

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 11 報)

—把持姿勢生成手法の高精度・高効率化(2)—

北海道大学 ○遠藤 維, 金井 理
産業技術総合研究所デジタルヒューマンセンター 宮田なつき, 河内まき子, 持丸正明
株式会社ニコン 今野 純, 小笠原美千代, 下川真理江

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、ハンド表皮メッシュ変形機能をより高精度化し、物理シミュレーションを用いて、より実際の把持姿勢に近い姿勢を、効率的に生成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。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ミック評価を行う「アーゴデザイン支援システム」の開発を目的とする。前報[1]までに、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た。さらに前報では、ユーザが「持ちやすい」と感じる大きな原因の一つである「しっくりくる」という感覚を反映した把持姿勢を生成するため、新たにハンドと製品モデルとの接触面積や、ハンド特徴部と製品特徴稜線とのフィット性等を考慮したエルゴミック評価指標と定め、これを目的関数として、基本把持姿勢を最適化により修正する手法を提案した。しかしながら、基本把持姿勢の生成時のユーザ・インタラクションにおいて、接触候補点の組み合わせを指定する際に、生成されるハンド把持姿勢を予想しにくいこと、適切な接触候補点の選択が困難であること、また、初期段階の基本把持姿勢生成時にも最適化を行っており、処理時間のコストが大きいといった問題点があった。

そこで本報では、より簡易なユーザインタラクションによりハンド初期姿勢を生成し、基本把持姿勢を生成することなく、前報の最適化アルゴリズムを応用して把持姿勢を生成する手法について述べる。また、ハンド初期姿勢の微小な違いがあってもある一定の把持姿勢を生成するために、動力学シミュレーションにもとづいたハンド姿勢制御による把持姿勢生成の可能性についても考察した。

2. 最適化にもとづく把持姿勢の生成手法

図 1 に示すように、提案する最適化にもとづく把持姿勢手法は 3 つのステップ、1) ユーザ・インタラクションによるハンド初期姿勢の決定、2) 把持姿勢の最適化、3) 不適切な手指姿勢の修正からなる。詳細を次節以降に示す。

2.1. ハンド初期姿勢の決定(A1)

以下のステップにより、製品に対するハンド初期姿勢を決定する (図 2)。

- 1) 製品メッシュ M^P 上に、ランダムに点群 C を発生させる。
- 2) 点群 C とハンド表皮メッシュ M^H 上の頂点から、把持時に接触位置が一致すると思われる組み合わせ (v_h, p_s) ($v_h \in V^H, p_s \in C$) を、ユーザが一組選択する。

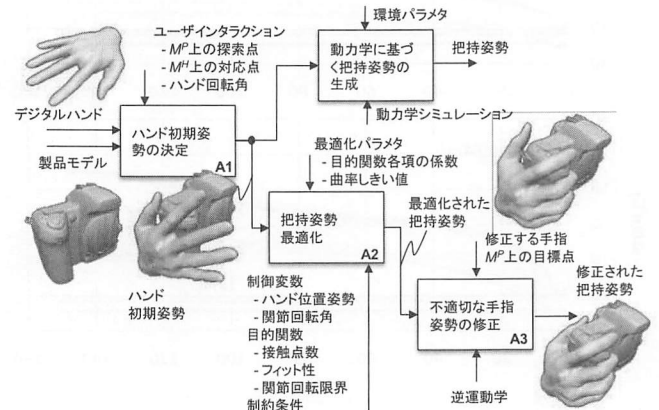


図 1 提案する把持姿勢生成手法の概要

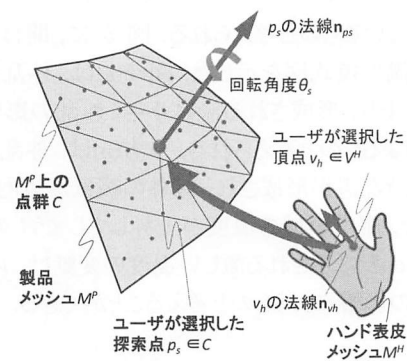


図 2 ハンド初期姿勢の生成

- 3) 点 v_h と点 p_s の位置が一致し、2 点の法線 n_{v_h} と n_{p_s} の開き角が π となるように M^H を平行移動・回転させる。
- 4) 点 p_s の法線を軸として、 M^H をユーザ定義値 θ_s だけ回転させる。

2.2. 把持姿勢の最適化(A2)

前節で得られたハンド初期姿勢から、前報で述べた最適化手法により、ハンド把持姿勢を求める。ただし、目的関数については、把持力の分布を求める際の解が不安定であることなどから、拡張 Grasp quality と腱活動レベルの均一性評価は評価しない。その代わりに、手指関節角度の限界・連動性制約[2]に対するペナルティ評価値 f_{joint} を目的関数に加える。

$$f_{joint} = \sum_{i \in \{Middle, Ring, Pinky\}} \sum_{j \in \{DIP, MP, PIP\}} w_{js} s_j(i) + w_{PIP}^x (\max(\theta_{PIP(Middle)}^x, \theta_{PIP(Ring)}^x, \theta_{PIP(Pinky)}^x) - \min(\theta_{PIP(Middle)}^x, \theta_{PIP(Ring)}^x, \theta_{PIP(Pinky)}^x)) \quad (1)$$

ここで、 w_p, w_{PIP}^X はユーザが定義した各項の係数を表し、 $\theta_{MP(i)}^z$ は手指 i の MP 関節における z 軸回転角を表す。また、

$$s_{DIP}^X(i) = |\theta_{DIP(i)}^X - (2/3)\theta_{PIP(i)}^X|$$

$$s_{MP}^X(i) = \max(\theta_{MP(i)}^X - dmax(\theta_{MP(i)}^X), dmin(\theta_{MP(i)}^X) - \theta_{MP(i)}^X) \quad (2)$$

$$s_{MP}^Z(i) = \max(\theta_{MP(i)}^Z - dmax(\theta_{MP(i)}^Z), dmin(\theta_{MP(i)}^Z) - \theta_{MP(i)}^Z)$$

とする。dmax(), dmin() は隣接する手指の姿勢から決定される動的な手指の関節角度限界値を表す[2]。

3. 結果

図 3(a)-(c)に、市販デジタル一眼カメラのグリップを対象として、前報までに提案した基本把持姿勢生成結果を示す。また、図 3(d)-(f)に、本アルゴリズムによる把持姿勢生成結果を示す。なお、図 3(c)(f)に示された赤点は、システムが生成した把持姿勢における、製品上のハンド表皮接触位置で、緑点は実被験者による製品の把持位置を示している。提案手法の処理時間は 2 分 43 秒となった。図 3 より、提案手法による把持姿勢は、従来手法と比べて以下の点が改善されたことが分かる。

- 1) 第 3-5 指がグリップにしっかり巻きつくようになった。
- 2) 親指の根元が製品にフィットするようになった。
- 3) グリップ側面の手のひらの把持位置が、実被験者とはほぼ一致した。

さらに、本システムが生成したこれらの把持姿勢を、5 名の実被験者に再現してもらい、どちらがより「しっくりくる」把持姿勢かどうかを回答してもらったところ、いずれの被験者も、提案手法による把持姿勢の方がより「しっくりくる」との回答を得た (表 1)。

4. 動力学シミュレーションに基づく把持姿勢の生成

以上より、エルゴノミック評価値を用いて、運動学にもとづいてハンド手指関節角度を探索することにより、適切な把持姿勢を生成できることを確認した。しかし、上述の手法では、わずかなハンド初期姿勢の差異によって、得られる把持姿勢が大きく異なる可能性があり、適切な把持姿勢を生成するために、ユーザが試行を何度も繰り返さなければならない場合がある。そこで本報ではさらに、動力学にもとづいたデジタルハンドの姿勢制御を行うことで、わずかなハンド初期姿勢の差異によらず、動力的に安定な把持姿勢を得る手法の可能性について考察した。

図 4 に、本システムに対して動力学シミュレータを本システムに実装した結果を示す。動力学シミュレータは PhysX [3]を用いた。デジタルハンドモデルについては、その表皮メッシュを、各面分が属するリンクごとに凸包メッシュに分割した。図 4 に、動力学シミュレーション

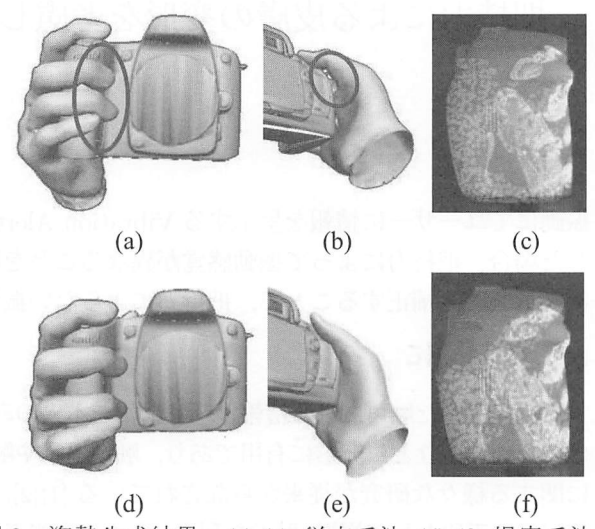


図 3 姿勢生成結果. (a)-(c) 従来手法, (d)-(f) 提案手法.

表 1 実被験者による把持姿勢評価結果

被験者					
従来手法によるDH把持姿勢の再現					
提案手法によるDH把持姿勢の再現					
しっくり握れる姿勢	提案手法	提案手法	提案手法	提案手法	提案手法

を用いた、円筒 ($\phi 30$) に対する把持姿勢結果を示す。この姿勢は、無重力環境内で、円筒の位置姿勢を固定し、ハンドの各凸包メッシュに対し、それらの重心から円筒の重心への方向に力をかけ続けて得られた結果である。図 4(a)(b)にあるように、初期姿勢を変えて試行してもほぼ同じ把持姿勢が得られた。これより、動力学シミュレーションを用いることで、微小な初期姿勢の差異によらず、動力的に安定な把持姿勢が生成できる可能性が示されたといえる。

参考文献

[1] 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 9 報), 精密工学会春季全国大会講演論文集, 2008.
 [2] J.Lee et al., "Model-Based Analysis of Hand Posture," *IEEE Computer Graphics and Applications*, 15(5), 77-86, 1995.
 [3] NVIDIA PhysX, http://www.nvidia.com/object/nvidia_physx.html

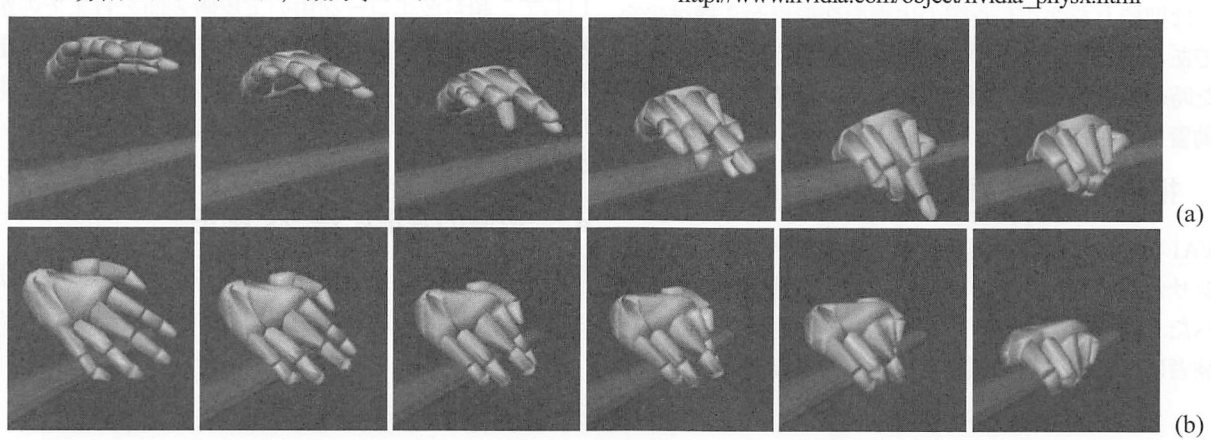


図 4 動力学シミュレーションによる把持姿勢生成結果.