ロボットの力制御のための三次元能動作業台

～力センサフィードバック制御の適用～

○正 中嶋 新一 (新潟工科大), 学 水野 彰 (新潟工科大院)

3D active worktable for force control of robot manipulators

～Application of a force sensor feedback controller～

* Shin-ichi NAKAJIMA, Akira MIZUNO, Niigata Institute of Technology, Kashiwazaki Niigata

KeyWords: 3D active worktable, Force control, Robot manipulator

1. はじめに

接触を前提とした磨き作業などを, ロボットを用いて自動化するためには, 作業時の力を制御する必要がある. しかし, 市販の産業用ロボットは位置制御を基本としているため, 力制御作業への応用が難しい. そこで, ロボットに順応して作業対象物を動かす三次元能動作業台を開発し, ロボットの力制御作業への応用について検討を行ってきた.^{1) 2)}

三次元能動作業台は, ベース上に設置した3台のDD (ダイレクト・ドライブ) モータとリンク機構を用いて, 直交3自由度の動作を実現している. また, 力制御には剛性制御法を用い, 磨き作業への適応について検討を行ってきた. しかし, 剛性制御法は安定な力制御が可能であるが, 高精度の力制御が出来ないという問題がある.

そこで, 本研究では従来の剛性制御系に力情報によるフィードバック制御を加えた力制御法についての検討を行った.

2. 三次元能動作業台

Fig.1 に三次元能動作業台の構造を示す. 三次元能動作業台は, 二次元能動作業台³⁾の直交2自由度運動を基本に, 作業台上部をスライドする構造となっている. また駆動には, 高精度の力制御を行うため, DD モータを使用した. DD モータは負荷軸と電動機構が直結しており, 減速器を持たないため摩擦損失が少ない. このため, 高精度な駆動トルクの制御が可能であるが, 重量が大きいため, 台上に設置することが難しい. そこで, ベースに設置したモータにより, リンク機構を介してスライドテーブルを駆動する方法を採用している.

Fig.1 3 D active worktable

3. 剛性制御

ロボットによる磨き作業を円滑に実行するためには, 工具押し付け方向には柔らかく, 送り方向には剛性の高い制御を行う必要がある. そこで, 従来の三次元能動作業台は剛性制御法を使用していた. 工具押し込み方向をZ_s軸とする対称面座標系における任意の剛性を実現する剛性モデルは

$${}^s F_{mf} = K_d ({}^s X_r - {}^s X) + D_d ({}^s \dot{X}_r - {}^s \dot{X}) \cdots (1)$$

で与えられる. ここで, Xはテーブル変位, X_rはその目標値, F_{mf}は各軸方向の力, K_d, D_dは剛性行列, ダンピング行列である. この剛性モデルを実現するために式(2)を用いてモータトルクを与える.

$$\tau = J^T R {}^s F_{mf} \cdots (2)$$

ここで, Jは作業台のヤコビ行列, Rは対称面座標系への回転変換行列である. この制御において, 工具押付方向に柔らかくなるように剛性行列を設定することで, 教示位置の誤差が生じて, 大きな力の変化を生じず安定な作業することができる. しかし, 精度の良い力制御ができないという問題がある.

4. 力制御法

力制御の高精度化を目的に力センサフィードバック制御の適用を行った. 力センサフィードバック制御は, 高精度な力制御が可能な反面, 接触時に安定な動作を行うことが難しい. そこで本研究では, 従来の剛性制御系に手首力センサの力情報によるフィードバック制御を加えた制御系を考えた.

本研究のシステムでは, 面接線方向には従来同様に剛性制御法を適用し, 押し付け方向にのみ力センサフィードバック制御を適用する. (Fig.2(a))

Fig.2 Concept of the force control

ここで、力フィードバック制御を適用した場合、工具が非接触状態から接触状態に移行する際に衝突による急激な力の変化が避けられない。そこで、ロボットが安定な接触状態になるまでは剛性制御とし、安全な接触状態を確保した後に力フィードバック制御に切り替える方法を考えた。(Fig.2(b))

また、工具位置が動作範囲を超える場合などの異常動作時には剛性制御へ復帰し、安全に作業を終了できるようにした。また、力センサフィードバック制御には、安定性と応答速度の両立を目的として、次式のような PI 制御を使用した。

$${}^s F_{mf} = K_I \int (f_z - f_{tz}) dt + K_P (f_z - f_{tz}) \cdots (3)$$

ここで f_z は力の測定値、 f_{tz} は力の目標値である。この式で求めた F_{mf} を、式(2)を用いてモータトルクに与えることで力センサフィードバック制御を実現できる。

本研究で考えた方法では、接線方向(X_s , Y_s 軸)は式(1)の剛性制御のままとする。一方、法線方向(Z_s)は剛性制御の範囲では式(1)を使用し、力センサフィードバック制御の範囲では、式(3)を使用することで、切り替え型のシステムとした。

4. 実験

構成した力センサフィードバック系を評価するために、まず力の応答について実験を行った。Fig.4 に押し付け力の目標値を 5[N] から 6[N] に変化させたときの応答を示す。Fig.4 の実験結果より、安定かつ高精度な力制御のことが確認された。

Fig.4 Experimental results of force feedback

次に、従来の剛性制御との比較を行うため、ロボットの位置を変化させたときの押し付け力の変化を調べた。

剛性制御における設定剛性は $K=2.5$ [N/mm] として実験を行った。また、力の目標値は 5[N] とした。このときの力の応答を Fig.5(b) に示す。

剛性制御系では、ロボットの変移量に押し付け力が比例して大きくなっているが、力フィードバック制御系ではロボットの位置変化にかかわらず押し付け力が一定に保たれている。

これらの実験結果から、本制御方式により高精度な力制御が可能であることが確認された。

4. まとめ

三次元能動作業台において、高精度な力制御を実現するために、剛性制御に力センサフィードバックを加えた力制御システムを構成した。また、基本的な実験により、提案した力制御方式の有効性を確認することが出来た。

(a) Position of a robot

(b) Contact force

Fig.5 Experimental results

参考文献

- 1) 水野彰, 中嶋新一: ロボットによる力制御のための三次元能動作業台, 日本機械学会北陸信越支部第 40 期総会・講演論文集, pp217-218, (2003)
- 2) 中嶋新一, 水野彰, 酒井伸浩: ロボットによる力制御のための 3D 能動作業台, 第 21 回ロボット学会 (CD-ROM), 2003
- 3) S.Nakajima: Development of an Active Worktable and Its Application to Force Control of Robot Manipulators, Journal of Robotics and Mechatronics Vol.12 No.3, pp 249-253, 2000