

学術論文

3次元再構成を行わない視覚サーボ系のための 障害物回避軌道の生成

細田 耕^{*1} 阪本 健二^{*2} 浅田 稔^{*1}

Trajectory Generation for Obstacle Avoidance of Uncalibrated Stereo Visual Servoing without 3D Reconstruction

Koh HOSODA^{*1}, Kenji SAKAMOTO^{*2} and Minoru ASADA^{*1}

In this paper, a trajectory generator for a visual servoing system with two cameras is proposed to make the system accomplish obstacle avoidance tasks in unknown environments. Using the estimated epipolar constraint between two cameras, the proposed scheme can generate trajectories for the visual servoing system on the 2D image planes by a simple obstacle avoidance method without reconstructing 3D geometry. The proposed scheme is based on the idea, "as long as one of projected trajectories does not intersect with projected obstacles, the trajectory in 3D space can avoid the obstacles." An experimental result is shown to demonstrate the validity of a combination of the proposed trajectory generator and the visual servoing control scheme.

Key Words: Visual servoing, epipolar constraint, no 3D reconstruction, obstacle avoidance

1. はじめに

未知あるいは動的に変化する環境内でロボットが与えられたタスクを実行するときに、環境の状態を観測したり、そのタスクの成否を観測したりするために視覚センサの果たす役割は大きい。視覚センサから得られた情報をもとにロボットを制御するにあたって、さまざまなロボットに種々の作業をさせるためには、得られた視覚情報を3次元再構成し、より抽象的なデータとするのが都合が良い。従来の視覚に関する研究はこのような観点に基づき、視覚情報処理をロボットの制御と独立に扱い、その精度を上げることに専念して来た。しかしながら実際には、ロボット自身の行動と必要な視覚情報処理の間には密接な関係があり[1]、キャリブレーションやセンサ配置問題など、各々単独では装置や時間のコストがかかってしまう問題を、この関係を利用することにより簡単に解くことができることがわかってきた。

一方、視覚を持つロボットに作業をさせる場合の制御則として、視覚情報を直接ロボットの制御ループに組み込む視覚サーボ系が注目を集めている[2][3]。視覚サーボ系を用いることにより、キャリブレーション誤差や外乱に強いロボットシステムを構成することができる。視覚サーボ系の研究において、前述

のようにセンサから得られる情報から環境の3次元情報を再構成し、これをサーボ系に利用する方法([4]など)も提案されているが、特に制御ループに直接視覚情報をフィードバックしてサーボ系の応答速度を上げることが目的のひとつであるので、このような再構成を極力排除するのが望ましいと考えられる。しかしながら、画像平面上のセンサ情報を直接フィードバックする視覚サーボ系においては、環境の3次元再構成をしないために、センサによりとらえられる画像特徴量を目標値に収束させるといった単純なサーボ系の動作によって与えられた作業を遂行しなければならない。そのため、画像特徴量の目標値を与えられた作業に応じてどのように生成するかが大きな問題となる。従来の研究[5]~[8]では、目標画像特徴量は固定で視覚サーボ系自体の性能を議論するものがほとんどで、目標画像特徴量軌道を計画することにより作業を遂行する方法の提案が重要であるのにも関わらず、これについて論じているものはほとんど無かった。筆者らの知る限り、Hager[9][10]が線分で記述されるような環境下で、ステレオカメラ間に存在するエピポーラ拘束を利用して、フロッピーディスクを差す軌道を生成し、動作を視覚サーボ系で実現する手法を示しているのみである。

本報告では、視覚を持つロボットの作業として、マニピュレータの障害物回避を想定し、視覚情報から障害物の3次元再構成をせずに、障害物回避作業を遂行するための軌道生成について述べる。ロボットが、視覚として相対的位置姿勢の固定された2台のカメラを持つものとする、そのカメラの画像間には幾何学的拘束(エピポーラ拘束)が存在することが知られている[11]。この拘束を利用し、2台のカメラの画像上で、障害物

原稿受付 1996年2月8日

^{*1}大阪大学工学部

^{*2}大阪大学工学部、現在松下電工株式会社に勤務

^{*1}Osaka University

^{*2}Osaka University, currently with Matsushita Electric Works, Ltd.

の像に同時に干渉していない軌道は、実際の空間においても障害物と干渉していない」という十分条件に基づく、3次元空間内の障害物回避問題は、2次元平面内の問題に帰着されることがわかる。この問題に対し、適当な2次元の障害物回避アルゴリズムを用いることにより障害物回避軌道を生成できることを示す。提案する方法は、障害物が画像上で背景から抽出されているような環境下であれば、カメラ間での対応がなくても適用可能であり、より適用範囲が広いと考えられる。最後に提案する手法を用いて生成した軌道をロボットシステムに適用することにより、その有効性を検証する。

2. 3次元障害物回避問題の2次元問題への帰着

2.1 障害物回避作業

本論文で視覚を持ったロボットに与えられる作業は、手先の始点位置、終点位置が与えられた時に、障害物を回避しながら始点から終点に移動することである (Fig.1)。ここではロボットは2台のカメラを持つと想定しているが、以下の議論は3台以上のカメラを持つ場合にも適用可能である。

画像処理、カメラおよび与えられる作業について以下の仮定をおく。

- (1) 画像上の障害物の領域は、適当な画像処理方法により背景から抽出されている。
- (2) 2台のカメラの相対的な位置、姿勢は固定されている。
- (3) 2台のカメラの画像平面上で障害物の像に同時に干渉しない点として、始点、および終点が与えられる。

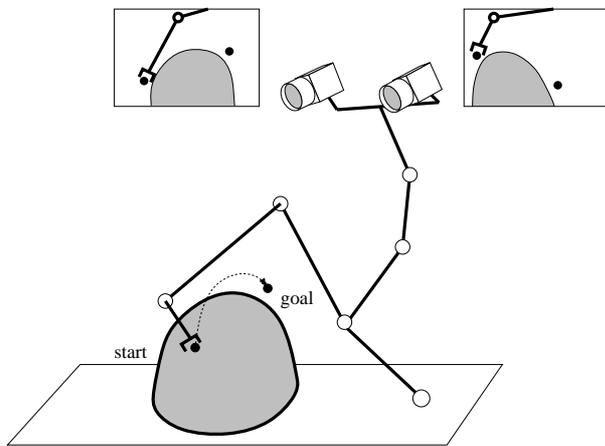


Fig. 1 Obstacle avoidance using visual servoing

2.2 エピポーラ拘束 [11]

複数のカメラ間の相対的な位置、姿勢が固定されている時には、その画像間にはエピポーラ拘束と呼ばれる幾何学的拘束が存在する [11]。 $p_1 = [x_1 \ y_1 \ 1]^T$ 、 $p_2 = [x_2 \ y_2 \ 1]^T$ をそれぞれ、カメラ1、カメラ2における特徴点の同次ベクトルとすると、エピポーラ拘束は

$$p_1^T E p_2 = 0 \tag{1}$$

と与えられる。ここで、行列 $E \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は、2台のカメラの相対的な位置、姿勢、およびカメラパラメータの関数であり、相対

的位置、姿勢が変化しない場合、定数行列となる。この拘束は一方の画像平面上でのある点は、他方の画像平面上ではある直線 (エピポーラ線) 上に対応する像があることを表している。

2台のカメラ間で対応のついた最低8点が与えられれば、行列 E を同定することができる。ロボットがマニピュレータを持つ場合、その先端が画像内で教示されれば、マニピュレータを動作させることにより、このような点を観測することは容易である。

2.3 画像平面内の障害物回避への帰着

従来の方法を用いて視覚サーボ系に障害物回避作業を実現させるには、カメラ間の障害物の像の対応から3次元の形状を再構成し、これに基づいて作業座標系で目標軌道を計画し、これを画像平面に投影して視覚サーボ系に対する目標値を生成する方法が一般的であると考えられる。このような方法をとるには、ロボットや環境に対する詳しい知識を必要とし、それゆえモデル化誤差や外乱に対するロバスト性に欠ける。

画像平面上のセンサ情報を直接フィードバックする視覚サーボ系においては、環境の3次元再構成をしないために、センサによりとらえられる画像特徴量を目標値に収束させるというサーボ系の動作によって、与えられた作業を遂行しなければならない。そのためには3次元空間内の障害物回避問題を画像平面内の障害物回避問題に帰着しなければならない。2台のカメラの画像上で、障害物の像に同時に干渉していない軌道は、実際の空間においても障害物と干渉していない」という十分条件を用いると、3次元の障害物回避は、画像平面内でエピポーラ拘束を考慮した障害物回避であると考えられる (Fig.2)。2次元平面内の障害物回避については、従来提案されているさまざまなアルゴリズム ([12] [13] など) を適用できると考えられる。

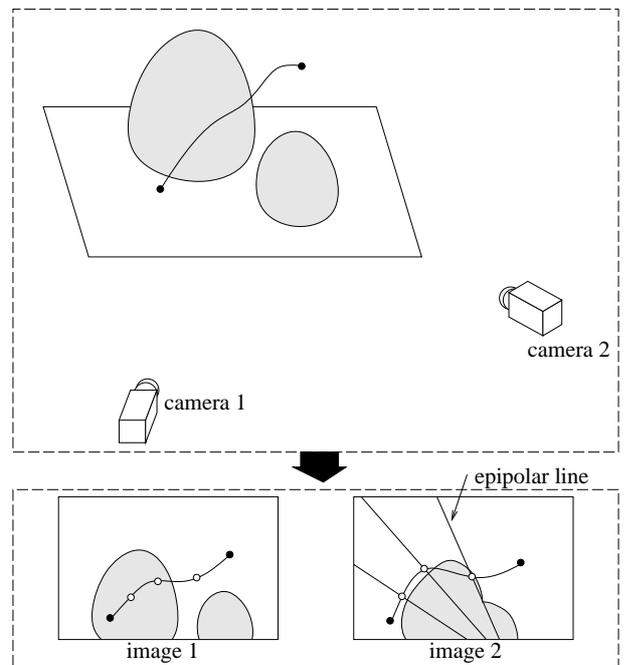


Fig. 2 3D obstacle avoidance is converted into constraint 2D avoidance

提案する帰着法は、障害物が何らかの形で背景から抽出されており、エピソード拘束行列 E が同定されていれば適用可能である。障害物は、例えば背景から二値化などの単純な画像処理で抽出できれば良く、カメラ間の画像の対応を必要としないので、カメラの内部(焦点距離、像中心、アスペクト比など)、及び外部(2台のカメラ間の相対的位置、姿勢)パラメータをあらかじめ校正する必要がない。また2台のカメラの画像間で、領域などの特徴に対応がついている必要はないことに注意されたい。このため、例えば筆者らが提案している適応機構を持つ視覚サーボ系 [14] などの併用により、環境に対する詳しい知識をほとんど使わないで障害物回避作業を遂行できる。

2.4 障害物回避軌道の生成

エピソード拘束を考慮に入れた、2次元平面内での障害物回避に対しては、例えば、従来提案されている2次元平面内の移動ロボットの障害物回避アルゴリズムなどを応用することにより容易に導くことができる。ここでは、軌道生成法の一例として、簡単な手法を示す (Fig.3)。

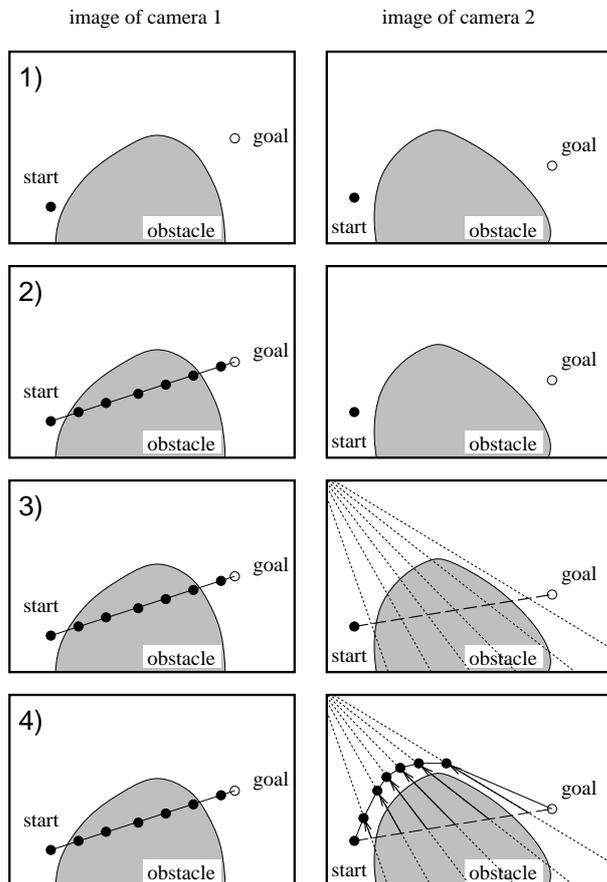


Fig. 3 Trajectory generation algorithm to avoid obstacles

- (1) 仮定(1)より、障害物の領域は何らかの画像処理法によって背景より抽出されている。
- (2) 画像1での目標軌道を、始点と終点を結んだ直線とする。この直線を十分に細かい間隔で分割する。

- (3) 同定されているエピソード拘束を用いて、分割されたそれぞれの区分点に対応するエピソード線を画像2上で求める。
- (4) エピソード線上を走査し、障害物と干渉しない点を画像2上での目標軌道とする。

3. 障害物回避タスクの実験実験

本章では、提案する手法と、2.4節で示した簡単な軌道生成アルゴリズムを用いて障害物回避軌道が生成されることを実験的に示し、さらにこの軌道を適応機構を持つ視覚サーボ系 [14] に与えることによって、障害物回避作業が実現できることを実験的に検証する。

3.1 適応機構を持つ視覚サーボ系

本報告で実験に適用された適応機構を持つ視覚サーボ系と、本報告で提案する障害物回避軌道生成法を組み合わせたシステムを Fig.4 に示す。この視覚サーボ系は、現在の画像特徴量とこれらに対して与えられた目標軌道とからフィードバック/フィードフォワード項を持つ制御入力を計算する部分と、ロボットの挙動を観測し、ロボットのパラメータを推定する推定器からなる。パラメータ推定器は、ロボットに対する入力と、出力としての画像特徴量を観測し、最小二乗推定に類似した手法を用いることによってパラメータを推定するものである。また、視覚サーボの制御部は画像特徴量を目標値に収束させるためのフィードバック項だけでなく、あらかじめ計算された目標値の時系列をよりよく追従するためのフィードフォワード項を持っている。この視覚サーボ系は

- ロボット、環境に対する先験的な知識を必要としない、
- 適用できるロボットについて、カメラの台数などの構造的な制約がない、
- パラメータ推定器はロボットの真のパラメータを推定するのではなく、目標値追従に必要なパラメータを推定する、
- フィードバック項のみの視覚サーボ系に比べてより性能のよい軌道制御が実現可能である。

などの特徴を持つ。

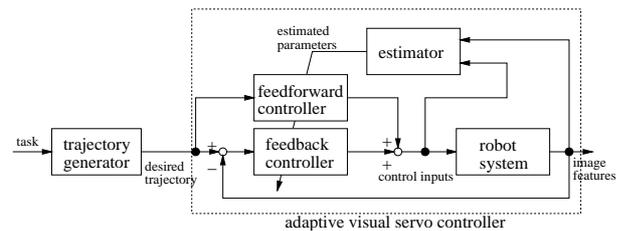


Fig. 4 Proposed trajectory generator and adaptive visual servo controller

3.2 実験システムの構成

Fig.5 に実験に用いたロボットの概観を示す。ロボットは1台のマニピュレータと、地面に固定された2台のカメラから構成される。マニピュレータとして、川崎重工製6自由度ロボット Js-5 を、またカメラとして、エルモ社製カラー CCD カメラ UN401(焦点距離 11[mm]) を2台用いている。Fig.6 に実験システムの全容を示す。カメラで取り込まれた画像は DataCube



Fig. 5 Camera-manipulator system used for experiments

社製画像パイプラインプロセッサ MV200 に送られる。カメラから取り込まれる画像サイズは 512×480 [pixel] であるが、これを水平方向に $1/2$ に縮小し、一枚あたり 256×480 [pixel] の画像として、2枚の画像を1つの画像に合成したものをこのプロセッサの出力としている。またこの画像プロセッサでは、障害物を背景から抽出するための二値化操作も行われる。プロセッサ MV200 から出力された画像は、富士通製トラッキングモジュールに送られる。この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相関がもっとも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 [15]。トラッキングモジュールにより得られた座標はホストコンピュータボード MVME167 (CPU:68040, 33MHz, motorola) に送られ、これをもとに川崎重工製 6 自由度マニピュレータ Js-5 に対する出力が計算される。計算された出力は VME-VME バスアダプタを通して、マニピュレータの専用コントローラに送られる。マニピュレータは専用コントローラによって位置制御されている。本実験では姿勢は固定し、手先位置 3 自由度をマニピュレータが持っている自由度としている。この実験システムを用い、適応機構を持つ視覚サーボプログラムを VxWorks 上の C 言語で記述したところ、サンプリング時間は 33[ms] となった。

3.3 実験結果

3.3.1 エピポーラ拘束の推定結果

画像上でマニピュレータの手先を教示し、マニピュレータを適当に動かすことによって、2枚の画像上で対応する 8 点を観測し、これらの座標を用いて、エピポーラ拘束行列 E を推定した。実験により得られた 8 点の画像特徴量ベクトルを Table 1 に示す。これらの値より推定されたエピポーラ拘束行列 E は、

$$E = \begin{bmatrix} -5.2 \times 10^{-5} & 1.0 \times 10^{-5} & -1.1 \times 10^{-2} \\ 1.2 \times 10^{-4} & 2.5 \times 10^{-5} & 4.1 \times 10^{-2} \\ 5.8 \times 10^{-3} & -3.3 \times 10^{-2} & 1.0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

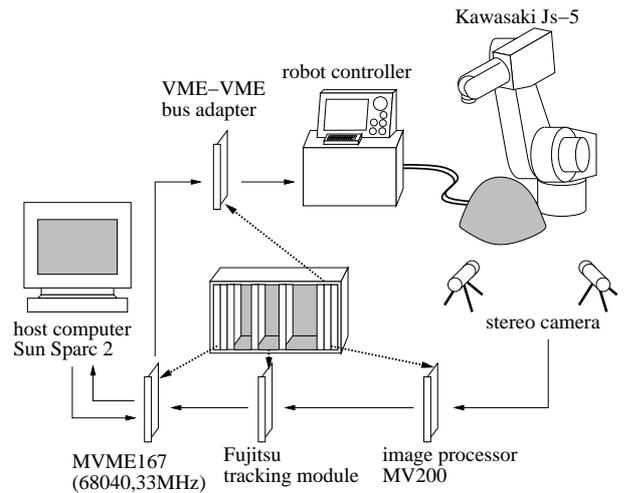


Fig. 6 Experimental equipment

Table 1 Feature points to estimate epipolar constraint

$[x_1, y_1, x_2, y_2]$
[170, 168, 185, 162]
[126, 134, 157, 142]
[96, 100, 128, 122]
[95, 111, 96, 141]
[96, 126, 68, 160]
[41, 181, 46, 220]
[68, 277, 33, 297]
[106, 389, 273, 391]

となる。

3.3.2 障害物回避のための軌道生成

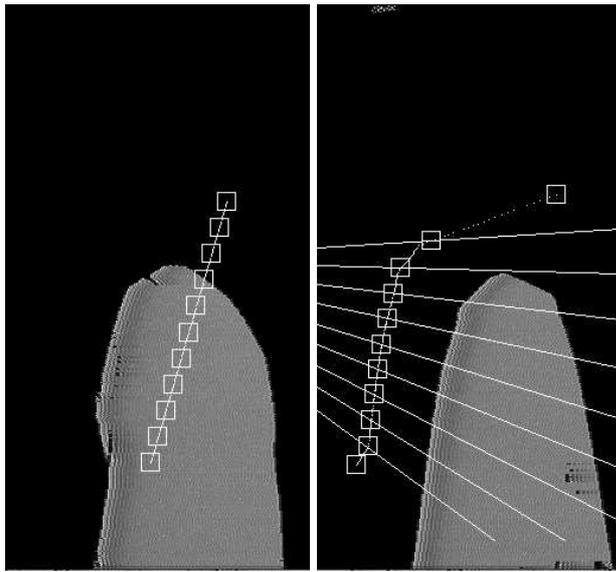
本実験では、障害物の領域は白黒濃淡画像に対する二値化操作により背景より抽出された。得られた障害物領域に対し、提案する手法を用いて、Fig.7に示すような障害物回避軌道を生成することができた。マニピュレータには、図中の軌道に沿って 33[s] で障害物回避をする時間軌道を与えた。

3.3.3 適応機構を持つ視覚サーボ系を適用した実験結果

生成された障害物回避軌道を適応機構を持つ視覚サーボ系に与えることによって、障害物回避を実現する。障害物回避作業を実現する前の状態と、実現後の状態を Fig.8, Fig.9に示す。視覚サーボ系によって制御されている間、マニピュレータの先端が障害物と干渉しないことを実験により確認した。

Fig.10, Fig.11に、画像平面上で視覚サーボ系に与えられた目標軌道と、実際にマニピュレータの手先が動いた軌道との誤差ノルムを示す。制御の初期では、視覚サーボ系はロボットのパラメータを十分に推定できないため、与えられた軌道に追従できないが、10秒経過後あたりより軌道に追従していることが分かる。

本実験では、目標軌道を画像平面 1 上で等速になるように与えている。本論文で提案している軌道計画法は、環境に対する知識を持たないため、この結果生成される 3次元空間内で実現される速度については、これを予想することはできない。この様な理由で、 $t = 33.0[s]$ で、追従誤差が大きくなっているもの



(a) frame 1

(b) frame 2

Fig. 7 Generated desired trajectories on the image planes

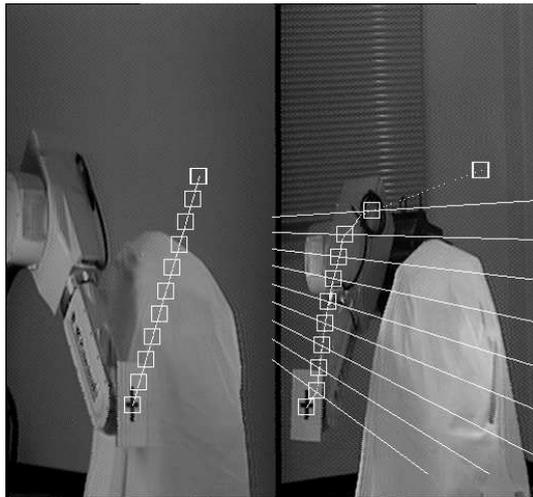


Fig. 8 Start posture of the manipulator

と考えられる。

これらの実験結果より、提案する障害物回避軌道生成器と適応機構を持つ視覚サーボ系の組合せにより、環境に対する知識をほとんど使わなくても、障害物回避作業を実現できることがわかった。

4. おわりに

本論文では、視覚サーボ系を用いて、環境の3次元情報を再構成せずに、3次元空間内の障害物回避を画像平面内の障害物回避問題に帰着する手法について述べた。そして、簡単な障害物回避アルゴリズムを用いて、障害物回避軌道が生成されることを実験的に確認し、適応機構を持つ視覚サーボ系にこの軌道を与えることによって、障害物回避作業が遂行されることを実

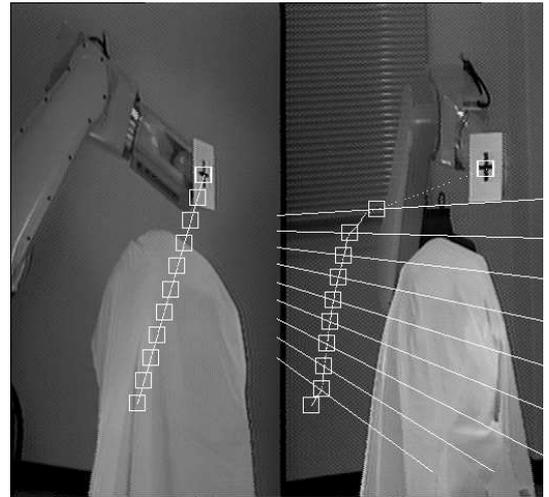


Fig. 9 Goal posture of the manipulator

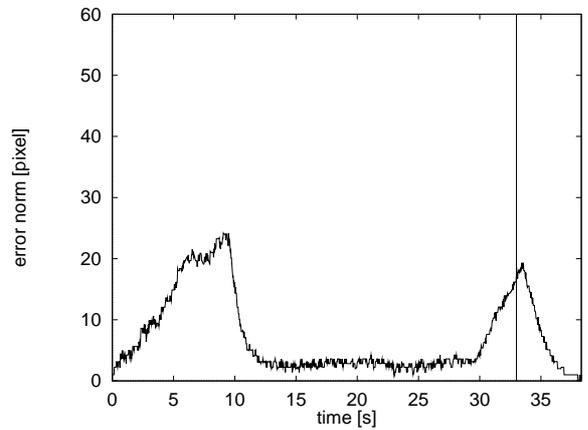


Fig. 10 Error norm on image plane 1

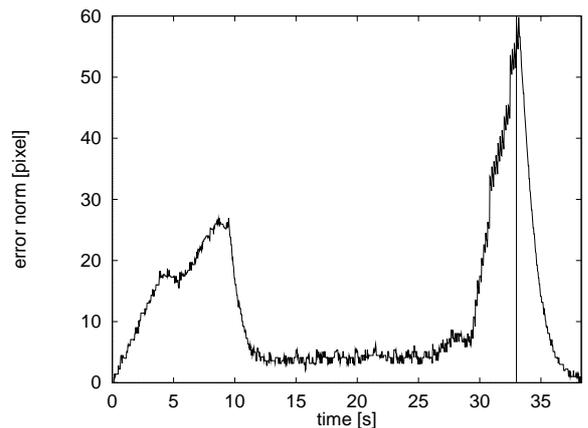


Fig. 11 Error norm on image plane 2

験により示した。提案した方法は画像上の障害物領域の認識、エピソード拘束の他に、環境に対する知識を必要としないため、適応機構を持つ視覚サーボ系との組合せにより、環境に対する事前知識をほとんど使わずに、与えられた障害物回避作業を遂行できる。したがって、ロボットシステムと環境に対するキャ

リブレーションをほとんど必要としない。

仮定(3)が満たされるためには、カメラ間の相対的距離が、障害物に対してある程度なければならない。この仮定が成立しない場合には、さらに障害物を細かい領域に分割するなどの手法を考慮する必要がある [16]。

本論文では、ロボットマニピュレータ先端の障害物回避のみを取り扱っている。本手法をロボットマニピュレータ全体の障害物回避に適用するためには、ロボットマニピュレータの腕部にいくつか画像特徴量を設定し、それら全てについて、同様の障害物回避をすればよいと考えられる。そのためには、さらにこれらの画像特徴量の間を拘束を考慮した障害物回避アルゴリズムと、視覚サーボ系を考える必要があり、このような方法が今後の課題であると考えられる。

本論文では、障害物回避作業を視覚サーボ系の目標軌道を設計することにより実現しているが、他の種々の作業に関してもこのような目標軌道設計により遂行可能なものがあると考えられ、これらの方策の提案が望まれる。

参 考 文 献

- [1] Y. Aloimonos. Introduction: Active Vision Revisited. In Y. Aloimonos, editor, *Active Perception*, chapter 0. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1993.
- [2] P. I. Corke. Visual Control of Robot Manipulators – A Review. In *Visual Servoing*, pp. 1–31. World Scientific, 1993.
- [3] 橋本. 視覚フィードバック制御-静から動へ. システム/制御/情報, Vol. 38, No. 12, pp. 659–665, 1994.
- [4] P. Allen, A. Timcenko, B. Yoshimi, and P. Michelman. Automated Tracking and Grasping of a Moving Object with a Robotic Hand-Eye System. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. RA-9, No. 2, pp. 152–165, 1993.
- [5] 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.
- [6] B. Nelson, N. P. Papanikolopoulos, and P. K. Khosla. Visual Servoing for Robotic Assembly. In *Visual Servoing*, pp. 139–164. World Scientific, 1993.
- [7] 加瀬, 丸, 西川, 宮崎. ステレオ視によるマニピュレータのビジュアルサーボ. システム制御情報学会論文誌, Vol. 6, No. 8, pp. 360–367, 1993.
- [8] 橋本, 木村. ビジュアルサーボインテグ-非線形オブザーバアプローチ-. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 7, pp. 92–99, 1995.
- [9] G. D. Hager. Real-Time Feature Tracking and Projective Invariance as a Basis for Hand-Eye Coordination. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 533–539, 1994.
- [10] G. D. Hager, W.-C. Cang, and A. S. Morse. Robot Feedback Control Based on Stereo Vision: Towards Calibration-Free Hand-Eye Coordination. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2850–2856, 1994.
- [11] H. C. Longuet-Higgins. A computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections. *Nature*, Vol. 293, pp. 133–135, 1981.
- [12] O. Khatib. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. *The Int. J. of Robotic Research*, Vol. 5, No. 1, pp. 90–98, 1986.
- [13] H. Noborio. A Path-Planning Algorithm for Generation of an Intuitively Reasonable Path in an Uncertain 2D Workspace. In *Proc. of the 1990 JAPAN-USA Symposium on Flexible Automation*, pp. 477–480, 1992.

- [14] 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, 1996. (掲載予定).
- [15] 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.
- [16] 細田, 浅田. 複数画像情報を用いた障害物回避行動の実現. 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 625–626, 1995.

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)

阪本 健二 (Kenji Sakamoto)

1969年7月14日生. 1995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. 同年松下電工株式会社に入社, 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 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)