HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Plausible 3D Human Hand Modeling for Virtual Ergonomic Assessments of Handheld Product : Construction, Contact simulation and Variational Modeling [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	謝, 雨来
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11314号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55771
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Xie_Yulai_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（工学）　　氏名　謝　雨来

学　位　論　文　題　名

Plausible 3D Human Hand Modeling for Virtual Ergonomic Assessments of Handheld Product: Construction, Contact simulation and Variational Modeling

（携帯型製品の仮想エルゴノミック評価のための手の 3 次元モデリングに関する研究:　その構築, 接触シミュレーション, 寸法バリエーションのモデル化）

人間が手で把持し操作するハンドヘルド型製品では,「持ちやすさ」や「操作しやすさ」といった特性が製品の市場競争力に大きく寄与している. 現在, 企業において, このような製品の「持ちやすさ」や「操作しやすさ」(以後「エルゴノミック評価」と呼ぶ) は, 物理モックアップを実被験者に利用させてテストする方法が, 一般的である. しかしこの方法は, モックアップ製作に多大な時間やコストを要すること, また広範囲な年齢・性別・身体特徴をもつ多数の被験者を参加させたテストの実施が難しく, さらに「持ちやすさ」や「操作しやすさ」が定性的な主観評価値としてしか得られず, 合理性に欠けるといった問題をもつ. このため現実には開発期間やコスト上の制約から, 十分な評価を行わないままに「持ちづらく」「操作しづらい」製品を量産しているケースも少なくない.

この課題解決のため, 人間の手指形状と運動を 3 次元で模擬した「デジタルハンド」により, 製品の 3 次元 CAD モデルを仮想的に把持・操作させ, 製品のエルゴノミック評価をデジタルデータのみから迅速かつ容易に評価できる「仮想エルゴノミック評価システム」が, いくつかの研究機関で試作開発されている. これらのシステムを今後さらに実設計に応用するためには, デジタルハンドによる仮想エルゴノミック評価が, 製品設計に十分な精度や信頼性を有していることが必要となる.

しかし, 従来のデジタルハンドに関する研究は,(1) 製品把持時の手の表皮形状や関節構造のモデル化精度が十分に検証されていない,(2) 製品把持時の表皮接触変形のモデル化がなされていない, ならびに (3) 想定されるユーザ集団の統計的な手の寸法バリエーションを反映した手のモデル化と, これに基づく統計的なエルゴノミック評価が行われていない, といった技術課題を持ち, 実用化の障害となっている.

本研究は, これらの技術課題を解決するため,(1) MRI 計測データに基づいた変形可能な表皮と手指骨リンク構造を持つ高精度な手の 3 次元モデル化手法,(2) 把持時の表皮接触変形と接触圧力を妥当な精度で高速に模擬できる表皮変形シミュレーション手法,(3) 写真計測データに基づく個人の手の 3 次元モデル生成手法, さらに (4) 日本人成人の手の寸法の統計的分布を反映した 3 次元モデル群による把持状況の統計的解析手法, の提案を目的としている.

本論文の各章の内容は, 以下の通りである.

第 1 章 Introduction では, 本研究の背景を述べ, 上述の各手法の開発が, デジタルハンドによる仮想エルゴノミック評価の実用化にとって必要不可欠であることを述べている.

第 2 章 MRI-based 3D Precise Human Hand Modeling では, 医療用 MRI による手の計測を行い, 変形可能な表皮と手指骨リンク構造を持つ高精度な手の 3 次元モデル化を行う手法を提案している. まず, 指の屈曲・伸展時や製品把持時の手を MRI で計測し, 得られたボリュームデータから骨と表皮の境界面メッシュモデルをそれぞれ抽出し, 運動前後の手姿勢のメッシュモデルを用いることで, 手指の骨リンク構造の単純関節回転軸の位置・姿勢を ICP 法により同定する. また拇指 CMC 関節の運動を四元数球面線形補間と平行移動の合成で表現する. その結果, これらの骨リンク構造を用いて再現した手指の運動は, 四指および拇指とも, 運動誤差が骨表面で 1mm 以内に収まる高精度なモデルであることを明らかにしている. また親指根元部の大変位の表皮変形は, マーカ点で計測された変位を表皮形状全体に RBF 補間を用いて分布させた. これにより, 拇指曲げに伴う拇指球付近の表皮ふくらみを, 平均 0.8mm 程度で高精度に近似できることを, 実験的に明らかにしている.

第 3 章 Efficient Simulation of Skin Contact Deformation では, 把持時の手指表皮の接触変形と接触圧力を妥当な精度で高速に推定できる近似的な表皮変形シミュレーション手法を提案し, その実験的検証を行っている. この接触変形シミュレーション手法では, 手指の接触変形が局所限定される Quasi-rigid モデル近似を導入するとともに, 非線形な力-変位関係の近似を可能とした拡張 Boussinesqu 近似, さらに人体組織のもつ体積保存性制約を組み合わせ, これを線形相補性問題 (LCP) 問題として解くことにより, 製品接触時の手指表面や掌部分の変形量, 接触圧力, 接触面積などを, 精度を著しく落とすことなく高速に推定できる. また推定された接触力, 変形量, 接触面積を, 画像処理を用いた実験計測値と比較した結果, 提案手法は接触力, 変形量, 接触面積の 3 者の関係を, 高い精度で近似可能なことを実証した. またシミュレーション時間も手指 1 領域の接触で 1sec 以下, 掌でも 30sec 以下と, 設計時の仮想エルゴノミック評価に用いるには十分な高速性を持つことを明らかにした.

第 4 章 Variational Hand Modeling based on Image-based 3D Model では, テンプレートモデルとなる第 3 章で生成された高精度な手の 3 次元モデルと, これとは異なる被験者の手の 3 次元写真計測データとを組み合わせ, 特定被験者の手寸法と関節回転軸が反映された 3 次元モデルを近似的に生成できる手法を述べている. まず掌側の皺部と指背面表皮上の数点がマーキングされた特定被験者の手をデジタルカメラで多方向から撮影し, 得られた画像群から特定被験者の手寸法をもつテクスチャ付表皮計測メッシュモデルを生成する. この表皮計測メッシュモデル上から, 手の解剖学的な特徴寸法群を自動抽出し, その寸法データに基づいてテンプレートモデルの各部を異なる倍率でスケーリングすることで, 特定被験者の寸法を近似したスケール後表皮メッシュモデルを生成する. 一方, 異なる 2 姿勢における表皮計測メッシュモデルの指背面上マーカ点位置の比較より, 第 2 章と同様の方法を用いて特定被験者の手指の関節回転軸を導出する. さらにこれらのメッシュモデルを用いて, 特定被験者の手指の関節回転軸データをスケール後表皮メッシュモデル内に配置する. これにより MRI 計測に頼らずとも, 特定被験者の手寸法と関節回転軸が反映された手の 3 次元モデルを近似的に生成可能なことを示している. また,MRI 計測データとの比較により, 提案手法は回転軸の軸間距離誤差が約 2mm 以内であり,Power-Grasp 時のエルゴノミック評価には許容可能な精度で特定被験者の手モデルを生成可能であることを示している.

第 5 章 Statistical Virtual Ergonomic Assessment of Hands based on Anthropometric Statistical Data では, 産業技術総合研究所が計測公開している日本人成人の手寸法の統計分布を用い, その分布をサンプリングした寸法をもつ手のモデルを第 4 章の方法で複数生成し, 第 3 章で提案した表皮変形シミュレーションへ入力することで, 同一製品を複数の日本人成人が把持した場合の接触面積や接触圧力の統計分布を近似的に推定できる方法を提案し, この方法が日本人の手の統計的寸法バリエーションを考慮した仮想エルゴノミック評価に有効となりえることを示唆している.

第 6 章 Conclusions では, 上記各章で得られた研究成果の要点をまとめ, 合わせて今後の課題を述べている.