information of the final position in the real world. In this paper, we propose an online torque change minimization algorithm. Human motions are measured by a motion capture system, and it is shown that human motion has small torque change. The proposed method is applied to the same motion and the effectiveness of the proposed method is evaluated. Finally, the proposed method is also applied to experiments of a two-link manipulator.

Key Words: Human like motion, Human like control, Online torque minimization

1 はじめに

人とコミュニケーションを行うロボットや、触れ合うことで人に安らぎを与えるセラピーロボットの開発が進められ、動作に自然さや生物らしさを持たせ、安心感を与えることが必要になる。ロボットに人らしい動きを行わせるために、ロボットの動作と人の動作の違いをアンケートで得ようとする研究 [1] やロボットと動作でコミュニケーションを行いアンケートで評価する研究 [2] がなされてきた。しかし、これは先に予定された運動に対する考察であり、人と共存するためには予測されていない状況でも人らしさを持って動くことが必要であろう。そのため、予め人らしい動作を用意するのではなく、人が動作を生成する原理を解明し、環境との相互作用から運動が創発されるようなシステムを設計する必要がある。

人の動作の解析を目的とした研究はいくつか行われてきており、躍度最小化 [3] や関節トルク変動の最小化 [4] が導かれている。しかし、躍度最小化手法は身体の質量や慣性モーメントなどの物理パラメータは考慮されず軌道のみから決定される。これに対し、トルク変動最小化手法では、初期姿勢と最終姿勢の間の軌道を身体の物理パラメータを用いて各関節が発生するトルクの変化量を最小化するものであり、実際の人の運動生成に近い軌道設計手法であると考えられる。しかし、我々の日常生活の中の運動では最終的な姿勢が決定されていない場合が多い。すなわち、手先のある目標の場所に持って行くという PTP 制御ではなく、環境の相互作用の中から適当に決まり、その基準も明確ではない場合が多い。

そこで本研究では、人らしい任意の運動を生成するために、人の運動の制御則を探る。重りを持った手先を目標高さで動かす運動の計測、および、重りの質量を変化させることで生成される運動の特徴を捉え、これを実現する制御アルゴリズムを導出する。また、これをロボットに実装し、ロボットの運動を生成する。

人間の動作の原理の解明できれば、人・物・環境の条件を設定することで任意の運動を生成可能となり、また、生物の CG での動作を生成することができる。これにより、現実感を与える CG の生成への応用などが考えられる。

2 上肢運動の計測と解析

2.1 運動の計測

人の手先に重りを持たせて所定の高さまで持ち上げさせる運動をモーションキャプチャを用いて計測する。モーションキャプチャに使用するカメラは 1000fps であり、被験者の肩肘手先の 3

点にマーカをとりつける。被験者は健康な男子大学生 1 名で、床の定められた位置に垂直に立ち手先を被験者の上下前後の平面上のみに動かす。また、被験者は腕の力を抜いて腕を床方向に伸ばした状態から運動を開始し、指定した高さまで手先を持っていった時点で運動を終了する。このとき 0.5s ごとに音が鳴る機器を用いて音が鳴って次の音が鳴るまでに移動を行うようにした。運動は手先に何も持たない場合、手先に 2kg のダンベルを持つ場合、手先に 5kg のダンベルを持つ場合の 3 種でそれぞれ 4 回計測を行った。

計測された手先の全軌道と動きを Fig.1 に示す。(a) は手先に何も持たない場合、(b) は手先に 2kg の重りを持った場合、(c) は手先に 5kg の重りを持った場合の手先の移動軌道データを示している。(a) では移動完了点が肩より大きく前方にあり軌道は身体前方側に膨み、(b) では移動完了点が (a) より肩方向によっていて軌道が直線的な形、(c) ではさらに移動完了点は肩に近づき軌道は鉛直上方向に向かう直線という傾向が見られる。なお、軌道は肩を原点とする動座標系で提示した。

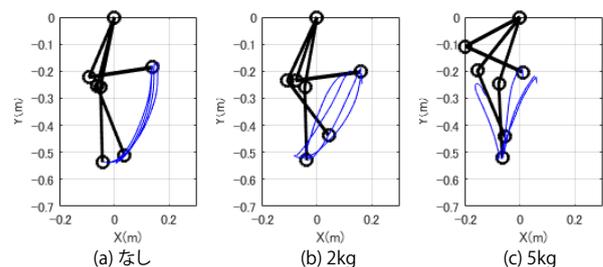


Fig.1 Arm motion and trajectory

2.2 運動の動力学解析

モーションキャプチャを用いて得られた上肢の長さを元として Fig.2 のように設定した。 \mathbf{x}_0 は肩、 \mathbf{x}_1 は肘、 \mathbf{x}_2 は手先位置を表している。 θ_1 を上腕の角度、 θ_2 を前腕の角度とし、2 リンク系の運動方程式を求める。2 リンクそれぞれの 2 次元方向と回転の

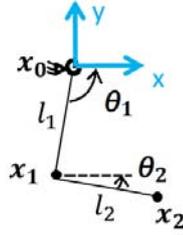


Fig.2 Arm link model

合計 6 つの運動方程式をまとめると以下のように書ける.

$$A(\theta)X = D \quad (1)$$

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2]^T \quad (2)$$

$$X = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad f_{1x} \quad f_{1y} \quad f_{2x} \quad f_{2y}]^T \quad (3)$$

$$D = \begin{bmatrix} m_1 \ddot{x}_{1g} \\ m_1 \ddot{y}_{1g} + m_1 g \\ I_1 \ddot{\theta}_1 + d_1 \dot{\theta}_1 - d_2 (\ddot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) \\ m_2 \ddot{x}_{2g} \\ m_2 \ddot{y}_{2g} + m_2 g \\ I_2 \ddot{\theta}_2 + d_2 (\ddot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

なお, $f_{1x}, f_{1y}, f_{2x}, f_{2y}$ はそれぞれの関節の内力, τ_1, τ_2 はそれぞれの関節のトルクを表す. 式 (1) より A の逆行列を左から乗じて

$$X = A^{-1}D \quad (5)$$

とすることで, 各リンクの関節に発生するトルク τ_1, τ_2 と内力 $f_{1x}, f_{1y}, f_{2x}, f_{2y}$ が導出できる.

まず, 上腕と前腕の長さはモーションキャプチャから 0.27m, 前腕長さ 0.29m とした. 逆運動学解析により関節角度を算出, ローパスフィルタを用いた差分法で微分を行うことで関節角速度 $\dot{\theta}$ と関節角加速度 $\ddot{\theta}$ を得た. 逆運動学解析により関節トルク τ を求めたものを Fig.3 に示す. (a) は重りを持たない場合, (b) は 2kg の重りを持つ場合, (c) は 5kg の重りを持つ場合を示す. (a) に比べて (b) では肩のトルクの最大値は大きく変動しないが, 肘のトルクの最大値は上がっている. (c) では肩のトルクが下がり, 肘のトルクはさらに大きくなっている. なお, (c) のうち身体後方へと移動してしまう軌道を通ったものが一つあり, 肩のトルクが負の値を示している紫色の線として表れている. これは身体後方へと持ち上げる場合, 肩では背中方向にトルクが働いた時前腕がぶら下がる形になることからトルクが小さくなるためである. (a),(b),(c) から, 持ち上げには肘のトルクより肩のトルクが小さくなるように動作を行っているといえる.

ここで計測結果の初期値と目標値から従来法である関節トルク変動最小化手法を用いた場合のトルクの微分値と, よくロボットの制御に利用される 5 次関数を用いた場合のトルクの微分値と計測から得られたトルクの微分値それぞれの時間変化のうち手先に 5kg の重りを持たせた場合のものを Fig.4 に示す. 重りを持たせない場合トルクの微分値が小さくなってしまい傾向がわかりづらいため, トルクの微分値の傾向がわかりやすい重り 5kg を持たせた場合を考えた. (a) が計測でのトルクの微分値, (b) が 5 次関数でのトルクの微分値, (c) がトルク変動最小化でのトルクの微分値である. なお, 計測値は誤差があり微分を行うと大きくなるため肩のスケールは他のグラフと変えて表示している. 手先が背中方向へ行ってしまった紫を例外として, 計測値では動作を開始してから動作終了までに肩肘ともにトルクの微分値が大きくなる山を 2 つ持っている. 5 次関数では山は 1 つでなだらかな形で, 肩では動作開始付近の値が大きく, 肘では動作終了付近の値が大きくなっている. 一方, トルク最小化は肩では右側の山しがあり肘では計測に近い形を持っている. 人間のトルク変動はトルク変動最小化手法のトルク変動と傾向が似ているため, トルク変

動最小化の動きをしていると考えられ, これは参考文献 [4] の結果と一致する.

3 逐次トルク変動最小化

上記の結果から, 人の動きはトルク変動最小化として得られていると判断できる. しかし, 一般にトルク変動を最小化するためには始点と終点が定められている必要があるが, 今回の設定では x 方向の位置を不定として運動をしているためこれをそのまま適用できない. そこで, 本研究では逐次トルク変動最小化手法を提案し, これを用いた人の運動のモデル化を行う. いま, 手先の初期位置 x_0 , 手先の最終高さ y_e , 初期時刻 t_0 , 要する時間 t_e を与えて, 手先の軌道を次式で定める.

$$x(t) = \alpha(t) \quad (6)$$

$$y(t) = b_0(t) + b_1(t)t + \dots + b_8(t)t^8 = B(t)t_8(t) \quad (7)$$

$$B(t) = [b_0(t) \quad b_1(t) \quad b_2(t) \quad \dots \quad b_8(t)] \quad (8)$$

これは x に関して時間の 0 次式, y に関して時間の 8 次多項式で表されているが, 各係数が時変であるため, 手先には自由度の高い複雑な軌道を許容する. ここで式 (7) に初期条件として初期高さ y_0 , 最終高さ y_e , 初期と終端での速度と加速度を次式で与える.

$$Y = B(t)T \quad (9)$$

$$Y = [y_0 \quad \dot{y}_0 \quad \ddot{y}_0 \quad y_e \quad \dot{y}_e \quad \ddot{y}_e] \quad (10)$$

$$T = [t_8(t_0) \quad \dot{t}_8(t_0) \quad \ddot{t}_8(t_0) \quad t_8(t_e) \quad \dot{t}_8(t_e) \quad \ddot{t}_8(t_e)] \quad (11)$$

初期条件式 (11) を満たすことから, 初期条件 Y を使って y 方向の位置関数の係数ベクトル $B(t)$ に拘束条件を与えると次式になる.

$$B(t) = YT^\# + \beta(t)T^\perp = B_0 + \beta(t)T^\perp \quad (12)$$

以上の式から時刻 t における手先の位置 x_t や速度 \dot{x}_t が以下のよう得られる.

$$x_t = \begin{bmatrix} \alpha(t) \\ (B_0 + \beta(t)T^\perp)t_8(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\dot{x}_t = \begin{bmatrix} \dot{\alpha}(t) \\ \dot{\beta}(t)T^\perp t_8(t) + (B_0 + \beta(t)T^\perp)\dot{t}_8(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

加速度 \ddot{x}_t は同様に速度を時間で微分することで得られる. ここで逆運動学から $\dot{\theta}$ と \ddot{x}_t の関係を求め, $\dot{\theta}$ を $\dot{\alpha}$ と $\dot{\beta}$ と 2 つに寄らない成分に分解すると以下の式が得られる.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \dot{\theta}_0 + \dot{\theta}_\alpha \dot{\alpha} + \dot{\theta}_\beta \dot{\beta}^T \quad (15)$$

式 (15) を式 (4) に代入すると以下の式が得られる.

$$D = D_0 + D_\alpha \dot{\alpha} + D_\beta \dot{\beta}^T = D_0 + D_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta}^T \end{bmatrix} \quad (16)$$

この関係から, トルク変化量を最小化する $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ には以下の式が成り立つ.

$$\begin{aligned} WX_k &= WA^{-1}D_0 + WA^{-1}D_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_k \\ \dot{\beta}_k^T \end{bmatrix} \\ &= WX_{k-1} \end{aligned} \quad (17)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

なお, 式 (18) の重み行列 W の成分 w_1, w_2 で肩と肘のどちらのトルクの変動を重視して最小化を行うかを設定する. また, 式 (17) を SR-Inverse[5] を用いて $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ について解くと以下の式が得られる.

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha}_k \\ \dot{\beta}_k^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} WA^{-1}D_{\alpha\beta} \\ \delta I \end{bmatrix}^\# \begin{bmatrix} -WA^{-1}D_0 - WX_{k-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

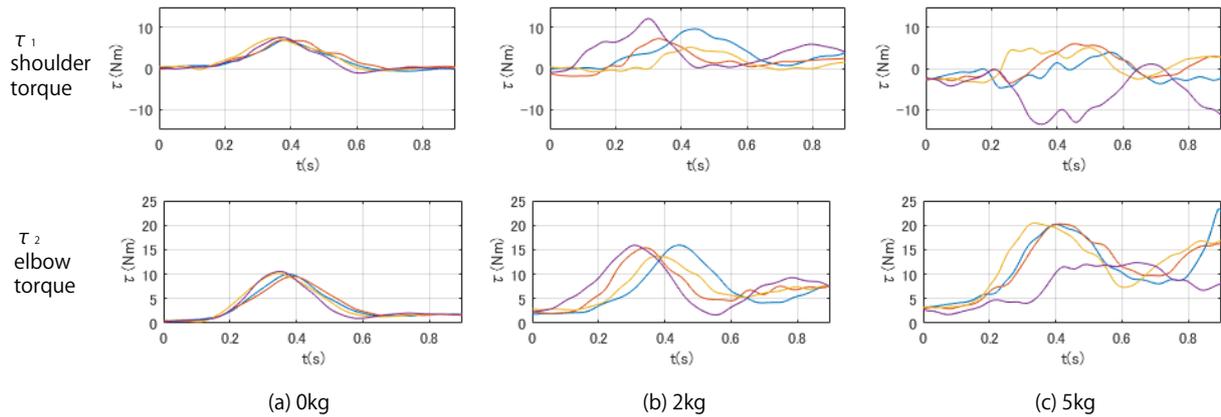


Fig.3 Torque of arm joints

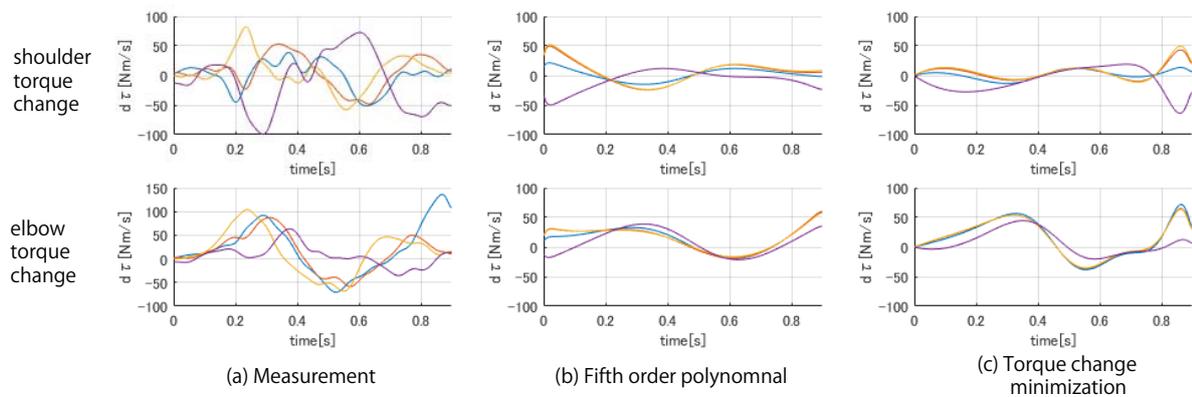


Fig.4 Arm torque change in each method (weight 5kg)

なお δ は重み定数である。また α, β は以下の式で更新する。

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + T\dot{\alpha}_k, \quad \dot{\alpha}_{k+1} = \dot{\alpha}_k + T\ddot{\alpha}_k \quad (20)$$

$$\beta_{k+1} = \beta_k + T\dot{\beta}_k, \quad \dot{\beta}_{k+1} = \dot{\beta}_k + T\ddot{\beta}_k \quad (21)$$

以上の方法を用いることで初期値 x, y と運動時間 t_e , y 軸方向のみの目標値を与えることでトルク変動を最小化しながら x 座標を自由に動く軌道を求める。

4 計測軌道と逐次トルク変動最小化軌道

計測から得られた初期値の座標 $(x_0, \dot{x}_0, \ddot{x}_0, y_0, \dot{y}_0, \ddot{y}_0)$ と移動完了位置の y 座標 $(y_e, \dot{y}_e, \ddot{y}_e)$ を使い上記の手法で最適な軌道を求めた。また、物理パラメータは計測と同じものを用いた。Fig.5 に (a) が手先に重りを持たない場合、(b) が手先に 2kg の重りを持つ場合、(c) が手先に 5kg の重りを持つ場合を示す。鎖線が実験で計測した軌道で実線がそれぞれの手法で計算した軌道となっている。また Fig.5 において重み行列成分は Table.1 のようにした。なお、重み行列 w_2 が 1 の状態で w_1 が 20 より大きくなってもほとんど変化が見られなかったため w_1/w_2 の最大値は 20 とした。(a) では右下方向に膨らむという計測と同様の傾向が見られる。一方、(b) では w_1 を 20 まで変化させても運動完了点にさがでいてしまったが計測と同じ軌道が直線に近い傾向が見られた。(c) では鉛直上方向への直線という計測と同じ傾向が見られた。例外として背中側に動いてしまった (c) の紫の線では肩より肘の重みが大きくすることで似た軌道が得られた。(a) に対して (b),(c) と重りを持つと重み行列の成分 w_1 が大きくなっている。これは、重りを持たない場合にはトルク変動は小さいために肩のトルク変動を重視しないが、重りを持つと肩のトルク変動を小さくするように動くためと考えられる。これらの結果から、提案す

Table 1 The weighting matrices of torque change

	number	w_1	w_2
(a)	all	1.2	1
(b)	all	20	1
(c)	except4 4(purple)	20 1	1 2.2

る逐次トルク変動最小化によって人に近い運動が生成されることが分かる。

5 ロボットへの実装

Fig.6 に示す平面 2 リンクマニピュレータを Fig.7 のように逐次トルク最小化手法で動作させた。各リンクの長さを人間の腕の長さと同じにすることで計測とほぼ同条件で制御を可能にした。また、各リンクは 60WDC モータ、速比 50:1 のハーモニックギアによって構成、エンコーダによって回転角度が計測される。サンプリングタイム 0.5msec で関節角度の PD フィードバック制御とトルクのフィードフォワード制御によりトルクの制御を行った。手先部分に重りを取り付けることが可能で何も持たない場合 (0kg)、重りを持つ場合 (2kg) の 2 種に関してそれぞれの軌道を動作させた。

ロボットが描いた軌道を Fig.8 に示す。(a) は重りを取り付けず重み w_1 を 1.2 として計算した軌道、(b) は重り 2kg を取り付け重み w_1 を 20 として計算した軌道となっている。また、赤の破線は計算値かつ目標値であり青の実線が動作時の値である。全

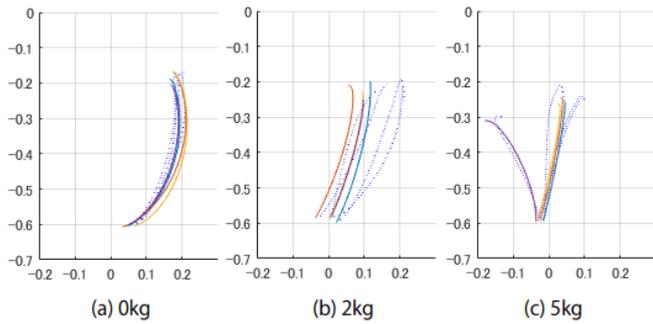


Fig.5 Track of successively minimum torque-change motion and measurement



Fig.6 Two-degree-of-freedom robot

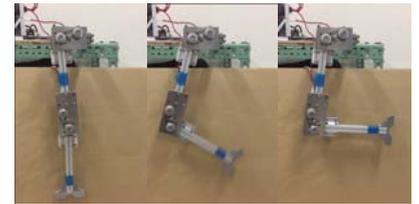


Fig.7 Snapshot of lift operation

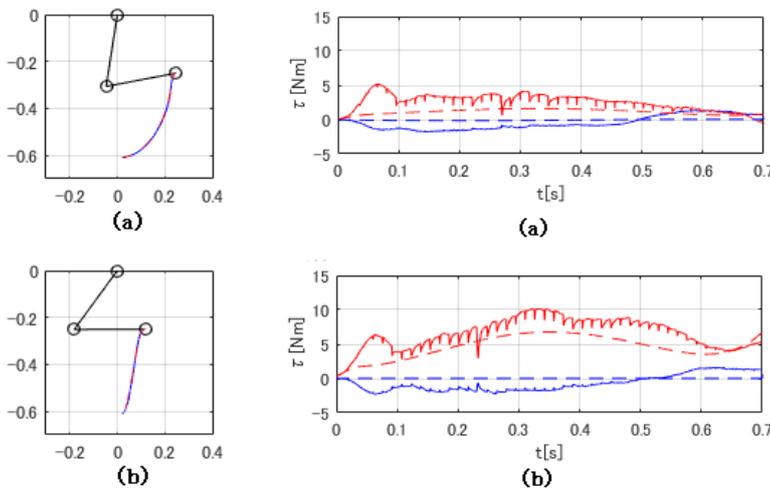


Fig.8 Trajectory of robot

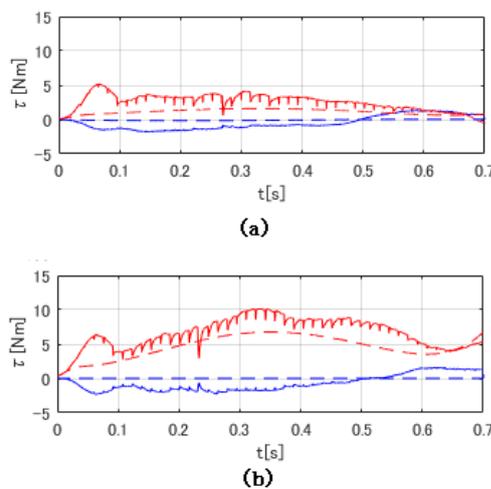


Fig.9 Torque of robot

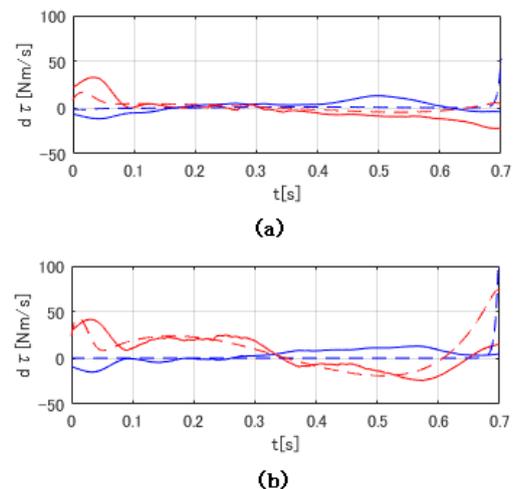


Fig.10 Torque change of robot

の場合において破線と実線は一致しており、ロボットが計算軌道と同様に動いたと言える。

各関節の出力トルクを Fig.9 に示す。(a) は重りを取り付けず重み w_1 を 1.2 とし、(b) は 2kg の重りを取り付け重み w_1 を 20 とした。破線が計算値かつフィードフォワード制御で与えたトルクで実線がそれにフィードバック値を加算した動作時の値を示す。また、赤い線が肘部分の関節トルクを表し青い線が肩部分の関節トルクを表している。(a)(b) ともに実線と破線の差はほぼ同一であり、これはロボットのモデル化誤差が原因であると考えられる。

各関節の出力トルクの変化量を Fig.10 に示す。(a) は重りを取り付けず重み w_1 を 1.2 とし、(b) は 2kg の重りを取り付け重み w_1 を 20 とした。破線が計算値かつフィードフォワード制御で与えたトルクを微分した値、実線が計算値にフィードバック値を加算した動作時のトルクをローパスフィルタを用いて微分した値を示す。また、赤い線が肘部分の関節トルクを表し青い線が肩部分の関節トルクを表している。(a)(b) ともに実線は破線に比べて大きいものの概形はほぼ同一であるため、本手法によりトルク変動を最小化した運動が実現可能であることが理解できる。

6 おわりに

本研究では、計測よりトルク変動最小手法を実証、それを基にした目標位置が定まっていない条件での運動の最適化手法として逐次トルク変動最小化手法を提案し、実際の運動との比較検証を行った。逐次で最適化を行う手法で人間の運動の冗長性を入れた関節トルク変動最小というモータを使うロボットの最適化手法で人の運動に近づくことができた。本研究では xy 座標上で x 方向のみ目標値のない運動を取り扱った。しかし、実際の人の運動では運動時間が指定されないなどの様々な自由度がある。運動時

間を取り扱う場合、運動の終了時間を評価関数に入れることが挙げられる。このように条件と自由度を増やしていき、様々な条件で最適な軌道が作られるようになったとき、ロボットはロボットの身体での新たな生物らしさを持った動きが可能であると予想される。

また、自然さや生物らしさのためにロボットを逐次トルク変動最小化を用い制御することでロボットがどのような印象を与えられるのかを調べる必要がある。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤 C)、「運動の誤差感度解析に基づく投擲の最適化と教示」の支援を受けた。

参考文献

- [1] 柴田, 猪岡: 評定尺度法によるロボット運動の心理的評価, 人間工学, vol31 No26,151-159 (1995)
- [2] 鈴木, 大村: Jerk 最小モデルに基づく指さし動作予測の印象評価, 情報処理学会 インタラクシオン, 249-254 (2013)
- [3] Flash T. & Hogan N.: The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model, *J. NeuroSci.*, 5, 1688-1703 (1985)
- [4] Uno Y., Kawato M. & Suzuki R.: Formation and control of optimal trajectory in human multijoint
- [5] Y. Nakamura and H. Hanafusa: Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control.*, Vol. 108, 163-171 (1986)