

# 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

石山 塁<sup>\*1</sup> 出口 光一郎<sup>\*1\*2</sup>

## Optimal Motion Control for Image-Based Visual Servoing by Decoupling Translation and Rotation

Rui Ishiyama<sup>\*1</sup> and Koichiro Deguchi<sup>\*1\*2</sup>

Image-based visual servoing interprets image change directly to camera motion, and control the position and pose of a robot mounting a camera. It does not need 3D object models and is robust for image reading errors and noise. However, because its strategy is to simply minimize the differences between the goal image and the currently obtained image, trajectory of the robot motion cannot be expected beforehand, and sometimes it results in largely inefficient motion. This paper points out that this inefficient motion is caused by interferences of translating motion and rotation of images. Then, we propose two algorithm to decouple them by using the Homography and the epipolar condition held between the goal image and the current image, and to generate the optimal trajectory of the robot motion to reach the goal position straightforwardly.

**Key Words:** Visual Servoing, Computer Vision, Homography, Epipolar Geometry

### 1. はじめに：視覚によるロボットの制御

本論文ではゴール画像を与えることで、カメラを搭載した移動ロボットやマニピュレータをそのゴール画像が得られる位置へと導く視覚サーボの手法について考察し、新しい手法を提案する。

画像を用いて能動ロボットの運動を制御する視覚サーボは、環境の変化や外乱に対して柔軟な制御手法として期待されている。これまでも多くの研究があるが、原理的には大きく分けて位置ベース法と画像ベース法の二つの手法がある [1]。位置ベース法は、対象物体の三次元幾何モデルを用いて画像からカメラの絶対的な位置・姿勢を求め、ゴール位置へ導くものである。これに対して画像ベース法 [2] では、Fig. 1 のように、カメラの動きと画像の変化を直接結び付けて考え、各時点での画像とゴール画像との差を最小にする向きに運動を制御する。そのようなフィードバックをかけながら移動していくことで、最終的に現在の画像とゴール画像とを一致させる。この手法では、対象の三次元情報を明示的に用いないため、対象の幾何モデルは不要であり、一般に様々な外乱に対して頑強であると言われている。しかし、画像上での差を最小化することだけを考えると軌道を生成するため、カメラの運動の三次元空間での

軌跡は予測不能な曲がった軌道になり、大きく回り道をすることがある。

このことは、画像ベース法による視覚サーボにとって、実用上の深刻な問題を生じ得る。そこで、軌道上の要所ごとの点での画像も与え、小刻みに軌道追従のための制御を繰り返す視覚サーボの手法が提案されている [3] [4]。

ただし、このような対処法では、任意の位置からゴールへいつも最適軌道を描かせるには、あらかじめ膨大な数の点で画像を得てそれぞれの画像での特徴点位置を抽出しておかなくてはならないし、十分細かい間隔で参照用の画像を用意しても、必ずしも滑らかな軌道が得られているわけではない。さらに、最

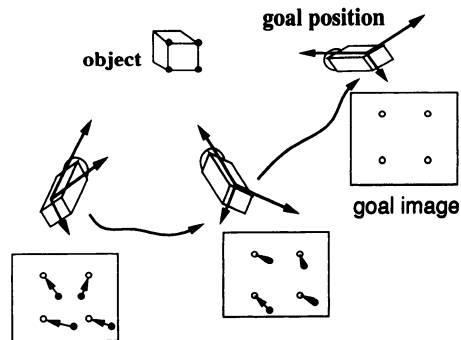


Fig. 1 Image-based visual servoing: Comparing the currently obtained image and the given goal image, the camera motion is controlled to minimize their difference to reach at the goal position

原稿受付 1998年11月27日

<sup>\*1</sup>東京大学工学部

<sup>\*2</sup>東北大学情報科学研究科

<sup>\*1</sup>Faculty of Engineering, University of Tokyo

<sup>\*2</sup>Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

適軌道を描かせるために適切な特徴点位置をデータベースの中から検索する必要もあるので、ゴール画像を一枚与えるだけで、ゴールへとロボットを導けるといった画像ベース法の最大の魅力を失ってしまう。

本論文では、ゴール画像一枚だけを与え、任意の位置から現在得ている画像との差のみに基づいてゴールへの直線的な軌道を得る方法について述べる。そのため、まず、この回り道が生成されてしまう原因について、画像ベース法を簡単にまとめるとともに、制御における問題点を考える。次に、その原因としての並進運動と回転運動の干渉について考察し、それらの非干渉化の手段を述べる。その一つとして対象が平面上にあることが分かっている場合にその平面の Homography を利用する手法、また、一般的な対象に対してエピポーラ条件を利用する手法をそれぞれ提案し、画像ベース制御において三次元的に最適軌道を生成する制御手法を示す。

両手法について6自由度を持つ実ロボットハンドによる実験を行い、その有効性を示す。

## 2. 従来の手法のまとめと問題点

### 2.1 カメラ運動と画像変化と制御

カメラ座標系で、焦点距離を1とした透視変換を考え、 $z = 1$ に画像面を考える (Fig. 2)。対象物体の点の三次元座標を  $\mathbf{P} = [x, y, z]^T$ 、その画像上の座標を  $\mathbf{p} = [u, v, 1]^T$  とすれば、

$$\mathbf{p} = \frac{1}{z} \mathbf{P} \quad (1)$$

カメラの並進速度を  $\mathbf{v}$ 、回転角速度を  $\boldsymbol{\omega}$  とすれば、点  $\mathbf{P}$  のカメラ座標による見掛けの速度は、

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P} = -\mathbf{v} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{P} \quad (2)$$

であることから、画像上の点の動きとカメラの動き  $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix}$  との関係は次のように書ける。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{z} & 0 & -\frac{x}{z^2} & \frac{xy}{z^2} & -1 - \frac{x^2}{z^2} & \frac{y}{z} \\ 0 & \frac{1}{z} & -\frac{y}{z^2} & 1 + \frac{y^2}{z^2} & -\frac{xy}{z^2} & -\frac{x}{z} \end{bmatrix} \mathbf{T}$$

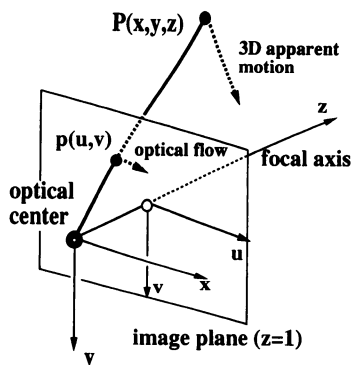


Fig. 2 Camera model and image motion by the camera motion

$$= \begin{bmatrix} 1/z & 0 & -u/z & uv & -1 - u^2 & v \\ 0 & 1/z & -v/z & 1 + v^2 & -uv & -u \end{bmatrix} \mathbf{T} \\ = [L_{trans}(u, v, z) \mid L_{rot}(u, v)] \mathbf{T} \quad (3)$$

この係数行列は Interaction matrix と呼ばれ、カメラ運動と画像変化の関係を表す行列である。

$\mathbf{x} = [u_1, v_1, u_2, v_2, \dots]^T$  を現在の画像特徴量 (ここでは特徴点の画像座標を並べたベクトル) とし、その各点についての式 (3) の係数行列を縦に並べた行列を  $L$  とすると、カメラの運動に対するこの画像特徴量の変化は、

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = L\mathbf{T} \quad (4)$$

と表せる。

そこで、 $\mathbf{x}_g$  をカメラがゴール位置にあるときの画像特徴量とすれば、画像上の各点がゴール画像に向かって動くようなカメラ運動の制御則は次のように与えられる。

$$\left| (\mathbf{x} - \mathbf{x}_g) - \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right| \rightarrow \min \text{ より}, \\ \mathbf{T} = -\lambda L^+ (\mathbf{x} - \mathbf{x}_g) \quad (5) \\ (1 > \lambda > 0: \text{ゲイン}, L^+: L \text{の疑似逆行列})$$

したがって、画像ベース法による視覚サーボでは、Fig. 1に示したように、現在位置で画像を撮り、式 (5) に従って運動量を決め、カメラを動かし、そしてそこでまた画像を撮り、というフィードバックを繰り返すことで、画像の差を小さくしていく。

### 2.2 画像ベース法の特長と問題点

画像ベース法の特長と問題点を以下にまとめる。

- 対象物体形状の幾何モデルが不要  
画像が一致すれば位置姿勢も一致していることを利用しているため、ゴール位置での画像と行列  $L$  の情報があれば制御が行える。
- 誤差などの外乱に対して頑強  
対象の幾何モデルは不要なためその誤差の影響を受けない。また、制御に用いる行列  $L$  の値に誤差があっても最終的な収束位置に影響せず、広い範囲からの収束が可能である。
- $L$  はカメラ位置によって刻々変化する  
式 (3) に示すように、式 (5) の行列  $L^+$  には、各特徴点の空間的な奥行きが含まれていることに注意が必要である。 $L^+$  の計算に用いる値としては、ゴール位置での値で近似するという手法がある。そのような粗い近似を行っても実験的にかなり広い範囲で収束することが報告されている。また、過去のカメラ運動と画像の履歴を用いてオンラインで行列  $L$  を推定する手法も提案されている [3]。

しかし、たとえ正確な行列  $L$  の値が求められたとしても、画像ベース制御では、画像上での特徴点の軌跡を最短にしているだけで、カメラ運動は空間的には最適にならない。

Fig. 3 に、上方に示す正方形の角の4点の画像を特徴点として、しかも、各カメラ位置で正確な行列  $L$  の値が与えられたとして、いくつかの初期位置から上記の方法でカメラをゴール位置へ導いたときの軌跡を示す。特に、回転が大きい場合や

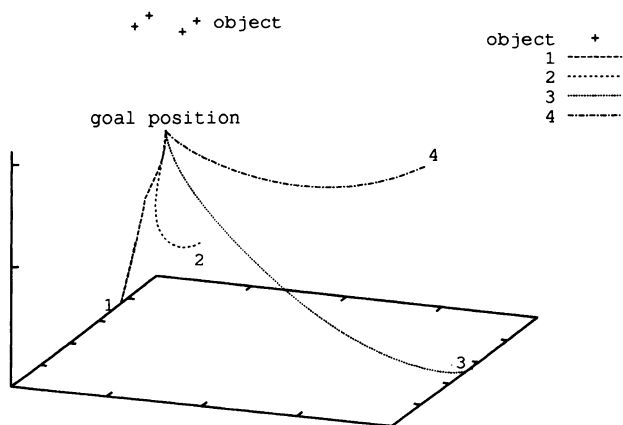


Fig. 3 Examples of the 3D trajectories of the camera motions by the image-based visual servoing from some different starting points, when true  $L$  values are always given analytically. Objects were four points above the goal position

ターゲットから距離が離れている場合などに大きく回り道をしている。軌道が大きく曲がり、ターゲットが視野から出てしまいゴール位置までたどり着けない場合もあった。また、単に遠回りするというだけでなく、軌道が予測不可能であるということは、制御にとって大きな問題である。

### 3. 並進と回転の干渉による影響

Fig. 4 に示すように、画像上の点は、カメラが並進運動をする場合は FOE (Focus of Expansion) と呼ばれる点を中心とする放射状の直線上を動き、回転運動では楕円上を動く。ゴールと現在の画像の間の変化は、並進による分と回転による分を足したものになっている。運動視差の性質から、回転による分は近くの点も遠くの点も同じように動くが、並進による分は遠くの点は少ししか動かない (Fig. 5)。

このような性質の違いにかかわらず、従来の画像ベース制御では、並進と回転をまったく同等に扱って画像誤差を最小化する運動を計算している。このため、回転による画像の変化分が並進運動に影響を与えてしまう。一般には回転の方が画像上で大きく点を動かすことができるので、必要以上の回転をまず行う傾向があり、それを補うために無駄な並進が必要になる。これが、最短軌道から大きく外れた運動をする原因であると考えられる。

したがって、画像ベース制御で三次元的に最適な軌道に制御するためには、並進と回転を分離して制御するのが望ましい。すなわち、画像だけからゴール位置の方向、またはゴール姿勢への回転(軸)が求められれば、運動に拘束条件を付けて制御を行うことができる。これにより、回転運動と並進運動の制御を非干渉化することができる。

以下では、現在の画像とゴール画像との間に成立する幾何学的関係を元に、制御の非干渉化と最適軌道の生成を行う手法を提案する。

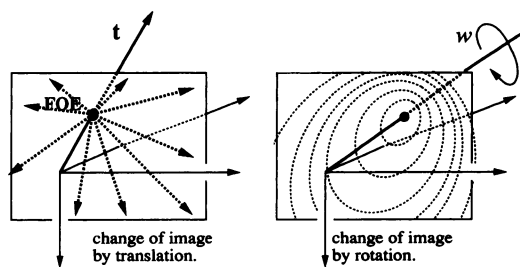


Fig. 4 The image flows generated by the camera translation and rotation

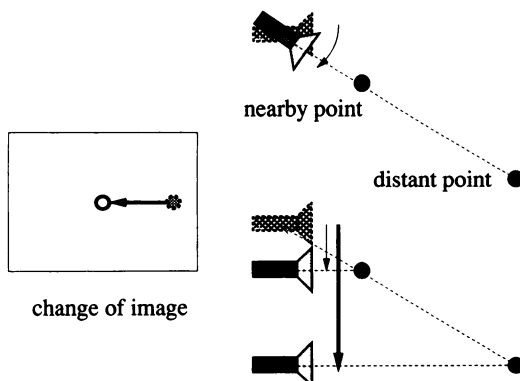


Fig. 5 Difference of parallax generated by camera rotation and translation

## 4. 平面の Homography を利用した直線軌道制御

### 4.1 対象点の Homography

対象点が三次元空間中のある平面上にある場合、現在位置の画像とゴール位置での画像の座標の間には、以下のような関係が成り立つ [5]。

点  $P$  が法線ベクトル  $\mathbf{n}_g$  の平面にのっている場合を考える (Fig. 6)。添字の  $g$  はゴール位置の、 $c$  は現在位置のカメラ座標系での座標値であることを示すとすると、

$$\begin{aligned} P_c &= RP_g + \mathbf{t} \quad (R: \text{回転行列}, \mathbf{t}: \text{並進ベクトル}) \\ &= \left( R + \mathbf{t} \frac{\mathbf{n}_g^\top}{d_g} \right) P_g \end{aligned}$$

ここで、 $d_g = \mathbf{n}_g^\top P_g$  はゴール位置からの平面への距離である。画像座標は、 $\mathbf{p}_c = \frac{P_c}{z_c}$ 、 $\mathbf{p}_g = \frac{P_g}{z_g}$  で与えられるので、

$$\frac{z_c}{z_g} \mathbf{p}_c = \left( R + \mathbf{t} \frac{\mathbf{n}_g^\top}{d_g} \right) \mathbf{p}_g \quad (6)$$

これは次のように表すことができる。

$$\alpha \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} u_g \\ v_g \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $H \equiv R + \mathbf{t} \frac{\mathbf{n}_g^\top}{d_g}$  は  $3 \times 3$  行列で、Homography 行列と呼ばれる。また、 $\alpha = \frac{z_c}{z_g}$  である。現在位置の画像とゴール画像と

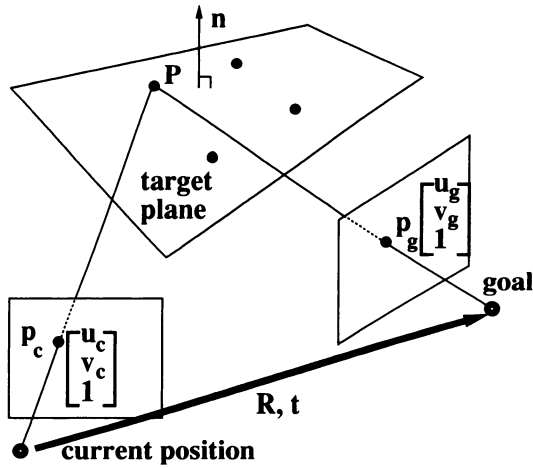


Fig. 6 Object targets on a 3D plane and their images

の間で対応点が  $n$  点 ( $n \geq 4$ ) とれば、画像だけから行列  $H$  が求められる。また、 $H$  を分解することにより、 $R$ 、 $\mathbf{t}/d_g$ 、 $\mathbf{n}_g$ 、 $\{\alpha_i/\alpha_1\} (i=2, \dots, n)$  を求めることができる [5]。

すなわち、カメラの現在位置・姿勢とゴール位置・姿勢との間の回転と並進がそれぞれ求まることになり、[6] で指摘されているように、平面を参照することでゴールへの軌道を生成できる可能性がある。しかし、画像誤差などの影響は避けられないことと、対象が単に平面であるということだけしか情報がないときは、 $\mathbf{t}/d_g$  によって、ゴールへの方向だけが与えられるので、一気にゴールへの軌道を決めることは困難である。以下では、これらの情報を用いて、刻々得る画像とゴール画像との間で、並進運動を一直線にゴールへ向かう向きに拘束する最適軌道を生成して、フィードバックする制御法を提案する。

#### 4.2 Homography を利用した直線軌道制御

まず、 $H$  から  $\mathbf{t}/d_g$ 、 $R$  が、 $R$  から回転軸  $\mathbf{u}$  と回転角  $\theta$  が求められる。ここで、並進には最短軌道を取ってゴールへ向かう役割、回転には対象を視野内に納めるための役割を与え、それぞれ別々に制御を考えることにする。

刻々の画像を得た時点で、その位置から一直線にゴールへ向かうように、並進運動を決定する。

$$\mathbf{v} = \hat{d}_g \left( \frac{\mathbf{t}}{d_g} \right) \quad (8)$$

ただし、 $d_g$  はゴール位置から平面までの距離で、未知であり、 $\hat{d}_g$  はその推定値である。

回転運動は対象が視野に納まるように、そしてゴール付近ではゴール画像に近くなるように以下の制御をする。つまり、並進によって生まれる画像の変化を補って視界を確保し、同時にゴール画像と現在画像の誤差を最小にするように制御する。回転による画像の変化は並進に比べ大きいので、無駄な動きは回転に負担させた方が小さくなり、安定に制御できると期待される。

$$\boldsymbol{\omega} = -L_{rot}^+ (\mathbf{x} - \mathbf{x}_g + L_{trans} \mathbf{v}) \quad (9)$$

残る問題は、三次元的な奥行きにも依存する行列  $L$  を計算する問題である。

$L$  の回転成分  $L_{rot}$  は、式 (3) に示すように、画像座標  $(u, v)$  だけから求めることができる。一方、並進成分  $L_{trans}$  は、画像座標  $(u, v)$  に加えて  $z_c$  にも依存している。

いま、 $d_c$  を現在位置から対象平面までの距離、 $\mathbf{n}_c$  を現在のカメラ座標での平面の法線ベクトルとすると、

$$\begin{aligned} z_c \mathbf{p}_c &= \mathbf{P}_c \\ \mathbf{n}_c^\top \mathbf{P}_c &= d_c \quad (\mathbf{P} \text{ は法線が } \mathbf{n}_c \text{ の平面上にある}) \end{aligned}$$

より、 $\mathbf{n}_c = R \mathbf{n}_g$  であるから、

$$\begin{aligned} d_c &= d_g + \mathbf{n}_c^\top \mathbf{t} \\ &= d_g \left( 1 + \mathbf{n}_g^\top R^\top \frac{\mathbf{t}}{d_g} \right) \end{aligned}$$

ここで、 $r \equiv 1 + \mathbf{n}_g^\top R^\top \frac{\mathbf{t}}{d_g}$ 、 $\gamma \equiv \frac{\mathbf{n}_g^\top R^\top \mathbf{p}_c}{r}$  と定義すると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{z_c} &= \frac{\mathbf{n}_c^\top \mathbf{p}_c}{r d_g} = \frac{\gamma}{d_g} \\ \therefore L_{trans} &= \frac{1}{d_g} \begin{bmatrix} -\gamma & 0 & \gamma u \\ 0 & -\gamma & \gamma v \end{bmatrix} = \frac{1}{d_g} M \end{aligned}$$

とおける。

ここで、 $L_{trans}$  の計算には、画像から求められる値に加え、ゴール位置から平面までの距離  $d_g$  の値が必要である。

式 (8)、式 (9) に基づく制御則は、 $0 < \lambda < 1$  となる  $\lambda$  によって、

$$\mathbf{v} = \lambda \hat{d}_g \frac{\mathbf{t}}{d_g} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega} &= -\lambda L_{rot}^+ (\mathbf{x} - \mathbf{x}_g + L_{trans} \mathbf{v}) \\ &= -\lambda L_{rot}^+ \left( \mathbf{x} - \mathbf{x}_g + M \frac{\mathbf{t}}{d_g} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

だけずつカメラを動かすこととするので、 $\hat{d}_g$  は並進速度に対するゲインと回転速度に対するゲインの比に相当する。ゴールへ安定に到達するためには、全体としてのゲインが 1 以下であればよいので、したがって、 $\hat{d}_g$  は正確に求める必要がなく、その他の既知の値とオーダーが合っている程度の近似値で十分である。

以上の制御法をまとめると、

(i) 現在位置で画像  $\mathbf{x}$  を得て、

(ii) 式 (10)(11) により  $\mathbf{v}$ 、 $\boldsymbol{\omega}$  を決め、カメラを動かす。

そこで、まだゴール画像との差が大きければ (i) へ戻り、これを繰り返す。

回転と並進の制御を分離したことにより、ゲインを独立に考えることができる。そして、それぞれの運動の役割が視野の確保と移動という二つに明確に分けられているため、ゲインの意味も明解である。この二つのゲインを調整することで、収束の早さと視野の確保の安定性との間のバランスをとることができる。

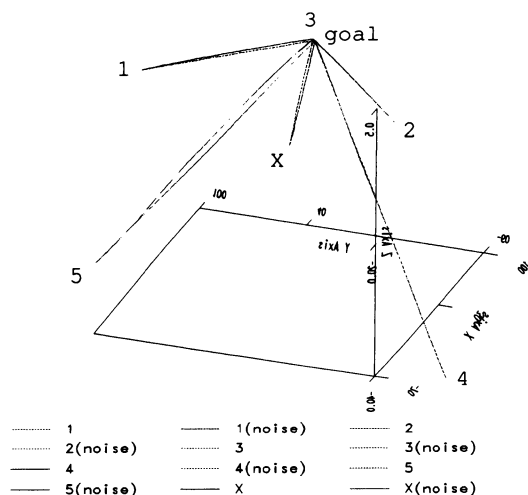


Fig. 7 Experimental results for controls using Homography matrices. Trajectories from many points are shown, which were reached straightforwardly in spite of perturbation noise

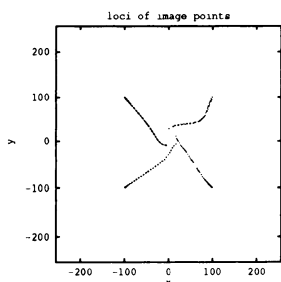


Fig. 8 Trajectories of image points in the case of starting form position 5

### 4.3 実験結果

Homography を利用する制御の実験結果を、Fig. 7, Fig. 8 に示す。対象は Fig. 3 の場合と同じで、図のゴール位置の上方にある正方形の角の4点を用いた。1秒に約5回の割合で、その時点の画像から最適な軌道を生成している。広い範囲のスタート位置からの、ロボットアームの先端に取り付けたカメラの運動の軌跡を示す。どの場合も直線軌道を生成できている。また、画像にノイズをのせ、 $d_g$  の値を真の値の2倍にした場合 (noise) も安定に制御できている。

## 5. エピポーラ条件を利用した直線軌道制御

### 5.1 ゴールと現在の画像の間のエピポーラ条件

対象が平面上にあるとは限らない一般の場合でも、ゴール画像と現在の画像の間で成り立つエピポーラ条件を考えることで、ゴール位置への並進方向と回転を求めることができる。

対象物体の形状にかかわらず、現在の画像とゴール画像上の対応点  $p_c$ ,  $p_g$  の間には  $3 \times 3$  の行列  $E$  に対して次のような関係が成り立つ。

$$p_c^T E p_g = 0 \quad (12)$$

ここで、行列  $E$  は Essential matrix と呼ばれ、 $E = [t]_{\times} R$  (た

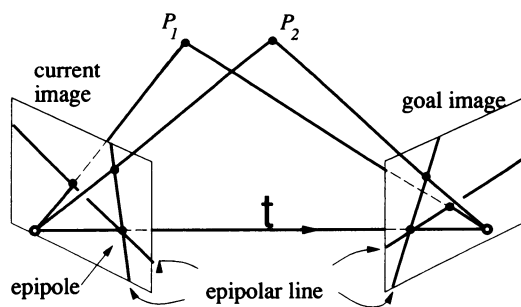


Fig. 9 The epipolar condition between two images. The epipole gives the direction of translation

だし、 $[t]_{\times}$  は、任意のベクトル  $x$  に対して、 $[t]_{\times} x = t \times x$  となる行列) で与えられる。この行列  $E$  も、実際には、画像の対応点の組からその値を計算することができる。  $E$  を  $t$  (の定数倍) と  $R$  に分解することにより、平行移動方向  $\tilde{t} = t/|t|$  と回転が求められる [8]。

次に、求めた  $\tilde{t}$  と  $R$  を用いて直線軌道を生成する制御を考える。

並進運動の制御は、一直線にゴールへ向かい、なめらかに減速してゴールへ収束するように、距離に対する比例制御を行う。

$$v = \lambda_{trans} \tau \tilde{t} \quad (13)$$

ここで、 $\tau$  はゴールまでの並進距離で未知の値である。しかし、求めた  $\tilde{t}$  と  $R$  を用いれば対象点の  $\tau$  に対する相対的な奥行き  $\varepsilon$  が推定できるので、 $\lambda_{trans}$  を適当な初期速度、 $\tau$  を現在の奥行きと初期位置での奥行きの比、とすれば、距離に対する比例制御が行える。

回転運動の制御は対象物体が視界に納まるようにしつつゴールへ向かうように前章の式 (11) と同様に制御する。

$$\omega = -\lambda_{rot} L_{rot}^+ (x - x_g) \quad (14)$$

以上の制御法は、前章の平面を利用する場合と同様であり、現在位置で画像  $x$  を得て、式 (13)(14) により  $v, \omega$  を決め、カメラを動かし、まだゴール画像との差が大きければ、これを繰り返す。

### 5.2 $L$ の推定問題

Essential matrix を使う手法では、 $L_{trans}(z_c)$  が必要である。これに関しては以下のような手段が考えられる。

#### ● ゴール位置の値で近似

本手法では並進方向を拘束しているため、 $L$  の誤差はターゲットを視野に納められるかどうか (回転運動) だけに影響し、並進運動の三次元空間での軌道には影響しない。

#### ● 画像とカメラ運動の履歴を使って推定

$L_{rot}$  は画像から求まるので、過去の履歴において、画像の変化の並進分  $\Delta x_{trans} = \Delta x - L_{trans} \omega$  を求めることができる。したがって、 $\Delta x_{trans} = L_{trans} v$  より  $v$  が分かれば  $L_{trans}$  を推定できる。

提案した手法では、回転と並進のゲインを別々に調整することができ、回転のゲインを大きくすれば  $L$  の誤差が大きくて

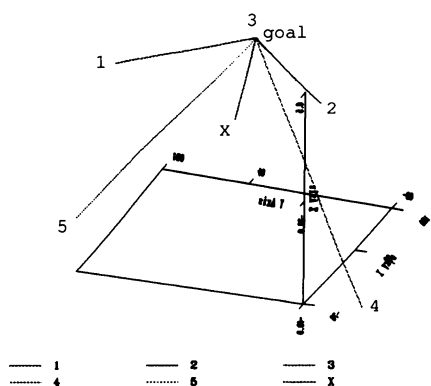


Fig. 10 3D trajectories of camera motion by the control second method using epipolar conditions.  $L$  was substituted with the value at the goal point

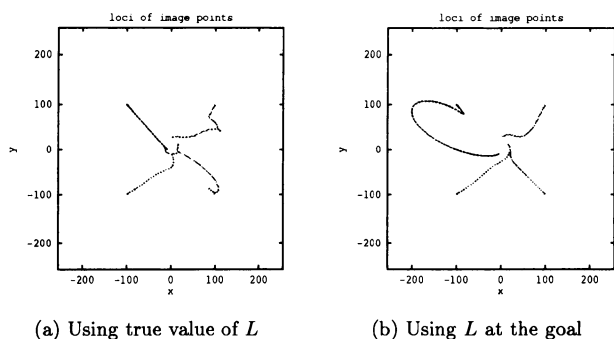


Fig. 11 Image point motion for the case starting from the point 5. Motions of 4 points out of 8 are shown

もゴール位置までターゲットを視野内に保ち続けることができる。したがって、 $L$  をゴール位置の値で近似しても、広い範囲の位置からゴール位置へ収束させることができる。

5.3 実験結果

直線軌道でのゴールへの収束

エピポラ条件を用いる提案手法による実験結果を示す。スタート位置は前出のものと同じである。対象点はこれまでと同じ正方形の角の4点に加え、さらに上方に同じ正方形を45度回転したものを置いてその角の4点も用いた。1秒間に5回の割合で画像を得て、その時点での最適な軌道を計算している。 $L$  はすべてゴール位置での値を用いているが、いずれのスタート位置からも直線軌道でゴールへ収束できている (Fig. 10)。

従来の画像ベース法では行列  $L$  をゴール位置での値で近似した場合、対象点が視界から外れてしまいゴールへたどり着けなかった場合があった。しかし、本手法では並進と回転のゲインの比を適当な値にすれば、最短軌道でゴールへ収束させることができた (Fig. 11)。

軌道の最適性

本論文で提案した手法はいずれも、並進運動を一直線の最短軌道に拘束し、回転運動は拘束せずに視野を確保する役割をまかせている。回転も含めた軌道の最適性を示すために、Fig. 12 に運動した距離とゴールまでの距離の推移を示す。cr1が従来の画像ベース法で行列  $L$  の真の値を用いたとき、cr1gは行列

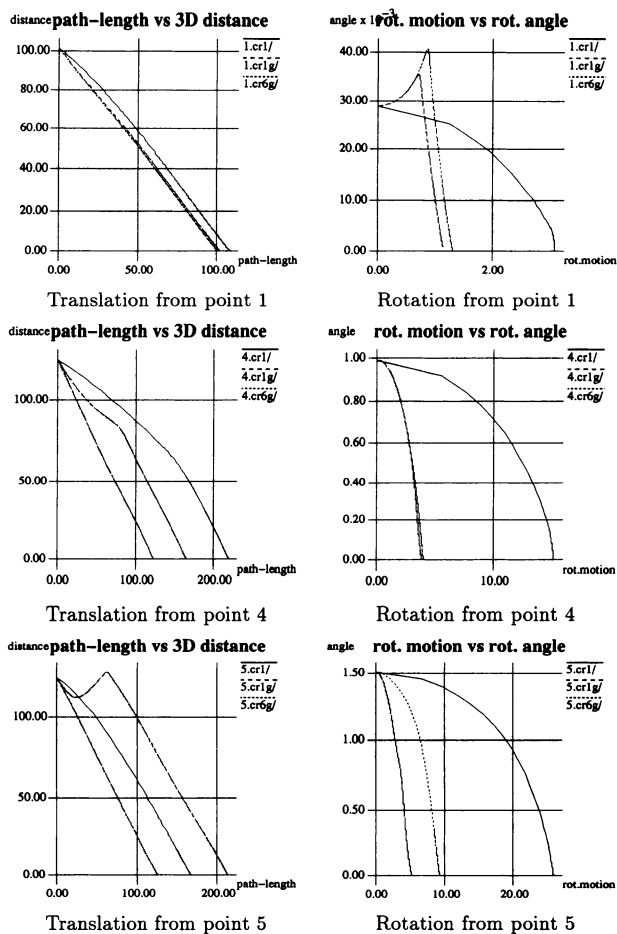


Fig. 12 Comparison of the motion optimality

$L$  をゴール位置の値で近似したとき、cr6gは Essential matrix を用いた直線軌道制御の手法で行列  $L$  をゴール位置の値で近似した場合である。

本手法では並進軌道は直線であるので、当然、最短になっている。一方、回転にその分の負担がかかっていることが予想されるが、前述の運動視差の性質により、回転にもさほどの無駄な運動は見られない。したがって、回転も含めた全運動を考える上でも無駄のない軌道に制御できていると言える。

6. 両手法の対比

以上に、並進と回転の運動を非干渉化する制御手法を二つ示した。Fig. 7 と Fig. 10 に示したように、実験では、両手法とも同程度の有効性を見せているが、それぞれ次のように異なる利点を持つ。

まず、最初の手法は、対象点が平面上にあるという条件のもとでのみ有効であるが、最低で4点の対応点があれば計算ができる。後者での、行列  $E$  の算出や分解には多くの手法が研究されているが、簡便な計算法では最低8点の対応点を必要とする。この計算は、一般にノイズに対して不安定であることが指摘されている [7]。また、前者では、回転成分と並進成分の和として Homography 行列が得られ、その両者を分解する。一方、

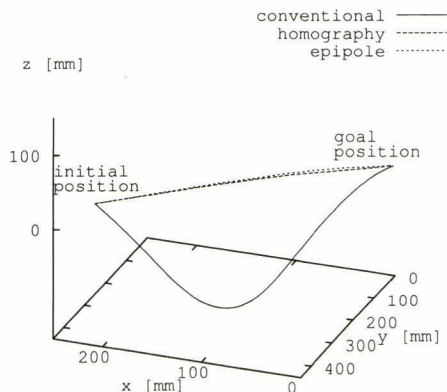


Fig. 13 Camera motion paths generated by the three methods

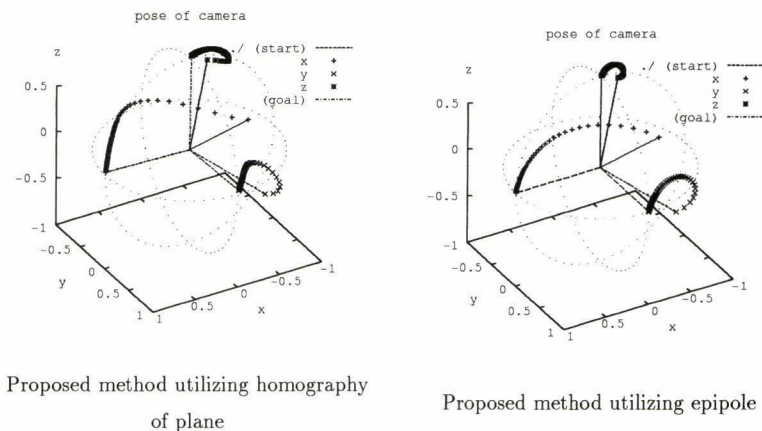


Fig. 14 Camera pose transitions

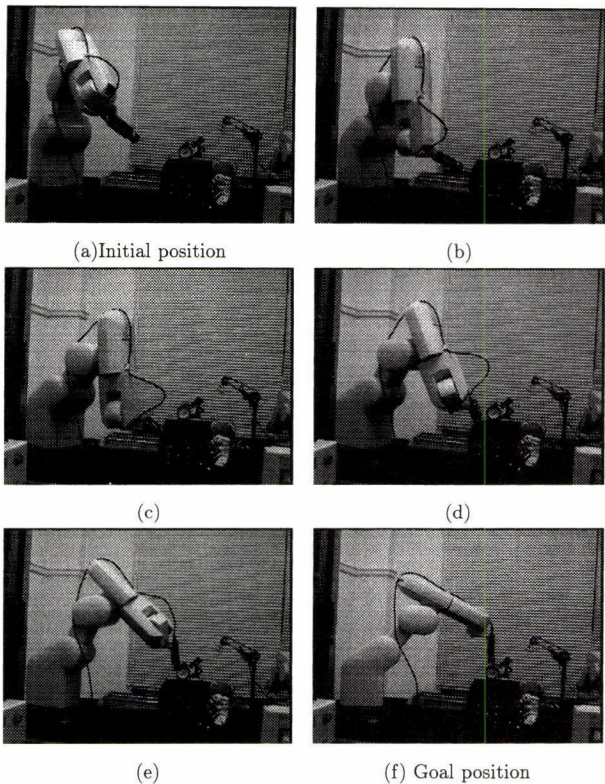


Fig. 15 Motion of the robot controlled by the conventional image-based method

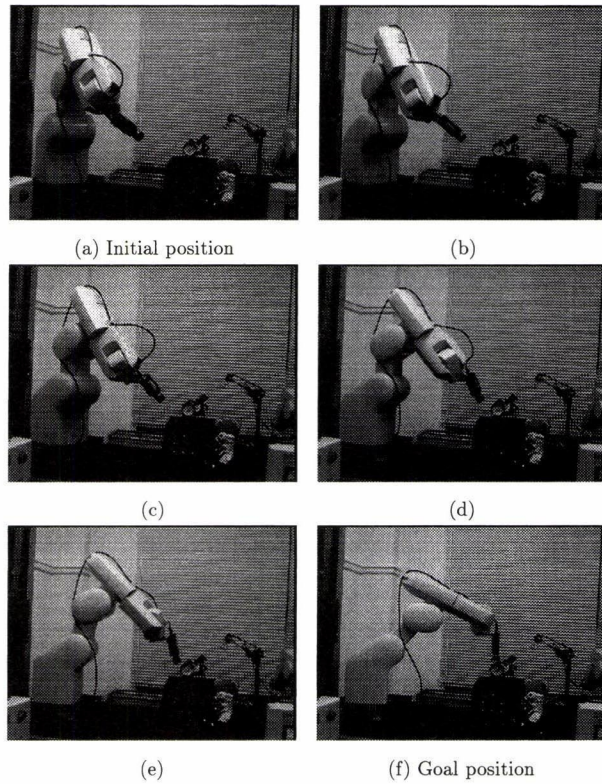


Fig. 16 Motion of the robot controlled using the Homography

後者では、回転成分と並進成分の積として Essential 行列が得られ、それを分解する。数値的には、当然、和の分解の方が積の分解より安定であることから、このことが言える。

前者は対象が平面上にあるという条件が課せられ、応用が限定されてしまうが、これを対象についての知識であると解釈すれば、その分だけ計算上優位であるとも考えられるということである。

Fig. 13 に、同一の初期位置からの三つの制御法でのロボッ

トの位置の変化の軌跡を示す。また、Fig. 14 に、提案手法での姿勢（回転）の変化を示す。提案手法では、最適な回転運動得ることについては考えていないにもかかわらず、滑らかな変化を得ていることが分かる。

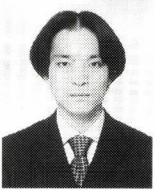
Fig. 15, および、Fig. 16 に、それぞれ、従来手法と Homography を利用した制御によるロボットハンドの動きの様子の系列を示す。従来手法では、ハンドが無駄な動きをした後にゴールへ達しているのに対して、提案手法では、初期位置から直線上をハンドの先端が移動してゴール位置へ向かう様子が分

かる。

## 7. ま と め

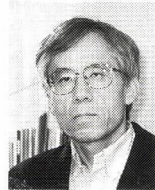
本論文では、まず、従来の画像ベース制御における軌道生成の問題について考察した。軌道が最適軌道に比べて大きく曲がってしまう原因として、回転運動と並進運動の干渉をあげ、制御の非干渉化の必要性を示した。そして、非干渉化と軌道の最適化を行う手法として、現在位置とゴール位置での2枚の画像の間に成り立つ Homography やエピポラ条件を利用し、直線軌道を生成する制御則を提案した。

並進方向に拘束をつけることは、画像の誤差を並進分と回転分に分けて独立に運動を計算していることに相当する。今後、並進方向をエピ極として画像上で運動の拘束を考え、カメラパラメータやハンド・アイ・キャリブレーションの誤差に対しても頑強な手法の研究を行いたい。



石山 塁 (Rui Ishiyama)

1974年3月27日生。1998年、東京大学大学院計数工学専攻修士課程修了。同年、日本電気(株)入社。C&Cメディア研究所にて、パターン認識の研究に従事。  
(日本ロボット学会正会員)



出口光一郎 (Koichiro Deguchi)

1948年5月9日生。1976年、東京大学大学院修士課程修了(計数工学)。同年より東京大学工学部助手、講師を経て、1984年、山形大学工学部情報工学科助教授、1988年、東京大学工学部計数工学科助教授、1998年、東北大学情報科学研究科教授、東京大学工学系研究科教授併任、現在に至る。この間、1991~1992年、米国ワシントン大学客員準教授。コンピュータビジョン、画像計測、並列コンピュータの研究に従事。情報処理学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会、形の科学会、IEEEなどの会員。  
(日本ロボット学会正会員)

## 参 考 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 Rives, P.: “A New Approach to Visual Servoing in Robotics,” IEEE Trans. Robotics Automation, vol.8, no.3, pp.313-326, 1992.
- [3] Hosoda, K. and Asada, M.: “Versatile Visual Servoing without Knowledge of True Jacobian,” Proc. IROS'94, pp.186-193, 1994.
- [4] 遠藤ほか: “予見制御による視覚軌道追従制御法”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.4, pp.565-572, 1997.
- [5] Faugeras, O. and Lustman, F.: “Motion and Structure from Motion in a Piecewise Planar Environment,” INRIA Technical Report, no.856, 1988.
- [6] Chaumette, F., Malis, E. and Boudet, S.: “2D 1/2 visual servoing with respect to a planar object,” pp.45-52, 1997.
- [7] 出口: “コンピュータビジョンのための幾何学(2)—ステレオの仕掛けを解き明かす—”, 情報処理学会誌, 37-7, pp.662-670, 1996.
- [8] Weng, J. and Huang, T.S.: Motion and Structure from Image Sequences. Springer-Verlag, 1993.