

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(3)

- ファジィコンプライアンス制御を用いた工具摩擦力の力覚提示 -

永田寅臣*1 小蓑正樹*2 渡辺桂吾*3

Automation of 3D Design and Manufacturing Process using AI Techniques

- Force Display of Polishing Tool's Friction Using Fuzzy Compliance Control -

Fusaomi Nagata, Masaki Komino, Keigo Watanabe

本稿では、教示作業中、研磨工具とワーク間に発生する摩擦力を作業者に提示することが可能なジョイスティック教示システムを提案する。対象とする摩擦力は、研磨工具の進行方向と逆方向に発生する。ジョイスティックは、コンプライアンス制御により仮想的なバネ - ダンパ系を構成しており、ファジィ制御で摩擦力に応じてバネの強さを変化させるようにした。例えば、教示中の摩擦力に応じてジョイスティックを低コンプライアンスに制御することで、作業者はそれを力覚で感知できるため、姿勢を適切に保つための処理を行うことができる。オープンアーキテクチャ型の産業用ロボット FS-20 を用い、単純曲面を有するワークでの教示実験と教示データを用いた木地の研磨実験を行い、提案手法の有効性を検証した。

1 はじめに

産業用ロボットは、これまで様々な製造業の分野に普及しており、自動化機械としての役割を果たしているところである。しかしながら、ユーザとの操作インタフェースは、未だに教示ペンダントを用いた教示方法のみが提供されているといった状況であり、よりユーザフレンドリな操作インタフェースの開発ニーズが高まっている。例えば、研磨ロボットを用いて自由曲面を有するワークを研磨する場合、従来の教示方法では曲面に沿って非常に多くの動作通過点を入力しなければならず、実用的でなかった。この問題点を解決するために筆者らは、ジョイスティック支援による力制御教示システムを提案してきた¹⁻⁵⁾。教示中、ユーザはジョイスティックを用いてロボットアーム先端に取付けた研磨工具の姿勢を直接制御できる。このとき、接触力と並進軌道は自動制御されるため、ユーザは過負荷や非接触状態を気にすることなく姿勢制御のみを行えばよい。

さて、自由曲面を有する家具部材の研磨作業で多用されているハンディタイプのオービタルサンダーやダブルアクションサンダーなどを使用する場合、工具をワークの法線方向付近から接触させることでより良好な仕上げ面を得ることができる。ところが、例えば

図-1のように進行方向に対して傾斜しすぎると、ワーク接平面上で進行方向とは逆方向に大きな摩擦力が発生してしまうため、材料表面を傷つけてしまうことになる。このような微妙な姿勢加減は目で確認しながら作業することが難しいため、何らかの対応策が必要となる。

本研究では、教示作業中に発生する摩擦力を作業者に提示することが可能なジョイスティック教示システムを提案する。ジョイスティックは、コンプライアンス制御により仮想的なバネ - ダンパ系を構成しており、さらにファジィ制御により摩擦力に応じてバネの強さを任意に変化させることができる。教示中に大きな摩擦力が発生したときにジョイスティックを低コンプライアンスに制御することで、作業者はそれを力覚で感知できるため、姿勢を適切に保つための処理を行うことができる。提案手法の有効性は、オープンアーキテクチャ型の産業用ロボット FS-20 を用いた単純曲面を有するワークの教示実験などを通じて検証した。

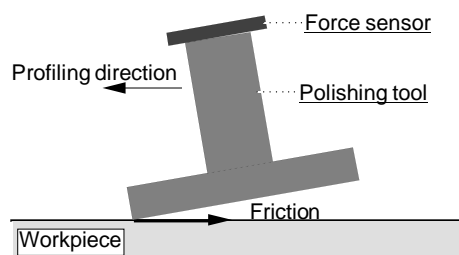


図-1 研磨中に発生する摩擦力

*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 佐賀大学大学院工学系研究科

2 力覚提示型ジョイスティックのコンプライアンス制御

提案する力覚提示型ジョイスティックシステムでは、研磨工具の姿勢を制御するために、図-2 の X 軸廻り及び Y 軸廻りのエンコーダの値をもとにロボットベース座標系における角速度を生成させる。また、図-1 のような摩擦の発生に応じてジョイスティックのコンプライアンスを変化させる。これにより、作業者は研磨工具とワーク間に発生している摩擦力の変化を感じながら教示作業を行うことができる。まず、ジョイスティックの望ましいコンプライアンス特性を次式で定義する⁶⁾。

$$\tau_j = B_j \dot{\theta}_j + \tilde{K}_j \theta_j \quad (1)$$

ただし、 $\tau_j \in \mathbb{R}^2$ はジョイスティックのモータ駆動トルクベクトル、 $\theta_j \in \mathbb{R}^2$ 、 $\dot{\theta}_j \in \mathbb{R}^2$ はジョイスティックの傾斜角度ベクトルと角速度ベクトルである。また、 $B_j = \text{diag}\{B_{jx}, B_{jy}\}$ 、 $\tilde{K}_j = \text{diag}\{\tilde{K}_{jx}, \tilde{K}_{jy}\}$ はそれぞれ、ジョイスティックに発生させる仮想的な粘性と剛性の係数行列である。添字 x, y はそれぞれ、図-2 における X 軸廻りおよび Y 軸廻りの成分であることを示す。さらに、発生する摩擦力に応じてジョイスティックのコンプライアンスを変化させるために \tilde{K}_j を次式のように定義する。

$$\begin{pmatrix} \tilde{K}_{jx} & 0 \\ 0 & \tilde{K}_{jy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{jx} & 0 \\ 0 & K_{jy} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta K_{jx} & 0 \\ 0 & \Delta K_{jy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここに、 $K_j = \text{diag}\{K_{jx}, K_{jy}\}$ は基準とする剛性係数行列を表し、 $\Delta K_j = \text{diag}\{\Delta K_{jx}, \Delta K_{jy}\}$ はファジィ推論により生成される補正剛性行列を表す。

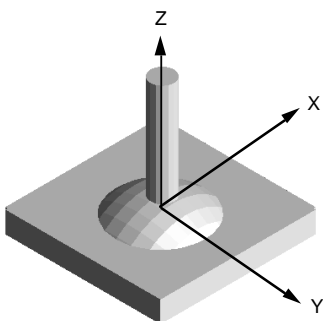


図-2 力覚ジョイスティックの座標系

3 ファジィ推論による補正剛性係数の生成

本節では、研磨工具とワーク間に発生している摩擦力を力覚（ジョイスティックのコンプライアンス）で作業員へ提示するために、簡略型ファジィ推論を用いて補正剛性行列を変化させる。この場合、ロボットベース座標系において X 軸方向に発生している摩擦力 f_x は、ジョイスティックの Y 軸廻りのコンプライアンスに反映させる⁷⁾。同様に Y 軸方向の摩擦力 f_y はジョイスティックの X 軸廻りのコンプライアンスに反映させる。

ファジィ入力には f_x, f_y を用い、以下のようにファジィルールを構成する。

$$\begin{aligned} \text{Rule 1 : If } |f_x| \text{ is } \tilde{A}_{x1} \text{ and } |f_y| \text{ is } \tilde{A}_{y1} \\ \text{then } \Delta K_{jx} = B_{x1} \text{ and } \Delta K_{jy} = B_{y1} \\ \text{Rule 2 : If } |f_x| \text{ is } \tilde{A}_{x2} \text{ and } |f_y| \text{ is } \tilde{A}_{y2} \\ \text{then } \Delta K_{jx} = B_{x2} \text{ and } \Delta K_{jy} = B_{y2} \\ \vdots \\ \text{Rule } L : \text{ If } |f_x| \text{ is } \tilde{A}_{xL} \text{ and } |f_y| \text{ is } \tilde{A}_{yL} \\ \text{then } \Delta K_{jx} = B_{xL} \text{ and } \Delta K_{jy} = B_{yL} \end{aligned}$$

ただし、 \tilde{A}_{xi} と \tilde{A}_{yi} はそれぞれ、 $|f_x|, |f_y|$ に対応した i 番目 ($i=1, \dots, L$) の前件部ファジィ集合であり、 L はファジィルールの総数である。また、 B_{xi}, B_{yi} はそれぞれ、ルール i における X 軸廻りと Y 軸廻り剛性係数

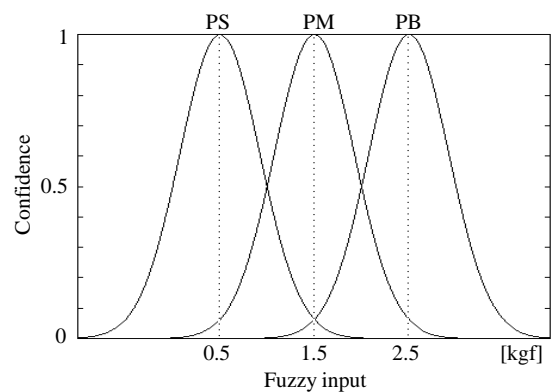


図-3 設計した前件部メンバシップ関数

表-1 設計した後件部メンバシップ関数

$ f_x $	$ f_y $		
	PB	PM	PS
PB	$(4.0K_{jx}, 4.0K_{jy})$	$(3.0K_{jx}, 4.0K_{jy})$	$(0.4K_{jx}, 4.0K_{jy})$
PM	$(4.0K_{jx}, 3.0K_{jy})$	$(3.0K_{jx}, 3.0K_{jy})$	$(0.4K_{jx}, 3.0K_{jy})$
PS	$(4.0K_{jx}, 0.4K_{jy})$	$(3.0K_{jx}, 0.4K_{jy})$	$(0.4K_{jx}, 0.4K_{jy})$

の補正量を表わす後件部定数値である。このとき、 i 番目のファジールールに基づく前件部適合度は次式で与えられる。

$$\omega_i = \mu_{A_{xi}} \{ |f_x| \} \wedge \mu_{A_{yi}} \{ |f_y| \} \quad (3)$$

ただし、 $\mu_x(\cdot)$ は式 (4) で与えられるガウシアン型の前件部メンバシップ関数で構成する。

$$\mu_x(x) = \exp \left\{ \log(0.5) \frac{(x - \alpha)^2}{\beta^2} \right\} \quad (4)$$

ここで、 α と β はそれぞれメンバシップ関数の中心値と標準偏差の逆数を表わす。このとき、補正剛性行列 ΔK_j は重み付き平均値法により次式から算出する。

$$\Delta K_j = \text{diag} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^L B_{xi} \omega_i}{\sum_{k=1}^L \omega_k}, \frac{\sum_{i=1}^L B_{yi} \omega_i}{\sum_{k=1}^L \omega_k} \right\} \quad (5)$$

図-3 には、設計した前件部メンバシップ関数を示す。また、各ルールに対応した剛性係数の補正量 (ΔK_{jx} , ΔK_{jy}) を表わす後件部定数値を表-1 に示す。なお、実験では 3 kgf 以上の摩擦力が生じた場合には過負荷とみなし、教示作業を中止して工具を退避させる処理を行う。このため図-3 に示す前件部では、台集合上の [0,3] の範囲が使用されることになる。

4 実験

4-1 実験システム

図-4 には、実験で使用した研磨ロボットを示す。ロボット本体は、川崎重工業株式会社製の 6 自由度産業用ロボット FS-20 (可搬重量：20 kgf) で、アーム先端にはニッタ社製の力覚センサを介して図-5 に示すコバックス社製のエア駆動の往復運動式工具 (サイズ：106×80 mm, 研磨紙の砥粒度：#120) を取付けている。図-6 には、米国 Immersion 社製の 2 自由度ジョイスティック Impulse Engine2000 を示す。このジョイスティックは、各モータの駆動トルクを 2048 段階に制御することで、最大 8.9 N までの力覚を提示できる。また、実験では式 (1) を用いてコンプライアンス制御を適用するが、角度には、次式のようにエンコーダ値 θ を $[-500, 500]$ の範囲で不感帯処理した値 $\tilde{\theta}_j = [\tilde{\theta}_{jx}, \tilde{\theta}_{jy}]^T$ を用いた。

$$\begin{cases} 0 & \text{if } -500 \leq \theta_{ji} \leq 500 \\ \tilde{\theta}_{ji} = \theta_{ji} - 500 & \text{if } \theta_{ji} > 500 \\ \theta_{ji} + 500 & \text{if } \theta_{ji} < -500 \end{cases} \quad (6)$$

図-7 には、教示モードにおける研磨ロボットシステムの制御系のブロック線図を示す。教示プロセスは、次のとおりである。まず、位置制御を行う方向では、並進移動の軌道生成器がジグザグパスなどの基準となる軌道を速度 $v_p(k)$ で生成する。ただし、 k は離散時刻を表す。姿勢制御を行う方向では、作業者が操作するジョイスティックのエンコーダ値から回転速度 $v_o(k)$ を生成させる。このとき、作業者は、研磨工具とワーク

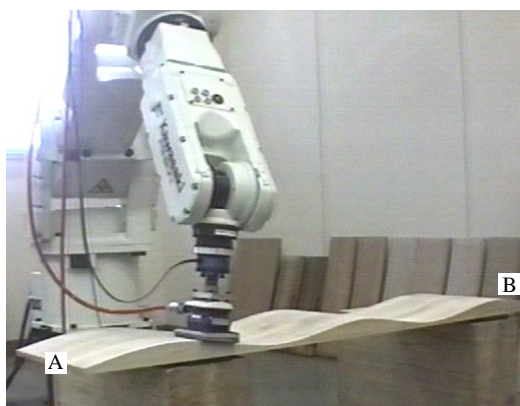


図-4 実験で使用した研磨ロボットFS-20

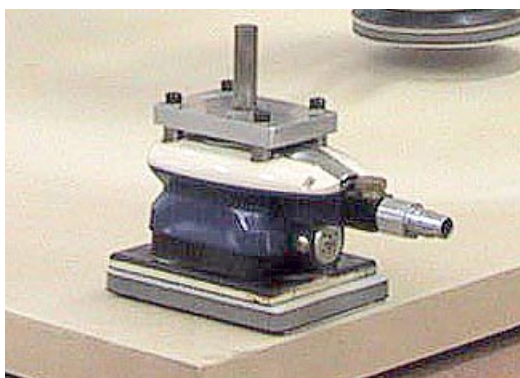


図-5 往復運動式の研磨工具



図-6 力覚提示型ジョイスティック

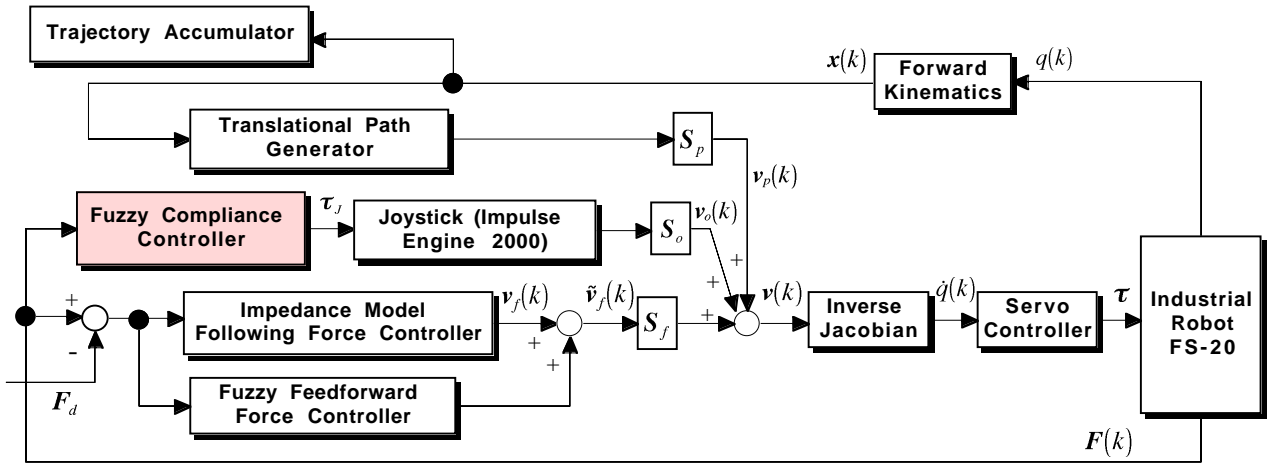


図-7 力覚提示型のジョイスティックを用いた場合の教示モードにおける研磨ロボットシステムの制御系のブロック線図

間に発生している摩擦力をジョイスティックのコンプライアンスとして感じながら教示を行うことができる。力制御を行う方向では、インピーダンスモデル追従型力制御法⁸⁾をファジィフィードフォワード制御法⁹⁾で補償した戦略を適用し、速度 $\tilde{v}_f(k)$ を生成させる。各方向の速度指令値はそれぞれのスイッチ行列を乗じた後に加算されて $v(k)$ となる。 $v(k)$ は逆ヤコビアンにより関節角速度 $\dot{q}(k)$ に変換された後、オープン PC コントローラの入力値として入力される。なお、インピーダンスモデル追従型の力制御器からの出力 $v_f(k)$ は、次式の解である。

$$M_d \dot{v}_f + B_d v_f = K_f (F - F_d) \quad (7)$$

ただし、 M_d 、 B_d はそれぞれ、ロボットアーム先端の目標慣性、目標粘性であり、 F 、 F_d はそれぞれ、カセンサからの観測値と目標の接触力である。 K_f はカフィードバックゲイン行列である。ラプラス変換子 s を用い、 $v_f(0) = \mathbf{0}$ とすると次式が得られる。

$$v_f(s) = (sM_d + B_d)^{-1} \{ K_f (F(s) - F_d) \} \quad (8)$$

さらに、式 (8) を時間領域で表すと次式が得られる。

$$v_f = e^{-M_d^{-1} B_d t} M_d^{-1} K_f (F - F_d) \quad (9)$$

図-8 には、インピーダンスモデル追従型力制御系のブロック線図を示す。

4-2 教示実験

NC加工後の単純曲面を有するワーク(310 × 1400 ×

40 mm) を用いて教示実験を行った。図-9にはそのCADモデルを示す。教示は、研磨工具のパワーを OFF とし、倣い速度 20 mm/s、目標接触力 1 kgf で図-4のA点からB点まで移動させて行った。ジョイスティックの基本コンプライアンスは $K_{jx} = K_{jy} = 0.167$ 、 $B_{jx} = B_{jy} = 0.5$ に設定した。その他の制御パラメータは表-2に示す。図-10には提案手法を用いた教示風景を

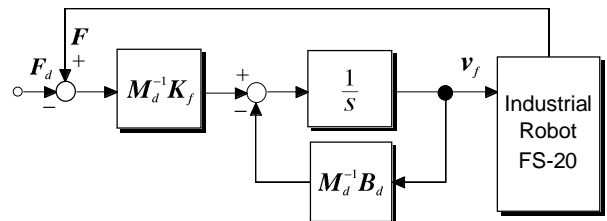


図-8 インピーダンスモデル追従型力制御系のブロック線図

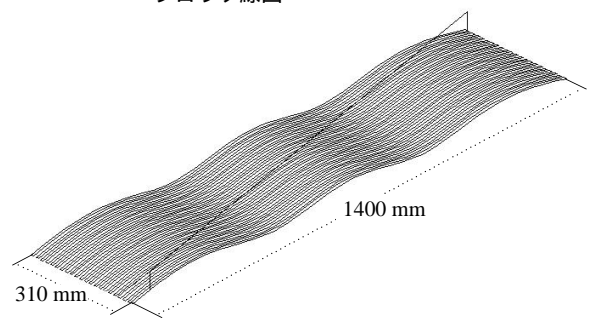


図-9 教示実験で使用したワークのCADモデル

表-2 教示実験で使用した制御パラメータ

Desired contact force $\sqrt{(f_{dx})^2 + (f_{dy})^2}$	1 [kgf]
Profiling velocity	20 [mm/s]
Desired inertia coefficient M_{d1}, M_{d3}	0.01 [kgf · s ² /mm]
Desired damping coefficient B_{d1}, B_{d3}	10 [kgf · s/mm]
Force feedback gain K_{f1}, K_{f3}	1
Velocity transformation gain K_{v1}, K_{v2}, K_{v3}	0.08
Velocity transformation gain K_{v4}, K_{v5}, K_{v6}	0.03
Sampling width Δt	10 [msec]

示す。図-11, 図-12 にはそれぞれ, 教示中の X 方向の摩擦力和補正剛性行列 ΔK_{fy} の変化を示す。これらの実験結果から, 研磨工具とワーク間に発生した摩擦力に応じてジョイスティックのコンプライアンスが変化していることが確認できる。教示中は, サンプリング間隔毎に研磨工具の位置・姿勢データが 図-7 の軌道蓄積器に保存される。図-13 には, 教示で得られた Z 方向の軌道を示す。

4-3 教示データを用いた研磨実験

最後に, 提案手法により獲得された教示データを用いて研磨実験を行った。図-14 には, プレイバックモードにおける研磨ロボットシステムの制御系のブロック線図を示す。プレイバックモードでは, 次の制御戦略を力制御に適用する。

$$\begin{aligned} \dot{x}(k) = & \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) \dot{x}(k-1) \\ & - \left\{ \exp(-M_d^{-1}B_d\Delta t) - E \right\} B_d^{-1}K_f \{F(k) - F_d\} \\ & + K_i \sum_{n=1}^k \{F(n) - F_d\} \\ & + K_r \left\{ \frac{x_a(\varepsilon k) - x_a(\varepsilon(k-1))}{\Delta t} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで, $K_r = \text{diag}(K_{r1}, \dots, K_{r6})$ はフィードフォワードゲイン行列である。 ε は教示モードに対するプレイバックモードの倣い速度の比を表す正整数である。 $x_a(\varepsilon k)$ は, 図-14 の軌道補償器が離散時刻 k に生成する目標の位置・姿勢ベクトルであり, 教示データの第 εk 行の位置・姿勢ベクトルである。教示データに基づく研磨実験では倣い速度を教示中の2倍の速さに相当する 40 mm/s に設定しているが, 安定した倣い制御性能が得られた。図-15 には, センサ座標系における Z 軸方向の接触力の応答を示す。研磨後の表面性状を触覚検査により評価したところ, 手作業で行った場合に比べて非常に良好な仕上面が確認できた。

5 おわりに

本稿では, ファジコンプライアンス制御を用いたジョイスティック教示システムを提案した。産業用ロボットFS-20をベースとした研磨ロボットシステムの教示作業に提案手法を適用した結果, 研磨工具とワーク間の摩擦力をジョイスティックの関節のコンプライ



図-10 力覚提示型ジョイスティックによる教示実験風景

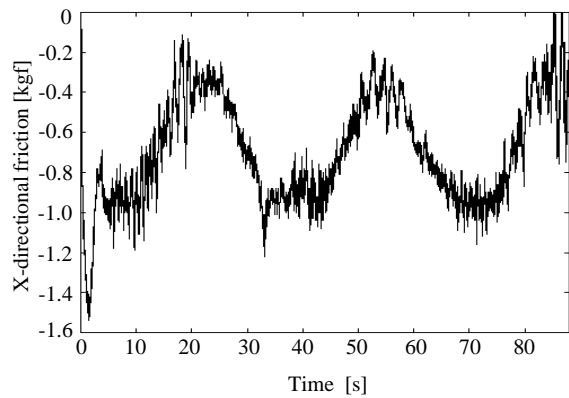


図-11 教示中にX方向に発生した摩擦力

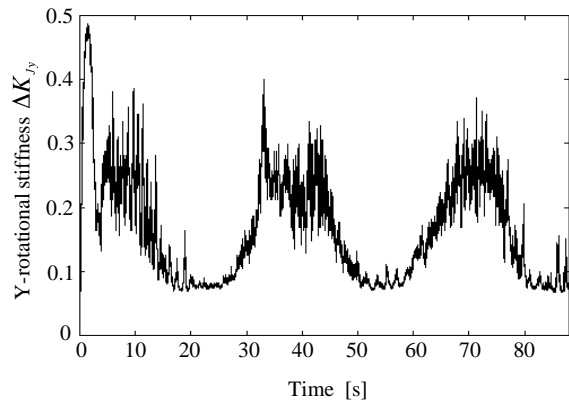


図-12 ファジ推論で生成したY軸回りの補正剛性

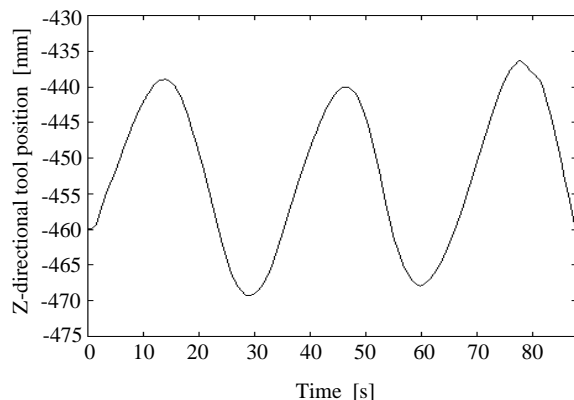


図-13 教示で得られたZ方向の軌道

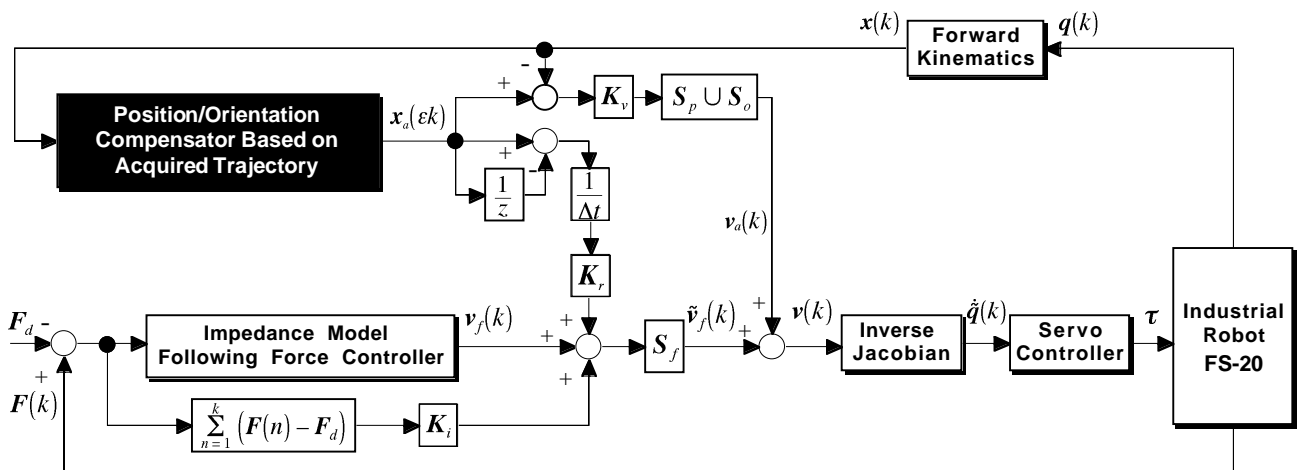


図-14 力覚提示型のジョイスティック教示により得られた教示データを用いた場合のプレイバックモードにおける研磨ロボットシステムの制御系のブロック線図

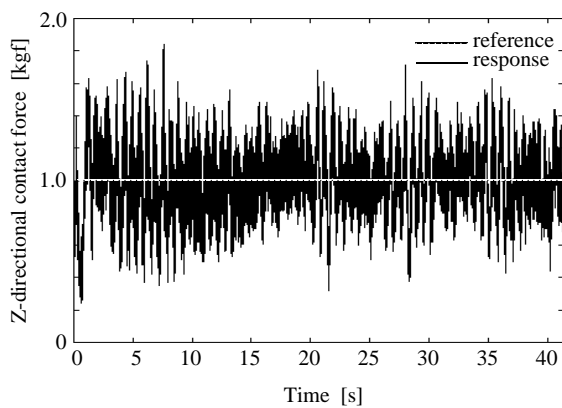


図-15 研磨実行中の研磨工具の接触力の応答

アンスで確認しながら安全に教示作業を行うことができた。

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。

6 参考文献

- 1) F. Nagata and K. Watanabe: Teaching System for a Polishing Robot Using a Game Joystick, *CD-ROM Procs. of The 39th SICE Annual Conference (SICE'2000), International Sessions*, pp. 1-6, Iizuka, Fukuoka, (2000).
- 2) F. Nagata, K. Watanabe, et al.: Polishing Robot Using a Joystick Controlled Teaching System, *CD-ROM Procs. of 2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pp. 632-637, Nagoya Congress Center, Oct. (2000).

- 3) 永田寅臣, 渡辺桂吾: 研磨ロボットのためのジョイスティック支援による力制御教示システム, *日本機械学会論文集C編*, Vol. 67, No. 655, p. 177-184 (2001).
- 4) F. Nagata and K. Watanabe: Polishing Robot with Human Friendly Joystick Teaching System, *Procs. of the International Conference on Machine Automation (ICMA2000)*, pp. 141-146, Osaka Institute of Technology, September (2000).
- 5) 永田寅臣, 渡辺桂吾: ファジィフィードフォワード制御を用いたジョイスティック教示システム, 第16回ファジィシステムシンポジウム講演予稿集, p. 151-154 (2000).
- 6) 永田寅臣, 渡辺桂吾, ほかに4名: ファジィコンプライアンス制御を用いたジョイスティック教示システム, 第2回日本ファジィ学会九州支部大会講演予稿集, p. 35-38 (2000).
- 7) F. Nagata, 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).
- 8) F. Nagata and K. Watanabe: An Experiment on Sanding task Using Impedance Controlled Manipulator with Vibrational Type Tool, *Procs. of the 3rd Asian Control Conference*, pp. 2989-2994, Shanghai Worldfield Convention Hotel, July (2000).
- 9) F. Nagata and K. Watanabe, et al.: Position-Based Impedance Control Using a Fuzzy Compensator, *Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems (KES'99)*, pp. 125-128, Aug. (1999).