

仮想面を用いた遠隔組立作業システム

—1自由度操作による6自由度組立作業—

Remote Controlled Assembly System Using Virtual Plane

- 6DOF Assembly Operation by 1DOF User Operation -

精密工学専攻 40号 原 章紘

Akihiro Hara

1. 諸言

原子力プラントや宇宙空間での作業など、人の立ち入りにくい環境下ではロボットの遠隔操作による作業が有効である。この遠隔操作の際に必要な力覚情報のフィードバックに、ハプティックデバイスを適用する研究を進めている⁽¹⁾⁽²⁾。

現在、ハプティックデバイスは、ユーザに高現実感を与える目的で開発され、並進・回転をあわせて6以上の自由度をもつものが多い。しかし、組立作業の分野では必ずしも多自由度は必要ではない。また、一度に並進・回転を駆使して行わなければならない組立は組立性の観点から組立品の設計に問題があり、組立構造自体をみなおすべきである。組立性の良い組立では、一度に動かす自由度は1~2自由度であり、一度にユーザが感じなければならない力覚情報も少ない⁽³⁾。すなわち、組立作業は、少自由度のハプティックデバイスでも操作が可能であると考えられる。そこで、本研究では、組立作業に少自由度のハプティックデバイスを適用することを目的とする。これまでに、シミュレーションにより、少ない自由度のデバイスで組立作業を行うことの有用性を示した⁽²⁾。また、1自由度の操作で3自由度のマニピュレータを操作し、組立作業を行うシステムを構築した⁽¹⁾。

本論文では、マスタ側の1自由度の操作で、スレーブ側の6自由度のマニピュレータを操作し、組立作業を行うために、ユーザが操作する自由度と制御系によって自動制御する自由度とを切り分ける手法を提案し、その手法を用いた組立実験の結果を報告する。

2. 組立作業の概要

2.1 ハプティックデバイスを用いた遠隔組立作業

少品種大量生産の場合には、組立を完全に自動化することができる。しかし、多品種少量生産や一点物の生産の場合、すべてを自動化するのはコストの面から見て難しく、人間の遠隔操作による組立が有効である。

遠隔操作で組立を行う場合は、視覚情報がディスプレイに表示される映像からしか得られないため、奥行き、部品同士の接触状態、及び力覚発生の有無等の把握が困難である。このため、遠隔組立作業において力覚情報がより重要になる。また、組立を行うごとに部品の詳細な形状情報をシステムに入力するのは手間がかかり効率的ではない。そこで、本研究では、部品の形状情報なしで、人間が作業現場をカメラ等で見ながらマニピュレータを遠隔操作して組立を行う。

H.Y.K. Lau ら⁽⁴⁾は視覚や力覚だけのフィードバックではなく、組付ける側と組付けられる側の部品の接触状態もフィードバックする仕組みを構築した。しかし、これは少自由度のハプティックデバイスを使用していない。

2.2 組立作業の性質

以下では、組み付ける側の部品を移動部品 (Movable part)、組み付けられる側の部品を環境部品 (Fixed part) と呼ぶ。

一般的に、組立作業では移動部品が環境部品との接触を順次増やしていくことで組立を進めていく特徴がある⁽⁵⁾。このため、移動部品を操作する際には、すでに実現した接触状態を維持するために、移動部品を環境部品に押し付けながら操作する。Fig. 1 (a) に移動部品の1面と環境部品の1面が接触している状態、Fig. 1 (b) に移動部品の1稜線と環境部品の1面が接している状態を示す。(a)の状態では、接触面に垂直な(-Z)方向に押し付け力 F_p を生成しながら Direction of Movement の方向へ移動部品を移動させる。この際、+Z方向への移動は行わない。(b)の状態では、接触箇所が減少しないように、今ある接触を維持しながら Direction of Rotation の方向へ移動部品を回転させる。この際、+Z方向の移動と接触箇所が減少してしまう方向への回転移動は行わない。

接触箇所が増えるごとに移動部品の自由度が拘束され、通常は組立を完了したときにすべての自由度が拘束される。組立途中で、一度環境部品に接触させた移動部品を離脱させることは少ない。

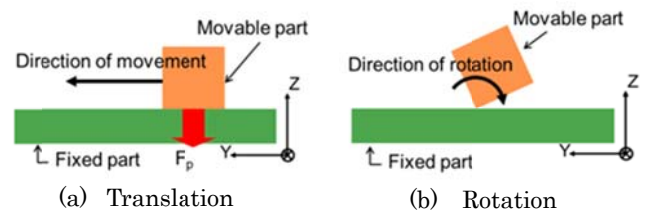


Fig. 1 Assembly process

3. 仮想面を用いた組立手法

1自由度のハプティックデバイスで組立作業を実行するために、本研究では以下に説明する“仮想面”を用いた組立手法を提案する。

3.1 仮想面の利用

Fig. 2 に組立途中の動作の例として環境部品の面に沿って移動部品を移動させ環境部品の壁に突き当たる動作 (移動部品を P_0 から P_1 まで移動させる) を示す。

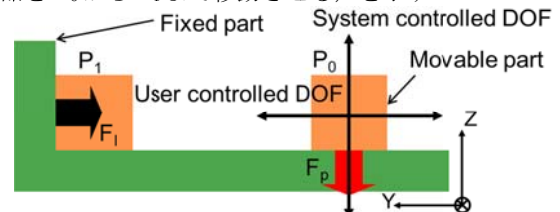


Fig. 2 DOF classification

2.2 節で述べたように、組立中は部品同士の接触箇所が減少する方向に移動部品を動かすことはない。したがって、その方向にユーザが操作できる自由度を割り当てる必要はない。この動作では、ユーザには操作できる自由度として面に

沿った自由度 (User controlled DOF) のみを許す。面に垂直な方向の自由度 (System controlled DOF) については、押し付け力 F_p を自動生成して接触を維持する。 F_p の方向についてはユーザへの反力提示も行わない。移動部品を P_1 まで移動させ、移動方向に衝突力 F_l を検知したら、それをユーザに反力としてフィードバックする。

ユーザが操作する自由度の方向と、部品を押し付ける自由度の方向は、部品間の関係と行う動作によって異なる。このため、接触状態に応じてそれぞれの自由度を指定する必要がある。そこで、操作方向と押し付け方向を切り分けるために仮想面という概念を導入する。仮想面とは、ユーザが定義する実在しない面であり、仮想面に沿う方向をユーザの操作方向、仮想面に垂直な方向を押し付け方向とする。Fig. 2 と同様に移動部品を移動させる場合の仮想面の配置の仕方の例を Fig. 3 に示す。環境部品の面に沿うように仮想面を配置することで、環境部品に対して押し付け力を生成しながら、環境部品に沿う方向に移動部品を動かすことができる。接触状態に応じて仮想面の配置を変えることで、それぞれの自由度の方向を指定することが可能である。

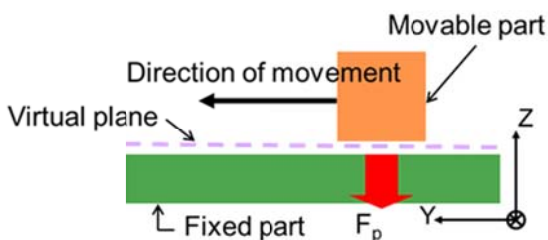


Fig. 3 Positioning of virtual plane

3.2 組付け動作における仮想面

実際に行う組付け動作を例にとり、仮想面の配置と自由度の切り分け方 (Fig. 4) を説明する。

移動部品の 1 面と環境部品の 1 面が接触している状態から移動部品の 1 面 1 稜線と環境部品の 2 面を接触させる組付け動作である。この場合は、接触を維持するための押し付け力を生成する必要があるため、まず環境部品の面に沿うように Virtual Plane 1 を配置する。そして、この面の法線ベクトル方向に押し付け力 F_p を自動生成する。押し付け力の生成の有無もユーザが指定する。1 自由度の操作で組付けを行うので、移動部品の移動方向を一意に定めなければならない。そこで、2 枚目の仮想面 (Virtual plane 2) を配置し、それぞれの仮想面の法線ベクトルの外積方向を移動方向 D とする。仮想面の配置と、押し付け力の生成の有無の設定により、いろいろな接触状態に対応できる。移動部品と環境部品が 2 面で接する場合には、2 方向へ押し付け力を生成させながら、外積方向へ操作する自由度を割り当てる。また、部品同士の接触がない場合には、押し付け力は生成せず、2 枚の仮想面を、それらの法線ベクトルの外積方向が部品を移

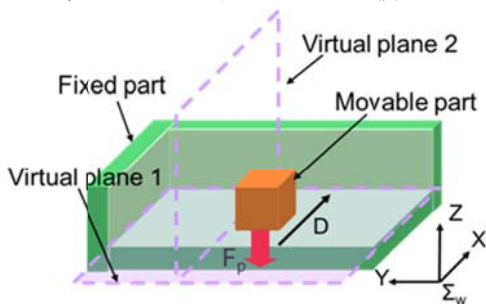


Fig. 4 Use of virtual plane

動させたい方向となるように仮想面を配置する。

仮想面を用いて、ユーザが操作する自由度の方向と押し付ける自由度の方向を指定することで、ハプティックデバイスとマニピュレータの間にある自由度の差を補完する。

3.3 移動部品の回転

移動部品と環境部品は様々な形状と姿勢を取るため、移動部品が環境部品に対し面で接するとは限らない。このため、接触状態を安定させるためには、移動部品に回転移動を与え、部品同士の面合わせを行う必要がある⁶⁾。

移動部品の形状情報をシステムが把握している場合、接触している頂点や稜線のまわりに回転させることで接触状態を遷移させることができる。本システムでは、移動部品の形状を把握していないので、3.1 節で述べた押し付け力 F_p を生成しながら、マニピュレータの手先の座標系 Σ_h を回転させる方法で回転移動を行う。このとき、 F_p の生成は自動的に行い、回転移動は並進移動と同様にユーザが行う。 F_p を生成する方向は、移動部品に割り当てられている移動方向である。例えば、Fig. 5 に示すように移動部品が 1 稜線と 1 面で環境部品に接触している状態から 2 面接触状態に遷移させる場合、 F_p を生成しながら回転方向に回転させることで、接触状態が遷移する。

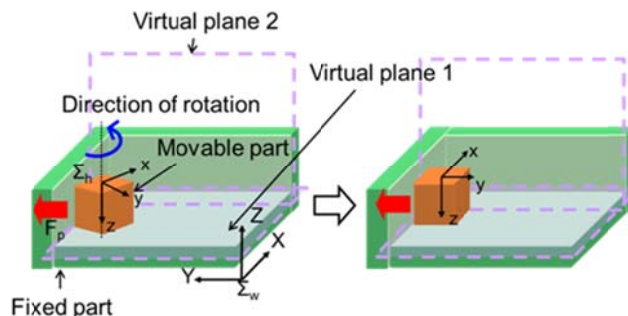


Fig. 5 Rotation motion

3.4 接触状態変化の検知

組立は、接触状態が変化するとに並進移動と回転移動を次々切り替えることで進む。すなわち、並進、回転移動を接触状態が変化した瞬間に切り替える必要がある。この接触状態の変化を検知するために、マニピュレータに搭載している 6 軸力覚センサから出力される、力とトルクの値を使用する。

並進移動中に衝突が起き、接触状態が変化すれば、移動方向に対する衝突力が発生する。この力が衝突判定の閾値を超えた場合に接触状態が切り替わったと判断する。ただし、摩擦やノイズ等の影響による誤認識を避けるため、閾値以上の値がある一定の間隔の間続いた場合にだけ接触状態が変化したとみなすこととした。回転移動の場合は、センサからのトルク値を回転軸まわりのトルクに変換した値を用いて接触状態の変化を検知する。この値がトルクの閾値以下になるか、前回値と比較して符号が逆転した場合を変化の条件とした。回転移動が終了し、並進移動へ切り替える場合は、ユーザが仮想面を再配置する。

4. 仮想面を用いた遠隔組立システムの実装

4.1 システムの構成

本システムは Fig. 6 に示すように、パソコン (PC1) とハプティックデバイスからなるユーザ側操作システム、パソコン (PC2)、マニピュレータ、ネットワークカメラからなるマニピュレータ側組立実行システムで構成した。

- ユーザ側操作システム

本システムは PC1 でハプティックデバイスの移動量を取得し、それをマニピュレータ側組立実行システムへ送る。また、ネットワークカメラの映像を取得し、その映像上に、システム内でつくり出した仮想面を描画し、ディスプレイに表示する。ユーザは映し出された映像を見ながらマウスを操作し、仮想面を配置する。配置し終わった状態での仮想面の位置と法線ベクトルの情報を PC1 で計算し、マニピュレータ側組立実行システムへ送る。ユーザへ提示する反力は、マニピュレータ側組立実行システムから送られてくる力とトルクの情報をもとに計算する。

- マニピュレータ側組立実行システム

PC2 では、ユーザ側操作システムから送られてくるハプティックデバイスの位置情報と仮想面の中心位置と法線ベクトルの情報、およびマニピュレータに搭載している 6 軸力覚センサからの情報をもとにマニピュレータを制御する。力覚センサからの情報は、ユーザ側操作システムへ送る。作業現場はネットワークカメラを用いて撮影する。

- システム間のデータ通信

遠隔操作でのリアルタイム性を重視するため、マニピュレータ側とユーザ側での情報のやり取りの通信プロトコルには、UDP (User Datagram Protocol) を用いた⁽⁷⁾。

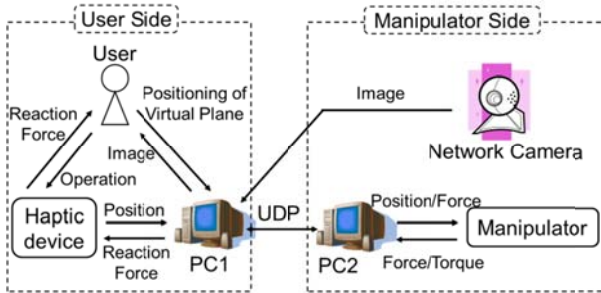


Fig. 6 System configuration

4.2 仮想面表示システム

ユーザ側操作システムにおいて、ユーザが見るダイアログボックスを Fig. 7 に示す。グラフィックスライブラリ OpenGL を用いて、ネットワークカメラからの映像上にグローバル座標系、2 枚の仮想面、それぞれのローカル座標系を描画している。仮想面の並進移動はマウスのドラッグで行い、回転移動はダイアログボックス上にあるスライダで行う。このとき、ラジオボタンにより動かす面を選択することで仮想面を 1 枚ずつ動かすことが可能である。それぞれの仮想面の中心位置と法線ベクトルの情報は常に表示される。また、3.1 節で述べた環境部品の面に対する押し付け力を生成する場合は、仮想面を環境部品の面に沿うように配置し、ラジオボタンで押し付け力を生成するという指示を出す。仮想面を配置し終わった段階で Write ボタンを押すことで、その状態で

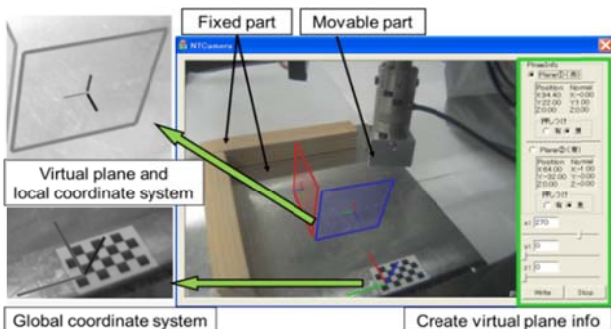


Fig. 7 Display for user side system

の仮想面の情報がマニピュレータ側システムへ送られる。

4.3 遠隔組立作業システム

本システムで使用するハードウェアと制御システムについて説明する。

4.3.1 1 自由度ハプティックデバイス

本システムで使用するハプティックデバイスは、オムニホイール式でエンコーダとモータを 2 基ずつ搭載し、2 自由度の位置情報を認識し、2 自由度の反力を提示することができる。本システムでは、このうちの 1 自由度のみを使用する。

4.3.2 6 自由度マニピュレータ

本システムで使用するマニピュレータの概観を Fig. 8 示す。6 つの回転関節を有した機構で、手先に固定した移動部品に生じる力覚情報を認識するために 6 軸力覚センサを搭載している。根元側には 4 節リンク機構、手先側には差動歯車機構を採用した。

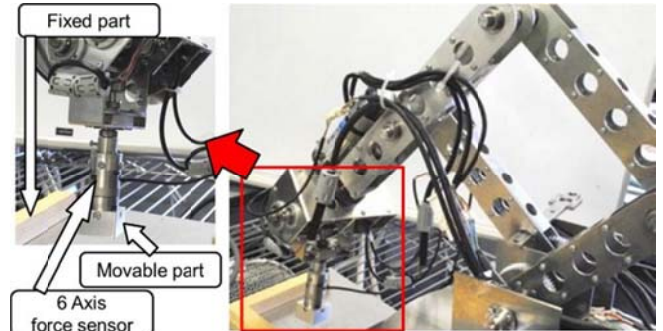


Fig. 8 6DOF manipulator

4.3.3 制御システム

位置制御系と力制御系から構成するシステムを Fig. 9 に示す。制御間隔は 2 [msec] である。

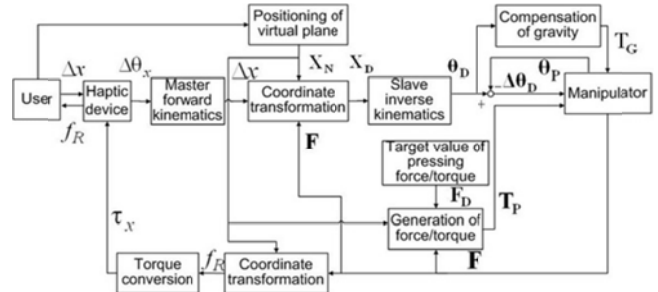


Fig. 9 Position and force control system

位置制御系では、ハプティックデバイスからの 1 自由度の移動量 Δx をもとに仮想面の情報 X_N とセンサからの力の情報 F を用いて、グローバル座標系での目標値 X_D を生成する。並進移動の場合は、 X_N から求めた移動部品の移動方向ベクトルに Δx を掛けることで目標位置を求める。回転移動の場合は、 Δx を回転軸まわりの回転角度とすることで目標姿勢を求める。 F は並進と回転を切り替えるために用いる。その後、逆運動学計算により各関節の目標値 θ_D を生成し、現在値と目標値の差 $\Delta\theta_D$ を求め、PID 制御により制御する。

力制御系では、仮想面の法線ベクトル方向へ一定の押し付け力を生成するために、目標押し付け力 F_D との差分を用いて PI 制御を行う。

衝突の反力は、力覚センサより検出する衝突力を、仮想面を用いて 1 自由度に変換し、ユーザにフィードバックする。

5. 遠隔組立実験

移動部品を環境部品との接触がない状態から、接触状態を

遷移させ、環境部品に3面拘束させるまでの実験を行った。

5.1 実験方法

移動部品が環境部品と接触していない状態から、本手法により、Fig. 10 に示すように部品同士の接触状態を順次遷移させ、最終的に移動部品と環境部品が3面で接触するまでの組立作業を行う。生成する押し付け力 F_p は大きさ3 [N] と設定する。移動部品には大きさが30[mm]×30[mm]×20[mm]、材質がアルミのものを使用し、環境部品には、底面がアルミ板、側面が木材を使用した。

仮想面は一連の作業の中で3つの状態をとる。①の状態は初期状態である。1面接触となった段階で②の状態に、2面接触となった段階で③の状態に再配置する。色つきの面は、押し付け力を生成する仮想面を表す。

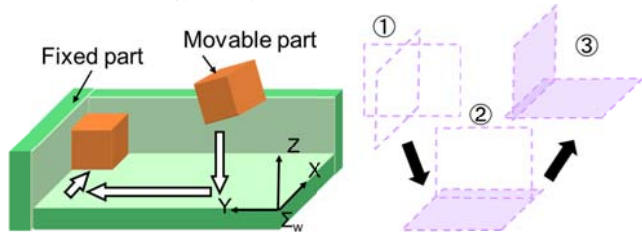


Fig. 10 Assembly procedure

5.2 実験結果と考察

Fig. 10 に示す一連の動作を行った際の移動部品の位置の時間変化、グローバル座標系の3軸方向の力 (F_x, F_y, F_z) の変化をそれぞれ Fig. 12, 13 に示す。図中の①~③は Fig. 10 に示した仮想面の状態、PV は仮想面配置にかかった時間、T は平行移動している時間、 F_i は検出された衝突力を表す。

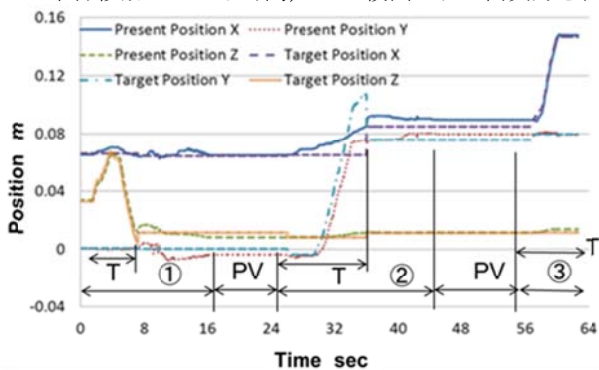


Fig. 11 Position of assembly operation

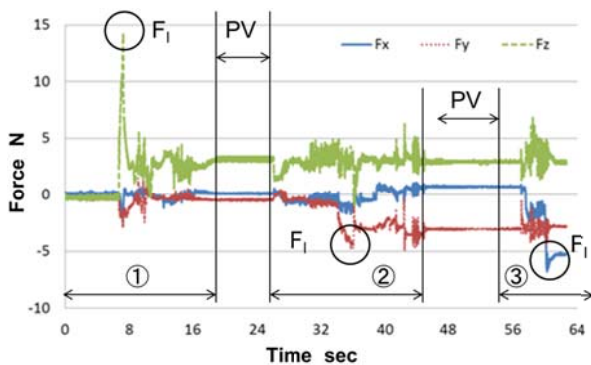


Fig. 12 Force of assembly operation

Fig. 11 から移動部品は初めにZ軸方向へ移動し、次にY軸方向へ移動し、最後にX軸方向へ移動しているとわかる。24秒付近からXの目標位置と現在位置にずれが生じている。これは位置より力による影響が大きいためである。目標位置

がずれても押し付けを維持し続けるようになっているため、力の影響により位置がずれってしまった際に、それを戻すことができなかったと考える。35秒付近でYの目標値と現在値にずれが生じているのは、環境部品の面の位置を越えて目標値が生成されたためである。これは接触状態が切り替わった際に修正されるので問題はない。一部の場所以外では、現在値は目標値によく追従している。

Fig. 12 からは、力の値の変化により接触状態が変化していることがわかる。8秒付近で F_z が大きな値となっており、この瞬間に移動部品の1頂点と環境部品の1面が接触した。その後、 F_z は多少のばらつきはあるものの、目標押し付け力である3 [N] となっている。部品が移動している間は力が一定となり、くく値にばらつきが生じてしまった。35秒付近で F_y が大きな値となっている。この瞬間に移動部品の1面1稜線と環境部品の2面での接触となった。その後、 F_y も目標押し付け力3 [N] を出力している。そして、60秒付近で F_x が大きな値となり、この瞬間に部品同士が3面で接触し組立が完了した。 F_i を検出した瞬間にユーザへ反力が提示される。指定した押し付け方向に対して目標押し付け力である3 [N] が生成されたことから、仮想面を用いての自由度の切り分けができたといえる。しかし、仮想面の配置に関してはかなり時間がかかるので、この時間を短縮する必要がある。

6. 結言

仮想面という概念を用いて、ユーザが操作する自由度と制御系で自動生成する自由度とを切り分け、ハプティックデバイスとマンピュレータ間の自由度の差を補完することで、1自由度の操作で6自由度の遠隔組立作業を実現した。

今後は、移動部品や環境部品の形状を変え、仮想面を平面だけではなく、曲面にも対応できるようにすることで、Peg-in-Hole など今回行った組立作業より複雑な組立を行えるシステムとする。

参考文献

- (1) 大井賢治, ハプティックデバイスを用いた1自由度の操作による3自由度遠隔組立作業, 精密工学会春季大会講演論文集, (2010), pp. 953-954.
- (2) 天内勇樹, 大井賢治, 平岡弘之, 舟橋幸祐, 2自由度ハプティックデバイスによる組立操作法—組立品モデルによる組立操作シミュレーション—, 精密工学会秋季大会講演論文集, (2009), pp. 473-474.
- (3) 加藤顕剛, 自動組立技術がわかる本, 工業調査会, (1995).
- (4) N.Y.KLau, M.C.C. Ngan, L.C.C. Wai and A.K.S.Ng, A force-reflecting teleoperator system with assembly state feedback, *Assembly Automation*, Vol.24, No.2 (2004), pp. 192-200.
- (5) J.Takamatsu, H.Tominaga, K.Ogawara, H.Kimura, K.Ikeuchi, Extracting manipulation skills from observation, *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol.1 (2000), pp. 584-589.
- (6) 清水昌幸, 小菅一弘, structured compliance を用いた平面組立作業, *日本ロボット学会誌*, Vol.20, No.8 (2002), pp. 852-859.
- (7) X.Xiaohui, D.Zhijiang and S.Lining, The Design and Implementation of Real-Time Internet-Based Telerobotics, *Proc. IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, Vol.2 (2003), pp. 815-819.