

人間の手作業をロボットに実現させるための作業解析の構想

A Plan for Handwork Analysis for Its Realization by Robots

○山田晋治, 内山勝

○Shinji Yamada, Masaru Uchiyama

東北大学

Tohoku University

キーワード : 技量 (Skill), 接触作業 (Contacted Task), ピン挿入 (Peg-in-Hole Insertion), トラッキングビジョン (Tracking Vision), 3次元位置測定装置 (3D Position Sensor), 力覚センサ (Force/Torque Sensor)

連絡先 : 〒 980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学工学部 機械航空工学科 宇宙機システム学講座
山田晋治, Tel.: (022)217-6973, Fax.: (022)217-6971, E-mail: yamada@space.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

人間が組み立て作業のような部品同士の接触を伴う作業を行う際, 自らが持っている作業対象の特性に関する知識をもとに状況判断し, 適切な動作を行う. すなわち, 作業対象に積極的に働きかけ, そのときの反応を見てその特性を理解し, 行動に移す¹⁾. これに対し, ロボットが組み立て作業を行う場合は, 作業対象の状態を常に認識しながら適切な動作を行う必要がある. しかし, 部品同士の接触を伴う作業では, この状態認識は容易ではなく, ロボットが作業対象の状態を認識できなくなってしまうことがある.

ロボットに人間の持つ手作業の巧みさ, すなわち技量を実現させるためには, まず, 人間の作業過程の力学を理解し, そこからロボットで実現できるような制御モデルを構築する必要がある²⁾ ~⁵⁾. この構築した制御モデルに基づき, 技量を発現させるためには, 高精度な力/モーメント発生機構

が必要となる. そこで, 技量発現機構として, 力/コンプライアンス制御の研究が進められているパラレルロボット HEXA を用いる^{6), 7)}. HEXA に制御モデルを適用し, モデルの妥当性を検証する必要がある.

図 1 にピン挿入作業を取り上げ, 手作業の解析から制御モデルを構築し, それを HEXA により実現し, 制御モデルの妥当性を評価する我々の構想を示す.

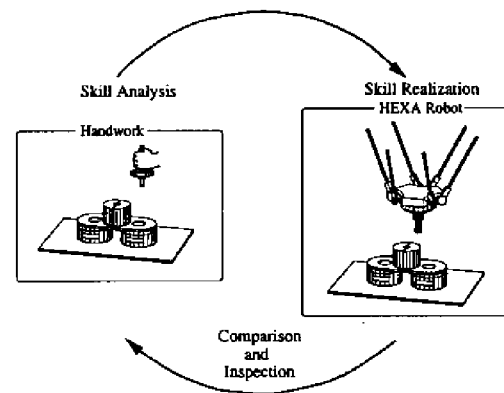


図 1 技量の解析と実現

2. 作業例

図2から図5に代表的な作業(研磨, クランク回し, 辺合わせ, ピン挿入作業)を示す。これらの作業では, 部品同士の接触を伴い, 作業対象物の位置だけではなく, 作業に伴い発生する力も考慮に入れてやらねばならない。

これらの作業をマニピュレータによって行わせるための制御法として, インピーダンス制御法とハイブリッド制御法が知られている^{8), 9)}。インピーダンス制御法は, 手先効果器の外力に対する機械インピーダンスを目的とする作業遂行に都合の良いように設定し, 位置と力を制御する。他方, ハイブリッド制御では, 位置と力の制御したい方向を定め, それぞれの方向の位置と力を測定し, それらをフィードバックして目標値に近づける。

これらの制御法を考慮しながら, 簡単にそれぞれの作業の特徴を述べる。

2.1 研磨作業

材料表面などをグラインダーを用いて研磨する際, 巧みに工具を動かしたりして, 加える力を調節する。図2のように表面(z 軸方向)が凸凹な場合などは, そのときの変位量(位置, 速度等)と力との関係(インピーダンス特性)を制御しつつ, 力制御を行っているものと思われる。

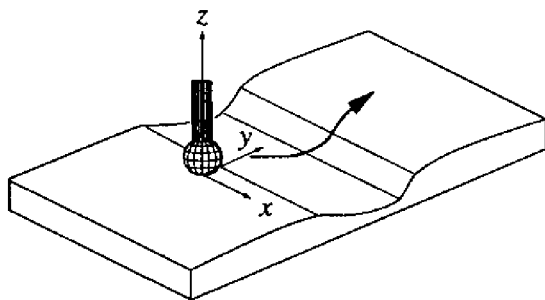


図2 研磨作業

2.2 クランク回し作業

図3のようにクランクを回す際の運動を考える。ハンドルをしっかり握って回転させると, ハンドルで動かすことができる方向というのは, x 軸に沿う並進と z 軸回りの回転運動に限定される。その他の並進, 回転の方向には動かすことはできないが, 力を加えることができる。以上のような拘束のもとで, 人間はうまく作業を行っているものと思われる。

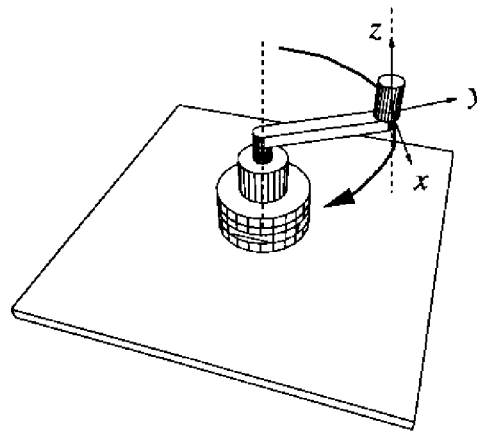


図3 クランク回し作業

2.3 辺合わせ作業

図4のような辺合わせ作業を行う方法として, まず辺Aに向かって姿勢を変えながら辺を一致させる。次に, 辺Aに接触させながら, 辺Bに一致させる。

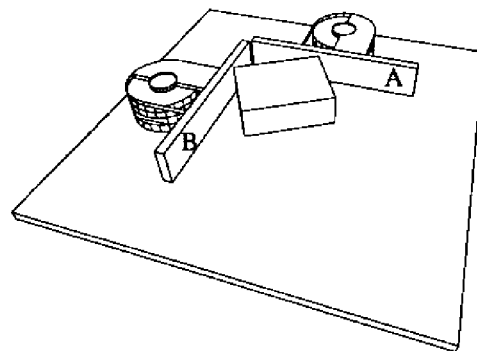


図4 辺合わせ作業

2.4 ピン挿入作業

組み立て作業を行う際には、穴に差し込んでおめるといふ作業が必要とされる場合がある。これを一般化したのが、ペグインホール作業とよばれるもので、丸棒 (peg) をはめあい公差の小さな穴 (hole) に挿入する作業である (図 5)。本論文では、このピン挿入作業を取り上げ、人間がどのように巧みに作業を行っているかを解明する。まず、人間の手作業に関するデータを取得する。第 3 章で述べる作業解析装置を構築し、データ取得の実験を行う。

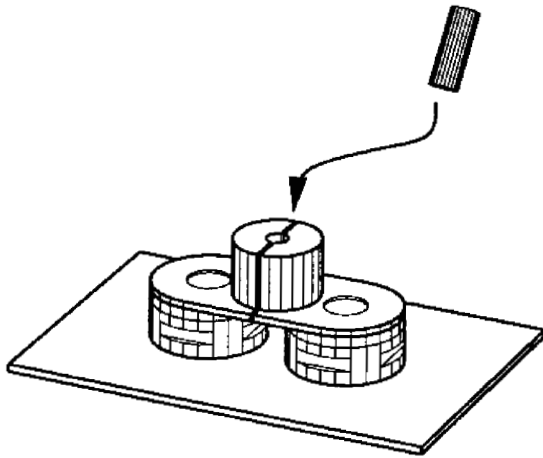


図 5 ピン挿入作業

3. 実験システム

3.1 システム構成

実験装置のシステム構成を図 6 に示す。このシステムでは、メインコンピュータとして 25 MHz CPU の MC68LC040 を搭載した CPU ボードを使用している。また、OS としては、リアルタイム OS の VxWorks を使用している。このメインコンピュータは、ワークステーションに Ethernet でつながっていて、UNIX 上でソフトウェアの開発や実行結果の解析ができる。VxWorks では、タスクごとに優先順位を付け、重要なタスクは最優先で処理できる。また、複数のタスクを実行したり、時

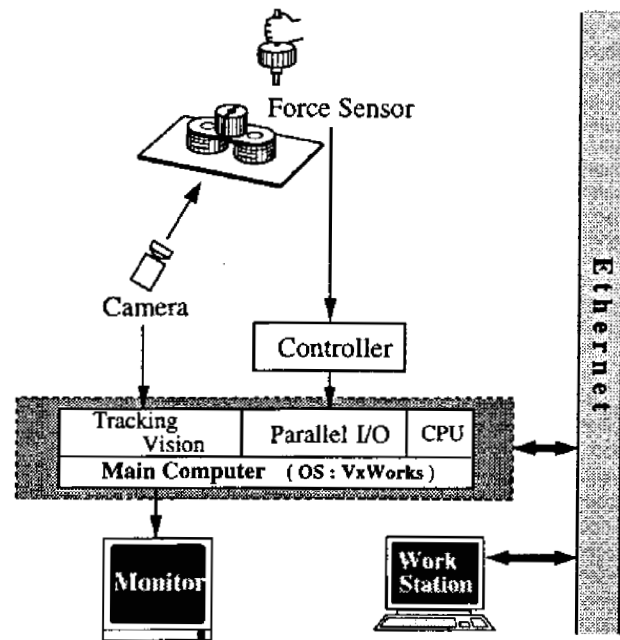


図 6 システムの構成

間経過の管理を伴う処理に対するプログラミングの複雑化を回避でき、複雑な処理を容易に取扱うことができる。

位置データは、ビデオ信号の入出力を行うビデオモジュール (VM) と相関演算による追跡処理を行うトラッキングモジュール (TM) の 2 種類の VME バス規格のボードで構成されるトラッキングビジョンを利用する。まず、カメラの映像を VM で A/D 変換し、TM の画像メモリへ転送する。TM で相関演算処理された結果をメインコンピュータに送る。処理された TM の画像メモリは、VM で D/A 変換されて、ビデオ信号としてモニタに出力される。

力データとして、変換器のひずみデータがセンサコントローラ内で A/D 変換され、その結果得られるデジタルデータがひずみゲージ毎に、12 ビットパラレルでパラレル I/O ボードへ出力される。

3.2 トラッキングビジョン

トラッキングビジョンは、動画像中の移動する複数ターゲットを追跡しながら、その位置情報をフレーム間 (1/30 [s]) で連続的に出力する高速相

関演算追跡処理装置である。

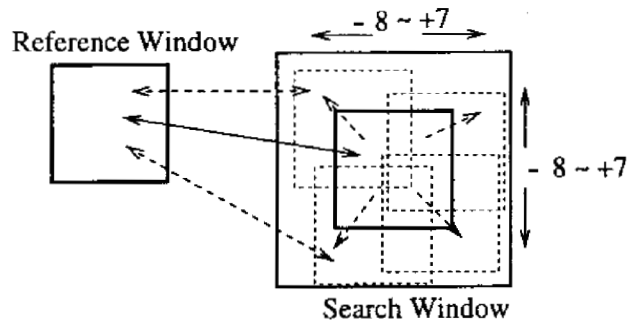


図7 MEPによる動き検出

TMでは、動き予測プロセッサ(MEP)により相関演算を高速に実行している。図7に示すように、MEPは1フレーム中に $N \times N$ ($N = 8$ or 16)画素の参照画像に対して、それを各方向に $-8 \sim +7$ 画素ずらして探索範囲の中で相関演算(対応画素の差の絶対値の総和)を行ない、最も相関の高い位置を求める。相関演算とは、参照画像 X とある時刻での探索範囲内の小領域 Y との誤差値

$$D_{i,j} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |X_{m,n} - Y_{m+i,n+j}| \quad (1)$$

を求める演算である。 $D_{i,j}$ が最小となる (i,j) を動きベクトルとして出力する。

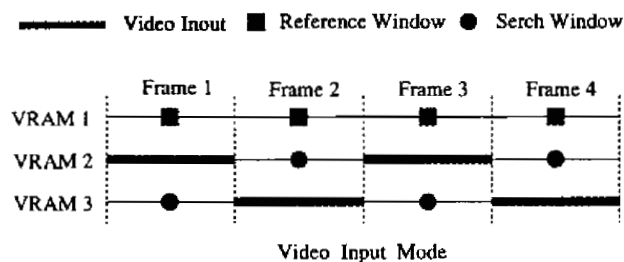


図8 映像入力モード

また、3枚の画像メモリを持っており、それらを図8のように参照画像用、探索画像用、画像入力用に切替えて使用することで相関演算を行なう。

VMはNTSC準拠のビデオ信号を入力し、モノクロ256階調のデジタル画像($512 \times 512 \times 8$ ビット)

ト)に変換する。また、メインコンピュータから自由にアクセスできるオーバーレイ画像メモリを実装しており、処理結果の表示に利用できる^{10), 11)}。

3.3 3次元位置測定装置

作業中の物体の位置、姿勢は3次元位置測定装置FASTRAK (Polhemus社)によっても計測できる。FASTRAKは磁気変換技術を応用し、3次元内に存在する物体の位置(x, y, z)、姿勢($pitch, yaw, roll$)をレーザをあてて計測する3次元位置測定装置である。位置 0.8 [mm]、角度 0.15 [deg]の精度で測定できる。また、最大で 120 ポイント/秒の高速サンプリングを実現できる。磁気を利用しているので金属等の磁界に影響を与えない環境で利用しなければならない。

磁気変換技術について簡単に説明する。図9に示すようにトランスミッタ(直流コイル)に交流を加えると磁界が発生する。この磁界中にレーザ(直流コイル)を置くとレーザに電流が誘起される。この電流の大きさをコンピュータで処理することにより位置、角度データを出力する。

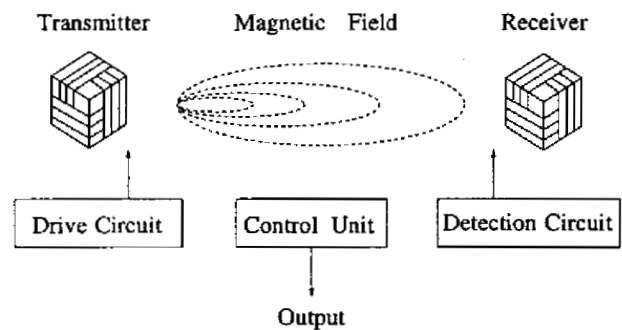


図9 磁気変換技術

3.4 力覚センサ

力覚センサは変換器、変換器ケーブル、およびコントローラから構成されている。変換器の8組のひずみゲージからの信号を、ユーザシステムからのクロック信号または、コントローラ内部のクロック信号に同期して出力する。ひずみゲージか

らの信号は、デジタル信号に変換して出力される。信号の伝送速度は最大 2000 [Hz] (0.5 [ms]) まで上げることができる。この信号を用いてユーザ・システム内で行列計算を行うことにより 6 成分の力/トルク・データが得られる。定格荷重は力 10 [kgf]、トルク 100 [kgf・cm]、許容過負荷は定格荷重の 500 % まで、精度は定格値の 1 % 以下となっている。

本論文では、ピン挿入作業について、ペグとホール部の物体各点に発生する接触力を詳細に測定するため、ホールを 2 つの部品から構成する。以下、これらをホール部 1, 2 と記述し、力覚センサを図 10 のように配置する。

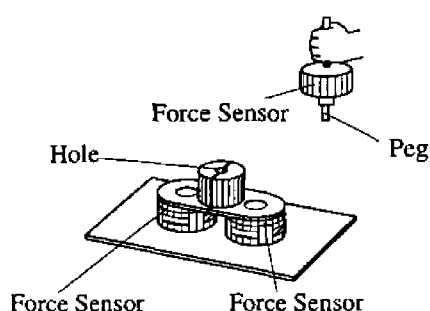


図 10 力覚センサの配置

4. 予備実験

4.1 実験方法

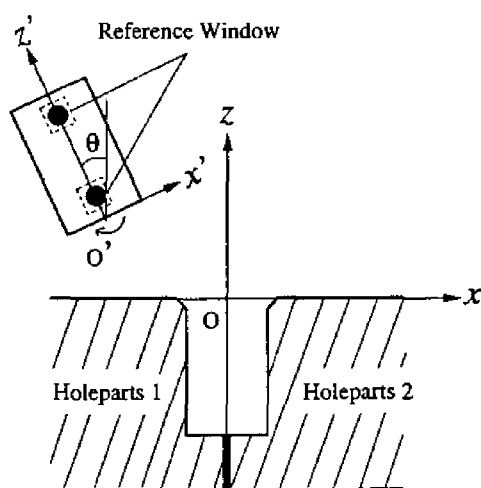


図 11 座標系の設定

ピン挿入作業において、人間がペグを挿入する一般的な方法として、ペグを傾けながらホールまで持っていき、挿入する際にペグを垂直に立て、作業を完了させるやり方が挙げられる。

実験条件は以下のように設定する。

サンプリングタイム	: 0.037 [s]
ホール内径	: $\phi 15h7$
ペグ外径	: $\phi 15H7$
ペグ長さ	: 30 [mm]

トラッキングビジョンが映像を入力し、処理を行うのに 1/30 [s] かかるので、サンプリングタイムを 0.037 [s] とし、トラッキング処理以外のデータ取得等の仕事を残った時間で行う。今回の実験では 3 次元位置測定装置は使用しない。

座標系を設定するため、ペグとホールを図 11 のように記す。ホール部入口を原点とした座標系 ($O-xz$) を基準としてペグ先端の位置 (x, z) を測定する。力/トルクはペグ先端に固定した座標系 ($O'-x'z'$) を基準として加わる値 ($F_{x'}, F_{z'}, M_{y'}$) を測定する。ペグ部の力覚センサが測定する値には、ペグ自身の質量も含まれているため、実験を行う前に、質量、センサ中心からペグ重心位置を求め、ペグの 2 点に図 11 のように円形のシールをはり、この 2 点を参照画像としてトラッキングさせ、ペグの傾き θ を求め、重力の影響を補正している。残り 2 個の力覚センサはホール部 1, 2 でのペグとの接触力を測定する。

4.2 結果

以上の方法で実験を行った結果を示す。ペグ先端の位置、姿勢 (x, z, θ) とそこに加わる力、トルク ($F_{x'}, F_{z'}, M_{y'}$) を図 12 に、ホール部 1, 2 に加わる力を図 13 に示す (実線: ホール部 1, 点線: ホール部 2)。トラッキングビジョンの精度についてであるが、当研究室のこれまでの研究で対象物が回転すると正確なトラッキングできなかつた。そこで、今回は円形のシールを追わせ、より正確なトラッキングを可能とした。

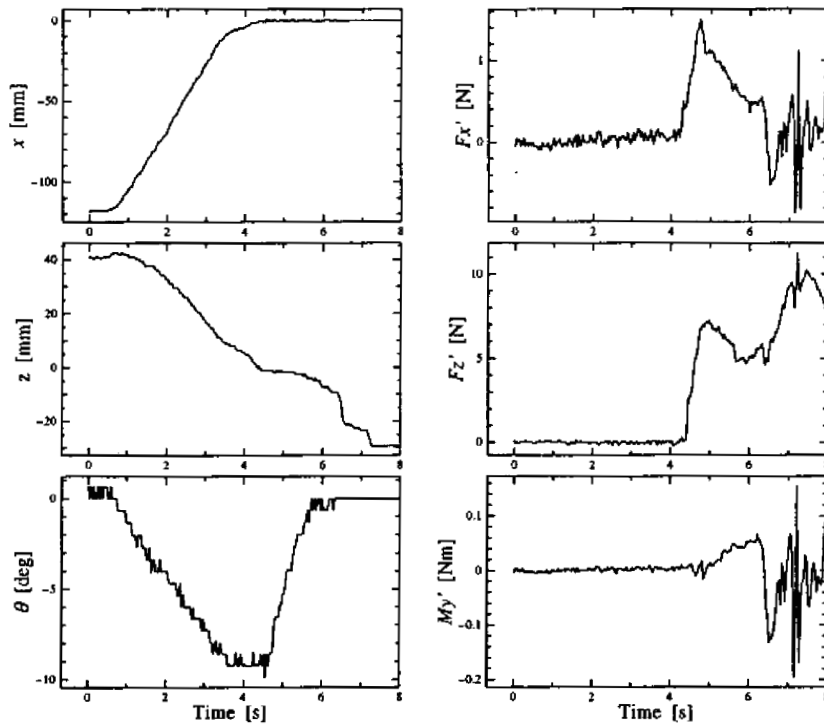


図 12 ペグの位置と力

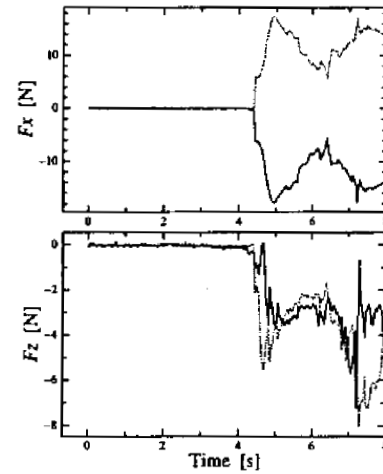


図 13 ホールでの接触力

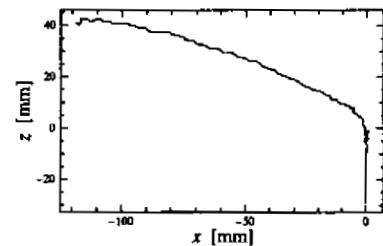


図 14 ペグの平面での軌道

4.3 作業特徴の抽出

構築した作業解析装置によって得られた結果について簡単に考察する。

ペグの平面内 (x, z) の軌道について、測定結果を図 14 に示す。この図より、作業を行う際ペグをホール入口まで直線的に導いていることがわかる。次に、図 12、図 13 からホール入口で接触して、力、モーメントを加わえていることがわかる。ホールに挿入するため、 z 方向に力を加えるが、姿勢を傾けたままでは挿入できない。この状態から次の段階に進むためには、手先にかかる力が減少するように、姿勢を変え、ホール部に設定した z 軸にペグを平行にする。次に、ペグを完全に押し込むまで力を z 方向に加えていくが、押し込む際、手先には大きな拘束力を受ける。これは、はめあい公差が小さいことによる摩擦の影響と考えられる。作業は拘束、つまり接触力が働かない自由空間での運動とペグとホールが接触して拘束を受けながらの運動に分類できる。

● 無拘束下での運動

この運動をロボットに実現させるには、得られた位置データ $p = (x, z, \theta)$ とそのデータから $\dot{p} = (\dot{x}, \dot{z}, \dot{\theta})$ を求めてやり、 p と \dot{p} とを教示することによって可能になると思われる。

● 拘束下での運動

θ を 0 に戻しているとき、同時に $F_{x'}$ 、 $F_{z'}$ 、 $M_{y'}$ とホール部に働く力も減少していることがわかる。これより、接触力は θ に依存していると思われる。 θ と接触力より拘束時での作業モデルが構築できるのではないと思われる。

ホール部における接触力についてであるが、ペグの傾きを直すことにより、ホール部 2 での接触力がホール部 1 より小さくなる。ホール部 2 での接触力が小さくなることより作業が進行することがわかる。

5. おわりに

本論文では、ピン挿入作業での位置、力データを取得するための作業解析装置を構築し、得られたデータから簡単に特徴を述べ、今後のデータの取り扱いに対する考えを述べた。3次元位置測定装置 (FASTRAK) とトラッキングビジョンとを組み合わせて、ピン挿入作業以外にも、第2章で述べた研磨、刃合わせ、クランク回し作業等の解析装置を構築し、データを取得する予定である。さらに、ロボットに人間の手作業の巧みさを実現させるためには、得られたデータをもとに、作業を定量的に解析する必要がある。

なお、本研究は平成7～9年度文部省科学研究費補助金重点領域研究「感覚と行動の統合による機械知能の発現機構の研究」(領域代表者：井上博允)、A班計画研究「技量の力学的理解に関する研究」(課題番号：07245103, 代表者：有本卓)の援助を受けて行われているものである。

参考文献

- 1) 高瀬 國克, 雨海 明博: 動的な応答を用いた作業監視, 第14回ロボット学会学術講演会, 1029/1030 (1996)
- 2) 内山 勝: 接触状態のシミュレーション, 日本ロボット学会誌 Vol. 11 No. 2, 201/205 (1993)
- 3) 内山 勝, 今橋 晃一: ルールベース人工技能システムの計算機援用ルール作成, 日本ロボット学会誌 Vol. 12 No. 3, 459/465 (1994)
- 4) R. Koeppe, A. Breidenbach, G. Hirzinger: Skill Representation and Acquisition of Compliant Motions Using a Teach Device, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, No. 2, 897/904 (1996)
- 5) 妻木 勇一, 山田 晋治, 内山 勝: インピーダンス特性を残した力制御に関する一考察, 第14回ロボット学会学術講演会, 1019/1020 (1996)
- 6) 三輪 敏雄: パラレルロボット HEXA による技能の実現に関する研究, 東北大学工学研究科精密工学専攻修士学位論文 (1996)
- 7) B. Porapakham, T. Miwa, D. N. Nenchev, M. Uchiyama: Friction Compensation Techniques for Compliance Control of a HEXA Parallel Robot, 第14回ロボット学会学術講演会, 1027/1028 (1996)
- 8) 吉川 恒夫: ロボット制御基礎論, 181/207, コロナ社 (1988)
- 9) John J. Craig 著, 三浦 宏文, 下山 勲 訳: ロボティクス - 機構・力学・制御 -, 303/319, 共立出版株式会社 (1991)
- 10) 内山 隆, 沢崎 直之, 青木 孝, 森田 俊彦, 稲本 康, 佐藤 雅彦, 稲葉 雅幸, 井上 博允: ピアオレートトラッキングビジョンの実用化, 第12回ロボット学会学術講演会, 345/346 (1994)
- 11) 井上 博允, 稲葉 雅幸, 森 武俊, 立川 哲也: 局所相関演算に基づく実時間ビジョンシステムの開発, 日本ロボット学会誌 Vol. 13 No. 1, 134/140 (1995)