

# デジタルハンドにおける骨リンクモデルの頑健で効率的な生成手法

北海道大学 ○天野克洋, 金井 理, 伊達宏昭

## 要 旨

手による持ちやすさに配慮しなければならないハンドヘルド型製品の設計評価において、人間の手の運動を模擬したデジタルハンドによる仮想評価の導入が期待されている。その実現には、人間の手指の関節運動を高精度に再現可能なデジタルハンドが必要である。しかし、MRI 計測に基づくデジタルハンドを構成する骨リンクモデルの生成には、これまで多大な時間を要し、また生成の際、解剖学的に妥当ではない関節運動を導出してしまふ場合があった。その解決のため、本研究では、MRI 計測からのデジタルハンド骨リンクモデルの頑健で効率的な生成手法について提案し、その有効性を確認した。

## 1. はじめに

近年、ハンドヘルド型製品の市場競争力を高めるため、人間の使いやすさ(エルゴノミクス)に配慮した製品設計が増加している。その設計効率化のため、図1のような人間の手を再現した3次元モデルであるデジタルハンドにより「把持しやすさ」を定量的に推定可能な仮想エルゴノミック評価システムが研究されているが[1]、評価の信頼性をより高めるには、デジタルハンドの高精度かつ効率的な生成技術が必要となる。

従来のデジタルハンド生成では、人間の手の把持姿勢をMRI画像データとして測定し、等値面抽出により表皮と骨の三角形メッシュモデルを作成し、これらから骨の関節構造をもつ図2のような骨リンクモデルを生成していた[2]。しかし従来手法では、20にも及ぶ骨セグメントを個々に手動で切り出さなければならず、また骨リンクモデル関節回転軸の自動導出処理が不安定で、必ずしも妥当ではない回転軸が導出される場合が多く、その手動での修正をユーザに強いるため、骨リンクモデルの生成に多大な時間を要していた。

そこで本研究では、リージョングローイングの導入により個々の骨セグメントの選択を半自動化し効率化するとともに、骨の主軸方向を参照した骨セグメント間の自動初期位置合わせにより妥当な関節回転軸を頑健に導出できるデジタルハンド用骨リンクモデルの新たな生成手法を提案し、その有効性を確認したので報告する。

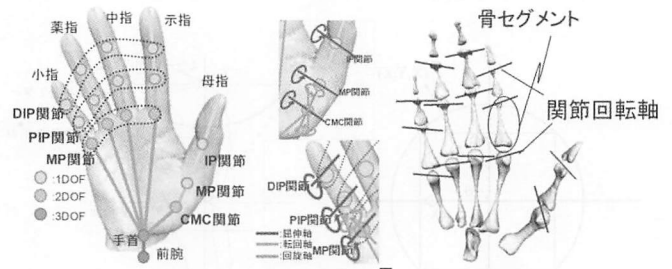


図1 デジタルハンド 図2 骨リンクモデル

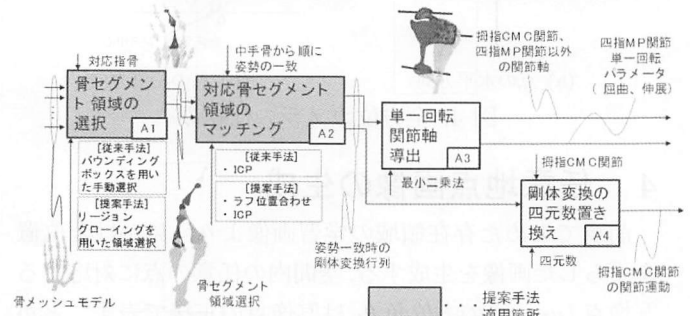


図3 従来研究と本研究の相違

## 2. 従来の骨リンクモデル生成手法[2]

### 2.1 骨リンクモデルとその関節構造

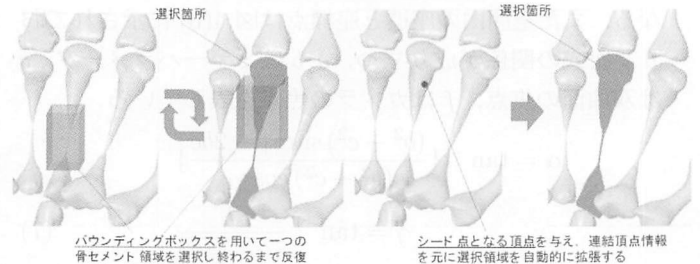
デジタルハンドの骨リンクモデルは、解剖学的知見[3]に基づき図1のような関節構造をもつ。すなわち、4指は中手指節間(MP)関節に屈伸・転回(2自由度(DOF))の回転を持ち、近位指節間(PIP)、遠位指節間(DIP)関節は屈伸の1DOFの回転を持つ。母指はCMC関節に屈伸と、旋回が付随した転回(2DOF)の回転を持ち、MP、指節間(IP)関節は屈伸の1DOFの回転を持つ。

### 2.2 MRI 画像データからの骨の3角形メッシュモデル生成

手指運動に伴う3次元の手骨の運動を記録するため、限界運動姿勢を含む複数の手の姿勢をMRIで計測する。次に、MRI画像データから医用画像処理ソフト(Osiris)を用いて骨の表面に対応する輝度値等値面を抽出し、これを骨メッシュモデルとして生成する。その後、3Dポリゴン編集ソフト(Geomagic)を用いて、骨メッシュモデルの平滑化を行う。

### 2.3 マッチングに基づく骨リンクモデルの関節構造推定

次に、2つの異なる限界運動姿勢の骨メッシュモデルを、中手骨から遠位方向に向かい順次位置合わせすることで、骨リンクモデルの関節構造(関節中心、関節軸)を導出する。従来手法ではまず図3のA1のように限界運動姿勢と中立姿勢の骨メッシュモデル内から、対応する骨セグメント領域同士を手動で選択する。次に図3のA2のように対応領域のメッシュ間でICP(Iterative Closest Point)[4]を用いた位置・姿勢のマッチングを行い、その際の剛体変換を求める。この剛体変換には、並進成分も含まれるため、四指の関節の場合、図3のA3のように最小二乗法を用いて、この剛体変換を単一軸周りの純回転に近



(a)従来手法 (b)提案手法  
図4 骨セグメント領域の選択手法

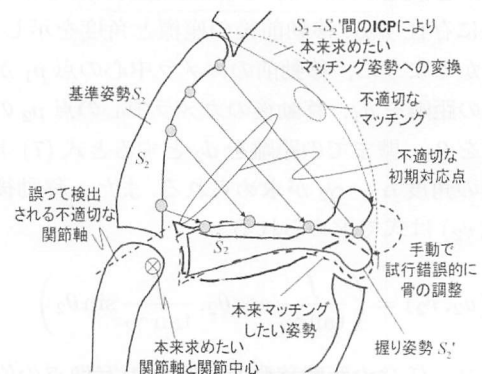


図5 従来の関節軸導出の問題点

似し、その軸を骨リンクモデルの関節回転軸としている[2].

一方、母指 CMC 関節は鞍型関節のため[3]、回転と同時に関節面滑りによる並進分の運動をも表現できるよう、ICP から得られた母指運動前後の剛体変換を、図 3-A4 のように四元数球面線形補間と併進線形補間の合成として表現している。

このように四指、母指いずれの関節構造導出では、異なる姿勢における対応骨セグメント領域間の相対的な位置・姿勢を、ICP でマッチングし導出する必要がある。

### 3. 提案手法による骨リンクモデル生成手法

#### 3.1 従来手法の問題点

前節で述べた従来の骨リンクモデル生成手法には、2つの問題点があった。第一は、対応する骨セグメント領域選択の際、図 4(a)のように、1セグメント相当のメッシュ頂点群を、各辺がxyz軸に平行なバウンディングボックスで囲みながら繰り返し選択しなければならず、作業に多大に時間を要していた。

第二は、図 5 のように骨セグメント領域間のマッチングの際、セグメント間の相対的な位置・姿勢の差異が非常に大きい状態から ICP を適用していたため、不適切な初期対応点を選ばれ、ICP の誤差最小化において望ましくない局所最適解に陥ることが多く、結果的に図 5 のように不適切な関節回転軸が導出されるケースが多かったことである。このような場合、従来は、一方のセグメントの位置・姿勢を試行錯誤的に他方へ近づけるユーザの手動処理を経て軸の再計算を行っていた。

#### 3.2 リージョングローイングによる骨セグメント領域の

##### 半自動選択

3.1 の問題解決のため、まず本研究では、骨メッシュモデル内からの骨セグメント領域の選択を半自動化できる機能を開発した。この機能は、図 4(b)のように、選択したい骨セグメント上にある1つの頂点をユーザが指示するだけで、システムが骨メッシュモデル内から、頂点の連結情報を基にリージョングローイングによって指定頂点を含む閉メッシュ内の全頂点を自動的に一つの骨セグメント領域として抽出できる機能である。これにより、各々の骨セグメント選択の作業時間を大幅に短縮した。

#### 3.3 主軸による骨セグメント領域間の自動ラフ位置合わせ

次に、骨セグメント領域間の ICP から適切な回転軸を導出するため、マッチングすべき骨セグメント領域間の自動的なラフ位置合わせ機能を実装した。図 6 に示すように、まず基準姿勢側の骨セグメントの重心を世界座標系原点に平行移動し、両セグメント領域の第一主成分方向が一致するように回転させ、さらに握り姿勢の骨セグメント領域の重心に一致するように平行移動する。この一連の剛体変換により、両セグメント間の相対的な位置姿勢をほぼ一致できるため、その後 ICP を適用しても、局所最適解には陥らず、マッチングのための適切な剛体変換と関節回転軸が安定的に導出できた。

### 4. 提案手法の有効性検証

#### 4.1 モデル生成時間の効率化

骨セグメント領域の選択時に、同一作業者が従来手法と提案手法を用いた際の作業時間の比較を表 1 に示す。提案手法は、従来に比べ作業時間を約 10 倍に効率化できたことが分かる。

#### 4.2 導出した骨リンクモデルの関節構造の妥当性

被験者 3 名の骨メッシュモデルに対して、従来手法と提案手法の各々を用いて関節回転軸を導出した。図 7 に被験者 B の小指の骨リンクモデル導出結果例を示す。従来手法(図 7(a))では、明らかに不適切な関節回転軸の方向が求められている。それに対し、提案手法で導出された回転軸は(図 7(b))、解剖学的にも妥当と思われる方向を示している。

また表 2 に、被験者 3 名の全指の全関節に対する関節軸導出結果をまとめた。表より、本手法を適用すれば、骨セグメント

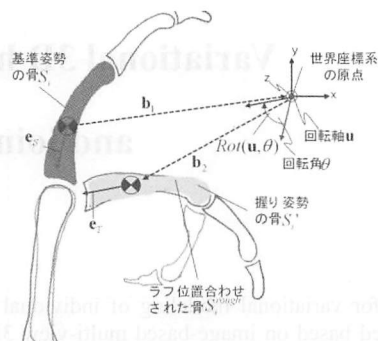
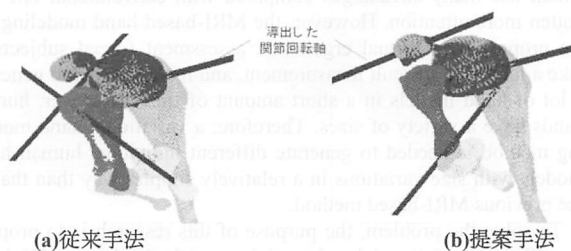


図 6 ラフ位置合わせの概要

表 1 従来手法と提案手法の所要時間の比較

指一本分の骨セグメントの領域選択	従来手法	提案手法
被験者 1	17分	2分
被験者 2	18分	2分
被験者 3	13分	1分



(a)従来手法 (b)提案手法  
図 7 被験者 B の小指(a)従来手法(b)提案手法

表 2 被験者の指のそれぞれの関節軸導出結果

	MP/CMC		PIP		DIP			
	提案	従来	提案	従来	提案	従来		
被験者 A	拇指	○	□	○	□	○	□	○:解剖学的に妥当 □:解剖学的に妥当ではない N/A:妥当な骨セグメントの抽出不可能であるため関節回転軸の導出未実施
	示指	○	○	○	○	○	□	
	中指	○	○	○	○	○	□	
	薬指	○	□	○	□	○	□	
	小指	○	○	○	□	N/A	N/A	
被験者 B	拇指	○	□	○	□	○	□	骨セグメントが抽出出来ていれば関節回転軸の導出可能
	示指	○	○	○	○	○	□	
	中指	○	○	○	□	○	□	
	薬指	○	○	○	□	○	□	
	小指	○	○	○	□	○	□	
被験者 C	拇指	○	○	○	○	○	□	N/A:妥当な骨セグメントの抽出不可能であるため関節回転軸の導出未実施
	示指	○	□	○	□	N/A	N/A	
	中指	○	○	○	□	N/A	N/A	

さえ抽出できていれば、解剖学的に妥当な関節回転軸の導出が必ず行えることを確認できた。

### 5. まとめ

デジタルハンド骨リンクモデルの頑健で効率的な生成手法を提案し、従来手法と比較し、作業の効率性、得られた関節構造の妥当性の面で、いずれも優れた方法であることを確認した。

#### 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).
- [2] 清水, 他:「MRI 測定に基づくデジタルハンドの高精度化」, 精密工学会北海道支部大会講演論文集 pp. 37-38- (2010)
- [3] カバンディ:「関節の生理学 1 上肢」, 医歯薬出版, (2005)
- [4] P. Besl et al.: "A method for registration of 3-D shapes", IEEE Transaction on pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2), pp.239-256 (1992)