

北海道大学 ○清水 康友, 川口 敬介, 金井 理, 伊達 宏昭, (株)構造計画研究所 金谷 尚輝

要 旨

製品の把持や操作の中で人間の手は重要な役割を果たすので、高精度に人間の手の運動を再現することができるデジタルハンドは、製品の仮想エルゴノミック評価に非常に役に立つ。本報告では、MRI 計測に基づき、手指の三次元運動を高精度に再現可能な指関節運動モデルと、皮膚変形を高精度に再現可能な表皮変形モデルを持つデジタルハンドの構築手法を提案する。更に、デジタルハンドと製品との接触領域と、実際の接触領域とを比較、検証する。

1. はじめに

近年、携帯電話や自動車のハンドルのような、ハンドヘルド型製品や部品の把持しやすさに関するエルゴノミック評価が、市場競争力を得る為に重要になっている。この為、試作品のコストを削減し、「把持しやすさ」の定量的評価を行うための仮想エルゴノミック評価技術が、研究されている[1][2]。このシステムには、高精度なデジタルハンド(人間の手の正確な 3D モデル)と高精度な把持姿勢の構築が必要である。しかし、従来のデジタルハンドでは、母指手根中手(CMC)関節の運動や、その運動による母指球付近の表皮形状を精度よく再現する事が出来なかった。

この為、MRI 計測に基づき手の骨と表皮を再構築し、手指の運動と表皮の形状を高精度に再現できるデジタルハンド構築の研究が行われてきたが、精度検証が不十分であった[3]。本報では、MRI 計測データからこのデジタルハンドの為の関節運動モデル及び表皮変形モデルを構築し、そのモデルの精度を定量的に検証する。更に、製品モデルの把持姿勢を再現し、その接触領域の精度検証も行う。

2. MRI 計測からの関節運動モデルと表皮変形モデルの構築[3]

2.1. 手の骨の関節運動モデルの構造

提案するデジタルハンドの関節運動モデルは、解剖学的知見[4]に基づき図 1 のように構成される。すなわち、4 指は中手指節間(MP)関節に屈伸/転回の 2 自由度(DOF)回転を持ち、近位指節間(PIP)、遠位指節間(DIP)関節は屈伸の 1DOF 回転を持つ。母指は CMC 関節に屈伸と、旋回が付随した転回の 2DOF 回転を持ち、MP、指節間(IP)関節は屈伸の 1DOF 回転を持つ。

2.2. MRI 計測データからの 3 次元メッシュモデル生成

手指の運動に伴う 3 次元での手の骨の運動と表皮形状をモデル化する為に、複数の手の姿勢を MRI で計測し、計測データから骨の骨髓表面及び表皮をそれぞれ 3 次元メッシュモデルとして構築した。MRI 計測は北海道大学「医の倫理委員会」で承認済みであり、各被験者に対し、表 1 の計測条件で図 2 に示す 8 姿勢を計測した。なお、図 2(a),(b)の姿勢の計測では、母指球付近の表皮上にマーカを配置した。

得られた MRI 計測データから医用画像処理ソフト(Osiris)を用いて、骨と表皮の輝度値等値面をそれぞれ抽出した後、3D ポリゴン編集ソフト(Geomagic)を用いて平滑化と細分割曲面化を行い、骨と表皮の 3 次元メッシュモデルを生成した。

2.3. ICP に基づく手の指の関節運動モデルの構築

次に、運動中の手の骨の位置を高精度に再現可能な関節運動モデルを構築する。図 2(a)の中間位と図 2(b),(c)の各関節の限界運動姿勢の骨メッシュにおいて、同一の指骨を対比的に選択し、対応する骨メッシュ同士の ICP による位置、姿勢合わせを行う。その後、以下のように、関節運動モデルを構築する。

4 指及び母指 MP・IP 関節の運動は各関節に固定された単一の関節回転軸回りの回転運動によって近似表現できる。しかし、ICP から得られる剛体変換は並進成分を含んでいるため、最小二乗法を用い、並進成分をゼロとするようにこの剛体変換を単一回転軸回りの回転として近似し、その軸を関節回転軸とする。

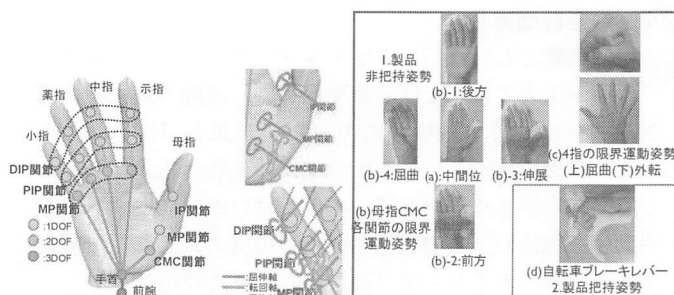


図 1 解剖学的知見に基づく 図 2 MRI 計測手姿勢
関節自由度を持つ関節運動モデル

表 1 MRI 計測条件

被験者	手に障害の無い男性2名	スライス枚数	124枚
撮影画像	T1強調画像	1ピクセル	0.78mm
磁場強度	1.5T	撮影時間	3分56秒
解像度	256×256	マーカ	口中清涼カプセル
スライス厚さ	1.0mm	固定具材質	紙粘土

一方、母指 CMC 関節は解剖学的に鞍型の関節構造と定義され[4]、単一回転軸回りの回転運動では滑りによる並進分の運動を表現出来ない事が後述の精度検証結果からも確認された。そこで、四元数の球面線形補間と並進線形補間の合成により、ICP から得られる母指運動前後の剛体変換が補間される運動として、母指 CMC 関節の運動を表現した。

2.4. SSD と特徴点修正を用いた手表皮変形モデルの構築

人間の手の様々な姿勢における表皮形状の変形を再現する為に、前節の関節運動モデルに伴う表皮の変形をモデル化する。

4 指および母指 MP・IP 関節の表皮は、SSD(Skeletal Subspace Deformation)と呼ばれる関節回転角に従った変形手法に基づき、次の様に変形される[3]。回転関節 j の所属頂点に対し、関節の回転角に対する重み w_1^j 、 w_2^j を設定する。 w_1^j は関節付近の表皮の手のひら側収縮と手の甲側伸長を表現する為に設定される重みである。 w_2^j はその関節回転の影響の大きさを設定する重みであり、所属頂点と各関節の運動に設定される内部楕円体と外部楕円体との相対的位置に基づき決定する。設定された重みに従い、関節が回転するに伴って表皮が変形する。

一方、母指 CMC 関節付近の表皮は、その関節の運動に伴い他の指関節付近の表皮より大きな変形が生じてしまう。そこで、母指球付近表面上の各マーカの重心位置に最も近い表皮メッシュ頂点をマーカ頂点とし、表皮メッシュ頂点との距離による放射基底関数(RBF)補間を用いて SSD 変形後の不足分を補正した。

3. 製品把持姿勢の再現

構築したデジタルハンドを用いて製品把持姿勢を再現した。まず、MRI 計測データから得られた、図 2(a)の中間位と図 2(d)の製品把持姿勢の骨メッシュの中指中手骨における ICP を行い、得られた剛体変換を用いて製品モデルをデジタルハンドの手のひらに位置合わせをする。その後、以下の基準に基づき表皮メッシュと製品モデルの接触状態を干涉深さにより評価し、干涉が無く接触領域を最大とする指の姿勢を生成する。

表皮メッシュ頂点 $^{skin}v_i^s$ が製品モデルの外側にある場合「非

干渉」状態、 $skin\ v_i^s$ が製品モデルの内側にあり、かつ頂点における法線 n_v 方向の干渉深さ d_v がしきい値 τ 以下ならば「接触」状態、 $skin\ v_i^s$ が「非干渉」「接触」のいずれの状態でも無い場合「干渉」状態とする。表皮メッシュの一点以上の頂点が「接触」状態であり、かつその他の頂点が「非接触」状態である場合、デジタルハンドが製品モデルに接触していることみなしている。なお、しきい値は[1]の文献のものから、今回の MRI 計測の被験者の手に合わせ、図 3 のように指表面のしきい値のみ $\tau = 5.0mm$ に変更した。

4. モデルの精度検証

4.1. 関節運動モデルの精度検証

提案手法を用い中間位骨メッシュを各関節の限界運動姿勢骨メッシュに運動させた時の、各指骨のメッシュモデル頂点と対応点間の距離平均値を平均運動誤差とし、その誤差を表 2, 3 に示す。平均運動誤差は、4 指では ICP と比較し 0.1mm 以下の誤差、母指は単一回転と四元数を組み合わせたものが ICP と比較し 0.17mm 以下の誤差となった。また、これらの関節運動モデルを組み合わせて中間位骨メッシュを製品保持骨メッシュに姿勢を近似した時の平均運動誤差を表 4 に示す。ICP マッチング自身の誤差が 0.61mm 生じているのに対し、提案する関節運動モデルでの各指の誤差平均が平均 1.5mm 以下に収まっており、高精度に把持姿勢を近似出来ていると言える。

4.2. 手指表皮変形モデルの精度検証

図 3(b)の母指各関節の限界運動姿勢の母指球付近の表皮メッシュ頂点と、提案手法による各関節の限界運動後表皮メッシュの最近頂点との距離誤差を表 5 に示す。SSD による表皮変形のみでは、距離誤差平均が 4.3mm となり母指球付近の表皮の膨らみが不十分であるが、RBF による補正後、距離誤差平均が 0.6mm となり、膨らみが改善され現実の母指球付近形状を近似出来ている事がわかる。

4.3. 製品把持姿勢の精度検証

更に、自転車ブレーキ部品の把持姿勢再現時の接触領域評価結果を、表 6 に示す。評価基準として、MRI 計測データから抽出された表皮メッシュと製品メッシュモデルの最近点間距離が 2mm 以下となる頂点集合の接触領域を、デジタルハンドにおける把持姿勢再現時の接触領域と比較した。指先と母指球付近の接触領域は実際の接触領域形状を良く近似しており、両者の接触面積の差は平均約 1500mm²、領域を形成する面分の共通部分に対するデジタルハンド側面分の割合が平均約 79%程度の精度で近似が可能であった。しかし、表 6 の赤丸部分に示す、

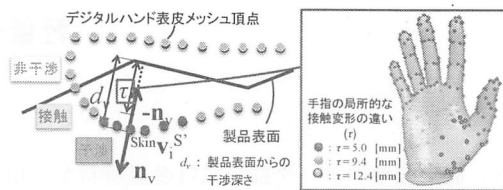


図 3 干渉深さによる干渉判定(左)と設定されたしきい値分布(右)

表 2 4 指：各関節限界運動時の骨の平均運動誤差[mm] (被験者数:2)

	屈曲姿勢			外転姿勢	
	基節骨	中節骨	末節骨	基節骨	誤差平均
ICP	0.55	0.88	0.89	0.36	0.67
提案モデル(単一回転)	0.63	0.96	1.06	0.44	0.77

表 3 母指：各関節限界運動時の骨の平均運動誤差[mm] (被験者数:2)

	中手骨	基節骨	末節骨	誤差平均
	ICP	0.35	0.43	0.47
提案モデル(単一回転)	1.22	0.80	1.14	1.05
提案モデル(CMC:四元数補間, MP,IP:単一回転)	0.35	0.47	0.96	0.59

表 4 製品把持姿勢再現時の骨の平均運動誤差[mm] (被験者数:2)

プレーキ把持姿勢	基節骨 (母指:中手骨)	中節骨 (母指:基節骨)	末節骨	誤差平均
ICP	0.5	0.6	0.73	0.61
提案モデル	1.22	1.24	1.95	1.47

表 5 母指各関節限界運動時の表皮変形距離誤差[mm] (被験者数:2)

	屈曲	伸展	前方	後方	誤差平均
SSDのみ	7.0	4.5	2.6	2.9	4.3
SSD+RBF補間	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

4 指 MP 関節付近の接触領域が過少評価されていた。SSD 変形のみを行ったデジタルハンドの把持姿勢の体積が平均約 2650mm³減少していることから、SSD のみでは表皮変形を十分に再現出来ていない事が分かった。今後は、これらの変形も母指 CMC 関節と同様に RBF 補間による補正を行えば、精度が向上すると考えられる。

参考文献

- 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エルゴノミック評価システムの開発(第 1 報)」, 精密工学会誌, 74(2), pp 182-187, (2008).
- 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エルゴノミック評価システムの開発(第 2 報)」, 精密工学会誌, 75(4), pp 548-553, (2009).
- 川口, 他:「計測データに基づくデジタルハンドの高精度表皮変形手法の実現」, 精密工学会春季全国大会講演論文集, pp169-170, (2010).
- カバンディ:「関節の生理学 I 上肢」, 医歯薬出版,(2005)

表 6 製品把持姿勢再現時の接触領域比較

	プレーキ把持姿勢	製品接触領域	ハンド接触領域	製品接触領域面分情報	
				製品接触領域面分形状	製品接触領域面分情報
Subject1	MRI計測データ	上図:手の指側 下図:手のひら側	12.4 mm 0mm	基準接触領域面積[mm ²]	7715mm ²
				基準接触面分数(B)	3469個
	共通接触面分数(A)に対する割合(A/B)	67%			
デジタルハンド	上図:手の指側 下図:手のひら側	12.4 mm 0mm	近似接触領域面積[mm ²]	6232mm ²	
			近似接触面分数(C)	2654個	
共通接触面分数(A)に対する割合(A/C)	87%				
実際の接触領域			製品側接触領域形状比較(青:MRI, 灰:DH)	製品側接触領域共通面分数(A)	2322個
Subject2	MRI計測データ	上図:手の指側 下図:手のひら側	12.4 mm 0mm	基準接触領域面積[mm ²]	7589mm ²
				基準接触面分数(B)	3616個
	共通接触面分数(A)に対する割合(A/B)	52%			
デジタルハンド	上図:手の指側 下図:手のひら側	12.4 mm 0mm	近似接触領域面積[mm ²]	6013mm ²	
			近似接触面分数(C)	2618個	
共通接触面分数(A)に対する割合(A/C)	70%				
実際の接触領域			製品側接触領域形状比較(青:MRI, 灰:DH)	製品側接触領域共通面分数(A)	1872個