

# 動特性を利用した見まねによる軌道生成

田熊隆史 (大阪大学) 細田耕 (大阪大学) 浅田稔 (大阪大学)

## Path planning by imitation utilizing robot's dynamics

\*Takashi TAKUMA, Koh HOSODA, Minoru ASADA (Osaka Univ.)

**Abstract**— In this study, we propose the way to modify the path, from observing the motion of teacher, by which a robot can follow with minimum consumption of energy. In an imitation research, robot follows the path to accomplish the task. But it should always generate the torque in each joint even while a teacher who is human does not, because the dynamics of robot is not considered. In order to use peculiar dynamics of robot, it is effective to modify the path or change the time scale of trajectory at each joint. In this paper, we analyze the time scale in order that the robot can move with less torque generation.

**Key Words:** learning by imitation, ballistic motion

### 1. はじめに

従来ロボットへの教示では、工場のロボットのように教示者が軌道や経由点を逐一教える必要があった。しかし熟練者の技術伝承のように、複雑な動作や熟練者が無意識に行っている動作をこのような方法で教えることは非常に難しい。

一方で教示者の動作を見まねし、その動作を再現することによって教示者と同じタスクを実行する手法 (Learning by Imitation) は複雑な動作を教示する場合に有効である。宮本ら<sup>1)</sup>は教示者が例示した動作を経由点とそれを結ぶ軌跡で表現し、経由点を変更して望ましい結果を得ることができた。しかし両者の身体構造の違いから、教示者にとって最適な軌道が必ずしもロボットにとって最適であるとはいえない。

本研究では以上の点に着目し、教示者の動作から得られた軌道をロボットにとって最適な軌道に修正し、教示者と同じタスクを実現できることを目標とする。

### 2. 動特性に着目した軌道修正

#### 2.1 見まねのレベル

一般的に、見まねのレベルは以下のような分類が行われている<sup>2)4)</sup>。

1. 教示者の軌道の完全追従  
教示者の動作軌道をそのまま真似るレベル。教示者と被教示者の身体構造が完全に一致し、教示者を測定するセンサが無限に近い精度でないと教示者と同じタスクを実行することができない
2. ロボットにとって最適な動作の生成  
教示者の動作軌道を修正してロボットにとって最適な動作を行いながらタスクを実行するレベル
3. 運動意図を理解した動作の生成  
教示者の動作軌道より運動の意図を理解し、自己および外界の物理学的な理解に基づいて動作を生成するレベル

本研究では2のレベルについて注目する。また最適な動作を、重力や慣性力を利用してトルクを与えずに弾道的に駆動する時間区間をなるべく多く持ちながらタスクを実行できる動作とし、教示者の動作から得られ

た軌道をロボットにとって最適にするために以下のような手法を提案する。

- i. 教示者の動作観測  
教示者の動作を観測し、ロボットの関節軌道に変換する
- ii. トルク軽減のための動作修正  
時間軸の伸縮や動作軌道を修正することによって、トルクがある範囲内に収まる時間区間の割合を多くする
- iii. 最適軌道の生成  
先に得られた動作軌道において、トルクがある範囲内にある時間区間の制御を切り、その間は弾道的に関節が駆動する

本報告ではこのうち2で述べた時間軸の伸縮について、次に述べるように動作全体の時間を一定の割合で伸縮することにより、全動作期間中トルクがある範囲内に収まる時間区間の割合が最大になるようにする。

#### 2.2 時間軸の伸縮<sup>3)</sup>と評価値

いま、教示者の動作から  $N$  自由度ロボットの各関節の軌道が以下のように得られたとする。

$$\begin{aligned} \theta_i(t) &= f_i(t) \\ i &= 1, 2, \dots, N \quad 0 \leq t \leq T_{obs} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで  $T_{obs}$  は教示者が動作を終えるまでの時間である。いま、時間の圧縮率を  $\alpha$  として動作時間を  $t = \alpha \hat{t}$  とすると、各関節の位置  $\theta_i(\hat{t})$  は以下ようになる。

$$\theta_i(\hat{t}) = f_i(\alpha \hat{t}), \quad 0 \leq \hat{t} \leq T_{obs}/\alpha \quad (2)$$

ここで  $\alpha$  が一定の場合、速度  $\dot{\theta}_i(\hat{t})$  および加速度  $\ddot{\theta}_i(\hat{t})$  は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_i(\hat{t}) &= \alpha \dot{f}_i(\hat{t}) \\ \ddot{\theta}_i(\hat{t}) &= \alpha^2 \ddot{f}_i(\hat{t}) \end{aligned} \quad (3)$$

$\alpha = 1$  の場合、与えられた軌道の速度、加速度は教示者のものと同じであるが、 $\alpha \neq 1$  の場合は教示者と異なる速度、加速度となる。従って本報告で述べる手法では

ロボットは教示者と同じ軌道を追従するが、速度、加速度は追従していないために教示者と異なるダイナミクスとなる。一方でボール投げのように、特定の位置で教示者と同じダイナミクスを実現するようなタスクを見まねする場合、一定の割合で伸縮するのではなく特定の位置においては伸縮を行わないような手法が必要である。これについては今後の課題とする。

次に、動作中のトルクがある範囲内にある時間区間が大きくなることを考え、探索の評価値  $C$  を以下のように定義する。

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{T_{THRESHOLD}^{(i)}}{T_{all}} \quad (4)$$

ここで  $T_{THRESHOLD}^{(i)}$  は動作中関節  $i$  においてトルクの大きさがある閾値以下である時間の長さを表し、 $T_{all} = T_{obs}/\alpha$  は動作全体の時間である。この値が最大となるように  $\alpha$  を探索する。

### 3. シミュレーション

本研究では3のような2自由度のロボットアームを用いて教示者の見まねを行う。稼働領域は地面と垂直な面で、重力を利用してトルクをなるべく抑制しながら教示者と同じ軌道を追従することを目的とする。

本報告ではまずシミュレーションを用いて先に述べた伸縮率  $\alpha$  の探索を行う。用いたモデルのサイズおよび大きさは以下の通りである。

Link	サイズ (w × d × h)[mm]	重さ [kg]
上腕	50 × 50 × 200	0.3
下腕	50 × 50 × 150	0.4

いま、教示者の動作は測定され、各関節の軌道  $f_i(t)$  は既に与えられたものとする。測定された手先の軌道と追従を行ったときの各関節のトルクの波形を図1に示す。ここで  $T_{obs} = 3000[msec]$  とした。次に評価値  $C$  を最大にする  $\alpha$  を探索する。 $\alpha$  は見まねによって得られる最適な動作が教示者のものとそれほど変わらないという仮定のもと、 $0.5 \leq \alpha \leq 1.5$  の範囲で探索を行った。またここで閾値を  $0.2[Nm]$  とした。

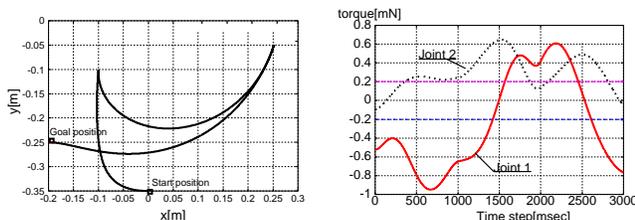


Fig.1 教示により与えられた手先の軌道(左)とその時のトルク(右)

$\alpha$  に対する  $C$  の変化を図2左に示す。探索により、 $\alpha = 1.278$  の時に評価値は最大となる。このとき評価値より二つの関節は全動作時間中平均約45.5%の時間

においてトルクの大きさが  $0.2[Nm]$  以内となっていることが分かる。この時の各関節におけるトルクの波形を図2右に示す。図1右( $\alpha = 1.0$ )に比べて、トルクが閾値の範囲内にある時間の割合が多くなっていることが分かる。

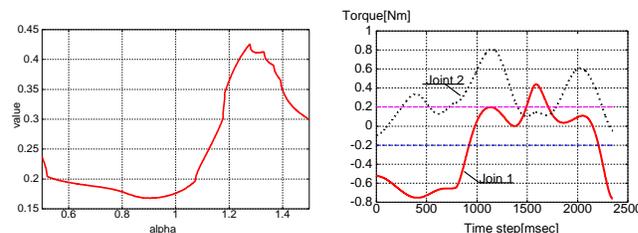


Fig.2 評価値の変化(左)と  $\alpha$  が最大の時のトルク(右)

### 4. 実機の作製

本報告ではシミュレーション上でロボットにとって最適な軌道の探索を行ったが、本研究では今後実機のみを用いてその探索を行う。製作するロボットは先に述べたシミュレーション上のモデルと同じ二つの関節を持ち、更に作業用のハンドを持つ。また、サイズ、質量もモデルに近い。製作した実機を図3に示す。

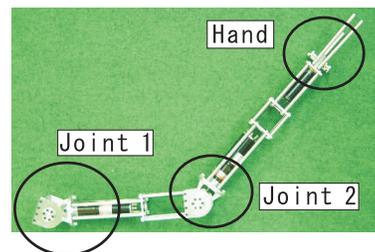


Fig.3 試作機

### 5. おわりに

人間が模倣を行うときにタイミングを計るように、見まねによる動作獲得において動作軌道を時間軸に沿って伸縮することは重要であると考えられる。本報告では最初の段階として動作全体を一定の割合で伸縮を行ったが、今後は特定の位置、もしくは時間で教示者と同じ速度、加速度となるように時間伸縮を行うことを考える。

また時間軸だけでなく、測定により与えられた軌道を変更することによって、ロボットにとって更に適した動作を生成する方法について今後考えていく。

#### 参考文献

- 1) 宮本弘之, 川人光男: 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, Vol.J81-D-II No.10 pp.2401-2410(1998)
- 2) 川人光男: 脳の計算理論, 産業図書(1996)
- 3) J.M. Hollerbach: Dynamic scaling of manipulator trajectories. *Transaction of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 106:102-106, 1984.
- 4) C. Nehaniv, K. Dautenhahn: Affordances and the algebraic foundations of imitation. *Proceedings of the European Workshop on Learning Robots 1998*