

学 位 論 文 題 名

A Study of Virtual Ergonomic Assessment using Digital Hand

(デジタルハンドを用いた仮想エルゴノミック評価の研究)

学位論文内容の要旨

人間が把持し操作する工業製品は多岐にわたり、その市場規模も大きい。デジタルカメラ、携帯電話、バーコードリーダといった情報機器から、電動工具、容器、自動車の操作部などが典型例である。これら製品の市場競争力を今後どのように維持してゆくかは、各メーカーでも大きな課題である。その解決策の1つとして、「持ちやすく」「操作しやすい」エルゴノミック設計を行い、製品の付加価値を高め、市場での差別化を図る戦略が考えられる。近年、エルゴノミック設計に関する認証制度が発足していることから、その関心の高さが示されている。

製品の「持ちやすさ」や「操作しやすさ」の評価(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評価する方法が一般的である。しかしこの方法は、モックアップの製作に時間やコストを要し、広範囲な年齢・性別・国籍・身体特徴をもつ多数の被験者を参加させた評価の実施が難しく、さらに「持ちやすさ」や「操作しやすさ」が定性的評価値でしか得られず合理性に欠けるといった問題をもつ。従って、このような物理的な試作品と実被験者によるテストに頼らずとも、設計上流で短期間かつ低コストに、製品のエルゴノミック評価を合理的・定量的に行える手法の開発が、企業のデザイン部門において強く望まれている。

一方、これらのデザイン部門には、3次元CADシステムが普及し、筐体の3次元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。そこで、人間の手の形状や構造を精密に模擬したモデルであるデジタルハンドモデル(以下「デジタルハンド」と呼ぶ)により、製品モデルを仮想空間内で把持させてエルゴノミック評価を仮想的に行うことで、上述のコストを減少できる可能性が生まれている。すでに人体全身の3次元デジタルヒューマンモデルを利用した市販のシミュレーションソフトウェアが自動車や航空機の設計や組立作業環境の仮想評価に利用されているものの、これらのソフトウェアに含まれているデジタルハンドは、形状精度や寸法バリエーションが十分ではなく、把持や操作の容易性を仮想評価する機能も実装されていない。

そこで本論文では、デジタルハンドと3次元製品モデルとを組み合わせ、人間の手による把持・操作を必要とする製品に対し、仮想的にエルゴノミック評価が行えるシステムを開発し、その有効性を実験的に検証することを目的とする。その実現のため、本論文では、エルゴノミック評価に必要となる以下の3種類の機能を開発し、それらの機能を評価している。

まず、豊富な寸法バリエーションを持ち、運動学的または幾何学的に正確な3次元デジタルハンドの生成機能を開発した。この機能は、産業技術総合研究所が開発したデジタルハンド『Dhaiba-Hand』をベースとしている。『Dhaiba-Hand』は、103人の日本人被験者の手寸法の測定値に対する因子分

析によって得られた「ジェネリックハンドモデル」に基づき、9種類の代表寸法バリエーションをもつデジタルハンドを生成できる。また、モーションキャプチャおよびMRI測定データの運動解析によって得られた高精度なリンク構造モデルをもつ。本研究ではこの『Dhaiba-Hand』に、手指の関節回転における表皮メッシュ変形機能、製品とハンドとの高速な干渉判定機能、および、手を自然に開いた状態から閉じた状態までの手指の動作経路を模擬する自然把持経路動作機能を独自に追加し、後述の把持姿勢生成、仮想エルゴノミック評価が可能なデジタルハンドモデルに拡張した。

次に、この機能拡張したデジタルハンドにより、3次元製品モデルを把持する際の妥当な把持姿勢を自動生成する機能を開発した。この機能では、製品モデル表面とハンド表面上の数点の対応点という少ないユーザ入力に基づき、システムが製品モデル表面とハンド表面間の接触点数を最大化する把持姿勢を自動生成する。ここで生成されたデジタルハンドの把持姿勢やハンドと製品間の接触領域を実被験者のそれらと比較した結果、実際の把持姿勢に極めて類似した接触状態や姿勢を生成できることを確認した。さらに、デジタル一眼レフカメラ等の、筐体と手との間のフィット感評価が重要となる製品に対する把持姿勢の自動生成機能として、接触点数、筐体フィレット部への手指形状のフィットの程度、手指関節角の連動性制約を考慮した目的関数を用いた最適化に基づき把持姿勢を生成する機能を開発した。実際のデジタル一眼レフカメラを対象に、推定された最適把持姿勢を実被験者に再現させる実験を行ったところ、その姿勢がいずれの実被験者にとってもフィット感の高い妥当な把持が行える姿勢であることを実験的に確認した。

さらに、生成されたデジタルハンドの把持姿勢における「持ちやすさ」を評価する仮想エルゴノミック評価機能を開発した。まず「把持安定性」の評価機能を開発した。把持安定性は、ロボット工学で用いられている Force-closure 成立の可否と、Grasp quality 値の組み合わせとして表現した。実被験者による「持ちやすさ」の主観評価値との比較から、円筒や四角柱といった単純形状をもつ把持物体に対して、被験者の「持ちやすさ」の主観評価平均値と Grasp quality 値との間に相関性があることを発見した。次に、デジタルハンドによる把持姿勢が自然で妥当なものか否かを評価するため、「把持容易性」の評価機能を開発した。まず、実被験者による実製品の把持姿勢の手指関節角度値を、主成分分析から求められた低次元空間上の1点で表し、これに実被験者の「持ちやすさ」の主観評価値をもとに把持容易性を属性づけした「把持容易性評価マップ」を作成しておく。デジタルハンドによる新たな製品モデルの把持姿勢をこのマップ上にプロットすることで、把持容易性を評価可能とした。さらに、この評価マップを活用した遺伝アルゴリズムにより、デジタルハンドが生成した把持姿勢に不自然な姿勢の手指が含まれていても、より自然で妥当な姿勢に自動修正する手法を考案し、その有効性を確認している。

以上より、本論文で提案したデジタルハンドを用いた仮想エルゴノミック評価のシステムは、人間に類似した自然な製品の把持姿勢を半自動的に生成できるとともに、実被験者による製品把持時の「持ちやすさ」の主観評価値と一定の相関をもつ把持安定性や把持容易性といった評価値を導出でき、人間が把持し操作する製品に対するエルゴノミック評価を、短期間・低コストで合理的に実施できる性能を十分に持つことを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 井 理
副 査 教 授 山 下 裕
副 査 教 授 小野里 雅彦
副 査 准教授 田 中 孝之

学 位 論 文 題 名

A Study of Virtual Ergonomic Assessment using Digital Hand

(デジタルハンドを用いた仮想エルゴノミック評価の研究)

現在、人間の手で把持・操作する製品筐体形状の「持ちやすさ」評価(以後「エルゴノミック評価」と呼ぶ)は、物理試作品を実被験者に頼ったテストにより行われている。しかしこの方法は、モックアップ製作に時間やコストを要し、広範囲な年齢・性別・国籍・身体特徴をもつ被験者を参加させることが難しく、定性的な評価しか行えないため、合理性に欠けるという問題を抱えている。従って、物理試作品や実被験者によるテストに頼らずとも、設計早期に短期間かつ低コストに、製品のエルゴノミック評価を定量的に行える手法の開発が、強く望まれている。

本論文は、これらの問題を解決すべく、人間の手形状を精密に模擬した3次元モデルである「デジタルハンド」により、情報機器等の製品モデルを計算機内で仮想的に把持させ、その「持ちやすさ」をシミュレーションのみに基づいて定量的に評価可能な手法とソフトウェアを新たに開発するとともに、その有効性を実験的に検証することを目的としており、7章から構成されている。

まず第1章 Introduction では、ハンドヘルド型製品のエルゴノミック評価プロセスの現状とその問題点を指摘し、その解決には、精密かつ豊富なサイズバリエーションをもつデジタルハンドのモデリング機能、デジタルハンドにより製品モデルを操作に妥当な姿勢で把持させる機能、ならびに把持姿勢で「持ちやすさ」を定量評価する機能を併せ持つ仮想エルゴノミック評価システムが必要であり、これら機能の開発とその実験的検証が、本論文の目的であることを述べている。また、デジタルマネキンやロボティクス・CG等の既存研究では、このような製品の「持ちやすさ」評価に十分な精度のモデルや評価機能が未だ開発されていないことを明らかにしている。

第2章 Digital Hand では、産業技術総合研究所が開発したデジタルハンド『Dhaiba-Hand』に対して、形状モーフィングによる表皮メッシュ変形機能、代表表現モデルを用いた製品・ハンド間的高速干渉判定機能、製品把持時の手指開閉動作を模擬する自然把持経路動作機能を、本研究で独自に開発・追加し、日本人成人男女手寸法の約9割を包含する9種類の代表寸法を持ち、手表面の変形を妥当な精度で近似可能なデジタルハンドが生成できたことを述べている。

第3章 Optimization-based Grasp Posture Generation I and Grasp Stability Evaluation では、デジ

タルハンドによる製品モデルの妥当な把持姿勢の自動生成法と、持ちやすさの第一の評価指標として、安定な把持の程度を表す「把持安定性」の仮想評価手法を提案している。これにより、製品モデル表面とハンド表面間の接触点数が最大となる最適把持姿勢が、少ない対話入力で自動生成でき、さらにロボット工学で用いられている Force-closure 成立の可否ならびに Grasp quality 値の組み合わせにより、最適把持姿勢における「把持安定性」を 0.0 から 1.0 の範囲で定量評価できることを示している。また、生成されたデジタルハンドの把持姿勢や接触領域が、実被験者のそれらと類似していること、被験者の「持ちやすさ」の主観評価平均値と Grasp quality 値間に一定の相関性があることを実験的に明らかにしている。

第 4 章 Evaluation of Ease of Grasping では、持ちやすさの第二の評価指標として、デジタルハンドによる把持姿勢の手指曲げが自然であるか否かを評価する「把持容易性」の仮想評価手法を提案している。まず、実被験者による様々な製品把持時の約 30 自由度の手指関節角度値を、主成分空間上の点群で表現し、これに「持ちやすさ」の主観評価値を属性づけした「把持容易性評価マップ」を作成し、デジタルハンドによる把持姿勢を同一マップ上にプロットすることで、把持容易性を 3 段階指標として定量評価できることを示している。さらに、把持状態のデジタルハンドの一部手指に不自然な姿勢が含まれていても、より自然で妥当な姿勢をこの評価マップ内から遺伝アルゴリズムを用いて探索発見できることを示している。

第 5 章 Data-driven Grasp Posture Generation では、把持姿勢例題のデータベースを用い、対話入力なしに、情報機器に適した把持姿勢を自動導出できる新たな把持姿勢生成法を提案している。まず把持させたい製品モデルに対し、データベースへ登録された既存の把持姿勢例題中から、入力製品形状を幾何学的に把持可能な全ての姿勢候補を形状マッチングにより探索し、次に上肢関節可動性と製品表示部可視性という 2 種類の幾何学的制約に基づき、姿勢候補の効率的な絞り込みを行うことで、入力された情報機器の把持と操作に適合したごく少数の姿勢候補のみを導出可能なことを、2 種類の情報機器製品モデルに対する計算機実験から明らかにしている。

第 6 章 Optimization-based Grasp Posture Generation II では、持ちやすさの第三の評価指標として、筐体と手の間の「フィット性」の仮想評価手法を提案するとともに、フィット性に優れた把持姿勢を最適化に基づき生成する手法を提案している。ここでは、ハンド・筐体間の接触点数、筐体凸稜線部への指腹部分の重複程度、手指関節角の連動性の 3 者から構成されるフィット性を表した目的関数を設定し、その最適化に基づき把持姿勢を自動決定する手法を開発している。また市販一眼レフカメラのグリップ部を対象に、推定された最適把持姿勢を実被験者に再現させ、その姿勢が人間にとっても、よりフィット感の高い妥当な姿勢であることを実験的に検証している。

第 7 章では、本研究で得られた結論を要約している。

これを要するに、著者は、人間による製品の把持を対象に、計算機シミュレーションに基づいて、「持ちやすさ」の主観評価と一定の相関を持つ仮想エルゴノミック評価を定量的に行うことが可能な手法に対する新知見を与えており、設計工学、人間工学、ディジタル幾何処理工学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって、論文提出者は、北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。