

# 学習者の動特性を考慮した見まねによる動作獲得

## Learning by Watching with Consideration of Dynamics of Learner

学 田熊 隆史 (阪大) 正 細田 耕 (阪大, 阪大 FRC)  
正 浅田 稔 (阪大, 阪大 FRC)

Takashi TAKUMA, Osaka University, 2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka  
Koh HOSODA, Osaka University, HANDAI Frontier Research Center  
Minoru ASADA, Osaka University, HANDAI Frontier Research Center

In this paper, the definition of imitation is proposed. One of the principal effect of imitation is that learner can acquire dynamical information of teacher, e.g. his torque pattern, by following kinematic information, e.g. his trajectory of motion watched by learner. Therefore it is important to choose the proper control law considering dynamics of robot as learner although dynamics of robot is not referred in many research on imitation. In order to estimate teachers dynamics information, robot should have self model to follow teacher's motion. Therefore definition of imitation should be considered dynamics of learner.

**Key Words:** learning by watching, estimation of dynamics, adaptive control

### 1 はじめに

近年、ヒューマノイドに見られるような多関節を持ち複雑な動作が可能でロボットが多く開発されている。このようなロボットの動作を教示するためには、教示者である人間が対象のロボットのモデルを理解して軌道を設計する方法が一般的である。こういった手法は工場で見られるロボットのように少ない関節で単純な動作を生成する場合は有効である。しかし多くの関節を持つロボットに複雑な動作を教示する場合、こういった手法では教示者がモデルを把握できなくなり、教示することが難しくなる。

こういった問題に対して教示者の動作を観測し、実行する見まねによる模倣 (learning by watching) は有効である<sup>1)</sup>。宮本ら<sup>2)</sup>は観測された教示者の動作軌道を数個の経由点で表現し、この経由点を変更することによって学習者であるロボットは教示者と同じ作業を実現することができた。

一方で模倣の重要な機能として、呈示された教示者の動作を学習者自身が実行することによって動作の「コツ」を取得することがある。これは例えば技能の伝承のように、教示者自身が自己の行動を明文化できない場合に有効な手法であり、学習者は運動学レベルの軌道を追従することによって、力の入れ具合など動力学レベルの情報を得ることができる。また教示者と学習者の動特性がほぼ一致している場合は軌道追従することによって教示者のトルクの時系列パターンが学習者においても再現することができ、これより相手の動作意図を推定することができる。従ってこういった模倣をロボットが行う場合は個々のロボットの動特性を考慮し、それに適した制御を行う必要がある。

しかし従来の模倣研究においてはそういったロボットの動特性については考慮されていない。ロボットの動特性を考慮せずに軌道を追従する方法としてハイゲインのフィードバック制御があるが、時間遅れがあることや高い周波数の応答性が悪いこと、サンプリングタイムが大きいと追従できないといった問題があり、個々のロボットのアクチュエータの能力や観測するカメラの能力によっては計画した軌道に追従できない場合がある。従ってロボットのモデルを構成しフィードフォワード制御によって軌道に追従させる必要があるが、ロボットの構造が複雑で測定が難しい場合や、経年劣化によるモデルの変化などがあって正確なモデルを測定することができない。そこで本稿では最初に動特性を考慮した模倣の定義を提案し、次に観測した軌道を追従しながらモデルを推定する適応制御の手法を用いて、教示者の軌道を追従することによって教示者の動力学レベルの情報が学習者に再現で

きることを示す。

### 2 動特性を考慮した模倣

本節ではまず模倣の定義を提案する。現在多くの研究者が様々な評価基準に応じて模倣の定義を行っている。その中で川人<sup>3)</sup>は模倣戦略として四つの戦略を示しており、これら四つのうち型真似の模倣である猿まねレベルの模倣は知能が低いとしている。しかしロボットの視覚にあたるカメラの秒間フレーム数はそれほど高くはないことから、その観測情報のみから教示者の動作を常に追従することは不可能である。また高いサンプリングタイムで認識が可能であったとしても、非線形なロボットシステムが軌道を追従するためには、自己のモデルを持つことが必要である。従って教示者の軌道を追従するには高度な知能を要すると考えられる。またモデルを必要としない軌道追従方法としてPD, PID フィードバック制御がある。しかしこれは制御に時間遅れがあることや、高い周波数の応答が悪いといった問題があり、必ずしもすべての軌道に追従することはできない。従って軌道追従のためには自己のモデルが必要であり、模倣においては「自己のモデルを用いて観測した軌道を追従すること」が重要である。そこで本研究では模倣をこのように定義し、これを満たす模倣の実現を目指す。

このような模倣の定義を満たす手法として適応制御がある。これはモデルを構成するロボットパラメータが正確に分からなくても軌道追従できるように、パラメータを推定値に収束させる手法である。本稿では実ロボットにおいて角加速度が正確に計算できないことを考慮して、各時刻における角加速度を必要としない適応制御の手法<sup>4)</sup>について簡単に説明する。

ロボットの運動方程式は次のように書くことができる。

$$\tau = H(q)\ddot{q} + C(\dot{q}, q)\dot{q} + G(q) \quad (1)$$

ここで  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  は関節の位置, 速度, 加速度を表し,  $H$  は慣性項,  $C$  は求心およびコリオリ項,  $G$  は重力項に相当する行列である。また,  $\dot{H} - 2C$  は歪対称行列である。ここで不明なパラメータを  $\phi = (\phi_1, \phi_2, \dots)$  とし,  $\phi_i = m_j l_{g_j}$  ( $m_j$  はリンク  $j$  の質量,  $l_{g_j}$  はリンク  $j$  の重心位置までの距離) のように  $\phi$  をうまく選択すると, 式 (1) は  $\phi$  について線形な式

$$\tau = Y\phi \quad (2)$$

に変形することができる。この  $\phi$  を用いて  $H, C, G$  を表したものを  $\hat{H}, \hat{C}, \hat{G}$  とすると, モータのトルク  $u$  は次の

制御則で求めることができる。

$$\mathbf{u} = \hat{\mathbf{H}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_d + \hat{\mathbf{C}}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}_d + \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) - \mathbf{K}_p \mathbf{e} - \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} \quad (3)$$

ここで  $\mathbf{q}_d$  は目標軌道であり、 $\mathbf{e} = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d$  である。また  $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_d$  は各要素が正の対称行列である。このとき推定パラメタ  $\phi$  は次の式によって更新される。

$$\dot{\phi} = -\Gamma^{-1} \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}_d) \mathbf{T}^T \dot{\mathbf{e}} \quad (4)$$

ここで  $\Gamma$  は各要素が正の対称行列である。これによりパラメタは推定値に収束し、軌道は追従できる。ここで式 (3) および式 (4) には現在の角加速度  $\ddot{\mathbf{q}}$  が用いられていないことに注意する。

### 3 数値実験

本研究では模倣において教示者と学習者の動特性はほぼ一致していると仮定し、実験では教示者と学習者は同じロボットが行う。図 1 に試作したロボットを示す。このロボットは二つの自由度を持ち、リンク 1 の全長が 220[mm]、重さが 530[g] である。またリンク 2 の全長は 270[mm]、重さが 750[g] である。

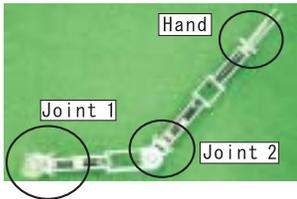


Fig.1 Robot arm with 2DOF joint

本稿では実機での実験に先立ち、シミュレーションによって模倣の実験を行う。最初に先の節で説明した適応制御を二自由度のロボットに適用したときの計算方法について簡単に述べ、シミュレーション結果を示す。

いま、学習者のロボットのパラメタのうち各リンクの質量  $m_1, m_2$  および重心までの距離  $l_{g1}, l_{g2}$ 、回転軸周りの慣性  $I_1, I_2$  が不明であったとする。ここでパラメタ  $\phi = (\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4)$  を以下のようにおく。

$$\begin{aligned} \phi_1 &= l_{g1}m_1 + l_1m_2 \\ \phi_2 &= I_1 + m_1l_{g1}^2 + l_1^2m_2 \\ \phi_3 &= l_{g2}m_2 \\ \phi_4 &= I_2 + m_2l_{g2}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

このとき、ロボットの運動方程式 (1) は以下のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Y}\phi = \begin{bmatrix} g s_1 & \ddot{q}_{1d} & k_1 & \ddot{q}_{1d} + \ddot{q}_{2d} \\ 0 & 0 & k_2 & \ddot{q}_{1d} + \ddot{q}_{2d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ただし、

$$\begin{aligned} k_1 &= -l_1 S_2 \dot{q}_2 (\dot{q}_{1d} + \dot{q}_{1d}) - l_1 S_2 \dot{q}_1 \dot{q}_{1d} \\ &\quad + g S_{12} + 2l_1 C_1 \dot{q}_{1d} + l_1 C_2 \dot{q}_{2d} \\ k_2 &= l_1 C_2 \dot{q}_{1d} + l_1 S_2 \dot{q}_1 \dot{q}_{1d} + g S_{12} \\ S_i &= \sin(q_i), S_{ij} = \sin(q_i + q_j) \end{aligned} \quad (7)$$

このとき式 (3) の  $\hat{\mathbf{H}}, \hat{\mathbf{C}}, \hat{\mathbf{G}}$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{H}} &= \begin{bmatrix} \phi_2 + \phi_4 + 2l_1\phi_3C_2 & \phi_4 + l_1\phi_3C_2 \\ \phi_4 + l_1\phi_3C_2 & \phi_4 \end{bmatrix} \\ \hat{\mathbf{C}} &= \begin{bmatrix} -l_1S_2\dot{q}_2\phi_3 & -l_1S_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)\phi_3 \\ l_1S_2\dot{q}_1\phi_3 & 0 \end{bmatrix} \\ \hat{\mathbf{G}} &= g \begin{bmatrix} S_1\phi_1 + S_{12}\phi_3 \\ S_{12}\phi_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) を用いてモータの入力トルクを計算し、式 (6) の行列  $\mathbf{Y}$  と式 (4) を用いてパラメタ  $\phi$  の更新を行う。

次にシミュレーション結果を示す。教示者のロボットが図 2 左のようなトルクパターンを発生したときの、各関節の軌道を図 2 右に示す。学習者はこの軌道を観測軌道とし、追従を行う。

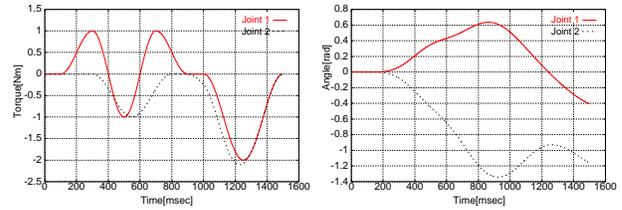


Fig.2 Teacher's demonstration (left : torque pattern, right : trajectory of joints)

観測した教師の軌道に適応制御を用いて追従したときの学習者のトルクパターンを図 3 左に示す。またこの時の不明なパラメタ  $\phi$  の変化を右に示す。図より、観測した軌道を追従することによって教示者と同じトルクパターンが再現できていることが分かる。また、ロボットのパラメタも試行を繰り返すことによってある値に収束していることが分かる。

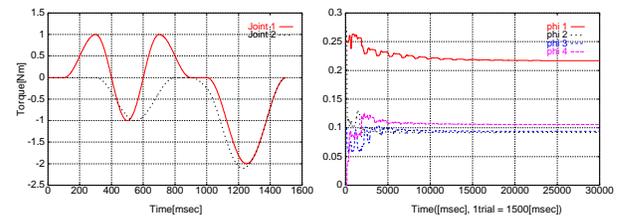


Fig.3 Torque pattern by adaptive control (left) and parameters (right)

### 4 まとめ

模倣には動作を実行する学習者の動特性が大きく関わっており、そのために自己のモデルが必要であることから、模倣の定義を「自己モデルを持って観測した軌道を追従することとした。そういった模倣を実現する一手法として適応制御を用い、教示者と学習者の動特性が同じ場合は、運動学レベルの観測軌道から教示者の動力学レベルの情報を学習者が獲得できることを示した。

今後は獲得されたモデルを用いて、観測のサンプリングタイムが大きいときも学習者の動特性に適した補間を行うことによって模倣を実現することを考える。

### 参考文献

- [1] Kuniyoshi, Inaba, Inoue, Learning by Watching : Extracting Reusable Task knowledge from Visual Observation of human Performance *IEEE Transaction on Robotics and Automation* Vol. 10, No. 6, pp.799-821, 1994
- [2] 宮本、川人、作業レベルのロボット学習のための見まねによる教示 電子情報通信学会論文誌 D-II No.10 pp.2401-2410 1998
- [3] 川人 脳の計算理論 産業図書 1995
- [4] Slotine, Li, On the Adaptive Control of Robot Manipulators, *Int. J. Robotics Research*, 6, 3, pp45-59