

# 研磨作業用ロボットに関する研究

鎌田 英博, 吉成 哲, 中島 康博, 安田 星季  
中村 勝男, 永滝真太郎\*, 小林 祐司\*

## Development of Finishing by Manipulating Industrial Robot

Hidehiro KAMATA, Satoshi YOSHINARI, Yasuhiro Nakajima, Seiki YASUDA  
Katuo NAKAMURA, Shintaro NAGATAKI\*, Yuji KOBAYASHI\*

### 抄 録

産業用ロボットのための力フィードバック制御は、人の圧感を活かした作業を代替えるに適したシステムとして提案されている。従来、ワークの表面研磨、稜線の面取り、機械加工バリ取りなどの工程は、その複雑さから自動化が最も困難であると認識され、主に人手に依存してきた。本研究は研磨工具を把持させた力制御ロボットによる自動研磨システムの構築を目指すために、主に力センサから得た信号のフィードバック制御方式の特性を把握し研磨工程への適応性を検証した。さらに、実用化の鍵を握る分野として、木工製品の木地研磨への応用を進めた。その結果、ロボットを活用した仕上げ研磨は非常に良好な研磨面を得ることが明らかになった。また、ツールとワークの適正な位置関係を見つけるために、新たな教示技術も考案し実験的に検討した。

**キーワード：**知能ロボット，力制御，作業をするロボット，エンドエフェクタ，研磨，木材

## 1. はじめに

木工製品の木地研磨は切削工程によって生じた木材表面部の圧縮繊維が塗料溶剤等を吸湿することによって起きあがる「毛羽立ち」を抑制し肌触りの良い仕上面を創成するために必要不可欠な作業である。しかしながら、意匠曲面を有する木材の研磨は専ら人力に頼っているのが現状であり、これが製造コストの削減や生産性向上の妨げとなっている。また、作業時に発生する粉塵や振動工具の長時間使用が人体に及ぼす悪影響など作業環境も望ましいものではない。とくに、北海道内には木製品の製造企業が多く、国内、海外の製品との競争に打ち勝つためにはコストダウン対策が重要な鍵を握ると思われる。そこで、産業用ロボットの有効活用を目指し、開発した力制御による研磨ロボットの適応化を図った。機械化を進める際には、人の手作業のデータ化などの基本的な加工条件が不足していたため、新たな対応方法など未知の領域も多かった。そこで、この技術の完成度を高めるために、ツールとワークの適正な位置関係を自動的に探索する技術を考案

し実験的に検討した。その結果ロボットを活用した仕上げ研磨は、人が行った場合と比べて遜色の無い研磨面を得ることができた。

## 2. 力制御による研磨

### 2.1 力制御機能

実験に使用したロボットアームを図1に示す。これは6軸直交座標型で、メカニカルインターフェース近傍に力覚センサを装着し、力制御により目標軌道を補正しながら移動する機能を持つ。

実験で扱った力制御はいわゆるインピーダンス制御である。この方式はエンドエフェクタが物体に接触したとき、それ以上無理に押しつけることなく、アーム全体の剛性を小さくすることで力を間接的に制御するものである。その結果、一定の押し付け力となるように目標軌道を修正することになるため、未知の表面の形状に依って滑らかに仕上げる作業、例えばワークの表面研磨、研削作業、鏝落とし、ワークの稜線の面取りおよび機械加工バリ取り等に有効と思われる。以下にその制御方法を記す。

\* 東芝機械株式会社

図2は工具先端の目標軌道の修正方法を示す。この図では工具先端を一定速度で送るとき、進行方向に対し垂直方向に押し付け力が一定になるように修正している。目標軌道  $r$  は以下のようにして求める。

$$r = r_p + \int K_f(F_d - F)F_a dt \quad \dots\dots(1)$$

- $r_p$  : プログラムにより指定される位置制御時の目標位置
- $K_f$  : 力制御ゲイン
- $F_d$  : 指定した方向への目標押し付け力の大きさ
- $F$  : 指定された方向の検出力の大きさ
- $F_a$  : 力修正方向単位ベクトル

本方式では検出力  $F$  の方向と、修正方向ベクトル  $F_a$  を独立に扱っている。例えば、面取りをしている状態では切削工具による主分力、背分力が発生するが、反力の状態は工具回転面内の方向でアップカットやダウンカット、稜線の凹凸の状態によって変化する。したがって、反力の方向は機械加工面に沿った方向が支配的であるとは限らない。ゆえに、力の検出方向(反力の方向)と力制御方向(修正方向)を独立に扱った方が適応性が高いと思われるからである。

より高品質な仕上げ作業を行うため力制御関係のパラメータを設定したので主な内容について説明する。これらの項目は研磨ツールとそれを把持するエンドエフェクタの機能に依存する面も多い。



図1 実験用ロボットアーム

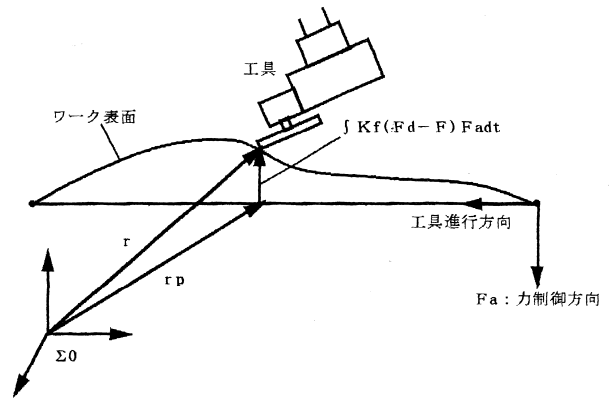


図2 力制御による目標軌道の修正

### 2.1.1 押し付け方向パラメータ

基準方向、基準方向の定義座標系、押し付け方法で構成されている。定義座標系をふまえた基準方向  $D$ 、工具進行方向ベクトル  $V$  とすると、押し付け方向  $F_a$  は以下ようになる。

#### a 基準方向に直接押し付ける方法

グラインダ作業、磨き作業など平面的、曲面的加工に適用できる。

$$F_a = D \quad \dots\dots(2)$$

#### b 工具の進行方向と基準方向の外積方向に押し付ける方法

面取り、バリ取り作業など直線的、曲線的加工に適用できる。

$$F_a = V \times D \quad \dots\dots(3)$$

### 2.1.2 検出力方向パラメータ

検出方向、検出方向の定義座標系で構成されている。検出方向には、通常の並進力  $F_x, F_y, F_z$ 、工具重心回りのモーメント  $M_x, M_y, M_z$ 、平面内合成力  $F_{xy}, F_{yz}, F_{zx}$ 、全合成力  $F_{xyz}$  のいずれかを設定できる。

### 2.1.3 カバターンパラメータ

押し付け力のパターンを設定するパラメータである。工具送りの加減速時に発生するワークの削り込みを防止するため、ワークの切削開始及び終了時に押し付け力の抜重を行うためのパラメータである。

### 2.1.4 力制御ゲインパラメータ

式(1)に記される力制御ゲインを設定するためのパラメータである。

## 2.2 研磨試験

実験で使用したツールはベルトサンダー方式のもので、その外観を図3に、研磨条件を表1に示す。また、表2にはアー

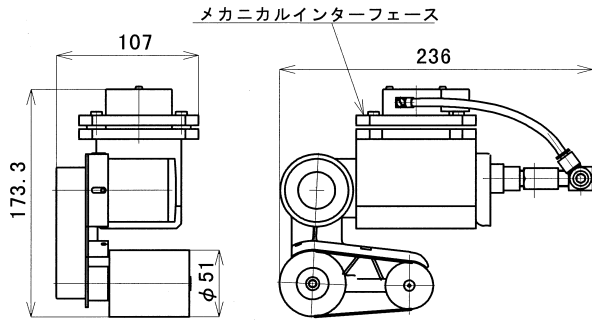


図3 使用した研磨ツール

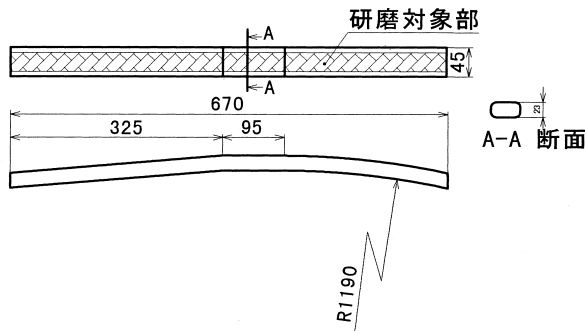


図4 試験用ワーク

ム先端のメカニカルインターフェース部近傍に装備した6軸力覚センサ(ニツタ株式会社)の特性を示す。この力覚センサからの出力から押し付け圧の変動を観察できる。まず、図4に示す形態のワークの上面に沿ってツールを移動させる軌道プログラムを生成した。その際の設定条件を以下に述べる。まず、ワーク座標系はロボットを背にしてワークに向かい前方がY軸+, 右手側がX軸+, 上方がZ軸+となるように設定した。これはX軸に平行に工具が移動するとき、NC加工機と同様の座標系となり、現場でなじみやすいと思われるからである。また、人が工具を操作するとき約15度傾斜させて押し付けることが観察されたため、この座標系でY軸に対して-15度回転させた方向を、目標とする押し付け方向とした。さらに、研磨ベルトの駆動用プーリーはコンタクトホイールとしての機能も兼ねており、一定の押し付け力で面上を移動する。ワークはあらかじめ、木材加工用縦軸NCフライス盤(NCルータ)にて切削加工されている。

人の研磨作業を代行するためには、ツールを適度な力で押し付け、面の変化にスムーズに追従するかが重要である。そこで実際にロボットアームで研磨作業中の押し付け力の変化を測定し、その安定性を評価した。

2.3 試験結果

図5は前述したワークの上面をX軸+方向に研磨作業中に力センサから出力される信号の様子である。①は押し付け力14.7Nで接触判定を行い、材料の位置を確認している状態

表1 研磨条件

研磨ツール	空気圧駆動式ハンディベルトサンダー 型式: RMB-1型(オフィスミン製) 重量(把持具を含む): 3.6 kg 空気供給量: 300 l/min 空気供給圧力: 6 kg/cm <sup>2</sup> (0.5Mpa) ベルト周速: 800 m/min コンタクトホイール: シリコンゴム製
工具オフセット	(x, y, z, a, b, c) = (-36.0, -5.0, 250.0, 180, 0, 90)
研磨紙	レジンベルト 型式: W14A180 #240
工作物(ワーク)	ミズナラ材(含水率 約8%)
押し付け力	2 kgf
工具送り速度	50 mm/min

表2 6軸力覚センサの性能

	定格	非直線性	ヒステリシス
F <sub>x</sub>	22kgf	0.06%	0.05%
F <sub>y</sub>	22kgf	0.08%	0.12%
F <sub>z</sub>	44kgf	0.08%	0.05%
M <sub>x</sub>	200kgf・cm	0.06%	0.11%
M <sub>y</sub>	200kgf・cm	0.05%	0.04%
M <sub>z</sub>	200kgf・cm	0.13%	0.07%

型式: UFS-3015A50-U560 (SN-N763)

ある。その後、一旦ワークから離れてエアバルブを全開し工具を作動、②で再度ワークに接触して研磨を開始している。③はワークの軌道が非線形に接続している個所であり、予想以上に圧力が増加している。④の位置で研磨作業は終了し工具をワークから回避させている。⑤で工具のベルト回転を停止しており振動現象は消えている。②から④までの移動中はほぼ一定の押し付け力で研磨しているのが確認できる。また④の位置で力が増加しているが、原因は明らかにできなかったが、この位置で工具姿勢はY軸の+方向に回転しつつ移動

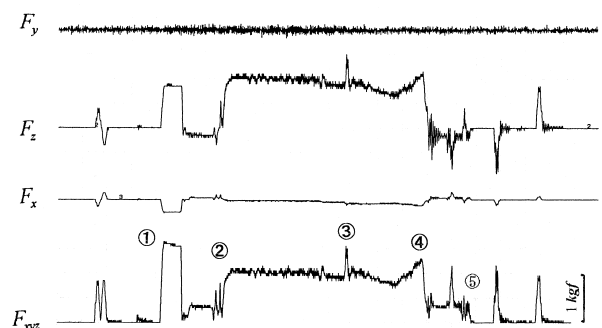


図5 研磨中の力検出信号

押し付け力: 1.0kgf  
積分ゲイン: 3.3mm/sample/kgf  
工具送り速度: 50mm/sec

しているため、工具姿勢とワークから受ける反力の方向にロボットの機構上の特性が作用した結果と考えられる。ロボット工学では機構と工具を含めた制御系全体の特性は充分把握されておらず、工具のファクターの相違が系全体の制御にどのような影響を及ぼすかは今後の課題として非常に重要と思われる。なお、この図では4種 ( $F_x F_y F_z F_{xyz}$ ) の信号出力のうち  $F_x$  の値を他の3出力の  $\frac{1}{2}$  として表示した。また  $F_{xyz}$  は各軸の合成力で

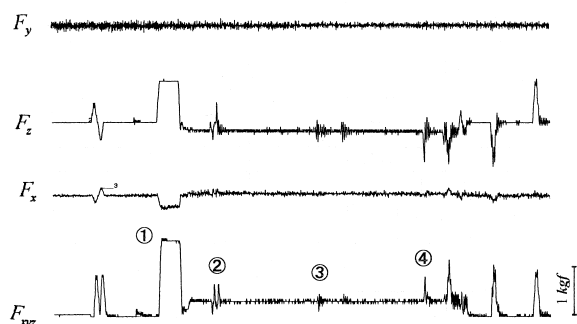
$$F_{xyz} = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2} \quad (9)$$

に基づいて算出している。図をみると  $F_{xyz}$  の成分中  $F_z$  の値が大きな割合であることがわかる。

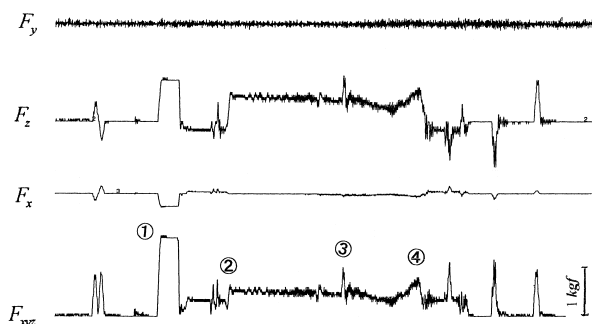
図6は押し付け力0.2kgfで研磨を行った場合の軌道を移動中の力検出信号を示している。

この場合は②の位置でわずかに接触したがそれ以降はワークから離れたまま移動している。この原因として、工具重量と比べて目標押し付け力が小さいため、誤差成分やノイズの影響で力制御が有効に機能しなかったと考えられる。

図7は押し付け力0.5kgfの場合である。②や③の位置で



**図6 研磨中の力検出信号**  
 押し付け力：0.2kgf  
 積分ゲイン：3.3mm/sample/kgf  
 工具送り速度：50mm/sec



**図7 研磨中の力検出信号**  
 押し付け力：0.5kgf  
 積分ゲイン：3.3mm/sample/kgf  
 工具送り速度：50mm/sec

は大きな振幅で力が変動しているが、そのほかは約0.5kgfの力で押し付けている。しかし、目標押し付け力に対する振動成分の割合が大きい上、工具の接触開始点でバウンドしているため、仕上がり面の精度は低下しており、良好な研磨状態とは言えない。

### 3. 教示の自動化

適正な仕上げ面研磨軌道をロボットに教示させるためにセンシングによる教示点探索方法を考案した。予めコンタクトホイールの姿勢を一定とし、教示点高さ方向の位置をラフに教示し、再教示として Reteach (Pn) なる最適点探索マクロ命令を中核とする自動教示作業を実行する。

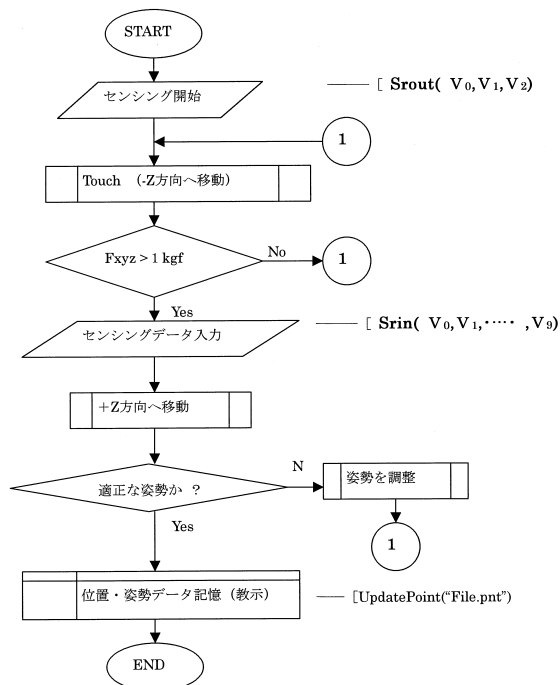
#### 3.1 教示点探索方法

##### 3.1.1 再教示プログラム

再教示プログラムは、ロボットの制御を行うメインソフトウェアに組み込まれるコンポーネントとして作成した。その主な機能は初期教示させたロボットプログラムを変換して自動再教示プログラムを生成する。再教示を必要とする座標点では Reteach (Pn) を実行して適正な位置・姿勢情報を新たに取得する。

##### 3.1.2 最適点探索マクロ命令 Reteach (Pn)

Reteach (Pn) は、図8に示す動作によりセンサーとワークの接触情報から研磨動作のための適正な位置・姿勢を決定する。その主な測定内容は、下記の通りである。



**図8 最適点探索マクロ命令**

- ① 指定された再教示点までエンドエフェクタを移動させる。
- ② -Z方向へ移動して触覚センサをワークに押し当てる。
- ③ 押し付け反力  $F_{xyz}$  がしきい値に達すると移動を停止する。
- ④ 2個のテープスイッチからの接触信号を読み込む。
- ⑤ 両方のテープスイッチがONであれば工具はワークと平行と判定する。
- ⑥ 両方のテープスイッチがONしていなければ+Z方向へ回避し、姿勢を変えて再度探索する。

この際、2分法による中間点探索のアルゴリズムを使用した。また、測定したポーズ型座標データ  $P_n$  はプログラム終了時にグローバル変数に引き渡した後でデータファイルに上書きし、正式な研磨動作用のデータファイルとして登録する。③の押し付け反力とは力覚センサの出力信号で、座標系  $\Sigma S$  上の  $X_s, Y_s, Z_s$  の合成力  $F_{xyz}$  を意味する。また、教示点  $P_n$  はワーク座標系  $\Sigma W$  を基準としたツール座標系  $\Sigma T$  の位置と姿勢で表現されるが、この再教示作業ではX軸回りの姿勢とZ軸方向の位置を修正する。

### 3.2 教示実験

図9は試作した触覚センサ、図10はそのヘッド部で、コンタクトホイールに2本のテープスイッチを巻装しており、その信号と力覚センサの信号からワーク面（凹面）との接触を判定し、教示点  $P_n$  の位置と姿勢を取り込む。また実験に使用したワークの材料は、ミズナラ（含水率約8%、比重0.64）で、サイズは縦452mm、横436mm、厚さ22mmである。椅子の座板として中央部（縦375mm、横364mm）をNCフライスで2.5次元曲面加工を施している。従来の工程では、ピックフィードによる加工痕をストロークサンダーを使用し、平滑な面に仕上げる必要があった。この作業をロボットに代行させるため研磨作業用の軌道プログラムを作成し、上述の再教示システムの活用を試みた。その教示作業の様子を図11に、座面上の経路を図12に示す。本実験では、この経路中移動ベ

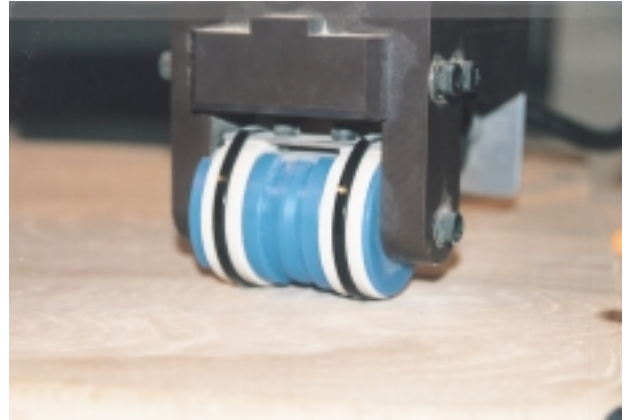


図10 教示用センサのコンタクトホイール

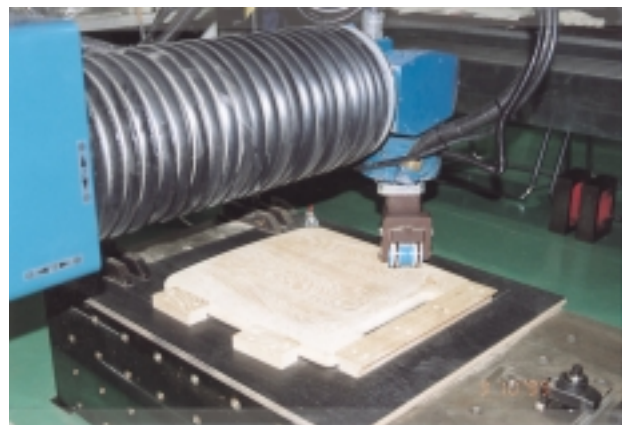


図11 教示動作

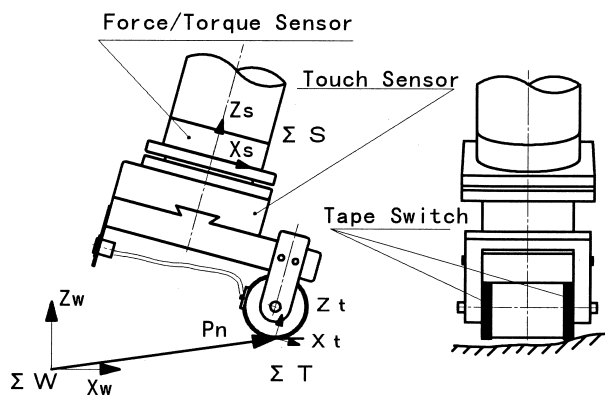


図9 教示用触覚センサ

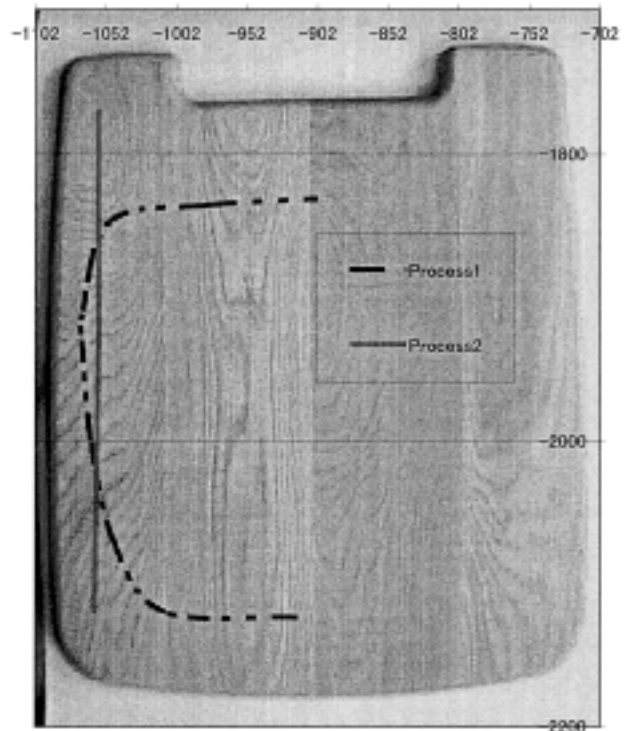


図12 座面上のツール軌道

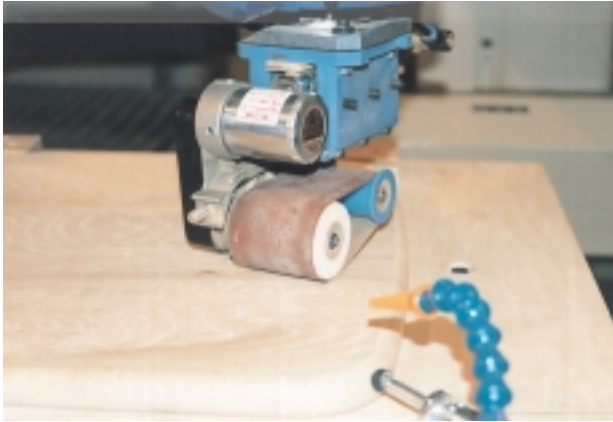


図13 研磨の様子

クトルに変更の少ない Process2 について検討した。次に再  
 教示の結果を基に研磨作業様子を図13に示す。研磨条件は、  
 押し付け力 2 kgf, 送り速度100mm/sec, 研磨ベルト速度  
 800m/min である。

研磨作業に使用するツールは図3のコンタクトホイールを  
 駆動軸とするハンディベルトサンダーである。

### 3.3 教示試験の結果

再教示プログラムを利用した仕上げ研磨作業の効果を確認  
 するため、再教示前後の研磨作業中の力信号を観察し比較し  
 た。これらデータと、目標押し付け力 (Desired Force) も  
 表示し両者を比較して力制御の効果を検討した。

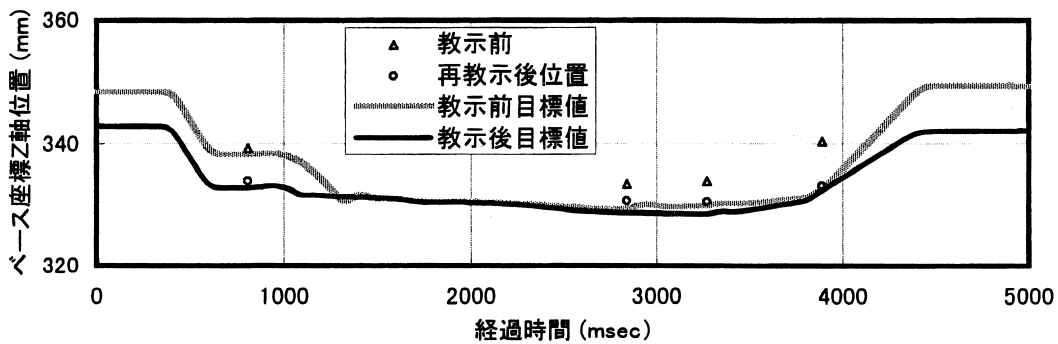


図14 ツール軌道と教示前後の座標値

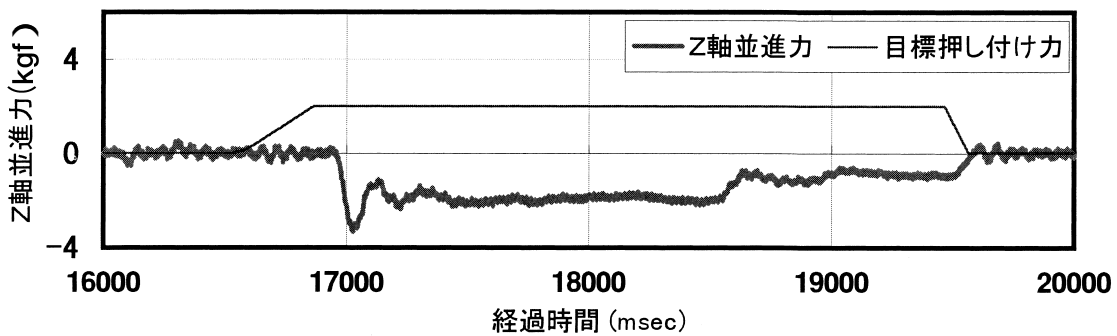


図15 教示前の力センサ出力 (Z軸並進力)

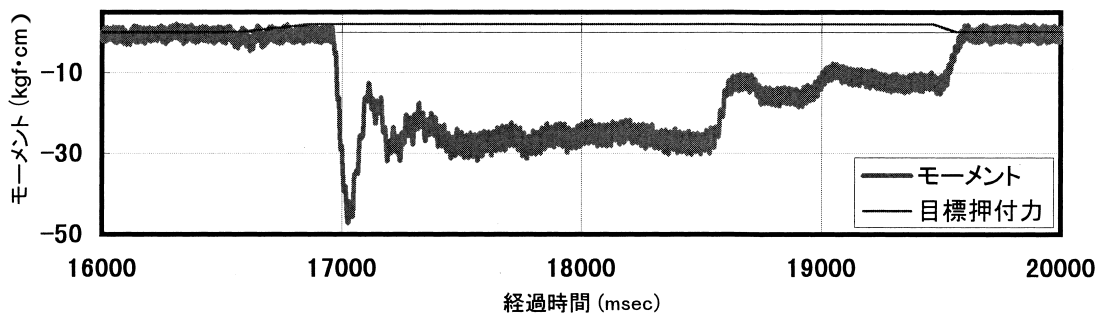


図16 教示前の力センサ出力 (X軸回りモーメント)

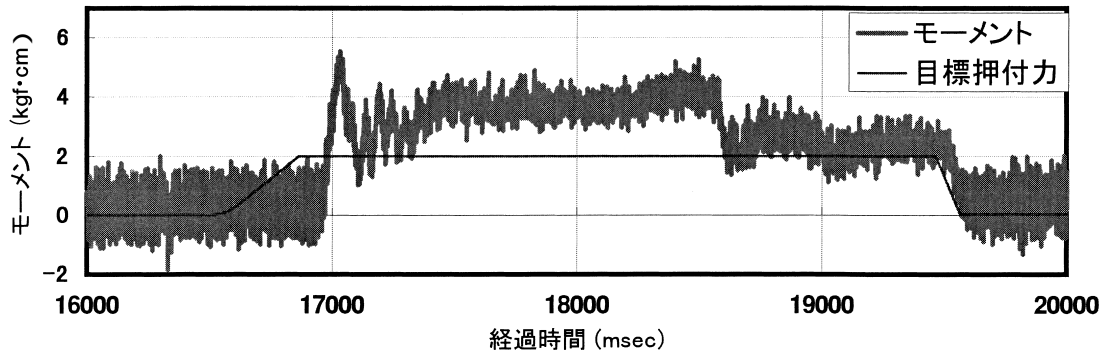


図17 教示前の力センサ出力 (Y軸回りモーメント)

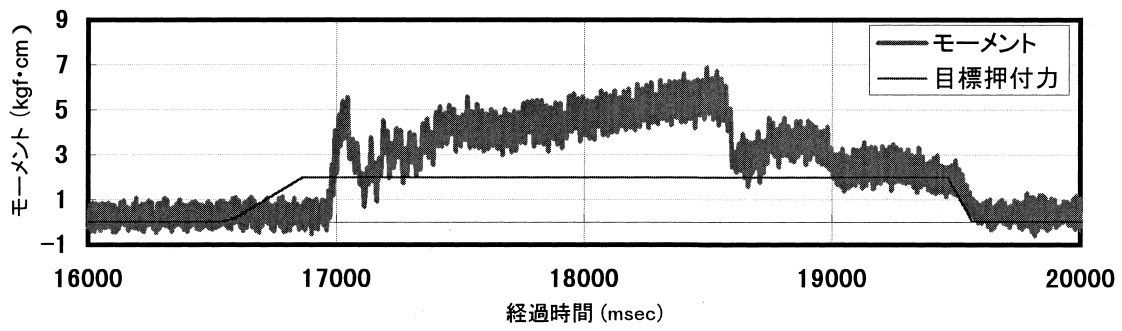


図18 教示前の力センサ出力 (Z軸回りモーメント)

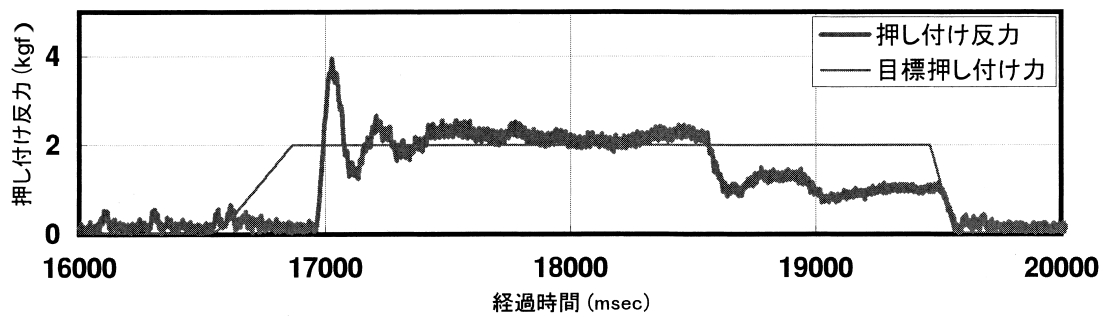


図19 教示前の押し付け反力

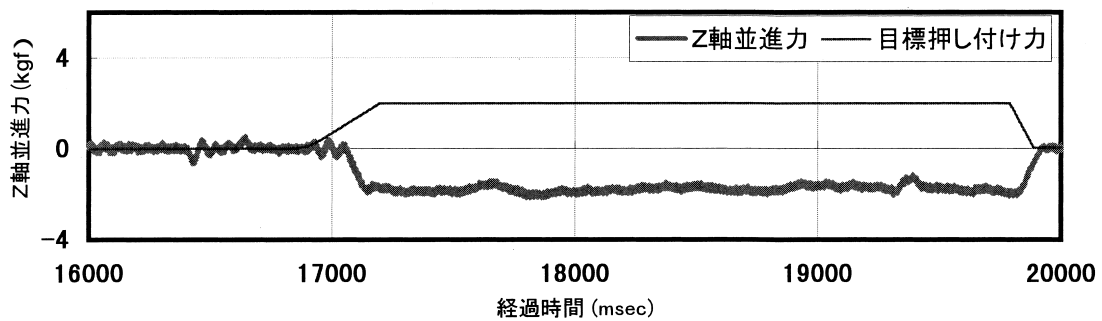


図20 再教示後の力センサ出力 (Z軸並進力)

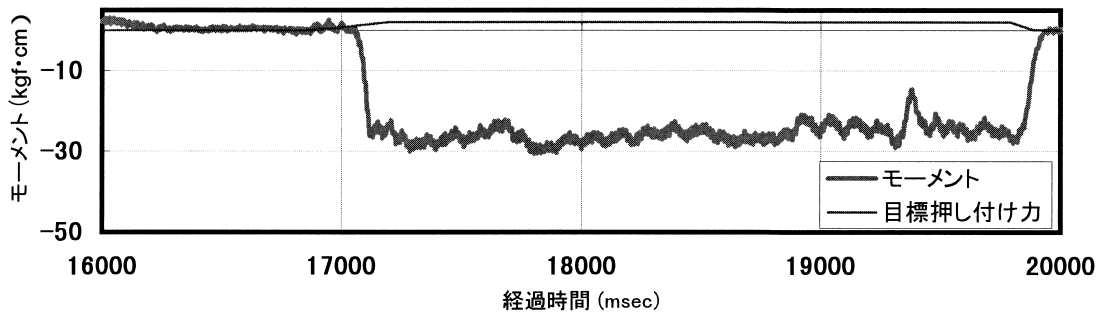


図21 再教示後の力センサ出力 (X軸回りモーメント)

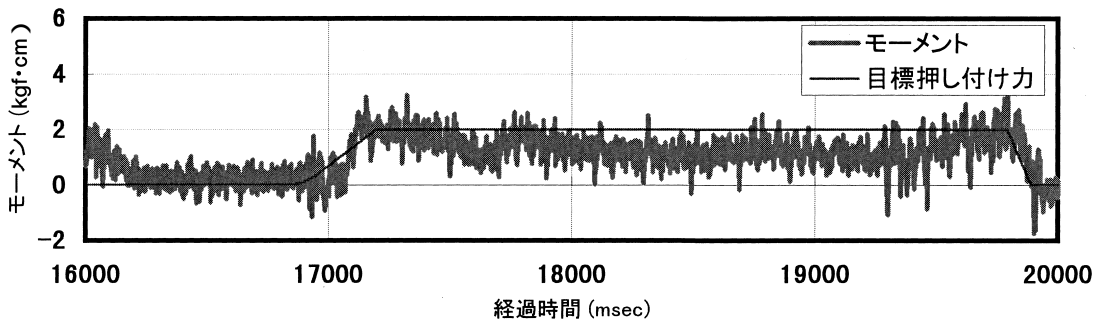


図22 再教示後の力センサ出力 (Y軸回りモーメント)

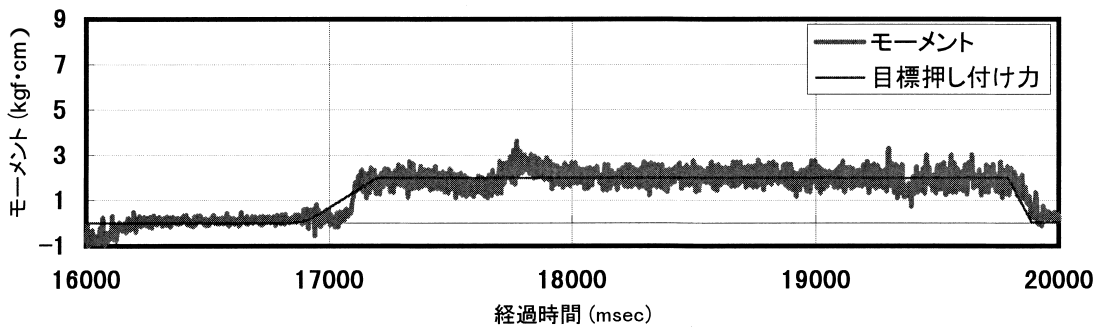


図23 再教示後の力センサ出力 (Z軸回りモーメント)

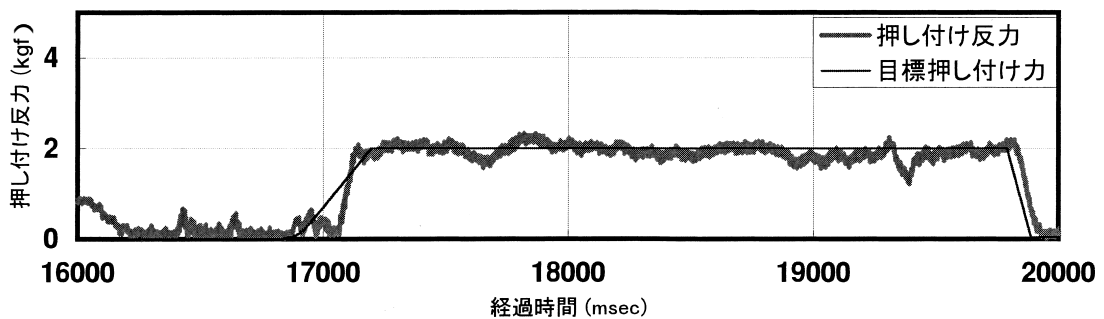


図24 再教示後の押し付け反力



### 3.3.1 教示前の研磨軌道

図14に教示前後の軌道の位置・姿勢のデータを比較した。工具が接触開始時点で教示位置に影響されているが、その後は両者とも力制御により面に追従している。

図15は教示前のZ軸並進力、図16から図18は教示前のX軸、Y軸、Z軸回りのモーメントで何れも研磨動作時の力センサ出力値である。図19はX、Y、Z軸の合成力を基にした制御信号による作業中の押し付け反力である。接触時の様子を見ると目標押し付け力から大きく外れ、ワーク面に追従した動作は行なわれていない。とくに、研磨動作開始時にはセンサ出力信号に大きなオーバーシュートが生じている。尚、全ての図中に目標押し付け力を併記し、研磨動作の応答性を示した。

### 3.3.2 位置と姿勢の教示による研磨軌道

同様に図20は再教示後のZ軸並進力、図21から図23は再教示後のX軸、Y軸、Z軸回りのモーメントで何れも研磨動作時の力センサ出力値である。図24は、この値を基にした制御信号による研磨動作時の押し付け反力である。この押し付け反力と目標押し付け力は教示前と比べてかなり接近し、工具はスムーズに研磨軌道を移動していると推測される。また、研磨開始時のオーバーシュートも現れず、再教示の効果は明らかである。また、姿勢修正の効果は再教示前後のY軸回りのモーメント値の減少に見て取れる。さらに、モーメントで見られる振動現象は押し付け反力に影響を与えておらず、研磨動作はかなり円滑に進んでいる。

## 4.まとめ

力制御ロボットによる木質部材の研磨システムについて以下の課題について検討した。

- (1) 機械系の剛性が高く、カフィードバック制御が可能な産業用ロボットアームを活用して木質部材の研磨作業が可能なシステムを開発した。
- (2) 一定の押し付け力となるように軌道修正する方法の力制御を提案した。この方法で木製椅子の自由曲面部を仕上げたところ、目標押し付け力に追従した押し付け反力を維持した作業を行うことが出来た。
- (3) 開発した研磨システムは工具の往復振動やベルト回転による振動による影響を受けず、一定の研磨条件において、その研磨面は良好であった。
- (4) 研磨軌道の教示法の簡便化を目的に、触覚センサーをワークモデルの曲面に接触させ、エンドエフェクタの位置と姿勢を自動的にワークの曲面に倣わせる手法を考案し、仕上げ研磨工程に適用したところ非常に良好な仕上げを行うことが出来た。
- (5) 研磨動作開始時に接触開始点でオーバーシュートの発生

率が高いため、今後有効な対策を検討する必要がある。

人が工具を保持しての重研削は過酷であり、しかも粉塵や機械振動による身体への悪影響も懸念されている。このような作業環境を考えると、作業をするロボットへの需要は今後も期待できる。また、近い将来想定される人手不足に対応するものとしても、前向きに検討すべき時期が来ている。さらに、木質材料はリサイクルが可能で人に優しい材料として、高齢化社会に歓迎され需要は伸びると思われる。しかし、資源の枯渇などを理由に年々低質化し樹脂等との複合材料の比率も増加している。木材と同様に複合材料もその繊維性故に、機械加工のみでは良質な仕上げ面を得難い。今後も研磨工程へ負担は一向に低減しないものと思われる。本研究は、木製品製造業の長年の懸案であった研磨作業に真正面から取り組んだもので、本システムは、現在も、道北の家具製造工場で、実験的に研磨作業の一部を担っている。今後も、様々な分野で事例研究を継続する予定である。

## 引用文献

- 1) 神野・吉見・阿部：遠隔グライнда作業ロボットの研究，日本ロボット学会誌，Vol.10 No.2，pp.244～253(1992)。
- 2) 永滝・鎌田：木質部材の素地研磨作業への力制御ロボットの適用，1997年精密工学会北海道支部学術講演論文集，p114～115

