

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

遠藤 維** 金井 理*** 岸浪建史† 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 (1st Report)
An Function of Virtually Evaluating Grasp Stability for Products

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

The purpose of this research is to develop a system that can evaluate stability and ease of a person grasping products such as digital cameras without real subjects and physical mockups. In the system, we integrate 3D digital hand models with the 3D CAD models of the product to realize the virtual ergonomic assessment. The system features are the following; i) Geometrically accurate 3D digital hand models with rich Japanese size varieties are used for the assessment, ii) A semi-automatic grasp planning function is installed to efficiently find appropriate grasp posture for the exterior housings geometries of appliances, and iii) "Force-closure" and the "grasp quality" indices can quantitatively evaluate grasp stability for the product.

Key words: digital human modeling, ergonomic assessment, force-closure, grasp quality

1. 緒 言

近年、デジタルカメラ、マウス、電動工具、ボトル容器など、手での把持・操作を必要とする製品の開発において、エルゴノミック設計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り、またその認証制度も発足している¹⁾。従来、製品のエルゴノミック性の評価(以後、「エルゴノミック評価」と呼ぶ)は、製品の物理モックアップを利用し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、物理モックアップの製作には通常、多くの時間とコストがかかるため、これらのコストを減らし、その設計にかかる開発期間を短縮したいという要望が、上述のような製品製造者のデザイン部門において高まっている。

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。

すでに人間の全身の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もあり²⁾、自動車や航空機的设计や作業環境の仮想評価等に利用されているが、これらのソフトウェアに含まれているデジタルハンドモデルは、製品の把持や操作の容易性といったエルゴノミック評価を行うために必要となるモデルの精度や寸法のバリエーションを、必ずしも満たしてはいない。

そこで本研究は、デジタルハンドモデル(以下、「デジタルハ

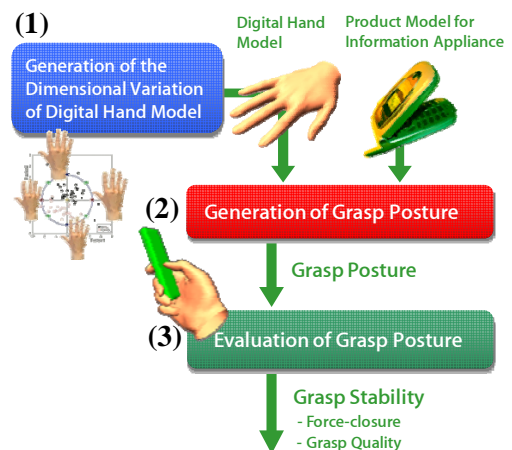


Fig.1 An overview of our system

ンド」と呼ぶ)と3次元製品モデルを統合することで、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を行うシステムを開発することを目的とする。

上述の目的のため、本システムでは図1に示された以下の3機能を実現する。

- (1) **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:** 本システムは、産業技術総合研究所³⁾が開発したデジタルハンド『Dhaiba-Hand』を用いている。『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、豊富な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³⁾。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⁴⁾⁵⁾。
- (2) **把持姿勢の自動生成機能:** 本システムは、比較的少ないユーザからの入力に基づき、製品モデルとデジタルハンドの形状から求められる、妥当と思われる把持姿勢を自

* 原稿受付 平成19年5月23日

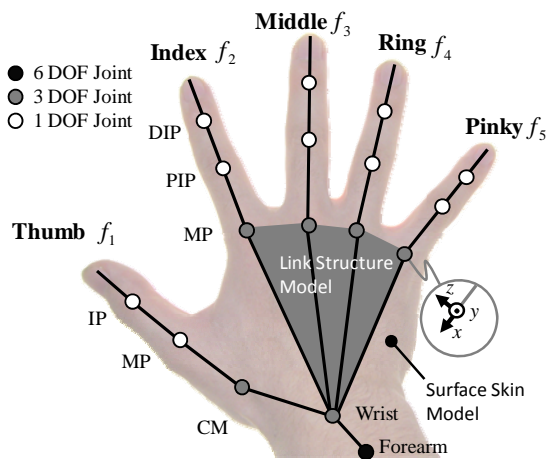
** 学生会員 北海道大学大学院情報科学研究科(札幌市北区北14西9)

*** 正会員 北海道大学大学院情報科学研究科

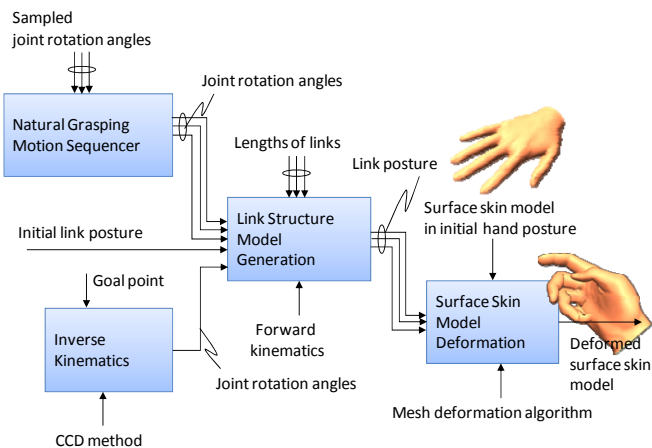
† 正会員 釧路工業高等専門学校(北海道釧路市大楽毛西2)

†† 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



(a) The link structure model and the surface skin model



(b) The flow of the deformation of the surface skin model

Fig.2 The digital hand model

動的に生成できる。

- (3) **把持姿勢の把持安定性仮想評価機能**：(2)で生成された把持姿勢は、製品の「把持安定性」によって定量的に評価される。把持安定性はロボット工学で用いられている Force-closure と Grasp quality とよばれる指標の組み合わせによって表現される。

以下、本論文では、(1)～(3)の機能の詳細、および(2)(3)に関する妥当性の実験的な検証について報告する。

2. 関連研究

ロボット工学では、Miller⁶⁾が GraspIt!とよばれる、ロボットハンドを対象とした汎用的な把持戦略システムを開発している。このシステムは、さまざまなロボットハンドや製品モデルをインポートし、製品モデルのハンドに対する相対的な位置姿勢の入力にもとづいて把持姿勢を生成し、Force-closure と Grasp quality にもとづいてハンドの把持姿勢の安定性を仮想評価することができる。また、このシステムで人間の手による把持姿勢の安定性評価を行うことも提案している⁷⁾。しかし、この研究では、多様な寸法バリエーションをもつデジタルハンドの生成手法については、議論されておらず、さらに、エルゴノミック評価機能の実験的な検証も行われていない。

また、デジタルハンドをバーチャルリアリティ (VR) 環境で利用する試みが、多くの研究でなされてきた⁸⁾。これらの研究の目的は、ユーザが仮想環境内に表示されたデジタルハンドを直接動かす、仮想物体を把持・操作させる機能の実現にある。デジタルハンドが物体を把持する運動は、ユーザがデータグローブを装着して、直接的に指示する。また、デジタルハンドの幾何形状は、操作のリアルタイム性を優先することから、しばしば簡略化され、また、寸法も一通りのことが多い。従って、VR 環境で使われているデジタルハンドでは、任意の人間の手に対する把持姿勢の安定性を評価し、製品のエルゴノミック評価に応用することは困難であると思われる。

さらに、アニメーションの分野では、ElKoura⁹⁾が、ギターを演奏する際のフレットング動作を生成するシミュレータを提案している。このシステムは、音楽の教育や解析におけるギターの指使いの正確なアニメーションを生成する目的の研究である。一方、Kyota¹⁰⁾は、より一般的な物体に対する把持姿勢を網羅的に自動生成するシステムを提案した。しかし、前者⁹⁾はギ

ターの演奏のみを対象としており、また後者¹⁰⁾では、製品のエルゴノミック評価を行うには、得られる把持姿勢の候補数が多すぎて評価が一意に定まらない。さらに、このデジタルハンドでは、手表皮のモデルのポリゴン数が少なく、エルゴノミック評価に必要な精度を満たさない。

これらの関連研究は、いずれも本研究とは研究目的が異なっており、製品のエルゴノミック評価を主目的としたデジタルハンドのモデル生成を行っていないため、評価で要求されるデジタルハンドの運動学的・幾何学的な精度や、寸法バリエーションを有していない。また、ユーザが想定した把持姿勢を柔軟かつ自動的に生成する機能が不十分であり、さらに、把持の安定性などを定量評価する機能がないといった欠点を有している。

3. デジタルハンドモデル

3.1 デジタルハンドの機能概要

一般的に、製品の使用者の身体寸法には個人差があるため、効果的な仮想エルゴノミック評価を行うためには、特定の寸法をもつ1つのデジタルハンドだけでは不十分である。このため、個人差の寸法バリエーションをもつ多様なデジタルハンドを生成する必要がある。そこで、本システムでは、『Dhaiba-Hand』と呼ばれるデジタルハンド³⁾の基本機能に、さらに本研究で開発した独自の機能を加え、以下の4つの機能を有するデジタルハンドモデルを新たに開発し、システムで用いている。

- (1) **リンク構造モデル**：リンク構造モデルは手骨の回転運動を近似するモデルで、MRI およびモーションキャプチャによる測定から生成された。17のリンクをもち、各リンクはその両端に1,3または6自由度の関節をもつ(図2(a))。
- (2) **表皮メッシュモデル**：表皮メッシュモデルは、CT画像から得られたハンド表皮の3次元ポリゴンメッシュである(図2(a))。表皮の幾何形状は、もともと手を開いた状態での一姿勢でのみ定義されているが、(3)の表皮メッシュ変形アルゴリズムによって、リンク構造モデルの姿勢変化に伴い、各姿勢に応じた変形後の表皮メッシュも生成可能である(図2(b))。
- (3) **表皮メッシュ変形アルゴリズム**：本システムでは、人体アニメーション生成ソフトウェア『Poser』¹¹⁾で用いられているスケルトンベースの変形アルゴリズムにより、リンク構造モデルの姿勢変化による表皮メッシュモデルの

幾何形状変形を行っている。

- (4) **自然把持経路生成機能**：本システムでは、デジタルハンドによって製品モデルを把持する機能が必要となるが、そのためには、人間の手指の運動特性をデジタルハンドに付与する必要がある。本システムでは、把持物体がない場合に手指を自然に閉じる際の各指の運動経路を『自然把持経路』として定義し、その運動における手指各関節の回転角度をサンプリングすることで、この運動経路をシミュレートできる。
- (5) **寸法バリエーション生成機能**：リンク構造モデルと表皮メッシュモデルは、特定の被験者の手の 82 の寸法パラメータを計測し、『Dhaiba-Hand』に実装されている「ジェネリックハンドモデル」をこの被験者の寸法にあわせて変形させることで生成される。また、手の「ごつい／華奢」「指が長い／指が短い」の 2 因子をそれぞれ軸とした日本人成人の手の寸法分布グラフにもとづき、その分布の 95% をカバーする確率楕円上にある仮想的な 8 種類の手の形状（パウンダリファミリー）や、最も平均的な形状を表すデジタルハンドも使用可能である。

上述した機能のうち (1)(2) は (5) の寸法バリエーションに依存し、(3) は非依存である。また、(4) は厳密には寸法バリエーションに依存するが、把持姿勢生成や評価に大きく影響を与えるものではないため、一種類の手から測定された自然把持経路を用いている。なお、(1)(2)(5) は産業技術総合研究所によって開発された機能で、(4) は本研究で独自に開発した機能である。また、(3) は市販ソフトの機能と同等のアルゴリズムを実装した。

3.2 リンク姿勢にもとづく表皮メッシュ変形アルゴリズム

デジタルハンドのリンク構造モデルの各関節回転量にもとづき、以下の手法によって表皮メッシュを変形させる。

ワールド座標系 Σ_w に関し、リンク j の親側（手首側）の関節に固定されたローカル座標系 Σ_j の位置姿勢を表す同次変換行列を wT_j と表記し、リンク j の親を $j-1$ 、子を $j+1$ とすると、

$${}^wT_j = {}^wT_1 {}^1T_2 \dots {}^{j-1}T_j \quad (1)$$

$${}^{j-1}T_j = \text{Trans}(\mathbf{t}_0^j) \text{Rot}(\mathbf{r}_0^j) \text{Rot}(\mathbf{r}^j) \quad (2)$$

となる。ここで、 \mathbf{t}_0^j 、 \mathbf{r}_0^j は、指関節が回転していない初期状態での座標系 Σ_{j-1} から座標系 Σ_j への平行移動ベクトルと xyz 各軸まわりの回転を表し、 \mathbf{r}^j は指の曲げに伴うリンク j における xyz 各軸まわりの回転角を 3 成分とする三次元ベクトルを表す。なお、ここでは便宜的に、 $\text{Trans}(t_x, t_y, t_z)$ を $\text{Trans}(\mathbf{t})$ 、 $\text{Rot}(z, r_z) \text{Rot}(y, r_y) \text{Rot}(x, r_x)$ を $\text{Rot}(\mathbf{r})$ と表記している。座標系 Σ_j からみた頂点 v の同次座標表現の位置ベクトルを ${}^j\mathbf{v}$ とすると、ワールド座標系からみた、関節回転による表皮変形後の頂点 v の位置 ${}^w\mathbf{v}'$ は、

$${}^w\mathbf{v}' = {}^wT_{j-1} \text{Trans}(\mathbf{t}_0^j) \text{Rot}(\mathbf{r}_0^j) \text{Rot}(\mathbf{r}^j) \prod_{k \in \text{child}(j)} \left\{ {}^jT_k \text{Rot}(\mathbf{r}^k) ({}^jT_k)^{-1} \right\} {}^j\mathbf{v} \quad (3)$$

$$\mathbf{r}^j = \left[w_v^{jx} r_x^j, w_v^{jy} r_y^j, w_v^{jz} r_z^j \right] \quad (4)$$

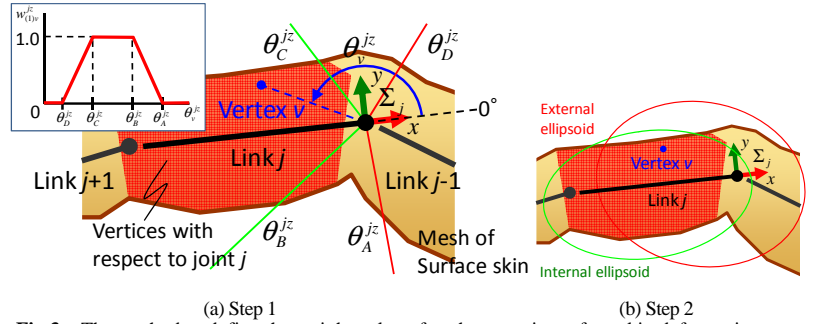


Fig.3 The method to define the weight value of each vertex in surface skin deformation.

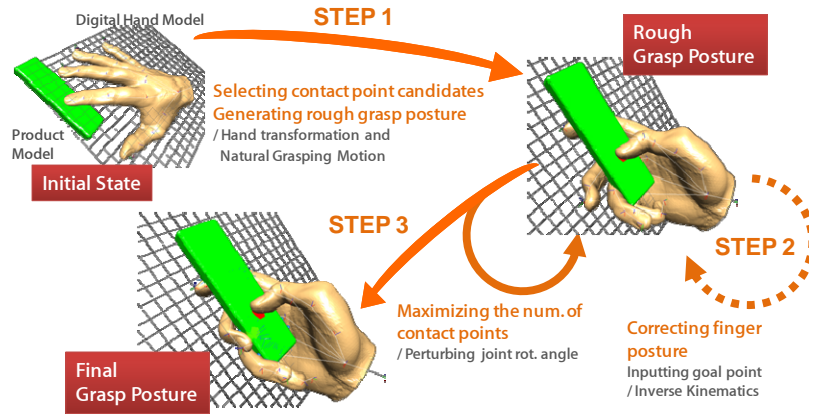


Fig.4 The algorithm to generate the grasp posture

と表される。 $w_v^{jz} \in [0,1]$ は、関節 j の z 軸まわりの回転角に対する頂点 v の回転角の重みで、以下によって求められた 2 つの重み $w_{(1)v}^{jz}$ 、 $w_{(2)v}^{jz}$ の積である（図 3； w_v^{jx} 、 w_v^{jy} についても同様）。

ステップ 1 表皮メッシュ上のすべての頂点について、あらかじめ所属するリンクとの対応を定めておく。リンク j またはリンク $j-1$ に属する任意の頂点 v について、座標系 Σ_j での位置ベクトルを $[v_x, v_y, v_z]$ とすると、ベクトル $[v_x, v_y, 0]$ が Σ_j の x 軸ベクトルとなす角度 θ_v^{jz} を求める。 θ_v^{jz} の大きさによって、リンク j の z 軸回転に対する v の回転量の重み $w_{(1)v}^{jz}$ が決定される。4 つの定数 $\theta_A^j, \theta_B^j, \theta_C^j, \theta_D^j$ を定義し、 $w_{(1)v}^{jz} = 0$ ($\theta_A^j \leq \theta_v^{jz} \leq 2\pi$, $0 \leq \theta_v^{jz} \leq \theta_B^j$), 1 ($\theta_C^j \leq \theta_v^{jz} \leq \theta_D^j$)、その他の角度ではこの 0 から 1 の値を角度 θ_v^{jz} で線形補間する（図 3(a)）。

ステップ 2 リンク j について 2 つの楕円体（内部楕円体と外部楕円体）をユーザがあらかじめ定義しておく。頂点 v が内部楕円体の内側に存在するとき $w_{(2)v}^{jz} = 1$ 、内部楕円体の外側かつ外部楕円体の外側では 0、その他の領域ではこの 0 から 1 の値を頂点 v と 2 つの楕円体との距離の比を用いて線形補間する（図 3(b)）。

4. デジタルハンドによる把持姿勢の生成

本節では、前節で述べたデジタルハンドを利用し、3次元CADで定義された製品モデルに対する把持姿勢を生成する手法について述べる。図 4 に示すように、本把持姿勢生成手法は大きく分けて 3 つの処理ステップからなる。第一に概略把持姿勢の生成、第二に不適切な手指姿勢の修正、最後に把持姿勢の最適化を行う。以下に、各ステップの詳細を述べる。

4.1 概略把持姿勢の生成

4.1.1 ユーザインタラクションに基づく接触候補点の指定

デジタルハンドが把持する「製品形状モデル」を製品モデルの管体形状を表す閉じた 3 次元メッシュとし、 M^p と表記する。また、 M^p の頂点集合を V^p と表記する。デジタルハンドの表皮メッシュモデルを M^h 、 M^h の頂点集合を V^h とする。なお、製品モデルが CAD データの場合は、あらかじめ面分の三角形

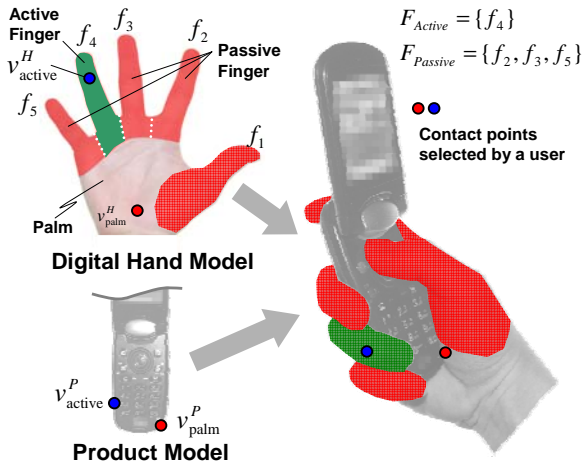


Fig.5 The selection of the contact point candidates

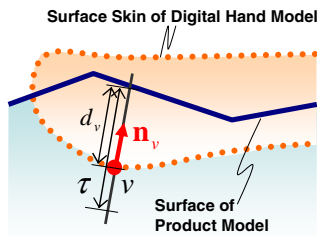


Fig.6 The method of the collision and contact detection between the surface skin of the digital hand and the surface of the product model.

分割機能を用いて、メッシュモデルに変換しておく。

本システムでは、把持姿勢生成における入力を容易にするため、親指をのぞく四指について、把持において能動的に握っているものと、単に添えているだけの指があると仮定する。前者を主把持指 $f_i \in F_{Active}$ 、後者を従属把持指 $f_i \in F_{Passive}$ と定義する。ユーザはまず、図5に示すように、第2指~第5指 (f_2, \dots, f_5) を一本の主把持指と三本の従属把持指に分類する。

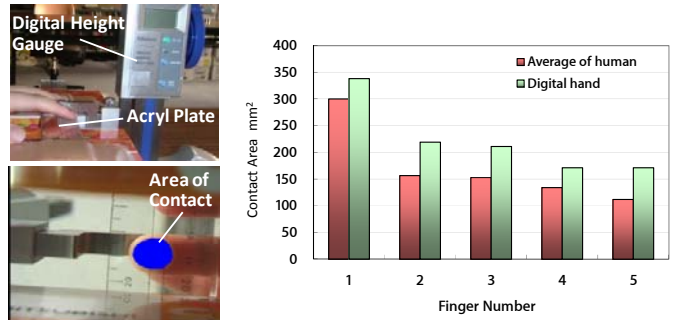
次に、デジタルハンド表皮メッシュの手のひら上の一頂点 $v_{palm}^H \in V^H$ 、およびこの頂点が接触と思われる製品形状モデル表面上の一頂点 $v_{palm}^P \in V^P$ を、それぞれユーザが対話的に選択する。同様に、主把持指上の一頂点 $v_{active}^H \in V^H$ と、対応する製品形状モデル表面上の一頂点 $v_{active}^P \in V^P$ をそれぞれ選択する(図5)。

4.1.2 デジタルハンド表皮メッシュモデルと製品形状モデルとの接触判定

本システムで把持姿勢を自動生成するためには、デジタルハンドの表皮メッシュと製品形状モデルとの接触を判定する必要がある。本システムでは現在、姿勢生成にかかる処理時間短縮のため、図6に示すように、デジタルハンド表皮メッシュと製品形状との接触によるハンド側の組織変形はモデル化せず、その代わりにデジタルハンドと製品が接触状態にあることを、モデル同士の干渉深さを評価し、以下の基準にもとづき近似的に判定している。

- (1) ハンド頂点 $v \in V^H$ が製品形状モデル M^P の外側にある場合、 v を「非干渉」状態とする。
- (2) ハンド頂点 $v \in V^H$ が製品形状モデル M^P の内側にあり、かつ v における法線 n_v 方向の干渉深さ d_v が閾値 τ_v 以下なら、 v を「接触」状態とする。 τ_v については後述する。
- (3) ハンド頂点 $v \in V^H$ が「非干渉」「接触」状態のいずれでもない場合、 v を「干渉」状態とする。

デジタルハンド表皮メッシュ M^H 上の一点以上の頂点が「接触」状態にあり、かつ他のすべての頂点が「非干渉」状態にある場合、デジタルハンドは製品モデルに接触しているとみなす。



(a) Devices for the experiment (b) The contact area of each fingertip
Fig.7 An experiment for validating a tolerance of the maximum collision depth

すべての把持姿勢で、デジタルハンドは製品に接触していなければならない。

この判定で必要となるデジタルハンド表皮メッシュの製品形状モデルに対する干渉深さ閾値 τ_v は以下のようにして定めた。

被験者の各手指の指先を、本人が限界と感じるまで透明アクリル板上に押し込んでいったときの最大押し込み量を図7(a)のようにデジタルハイトゲージを用いて計測した。4名の成人を被験者として計測した結果、最大押し込み量の平均値は4mmとなった。また、最大押し込み時の、指先の平面との接触面積を画像処理により記録し(図7(a))、デジタルハンドの指先を最大干渉深さが4mmになるように平面に干渉させたときの干渉部の面積と比較した(図7(b))。この結果より、干渉深さ閾値を4mmに設定すると、実被験者の指先の接触面積とデジタルハンドの指先の干渉面積との誤差が高々70mm²であり、接触面の幅の誤差に直すと1.5mm以下であり、ハンド側の組織変形を概ね近似できることが確認できた。また、五指をのぞく手のひらや、母指のCM関節の付近にある表皮は、指先の表皮と比較して変形量が大きく異なるため、これらの部位についても最大押し込み量を測定した結果、それぞれ平均値が9.4mm、12.3mmとなった。

以上より、ハンド頂点 $v \in V^H$ の所属するリンクが、Forearm または Wrist を起点とするリンクである場合は $\tau_v = 9.4$ 、母指CM関節を起点とするリンクである場合は $\tau_v = 12.3$ とし、それ以外のリンクである場合は $\tau_v = 4.0$ とした。

4.1.3 接触候補点にもとづく概略把持姿勢の生成

以下の手順により、デジタルハンドの概略把持姿勢を、システムが自動的に求める。

- (1) 頂点 v_{palm}^H の位置 v_{palm}^H が、頂点 v_{palm}^P の位置 v_{palm}^P に一致するように、デジタルハンドの位置を平行移動させる。
- (2) 主把持指 $f_i \in F_{Active}$ に対する自然把持経路の各サンプル時刻において、デジタルハンドをグローバル座標の xyz 各軸まわりに、 v_{palm}^P を中心として回転させ、 v_{active}^H と v_{active}^P との距離が最小になるハンドの姿勢を定める。さらに、サンプル時刻を更新しながら、この距離が最小となるハンドの姿勢を一つ定める。この間、他の指は初期姿勢の開いた状態のままとする。
- (3) (2)で得られた姿勢から、 v_{palm}^P と v_{active}^P とを結ぶ直線を軸としてデジタルハンドをあらかじめ定めた角度の増分値ごとに回転させながら、ハンドと製品形状モデルとの接触点数が最大になるハンドの姿勢を求める。
- (4) 最後に、すべての従属把持指 $f_i \in F_{Passive}$ と母指について、各指の表皮が製品形状モデルに接触するまで自然把持経路に従って閉じてゆく。

以上から、デジタルハンドによる概略把持姿勢が生成できる。

4.2 不適切な手指姿勢の修正

前ステップで得られたデジタルハンドの概略把持姿勢では、想定される自然な把持姿勢と大きく異なる不適切な姿勢の手指が生成されてしまうことがある（例えば、情報機器製品で、特定のボタンを押下したい場合など）。このような場合、ユーザが不適切な姿勢の手指に対し、その指の先端が接触するべき製品上の目標点を追加入力することで、その姿勢をシステムが自動的に修正する。目標点に接触するように手指の姿勢を修正する方法には、CCD法¹²⁾を利用した逆運動学を本システムでは用いている。

4.3 把持姿勢の最適化

人間の手の場合、一般的に、安定に把持を行うために各指と製品との接触面積が大きくなるように姿勢を微修正するが、4.1節や4.2節の把持手法で主に用いられている自然把持経路や逆運動学だけでは、このような姿勢にたどりつかない場合がある。そこで、概略把持姿勢の各指の関節に対し、その回転角度を摂動させることにより、デジタルハンド表皮メッシュと製品形状モデルとの接触点数を局所的に最大化させる。本システムでは、各関節の回転量は一回につき0.06deg、正・負各方向に8回ずつ回転させている。これにより、デジタルハンドの概略把持姿勢に対し、製品との接触点数が局所最大になるように姿勢を最適化させ、最終的な把持姿勢の出力が得られる。

5. 把持安定性評価

物体を把持した際の把持安定性に関しては、ロボット工学、ロボットハンドによる物体に対する把持戦略の中で、数多く議論されてきた¹³⁾。その中で、摩擦を考慮した剛体ハンドによる剛体の把持における把持安定性評価指標として、Force-closureとGrasp quality評価値が代表的なものとして提案されている¹⁴⁾¹⁵⁾。本研究では、この2つの評価指標を、製品の把持安定性を評価するために用いる。

5.1 Force-closure

製品モデルに対し、デジタルハンド表皮メッシュが N 個の頂点においてクーロン摩擦（摩擦係数 μ ）で接触しているとすると、各手指が接触点 c で滑らないためには、図8に示すように、 c における接触力（接触点 c において物体に作用する力ベクトル）が摩擦円錐内になければならない。簡単のため、この円錐を L 角形の底面をもつ頂角 $\tan^{-1}\mu$ の多角錐に近似する。このとき、接触点 c ではたらく力 \mathbf{f}_c とトルク $\mathbf{f}_c \times \mathbf{p}(c)$ を表す wrench $\mathbf{w}(c) \in \mathcal{R}^6$ は以下のように表現できる。なお、 $\mathbf{p}(c)$ は接触点 c の、製品重心位置からの位置ベクトルを表す。

$$\mathbf{w}(c) \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{f}_c \\ \mathbf{f}_c \times \mathbf{p}(c) \end{bmatrix} = \sum_{l=1}^L \alpha_l(c) \mathbf{w}_l(c) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{w}_l(c)$ は c の近似摩擦多角錐の稜線 l に関する wrench で、稜線 l の単位方向ベクトルを $\mathbf{d}_l(c)$ 、 c の接触点位置ベクトルを $\mathbf{p}(c)$ とすると、

$$\mathbf{w}_l(c) = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_l(c) \\ \mathbf{p}(c) \times \mathbf{d}_l(c) \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。また、 $\alpha_l(c)$ は非負の係数の集合である。

ある物体が把持されているとき、この物体に作用する任意の外力とモーメントに対して、力とモーメントの平衡式が成り立つような把持力を発生させられるような接触点の集合が物体表面上に存在していれば、この物体はForce-closureの状態にあるという¹⁵⁾。このとき以下を満たす。

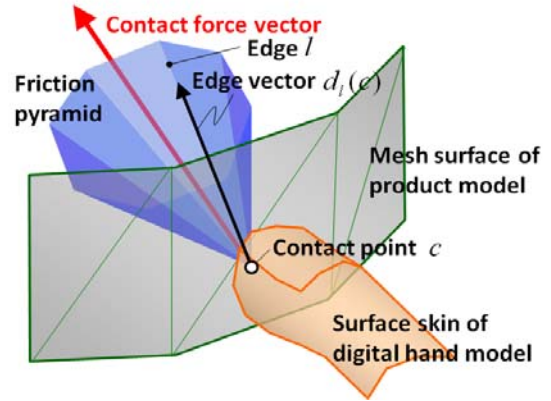


Fig.8 A contact point between the surface skin of the digital hand model and the surface of the product model

$$\mathbf{0} \in \text{Interior} \left(\text{ConvexHull} \left\{ \bigcup_{c=1}^N \bigcup_{l=1}^L \mathbf{w}_l(c) \right\} \right) \quad (7)$$

ここで、 $\text{ConvexHull}(\cdot)$ 、 $\text{Interior}(\cdot)$ はそれぞれ点集合の凸包とその内部、 $\mathbf{0}$ は wrench 空間の原点を表す。なお、本研究では、摩擦係数について、人間の皮膚と物体の間の摩擦係数の一般的な値として、 $\mu=1.0$ を用いた。

5.2 Grasp quality

Force-closureは、摩擦係数から得られた近似摩擦多角錐の稜線の単位方向ベクトルと、接触点の位置ベクトルのみから導かれる $\mathbf{w}_l(c)$ のみから判別されるので、実際の各接触点での接触力によらない。逆に言えば、Force-closureを満たしていても、実際には発生できないほど大きい接触力が必要となる可能性がある。そこで、ある把持姿勢で物体がForce-closureを満たしているとき、最悪どの程度の接触力が必要になるかを知る必要がある。その指標がGrasp Qualityである。

式(7)のForce-Closureが成立するとき、Grasp Quality ε は、任意の外力に対抗するために必要な接触 wrench の大きさの総和が最大となる場合の、その総和の逆数と定義され¹⁵⁾、式(8)によって求められる。

$$\varepsilon = \min_{h \in H} (\text{dist}(\mathbf{0}, h)) \quad (8)$$

ここで、 $\text{dist}(a, b)$ は、六次元空間上の点 a と超平面 b との距離を表す。

6. 把持姿勢生成・把持安定性に対する評価・検証結果

図9に、実際に試作されたペン型マウスの製品モデルに対する把持姿勢の生成結果を示す。この把持姿勢ではForce-Closureを満たし、Grasp Qualityは0.56だったが、母指を製品から離れた状態で再度評価を行うと、Force-Closureを満たさなくなった。この機器には側面に母指で操作するように設計されたボタンがついているが、このボタン配置では操作中の安定な把持が不可能であり、ボタン位置の再設計が必須であることが評価からわかった。

図10に、情報機器の製品モデルに対する、把持姿勢の生成結果を示す。サイズの違う類似形状に、想定される「ありうる」把持姿勢を柔軟に生成できていることがわかる。

本システムで得られた把持姿勢の検証に対する結果を図11(a)に示す。この検証では、60mm、長さ205mmの円筒を評価対象とし、被験者（26歳、日本人男性）に5回把持させ、被験者と同じ寸法をもつデジタルハンドによる把持姿勢と比較評価した。指先や手のひらの一部接触位置に誤差が見られるものの、円筒面への指の接触領域は概ねデジタルハンドと実被験者で

一致していることがわかる。また、母指のつけ根の接触にずれがあるのは、表皮の弾性変形特性がまだモデルに含まれていないことが原因であると考えられる。一方、指の角度が若干ずれている理由は、同一人物による同じ把持でも試行によって把持姿勢に相違が生ずるからであると考えられる。

次に、本システムで得られた把持安定性を実験的に検証した。この検証では、高さが205mmの円筒7本(それぞれ40mm~165mm)、および、正方形の断面をもつ4本の四角柱(それぞれ40mm~100mm)を把持対象とした。21~26歳の日本人男女7名によってこれらの円筒・角柱の把持安定性評価を4段階(0:把持不可能, 1:把持がやや困難, 2:把持可能, 3:容易に把持可能)で主観評価させてその平均値を求め、本システムから得られた、各被験者とはほぼ同一寸法のデジタルハンドによる把持姿勢の Grasp Quality の平均値と組み合わせてプロットしたものが図11 (b)である。被験者の主観評価値は、個人差によるばらつきがあるものの、その平均値は Grasp Quality との相関性がみられることがわかった。

8. 結 言

デジタルハンドモデルと製品の3次元製品モデルとを統合し、製品のエルゴノミック評価を行うシステムを提案した。豊富な寸法パリエーションをもち、運動学的、幾何学的に精密な3次元デジタルハンドモデルを生成する手法を提案した。ユーザインタラクションに基づき、デジタルハンドによる製品モデルに対する把持姿勢を自動生成する手法を提案し、実際の把持姿勢に近いものを生成できることを確認した。また、その把持姿勢に対するエルゴノミック評価の指標として、Force-closure、Grasp Quality の組合せによる把持安定性を提案し、特に Grasp Quality の平均値が被験者の主観評価値と相関性をもつことを実験的に発見した。今後の課題として、製品筐体のエルゴノミック評価指標を改善するための筐体形状の適切な変更案を導出できるような、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、文部科学省知的クラスター創成事業補助金(札幌ITカレッジエリア)により実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 使いやすさ検証済み認証制度, <http://www.ud-web.net/>
- 2) 例えば, Jack, <http://www.ugs.com>
- 3) M.Kouchi et al.: An Analysis of Hand Measurements for Obtaining Representative Japanese Hand Models, Proceedings of the 8th Annual Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium, (2005) 2005-01-2734.
- 4) N.Miyata et al.: Modeling of Human Hand Link Structure from Optical Motion Capture Data, IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, (2004) 2129.
- 5) N.Miyata et al.: Method to Derive Hand Link Model with MRI images, Proceedings of the 21st Annual Conference of the Robotics Society of Japan, (2003) 1A11.
- 6) A.Miller et al.: GraspIt!: A Versatile Simulator for Robotic Grasping, IEEE Robotics and Automation Magazine, (2004) 110.
- 7) A.Miller et al.: From Robot Hands to Human Hands: A Visualization and Simulation Engine for Grasping Research, Industrial Robot, **32**, 1, (2005) 55.
- 8) 例えば, H.Wan et al.: Realistic Virtual Hand Modeling with Applications for Virtual Grasping, Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications in Industry, (2004) 81.
- 9) G.ElKoura et al.: Handrix: Animating the Human Hand, Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation, (2003) 110.
- 10) F.Kyota et al.: Detection and Evaluation of Grasping Positions,

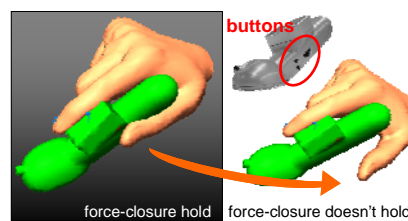
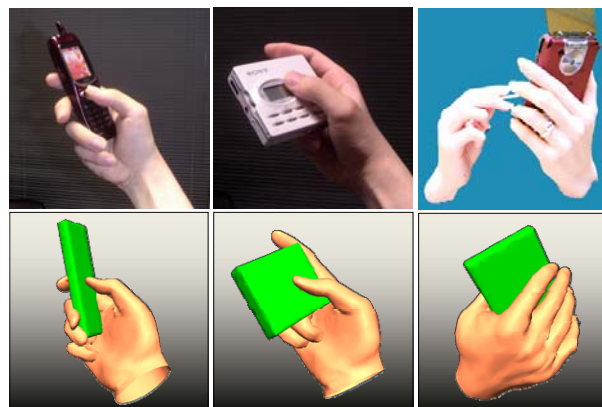
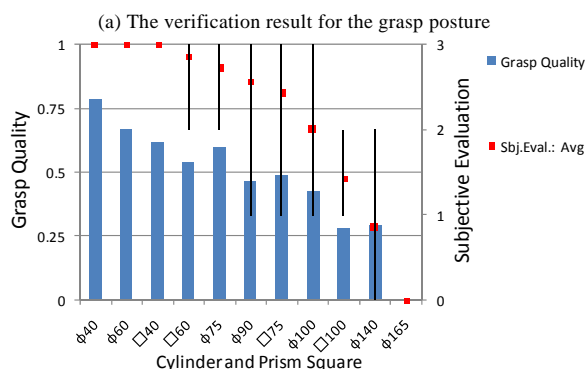
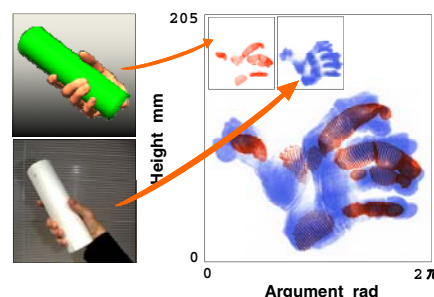


Fig.9 The result of the grasp posture for a pen-type mouse



(a) Cell-phone (b) Portable audio player (c) PDA

Fig.10 The results of generating the grasp posture for a variety of information appliances. All posture satisfy the force-closure, and the grasp quality is (a) 0.35, (b) 0.51, (c) 0.52. The time for process is (a) 30sec, (b) 33sec, (c) 40sec.



(a) The verification result for the grasp posture
(b) The verification results for of the stability evaluation
Fig.11 The results of the experiments for the verification

- Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH, (2005) sketches.
- 11) Poser, <http://www.e-frontier.com/>
 - 12) C.Welman: Inverse Kinematics and Geometric Constraints for Articulated Figure Manipulation, Simon Fraser University Master's Thesis, (1993).
 - 13) A.Bicchi, V. Kumar: Robotics Grasping and Contact: A Review, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2000) 348.
 - 14) V.Nguyen: Constructing force-closure grasps, The International Journal of Robotics Research, **7**, 3, (1988) 3.
 - 15) N.S.Pollard, "Closure and Quality Equivalence for Efficient Synthesis of Grasps from Examples," The International Journal of Robotics Research, **23**, 6, (2004) 595.