デジタルヒューマンのための 前腕ひねり作業のモデリング(第2報)*

—前腕ひねり作業評価システムの構築—

福井 裕** 川野 常夫*** 杉村 延広†

Study on Modeling of Forearm Torsion Operations for Digital Human Model (2nd Report)

— Construction of Evaluation System for Forearm Torsion Operations —

Yutaka FUKUI, Tsuneo KAWANO and Nobuhiro SUGIMURA

The purpose of the study is to develop an evaluation system for the operations involving forearm torsion, such as screw driving and knob turning, for digital human model. In the previous report, a model was proposed to estimate the rotational range of the object rotated by the hand. The purpose of this report is to propose a decision rule for the working postures of the upper limb for torsion operations. The working postures were measured for various positions of the object. The results demonstrated that the upper limb took the posture so as to decrease slightly the maximum degree of coincidence of the upper limb. A digital human model was developed for evaluation of the operations involving forearm torsion based on the results.

Key words: working posture, decision rule, evaluation of motion, forearm torsion, digital human model

1. 緒 言

人間の日常生活や労働の場において、ドライバによるネジ締めやボリュームスイッチの回転のような前腕のひねりを伴う作業は多い。近年、デジタルヒューマン¹⁾²⁾と呼ばれる人体モデルと CAD/CAE を組み合わせ、製品の操作性や工場における人間の作業性を視覚的に検討する手法が導入されている。しかし、このデジタルヒューマンの上肢において、前腕のひねり動作は正確にモデル化されていない。そのため、既存のデジタルヒューマンでは、作業者にとって作業対象をどの位置に配置すればひねりやすいか、また、大きくひねるためにはどのような姿勢が良いかといったような前腕のひねりを伴う作業の評価を正確に行うことは難しい。

筆者らはこれまでに、これらの問題を解決すべく、前報³⁾において、作業対象を含む上肢の各セグメントの方向ベクトルの一致度を定義し、作業者と作業対象の位置に応じた一致度から回転可動域を推定するモデルを提案してきた。このモデルをデジタルヒューマンに応用すれば、前腕のひねりを伴う作業において、作業対象の回転可動域を推定することができ、ひねりやすい作業対象の配置を検討することができる。しかし提案したモデルでは、人間の上肢の自由度に冗長性があるため、肩と手の位置が決まっても肘の位置が一意に決まらないという問題があった。Jack⁴⁾などの既存のデジタルヒューマンでは、上肢姿勢を一意に決めるためのルールが組み込まれているが、前腕のひねり作業に特化したルールではなく、肘の位置を含めた上肢の姿勢を決定する手法の確立が必要である。

本報では、前腕のひねりを伴う作業において、上肢姿勢を実験により計測し、ひねり作業に適した上肢姿勢を決定するためのルールを提案する。また、提案する姿勢決定ルールと、前報で提案した回転可動域推定モデルを組み込んだ独自のデジタル

Fig.1 Link model of upper limb

ヒューマンを開発し、前腕ひねり作業評価システムを構築する。

2. 上肢作業姿勢の決定ルールの方針

2.1 回転可動域推定モデル

前報³⁾では、図1に示す作業対象と上肢リンクモデルにおいて、それぞれのセグメント間の方向ベクトルが一致する度合いを示す指標として、式(1)に示す上肢の「一致度」を提案した。

$$c = \left[\alpha_{ab} \left(1 - \frac{\theta_{ab}}{90^\circ} \right) + \alpha_{ac} \left(1 - \frac{\theta_{ac}}{90^\circ} \right) + \alpha_{cd} \left(1 - \frac{\theta_{cd}}{90^\circ} \right) \right] \times 100 \quad (1)$$

ここで、 a, b, c, d は同図に示すように、各セグメントの方向ベクトルを表し、 θ は方向ベクトル同士の交差角を表す。上肢の作業姿勢によってこの一致度は変化するが、実験によって、その一致度が高いほど作業対象の回転可動域が大きくなるという相関関係を明らかにした。それに基づいて、一致度から作業対象の回転可動域を推定するモデルを構築した。このモデルを用いれば、作業者の代理人であるデジタルヒューマンの手で作業対象を把持させると、その上肢全体の一致度は容易に求まるため、そのときの作業対象の回転可動域が推定できることになる。

しかしながら、デジタルヒューマンが作業対象を手で把持するときの上肢の姿勢は図2に示すように一意に決まらない。同

* 原稿受付 平成 20 年 11 月 11 日

** 学生会員 大阪府立大学大学院 (大阪府堺市中区学園町 1-1)

*** 正 会 員 摂南大学 (大阪府寝屋川市池田中町 17-8)

† 正 会 員 大阪府立大学 (大阪府堺市中区学園町 1-1)

図は Jack を用いて重ね描きして示している. 同図で示すように, デジタルヒューマンの手と肩の位置が決まっても, 肘の位置はそれらを結ぶ線を軸として理論上 360° 回転する自由度を持っており, 一意には決まらない. これは人間の肩から手首までの上肢の自由度は 7 であり, 3 次元の作業空間の 6 自由度よりも多いためである. このため, 手の位置座標から上肢の各関節角度を求める逆運動学において姿勢を一意に決めるには何らかのルールが必要となる.

2.2 ルール導出の方針

これまで上肢の姿勢決定ルールとして, 人間の上肢と等価な構造を持つマニピュレータでは, 手先の速度の出しやすさを表す可操作度最大化, 手先の力の出しやすさを表す可操作力最大化⁵⁾, 位置および運動エネルギー最小化⁶⁾などがしばしば用いられている. また, 上肢作業では水平面内の 8 方向に手先力を発揮する作業において, 関節トルク最小の姿勢と筋活性最小の姿勢⁷⁾を比較し, 後者が腕姿勢選択に関連していることが示されている. また, プッシュスイッチ操作においては, 関節モーメントの和最小, かつ操作方向の可操作力最大⁸⁾の姿勢であることが示されている. しかし, 前腕ひねり作業の姿勢決定ルールを扱ったものはない.

本研究では, 作業対象の回転可動域に着目しており, 前腕のひねりを伴う作業では, より作業対象を大きく回転できることが良い規範であると考えられる. この規範の下では, 上肢は作業対象を大きく回転できるような姿勢をとることとなる. 前報³⁾では, 上肢全体の一致度が高いほど作業対象の回転可動域が大きくなることが示されたので, 作業対象を大きく回転させるためには上肢全体の一致度が高くなるような姿勢をとることが予想される. 本報ではそれを明らかにするための実験を行う. すなわち, 実験によって上肢全体の一致度が高いことが, 作業対象を大きく回転するための必要条件であることを明らかにする. 実験では, 被験者に回転可動域が最大となるように姿勢をとらせ, そのときの上肢全体の一致度を計測する. もし, そのときの一致度が最大もしくは最大に近くなれば, 上記の必要条件が成り立つことになり, 作業対象をより大きく回転させる作業においては, 人間は上肢全体の一致度が高くなるようなルールに基づいて姿勢を決定していると判断することができる.

3. 計測実験

3.1 実験条件

前腕のひねりを伴う作業の作業対象としてドライバを取り上げ, 前報³⁾と同様にその回転可動域の大きさのみに着目するため, ネジ締め作業の回転抵抗はない, すなわち回転力は必要としないものとする. そのような作業としてはネジの仮締めやネジによる電気抵抗値の調節作業などが考えられる.

被験者は 21~29 歳の男子 11 名で, いずれも右利きとした. ドライバに見立てた作業対象は木製丸棒 ($140\text{mm} \times \phi 20\text{mm}$) を用いた. 作業対象の把持方法は前報で定義した通り, 手の第 1 指と他の 4 指を対向させて握る通常の把持方法とした. また, 作業対象の位置は, 前報で定義した位置のうち, 図 3 に示す右手によるネジ締め作業の代表的な 9 ヶ所の位置 ($C2', D2', E2', C3', D3', E3', C4', D4', E4'$) を選んだ. ここで位置の記号は, 水平面内の方向 (肩を中心に前方を C, 右斜め 45° 方向を D, 右側方を E) と矢状面内の方向 (斜め上 45° 方向を 2, 正面を 3, 斜め下 45° 方向を 4) の組み合わせによる前報の表記法に従っている. $2', 3', 4'$ のダッシュは, それぞれの方向に腕を伸ばした

Fig.2 Redundant degree of freedom of upper limb for a digital human model

Fig.3 Definition of position of rotated object

ときの肩と手の距離を二等分した位置を示している. それらのどの位置においても, 作業対象の回転軸は人体の矢状軸と平行になるようにした.

上肢各セグメントの方向ベクトルを求めるために, 図 1 に示した計測点, つまり, 作業対象の両端, 右手の甲の中央上端 (有頭骨の体表面上), 手関節中心, 肘関節中心, 肩関節中心の計 6 点の座標を, モーションキャプチャシステム EGL-500RT⁹⁾ (motion analysis 社製) を用いて計測した. ただし, それらの点を直接計測できないため, マーカを同図に示すように計測点を挟むようにそれぞれ 2 ヶ所に貼り付け, この 2 点を結ぶ線分の中点を計算することによって計測点を求めた. また, 肩関節については, 肘関節と肩関節の外径が同じであると仮定して, 肘関節の外径の半径 L を流用して, 肩峰点に貼り付けたマーカ 1 個から関節中心を同定した.

作業対象の回転は次のように行う. まず, 被験者は作業対象を把持したまま, 反時計回りに限界 (前腕の回内位) まで回転させる. 次に, 回内位を開始位置として, 時計回りに限界 (回外位) まで 1 回の動作で回転させる. この回内位から回外位までの作業対象の回転角度を回転可動域とする. また, 回転させる際, できる限り肘や肩の位置が変化しないように上肢姿勢を保持する.

先に述べたように, 本実験では被験者に作業対象の回転可動域が最大となるように姿勢をとらせ, そのときの上肢全体の一致度を求める. ここで回転可動域が最大となっているかどうかの判断として, 被験者の主観的判断に委ねる場合と, 回転可動域の実測値に基づいた客観的判断による場合の 2 通りを取り上げる. 前者の判断では人間にとって自然な姿勢が期待される. 一方, 後者の判断では, 回転可動域の実測値が最大となるまで試行錯誤を繰り返すこととなり, いわば強制された姿勢となることが考えられる. 本研究ではそれらを比較検討するため, 被験者 11 名のうち 6 名は, 被験者自身で回転可動域が最大となると主観的に判断した姿勢をとるものとし, 残りの 5 名は, 回転可動域の実測値が最大となるまで試行錯誤を繰り返して姿勢を客観的に決定するものとする. それぞれを A グループ (主観的判

断), B グループ(客観的判断)とする。

3.2 実験手順

A グループ(主観的判断)では, まず作業対象を前述の9ヶ所のうちの1ヶ所におおよそ配置し, 被験者にとって作業対象の位置が定義通りの位置になるように, 作業対象の位置と被験者の立つ位置を調整する。次に被験者は作業対象を把持し, 手と肩の位置はそのまま, 肘の位置を徐々に変化させながら, その都度作業対象を回転させてみることによって, その回転可動域が主観的に最大になると判断される姿勢を探す。ここで作業対象の回転中は, 肘や肩の位置を動かさないように被験者に指示する。姿勢が確定すれば, その姿勢を約3秒間保持させ, モーションキャプチャで撮影する。以上の手順を, 作業対象の9ヶ所の位置全てについて行う。

B グループ(客観的判断)の予備実験において, 作業対象の回転可動域は, ある肘の位置のとき最大となり, そこを中心に肘を上下へ移動させると徐々に減少することを確認した。そこで, 肘の位置を徐々に変化させることにより, 回転可動域が最大となる作業姿勢を探索することとした。実験手順はAグループ(主観的判断)と同様であるが, 回転可動域を作業対象に取り付けたポテンシオメータで計測し, 被験者の正面に配置された14インチディスプレイに回転角度をデジタル表示する。被験者はその角度を確認しながら作業を行う。

3.3 データ処理

まず, 肘の位置を図4で示すように定義する。同図は, 人間を後方から見て, 肩関節中心 S から手関節中心を結ぶベクトル e が紙面に対して垂直になるように図示している。まず, 図中○で示した肘関節中心 E は, 筋骨格構造や各部の干渉を無視すれば e を軸として理論上 360° 回転する自由度を持っており, その軌跡は, 同図に示すように, e に垂直な平面上に円として現れる。次に, その円の中心 S を通り, e に垂直かつ床面に平行な線を始線とし, それと線分 SE のなす角度を ϕ として肘の位置を定義する。ここで肘の位置 ϕ が変化すると, 上腕や前腕などの方向ベクトルが変化するため, 前述の式(1)で表される上肢全体の一致度も変化する。したがって, 肩と手の位置が定まったとき, 一致度は肘の位置 ϕ ($-180 \leq \phi \leq 180$)の関数と考えられる。

作業対象をD2', つまり被験者の右斜め上方に配置した場合について, ある被験者の肘の位置 ϕ に対する一致度の変化の一例を図5に示す。図中●は理論上の最大一致度 $C_{th,max}$ を表している。このときの姿勢を理論姿勢とする。一方, 被験者が実際にとった姿勢を実測姿勢とし, その姿勢から求めた一致度 C_{ex} を, 図中に○で示す。次に, 理論姿勢を基準として, 実測姿勢との肘の位置の角度差 D_{ex-th} を求める。次に, C_{ex} と $C_{th,max}$ の差の $C_{th,max}$ に対する割合 P_{ex-th} を求める。理論姿勢より実測姿勢の肘の位置が下方, つまり D_{ex-th} の符号が負の場合, P_{ex-th} の符号を負に, 実測姿勢が上方, つまり D_{ex-th} の符号が正の場合, P_{ex-th} の符号を正にする。以上の手順で, すべての作業対象位置において, D_{ex-th} および P_{ex-th} を求める。

3.4 実験結果

A グループ(主観的判断)の実験結果を図6に示す。まず, 同図(a)は, 理論姿勢と実測姿勢の肘の位置の角度差 D_{ex-th} の分布を示している。横軸は D_{ex-th} , 縦軸はデータ総数に対する各区間の相対度数を示している。 D_{ex-th} の平均は -16.1° となり, 分布が全体的に負の方向にシフトしていることが確認できる。つまり, ほとんどのデータにおいて, 実測姿勢の肘の位置は, 理論姿勢のそれよりも下方に位置している。次に, 同図(b)は, 理論姿勢

Fig.4 Definition of elbow position

Fig.5 Example of change of degree of coincidence (object at position D2')

の最大一致度 $C_{th,max}$ と実測姿勢の一致度 C_{ex} の差の割合 P_{ex-th} の分布を示している。 P_{ex-th} が0%であるデータは実測した上肢全体の一致度が理論上の最大値に達していることを示している。しかしながら過半数のデータは負の方向に分布し, 全体の平均は -11.3% であるため, 上肢全体の一致度が最大値より 11.3% 下回っていることを示している。

他方, B グループ(客観的判断)の実験結果を同様に図7に示す。同図(a)(b)のいずれもばらつきはあるものの, 0を中心に正負両方向に分布しており, 図6のような偏りは認められない。以上のことから, 作業対象の回転可動域が最大となるまで試行錯誤を繰り返して決定した姿勢では, 上肢全体の一致度が最大となることがわかる。したがって一致度が高いほど回転可動域が大きくなるという前報³⁾の結果と合わせると, 上肢全体の一致度が高いことは, 作業対象を大きく回転するための必要十分条件であるといえる。

4. 上肢作業姿勢の決定ルールの導出

B グループ(客観的判断)の実験結果から, A グループ(主観的判断)においても, もう少し肘を上げれば, 理論姿勢に近づくことによって一致度が増加し, その結果, 作業対象をより大きく回転できることが予想される。しかし実際には, 一致度が最大になる理想的な姿勢よりも, 肘の位置が平均 16.1° , 一致度では 11.3% 低くなる姿勢を選択していた。このことから, 理論姿勢よりも肘の位置を下げて一致度を減少させる方向へ働く何らかの要因があることが示唆される。

ここで, 川上ら¹⁰⁾の研究によると, 被験者の正面に配置されたボタンまで手先を移動させる際, 垂直方向の移動量が長いほど上肢の筋負担が増加し, また, 水平方向よりも垂直方向の移動が筋負担に与える影響は大きくなることが報告されている。このことから, より上方にある作業対象を把持するには, 手を

(a) Angular difference of elbow position

(b) Difference of degree of coincidence

Fig.6 Distribution of difference between theoretical and experimental posture about Group A

より上方へ移動させる必要があり、それによって負担が増加すると考えられる。さらに、作業対象を把持した姿勢から、一致度が增加するように肘の位置を上げることは、さらなる負担増となる。したがって、手の位置が高いほど、上肢姿勢を維持するための負担が増加するため、それを軽減しようとして理論姿勢から離れることが考えられる。すなわち、手の位置が高いほど理論姿勢と実測姿勢の一致度の差も増加すると推察される。言い換えれば、作業対象の高さが一致度を減少させる要因となっていると考えられる。

そこで A グループ(主観的判断)の被験者について、上肢の力を抜いて垂直におろしたときの肘関節中心を原点として、そこから作業対象を把持した際の実測姿勢の手関節中心までの垂直方向の距離と、実測姿勢と理論姿勢の一致度の差の割合 P_{ex-th} との相関を検討した。その結果を図 8 に示す。横軸は、手関節中心までの垂直方向の距離を上肢長で除して基準化した値 h を示す。本研究では、上肢作業を対象としていることから上肢長を基準とした。縦軸は、一致度の差の割合 P_{ex-th} を示す。相関係数は $-0.79(p < 0.01)$ となり、有意な相関が示された。つまり、手関節中心の位置が高いほど P_{ex-th} も負の方向へ増加することがわかる。これに対して、原点から実測姿勢における手関節中心までの水平方向の移動量と P_{ex-th} との相関係数は 0.12 となり、相関がないことが示され、水平方向の移動量は P_{ex-th} の変動にはほとんど影響がないことがわかった。

これらのことから、作業対象が上方にあるほど、肘が下がって一致度が減少することがわかった。これは、より高い位置に姿勢を維持するほど負担が増加するためと考えられる。また、同図から、 h に応じた一致度の減少の割合を求める回帰式を最小自乗近似した結果、次式が得られた。

$$P_{ex-th}(h) = -49.76h + 8.34 \quad (0.17 < h \leq 0.70) \quad (2)$$

ここで同図から、 P_{ex-th} が正、すなわち肘が理論姿勢より上になるデータも見られるが、これは h が低いときであり、そのときには姿勢を維持する負担が小さいため、データのばらつきの現れであると考えられる。したがって本研究では、式(2)の $P_{ex-th}(h)$ は 0 以下とみなす。また、 $0 < h \leq 0.17$ のときは、 $P_{ex-th}(h) = 0$ とする。この回帰式は、被験者の年齢や性別といった属性に応じて求める必要がある。

(a) Angular difference of elbow position

(b) Difference of degree of coincidence

Fig.7 Distribution of difference between theoretical and experimental posture about Group B

Fig.8 Relationship between position of wrist joint and difference of degree of coincidence

以上の結果より、前腕のひねりを伴う作業において、デジタルヒューマンが作業対象を把持する際の上肢姿勢決定ルールを「上肢全体の一致度が最大となるように作業対象を把持させ、その姿勢から手首の高さに比例した減少割合だけ一致度が小さくなるように肘の位置を下方へ修正する」と定めた。

5. 前腕ひねり作業評価システム

5.1 システムの概要と処理フロー

前報³⁾では上肢全体の一致度 c から作業対象の回転可動域を推定する式として以下の式を提案した。

$$r_5(c) = 0.015c^2 + 0.047c \quad (3)$$

$$r_{50}(c) = 0.00074c^2 + 2.3c \quad (4)$$

$$r_{95}(c) = -0.015c^2 + 5.2c \quad (5)$$

ここで、 $r_5(c)$ 、 $r_{50}(c)$ 、 $r_{95}(c)$ は回転可動域のそれぞれ 5、50、95%ile 値を表す。

本報では、この回転可動域推定式と、本報で提案した上肢作業姿勢決定ルールを組み込んだデジタルヒューマンを独自に開発し、前腕のひねりを伴う作業において作業対象の最適配置を検討するための評価システムを構築する。本研究で開発した前腕ひねり作業評価システムの一例を図 9 に示す。開発に用いたプログラミング言語は Visual C#、3次元グラフィックスライブラリは OpenGL である。本システムでは、前腕のひねりで回転させる道具や機器の配置を検討する際、デジタルヒューマン

に作業対象を把持させ、そのときの上肢全体の一致度から作業対象の回転可動域のうち 5, 50, 95%ile 値を推定し可視化することができる。設計者は、この推定された可動域を基に、作業対象の位置によって回転角がどのように変化するかを確認しながら、最適な作業対象の配置を事前に検討できるようになっている。

具体的な処理フローは、まず、作業対象の配置を検討する設計者が、作業対象の位置を決め、それをデジタルヒューマンの右手で仮に把持させる。このときデジタルヒューマンの上肢の各関節の中心座標は既知であるため、コンピュータにより各セグメントの方向ベクトルがリアルタイムに計算され、同時に式(1)を用いて上肢全体の一致度が求められる。次に、本報で提案した上肢作業姿勢決定ルールを基に、コンピュータによって上肢姿勢が修正される。この姿勢における一致度が、前報³⁾で提案した回転可動域の推定式(3)(4)(5)に代入され、作業対象の回転可動域の 5, 50, 95%ile 値が求められる。それらの3つの値は、同図右に示すように、別のウィンドウの円グラフの円周上にそれぞれのマーク(●, ○, ■)を用いてプロットされる。作業姿勢が変更されると、自動的に一致度が再計算され、これら3つの値がリアルタイムに変化する。

5.2 作業対象の配置改善例

図10に、開発した作業評価システムによる評価例を示す。まず、設計者が回転を伴う作業対象の配置を検討する際、同図(a)のように、作業対象を仮に作業者の右斜め上方に配置した場合を考える。コンピュータは、作業対象と上肢の方向ベクトルの相対的な関係から、回転可動域の 5, 50, 95%ile 値を可視化してウィンドウに表示する。この場合の一致度は 60%、回転可動域の3つのパーセンタイル値は、それぞれ 56, 140, 257° となった。ここで作業者が自由に動ける環境にないとき、作業対象の位置を変えることによって回転可動域を拡大することを考える。そこで、同図(b)のように、作業対象を下方へ移動させた。その結果、一致度は 76%、回転可動域の3つのパーセンタイル値は、それぞれ 90, 179, 308° とそれぞれ向上した。

このように、設計段階で、作業対象の回転可動域を推定することができれば、前腕の回転を伴う作業対象の最適な配置を事前に検討することが可能となる。また、上肢全体の一致度が最大、つまり回転可動域が最大となる姿勢を設計者や作業者に提示することにより、より大きく回転させるにはどのような姿勢をとればよいかといった運動指針の提供に役立つ。

6. 結 言

本報では、前報³⁾で提案した上肢全体の一致度を基にして、デジタルヒューマンにおける前腕のひねりを伴う作業の上肢作業姿勢を決定するためのルールを提案した。また、回転可動域推定モデルと上肢姿勢決定ルールをデジタルヒューマンに組み込み、前腕ひねり作業評価システムを構築した。

本研究の結果をまとめると、以下のようになる。

(1) 作業対象の回転可動域が最大となる姿勢では、その姿勢における上肢全体の一致度も最大となった。一致度が高いほど回転可動域が大きくなるという前報³⁾の結果と合わせると、上肢全体の一致度が高いことは、作業対象を大きく回転するための必要十分条件であることが立証できた。

(2) 被験者が自身で作業対象の回転可動域が最大であると主観的に判断した姿勢では、上肢全体の一致度が最大となる理論姿勢より、肘の位置が平均で 16.1° (一致度が 11.3%) だけ低くなる

Fig.9 Evaluation software

(a) Before improvement
(50%ile : 140°)

(b) After improvement
(50%ile : 179°)

Fig.10 Examples of evaluations

姿勢を選択していることがわかった。

(3) 実測姿勢と理論姿勢の上肢全体の一致度の差の割合 P_{act-th} と、実測姿勢における手首の位置との相関を求めた結果、より高い位置にある作業対象を把持する方が、理論姿勢との一致度の差の割合が増加することがわかった。これを基にして、デジタルヒューマンにおける前腕のひねりを伴う作業の上肢姿勢を決定するためのルールを提案した。

(4) 前報³⁾で提案した上肢全体の一致度を基にした回転可動域推定モデルと、本報で提案した上肢作業姿勢決定ルールを組み込んだデジタルヒューマンを独自に開発し、前腕のひねりを伴う作業の評価システムを構築した。

今後は、構築した評価システムを基にして、より実際のひねり作業に適した実践的なルールを導出する必要がある。そのために例えば、これまでは想定していない回転抵抗を実験に考慮し、より力が入りやすい上肢姿勢、あるいはより疲労しにくい上肢姿勢などを生成するルールの導出を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) Chaffin, D.B.: Improving digital human modeling for proactive ergonomics in design, *Ergonomics*, **48**, 5 (2005), 478.
- 2) 川野常夫: デジタルヒューマンモデルとその産業応用, *日本機械学会誌*, **106**, 1013 (2003) 272.
- 3) 福井 裕, 川野常夫, 杉村延広: デジタルヒューマンのための前腕ひねり作業のモデリング(第1報), *精密工学会誌*, **74**, 4 (2008) 395.
- 4) http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/assembly_planning/jack/index.shtml
- 5) 吉川恒夫: ロボットアームの可操作度, *日本ロボット学会誌*, **5**, 1 (1984) 63.
- 6) 辻 敏夫, 中山聖也, 荒木 淳, 伊藤宏司: 仮想アームを用いたマニピュレータの逆運動解法とまきつき制御への応用, *日本機械学会論文集(C編)*, **59**, 558 (1993) 474.
- 7) 的場和樹, 片山正純, 宇野洋二: 手先力保持タスクにおける人腕姿勢選択指標に関する考察, *電子情報通信学会技術研究報告 NC*, **99**, 103 (2000) 79.
- 8) 山崎信寿, 寺西監之, 難波昇平, 五十嵐智貴: プッシュスイッチ操作における上肢姿勢の決定基準, *人間工学*, **41**, 2 (2005) 89.
- 9) <http://www.motionanalysis.com/>
- 10) 川上満幸, 金子智彦, 三林洋介, 鶴飼隆好: 上肢動作における立体作業域の設計要因, *日本機械学会論文集(C編)*, **65**, 633 (1999) 2148.