

# デジタルハンドとプロダクトモデルとの統合による アーゴデザイン支援システムの開発 (第6報)

—複数被験者の計測データ分析に基づく把持容易性評価手法の開発—

北海道大学 ○遠藤 維, 金井 理, 岸浪建史

産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター 宮田なつき, 河内まき子, 持丸正明

本研究は、多様かつ高精度なデジタルハンドモデルを用い、製品の把持操作姿勢を求め、UI 操作時の手指動作をシミュレーションするシステムの開発を目的とする。本報では、複数の実被験者の把持姿勢の指関節曲げ角度の計測データから主成分分析を行い、これを用いて、デジタルハンドによって把持容易性を評価する手法について述べる。

## 1. はじめに

CAD システムの普及に伴い、人間が把持して利用する製品に対するエルゴノミクス評価をシミュレーションにもとづき実施したいという要求が高まっている。しかしながら、市販のコンピュータ・マネキンを用いたシステム[1]は、特にパームトップ型の情報機器を対象として仮想エルゴノミクス評価を行うには、豊富なサイズバリエーションや高精度な幾何形状・運動生成機能をもつ手のモデル(デジタルハンド)や、製品形状やユーザインタフェース(UI)操作仕様と手のモデルを連携させたシミュレーション機能といった、評価に要求される精度や機能が不足している。

そこで本研究は、上述の機能要求を満たし、デジタルハンドを用いて情報機器製品の仮想エルゴノミクス評価を行う「アーゴデザイン支援システム」の開発を目的とする。前報まで[2]に、従来研究では行われていなかった、UI 操作を考慮した基本把持姿勢を対話入力にもとづき自動生成し、製品形状モデルの把持安定性を Force-closure と Grasp Quality を用いて定量的に評価する機能を実現し、その結果の妥当性を実験的に確認した。しかしながら、より人間の「持ちやすさ」の感覚に近い指標を得るためには、人間の把持時の手指の角度を考慮した把持容易性の評価が不可欠である。そこで本報では、人間の製品把持時の手指関節角度の計測データにもとづき、デジタルハンドによる把持状態の把持容易性を三段階で評価可能な手法を開発したので報告する。

## 2. 把持容易性評価手法

人間の手が物体を把持したときに感じる「持ちやすさ」には、手の各関節の角度が大きく影響していると考えられる。これまでに、宮田ら[3]がある把持姿勢における指先の目標点への到達性と手指関節角の可動域に対する余裕を同時に評価することで、UI 配置の操作容易性を評価する方法を既に提案しているが、主観的な持ちやすさをかならずしも評価してはいない。これに対し本研究では、実被験者に様々な物体を把持させ、その際の手指の関節角度と主観的な把持容易性を同時に測定した計測データに基づいて、把持容易性を評価する機能を開発した。

### 2.1. 把持容易性評価手法の概要

図 1 に、把持容易性評価手法の概要を示す。本システムでは、あらかじめ、被験者が多種多数のサンプル物体を把持したときの手指の関節角度を、データグループを用いてそれぞれ測定しておく。その測定データの関節角度群に対して主成分分析を行い、数個の上位主成分および各関節の可動限界角度から、把持容易性評価マップを生成する。この前処理によって得られた把持容易性評価マップに、製品形状モデルを把持した時のデジタルハンドの手指の関節角度を入力し、把持

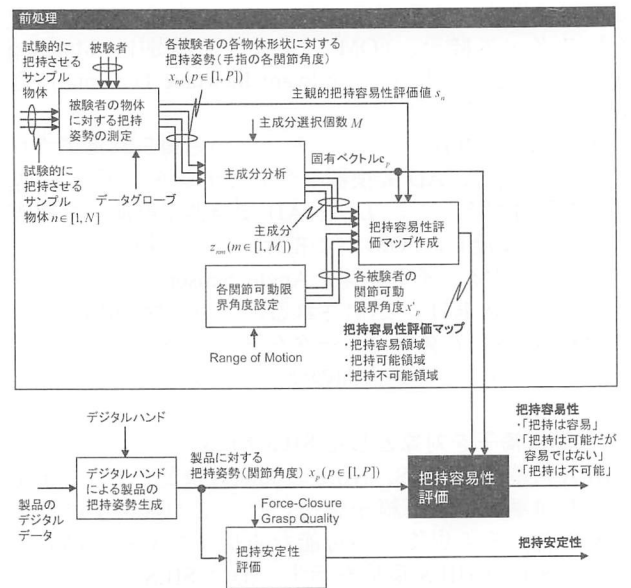


図 1 把持容易性評価手法の概要。

容易性を三段階で評価する。

### 2.2. 物体把持時の手指関節角度の主成分分析

ある把持姿勢における手のリンク構造がもつ  $P$  個 ( $P \approx 30$ ) の関節角度の集合を  $\{x_p | p=1,2,\dots,P\}$  によって表現する。これらの関節角度は互いに独立な変数のようにみえるが、実際にはある複数の関節の運動には連動性があるため、把持姿勢はより少ない自由度の変数で記述され得ると考えられている[4]。

今、 $N$  個の物体に対する把持時の手指の関節角度が計測されたものとし、その各指の関節角度の標準化された測定値の集合を  $\{x_{np} | n=1,2,\dots,N; p=1,2,\dots,P\}$  とする。この測定値集合を行列  $X = [x_{np}]$  ( $x_{np} \in \mathfrak{R}; n \in [1,N]; p \in [1,P]$ ) で表す。ここで、分散・共分散行列

$$V = \frac{1}{N-1} X^T X \quad (1)$$

を定義し、行列  $V$  の固有値解析を行う。 $V$  の固有ベクトルを、対応する固有値が大きい順に  $c_1, c_2, \dots, c_P$  とする。行列  $W$  を  $W = [w_{ij}]$  ( $w_{ij} \in \mathfrak{R}; i, j \in [1,2,\dots,P]$ ) とすると、次式

$$W = [w_{ij}] = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_P] \quad (2)$$

の関係が成り立つ。手指の関節角度が  $M$  個の主成分で近似されるとすると、 $M$  ( $M \leq P$ ) 個の主成分得点

$$z_{nm} = \sum_{p=1}^P w_{pm} x_{np} \quad (m=1,2,\dots,M) \quad (3)$$

によって、近似的に、物体  $n$  に対する把持姿勢が

$(z_{n1}, \dots, z_{nM})$ として記述できる。

### 2.3. 把持容易性評価マップ

実被験者の各サンプル物体に対する把持姿勢（把持経路の姿勢も含む）に対し、(3)式を適用し、主成分得点  $z_{nm}$  を求める。ここで、「持ちやすい」（または「持ちづらい」）という主観的な把持容易性に対する評価値を各サンプル物体に対する主成分得点  $(z_{n1}, \dots, z_{nM})$  と共に  $M$  次元のグラフ上にプロットすれば、一般的に「持ちやすい」（または「持ちづらい」）とされる場合の把持姿勢に対応した主成分得点の領域が得られる。これを「把持容易領域」（または「把持可能領域」とし、これらの領域をもったグラフを「把持容易性評価マップ」と呼ぶこととする。さらに、既に文献[5]等で与えられている手指の関節可動限界を超える手指姿勢を総当りでマップ上にプロットすることで、指の可動限界を超えてしまう「把持不可能領域」も得ることができる。

本稿では、手の大きさによる把持容易性の評価の差を考慮するため、複数の実被験者を、手の大きさに基づき5つのサイズグループに分け、グループごとに把持容易性評価マップを作成する。河内ら[6]により得られている日本人成人の手の寸法バリエーション9種類を、2種類ずつに4等分された境界ファミリと、1種類の平均寸法に分け、この5グループのうち最も近い代表寸法をもつグループを選ぶことで各被験者の手のサイズグループを決定する。

### 2.4. 把持容易性評価手法

デジタルハンドの製品形状に対する把持姿勢の手指関節角に対し、同様に(3)式から主成分得点を求め、このデジタルハンドが属するサイズグループの把持容易性評価マップ上にプロットし、三領域のどの部分に含まれるかを評価することで、デジタルハンドの把持姿勢を「容易に把持できる」「必ずしも容易ではないが把持可能である」「把持不可能である」の三段階で評価する。

### 3. 把持容易性評価マップ生成実験結果

実被験者8名（10代女子）に、58個の製品および直径の異なる12個の円筒と角柱を把持させ、各20個の関節角度を、データグローブ「CyberGlove」を用いて測定するとともに主観的な把持容易性を回答させた。その結果をもとにサイズグループごとに主成分分析を行い、その各主成分に対する累積寄与率をグラフにしたものを図2に示す。第3主成分までの3つの固有値に対応する主成分で、累積寄与率が約70%になっており、手指の把持姿勢においては、各関節の回転角に高い連動性があることが確認できた。この結果と分析の容易さを考慮し、今回は把持姿勢の近似に用いる主成分の個数  $M$  を2とし、得られた把持容易性評価マップの一例（最も平均的なハンド寸法をもつサイズグループ）を図3に示す。丸点は「持ちやすい」、三角点は「持ちづらい」という主観評価を得た物体を表す。●、▲は、実被験者による把持姿勢の測定結果を示す。マップ上の各曲線（網かけ）は、非把持状態から把持状態に至る過程での把持姿勢分布の推移を示す。また前報[2]で報告したデジタルハンドによる直径の異なる複数の円柱の把持姿勢生成結果と、実被験者による同一円柱把持時の主観評価を合わせたものを○、△で示す（添えてある数字は各円柱の直径）。関節角度の測定箇所が少なく、測定データに比較的大きい誤差が含まれていたものの、マップ上において把持不可能領域の外側に殆どの把持姿勢が存在していることが判る。また、把持不可能領域と把持可能領域の境界付近に、「持ちづら

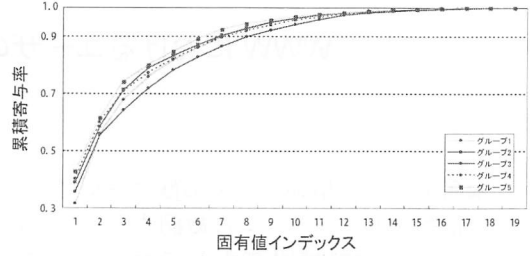


図2 主成分の累積寄与率

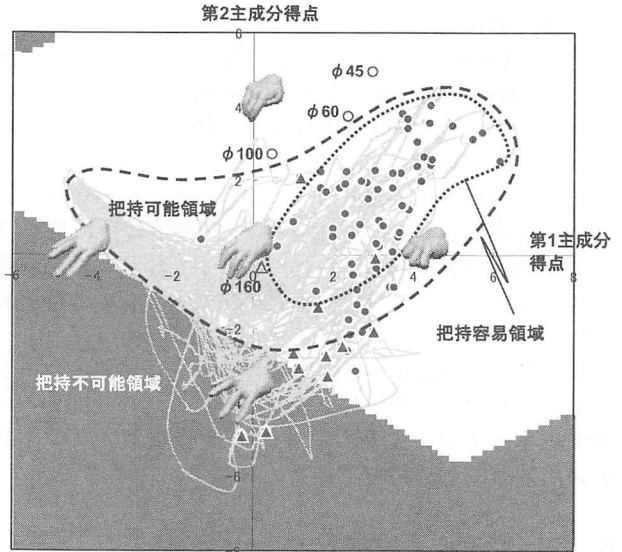


図3 把持容易性評価マップ

い」と評価された姿勢が存在していることも判る。デジタルハンドによる把持姿勢と主観評価の対に関しては、これら主成分得点の分布にやや差があるが、これはデータグループのキャリブレーションが正確に行えていないことが原因であると思われる。

### 4. おわりに

本稿では、複数の実被験者の把持姿勢の測定データにもとづきデジタルハンドによる製品の把持容易性評価を、主成分分析に基づき行える可能性を確認した。

### 謝辞

データグローブでの実験に際して、札幌市立大学の城間祥之教授および学生諸君にご協力いただきましたことを感謝します。

### 参考文献

- [1] 例えば Jack, <http://www.ugs.jp/product/efactory/jack.html>.
- [2] 遠藤, 他: デジタルハンドとプロダクトモデルとの統合によるアーゴデザイン支援システム(第4報), 精密工学会春季全国大会講演論文集, p.23-24, 2006.
- [3] N. Miyata, et al: Posture Estimation for Screening Design Alternatives by DhaibaHand - Cell Phone Operation -, Proc. 2006 Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium (CD-ROM), 2006-01-2327, 2006.
- [4] M. Santello, et al: Postural Hand Synergies for Tool Use, The Journal of Neuroscience, 18(23), 10105-10115, 1998.
- [5] 飯島貴志: 人体のしくみ—CGデザイナーのためのグラフィックバイブル, ワークスコーポレーション, 2003.
- [6] Kouchi, et al: An Analysis of Hand Measurements for Obtaining Representative Japanese Hand Models, Proc. 2005 Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium (CD-ROM), 2005-01-2734, 2006.