

掌上装着魚眼カメラを用いた フリーハンド AR のための手指姿勢推定

丸山裕介[†] 河野恭之[†]

概要：本研究では、ユーザの掌に魚眼カメラを装着しその手の指先を検出することで逆運動学的に手指の自然な姿勢を推定する。手指を屈曲させる際、手指の各関節を任意に動作させることは困難でありそれぞれの関節が従属的に動作すると考えると、ある関節の屈曲角が定まれば他の関節に関しても屈曲角が一意に定まる。そのため魚眼カメラに対する指先の位置さえ決まれば各関節の屈曲角を逆運動学的に推定できる。本研究ではこの関節間の特性を依存関係と呼び、魚眼カメラを用いて検出した指先位置と関節間の依存関係を利用することで手指姿勢を逆運動学的に推定する。本手法がユーザに与える制約は指先を検出するための魚眼カメラの装着のみであり、ユーザの位置や手の可動範囲を制限しない。そのため本システムを利用することで直感的な操作ができ、かつ没入感のあるハンズフリーな AR・VR システムを実装できると考えられる。本研究ではシステムの実装に加え、母指のみ依存関係の導出を行った。先行研究にて提案された依存関係を本手法に適用して手指姿勢を推定し、同時に光学式モーションキャプチャを用いて各関節の屈曲角を計測して誤差を算出する実験を行った。実験の結果から、母指に対する依存関係の整合性が低いことを確認できた。母指のみ依存関係を新たに導出し実験を行ったところ、より整合性の高い依存関係が導出できたことを確認した。

キーワード：手指姿勢、魚眼カメラ、AR

1. はじめに

本研究では、ユーザの掌に魚眼カメラを装着し指先を検出することで逆運動学的に手指の自然な姿勢を推定する。魚眼カメラの装着例を図 1 に示す。手は人間にとって触れる、掴むなどの動作を広範囲で可能とする重要なインタフェースであり、ヒューマンコンピュータインタラクションなどの分野において手指姿勢を推定する研究が盛んに行われている。例えば、赤外線カメラを用いて手や指の位置姿勢を計測する Leap Motion[1]や、筋電センサや加速度センサが内蔵されたハードウェアを腕に装着して手指の動きを推定する Myo[2]などのシステムが開発された。推定した手指姿勢の適用には AR や VR が挙げられる。AR や VR では実体のない仮想的な物体を視認できる。これらのシステムに手指姿勢推定を応用することで仮想物体への接触を実現できユーザの入力手段を拡張できると考えられる。特に AR では自分の手と仮想物体の双方を視認できるため直感的な入力手段となり得る。本研究では、この入力手段をハンズフリーに実行できる手指姿勢推定システムを開発する。ユーザの掌に装着した魚眼カメラを用いて指先を検出することで、カメラと指先との位置関係が分かる。ここで手指を屈曲させる際の関節間の特性を考える。手指の各関節を任意に動作させることは困難でありそれぞれの関節が従属的に動作すると考える。この場合、カメラと指先の位置関係がわかれば一意に各関節の屈曲角を計算できる。本研究における手指姿勢推定システムが与えるユーザへの制約は掌へのカメラの装着のみであり、肩や腕により広範囲に動かせるといった手の利点を失わずに手指姿勢を推定できる。



図 1. 魚眼カメラの装着例

2. 関連研究

本研究と目的や手法が類似している研究や技術を挙げる。上田ら[3]は複数台のカメラでユーザの手を多視点から撮影することで手の形状を推定しているが、複数台のカメラが必要であり、そのすべてのカメラの画角に収まる範囲でしか手を動かすことができない制約をユーザに与えてしまう。本研究における手指姿勢推定システムがユーザに与える制約は掌への魚眼カメラの装着のみであり、このカメラを用いて指先を検出するのみで手指姿勢を推定できるためユーザの位置及び手の可動範囲に制限を与えない。

Gentile ら [4]は Kinect を用いて距離画像から手を検出して距離画像の特徴を学習することで手の開閉の程度を推定しているが、手指毎の姿勢を推定することができない。本研究における手指姿勢推定システムでは各手指の指先を検出することで手指毎の姿勢推定が可能である。

柏木ら[5]は把持される筒状の物体の蓋の上面や透明な物体の内部に魚眼レンズカメラを設置して手指を認識する手法を提案した。本研究と同様に手指の検出には魚眼レンズが取り付けられたカメラを用いているが、研究目的とそのためカメラの装着位置が相違している。柏木らの研究

[†] 関西学院大学大学院 理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kwansei Gakuin University

の目的は物体が把持される際の手全体の位置姿勢の復元であるのに対し、本研究の目的はできるだけユーザを制限しない手指姿勢推定及び AR システムの実現である。また柏木らの手法ではカメラが取り付けられる対象が把持される物体であるのに対し、本手法では掌である。本研究では手指の姿勢を推定する流れにおいて画像処理による指先検出を行うためユーザが物体を把持している状態ではオクルージョンが発生し指先を検出できない。そのため手指の姿勢を推定することができない。しかし物体を把持している状態でも手指姿勢推定が可能であるため本手法は汎用性が高いと考えられる。

Leap Motion は設置型のインタフェースであり赤外線カメラで撮影した画像を解析することで三次元空間での手や指の位置姿勢を検出している[1]。バーチャルろくろシステム Roquero はこのインタフェースを用いており、検出した手指の位置姿勢を反映させた 3D ハンドモデルと 3D ろくろモデルを同じ仮想空間内に出現させて仮想的なろくろ回しを実現している[6]。Leap Motion で手指の位置姿勢を検出する手法では、ユーザは赤外線カメラで撮影できる範囲でしか手指を動かすことができない。またこのインタフェースに対してユーザの左右の手が重なる場合オクルージョンの問題が発生するためユーザの両手はこの問題が発生しない相対位置姿勢でなければならない。本システムでは環境カメラを必要とせず、手指姿勢に用いる魚眼カメラは掌に付随するため、手や指の運動範囲が制限されない。

Chan ら[7]は魚眼カメラをいずれかの 2 本の指の間に挟むようにして装着し手指を検知することでジェスチャを認識する Cycrops ring を開発した。この構成ではカメラを装着した手指の向きによってカメラの向きが変わってしまう中でジェスチャ対象の手指を全体的に検出する必要があり、このシステムを利用する場合ユーザの手指の運動範囲を制限してしまう。本手法では手指姿勢推定に用いる魚眼カメラをユーザの掌に装着させるのみであり、また指先を検出するのみで手指姿勢を推定できる。そのため Cycrops ring に比べ手指の屈曲に制限を与えない構成と考えられる。

Kim ら[8]は赤外線カメラや慣性測定ユニットなどが搭載された装置を手首に装着し手の検出や動きの推定を行うことでハンドジェスチャを認識するデバイス Digits を開発した。このデバイスがユーザの手首に装着されることからユーザの位置が制限されないという本研究と同様の利点がある。しかしデバイスに搭載された赤外線カメラの画角上、手首が伸展する場合には手を検出できずハンドジェスチャの認識が不可能になると考えられる。本手法では手指姿勢推定に用いる魚眼カメラをユーザの掌に装着する。そのためカメラと掌の位置関係が変化せず手首の伸展や屈曲の方向によらず手指姿勢推定が可能である。

3. 研究概要

本研究では、ユーザの掌に魚眼カメラを装着しその手の指を検出することで逆運動学的に手指の自然な姿勢を推定する。手指の姿勢を推定するにあたり、関節間の特性に注目する。手指の各関節を任意に動作させることは困難であり、手指を自然に屈曲させる際それぞれの関節は従属的に動作すると考えられる。この特性から、ある関節の屈曲角が定まれば他の関節に関しても屈曲角が一意に定まる。そのため魚眼カメラに対する指先の位置さえ決まれば各関節の屈曲角を逆運動学的に推定できる。本研究ではこの関節間の特性を依存関係と呼び、魚眼カメラを用いて検出した指先位置と関節間の依存関係を利用することで手指姿勢を逆運動学的に推定する。本手法がユーザに与える制約は指先を検出するための魚眼カメラの装着のみであり、ユーザの位置や手の可動範囲を制限しない。そのため本システムを利用することで直感的な操作ができ、かつ没入感のあるハンズフリーな AR・VR システムを実装できると考えられる。

本章では手指姿勢を推定する過程、及び屈曲角間の依存関係の導出について述べる。手指姿勢推定の流れを図 2 に示す。まず魚眼カメラを用いて取得した画像から肌色領域を抽出する。この肌色領域には魚眼カメラを装着した手の指以外も含まれている可能性があるため、手指領域の候補を絞り込む。手指を屈曲する際、魚眼カメラと手指の距離が小さくなり手指領域の面積が大きくなる傾向にあると考えられる。そこで抽出した肌色領域に対して距離変換処理を利用することで比較的面積の大きい肌色領域を抽出する。次に各手指の指先画像を用いたテンプレートマッチングを行う。ここで各手指の内転(外転)の可動範囲を利用して各手指の探索範囲を設定する。この探索範囲においてテンプレートマッチングを行うことで手指を検知する。手指を検知した探索範囲における最大肌色領域を手指領域に決定する。この手指領域に対して指先検出を行う。魚眼カメラと手指との実際の位置関係を考慮すると、手指の付け根の座標を仮定する場合、この座標はカメラ画像の外側に位置する。また指先の座標は付け根の座標に対し、手指領域の輪郭上で最も距離が大きい座標と考え、この座標を指先に決定する。この指先座標を利用することで、魚眼カメラに対する指先へのベクトルの角度 θ_{ip} (図 3) を計算できる。予め各関節間の距離、カメラと手との位置関係を設定し、 θ_{ip} 及び屈曲角間の依存関係を利用することで θ_{ip} に対応する手指姿勢を成す各関節の屈曲角を一意に計算する。本研究では依存関係の導出も行い、ユーザの手背に貼付したマーカを認識できる光学式モーションキャプチャを用いて屈曲角のデータを収集し解析することで屈曲角間の依存関係を導出する。

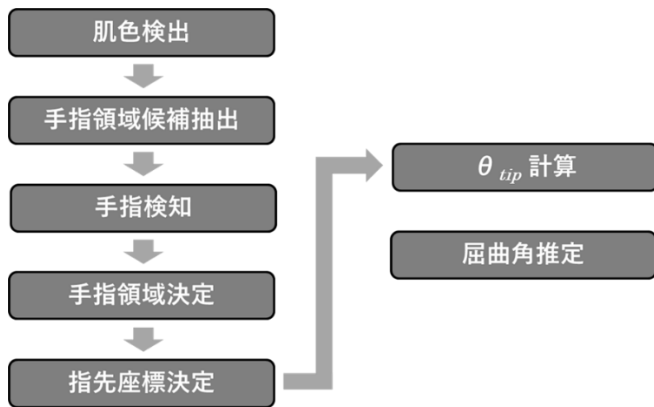


図2 手指姿勢推定の流れ

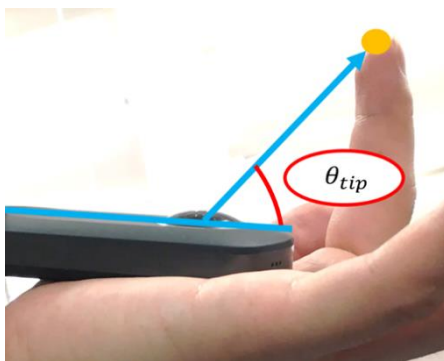


図3 θ_{tip} の示す角度

3.1 指先検出

手指の姿勢を推定するにあたり画像上での指先座標を求める。本節では、掌に装着した魚眼カメラの画像に対して手指領域を抽出し、得られた手指領域において指先となる座標を検出するまでの過程を述べる。本節における処理の流れを以下に示す。

- i. **肌色領域の抽出**：肌色である手指を検出するために、肌色の色相範囲を設定し肌色領域を抽出する。
- ii. **手指領域候補の抽出**：手指を屈曲すると魚眼カメラとの物理的な距離が小さくなり手指領域は比較的面積の大きい領域となると考えられる。この特性を利用して手指領域候補を絞り込む。
- iii. **手指の検知**：手指が画角内に存在する場合には必ず指先が映る。そこで各手指の可動範囲を考慮して設定した探索範囲内で各手指の指先画像のテンプレートを用いたテンプレートマッチングを行うことで手指を検知する。
- iv. **手指領域の決定**：手指領域は比較的面積が大きい肌色領域となることから、手指を検知した探索範囲内で最大の肌色領域を手指領域に決定する。

- v. **指先座標の決定**：カメラを掌に装着すると手指の付け根は画角外に存在するため、手指領域において手指の付け根付近は魚眼画像の端に、指先は手指領域の輪郭においてこの位置から最も距離が大きい座標に射影され则认为られる。そこで画像上に手指の付け根の座標を設定し、手指領域の輪郭上でこの座標から最も距離が大きい座標を指先座標に決定する。

3.1.1 手指領域検出

まず掌上に装着した魚眼カメラを用いて画像を取得する。カメラ画像の例を図4に示す。取得した画像から手指領域の候補となる肌色領域を抽出する。肌色領域の抽出には色相空間を利用する。色相空間は輝度に依存しないため、手指に影ができた場合でも比較的高精度に肌色領域を抽出できる。Sherrah ら[9]が提案した肌色の色相範囲(式1)を基にカメラ画像を2値化することで肌色領域と非肌色領域に分離する。カメラ画像を図3.3, 肌色領域抽出後の画像を図5に示す。

$$6^{\circ} \leq \theta_{skin} \leq 38^{\circ} \quad (1)$$

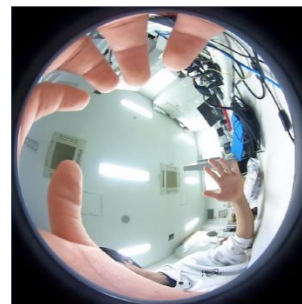


図4. カメラ画像



図5. 肌色領域検出画像

抽出した肌色領域にはカメラを装着している手の指以外も含まれている可能性がある。そこで取得画像に手指領域が含まれる場合の特徴を基に、肌色領域に対して複数の処理を施すことで手指を検知する。魚眼カメラの装着位置と手指の屈曲方向を考慮すると、魚眼カメラの画角内に手指が存在する場合には魚眼カメラと手指の距離が小さくなり、他の肌色領域に比べ手指領域の面積が大きくなる傾向にあると考えられる。そこで、まず肌色領域検出画像に距離変換処理を施す。距離変換とは、二値画像においてある画素から最近傍の0画素までの距離をすべての非0画素に対して求め各画素の画素値とする処理である。抽出した肌色領域に対してこの距離変換処理を施し、閾値を設定して再度2値化することで比較的面積の大きい肌色領域を抽出する。図5の画像に対して距離変換処理を施した画像を図6, 2値化後の画像を図7に示す。

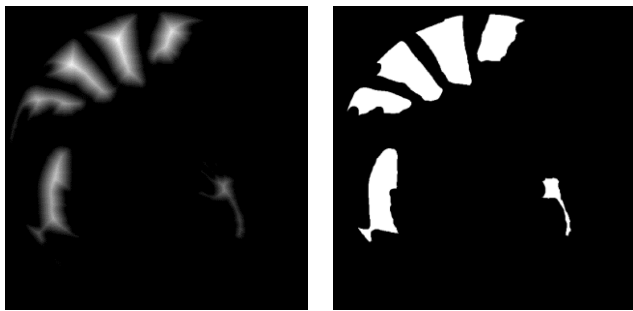


図 6. 距離変換処理画像 図 7. 図 6 を 2 値化した画像

次に、肌色領域から手指を検知する。手指検知の際に手指領域の形状の特徴を利用する。指先の形状は丸みを帯びており、図 4 及び他の 2 値化画像の図においてその特徴が反映されていることがわかる。そこで 2 値化された各手指の指先画像のテンプレートを用意し、テンプレートマッチングを行う。ここで、各手指の検知に対応するテンプレートマッチングの適用範囲を設定する。藤木ら[10]が提案した表 1 に示す手指の内転(外転)の可動範囲に注目し、魚眼画像に対して各手指の探索範囲を設ける。設定した探索範囲に対して各手指に対応するテンプレートマッチング処理を行うことで各手指を検知する。各手指に対するテンプレート画像を図 8 に、テンプレートマッチングの様子を図 9 に示す。手指を検知した探索範囲における最大の肌色領域を手指領域に決定する。

表 1. 各手指の内転(外転)角

	母指	示指	中指	環指	小指
内転(外転)可動角	80	40	40	40	40

単位：度



図 8. テンプレート画像

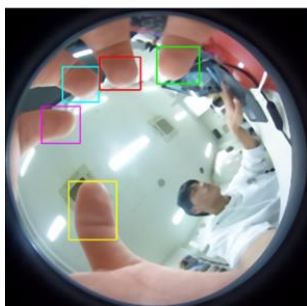


図 9. テンプレートマッチング

3.1.2 指先座標の決定

検出した手指領域から指先の位置を決定する。実際のカメラと手指との位置関係より各手指の付け根はカメラの筐体に最も近く、カメラ画像において外側に位置する。そこ

でカメラ画像に手指の付け根の座標を仮定する場合、指先は手指領域の輪郭においてこの座標から最も距離のある座標である。仮定した手指の付け根の座標と手指領域の輪郭上のそれぞれの座標との距離を求め最も距離が大きい輪郭上の座標を指先座標に決定する。指先を検出した画像を図 10 に示す。図 10 では仮定した親指の付け根の座標を白い点に示している。手指領域の輪郭上で付け根の座標から最大の距離である座標を指先に決定し、円でその座標を示している。

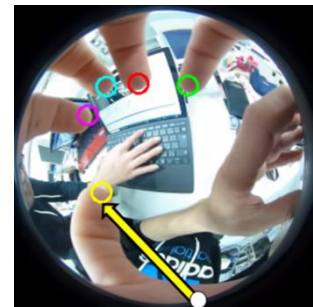


図 10. 指先位置の決定

3.2 屈曲角推定

本研究における手指の姿勢は各関節間の距離と各関節の屈曲角によって成り立つものとする。本節では、検出した指先座標から手指の姿勢を求める手法について述べる。本節における処理の流れを以下に示す。

- 指先とカメラとの位置関係を推定：魚眼レンズの画像への射影方法から、カメラ画像の中心と指先座標との相対位置を計算することで魚眼レンズの中心から指先へのベクトルの角度 θ_{tip} を求める。
- 手指の各関節の屈曲角を推定：各関節間の距離、カメラと手との位置関係を設定し、各屈曲角間の依存関係を利用することで θ_{tip} から逆運動学的に手指姿勢を推定する。

手指を自然に動かすとき、屈曲角間には依存関係が存在する。屈曲とは手を握る方向への手指の運動である。各関節間の距離の値、カメラと手の位置関係を設定すると、この依存関係を利用することで指先座標から逆運動学的に各屈曲角を求められる。

3.2.1 θ_{tip} の計算

本手法ではカメラに対する指先へのベクトルの角度 θ_{tip} (図 3)を基に手指姿勢を推定する。検出した指先の座標を用いて魚眼レンズの射影方法から θ_{tip} を求める。使用している魚眼レンズでは立体射影により画像が生成されている。立体射影の性質を図 11 に、 θ_{tip} の求め方を式 2 に示す。魚眼レンズによる仮想の半球上の点は、仮定した手指の付け根の座標と射影された指先の座標との距離 d 、半球の半径を r としたとき図 11 と式 2 に基づいて画像へ射影されることから、指先座標を用いて θ_{tip} を求められる。

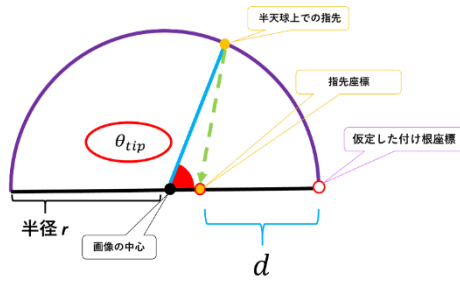


図 11. 立体射影に基づく θ_{tip} の計算

$$\theta_{tip} = \begin{cases} 2 \tan^{-1} \frac{d}{r} & (0 \leq d \leq r) \\ \pi - 2 \tan^{-1} \frac{d-2r}{r} & (r < d < 2r) \end{cases} \quad (2)$$

3.2.2 屈曲角の計算

本研究では各関節の屈曲角を求めることで手指の姿勢を推定する。指先と各関節、カメラと手の位置関係を図 12 に示す。各関節間の距離 a, b, c 、掌の厚みの中心面から魚眼カメラのレンズまでの高さ h 、カメラレンズの中心から MP 関節までの距離 l は予め与えるものとする。この図から各屈曲角 θ_{MP} , θ_{PIP} , θ_{DIP} と θ_{tip} を用いた方程式が導かれる(式 3)。しかしこの方程式には未知数が 3 つ存在するため解くことができない。そこで、手指を自然に動かす際に生じると考えられる関節間の依存関係を導出する。各手指には屈曲する関節が 3 つあるため、2 つの依存関係を導出する。手指における 3 つの屈曲角の間に 2 つの依存関係を利用することで、各屈曲角は 1 つの変数で表わすことができる。このことから図 12 によって導かれた方程式に存在する未知数は 1 つとなり方程式を解くことができるため、各手指における 3 つの関節の屈曲角を求められる。本研究では表 2 に示した各関節の屈曲可動角の範囲内で各屈曲角を求める。

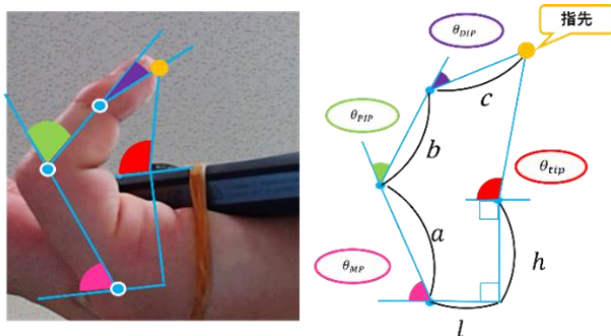


図 12. 手指とカメラの位置関係

$$\begin{aligned} & a \cos \theta_{MP} + b \cos(\theta_{MP} + \theta_{PIP}) + c \cos(\theta_{MP} + \theta_{PIP} + \theta_{DIP}) + l \\ &= \frac{a \sin \theta_{MP} + b \sin(\theta_{MP} + \theta_{PIP}) + c \sin(\theta_{MP} + \theta_{PIP} + \theta_{DIP}) - h}{\tan \theta_{tip}} \end{aligned} \quad (3)$$

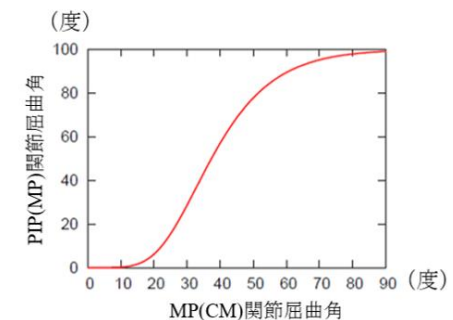
表 2. 各関節の屈曲可動角

	母指		示指	中指	環指	小指
CM関節	0~90	MP関節	0~90	0~90	0~90	0~90
MP関節	0~70	PIP関節	0~100	0~100	0~100	0~100
IP関節	0~50	DIP関節	0~80	0~80	0~80	0~80

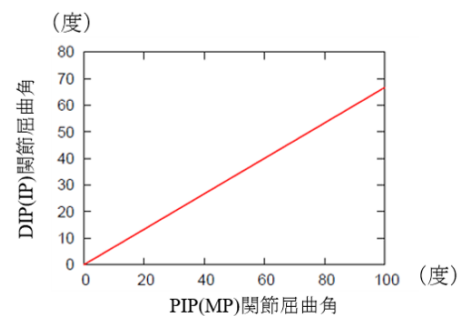
単位: 度

3.3 関節間の依存関係

前節では指先と各関節、カメラと手の位置関係から屈曲角を求めるための方程式を導出した。この方程式には未知数が 3 つ存在し解くことができないため、関節間の依存関係を用いる。また本研究では依存関係を導出する。各手指には屈曲する関節が 3 つあるため、2 つの依存関係を導出し、各屈曲角を 1 つの変数で表わすことで方程式を解き各関節の屈曲角を計算する。藤木ら[10]は図 13 に示す形で各関節間の依存関係を提案した。藤木らは各手指に対して同一の依存関係を提案しており、手指毎の特性を考慮していない。特に母指に関しては他の手指と構造が異なり、他の手指において MP 関節が付け根に位置するが、母指のみ付け根ではなく掌の内部に存在する CM 関節が動く特性がある。この特性から、母指の CM 関節は他の手指の MP 関節に比べて曲げにくく依存関係に表れる性質が異なる可能性が考えられる。そこで藤木らの依存関係を本システムに適用し整合性を確認するために実験を行う。屈曲角の真値と本システムを用いて推定した屈曲角の誤差率を算出し依存関係の整合性を確認することで藤木らの依存関係を評価する。誤差率の高い関節を含む手指に関しては依存関係の整合性が低いと判断する。整合性の低い依存関係に関しては本研究にて導出を行う。



(a) MP-PIP(CM-MP)関節間



(b) PIP-DIP(MP-IP)関節間

図 13. 藤木ら[10]が提案した依存関係

3.3.1 予備実験

実験概要を表3に示す。実験にはモーションキャプチャを用いる。使用するのはマークを認識し三次元位置をリアルタイムに計測できる光学式モーションキャプチャであるnac社製のMAC3D Systemである。藤木ら[10]の依存関係を適用した本システムとこのモーションキャプチャを同時に作動させることで双方での屈曲角を同時に計測する。被験者には掌上装着魚眼カメラに加え図14のように各関節上にマークを貼付させる。モーションキャプチャを用いてこれらのマークを認識する。次に関節の屈曲角を計算する。実際の関節はマークを貼付した位置ではなく骨格中にあるため、手の厚みを考慮して実際の関節位置を調整した。調整後の関節位置を基に屈曲角を計算した。被験者には手指の姿勢3種類(Level 1~3)を依頼する。手指の姿勢の種類は手の開閉を3段階に分けたものである。Level 1では手を開いた状態、Level 3では手を閉じた状態であり、Level 2はLevel 1とLevel 3の中間の状態である。なお、手を完全に閉じる場合にはモーションキャプチャでマークを検出できなくなるため、マークを検出できる上で手を閉じることのできる限界の状態をLevel 3とみなしている。これらの手指姿勢の種類それぞれにおいて本システムとモーションキャプチャを用いて各屈曲角を計測する。モーションキャプチャを用いて計測した値を真値とみなし、各屈曲角の可動範囲に対する誤差の割合と定義した誤差率を求めることで依存関係の整合性を評価する。被験者は10名であり、22歳の男性7名と女性2名、25歳の男性1名である。なお、本手法では手指の自然な姿勢を対象にしているため、被験者には実験前に自然な姿勢をとるよう指示した。

表3. 実験概要

内容	依存関係の整合性の確認
手法	手の開閉レベル1~3において本手法及びモーションキャプチャで取得した関節角の比較
	Level 1 開 Level 2 Level 3 閉
被験者	10人(22歳男性7名と女性2名, 25歳男性1名)



図14. マークの貼付例

本実験の全体結果を表4に示す。被験者A~Jの10人それぞれにおける手指の姿勢の3種類(Level 1~3)に対する各屈曲角推定の誤差率を表記している。また被験者および手指の姿勢の種類を総合し各屈曲角に対する誤差率の平均を

表記したものを表5に示す。本実験では表2に示した各屈曲角の可動範囲に対する誤差の割合を誤差率と定義する。この誤差率が低いほど推定精度が高いと言える。全体結果では誤差率が20%を上回る関節もあり個人差が見受けられたが、全体平均の結果では母指を除く各手指の関節に対して全て20%以下の誤差率であった。この結果から、母指を除いては藤木らの依存関係は整合性が高いと言える。母指のCM関節に関しては全体平均の結果が他の手指と比べて特に誤差率が高く精度が低かった。他の手指と比べて構造が異なる母指の特性である、付け根ではないCM関節が動くことが低精度の原因であると考えられる。この結果から、藤木ら[10]の提案した依存関係には母指のみ現れる特性が考慮されていないために整合性が低いと言える。そこで母指に対する依存関係を導出する。本実験で真値とみなしている、モーションキャプチャによる屈曲角を基に依存関係を導出する。導出した依存関係を本システムに適用し予備実験と同様の環境で再度誤差率を算出し整合性を確認する。

表4. 誤差率の全体結果

	thumb_ip	thumb_mp	thumb_cm	index_dip	index_pip	index_mp	middle_dip	middle_pip	middle_mp
A	level1: 2%	14%	11%	20%	4%	13%	4%	2%	12%
	level2: 10%	9%	13%	33%	5%	10%	6%	3%	10%
	level3: 4%	20%	7%	41%	6%	4%	35%	9%	4%
B	level1: 20%	6%	20%	10%	10%	12%	6%	12%	11%
	level2: 2%	1%	20%	29%	12%	14%	26%	18%	11%
	level3: 14%	10%	16%	49%	7%	8%	51%	20%	8%
C	level1: 28%	4%	19%	4%	4%	17%	10%	20%	16%
	level2: 8%	19%	28%	20%	0%	13%	25%	18%	21%
	level3: 1%	24%	24%	14%	27%	5%	14%	25%	21%
D	level1: 27%	49%	24%	0%	6%	24%	8%	5%	19%
	level2: 11%	43%	19%	3%	8%	12%	5%	4%	22%
	level3: 5%	39%	22%	9%	8%	14%	10%	10%	6%
E	level1: 50%	31%	49%	11%	2%	24%	4%	3%	27%
	level2: 42%	31%	49%	4%	8%	27%	3%	5%	31%
	level3: 46%	34%	50%	0%	11%	29%	10%	19%	32%
F	level1: 4%	43%	37%	16%	24%	6%	5%	8%	14%
	level2: 14%	53%	37%	0%	4%	18%	9%	6%	20%
	level3: 0%	51%	33%	6%	4%	13%	18%	13%	8%
G	level1: 16%	13%	29%	5%	5%	14%	6%	9%	16%
	level2: 18%	16%	30%	8%	2%	13%	1%	4%	20%
	level3: 20%	4%	26%	9%	2%	19%	5%	3%	24%
H	level1: 8%	44%	48%	6%	2%	22%	5%	7%	19%
	level2: 2%	33%	43%	15%	8%	14%	13%	4%	18%
	level3: 12%	40%	47%	11%	3%	2%	4%	14%	14%
I	level1: 14%	41%	49%	16%	11%	0%	26%	16%	8%
	level2: 22%	30%	46%	21%	14%	1%	33%	16%	10%
	level3: 22%	36%	47%	21%	13%	14%	31%	12%	9%
J	level1: 40%	40%	48%	10%	13%	24%	8%	13%	26%
	level2: 30%	37%	47%	13%	12%	6%	9%	6%	21%
	level3: 30%	31%	44%	14%	14%	1%	5%	5%	14%

	ring_dip	ring_pip	ring_mp	little_dip	little_pip	little_mp
A	level1: 13%	1%	11%	16%	5%	23%
	level2: 6%	6%	12%	6%	5%	17%
	level3: 33%	10%	9%	16%	7%	12%
B	level1: 10%	17%	7%	18%	2%	2%
	level2: 33%	24%	10%	10%	2%	2%
	level3: 58%	29%	11%	16%	9%	7%
C	level1: 0%	16%	23%	14%	12%	25%
	level2: 23%	22%	14%	1%	5%	6%
	level3: 6%	23%	16%	5%	2%	1%
D	level1: 1%	4%	26%	17%	8%	33%
	level2: 6%	3%	29%	20%	7%	32%
	level3: 13%	4%	7%	30%	32%	5%
E	level1: 0%	2%	23%	6%	1%	10%
	level2: 5%	9%	31%	5%	7%	16%
	level3: 6%	24%	34%	5%	12%	14%
F	level1: 6%	18%	7%	13%	5%	8%
	level2: 6%	4%	24%	23%	8%	0%
	level3: 13%	6%	13%	28%	15%	3%
G	level1: 1%	13%	19%	1%	9%	9%
	level2: 6%	11%	27%	4%	9%	16%
	level3: 5%	12%	33%	9%	7%	21%
H	level1: 3%	15%	31%	5%	4%	16%
	level2: 6%	15%	31%	16%	17%	22%
	level3: 4%	30%	24%	4%	2%	19%
I	level1: 25%	5%	14%	24%	17%	11%
	level2: 29%	5%	14%	24%	11%	4%
	level3: 31%	1%	0%	28%	13%	8%
J	level1: 4%	2%	10%	13%	13%	30%
	level2: 6%	1%	17%	21%	11%	23%
	level3: 1%	8%	18%	28%	15%	19%

表 5. 関節毎の平均誤差率

	thumb_ip	thumb_mp	thumb_cm	index_dip	index_pip	index_mp	middle_dip	middle_pip	middle_mp
Average	17%	28%	33%	14%	8%	13%	13%	10%	16%
	ring_dip	ring_pip	ring_mp	little_dip	little_pip	little_mp			
Average	12%	11%	18%	14%	9%	14%			

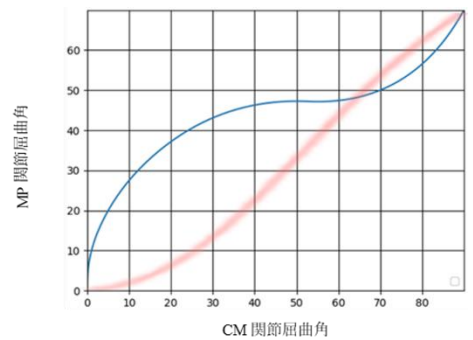
3.3.2 依存関係の導出

予備実験では母指の屈曲角の誤差率が高いことが確認できた。適用した依存関係には母指のみ CM 関節が動く特性が考慮されていないため整合性が低いと判断した。他の手指に対しては藤木ら[10]の依存関係の整合性が高いと判断し、母指のみ新たな依存関係を導出する。依存関係の導出には予備実験にてモーションキャプチャを用いて計測した各屈曲角のデータを利用する。母指の CM-MP, MP-IP 屈曲角それぞれの点群に対して 3 次スプライン補完、及び最小二乗法を応用する。まず 3 次スプライン補完に必要な 4 点を設定する。なお、4 点の内 2 点は可動範囲の最小と最大を用いる。残り 2 点を点群からランダムに抽出する。これらの 4 点を用いて 3 次スプライン補完を利用する。ここで、導出する関数に条件を設ける。手指を屈曲する際それぞれの屈曲角が増加すると仮定し、各屈曲角が増加傾向にあることを条件に設定する。この条件下でこれらの 4 点を用いて 3 次スプライン補完を利用することで関数を導出する。関数の導出に用いる 4 点の内 2 点はランダムに抽出されるため、複数の関数を導出できる。これらの関数に対して最小二乗法を応用する。3 次スプライン補完で導出した関数と各点との差の二乗の総和が最小となる関数を依存関係に決定する。導出した依存関係及び藤木らが提案した依存関係を図 15 に示す。導出した関数を青線、藤木らの依存関係を透明な太赤線で描画した。予備実験の考察と同様に、母指に適用した藤木らの依存関係の整合性が低いことがこの図からも確認できる。特に CM-MP 関節間の依存関係に関しては関数の差が大きかった。この差は掌の内部に存在する CM 関節が MP 関節に比べて曲がりにくいことから表れ、表 4 に示した全体平均の結果における CM 関節の推定精度が低かった原因と考えられる。

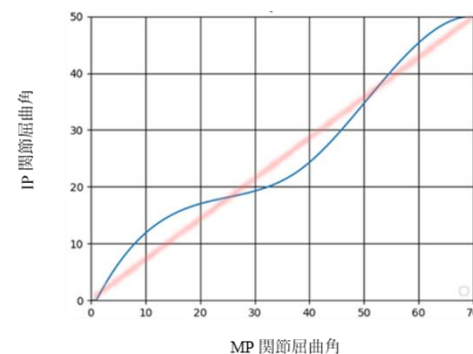
3.3.3 実験及び結果と考察

予備実験にて藤木らの依存関係では母指の屈曲角の推定精度が低く、整合性が低いことを確認した。そこで新たに依存関係を導出した。この依存関係を本システムに適用し、予備実験の方法と同様に再実験した。本実験の全体結果を表 6 に示す。また各関節に対する誤差率の平均を表 7 に示す。予備実験での平均誤差率(表 5)より、再導出した依存関係を用いることで IP, MP, CM 関節においてそれぞれ 1%, 3%, 16% 誤差率が低下したことが確認できた。この依存関係を利用しても MP 関節に関しては誤差率が 20%以上であったが、CM 関節に関しては精度が大幅に向上した。そのため藤木ら[10]の依存関係と比べ、導出した依存関係には CM 関節が動く特性が考慮されていると考えられる。

今後、被験者数を増やし実験を重ねることでこの依存関係の一般性を明らかにすること、また蓄積した屈曲角のデータからより整合性の高い依存関係の導出を目指す。



(a) CM-MP 関節間



(b) MP-IP 関節間

図 15. 導出した母指の依存関係

表 6. 誤差率の全体結果

		thumb_ip	thumb_mp	thumb_cm
A	level1	0%	20%	12%
	level2	0%	21%	13%
	level3	0%	23%	14%
B	level1	4%	7%	4%
	level2	6%	7%	2%
	level3	18%	13%	1%
C	level1	16%	6%	6%
	level2	10%	5%	6%
	level3	19%	6%	3%
D	level1	19%	47%	6%
	level2	9%	49%	5%
	level3	7%	39%	9%
E	level1	36%	20%	28%
	level2	28%	20%	28%
	level3	28%	19%	28%
F	level1	14%	36%	13%
	level2	18%	51%	22%
	level3	4%	49%	23%
G	level1	12%	7%	6%
	level2	8%	7%	4%
	level3	16%	1%	4%
H	level1	42%	39%	27%
	level2	2%	31%	29%
	level3	24%	27%	44%
I	level1	28%	33%	27%
	level2	26%	31%	28%
	level3	28%	33%	29%
J	level1	28%	33%	26%
	level2	20%	31%	28%
	level3	20%	24%	24%

表 7. 誤差率の結果の平均

	thumb_ip	thumb_mp	thumb_cm
Average	16%	25%	17%

4. AR ろくろ回し

本手法の応用に AR ろくろ回しを開発した。掌に装着した魚眼カメラを用いて手指姿勢推定と並行して机上の AR マーカを検出することでマーカ座標系での掌の三次元位置姿勢を推定する。仮想の粘土(以下クレーモデル)をマーカの中心に生成し、推定した手指姿勢を適用したユーザーの手を復元したモデルの衝突をリアルタイムにシミュレーションすることでクレーモデルを変形させる。ユーザーの頭部に HMD と一人称視点用カメラを装着しマーカを検出することでリアルタイムに変形するクレーモデルを視認でき、AR ろくろ回しを体験できる(図 16)。AR ろくろ回しの開発を通して、本手法が AR に適用できることを確認した。



図 16. AR ろくろ回しの様子

5. まとめと今後の展望

本研究では、ユーザーの掌に魚眼カメラを装着し指先を検出することで逆運動学的に手指姿勢を推定する。魚眼カメラを用いて手指領域及び指先を検出し、屈曲角間の依存関係を利用することで逆運動学的に手指姿勢を推定した。依存関係に関しては、藤木ら[10]の先行研究にて提案された依存関係に手指毎の特性、特に母指における CM 関節が動く特性が考慮されていないと考え本研究における手指姿勢システム及びモーションキャプチャを用いた予備実験を行うことで整合性の確認を行った。予備実験の結果から、提案された依存関係は母指以外の手指に関して整合性を確認できたが、やはり母指に関しては整合性が低い結果となった。この結果を受け、母指のみ依存関係を再導出した。この依存関係を用いて予備実験と同様に実験を行ったところ、IP, MP, CM 関節において 1%, 3%, 16% 誤差率が低下したことが確認できた。この依存関係を利用しても MP 関節に関しては誤差率が 20%以上であったが、CM 関節に関しては精度が大幅に向上した。そのため藤木らの依存関係と比べ、導出した依存関係には CM 関節が動く特性が考慮できていると考えられる。今後、被験者数を増やし実験を重ねることで本研究にて導出した依存関係の一般性を明らかにすること、また蓄積した屈曲角のデータからより整合性の高い依存関係の導出を目指す。

本研究では自然な手指の姿勢では各関節の動きが従属的であると考え、依存関係を利用して手指姿勢を推定した。本手法ではユーザーの手指の姿勢を推定できるため、AR や VR に応用すれば実体のない仮想物体への接触を実現でき、

ユーザーの入力手段を拡張できると考えられる。特に AR では自分の手と接触対象の仮想物体の双方を視認できるため直感的な入力手段を実装できる。ここで、物体を把持する際の手指姿勢を考える。手で物体を把持する際、把持する物体の形状によって各関節間の従属性が変化すると考えられる。例えば薄い物体を把持する際、物体の表面に手指を沿わせる持ち方が考えられる。この場合では少なくとも母指の IP 関節、他の手指の DIP, PIP 関節の屈曲角が小さくなり本研究で利用している依存関係を無視する可能性が高い。そのため現段階での本システムを AR や VR に応用し仮想物体を把持できるシステムを開発しても没入感が低いと考えられる。本手法を利用して AR ろくろ回しを開発したが、実際のろくろ回しでも手指姿勢が自然でなく本研究で利用した依存関係に従わない場合が考えられる。そこで、把持する物体の特徴に対する依存関係の研究が考えられる。物体を把持する際の手指姿勢に関しては柏木ら[5]の研究が挙げられる。物体を把持する際の手指姿勢を考慮することで、より没入感のある AR や VR を実装できると考えられる。本手法では適用する依存関係によって推定する手指姿勢が異なるため、把持する物体の種類に対する依存関係を導出できれば、仮想物体に合わせた直感的な把持を実現できると考えられる。

参考文献

- [1] Weichart, F., Bachmann, D., Rudak, B. and Fisseler, D.: Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller, *Sensors*, Vol.13, pp.6380-6393 (2013).
- [2] The Myo team: Welcome to Myo Support, NORTH (online), available from < <https://support.getmyo.com/hc/en-us> > (accessed 2020-02-19).
- [3] Ueda, E., Matsumoto, Y., Imai, M., and Ogasawara, T.: A Hand-Pose Estimation for Vision-Based Human Interfaces, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.50, No.4, pp.676-684 (2003).
- [4] Gentile, V., Sorce, S., and Gentile, A.: Continuous Hand Openness Detection Using a Kinect-Like Device, *CISIS*, pp.553-557 (2014).
- [5] 柏木直諒, 杉浦裕太, 宮田なつき, 多田充徳, 杉本麻樹, 斎藤英雄: 組込み型カメラによる把持動作時の人体手形状 3D 復元, 映像情報メディア学会誌, Vol.71, No.11, pp.J283-J286 (2017).
- [6] MELTA: バーチャルろくろシステム Roquero, MELTA (オンライン), 入手先<<https://roqu.ro>> (参照 2020-02-20).
- [7] Chan, L., Chen, L., Hsieh, C., Liang, R., and Chen, B.: CyclopsRing: Enabling Whole Hand and Context Aware Interactions Through a Fisheye Ring, *Proc. UIST '15*, pp.549-556 (2015).
- [8] Kim, D., Hilliges, O., and Izadi, S.: Digits: freehand 3D interactions anywhere using a wrist-worn gloveless sensor, *Proc. UIST '12*, pp.167-176.
- [9] Sherrah, J. and Gong, S.: Skin Colour Analysis, available from <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/GONG1/cvOnline-skinColourAnalysis.html> (accessed 2020-02-20).
- [10] 藤木隆司, 陣維英, 吉本廣雅, 有田大作, 谷口倫一郎: 手の制約知識を用いた逆運動学解法による実時間三次元手形状推定, 画像の認識・理解シンポジウム, pp.1380-1387 (2005).