

触覚情報による産業用ロボットの教示技術に関する研究

鎌田 英博, 安田 星季

Teaching method for Industrial Robot with Tactile Sensor

Hidehiro KAMATA, Seiki YASUDA

キーワード：産業用ロボット, 教示, 触覚センサ

1. はじめに

旭川地方は豊富な森林資源を背景に、家具製造や木製品製造などの木材関連企業が特異的な集積を見せているところがある。地域の家具業界や木製品製造業においては、ライフスタイルやライフステージの変化に対応して、機能性やデザイン性などを高めることにより付加価値を向上させた新製品開発が指向されており、近年、その製品は複雑な三次元形状を有するものが増えてきている。

これら製品の製造工程においては研磨作業が不可欠であるが、その作業の大半を人手に頼るところが多く、特に複雑な形状のものは完全な手作業が必要となっている。このことは人件費の負担によるコストアップを引き起こし、低価格化を阻害することで競争力低下を招くだけでなく、白蟻病や胸部疾患など従業員の健康にも影響を及ぼすものとなっており、早急な対応が求められている。

このため、研磨工程の自動化システムの開発研究を進めた結果、平成8年に木材用の自動研磨ロボットを完成した。しかし、このシステムは、予め形状入力(ティーチング)した材料を自動的に研磨するというもので、材料の形状が変わるとティーチングをやり直す必要があり、システムに精通した選任スタッフが必要となる問題が生じた。多品種少量生産を続ける地域の製造業界にとっては、ティーチングまでの完全自動化が研磨工程の機械化を進める重要なポイントとなる。本研究は、これまでの取り組みをさらに高度化し、自動形状認識システムを付加した自動研磨システムを構築し、安全衛生上の問題を解決し、製品コストの低減を実現しようとするものである。

事業名：一般試験研究

課題名：触覚情報による産業用ロボットの教示技術に関する研究

2. 実 験

2.1 実験装置

試験装置の概要を表1に示す。自由曲面形状の探索・捕捉作業を高速化する目的で、多関節ロボットの各軸目標位置や姿勢を捕捉する触覚アタッチメントを開発した。図1に示すアタッチメントは、触覚部とベース部より構成される。触覚部は加圧導電性ゴム(JSR PCR 101: 丸ワコム電創)をアルミ箔、リード線で挟んだ構成で、耐久性を高めるために熱収縮フィルムでラッピングした。この導電性ゴムは、ゴムを基材とした複合材料で加圧すると電気抵抗が急激に低下するため触覚センサとして用いた。

ベース部は、NCナイロン製の本体にアルミプレートとツールチェンジャ(QC-10A: ピーエルオートテック)を装着している。下端の触覚部を配置した接触プレートは、研磨ツールと同等の形状とした。前述の触覚部の接点材料は、DC24Vまでの電圧負荷が可能であったため、シーケンサ等の外部機器を介さずコントローラのI/O端子に直接接続した。信号ケーブルは、ツール把持の際にツールチェンジャを通してマニピュレータ本体の内蔵ケーブルに連結される。この触覚アタッチメントとワーク表面との干渉状態を計測し、ワークの傾斜や高さを探ることとした。

アタッチメントのサイズや接触プレート上の触覚センサの形状やレイアウト等は、性能に大きな影響を与えるため、図2に示す様に3次元CAD上でその妥当性を検討した。

図3は触覚アタッチメントをマニピュレータに把持させた様子である。マニピュレータのフランジ部(第6軸先端面)とツールチェンジャの間に6軸力覚センサ(型式IFS-50M31A: ニッタ)を装着した。この力覚センサでX, Y, Zの3軸と M_x , M_y , M_z の3モーメントを計測し、その信号は通信ボードを通して直接PCに入力した。

図4は実験に用いた産業用マニピュレータロボット(型式FS06N:川崎重工(株))である。教示作業を自動化するためには、力信号、触覚センサ信号を高速で読み取り、与えられた接触条件を満足するまで力制御移動を繰り返す必要がある。また、教示中の姿勢移動を速やかに行うために、ツール座標系のオフセット値の変更や、回転軸の移動を迅速に行われなければならない。本機は、付属の制御ボードを使って基本的な動作レベルからプログラムすることが出来る。このマニピュレータにコントローラおよび制御ボードを組み合わせ、PCを中心とした制御システムを構築した。さらに、PCにはマニピュレータの動作演算処理の他に力制御および触覚情報などの外部入力信号処理作業も行わせた。

表1 実験装置の概要

機器名(型式)	主な仕様	その他
マニピュレータロボット (FS06N)	可搬重量: 6 kg f 位置繰り返し精度: ±0.05mm 許容負荷モーメント: 6N/m	川崎重工(株)
6軸力覚センサ (IFN-50M31A 25-125)	定格荷重 Fx, Fy: 100N Fz: 200N 重量: 140g	ニッタ(株)
加圧導電性ゴム (JSR PCR 101)	応答速度: 1msec以下 約0.1kgf/cm ² の押付方で導通	ワコム電創(株)

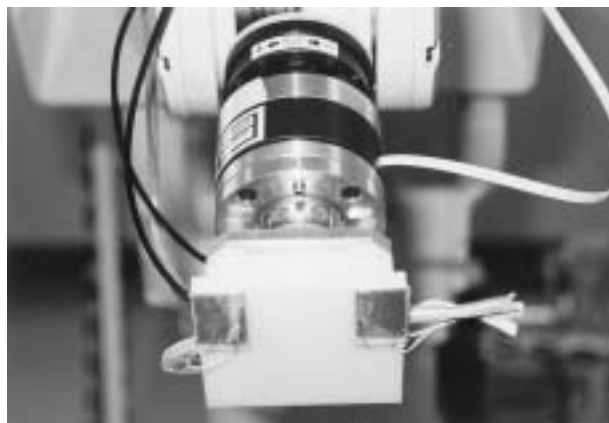


図3 装着したセンサ類



図4 実験機(マニピュレータロボット)



図1 触覚アタッチメント

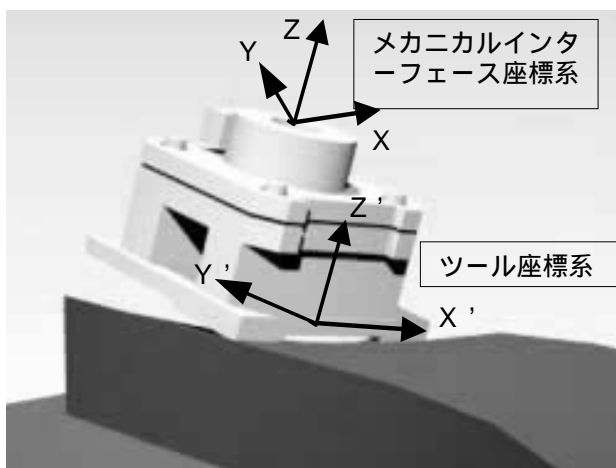


図2 アタッチメント周辺の座標系

2.2 形状認識のための軌道生成

マニピュレータの軌道を生成し制御する方法を図5の状態遷移図に基づいて説明する。②で示した工程で、各軸モーターの移動回転角を算出し、ツール先端を指定した位置まで移動させる。この位置とは、オペレータが教示を希望するベース座標系XY平面上のポイントデータである。ベース座標系のポイントデータをモータ各軸の補間指令に逆変換し、移動させる。この際の指令はロボット言語で生成した位置指令値を10msec間隔で力補正する方式で、実時間位置補正(Real Time position Compensation)と呼ぶ。何れの指令も主にAPI(Application Programming Interface)を使用して行う。図2に示した通り、マニピュレータ側から見た触覚アタッチメントの接触点(ツール座標系X'-Y'-Z')はメカニカルインターフェース座標系(第6軸フランジ面を基準としたX-Y-Z)からのオフセット値(x, y, z, O, A, T)=(0, 0, 125, 45, 0, 0)で定義する。開発したアタッチメントのY軸(ツール座標系Y軸)はメカニカルインターフェース座標系と-45度ずれていることから、Z軸まわりに+45度回転して、Y軸方向を一致させた。教示動作は、このY軸周りの回転移動による。③はアタッチメントを一定圧でワークに押し付けている状態である。接触プレートがワークに接触するまで下

降を継続し、一定圧力に達した時点で停止する。

停止後、次の工程では左右の触覚センサの on/off 状態により 4 つの場合に分岐させることができる。まず、押し付け力を一定に保持した状態で、左センサが反応していれば右に、右センサが反応していれば左に回転運動を続けて適正な姿勢を探索する。左右センサが同時に反応した場合には、回転を中止し、その座標（ベース座標）を教示点として記憶する。この手法の特徴は触覚センサの導通を受けると、即座に状況を判断し回転軸を決定し、回転移動探索を開始することである。

ティーチングシステムの操作性を向上させるため、ダイアログボックス形式でユーザーインターフェースを製作した。図 6 は、本実験のために作成した操作画面である。画面右側にマニピュレータの CG を配置し、実機での試験前に各部を拡大・縮小、移動・回転しながら、上記システムの動作を確認した。ダイアログボックスの作成には、ウィンドウベースの VisualC++ を用いた。図の左下には IO モニターを配置し入出力端子全点の信号を表示させた。また、外部出力に

ついては一部の出力端子から擬似出力を発生させることもできる。したがって、このモニターを利用してシミュレーションモードで触覚センサによる左右の回転方向と回転中心位置の妥当性を検討できる。尚、今回は力センサの出力モニターについて検討していないが、探索時は力センサを含めてシステム全体の動作確認を行う必要があるため、今後の課題とした。

ダイアログボックスの操作手順について説明する。まず、教示を希望する座標点群（XY 座標データ）を作成しテキストファイルで登録する。左上の選択ボタンで、そのファイルを読み込むと、内容をデータリスト画面で確認することが出来る。次に、“動作 API モード”を選択することにより、画面からの指示でマニピュレータが作動可能な状態となる。さらに、Force Reference に目標押し付け力を入力する。今回の実験では Z 軸方向に 1 kgf を設定した。“Start” ボタンをクリックすると作業開始し、ファイルデータでリストした座標に移動しワークの表面形状を探索する。各位置で記憶した座標データは、データリストの右欄に表示すると共に新たなファイルとして登録する。さらに、ベース座標系での現在値と力センサの出力も表示させ、操作性の向上を図った。

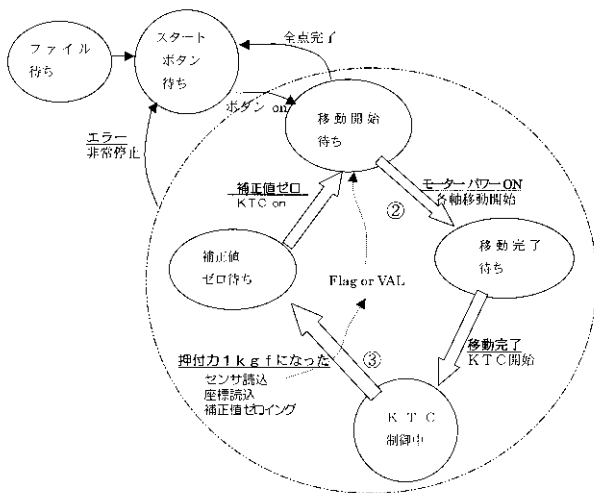


図5 状態遷移図

3. 形状認識システムによる面形状の捕捉試験

開発したティーチングシステムの性能を検証するため、実験機による教示実験を行った。実験に用いたワークは発泡樹脂製で、直方体の上面に捻り（正弦曲線）を与えた形状を NC 加工機により削り出したものである。この捻れた面上の希望する教示位置 3ヶ所で、上記の探索動作を連続して行わせた。図 7 にその探索の状況を示す。測定は 5 回繰り返しい、各測定値を比較、検討した。

実験機ではツール先端の姿勢を ZYZ オイラー角で表現する。オイラー角とは、移動座標系（ツール座標系）{P}を基準座標系（ベース座標系）{A}と一致させた状態から{P}の 3つの軸、 \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} 軸の回りに回転させて姿勢を決定する場合、この 3つの回転角の組み合わせをいう。{P}を、 \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} 軸まわりに順に、角度 O, A, T (deg) だけ回転させると、{A}に対して{P}の最終姿勢は、次のような等価回転行列で示すことができる。

$${}^A R_{ZYX}(O, A, T) = \begin{bmatrix} cOcAcT - sOsT & -cOcAsT - sOcT & cOsA \\ sOcAcT + sOsA & sOcAsT + cOcT & sOsA \\ -sAcT & sAsT & cA \end{bmatrix} \quad (1)$$

この回転行列から Z-Y-Z オイラー角の各ベクトル成分は以下のように書くことができる。



図6 操作画面ダイアログボックス

$${}^0R_{Z^1Z^2}(O, A, T) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{22} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで ${}^1\hat{X}_P, {}^1\hat{Y}_P, {}^1\hat{Z}_P$ は座標系{P}の主方向を与える単位ベクトルである。また(2)式の回転行列の各成分は、ベース座標系の主軸方向にツール姿勢ベクトルを投影したものである。したがって、ツール座標系の姿勢ベクトルのX方向成分がベース座標系となす角度が測定値と一致することになる。ここでその測定角度を θ (deg)とすると以下のように書くことが出来る。

$$\begin{aligned} \theta &= ATAN\left(\frac{\sqrt{r_{11}^2 + r_{31}^2}}{r_{21}}\right) \\ &= ATAN\left(\frac{\sqrt{cOcAcT - sOsT^2} + sAcT^2}{sOcAcT}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

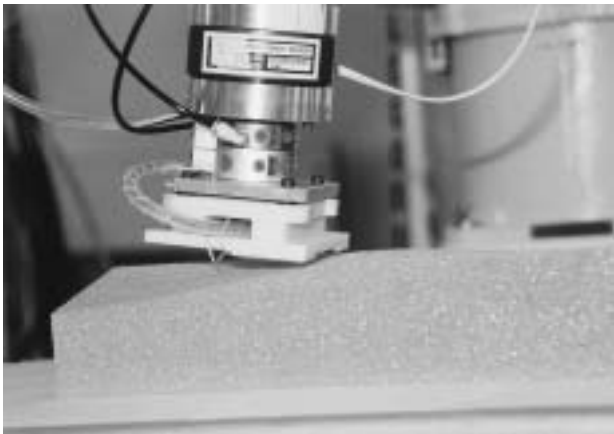


図7 形状探索の様子

4. 面形状の捕捉試験の結果

マニピュレータロボットによるティーチングシステムで、ワークの表面の傾斜角度を探索する実験を行った結果、設定した手順どおりに動作し、姿勢データも確実に表示した。また、ダイアログボックスからの指示に従って、一連の作業を計画通り実行し、指定点の位置・姿勢情報を新たなデータファイルに登録することを確認した。

触覚アタッチメントによる測定結果を図8に示す。何れも次の3条件をそれぞれ5回繰り返し測定し、横軸に測定値のX座標値、縦軸に(3)式から算出した傾斜角度 θ をプロットした。条件Ⅰは、XYZ各軸を同時に力制御し、ゲインを0.04mm/kgとした場合で、条件ⅡはZ軸についてのみ力制御を行いゲインは条件Ⅰと同じである。条件Ⅲは、Z軸についてのみ力制御を行い、ゲインを0.01(mm/kg)に低下させた場合である。尚、力制御の押し付け力を1kgfに、サンプリングタイムを10msecに設定している。

条件Ⅰの場合には力制御中にツール先端で発生する振動を観察したが、この現象は3軸同時に力制御をかけたことに起因するものと思われる。振動現象は条件ⅠのX座標がⅡ、Ⅲと比べると教示指定点からややずれていたり、 θ が大きな値をとる原因とも考えられる。条件Ⅱでの測定中もⅠに比べてやや低減しているものの同様の振動が観察された。条件Ⅲになると振動がさらに減少しており、測定値も一定の範囲内に納まっている。

図9は、3ヶ所の測定点でのZ軸方向の座標値の状態を表している。前述と同様に、条件Ⅲの場合にはデータ間の差

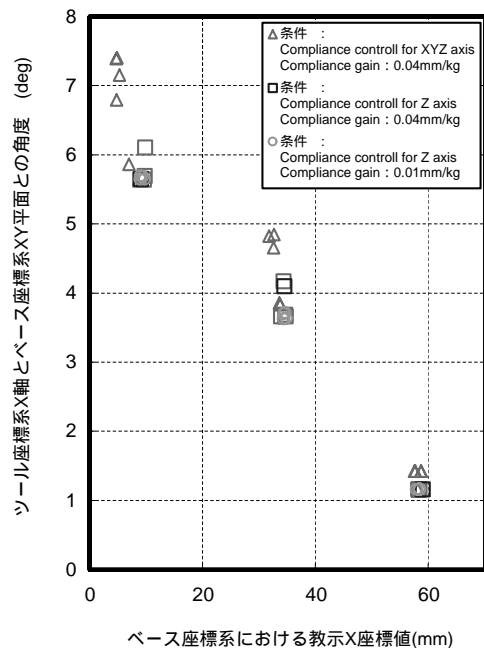


図8 姿勢測定の結果

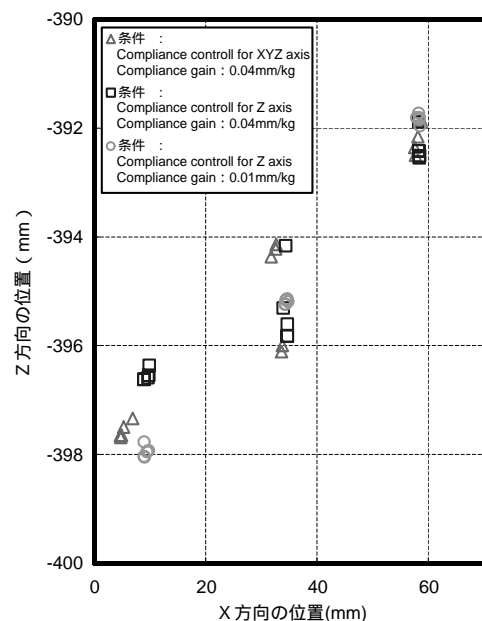


図9 Z軸方向測定値

が小さく安定した測定を行っている。今回の実験のように、力制御をかけながら計測動作を行う場合には、発生した振動を低減するために力制御軸数を絞り、ゲインを低下させる対策が効果的であった。

5.まとめ

触覚センサとオープンアーキテクチャー仕様の産業用マニピュレータロボットを用いて、次のような自動教示方法を提案する。この方法は、主に木製部品の曲面切削後に行われる仕上げ研磨作業への実用化を目標にしている。

- 1) 移動中のマニピュレータが力や触覚信号を認識し、高速で次動作を決定できるように、実時間位置補正機能を活用した形状認識動作プログラムを開発した。
- 2) ツールの移動の柔軟性を高めるためにマニピュレータロボットが稼働中でも、必要に応じてツール座標系を移動したり回転軸を変更するなどの手首動作の柔軟性を高めた。
- 3) 触覚を持つツールを回転させながら曲面との接触点を探索できるように、力信号や触覚信号に追従した位置および姿勢制御の新たな活用方法を作製した。

その他、ダイアログボックスによるユーザーインターフェースを作成し操作性を検討した結果、操作盤のレイアウトや情報の内容などを比較的容易に編集できることがわかった。また、力制御を使用したワーク傾斜角の計測実験を行った結果、制御軸数を絞り込むことやゲインの調整で振動を低減し安定して測定できることがわかった。今後、本システムを木製品の曲面研磨作業へ使用しながら、その実用性を検討する予定である

これらの手法は、組み合わせ次第で産業用マニピュレータロボットの適応化技術として活用も可能と思われる。現在、道内でもマニピュレータロボットへの関心が高まりつつあるが、PCも含めて機器の低価格化が進めば、さらに製造工場での実用化ニーズは高まるはずである。今後も重要な製造技術として期待し、普及を進めたいと考えている。