

腕を含む体の到達運動を再現する最適制御モデルの構築

片場 翔太^{*1}, 花岡 幸司^{*2}, 松井 利一^{*3}

Optimal Control Model for Reproducing Human Body's Reaching Movements Including Arm

Shouta KATABA^{*1}, Koji HANAOKA^{*2}, Toshikazu MATSUI^{*3}

^{*1*2*3} Graduate School of Science and Technology, Gunma University
29-1 Honcho, Ota-shi, Gunma 373-0057, Japan

This paper formulates an optimal control model that reproduces human whole-body reaching movements with cooperation between arm and body. The model consists of four links (an arm, an upper body, a thigh, and a lower leg) and four joints (shoulder, hip, knee, and ankle joints), and minimizes the sum of square of torque-change integrated over the movement duration. This paper applies the proposed model to reproducing whole-body movements with cooperation between rising and reaching movements, and clarifies its performance and factors indispensable in reproducing the same whole-body movements as humans. Consequently, the following results are shown: (1) the input weight R_{44} of the model's shoulder joint affects the way of cooperation between the model's arm and body in the optimally-predicted whole-body reaching movements; (2) smaller (or larger) values of R_{44} expand (or narrow) the range of swing back of the model's arm in the optimally-predicted movements; (3) the optimal movement predicted at a large value of R_{44} agrees well with the experimental one; (4) a decrease in the input weight of R_{44} causes a decrease in the magnitude of the model's hip-joint torque. These results suggest that the proposed model is effective in simulating whole-body reaching movements with cooperation between arm and body and that the input weight R_{44} can be a factor involved strongly in the way of cooperation between arm and body.

Key Words : Arm, Body, Cooperation, Whole-body reaching movements, Optimal control model, Swing back, Weight

1. 緒 言

ヒトの動作は、腕や体だけでなく両者が協調した動作を行う場合が多い。例えば、腕と体の両方を動かして遠くの物体に手を伸ばすという腕と体の協調に基づく全身到達運動はヒトが行う代表的な運動の一つである⁽¹⁾。しかし、腕と体の協調様式を理論的にシミュレート可能な最適制御モデルなどの数理的モデル化の研究は見当たらない。ヒト腕の到達運動に関しては、躍度最小モデル⁽²⁾、トルク変化最小モデル⁽³⁾⁽⁴⁾、エネルギー最小モデル⁽⁵⁾⁽⁶⁾、分散最小モデル⁽⁷⁾などの2関節腕最適制御モデルや手関節のフリージング機構とエネルギー最小化を特徴とする3関節腕最適制御モデル⁽⁸⁾が提案され、最適化規範やヒト腕運動制御機構の解明に利用されている。我々は、ヒトの椅子からの立ち上がり動作や椅子への座り動作に関してもその制御法則やメカニズムの解明に数理的モデル化の研究が役立つと考え、上体と大腿と下腿からなる3リンク3関節機構のダイナミクス切替え型最適制御モデルを構築し、実測立ち上がり動作や座り動作の理論的再現が可能であること、各動作を再現するための最適条件が存在することを既に明らかにした⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。上記の従来結果を組み合わせ、腕と体の協調に基づく全身到達運動を再現する最適制御モデルに発展させることが可能になれば、どのような規範に基づいて腕と体の協調到達運動が実現されているのかという基本的動作メカニズムを探ることが可能になるだけでなく、跳躍運動や歩行運動などのより複雑な腕と体の協調動作を再現するための基礎が確立できるという観点、およびリハビリ機器や介助機器の最適設計への応用可能性という観点からも意義がある。

^{*1*2} 群馬大学理工学研究院 (〒373-0057 群馬県太田市本町 29-1)

^{*3} 正員, 群馬大学理工学研究院 (〒373-0057 群馬県太田市本町 29-1)

E-mail: matsui@gunma-u.ac.jp

上記観点から本研究では、腕と体の協調到達運動を再現可能とする最適制御モデルを提案する。具体的には、4リンク（腕、上体、大腿、下腿）4関節（肩関節、股関節、膝関節、足関節）構造を持ち、トルク変化最小規範に基づく評価関数を最適化する。そして、提案モデルを立ち上がりながら行う腕の到達運動に適用し、提案モデルが腕と体の協調到達運動の実測結果を理論的に再現可能にするかどうかを検証すると同時に、ヒトと同様の協調到達運動を実現するのに必要な要因について検討する。その結果、(1)肩関節の入力重みに依存して腕と体の協調特性の異なる最適立ち上がり動作が生成されること、(2)肩関節入力重みが小さい（大きい）場合、最適立ち上がり動作における腕の振りが大きく（小さく）なること、(3)肩関節入力重みが大きい場合の最適立ち上がり動作が実測動作と良く一致すること、(4)肩関節入力重みが小さくなるほど、股関節トルクの大きさが減少することが示される。上記結果は、提案モデルが腕と体の協調到達運動をシミュレートするのに有効な数理モデルであり、腕と体の協調動作が腕の動き易さに依存することを示唆する。以下では、まず腕を含む体を4リンク4関節構造で表した最適制御モデルの定式化を行う。次に、提案モデルを立ち上がりながら行う腕の到達運動再現に適用し、肩関節の入力重みが再現軌道や腕と体の協調様式に及ぼす影響を明らかにし、実測動作を再現するのに必要な要因について検討する。さらに、腕と体の協調様式と関節トルクの関係も検討する。最後に考察を加える。

2. 腕を含む体の4リンク4関節構造最適制御モデル

図1に示されるように、腕と上体（腰から頭まで）と大腿と下腿からなる4リンク4関節機構モデルが、垂直面内で腕を含む体全体の到達運動を行う場合の運動方程式は以下で表せる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h} + \mathbf{g} + \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (1)$$

$$M_{11} = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + 2\beta_{12} \cos \theta_2 + 2\beta_{13} \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2\beta_{14} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 2\beta_{23} \cos \theta_3 + 2\beta_{24} \cos(\theta_3 + \theta_4) + 2\beta_{34} \cos \theta_4$$

$$M_{12} = M_{21} = J_2 + J_3 + J_4 + \beta_{12} \cos \theta_2 + \beta_{13} \cos(\theta_2 + \theta_3) + \beta_{14} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 2\beta_{23} \cos \theta_3 + 2\beta_{24} \cos(\theta_3 + \theta_4) + 2\beta_{34} \cos \theta_4$$

$$M_{13} = M_{31} = J_3 + J_4 + \beta_{13} \cos(\theta_2 + \theta_3) + \beta_{14} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \beta_{23} \cos \theta_3 + \beta_{24} \cos(\theta_3 + \theta_4) + 2\beta_{34} \cos \theta_4$$

$$M_{14} = M_{41} = J_4 + \beta_{14} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \beta_{24} \cos(\theta_3 + \theta_4) + \beta_{34} \cos \theta_4$$

$$M_{22} = J_2 + J_3 + J_4 + 2\beta_{23} \cos \theta_3 + 2\beta_{24} \cos(\theta_3 + \theta_4) + 2\beta_{34} \cos \theta_4$$

$$M_{23} = M_{32} = J_3 + J_4 + \beta_{23} \cos \theta_3 + \beta_{24} \cos(\theta_3 + \theta_4) + 2\beta_{34} \cos \theta_4$$

$$M_{24} = M_{42} = J_4 + \beta_{24} \cos(\theta_3 + \theta_4) + \beta_{34} \cos \theta_4$$

$$M_{33} = J_3 + J_4 + 2\beta_{34} \cos \theta_4, \quad M_{34} = M_{43} = J_4 + \beta_{34} \cos \theta_4, \quad M_{44} = J_4$$

$$h_1 = -\beta_{12} \sin \theta_2 \left[\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \right] - \beta_{13} \sin(\theta_2 + \theta_3) \left[2(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \dot{\theta}_1 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \right] - \beta_{14} \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \left[2(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \dot{\theta}_1 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)^2 \right] - \beta_{23} \sin \theta_3 \left[2\dot{\theta}_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + \dot{\theta}_3^2 \right] - \beta_{24} \sin(\theta_3 + \theta_4) \left[2(\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)^2 \right] - \beta_{34} \sin \theta_4 \left[2\dot{\theta}_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + \dot{\theta}_4^2 \right]$$

$$h_2 = \beta_{12} \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1^2 + \beta_{13} \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot \dot{\theta}_1^2 + \beta_{14} \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cdot \dot{\theta}_1^2 - \beta_{23} \sin \theta_3 \left[2\dot{\theta}_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + \dot{\theta}_3^2 \right] - \beta_{24} \sin(\theta_3 + \theta_4) \left[2(\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + (\dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)^2 \right] - \beta_{34} \sin \theta_4 \left[2\dot{\theta}_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + \dot{\theta}_4^2 \right]$$

$$h_3 = \beta_{13} \sin(\theta_2 + \theta_3) \cdot \dot{\theta}_1^2 + \beta_{14} \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cdot \dot{\theta}_1^2 + \beta_{23} \sin \theta_3 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2$$

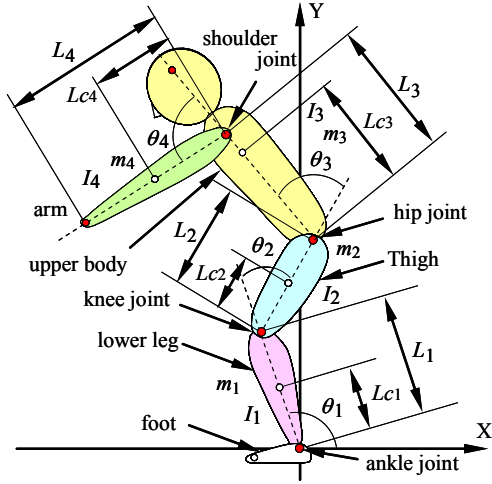


Table 1 Dynamics parameters of the human body used for simulations.

parameter	link1	link2	link3	link4
L_i (m)	0.379	0.486	0.432	0.710
L_{ci} (m)	0.216	0.277	0.298	0.270
m_i (kg)	3.286	7.068	26.66	8.06
I_i ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.246	0.724	4.965	0.00016
D_i (kgm^2/s)	0.440	1.050	3.750	0.370

Fig. 1 A four-link and four-joint model for the human body.

$$\begin{aligned}
& + \beta_{24} \sin(\theta_3 + \theta_4) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - \beta_{34} \sin \theta_4 \left[2\dot{\theta}_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + \dot{\theta}_4^2 \right] \\
h_4 &= \beta_{14} \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
g_1 &= \alpha_1 g \cos \theta_1 + \alpha_2 g \cos(\theta_1 + \theta_2) + \alpha_3 g \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \alpha_4 g \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
g_2 &= \alpha_2 g \cos(\theta_1 + \theta_2) + \alpha_3 g \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \alpha_4 g \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
g_3 &= \alpha_3 g \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \alpha_4 g \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
g_4 &= \alpha_4 g \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)
\end{aligned}$$

ここで、足関節と膝関節と腰関節と肩関節の角度及びトルクを $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ 、慣性行列、遠心力・コリオリ力、粘性抵抗力を各々 $M, h, D\theta$ 、下腿と大腿と上体（股関節から頭まで）と腕の質量を m_1, m_2, m_3, m_4 、下腿と大腿と上体（股関節から肩関節まで）と腕の長さを L_1, L_2, L_3, L_4 、足関節から下腿重心までの距離と膝関節から大腿重心までの距離と腰関節から上体（胴体と頭）重心までの距離と肩関節から腕重心までの距離を $L_{c1}, L_{c2}, L_{c3}, L_{c4}$ 、下腿と大腿と上体（胴体と頭）と腕の重心周りの慣性モーメントを I_1, I_2, I_3, I_4 、足関節と膝関節と股関節と肩関節の粘性係数を D_1, D_2, D_3, D_4 、重力加速度を $g (=9.8 \text{ m/sec}^2)$ とした。表 1 に身体のダイナミクスパラメータ $m_i, L_i, L_{ci}, I_i, D_i$ ($i=1\sim 4$) を示す。これらは、文献(11)~(14)を参考にし、被験者の体重や各部の長さに基づいて推定した。式(1)を状態方程式で表わすと以下となる。

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ -M^{-1}(h + g + D\dot{\theta}) + M^{-1}\tau \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \\ I \end{bmatrix} u = A(x) + Bu \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
x &= [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4]^T \\
\theta &= [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T, \quad \tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4]^T, \quad u = \tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4] \\
I &: 4 \times 4 \text{ 単位行列}
\end{aligned}$$

腕と体の協調動作を伴う全身到達運動を再現する最適制御モデルは、4リンク4関節機構の運動方程式（式(2)）を拘束条件として、次のトルク変化最小規範に基づく評価関数が最適化されるように軌道が計画される。

$$J = \{x(t_f) - x_f\}^T Q \{x(t_f) - x_f\} + \int_0^{t_f} u^T R u dt \quad (3)$$

ここで、式(3)の第一項は到達誤差項、 t_f は全運動時間、 $x_f, x(t_f)$ は各々到達目標値と時刻 $t=t_f$ での状態変数値、 Q, R は各々 $12 \times 12, 4 \times 4$ の対角行列形式の重み行列である。拡張評価関数 J^* の第一変分 $\delta J^* = 0$ が式(3)の最適化の為の必要条件であり、通常最適制御問題の場合と同様に、変分法を用いて解くことが可能である。具体的には、ハミルトン関数を

$$H(x, u, \lambda) = u^T R u + \lambda^T (A(x) + Bu) \quad (4)$$

と定義すれば、この時の最適制御入力

$$H/\partial u = 0 \quad (5)$$

により決定される。最適軌道は、式(5)の最適制御入力の下で以下の方程式

$$\dot{x} = \partial H/\partial \lambda, \quad \dot{\lambda} = -\partial H/\partial x \quad (6)$$

を満足する軌道として求められる。ここで、 λ は12次元随伴ベクトルである。良く知られている様に、式(6)は変数 x と λ に関する非線形連立微分方程式となるので、以下の境界条件

$$x(0) = x_0, \quad \lambda(t_f) = 2Q\{x(t_f) - x_{tf}\} \quad (7)$$

の下で多点境界値問題として解くことが可能である。 $x_0, x(t_f)$ は各々時刻 $t=0$ での境界条件と状態変数値である。初期状態 x_0 の中の関節初期トルクは、初期状態の姿勢を維持するのに必要なトルクとして計算した。具体的には、運動方程式(式(1))において角速度と角加速度を0にして計算した。上記多点境界値問題は広義ニュートン法を用いて解くことが可能である。

3. 腕を含む体の到達運動再現

3.1 腕を含む体の到達運動の実測

図2は、腕を含む体の到達運動の軌道を実測する為の実験システムである。被験者の首と肘を固定することにより、腕と上体(頭部、胴体)と上腿と下腿の4リンク及び、肩関節と股関節と膝関節と足関節の4関節のみが動ける状態にした。被験者は、腕を前方斜め下に伸ばした中腰姿勢を初期状態とし、側面に設置された平面ボードに埋め込まれた緑色LEDの点灯を合図にして立ち上がりながら手先を目標点に到達させる2種類の運動(立ち上がり到達運動)を実行した。第一は、手先を膝の近くに置いた初期状態から肩とほぼ同じ高さの目標点まで到達させる立ち上がり到達運動であり、第二は、手先を床の近くに置いた初期状態から頭とほぼ同じ高さの目標点まで到達させる第一の運動よりも大きな立ち上がり到達運動である。手先を目標位置に到達させる以外の指示は行わなかった。被験者のつま先と足関節と膝関節と股関節と肩関節と手先と頭部には赤色LEDが取り付けられており、立ち上がり到達運動の開始から終了までの各LEDの軌道は、側面に設置されたデジタルビデオカメラ(60 frames/sec)で撮影し、画像解析を行うことにより導出された。被験者の足関節の位置を座標原点とした。被験者は2人(A.O., S.K.)であり、2種類の立ち上がり到達運動を各10回ずつ行った。実験は暗室の中で行った(LEDのみ見える状態)。各LEDの位置は、デジタルビデオカメラ画像を画像解析することにより算出し、LEDの位置関係から足関節と膝関節と股関節と肩関節の角度を導出した。この4つの関節角度データを1/60 secから1 msec間隔のデータに増やす為に、始点と終点の関節角度と関節角速度を保存する条件を付加した最小2乗法を用いて多項式近似を行い、データを補間した。関節角速度、角加速度、接線方向速度は補間データを微分して導出した。

図3は、撮影ビデオ画像から画像処理により導出した軌道を示す。図3(a)は手先と肩関節と頭部先端と股関節と膝関節の軌跡、(b)は肩関節角度と股関節角度と膝関節角度と足関節角度の時間変化特性、(c)は手先の接線方向速度の時間変化特性であり、(1)と(2)はそれぞれ被験者A.O.の第一立ち上がり到達運動、被験者S.K.の第二立ち上がり到達運動を表し、各々10回分の実測結果が重ねられている。図3から分かる様に、腕運動制御機構と体運動制御機構は独立機構と考えられるが、立ち上がり到達運動では両機構が協調して目的動作を実現させている。

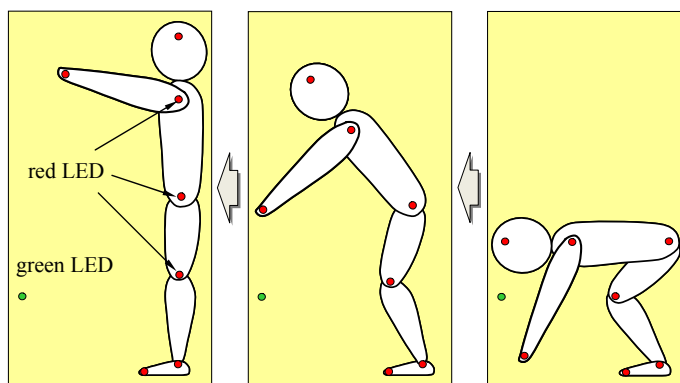
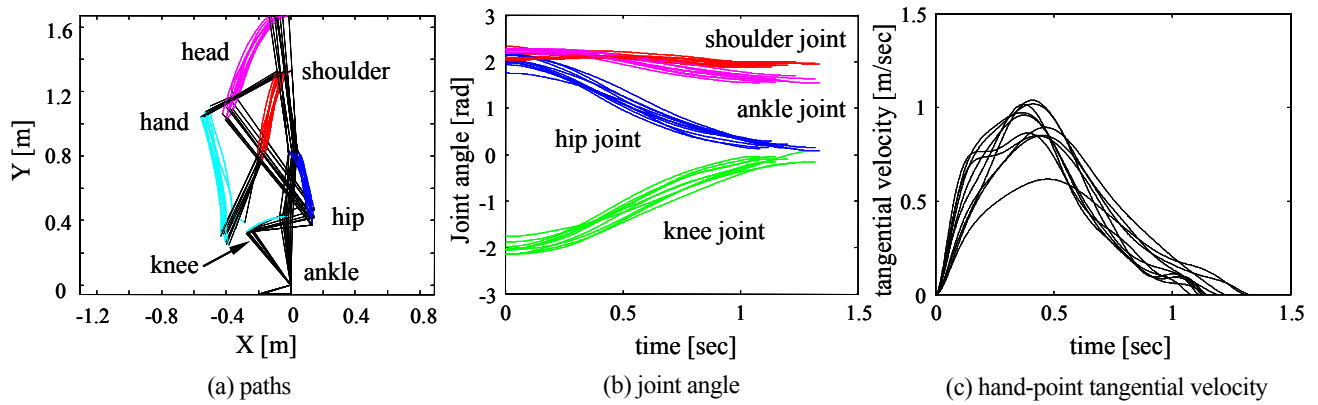
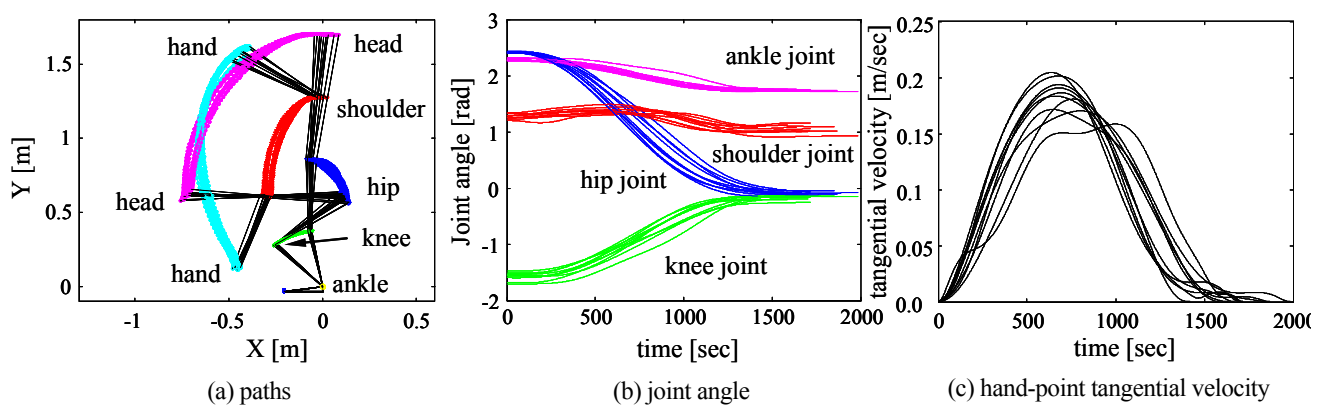


Fig.2 Experimental setup for measuring human whole-body reaching movements.



(1) first whole-body reaching movement characteristics (subject: A.O.)



(2) second whole-body reaching movement characteristics (subject: S.K.)

Fig. 3 The first and second whole-body reaching movement characteristics measured experimentally.

3・2 立ち上がり到達運動再現軌道に及ぼす入力重みの影響

図4は、肩関節に関する入力重み R_{44} (重み行列 R の対角成分) をパラメータとして多点境界値問題 (式(6)) を解くことにより導出された立ち上がり到達運動の再現軌道を重ねて表示したものであり、図4(a)は手先と肩関節と頭部先端と股関節と膝関節の軌跡、(b)は肩関節角度と股関節角度と膝関節角度と足関節角度の時間変化特性、(c)は手先の接線方向速度の時間変化特性である。図5は、図4(a)の結果を見やすくする為に、立ち上がり到達運動の姿勢を 100 [msec]毎の時間間隔で並べたものである。但し、被験者 A.O.の第一立ち上がり到達運動の場合である。計算では、立ち上がり到達運動の1つの実測結果から導出した初期姿勢 ($t=0$) と最終姿勢 ($t=t_f$) に於ける足関節、膝関節、股関節、肩関節の角度 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) を式(7)の境界条件に代入し、式(6)の多点境界値問題を広義ニュートン法を用いて解いた。また本研究では、状態変数の到達目標値 \mathbf{x}_f に於いて、関節角度 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) は実測結果から導出し、関節角速度は $\dot{\theta}_1=\dot{\theta}_2=\dot{\theta}_3=\dot{\theta}_4=0$ とし静止するものと設定した。また、到達目標値 \mathbf{x}_f の関節トルク ($\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$) は、運動方程式 (式(1)) において角速度と角加速度を0にして計算した。従って、関節角度に関してのみ終端条件を自由とし、その他の8要素に関しては終端条件を固定にして最適化を行ったので、重み行列 Q の要素は第一から第四までの対角要素 $Q_{11}, Q_{22}, Q_{33}, Q_{44}$ だけであり、他の要素は0とした。具体的には $Q_{11}=Q_{22}=Q_{33}=Q_{44}=10^8$ と設定した。重み行列 R の他の要素値は $R_{11}=R_{22}=R_{33}=1.0$ 、運動時間は $t_f=1231$ msecであった。図4, 5から、以下の結果が得られた。

- (1) 肩関節の入力重みが $R_{44}=1$ の場合、立ち上がり到達運動の理論的生成は可能であるが、実測立ち上がり到達運動とは異なり、腕を後方に振ってから前方に振り戻すことにより手先を目標位置に到達させた。これに伴い、手先接線方向速度には2つのピークが生じた。
- (2) 肩関節の入力重み R_{44} を大きくする程、腕を後方に振る動作が小さくなり、実測動作に近い立ち上がり到達運動の理論的生成が可能であった。これに伴い、手先接線方向速度のピークは2つから1つに変化した。

(3) 実測動作とほぼ同様の立ち上がり到達運動が再現可能な肩関節の入力重み R_{44} が存在した。

結果(1)は、肩関節の入力重みが他の入力重みと同じ場合 ($R_{11}=R_{22}=R_{33}=R_{44}=1.0$)、本提案の最適制御モデルの評価関数 (式(3)) を最適化する運動が、実測立ち上がり到達運動とは異なり、腕を後方に振り出す動作を伴う立ち上がり到達運動であること、即ち、この条件では本提案モデルは実測立ち上がり到達運動を理論的に再現しないことを意味する。結果(2)は、本提案モデルが実測立ち上がり到達運動と同様に腕の後方振り出し動作をなくすためには肩関節に関する入力重み R_{44} を増加させることが必要、即ち、腕制御機構と体制御機構を同様に扱うことはできないことを意味する。肩関節の入力重みを増加させることにより、肩関節への入力 (トルク変化) を減少させ、腕の動かし方を様々に制御することが可能になる。即ち、肩関節の入力重みにより腕と体の協調特性を様々に変化させることが可能である。腕制御機構と体制御機構を同様に扱うことはできないのは、主に両者の物理パラメータの違い、腕運動制御機構と体運動制御機構の独立性、及び、腕は体よりも器用に動かせるという本質的機能の違いによると考えられる。結果(3)は、肩関節の入力重み R_{44} を適切に設定することにより、本提案モデルが実測立ち上がり到達運動を理論的に再現する能力を持つこと、即ち、本モデルの有効性を意味する。

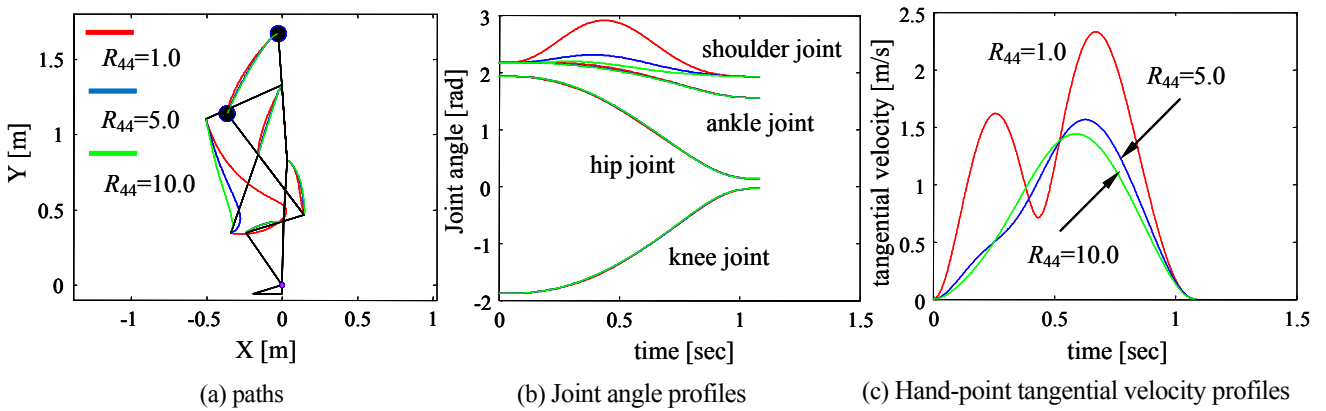


Fig.4 Whole-body reaching movement characteristics reproduced as a parameter of the input weight R_{44} .

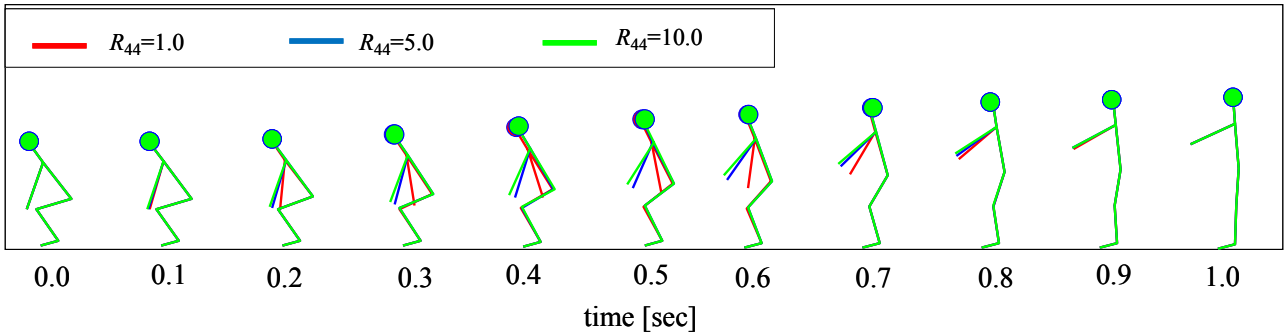


Fig.5 Series of the whole-body reaching postures calculated every 100 msec as a parameter of the input weight R_{44} .

図6は、肩関節に関する入力重み R_{44} (重み行列 \mathbf{R} の対角成分) をパラメータとして多点境界値問題 (式(6)) を解くことにより導出された被験者 S.K. の第二立ち上がり到達運動の再現軌道を重ねて表示したものであり、図6 (a)は手先と肩関節と頭部先端と股関節と膝関節の軌跡、(b)は肩関節角度と股関節角度と膝関節角度と足関節角度の時間変化特性、(c)は手先の接線方向速度の時間変化特性である。図7は、図6 (a)の結果を見やすくする為に、立ち上がり到達運動の姿勢を 100 [msec]毎の時間間隔で並べたものである。計算方法は、図4、5の場合と同じである。重み行列 \mathbf{Q} は、 $Q_{11}=Q_{22}=Q_{33}=Q_{44}=10^8$ 、他の要素は0であり、重み行列 \mathbf{R} の他の要素は $R_{11}=R_{22}=R_{33}=1.0$ 、運動時間は $t_f=1417\text{msec}$ であった。図6、7から、以下の結果が得られた。

- (1) 肩関節の入力重みが $R_{44}=1$ の場合、立ち上がり到達運動の理論的生成は可能であるが、実測立ち上がり到達運動とは異なり、腕を後方に振ってから前方に振り戻すことにより手先を目標位置に到達させた。これに伴い、手先接線方向速度には2つのピークが生じた。
- (2) 肩関節の入力重み R_{44} を大きくする程、腕を後方に振る動作が小さくなり、実測動作に近い立ち上がり到達運動の理論的生成が可能であった。これに伴い、手先接線方向速度のピークは2つから1つに変化した。
- (3) 実測動作とほぼ同様の立ち上がり到達運動が再現可能な肩関節の入力重み R_{44} が存在した。
- (4) 腕を後方に振る動作は、図4、5の結果よりも拡大された。

以上の結果から、図4、5の場合よりも動作を大きくした立ち上がり到達運動の場合にも、本提案モデルはそれらの理論的生成が可能であり、動作が大きくなると腕を後方に振り出す動作も拡大されることが理解される。図8は、実測立ち上がり到達運動とその最適再現運動の姿勢を100 [msec]毎の時間間隔で重ねたものであり、実測動作が比較的良好に再現できることが分かる。

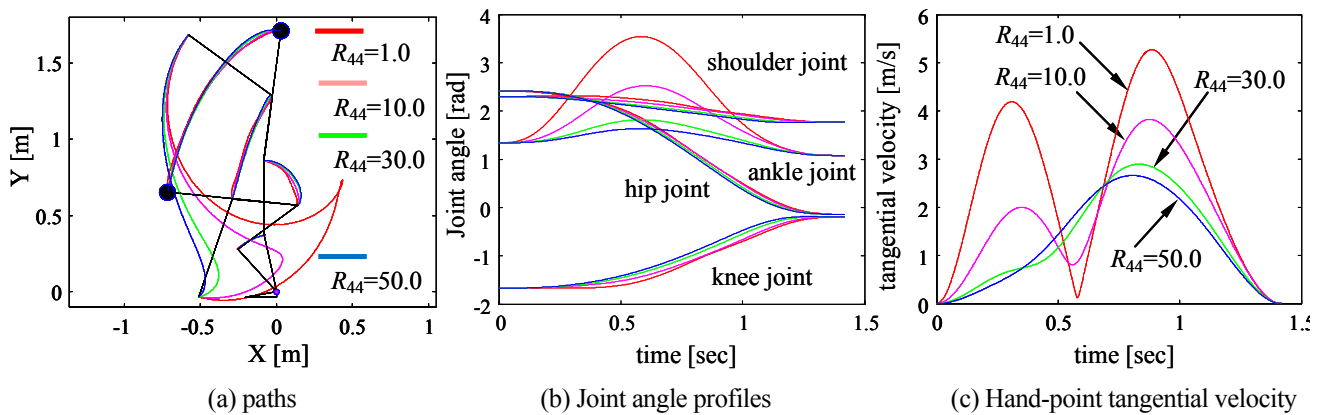


Fig.6 Whole-body reaching movement characteristics reproduced as a parameter of the input weight R_{44} .

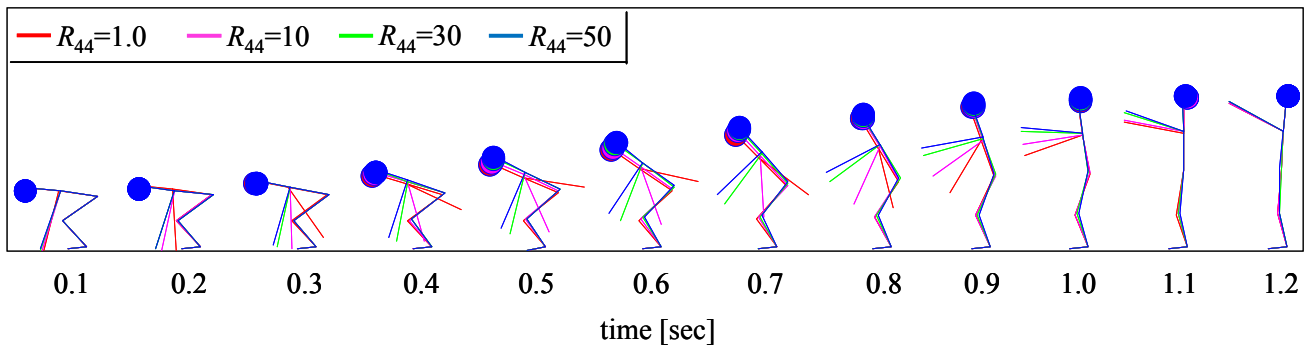


Fig.7 Series of the whole-body reaching postures calculated every 100 msec as a parameter of the input weight R_{44}

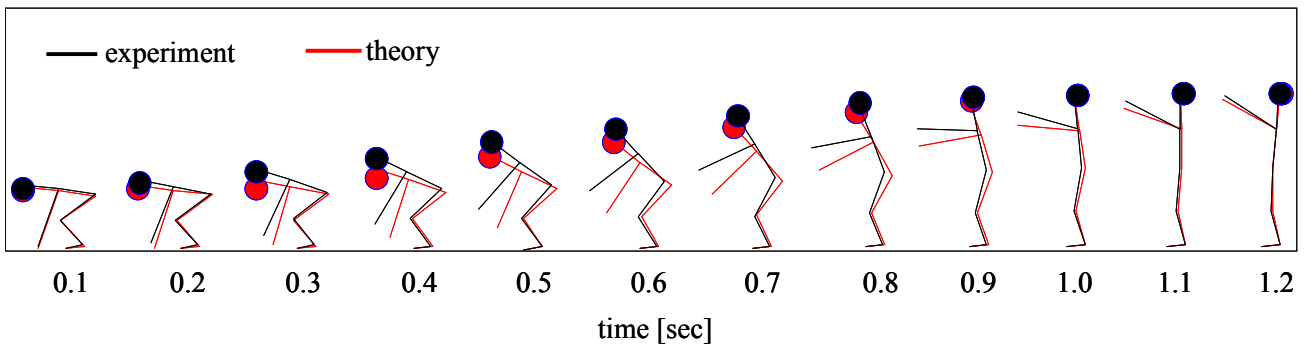


Fig.8 Comparison between experimental-measured and optimally-reproduced theoretical whole-body reaching postures every 100 msec.

3・3 腕と体の協調特性が関節トルクに及ぼす影響

図9は、肩関節に関する入力重み R_{44} (重み行列 R の対角成分) をパラメータとして多点境界値問題 (式(6)) を解くことにより導出された被験者 S.K. の第二立ち上がり到達運動の再現軌道において、各関節トルクの時間変化特性を重ねて表示したものである。計算方法は、図5～8の場合と同じである。重み行列 Q は、 $Q_{11}=Q_{22}=Q_{33}=Q_{44}=10^8$ 、他の要素は0であり、重み行列 R の他の要素は $R_{11}=R_{22}=R_{33}=1.0$ 、運動時間は $t_f=1417$ msec であった。図9から、以下の結果が得られた。

- (1) 関節トルクの最大値 (絶対値) は、股関節、足関節、膝関節、肩関節の順に小さくなった。
- (2) 肩関節の入力重み R_{44} の減少に伴い、股関節トルクと足関節トルクの最大値 (絶対値) は減少し、股関節トルクの方が減少量は大きかった。
- (3) 肩関節の入力重み R_{44} の減少に伴い、膝関節トルクと肩関節トルクの最大値 (絶対値) は増加した。

結果(1)は、立ち上がり到達運動では、股関節、足関節、膝関節、肩関節の順に負担が減少することを意味する。スクワット運動などと比較して膝関節トルクが小さいが⁽¹⁵⁾、これは、到達運動による腕の振り上げ動作が膝関節トルクを減少させる効果をもたらしていると考えられる。結果(2)は、腕を後方に振り出してから立ち上がり到達運動を行なうことが股関節トルクと足関節トルクを減少させる効果をもたらし、股関節トルクの方がより大きく減少することを意味する。結果(3)は、立ち上がり到達運動はスクワット運動などと比較して膝関節トルクを減少させる効果を持つが、腕を後方に振り出す動作はこの効果を弱める方向に働くことを意味する。肩関節トルクの増加は、腕の後方への振る余計な動作が追加されたからである。

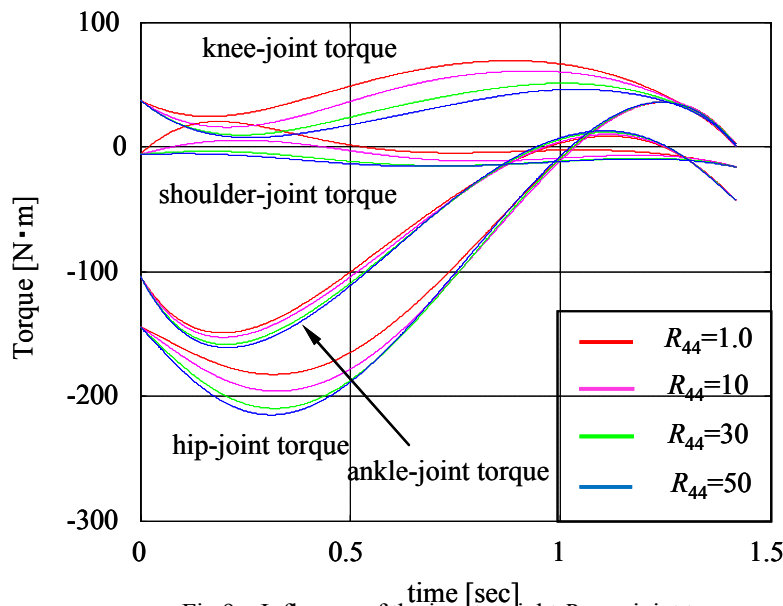


Fig.9 Influence of the input weight R_{44} on joint torques.

4. 考察

3.において、提案モデルの肩関節入力重み R_{44} を他の対角要素値 ($R_{11}=R_{22}=R_{33}=1.0$) と同じ値にした場合には、腕を後方に振り出してから前方への到達運動を行う最適立ち上がり到達運動が理論的に生成され、実測軌道とは異なる結果が得られること、及び、実測軌道と同様に腕の後方振り出しを伴わない立ち上がり到達運動を再現するには、肩関節の入力重み R_{44} を増加させる必要があることが示された。しかし、実測においても腕の後方振り出しを伴う立ち上がり到達運動を行う可能性はあり得ると考えられる。たとえば立ち幅跳びや垂直跳びなどでは、腕を後方に振り出す動作が距離や高さを伸ばすことに貢献している。同様に、立ち上がり到達運動の場合も被験者への教示法を変えれば腕を後方に振り出す可能性が考えられる。図9では、腕の後方振り出しを伴わない立ち上がり到達運動でも、腕を体に固定して行ったスクワット運動よりも膝関節トルクの減少が見られた。従って、関節への負担をできるだけ小さくする立ち上がり到達運動を実現するように教示すれば、股関節トルクを減少さ

せる立ち上がり到達運動を実現するために腕を後方に振り出す可能性は十分期待できる。即ち、ヒトは、腕の動かし方（腕と体の協調動作）を適切に制御する能力を持つと予想される。それは、腕運動制御機構と体運動制御機構が独立だからである。今回の実測で腕の後方振り出しが見られなかったのは、到達運動のみを教示し、関節への負担に関する教示を行わなかったからであろう。本提案モデルは、肩関節入力重み R_{44} を変化させることにより腕と体の様々な協調動作を生成することが可能であり（図4～8）、これは、本提案モデルが腕と体の協調動作を伴う立ち上がり到達運動をシミュレートするのに有効であることを示唆する。従って、肩関節入力重み R_{44} は、ヒトの動作規範と密接に関係するパラメータと考えられ、固定パラメータではなく、本質的に可変パラメータとして扱うべきであると考えられる。

5. 結 語

腕と体の協調到達運動を再現可能とする4リンク4関節構造最適制御モデルを提案した。そして、提案モデルを立ち上がりながら行う腕の到達運動に適用し、提案モデルが腕と体の協調到達運動の実測結果を理論的に再現可能にするかどうかを検証すると同時に、ヒトと同様の協調到達運動を実現するのに必要な要因について検討した。その結果、(1)肩関節の入力重みに依存して腕と体の協調特性の異なる最適立ち上がり動作が生成されること、(2)肩関節入力重みが小さい（大きい）場合、最適立ち上がり動作における腕振りが大きく（小さく）なること、(3)肩関節入力重みが大きい場合の最適立ち上がり動作が実測動作と良く一致すること、(4)肩関節入力重みが小さくなるほど、股関節トルクの大きさが減少することが示された。以上は、提案モデルが腕と体の協調到達運動をシミュレートするのに有効であり、腕と体の協調動作が腕の動き易さに依存することを示唆する。

文 献

- (1) T.R. Kaminski: "The Coupling between Upper and Lower Extremity Synergies during Whole Body Reaching", *Gait & Posture*, Vol. 26, pp. 256-262, 2007.
- (2) T. Flash and N. Hogan: "The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model", *J. Neuroscience*, Vol. 5, pp. 1688-1703, 1985.
- (3) Y. Uno, M. Kawato, and R. Suzuki: "Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement - Minimum Torque-Change Model", *Biol. Cybern.*, Vol. 61, pp. 89-101, 1989.
- (4) E. Nakano, H. Imamizu, R. Osu, Y. Uno, H. Gomi, T. Yoshioka, and M. Kawato: "Quantitative Examination of Internal Representations for Arm Trajectory Planning: Minimum Commanded Torque Change Model", *J. Neurophysiol.*, Vol. 81, pp. 2140-2155, 1999.
- (5) 加島正, 石動善久: "ヒトの上肢運動における軌道制御", 計測自動制御学会論文誌, Vol. 31, No. 9, pp. 1416-1422, 1995.
- (6) 加島正, 石動善久: "ヒトの上肢運動の軌道生成", 計測自動制御学会論文誌, Vol. 34, No. 10, pp. 1440-1447, 1998.
- (7) C.M. Harris and D.M. Wolpert: "Signal-Dependent Noise Determines Motor Planning", *Nature*, Vol. 394, No. 20, pp. 780-784, 1998.
- (8) T. Matsui, K. Takeshita, and T. Shibusawa: "Optimal Control Model of Human Three-Joint Arm System Characterized by Hand-Joint's Freezing-Like Mechanism", *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 5, No. 7, pp. 1531-1544, 2011.
- (9) T. Matsui, K. Hagiwara, and K. Wada: "Dynamics-Switching Optimal Control Model for Reproducing Human Rising Movements from a Chair", *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-16, 2013.
- (10) K. Wada and T. Matsui: "Optimal Control Model for Reproducing Human Sitting Movements on a Chair and its Effectiveness", *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 164-179, 2013.
- (11) ロルフ・ヴィルヘード（金子公宥, 松本迪子訳）: "目でみる動きの解剖学", 大修館書, 1999.
- (12) D.A. Winter: "Biomechanics and Motor Control of Human Movement", John Wiley and Sons, 3rd edition, 2004.
- (13) H. Hatze: "A New Method for the Simultaneous Measurement of the Moment of Inertia, the Damping Coefficient and the Locomotion of the Center of Mass of a Body Segment", *Europ. J. Appl. Physiol.*, Vol. 34, pp. 217-226, 1975.

- (14) P.L. Weiss, R.E. Kearney, and I.W. Hunter: "Position Dependence of Ankle Joint Dynamics-I. Passive Mechanics", J. Biomech., Vol. 19, No. 9, pp. 727-735, 1986.
- (15) 茂木正義, 松井利一: "単純動作の連続的組合せに基づくスクワット運動の最適制御モデル", スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011, pp. 558-563, 2011.