

学術論文

未知環境内で動作するロボットの ビジュアルサーボ/カサーボハイブリッド制御系

細田 耕^{*1} 五十嵐 克司^{*2} 浅田 稔^{*1}

Adaptive Hybrid Visual/Force Servoing Control in Unknown Environment

Koh HOSODA^{*1}, Katsuji IGARASHI^{*2} and Minoru ASADA^{*1}

This paper describes an adaptive hybrid visual servoing/force controller to realize visual servoing while the manipulator exerts contact force on a constraint surface. The proposed controller has a hybrid structure of force control and visual servoing control. It has on-line estimators for the parameters of the camera-manipulator system and for the parameters of the unknown constraint surface. It needs no *a priori* knowledge except the manipulator kinematics.

First, we propose an estimator of an image Jacobian matrix which describes the relation between image features and the tip position/orientation of the manipulator. Second, a method to estimate the normal vector of the unknown constraint surface is introduced. Then, an adaptive hybrid visual servoing/force controller is proposed. Finally, experimental results are shown to demonstrate the validity of the proposed method.

Key Words: visual servoing, force servoing, hybrid control, on-line estimation, unknown environment

1. はじめに

ロボットが動作する環境が複雑になり、環境中の未知要素が増えたり、環境が動的に変化するような場合には、環境の未知部分を同定したり、動的変化を計測するために、ロボットにさまざまな外界センサを装備する必要が出てくる。また、ロボットが対象とするタスクが複雑になってくると、それに対応してロボットの自由度も増加する傾向がある。ロボットの外界センサの数、および自由度が増加するにつれて、多入力多出力系としてのロボットをいかに制御するかが、環境やタスクの変化に対するロボットの適応性を高める上で重要となる。

環境や作業対象についての事前知識が少ない環境内で動作する、単一外界センサベースのサーボ系についてはさまざまな研究がなされている。外界センサとして視覚センサを用いた適応型ビジュアルサーボ系については Weissら [1], Feddemaら [2], Papanikolopoulosら [3]~[5], および著者ら [6] がさまざまな制御則を提案している。これらの研究においては外界センサは唯一であり、ロボットに与えられるタスクは、この単一の外界センサ内で与えられる。また吉川ら [7], Fedeleら [8] は、未知拘束面をオンライン推定しながら拘束面に対する力を制御し、また拘束面との接線方向には位置制御をする「位置と力のハイブ

リッド制御」を提案している。これらの論文では外界センサとして力センサのみを用いており、位置制御は力の信号をもとに行われているため、位置制御と力制御がお互いに干渉することはない。したがって、力制御と位置制御に個別に与えられるタスクが矛盾することはない。

ロボットが複数の外界センサを持つ場合には、ロボットに対するタスクの与え方に注意が必要となる。ロボットが環境に対する事前知識を十分持っている場合には、タスクはこの事前知識に基づいた環境のモデル内で与えられることになる。複数の外界センサを用いてロボットを制御する枠組として代表的なセンサフュージョン [9] の研究においては、複数の外界センサから観測される情報をモデルをもとに統合し、統合された空間内でロボットに対するタスクが与えられる。この方法では、センサ情報を統合するために設計者がある種のモデルを用意し、それに照らしあわせてセンサ情報を抽象化するため、(1) 統合のためのモデルを作るために環境に対する知識が必要、(2) センサ情報を抽象化するために時間がかかり、速応性が損なわれるなどの問題点がある。

ロボットが環境のモデルを持たず、ロボットに対するタスクはロボットが持つ各外界センサ上に独立に与えられる場合、センサ情報を抽象化せず、制御系の速応性を保つために、それぞれの外界センサに基づいてサーボ系を構成し、これを組み合わせたハイブリッド型の制御系を作ることが有効であると考えられる。しかしながらこのようなハイブリッド型の制御では、各外界センサに与えられるタスクを熟考しないと、タスク間で予

原稿受付 1996年6月4日

^{*1}大阪大学工学部

^{*2}大阪大学工学部、現在セイコーエプソン(株)に勤務

^{*1}Osaka University

^{*2}Osaka University, currently with SEIKO Epson, Ltd.

盾が生じ、これを実現できない。Nelsonら [10] は、視覚センサと力覚センサを用いたハイブリッド制御について述べているが、ロボットや環境に対する知識を十分に持っているため、センサ間の干渉については熟考していない。そのためロボットを取り巻く環境が未知で環境のモデルを構築しにくい場合には、この方法は使えない。

本論文では、環境に対する先験的知識がない場合に環境変化に早い応答をするために、複数の外界センサベース制御のハイブリッド構造を使うことを考え、その典型例として、視覚センサと力覚センサという異種の外界センサを持つマニピュレータのビジュアルサーボ系と力サーボ系のハイブリッドサーボ系を提案する。また視覚、力覚センサに対して独立に与えられたタスクを矛盾なく統合する方法について述べる。以下ではまず、未知環境内で動作する適応型視覚サーボ系と、未知拘束面を推定しながら望みの力を発生する力サーボ系について述べる。そしてこれらのサーボ系を、お互いに干渉しないように動作させるための非干渉化について述べ、最後に実験結果を示して提案する手法の有効性を検証する。

2. 視覚と力覚を持つロボットの接触および目標値追従作業

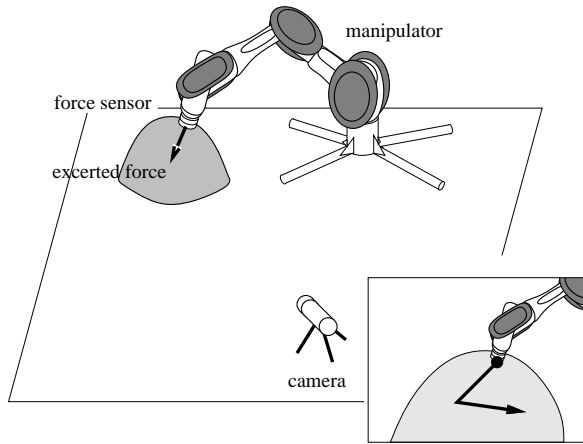


Fig. 1 Camera-manipulator system

本論文ではFig.1に示すような視覚センサ、力覚センサおよびマニピュレータを持つロボットを対象とする。視覚センサからは画像特徴量(画像上での特徴の位置、輪郭、面積など)が、また力覚センサからはマニピュレータ先端にかかる力、トルクを観測することができる。ロボットと作業環境に対しては

A1 ロボットは、そのマニピュレータ部の運動学を与えられている、すなわちマニピュレータ部の基準座標から見たマニピュレータ部先端の位置、姿勢が現在の関節角から計算可能で、それ以外のロボットや作業環境に対する知識を持たない。例えば、カメラの内部パラメータや、カメラとマニピュレータの相対位置、作業対象となる面の形状などは未知である。

A2 作業対象となる未知拘束面は1つで、滑らかな面である。

という仮定を設ける。

ロボットに与えられるタスクは、力覚センサを用いて対象物との接触力を保持しながら、視覚センサ空間内で与えられた画像特徴量の目標値に観測される画像特徴量を追従させることである。画像内でのタスクと力センサ空間内でのタスクはそれぞれ独立に与えられており、仮定A1より環境に対する先験的知識がほとんどないので、これらのタスクをあらかじめオフラインで矛盾なく統合しておくことはできない。以下では、視覚および力覚センサから得られる情報から環境およびロボットを同定し、同定結果に基づいて二種のタスクを統合する方法について述べる。

3. 視覚による環境・ロボットの推定

視覚センサによって得られる信号により、ロボットおよび環境を推定する方法として、著者らが提案している画像ヤコビ行列の推定法 [6] を用いる。

マニピュレータ基準座標系を、マニピュレータの基部に固定する。この基準座標系から見たマニピュレータ先端の位置姿勢ベクトルを $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ 、画像センサ空間内でのマニピュレータ先端に固定された画像特徴の特徴量を $\mathbf{x}_{img} \in \mathbb{R}^m$ とすると、これらのベクトルの関係は

$$\mathbf{x}_{img} = \mathbf{x}_{img}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

のように書ける。(1)式を時間微分することにより、

$$\dot{\mathbf{x}}_{img} = \mathbf{E}_{img}(\mathbf{x})\dot{\mathbf{x}} \quad (2)$$

を得る。ここで、 $\mathbf{E}_{img}(\mathbf{x}) = \partial \mathbf{x}_{img} / \partial \mathbf{x}^T \in \mathbb{R}^{m \times n}$ は、マニピュレータ先端の速度と画像特徴量速度の関係を示す画像ヤコビ行列と呼ばれる行列である。画像ヤコビ行列は、カメラの内部パラメータやカメラとマニピュレータの相対位置姿勢の関数となる。

式(2)を満たす推定画像ヤコビ行列 $\hat{\mathbf{E}}_{img}$ を、時間重みつき最小二乗法を基に以下のように推定する [11]。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{e}}_i(k+1) - \hat{\mathbf{e}}_i(k) &= \frac{\{\mathbf{x}_{img}(k+1) - \mathbf{x}_{img}(k) - \hat{\mathbf{E}}_{img}(k)\mathbf{u}(k)\}_i}{\rho_i + \mathbf{u}(k)^T \mathbf{W}_i(k)\mathbf{u}(k)} \\ &= \mathbf{W}_i(k)\mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで $\hat{\mathbf{E}}_{img}(k)$ 、 $\mathbf{u}(k)(=T\dot{\mathbf{x}})$ は k 番目のサンプリングにおける推定行列およびその時の入力、 T はサンプリング時間、 $\hat{\mathbf{e}}_i^T$ は推定ヤコビ行列 $\hat{\mathbf{E}}_{img}$ の第 i 行ベクトル、 $\mathbf{W}_i(k)$ は重み行列、 ρ_i は適当な正の定数である。この推定則は、真のヤコビ行列を推定するのではなく、式(2)を満足する行列を推定することに注意されたい。この推定則を用いて、キャリブレーションされていないロボットに対しビジュアルサーボを実現できることが示されている [6]。

4. 力覚による未知拘束面の推定

力覚センサによって得られる情報をもとに、作業対象である未知拘束面の法線方向を推定する [7]。仮定A2より、拘束面は

$$S(\mathbf{x}) = 0 \quad (4)$$

と表される．これを時間微分して

$$e_f^T \dot{x} = 0 \quad (5)$$

を得る．仮定 A1) より，ロボットは作業環境に対する知識を持たないため，作業を遂行するにはこの拘束面の法線方向 e_f を推定する必要がある．

マニピュレータが対象面と接触を保っているときには，マニピュレータ先端にかかる力 f は，摩擦力と法線方向の力の和である．摩擦力がマニピュレータ先端の動きの方向成分のみからなるとすると，これを f から除くことにより，拘束面の法線方向 \hat{e}_f を推定することができる．サンプリング時間 T の間のマニピュレータ先端の移動量を Δx とすると，拘束面の法線方向 \hat{e}_f は，

$$\hat{e}_f = \tilde{f} / \|\tilde{f}\| \quad (6)$$

と推定できる．ここで，

$$\tilde{f} \triangleq f - (f^T \Delta x) \Delta x / \|\Delta x\|^2 \quad (7)$$

である．この法線方向 \hat{e}_f に沿って拘束面に力を制御すればよい．

5. 未知環境内で動作するビジュアルサーボ/力サーボハイブリッド制御系

5.1 外界センサを用いたサーボ系同士の干渉

ロボットが複数の外界センサを持つ場合，それらのセンサ空間の相互作用が既知である場合には，例えば Nelson ら [10] が行っているように，その関係に基づいてお互いのセンサ空間の間で矛盾しない制御系を構成することができる．しかしながら本論文での状況のように，ロボットがロボット自身や環境に対してほとんど知識を持たない場合や，モデル化誤差や外乱がある場合には，

R1 各センサ空間はお互いに個別に定義されるため，各センサ空間内で与えられるタスクはお互いに干渉している可能性がある，

R2 制御前にセンサ空間内の干渉を十分に同定していても，モデル化誤差，ノイズ等の外乱により各タスクがお互いに干渉してしまう．

といった理由により，干渉をあらかじめ取り除くことはできない．

本論文で対象としているビジュアルサーボ系と力サーボ系の場合でもこの様な干渉が起こる．ビジュアルサーボ系は式 (3) に基づいて推定されたヤコビ行列を基に動作し，力サーボ系は式 (6) に基づいて推定された拘束方向にしたがって動作する．これらの推定結果は干渉しており，このままでは制御系は対象面に過大な力をかけたり，与えられた画像に追従できなくなり，与えられたタスクを達成することはできない．そこでこれらのサーボ系の出力を非干渉化するために，これらの推定結果を非干渉化する．

力センサによる拘束面の推定は，視覚センサによる画像ヤコビ行列の推定に比べ，一般にサンプリング時間が短い．また，拘束面に一定の力をかける作業を失敗すると，過大な力がマニピュレータにかかり，マニピュレータや作業対象物を破壊して

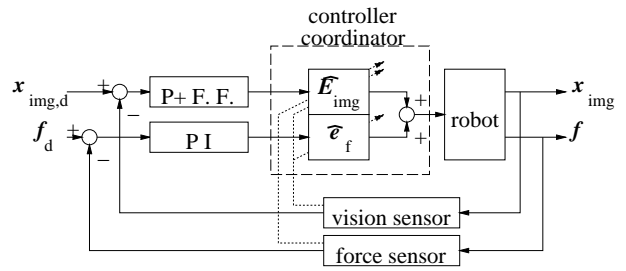


Fig. 2 Adaptive hybrid visual servoing/force controller

しまう恐れがある．一方，画像目標軌道にマニピュレータが追従できなくても，マニピュレータや対象物を破壊する恐れがないため，ここでは力センサによる推定結果 \hat{e}_f を重視し，視覚成分 \hat{E}_{img} からこれを取り除くことによって非干渉化する．非干渉化された画像ヤコビ行列 \hat{E}'_{img} は，

$$\hat{E}'_{img,j} = \hat{E}_{img,j} - \hat{E}_{img,j} \hat{e}_f \hat{e}_f^T \quad (8)$$

によって得られる．ここで， $\hat{E}'_{img,j}$, $j = 1, \dots, m$ は，非干渉化されたヤコビ行列 \hat{E}'_{img} の第 j 行ベクトルである．式 (8) を用いることにより，力サーボ系と視覚サーボ系を非干渉化でき，これによってこれらのサーボ系のハイブリッド構造を実現することができる．

5.2 適応機構を持つハイブリッドビジュアルサーボ/力制御系

マニピュレータは各関節ごとに速度制御されており，ビジュアルサーボに対してはフィードフォワード+P制御，力サーボに対してはPI制御を適用すると，提案するビジュアルサーボ/力サーボハイブリッド制御系は

$$\dot{\theta} = J^{-1}(u_f + u_{img}) \quad (9)$$

である．ここで， u_f は力制御系に対する制御入力，

$$u_f = \hat{e}_f \left\{ K_{fp}(f_d - \hat{e}_f^T f) + K_{fi} \int (f_d - \hat{e}_f^T f) dt \right\} \quad (10)$$

u_{img} はビジュアルサーボ系に対する制御入力，

$$u_{img} = \hat{E}'_{img,+} \{ \dot{x}_{img,d} + K_p(x_{img,d} - x_{img}) \} \quad (11)$$

である． f_d および $x_{img,d}$ は，それぞれ，拘束面に対する目標法線力，画像平面内での目標特徴量である．また，マニピュレータの関節変位速度とマニピュレータの手先速度の関係を記述するヤコビ行列 J は，仮定 A1) より既知である．式 (3), (6), (8), (9) により構成される適応型ハイブリッドビジュアルサーボ/力制御系のブロック線図を Fig.2 に示す．

6. 実験

6.1 実験装置

Fig.3に，実験に使用した装置の概観を示す．マニピュレータとして7自由度可搬式汎用知能アーム PA-10(三菱重工)を用いている．本実験では，手先の姿勢ともう一軸を固定するこ

とにより、3自由度マニピュレータとして扱っている。CCDカメラ(UN401, ELMO)によって取得された画像情報はトラッキングモジュール(富士通)に送られる(画像サイズ 512[pixel] × 512[pixel])。トラッキングモジュールは前もって与えられた画像テンプレートと、現在の画像の相関をとることによって、そのテンプレートと最も相関が高い画像が現在の画像平面上のどこにあるかを検出できる[12]。このモジュールにより得られたテンプレートの座標はホストコンピュータボードMVME167(CPU:68040, 33[MHz], Motorola)に送られる。また、マニピュレータの先端には6軸の力覚センサが取り付けられており、計測された力はPI/Oボードを介してホストコンピュータボードに送られる。これらの信号と、アークネットを介して得られるマニピュレータの関節情報を基にマニピュレータに対する制御出力が計算される。制御出力はアークネット(5Mbps)を介してマニピュレータの専用コントローラに送られる。このシステムを用い、制御用のソフトウェアをVxWorks上のC言語で作成したところ、力制御系のサンプリングタイムが4[ms]、ビジュアルサーボ系のサンプリングタイムが33[ms]となった。

6.2 未知曲面に対する押しつけと画像追従の実験結果

実験に用いたマニピュレータとカメラ、および未知拘束面の概観をFig.4に示す。拘束面は緩やかな曲面でその形状は未知である。対象面と接触するまで、手先を十分に小さい一定速度で $-z$ 方向に運動させ、力センサに0でない値を検出した点をAとする。この点Aから提案する手法を適用した。未知拘束面に対する法線方向力の目標値は19.6[N]とした。ロボットに与えた画像平面内での画像特徴量の目標軌道を、画像平面内での三角形として与える(Fig.5)。対象面と接触するまで、手先を十分に小さい一定速度で $-z$ 方向に運動させ、力センサに0でない値を検出した点をAとする。この点Aから提案する手法を適用した。目標は、点Aから点Bまでを5[sec]、点Bから点Cまでを5[sec]、点Cから点Aまでを5[sec]で、速度台形則にしたがって移動する。パラメータ推定則に用いた重み行列 W 、および忘却係数 ρ は、それぞれ試行錯誤的に0.01I, 0.3と決めた。画像ヤコビ行列の初期値として、あらかじめマニピュレータを x, y, z 軸方向に動かして、おおよその値、

$$\hat{E}_{img}(0) = \begin{bmatrix} -0.03 & 0.4 & -0.02 \\ 0.15 & 0.1 & -0.2 \end{bmatrix}$$

を得た。ゲインに関しては、 $K_{fp} = 29.0$, $K_{fi} = 0.075$, $K_p = \text{diag}[2.0 \ 2.0 \ 2.0]$ としている。

実験結果をFig.6-9に示す。手先に生じる力をFig.6、画像平面内で実現された手先の動きをFig.7、画像平面内での x 軸、 y 軸に沿った誤差ノルムをそれぞれFig.8, Fig.9に示す。

Fig.6において、最初の約1秒は対象と接触するまでであり、この間は力が発生していない。それ以降は、提案する方法により、手先に目標の力が実現されていることがわかる。マニピュレータの速度がより小さい場合には力の誤差がより少なくなることも、実験により確認している。Fig.7より、画像平面内においてもよい応答を得ることができるのが確認された。追従誤差は、大きくても4[pixel]であることがFig.8およびFig.9よりわかる。

力制御とビジュアルサーボを式(8)による非干渉化無しで適用した実験も行ったが、拘束面方向に過大な力を生じるため、実験遂行が不可能であることを確認している。これらの実験結果より、提案する手法の有効性が検証された。

7. おわりに

本報告では複数の外界センサに基づいたサーボ系のハイブリッド化を目的とし、視覚センサと力覚センサという異種の外界センサを持つマニピュレータのビジュアルサーボ系と力サーボ系のハイブリッドサーボ系を提案した。提案する手法を用いることにより、未知の拘束面に対して先験的な知識を与えることなしに、拘束面に望みの力を出しながら、画像内で与えられた目標軌道を追従させることができる。このことを実験により検証した。

本論文で対象としているのは、複数の外界センサに基づくサーボ系のハイブリッド構造であり、従来より提案されている位置と力のハイブリッド制御[7][8][13]とは根本的に異なることに注意されたい。これらの論文中では外界センサとして力センサのみを用いており、位置制御は力の信号をもとに行われているため、位置制御と力制御がお互いに干渉することはない。

本論文ではビジュアルサーボ系と力サーボ系の非干渉化を、推定画像ヤコビ行列から、推定された拘束行列を取り除くことによって行った。これは、本文中にも述べたように、(1)力センサによる拘束面の推定は、視覚センサによる画像ヤコビ行列の推定に比べ、一般にサンプリング時間が短い、(2)拘束面に一定の力をかける作業を失敗すると、過大な力がマニピュレータにかかり、マニピュレータや対象物を破壊してしまう恐れがあるが、画像目標軌道にマニピュレータが追従できなくても、これらを破壊する恐れがない、という理由に基づいている。このように与えられた複数タスクの優先度までも、ロボットが自立的に獲得できることが望ましいと考えられる。また、本論文ではビジュアルサーボ系と力サーボ系について考察したが、この他にも種々の外界センサをもとにしたサーボ系についても、同様の考察ができるものと考えられる。

参考文献

- [1] L. E. Weiss, A. C. Sanderson, and C. P. Neuman. Dynamic Sensor-Based Control of Robots with Visual Feedback. *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 5, pp. 404-417, 1987.
- [2] J. T. Feddema and C. S. G. Lee. Adaptive Image Feature Prediction and Control for Visual Tracking with a Hand-Eye Coordinated Camera. *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, Vol. 20, No. 5, pp. 1172-1183, 1990.
- [3] N. P. Papanikolopoulos and P. K. Khosla. Adaptive Robotic Visual Tracking: Theory and Experiments. *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 38, No. 3, pp. 429-445, 1993.
- [4] B. Nelson, N. P. Papanikolopoulos, and P. K. Khosla. Visual Servoing for Robotic Assembly. In *Visual Servoing*, pp. 139-164. World Scientific, 1993.
- [5] N. P. Papanikolopoulos, B. Nelson, and P. K. Khosla. Six Degree-of-Freedom Hand/Eye Visual Tracking with Uncertain Parameters. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 174-179, 1994.

- [6] 細田, 浅田. 構造やパラメータに関する先験的な知識を必要としないフィードフォワード補償器を持つ適応型ビジュアルサーボ系の構成. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 313-319, 1996.
- [7] T. Yoshikawa and A. Sudo. Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators — On-Line Estimation of Unknown Constraint. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 2, pp. 220-225, 1993.
- [8] A. Fedele, A. Fioretti, C. Manes, and G. Ulivi. On-Line Processing of Position and Force Measures for Contour Identification and Robot Control. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 369-374, 1993.
- [9] 山崎, 石川 (編). センサフュージョン. コロナ社, 1992.
- [10] B. J. Nelson, J. D. Morrow, and P. K. Khosla. Improved Force Control Through Visual Servoing. In *Proc. of the American Control Conference*, 1995.
- [11] P. Eykhoff. *System Identification*, chapter 7. John Wiley & Sons Ltd., 1974.
- [12] 稲葉. 局所相関プロセッサを用いたロボットビジョン. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 3, pp. 327-330, 1995.
- [13] M. H. Raibert and J. J. Craig. Hybrid Position/Force Control of Manipulators. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 103, No. 2, pp. 126-133, 1981.



細田 耕 (Koh Hosoda)

1965年11月9日生. 1993年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了. 同年大阪大学工学部助手となり, 現在に至る. 1995年日本ロボット学会研究奨励賞, 1996年日本ロボット学会第10回論文賞受賞. 視覚サーボ系, 知能ロボットの研究に従事. 博士(工学). IEEE, 計測自動制御学会の会員. (日本ロボット学会正会員)

学会の会員.



五十嵐 克司 (Katsuji Igarashi)

1971年4月2日生. 1996年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士前期課程修了. 同年セイコーエプソン(株)に入社, 現在に至る. 在学中視覚サーボ系を用いたロボットの制御, 力制御の研究に従事. (日本ロボット学会正会員)



浅田 稔 (Minoru Asada)

1953年10月1日生. 1982年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了. 同年同大学基礎工学部助手. 1989年同大学工学部助教授, 1995年同教授となり現在に至る. この間, 1986年から1年間米国メリーランド大学客員研究員. 1989年情報処理学会研究賞, 1992年IEEE/RSJ IROS'92 Best

Paper Award, 1996年日本ロボット学会第10回論文賞受賞. 知能ロボットの研究に従事. 工学博士. 電子情報通信学会, 情報処理学会, 人工知能学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEEなどの会員 (日本ロボット学会正会員)

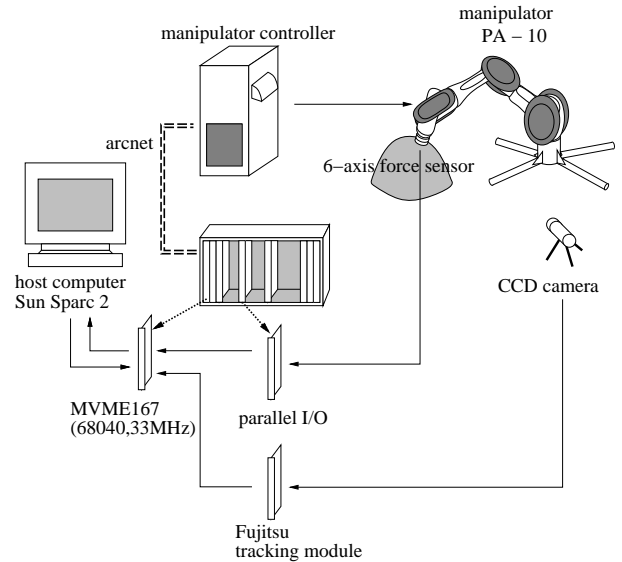


Fig. 3 Experimental equipment

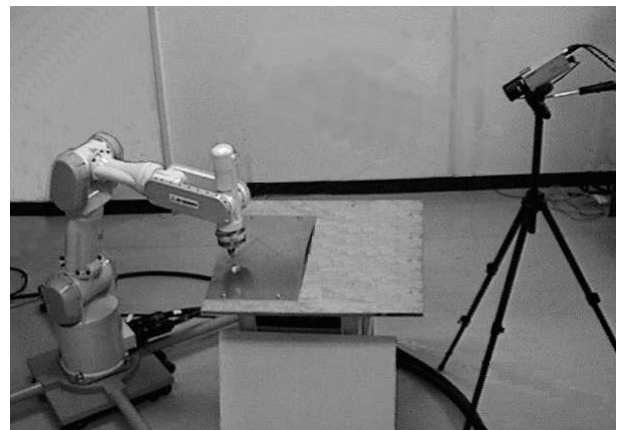


Fig. 4 Overview of the manipulator, the camera, and the constraint surface

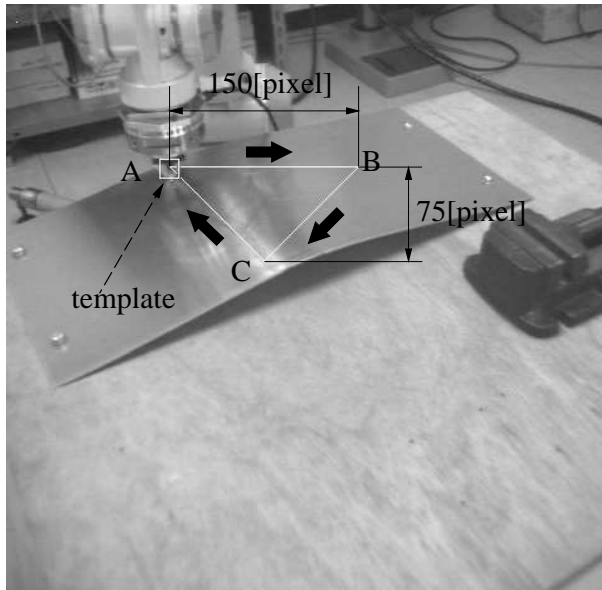


Fig. 5 Desired image trajectory on the image plane

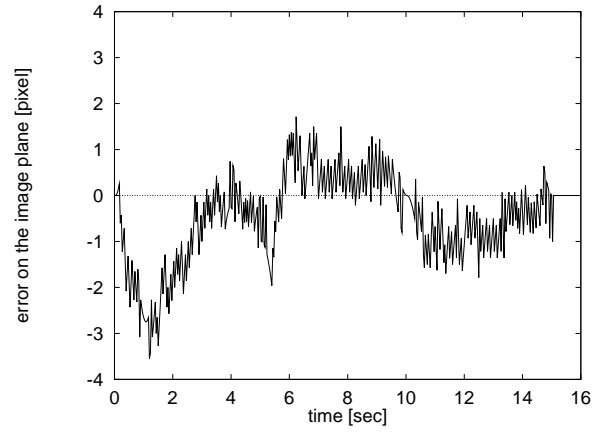


Fig. 8 Experimental result 4:tracking error on the image plane(along x-axis)

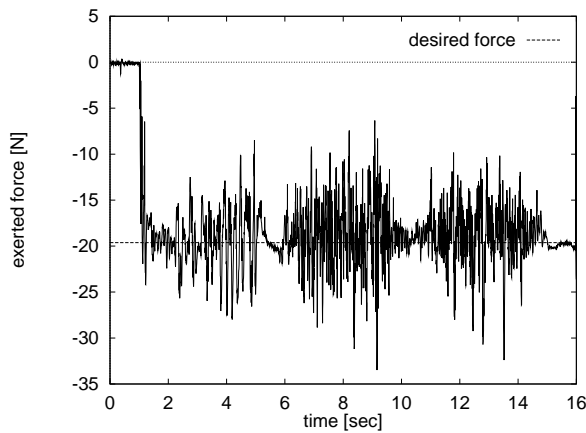


Fig. 6 Experimental result 2:exerted normal force

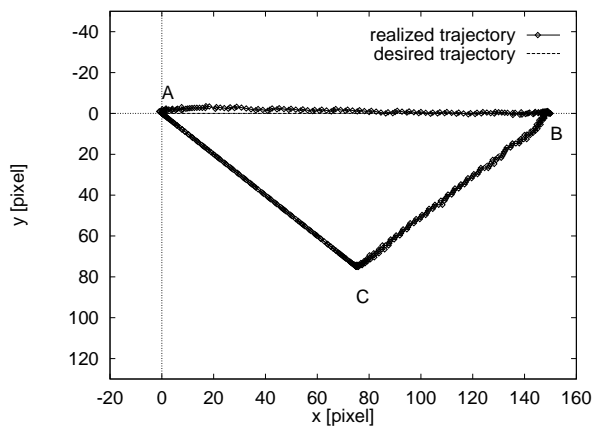


Fig. 7 Experimental result 3:trajectory on the image plane

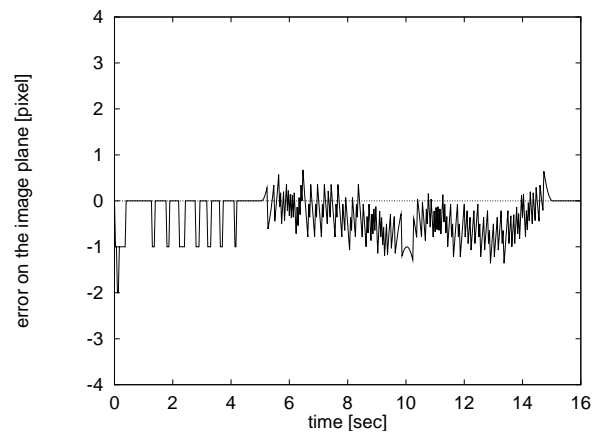


Fig. 9 Experimental result 5:tracking error on the image plane(along y-axis)