

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(1)

- ボールエンド形状の軸付き弾性砥石のための学習型モーション/力制御系の開発 -

永田寅臣*1 楠本幸裕*1 安田仁徳*2 津田邦博*2 渡辺桂吾*3 木口量夫*3

Development of Super Polishing System for Metallic Molds with Curved Surface

Development of Learning-based Motion and Force Control Strategy

for Mounted Abrasive Rubber Tools with Ball-end Shape -

Fusaomi Nagata, Yukihiro Kusumoto, Kiminori Yasuda,

Kunihiro Tsuda, Keigo Watanabe and Kazuo Kiguchi

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システムを試作開発した。本稿では、従来の自動磨きシステムがPETボトル金型の磨き作業に対応できなかった問題点を客観的に整理するとともに、それらを解決するために提案した学習型モーション/力制御法について詳述する。提案手法では、まず、Windows APIを有する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、磨きシステムを構成する。つぎに、砥石の押付力と砥石に作用する摩擦力の合力を磨き力として定義し、この磨き力を安定的に制御することで高品位な磨き機能を目指すものである。

1 はじめに

現在、ペットボトル製造用の金型の需要は世界的規模で益々増大している状況にある。この金型製造において最も自動化が望まれているのが、NC加工後の磨きの工程である。金型の製造分野においては、3次元CAD/CAMシステムやマシニングセンタの普及により、設計/加工の工程が大幅に合理化されてきている。しかしながら、最終工程である磨きの工程は未だ熟練者の手磨きに支えられている状況である。現状では、限られた人数の熟練作業者が砥石などを使用し、例えばペットボトル用金型の場合、熟練者一人当たり3日に約1個のペースで手作業にて仕上げられている。このため、安価な人件費で対抗してくる中国などアジア地域の金型製造業に対して日本国内の企業は非常に大きな危機感を抱いている。このような背景から、仕上げ精度、製造時間、製造コストの全ての点で優位に展開していくことができる自動磨きシステムの研究開発に大きな期待が寄せられている。

本研究では、まず、軸付き砥石を装着した産業用ロボットにより動作自由度の高い磨きシステムを構成する。つぎに、軸付き砥石のための学習型モーション/力制御法¹⁻³⁾を提案し、凹型曲面を有するアルミワ-

クの磨き実験によりその有効性を検証する。

2 従来システムの問題点

これまでに行われてきた金型磨き工程の自動化研究の代表的なものとして、マシニングセンタや産業用ロボットに専用の研磨工具を取付け、工具の押付力を一定に保ちながら磨くことで目標とする仕上精度を実現しようとした自動研磨装置が多数提案されている。しかしながら、エア駆動あるいは電気駆動の回転式・振動式の磨き工具が使用されているため、複雑な駆動ノイズの発生により、これら工具を使用した場合の最適な押付力(数百gf程度)の検出が困難である、回転・振動による研削力が強く、工具駆動トルクと押付力の微調整が困難である、磨き品質に重要な影響を及ぼす運動摩擦や粘性摩擦が考慮されていないため、均一な仕上げ品質が得られない、といった問題点がある。このため、パーティション部のエッジを過研磨しやすいなどペットボトル金型で使用されている程度の曲率を有する自由曲面の高品位磨きに対応できていないようである。

3 学習型モーション/力制御系の提案

本節では、本プロジェクト事業で開発する磨きシステムの基本制御戦略であるモーション/力制御法について述べる。これまでに、位置と力のハイブリッド

*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 佐賀大学大学院工学系研究科

制御法やインピーダンス制御法など、マニピュレータと環境との間に作用する力を制御するための手法が提案されているが、自由曲面を有する金型ワークの磨きシステムを実現するためには、工具の押付力の調整だけでは十分とはいえない。そこで我々は、砥石工具の押付力に加えて砥石工具と金型ワークとの間に作用する摩擦力を制御しながら所望の磨き品質を達成していくことができる磨き方法を提案する。

3-1 システム構成

図-1には、磨きシステムの概略図を示す。磨きシステム本体には、人間の腕に近いリンク機構を備えていること、既に産業界における実績が多数あり信頼性と安定性を確保できること、技術情報を得やすいなどの理由により、垂直多関節型の産業用ロボットを想定している。特に最近では、従来の教示方式インタフェースに加えて、ユーザがアプリケーション開発を行えるように内部アーキテクチャが公開されたオープンインタフェースを有するコントローラが提供されてきているため、本システム開発においても積極的に採用することとする。これにより、例えば、VC++からコールできるキネマティクスやサーボコントロールなどのAPIを利用することで、ユーザ側で開発する速度指令の制御則を容易に適用できるようになる。

つぎに、ロボットアーム先端には、図-2のように各方向の力覚情報を独立に観測できる力センサを装着し、その先にアルミ製の軽量アタッチメントを介して様々な軸付き砥石を固定できる。基本的な磨き戦略として、従来から問題となっている砥石周辺部とワークとの干渉を防ぐために砥石の姿勢は変化させず、図-3のように工具軸をロボットベース座標系(O-XYZ)のZ軸に固定し、工具の3自由度並進移動と磨き力(押付力と摩擦力の合力)のハイブリッド制御で磨きを行う。この場合、砥石が自由曲面を有する金型ワークとの良好な接触状態を維持できるように、ボールエンド形状の砥石を用いる。例えば、図-3において、ワーク底面は砥石のボールエンド(先端)部分で磨かれ、ワーク側面は砥石のフラット(側面)部分で磨かれることになる。これにより、砥石の外周を効率的に消費しながら磨きを実行できるため、長時間の自動運転にも適用できるものと期待される。

3-2 弾性砥石とワーク間に作用する摩擦力の制御

準備実験として、軸付き砥石をハンディタイプの電動工具に装着し、平面金属ワークを手動操作で磨いて

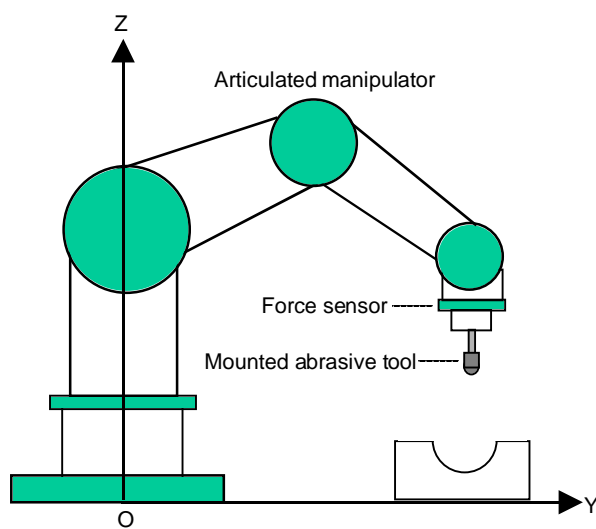


図-1 磨きシステムの概略図

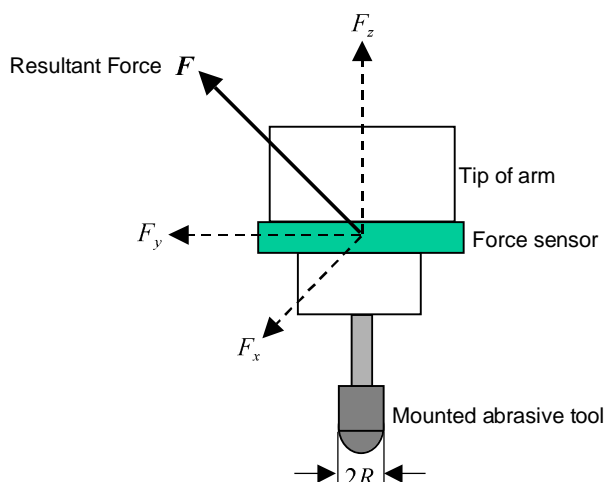
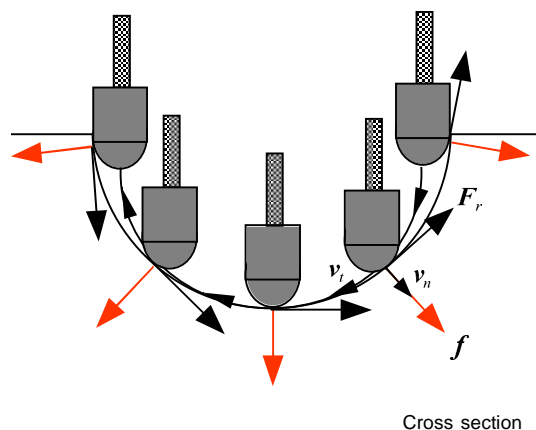


図-2 アーム先端に装着する力センサと軸付き砥石



Cross section

図-3 軸付き砥石のためのモーション・力制御法

みた。ところが、ハンディタイプの電動工具では軸回転速度が 10,000 r/min 以上にもなるため、研削力が非常につよく、数百グラム程度の押付力でも火花が発生し過研磨ぎみになってしまった。また、既に商品化されている木工用ロボットサンダー⁴⁻⁶⁾の先端にエア駆

動工具を装着し、アタッチメントを介して軸付き砥石を取付け同様な磨き実験を行ったが、工具の回転運動に伴う高周波数の振動が発生するため、力センサで数百グラム程度の押付力の変化を観測することは困難であった。さらにこの場合は、ロボット本体、力センサ、アタッチメント、工具などに弾性成分が含まれておらず、非常に硬い系での力制御を行う必要があったため、ゲインを小さくすることで制御系の安定化を図った。この準備実験により、軸付き砥石を高速回転させその回転運動による研削力で磨きを実行する方法は適用が困難であると思われたため、実際に熟練者の磨き作業風景を観察し、その熟練者スキルに基づく磨き戦略について検討することとした。熟練者は、電動式やエア駆動式の工具は使用せず、竹へらの先端にゴム材を介して研磨紙を貼り付けた専用工具を使用している。この場合、NC加工後の大きなカスプマーク除去から仕上げ磨きまでに対応するため、研磨紙の粒度を #320 #400 #600 #800 #1000 #1200 #1600 #2000 のように細かくしながら作業を進めている。特に、磨きの方向を横方向や縦方向に適度に変化させながら磨くことで、磨きに伴う傷を効率的に除去していた。そこで、本システムでもこのような熟練者の磨き技能を目標とし、砥石とワーク間に発生する摩擦力を考慮した磨き方法を検討した。

本システムでは、まず、**図-3**に示す軸付き砥石とワーク間に作用する摩擦力として、運動摩擦力 $-\mu |f| (v_x / |v_x|)$ kgf と粘性摩擦力 $-v_x$ kgf を考慮する。つぎに、この摩擦力と工具の押付力 $f(f_x, f_y, f_z)$ kgf との合力を磨き力(Polishing force) $F(F_x, F_y, F_z)$ kgf として定義する。ただし、押付力 f は工具とワークの接触地点におけるワークの法線方向速度 $v_n(v_{nx}, v_{ny}, v_{nz})$ mm/s により与える。また、 μ と v_i はそれぞれ、運動摩擦係数と粘性摩擦係数であり、 $v_i(v_{ix}, v_{iy}, v_{iz})$ mm/s は工具の接線方向速度である。従来、軸付き砥石工具はその回転運動(数千~2万 r/min 程度)や往復運動により研削力を得ていたが、本システムでは磨き力の目標値を繊細に設定できるように、かつ、ノイズの少ない力覚情報を測定できるように、軸付き砥石をアタッチメントに固定し工具の回転をロックして使用する。なお、砥石の外周を均一に消費していくため、マニピュレータの6軸目を使用し、 $\omega = 1/180 \sim 1/18$ rad/s 程度の低速度で砥石を往復回転させる。

つぎに、**図-2**のように、磨きを実行中に力覚センサ

で検出された各方向の力の合力 $F(F_x, F_y, F_z)$ kgf には、押付力と摩擦力が含まれているため、これを磨き力とみなすことができる。この力覚信号には工具回転に伴うノイズ成分がほとんど含まれないため、500 Hz のカットオフ周波数でフィルタ処理した信号を用いた。この場合、砥石に作用する運動摩擦力と粘性摩擦力の合力 $F_r(k)$ は次式で与えられるものとする。

$$F_r(k) = -\mu |f(k)| \left(\frac{v_i(k)}{|v_i(k)|} \right) - v_i(k) \quad (1)$$

ただし、 k は離散時刻を表す。さらに、前述のように**図-2**に示す力センサで観測された各方向の力の合力 $F(k)$ が工具の押付力、運動摩擦力および粘性摩擦力から構成される磨き力であることから、 $F(k)$ は次式で表すことができる。

$$F(k) = f(k) + F_r(k) \quad (2)$$

式(2)に示される砥石工具の磨き力は、次式に示すインピーダンスモデル追従型力制御法を用いてフィードバック制御する⁴⁾。

$$v_n(k) = e^{-M_d^{-1} B_d \Delta t} v_n(k-1) - \left\{ e^{-M_d^{-1} B_d \Delta t} - I \right\} B_d^{-1} K_f \{ F(k) - F_d \} \quad (3)$$

ただし、 $K_f = \text{diag}(K_{fx}, K_{fy}, K_{fz})$ はカフィードバックゲイン行列である。 $M_d = \text{diag}(M_{dx}, M_{dy}, M_{dz})$ 、 $B_d = \text{diag}(B_{dx}, B_{dy}, B_{dz})$ はそれぞれ、目標慣性行列および目標粘性行列である。 M_d 、 B_d 、及び K_f は正定の対角行列に設定する。 $F_d(F_{dx}, F_{dy}, F_{dz})$ は、目標とする磨き力ベクトルであり、 Δt と I はそれぞれ、サンプリング幅と単位行列である。

3-3 目標軌道の自動調整

これまでも産業用ロボットの教示作業を効率的に行う手法が多数提案されている⁷⁾。既に開発している木工用ロボットサンダーにおいては、研磨実行時の理想的な目標軌道を安全に獲得する目的で、ジョイスティック支援による教示システムを開発している⁸⁾。さらに、3次元CAD/CAMシステムで設計・加工されている場合には、CAMのメインプロセッサが算出するカッターロケーションデータ(CLデータ)⁹⁾を直接目標軌道に利用できるように位置・姿勢補償器⁶⁾を開発し、ロボットに実装してきた。今回課題とされている金型

ワークもCADで設計されているため、弾性砥石の並進移動を行う方向の目標軌道にCLデータを用いることができる。

図-4と図-5には、シリンダー形状をしたアルミワーク金型の研磨実験で使用する横方向と縦方向の目標軌道を示す。例えば横方向のパスでは、経路条件としてワークの断面に沿った送り幅 0.2 mm のジグザグパスを指定しているため、CAMのメインプロセサは、工具が図-6の(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (6) (5) (4) (3) (2) (1)と往復移動するようなパスを生成する。このため、このCLデータを磨きシステムの目標軌道として直接参照すると、(1)や(7)のように磨き戦略上好ましくない状況が発生する。これは、(1)あるいは(7)の状態まで工具が移動すると、その過程でパーティション部分のエッジを過研磨してしまい品質を著しく損ねてしまうためである。この問題点を解決するため、提案システムでは、パスの最下点からの最大高さ h mm をパラメータ(Max. height)として考慮し、使用する工具形状に応じて例えば、(2)及び(6)の高さ

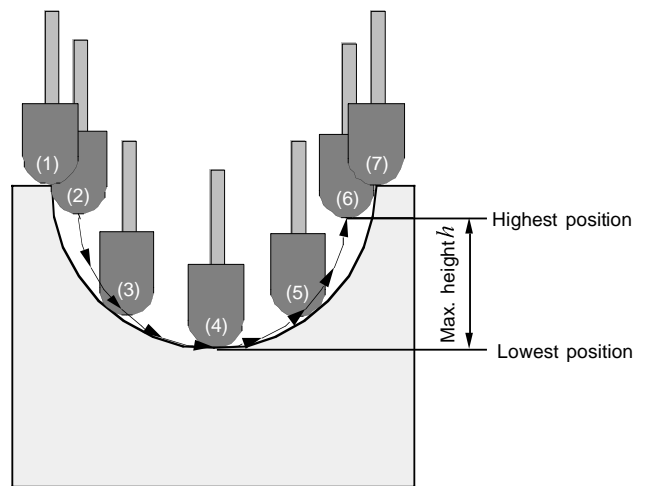


図-6 最大高さ h を考慮した目標軌道の補正

上工具が上昇しないようにした。具体的には、CLデータの中で最大高さ以上の値を持つステップは全て強制的に読み飛ばす処理を行うが、工具最上点((1)あるいは(7))でのステップにはピックフィード(送り動作)のための移動量(今回は 0.2 mm)が記述されているため、この送り量だけは自動的に抽出できるようにしている。これにより、ユーザは使用する工具形状に応じて最大高さを設定するだけで、汎用的なCLデータをそのまま適用できるようになった。このほか、自動研磨中における不意の異常を検知するため、力センサからの値が突然零に変化したり(例えば、砥石破損による非接触状態の発生による)、工具先端の位置が最下点以下の値を示した場合には、自動的に運転を停止し、ワークを不用意に傷つけることのないようにしている。

通常、ペットボトル製造用のアルミ製金型は3次元CAD/CAMとマシニングセンタで設計・加工されているため、本システムで採用しているCLデータを参照するテクニックは、これまで切望されてきた教示レス化を簡単に実現するための有効な手法といえる。

3-4 軸付き砥石の軌道制御

砥石の最初の基本経路には、CAMのメインプロセサがジグザグパスや渦巻きパスなどで生成したCLデータ $T(n) \in \mathbb{R}^6$ を用いることができる。このCLデータは、指定されたトレランスを満足するような直線近似により生成される。 $T(n)$ は位置ベクトルと姿勢ベクトルから構成され、 n はそのステップ数を表す。砥石の軌道は、指定された速度ノルムとCLデータに基づいて算出された接線方向速度 $v_t(k)$ によりフィードフォワード制御される。なお、式(3)により磨き力を制御する場合、速度 $v_n(k)$ は $v_t(k)$ に対して直交する方向へ加える。と

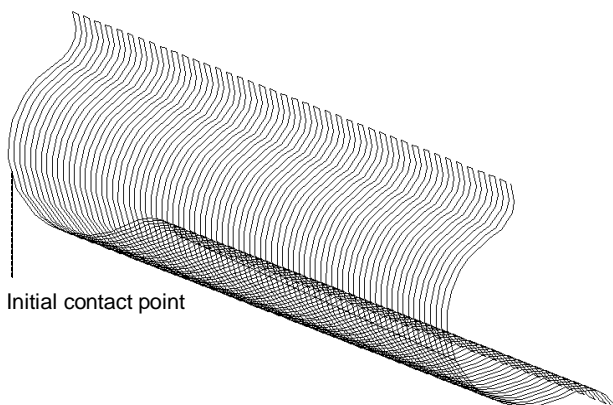


図-4 CAMで生成された横方向のジグザグパス

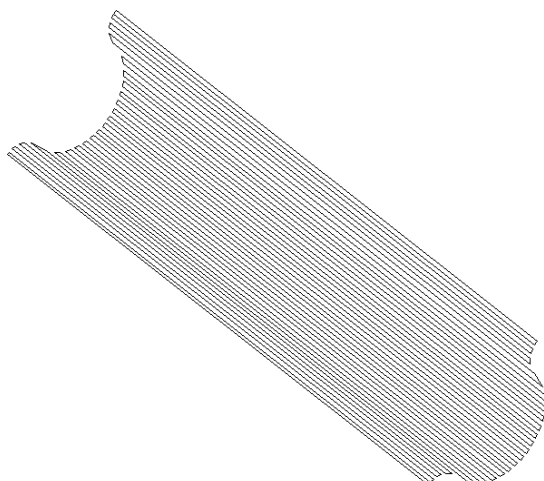


図-5 CAMで生成された縦方向のジグザグパス

ここで、ペットボトル金型はパーティション部で2分割された形状をしているため、オーバハング部分が存在しない。このため、砥石工具の先端がボールエンド形状であれば、砥石とワークは良好な接触点を持ち続けることができる。このような理由から、本提案システムでは砥石の姿勢は変化させず、姿勢がワーク座標系のZ軸方向に追従するように制御している。結果的に、砥石の姿勢変化に伴うワークとのクリティカルな接触状態が発生しないため、磨き力の急激な変化（振動やオーバシュート）が発生しにくくなった。マシニングセンタが3次元加工を行う場合に使用されるCLデータの形状精度は $1\mu\text{m}$ 程度であるが、研磨ロボットが目標軌道として参照するCLデータのそれは 1mm 程度である。このことから1,000倍程度精度を粗く設定してCLデータを生成しても問題ないことがわかる。これは、開発した研磨ロボットでは、砥石工具のフィードフォワード制御のための操作量をだまかに算出するためにCLデータが参照されるだけであるが、ワークの形状精度や固定位置に関する誤差及び不確かさは、式(3)で与えられる力制御戦略により理想的に吸収されてしまうからである。

3-5 目標軌道の学習機能

提案システムでは、個々のワークの磨き作業における最初の目標軌道としてCLデータを参照するが、2回目以降の磨き作業では、前回の磨き作業で得られた砥石の実軌道を用いることができる。これは、図-7に示す磨き戦略により得られる力偏差の少なくなった実軌道 $P^i(k)\{P_x^i(k), P_y^i(k), P_z^i(k)\}$ をつぎの磨き工程の目標軌道として繰り返し保存しているためである。 i は作業回数を表す。例えば、砥石の粒度を#150 #300

#600 #900 #1200 酸化クロムパフと変化させて仕上げる場合、作業回数は6となる。この目標軌道の学習機能により、磨き作業を進める過程で力偏差 $\sum_{k=1}^n |F(k) - F_d|$ (k は離散時刻で、 n は一工程に要した時間である) の発生が少ない望ましい磨き応答が得られるようになるため、ワーク表面の仕上げ品質も大きく改善されるものと期待される。その他、砥石が最初にワークに接触する際(アプローチ時)の応答を改善するためにニューラルネットワークを応用した力制御法¹⁰⁾を併用している。

4 実験

提案するモーション/力制御法の基本性能を評価するため、図-8のように(株)メイホー製の軸付き弾性砥石を用いた倣い制御実験を行った。まず、砥石は 2mm/s の低速で図-4に示す最初の接触地点まで降下する。つぎに、ワークとの接触を検知するとロボットの第6軸を使用し、 5rad/s で工具を往復回転させながらジグザグパスに沿った倣い移動を開始する。設定した目標の磨き力 F_d は 3kgf である。図-9には磨き力の制御結果を示す。工具が最上点から降下する際に磨き力が減少していることが確認できるが、これは力フィードバック制御ゲイン $K_f = \text{diag}(K_{f_x}, K_{f_y}, K_{f_z})$ を各方向とも同じ値に設定していることに起因している。磨き実行中は、砥石先端が押下されるA地点付近(Z方向への力制御が主に働いている)に比べて、砥石側面が撓るように接触するB及びC地点付近(X方向への力制御が主に働いている)の方が系の剛性が低いため、 K_f を各方向で独立に設定することで応答を改善できるものと考えられる。

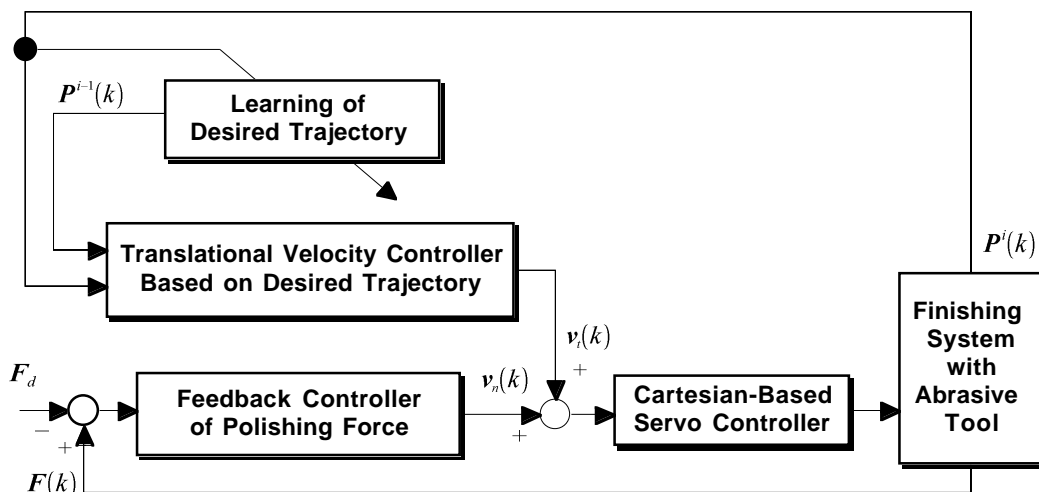


図-7 学習型モーション/力制御法

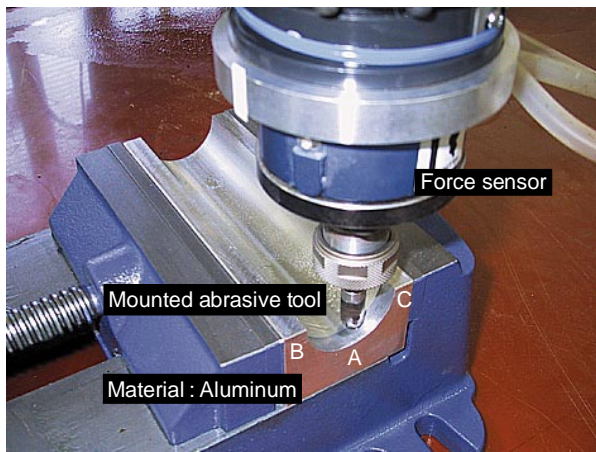


図-8 オフセットのない砥石の接続

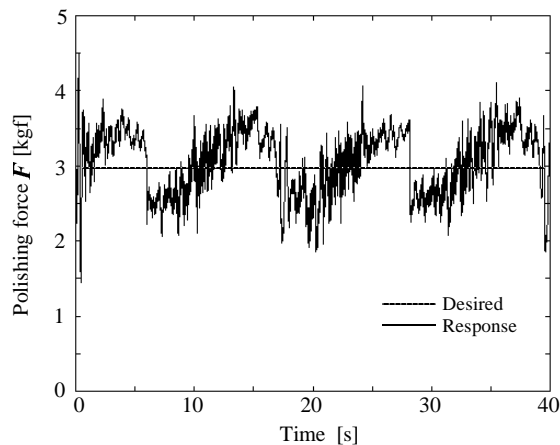


図-9 FS20による磨き力の制御結果

さて、磨き実行後のワーク表面を目視と触感により評価した結果、全体的に安定した綺麗な表面性状が確認された。これは、人間に比べて平均的に安定した磨き力を発生できたことによる磨き効果と考えられる。

5 おわりに

本研究では、ボールエンド形状の軸付き弾性砥石のための学習型モーション/力制御法を提案し、その実現方法を詳述した。シリンダー形状のアルミワークを用いた簡単な磨き実験により、提案手法の有効性が確認された。

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 - 学習型モーション/力制御系の開発と磨き実験による性能評価 - 」として実施したものである。

6 参考文献

- 1) 永田, 楠本, 渡辺, 津田, 安田: ペットボトル金型の高品位磨きシステムの開発 - ボールエンド形状砥石のハイブリッドモーション/力制御法 -, 第3回SICEシステムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 83-84, 神戸市産業振興センター, (2002)
- 2) 永田, 楠本, 渡辺, 津田, 安田: 金型の高品位磨きのための軸付砥石のモーション/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)
- 3) F. Nagata, K. Watanabe, Y. Kusumoto, et al.: New Finishing System for Metallic Molds Using a Hybrid Motion/Force Control, *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2003)*, The Grand Hotel, Taipei, Sept. (2003), accepted.
- 4) 永田, 渡辺, 津田, 川口, 他3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)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 水川, 小山: 産業用ロボットの教示方法の現状と展望, *日本ロボット学会誌*, Vol. 17, No. 2, pp. 180-185, (1999)
- 8) F. Nagata, K. Watanabe, et al.: Polishing Robot Using a Joystick Controlled Teaching system, *Journal of Robotics and Mechatronics - Special Issue on Recent Advances in Robot Control -*, Vol. 13, No. 5, pp. 517-525, (2002)
- 9) JISハンドブック, 工作機械 B6325 (数値制御プロセッサの出力 - CLDATA), 日本規格協会
- 10) F. Nagata, K. Watanabe, et al.: Learning of Contact Motion Using a Neural Network and Its Application for Force Control, *Procs. of the 4th Asian Control Conference (ASCC2002)*, pp. 420-424, Singapore, Sept. 25-27, (2002)