

デジタルヒューマンのための上肢ひねり作業における 発揮トルク推定手法の提案

Digital Human Model for Estimating Torque from Arm Posture in Screw Driving Tasks

福井 裕 摂南大学理工学部

川野常夫 摂南大学理工学部 機械工学科

杉村延広 大阪府立大学大学院 工学研究科

FUKUI, Yutaka Faculty of Science and Engineering, Setsunan University

KAWANO, Tsuneo Department of Mechanical Engineering, Setsunan University

SUGIMURA, Nobuhiro Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract

The purpose of this study is to develop a digital human model for evaluating the operations involving the rotational movements of the upper limb in hand-operated screw driving tasks. Experiments were carried out to derive the equations for estimating the maximum torque applied by the movements of the forearm and/or wrist about a screwdriver axis from the working posture of the upper limb. The applied maximum torque and arm posture were measured at each of 22 positions of the screwdriver for 8 participants. The results demonstrated that the measured torques varied with the arm postures. A torque-producing index was defined in terms of the rotational axes and the height of the arm so as to correlate well with the measured torques. Finally, software was developed to estimate the applied maximum torque about screwdriver axis from the torque-producing index of any digital human's posture.

キーワード: ネジ締め作業、トルク、上肢姿勢、デジタルヒューマンモデル、作業設計

Keywords : screw driving task, torque, arm posture, digital human model, work design

1. はじめに

デジタルヒューマンモデルと呼ばれる 3 次元コンピュータグラフィックスによる人体モデルと CAD/CAE(Computer Aided Design/ Engineering)を組み合わせ、製品の操作性や製品と人間との親和性、あるいは工場における人間の作業性などを仮想的に検討する手法が導入されている^{(1),(2)}。しかし、既存のデジタルヒューマンモデルでは、上肢のひねり運動は完全にモデル化されておらず、ドライバのネジ締めやボリウムスイッチの回転のような上肢のひねりを伴う作業を正確に評価することは難しい。

著者らはこれまでに、上肢のひねりを伴う作業を対象として、作業姿勢から回転対象を最大限に回すこと

のできる角度（回転可動域）を推定する手法を提案し、それを基にしてデジタルヒューマンモデルによる上肢ひねり作業評価システムを開発した^{(3),(4)}。設計者が回転対象の位置とデジタルヒューマンモデルの上肢の作業姿勢を決めると、回転可動域の大きさを基にした評価結果が可視化され、作業姿勢や作業位置に関する指針を得ることができる。ただし、そこでは回転力（トルク）を必要としない作業を対象としており、ドライバによる手動のネジ締め作業といったトルクを必要とする作業を評価することはできない。

本研究では、ドライバによるネジ締め作業を対象として、種々の作業位置において発揮することのできる最大のトルク（以下、最大発揮トルク）を実験によって測定する。また、上肢の姿勢と最大発揮トルクの関係性を明らかにし、上肢の姿勢から最大発揮トルクを推定する手法を提案する。最後に、トルクを必要とする作業が評価できるように開発した上肢ひねり作業評価システムを拡張する。ここで、本研究の対象とするデジタルヒューマンモデルは、Jack(Siemens)やRAMSIS(Human Solutions)のように筋肉のモデルが入っていないものと、SIMM(MusculoGraphics)のように筋肉のモデルが入っているものとに分類される。実際の生産や設計の現場では、SIMM はあまり利用されていないことから、本研究では、筋肉のモデルが入っていないデジタルヒューマンモデルへの適用を想定して、上肢の筋肉の働きを考慮せず作業姿勢だけで最大発揮トルクを推定する手法を提案する。

これまでも、上肢の動作を伴う機器や作業の設計指針を得るための研究は行われている。山崎らはプッシュスイッチ操作における上肢姿勢の決定基準を明らかにし、ATM や自動車などの設計に応用した⁽⁵⁾。また、金指らはコネクタの差し込み作業を対象とし、上肢作業姿勢を決定するための評価関数を明らかにした⁽⁶⁾。いずれも対象物を押す、差し込むといった作業を対象としており、本研究で着目している上肢のひねりを伴う作業を対象としていない。上肢のひねりを伴う作業を扱った研究では、梁瀬らがドアノブの回転を対象として、複数の高さによるトルクの違いを測定した⁽⁷⁾。ここではトルクの大きさを評価関数としてドアノブの適正な取り付け範囲を定めることが目的であった。また、ネジ締め作業に着目した研究では、ドライバのグリップの太さの違いによる手首角度や前腕筋の活動の変化を測定した研究⁽⁸⁾や、対象物の高さや方向、ドライバの先端形状（プラスとマイナス）の違いがパフォーマンスに与える影響を測定した研究⁽⁹⁾などがあるが、いずれも本研究のように上肢の作業姿勢からトルクを推定することを目指したものではない。本研究は、このような実際の評価実験を計算機を使った仮想実験で代替するための手法の構築を目的としている。

2. 最大発揮トルクの測定実験

2-1 実験条件

本実験では、上肢のひねりの伴う作業の例として、ドライバによる手動のネジ締め作業を取り上げ、種々の位置のドライバを回転する際の最大発揮トルクとそのときの上肢姿勢を測定する。図1に本研究で製作したトルク測定装置を示す。本測定装置は、トルク測定器とそれを固定するためのフレームから構成される。トルク測定器は、図に示すように、アルミ板（160×320mm）に鋼製の六角ボルト（φ9×100mm）を固定し、六角ボルトの表面に2枚のひずみゲージ（KYOWA KFG-5-120-C1-11）を回転軸を挟んで対向して貼り付けている。これにより曲げモーメントを除去して軸周りのトルクだけを測定できるようにしている。実験では、トルク測定器の六角ボルトに、市販のナットドライバ（グリップ部：φ30×95mm、ブレード部：130mm）を用いて、ネジを締める要領で時計回りのトルクを作用させる。このとき、六角ボルトはアルミ板に固定してあり回転はしない。トルク測定器は固定用のフレームから取り外しができ、固定高さを変えられるようにしている。これにより、実験参加者の立つ位置と組み合わせて、肩の周りの種々の位置にトルク測定器を配置できるようになっている。

実験参加者は21～24歳の男性8名で、いずれも右利きとした。実験参加者には事前に本実験の趣旨を説

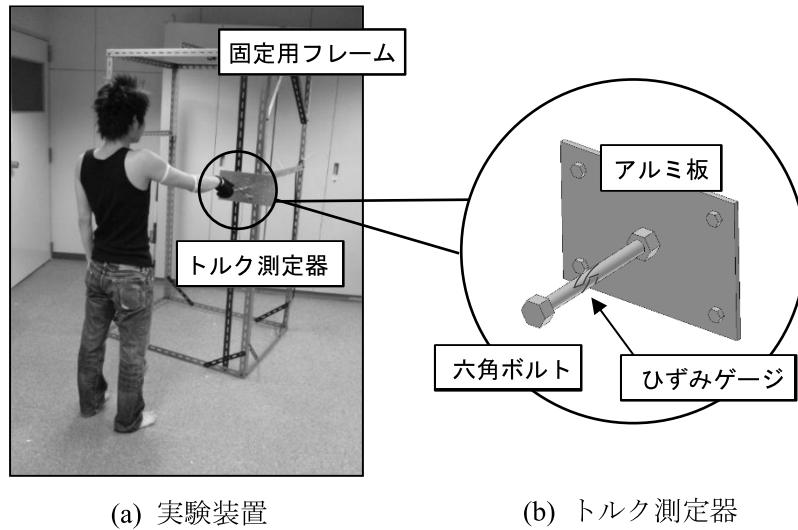


図1 トルク測定装置

明し、実験参加者からインフォームドコンセントを得た上で実験を行った*。実験参加者はドライバを右手で把持し、体幹を動かさずに右上肢のみを使って六角ボルトにトルクを作用させる。ドライバの握り方は、一般的なネジ締めと同様にした。すなわち、右手の第1指と他の4指を対向させて握った後、第1指の腹でグリップ部を押さえる方法とした。

ドライバの位置（以下、作業位置）は、実験参加者の右肩を中心として図2のように設定する。水平面内では、左端から右端まで腕をまっすぐ伸ばした状態の5通り（A～E、45度刻み）の手の位置とする。同様に、矢状面内では、上端から下端まで腕をまっすぐ伸ばした状態の5通り（1～5、45度刻み）の手の位置と、それぞれの位置において肩と手の中点の位置の5通り（1'～5'）とする。水平面内および矢状面内の

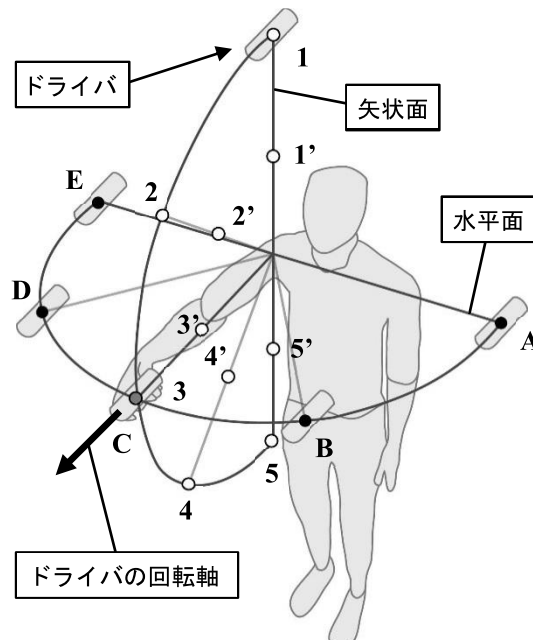


図2 作業位置

* 本実験は2009年6月から9月にかけて実施した。

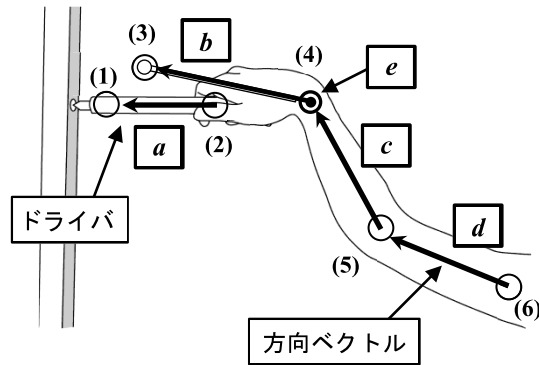


図3 ドライバと上肢のリンクモデル

組み合わせは、計 34 通りとなる。例えば、手を正面にまっすぐ伸ばした位置では、水平面は C、矢状面は 3 という組み合わせとなり、その位置を C3 と表記する。本実験では、これら 34 通りの組み合わせから、実際のネジ締め作業ではほとんどあり得ない A および B 方向を除いた代表的な 22 ヶ所 (C1、C2、C3、C4、C5、D2、D3、D4、E2、E3、E4、C1'、C2'、C3'、C4'、C5'、D2'、D3'、D4'、E2'、E3'、E4') について測定を行う。ドライバの回転軸の方向は人体の矢状軸と平行にした。

図3に示すように、ドライバと上肢の各セグメントの両端の3次元座標を2台のビデオカメラを用いたモーションキャプチャ装置によって取得し、それらの座標を結ぶリンク構造を上肢の作業姿勢とする。計測点は、図に示すように、ドライバの両端(1)と(2)、手の方向を知るために手の甲に取り付けたポール ($\phi 7 \times 150 \text{mm}$) の先端(3)、手関節中心(4)、肘関節中心(5)、肩から肘へ向かって 100mm 程度の上腕上端(6)とする。それぞれのセグメントの方向を表すため、計測点を通る方向ベクトルをそれぞれ $a \sim e$ と定義する。

2-2 実験手順

作業位置 22 カ所のうちの 1 カ所にドライバのグリップ部が位置するようにトルク測定器を固定用フレームに取り付ける。実験参加者はドライバを把持してから、ドライバの先端をトルク測定器の六角ボルトにはめ込み、スタートの合図に合わせて、時計回りに最大限のトルクを作用させる。このとき、六角ボルトに貼り付けたひずみゲージはブリッジ回路を通してパソコンと接続されており、トルクは電圧値の変化としてパソコンに記録される。また、モーションキャプチャ装置を用いて、図3で定義した計測点(1)～(6)の3次元座標もパソコンに記録される。以上の手順を 22 カ所の作業位置すべてについて行う。作業位置を変更するごとに、腕が疲れないように 5 分程度の休憩を設けた。

2-3 実験結果と考察

実験によって測定した最大発揮トルクの分布を図4に示す。実験参加者を後方から見下ろすように図示している。図中の円は作業位置、すなわちドライバのグリップ部の位置を表しており、円の背景は最大発揮トルクの大きさを基にして分類した 5 つのグループを表している。このときの最大発揮トルクは、各作業位置において実験参加者 8 人の平均値である。グループは、最大発揮トルクの最大値と最小値の差を 5 等分し、最大発揮トルクの降順にそれぞれ 1～5 とした。図の右には、各グループにおける最大発揮トルクの上限值と下限値を示している。

最大発揮トルクが最も大きくなったのは、作業位置 C5、すなわち手を下方へまっすぐ伸ばした位置で 3.71Nm であった。対して、最大発揮トルクが最も小さかったのは C1'、すなわち頭部の右側方の位置で

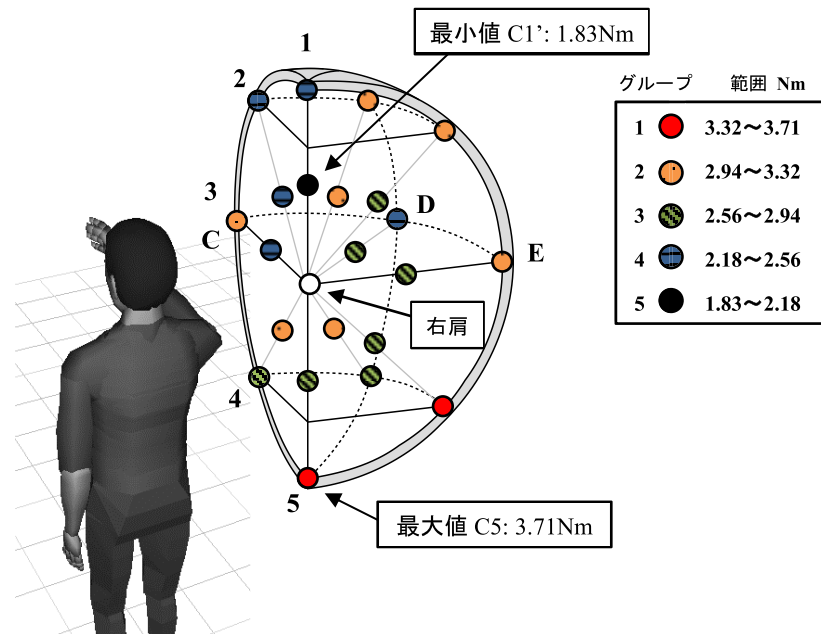


図4 最大発揮トルクの分布（8名の平均値）

1.83Nmであった。

図より、最大発揮トルクが大きいグループ1（C5、E4）およびグループ2（C4、D4、C5'、E4'、E3'、D3'、E2'）は、右肩を中心として右斜め下方および正面下方に分布している。他方、最大発揮トルクが小さいグループ4（C1、C2'、D3、C2、C3'）およびグループ5（C1'）は、正面上方および頭部の右側方に分布している。言い換えれば、右斜め下方および正面下方は力が入りやすく、正面上方および頭部側方は力が入りにくいといえる。

また、発揮トルクが最も大きいグループ1はすべての作業位置が肩より下方に分布している。ついで発揮トルクが大きいグループ2は、1カ所を除いて、作業位置が肩と同じ高さ、または肩より下方に分布している。対して、発揮トルクが小さいグループ5および4はすべての作業位置が、肩と同じ高さ、または肩より上方に分布している。このことから、下方の作業位置は力が入りやすく、上方の作業位置は力が入りにくいことが示唆される。

モーションキャプチャ装置で計測したデータを基にして描いた上半身を表すスティックピクチャを図5に示す。同図には例として、グループ1から最大発揮トルクが最大となったC5、グループ3からC3、グループ5から最大発揮トルクが最小となったC1'を、(a)~(c)にそれぞれ示している。

はじめに、(a)に示すに作業位置C5では、肘関節を伸展させ上肢を体幹に固定した姿勢になっている。すなわち、前腕の方向ベクトルとドライバのそれは直交しているが、手関節の屈伸軸の方向ベクトルとドライバのそれは、ほぼ一致している。このことから、前腕のひねりによるトルクはドライバには寄与せず、手関節の屈伸によるトルクが支配的になっていると考えられる。つぎに、(b)に示す作業位置C3では、上肢を前方に伸ばした姿勢になっており、手関節の屈伸軸の方向ベクトルとドライバのそれは直交しているが、前腕の方向ベクトルとドライバのそれは一致している。すなわち、(a)とは逆に前腕のひねりによるトルクが支配的になっていると考えられる。

ここで(a)と(b)の最大発揮トルクを比較すると、手関節の屈伸が支配的な(a)の姿勢の方が大きかった。すなわち、前腕のひねりより手関節の屈伸の方がより大きなトルクを発揮できる。最後に、(c)に示す作業位

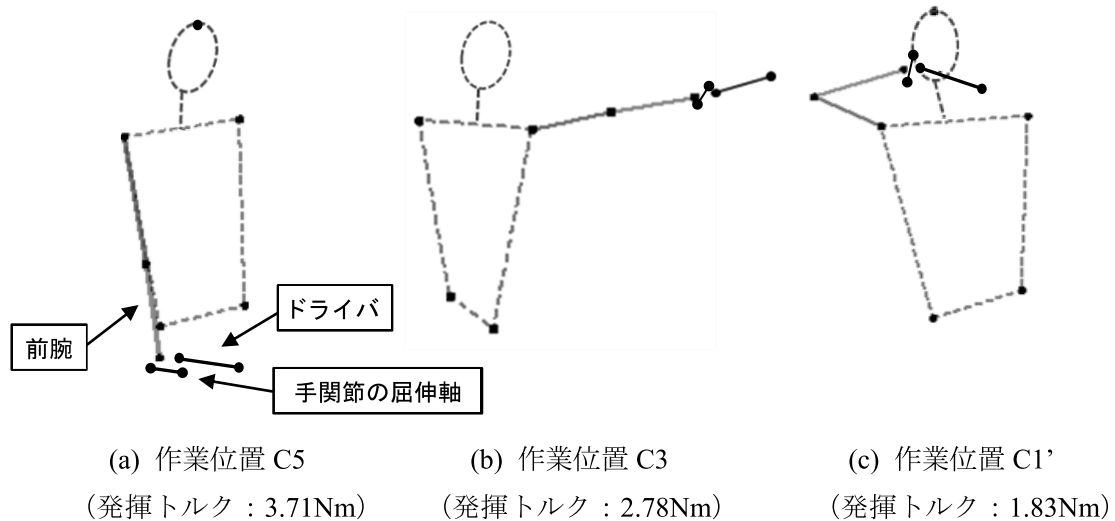


図5 ネジ締め作業時の上肢姿勢 (C5、C3、C1')

置C1'では、頭部の右側方にあるドライバを把持しているため、前腕および手関節の屈伸軸の方向ベクトルがドライバのそれとほぼ直交している。方向ベクトルが一致しておらず、ドライバへトルクが伝わりにくくなっていると考えられる。

これらのことから、ドライバの方向ベクトルと手関節の屈伸軸の方向ベクトルの一致の度合い、または、ドライバの方向ベクトルと前腕の方向ベクトルの一致の度合いによって、発揮トルクが変化することが示唆された。

3. 最大発揮トルクの推定手法

3-1 発揮度の定義

実験から、ドライバと手関節の屈伸軸の方向ベクトルの一致度合い、および、ドライバと前腕の方向ベクトルの一致度合いが高ければ、上肢からドライバへトルクが伝わりやすい、すなわちトルクを発揮しやすいことが示唆された。本研究では、トルク発揮のしやすさを発揮度 p とし、次式のように定義する。

$$p = \left[\alpha_{ae} \left(1 - \frac{\theta_{ae}}{90^\circ} \right) + \alpha_{ac} \left(1 - \frac{\theta_{ac}}{90^\circ} \right) + \alpha_{wh} \left(1 - \frac{h_{wrist}}{2l_{arm}} \right) \right] \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

ここで θ_{ae} はドライバの方向ベクトル \mathbf{a} と手関節の屈伸軸の方向ベクトル \mathbf{e} の交差角を、 θ_{ac} は \mathbf{a} と前腕の方向ベクトル \mathbf{c} の交差角を表す。同式の第1項の括弧内は、作業対象と手関節の屈伸軸の方向ベクトル同士の一致の度合いを表している。方向ベクトルが一致すれば1、直交すれば0となるようにしている。同様に第2項の括弧内は、作業対象と前腕の方向ベクトル同士の一致の度合いを表している。

実験から作業位置が肩より低い方がトルクを発揮しやすいという傾向が示唆された。川上らは、ボタン操作において腕を垂直方向に挙上すると上肢の筋負担が増加することを報告している⁽¹⁰⁾。このことから、方向ベクトル同士の一致度合いの観点ではトルクを発揮しやすい姿勢であったとしても、腕を挙上するために筋のパワーを消費することによって、ドライバに作用するトルクが減少することが予想される。同式の第3項に示すように、腕の挙上による発揮度の減少を表す成分を追加した。 h_{wrist} は、手の力を抜いて真下に下ろした際の手首位置を原点としたときの作業姿勢の手首の垂直高さを表している。また、 h_{wrist} は実験参加者の体格によって絶対値が異なるため、

上肢長 l_{arm} を2倍した値で除して基準化している。寄与率 α_{ae} 、 α_{ac} 、 α_{wh} は3つの項が最大発揮トルクに寄与する割合を表しており、これらの総和は1とする。

3-2 寄与率の決定

発揮度 p から最大発揮トルクを推定するためには、それらの間に高い相関があることが望ましい。相関係数が最大となるように3つの寄与率の組み合わせを探索する。最大発揮トルクは実験参加者間の個人差が大きい傾向があったため、個々の実験参加者では相関があっても全実験参加者では相関が低くなることが考えられる。そこでまず、実験参加者間の個人差を除くために各個人について定式化した上で、個人間のばらつきを考慮することにした。

具体的には、次の手順で寄与率を定める。はじめに、1人の実験参加者の全作業位置において式(1)を用いて発揮度 p を計算し、 p と最大発揮トルクとの相関係数を求める。つぎに、すべての実験参加者について同様に相関係数を計算し、すべての実験参加者で相関係数の平均値を求める。この手順を α_{ae} 、 α_{ac} 、 α_{wh} の値をそれぞれ0～1まで、0.01刻みで変化させながら繰り返し、それぞれの寄与率の組において、相関係数の平均値を求める。最後に、このようにして求めた平均値が最大となるような寄与率の組を求める。ここで相関係数は、特定の分布を想定しないノンパラメトリック手法における順位相関係数を用いた。以上の手順で寄与率を求めたところ、 α_{ae} 、 α_{ac} 、 α_{wh} はそれぞれ0.50、0.15、0.35となった。このときの相関係数の平均値は0.65($p<0.01$)となった。

3-3 最大発揮トルクの推定式

全実験参加者の全作業位置において、式(1)から発揮度を計算し最大発揮トルクとの関係を求めた結果を図6に示す。横軸は発揮度を、縦軸は最大発揮トルクを示している。このとき、相関係数は0.58($p<0.01$)となり、有意な正の相関関係が示された。

図から分布にはばらつきがあることがわかる。個々の実験参加者で求めた相関係数の平均値が0.65とばらつきが少ないことから、このばらつきは個人差が原因であることが考えられる。すなわち、大きな力を発揮できる人、あまり力を発揮できない人がいる。そこで、その個人差を考慮したモデルを構築するために、図に示したような最大発揮トルクの5、50、95%ile値の境界域を導入する。パーセンタイル値の境界域を導入することにより、平均的な最大発揮トルク(50%ile)

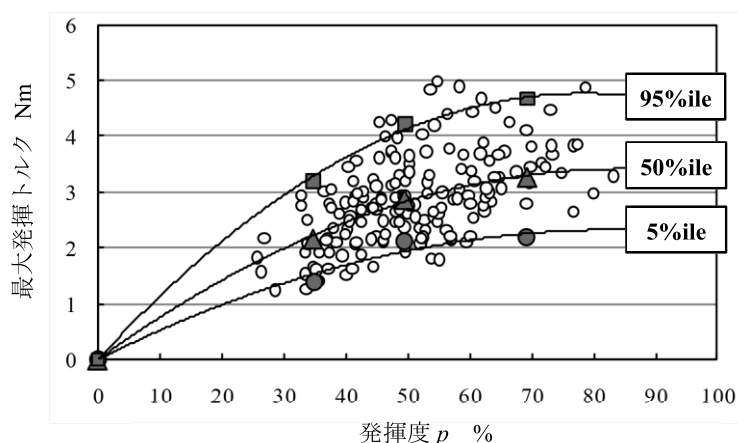


図6 発揮度と最大発揮トルクの相関

とその上下限(95%ile、5%ile)を推定することが可能となった。これらの曲線から最大発揮トルクの推定式は次の3つの式ようになる。

$$t_5(p) = -0.00033p^2 + 0.055p \quad (2)$$

$$t_{50}(p) = -0.00047p^2 + 0.080p \quad (3)$$

$$t_{95}(p) = -0.00077p^2 + 0.12p \quad (4)$$

ここで、 $t_5(p)$ 、 $t_{50}(p)$ 、 $t_{95}(p)$ はそれぞれ最大発揮トルクの5、50、95%ile 値を、 p は発揮度を表す。

4. 最大発揮トルクを基にした上肢ひねり作業評価システム

これまでに開発したデジタルヒューマンモデルに、本研究で提案した最大発揮トルクの推定手法を組み込むことによって、図7に示すような発揮トルクの観点から上肢のひねり作業を評価することができるシステムを開発した。2つの異なる姿勢における評価の例を図(a)と(b)にそれぞれ示している。

図に示すように、本システムは作業者の代理人であるデジタルヒューマンモデルと設計の対象である回転対象から構成されており、設計者が回転対象の位置やデジタルヒューマンの姿勢を変更すると図右上に示す評価結果がリアルタイムに更新される。評価結果の棒グラフは最大発揮トルクの値を示しており、右に進むほど最大発揮トルクが増加する。棒グラフの背景色は最大発揮トルクが増加するにつれて、赤色から青色に徐々に変化させている。図中の丸、三角、四角のマークは、それぞれ最大発揮トルクの5、50、95%ile 値を表している。棒グラフの右側には、発揮度が表示される。

評価は、はじめに設計者はマウスを用いて任意の位置の回転対象を把持するようにデジタルヒューマンモデルの姿勢を決定する。つぎに、コンピュータがデジタルヒューマンモデルの上肢姿勢を基に式(1)から発揮度を求め、さらに式(2)～(4)から最大発揮トルクの5、50、95%ile 値を計算する。最後に、評価結果が別のウィンドウとして画面に表示される。設計者はこの手順を繰り返し、評価結果を参考にして回転対象の力の入りやすい配置を検討する。

評価の例として、図(a)にトルクを発揮しにくい姿勢、(b)にトルクを発揮しやすい姿勢を示している。(a)の場合、回転対象はデジタルヒューマンモデルの頭部前方に位置している。このとき、

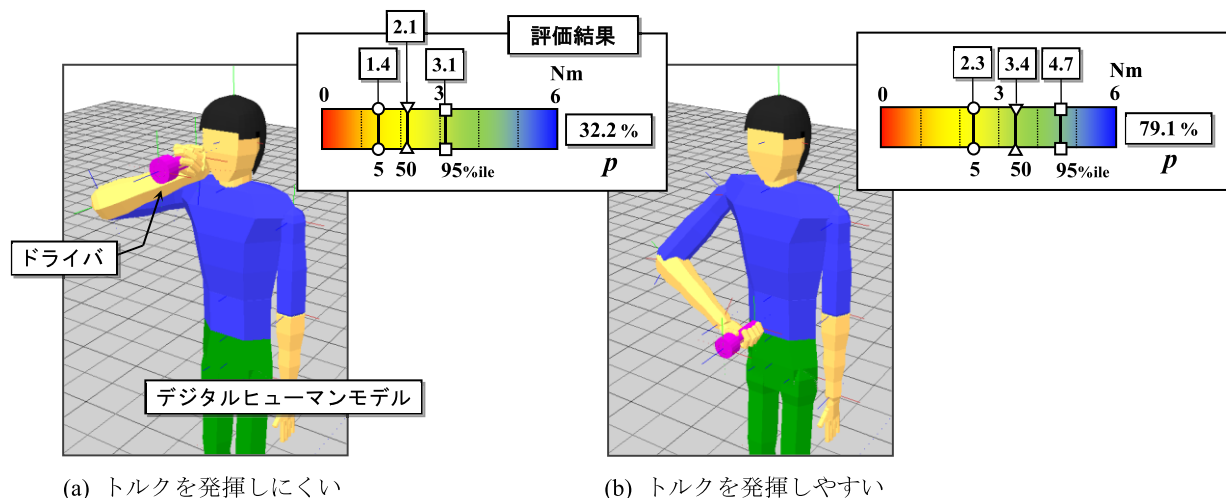


図7 上肢ひねり作業の評価システム

発揮度は32.2%、最大発揮トルクの50%ile値は2.1Nmとなった。手関節の屈伸軸と前腕の方向ベクトルは、いずれも回転対象の方向ベクトルと一致していないことから、発揮度が小さくなったと考えられる。また、(b)の場合、回転対象はデジタルヒューマンモデルの腹部の前方に位置している。このとき、発揮度は79.1%、最大発揮トルクの50%ile値は3.4Nmとなった。前腕と回転対象の方向ベクトルはほとんど一致していないが、手関節の屈伸軸と回転対象の方向ベクトルが一致していることから、(a)と比べて発揮度および最大発揮トルクが大きくなったと考えられる。

このように本システムを使用することによって、設計者は上肢をひねって操作する道具や機器の配置を検討する際、発揮度およびそこから推定される最大発揮トルクの大きさを基にして力の入れやすい配置を検討することができる。

5. おわりに

本研究では、これまでに開発した上肢ひねり作業評価システムにおいて、トルクが必要な作業を評価することができるように拡張することを目的とした。ドライバを用いた測定実験を行い、種々の位置の最大発揮トルクと作業姿勢を測定し、その結果を基にして、上肢姿勢によって決まる発揮度から最大発揮トルクを推定する手法を提案した。最後に、最大発揮トルクを基にした上肢ひねり作業評価システムを開発した。

本実験では実験参加者を21~24歳の男性に限定したが、年齢や性別によって発揮されるトルクは異なると予想される。すなわち、実験参加者の属性によって、計測データから導出される発揮トルクの推定式も変化すると予想される。今後はより幅広い属性の実験参加者に対して実験を行い、本手法の妥当性を検証する必要がある。今回はドライバのグリップ部の直径とドライバの回転軸の方向を限定して実験を行った。今後は、ドライバの直径や回転軸の方向をいくつか変化させた実験を行い、提案した最大発揮トルクの推定手法が適用可能かどうか検証していく。また、発揮トルクの推定精度の向上を目的に、上肢の筋肉を考慮したモデルに拡張していく予定である。

参考文献

- (1) D. B. Chaffin, "Improving digital human modeling for proactive ergonomics in design", *Ergonomics*, 48-5(2005), pp.478-491.
- (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), pp.272-275.
- (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), pp.395-399.
- (4) 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2報)」, 精密工学会誌, 75-7(2009), pp.871-875.
- (5) 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), pp.89-96.
- (6) 金指 央樹, 宮田 なつき, 新井 民夫, 千葉 龍介, 太田 順, 「上肢作業姿勢生成のための評価関数推定」, 精密工学会誌, 74-12(2008), pp.1335-1340.
- (7) 梁瀬 度子, 平手 早苗, 「高齢者の動作能からみた把手操作時の至適高について」, 人間工学, 24- Supplement(1988), pp.222-223.
- (8) Won-gyu Yoo, "Effects of the difference screwdriver handle sizes on the forearm muscles activities and

wrist motion during screw-driving work", *Journal of Physical Therapy Science*, 25-7(2013), pp.885-886.

- (9) Patrick G. Dempsey, Raymond W. McGorry, Niall V. O'Brien, "The effects of work height, workpiece orientation, gender, and screwdriver type on productivity and wrist deviation", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 33(2004), pp.339-349.
- (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), pp.2148- 2153.

【原稿受付】2015 年 8 月 8 日、【掲載決定】2015 年 9 月 29 日

【著者連絡先】

福井 裕 摂南大学、特任技師 e-mail: y-fukui@eng.setsunan.ac.jp
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8、摂南大学理工学部