

[研究助成 (A)]

人間動作再現の高度化を目指したロボット運動制御技術の研究

Motion Control for Advanced Human Motion Reproduction

2211028



研究代表者

神戸大学 大学院海事科学研究科

准教授

元 井 直 樹

[研究の目的]

近年の少子高齢化に伴い産業分野における労働力不足が懸念されている。特に、熟練技術者による人手作業においては、その技術の継承や後継者不足に対する問題が生じうる。結果、繊細な感覚や精密な手先作業を必要とする伝統工芸などの熟練作業の損失につながる可能性がある。このような技術の損失を防ぐことを目指し、人間の動作を抽出・保存し、自動で再現するシステムの実現が盛んに研究されている。

人間の動作を抽出する手法としてモーションキャプチャが利用されている。しかしながら、モーションキャプチャは画像情報に基づいており位置情報しか取得できない。このため接触動作時における力情報の習得ができず、接触を含む動作の保存・再現手法としては不適である。一方で、力覚伝送を有する遠隔制御技術であるバイラテラル制御を用いた人間動作の位置・力情報を抽出する研究も報告されている。この手法は、人間動作における位置・力情報の抽出と抽出データの再現を行い、モーションコピーシステムと呼ばれている。

モーションコピーシステムは位置・力情報を保存するための「モーション保存フェーズ」と再現するための「モーション再現フェーズ」の2つのプロセスによって構成されている。モーション保存フェーズではバイラテラル制御を用いて操作者の位置・力情報を抽出・保存する。

一方、モーション再現フェーズでは操作者の代わりに保存された動作データに基づいてシステムを駆動することで人間の動作を再現する。

動作再現において時間的な修正を加えることで、動作データの再生速度を自由に変更可能となる。これにより保存された動作を低速・高速で再現することが可能となり、位置・力情報は速度倍率に対応して時間領域で収縮・拡張される。再生速度が変化した場合、慣性力や摩擦力など環境からの影響も変化するため保存時と結果の誤差が発生しやすくなる。この誤差を解消できれば熟練作業を必要としていた製品を自動的かつ高速に生産できるようになり、人間動作再現の高度化につながる。そこで本研究では人間動作再現における高速・高精度化を目指す。

[研究の内容、成果]

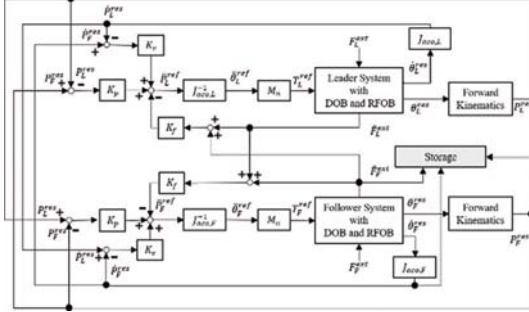
1. モーションコピーシステム

図1にモーションコピーシステムのブロック線図を示す。モーションコピーシステムは「モーション保存フェーズ」と「モーション再現フェーズ」で構成される。それぞれについて詳述する。

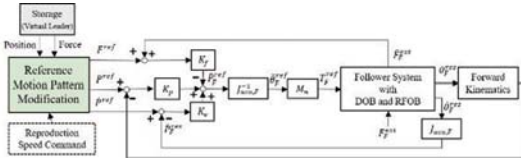
1.1 モーション保存フェーズ

図1(a)にモーション保存システムのブロック線図を示す。力覚伝送を有するバイラテラル制御を用いることで操作者の動作の位置・力情報を抽出・保存するモーション保存システムを

実現する。バイラテラル制御では操作者が操作するリーダシステムと遠隔地で動作するフォロワシステムで構成される。



(a) モーション保存フェーズ



(b) モーション再現フェーズ

図1 モーションコピーシステム

バイラテラル制御では式(1) および式(2) に示す制御目標式を同時に満たす必要がある。

$$\dot{p}_L^{res} - \dot{p}_F^{res} = 0 \quad (1)$$

$$F_L^{ext} + F_F^{ext} = 0 \quad (2)$$

ここで p および F はロボットの位置・力情報を示す。上付き添え字 $\blacksquare^{res}$ および $\blacksquare^{ext}$ は応答値と外力を示す。また、下付き添え字 $\blacksquare_L$ および $\blacksquare_F$ はリーダ・フォロワシステムの値を示す。

1.2 モーション再現フェーズ

図1(b) にモーション再現フェーズのブロック線図を示す。モーション再現フェーズは、仮想リーダシステムとフォロワシステムによって構成される。モーション保存フェーズで保存された操作者の動作データを仮想リーダシステムとみなし、再現動作のための位置・力情報を逐次実行する。ストレージに保存された位置・力情報をそれぞれ p^d および F^d とする。この時、仮想リーダシステムに関する位置・力参照値は下記となる。

$$p^{ref} = p^d \quad (3)$$

$$F^{ref} = -F^d \quad (4)$$

ここで p^{ref} および F^{ref} は、仮想リーダシステムに関する位置・力参照値を示す。再現動作を実現するためにフォロワシステムにおける加速度参照値 $\ddot{p}_F^{ref}$ は以下のように設定される。

$$\ddot{p}_F^{ref} = C_p(p^{ref} - p_F^{res}) - C_f(\dot{p}_F^{ref} + \dot{p}_F^{res}) \quad (5)$$

ここで C_p は位置コントローラ、 C_f は力コントローラであり、位置ゲインを K_p 、速度ゲインを K_v 、力ゲイン K_f を用いて以下のように示される。

$$C_p = K_p + sK_v \quad (6)$$

$$C_f = K_f \quad (7)$$

また、動作データの再生速度は自由に設定することが可能である。図2 に再現動作の速度の変更方法を示す。図2 に示すように、保存動作を高速化する場合に保存された位置・力情報が時間領域で収縮され、低速化する場合に拡張される。

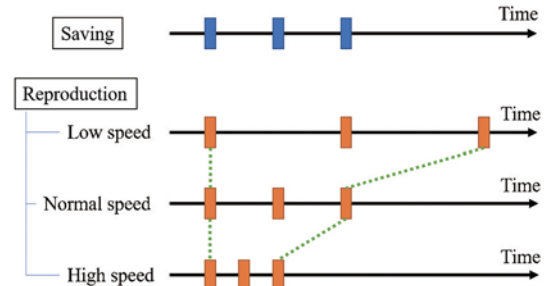


図2 動作生成速度

2. 反復学習を用いた動作再現手法

モーション再現フェーズで再生速度を変化させた場合、動作保存時と再現時における位置・力誤差が発生する。これらの誤差に対して反復学習制御をモーション再現フェーズに組み合わせる。反復学習制御では試行毎に誤差を算出し、誤差に応じて位置・力参照値を修正する。結果、試行を繰り返すことで動作再現における位置・力誤差が小さくなる。

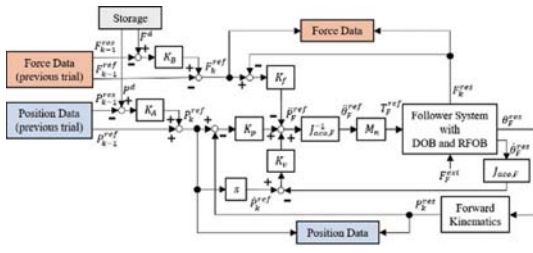


図3 反復学習を用いた動作再現手法

図3に反復学習を用いた動作再現手法のブロック線図を示す。反復学習制御の1試行目では、保存された動作データおよび設定された再生速度の倍率に基づき動作再現を行う。2試行目以降においては、目標値と前試行における応答値の差に基づいて新たな参照値を設定し、動作再現を行う。 k 回目($k=1, 2, 3, \dots$)の試行における位置参照値 p_k^{ref} および力参照値 F_k^{ref} は式(6)-(7)で表される。

$$p_k^{ref} = \begin{cases} p^d & \text{if } k=1 \\ p_{k-1}^{ref} + K_A(p^d - p_{k-1}^{res}) & \text{if } k \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

$$F_k^{ref} = \begin{cases} -F^d & \text{if } k=1 \\ F_{k-1}^{ref} - K_B(F^d - F_{k-1}^{res}) & \text{if } k \geq 2 \end{cases} \quad (7)$$

ここで p_k^{res} および F_k^{res} は k 回目の試行における位置・力応答値である。また、 K_A および K_B は反復学習における位置・力ゲインである。

式(6)-(7)に示す位置・力参照値より再現フェーズにおける加速度参照値は下記となる。

$$\ddot{p}_k^{ref} = C_p(p_k^{res} - p_k^{ref}) - C_f(F_k^{ref} + F_k^{res}) \quad (8)$$

3. 実験結果

反復学習を用いた動作再現手法の有効性を確認するために、実機実験を行った。

3.1 実験方法

本研究では図4に示すデルタ型パラレルリンクロボット2台を用い、リーダー・フォロワーシステムを構築した。また、リーダーシステムのエンドエフェクタには筆ペンの柄を模した持ち手を、フォロワーシステムのエンドエフェクタには筆ペンを装着している。

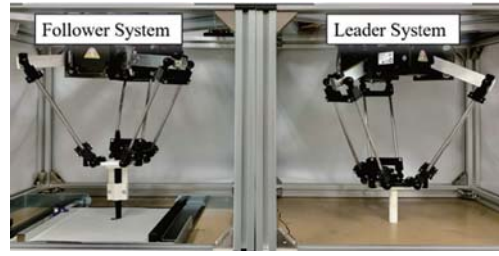


図4 実験システム

本実験では「学」という文字を書く動作の位置・力情報を保存し、2倍速で再現を行った。まずモーション保存フェーズで操作者がリーダーシステムを操作し、フォロワーシステムにて文字を書き、その際の位置・力情報を保存する。次に動作再現フェーズとして反復学習を用いた動作再現手法を用いて動作再現を行った。ここで試行は接触動作中の力の目標値と応答値の二乗平均平方根誤差(RMSE)を評価し、1試行目のRMSEから35%以上小さくなるまで試行を繰り返した。

3.2 実験結果

モーション保存フェーズの実験結果を図5に示す。また、この時に書いた文字を図6に示す。図5より位置情報はリーダー・フォロワーシステムで一致しており、また力情報に関しては作用・反作用の法則が人工再現できている。よって、

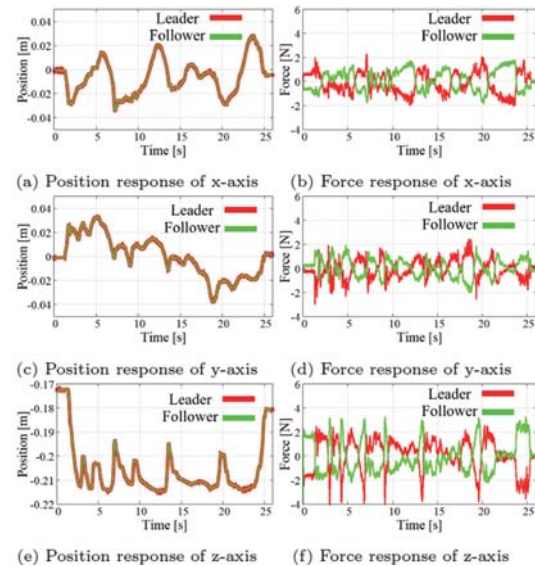


図5 実験データ(動作保存フェーズ)



図6 書いた文字（動作保存フェーズ）

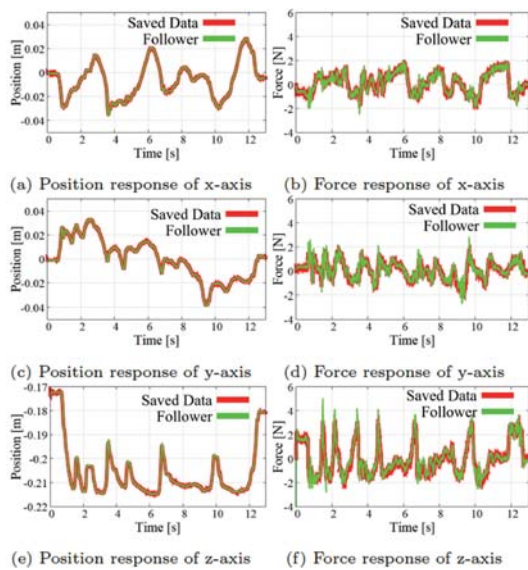
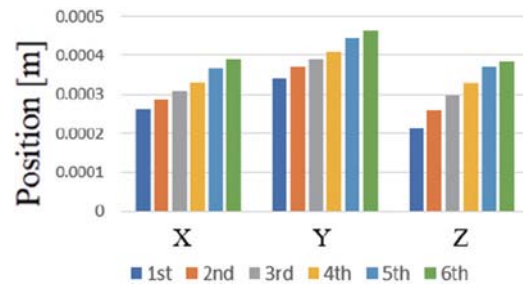


図7 実験データ（動作再現フェーズ）

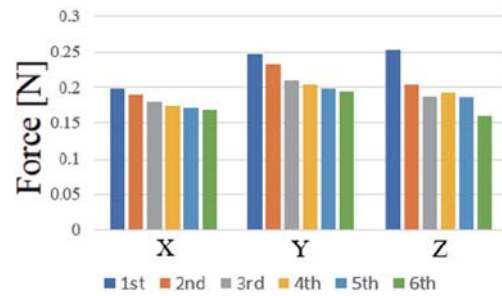
力覚伝送を有するバイラテラル制御が実現出てきている。本実験データにおけるリーダシステムの位置・力情報を抽出し、保存する。

保存した位置・力情報をもとに動作再生速度を2倍に設定した場合の、動作再現フェーズの実験結果を図7に示す。図7より動作保存フェーズの位置・力応答を再現できているが、再生速度を2倍にしたことに起因する位置・力誤差が生じてる。そこで反復学習を用いて位置・力の追従誤差への対応を行う。

図8に反復学習を動作再現手法における繰り返し回数と誤差の関係を示す。図8に示すように繰り返し回数の増加に伴い、位置誤差は微増し、力誤差は減少する。ここで文字書き動作における位置・力情報は互いに独立ではなく、干渉する。しかしながら、位置誤差は微増であり、

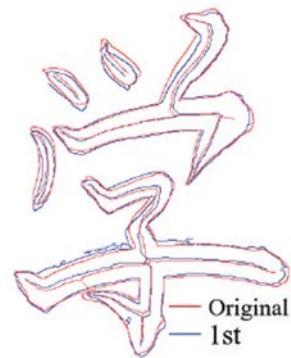


(a) 位置誤差

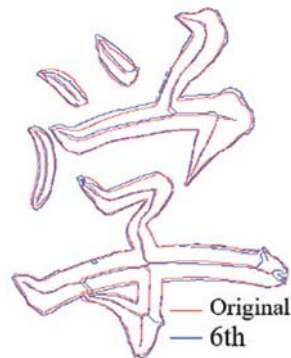


(b) 力誤差

図8 実験結果（繰り返し回数と誤差）



(a) 1回目



(b) 6回目

図9 試行回数と文字（動作再現フェーズ）

ほぼ同精度を保ちつつ、力精度が改善されている。この際の文字を図9に示す。図9(a)と(b)の比較より、動作再生速度が2倍になっ

ているにも関わらず、試行回数が増えるにつれて動作保存フェーズの文字に近づいていることが分かる。以上より、反復学習を用いた動作再現手法の有効性を実験データより確認した。

4. まとめ

モーションコピーシステムは人間動作における位置・力情報を抽出・保存する動作再現フェーズと、保存データに基づき動作再現を行う動作再現フェーズから構成される。本研究では、動作再現フェーズにおける再生速度を高速化することで、再現動作の高度化を目指した。動作再現フェーズにおける再生速度の高速化では、高速化に伴う位置・力誤差が生じ、再現動作精度が劣化する。そこで本研究では、モーション再現フェーズにおいて反復学習制御を用いることで位置・力参照値の修正手法を示した。再現動作において位置・力目標値と応答値の差に基づいて位置・力の参照値を試行毎に修正する。結果、試行を重ねていくことで再現動作精度の向上が見込まれる。

本研究ではデルタ型パラレルリンクロボット2台を用い、筆ペンを用いた筆記動作において、モーション再現フェーズにおける反復学習制御の有効性の実証を行った。反復学習を用いることで保存動作の再生速度を変更した場合においても位置・力の応答値を目標値に近づけることが可能であることを示した。また、保存動作と再現動作の比較により、反復学習を用いることで再現精度の向上を実証した。以上より、実験結果よりモーション再現フェーズにおける反復学習制御の有効性を実証した。

[今後の研究の方向、課題]

本研究ではデルタ型パラレルリンクロボットの手先の位置・力情報に基づいてモーション再現フェーズにおける反復学習制御を行った。しかしながら、ロボットの手先動作に基づく動作修正のみでは再現動作の精度を改善できない部分があることも実験結果から示唆された。

そこでより一層の再現動作の高精度化のためには、タスクの完成度、本研究の場合では筆記動作における文字自体を評価し、反復学習を実施すべきである。筆記動作においてはカメラなどの視覚センサに基づく評価を組み合わせることで性能をさらに向上させることが望まれる。また、筆記動作のみならず産業用ロボットにおける組付け動作の自動化等、本技術の応用先の拡張も望まれる。

[成果の発表、論文等]

【国際会議（査読有）】

- [1] T. Tsubaki, Y. Ueda, N. Motoi, "Research on Bilateral Control with Frequency Modifications by using Fast Fourier Transformation", Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1-6, 2021.
- [2] M. Kobayashi, A. Yamaguchi, and N. Motoi, "Motion-Reproduction Method Based on Iterative Learning Control for Variable Reproduction Speed", Proceedings of IEEE international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, pp. 1-6, 2021.

【国内会議（査読なし）】

- [3] 山口瞭, 小林聖人, 元井直樹, "再現速度変更型モーションコピーシステムの反復学習制御による精度向上", 電気学会産業計測制御研究会, IIC-21-037, 2021.