



デジタルハンドとプロダクトモデルとの統合による エルゴノミック評価システムの開発 (第2報)*

— 把持容易性評価機能および把持姿勢の最適化手法 —

遠藤 維** 金井 理*** 宮田なつき† 河内まき子†† 持丸正明†

A Development of an Ergonomic Assessment System by Integrating a Digital Hand with a Product Model (2nd Report)

— A Function of Grasp Stability Evaluation and an Optimization Method for a Grasp Posture —

Yui ENDO, Satoshi KANAI, Natsuki MIYATA, Makiko KOUCHI and Masaaki MOCHIMARU

The purpose of this research is to develop a virtual ergonomic assessment system that evaluates grasp stability and ease of grasping of products such as digital cameras without real subjects and physical mockups by integrating 3D digital hand models with the 3D CAD models of the products. In this paper, we propose “ease of grasping” as a new index for the assessment. This index is calculated from the “EOG-map”, in which example grasp postures of real subjects are plotted as principal component scores in low dimensional space. We also propose an optimization-based correction method for an inappropriate finger posture by using the EOG-map.

Key words: digital human modeling, ergonomic assessment, ease of grasping, EOG-map, optimization method

1. 緒 言

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し、その「持ちやすさ」「操作しやすさ」といったエルゴノミック評価を、シミュレーションにもとづき低コストで効率的に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⁾では、人間の手のモデルの精度が十分ではなく、仮想エルゴノミック評価を行うことは、現状困難である。

そこで本研究は、図1に示すように、これらの機能要求を満たし、人間の手の形状や構造、寸法の個人差を精密に模擬したモデルである「デジタルハンド」を用いて製品の仮想エルゴノミック評価を行うソフトウェアシステムの開発を目的とする。前報²⁾では、主に情報機器製品を対象とし、機器のユーザ・インタフェース操作を考慮した把持姿勢を、ユーザが指定した製品形状とハンド表皮上の2組の対応点にもとづいて自動生成し、その把持姿勢における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、Force-closure と Grasp quality を用いた把持安定性評価では、把持時の手指関節角度の妥当性は考慮していないため、不自然な手指の姿勢をもつ把持姿勢でも、把持安定性評価値が高くなる可能性があるといった問題点をもっていた。

そこで本報では、この問題を解決する新たな仮想エルゴノミック評価機能として、実被験者による実製品に対する把持姿勢とその「持ちやすさ」の主観評価を測定したデータベースにもとづいて、手指関節角度の類似性の観点から、デジタルハンドで生成した把持姿勢の把持容易性を評価す

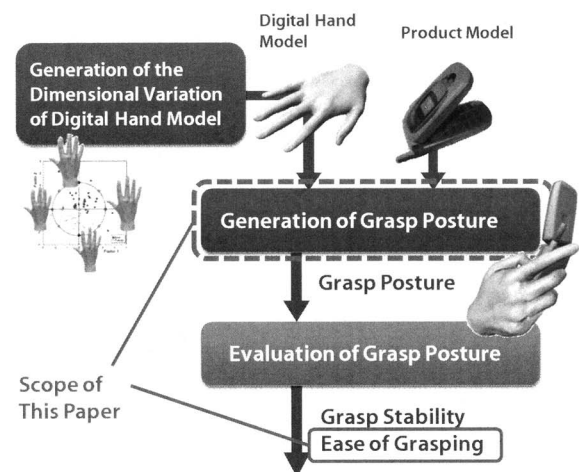


Fig.1 An overview of our system

る機能を提案する。さらに、この評価に基づき、ユーザの対話入力に基づいて生成された把持姿勢を、データベースに登録されている人間のあり得る把持姿勢を目標として、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化により自動的に修正する手法を開発したので報告する。

2. 関連研究

これまででも、把持姿勢例題の学習によって、新たな物体に対する把持姿勢の自動生成を試みた研究がいくつか報告されている³⁾⁻⁵⁾。Kyotaら³⁾は、実被験者の把持姿勢と把持物体形状データとの関係をニューラルネットワークで学習させ、未知物体に対するデジタルハンド把持姿勢を生成する手法を提案した。また、Pelossoffら⁴⁾は、ロボットハンドモデルを用いて、楕円体の物体に対して生成された複数の把持姿勢とその Grasp quality から、Support Vector Machine (SVM)を用いて、新たな楕円体の物体に対する把持姿勢とその Grasp quality を予測する手法を提案している。Liら⁵⁾は、実被験者の把持姿勢をデータベース化し、タスクを考

* 原稿受付 平成20年6月17日

** 学生会員 北海道大学大学院情報科学研究科(札幌市北区北14西9)

*** 正会員 北海道大学大学院情報科学研究科

† 正会員 産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター(東京都江東区青海2-41-6)

†† 産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター

慮した Grasp quality 評価から適切なデジタルハンド把持姿勢を生成する手法を提案した。しかしながら、いずれの研究においても、把持の姿勢生成において、手指姿勢の自然さを考慮した把持容易性評価は行っておらず、場合によっては不自然な把持姿勢を導出する可能性をもつという問題点がある。これに対し本研究では、以下の節で述べる把持容易性評価機能を導入し、さらに、評価時に用いた手指関節角度の運動性を表す「把持容易性評価マップ」を利用した把持姿勢修正手法によって、人間の自然な把持姿勢を生成することが可能な点が特徴である。


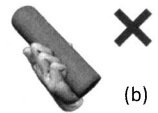

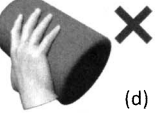
3. 把持容易性評価

前報²⁾における検証から、本システムにおける把持安定性評価は実被験者による主観的な「持ちやすさ」の評価値とある程度の相関性があることがわかった。しかしながら、この評価で用いられている Force-closure と Grasp quality は、製品形状とデジタルハンドとの接触点位置のみから導出されたもので、手指関節角度の妥当性は考慮されていない。したがって、表 1(b)の把持姿勢のように、Force-closure を満たし、Grasp quality も高い値をもっているにもかかわらず、実際にはありえない不自然な手指姿勢をもつ把持姿勢が作りだされる可能性がある。このため、把持姿勢の手指関節角度の妥当性を評価できる、把持安定性とは別のエルゴノミック評価指標を併用する必要がある。この評価指標を、本論文では以後「把持容易性 (EOG: Ease Of Grasping)」と呼ぶこととする。

把持容易性を評価するためには、その把持姿勢における手指の関節角度値の組み合わせを基に評価指標を計算する必要があるが、手指の自由度は合わせて 25~32 ほどあると言われており⁶⁾、全ての関節角度から一つの把持容易性評価指標を計算するのは、入力自由度が高すぎて困難となってしまう。

一方、神経科学における研究の一つ⁷⁾より、把持運動および把持状態における人間の手指の各関節角度の間には、強い相互依存性が存在しているため、現実の把持姿勢は、手指の自由度よりずっと少ない変数によって近似的に表現可能であることが知られている。そこで、本研究では、この手指関節角度の相互依存性を利用し、より少ない自由度で手指の姿勢表現が行える空間へ関節角度値の変換を行い、この変換空間上で把持容易性を評価する新たな指標を提案

Table 1 The relation between grasp stability and ease of grasping

		Ease of Grasping	
		high	low
Grasp Stability	high	 "Possible" Grasp Posture (a)	 (b)
	low	 (c)	 (d)

することとする。

3.1 把持容易性評価の概要

図 2 に、本システムにおける把持容易性の評価手法の概要を示す。把持容易性評価は以下の 3 つの手順により求められる。

- (1) 前処理として、図 2 (A1)-(A3)に示すように、複数のサンプル物体を実被験者が把持した時の手指関節角度値を測定し、これにもとづいて「把持容易性評価マップ (EOG マップ)」を生成する。このマップは、約 30 次元をもつ手指関節角度を数次元程度の空間に変換し、サンプル物体に対する把持時の手指姿勢を、変換領域内の各点としてプロットし、これにもとづき、等間隔に分割された空間内の領域をそれぞれ把持容易性の観点から属性づけしたものである。
- (2) 前報²⁾に示した手法を用いて、把持容易性評価を行いたい製品モデルに対するデジタルハンドの把持姿勢を、対話入力にもとづき生成する (図 2 (B1))。
- (3) EOG マップを用いて、(2)で得られた把持姿勢に対する把持容易性を 3.2 節に述べる方法で評価する (図 2 (B2))。

3.2 把持容易性評価マップ (EOG マップ)

EOG マップは比較的低い次元の空間内にプロットされた点の集合からなり、各点は、実際の一つの把持姿勢例題から測定された、約 30 次元程度の手指関節角度の組み合わせに対応している。EOG マップの各プロットは以下の処理によって生成される。

- (1) 被験者は、単純形状を含む実際のサンプル物体の集合を一つ一つ把持していく。

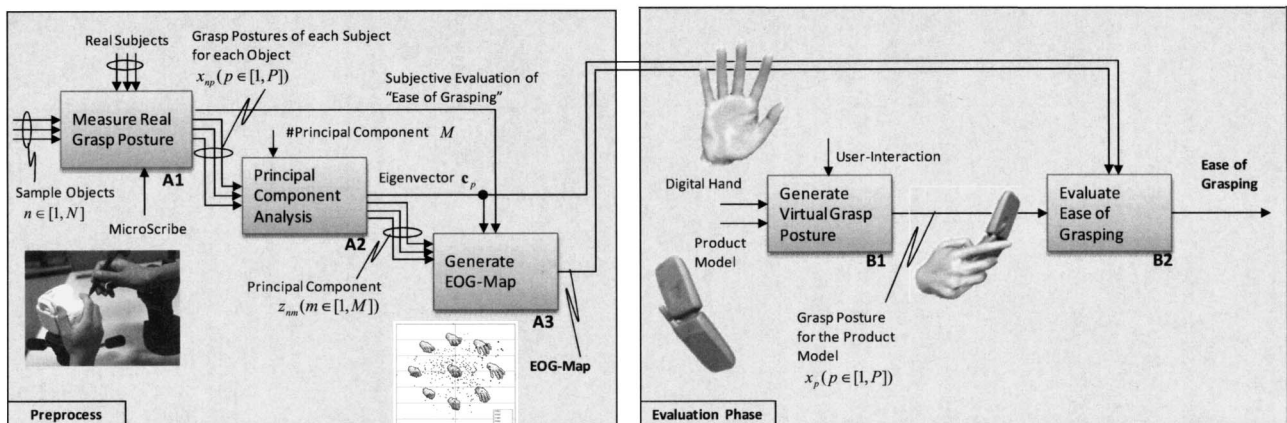


Fig.2 The proposed system for evaluating ease of grasping

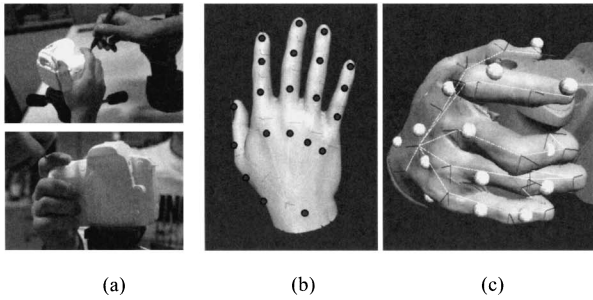


Fig.3 The grasp posture reconstruction for EOG-map generation. (a) Measurement of the positions of the feature points on hands and products using MicroScribe, (b) feature points on hands, and (c) a reconstructed grasp posture.

- (2) 物体に対し、把持した状態での手指関節角度を、3.3節に示す測定方法により求める。同時に、被験者の、この物体に対する「持ちやすさ」の主観評価を2段階(「把持が容易」「把持が容易でない」)で記録しておく。
- (3) (1)-(2)の実験を、複数の被験者に対して行う。
- (4) すべての記録された手指関節角度の集合を主成分分析(PCA)し、得られた結果(主成分得点)をEOGマップ上にプロットする。

したがって、EOGマップにおいて、一つの姿勢例題は、実被験者の手指関節角度を表した主成分得点を座標値にもつ一点として表現され、複数の被験者、複数の物体に対してプロットされる。EOGマップが表現されている空間は均一な幅で分割されており、各分割領域は、その内部に含まれる姿勢例題の点群それぞれがもつ「持ちやすさ」の主観評価値にもとづいて属性付けされる。一方、デジタルハンドによる製品モデルの把持姿勢に対して、その主成分得点を同一のEOGマップ上の一点としてプロットし、この点を含む領域の属性から、この製品の把持容易性が評価される。このEOGマップ生成の詳細は3.5節で述べる。

3.3 把持姿勢手指関節角度の導出

被験者にサンプル物体を把持させ(図3(a))、あらかじめ定められた特徴点(図3(b));被験者の手表皮上の21点)の位置を、多関節型接触式三次元位置姿勢測定機「MicroScribe」を用いて測定する。測定された特徴点と、これらの特徴点に対応するデジタルハンド表皮上の頂点との位置の誤差の総和が最小になるように、デジタルハンド・リンクモデルの各関節回転角を全探索によって決定し、実物把持時の手指姿勢をデジタルハンドで再現する(図3(c))。なお、使用するデジタルハンドは、17のサイズバリエーションのうち、被験者のハンドサイズに最も近いものを使用する。この17のサイズバリエーションは、前報²⁾で報告した日本人成人の手の寸法分布の95%をカバーする確率楕円上にある仮想的な8種類の手形状、および最も平均的な手形状、ならびにこの平均形状と前述した8種類の形状とを1:1に内分した8種類の形状をもつデジタルハンドからなる。

3.4 把持姿勢の手指関節角度に対する主成分分析

ある把持姿勢におけるデジタルハンドのリンク構造モデルより得られる P 個($P=30$)の関節角度の集合を、 $\{x_p | p \in [1, P]\}$ 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見えるが、実際には関節同士の運動に連動性があるため、把持姿勢はより少ない自由度の変数で記述され得る⁷⁾。

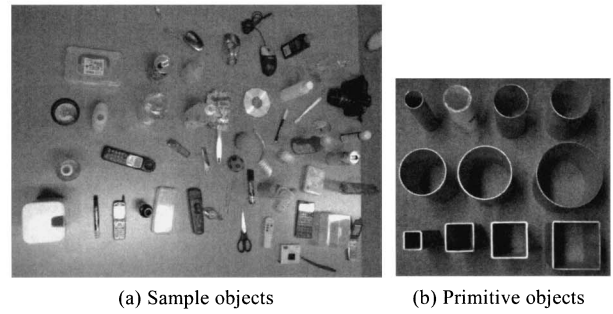


Fig.4 Sample objects used in the test for generating the EOG-map

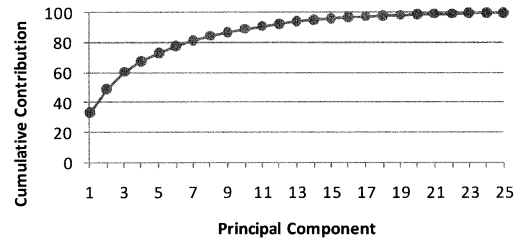


Fig.5 Cumulative Contribution

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を平均と分散で標準化した測定値の集合を $\{x_{np} | n \in [1, N], p \in [1, P]\}$ とする。この測定値集合を行列 $X = [x_{np}]$ ($x_{np} \in \mathbb{R}, n \in [1, N], p \in [1, P]$)で表す。手指の関節角度が $M \leq P$ なる M 個の主成分で近似されるとすると、 M 個の主成分得点

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

によって、物体 n に対する把持姿勢が主成分得点ベクトル $\mathbf{z}_n = [z_{n1} z_{n2} \dots z_{nM}]$ として近似的に記述できる。ここで、式(1)の $C = [c_{pm}]$ ($c_{pm} \in \mathbb{R}, p, m \in [1, P]$)は、 X に対する分散・共分散行列の固有ベクトルを並べた行列である。

3.5 把持容易性評価マップ (EOGマップ) の生成

3.5.1 把持容易性評価マップ生成手法

式(1)から得られる主成分得点ベクトル \mathbf{z}_n を M 次元空間上にプロットする。次に、ユーザが指定した幅で等間隔にこの空間を分割し、 M 次元ボクセル表現を得る。さらに、各ボクセルに対する把持容易性評価値を、以下の3段階評価値を与えることにより定める。

- (1) 「把持可能」ボクセル: 被験者の主観評価が「把持が容易でない」把持姿勢の点を一つでも含むボクセル
- (2) 「把持容易」ボクセル: 上記の(1)に該当せず、かつ被験者の主観評価が「把持が容易」である把持姿勢の点を一つでも含むボクセル
- (3) 「把持不可能」ボクセル: 把持姿勢の点を全く含まないボクセル

3.5.2 EOGマップの生成結果

EOGマップは、図4に示される49個のサンプル物体(ケース、カメラ、包装容器など)、および径・辺長の異なる11本の円筒・角柱を用いて生成された。被験者は成人男子5名を用いた。主成分数 M は、図5より、以下の理由から $M=3$ とした。

- (1) 第3主成分までの累積寄与率が60%以上となっていること

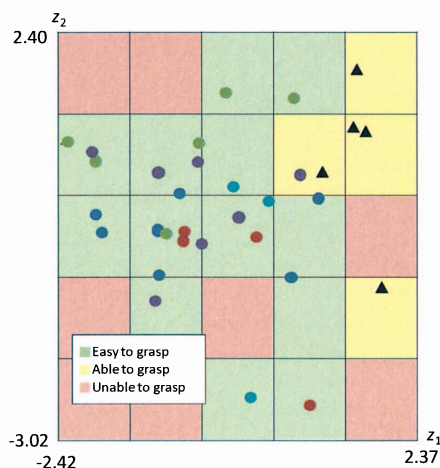
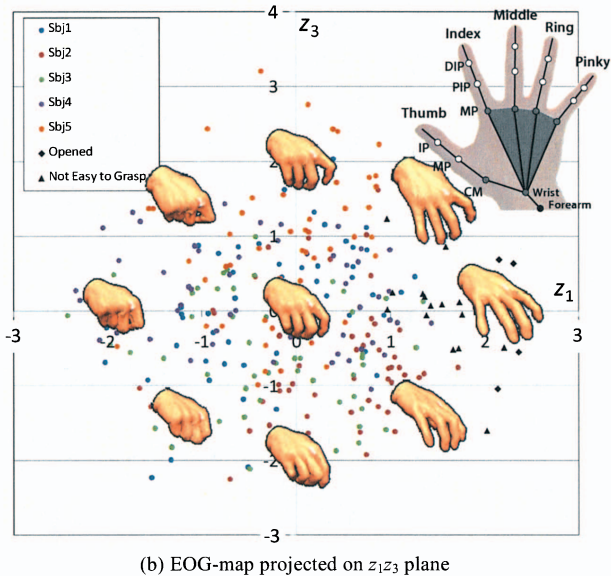
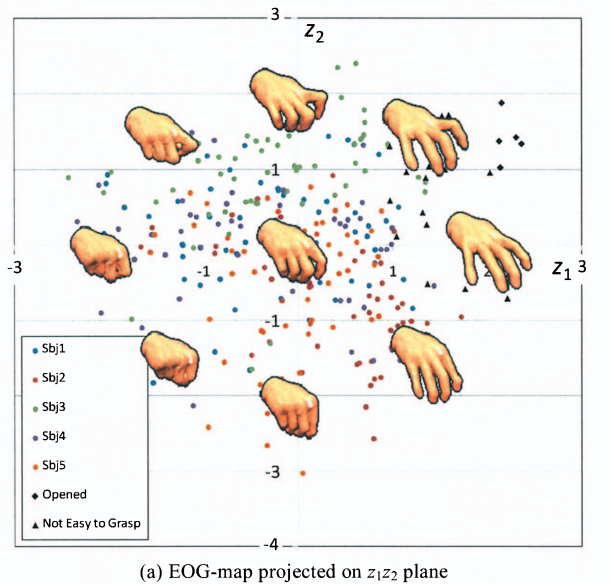


Fig.6 The ease of grasping evaluation map (EOG-map)

- (2) 把持容易性評価の判定が効率的に行えること
- (3) 第4以降の主成分は、手指の微小な姿勢変化に寄与しており、把持容易性のような3段階の粗い評価に影響を与える可能性が低いこと

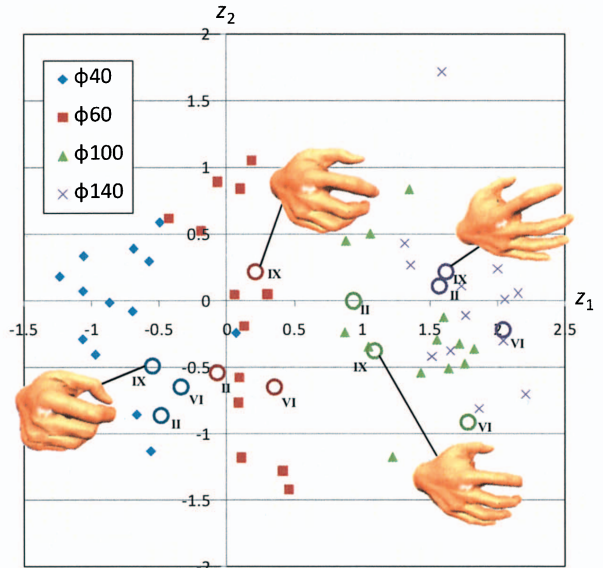


図6に、上述の手法によって生成されたEOGマップを示す。ボクセルの分割数は 5^3 とした。図6(a)は第1主成分得点(z_1)と第2主成分得点(z_2)、図6(b)は第1主成分得点と第3主成分得点(z_3)をそれぞれ横軸・縦軸として、すべてのプロットを投影したものである。図6(a)および図6(b)の手姿勢は、それぞれ第3・第2主成分得点を0としたときに、各点における主成分得点から再現される手姿勢を示す。丸点/三角点は、被験者による主観評価が「把持が容易/把持が容易でない」であった把持姿勢を示す。また、ひし形の点は、手を開いた状態での姿勢を示す。

図6(a)(b)より、第1主成分は第2-4指のMP・PIP・DIP関節の連動した屈曲動作を表し、一方、第2主成分は第2-4指のMP関節のみの連動した屈曲動作を表し、さらに第3主成分は第2-4指のMP関節の内外転動作を主に表していることが分かる。また、「把持が容易でない」主観評価を得た把持姿勢は、「把持が容易である」主観評価を得た把持姿勢よりも第1主成分得点が高い領域に分布していることが分かる。これにもとづいて、3.5.1節で述べたEOGマップをボクセル表現して構築した結果の一部($z_3=0$ のマップ断面)を図6(c)に示す。各ボクセルは「把持容易」「把持可能」「把持不可能」ボクセルの3種類に分類されており、ボクセル表現を用いたEOGマップによって、把持容易性が判別可能であることが分かる。

3.6 デジタルハンドによる把持容易性評価方法および検証結果

図2(B2)に示した評価プロセスでは、把持容易性を評価したい製品モデルの把持姿勢を生成したのち、式(1)を用いて、デジタルハンドの姿勢 i に対する主成分得点ベクトル z_i を計算し、 i が含まれるボクセルの把持容易性評価値(3.5.1節参照)を、 i に対する把持容易性評価値と定める。

図7に示すように、EOGマップ上にいくつかのデジタルハンド把持姿勢をプロットすることで、把持容易性評価の検証を行った。これらの姿勢は、EOGマップの生成時に用いた実際の円筒と同じ径をもつ円筒モデルに対するデジタルハンドの把持姿勢として、本システムによって生成されたものである。小さな点は実被験者(成人男子9名、成人女子4名)による各円筒に対する把持姿勢を示し、大きな

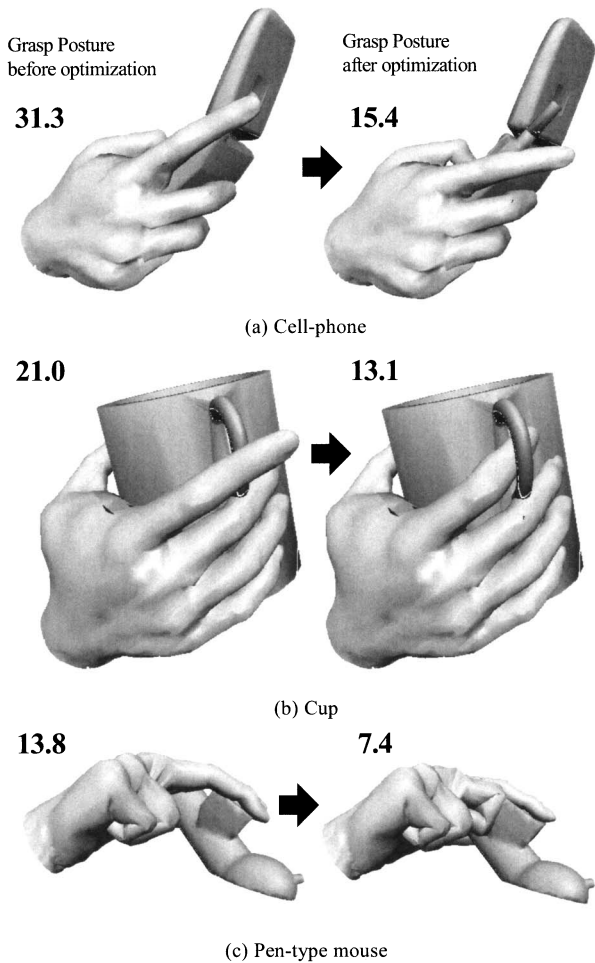


Fig.8 The results of the grasp posture optimization. The left portions are the grasp postures before the optimization, and the right portions are the ones after the optimization. Each number in the figure represents the similarity for the goal posture.

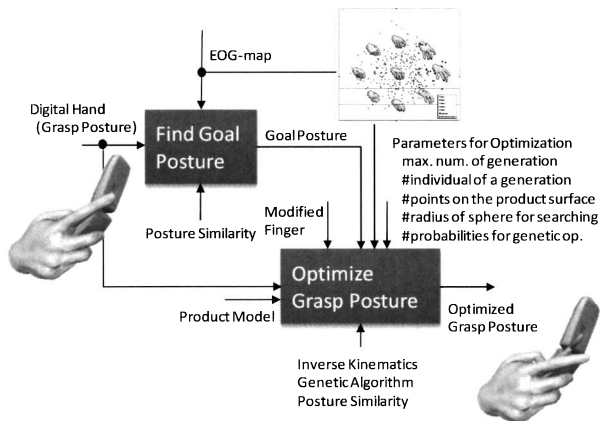


Fig.9 The overview of the grasp posture optimization

○点はシステムによって生成されたデジタルハンドによる把持姿勢を示す。図中のII, VI, IXはハンドサイズバリエーションの中で使用したハンドのインデックスを表し、順に「長くてごつい」「短くてきゃしゃ」「日本人成人の平均的な」ハンドサイズとなっている。ハンド長の短いハンドは、長いハンドに比べて第一主成分得点が大きくなっており、特に径の大きい円筒(φ100やφ140程度)を握る際、同一径でも、短い手の人間がより「持ちづらく」感じるという事実を反映できていることが分かる。

また、図7より、デジタルハンドによる把持姿勢の第1

主成分得点は、同じ円筒を把持した実被験者の把持姿勢の第1主成分得点群の範囲内にほぼ収まっていることが分かる。第2主成分はそもそも被験者間のばらつきが大きく、円筒の径による分布の特徴の違いは特にみられない。これは、第2主成分が主として表している運動したMP関節角度は、被験者が円筒をしっかり握っているか、ゆるく握っているかで大きく変化する成分であるからと考えられる。

これにより、提案したEOGマップに基づく手法が、デジタルハンドによる把持姿勢に対する把持容易性を評価する上で有効である可能性をもつことが確認できた。

4. 把持容易性評価手法に基づく把持姿勢の最適化

4.1 概要

前報²⁾で述べた対話入力に基づく把持姿勢生成手法によって、デジタルハンドの把持姿勢を得たとき、この姿勢に不自然な手指の姿勢が存在する場合がある。図8(a)-(c)左に、このような把持姿勢の例を示す。それぞれ、携帯電話のアンテナ、コップの取っ手、ペン型マウスのユーザ・インターフェイス部に指が引っかかっており、不自然な手指姿勢となっている。これは、前報で述べた把持姿勢生成手法では、手指の姿勢を決定する際に、自然把持経路を用いて、手を開いた状態から、製品に接触するまで各手指を一様に閉じていくという方法を用いているためである。

そこで、このような手指姿勢をより自然な姿勢に修正したい場合、この姿勢に最も「類似」して、かつ実被験者が「把持が容易」と主観評価するような把持姿勢を、前節で得た把持容易性評価マップから検索し、その姿勢を目標把持姿勢として現在の把持姿勢を最適化により修正する方法を提案する。次節以降にアルゴリズムを示す。

4.2 把持姿勢の類似性評価

図6の評価マップにおける主成分得点空間での「距離」は、手指姿勢の類似度を表すと考えることができる。そこで、さらに各主成分の寄与率を重みとして加えて

$$S_{ij} = \|W(z_i - z_j)\| \quad (2)$$

とすれば、式(2)の S_{ij} は物体把持時の手指関節回転角の運動性を考慮した手指姿勢の類似度であると考えられる。ここで、 $M' < P$ 次元の主成分得点ベクトル $z_i, z_j \in \mathbb{R}^{M'}$ はある把持姿勢 i, j の主成分得点ベクトル、 W は各主成分の寄与率 $w_1, w_2, \dots, w_{M'}$ を対角要素とする対角行列である。また、 M' は把持姿勢の類似性評価に用いる主成分数で、本手法では把持物体の細かい形状に対する把持姿勢の微小な変化に対応した、精度の高い類似性評価を行うため、図4から累積寄与率が80%以上となるように $M'=8$ と定めた。

4.3 遺伝的アルゴリズムを用いた把持姿勢最適化手法

図9に、把持容易性評価にもとづく把持姿勢最適化手法の概要を示す。本手法では、最適化における目的関数が微分不可能で、また、局所最大となる可能性が強く、さらに、手指関節角度の組み合わせが莫大であることから、最適化における探索手法として、遺伝的アルゴリズム⁸⁾を用いた。以下に、その詳細について述べる。

- (1) 把持容易性評価マップ生成に用いられた把持姿勢の中から、現在のデジタルハンド把持姿勢との類似度(式(2))が最小で、かつ「把持が容易」と主観評価された把持姿勢の主成分得点ベクトル z_{Goal} を選ぶ。

- (2) 図 10 に示すように、修正したい手指 f_i の指先位置を中心とする半径 τ_r の球内に存在し、かつ製品メッシュ M^p の表面上に存在する点をランダムに N_{pt} 点選択し、集合 Q をつくる。なお、集合 Q の各点は x, y, z 座標値でソートされ、配列としてインデックス化しておく。このインデックスをビット列として、以降 (3)-(6) の手順における遺伝子操作の対象とする。
- (3) 点 $q \in Q$ をランダムに N_{Gen} 点選択し、これらを現世代の個体とする。
- (4) 現世代の個体 (点) に対し、4.4 節に示す手順によって、適応度を計算する。
- (5) 現世代の各個体に対し、遺伝的操作 (トーナメント選択・一点交叉・突然変異) を確率的に行い、これらを次世代の個体とする。
- (6) (4)以降を最大世代数 N_{Max} 回まで繰り返し、最終的に「現世代」の中で最も適応度の高い個体に対応した製品メッシュ上の点を「解」とする。この解が表す点が、逆運動学を用いて修正すべき手指 f_i の指先位置の目標点となる。

4.4 適応度の計算

- (1) 点 q を手指 f_i の指先位置の目標点として、 f_i の姿勢を逆運動学で求める。ここでは、まず、 f_i の指先に属する表皮代表頂点 2 数点に対し、これをハンドリンクの先端位置として CCD 法⁹⁾を用いて逆運動学を行う。これより得られたリンク姿勢の中から、逆運動学に用いた表皮代表頂点と物体の目標点 q の各法線ベクトルのなす角度が π にもっとも近い姿勢を、出力姿勢とする。
- (2) 求めたデジタルハンド把持姿勢に対する主成分得点ベクトル \mathbf{z}_q を求める。
- (3) 適応度を、目標姿勢との類似度の逆数 $1/\|\mathbf{W}(\mathbf{z}_{Goal} - \mathbf{z}_q)\|$ として計算する。ただし、この姿勢においてハンドと製品モデルが接触していなければ、適応度は 0 とする。

4.5 把持姿勢最適化結果

図 8 に携帯電話、カップ、およびペン型マウスの製品モデルに対する把持姿勢最適化結果を示す。図 8(a)-(c)は、左側の図が最適化前、右側の図が最適化後を示す。最適化はそれぞれ第 2 指、第 2 指、第 3 指に対して行い、 $\tau_r = 200[\text{mm}]$ 、 $N_{pt} = 2^{15} = 32768$ 、 $N_{Gen} = 30$ 、 $N_{Max} = 100$ 、遺伝子操作におけるトーナメント選択・交叉の確率は、それぞれ 0.1、0.6、突然変異確率は初期世代で 1.0、最終世代で 0.0 となるように線形補間した確率を用いて遺伝的アルゴリズムを実行した。処理時間はそれぞれ 18s、10s、10s であり、目標姿勢との類似度は、最適化前がそれぞれ 31.3、21.0、13.8 だったのに対し、最適化後の類似度はそれぞれ 15.4、13.1、7.4 となった。最適化前では、把持姿勢生成の際に第 2 指が携帯電話のアンテナ部に引っかかっていた (図 8(a)左) が、本最適化により適切な指姿勢に修正されていることが分かる (図 8(a)右)。図 8(b)左のコップの取っ手に引っかかっている第 2 指や、図 8(c)左のユーザ・インタフェースに引っかかっている第 3 指も同様に、図 8(b)(c)右に示すように、自然な指姿勢に修正されている。

5. 結 言

デジタルハンドと 3 次元製品モデルとを用いて、製品の

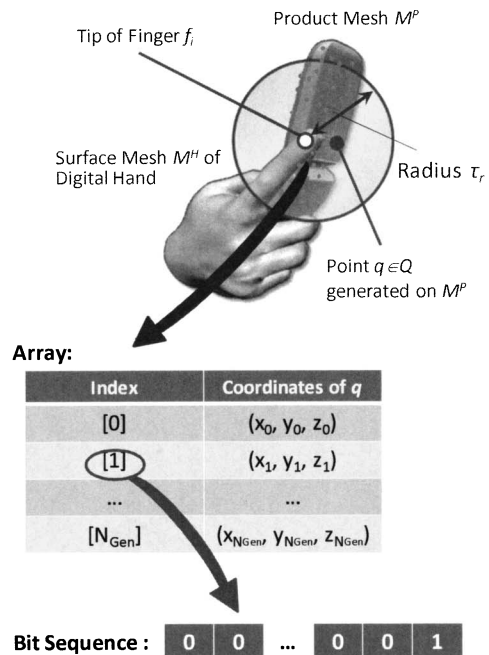


Fig.10 An overview of the method using a genetic algorithm.

エルゴノミック評価の一部となる把持容易性を仮想的に評価できる新たな手法を提案した。この評価のために、実製品の把持姿勢の手指関節角度値を低次元で表現し、これに被験者の「持ちやすさ」主観評価をもとに把持容易性を属性づけした EOG マップを新たに提案した。また、デジタルハンドによって生成された不適切な手指姿勢を、EOG マップを用いた最適化によって修正する手法を提案し、その有効性を確認した。

今後の課題として、このような製品筐体のエルゴノミック評価指標を改善するような、製品筐体形状の再設計支援機能を開発していく予定である。

謝 辞

本研究は、科学研究費 (萌芽研究 19650043 および特別研究員奨励費 20・2105) により実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 例えば, Jack, <http://www.ugs.com>
- 2) 遠藤維ほか: デジタルハンドとプロダクトモデルとの統合によるエルゴノミック評価システムの開発 (第 1 報) —製品の把持安定性仮想評価機能—, 精密工学会誌, 74, 2 (2008) 182.
- 3) F. Kyota et al.: Detection and Evaluation of Grasping Positions, Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH sketches, (2005) 80.
- 4) R. Pelossof, et al.: An SVM Learning Approach to Robotic Grasping, Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2004) 3512.
- 5) Y. Li, et al.: Data-Driven Grasp Synthesis Using Shape Matching and Task-Based Pruning, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 13, 4 (2007) 732.
- 6) J.Lee et al.: Model-Based Analysis of Hand Posture, IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications, 15, 5 (1995) 77.
- 7) M. Santello, et al.: Postural Hand Synergies for Tool Use, The Journal of Neuroscience, 18, 23 (1998) 10105.
- 8) 伊庭育志: 遺伝的アルゴリズムの基礎—GA の謎を解く—, オーム社 (1994)
- 9) C. Welman: Inverse Kinematics and Geometric Constraints for Articulated Figure Manipulation, Simon Fraser University Master's Thesis, (1993).