

称号及び氏名 博士（工学） 福井 裕

学位授与の日付 平成 21 年 3 月 31 日

論文名 「デジタルヒューマンモデルにおける前腕ひねり作業評価システムの開発」

論文審査委員 主査 杉村 延広  
副査 菊田 久雄  
副査 大多尾 義弘

## 論文要旨

近年、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 や生産工程シミュレータなどを組み合わせ、製品の操作性や工場における人間の作業性などの人間工学的な評価をコンピュータ上で仮想的に行う手法が導入されている。ここで言う人体モデルとは、コンピュータグラフィックスを用いた映画やビデオゲームに登場するような描画を目的としたモデルではなく、人間の骨格構造や運動機能などを再現することができるモデルのことである。

デジタルヒューマンモデルは元々、自動車の運転席周りの設計を目的として開発されてきた経緯があり、早くから自動車設計への応用が進められている。現在では、自動車の設計だけでなく、航空機や住宅設備の設計や工場のライン設計などの領域で応用されている。

既存のデジタルヒューマンモデルでは、前腕のひねり運動が十分にモデル化されておらず、ドライバーによるネジ締め作業や操作盤のツマミの回転などの前腕のひねりを伴う製品や作業の設計に利用することは難しい。既存のデジタルヒューマンモデルの前腕はひねることのできない 1 本の剛体リンクとしてモデル化されており、手関節を 3 自由度のボールジョイントとみなし、そのうちの 1 自由度の回転で前腕のひねりを代用している。その回転には実際の人間に合わせた可動域が設定されているが、それらは腕がどのような姿勢であっても同じ角度になっている。そのため、作業者にとってドライバー等の作業対象をどの位置に配置すればひねり易いか、また、大きくひねるためにはどのような姿勢がよ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。

本論文は、ドライバーのネジ締めに代表される前腕のひねりを伴う作業の難易度を評価するためのデジタルヒューマンモデルの開発について論じたものであり、以下の 6 章から構成されている。

第 1 章は緒論であり、デジタルヒューマンモデルの概要およびその問題点を示すとともに、前腕のひねり運動を再現することができるモデルの必要性を述べた。また、本研究の目的および本論文の構成について述べた。

第2章では、既存のデジタルヒューマンモデルが備えている基本機能を整理し、デジタルヒューマンモデルを用いた設計例を述べた。次に、本研究で対象としている上肢のモデル化に関する研究開発の現状を述べた。すなわち、既存のモデルでは肩や手の詳細なモデル化が進んでいるが、前腕は手関節の自由度に前腕の回転の自由度を付加しただけという簡易なモデルでしかない。また、本研究で得られた成果を可視化するために独自に開発したデジタルヒューマンモデルについて、人体モデルのリンク構造および3次元コンピュータグラフィックスを用いた人体モデルの描画方法を述べた。

第3章では、前腕のひねり運動をモデル化するための指針を得るために、以下に示す2つのアプローチから前腕のひねり運動の解析を行った。第1のアプローチでは、前腕のひねり運動が前腕骨である橈骨と尺骨の相対的な運動によって生じることから、両骨の運動中の位置関係の変化を調べることで、解剖学的な観点から前腕のひねり運動を解析した。そのために、X線CT装置を用いて前腕を撮像し、得られた断層画像を積層することによって橈骨と尺骨の3次元ポリゴンモデルを構築した。ポリゴンモデルを基に、前腕の5カ所（前腕長を基準に手首から10%、30%、50%、70%、90%点）の断面において、橈骨と尺骨の骨間距離を計測した結果、肘が伸展位と屈曲位の両方において、手首から30%点の断面における骨間距離が最も大きくなることがわかった。また、肘が屈曲位と伸展位において骨間距離を比較した結果、前腕が回内位にあるときは、伸展位より屈曲位における骨間距離が小さくなることがわかった。また、前腕が回内位と中間位の間、中間位、回外位にあるときは、肘が屈曲位と伸展位において骨間距離に大きな差が見られなかった。このことから、骨間距離が小さい、すなわち橈骨と尺骨がより接近することにより前腕の回転限界への到達が遅くなり、その結果、屈曲位において前腕の回転可動域が大きくなると考えることができる。

第2のアプローチでは、上肢の姿勢と前腕の回転可動域との関係性を調べることで、幾何学的な観点から前腕のひねり運動を解析した。そのために、前腕をひねることによって生じる皮膚表面の形状変化を捉えることができるセンサを用いて、被験者の周りの複数の位置にあるドライバを模した作業対象を回転する際の、前腕の回転可動域および上肢の作業姿勢を計測した。その結果、作業対象の位置によって前腕の回転可動域が変化することがわかった。また、作業対象と前腕の方向ベクトルが一致する度合いを求めたところ、方向ベクトルの一致度合いと前腕の回転可動域には統計的に有意な相関関係があることが示された。このことから、上肢の各セグメントの方向ベクトルの一致度合いから回転可動域を推定することが可能であるという指針を得ることができた。

第4章では、第3章で得られた指針を基に、前腕のひねりを伴う作業を行う際の上肢姿勢から作業対象の回転可動域を推定する手法を提案した。そのために、作業対象を被験者の周りの複数の位置に配置し、作業対象と上肢を表すリンクモデルにおいて、作業対象を回転させる際の各セグメントの方向ベクトルと作業対象の回転可動域を計測した。また、方向ベクトルの一致度合いを表す一致度という指標を提案し、作業対象と手の方向ベクトルの一致度、作業対象と前腕の方向ベクトルの一致度、前腕と上腕の方向ベクトルの一致度をそれぞれ求め、それらの一致度を組み合わせて上肢全体の一致度を定義した。上肢全体の一致度と作業対象の回転可動域には統計的に有意な相関関係があることがわかった。また、計測したデータには個人差が原因と考えられるばらつきが確認された。個人差を考慮するために、計測したデータから回転可動域の5、50、95%ile値を求め、その境界を表す曲線を2次式でそれぞれ近似した。これらの式を基にして、上肢全体の方向ベクトルの一致度から作業対象の回転可動域を推定する式を提案した。この式を用いることにより、個人差による分布において、平均的な回転可動域(50%ile)やその上下限(95%ile, 5%ile)を推定することが可能となった。

第5章では、人間の上肢の自由度には冗長性があるため、デジタルヒューマンモデルが作業対象を把持する際、手と肩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ることから、前腕のひねり作業に特化した上肢作業姿勢を決定するためのルールを提案した。本研究では、前腕のひねりを伴う作業では、作業対象をより大きく回転できることが良い規範であると考

える。この規範の下では、作業対象を大きく回転できるような作業姿勢をとることとなる。第4章において、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選択することが予想される。

このことを立証するために、作業対象の回転可動域が最大となる姿勢において上肢の各セグメントの方向ベクトルから上肢全体の一致度を求めた。その結果、作業対象の回転可動域が最大となる姿勢では、上肢全体の一致度も最大となることがわかった。すなわち、前述した第4章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条件であることが立証された。

また、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際の上肢姿勢では、上肢全体の一致度が最大となる理想的な姿勢より、一致度が減少する姿勢、すなわち肘の位置が低い姿勢をとっていることがわかった。この要因を検討した結果、より高い位置にある作業対象を把持する方が、理想的な姿勢との一致度の差が増加することがわかった。すなわち、上方にある作業対象を把持する場合、姿勢を維持する筋負担が増加し、それが原因となって肘が下がり一致度が減少することが明らかになった。この結果に基づき、作業対象を把持する際の手首の高さに比例した一致度の減少割合を求める回帰式を最小自乗法により近似した。以上のことから、前腕ひねり作業における上肢作業姿勢決定ルールを「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、その姿勢から作業対象を把持する際の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。

最後に、第4章で提案した上肢全体の一致度から作業対象を推定するための式と、本章で提案した上肢作業姿勢決定ルールを、開発したデジタルヒューマンモデルに組み込むことによって、前腕ひねり作業評価システムを構築した。

第6章では、本研究で得られた成果を総括した。

## 審査結果の要旨

本論文は、機械の組立作業における作業性を人間工学的観点から解析したものである。そのために、ドライバのネジ締めで代表される前腕のひねりを伴う作業の難易度を実験的に評価するとともに、その結果をデジタルヒューマンモデルに組み込み、前腕のひねりを伴う作業性を評価するシステムの開発について論じており、次のような成果を得ている。

- (1) 現状におけるデジタルヒューマンモデルの研究状況を分析し、前腕のひねりを伴う作業性評価の観点からの問題点を分析するとともに、本研究で必要となる新たなデジタルヒューマンモデルの開発を行っている。
- (2) 前腕のひねり動作の基礎解析として、X線CTおよび前腕の表面の回転角を計測するためのシェイプテープを用いた計測を行い、ひねり動作を伴う作業に影響する因子を明確にしている。特に、前腕の方向と作業対象の回転軸との角度が前腕のひねり動作に大きく影響することを明確にしている。
- (3) 作業者の右肩位置を基準にして、複数箇所に配置した作業対象を右腕で回転させる実験を行い、位置による作業対象の回転可動域について分析している。この結果、上腕、前腕、手および作業対象回転軸の相対的な姿勢により回転可動域が変化すること、相対的な姿勢と回転可動域の間の定量的な関係があることを明確にしている。
- (4) 作業者が主観的に姿勢を決定する場合と回転可動域を確認しながら姿勢を決定する場合について、(3)と同じ作業実験を行い、上腕、前腕、手および作業対象回転軸の相対的な姿勢と回転可動域の定量的

関係を検証している。また、この関係をデジタルヒューマンモデルに実装し、ひねり動作を評価するシステムを実現している。

以上の諸成果は、機械生産における回転動作を伴うに組立に関する新しい知見であるとともに、新たな生産工程の研究開発に寄与するものであり、本分野の学術的・産業的な発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。

学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。