

# AIアプローチによる3次元設計と加工工程自動化に関する研究(1)

## - インテリジェント力制御を用いた研磨ロボットの研究開発 -

永田寅臣\*1 小藁正樹\*2 野田勇次\*2 川口修司\*2 津田邦博\*2 原 健二\*3 松山拓郎\*1 渡辺桂吾\*4

## Automation of 3D Design and Manufacturing Process Using AI Techniques

### - Polishing Robot System Using Intelligent Force Control Strategies -

Fusaomi Nagata, Masaki Komino, Yuji Noda, Shuji Kawaguchi, Kunihiro Tsuda, Kenji Hara, Takuro Matsuyama,  
Keigo Watanabe

多軸制御用 CL データに基づく位置補償器を一般化し、指定された倣い速度のノルムと接線方向のベクトルに応じて並進速度成分と回転速度成分をそれぞれ生成できる速度ベースの軌道生成器を構成した。これにより、速度指令型のサーボコントローラを有するオープンアーキテクチャ型の産業用ロボットでの利用を可能にした。さらに、曲面を有する複数のワークに対して、3次元物体モデリング機能(イメージ情報から3次元 DXF データを自動生成)と、ロボット軌道データの自動生成機能(3次元 DXF データから多軸制御用 CL データの自動生成)を適用し、得られた CL データを用いてロボットによる研磨実験を行い、その有用性について検証した。その結果、これまで機械化が難しいとされてきた塗装面の研磨にも十分適用可能であることが確認された。

#### 1 はじめに

木製家具の製造工程における研磨作業は、ワイドベルトサンダーによる平面の林地研磨と、プロフィールサンダーやウェーブサンダーによる単純曲面の林地研磨などで一部機械化されている程度で、自由曲面の研磨や膜厚の薄い塗装面の研磨はほとんど自動化が進んでおらず、熟練者による手作業で行われているのが現状である。このため、家具製造に要する時間の4割以上は、研磨工程に費やされているといわれている。特に塗装工程においては仕上げ品質を高めるために、塗装乾燥 研磨といった作業を数回繰り返す必要があるため、その都度材料を移動させなければならない。このため、人為的な材料固定位置の誤差が発生する中で、数百 $\mu\text{m}$ の塗膜から20 $\mu\text{m}$ 程度の加工(取り代調整)を行うことが非常に難しく、特に自動化が困難だとされていた。

従来装置が抱える問題点は、自由曲面を有する家具部材に柔軟に対応できないこと、接触力を調整するなどの繊細で丁寧な研磨ができないこと、膜厚の薄い塗装面の研磨に対応できないことが挙げられる。さらに、部材のサイズが大きくなると木材に特有の性質である反りやねじれが原因となって形状変化をおこしやすいため、従来の研磨装置では元形状に対して研磨量

一定の精密研磨(取り代調整)ができず、自動化をより一層困難なものとしている。

本プロジェクトにおける研磨ロボットの開発では、人間に近い動作自由度を有していること、技術情報を得やすいこと、信頼性とコストの面で優れていることなどの理由で、産業用ロボットをベースに開発することとした。この場合、以下の項目に注意しながら解決策を検討する必要があった。(1) 教示再生方式による位置制御機能しか利用できないため、研磨作業の自動化に不可欠な柔らかい力制御の実現が困難である。(2) 各ワークの形状に応じた煩わしい教示作業を必要とする。(3) 安全性の問題から、サーボ系など内部アーキテクチャが公開されていないため、ユーザ側で開発した力制御法などを適用することが非常に困難である。

本研究では、熟練作業者が木質材料を傷つけないように力を巧みに調節しながら手作業で行っている研磨作業を産業用ロボットに行わせるために必要となる「柔らかい力の制御技術」および「教示作業を必要としない、研磨工具の滑らかな軌道の生成法」をインテリジェント力制御技術と称し、当該技術を駆使することで従来の研磨装置及び産業用ロボットが抱える問題点を克服しながら、現場普及型のフレキシブルな研磨ロボットシステムの試作開発を目的とした。

本稿では、多軸制御用 CL データに基づく位置補償器を一般化し、指定された倣い速度のノルムと接線方向のベクトルに応じて並進速度成分と回転速度成分をそ

\*1 インテリア研究所技術開発課

\*2 株式会社エーエスエー・システムズ

\*3 機械電子研究所電子技術課

\*4 佐賀大学大学院工学系研究科

れぞれ生成できる速度ベースの軌道生成器を構成した。これにより、速度指令型のサーボコントローラを有するオープンアーキテクチャ型の産業用ロボットでの利用を可能にした。また、自由曲面を有する複数のワークに対して、3次元物体モデリング機能<sup>1)</sup>(イメージ情報から3次元DXFデータを自動生成)と、ロボット軌道データの自動生成機能(3次元DXFデータから多軸制御用CLデータの自動生成)を適用し、得られたCLデータを用いてロボットによる木地の研磨実験を行った。さらに、単純曲面を有するワークの塗装面の研磨実験を行い、その有効性を検証したので報告する。

## 2 CLデータに基づく速度ベースの軌道生成器

従来、産業用ロボットにある動作を行わせる場合、目標軌道は教示用ペンダントを用いて作成されていたが、非常に煩わしく時間を要する作業となっていた。家具の製造工程においては、ほとんど全てのワークがCADシステムで設計されている。このため、CAMのメインプロセッサが生成するカッターロケーションデータ(CLデータ)や、ポストプロセッサが生成するNCデータを各モデルの形状情報として参照することができる。本章では、従来の煩わしい教示工程を省略するためにCLデータに基づく速度ベースの軌道生成器を提案する<sup>2)</sup>。提案する軌道生成器は、位置・姿勢制御を行う方向の目標軌道だけでなく、力制御を行う方向のフィードフォワード量を生成する。これ以降、提案する軌道生成器を用いてどのように倣い制御系を構成するかについて述べる。

CLデータは、ワーク表面上の位置ベクトルとその点における法線ベクトルから構成され、その第 $n$ ステップ $CL(n) \in \mathbb{R}^6$ は次式で表される。

$$CL(n) = [CL_p^T(n) \ CL_o^T(n)]^T \quad (1)$$

ここで、 $CL_p^T(n) = [x(n) \ y(n) \ z(n)]$ と $CL_o^T(n) = [v_x(n) \ v_y(n) \ v_z(n)]$ はそれぞれ、位置ベクトルと正規化された姿勢ベクトルを表す。軌道生成器は、次式に示す離散時刻 $k$ における目標軌道 $r(k)$ を生成する。

$$r(k) = [r_p^T(k) \ r_o^T(k)]^T \quad (2)$$

ここに、 $r_p(k) = [r_x(k) \ r_y(k) \ r_z(k)]^T$ と $r_o(k) = [r_{vx}(k) \ r_{vy}(k) \ r_{vz}(k)]^T$ はそれぞれ、位置と姿勢の要素を

表す。 $r(k)$ は、CLデータと次式で与えられる倣い速度 $v(k)$ ( $|v(k)|$ は定数)によって算出される。

$$v(k) = [v_x(k) \ v_y(k) \ v_z(k) \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (3)$$

つぎに、倣い制御の例を図-1に示す。この場合、 $r(k) \in [CL(n), CL(n+1)]$ は、以下の手順で求められる。まず最初に、次式で定義される方向ベクトル $D = [D_p^T \ D_o^T]^T$ を定義する。

$$D = CL(n+1) - CL(n) \quad (4)$$

ここに、 $D_p = [D_x \ D_y \ D_z]^T$ と $D_o = [D_{vx} \ D_{vy} \ D_{vz}]^T$ はそれぞれ、位置と姿勢の成分を表す。各方向の倣い速度は、次式により求めることができる。

$$v_i(k) = |v(k)| \frac{D_i}{|D_p|} \quad (i = x, y, z) \quad (5)$$

よって、サンプリング幅 $\Delta t$ を用いると、目標位置 $r_p(k)$ は次式によって求まる。

$$r_i(k) = r_i(k-1) + v_i(k)\Delta t \quad (i = x, y, z) \quad (6)$$

つぎに、姿勢成分 $r_o(k)$ を求めるために図-2に示す角度 $\theta_1(n), \theta_2(n)$ を定義する。 $\theta_1(n)$ と $\theta_2(n)$ はそれぞれ、研磨工具の傾斜角度と旋回角度を表す。 $CL_o(n)$ の各成分は、次式で表される。

$$v_x(n) = \sin\theta_1(n) \cos\theta_2(n) \quad (7)$$

$$v_y(n) = \sin\theta_1(n) \sin\theta_2(n) \quad (8)$$

$$v_z(n) = \cos\theta_1(n) \quad (9)$$

離散時刻 $k$ における目標の傾斜角度 $\theta_{r1}(k)$ と旋回角度 $\theta_{r2}(k)$ は、次式から求めることができる。

$$\theta_{r1}(k) = \theta_1(n) + \{\theta_1(n+1) - \theta_1(n)\} \frac{|r_p(k) - CL_p(n)|}{|D_p|} \quad (10)$$

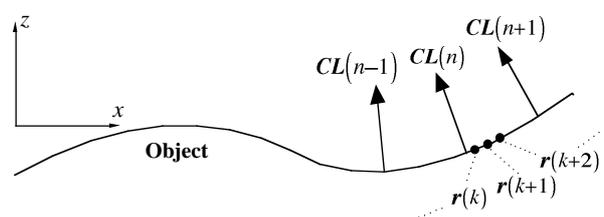


図-1 ワークとCLデータとの関係

ここで、 $i = 1, 2$  である。式 (10) を式 (7), 式 (8), 式 (9) に代入することで、目標の姿勢ベクトルは次式のように求めることができる。

$$r_{vx}(k) = \sin\theta_{r1}(k) \cos\theta_{r2}(k) \quad (11)$$

$$r_{vy}(k) = \sin\theta_{r1}(k) \sin\theta_{r2}(k) \quad (12)$$

$$r_{vz}(k) = \cos\theta_{r1}(k) \quad (13)$$

力制御を行う方向では、 $r_p(k)$  がフィードフォワード制御に用いられる。インピーダンスモデル追従型力制御法に対して、式(2)をフィードフォワード制御に用いると次式に示す力制御則が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{x}(k) = & \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) \dot{x}(k-1) \\ & - \left\{ \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) - E \right\} B_d^{-1}K_f \{F(k) - F_d\} \\ & + K_i \sum_{n=1}^k \{F(n) - F_d\} + K_r \left\{ \frac{r(k) - r(k-1)}{\Delta t} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、 $K_r = \text{diag}(K_{r1}, \dots, K_{r6})$  は、フィードフォワードゲイン行列である。一方、位置・姿勢制御を行う方向では、 $r_p(k)$  と  $r_o(k)$  が研磨工具の目標軌道として用いられる。 $r_p(k)$  と  $r_o(k)$  は、速度への変換ゲイン行列  $K_v = \text{diag}(K_{v1}, \dots, K_{v6})$  により位置・姿勢速度  $v_r(k)$  に変換された後に  $\dot{x}(k)$  に加算され、逆ヤコビアンへの入力となる。図-3には、開発した軌道生成器を用いた研磨ロボットの制御系のブロック線図を示す。式(14)の速度指令値は、サンプリング間隔（例えば、10 msec）毎に更新される。このように対象ワークが CAD/CAM システムで設計され NC 工作機械で加工されている場合には、ワーク形状の情報として CL データを参照できるため、容易にフィードフォワード制御に応用すること

ができる。これにより、微い制御性能の高速化が期待される。

### 3 木地研磨と塗面研磨の実験

本章では、試作開発した研磨ロボットを用いて曲面を有する家具部材の木地研磨と塗面研磨の実験を行い、研磨後の表面性状について定量的および定性的評価を行った。研磨工具に関しては、軽量なこと、コストが安いこと、種類が豊富なこと、構造がシンプルのため粉塵にも強く故障しにくいことなどから、エア駆動による研磨工具を用いることにした。仕上げ精度としては算術平均粗さ (Ra) 評価で、#120 ~ #220 の研磨紙を用いた木地研磨実験で  $2 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$  程度を、また、#320 ~ #600 の研磨紙を用いた塗面研磨実験で  $2 \mu\text{m}$  以下をそれぞれ目標とした。さらに、塗面研磨においては、対象となる塗装面の膜厚が数百  $\mu\text{m}$  程度であることから、 $20 \mu\text{m}$  程度での取り代調整が可能な研磨精度を目指した。

#### 3-1: ベルト式研磨工具での木地研磨実験

図-4の研磨実験では、プロフィールサンダーなどで

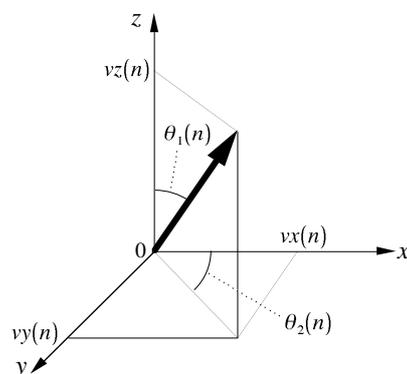


図-2 ロボットベース座表系における工具ベクトル  $CL_o(n)$

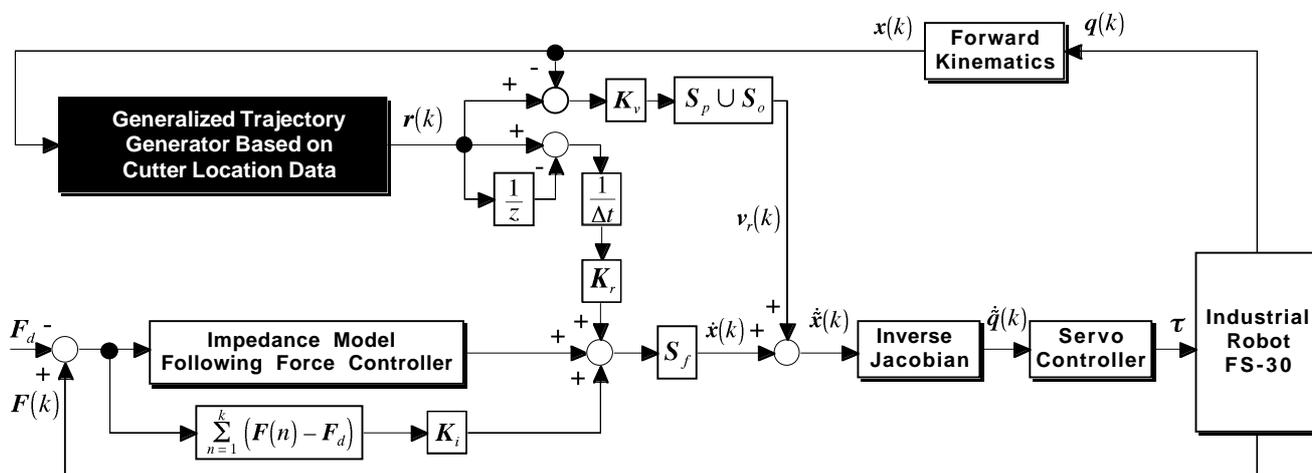


図-3 一般化された軌道生成器を用いた研磨ロボットの制御系のブロック線図

使用されている比較的大きめのベルトサンダーをロボットアーム先端の力覚センサにアタッチメントを介して取付けた。この工具は重量が 3 kg 程度あるだけでなく、エア圧を推奨の 5 kgf/cm<sup>2</sup> 程度に設定すると非常に大きな振動を発生するため、作業者が手に持って研磨することはほとんど不可能に近い。図-5には、3次元物体モデリング機能<sup>1)</sup>とロボット軌道データの自動生成機能により作成されたジグザグパスを示す。研磨工具のベルト幅が 100 mm 程度であるため、ジグザグパスの送り幅は 80 mm に設定した。その後、表-1のように倅い速度を 100 mm/s、研磨工具の接触力を 1 kgf に設定して研磨を行ったが良好に研磨を行うことができた。研磨工具の姿勢は、工具座標系の Z 軸が常にワーク表面に対して法線方向となるように制御した。研磨後の表面性状を算術平均粗さで評価したところ、3 μm 程度であった。この研磨工具の回転ローラー半径が 30 mm 程度であることから、工具進行方向に対するワークの曲率半径がこの値以上であれば、工具

干渉を招くことなく研磨できる。ローラーの半径が大きいほど研磨効率が上がることは明らかであるが、逆にゆるやかな曲面にしか適用できなくなるというトレードオフの問題がある。ベルトの幅についても、研磨効率と曲面への適応性がトレードオフの関係となる。さて、この研磨工具は、図-4のように断面形状がどこでも等しい単純な曲面を効率良く研磨するのに適している。研削力が強いいため、NC 加工後の木地研磨には適しているが、塗面研磨に用いる場合は注意を要する。また、実験では柔らかめのゴム製ローラーを用いたが、木地研削では、硬度の高いゴムと #80 程度の粗い研磨紙を使用し、位置制御戦略のみで加工する方が、早材・晩材に起因する加工斑を抑えることができると思われる。

### 3-2: オービタルサンダーでの木地研磨実験

図-6の研磨実験では、曲面を有するワークを手加工で研磨する場合に使用されている小型のオービタルサンダーを用いた。オービタルサンダーは、工具が回転

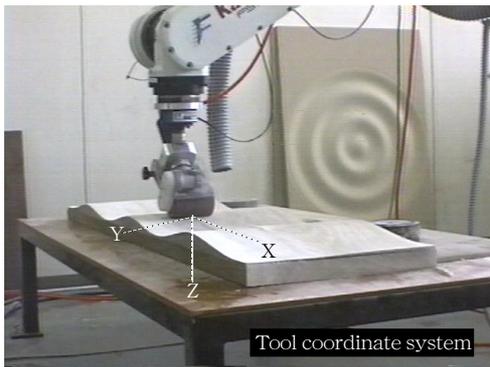


図-4 ベルト式研磨工具による曲面ワークの研磨実験



図-6 小型の回転式研磨工具による曲面ワークの研磨実験

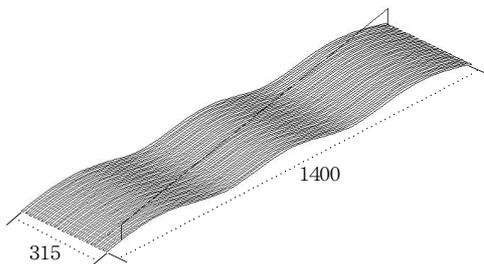


図-5 図-4の実験で使用したジグザグパス

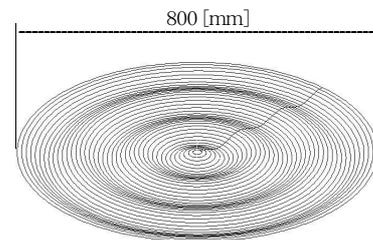


図-7 図-6の実験で使用した渦巻きパス

表-1 図-4の実験での研磨条件

材料	サクラ集成材
サイズ	315 × 1400 × 30 mm
研磨紙番手	#220
接触力	1 kgf
倅い速度	100 mm/s
研磨工具	ベルト式 (幅100 mm)
工具の送り幅	80 mm
ローラー	柔らかかめのゴム

表-2 図-6の実験での研磨条件

材料	MDF集成材
サイズ	800 × 800 × 30 mm
研磨紙番手	#220
接触力	0.7 kgf
倅い速度	100 mm/s
研磨工具	回転式 (直径50 mm)
工具の送り幅	30 mm
工具パッド	厚さ10 mmのスポンジ

しながら偏心運動を行うもので、細かい粒度の研磨紙を用いることでベルトサンダーなどに比べて非常に繊細な研磨が可能となる。図-7には研磨実験で使用した渦巻き状のパスを示す。従来、このような複雑な曲面に適用できる自由度の高い研磨装置は存在しなかったため、手作業で研磨が行われていた。さて、研磨工具はこのパスに沿って中心から外側に向かって移動するが、研磨工具の直径が 50 mm 程度であるため、外側へ移動の送り幅は 30 mm に設定した。研磨中、研磨工具がワーク表面の法線方向から接触するように姿勢制御を行った。表-2のような条件で、倣い速度を 100 mm/s、研磨工具の接触力を 0.7 kgf に設定して研磨を行ったが良好に研磨を行うことができた。研磨後の表面性状を算術平均粗さで評価したところ、 $3\mu\text{m}$  程度であった。この研磨工具は、形状が小さいため接触面積を小さく設定できるため、小さな曲面部分の研磨作業に適している。特に、ロボットに取付けることで動作範囲を非常に大きくとれるため、脚もの家具や扉枠などの細くて長いワークに対しても適用可能と思われる。

### 3-3: オービタルサンダーでの木地仕上げ研磨

つぎに、図-8のような自由曲面を有するワークに対して、Case2と同様のオービタルサンダーで、#220、#320、#400の順番に粒度を細かくしながら木地の仕上げ研磨を行った。従来の自動化機械が対応できないこのような自由度の高い曲面に対して、図-9のように

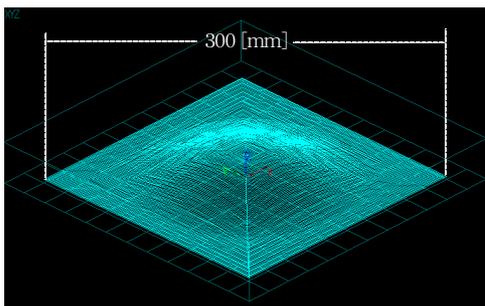


図-8 従来の自動研磨装置では対応できない曲面



図-9 オービタルサンダーで木地仕上げされた木製ワーク

非常に美しい表面性状を得ることができた。

### 3-4: 往復運動式の研磨工具での塗面研磨実験

図-10の研磨実験では、単純曲面を有するMDF 集成材にウレタンサンディング塗装を施したワークを用いて塗表面の研磨実験を行った。この場合、曲面を有するワークを手加工で研磨する場合に使用されている重量 950 g の往復運動式工具を用いた。この研磨工具は小型軽量で、ストレート（前後の往復）運動により木目

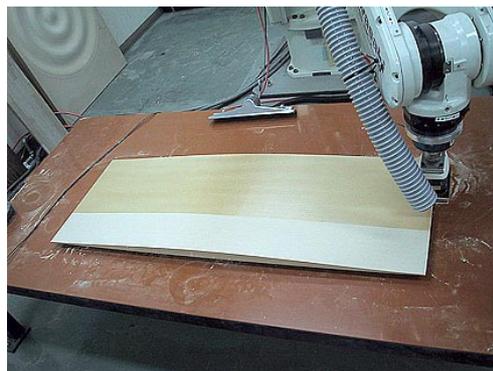


図-10 往復振動式の研磨工具による塗膜の研磨実験

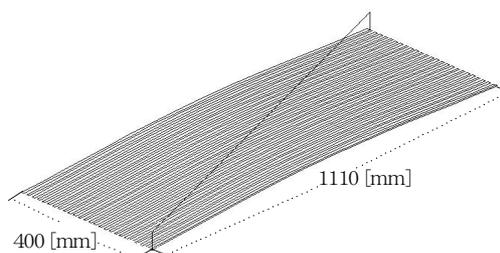


図-11 図-10の実験で使用したジグザグパス

表-3 図-10の実験での研磨条件

材料	MDF集成材
サイズ	400 x 1110 x 30 mm
研磨紙番手	#400
接触力	0.7 kgf
倣い速度	50 mm/s
研磨工具	往復振動式 (80 x 100mm)
工具の送り幅	50 mm
工具パッド	厚さ10 mm のスポンジ

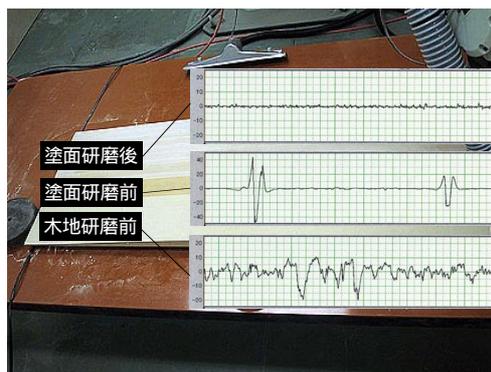
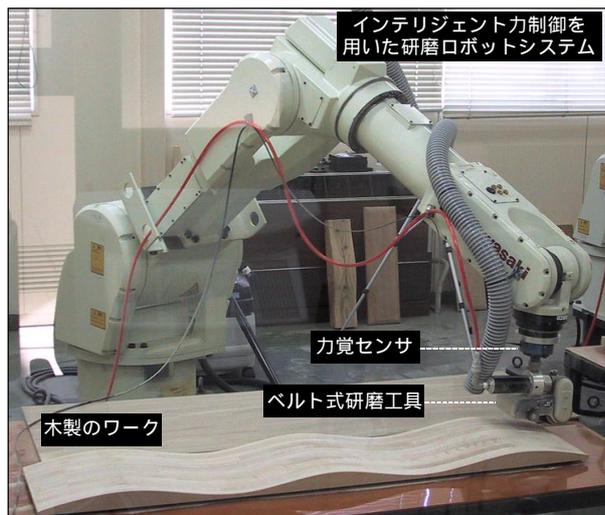


図-12 塗面研磨後の表面粗さ



インテリジェント力制御による柔らかい力の調節機能  
 熟練作業者の2倍の速さで研磨加工が可能 (100 mm/s 以上)  
 自由曲面を有するワークへの優れた適応性  
 塗面研磨でも非常に良好な仕上げ面を達成  
 (塗装面の研磨では20 μm 単位での取り代調整が可能)

煩わしい教示作業を必要としない  
 温湿度変化に起因する木材特有の反り(10mm 程度)に対応  
 ワーク固定時の位置決め誤差(数mm 程度)に対応  
 力覚提示型のジョイスティック教示機能  
 ヒューマンフレンドリなユーザインタフェース  
 産業用ロボット並みの高信頼性とコストを実現

図-13 インテリジェント力制御を用いた  
 研磨ロボットシステムの成果概要

を生かした研磨が可能である。研削力は比較的強い  
 が、#400 程度の研磨紙と柔らかめのパッドを併用  
 し、接触力を小さくして研磨することで塗面研磨にも  
 十分適用できる。研磨工具のサイズが 80 × 100 mm 程  
 度であるので、ジグザグ移動時の送り幅を 50 mm に  
 設定した。図-11には、研磨実験で使用したジグザグ  
 パスを示す。研磨中は研磨工具がワーク表面の法線方  
 向から接触するように姿勢制御を行った。その他は  
 表-3のような条件で、倣い速度 50 mm/s、研磨工具  
 の接触力を 0.7 kgf に設定し、研磨実験を行った。図-  
 12には、NC 加工後(木地研磨前) 塗装後(塗面研  
 磨前) 塗面研磨後の表面の粗さを示している。塗装  
 後の表面粗さを評価した結果、算術平均粗さ (Ra) で  
 0.2 μm 程度、最大高さ (Ry) で 3 μm 程度の値が得  
 られた。この場合、指や手の平で触るとツルツルした  
 表面性状が確認された。さらに、目視評価でも非常に  
 綺麗な塗装表面が確認された。

#### 4 おわりに

本研究では、曲面を有する家具部材の研磨工程を自  
 動化するための研磨ロボットシステムを試作開発し

た。特に、これまで最も機械化が難しく熟練者の手作  
 業に委ねられていた自由曲面や塗装面の研磨作業にも  
 十分適用可能であることを確認した。図-13には、提  
 案システムのその他の特徴を示す<sup>3-6)</sup>。今後は、家具の  
 製造現場での具体的な利用を考慮した適用研究を行  
 いながら商品化を支援していく。

#### 謝 辞

本研究の一部は、ベンチャー企業支援型地域コンソーシ  
 アム研究開発事業(中核的産業創造型)の一環として、  
 NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)から委託  
 を受けた(株)北九州テクノセンターから再委託された研  
 究開発業務として実施したものである。

#### 5 参考文献

- 1) K. Hara, H. Zha, T. Hasegawa, et al.: Morphology-Based Surface Evolution and Its Application to Topology-Adaptive 3-D Modeling, IEICE Transactions on Information and Systems - Special Issue on Machine Vision Applications -, (2001).
- 2) 永田, 渡辺, 津田, ほか6名: オープンアーキテクチャ型の産業用ロボットをベースとした研磨ロボットの開発 - オープンPCコントローラを用いた産業用ロボットの倣い制御系の開発 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 香川県高松市 サンメッセ香川, 平成13年6月.
- 3) F. Nagata, K. Watanabe, et al.: Furniture Polishing Robot Using a Trajectory Generator Based on Cutter Location Data, 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA2001), pp. 319-324, Convention & Exhibition Center(COEX), Seoul, Korea, May (2001).
- 4) F. Nagata, K. Watanabe, et al.: Joystick Teaching System for Polishing Robots Using Fuzzy Compliance Control, Procs. of 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, pp. 362-367, Banff Centre for Conferences, Banff, Alberta, Canada, July (2001).
- 5) 永田, 津田, 川口, 原, 他2名: 曲面を有する家具部材の自動研磨ロボットの開発, 木工機械グラフ, Vol. 33, No. 5, p. 20-25 (2001).
- 6) F. Nagata, K. Watanabe, et al.: Polishing Robot Using a Joystick Controlled Teaching system, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 13, No. 5, (accepted)