作業用ロボットにおける力制御

新 井 健 生*

1. はじめに

作業用ロボットの性能と汎用性を高めるためには、力制御は不可欠である。エンドエフェクタが対象物や環境と干渉するような場合は、力制御を用いることにより、接触状態の微妙な制御、位置決め誤差や機構誤差の吸収、対象物やロボットの破損防止、順応・ならい動作などの実現が可能となる。また、干渉が積極的に起こらない場合においても、動力学を補償した精度の高い位置・軌道制御、障害物回避や手探り動作などが可能となる。

力制御を達成するためには、機構のたわみや変形を巧みに利用した受動的なメカニズムを用いる方法、正確な力の発生が可能なアクチュエータを用いる方法、力センサの信号を用いたサーボによる方法などがある。制御の方法としては、単純な力制御や、指定した作業座標内で位置と力を選択的に同時に指定するハイブリッド制御、位置あるいは速度と力の関係を指定するコンプライアンスあるいはインピーダンス制御などが提案されている。

これらの力制御を実現して実際の作業に適用するためには、解決すべき問題点も多い。まず第1に、力制御を容易に達成し得るロボットマニピュレータのハードウェアが必要である。機構部の摩擦やバックラッシュが少なく、力の発生が容易であることが望ましい。作業によっては大きな力も必要となろう。第2は制御アルゴリズムの演算を高速に実現するソフトウェアと計算機ハードウェアの開発が必要である。

小稿では、3次元立体縫製という具体的な作業を実現するために筆者らが開発したシステムについて、その必要性、具体的な実現法などを力制御の一つの適用事例として紹介する。

2. 3次元立体縫製

アパレル産業における生産システムの自動化とロボット化を図るため、通商産業省工業技術院は昭和 57 年度

から平成2年度までの9年にわたり大型プロジェクト「自動縫製システム」の研究開発を行った。3次元立体縫製の研究はこの中の重要な開発課題の1つで、固定ミシンに生地を送り込んで縫製を行う従来の方式とは全く異なり、マニピュレータ先端に取り付けた小型ミシンを空間内で自由に動かし、立体的に縫製作業を行うことにより、作業の高度化とフレキシビリティをねらったものである¹⁾。図1は3次元縫製の概念図であり、小形ミシン、マニピュレータ、生地支持体から構成されている。このような方式が可能となるならば、多様な服の種類やサイズに対応することができると同時に、作業が非常に困難とされている袖付け作業にも適用でき、フレキシブルな縫製作業が可能となる。

3次元縫製を実現する手段として、例えば産業用ロボットを用いたティーチングプレイバック方式が考えられる。一方、既製服の仕上がり縫製線の精度としては $\pm 0.5\text{ mm}$ という数値がアパレルメーカー側よりあげられている。3次元縫製をティーチングプレイバックによる軌道制御で行なったところ、この精度を達成することが非常に困難であった。さらに、正確な縫製軌道を教示することも大変難しく、服種に応じた各種・各サイズの膨大なデータをそろえているということも実用的ではないと考えられた。

このような問題を解決するため、縫製作業をティーチングプレイバックによる軌道制御ではなく、生地支持体にガイド面を取り付け、この面をなめらかにならうことによって縫製を行う方法を開発することとした。図2はこの方式の基本的な概念を示したものである。ミシン先端に直交座標系を想定し、 x, z 軸方向の力、及び x, y, z 軸回りのモーメントを一定に保つことによりミシンをガイドに押しつけ、 y 軸方向へ一定の速度で動かすことが可能ならばならい動作が行え、ガイドに沿った正確な縫製線が達成できる。このような動作はミシン先端に固定した座標系において、ある方向は位置制御、他の方向は力制御を行うハイブリッド制御によって達成することができる。

ハイブリッド制御を行うためには、位置制御と同時に

原稿受付 1991 年 8 月 13 日

Force Control for Working Robots

* 機械技術研究所ロボット工学部自律制御課

力制御が精度よく行えるマニピュレータハードウェアが必要である。従来のマニピュレータや産業用ロボットでは、各関節は減速機付きのアクチュエータで駆動されているため、摩擦やバックラッシュの影響が大きく、力制御を行うことが困難であった。トルクセンサやリストセンサを用いて、フィードバック制御により力制御を行う方法も数多く提案されているが、本研究では高精度な位置制御と力制御が達成できるようにダイレクトドライブ (DD) 方式によるマニピュレータを用いることとした。

一方、ハイブリッド制御に関しては、Raibert らの提案²⁾以来多くの研究が行なわれているが^{3), 4)}、これを実作業に適用した例は少ない。また、ならい制御についてもいくつかの方法が提案されているが^{5), 6)}、位置や力の座標変換等に要する演算が多いため、これをそのまま 6 自由度のマニピュレータに適用することは困難である。そこで、演算の高速化と高精度なティーチングを不要とすることを目的とした位置と力のハイブリッド制御を開発した。すなわち、まず予め大まかな精度で与えた縫製線のデータを用いた軌道制御系を構成する。一方、マシンが生地支持体と接触する際に発生する微小な力を、マシン先端に取り付けたならいセンサにより計測し、この力情報を基準値と比較し、その偏差を軌道制御の偏差信号に重畳させ、生地支持体に沿った滑らかなならい動作を実現するものである。このような方式を用いることにより、位置に関する座標変換演算を行う必要がなく、多自由度マニピュレータのならい動作が実時間で実現できる。また結果として、ティーチングで与えられた縫製軌道が多少誤差を含んでいたとしても、ならい動作によってそれを吸収し、ガイドに沿った正確な縫製線が実現できることになる。以下、試作したマニピュレータ並びに分散型制御装置、ならい動作による縫製作業の実現方法及びその実験結果等について紹介する。

3. 縫製作業用マニピュレータ

開発されたマニピュレータは力制御を利用したならい動作が行いやすいように以下の特徴を有している^{7), 8)}。

(1) 動作領域が大きく、手先の器用な動作が可能となるように多関節型の構造を用いることとし、可搬重量を大きくするため R—P—P—R—P—R (R: ローション機構, P: ピボット機構) の関節構成とした。また、マニピュレータの大きさは、実作業空間が広く取れ、作業姿勢が特異点からなるべくはなれるように上腕と前腕の長さを等しく 320 mm とし、吊り下げる方式を採用した。

(2) DD 方式を採用し、伝達機構に起因する摩擦やバックラッシュを低減した。ただし、第 3 軸については

図 1 3次元縫製概念

図 2 ならい動作による縫製

重力補償を行うため、減速比 1:1 のアモルファス金属性の薄板を積層したベルト伝達機構を用いている。これは十分摩擦が少なくバックラッシュもないので、DD 方式の特徴を活かすことができるものである。

(3) マシン先端に、ハイブリッド制御に必要な 5 軸方向の微小な力とモーメントを計測するセンサを設けた。

(4) 可搬重量を高めるため、重力項の大きい第 2、3 軸にはカンタウエイト機構を設けた。第 3 軸のアクチュエータを第 2 軸に対して反対側に設けることにより、第 2 軸の重力バランスを取っている。このような機構を用いることにより、アーム全体の重量の軽減と操作性の向上を図っている。

(5) 肩側 4 軸の関節角度出力は、アクチュエータであるメガトルクのモータ (日本精工製) のレゾルバ信号により 153,600 パルス/回転の角度分解能を有している。手先 2 軸については 65,536 パルス/回転の分解能を有する 16 ビットレゾルバを設けている。

(6) 制御用の計算機は 7 台のパーソナルコンピュータ (NEC 製 PC 9801 VM) で構成されている。これはならい動作に必要な大量、複雑な計算を効率的、かつ安価に行うことを目的としたものである。6 台のパーソナルコンピュータを各関節の制御に割り当て、1 台のパーソナルコンピュータを統括用計算機とした。関節の制御を行うパーソナルコンピュータは D/A ボードと PIO

図 3 試作したマニピュレータの構成図

ボードを有しており、D/A ボードはモータの駆動信号を発生し、PIO ボードはレゾルバ信号を取り込んでいる。統括用コンピュータは A/D ボードを有しており、力センサの出力信号を取り込んでいる。7 台のパーソナルコンピュータ間の通信は、機械技術研究所で開発されたコミュニケーションメモリにより行われている⁹⁾。図 3 にマニピュレータの機構を、図 4 に制御用計算機の構成を示す。

4. ならい動作のアルゴリズム

本システムでは縫製作業を行う方法として、生地支持体上に縫製線と平行なガイドを取り付け、このガイドに沿ってミシンを移動させる方法を採用した。具体的には、ミシン先端をこのガイドに軽く接触させることにより位置姿勢を一定に保持し、さらに縫製線の方に一定速度でミシンを動かすようにマニピュレータの動作制御を行う。これは、いわゆる位置と力のハイブリッド制御と呼ばれており、一般に提案されているハイブリッド制御では図 5 に示すように位置や力に関する座標変換演算が必

図 4 分散型制御装置の構成図

要であり、多自由度マニピュレータを実時間で制御することは演算時間の観点から非常に困難である。そこで、本システムでは演算の簡素化を図り、また安定したならい動作を実現するため、縫製軌道データを利用した軌道制御のジョイントサーボ偏差に、ならい時の接触力偏差の積分値を重畳する方式を提案している¹⁰⁾。この方式を採用することにより、図中の点線で示した位置に関する座標変換の演算を省くことが可能となり、演算時間の短縮化が可能となる。

ミシンに固定された座標系 C^m における基準接触力が $F^m_r = (f^m_{rx}, 0, f^m_{rz}, m^m_{rx}, m^m_{ry}, m^m_{rz})^t$ で与えられているものとする。この時、接触力偏差 ΔF^m はならいセンサ情報を利用することにより次のように求まる。

$$\Delta F^m = F^m_r - F^m \quad (1)$$

F^m はセンサから得られる接触力の現在値である。この偏差を打ち消すために必要な各軸で発生すべきトルク ΔT は、運動学で定義されるヤコビアン J を用いることにより次のように求まる。

$$\Delta T = J^T \Delta F^m \quad (2)$$

ここで J は次のようになる。

$$J = \begin{bmatrix} z_1 \times s_1 & \cdots & z_6 \times s_6 \\ z_1 & \cdots & z_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

図 5 ハイブリッド制御系のブロック図

図 6 使用した制御系のブロック図

z_i は C^m におけるマニピュレータ第 i 関節の軸方向を表す単位ベクトル, s_i は C^m の原点から i 軸に固定されたリンク座標系原点への位置ベクトルを表している。一方, 軌道制御に必要なトルク T_p は, 縫製軌道データを θ_r として比例微分制御を行うと次のようになる。

$$T_p = K_p(\theta_r - \theta) + K_d(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}) \quad (4)$$

以上より, 各軸で発生すべき力は, ダイナミクスの補償項 T_d と, クーロン摩擦補償項を加え合わせることにより次のように求まる。

$$T_a = K_p(\theta_r - \theta) + K_d(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}) + \int K_f \Delta T dt + T_d + T_c \text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (5)$$

ここで, T_c は対角行列 $\text{dian}(t_{c1}, \dots, t_{c6})$ であり, t_{ci} は第 i 関節のクーロン摩擦である。また $\text{sgn}(\theta) = (\text{sgn}(\theta_1), \text{sgn}(\theta_2), \dots, \text{sgn}(\theta_6))^T$ である。図 6 は本システムで実際に採用し, 計算機にインプリメントしたハイブリッド制御系のブロック図である。サーボの演算は各サブコンピュータが受けもち, 力センサからの入力, 座標変換, ヤコビアン計算は統括用コンピュータが受けもっている。

肩側 4 軸のジョイントサーボには十分な制動効果と安定な動作を得るために, カットオフ周波数 100 Hz のローパスフィルタが設けられている。なお, 動力学補償項 T_d は与えられた縫製軌道データにより予め計算可能であり, 軌道データとともに保存されている。サンプリングレートは第 1 軸から第 4 軸は 0.8 ms, 第 5, 6 軸は 0.6 ms である。一方, 力フィードバックの項 T_f は, 30 ms ごとに更新され, 各軸に指令される。

ミシンの接触力 F^m はミシン先端に取り付けたセンサにより計測する。このセンサは, 5 つのリン青銅製板状パネで構成され, 接触力によって生ずる歪をストレインゲージで測定する。出力信号を処理して, ミシンに固定された座標系 C^m で発生している力 f^m とモーメント m^m を推定している。

5. 作業実験結果

作業実験として, 袖付けを想定した円弧縫製作業を取り上げた。生地支持体に固定されたアルミ製のガイドは

図 7 軌道制御による作業実験結果

図 9 ならい動作による作業実験結果

写真 1 縫製作業の様子

生地をはさむ面の直径が 130 mm, 奥行き 22 mm のものを用いた。縫製軌道のティーチングは, ミシンを手で持って動かすダイレクトティーチングによりガイド上の適当な 3 点を教示し, この 3 点から円軌道を計算により求めている。したがって, 縫製軌道そのものは正確な円弧であるが, 教示のばらつきにより直径は 130 ± 0.5 mm 程度となっている。求められたこの軌道を等分割して, ミシンの位置と方向に関する 2000 組のデータを求め, 逆運動学により対応する 2000 の関節角度データ θ_r を求めた。これらのデータは 20 msec ごとに関節サーボへ指令され, この結果, y 軸方向の速度は 6.7 mm/s となった。もちろん, この速度は調節可能であるが, 自動縫製プロジェクトの目標値に近い値であることから今回

(a)

(b)

図 8 ならい動作の力とモーメントの応答

の実験ではこれを基準値として用い、ミシンの送り速度もこの値に同期させた。図7は軌道制御による縫製実験の結果である。縫製線の精度はほぼ2.0 mm程度である。この程度の精度となる原因としては、縫製軌道に教示誤差があること、運動学パラメータの誤差やサーボ剛性の低さなどに起因するマニピュレータ自体の位置決め精度が悪いこと、生地支持体が教示時の位置からずれる可能性があること、などが考えられる。この実験結果から、軌道制御のみによる方法では、縫製精度を高めることは極めて困難であることが判明した。

次に、ならい動作による縫製実験を行った。実験では、始め5方向全てについて力の比例ゲインと積分ゲインを一定としてならい動作を行なった。しかし、 m_x と m_z の偏差が大きく、十分に改善されなかったため、これらの2成分に関するゲインをさらに調節した。図8はこの時の力及びモーメントの応答結果である。図中、 f^m_x 、 m^m_x 、 m^m_z に低周波の振動が見られるが、これらは教示軌道のズレによって生じる誤差の影響と考えられる。特に前半の部分が顕著であるが、これは力制御のサンプリング時間が30 msecであるため応答が鈍く、収束が遅くなっていることが原因と考えられる。なお、縫製精度に及ぼす影響は f_x 方向の誤差が主となっている。

図9は縫製作業の結果である。軌道制御に比して、ならい動作の場合では、縫製線の精度が大きく改善され、目標の ± 0.5 mm以内となった。なお、本実験は同じ条件で繰り返し行ない、毎回同様の縫製結果が得られた。また、ガイドも数カ所の異なる位置に設置し、同様の比較実験を繰り返すことにより再現性の確認を行なった。さらに、ガイドを数mm程度故意に移動させ、もとの縫製軌道を用いて作業を行なわせる実験も行なった。この場合、軌道制御のみによる実験では、マシンとガイドが相対的にズレを生じるため作業を遂行することは不可能であった。一方、ならい制御では、センサがガイド面をならうことにより軌道が修正され、確実に縫製作業が行えることが確認された。写真1は縫製作業実験の様子である。

☆ ☆

高度な作業の自動化を図るため、力制御を適用することとし、作業用マニピュレータ、及びそれを用いたなら

い動作によるシステムを構築した。本方式による3次元縫製は、適切なガイドさえあれば正確なティーチングは一切不要であり、しかも必要な縫製精度が十分確保できるフレキシビリティの高い方式である。さらに、バリとりや鋳物仕上げなどならい動作を主体とする作業へも容易に応用が可能である。

参考文献

- 1) 中村, 新井, 大地, “マニピュレータによる3次元縫製技術”, 計測自動制御学会誌, 27-9, pp.793-800, 1988
- 2) M. H. Raibert and J. J. Craig, “Hybrid Position/Force Control of Manipulators”, Trans. ASME J. DSC, 103, pp.126-133, 1981
- 3) 吉川, 杉江, 田中, “ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御”, 日本ロボット学会誌, 6-5, pp.380-387, 1988
- 4) 川村, 松森他, “学習方式による位置と力のハイブリッド技術”, 日本ロボット学会誌, 5-2, pp.109-120, 1987
- 5) 中嶋新市, “ロボットによる経路ならい作業のための超音波近接センサ”, 計測自動制御学会論文集, 22-5, pp.567-573, 1986
- 6) 中村, 花房, “関節形ロボットのセンサフィードバックによる3次元自律ならい制御”, 計測自動制御学会論文集, 21-2, pp.183-189, 1985
- 7) 新井, 矢野他, “7自由度人間腕形ダイレクトドライブマニピュレータの開発”, 日本ロボット学会誌, 5-1, pp.27-35, 1987
- 8) T. Yano, T. Arai et al., “Development of Direct-Drive Manipulator for Automated Sewing”, Proceedings of 17th ISIR, pp.17.55-17.61, 1987
- 9) S. Kokaji, “Collision-free Control of a Manipulator with a Controller Composed of Sixty-four Micro-processors”, IEEE Control Systems, 6-5, pp.9-14, 1986
- 10) 新井, 中村, 佐藤, “ならい動作による3次元縫製”, 計測自動制御学会論文集, 26-4, pp.451-458, 1990

新井健生 (Tatsuo ARAI)

昭和50年東京大学工学部計数工学科卒業。昭和52年同大学大学院修士課程修了。同年工業技術院機械技術研究所入所。移動ロボットの開発、マニピュレータの制御、極限作業ロボット、自動縫製システムなどの研究に従事。現在同所ロボット工学部自律制御課主任研究官。工学博士。昭和61年より千葉大学非常勤講師。昭和61～62年MIT客員研究員。昭和63年度日本ロボット学会論文賞受賞。

(日本ロボット学会正会員)