

未知環境における視覚と力覚のハイブリッド制御

○五十嵐 克司 細田 耕 浅田 稔
大阪大学工学部

Hybrid Visual Servoing/Force Control in Unknown Environments

○Katsuji IGARASHI Koh HOSODA Minoru ASADA
Osaka University

Abstract – This paper describes a hybrid visual servoing/force control based on image feature based visual servoing control and force control in unknown environments. First, deviation of arm motion between constraint and visual servoing direction is described. Second, controller which estimates the description of motion in unknown environment and controls the robot without interference is proposed. Finally, experimental results are shown.

1 はじめに

ロボットに未知環境内で作業を遂行させることはロボット工学における目標のひとつである。そこで近年、各種外界センサを用いて未知環境を推定しながらロボットを制御する方法が研究されている [1][2]。しかし、これらは一種類の外界センサ情報によるものであり、異なる種類の外界センサを利用していない。異種外界センサを利用した未知環境適応型のロボットシステムについての研究は、作業対象やシステムの状態変化に柔軟なシステムを構築し、より複雑な作業をロボットに遂行させる上で重要である。

外界センサとして力覚センサと視覚センサを用いたロボットアーム制御の研究として、Nelsonら [3] は、手先効果器を対象に接近させ把握するという作業において、ルールベースによる力制御と視覚サーボ制御の切替えをおこなう制御系を提案し、接触時の安定性向上やテレオペレーションにおける操作性向上に有効であることを示した。また、視覚サーボ制御と力制御をサブタスクとして同時に行なうハイブリッド制御法も提案している。しかしながら、与えるサブタスクがあらかじめ独立となるような作業を想定しており、各サブタスク間の干渉について議論していなかった。しかし、未知環境下ではこれら異種外界センサに別々に作業が与えられるため、サブタスク間の干渉という問題が起こり得る。

本報告では、視覚センサと力覚センサにより環境をオンラインで推定し、視覚サーボ制御と力制御をサブタスクとして同時に実行することによって未知環境で自律的な拘束作業を実現する視覚と力覚のハイブリッド制御法を提案する。提案する手法はロボットの運動学のみを必要とし、推定された環境情報によりサブタ

スク間の干渉を無くすことが可能になる。

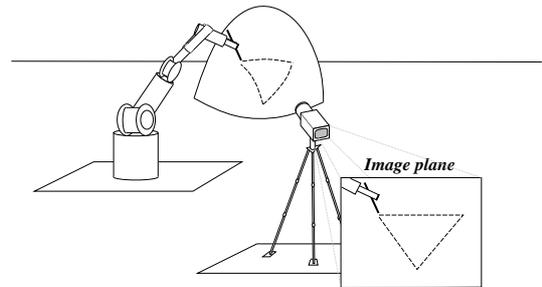


Fig.1 Task overview.

2 作業と問題設定

ロボットアーム、作業対象、視覚センサからなる作業環境を Fig.1 に示す。視覚センサは画像特徴量としてロボットアームの手先効果器の画像上での位置を観測する。また、アーム手首部の6軸力覚センサにより、手先効果器が作業対象に加える力を観測する。与える作業はアームが対象物に望みの力を加えて拘束を維持しながら、手先画像特徴量の変化により与えられた望みの軌道に手先を追従させることである。

ここで仮定としてアームの運動学パラメータのみが既知であるとする。つまり、アームの基準座標系から見た手先の位置姿勢は既知とする。他のパラメータ、例えば作業空間内における対象物、アーム、カメラの相互の位置関係や対象物形状などは未知とする。

3 手先運動のタスク空間での記述

手先拘束を受けるアームの拘束と運動の一般的記述 [4] を基に，アーム手先の運動を記述するためのタスク空間を定義する．タスク空間の座標を与えることで，アームを拘束方向に対して力制御すると同時に，画像特徴量を基にした視覚サーボ制御を実行する作業を容易に記述できる．

まず，アームの手先効果器が対象から受ける物理的拘束が手先位置ベクトル $\boldsymbol{x} (\in \mathbb{R}^n)$ 空間内の $m (\leq n)$ 個の独立な拘束超曲面を表す関数，

$$s_i(\boldsymbol{x}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

によって表されるとする． $s_i(\boldsymbol{x})$ は \boldsymbol{x} に関して1回微分可能で，基準座標系における n 次元空間内で互いに独立であるとする．また，これらの超曲面はアームの手先から力が加えられても変動しない．すなわち，拘束を手先に与える対象物は無限大の剛性を持つものとする．式 (1) を時間変数 t に関して微分することにより，

$$\boldsymbol{E}_f \dot{\boldsymbol{x}} = \mathbf{0} \quad (2)$$

を得る．

ただし， $\boldsymbol{E}_f \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_{f,1} & \boldsymbol{e}_{f,2} & \cdots & \boldsymbol{e}_{f,m} \end{bmatrix}^T$ ， $\boldsymbol{e}_{f,i} \triangleq \frac{\partial s_i(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}$ ， $i = 1, 2, \dots, m$ である．このとき， $s_i(\boldsymbol{x})$ は独立であるようにとったので， $\text{rank } \boldsymbol{E}_f = m$ となる． \boldsymbol{E}_f の行ベクトル $\boldsymbol{e}_{f,i}$ ， $i = 1, 2, \dots, m$ はそれぞれ i 番目の拘束超曲面の法線方向に対応する基準座標系から見たベクトルである．

次に，アームの手先を視覚センサにより観測するとき，基準座標系から見た n 次元の手先位置ベクトル \boldsymbol{x} の関数として表される任意の k 個の画像特徴量 $p_{img,j}(\boldsymbol{x})$ ， $j = 1, 2, \dots, k$ を得ることができる．アームが m 個の拘束超曲面によって表わされる物理的拘束を受けるとき， $p_{img,j}(\boldsymbol{x})$ が拘束曲面上における手先の運動を記述するためには， $s_i(\boldsymbol{x})$ ， $i = 1, 2, \dots, m$ ； $p_{img,j}(\boldsymbol{x})$ ， $j = 1, 2, \dots, k$ が基準座標系における n 次元空間内で互いに独立な関数であることが条件となる．

以上で定義した k 個の画像特徴量と m 個の拘束超曲面の組によりタスク空間

$$\boldsymbol{x}_c \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{img}^T & \boldsymbol{x}_f^T \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

を定義する．ここで，

$$\boldsymbol{x}_{img} \triangleq \begin{bmatrix} p_{img,1} & p_{img,2} & \cdots & p_{img,k} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$\boldsymbol{x}_f \triangleq \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \cdots & s_m \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

このとき，座標 \boldsymbol{x}_c と基準座標系からみた手先速度の関係を得る．

$$\dot{\boldsymbol{x}}_c \triangleq \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{x}}_{img} \\ \dot{\boldsymbol{x}}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{x}}_{img} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \boldsymbol{E} \dot{\boldsymbol{x}} \quad (6)$$

ここで，

$$\boldsymbol{E} \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{E}_{img} \\ \boldsymbol{E}_f \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{E}_{img} \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_{img,1} & \boldsymbol{e}_{img,2} & \cdots & \boldsymbol{e}_{img,k} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\boldsymbol{e}_{img,j} \triangleq \frac{\partial p_{img,j}(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (9)$$

$$\boldsymbol{E}_f \triangleq \begin{bmatrix} \boldsymbol{e}_{f,1} & \boldsymbol{e}_{f,2} & \cdots & \boldsymbol{e}_{f,m} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$$\boldsymbol{e}_{f,i} \triangleq \frac{\partial s_i(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

\boldsymbol{E}_{img} の行ベクトル $\boldsymbol{e}_{img,j}$ ， $j = 1, 2, \dots, k$ は，それぞれ対応する j 番目の画像特徴量の変化量に対する基準座標系から見た手先の移動ベクトルである．先に示した $s_i(\boldsymbol{x})$ と $p_{img,j}(\boldsymbol{x})$ の独立性に関する条件は，行列 \boldsymbol{E}_f ， \boldsymbol{E}_{img} ， \boldsymbol{E} の階数に関する以下の条件式が成立することで局所的に満足される．

$$\text{rank } \boldsymbol{E}_f = m \quad (12)$$

$$\text{rank } \boldsymbol{E}_{img} \leq n - m \quad (13)$$

$$\text{rank } \boldsymbol{E} = \text{rank } \boldsymbol{E}_f + \text{rank } \boldsymbol{E}_{img} \quad (14)$$

式 (12) は独立な拘束の数に関する条件であり，式 (13)，(14) は画像特徴量の運動に対応する基準座標系から見た位置制御方向が物理的拘束方向と独立であるための条件式である．

4 タスク空間と手先運動の関係の実時間推定

問題設定より，前節で定義したタスク空間と手先位置 \boldsymbol{x} の関係 \boldsymbol{E}_f ， \boldsymbol{E}_{img} はあらかじめ与えられていないので，センサ情報を用いて推定する必要がある．この \boldsymbol{E}_f ， \boldsymbol{E}_{img} を力覚センサと視覚センサの測定値を用いて実時間で推定する．ただし，先に示した \boldsymbol{E}_f と \boldsymbol{E}_{img} の独立性の条件を満足しなければならない．

4.1 \boldsymbol{E}_f の推定則

時刻 t における $\boldsymbol{E}_f(t)$ はその時刻の手先効果器と対象物の接触点における対象曲面の法線方向 $\boldsymbol{n}(t)$ の推定値 $\hat{\boldsymbol{n}}(t)$ によって与えられる．アームの運動速度が対象面上で小さいときには，接触点における摩擦力が無視できると考えられるので，力覚センサによって

得られた力 f の方向が法線方向とみなせる．これを正規化し，

$$\widehat{E}_f(t) = \widehat{n}(t) = \frac{f(t)}{\|f(t)\|} \quad (15)$$

を得る．また，アームの運動速度が対象面上で大きいとき，対象の法線方向の推定は接触点での摩擦力の影響が無視できなくなるため，それを除去するような推定が有効である [1]．手先効果器が対象に与える力のうち，サンプリング間隔 Δt_f 毎の基準座標系における手先微小運動 $\Delta x_{t_f}(t)$ の方向の力成分が摩擦力であるとして取り除くと，接触点における対象の法線方向 E_f が以下のように得られる．

$$\widehat{f}(t) = f(t) - \left\{ f(t)^T \frac{\Delta x_{t_f}(t)}{\|\Delta x_{t_f}(t)\|} \right\} \frac{\Delta x_{t_f}(t)}{\|\Delta x_{t_f}(t)\|} \quad (16)$$

$$\widehat{E}_f(t) = \widehat{n}(t) = \frac{\widehat{f}(t)}{\|\widehat{f}(t)\|} \quad (17)$$

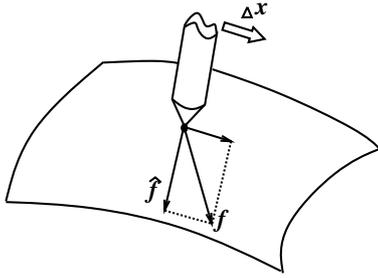


Fig.2 Normal vector estimation.

4.2 E_{img} の推定則

構成する視覚サーボ制御則で必要となる現在の手先位置における局所的な手先の画像特徴量の変化速度と基準座標系から見た手先速度の関係を表す行列 $E_{img}(t)$ を細田ら [2] の推定則と同様にして，サンプリング間隔 Δt_v ごとに $E_{img}(t)$ を以下のように推定する．

$$\widehat{E}_{img}(t) - \widehat{E}_{img}(t - \Delta t_v) = \frac{\{\Delta x_{img}(t) - \widehat{E}_{img}(t - \Delta t_v) \Delta x_{t_v}(t)\} \Delta x_{t_v}(t)^T W(t)}{\rho + \Delta x_{t_v}(t)^T W(t) \Delta x_{t_v}(t)} \quad (18)$$

ここで， $\Delta x_{t_v}(t) \triangleq x(t) - x(t - \Delta t_v)$ ， $\Delta x_{img}(t) \triangleq x_{img}(t) - x_{img}(t - \Delta t_v)$ である． W は重み行列であるが単位行列を用いた． ρ は外乱により右辺第2項の分母の値が小さくなったときに推定値が発散しないようにするための正の定数であり，できるだけ小さな値となるように決定する．

4.3 E_f と E_{img} の非干渉化

推定則 (17)，(18) によって E_f ， E_{img} はそれぞれ独立に推定されるため，独立性の条件 (14) を満足するとは限らない．そこで，推定則 (18) によって得られた $\widehat{E}_{img}(t)$ の各行ベクトル $\widehat{e}_{img,j}$ から式 (17) で推定された $\widehat{E}_f(t)$ を用いて，これに直交する成分からなる推定値 $\widehat{E}'_{img}(t)$ を得ることで独立性を保証する．サンプリング間隔 Δt_v ごとの $\widehat{E}'_{img}(t)$ の各行ベクトル $\widehat{e}'_{img,j}(t)$ ， $j = 1, 2, \dots, k$ の推定則を以下のように与える．

$$\widehat{e}'_{img,j}(t) = \widehat{e}_{img,j}(t) - \sum_{i=1}^m \{ \widehat{e}_{img,j}(t) \widehat{e}_{f,i}(t)^T \} \widehat{e}_{f,i}(t) \quad (19)$$

ただし， $\widehat{e}_{f,i}(t)$ は $\widehat{E}_f(t)$ の各行ベクトルである．

5 制御系の設計

関節速度 $\dot{\theta}$ を指令値とするアームに対して，以上のようになされた推定値 $\widehat{E}_f(t)$ ， $\widehat{E}'_{img}(t)$ を用いて，拘束方向の力 f_f ，および画像特徴量 x_{img} とその変化速度 \dot{x}_{img} を，目標力 f_{fd} ，目標画像特徴量 $x_{img,d}$ および目標速度 $\dot{x}_{img,d}$ に追従させるサーボ系を

$$\dot{\theta} = J^{-1} (u_f + u_{img}) \quad (20)$$

$$u_f = \widehat{E}_f^T \left\{ K_{fp} (f_{fd} - f_f) + K_{fi} \int (f_{fd} - f_f) \right\} \quad (21)$$

$$u_{img} = \widehat{E}^+ \begin{bmatrix} \dot{x}_{pd} + K_{img}(x_{pd} - x_p) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

のように構成する．ここで， J はアームの関節ベクトル $\theta \in \mathbb{R}^l$ と環境に固定された基準座標系における手先位置 $x \in \mathbb{R}^n$ ， $n \leq l$ との関係

$$x = x(\theta) \quad (23)$$

を時間変数 t で微分して得られる関節速度と手先速度の関係

$$\dot{x} = J\dot{\theta} \quad (24)$$

を表す行列である．ただし， $J \triangleq \frac{\partial x(\theta)}{\partial \theta^T}$ である．また，

$$\widehat{E} \triangleq \begin{bmatrix} \widehat{E}'_{img} \\ \widehat{E}_f \end{bmatrix} \quad (25)$$

である．また， \widehat{E}^+ は行列 \widehat{E} の疑似逆行列， K_{fp} ， K_{fi} はそれぞれ力の誤差に対する正定な比例ゲイン行列，積分ゲイン行列， K_{img} は画像特徴量の誤差に対する正定ゲイン行列である．

力制御則 (21) はアームが推定された拘束方向に加える力の目標値からの誤差に比例する手先速度と誤差の積分値に比例する手先速度を発生しようとする制御則

である．得られた関節速度指令値 $J^{-1}u_f$ は手先の拘束方向にだけ速度成分を持ち，対象が完全な剛体であるという仮定の基で画像特徴量は変化せず，その結果視覚サーボ系に干渉しない．

視覚サーボ則 (22) は与えられた画像特徴量の目標速度のフィードフォワード項および画像特徴量の目標位置誤差のフィードバック項を持つ．この視覚サーボ系により得られる関節速度指令値 $J^{-1}u_{img}$ は手先拘束方向に手先速度成分を持たず，力制御系に干渉しない．

ブロック図を Fig.3 に示す．

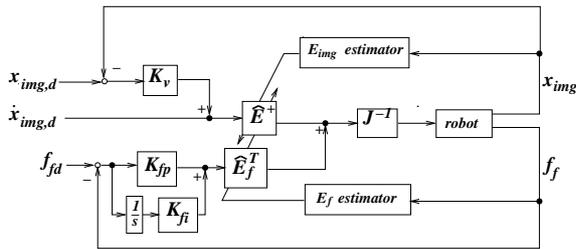


Fig.3 Block diagram.

6 実験

6.1 実験装置

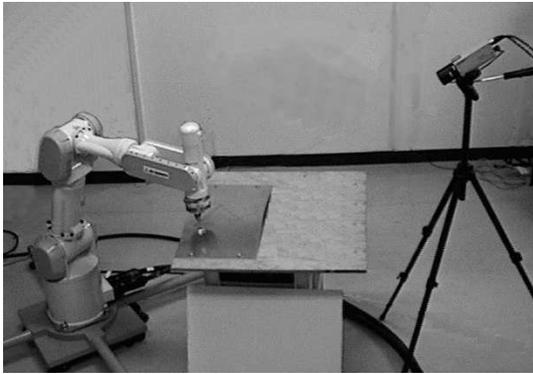


Fig.4 Experimental setup.

アーム，カメラ，対象の概観を Fig. 4 に，実験装置を Fig.5 に示す．作業用マニピュレータとして三菱重工製 7 自由度可搬式汎用知能アーム PA10 を使用する．ただし，本実験では手先位置の 3 自由度だけを扱い，手先姿勢は固定する．ホストとして MVME167 (Motorola 68040 33MHz) をバスマスタとする VME バスシステム (OS: VxWorks) を用いた．VME システムには他にロボットコントローラと接続するためのアーケネット

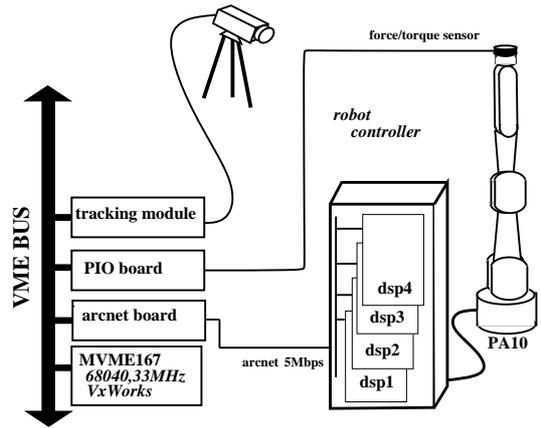


Fig.5 Experimental equipment.

ボード (東洋マイクロシステム社製)，アームの手首部に装着する 6 軸フォーストルクセンサ (ピーエルオートテック社製) のコントローラと接続するためのパラレル I/O ボード，入力されたカメラ画像からテンプレート画像 (16[pixel] × 16[pixel] を使用) を相関演算によって実時間追跡 (1/30[s]) するトラッキングビジョンシステム (富士通製) で構成される．力覚センサのサンプリング間隔および力制御系の制御周期は 4[ms]，視覚センサのサンプリング間隔および視覚サーボ制御周期は 33[ms] である．

6.2 曲面上での作業

視覚センサとして 1 台のカメラを適当に配置し，対象物としてアルミ製の曲面を置き，Fig.6 に示す観測画像を得た．このときのアームの位置を初期姿勢とし，手先の画像をトラッキングビジョンシステムのテンプレート画像として与える．このテンプレート画像を用いて追跡した手先位置の x, y 座標を画像特徴量 x_{img} とする．

まず，アームの初期姿勢から対象と接触するようにアームを適当に動かす．そして対象と接触が起きた瞬間の画像特徴量を始点とする三角形を目標軌道とし，各辺を 5 秒間で速度台形則により移動するような目標軌道 $x_{img,d}$ と目標速度 $\dot{x}_{img,d}$ を生成した．生成された軌道は作業空間では一辺が約 0.25[m] の歪んだ三角形を描く軌道となった．また，推定された拘束方向に対して目標力 $f_d = 19.6[N]$ に追従させる．

$\hat{E}_{img}(t)$ の推定則の ρ は試行錯誤的に決定し $\rho = 30.0$ とした．ゲイン行列はそれぞれ， $K_{fp} = 29.0$ ， $K_{fi} = 0.075$ ， $K_v = \text{diag} \begin{bmatrix} 2.0 & 2.0 \end{bmatrix}$ とした． E_{img}

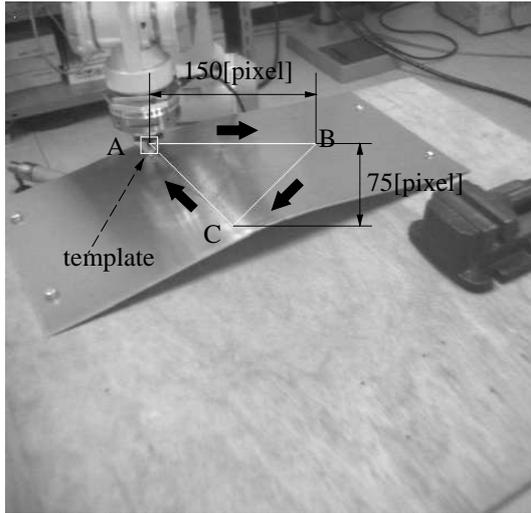


Fig.6 Initial position on curved surface and desired trajectory.

の初期値は,

$$\hat{\mathbf{E}}_{img}(0) = \begin{bmatrix} -0.03 & 0.4 & -0.02 \\ 0.15 & 0.1 & -0.2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

と適当に与えた.

実験結果として Fig.7 に基準座標系における手先の軌道と推定された法線方向を, Fig.8 に推定された拘束方向の力の応答を, Fig.9 に接触時からの画像特徴量の目標軌道と実際に観測された軌道を, Fig.10, Fig.11 に画像特徴量の目標位置からの誤差を示す.

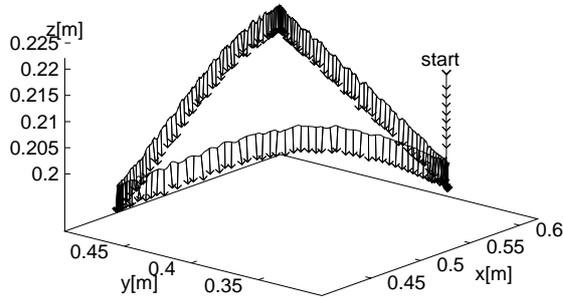


Fig.7 Estimated normal vector.

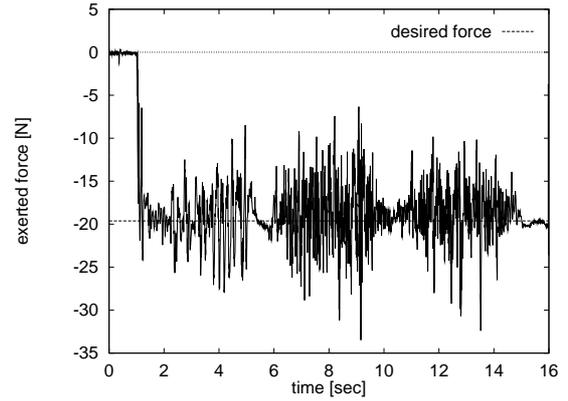


Fig.8 Force response about estimated constraint direction.

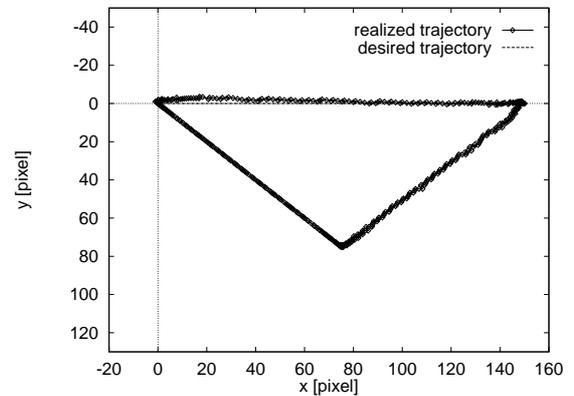


Fig.9 Image Feature trajectory.

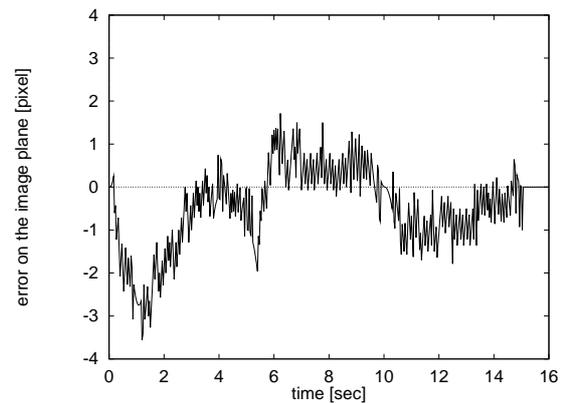


Fig.10 Tracking error on the image plane about x-axis.

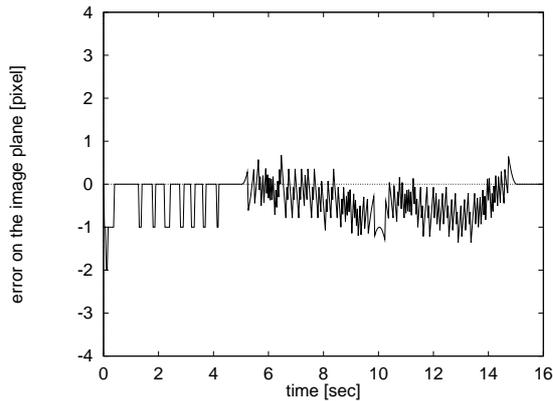


Fig.11 Tracking error on the image plane about y-axis.

Fig.7により曲面に対して拘束方向がほぼ垂直に推定されていることが分かる。Fig.8により推定された法線方向に対して目標の力に追従していることが分かる。Fig.9により画像特徴量で与えた目標軌道に良く追従していることが分かる。また、Fig.10, Fig.11より、はじめ追従誤差が大きい時間がともに誤差が小さくなっていることから、 E_{img} の推定と直交化の手法の有効性が示された。

7 おわりに

未知環境においてロボットアームによる対象物との物理的拘束を伴う作業を、視覚センサと力覚センサの情報を用いて実現する視覚と力覚のハイブリッド制御を提案した。異なる種類の外界センサの特徴量を基にしたタスク空間を定義して作業を与え、このタスク空間と手先運動との関係を外界センサ情報からオンラインで推定し、それぞれの外界センサに与えられたサブタスクを非干渉化することで、力制御によって拘束を維持させながら、画像特徴量を基にした視覚サーボ制御を実現した。本手法の有効性を調べるため3次元空間で1つの拘束面に対して力制御しながら、画像上で与えられた目標軌道にアームを追従させる実験を行い有効な結果を得た。

本報告で実現した作業は3次元での手先位置とその力の3成分だけを扱った。そのため、環境の推定則で得た \hat{E} の独立性を行列 \hat{E}_f と \hat{E}_{img} の直交化の操作によって保証した。しかし、アームの手先姿勢や、トルクも考慮した6自由度の作業における \hat{E} の推定とその独立性の保証には直交化の概念は物理的意味を持たなくなり [5][6]、独立性を保証するためには別の枠組

が必要になると考えられる。また、本報告ではタスク空間の視覚部分を単眼視覚による手先の座標で定義し、与えた作業は簡単な直線軌道であったが、より複雑な作業の記述のための複数視覚によるタスク空間の表現や制御系の構成が課題として考えられる。

参考文献

- 1) Tsuneo Yoshikawa and Akio Sudou. "Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators—On-Line Estimation of Unknown Constraint". *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, Vol. 9, No. 2, pp. 220–226, 1993.
- 2) K. Hosoda and M. Asada. "Versatile Visual Servoing without Knowledge of True Jacobian". In *Proc. of IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems 1994 (IROS '94)*, pp. 186–193, 1994.
- 3) Bradley J. Nelson, J. Daniel Morrow, and Pradeep K. Khosla. "Improved Force Control Through Visual Servoing". In *American Control Conference*, Seattle, Washington, June 21-23 1995.
- 4) 吉川恒夫. 「ロボット制御基礎論」. コロナ社, 1988.
- 5) J. Duffy. "The Fallacy of Modern Hybrid Control Theory that is based on "Orthogonal Complements" of Twist and Wrench Space". *Journal of Robotic Systems*, Vol. 7, No. 2, pp. 139–144, 1990. Editorial.
- 6) 杉本浩一. "位置と力のハイブリッド制御に関する理論的考察". *日本ロボット学会誌*, Vol. 11, No. 3, pp. 453–460, 1993.