

タンゴルトポロジーを用いたロボットハンドによる 人間の持ち替え動作の模倣

佐藤啓宏 (東京大学) ビナヤウエキンポンタリン (東京大学)

○工藤俊亮 (電気通信大学) 池内克史 (東京大学)

1. はじめに

人間の器用な操りを再現できるロボットハンドの実現に期待が集まっている。災害現場などへ人間の代わりにヒューマノイドロボットを派遣して遠隔操縦によって作業を行わせたいと考えたとき、人間用に設計された道具を人間と同じように扱える能力をロボットハンドが備えることが望まれる。従来、ロボットハンドの動作計画は解析幾何学に基づくもの[1]が主流であったが、予め設計された動作パターンに制限されて自然な動作を失ったり、ハンドと操作対象の物体との接触位置を維持することに拘束されて自然な操りを行えないなどの課題があった。とくに持ち替え動作においてその傾向が著しく見られた。その一因として、指先での操りのような自然で流れるような動作が、従来の解析では記述困難であったためだと考えられる。そこで、本研究では、ハンドによる物体操作に関する位相幾何学に基づく解析と記述法を提案する。

2. 関連研究

人の手の動きをロボットハンドにマッピングする方法として、(a) マスタースレーブ装置を用いたテレオペレーション形式[2]、(b) 自動プログラミング形式[3]、(c) 観察学習形式[4]などが提案されてきた。本来、人の手とロボットハンドは自由度や形状が異なることが、操り動作のマッピングを難しくしている要因である。特に(a)では幾何形状の異なる物同士を1対1で対応付けようとする点、(b)では操作者の望む動作の生成を保障すること、(c)では動作理解のためのモデル設計、に難しさがあった。

ロボットは人間の明確な意図に基づいて操縦できることが望ましい。そこで本研究では、タスクモデル解析による(c)のアプローチを用いる(図1)。タスクモデ

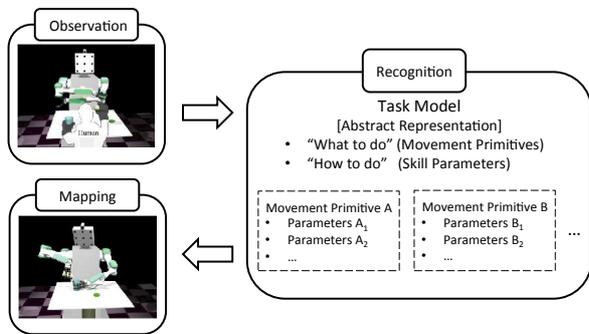


図1 タスクモデルによる観察学習パラダイム

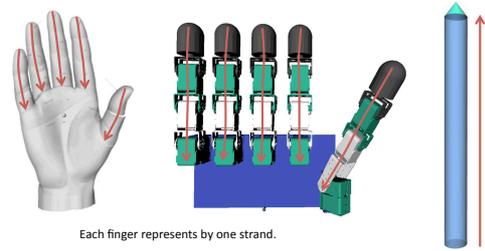


図2 開曲線のハンドへの配置例

ルは、一つの動作を「何をしているか(タスク)」「どのようにしているか(スキル)」に抽象化して記述するものであり、タスクは動作意図を表し、スキルはその動作をロボットが実行するために最低限必要なパラメータセットである。動作を一度、抽象度の高い記述に置き換えることで、想定されたタスク領域内では、人間とロボットの違いを吸収して上手く動作の再構成を行うことができる。

このような枠組みに、トポロジー空間における表現を適用して操り動作を記述する方法を考えていく。教示動作の単純な再生だけでなく状況に応じて動作の組み換えを行いたい場合、動作を表す数値データを人間が理解可能なレベルまで記述の抽象度を上げる必要がある。そこで本研究では、持ち替え動作の模倣を、

1. セグメンテーション
2. 認識
3. マッピング

の段階で行う。

3. トポロジー空間におけるハンドと物体の 静的な関係の表現

ハンドの各指と操作対象の物体の骨格を、それぞれ1本のひもに見立て、2本のひもの絡まり具合の変化によって操りの状態遷移を記述したい。本論では、ペンの持ち替え動作について解析していく。

3.1 ハンドへのひもの配置

ハンドにおけるひもの配置を図2のように各指ごとに定義する。また、ペンを操作対象とし一本のひもと見なす。ただし、必ずしもこのような配置でなければならない訳ではない。親指-人差し指を繋ぐように定義してもよく、絡まり具合を大きな値で表現できる利点がある。どのようにひもを表す開曲線を定義すると良いかについては、別途議論が必要である。

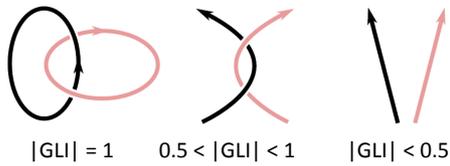


図 3. いくつかの絡まり状態と GLI の例

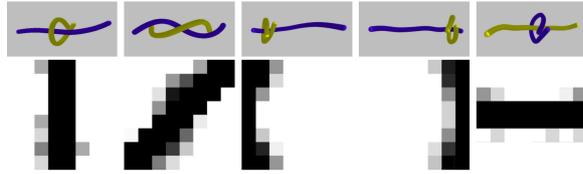


図 4. Write 行列の例

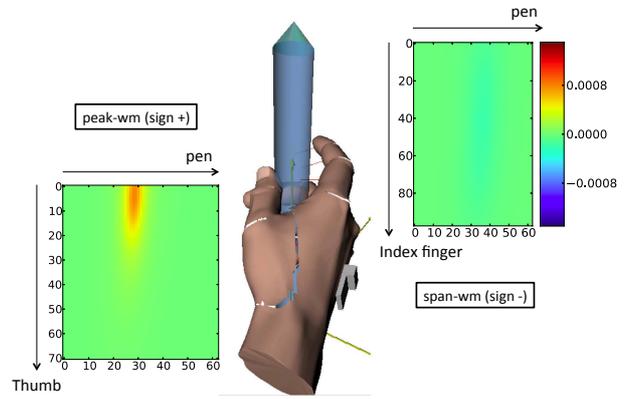


図 5 ハンドにおける Writhe 行列の例.

3.2 Gauss Linking Integral(GLI)

位相幾何学分野において、19 世紀すでに数学者ガウスが 2 つの開曲線の絡まりを表す方程式を提案しており、Gauss Linking Integral として知られている。GLI は式 (1) で表され、全方向から見た 2 つの曲線 γ_1 と γ_2 の平均交差数を表しており writhe と呼称される。

$$GLI(\gamma_1, \gamma_2) = \frac{1}{4\pi} \int_{\gamma_1} \int_{\gamma_2} \frac{d\gamma_1 \times d\gamma_2 \cdot (\gamma_1 - \gamma_2)}{\|\gamma_1 - \gamma_2\|^3}. \quad (1)$$

近年、DNA の染色体の 2 本のらせん構造の絡まりを解析するために、2 本の開曲線への応用方法が提案されており [5]、曲線を細かい線分の連なりとして離散的に近似することによって、GLI を効率的に計算する方法が示されている。

3.3 Writhe 行列

トポロジー座標での 2 曲線間の関係を表すために、文献 [5] では曲線を構成する各線分間の writhe を合計することで GLI を求めていたが、各 writhe を合計するのではなく行列の形で表現することの有効性が文献 [6] で提案され (図 3,4 文献 [6] より引用)、CG の分野での応用として 2 人の組み合う動作のアニメーション生成のために使われている。この行列を Writhe 行列と呼ぶ。本研究でも writhe 行列をもとに指と物体の関係を記述する。ただし、文献 [6] では writhe 行列の特性を writhe, center, density という指標によって捉えていたのに対し、本研究では後述のように peak, span という指標を新たに考案し用いている。

3.4 ハンドにおける Writhe 行列の実例

ハンドでペンを握った時の実例を図 5 にあげ、検討する。握りこむ深さによって Writhe の値は変化し、ペんに接触し深く絡まる親指では writhe 行列の上部にピークが見られ、離れていてあまり絡まない人差し指では、列をまたがるような薄い Writhe の変化が見られる。このような Writhe 行列上で握りの状態を表す 2 つの特性を、peak と span として定義することにする。peak では Writhe の分散 σ_x が小さく GLI w は大きな値を示し、span では分散が大きく GLI は小さな値を示す。

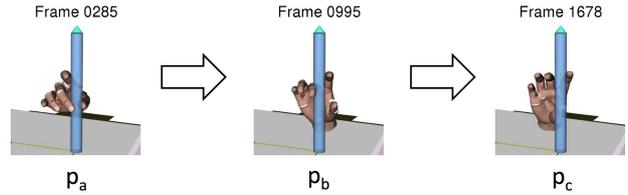


図 6. ハンドによるペンの持ち替え動作例

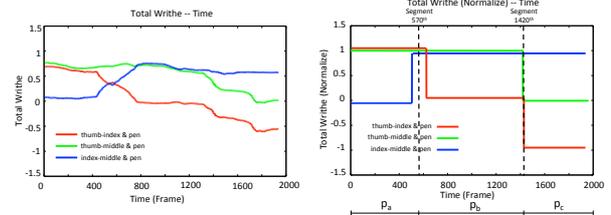


図 7. Writhe の総和による位置関係変化の切り出し

4. 持ち替え動作の解析と記述

4.1 時間軸のセグメンテーション

図 6 に持ち替え動作の例を示す。まず GLI の時間変化によるセグメンテーションを検討する。図 7 (左) に動作シーケンスにおける各指の Writhe の総和の遷移を表し、(右) にセグメンテーション結果を示す。例では、閾値を ± 0.5 に置いている。この表現では、各指と物体の位置関係の変化が分かりやすい。

つぎに持ち替え動作中の Writhe 行列を peak と span の表現で扱うために、図 8 のように $\sigma_x/|w|$ の時間変化として観察する。この表現では、一点の近接状態が起こると非常に大きな値を示すため、接触状態の変化を切り出すことができる。接触状態の ON/OFF の切り出しのみならず、 $\sigma_x/|w|$ の値をアナログ値として扱えば接触・離脱のアプローチの時間変化も捉えることができる。

4.2 持ち替え動作の認識

操り動作を抽象度の高い記述とするために、運指を文脈で表せるようにしたい。検討のために、3 本指でペンを持ち替える動作における全パターンを数え上げ整理して図 9 に示す。

トポロジー座標での識別を理解しやすくするために、

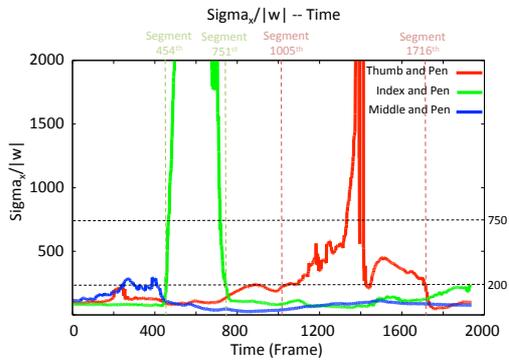


図 8. peak-span による接触状態変化の切り出し

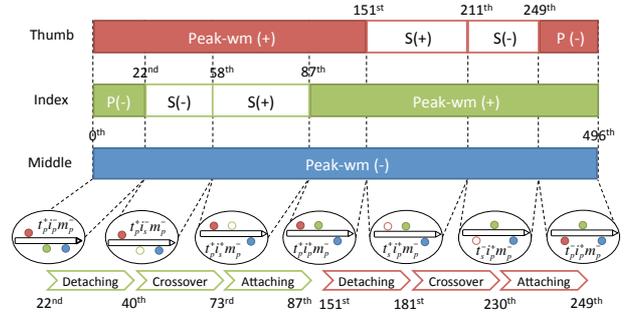
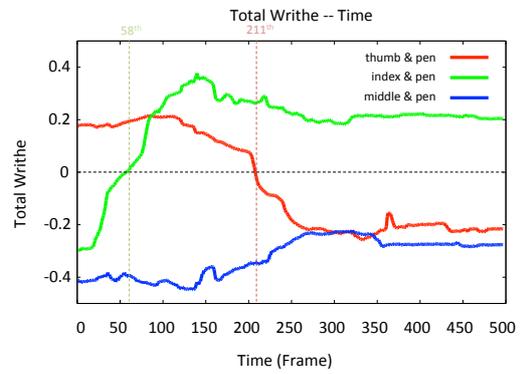


図 10 認識結果の例

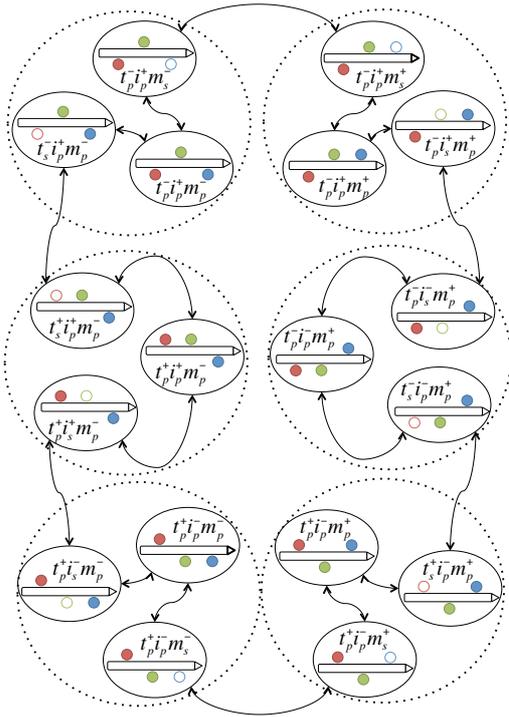


図 9 ペン状物体の 3 指での持ち替えにおける状態遷移

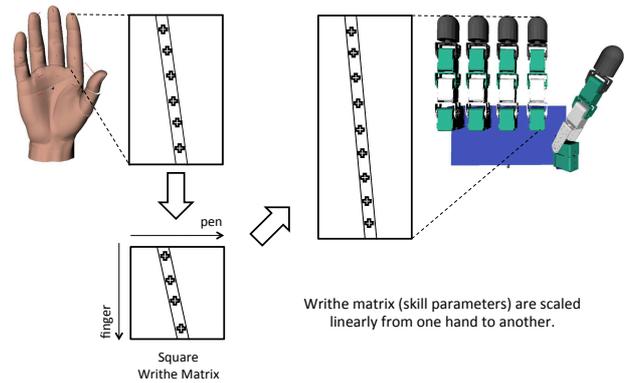


図 11 異なる指の長さへの Writhe 行列のマッピング

次のようにパラメータ表記を定義する。

- F_T^S : T 型の符号 S を持つ指 F の Writhe 行列
 - $F \in \{t, i, m\}$: 親指, 人差し指, 中指の別
 - $T \in \{p, s\}$: Peak または Span
 - $S \in \{+, -\}$: Writhe 行列の符号+または-
- $t_p^+ i_p^+ m_p^- = m_p^- t_p^+ i_p^+$: 順序による違いはない

このように整理したうえで、遷移を観察すると次のパターンに類別できる。

1. **Detaching** 物体から指が離れる動作。Writhe 行列は peak から span へ変化し、符号は変わらない。
2. **Attaching** 指が物体に接触する動作。Writhe 行列は span から peak へ変化し、符号は変わらない。
3. **Crossover** 指が物体をまたぐ動作。Writhe 行列は span から span へ変化し、符号が変化する。

ペンの持ち替えにおいては、ロボットの動作を上記 3 種類で記述することができる。図 10 にペンの持ち替え

動作における認識結果の例を示す。各時間セグメント毎に行われている動作の識別が来ている。

4.3 マッピング

認識された動作要素をロボットハンドにマッピングするための処理の流れを図 12 に示す。まず、教示における開始と終了の姿勢のトポロジー表現をスキルパラメータとして取得する。

スケールを整えるためにリサンプリングを行う。人間とロボットの指の長さの違いを吸収するために、図 11 のように Writhe 行列上で一度正規化してからリサンプリングを行う。

つぎに、2 つの Writhe 行列の時間補間を行う。この補間を、単純な要素ごとの線型補間ではなく、 $p \rightarrow p \cdot p \rightarrow s \cdot s \rightarrow s$ ごとにアルゴリズムを設計した点に本研究の工夫があり、詳細は文献 [8] に記した。

ロボットの動作は、補間された Writhe 行列間で逆運動学を解いて生成される。トポロジー空間での逆運動

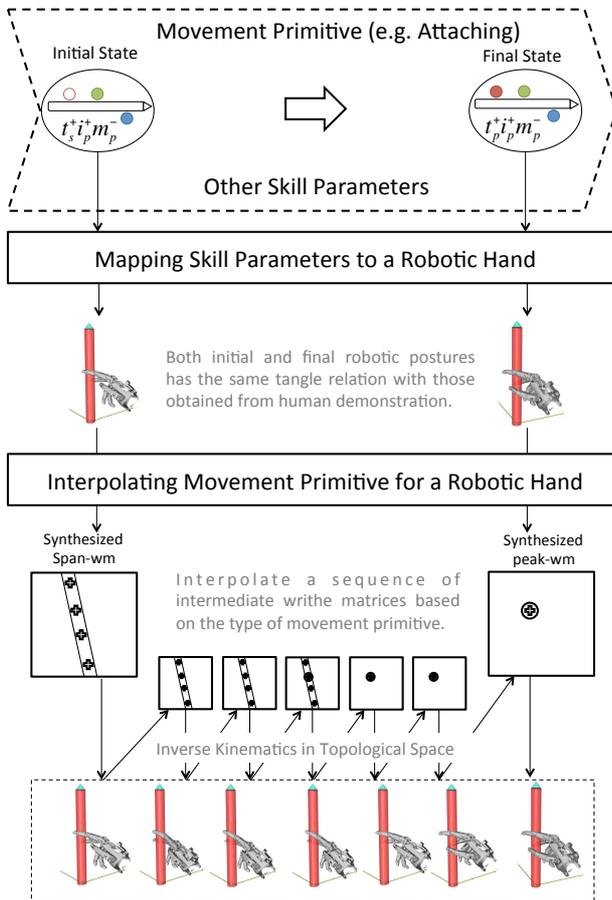


図 12 ロボットハンドにマッピングするための処理の流れ

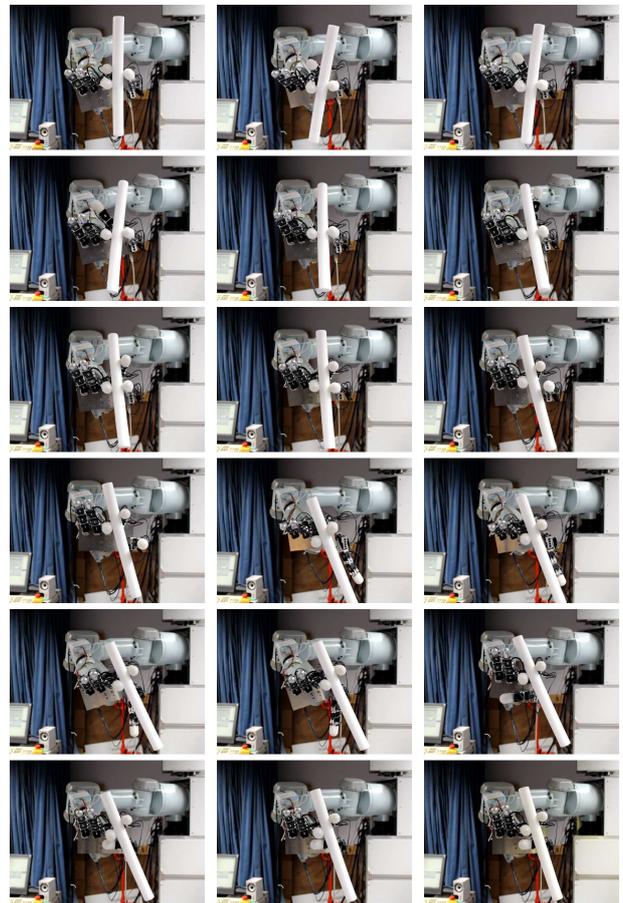


図 13 人の教示に基づくペンの持ち替え動作のロボットによる再現の実行例

学解法は、文献 [7] で議論されている。

5. 実験

図 13 に人の教示に基づくペンの持ち替え動作のロボットによる再現の実行例を示す。ロボットの指は各関節がサーボモータで構成されており、一指 4 自由度である。4.3 節での逆運動学計算を基に順次ロボットの動作が実行され、3 指による持ち替え動作を実行できた。現時点ではロボットの動作は静的に生成されており、力や視覚のフィードバックは行われていないため今後の課題である。

6. まとめ

本論では、ハンドによる物体の操り動作をトポロジー空間でのパラメータ表現によって記述可能であることを示し、抽象度の高い動作理解への親和性が高いことを示した。ペンの持ち替え動作を対象に、動作解析の実例とロボットによる再現が可能であることを示した。しかし、棒状の対象に限っての解析になっている。一般の 3 次元物体への理論の汎化が今後の課題である。トポロジー表現を用いた操り記述の適用範囲はもっと広いと信じる。

謝辞

本研究は、科研費 24240034 のサポートを受けて実施された。

参考文献

- [1] W.B.Griffin, R.P.Findley, M.L.Turner, M.R.Cutkosky: "Calibration and Mapping of a Human Hand for Dexterous Telemanipulation," ASME IMECE, 2000.
- [2] S.Bann, M.Khan, J.Hernandez, Y.Munz, K.Moorthy, V.Datta, T.Rockall, A.Darzi: "Robotics in surgery," Journal of the American College of Surgeons, vol.196, no.5, pp.784-795, 2003.
- [3] J.P.Saut, A.Sahbani, S.El-Khoury, V.Perdereau: "Dexterous manipulation planning using probabilistic roadmaps in continuous grasp subspaces", IROS, pp.2907-2912, 2007.
- [4] S.B.Kang, K.Ikeuchi: "Toward automatic robot instruction from perception-recognizing a grasp from observation," Tran. on Robotics and Automation, vol.9, no.4, pp.432-443, 1993.
- [5] K.Klenin, J.Langowski: "Computation of Writhe in Modeling of Supercoiled DNA," Biopolymers, vol.54, pp.307-317, 2000.
- [6] E.S.L. Ho, T.Komura: "Indexing and Re-trieving Motions of Characters in Close Contact," Trans. on Visualization and Computer Graphics, vol.15, pp.481-492, 2009.
- [7] E.S.L. Ho, T.Komura: "Character motion synthesis by topology coordinates," Eurographics, vol.28, no.2, 2009.
- [8] P.Vinayavekhin, S.Kudoh, J.Takamatsu, Y.Sato, K.Ikeuchi: "Representation and Mapping of Dexterous Manipulation through Task Primitives," ICRA, pp.3722-3729, 2013.