解説

テレロボティクスと教示

Telerobotics and Robot Teaching

横小路 泰 義* *神戸大学大学院工学研究科

Yasuyoshi Yokokohji* *Graduate School of Engineering, Kobe University

1. はじめに

ロボットの遠隔操作は極限環境等の人間が直接作業できない環境下での一過性の作業に適しており、ロボットの教示は産業用ロボットの教示に代表されるように、繰り返し行う動作を生成するために行われる。このように一見まったく関係のないように見える遠隔操作と教示が実は深い関係にある。そもそもロボットの機能が人に変わって作業を遂行することであるならば、人間はロボットに何らかの作業指令を与える必要があり、ロボットには人間からの作業指令を（レベルの違いこそあれ）受け付ける機能を有していなければならない。教示する人間にとってみれば自身が作業する場合を思い浮かべて直観的に教示できるほうが望ましい（図1）。

その意味で遠隔操縦ロボットは、人間からの運動レベルでの作業指令を受け付け、同時にその指令をロボットが即座に実現することで作業を遂行していると考えることができる。また産業用ロボットの教示再生方式は、デボルの特許から50年の間、基本的に何ら変わることはない普遍的な基本原理であるといえるが、これは実際の作業環境で教示するがゆえの直観性と「現物合わせ」による正確性を兼ね備えた方法であるためであり、ティーチングペンダントを用いた作業教示は見方によっては「産業用ロボットの遠隔操作による教示」とみなしてもよいように思う。

このように、遠隔操作と教示とは運動レベルでのロボットへの教示という観点で、実は密接な関係にあることがお分かりになるであろう。

遠隔操縦による教示（例えば文献[1][2]）を以下では遠隔教示と呼ぶことにするが、遠隔教示以外にもロボットを直接操作する直接教示（ダイレクトティーチング）という方法もあり、人間がロボットを介さず直接作業を行った際の動作を記録して教示データとする「実演教示」（例えば

文献[3][4]）もある[†]。教示の直観性という面では実演教示に勝るものはないが、人間が本来取得できる感覚情報をフルに使って実演した動作が、通常人間よりは得られる感覚情報の乏しいロボットにとっても果たして適当な動作であるかは保証の限りではない。直接教示や遠隔教示では、ロボットを介しての作業となるため、おのずとロボットの身体性に合わせた教示動作となる。特に遠隔教示では教示動作を再生するための情報はすべて取得できているため、教示動作の作業遂行十分性が保障される。以下では、筆者らの直接教示、遠隔教示に関する研究例を紹介し、これらの可能性について考えてみたい。

2. 直接教示データの統計的性質からのフィードバック則の抽出

2.1 折り紙ロボットの例

筆者らは折り紙ロボットの教示方法として直接教示法を採用し、直接教示データの統計的性質から環境変動に適應するようなフィードバック則の抽出を行う手法を提案している[5]。図2に教示と再生の様子を示す。

従来の直接教示と筆者らのアプローチの大きな違いは、

図1 作業教示と作業遂行

(a) 教示

(b) 再生

図2 折り紙ロボットの直接教示

原 2012年6月1日

キーワード: Teleoperation, Robot Teaching, Skill Transfer, Robustness Against Environmental Variation

*〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1

*Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo

[†]直接教示や遠隔教示もある意味実演による教示なので、この呼称はやや曖昧ではある。

図3 折り紙操作の教示軌道とフィードバック則の抽出

図4 相関の度合いによるフィードバック則への重みづけの変更

教示を複数回行わせ、その教示データの統計的性質を積極的に利用する点である。図3(a)に教示されたロボット先端の軌道を示すが、教示された軌道は試行ごとに揺らいでおり、この揺らぎには環境変動に応じた軌道の変化によるものと、単なる人間動作の揺らぎの両方が含まれている。

図3(b)にフィードバック則の抽出原理を示す。ここでは、ロボットの軌道を速度の次元で与えるものとし、ロボットの指先の力センサによって折り紙からの反力を三次元ベクトルで検出できるものとする。このとき図3(b)のように、教示軌道の平均からの変動と、同じく教示時に計測した力の平均からの変動とに強い相関があれば、人間は教示時に無意識的に折り紙の変形度の変化に応じて、教示軌道を変化させていることを意味し、ある力計測値の平均からの変動 $f(t)$ が与えられたときに、教示データが最もとりうる速度変化分は、与えた $f(t)$ に対する速度変動の周辺分布の最尤値であり、力の分散行列、速度と力の共分散行列から計算することができ、図中の傾きがフィードバックゲインに相当する。

ただし、このような周辺分布の最尤値は、図4に示すように、両者の間の相関が強い場合はあまり意味のあるものではないので、両者の間の正準相関値に応じて対応する方向ごとに抽出されたフィードバック則の重みを変化させるようにしている。

複数の教示データの統計的性質を利用するという点では、同じく Khansari-Zadehrdら [6] の研究があるが、彼らは

[†]例えば、ノミナルな目標軌道の良否がロバスト性にどう影響するか、ノミナル軌道が適切であれば環境変動適応則を単純化できるのか、など。

^{††}ここでの「軌道」は、ノミナル軌道だけでなく手先コンプライアンスなどの環境変動適応則を含めたものを意味する。

あくまで初期位置を含むロボットの状態の違いによって揺らぎが生じるようなノミナル軌道の生成に焦点を当てており、教示データから環境変動に適応したフィードバック則を抽出しようとする観点はない。

2.2 直接教示の重要性と課題

提案手法のポイントは、タスクの成否の鍵となる環境変動要因を検出するセンサを適切な場所に配置することと、実際の作業環境においてロボットの身体性に合わせて人間が教示することである。センサは教示する人間が用いるモダリティと同じである必要はなく、必要な環境変動要因が検出できれば異なったモダリティでも構わない。実際、折り紙作業の教示時に人間は視覚で紙の変形を認識しているが、ロボットは指先の力センサでそれを（指先接触点のローカルな情報のみではあるが）認識している。また後者のポイントは、人間教示者がロボットに歩み寄る必要があることを意味し、教示者にある程度の慣れと負担を強いることになる。この問題を解決するには、直接教示を念頭に置いた教示のしやすいロボットの設計をすることが必要となり、筆者らは現在そのような折り紙ロボットの設計製作を進めている。

3. 遠隔教示軌道のロバスト性の検討

3.1 ロボット軌道のパラメータ空間表現

前章では、人間の持つ暗黙知的な作業スキルを直接教示データの統計的性質に着目して抽出する手法を紹介した。そもそも人間の作業スキルに着目するのは、それが環境変動に対してロバストであるからであり、どのような教示手法であれ最終的に環境変動にロバストな動作が得られればよい。つまり、直接教示であれ遠隔教示であれ、それらはあくまでロバストな動作をロボットに与えるための手法に過ぎない。

筆者らは、作業スキルを「適切なノミナル軌道+適切な環境変動適応則」ととらえているが、両者とロバスト性との関係についてはまだ明らかになっていない点が多い[†]。そこでそもそもロボット軌道の環境変動に対するロバスト性を決定している条件とは何かを明らかにしようと考えた。ロボット軌道の環境変動に対するロバスト性を検討するには、まずロボット軌道^{††}を何らかの形でパラメータ表現する必要があるが、そのようなパラメータ表現が可能であれば、与えられたあるロボット軌道はこのパラメータ空間の1点で表現され、ロバスト性の条件とは、図5に示すようにこちらで与えるロバスト性の評価指標の目標値を上回る軌道のパラメータ空間内の集合に属するか否かの条件となる。

3.2 剛体ペグ挿入作業のロバスト性評価

筆者らはこの方針に基づき、組み立て作業の典型例である剛体ペグ挿入作業に注目し、ペグ挿入作業を行うロボット軌道の穴位置の変動に対するロバスト性の条件を明らか

図5 ロボット軌道のパラメータ空間表現

図6 剛体ペグ挿入作業の様々な軌道

にしようと試みた [7] [8]. ロボット軌道は、厳密には三次元空間内での位置と姿勢の時系列情報を含み、そのままではとてもパラメータ空間として扱えるものではない. そこで筆者らは、接触状態遷移をロボット軌道のパラメータの一つととらえ、これにより軌道のパラメータ空間を大きく圧縮することとした. ただし、同じ接触状態遷移となる軌道をすべて同じと扱うのは明らかに空間表現としては荒すぎるので、ペグの傾き角もパラメータの一つとしている. その他の軌道のパラメータとしては、軌道再生時のロボットの先端のコンプライアンス（位置制御のゲインに相当）を取っている.

図6は剛体ペグ挿入作業の様々な軌道を接触状態遷移図で表現したものである. 筆者らはまず、位置制御ベースの産業用ロボットに教示する軌道の典型である Path 0 と、人間が教示する場合に取るであろう軌道として Path 1 を取り上げ、穴位置のズレに対するロバスト性を実験的に比較した. Path 0 は、産業用ロボットの教示と同様にペグを挿入させた状態での関節角度から手先の位置姿勢を計算で求め、その位置までの挿入軌道は数値的に求めた. Path 1 は、バイラテラル制御されたマスタ・スレーブシステムにより人間が遠隔教示した. 結果は予想通り、Path 1 の方がペグ穴の位置変動に対してロバストであることが確認できた [7].

次に、Path 1 よりロバストであることが実験的に明らかになった Path 3 に対し、ペグの傾き角と手先コンプライ

図7 剛体ペグ挿入の接触状態時間変化図

アンスを変化させたときのロバスト性を実験的に検討するとともに、タスクの成功・失敗を決定づける接触状態遷移の分岐条件を理論的に明らかにしようと試みた. その際に役立ったのが、図7に示す接触状態時間変化図である. これは従来の接触状態遷移図とは違い、まず教示時のノミナル軌道の接触状態遷移を時系列的に表し、次に環境変動によって生じる異なった接触状態遷移を同じく時系列的に表現したものである. これにより、どの時点でどのような分岐が生じるのかが把握しやすくなる.

筆者らは、接触状態時間変化図での分岐条件が (i) 接触維持条件, (ii) すべり条件, (iii) ペグ挿入完了条件の三つに分けられることを見出し、準静的なつり合い条件のもとで導出したこれらの条件に基づいてタスクの成否を数値的に予測し、その予測結果と実験結果がおおむね一致することを確認めた [8]. これは、実際に実験を行わなくても与えられた軌道のロバスト性が計算により評価できることを意味し、パラメータ空間をくまなく探索すれば、図5に示したように、要求するロバスト性条件を満たす軌道を見出すことが可能になる. 実際、Path 3 の軌道の中では、人間による教示では思いつかないような大きなペグの傾き角を与えた軌道のほうがロバスト性が高くなることが分かっており、人による教示が必ずしも最適な教示方法ではないことを意味するので興味深い†.

ここで紹介したペグ挿入作業程度であれば、遠隔教示者はあらかじめ決められた接触状態遷移に沿って教示動作を行うことは比較的容易であるが、複雑な組み立て作業では、前節の動作レベルでの揺らぎと同じく、接触状態遷移そのものが揺らぐ可能性がある [9]. 文献 [9] では、教示された様々な接触状態遷移の中から望ましい接触状態遷移を決める手法を提案しているが、このような実演時の状態遷移の揺らぎの情報も作業スキルとして有効に活用することも考えられる.

また筆者らは、上記の剛体ペグ挿入作業で得られた知見が、作業としてはより複雑になる柔軟部品のペグ挿入作業の場合にどうなるかも現在検討中である.

†ただし、これは手先コンプライアンスが作業を通して一定とした場合のみに適用し、時変コンプライアンスまで軌道の範囲を広げると探索は難しくなるであろう.

4. お わ り に

本稿では限られた誌面の中で、直接教示や遠隔教示といったロボットを操作しながら作業を教示する方法について、筆者らの研究例を中心に紹介した。遠隔教示そのものの話題からは多少それてしまった感があるが、強調したいのは最終目的はあくまで環境変動に対してロバストな軌道を生成することであり、直接教示や遠隔教示はそのための手法に過ぎないという点である。直接教示や遠隔教示で抽出できたフィードバック則も、それがなぜロバストなのかを解析することで、スキルの再利用性[2]にもつながるのではないかと考える。また遠隔教示では教示者に提示する情報をある程度コントロールできるので、ロバスト性の理論的解明結果に基づいて、教示者に対してよりロバストな軌道となるように何らかのガイダンス機能を付与することなどが将来課題として考えられる。

最後になるが、本稿で紹介した研究内容は、筆者の所属する研究室の学生諸君および当該研究課題の共同研究者諸氏との協力によるものであることをここに記し感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] 尹, 末廣, 音田, 北垣: “バイラテラル遠隔操作を利用したタスクスキルトランスファー手法”, 日本ロボット学会誌, vol.25, no.1, pp.155-165, 2007.
- [2] 清水, 尹, 音田: “再現性の高いロボット作業技能の構築法”, 日本機

械学会論文集 (C 編), vol.75, no.760, pp.171-178, 2009.

- [3] 國吉, 井上, 稲葉: “人間が実演して見せる作業の実時間視覚認識とそのロボット教示への応用”, 日本ロボット学会誌, vol.9, no.3, pp.295-303, 1991.
- [4] 池内, 末広: “視覚による組立作業理解のための作業モデルとそれに基づく動作生成”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.2, pp.281-290, 1993.
- [5] 田中, 木原, 横小路: “人間の直接教示動作の統計的性質に基づいた折り紙ロボットの目標軌道とセンサフィードバック則生成法”, 日本ロボット学会誌, vol.27, no.6, pp.685-695, 2009.
- [6] S.M. Khansari-Zadeh and A. Billard: “Learning Stable Nonlinear Dynamical Systems with Gaussian Mixture Models,” IEEE Trans. on Robotics, vol.27, no.5, pp.943-957, 2011.
- [7] 鈴木, 木原, 菅野, 横小路, 津坂, 札幌, 佐藤: “ロボット軌道のパラメータ空間表現によるロバスト性条件の考察と直接教示法の有効性の検討”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2011.
- [8] 鈴木, 木原, 菅野, 横小路, 津坂, 札幌, 佐藤: “直接教示されるロボット軌道のパラメータ空間表現によるロバスト性条件の導出”, 第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 2011.
- [9] J.R. Chen: “Constructing Task-Level Assembly Strategies in Robot Programming by Demonstration,” Int. J. of Robotics Research, vol.24, no.12, pp.1073-1085, 2005.

横小路泰義 (Yasuyoshi Yokokohji)

1988 年京都大学大学院博士課程中途退学。同年に京都大学工学部オートメーション研究施設助手。1992 年機械工学教室助教授, 2007 年機械理工学専攻准教授を経て 2009 年より神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻教授。博士 (工学)。遠隔操縦システム, ハプティックインタフェース, ロボットハンド等の研究に従事。システム制御情報学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)