



## トレイグジスタンスの研究 (第 93 報)

### —精緻な手指作業を実現するマスタースレーブ計算手法—

井上康之<sup>1)</sup>, 加藤史洋<sup>1)</sup>, 館暉<sup>1)</sup>

1) 東京大学 高齢社会総合研究機構 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, y-inoue@tachilab.org)

**概要:** マスタースレーブ式ロボット操縦システムを用いて人間の細かな手の動きをロボットハンドで再現させるには、操縦者の手指姿勢を正確に計測してその情報をロボットに適切に反映させる必要がある。本研究では 9 軸慣性センサを用いて人の指先位置と方位を推定し、その手指姿勢をロボットに再現させる計算手法を構築した。この手法を用いることで操縦者ごとの手の大きさや形の違いによらずロボットハンドによる精緻な作業が可能になる。

**キーワード:** テレイグジスタンス, マスタースレーブ制御, 運動学

#### 1. はじめに

人間の手は 5 本の指が器用に動くことで様々な作業を遂行することができる。物を指先で掴んだり指全体で包むように把持するといった基本的な動作から、外科手術をする・楽器を演奏するなどの特別な技能に至るまで、人類は器用に動く 5 本の指を使って文明社会を築き上げてきた。しかし、特別な技能に関する器用な人の手の動きはその人にしかできないことが多く、また、それらは暗黙的な身体知である。そのため、専門医や演奏家などの優れた技能はその人の手の届く範囲でしか実現されず、その技能を他者に教えるのにも困難がある。

それに対して、人間の身体の動きを記録してロボットにその動きを再現させるという技術的アプローチが存在する。そのひとつが人間の存在そのものを実質的に遠隔地に伝えるトレイグジスタンス[1]である。人間と同等の運動機能・感覚機能を備えた代理ロボットを通じて、操縦者の身体運動がリアルタイムに別の場所に再現される。トレイグジスタンスが実現すると、人は実際に移動することなく様々な場所で活動できるようになる。しかし、特殊な訓練なしにロボットを自らの身体と同じように自然に動かせるようにするためには、人間の動きを正確にロボットに再現させるマスタースレーブ式ロボット操縦システムが必要である。

トレイグジスタンスを実現するための人型代理ロボット“TELESAR”とその制御システムがこれまで開発されてきた[2][3]。これらのシステムは操縦者の身体の動きを計測し、その動きをロボットに再現させる。人とロボットの身体各部分の位置や姿勢を正確に一致させることで、

Yasuyuki INOUE, Fumihiko KATO and Susumu TACHI

操縦者はあたかもそのロボットの中に入っている、あるいは自分自身がロボットになったような感覚でロボットを操作することができる。これらのシステムは頭や胴体・腕に関する動きは高い精度で再現できているが、手の動きはあまり正確に再現できていない。ロボットハンドの制御について、TELESAR V では操縦者の手に装着した曲げ感知センサグローブを用いた手法が提案されている[4]。この手法では、操縦者が特定的手指姿勢を行っている時の指節の曲げ角を測定し、その情報に基づいて操縦者の手とロボットハンドの対応関係を取ることで手指運動のマスタースレーブ制御を行っている。しかし、この手法は操縦者の指先位置に関する厳密な逆運動学問題を解いておらず、手指姿勢が常に正確に再現されるとは限らない。そのため、操縦者はロボットハンドと実際の手の間にある位置や方向のずれを視覚的に補正する必要があり、指先の身体感覚をうまく使うことができない。

手指運動の厳密なマスタースレーブ制御が困難な理由のひとつは、指の動きを正確に計測するのが難しいためである。モーションキャプチャに代表される光学式センサは指の位置の計測に適するが、自己遮蔽による欠落が生じやすい。一方で、装着型センサグローブは自己遮蔽が起きず安定して指の曲げ角を計測することが可能だが、指の位置は計測できないことが多い。

そこで、本報告では、操縦者の手とロボットハンドを厳密に一致させる運動学的なマスタースレーブ計算手法を提案して、その有効性を検討する。この手法によってロボットハンドの操作が正確に行えるようになることで、単純な手指動作だけでなく専門的な身体技能もロボットハンドを通じて再現できるようになると期待される。



レイグスタンスにおいて重要なことは、操縦者の視点から見た終端部の位置と方向を一致させることである[2][3]。そのため、理想的には5指全ての指先の位置と方向がマスタースレーブ間で一致した状態を作り出すことが望ましい。しかし、人間の指長には個人ごとに異なる一方でロボットハンドの指長は固定である。また、人間の関節可動域に対してロボットハンドの可動域が足りず目標の位置や方向に到達できない状況もありうる。故に、5指全ての位置・方向を同時に厳密に一致させることは難しい。そこで、本手法では以下の3つの点についてマスタースレーブ間で一致させることを考える。

1. 操縦者の視点から見た手首の位置と方向
2. 手のローカル座標系における母指の相対位置
3. 母指に対向する各指までの指間ベクトル

まず、手全体の位置・方向をマスタースレーブ間で一致させる。これによって固有感覚で知覚される操縦者の手とカメラ映像に見えるロボットハンドの空間的な整合性が保たれる。次に、手のローカル座標系の原点(=手首)に対する母指の指先の相対位置を一致させる。これによって操縦者の母指の3次元的な動きがロボットハンドに再現される。最後に、母指の指先から対向する4指の指先までの指間ベクトル(=指どうしの距離と方向)を一致させる。これによって指先を使った物を掴まむ・掴む動作がロボットハンドに再現される。

上記のうち、1の具体的な実現方法は先行研究[3]で述べられているため、ここでは2と3について述べる。まず2について、母指(第I指)に関するロボットハンドの順運動学モデルを記述し、その逆運動学問題を考える。TELESAR VI ロボットハンド第I指の順運動学は以下のように記述される。

$$\begin{aligned} {}^{sl-hand}T_{sl-thmtip} &= {}^{sl-hand}T_{J1} \cdot {}^{J1}T_{J2} \cdot {}^{J2}T_{J3} \cdot {}^{J3}T_{J4} \cdot {}^{J4}T_{J5} \cdot {}^{J5}T_{sl-thmtip} \\ &= \mathbf{Thumb}(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) \end{aligned}$$

ここで、 $\theta_1 \sim \theta_5$ は第I指の各ジョイント角であり、 $\mathbf{Thumb}()$ は同次行列の積で得られる回転9、並進3の合計12式を省略して表現したものである。この中から、第I指の終端位置に対応する並進成分3式を取り出す。

$$\begin{cases} g_x(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) = p_x \\ g_y(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) = p_y \\ g_z(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) = p_z \end{cases}$$

左辺は5つの変数(ジョイント角)からなる非線形関数(詳細は省略)であり、右辺は第I指の終端位置である。これらの式から、任意の終端位置が与えられた時にそれに対応するジョイント角 $\theta_1 \sim \theta_5$ を求める逆運動学問題を解く。求める変数の数に比べて入力の数が多いため、実際に解くには追加の制約条件が必要である。

こうして得られた逆運動学モデルに対して、2.1節の推定手法で得られる操縦者の母指位置 ${}^{ms-thmtip}P$ を目標値として入力することで、ローカル座標系におけるマスタースレーブ間での母指先端位置が一致する。ただし、前述したように人間の指長とロボットハンドの指長は必ずしも

同じとは限らず、 ${}^{ms-thmtip}P$ をそのまま目標値に設定すると、人間の方が指が長い場合はロボットハンドの可動範囲を越えたり、逆に人間の方が短い場合は可動範囲が極端に狭くなるが起こりうる。それを防ぐため、操縦者の手とロボットハンドが初期姿勢にある時の母指位置 ${}^{ms-thmtip}P_{ini}$ と ${}^{sl-thmtip}P_{ini}$ をあらかじめ求めておき、その差分ベクトル $\mathbf{d}_{ini} = {}^{sl-thmtip}P_{ini} - {}^{ms-thmtip}P_{ini}$ だけ母指位置の目標値をオフセットさせることで、指長の個人差によらずロボットハンドの可動範囲が十分に利用できる。

次に、3に関しては紙面の都合から示指(第II指)のみについて述べる。TELESAR VI ロボットハンド第II指の順運動学は以下のように記述される。

$$\begin{aligned} {}^{sl-hand}T_{sl-idxtip} &= {}^{sl-hand}T_{J1} \cdot {}^{J1}T_{J2} \cdot {}^{J2}T_{J3} \cdot {}^{J3}T_{J4} \cdot {}^{J4}T_{sl-idxtip} \\ &= \mathbf{Index}(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \end{aligned}$$

ここで、 $\phi_1 \sim \phi_4$ は第II指の各ジョイント角であり、 $\mathbf{Index}()$ は同次行列の積で得られる12式の省略表現である。この中から、第II指の終端位置に対応する3式を取り出す。

$$\begin{cases} h_x(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) = p_x \\ h_y(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) = p_y \\ h_z(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) = p_z \end{cases}$$

第I指と同様に、これらの式を用いて任意の終端位置に対応するジョイント角 $\phi_1 \sim \phi_4$ を求める逆運動学問題を解き、操縦者の示指位置 ${}^{ms-idxtip}P$ を目標値として入力する。そのとき指間ベクトル $\mathbf{v} = {}^{idxtip}P - {}^{thmtip}P$ がマスタースレーブ間で一致するように示指位置の目標値をオフセットさせる。

上記1~3を適用した結果、手全体の位置と姿勢はマスタースレーブ間で一致するが、指先の位置はオフセット分だけずれるため、カメラ映像から見るロボットハンドの指先位置は操縦者のそれとは厳密には一致しない。しかし、指間ベクトルを一致させているため、操縦者が自らの指を動かしたときの指先どうしの相対的な位置関係は正確にロボットハンドで再現されており、細かな手指作業を行うことが可能である。

### 3. 提案システムの評価

#### 3.1 順運動学モデルによる指先位置の推定精度

提案手法の有効性を調べるため、2.1節の手法を用いた指先位置の推定精度を評価した。9軸慣性センサを備えた装着型センサグローブ(IGS-Cobra Glove)と光学モーションキャプチャ(OptiTrack)を用いて、手指運動を行う間の指先位置とその指姿勢を計測し、計算で得られた指先の推定位置をモーションキャプチャの実測位置と比較した。図3は母指と示指に関する指先位置の運動軌跡である。赤線がモーションキャプチャによる実測値、青線は提案モデルによる推定値を示している。図3から分かるように、推定された指先位置は実測値とほぼ同じであった。次に、指どうしの相対距離と方向が正確に推定できているかを調べた。図4は母指と示指を動かしている間の指間ベクトル $\mathbf{v} = {}^{idxtip}P - {}^{thmtip}P$ の長さ(実測値:赤, 推定値:青)

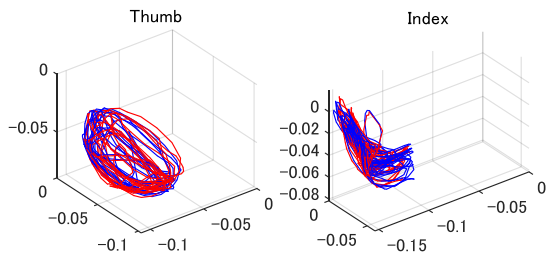


図 3: 順運動学モデルによる指先の推定位置

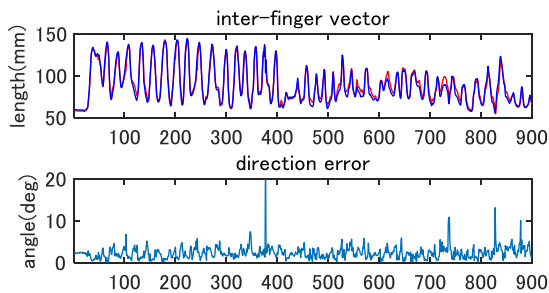


図 4: 指間ベクトルの長さおよび角度誤差

とそのベクトル方向の角度誤差である。図 4 から分かるように、提案モデルは指先間の相対距離と方向をほぼ常に正確に推定できていた。誤差の平均と標準偏差はそれぞれ  $0.9 \pm 3.8$  mm,  $2.4 \pm 1.6$  deg であった。

### 3.2 逆運動学モデルによる目標位置への到達精度

3.1 節で得られた指先の推定位置を用いてロボットハンドの逆運動学計算を行い、目標値に対する到達精度を確認した。図 5 は母指/示指に関する操縦者の指先の入力位置（青）に対するロボットハンドの出力位置（紫）である。

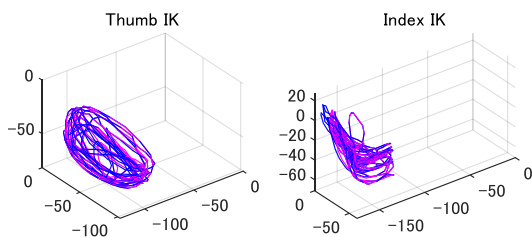


図 5: 逆運動学モデルによるロボットハンドの指先位置

図 5 から分かるように、逆運動学で求められたロボットハンド各指先の先端位置は操縦者の指先位置とほぼ正確に一致していた。一部の姿勢においては入力と出力の間に若干の位置ずれがあったが、これは目標となる指先位置がロボットハンドの可動範囲を超えているなど逆運動学の解が得られない場合に生じており、目標が可動範囲内にある場合は常に正確にロボットハンド先端が目標まで到達していた。

## 4. まとめ

本報告では、ロボットハンドによる精緻な手指運動を実

現するためのマスタースレーブ計算手法を提案した。操縦者側の手指姿勢の推定には 9 軸慣性センサとモーションキャプチャを併用した順運動学モデリングを行い、そのモデルで推定した操縦者の指先位置に基づいてロボットハンドのジョイント角を逆運動学で求めることで、マスタースレーブ間での指先位置を正確に一致させることに成功した。この手法を用いることで、テレグジスタンスロボットの操縦者は自らの手指運動をロボットハンドを使って正確に再現させることができるようになる。

今後の課題は、順運動学モデリングにおけるリンク長推定プロセスの簡便化と、逆運動学計算における指先姿勢の利用である。前者は、現在の手法は個人ごとに異なる各指のリンク長を得るために、指ごとにモーションキャプチャの計測マーカーを取り付けて初期計測を行う必要がある（所要時間 5~10 分）。これに対して、2D:4D 比などの解剖学的制約を利用すれば、より短時間で高精度なリンク長推定が可能になると予想される。後者は、現在の逆運動学計算は指先の終端位置だけをマスタースレーブ間で一致させる形式になっているが、これに指先の方向も一致させるよう逆運動学問題を定式化すれば、指先で物を挟む動作だけでなく、指の腹で物を押す動作や爪で弾くなどのさらに細かな手指運動も再現できると期待される。

謝辞 本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (ACCEL) 「触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開」の支援によって行われた。

## 参考文献

- [1] S. Tachi, *Telexistence* (2nd Edition). World Scientific, 2015.
- [2] C. L. Fernando, M. Furukawa, T. Kurogi, S. Kamuro, K. Sato, K. Minamizawa and S. Tachi, "Design of TELESAR V for Transferring Bodily Consciousness in Telexistence", 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5112 – 5118, 2012.
- [3] 井上康之, M. Y. Saraiji, C. L. Fernando, 加藤史洋, 山崎喬輔, 田島優輝, 館暲: テレグジスタンスの研究 (第 89 報) —テレグジスタンスのためのロボットシミュレーションシステム—, 日本バーチャルリアリティ学会第 22 回大会論文集, 2017.
- [4] C. L. Fernando, M. Furukawa, K. Minamizawa, S. Tachi, "Experiencing ones own Hand in Telexistence Manipulation with a 15 DOF Anthropomorphic Robot Hand and a Flexible Master Glove", Proceedings of the 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), pp.20 – 27, 2013.