

自由曲面金型のスーパー磨き自動仕上げシステムの開発(2)

—学習型モーション・力制御法の産業用ロボットへの適用と磨き実験による性能評価—

永田寅臣*1 楠本幸裕*1 安田仁徳*2 津田邦博*2 尾本正明*3 森 直樹*3 梅津真弓*4 横山和彦*4 渡辺桂吾*5

Development of Super Polishing System for Metallic Molds with Curved Surface

- Application of Learning-based Motion and Force Control Method to an Industrial Robot and its Evaluation via Polishing Experiments -

**Fusaomi Nagata, Yukihiro Kusumoto, Kiminori Yasuda, Kunihiko Tsuda, Masaaki Omoto,
Naoki Mori, Mayumi Umetsu, Kazuhiko Yokoyama and Keigo Watanabe**

平成13年度補正即効型地域新生コンソーシアム事業「自由曲面金型のスーパー磨き自動仕上げシステムの開発」により、自由曲面を有するPETボトル金型の磨き工程を自動化するための基本システムを試作開発した。本稿では、提案した学習型のモーション・力制御法をオープンインタフェイスを有する産業用ロボットにインプリメントするとともに、アルミ製の凹型曲面の磨き実験により性能を評価した。その結果、NC加工後に発生するカスプマーク除去（#220から#400の砥石による初期の粗磨き）から、磨きに伴う傷を小さくしていく中磨き（#600から#800の砥石による磨き）を経て、酸化クロムを含浸させた工具による仕上げ磨きにまでフレキシブルに対応できることが確認されたので報告する。

1 はじめに

本研究では、Windows APIを介してモーション制御が可能な腕型マニピュレータのアーム先端にボールエンド形状の弾性ゴム砥石を装着し、動作自由度の高い磨きシステムを構成する。これまで産業用ロボットのユーザインタフェイスは、安全上の問題などから教示方式が一般的であった。最近は、ユーザ側でのアプリケーション開発のニーズに応えるため、運動制御系（各関節角度のフィードバック制御）などが公開されたオープンインタフェイスを有する産業用ロボットが登場してきている。APIは、腕型マニピュレータの各関節を動かしたり、各関節の角度情報を読み込んだりするための基本関数であり、Windows上でのアプリケーション開発を可能とする基本ドライバソフトである。さて、従来の磨きロボットでは煩わしい教示作業によりアームの動きを入力する必要があるだけでなく、位置制御が中心であったため、熟練者のような繊細な磨き機能が達成されていなかった。本研究では、既に提案している学習型のモーション／力制御技術¹⁾を応用することで、教示レスで利用でき、砥石とワーク間に作用する磨き力（工具押付力と摩擦力の合力）を安定的

に制御できる基本磨きシステムを開発し^{2~4)}、実用化を図ることを目的とする。具体的な数値目標として、磨き品質と磨きスピードの点で熟練作業員以上の性能を目指す。なお、磨き品質の比較については、熟練者の目視や触感による定性的評価により行うこととする。

2 腕型マニピュレータへの学習型モーション／力制御法の実装

本節では、既に提案している学習型モーション／力制御法をどのようにして、オープンインタフェイスを有する腕型マニピュレータに実装するかについて詳述する。従来は、ロボットメーカーが提供する教示再生方式のユーザインタフェイスしか利用できなかったため、現場でのカスタマイズを十分に行うことができなかった。本システムでは、磨きシステムのための基本機能を新たに開発し、金型磨きシステムとして実用化できるようにカスタマイズを行う。

2-1 オープンインタフェイスを有する腕型マニピュレータ

実験で使用する腕型マニピュレータは、図-1に示す(株)安川電機製の6自由度垂直多関節型産業用ロボットMOTOMAN UP-6である。本システムでは、ユーザサイドにおける効率的なアプリケーション開発を支援するために、キネマティクスや座標変換、作業座標サーボコントロールなどのAPIを提供している。このAPIは

*1 インテリア研究所

*2 株式会社エーエスエー・システムズ

*3 株式会社メイホー

*4 株式会社安川電機

*5 佐賀大学大学院工学系研究科



図-1 腕型マニピュレータMOTOMAN UP-6

表-1 MOTOMAN UP-6が提供するAPI関数の一例

①yeapi_SetSegmentJoint()	: 関節座標系での速度指令
②yeapi_SetSegmentCartesian()	: 作業座標系での速度指令
③yeapi_MoveJoint()	: 関節座標系での移動指令
④yeapi_MoveCartesian()	: 作業座標系での移動指令
⑤yeapi_GetMotionJoint()	: 各関節角度情報の取得
⑥yeapi_GetMotionCartesian()	: 位置・姿勢情報の取得
⑦yeapi_SetSpeed()	: 移動指令時の速度を指令
⑧yeapi_SetDo()	: デジタル出力指令
⑨yeapi_SetToolCoord()	: ツール座標系の変換行列を設定
⑩yeapi_SetUserCoord()	: ユーザ座標系の変換行列を設定
⑪yeapi_GetAxes()	: ロボットの軸数を取得
⑫yeapi_Stop()	: 強制停止指令
⑬yeapi_Restart()	: 動作停止状態からの復帰指令
⑭yeapi_Initlize()	: ユーザプログラム起動時の初期化
⑮yeapi_Quit()	: ユーザプログラム終了時の処理
⑯yeapi_ShutdownServer()	: ロボット制御常駐プログラムの終了
⑰yeapi_SetParamData()	: 7軸目モータなど各パラメータの設定
⑱yeapi_SetStatusData()	: 7軸目モータなど各ステータスの取得

Windows Visual C++ の開発環境下で使用することができる。表-1には API 関数の一例を示す。例えば、力制御法を直交座標系における速度指令で導出しておけば、yeapi_SetSegmentCartesian()により簡単に力制御機能を実装することができる。従来は、逆キネマティクスや逆ヤコビアンを用いて、一旦関節座標系における操作量に変換してからコントローラへ出力する必要があったため、この機能は非常に有用である。また、座標変換は yeapi_SetToolCoord() や yeapi_SetUserCoord()を用いれば、汎用の3次元 CAD/CAMシステムを用いて作成したCLデータの座標系とロボットの座標系を一致させることができる。これにより、CLデータを磨きシステムの目標軌道としてダイレクトに使用することができるようになった。

2-2 プログラム開発

プログラム開発は、Windows Visual Studioの開発ツールを用いて行った。マニピュレータのアーム先端に装着された砥石は、10 msec のタイマー割り込みを用いて、ワークの接線方向の速度 $v_t(k)$ と式(3) で与えられる法線方向の速度 $v_n(k)$ がハイブリッド制御される。速度 $v_n(k)$ により押付力 f を加える方向は、砥石とワークの接触地点における法線方向からであるが、これはCLデータに記述されている姿勢情報から算出している。また、力センサからの情報 $F(F_x, F_y, F_z)$ も10 msec 間隔でモニターしているが、500 Hz のカットオフ周波数でフィルタ処理した信号をフィードバック制御に用いた。図-2には、開発した基本ユーザインタフェースを示す。従来は、教示再生方式のユーザインタフェースが一般的となっていたが、このようなオープンインタフェースを利用すれば、ユーザサイドでのスキルフルなアプリケーション開発が可能になる。

2-3 磨き実験による性能評価

図-3には、磨きシステムの砥石工具接続部を示す。オープンインタフェースを有する腕型マニピュレータ((株)安川電機 MOTOMAN UP-6)のアーム先端フランジ面にニッタ(株)の6自由度力覚センサを装着している。力覚センサの先端には、アタッチメントを介してエア駆動式工具を装着し、図-4と図-5 にそれぞれ示す軸付き砥石と弾性ゴム砥石を固定できるようにしている。実験で使用した砥石は、市販されているキャップサンダー(CS : #150, #320), ゴム砥石(#80, #120, #320), グリーンポリリッシャ(GP : #150, #220, #400)と、(株)メイホーの弾性ゴム砥石(#220, #320, #400, #600, #800)などであ

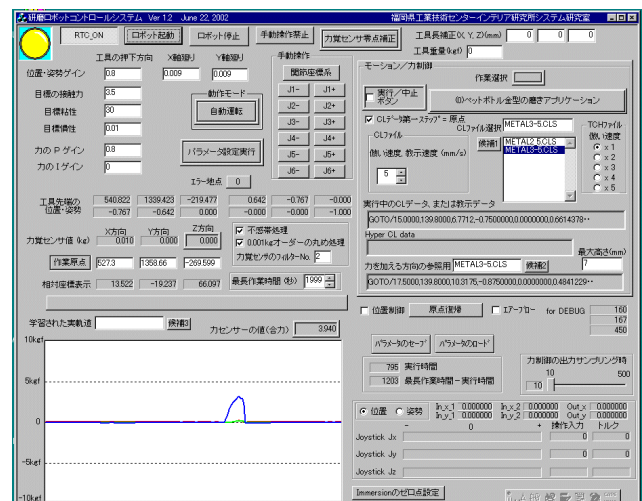


図-2 Windows上で開発した磨きシステムの基本操作画面

る。特に、弾性ゴム砥石は耐磨耗性と曲面への適応性に優れた工具であり、自動化システムによる長時間の使用に適している。今回使用した砥石の粒度は#150～#800で、シャンク径は 3 mm と 6 mm である。なお、実験では工具回転に伴う過研磨を防ぐために、ロボットの6軸目を用いて1～40 deg/s 程度の低速度で往復回転させた。磨き対象であるアルミ製の金型ワークについては、ロボットをアンカーで固定している床面上に鉄製のテーブルを配置し、その上に簡易なバイ

スを用いて固定しているだけである。ロボットのベース座標系とワークの座標系の座標合わせは、ロボットを実際に X 軸方向、Y 軸方向、Z 軸方向に動かしながら、ワーク固定位置を微調整し、目視で行った。このように非常に簡単にワークを固定できるのも力制御戦略を採用していることの恩恵であり、従来の高い剛性と精度を持った特殊なジグなどを一切必要とせず、かなりラフな位置決めでも十分適用できることがわかってきた。

2-4 アルミ製のワークを用いた磨き実験

つぎに、提案システムの有効性を検証するため、シリンダー形状のアルミワークの磨き実験を行った。このワークは事前にマシニングセンタにより3次元加工されたもので、ワーク表面にはNC加工では除去することができない高さ0.1 mm 程度のカスパマークが残っている。磨き工程では、ワークの形状寸法を変えずに、表面性状を均一にスムーズに仕上げていく必要がある。シリンダー形状のワークは、その断面がどこも同じ形状となっているため、磨きの難易度としては優しいと思われるが、逆に、エッジ部の過研磨を出さずに接合部付近をシャープに磨き上げる必要があるため、安定した磨き力の制御が不可欠である。

さて、既に述べたようにボールエンド形状の軸付き弾性砥石を装着した磨きシステムは、磨き力が一定に推移するように、砥石の法線方向速度と接線方向速度を制御する。まず、動作確認のために、目標の磨き力、接線方向の速度、インピーダンスパラメータなどを表-2のように設定し、磨き実験を行った。使用した砥石工具は、図-4に示した軸付き砥石工具である。特に、木工用ロボットサンダー^{5~7)}と比較して非常に硬い



図-3 エア駆動式の砥石工具の接続部



図-4 従来の軸付き砥石(シャンク径: 3 mm)



図-5 (株)メイホー製弾性ゴム砥石(シャンク径: 6 mm)

表-2 磨き実験で使用した制御パラメータ

Base pass along the cross section	Zigzag
Pick feed in longitudinal direction	0.2 mm
Radius of abrasive rubber tool	5 mm
Grit size of abrasive rubber tool	#150, #320, #400
Rotational velocity of the 6-axis	10 or -10 deg/s
Rotational limits of the 6-axis	$-45 < \theta_6 < +45$ deg
Max. height h	14 mm
Desired polishing force $ F_d $	3 kgf
Tangent directional velocity $ v_t $	6 mm/s
Desired mass coefficient M_{d1}, M_{d2}, M_{d3}	0.01 kgf · s ² /mm
Desired damping coefficient B_{d1}, B_{d2}, B_{d3}	30 kgf · s/mm
Force feedback gain K_{f1}, K_{f2}, K_{f3}	1.2, 1.2, 0.4
Sampling width Δt	10 ms

系で力制御を実行する必要があったため、カフィードバックゲインを0.4程度に小さく設定することで振動の発生を抑えた。また、実験当初は図-3のように砥石工具の回転軸とロボットの6軸の回転軸がオフセットしている状態で、工具のZ軸廻りに低速回転させたため、力制御の応答に好ましくない挙動が発生した。そこで、オフセットが発生しない状態で砥石工具を装着できるアタッチメントを使用することで安定性を向上させた。

3 磨き条件に関する考察

磨き品質に影響を及ぼす重要なパラメータとして、使用するマニピュレータ、砥石の種類とその粒度、磨き力、做い速度(接線方向速度)、工具の回転速度、制御ゲイン、および工具経路とそのピックフィード(ジグザグパスにおけるパスとパスとの間隔、送り量のこと)などが挙げられる。望ましい磨き条件を抽出していくために、まず、実験者の主観によりランダムに条件を変えながら磨き実験を行った。本章では、これまでの実験結果から得られた各条件と磨き品質の関係について述べることにする。特に、今回の実験では、従来高速回転(20,000 r/min程度)させて使用されていた軸付き砥石の回転をロックし、ボールエンド形状の輪郭を均一に消費していくための目的で、超低速(1~40 deg/s)で回転させて使用している。

1) マニピュレータ本体

使用したロボット本体は、川崎重工業製の産業用ロボット FS20N(最大可搬質量:20 kg)と安川電機製の腕型マニピュレータ MOTOMAN UP-6(最大可搬質量:6 kg)である。FS20NはMOTOMAN UP-6が開発されるまで、事前の準備実験に用いた。どちらも、繰り返し位置精度として0.1 mm程度を保証しているが、UP6では最新の高分解能を有するモータが使用されているため、非常に安定した力制御性能を得ることができた。

2) 砥石

キャップサンダーはボールエンド形状のゴム材にキャップ式の研磨布を被せたもので、研削力はかなり強い。使用した粒度は#150と#320であり、カスプマークをかなり効率的に除去することができたが、どちらの場合も後工程で除去しにくい傷が残るケースが発生した。また、3~4 cm程度磨くと、キャップが破れてしまうことがあったため、長時間の連続運転に使

用するには信頼性に問題が残った。磨き力を3~3.5 kgf程度に設定していたため、磨き力の設定値を小さくすれば、傷の発生やキャップの破れを防ぐことができると思われる。ボール形状をしたゴム砥石とグリーンポリシャは#80~#320の粒度のものをを用いた。研削力が比較的弱い初期のカスプマーク除去には不向きであったが、カスプマーク除去後の中磨きに適していると思われる。最後に、本プロジェクトで研究開発された弾性ゴム砥石(図-5)の特徴について述べる。まず、砥石の粒度が#220~#1200までの範囲をカバーできるために、カスプマーク除去のための粗磨きから中磨き、仕上げ磨きの工程に対応することができる。また、ゴムの含有量を自由に決定できるため、望ましい弾性特性を発揮させることができる。さらに、シャンク径を従来の3 mmから6 mmに太くすることで横方向の剛性を高くするだけでなく、砥石の根元(フラット)部分を長く設計することで長時間の連続運転に耐え得るように配慮されている。このような弾性ゴム砥石の優秀性により、自動磨きシステムでも安定的に使用することができた。図-6には、メイホー製の弾性ゴム砥石を用いた磨き風景を示す。

3) 磨き力

本プロジェクト研究で定義している磨き力は、磨き性能、磨き品質に最も大きな影響を及ぼす条件の一つである。磨き力は工具の押付力と、工具とワーク間に作用する摩擦力の合力であり、磨き力を大きく設定すれば研削力が上がり、小さい値に設定すれば研削力が下がる。本実験では、磨き力を1.5~4 kgfの範囲で変化させ、磨き品質との関係を調べてみた。その結果、3.5 kgf以上に設定すると、工具の進行方向に後工程で除去しにくい傷が発生することが明らかとなった。

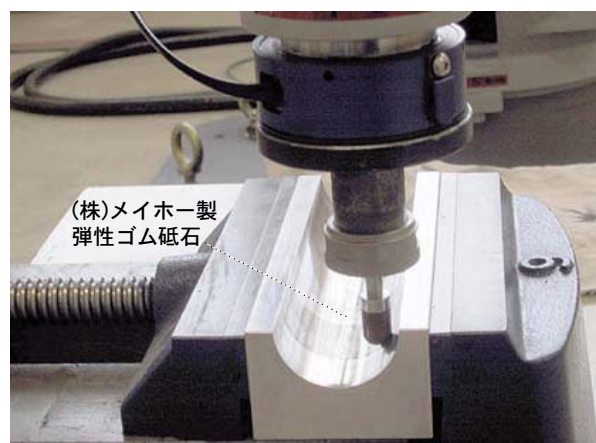


図-6 弾性ゴム砥石を用いた磨き風景

初期のカスプマークを効率的に除去するためには、2～3 kgf の磨き力が適していることが確認された。なお、磨き効率(如何に少ない磨き回数で所望の表面性状を創出するか)を最優先しなければ、例えば、1.5 kgf 程度の弱い磨き力で数回磨く方が美しく高品位に磨けることが分かった。

4) 倣い速度(接線方向速度)

倣い速度は、砥石工具のワーク接線方向での速度のことであり、これはそのまま磨き速度を表すものである。このため、現場では同じ磨き品質が得られるのであれば、少しでも大きな倣い速度を設定し、磨き作業に要する時間を短縮したいというニーズが大きい。今回提案した磨き戦略の中では、倣い速度の値が粘性摩擦力の大きさを左右する。理想的には倣い速度を大きく設定したいところであるが、これとのトレードオフとして力偏差が大きくなるという問題点があるため、今回の実験では、断面方向ジグザグパス使用時で3～8 mm/s、縦方向ジグザグパス使用時で5～15 mm/s の値に設定した。この結果から、上下方向の起伏の少ないワークほど倣い速度を大きく設定できることが確認された。

5) 工具回転速度

提案システムでは、軸付き砥石の高速回転に伴う過研磨を防止するため、回転をロックして使用しているが、ボールエンド形状の砥石の輪郭を均一に消費していくために低速(1～5 deg/s)で往復回転させて使用した。また、砥石の側面で磨く場合に磨き残し(カスプマークが除去されずに残る症状)が見受けられたため、5～40 deg/s で回転させることで砥石の周速を発生させ、磨き能力を高めた。

6) 最大高さ

最大高さを設定することで、砥石がその高さ以上上昇しなくなるため、例えばパーティション部の研磨など過研磨が発生しやすい状況を回避することができるようになった。今回使用した砥石の場合、13～15.5 mm 程度の値を設定した。この値は、使用する工具のボール半径を考慮すれば容易に決定することができる。

7) カフィードバック制御ゲイン

これは、力制御性能の感度を表すパラメータであり、インピーダンスモデル追従型力制御法の対角行列 K_f により与えることができる。この力制御法では、ロボットベース座標系における砥石のX, Y, Z各方向の

速度が操作量となっている。このため、力制御の感度も各方向で独立に設定できる仕様となっている。木工用ロボットサンダーでの設定値には1前後の値を使用していたが、ペットボトル金型の磨きシステムでは力制御系の剛性が高いため、0.3～0.6程度の値で良好な力制御特性が得られた。また、実験開始当初は各方向で同じ値を設定していたが、0.3～0.6程度の設定値ではシリンダーの側面付近(X方向での力制御が主の場合)で目標値への追従性が悪くなり、1程度まで上げると底の付近(Z方向での力制御が主)で振動が顕著に発生する結果となった。そこで、X方向とZ方向の力制御ゲインをそれぞれ、1.3, 0.3のように独立に設定することでこの問題を解決することができた。これは、例えば、3～6 mm程度のシャンク径の砥石を用いる場合には側面で磨くと横方向のたわみが発生しやすくなるため、力制御則のX方向とY方向のカフィードバックゲインをZ方向の値よりも大きな値に設定することで、接触の感度を高める必要があるということである。図-7にはそれぞれ、各方向で異なるカフィードバックゲインを設定した場合のカセンサの値を示す。

8) CLデータ

本システムでは、3次元CAD/CAMシステムのメインプロセッサが生成するCLデータを、砥石の最初の目標軌道に用いることができる。これにより、従来の煩わしい教示作業を省くことができるだけでなく、力制御性能を大幅に改善することができた。実験で使用した3次元CAD/CAMシステムは、米国EDS社のUnigraphics V. 10. 2である。まず最初に作成したCLデータは、断面方向のジグザグパスと縦方向のジグザグパスでピックフィードは0.2 mmである。このCLデータにはモデルの表面上における通過点の座標とその法線ベクトルが含まれているため、この法線ベクトルを参照して砥石を押し付ける方向を決定している。すなわち、砥石は、ワークとの接触点における法線方向へ押し付けられるように力制御される。例えば、CAMが生成するCLデータは、砥石先端の中央部分がモデル表面に沿って移動しようとするような軌道で生成されているが、磨きが実行されている場合は力制御機能により、工具先端部分が工具半径に応じてオフセットして移動することになる。また、マシニングセンタで精密な3次元加工を行う場合に使用されるCLデータの精度(μm 単位)と比べて、非常に粗い精度(mm単位)でも磨きシステムには適用できることが確認され

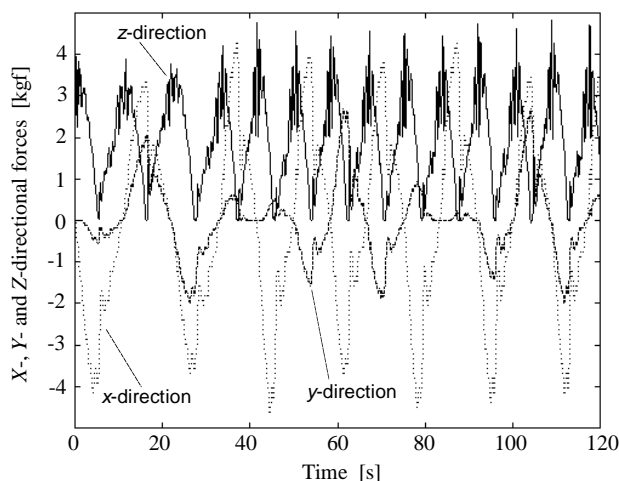


図-7 各方向で異なる力フィードバックゲインを設定した場合の力センサの値の変化

た。このように、腕型マニピュレータのアーム先端に取り付けられた砥石工具は、CLデータに基づき大まかに軌道制御されるとともに、磨き力が一定で推移するように力制御法により法線方向の速度が繊細に制御されることになる。

4 定性的評価

さて、このような磨き品質に影響を及ぼすと思われる条件を試行錯誤的に変更しながら磨き実験を行い、磨き後の表面性状を目視と指による触感で評価したところ、パーティション部の磨きダレなどが発生することなく、高品位な磨き面が確認された。これは、開発した磨きシステムを用いることで全体的に均一な磨き力を発生させることができたことによる効果と思われる。図-7には、磨き実行中の力覚センサの値の変化を示す。さらに、磨きシステムで磨いたワークの表面品質を客観的に評価するために、実際にペットボトル金型の磨き作業に携わっている熟練者に観察してもらった。その結果、使用した砥石の粒度、磨きに要した時間、磨かれた表面の品質といった点から、高い評価を得ることができた。熟練者の評価技術を最優先している理由は、3次元粗さ計測器などを用いれば定量的な粗さは測定できるものの、その値は使用する砥石の粒度にはば左右されるだけでなく、ワークの測定部分における局所的な評価(参考値程度)にしかならないため、美感や触感など現場におけるワーク全体の商品としての可否判断は熟練者により行われているからである。

5 おわりに

本研究では、オープンインタフェイスを有する腕型

マニピュレータに対して、ボールエンド形状の軸付き砥石のためのモーショ／力制御法を適用し、基本的な磨き実験により性能を評価した。その結果、NC加工後の凹型曲面のカस्पマークの除去などに優れた効果が確認された。

謝 辞

本研究は、平成13年度補正即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業の一環として、九州経済産業局から委託を受けた(財)北九州産業学術推進機構から再委託された研究開発業務「自由曲面金型のスーパー磨き自動仕上げシステムの開発ー学習型モーショ／力制御系の開発と磨き実験による性能評価ー」として実施したものである。

6 参考文献

- 1) 津田, 安田, 永田, 他2名: 研磨装置及び研磨方法, 特願2002-286901, (2002)
- 2) 永田, 楠本, 渡辺, 他11名: オープンインタフェイスを有する産業用ロボットを用いた金属材料の高品位磨きシステムの開発, 第4回日本ファジィ学会九州支部学術講演会予稿集, pp. 13-16, (2002)
- 3) 永田, 楠本, 渡辺, 他2名: 金型の高品位磨きのための軸付砥石のモーショ／力制御法, 第12回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集, pp. 133-136, アバンセ(佐賀県立女性センター・佐賀県立生涯学習センター), (2002)
- 4) F. Nagata, K. Watanabe, Y. Kusumoto, et al.: High Precision Polishing Robot Using a Learning-Based Surface Following Controller, *Procs. of 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA2003)*, pp. 91-96, (2003)
- 5) 永田, 渡辺, 津田, 他4名, “多軸制御用CLデータに基づく倣い制御器を用いた力制御ロボットサンダーの開発とその評価実験”, *精密工学会誌*, Vol. 68, No. 7, pp. 953-957, (2002)
- 6) F. Nagata, K. Watanabe, et al.: 3D Machining and Finishing System for New Designed Furniture, *Procs. of 2002 Japan USA Symposium on Flexible Automation*, Vol. 3, pp. 1239-1245, Hiroshima, Japan, July (2002)
- 7) F. Nagata, K. Watanabe, et al., Flexible Finishing System Using Hyper Cutter Location Data, *Procs. of The 6th International Conference on Mechatronics Technology*, pp. 218-223, Kitakyushu, Japan, Sept. (2002)