

2台のカメラを用いたマニピュレータの 平面障害物回避軌道の生成

城井壮一郎 細田耕 浅田稔
key@robotics.ccm.eng.osaka-u.ac.jp
大阪大学 工学部 電子制御機械工学科
〒 565 大阪府吹田市山田丘 2-1

本論文では、キャリブレーションされていない視覚・マニピュレーター系に対して、平面障害物が与えられた場合について、その障害物回避軌道を、2台のカメラの配置と平面との間に存在する幾何学的関係を用いて生成する手法について述べる。この手法においては、左右の画像の同一平面上の対応点を与えることによって、障害物形状や手先位置を3次元再構成することなしに、障害平面と手先との相対関係を得ることにより、障害物回避軌道を生成する。生成された障害物回避軌道は、汎用ビジュアルサーボ系に与えられ、これによって環境やシステムの先験的な知識なしに、視覚・マニピュレータ系の平面障害物に対する障害物回避が実現できることを実験により検証する。

Trajectory Generation for Plane Obstacle Avoidance of Vision-Guided Manipulators

Soichiro Kii , Koh Hosoda and Minoru Asada

Dept.of Mech.Eng.for Computer-Controlled Machinery, Osaka University.
2-1,Yamadaoka,Suita,Osaka 565,Japan

This paper describes a method to generate trajectory for plane obstacle avoidance utilizing uncalibrated visual servoing system. the property of projective geometry, the relation between a plane and a point at 3D space is estimated, and the proposed scheme can generate desired trajectory for the visual servoing system in 2D image without reconstructing 3D geometry. Simulation and Experimental results are shown to demonstrate the effectiveness of the trajectory generator.

1 はじめに

近年，ロボットシステムにおいて，複数のカメラとマニピュレータを合わせた視覚・マニピュレータ系が，多く研究されている．なかでも，画像特徴量を制御系の中に組み込んだ視覚サーボ系に関する研究が盛んに行われている．従来の視覚サーボ系は，あらかじめカメラとマニピュレータの構造に関する知識を持ち，それらに関する多数のパラメータをキャリブレーションする必要があった．それゆえ，カメラキャリブレーションやハンド・アイキャリブレーションなどを行う手法も多く提案されているが，キャリブレーションを行うことは，環境の変化によって生じるパラメータ変動や同定誤差に対しシステムがロバストでなくなる等の問題点が考えられる．そこで，キャリブレーション誤差に影響を受けない視覚サーボ系の研究が必要となってきた．

細田らは，システムの構造やパラメータに関する先験的な知識を持たない場合に，それらをオンラインで推定する汎用ビジュアルサーボ系の構成法を提案した [1]．この手法を用いる場合，3次元再構成しないため，3次元空間内で物理的に実現可能な目標値を，いかにして生成するかが問題となってくる．

実際に視覚・マニピュレータ系において，3次元空間内で与えられたタスクを行う際に重要であるのは，絶対的な位置情報ではなく対象物と環境とマニピュレータの相対的な位置情報であることが多く，相対的な位置情報は，キャリブレーションされていないシステムにおいても，複数のカメラが存在すれば，その画像情報から決定できる．

細田らは，相対的に固定された2台のカメラを用い，いくつかの対応点からカメラ間に存在する幾何学的拘束を推定し，障害物の情報として，輪郭のみを与え，画像情報のみからマニピュレータの障害物回避軌道を生成するアルゴリズムを提案した [2]．しかし，この方法ではマニピュレータ，カメラ，障害物の状態によっては回避軌道が生成できない場合があった．

Hagerらは，平行な直線エッジの消失点を利用して，フロッピーディスクをディスクドライブに差し込む事を提案した．この方法では平行な直線エッジので構成された環境内に限定されている [3]．

そこで，障害物の情報として，平面から構成されているということと，同一平面セグメントの領域とい

くつかの対応点が与えられた場合について考察する．

運動するカメラ系に対して，物体面が平面のとき，運動前と運動後との2枚の画像の平面上の4組の点の対応から変換行列を推定し，これを用いて面の勾配と，カメラの回転，並進を得ることができる．[4] この原理を用いると2台のカメラを用いたとき，平面の3次元再構成ができ，平面障害物の回避軌道は生成できる．

それに対して本稿では，2台のカメラを用いて，環境の3次元再構成をせずに平面障害物の回避軌道を生成する手法を提案する．この手法では，障害物とマニピュレータの相対的な奥行きを判断し，3次元に対応のついた画像上での障害物回避軌道を，画像情報のみから生成する．そして，生成された障害物回避軌道を，細田らの提案する汎用ビジュアルサーボ系に与え，システムの構造やパラメータに関する先験的な知識なしでも，障害物回避行動が実現できることを，実験によって検証する．

2 汎用視覚サーボ系 [1]

2.1 ビジュアルサーボにおける画像特徴量と関節変位の関係の推定

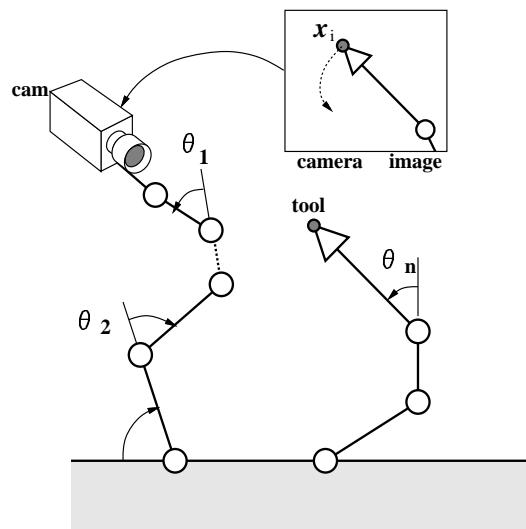


Fig. 1 Visual Servo System

Fig.1に示されるように，カメラとマニピュレータを持つシステムを考える．アームの手先あるいは3次元上に固定された対象を，画像上の目標値に収束

させるものである．カメラから手先までの関節変位は観測でき，これを関節変位ベクトル θ とする．対象の画像上での特徴量を，画像特徴量ベクトル x とすると

$$x = x(\theta) \quad (1)$$

と書くことができる．式(1)を微分することにより，速度間の関係式

$$\dot{x} = J(\theta)\dot{\theta} \quad (2)$$

を得る．ここで， $J(\theta)$ は画像特徴量速度と関節角速度間を記述するヤコビ行列であり，カメラとマニピュレータの構造やそれらに関するパラメータ，カメラ・アーム間の位置・姿勢変換行列などを含んでいる．式(2)をみたすような $J(\theta)$ をオンライン推定する．

2.2 ヤコビ行列の推定法

式(2)における，ヤコビ行列 J をオンラインで推定する手法として

$$\hat{J}(t) - \hat{J}(t-\Delta t) = \frac{\{\Delta x(t) - \hat{J}(t-\Delta t)\Delta\theta(t)\}^T W(t)}{\rho + \Delta\theta(t)^T W(t)\Delta\theta} \quad (3)$$

なる推定則を用いる．ここで， $W(t)$ は各要素間の重み行列， $\rho(0 \leq \rho \leq 1)$ は忘却係数である．忘却係数 ρ が 0 に近い時には，推定値は現在の観測データに敏感になり，逆に ρ が 1 に近い場合には鈍感で安定になる．

2.3 ビジュアルサーボ系の構成

式(3)によって推定されたヤコビ行列を用いて，画像特徴量を，与えられた 1 階微分可能な目標軌道 x_d に追従させるビジュアルサーボ系として，

$$\dot{\theta} = \hat{J}^+ \dot{x}_d + (I_n - \hat{J}^+ \hat{J})k - K\hat{J}^T(x - x_d) \quad (4)$$

を用いる．ここで， \hat{J}^+ は(2)式の J の推定値 \hat{J} の疑似逆行列で， I_n は $n \times n$ の単位行列， K は正定ゲイン行列， e は誤差ベクトルである．また， k は関節自由度が目標を実現するというタスクに対して冗長である時に，その冗長性を記述する任意のベクトルとなる．

この視覚サーボ系の特徴として次のことがいえる．

1. 入出力数の限定などのシステムに対する制約が無く，システムの構造と無関係に構成できる．このため，カメラの台数などに限定が無い．
2. ヤコビ行列は，システムの状態を観測できればシステムの構造やパラメータなどの先験的知識を必要とせず，面倒なキャリブレーションを必要としない．
3. 推定されたヤコビ行列は，必ずしも真のヤコビ行列ではないが，制御則と併せて画像特徴量の目標軌道への収束を保証する．

この視覚サーボ系を用いることにより，本報告で提案する平面障害物の回避軌道の生成法と併せて，三次元再構成せずにマニピュレータの平面障害物回避が実現できる．

3 2台のカメラの対応点の情報を用いた平面の表現

まず，固定された 2 台のカメラがあり，その相対位置が分からない場合，平面は画像上でどのように表現されるかを考察する (Fig.2 参照) ．

ここで，左右のカメラの画像平面上の座標をそれぞれ (x_l, y_l) ， (x_r, y_r) ，左右のカメラの同一焦点距離を f とする．右カメラ座標系 $\Sigma'(X', Y', Z')$ の左カメラ座標系 $\Sigma(X, Y, Z)$ に対する座標変換の回転 ${}^r R_l$ と並進 h を

$${}^r R_l = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

$$h^T = (h_x, h_y, h_z)$$

とする．

三次元空間上の点 $P(X, Y, Z)$ は，画像上で

$$\begin{bmatrix} x_l \\ y_l \end{bmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \frac{f}{Z'} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} \quad (6)$$

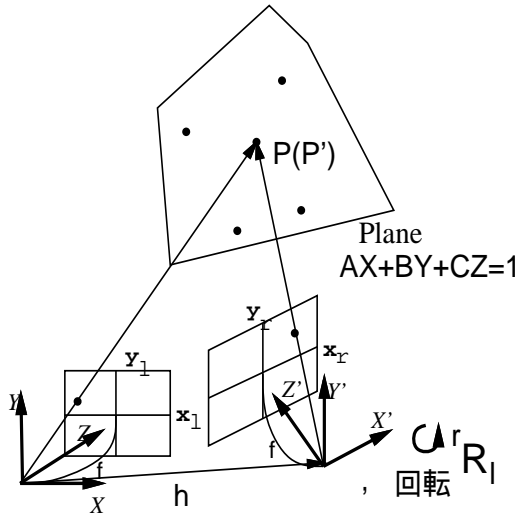


Fig. 2

に投影される． $P'(X', Y', Z')$ は同一点を左カメラ座標 $\Sigma(X, Y, Z)$ で表すと $P(X, Y, Z)$ で

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = {}^r R_l (P - h) \quad (7)$$

と表せるので右カメラの画像上では

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \frac{f}{r_z(P - h)} \begin{bmatrix} r_x(P - h) \\ r_y(P - h) \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる．ここで (5) より

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \frac{Z}{f} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \end{bmatrix}$$

ここで

$$p_l^T = \left(\frac{x_l}{f}, \frac{y_l}{f}, 1 \right)$$

とおけば, (8) より

$$x_r = \frac{f(Zr_x p_l - r_x h)}{Zr_z p_l - r_z h} \quad (9)$$

$$y_r = \frac{f(Zr_y p_l - r_y h)}{Zr_z p_l - r_z h} \quad (10)$$

となる．ゆえに Z についてとくと

$$Z = \frac{(x_r r_z - f r_x) h}{(x_r r_z - f r_x) p_l} \quad (11)$$

$$Z = \frac{(y_r r_z - f r_y) h}{(y_r r_z - f r_y) p_l} \quad (12)$$

となる．これより (X, Y, Z) 全てが (x_l, y_l, x_r) , または (x_l, y_l, y_r) で表されることとなる．

ここで, 3次元空間上に

$$AX + BY + CZ = 1$$

なる平面があるとすると, これは (x_l, y_l, x_r) で

$$a_1 x_l x_r + b_1 x_r + c_1 x_l + d_1 y_l + e_1 y_l x_r = 1 \quad (13)$$

または (x_l, y_l, y_r) で

$$a_2 x_l y_r + b_2 y_r + c_2 x_l + d_2 y_l + e_2 y_l y_r = 1 \quad (14)$$

のように表される．

ここで, $(a_1, b_1, c_1, d_1, e_1)$ および $(a_2, b_2, c_2, d_2, e_2)$ は N , ${}^r R_l$, h の各成分および f で表される係数で, カメラの相対位置が固定であれば一つの平面に対して一意に決定する．つまり画像上で, 対応のついた5組の (x_l, y_l) , (x_r, y_r) がわかれば平面上の左右の対応点が全てわかることになる．

4 平面との相対的奥行きの獲得

前章の式 (13) を利用して平面との奥行き関係を得る．例えば, Fig.3のようにカメラが左右に配置されていたとすると左画面の同一点は右画面ではエピポラ拘束によりエピポラ線上にある．平面を基準にすると平面上のある点 P と左画面で同一点上にある Q が三次元空間上で平面より手前にあるとすると右画面上では P より左側に映る．すなわち, 同じ (x_l, y_l) では, x_r が小さい程手前になることを示す．この様に式 (13) 式と画面上から観測される (x_l, y_l, x_r) のみから3次元再構成せずに平面との相対関係がわかる．

例のように, 「同じ (x_l, y_l) では, x_r が小さい程手前になる」という性質はカメラ配置によって成否が決まる．カメラ配置の判別式を求める．判別式はカメラの画角によって決まるが, 簡単のために画角が充分小さいとして考える．

基準とする平面が

$$AX + BY + CZ = 1$$

で $C > 0$ の場合を考える．この平面に対して右カメラが左カメラと同じ側にある場合, より手前側であ

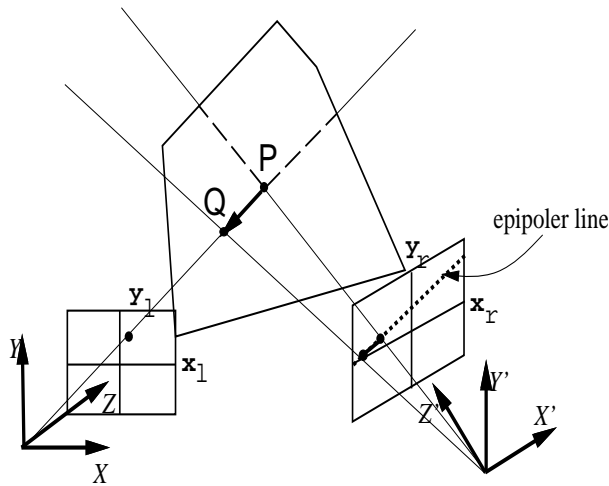


Fig. 3

る事は、平面を境界にした左カメラ座標の原点側の領域である事と同値である。左画像上の原点、つまり左カメラ座標系のZ軸は、右画像上(あるいはその延長平面上)で直線に射影される。ここで、右画像上のx座標 x_r は、Zの関数として表せる。

$$x_r(Z) = \frac{f(R_{11}h_x + R_{12}h_y + R_{13}(h_z - Z))}{R_{31}h_x + R_{32}h_y + R_{33}(h_z - Z)} \quad (15)$$

この関数が $Z = C$ 付近で増加していればよいから、判別式は下式ようになる。

$$\left. \frac{dx_r(Z)}{dZ} \right|_{Z=C} > 0 \quad (16)$$

画角が充分小さいとすると、判別式をみれば左右画像上の全ての点に対し「同じ (x_l, y_l) では、 x_r が小さい程手前になる」ということができる。

5 回避軌道生成のアルゴリズム

前章の幾何学的法則を利用して固定された2台のカメラを用いてマニピュレータが、多面体の1面との衝突を回避することを考える。Fig.4 参照。

Fig.4においてCameraL及びCameraRで面の頂点A,B,C,Dと手先の位置S及び目標位置Gが分かっている(見えている)とする。SからGに直線的に軌道を取るとQで面に衝突するような場合について考察する。まず、前準備として以下のことを行う。

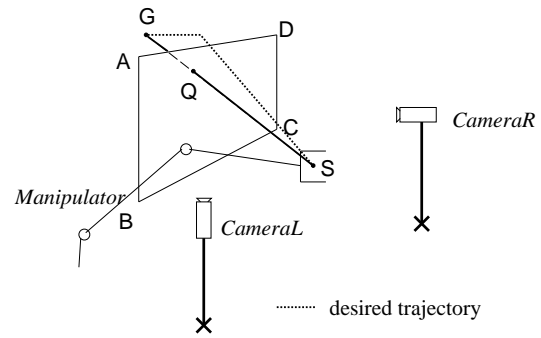


Fig. 4

- 平面である領域とそうでない領域を判別できるようにする。
- A,B,C,D が分かれば面は平面であるから、線分ACとBDの交点Eも簡単に計算できる。この5点から(13)式の a_1, b_1, c_1, d_1, e_1 が計算できる。

次に、Fig.5の手順で回避軌道を生成する。

1. SとGの座標値を得る。
2. 左画面のSからGを直線で結び、適当なステップ数で分割する。
3. (13)式から各ステップの (x_l, y_l) に対応する x_r が求まる。4章の性質を用い当たらない方向にマージンをとり x_r の目標値を与える。
4. 左画面で平面でない領域に入ったらG点まで x_r も残りのステップ数で等分割して目標値を与える。(図では、全ステップの x_r 目標値が示してある。)

以上のアルゴリズムで平面に対する回避軌道を生成する。多面体の場合、このアルゴリズムを全ての面について適用する。この様にして得られた目標値を画像特徴量ベクトルを (x_l, y_l, x_r) としてビジュアルサーボ系に与える。

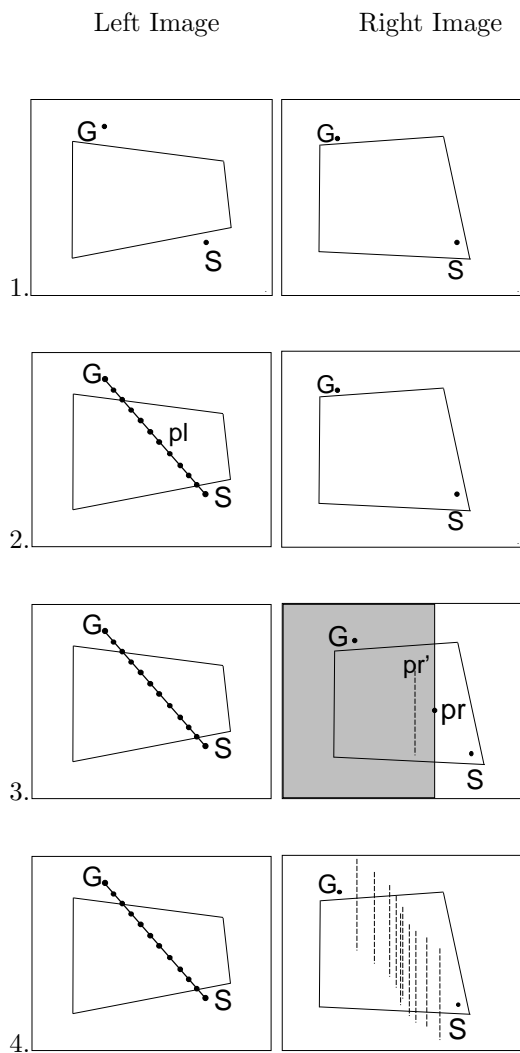


図5: Algorithm to avoid plane

6 シミュレーション

前章で提案した障害物回避の手法を、簡単なモデルを用いたシミュレーションによって検証した。障害物は直方体で、頂点の座標は

	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	0.0	1.0	11.0
2	3.0	2.0	14.0
3	0.5	2.25	14.75
4	-2.5	1.25	11.75
5	0.0	-2.0	12.0
6	-2.5	-1.75	12.75
7	3.0	-1.0	15.0
8			

始点と終点は

	X(m)	Y(m)	Z(m)
始点	-0.5	-1.2	9.0
終点	0.5	2.0	13.0

カメラの配置・方向は

	並進 (m)			回転 (rad)		
	c_x	c_y	c_z	ϕ	θ	ψ
左カメラ	0	0	0	0	0	0
右カメラ	1.6	-0.7	-0.4	$\frac{\pi}{12}$	$\frac{\pi}{24}$	0

とする。但し回転はロール・ピッチ・ヨー角で表してある。また焦点距離 $f=10(\text{mm})$ 、投影面の大きさは $5(\text{mm}) \times 5(\text{mm})$ とし、画像はピクセル化 (250×500) するものとする。カメラから観測される7点と始点および終点の画像上の座標は

	x_l	y_l	x_r	y_r
1	125	340	351	390
2	232	392	462	495
3	141	402	378	453
4	18	356	259	348
5	125	83	389	150
6	26	112	301	130
7	225	183	486	289
始点	97	116	338	176
終点	105	403	337	435

となる。前章のアルゴリズムを用いて、軌道を生成すると画像上の目標値は Fig.6 ようになる。Fig.7 は3次元空間での軌道の座標値である。

Fig.8で軌道が滑らかでないのは、ピクセル化したためと考えられる。

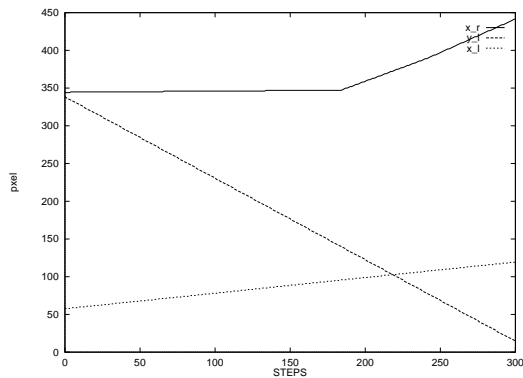


Fig. 6 Desired at image

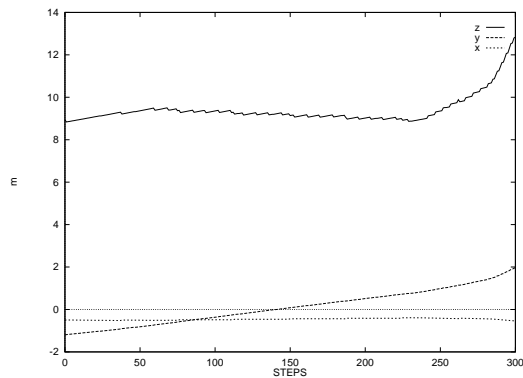


Fig. 7 Trajectory at 3D space

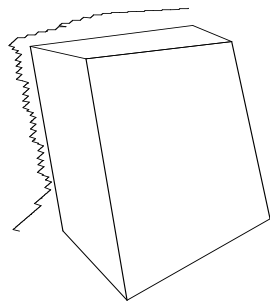


Fig. 8 Simulation result

7 実験

提案した手法について実験を行った。2台の固定されたカメラの画像から、障害物の箱の頂点を人間が与え、平面の式をえる。ロボットアームの手先はトラッキングモジュールにより追跡され、画像上の位置がホストコンピュータに送られる。実験結果をFig.9に示す。右画面の縦白線は x_r の目標値である。実験では、アームの太さを考慮して大きめにマージンをとった。

8 おわりに

平面に対する相対的奥行きを画像情報のみから得、平面から構成される障害物に対する回避軌道を生成した。生成軌道をキャリブレーションされていない視覚サーボ系に与え、3次元再構成せずに回避行動を実現した。

本報告では障害物を平面から構成される物体に限定したが、実空間では平面に対して作業することは少ない。今後は、様々な環境での物体との相対位置関係を獲得する手法などについて研究をすすめる予定である。

参考文献

- [1] 細田耕, 浅田稔. 実時間推定器を持つ視覚・運動系の反射的合目的行動の実現. ロボット学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 159-164, 1996.
- [2] 細田耕, 浅田稔. 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.
- [3] Gregory D. Hager. Real-Time Tracking and Projective Invariance as a Basis for Hand-eye Coordination. In *CVPR94*, Vol. 2, pp. 533-540, 1994.
- [4] 金谷健一. 画像理解 - 3次元認識の数理 -. 森北出版株式会社, 1990.



Fig. 9 Experimental result