

非駆動関節を有する2リンクアームの手动制御

Manual Control of the Positioning of Two-link Arm with a Free Joint

○谷貝将通, 石原正, 猪岡光

○Masamichi Yagai, Tadashi Ishihara, Hikaru Inooka

東北大学大学情報科学研究科

Graduated School of Information Sciences, Tohoku University

キーワード: 非駆動関節マニピュレータ (under-actuated manipulator), 非ホロノミック (nonholonomic constraint), 手动制御 (manual control), 軌道計画 (trajectory planning),

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字01 東北大学大学院 情報科学研究科 システム情報科学専攻
知能ロボティクス学講座 知能制御システム学研究室

谷貝将通, Tel.: (022)217-7021, Fax.: (022)217-7019, E-mail: yagai@control.is.tohoku.ac.jp

1. 緒言

近年, 非ホロノミックな性質を持つ系に対する研究が盛んに行われているが, この代表的な例として, 非駆動関節を有する水平面内リンク機構がある. この系は船舶系などと比較すると運動方程式に近似項がなく解析や検証に適しているが, 最終目標点に対する収束が理論的に証明された制御則がまだ提案されていないなど, 扱いが困難な系であることにはかわりはない.

一方で, このような従来の制御理論の適用が困難な制御対象に対して, 人間の優れた認識能力や学習能力を利用する研究がある. 人間による良好な制御操作が求めれば, 探索による数値解を求める際の参考にするなどの利用法が考えられる.

本研究では第2関節を非駆動関節とする水平面内2リンクアームに対して, 2点間の位置制御を手動制御によって行い, その有効性と利用法について検討する.

2. 第2関節を非駆動関節とする2リンクアーム

非駆動関節を有するアームの最も単純な形態として, 第1関節が能動, 第2関節が非駆動の二つの回転関節からなる水平2リンクアームが考えられる. この系は特殊な関節配置の場合を除き, 運動方程式が加速度まで含む積分不可能な微分方程式で表現される, 2階の非ホロノミック系となる.

このアームは全ての関節角が停止可能な平衡点となるが, その一方で大抵の平衡点周りでの線形化系は可制御なものとならず, よって従来の方法による制御法の構築は困難である. しかし, 非ホロノミックな性質を利用すれば, 能動関節の運動によって全体を目標の形状に位置制御できる可能性がある. アクチュエータの数よりも多くの関節を有するアームを制御できるようになれば, アームの軽量化や省エネルギー, 耐故障性などに有効であると考えられる.

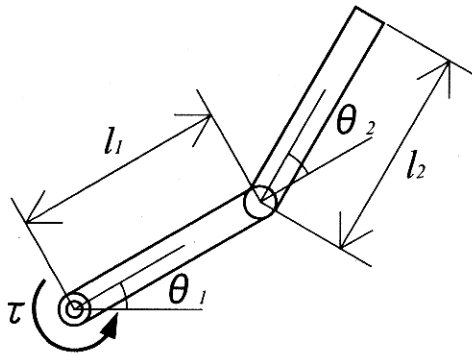


Fig. 1 第2関節を非駆動関節とする2リンクアームのモデル

2.1 2リンクアームのモデル

本研究ではFig.1に示すような、第2関節を非駆動関節とする2リンクアームを対象とする。座標系は関節角度座標を用いることすると、運動方程式は、

$$M(\theta)\ddot{\theta} + b(\theta, \dot{\theta}) = \begin{pmatrix} \tau \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる。なお、モデル化にあたっては摩擦などの減衰力は考慮していない。 $M(\theta)$ は慣性行列、 $b(\theta, \dot{\theta})$ はコリオリ・遠心力項を表す。

3. 手動による位置制御

本章では前章で導いたモデルもとに作成したシミュレータを用いて、本研究で対象とするアームに対して手動による制御を適用し、その有効性を示すとともに、2点間の位置決め軌道がどのようにして決まるのかを検討する。

3.1 実験

実験は前章で導いたモデルもとに作成したシミュレータを用いた。被験者はディスプレイ上に再現された2リンクアームにジョイスティックでトルクを入力し操作する。用いたパラメータをTable.1に示す。ここで τ_{max} は第1関節に加えるトルクの最大値である。操作は $(\theta_1, \theta_2) = (0, 0)$ で停止した状態のアームを $(\theta_1, \theta_2) = (\frac{5\pi}{6}, \frac{\pi}{3})$ で再び停止させることを目的として行なった。被験者は男子学生3名で、それぞれ、1セットを10回として1日4セットづつ4日間、計120回の試行を行なった。

Table 1 2リンクアームの物理パラメータ

パラメータ	値
l_1	1
l_2	1
m_1	1
m_2	1
κ	2
λ	1
τ_{max}	0.1

3.2 実験結果

Fig.2からFig.4に被験者(A), (B), (C)の各セットごとの成功率を示す。グラフの横軸はセット数、縦軸はそのセットにおける成功率を示す。被験者ごとに差はみられるが、練習回数の増加と共に成功率が上昇していることが分かる。このことは、本研究の制御対象に対して人間の制御特性や学習能力は有効であることを示している。

次にFig.5からFig.7に練習初期、中期及び後期に見られた代表的な操作パターンと2リンクアームの運動を示す。上のグラフは位置の目標角度からの偏差を示しており、実線が第1関節、破線が第2関節である。下のグラフは入力トルクである。練習初期はアームの動特性を十分に学習していないので、第2関節が何回も回転してしまう場合が多く、目的の制御を行うことができていない。練習中期になると、第1関節を目標角度近くに移動させ、次に第1関節を動かさないようにしながら、第2関節の目標角度への接近を待つような制御操作を行なうようになる。さらに練習を続けるとFig.7に示すように第1関節の位置決めと第2関節の位置決めがほぼ同時に行なわれるようになる。このよ

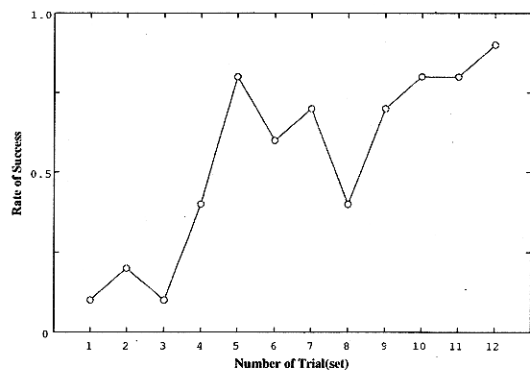


Fig. 2 成功率(被験者(A))

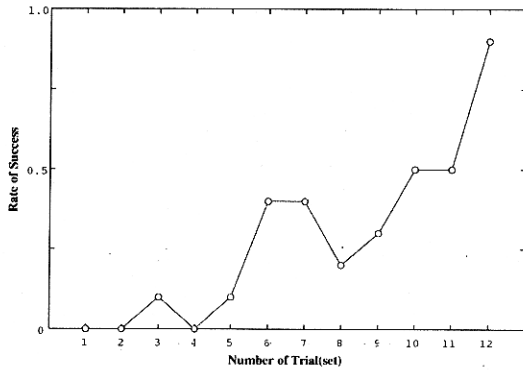


Fig. 3 成功率(被験者(B))

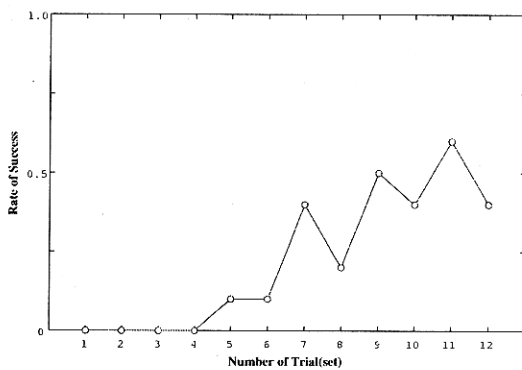


Fig. 4 成功率(被験者(C))

うに人間は練習を繰り返すことでシステムの動特性を把握し、両関節の制御が可能になったと考えられる。

3.3 制御操作の検討

前節ではシミュレータを用いた実験の結果、人間は練習により、第2関節を非駆動関節とする2リンクアームの操作を実現できること示した。本節では人間が生成した軌道を検討し、一般的な2点間の位置決め軌道計画への応用を考える。

Fig.7を見ると、操作開始直後の加速部分と目標到達直前の減速部分に大きな入力が存在することが分かる。その一方でその間の操作入力小さく時間も短い。特に減速操作の直前には完全な無入力状態が存在する。トルク入力のない状態ではアームは慣性による自由運動となる。このことから人間は初期加速軌道と停止のための減速軌道を自由運動で接続するようにして、2点間の位置決め軌道を決定しているのではと考えた。

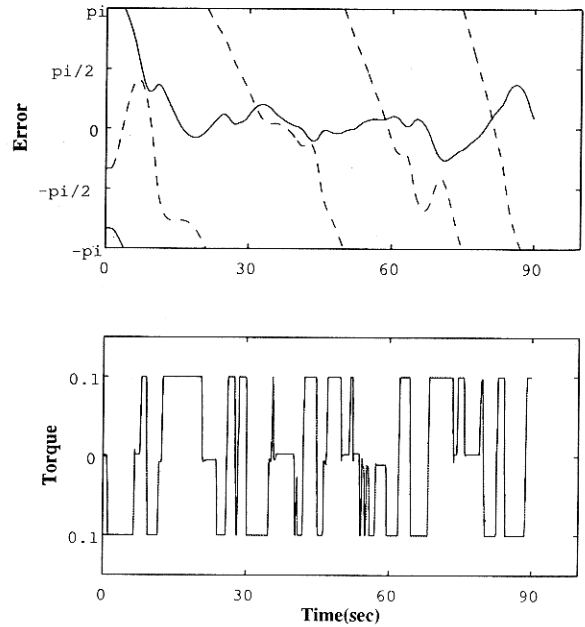


Fig. 5 練習初期

4. 2リンクアームの自由運動

柳は2リンクアームにおける自由運動は周期運動となり、その運動が第2関節の運動により振動モード(Fig.8)と回転モード(Fig.9)の2つに分類できることを示し、さらにその経路¹は両関節の角速度の比で決まることを示した⁵⁾。

そこで、自由運動における両関節の角速度比を、

$$\gamma = \frac{\dot{\theta}_1}{\dot{\theta}_2} \quad (2)$$

とおく。前章の実験の練習後期の軌道について、その各時点において自由運動となった場合の $\theta_2 = 0$ のときの γ をとくに γ_0 とし、その変化をFig.10に示した。2本の点線に挟まれた範囲に γ_0 の値がある場合は回転モードとなり、それ以外の場合は振動モードとなる。初期加速と停止減速以外では γ_0 の値はほとんどが回転モードの範囲に存在する。このことから、初期加速と停止減速の間の自由運動が回転モードの自由運動であることが分かる。

5. 自由運動を利用した軌道計画

本章では前章での考察をもとに実験と同じ初期位置と目標位置の間の位置決め軌道を生成する。

¹ここで経路とは形状空間における時間に依存しない幾何学的な曲線をさす。それに対し、時間変化も考慮した運動の表現を軌道と呼んで区別する。²⁾

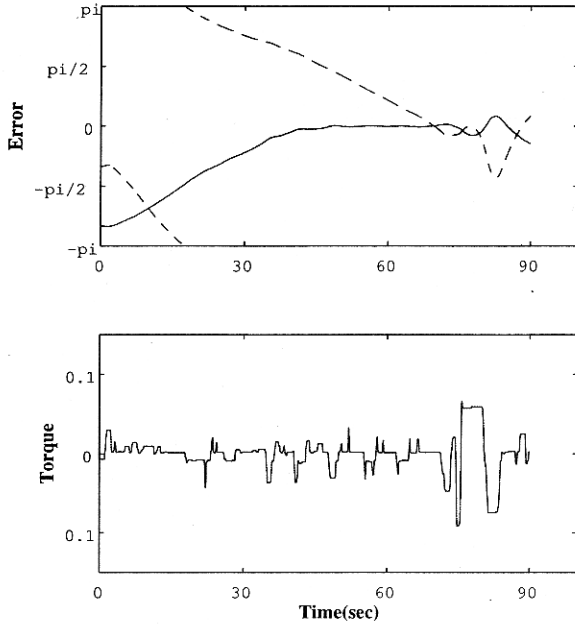


Fig. 6 練習中期

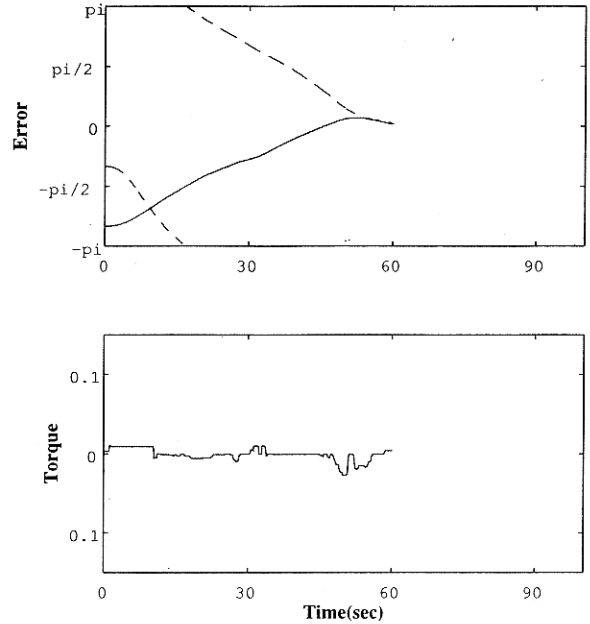


Fig. 7 練習後期

5.1 軌道計画手順

まず、自由運動は初期位置と目標位置の近傍を通過するような自由運動を適当に選ぶ。この自由運動は前章の結果を考慮して回転モードのものを選択する。回転モードにおいては γ は θ_2 によってのみ決まる関数

$$\gamma = \gamma(\theta_2) \quad [0 \leq \theta_2 \leq 2\pi] \quad (3)$$

となるので、これをオフラインであらかじめ計算する。次に、初期位置と自由運動と接続する加速軌道については、 K を定数として、

$$\tau = -K(\dot{\theta}_1 - \frac{\dot{\theta}_2}{\gamma(\theta_2)}) \quad (4)$$

という簡単なフィードバックを用いて自由運動へ収束させることで求めることができた。停止位置への減速軌道は目標位置を初期位置として同様のフィードバックを用い、時間を反転させることにより求めた。その後、両者の軌道を接続する。この軌道の前で第1関節の角度変化が目標の初期角度と目標角度の差と等しくなれば、軌道計画は成功である。一致しない場合には目標とする自由運動を変更し、同様の手順を繰り返すことで軌道を生成する。

(4)式は $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0$ のとき $\tau = 0$ となるので使えない。そのため初期位置から一定の大きさのトルクを一定期間加えて、両関節を加速させたのち、

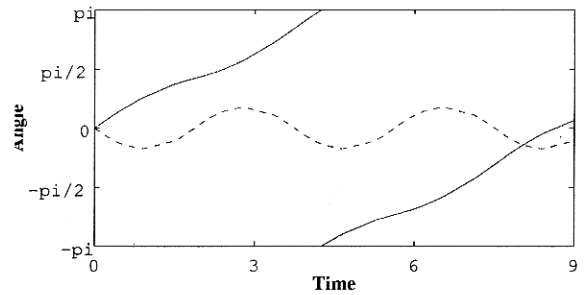


Fig. 8 振動モード

(4)式を適用した。また、(4)式は速度比のフィードバックなので両関節の角速度はわからない。しかし軌道が求まれば時間軸の伸縮により経路を変えずに軌道終端の両関節の角速度を同じ倍率で変えることできる²⁾ため、自由運動軌道との接続が可能となる。

この手順で求めた軌道をFig.11に示す。実線が第1関節の目標位置との誤差、破線が第2関節の目標位置との誤差である。

5.2 実験結果との比較

前節で求めた軌道(Fig.11)を実験で得られた軌道(Fig.12)とを比較する。ともに実線が第1関節の目標位置との誤差、破線が第2関節の目標位置との誤差である。なお比較しやすいように目標位置

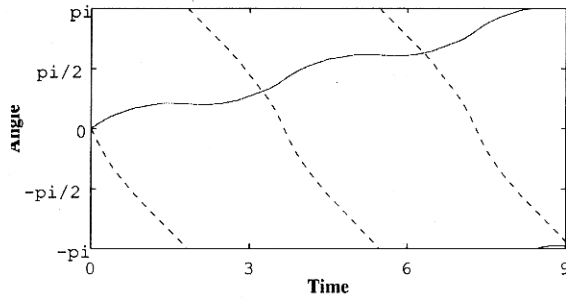


Fig. 9 回転モード

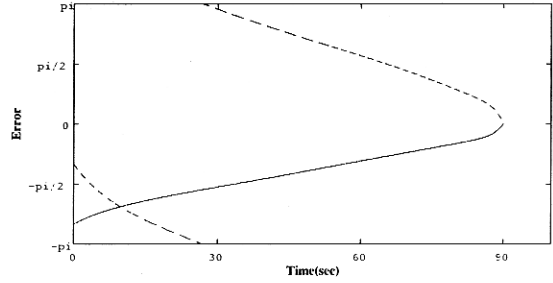


Fig. 11 計算により求めた軌道

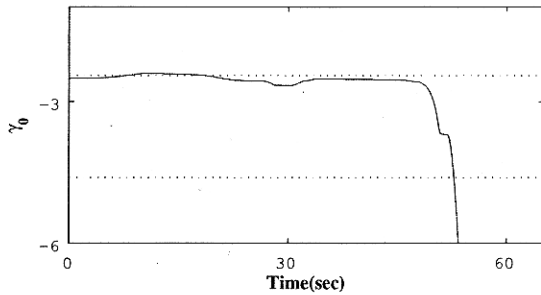
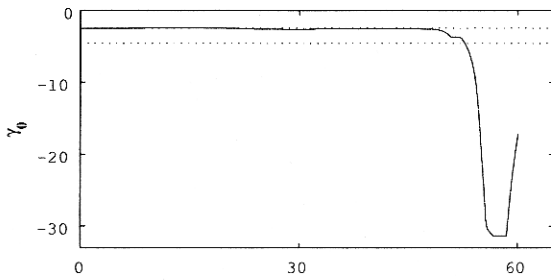


Fig. 10 練習後期の γ_0 の変化

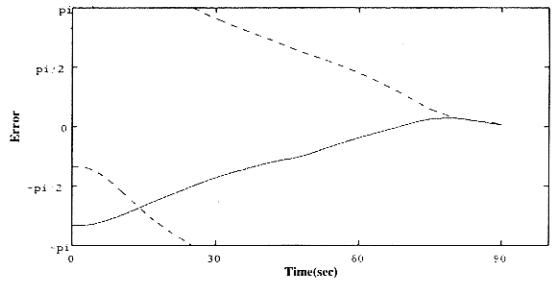


Fig. 12 手動操作により求めた軌道

を行ない、人間の操作特性が有効であることが確認した。また、実験における人間の操作から、2リンクアームの自由運動を利用した軌道計画法を検討し、実験と同じ初期位置、目標位置間における2点間の位置決め軌道を求めることに成功した。

への到達時間を90secで統一している。

Fig.11, Fig.12を比較してみると、初期位置から目標位置への位置決めを達成しているものの、その軌道には差があること分かる。特に、初期加速軌道と停止位置への減速軌道で差が大きい、この原因としては、一定の大きさのトルクを一定期間加えるという停止状態からの加速方法が、人間のそれとは異なっているためと考えられる。また、手動実験では存在した、トルクの大きさの制限を前節の軌道計画の際には考慮しなかったことも原因と考えられる。

6. 結言

本研究では第2関節を非駆動関節とする2リンクアームを対象として、人間による手動制御の実験

参考文献

- 1) 小林 啓吾, 井村 順一, 吉川 恒夫: 一つの非駆動関節を持つ平面劣駆動マニピュレータの可制御性, 日本ロボット学会誌, **17-8**, 1167/1172(1999)
- 2) 荒井 裕彦, 谷江 和雄, 城間 直司: 非駆動関節を有するマニピュレータの時間軸伸縮による制御, 日本ロボット学会誌, **16-4**, 561/568(1998)
- 3) 荒井 裕彦: Underactuated manipulatorの非ホロノミック制御, システム/制御/情報, **43-10**, 553/560(1998)
- 4) 志藤 嘉信: 非駆動関節を有する2リンクアームの位置制御に関する研究, 東北大学大学院工学研究科修士学位論文(1994)
- 5) 柳 基鎬: 2リンクアームの非線型運動制御に関する研究, 東北大学大学院工学研究科博士学位論文(1993)