

## 未校正カメラによる未校正ロボットの視覚サーボ

佐藤 岳晴<sup>†</sup>      佐藤 淳<sup>†</sup>

Visual Servoing from Uncalibrated Cameras for Uncalibrated Robots

Takeharu SATO<sup>†</sup> and Jun SATO<sup>†</sup>

あらまし カメラから得られる画像を用いてロボットの位置や姿勢を制御する視覚サーボでは、画像からいかに誘導に必要な情報を得るかがポイントとなる。従来の視覚サーボの研究は、カメラもロボットも校正済みであることを仮定して行われてきた。しかし、一般にカメラやロボットを正確に校正することは非常に難しい。そこで、カメラもロボットも未校正の状態での確に動作する視覚サーボの実現が望まれる。一方、近年のコンピュータビジョンの研究から、たとえカメラが未校正であっても、エビボラ幾何などの情報ならば得られることが明らかになってきた。本論文では、このようなエビボラ幾何に着目し、カメラもロボットも未校正である場合における視覚サーボの実現法を提案する。更に、実機による実験により本手法の有効性を示す。

キーワード 視覚サーボ, 未校正カメラ, 未校正ロボット, エビボラ幾何

### 1. ま え が き

カメラを搭載したロボットアームや移動ロボットに対し目標画像を与えることで、任意の位置、姿勢からその画像が得られる位置及び姿勢へ誘導することを視覚サーボと呼ぶ。視覚サーボは、様々な状況変化や外乱に対し安定な制御法として期待されている [1]。

従来の視覚サーボの研究では、カメラ及びロボットの制御は校正されたものとして行われてきた [2], [3]。これらの研究では、画像内の変化とカメラの運動との間の関係を相互行列を用いて線形に記述し、目標画像により近づくようロボットに対する制御量を逐次発生させるフィードバック制御がとられていた。一方、従来の視覚サーボでは回転成分と並進成分が相互干渉し最適な軌道とならないことから、エビボラ幾何を用いることにより回転と並進のサーボ量を分離し最適に制御する方法なども提案されている [4], [5]。

これらの研究ではカメラが校正済みであることを前提としているが、カメラの校正を正確に行うことは一般に非常に難しい。未校正カメラで視覚サーボを実現しようとした例として、ワールド座標に固定された未校正のステレオカメラを使い、射影復元を通してロボットを視覚サーボする方法などが提案されている [6]。

これら一連の研究では、カメラのみでなく、制御対象であるロボットも校正されていることを前提としている。すなわち、1 単位の並進や 1 単位の回転などの制御量をロボットに送ったとき、ロボット座標系においてどの方向にどれだけロボットが運動するかを既知としていた。しかし、実際のロボットは必ずしも理想的なロボット座標系に従って動くわけではなく、ある方向に並進するよう命令を送ったはずが、機械的な要因などにより実際には異なる方向に動いたり、1 単位で動く量が理論値と実際の値で異なっていたりする。この結果視覚サーボには無駄な動きが生じ、制御が収束するまでに時間がかかったり、最悪の場合制御が収束しないなどの問題がある。ロボットを厳密に校正することも実際には非常に大変なことなのである。したがって、カメラもロボットも基本的には完全に校正することは不可能と考える方が妥当である。

そこで本論文では、カメラ、ロボットともに未校正と考え、このような校正されていないカメラとロボットを使っていかに安定に視覚サーボを実現するかを示す。特に、近年明らかになってきた、複数画像に関する非ユークリッド幾何的性質 [7], [8] をもとに、未校正カメラから得られるエビボラ幾何 [9] から、未校正なロボットに対する制御量がいかに決定できるかを示す。本手法により、従来必要とされていたカメラやロボットの校正の手間や時間を省くことができ、また、

<sup>†</sup>名古屋工業大学電気情報工学科, 名古屋市  
Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

従来校正誤差により無駄な動きが生じていたフィードバック制御を効率良く安定に行うことが可能となる。

以下では、まず、本研究の主題を明らかにする。次に移動前後の画像でのエピポーラ幾何について述べ、カメラ、ロボットともに未校正であっても、エピポーラ幾何を用いることで視覚サーボが実現できることを示す。最後に実機を使った実験により提案手法の有効性を示す。

## 2. 未校正カメラと未校正ロボット

本研究では移動ロボットにカメラを固定し視覚サーボを行うことにする。図1に示すように、移動ロボットは平面上を運動し、並進1自由度と回転1自由度のみ行うことができるものとする。したがって、カメラの視点Cはある平面Π上を運動する。一般の移動ロボットは、このようなタイプのものがほとんどである。

今、ロボット座標系において $(X_R, Y_R, Z_R)$ の座標値をもつ空間中の点 $X_R$ がこのカメラの画像上で点 $m$ に投影されているとする。ここでコントローラからロボットにある制御量 $Y$ を送ってロボットを運動させる。このとき、ロボットに送った制御量 $Y$ とロボット座標系における点 $X_R$ の運動 $\dot{X}_R$ との関係を $Q$ 、ロボット座標系における運動 $\dot{X}_R$ とカメラ座標系における運動 $\dot{X}_C$ との関係を $M$ 、カメラ座標系における点の運動 $\dot{X}_C$ と画像内の変化 $\dot{x}$ の関係を $P$ 、画像内の変化 $\dot{x}$ と画像座標における変化 $\dot{m}$ の関

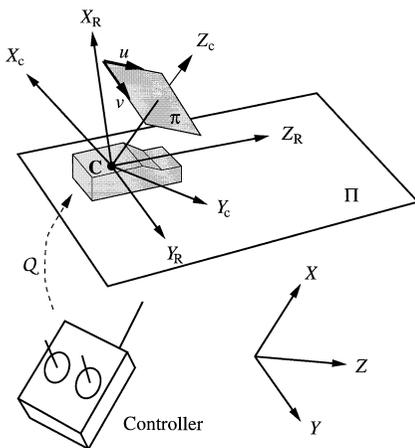


図1 未校正カメラと未校正ロボット

Fig.1 Uncalibrated cameras and uncalibrated robots.

係を $A$ とする。すなわち、

$$Y \xrightarrow{Q} \dot{X}_R \xrightarrow{M} \dot{X}_C \xrightarrow{P} \dot{x} \xrightarrow{A} \dot{m} \quad (1)$$

すると、視覚サーボを行う上で必要なものは、 $Y$ と $\dot{m}$ との間の関係である。もしも $Q, M, P, A$ の逆写像が求めれば、 $\dot{m}$ から目標画像を得るために必要な制御量 $Y$ を発生させることができる。

従来の視覚サーボはカメラもロボットも校正済みであることを前提としていた。すなわち、可逆な $Q, M, A$ がいずれも既知であるとして、このとき $P$ を相互行列の形で線形近似し、何らかの方法でこの $P$ を求めて $\dot{m}$ から $Y$ を計算するというものであった。しかし、実際には $Q, M, A$ を正確に知る(校正する)ことは非常に難しい。

本研究はカメラもロボットも未校正、すなわち $Q, M, P, A$ いずれも未知の状態、 $\dot{m}$ から $Y$ を決定しようというものである。

すなわち、移動ロボットに直進コマンドを送ると、どの方向にどれだけ直進し、回転コマンドを送ると、どの軸回りにどれだけ回転するのかわからない。カメラがこの移動ロボットにどのような姿勢で取り付けられているのかも未知なので、これらの制御コマンドとカメラ運動の関係も未知である。前もってわかっているのは、ある一定量のコマンドを送るとある一定量だけ運動するということだけである。ただし、ロボットの回転中心とカメラの回転中心は一致しているものと仮定する。

このような条件のもとで、目標位置における画像が1枚与えられたとき、任意の位置及び姿勢において得られる画像から、与えられた画像が得られる位置及び

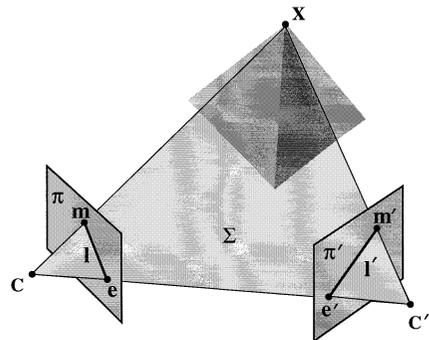


図2 エピポーラ幾何

Fig.2 Epipolar geometry.

姿勢に至るよう移動ロボットに対する制御量を発生させよ、というのが本研究の主題である。

ここで重要な役割を果たすのが、エピポーラ幾何である。次章では、図 2 に示すように、目標位置におけるカメラの視点を  $C'$ 、任意の位置におけるカメラの視点を  $C$  とし、この二つの視点間でのエピポーラ幾何を考える。

### 3. エピポーラ幾何と視覚サーボ

カメラを回転や並進によって移動させた場合、移動する前後の相対的なカメラの位置や姿勢の情報はエピポーラ幾何(図 2)によって記述することができる。

これまでの研究から、カメラが未校正であり、かつカメラの運動が未知である場合でも、移動前後の二つの画像間で 7 点以上の対応点がわかっているならば、エピポーラ幾何が計算できることが示された。

カメラが未校正、すなわちカメラの内部パラメータも外部パラメータもともに未知の場合でも、二つの画像座標  $m, m'$  間の関係は  $3 \times 3$  でランク 2 の Fundamental 行列  $F$  を用いて次のように表せる。

$$\tilde{m}^T F \tilde{m} = 0 \quad (2)$$

ここで  $(\tilde{\cdot})$  は齊次座標を表し、 $\tilde{m} = [m^T, 1]^T$ 、 $\tilde{m}' = [m'^T, 1]^T$  である。(2) はエピポーラ方程式と呼ばれる。 $F$  行列は 7 点以上の対応から非線形に [10]、また 8 点以上の対応から線形に計算できることが知られている [11], [12]。

視覚サーボを行うためには、ロボットが目標位置へ向かうために必要な並進及び回転の情報が必要となる。カメラが未校正である場合、このような情報は、エピポーラ幾何から得られるエピポール及びエピポーラホモグラフィによって表される [13]。

#### 3.1 並進に関する情報

視点  $C$  を  $C'$  に投影した像を  $e'$  とし、視点  $C'$  を  $C$  に投影した像を  $e$  とすると、 $e, e'$  はエピポールである。 $F$  行列が求まれば、それぞれの画像におけるエピポール  $e, e'$  は次式を解くことによって求まる。

$$F \tilde{e} = 0 \quad (3)$$

$$F^T \tilde{e}' = 0 \quad (4)$$

視覚サーボにおいては、 $e$  は現在の位置から見た目標位置を、また  $e'$  は目標位置から見た現在の位置をそれぞれ表している。しかし、エピポールはあくまでも画像に投影された目標位置あるいは現在位置であり、

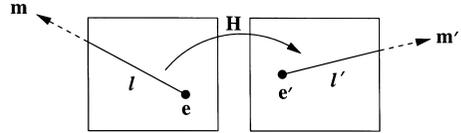


図 3 エピポーラホモグラフィ  
Fig. 3 Epipolar homography.

3次元空間における完全な情報、すなわち 3次元空間における XYZ 座標などの情報として扱うことはできない。

#### 3.2 回転に関する情報

一方、二つの画像上の無限遠点を  $m, m'$  とすると、 $m, m'$  は、

$$\tilde{m} = [u \ 1 \ 0]^T \quad (5)$$

$$\tilde{m}' = [u' \ 1 \ 0]^T \quad (6)$$

と表される。

このとき、それぞれの画像上のエピポーラ線を  $e$  と  $m$  及び  $e'$  と  $m'$  を通る直線であるとする、 $m$  と  $m'$  に対してもエピポーラ方程式 (2) が成り立つ。(5)、(6) を (2) に代入し、これを開くと、

$$f_{11}uu' + f_{12}u' + f_{21}u + f_{22} = 0 \quad (7)$$

となる。ここで、 $f_{ij}$  は  $F$  行列の  $i, j$  番目の要素を表す。(7) は行列を用いて表すと、

$$\begin{bmatrix} u' \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} -f_{21} & -f_{22} \\ f_{11} & f_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

となり、1次元の射影変換であることがわかる。ここで、 $\sim$  は定数倍の不定性を除いて等しいことを表す。

ここで式 (8) の右辺の行列を  $H$  と置くと、 $H$  は定数倍の不定性があるため、自由度は 3 である。このような自由度 3 の変換をエピポーラホモグラフィと呼ぶ。(8) より  $H$  の要素は  $F$  の左上の  $2 \times 2$  行列  $F_{2 \times 2}$  の各要素からなっていることがわかる。図 3 に示すように、エピポーラホモグラフィは二つの画像間のエピポーラ線の間を表現するものであり、これは二つのカメラ間の相対的な姿勢(回転)に関する情報を含んでいる。例えば、内部パラメータの等しい二つのカメラの姿勢が同じであるとき、 $H$  は単位行列となる [13]。しかし、エピポーラホモグラフィも画像に投影された回転でしかないため、完全な 3次元情報、すなわち 3次元空間における回転角などの情報として扱うことはできない。

#### 4. 未校正カメラによる視覚サーボ

エピポール及びエピポーラホモグラフィが求められると、視覚サーボで有用な目標位置と現在位置との間の並進及び回転が、画像に投影された情報として得られる。残念ながらこれらの情報は3次元空間における完全な情報ではなく不定性が残る。本章では、このような不定性が残る位置及び姿勢の情報からいかに的確に視覚サーボを行うかを述べる。

移動ロボットは1自由度の並進と1自由度の回転しかできないため、視覚サーボの方法としては、まずエピポールを用いて目標位置まで並進を行い、目標位置に達した後、エピポーラホモグラフィを用いて目標姿勢へと回転させることにする。前者を並進モード、後者を回転モードと呼ぶことにする。

##### 4.1 エピポーラ幾何と制御量

未校正のシステムを使う場合にまず問題となるのが、どのような制御量をロボットに送れば思った方向に進ませられるかである。本節では、ロボットもカメラも未校正である場合に、いかにエピポーラ幾何と実際の制御量とを結び付けるかについて考える。

図4に示すように、現在位置  $C_1$  から目標位置  $C_2$  へ視覚サーボする場合を考えよう。このとき、目標位置  $C_2$  は  $C_1$  の画像面  $\pi_1$  上でエピポール  $e_{12}$  に投影される。同様に現在位置  $C_1$  は  $\pi_2$  上で  $e_{21}$  に投影される。

1自由度の並進と1自由度の回転を組み合わせると目的位置と目的姿勢に到達するには、まずロボットの進行方向(1自由度の並進方向)が目標位置の方向へ向くようロボットを回転しなければならない。この回転

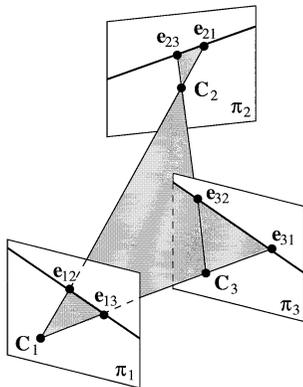


図4 並進モード

Fig. 4 Translational mode.

量を画像から判断したいが、カメラは未校正でしかもカメラの姿勢とロボットの姿勢の関係は未知であるので、どれだけ回転させればロボットの進行方向と目標位置の方向が一致するのかがこのままではわからない。

そこで、まずロボットを一度並進させてみる。この並進後の視点を  $C_3$  としよう(図4参照)。同一カメラが並進する場合には自己エピポーラが成り立ち、移動前後の画像においてエピポールの位置は一致する[14], [15]。つまり  $\pi_1$  と  $\pi_3$  を重ね合わせてみると、 $e_{13}$  と  $e_{31}$  はびたりと一致する。このとき、エピポール  $e_{31}$  (または  $e_{13}$ ) は、画像上でのロボットの進行方向(並進方向)を表している。一方、視点  $C_3$  と視点  $C_2$  の間のエピポール  $e_{32}$  は視点  $C_3$  における目標位置  $C_2$  を表している。したがって、視点  $C_3$  において二つのエピポール  $e_{31}$ ,  $e_{32}$  が一致するようにロボットを回転させれば、ロボットの進行方向が目標位置の方向に一致する。

##### 4.2 並進モードの制御

以上のような方向合せを行ってから並進することにより、移動ロボットは目標位置の方向へ進む。このような方向合せと並進を繰り返していけば、いつかはこのロボットは目標位置にたどり着く。しかし、先に述べたようにエピポールからは移動方向の情報は得られても移動の大きさについては不定性をもっている。したがって、エピポールの方向のどの距離に目標位置があるのかわからないので、従来の視覚サーボのように距離に対するフィードバック制御を行うことができず、また並進モードから回転モードへの切換えタイミングもわからない。そこで、次節に述べるように平面射影変換を用いてこの問題を解決する。

##### 4.3 並進モードから回転モードへの切換え

もし、二つのカメラが姿勢は異なるが、同じ位置に存在する場合、この二つのカメラの画像間には平面射影変換[13], [16]の関係が存在する。このとき、二つのカメラ間の外部パラメータは回転  $R$  のみで構成されるため、カメラの内部パラメータを上三角行列  $A$  で表すと、 $m$  と  $m'$  の間には次のような関係がある。

$$\tilde{m}' \sim P \tilde{m} \quad (9)$$

ここで、 $P$  は次のような  $3 \times 3$  行列である。

$$P = ARA^{-1} \quad (10)$$

今、このような行列  $P$  は未知ではあるが、定数倍の不定性があること、及び次に示すようにその行列式が

1 であることから自由度 7 の行列とみなすことができる。

$$\det \mathbf{P} = \det \mathbf{R} = 1 \quad (11)$$

画像中での 1 組の対応点  $\mathbf{m}$ ,  $\mathbf{m}'$  から式 (9) により二つ拘束が得られるため、4 点の対応点が与えられれば、 $\mathbf{P}$  の要素を決定することができる。このような  $\mathbf{P}$  を用いることにより、次に示すように 5 点以上の対応点からカメラが目標位置に達したかどうか判断することができる。

今、空間中に  $N$  個 ( $N \geq 5$ ) の点が存在するとする。もし、カメラが目標位置に達しているとする、 $N$  点のうち 4 点から求めた  $\mathbf{P}$  により残りの  $N - 4$  点も矛盾なく式 (9) により変換できる。ここでもしも変換できなかったとすると、カメラは目標地点に達していないことになる。このようにして、 $N$  個 ( $N \geq 5$ ) の点が矛盾なく変換できる  $\mathbf{P}$  が存在するとき、カメラは目標位置に達したといえ、このような  $\mathbf{P}$  が存在しないとき、カメラはまだ目標位置に達していないと判断できる。

実際には、 $N$  個 ( $N \geq 5$ ) の点から最小 2 乗法により  $\mathbf{P}$  を求め、この  $\mathbf{P}$  による  $N$  個の点の当てはめ誤差  $\Delta \mathbf{m}$  があるしきい値以下であることをもって、 $\mathbf{P}$  によりこれらの点が矛盾なく変換されたと判断する。ここで  $\Delta \mathbf{m}$  は求められた  $\mathbf{P}$  から得られる投影点  $\hat{\mathbf{m}}'$  を用いて、 $\Delta \mathbf{m} = \sum_{i=1}^N (\hat{\mathbf{m}}'_i - \mathbf{m}'_i)^T (\hat{\mathbf{m}}'_i - \mathbf{m}'_i)$  より計算する。そして、このように二つの画像間で平面射影変換の関係が存在すると判断できた時点で、移動ロボットの制御を並進から回転へ遷移させる。また、この当てはめ誤差  $\Delta \mathbf{m}$  はそのまま並進運動のフィードバックゲインとして使用することができる。すなわち、並進運動の制御則は次のように表すことができる。

$$Y_t = -\lambda_t (\Delta \mathbf{m}_k - \Delta \mathbf{m}_{k-1}) \quad (12)$$

ここで  $Y_t$  は並進運動の制御量であり、 $\Delta \mathbf{m}_k$  は時刻  $k$  における  $\Delta \mathbf{m}$  である。また、 $\lambda_t$  はフィードバックゲインである。

図 5 はシミュレーションにより目標位置方向に等間隔で並進移動させたときの  $\Delta \mathbf{m}$  の変化の様子である。11 時刻目において目標地点と一致し、12 時刻目以降は行きすぎている。この図に見るように、目標位置に近づくにつれ  $\Delta \mathbf{m}$  は減少し、行きすぎた場合には  $\Delta \mathbf{m}$  が増加する。したがって上記の制御則によりフィードバック制御できることがわかる。

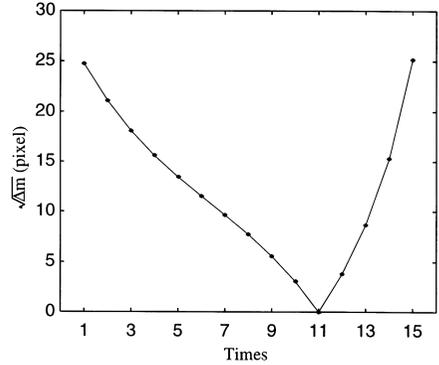


図 5 当てはめ誤差  $\Delta \mathbf{m}$  の変化  
Fig. 5 Changes in  $\Delta \mathbf{m}$ .

#### 4. 4 回転モードの制御

目標位置までカメラを移動できた場合、残る問題はカメラの姿勢をいかにして目標姿勢に合わせるかである。このカメラの向きに関する問題はエピポーラホモグラフィを用いることで解決することができる。もし、二つの画像の姿勢が同じであれば、二つの画像間でエピポーラ線の傾きが同じであるため、このときエピポーラホモグラフィ  $\mathbf{H}$  は単位行列になる。つまり、 $\mathbf{H}$  が単位行列になったとき、二つの画像面は平行である、と判断することができる。したがって、 $\mathbf{H}$  が単位行列になるようにカメラを回転させていけば、カメラの姿勢も目標姿勢に合わせる事ができる。

しかし残念ながら、現在位置が目標位置と一致した時点でエピポーラ幾何は不定となる。そこで、エピポーラホモグラフィの代わりに式 (9) に示す射影変換行列  $\mathbf{P}$  が単位行列  $\mathbf{I}$  となることをもって目標姿勢に一致したと判断する。したがって、 $\mathbf{P}$  と単位行列  $\mathbf{I}$  との差分  $\Delta \mathbf{P} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\mathbf{P}_{ij} - \mathbf{I}_{ij})^2$  を回転運動のフィードバックゲインとして用いる。すなわち、回転運動の制御則は次のように表される。

$$Y_r = -\lambda_r (\Delta \mathbf{P}_k - \Delta \mathbf{P}_{k-1}) \quad (13)$$

ここで  $Y_r$  は回転運動の制御量であり、 $\Delta \mathbf{P}_k$  は時刻  $k$  における  $\Delta \mathbf{P}$  である。また、 $\lambda_r$  はフィードバックゲインである。

図 6 はシミュレーションにより、目標位置において目標姿勢方向へ等角度で回転運動させたときの  $\Delta \mathbf{P}$  の変化の様子である。11 時刻目において目標姿勢と一致し、12 時刻目以降は行きすぎている。この図から明らかなように、目標姿勢に近づくにつれ  $\Delta \mathbf{P}$  は減少し、

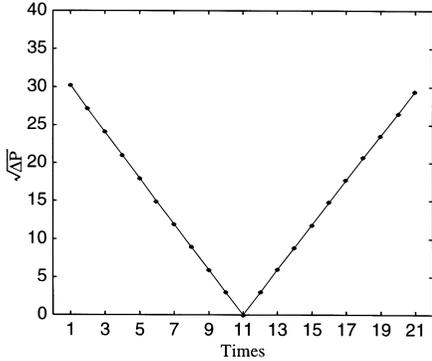


図6 差分  $\Delta P$  の変化  
Fig.6 Changes in  $\Delta P$ .

行きすぎた場合では増加するため，上記の制御則によりフィードバック制御できることがわかる．

#### 4.5 未校正視覚サーボのまとめ

以上述べた未校正カメラと未校正ロボットによる視覚サーボの手順を以下にまとめる．

(1) まずはじめに単位制御量だけ前進し，移動前後の画像間でエビポール  $e_{31}$  を求める．

(2) 次に前進後の画像と目標画像との間でエビポール  $e_{32}$  を求める．

(3) 次に  $e_{31}$  が  $e_{32}$  と一致するように回転を行う．

(4) 現画像と目的画像との間に平面射影変換の関係が存在するかどうか調べる．もし，この関係が存在する場合には目標地点に達したと判断し(5)に進む．そうでない場合には再び前進を行い(2)に戻る．

(5) 射影行列  $P$  が単位行列となるまで回転を行い姿勢を合わせる．

以上により，任意の位置及び姿勢から目標位置及び姿勢となるよう視覚サーボを行うことができる．

### 5. 実機による実験

実機による視覚サーボの実験結果を示す．本実験では移動ロボットとして市販のラジコンにカメラを搭載したものをを用いた(図7参照)．このロボットは左右への旋回及び前後進運動のみ行うことができる．内部パラメータが未知のカメラを適当にロボットに取り付けたため，式(1)の  $Q, M, P, A$  はいずれも未知である．また，エビポーラ幾何などの計算に必要とされる対応点については手動で取得している．

#### 5.1 サーボイングの実験

まず，目標位置にロボットを置き目標画像を撮像し

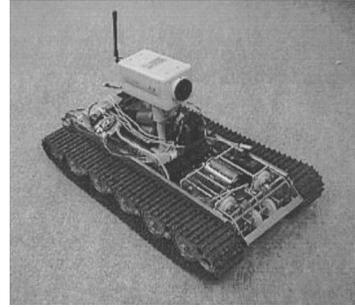


図7 本実験で用いたロボット  
Fig.7 The robot used in our experiment.

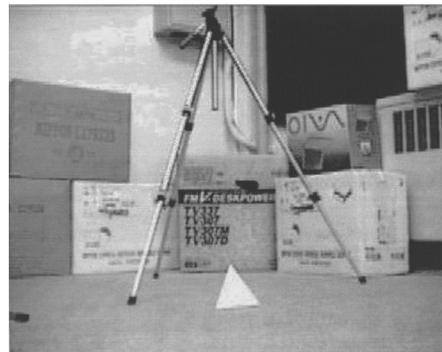


図8 目標画像  
Fig.8 The image at target position.

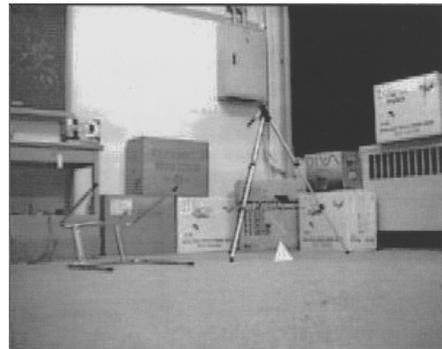


図9 開始画像  
Fig.9 The image at starting position.

た後，ロボットを任意の開始位置に置いて提案した視覚サーボを開始した．図8は目標画像を，図9はある開始位置における画像の例である．図10はサーボ途中の各時刻における画像と目標画像との間でエビポーラ幾何を計算した例である．図10中の黒丸は対応点を，また四角の点は得られたエビポールを示す．図10

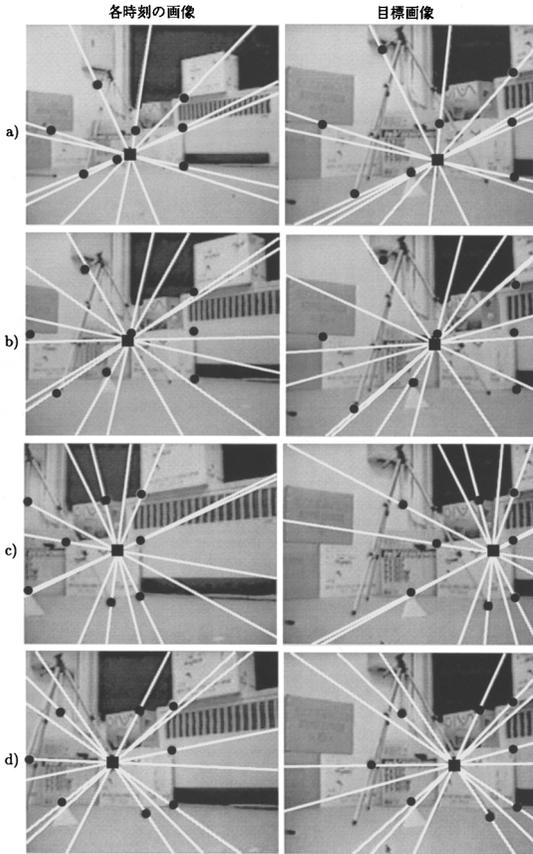


図 10 各時刻における画像と目標画像間のエピポーラ幾何  
Fig. 10 Epipolar geometry computed from current and target positions.

において、a), b), c) は並進モード時、d) は回転モード時におけるエピポーラ幾何の計算例である。このようなエピポーラ幾何計算を逐次行いながら提案手法により、視覚サーボを行った。図 11 はこのようにして様々な開始位置からある目標位置に対し視覚サーボを行った結果である。図中白丸は開始位置を表し、白線はロボットの移動軌跡である。また、矢印は開始時のロボットの姿勢を示す。図 11 から明らかなように、様々な位置、姿勢で視覚サーボを開始しても目標位置に確実に制御されていることがわかる。移動の軌跡も目標位置までほぼ直線を描いており、制御に無駄がないことがわかる。ただし、ロボットが回転 1 自由度、並進 1 自由度しかもっていないため、極端な開始位置と姿勢では制御しきれず失敗している。これは、並進移動の制御途中で目標画像と現画像の間で共通に投影されている対象物がなくなり、エピポーラ幾何が求め

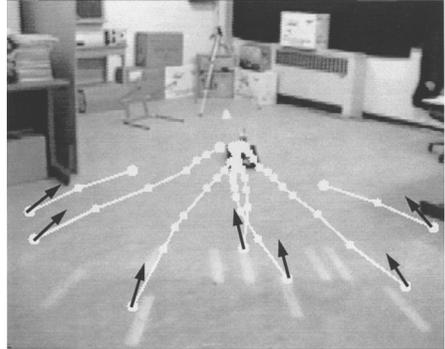


図 11 視覚サーボの実験結果  
Fig. 11 Results from experiment of visual servoing.

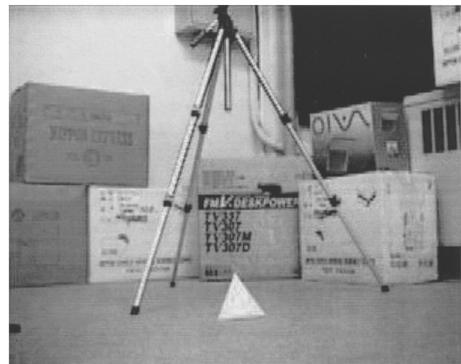


図 12 制御終了時の画像  
Fig. 12 The image at goal position after visual servoing.

られなくなってしまったからである。また、図 12 は制御終了時の画像である。図 12 と図 8 の目標画像を比べると、ほぼ一致しており、ロボットの姿勢も目標姿勢へうまく制御されていることがわかる。

また、図 13、図 14 は図 11 に示す結果の一つについて計測した  $\Delta m$  と  $\Delta P$  の変化を示したものである。実験においても  $\Delta m$  と  $\Delta P$  は制御により 0 付近に収束しており、制御が正しく行われていることがわかる。

### 5.2 精度評価

次に視覚サーボの制御結果に対し、位置決め精度を評価した。図 15 の黒点は制御終了時のロボットの位置を床面に対し真上から見たものである。これらの点に対し  $3\sigma$  ( $\sigma$  は標準偏差を表す) の不確定領域を計算した結果が図の楕円である。位置決め精度がこの程度である原因としては、 $F$  行列の計算精度の問題、市販のラジコンカーという制御精度の悪いロボットを使用していること、空中における制御と異なり床面との

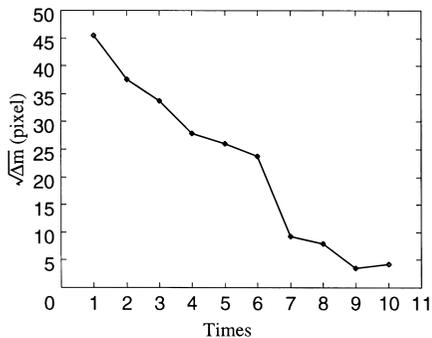


図 13 当てはめ誤差  $\Delta m$  の変化  
Fig. 13 Changes in  $\Delta m$ .

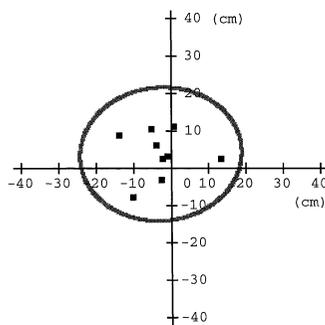


図 15 位置決め精度  
Fig. 15 The accuracy of positioning.

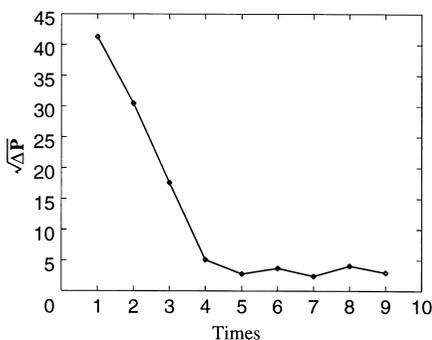


図 14 差分  $\Delta P$  の変化  
Fig. 14 Changes in  $\Delta P$ .

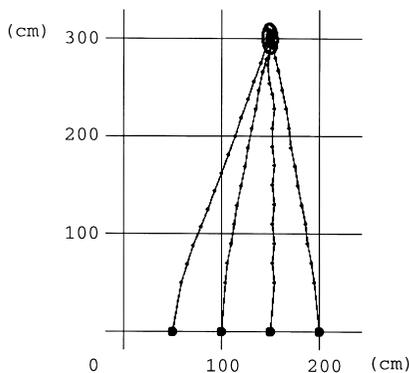


図 16 シミュレーション結果  
Fig. 16 Results from simulation.

摩擦の影響を受けること等が考えられる。F 行列の計算精度に関しては非線形解法 [10] を使用する手法、若しくは統計的最適化理論に基づく最適計算 [18] により改善の余地がある。

### 5.3 シミュレーションによる精度評価

次に、画像ノイズと制御精度の関係を把握するため、視覚サーボのシミュレーション実験を行った。投影される画像の大きさは  $600 \times 480$  pixel とし、投影された特徴点に標準偏差 1 pixel のランダムノイズを乗せ、提案した手法により視覚サーボを行った。

様々な開始位置 (黒丸) から目標位置へ 20 回視覚サーボを行った結果の軌跡の一部を図 16 に実線で示す。制御終了時のロボット的位置に対し  $3\sigma$  の不確定領域を計算したものが図の楕円である。この図より明らかなように、1 pixel 程度の画像ノイズにより約 10 cm 程度の位置ずれが起こることがわかる。また、姿勢制御に関しては 2.36 度程度の誤差が発生した。

## 6. むすび

本論文では未校正カメラ及び未校正ロボットにおける視覚サーボの実現方法について述べた。

まず、未校正カメラにおいてもエピソード幾何を用いることで、視覚サーボで必要とされる目標位置と姿勢の情報が得られることを示した。これをもとに、エピソードの示す方向へ並進し、目標位置に達した後に回転を行った。並進運動から回転運動への切換えは、目標位置に達した場合に目標画像と現画像の間に平面射影変換の関係が成り立つことを利用して判断した。以上の手法に基づいて実機による実験を行い、未校正カメラによる未校正ロボットの視覚サーボが実現可能であることを確認した。

本論文では、ロボットの自由度が並進 1 自由度、回転 1 自由度であるとして視覚サーボを考えた。床面上を運動する移動ロボットを制御対象とする場合には、一般的にこのような自由度の構成となる場合が多い。

しかし、ロボットアームなどを対象とした場合にはより自由度は大きくなる。このようなより自由度の大きい制御対象に対し未校正カメラで視覚サーボを行うことが今後の課題である。

また、本論文では、複数の視点において物理的な対応が陽に得られる多面体などの対象物を扱った。しかし、対象物をより一般化し曲面体などを扱う場合には物理的対応が陽には得られず、エピポーラ幾何の計算ははるかに難しくなる [17], [19]。このような対象物に対する視覚サーボの実現も今後の課題である。また、F 行列の計算精度と制御精度の関係や、従来手法との精度比較なども今後検討する必要がある。

謝辞 この研究は栢森情報科学振興財団の助成を受けて遂行された。

## 文 献

- [1] 橋本浩一, “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.
- [2] B. Espiau, F. Chaumette, and P. Rives, “New approach to visual servoing in robotics,” IEEE Trans. Robotics and Automation, vol.8, no.3, pp.313-326, 1992.
- [3] K. Deguchi and T. Noguchi, “Visual servoing using eigenspace method and dynamic calculation of interaction matrices,” Proc. 13th Int. Conf. on Pattern Recognition, vol.1, pp.302-306, Vienna, Austria, Aug. 1996.
- [4] R. Basri, E. Rivlin, and I. Shimshoni, “Visual homing: Surfing on the epipoles,” Proc. 6th Int. Conf. on Computer Vision, pp.863-869, Bombay, India, 1998.
- [5] 出口光一郎, 石山 壘, “画像ベース視覚サーボにおける最適軌道生成のための並進と回転運動の非干渉化” 画像の認識・理解シンポジウム, pp.337-343, 1998.
- [6] 木下敬介, “Uncalibrated stereo と視覚サーボによるロボットの制御” 画像の認識・理解シンポジウム, vol.2, pp.187-192, 1996.
- [7] O.D. Faugeras, “What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?,” G. Sandini, ed., Proc. 2nd European Conf. on Computer Vision, pp.563-578, Springer-Verlag, Santa Margherita, Italy, 1992.
- [8] R.I. Hartley, R. Gupta, and T. Chang, “Stereo from uncalibrated cameras,” Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.761-764, 1992.
- [9] Q.T. Luong and O.D. Faugeras, “The fundamental matrix: Theory, algorithm and stability analysis,” Int. J. Computer Vision, vol.17, no.1, pp.43-76, 1996.
- [10] Z. Zhang, “Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review,” Int. J. Computer Vision, vol.27, no.2, pp.161-195, 1998.
- [11] H.C. Longuet-Higgins, “A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections,” Nature,

no.293, pp.133-135, 1981.

- [12] R.I. Hartley, “In defense of the eight-point algorithm,” IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.19, no.6, pp.580-593, 1997.
- [13] 佐藤 淳, コンピュータビジョン 視覚の幾何学, コロナ社, 1999.
- [14] J.L. Mundy and A. Zisserman, “Repeated structures: Image correspondence constraints and 3D structure recovery,” in Applications of Invariance in Computer Vision, eds. J.L. Mundy, A. Zisserman, and D.A. Forsyth, pp.89-106, (LNCS 825), Springer-Verlag, 1994.
- [15] J. Sato and R. Cipolla, “Affine reconstruction of curved surfaces from uncalibrated views of apparent contours,” Proc. 6th Int. Conf. on Computer Vision, pp.715-720, Bombay, India, Jan. 1998.
- [16] 出口光一郎, 画像と空間—コンピュータビジョンの幾何学, 昭晃堂, 1991.
- [17] R. Cipolla, K. Astrom, and P.J. Giblin, “Motion from the frontier of curved surfaces,” Proc. 5th Int. Conf. on Computer Vision, pp.269-275, Cambridge, Massachusetts, 1995.
- [18] 三島 等, 金谷健一, “基礎行列の最適計算とその信頼性評価” 情処学研報, 99-CVIM-118-10, pp.67-74, 1999.
- [19] 佐藤 淳, 木下敬介, R. Cipolla, “曲面上のエピポーラ幾何と未校正カメラによる視覚誘導” 信学論 (D-II), vol.J82-D-II, no.9, pp.1401-1410, Sept. 1999.

(平成 11 年 7 月 5 日受付, 11 月 4 日再受付)



佐藤 岳晴 (学生員)

平 9 名工大・電気情報卒。現在同大大学院修士課程在学中。コンピュータビジョンの研究に従事。



佐藤 淳 (正員)

昭 59 名工大・工卒。平 8 ケンブリッジ大学院博士課程了。同年ケンブリッジ大・工・助手。平 10 名工大・工・助教授。この間に、ATR 人間情報通信研究所客員研究員など。コンピュータビジョン、視覚誘導、視覚的ユーザインタフェースの研究に従事。博士 (PhD)。著書に「コンピュータビジョン—視覚の幾何学」(コロナ社)等。BMVC'94 最優秀科学論文賞, BMVC'97 最優秀科学論文賞等受賞。情報処理学会, British Machine Vision Association 各会員。