

インピーダンス制御法を用いた人間協調型ロボットに関する研究

辻 善夫・山田 充・高原 祥充

Yoshio TSUJI, Mitsuru YAMADA and Yoshimichi TAKAHARA

キーワード 人間ロボット協調／インピーダンス制御
KEY WORDS Human Robot Cooperation / Impedance control

1 はじめに

近年、高齢化が進み、介護者の不足は深刻な問題となっている。そのため、介護者の負担を軽減する介護ロボットの開発が期待されている。そこで、我々は、次のような3つの機能を持った人間協調型ロボットの開発を行っている¹⁾。一つ目は患者が指さした物を把持する機能、二つ目は把持した物を患者に手渡す機能、三つ目は移動したい物をロボットと患者が同時に掴み、協調して運ぶ機能（以下、協調搬送機能）である。ここでは協調搬送機能に着目し、協調搬送時における人間の作業力を軽減したり、位置決め精度を向上させる研究を行っている。

人間が物のある位置に移動させる作業は、移動を開始し、ある速度で目標点近くまで運ぶ局面と、目標位置に位置決めする局面に分けることができる。制御理論的にみた場合、目標点近くまで運ぶ局面では、人間は粘性（ダンパー要素）を下げ作業に必要な力を小さくし、位置決め局面では、位置決め精度を上げるために剛性（バネ要素）を上げている。このように、人間は作業局面に合わせて、身体（主に腕）の剛性や粘性を調整している。

一般的なロボット制御手法として、ロボット手先にかかる外力に対する機械インピーダンスのパラメータ（慣性、粘性、剛性）を、目的とする作業に合わせて設定し、位置と力を制御するインピーダンス制御がある²⁾。人間に違和感を与える事なく、ロボットが協調搬送機能を実現するには作業局面に合わせてインピーダンスパラメータを調整する必要がある。そこで今年度は、協調搬送機能を実現するため、ロボットにインピーダンス制御を適用し、インピーダンスパラメータが操作力と作業精度に与える影響を調べた。

2 制御方法

ロボットアームに実現させたい機械インピーダンスの3つの特性を M :慣性特性、 B :粘性特性、 K :剛性特性とすると、ロボットアーム先端に作用する外力 F との間には式(1)の関係が成り立つ。

$$F = M\ddot{X} + B\dot{X} \quad (1)$$

ここで

$F = (f_x, f_y, f_z)$: 作業者が与えた力

$M = \text{diag}(m_x, m_y, m_z)$: 慣性行列

$B = \text{diag}(b_x, b_y, b_z)$: 粘性行列

$X = (x, y, z)$: ロボットアーム先端位置

であり、 $\ddot{X}$ は先端加速度、 $\dot{X}$ は先端速度である。ここで、剛性を含むインピーダンスモデルでは、アームの先端位置が目標軌道から外れた場合、先端位置を目標軌道に戻そうとする力が作用するため、作業に悪影響を与える可能性がある³⁾。よって、ここでは $K=0$ [N/mm] とした。式(1)の関係を實現するには、式(2)のようにロボットアーム先端の速度を制御しなければならない。ここで、 s はラプラス演算子である。

$$\dot{X} = (Ms + B)^{-1} F \quad (2)$$

3 実験概要

ロボットアームに設定した慣性、粘性が作業力、作業精度に与える影響を調べるための軌道追従実験を行った。実験に用いたシステムの概観を図1に、システムのブロック線図を図2に示す。ロボットを制御するため、パソコンからサーボドライバに、速度指令値 $\dot{X}r = (\dot{x}_r, \dot{y}_r, \dot{z}_r)$ [mm/s] を10ミリ秒ごとに送信した。ここで、 $\dot{X}r$ は設定したインピーダンスを實現する理論手先速度、 $\tau = (\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \tau_7)$ [Nm] は7個のサーボモータ

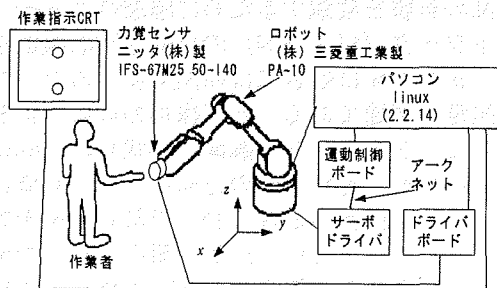


図1 システム外観図

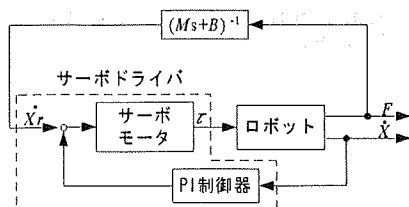


図2 システムのブロック線図

が発生したトルク、 $\dot{X}=(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ [mm/s] は実際のロボットアーム先端の速度である。

また、作業者へ作業を指示するため、作業指示 CRT を用い、アーム先端の目標位置を示す円 (円 A) と実際のアーム先端位置を示す円 (円 B) を表示した。作業指示 CRT の画面構成を図3 に示す。円 A は、目標位置 $X_d(x_d, y_d, z_d)$ が図1の x 軸上を移動するのに合わせて、画面上を上下方向に移動するように表示した。これにより、作業者が円 B を円 A に一致させるようにアーム先端を把持して移動させれば、アーム先端位置を目標軌道通りに動かすことができる。目標軌道は、x 軸方向に振幅100mm、角速度0.5 [rad/sec] で余弦波状に移動する軌道とした。ロボットアームの運動を x 軸方向に拘束するため、 $y_d=z_d=0$ [mm] とした。この時、ロボットアーム先端に装着した力覚センサにより、作業者がロボットアーム先端に加えた作業力 $F(f_x, f_y, f_z)$ を計測した。

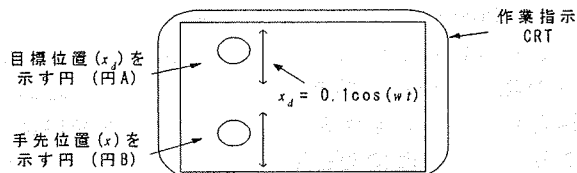


図3 作業指示 CRT の画面構成

4 実験結果および考察

目標軌道が x 軸方向のみの軌道のため、 $b_x=10$ [Ns/m] と設定し、 m_x を種々の値に設定して実験を行った。ここで、操作力と作業精度を評価する値を次式のように定義した。

$$Exe = \sum |x_d - x| / N : \text{作業精度評価値 [mm]}$$

$$Efx = \sum |f_x| / N : \text{作業力評価値 [N]}$$

ここで、 N はデータ数である。それぞれの評価値が小さいほど、作業精度が高く、操作力が小さいことを示す。図4にこの時の評価値を示す。 m_x を小さくするに従い、作業に必要な操作力が減少し、作業精度が向上する傾向が見られた。これは m_x を小さくすることで加速時に必要な力が減少し、目標位置の移動に遅れず先端位置を合わせることができたためと考えられる。

次に、 $m_x=30$ [Ns²/m] と設定し、 b_x を種々の値に設定して実験を行った。図5にこの時の評価値を示す。 b_x を小さくするに従い、操作力は減少した

が、作業精度は単純には向上しなかった。これは b_x を小さくしすぎると、正確な位置決めが難しくなるためと思われる。これらの実験結果より、操作力を減少させるとともに作業精度を向上させるためには、作業局面によってロボットアームの機械インピーダンスを適切に調整する必要があることが確認できた。

5 まとめ

ロボットにインピーダンス制御を適用し、インピーダンスが作業性に与える影響を、軌道追従実験により調べた。実験より、作業性を向上させるには作業局面に合わせてインピーダンスを適切に調整する必要があることが確認できた。今後、作業局面や移動方向に応じてロボットのインピーダンスを調整し、作業者が違和感なくロボットと協同搬送を行えるよう研究を進めていく予定である。

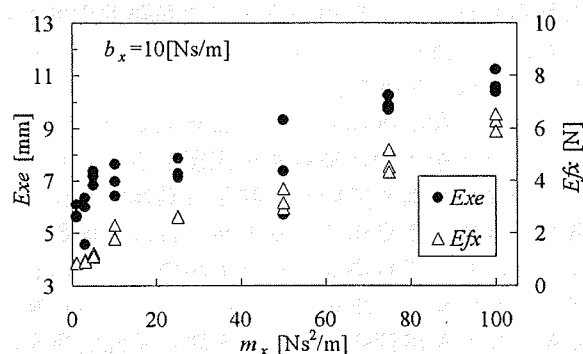


図4 実験結果 ($b_x=10$ [Ns/m])

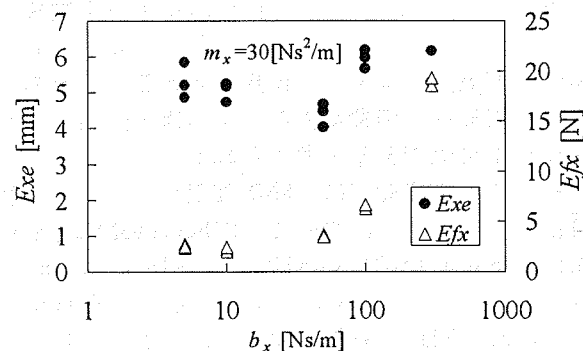


図5 実験結果 ($m_x=30$ [Ns²/m])

参考文献

- 1) 辻善夫、山田充、高原祥充：岡山県工業技術センター報告第27号, 57 (2001)
- 2) 吉川 恒夫：”ロボット制御基礎論” コロナ社 (1988)
- 3) 山田陽滋、鴻巣仁司、森園哲也、梅谷陽二：機械学会論文集(C), 68, 509 (2002)
- 4) 積際徹、横川隆一、原敬：機械学会論文集(C), 68, 483 (2002)