

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25730164

研究課題名(和文) デジタルハンドによる製品の操作性評価に基づくエルゴノミック設計支援システムの開発

研究課題名(英文) Development of the system for assisting human-centred product design based on virtual operability assessment with hand models

研究代表者

遠藤 維 (Endo, Yui)

独立行政法人産業技術総合研究所・デジタルヒューマン工学研究センター・主任研究員

研究者番号：40599073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：人間の手の形状と運動を精密に模擬できるデジタルハンドモデルを用いて、製品モデルに対し、仮想的なエルゴノミック評価による設計支援システムを開発することを目的とする。本研究では、製品に対する「操作しやすさ」を、手指の力・トルク発揮効率等の観点から、定量的かつ仮想的に評価するシステムを実現するための研究を以下のテーマのもと行うものとする：1) 把持姿勢生成時における、製品に対する手指の接触領域導出手法の高精度化、2) 製品の操作タスクに対する「操作しやすさ」の定量評価指標のモデル化、3) 把持姿勢および「操作しやすさ」定量評価指標の妥当性評価。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the research is to develop a system for assisting human-centred product design based on virtual operability assessment with 3-dimensional precise hand models. In this study, the research for realizing the evaluation of the "task operability" for various products in ergonomic aspects of force and torque exertion by human hand, including validation of the system, was conducted, as follows: 1) The precise calculation method of the hand grasp posture with contact area for the product, 2) modeling the quantitative "operability" for operation tasks of the product, 3) validation of the system.

研究分野：設計工学

キーワード：ハンドモデル デジタルヒューマン デジタルハンド 把持

### 1. 研究開始当初の背景

デジタルカメラ、携帯電話といった情報機器、洗剤のボトル容器、自転車や自動車のハンドル、ハンドブレーキなど、人間による把持・操作を必要とする製品は数多く存在している。近年、これらの製品開発において、筐体の持ちやすさや、ボタン等のユーザインタフェース (UI) の操作しやすさなど、製品に対するエルゴノミック性の評価 (ユーザである人間に使いやすく設計されているかどうかを評価すること。以後、「エルゴノミック評価」と呼ぶ) を行うことで、製品の付加価値や市場競争力を高めることへの関心が高まっている。従来、これらのエルゴノミック評価は、製品の物理モックアップ (試作品) を利用して、実被験者にテストをさせるという形で行われてきた。しかしながら、物理モックアップの製作、多種多人数の実被験者の確保には、通常、莫大な時間と費用がかかるため、実際には、十分なエルゴノミック評価が行われずに市場に出回ってしまうことが多い。また一方で、3次元 CAD システムが普及し、製品筐体の形状・特性・機能を計算機上で再現した3次元の製品モデルが、設計の初期段階から利用可能となっていることから、CAD システムで設計された製品モデルを用いて、エルゴノミック評価を計算機上で仮想的に行うことで、上述のコストを削減し、評価にかかる期間を短縮したいという要望が高まっている。現在の CAD システムを用いて、このような製品に対する仮想エルゴノミック評価を行うには、

1. 評価に有効な精度でのシミュレーション機能をもつ手の3次元モデル (デジタルハンドモデル) の生成機能
2. 製品の三次元形状モデルを用いた、機器筐体の持ちやすさの評価機能
3. レバーやボタンなどの物理的な形状・配置・操作順序などに関する操作しやすさの評価機能

といった機能の実現が必要となる。これまでに、Jack, RAMSIS, Santos といった人体全身の三次元モデル (デジタルヒューマンモデル) を用いたシミュレーションソフトウェアが市販・研究開発され、自動車・航空機的设计や、軍事産業などにおいて活用されている。また、ロボット工学では、例えば、Miller らがロボットハンドによる製品の把持、把持安定性の解析を行うソフトウェアを開発している。しかしながら、これらの既存技術には、実製品を対象として仮想エルゴノミック評価を行う場合に要求される、上述の高精度なデジタルハンドや評価機能が実現されていない。

### 2. 研究の目的

そこで、人間の手の形状と運動を精密に模擬できるデジタルハンドモデル (以後、ハンドモデルと呼ぶ) を用いて、製品モデルに対し、仮想的なエルゴノミック評価による設計

支援システムを開発することを目的とする。

報告者はこれまでに、上述のシステム開発に関して以下の機能を提案し、実現してきた。

1. 運動学的、幾何学的に高精度であり、かつ日本人成人の代表的な寸法バリエーションをもつハンドモデルをシミュレートし、システムによって、運動学的 (手指の関節角度) もしくは力学的 (手指関節に対するトルク・外力) な制御をおこなうことで、製品モデルに対して、人間のありうる把持姿勢を高速かつ自動的に生成する機能
2. 製品モデル上の把持接触位置から製品の把持安定性評価、把持時の手指関節角度から各指の運動性の妥当性を評価する把持容易性評価、および、接触面積、特徴稜線へのフィット性などから把持姿勢が「しっくりくる」かどうかを評価する把持適合性評価機能

以上より、製品に対する把持時の手の「持ちやすさ」を、定量的かつ仮想的に評価するシステムを実現し、そのエルゴノミック評価システムとしての妥当性を、実製品・実被験者を用いて確認した。しかしながら、多くの製品は、把持するだけではなく、ボタンを押す、容器の中身を注ぐといった操作を必要とする。このような操作に対するエルゴノミック評価では、手指の各関節において発揮されるトルクや、製品に対する接触力の分布などを評価することで、操作の妥当性を評価する必要があるが、既存研究においてこういった評価機能を含むものは例をみない。

そこで、本研究では、製品の筐体や機構、UI に対する「操作しやすさ」を、手指の力・トルク発揮効率の観点から、定量的かつ仮想的に評価するシステムを実現するための研究を行うものとする。また、実現したシステムのエルゴノミック評価システムとしての妥当性を、実被験者・実製品を用いた実験により確認するための方法を開発する。

### 3. 研究の方法

前述の目的を達成するため、これまでの研究成果に加え、以下の研究をおこなっていく。

1. 把持姿勢生成時における、製品に対する手指の接触領域導出手法の高精度化
2. 製品の操作タスクに対する「操作しやすさ」の定量評価指標のモデル化。操作時における手指の力・トルク発揮効率を仮想・定量評価する。
3. 把持姿勢および「操作しやすさ」定量評価指標の妥当性評価

### 4. 研究成果

#### 4.1 把持姿勢生成時における、製品に対する手指の接触領域導出手法の高精度化

CAD 等の設計ソフトウェアから出力された製品の筐体形状を表す3次元メッシュモデル

(製品モデル) に対し、ハンドモデルの把持姿勢を安定して導出する。

ハンドモデルを運動学的に制御し、幾何学的な特徴から評価を行う場合、一般的には、ハンドモデルは、以下の構造をもつ。

1. 手表皮形状を表す 3 次元サーフェスマッシュモデル (手表皮モデル)
2. 関節回転中心および関節の接続構造情報を表すリンク構造モデル
3. リンク構造モデルの各関節回転にもとづいて表される手姿勢に対応するよう、手表皮モデルを変形するための手表皮変形モデル

一方、本手法においては、製品モデルに対する適切な把持姿勢を探索する際、製品モデルと手表皮との接触・干渉判定を効率よく行う必要があるが、製品モデルのように、凹形状を含む可能性のあるメッシュに対する干渉判定は、計算コストが大きい。また、手表皮モデルについても、把持時の接触による変形を考慮する必要があるが、3 次元サーフェスマッシュでは、手内部の体積変化を考慮した変形が困難である。

以上の理由から、本手法においては、以下のようにハンドモデルおよび製品モデルの構造および性質を定義した。

1. 手形状は四面体ボリウムメッシュモデル (手ボリウムモデル) として表現する。
2. リンク構造の各リンクに付着する骨形状を近似的にカプセル形状で表現し、関節中心において、隣接するリンク同士は、1 自由度または 3 自由度の回転運動制約をもつ (リンク形状モデル)。
3. 手ボリウムモデル内部にある四面体各頂点は、その位置がリンク形状モデルの各リンクに近接する場合、このリンクのローカル座標系での初期姿勢での位置にバインドされる。
4. 製品近似モデルは、任意の直径および中心位置をもつ球体の集合によって近似的に表現される。

以上のモデルを、空間内に配置し、接触判定機能を有する既存の動力学シミュレーションエンジンを使用して、ハンドモデルが初期姿勢から把持姿勢に至るまでの挙動をシミュレーションする。製品近似モデルは空間内の任意の位置に固定される。手ボリウムモデルは、リンク形状モデルの各カプセル形状に対して与えられる外力を制御することによって、その姿勢を制御する。製品近似モデルと手ボリウムモデルとの接触判定および接触に起因する挙動は、動力学シミュレーションエンジンがその計算を受け持つ。

一方、人間の経験や知識が大きく影響する把持動作を再現するようにリンク形状モデルに対する制御モデルを構築することは極めて困難であることから、本手法では、初期入力

として、第 1 指から第 5 指の指先や、てのひらに配置された任意のリンクに近接する表皮が接触すると考えられる製品モデル上の位置を指定しておく。シミュレーションでは、これらの対応点間の距離がそれぞれゼロに近づくようにリンク形状モデルの制御を行う。本研究においては、これまで不安定だったこの制御をいかに安定かつ頑健な手法とするかが課題の一つであった。ここでは、経験的に最も安定性の高い結果となった PD 制御を使用することとした。以下にその詳細の一部を示す。

ユーザが指定した製品上の目標点を  $m_v$  とし、この点に接触すると想定される手表皮上の頂点を  $v$  とする。  $v$  に対応するリンク形状モデル上の剛体カプセル形状を  $b_v$  とすると、シミュレーション時刻  $t$  において、この剛体  $b_v$  にかける外力  $\mathbf{f}_{b_v}(t)$  は以下のように計算される。

$$\mathbf{f}_{b_v}(t) = k'(t)\varepsilon_F\Delta\mathbf{p}'_v(t) + \varepsilon_D(\Delta\mathbf{p}'_v(t) - \Delta\mathbf{p}'_v(t-1))$$

$$\Delta\mathbf{p}'_v(t) = \mathbf{p}_{m_v} - \mathbf{p}'_v(t)$$

$$\mathbf{p}'_v(t) = \mathbf{p}_v(t) + d\mathbf{n}_v(t)$$

ここで、 $\mathbf{p}_v(t)$  および  $\mathbf{n}_v(t)$  はそれぞれ頂点の位置ベクトルおよび法線ベクトル、 $\varepsilon_F$ 、 $\varepsilon_D$  および  $d$  はスカラー定数である。また、

$$k'(t) = 1 - \left(1 + \alpha t + \frac{\alpha^2 t^2}{2}\right) e^{-\alpha t}$$

であり、 $\alpha$  はスカラー定数である。この項により、シミュレーション初期段階で剛体に強い力が急激にかかることにより、手ボリウムモデルの形状が破綻するといった問題を解決することができる。

このほか、外力  $\mathbf{f}_{b_v}(t)$  に加え、リンク形状モデル上の各剛体カプセル形状  $b$  に対し、外力  $\mathbf{f}_b^v(t) = -\varepsilon_V\dot{\mathbf{p}}_b(t)$  をかける。ここで、 $\varepsilon_V$  はスカラー定数である。これにより、ハンドモデル全体の位置姿勢をグローバルに把持姿勢へと近づけることができる。

以上の把持姿勢生成手法をソフトウェア上



図 1 把持姿勢生成結果。

に実装し、実製品モデルに対して妥当な把持姿勢を生成できることを確認した(図 1)。なお、本手法では動力学シミュレーションライブラリとして「bullet」を使用した。

#### 4.2 製品の操作タスクに対する「操作しやすさ」の定量評価指標のモデル化

「操作しやすさ」の定量評価指標について、手指操作における筋発揮等の動力学的な評価指標を利用するため、以下の研究に取り組んだ。

1. ハンドモデルへの筋骨格構造モデルの付加
2. 外部筋骨格シミュレーションソフトウェアとの連携
3. 個人別ハンドモデルに対する骨格パラメータの推定

ここでは、人体に関する動力学的な評価として、一般的に、関節回転角度をパラメータとして与えられる人体モデルの動作シーケンス、および動作中に人体に及ぼされる外力等を入力とし、逆動力学シミュレーションにより、関節トルクや筋発揮効率を推定するといった手法を主な対象とした。

これまでにも、例えば AnyBody や OpenSim といった、市販もしくはオープンソースの筋骨格シミュレーションソフトウェアが存在するものの、取り扱う人体モデルについては、代表的なモデルにとどまり、個人別モデルを扱うには至っていない。また、人体モデルの構造については、筋モデルおよび骨格モデルを扱っているものの、表皮形状や内臓等の情報は含まれていない。しかしながら、現実的には、評価すべき動作としては、モーションキャプチャ等の計測システムを用いて計測された「個人」の動作データが利用されることが多く、標準的な人体形状やパラメータ（もしくはリンク長の伸縮等にもとづく簡易な個人推定モデル）によるシミュレーションでは、合理的とは言い難い可能性があった。これに対し、本研究では、筋・骨格形状のみならず、人体表皮形状や内臓形状も配置した個人別モデルを生成し、これらの幾何学的な情報にもとづく個人別の骨格パラメータを推定することで、個人別モデルに対する合理的な筋骨格シミュレーションを実現することを目的とする。

上述の目的のため、4.1 節において使用された、報告者が開発中の人体シミュレーションのためのプラットフォームソフトウェアにおいて、現状のハンドモデルに対して筋骨格に関する情報を付加するための枠組みを制定し、実装した。また、後述する個人別ハンドモデル生成結果を既存の筋骨格シミュレーションソフトウェアにおいても利用できるよう、筋骨格構造に関するデータの互換性を解決し、他のソフトウェアでインポート可能な形式で出力するための機能を実装した。ここでは、OpenSim を一例として実装を行った。また、

手表皮モデルおよびリンク構造モデルを含む個人別ハンドモデルが与えられた際に、その筋骨格パラメータを推定する手法を提案した。そのフローを以下に述べる。

1. 標準的なハンドモデル（標準ハンドモデル）に骨格形状、筋形状および筋腱の接続構造を表現するワイヤセットを、解剖学教本等をもとに手動で配置する。各形状は三角形サーフェスマッシュとする。
2. 与えられた個人別ハンドモデルに対しては、標準ハンドモデルとの各リンクの伸縮率およびローカル座標系の情報をもとに、ステップ 1 で配置された各モデルを再配置する。
3. 標準ハンドモデルの手表皮モデルの各頂点に設定された、リンク構造モデルの各リンクに対する重み情報にもとづき、手表皮モデルのサーフェスマッシュを、各リンクに対応する部位ごとに分割する。各分割形状の分割境界稜線が囲む空間を面分で埋め、各分割形状を閉じたメッシュとして再構築する。
4. ステップ 3 で得られた、標準ハンドモデルに対する表皮分割形状セットの頂点インデックス情報から、個人別ハンドモデルの手表皮モデルに対する分割形状モデルを生成する。
5. 個人別ハンドモデルの各分割形状モデル、骨格形状に対し、体積、重心、慣性モーメントを推定する。さらに、体組織や骨の標準的な密度情報から、これらの質量を推定する。

なお、ここで使用する個人別ハンドモデルについては、標準的なハンドモデルに対して、頂点数・面分数や、解剖学的特徴点となる頂点のインデックスが共通となっている、いわゆる「相同モデル」を使用するものとする。

#### 4.3 把持姿勢および「操作しやすさ」定量評価指標の妥当性評価

4.2 節で述べた個人別モデルへの筋骨格情報の付与や逆動力学シミュレーションの妥当性評価を行う上で、手表皮モデルおよびリンク構造モデルを含む個人別ハンドモデルの生成が不可欠である。本研究では、まず、モーションキャプチャから得られた、被験者の手表皮上のいくつかの解剖学的特徴点（ランドマーク）の動作軌道から、被験者個人のハンドモデルを生成する手法を開発した(図 2-3)。概要は次の通りである。

1. 被験者の任意の手指について、手指の各リンク付近の表皮上に、3 点ずつマーカを貼付する。手の甲にも 3 点以上マーカを貼付する。
2. マーカを貼付した手指について、MP 関節、DIP 関節、PIP 関節各々を自由に動かしている様子を、モーションキャプチャで計測

- する。
3. 他の指についても、ステップ 1-2 を実施する。
  4. 手指のランドマーク点にマーカを貼付し、基準姿勢を計測する
  5. 各計測データに対し、手の甲のマーカ位置を基準として座標系を統一する。さらに、各計測データに対し、マーカ軌道から関節の回転中心位置を推定する。
  6. 標準ハンドモデルの手表皮モデルについて、その各ランドマーク点が、個人別ハンドモデルにおいて対応するランドマーク点に一致するように、標準ハンドモデルの手表皮モデルを非線形最適化により変形する。その際、メッシュ各頂点位置を制御変数、メッシュ形状の変形量を最小化すべき目的関数とした。

また、このほか、より簡便に個人別ハンドモデルを生成する手法として、少数の寸法値を入力とする手法を開発した。これは、被験者数および寸法計測項目が十分なデータベースを利用し、まず、少数の寸法値から、データベースがもつ全寸法計測項目に対する値を推定する。次に、これらの推定寸法値群を制

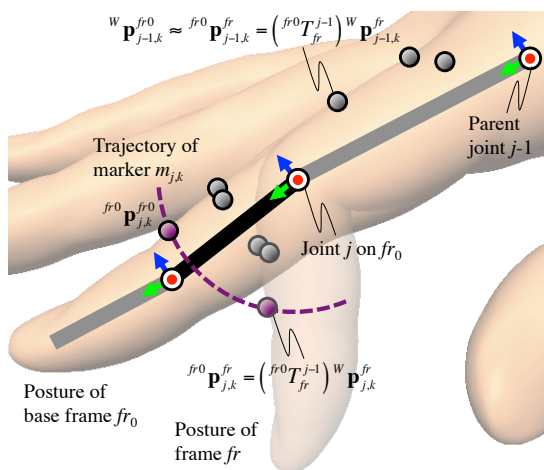


図 2 個人別ハンドモデル生成手法

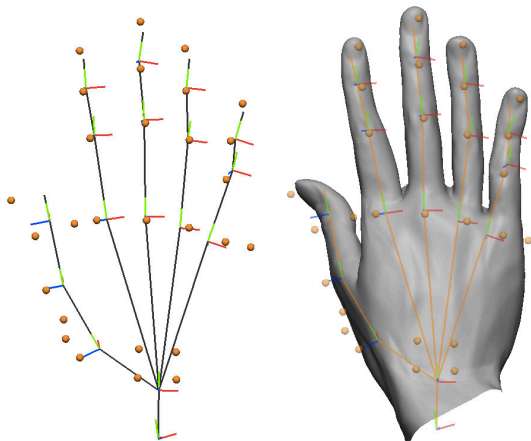


図 3 個人別ハンドモデル生成結果.

約条件として、前述のステップ 6 と同様の目的関数を使用して、標準ハンドモデルの手表皮モデルを最適化する。ただし、計算コストを下げるため、本手法では、リンク構造モデルの各リンクのローカル座標系のそれぞれの軸に対するスケール値を制御変数として、このスケール値にもとづき手表皮モデルの各頂点位置を制御するものとする。寸法値にもとづく本手法は、従来、全身のヒューマンモデルを生成する際に使用される手法として提案されていたものであるが、本研究において、手の詳細形状においても有効であることが確認された。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

Yui Endo ほか 2 名, "Reconstructing individual hand models from motion capture data," Journal of Computational Design and Engineering, Vol.1, pp1-12, 2014.

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

遠藤 維 (YUI ENDO)

国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
研究者番号 : 40599073