

## 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3報)

— 製品の最適把持姿勢生成手法 —

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 持丸正明, 河内まき子, 宮田なつき

近年、意匠設計における製品のエルゴノミクス評価の必要性が高まっている。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、最低限のユーザ・インタラクションによって製品の把持操作姿勢を求め、ユーザインターフェイス (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、与えられたデジタルハンドの初期姿勢から、Force-Closure に基づき製品モデルの安定性を評価するのに適切な把持姿勢を自動生成する手法について述べる。

### 1. はじめに

近年の CAD システムの普及に伴い、CAD 内で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することで、開発コストや時間の削減を行いたいという要求が高まっている。パームトップで用いる IT 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ーフェイス (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などが求められる。しかし、市販のコンピュータ・マネキンをを用いたシステム [1] は、IT 機器の仮想エルゴノミクス評価に要求される精度や機能をもっていない。そこで本研究は、上述の機能要求を満たし、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 [2] において、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の概略姿勢を対話入力にもとづき自動生成する機能を実現したが、この概略把持姿勢で製品を安定に把持できるかどうかは評価できなかった。そこで本報告では、デジタルハンドによる製品の適切な基本把持姿勢の半自動生成と把持安定性評価を行う機能を実現したので報告する。

### 2. システムの機能構成

前節の目的を満たすために必要な、アーゴデザイン支援システムの機能を図 1 に示す。本報では、基本把持姿勢の自動生成 (1)、およびその把持安定性評価 (2) について述べる。なお、デジタルハンドにはデジタルヒューマン研究センター提供の「DhaibaHand」 [3] を利用している。

### 3. 基本把持姿勢生成アルゴリズム

#### 3.1. 基本把持姿勢の概略姿勢の導出

本研究では、製品を自然に把持したときのハンドの姿勢を基本把持姿勢と呼ぶ。前報 [2] では、能動的に把持を行う指「主把持指」を指定し、手のひらの一点と主把持指上の一点について、それぞれ製品形状モデルにおける対応点を指定し、「自然把持経路」に沿って手指を自動的に閉じることにより基本把持姿勢の概略姿勢 (前報での基本把持姿勢可能解) を生成した。しかし、手指の関節角を製品の表面形状に合わせて微妙に調節する処理が含まれていないため、この姿勢では把持安定性の評価を行うに十分な数の接触点が生成されていなかった。そこで本報では、この概略姿勢から、より多くの接触点をもち現実に近い基本把持姿勢を導出するアルゴリズムを新たに提案する。



図 1 アーゴデザイン支援システム機能図。

### 3.2. 適切な把持姿勢の導出

- 母指および各従属把持指の姿勢は、自然把持経路上で製品形状との接触点数が最大になるようにそれぞれ選ばれるため、概略姿勢のみでは、製品に指が届かない場合や想定する姿勢と大きく異なる場合もありえる。この場合は、不適切な姿勢となっている指に対して、ユーザが製品との対応点を再度指定することで、逆運動学を用いて適切な姿勢を生成する。
- 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関節の回転角を微調節するが、自然把持経路や 1) の逆運動学だけではこの姿勢にたどりつかない場合が多い。そこで、各指の関節回転角  $\theta$  に摂動を加え ( $\theta + \Delta\theta \times i$  ( $i = 0, 1, \dots, i_{\max}$ )), 全探索によって接触点数の大きい姿勢をみつけ、これを基本把持姿勢とする。本報告では、 $\Delta\theta = 0.1$ ,  $i_{\max} = 3$  とした。ただし、DIP の関節回転角  $\theta_{DIPx}$  については、PIP との連動則  $\theta_{DIPx} = (2/3)\theta_{PIPx}$  を利用し、自動的に決定した。

### 3.3. Force-Closure と Grasp Quality を用いた把持姿勢の安定性評価

前節で導出された基本把持姿勢について、製品に対する把持安定性を定量評価する。その指標として、[4]で述

べられている Force-Closure と Grasp Quality を利用する。

製品モデルに対し、ハンド表皮が  $N$  個の頂点においてクーロン摩擦 (摩擦係数  $\mu$ ) で接触しているとす。各指が接触  $c$  で滑らないためには、 $c$  における接触力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  $c$  で製品に作用する力とトルクの wrench  $w(c) \in \mathbb{R}^6$  は以下のように表現できる。

$$w(c) = \sum_{l=1}^L \alpha_l(c) w_l(c) \quad (1)$$

ここで、 $w_l(c)$  は  $c$  の摩擦錐稜線  $l$  に関する wrench で、錐の稜線ベクトルを  $d_l(c)$ 、 $c$  の接触点位置ベクトルを  $p(c)$  とすると、

$$w_l(c) = \begin{bmatrix} d_l(c) \\ p(c) \times d_l(c) \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。また、 $\alpha_l(c)$  は非負の係数の集合である。

物体に作用する任意の外力に対して、力とモーメントの平衡式が成り立つとき、物体は Force-Closure の状態にあるといい、このとき以下を満たす。

$$0 \in \text{Interior} \left( \text{ConvexHull} \left\{ \bigcup_{c=1}^N \bigcup_{l=1}^L w_l(c) \right\} \right) \quad (3)$$

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、 $0$  は wrench 空間の原点を表す。

式(3)の Force-Closure が成立するとき、Grasp Quality  $\varepsilon$  は、任意の外力 wrench に対抗するために必要な wrench の大きさの総和の逆数と定義され、(3)の凸包を構成する各超平面  $h \in H$  と原点との距離の最小値(4)によって求められる。

$$\varepsilon = \min_{h \in H} (\text{dist}(0, h)) \quad (4)$$

#### 4. 基本把持姿勢生成および把持安定性評価結果

図 2 に、CAD で試作されたペン型マウスに対する基本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、母指を製品から離すと、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ることが評価からわかった。

図 3 に、情報機器製品に対する、基本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」把持姿勢を頑健に生成できていることがわかる。

なお、実装にあたっては、逆運動学に CCD 法[5]、6 次元凸包の計算に Quickhull アルゴリズム[6]を利用した。また、製品とハンドとの静止摩擦係数  $\mu$  は[7]を参考に 1.0 とした。製品とハンドの干渉・接触判定では、製品形状モデルに三角形メッシュとし、ハンド表皮メッシュを約 500 点の代表頂点に近似して行うことで、高速化した。

#### 5. おわりに

本稿では、デジタルハンドを用いて、パームトップ IT 機器の仮想エルゴノミクス評価を行うシステムについて、把持安定性評価が可能となる適切な基本把持姿勢を半自動的に生成した。今後、本システムに製品の

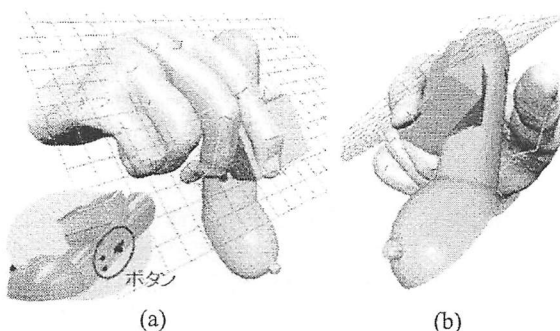
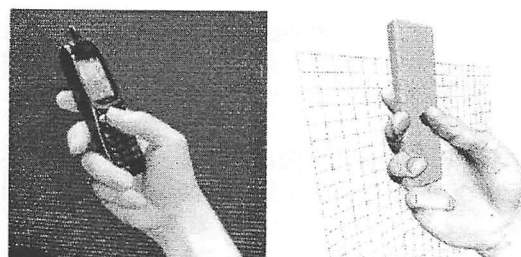
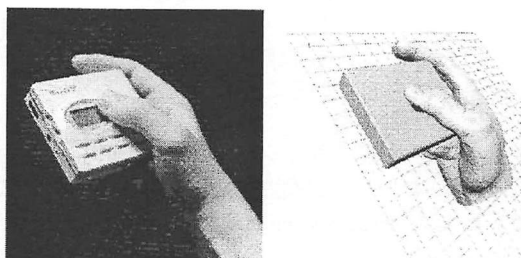


図 2 ペン型マウスに対する基本把持姿勢生成結果。(a) 通常の把持姿勢, (b) 母指を離した時の把持姿勢



(a) 携帯電話 (面分数: 2546)



(b) 携帯 MD プレーヤ (面分数: 2170)

図 3 情報機器製品に対する基本把持姿勢生成結果。いずれも Force-Closure を満たし、Grasp Quality は (a) 0.34, (b) 0.59. 処理時間は (a) 55 秒, (b) 55 秒 (Pen.M 1.5GHz).

UI 操作タスクモデルを組み込み、その操作容易性評価を行うとともに、三次元 CAD システム内への実装を行っていく予定である。

#### 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 1 報), 精密工学会春季大会講演論文集, 2005.
- [3] 宮田, 他: デジタルハンドモデルと 3 次元 CAD の統合, 精密工学会誌, Vol.71, No.4, 2005.
- [4] N.S.Pollard: Closure and Quality Equivalence for Efficient Synthesis of Grasps from Examples, The International Journal of Robotics Research, 23(6) 595-613, 2004.
- [5] C.Welman: Inverse Kinematics and Geometric Constraints for Articulated Figure Manipulation, Simon Fraser University Master's Thesis, 1993.
- [6] C.B.Barber, et al.: The Quickhull Algorithm for Convex Hulls, ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), v.22 n.4, 469-483, 1996.
- [7] 人間生活工学研究センター: システム技術開発調査研究 デジタルハンド技術に関する調査研究報告書, 2004.