

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(3)

- ペットボトル金型の磨き実験と表面粗さ測定器による定量的評価 -

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

Development of Super Polishing System for Metallic Molds with Curved Surface

-Polishing Experiments of PET Bottle Molds and

its Quantitative Evaluation with a Stylus Instrument -

Fusaomi Nagata, Yukihiro Kusumoto, Kiminori Yasuda,

Kunihiro Tsuda, Masaaki Omoto and Naoki Mori

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、試作開発した磨きシステムで磨いたシリンダーワークの磨き面を表面粗さ計を用いて定量的に評価するとともに、自由曲面を有するペットボトル金型の磨き実験を行ったので報告する。メイホー製の弾性ゴム砥石を用いた場合、磨きシステムでは #400 程度までの砥石で磨くだけで、熟練者が #800 程度の砥石まで仕上げた場合と同程度の磨き品質が得られることが確認された。さらに、カスプマークが効率的にかつ高品位に除去できたため、酸化クロムで拭き上げると鏡面性状を達成することができた。

1 はじめに

本研究では、まず、安川電機製の腕型マニピュレータにメイホー製の弾性ゴム砥石を装着し、基本的な磨きシステムを構成した。つぎに、弾性ゴム砥石のための学習型モーション/力制御法を開発し¹⁻³⁾、この磨きシステムにインプリメントすることで自由曲面を研磨できる自動磨きロボットを構築してきた⁴⁻⁶⁾。

本稿では、試作開発した磨きロボットで磨いたアルミ製ワーク表面の定量的評価を行い、熟練者が磨いた場合と比較検討する。つぎに、磨きロボットのためのCAMシステムを構築するために、力制御系と位置制御系が干渉しあうハイブリッド制御法を提案する。最後に、自由曲面を有するペットボトル金型の磨き実験を通じて、提案手法、提案システムの有用性について検証したので報告する。

2 金型磨き面の定量的評価

本章では、**図-1**に示すシリンダー形状のワークを用いて、熟練作業者が磨いた場合と磨きロボットで磨いた場合それぞれについて表面粗さを測定し、定量的な比較検討を行う。**図-2,3**には、熟練者と磨きロボットによる磨き風景をそれぞれ示す。使用した表面粗さ測

定器は、**図-4**に示す(株)東京精密のSURFCOM-1400である。**図-5**には計測結果を示している。熟練者の測

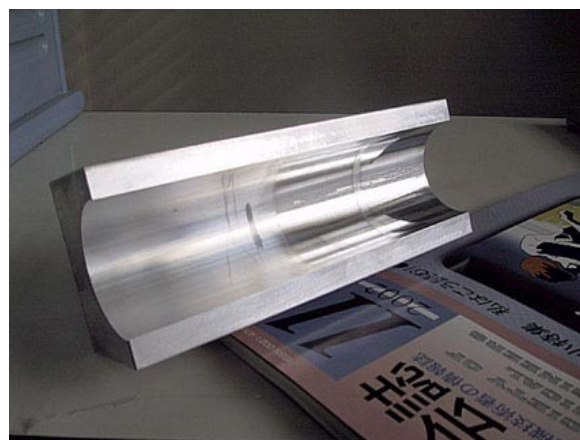


図-1 定量的評価のためのアルミワーク



図-2 熟練者による金型の磨き風景

*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

定データ(I : 算術平均粗さ Ra μm , I : 最大高さ Ry μm)は, 砥石の粒度を #220 #320 #400 #600 #800と細かくして磨いた場合のそれぞれの値と, 酸化クロムで鏡面に仕上げた面の値を折れ線グラフに表している。一方, 開発した磨きロボットの測定データ(I : 算術平均粗さ Ra μm , I : 最大高さ



図-3 開発した磨きシステムによる磨き風景



図-4 表面粗さ測定器SURFCOM-1400

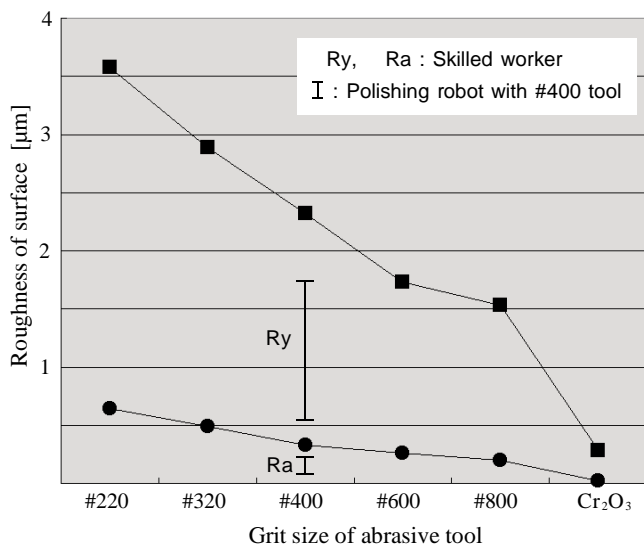


図-5 シリンダーワークの底部磨き面の定量的評価

Ry μm)は, これまで行ってきた磨き実験の中で, 砥石の粒度を #220 #320 #400と細かくしながら磨いた場合の値である。複数のワークを用いて条件を試行錯誤的に変えながら磨き実験を行っていたため, 測定結果にバラツキが発生しているものの, ほぼこの範囲内に収まることが確認された。これまでの実験結果から, 磨きシステムでは #400 程度までの砥石を用いるだけで, 従来熟練者が #800 程度まで粒度を細かくしながら磨いていたときと同程度の仕上げ面を得ることができるものと思われる。

3 磨きロボットのためのCAMシステムの開発

3-1 力制御系と位置制御系が干渉しあうハイブリッド制御法

実際にペットボトル金型の磨き評価を行うために, まず, 図-6に示すようなCADモデルをもとにNC加工されたアルミワークの微い制御実験を行った。このアルミワークでは, 断面方向にカスプラインが発生している。微い制御実験で使用した工具は, 図-7に示す軸付きフェルトパフである。シリンダー形状のワークをジグザグパスで磨いたときは, 磨き力の閉ループ処理を行う方向(工具接触地点における法線方向)がロボット座標系における X 及び Z 軸方向であり, ピックフィードは Y 軸方向に 0.2 mm ずつ行わせていた。Y 軸方向への工具のピックフィードは, 腕型マニピュレータ用API の `yeapi_SetSegmentCartesian()`を用いたオープンループで行っていたが, 力制御に伴う操作量が Y 軸方向に発生しないため, ほぼ正確に 0.2 mm ずつの送りを実行することができた⁷⁻⁹⁾。一方, 図-7のようなペットボトル金型の場合は, 例えば径が変化する部分で 3 方向同時に力制御を行うことになる。このため, Y 軸方向にも力制御に伴う操作量が発生することになり, ジグザグパスに沿った Y 軸方向への正確な送り(0.2 mm ずつ)が実行できなくなる。具体的には, 径が小さくなる方向の場合は工具が上昇できなかったり, 逆に径が大きくなる場合は工具が滑り落ちるような現象が起きてしまう。この問題点を解決するために, すなわち, ジグザグパスに伴う工具のピックフィード量を正確に実行できるように, 工具のピックフィード方向では磨き力の閉ループに加えて P 動作による簡単な位置の閉ループを併用する構成とした。この場合, 磨き力の制御性能に影響しないように速度への変換ゲインを 0.01 程度の小さな値に設定している。

図-8には、開発した磨きロボットの制御系のブロック線図を示す。まず、 $f(f_x, f_y, f_z)$ と $x(x, y, z)$ はそれぞれ、力覚センサで計測された力ベクトルと、順キネマティクスで求められたツール先端の位置・姿勢ベクトルである。 $v_n(v_{nx}, v_{ny}, v_{nz})$ と $v_t(v_{tx}, v_{ty}, v_{tz})$ はそれぞれ、

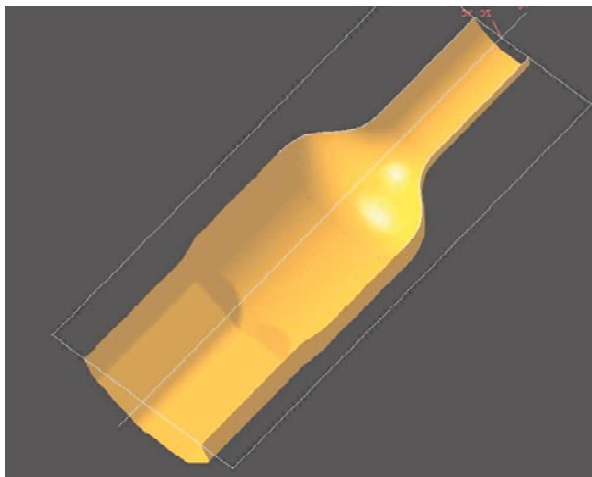


図-6 ペットボトル金型用のCADモデル



図-7 フェルトパフ工具での倣い実験

力フィードバック制御則(インピーダンスモデル追従型力制御法)と、CLデータに基づくフィードフォワード位置補償器が生成する速度ベクトルである。 v_n と v_t はそれぞれ、砥石とワークの接触地点における法線方向と接線方向に与える。 $f_d(f_{dx}, f_{dy}, f_{dz})$ は目標とする磨き力ベクトルである。また、 $v_p(v_{px}, v_{py}, 0)$ は位置のフィードバック制御則が生成する速度ベクトルであり、次式で与えられる。

$$v_p = K_v(x_d - x) \quad (1)$$

ただし、 $K_v = \text{diag}(K_{vx}, K_{vy}, 0)$ は速度への変換ゲイン行列であり、 $x_d(x_{dx}, x_{dy}, 0)$ はCLデータに基づく目標の位置ベクトルである。 v_p を与えることで砥石はCLデータのXY成分に追従しながらワーク表面上を移動することができる。なお、この制御戦略により、目標の磨き力で研磨しながら、自由曲面上をCLデータに沿って移動させることができるようになった。

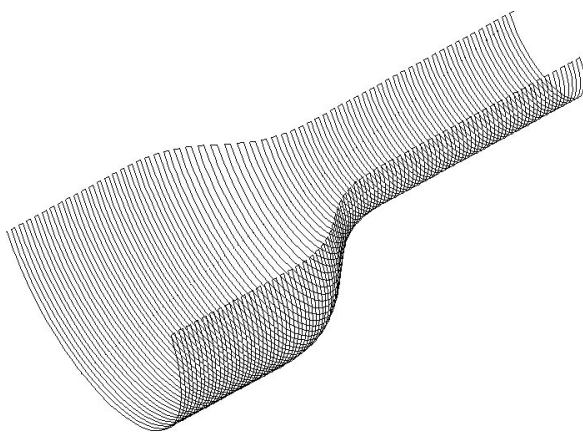


図-9 断面方向のジグザグパスの例

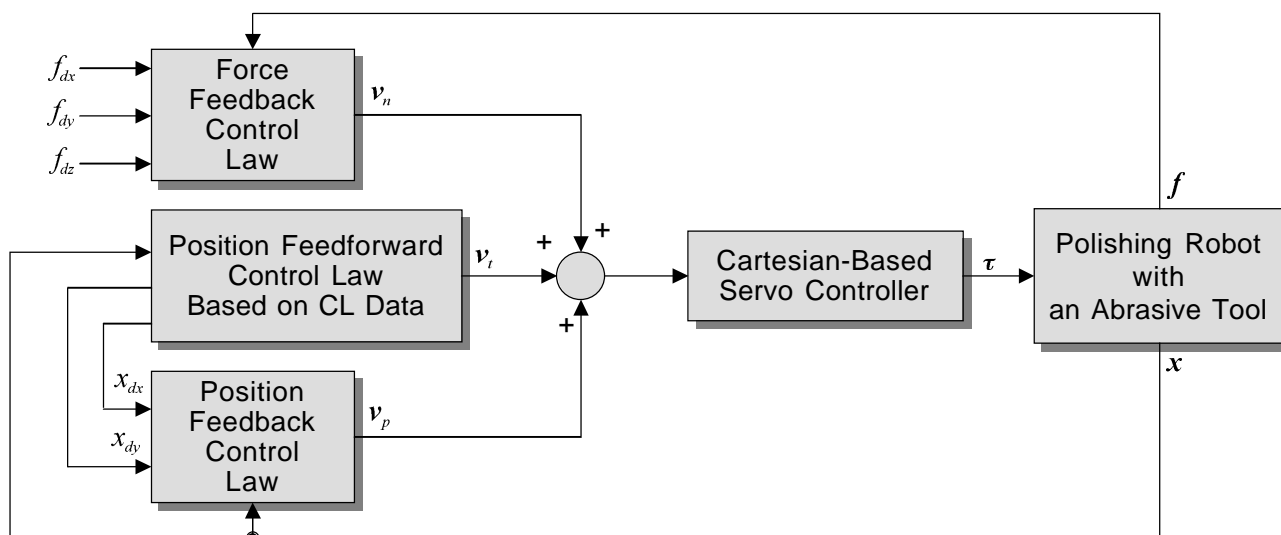


図-8 開発した磨きロボットの制御系のブロック線図

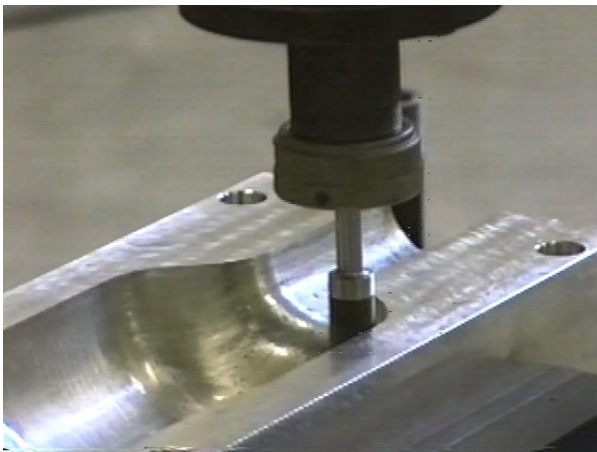


図-10 ペットボトル金型の磨き風景

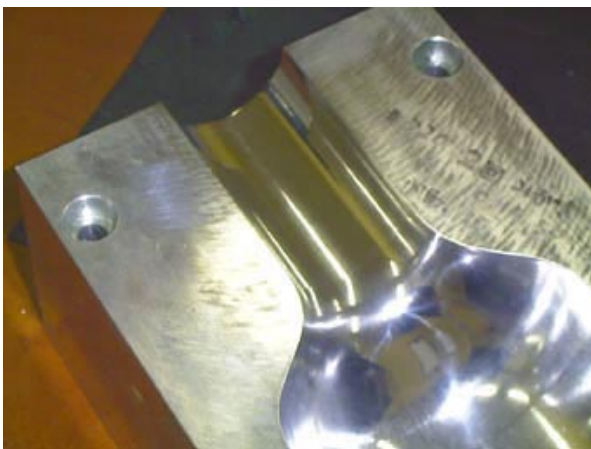


図-11 酸化クロムで拭き上げたワーク表面(1)

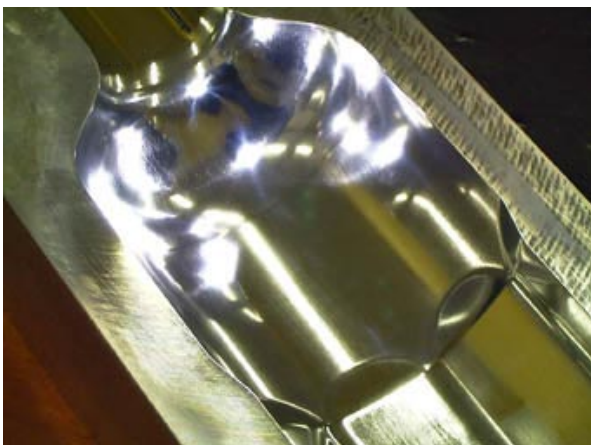


図-12 酸化クロムで拭き上げたワーク表面(2)

3-2 アルミ製ペットボトル金型の磨き実験

つぎに、図-9に示すピックフィード 0.2 mm の断面方向のジグザグパスを用いて磨き実験を行った。使用した砥石はメイホー製の弾性ゴム砥石 #220, #320, #400 である。図-10には磨き風景を示している。図-11,12には、その後ワーク縦方向のジグザグパスを用いて磨いた後に酸化クロムで拭き上げた後の状態を示している。これらの写真から #400 までの砥石を

使用しただけで鏡面特性を発現できることが確認された。この場合、算術平均粗さ Ra と最大高さ Ry の測定値はそれぞれ、 $0.05 \sim 0.11 \mu\text{m}$, $0.61 \sim 1.60 \mu\text{m}$ の範囲内であった。磨きロボットでは、磨き効率を大きく左右する磨き力を均一に発生させることができるために、このような磨き性能を発揮できたものと考えられる。本章で紹介した磨き実験結果から、提案する磨きロボットはこのような自由曲面に対してもストレスなく適用できることが確認できた。

4 成果と今後の展開

4-1 成果

従来、「低剛性な産業用ロボットベースでは、NC加工後の金型磨きの工程を自動化することはできない」、「産業用ロボットが発揮できる程度の繰り返し位置精度(0.1 mm 程度)では、金型磨きは不可能である」ということが定説となっていた。本研究では、マシニングセンタなどと比べて非常に安価な腕型マニピュレータ(垂直多関節型の産業用ロボット)に弾性ゴム砥石を装着し、既に提案している摩擦力を考慮に入れた磨き戦略を適用することで、現場普及型の画期的な自動磨きロボットを開発することができた。その後、シリンダー形状とペットボトル形状のアルミワークを用いて磨き実験を行い、システムの有効性を検証した。その結果、まず、手磨きの場合の第一工程であり、最も時間と負荷を必要としていたカスプマークの除去作業に対して優れた性能が確認された。#220 ~ #320 程度の砥石工具を用いるカスプマークの除去作業が安定的に自動化されるだけでも、システムの高い商品効果が期待される。つぎに、カスプマークが除去された金型ワークに対して、#400 程度の砥石を使用し、磨き実験を行った。その結果、図9に示した断面方向のパスとそれに直交した方向のパスを交互に用いて磨いていくに従い、ワーク表面の傷が小さくなり、非常に綺麗な表面性状が確認された。この場合、酸化クロムで拭き上げると最終目標である鏡面特性も確認することができた。現時点でも、カスプマークの除去を主目的とする基礎磨き程度の工程には十分適用できることが熟練作業者により評価された。

最後に、本稿で提案した磨きシステムの特徴は、以下のとおりである。

- 1) 従来、回転トルクにより研削力を発生させている軸付き砥石を回転させず、回転をロックして磨く。

ただし、ボールエンド形状の軸付弾性ゴム砥石の外周を均一に消費しながら磨くために、低速回転を併用する。

2) 回転による研削力ではなく、工具の押付力と並進移動速度によりそれぞれ発生される運動摩擦力と粘性摩擦力を考慮して磨く。

3) 工具の押付力と、運動摩擦力および粘性摩擦力など摩擦力との合力を磨き力として定義し、インピーダンスモデル追従型力制御法により磨き力を目標値に追従させるながら磨く。

4) 1 mm 程度のワーク固定位置の不確かさを吸収しながら磨くことができるため、位置決め精度を保証するための特殊な治具などを必要としない。

4-2 今後の展開

今後は、本プロジェクト研究で試作開発し有用性が確認された磨きロボットの商品化を早急に図るために、様々なペットボトル金型の磨き実験を実施し、システムの安定性と信頼性を高めていく予定である。加えて、産業界に広く多種存在するその他の金型磨き工程にフレキシブルに対応できるように、更に以下のような研究課題を解決しながら高度化を図っていく。

1) 仕上げ磨きにも十分対応できるようにするために、熟練者の腕のような柔らかさを発揮できなければならない。このため、軽量・安全な材質によるリンクの設計と、低剛性な関節機構について検討する。

2) オーバハングを持った金型ワークにも適用できるように7関節以上の自由度を持った冗長自由度を有するロボットへの拡張を検討する。

3) 制御戦略(ソフトウェア)としては、前述のロボット本体の各関節をコンプラインス制御しながら、ロボットアーム先端に装着する磨き工具の軌道制御と磨き力制御をハイブリッドに行うことで、熟練作業者のようなしなやかで高速な磨き動作を実現する。これにより、仕上げ磨きにも対応できるようにする。

4) 同一サイズのロボットであってもより大きな金型ワークを磨けるように、また、長時間運転に不可欠な効率的なミスト機能を実現するため、ワーク固定台に3自由度の並進制御機能と2自由度のチルト制御機能を持たせる。

5) ペットボトル程度の小型の金型ワークから、自動車ボディのような大型の金型ワークに対応できるロ

ボットのラインナップ構成を実現する。

6) 磨き工具については、大型の金型ワークを効率的に研磨するための軽量の磨き工具を開発する。現在使用している直径1 cm程度から直径10 cm程度までの回転トルク制御可能な砥石工具をツールチェンジャーで自動交換できるようにする。さらに、小型の押付力センサを開発し、砥石工具のシャンク取付け部に実装することで、磨き工具を高速に動作させた場合でも工具押付力を高精度に観測できるようにする。

7) #600~#1200程度の弾性砥石工具を用いた磨き実験とフィールドテストによる総合評価

8) 曲率半径1 mm程度の微小曲面を有するワークを繊細に研磨できるように、1 gf~500 gf程度の力制御機能について検討する。

今後もこのような高度化研究に取り組み、それらの成果を融合させることで、材料やサイズ、目標精度などの様々な金型磨きニーズにフレキシブルに対応できる「万能型金型磨きロボット」を構築していく。これにより、世界的な競争下であっても、ハードとソフトの両面で優位性を確保し続けることができるものと思われる。

5 おわりに

本研究では、まず、試作開発した金型磨きロボットを用いてペットボトル金型の磨き実験を行い、自由曲面への適応性を中心に基本性能を評価した。その結果、ペットボトルで使用されている程度の曲率を持った凹曲面に十分対応できることが確認された。特に、最も時間を必要としていたカスプマーク除去に優れた効果が見られた。つぎに、表面粗さ測定器を用いて研磨後のワーク表面を局所的に定量評価した結果、軸付弾性ゴム砥石を使用することで、磨き精度と磨き効率を大幅に改善できることが確認された。

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) 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) 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, (2003), accepted.
- 3) 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)
- 4) 永田，楠本，渡辺，木口：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 - ，平成13年度補正地域新生コンソーシアム研究開発事業成果報告書，pp. 80-103，(2003)
- 5) 津田，安田，永田，楠本：金型研磨ロボットシステムの開発，*機械と工具* 5月号別冊 - 最新金型加工技術 - ，pp. 77-82，工業調査会 (2003)
- 6) 津田，安田，永田，楠本：熟練職人技を低コストで代替する自由曲面金型の磨きロボットシステムの開発，*ツールエンジニア*5月号，Vol. 44, No. 5, pp. 60-65，(株)大河出版 (2003)
- 7) 永田，楠本，渡辺，他2名：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)
- 8) 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)
- 9) 永田，楠本，渡辺，ほか10名：オープンインタフェー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)