

未校正ステレオポインタによる視覚誘導

清水 康人[†] 佐藤 淳[†]

Visual Navigation from Uncalibrated Stereo Pointers

Yasuhito SHIMIZU[†] and Jun SATO[†]

あらまし 画像認識に基づきロボットを誘導する視覚誘導は、これまで広く研究が行われてきたが、従来の視覚誘導では、センサであるカメラを校正したり、制御対象であるロボットを校正する必要があった。しかし、カメラやロボットを正確に校正することは実際には非常に難しい。そこで、本論文ではグローバルビジョン方式の視覚誘導において、未校正のステレオカメラを用いて未校正の移動ロボットを安定に誘導する方法を提案する。まず誘導空間を射影平面と考えることにより、移動ロボットの目的地を射影平面上で特定する方法を示す。次に射影不変量を用いることにより、画像空間とロボットの制御空間との関係を直接的に求め、未校正のロボットを的確に誘導する方法を提案する。更に実機を用いた実験を行い、提案した手法の有効性を示す。

キーワード 未校正カメラ、未校正ロボット、視覚誘導、ステレオポインタ、射影不変量

1. ま え が き

カメラ画像を用いてロボットを誘導する視覚誘導においては、壁などに固定したカメラを用いるグローバルビジョン方式 [1], [2] と、ロボット自身に取り付けたカメラを用いて誘導するローカルビジョン方式 [3] ~ [6] が考えられる。

グローバルビジョン方式の視覚誘導においてある目的地へとロボットを誘導するには、環境を撮影したカメラ画像上で目標地を指示して誘導する方法がとられてきた。しかしこのような方法では一般にカメラとユーザの視点が異なるため、ユーザは実際に見たものとは大きく異なる画像をもとにロボットに指示を与えなければならず、制御しづらいなどの問題があった。このようなことから、近年ではユーザが実空間中の目的地を指や指し棒などで直接指し示すことで、ロボットを誘導する視覚誘導法が研究されている [2]。

ユーザが 3 次元空間中で指し示した位置をグローバルビジョンにより求める方法としてはステレオ法が考えられる。しかしこれまでのステレオ法ではカメラの内部及び外部パラメータを正確に校正する必要があった。更に、ステレオカメラで得られた情報をもとにロボットを誘導するには、制御対象であるロボットも校

正しなければならなかった。すなわち、回転や並進などに関して一単位の制御命令をロボットに送信したときに、ロボットがどの方向にどれだけ運動するかが既知でなければならなかった。しかし、実際にはステレオカメラやロボットを正確に校正することは非常に困難である。

これに対し、近年のコンピュータビジョン研究から、未校正のステレオカメラであっても射影的な不定性を残して 3 次元的な幾何情報を復元できることが示された [7], [8]。このような射影復元を用いたロボット誘導法 [1] も提案されたが、基礎行列の計算を必要とする射影復元は安定に行うのが非常に難しいなどの問題があった。そこで本論文では誘導空間を平面に制限し、射影平面の特性を用いることにより、ロボットもステレオカメラも未校正のまま、射影復元を行わずに視覚誘導を実現する方法を提案する。

射影復元を行わずに未校正ステレオカメラでロボット誘導を行った例として [2] がある。この研究では平面上の 4 点の射影基底を用いることにより、指し示した目標地とロボットに対する制御量の関係を直接求める方法が提案された。しかしロボットの並進運動のみが制御され、回転運動の制御を行うことができなかった。位置情報は 4 点の射影基底をもとに表現することができるが、回転に関する情報は射影基底のみでは表現できないからである。並進運動の自由度が十分に大

[†] 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

きいロボットアームではこれでも問題ないが、移動ロボットのように並進 1 自由度と回転 1 自由度しかないロボットの場合には、目的地に到達するためには、必ず回転運動と並進運動の両方を行わなくてはならないので、このままでは目的地へと制御できない。

そこで本論文では、未校正の移動ロボットを運動させて得られる平面上の 5 点の投影像をもとに、ステレオカメラの射影空間とロボットの制御空間との関係を求める方法を示す。このように、射影空間とロボットの制御空間との関係を直接求めて利用することにより、未校正のシステムでも並進運動と回転運動をともに制御することが可能となる。

以下では、まず射影不変量を用いることにより未校正のカメラ画像を正規化し、画像の射影空間とロボットの制御空間の関係を直接的に求める方法について述べる。次に、ステレオ画像を正規化することによりユーザが指し示した位置を画像中で特定する方法を示す。更に正規化された画像を用いることにより、校正されていない移動ロボットを的確に誘導する方法について述べる。最後に実機を使った実験を行い、本手法の有効性を示す。

2. 射影空間の正規化

平面 Π 上を運動する移動ロボットについて考える。この移動ロボットは平面 Π 上において 1 自由度の並進と 1 自由度の回転のみ行うことができ、それぞれの運動が制御命令 Q_τ 及び Q_θ により与えられる。

移動ロボットの運動は 3 次元空間中に設置された未校正カメラによって観測される。カメラにレンズひずみがないと仮定すると、平面 Π 上の点 $X = [X, Y]^T$ と画像上の点 $m = [u, v]^T$ の関係は射影変換行列 H によって次のように表せる。

$$\tilde{m} \sim H\tilde{X} \quad (1)$$

ここで (\sim) は斉次座標を表し (\sim) は定数倍の不定性を残して等しいことを表す。カメラが未校正なので H は未知である。ロボットを制御する上で必要なのは、一連の制御命令 $Q = [Q_\tau, Q_\theta]^T$ と画像上でのロボットの運動 Δm の関係である。

ロボットも未校正であるため制御命令とロボットの運動の関係は未知であるが、1 単位の命令はロボットに一定量の運動を起こさせると仮定する。

ここで 1 単位の回転命令と 1 単位の並進命令を 4 回ずつ交互に送る。するとロボットは円に内接する四つ

の辺を描いて運動し、その停止位置として円上に 5 点 X_i ($i = 1, \dots, 5$) を定義することができる。制御命令に対するロボットの運動は未知であるから、円に内接する 4 辺の長さ τ_0 や各辺のなす角 θ_0 は未知である。しかし、一定量の制御命令を送ると一定量の運動が発生することから、これら 4 辺の長さや互いになす角は理論上一定となる。

このロボットの運動は画像上では図 1 に示すように楕円上の 5 点 m_i ($i = 1, \dots, 5$) として観測される。もしも楕円上の m_i から円周上の X_i への変換 H が求まれば、画像点 m と平面 Π 上の点 X との関係を直接得ることができる。ここで、画像から得られる情報には定数倍の不定性が残るため、以降では X_i は単位円上に存在すると考える。以上の問題を定式化すると次のようになる。

♣ 楕円上の 5 点 m_i ($i = 1, \dots, 5$) から単位円上の 5 点 X_i ($i = 1, \dots, 5$) への射影変換のうちで、単位円上の 5 点 X_i 間の 4 辺の長さが等しくなるような射影変換 H を求めよ。

この問題は次のように射影不変量を考えることで簡単に解くことができ、かつ解がユニークであることがわかる。

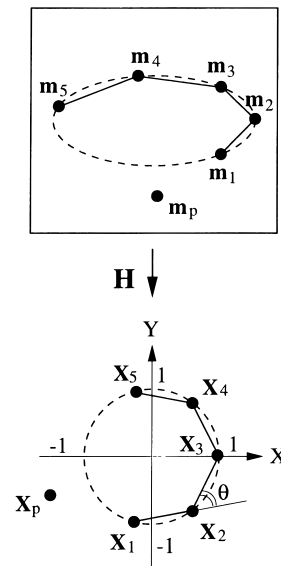


図 1 射影空間の正規化

Fig. 1 Normalisation of projective space.

H は射影変換なので, \mathbf{m}_i ($i = 1, \dots, 5$) と \mathbf{X}_i ($i = 1, \dots, 5$) から得られる射影不変量は互いに等しくなければならない. したがって, \mathbf{m}_i と \mathbf{X}_i から求まる射影不変量をそれぞれ \mathcal{I}_1 及び \mathcal{I}_2 とすると, 次の等式が成り立つ.

$$\mathcal{I}_1 = \mathcal{I}_2 = \mathcal{I} \quad (2)$$

ここで \mathcal{I}_1 と \mathcal{I}_2 は次のように表される [9].

$$\mathcal{I}_1 = \frac{|\tilde{\mathbf{m}}_1 \quad \tilde{\mathbf{m}}_2 \quad \tilde{\mathbf{m}}_4||\tilde{\mathbf{m}}_1 \quad \tilde{\mathbf{m}}_3 \quad \tilde{\mathbf{m}}_5|}{|\tilde{\mathbf{m}}_1 \quad \tilde{\mathbf{m}}_2 \quad \tilde{\mathbf{m}}_3||\tilde{\mathbf{m}}_1 \quad \tilde{\mathbf{m}}_4 \quad \tilde{\mathbf{m}}_5|} \quad (3)$$

$$\mathcal{I}_2 = \frac{|\tilde{\mathbf{X}}_1 \quad \tilde{\mathbf{X}}_2 \quad \tilde{\mathbf{X}}_4||\tilde{\mathbf{X}}_1 \quad \tilde{\mathbf{X}}_3 \quad \tilde{\mathbf{X}}_5|}{|\tilde{\mathbf{X}}_1 \quad \tilde{\mathbf{X}}_2 \quad \tilde{\mathbf{X}}_3||\tilde{\mathbf{X}}_1 \quad \tilde{\mathbf{X}}_4 \quad \tilde{\mathbf{X}}_5|} \quad (4)$$

式 (3) の $|\tilde{\mathbf{m}}_i \quad \tilde{\mathbf{m}}_j \quad \tilde{\mathbf{m}}_k|$ は三つの列ベクトル $\tilde{\mathbf{m}}_i$, $\tilde{\mathbf{m}}_j$, $\tilde{\mathbf{m}}_k$ からなる 3×3 行列の行列式を表す. $|\tilde{\mathbf{X}}_i \quad \tilde{\mathbf{X}}_j \quad \tilde{\mathbf{X}}_k|$ も同様に $\tilde{\mathbf{X}}_i$, $\tilde{\mathbf{X}}_j$, $\tilde{\mathbf{X}}_k$ から求まる行列式を表す.

\mathbf{X}_i ($i = 1, \dots, 5$) は未知であるが, これら 5 点は単位円上にありかつ隣り合う辺同士のみなす角や長さは等しい. したがって $\mathbf{X} = [1, 0]^T$ とおくと, これら 5 点は次のように表せる.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1 &= \mathbf{R}^{-2}\mathbf{X}, & \mathbf{X}_2 &= \mathbf{R}^{-1}\mathbf{X}, & \mathbf{X}_3 &= \mathbf{X}, \\ \mathbf{X}_4 &= \mathbf{R}\mathbf{X}, & \mathbf{X}_5 &= \mathbf{R}^2\mathbf{X} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで \mathbf{R} は原点を中心に角度 θ_0 の回転を発生させる 2 次元回転行列を表す. 行列 \mathbf{R} による回転の大きさはロボットの回転運動の大きさに等しいことに注意が必要である.

式 (5) を式 (4) に代入し式 (2) を用いることで, \mathcal{I} と θ_0 との関係が次のように求まる.

$$\mathcal{I} = 2(1 + \cos \theta_0) \quad (6)$$

以上より, 投影点 \mathbf{m}_i ($i = 1, \dots, 5$) が与えられると, まず式 (3) から \mathcal{I} が求まる. 次に式 (6) から θ_0 が求まり, 単位円上の \mathbf{X}_i ($i = 1, \dots, 5$) を計算することができる. このようにして, 楕円上の 5 点を単位円上の等間隔の 5 点に変換する射影変換行列 H を求めることができる. 射影変換 H は線形法により簡単に求まるが, 近年では繰返し法によりより安定に計算する方法も提案されている [10]. 射影変換 H を用いて画像を変換することで, 制御命令を基準とした空間へと画像を変換することができる. これを正規化と呼び, 画像を正規化したものを正規化空間と呼ぶことに

する. 次に示すように, 正規化空間においては未校正ロボットの制御する上で非常に重要な性質がある.

並進制御量 Q_τ と回転制御量 Q_θ を正規化空間における並進量 τ と回転量 θ に変換する次のような関数 f_τ , f_θ を考える.

$$\tau = f_\tau(Q_\tau)$$

$$\theta = f_\theta(Q_\theta)$$

正規化空間の重要な性質は Q_τ と Q_θ がともに次に示すように f_τ と f_θ に関して線形であるということである.

$$f_\tau(Q_{\tau 1} + Q_{\tau 2}) = f_\tau(Q_{\tau 1}) + f_\tau(Q_{\tau 2})$$

$$f_\theta(Q_{\theta 1} + Q_{\theta 2}) = f_\theta(Q_{\theta 1}) + f_\theta(Q_{\theta 2})$$

すなわち, 正規化空間では並進, 回転ともに線形に制御することができる. この性質を 5. の未校正ロボットの制御において用いる.

3. 正規化の一意性と不定性

図 2 に式 (6) の \mathcal{I} と θ_0 の関係を示す. この図から明らかなように, $0 \leq \theta_0 \leq \pi$ の範囲では, \mathcal{I} より θ_0 が一意に求まる. すなわち θ_0 が π ラジアン以下であれば, 正規化のための射影変換 H を一意に決定することができる.

ただし, 式 (3) に示す不変量 \mathcal{I}_1 はその分母が 0 であるとき不定となる. このような場合には回転角 θ_0 が求まらず正規化が行えない. 回転角が $0 \leq \theta_0 \leq \pi$ の範囲において不変量 \mathcal{I}_1 の分母が 0 となるのは, θ_0 が $0, \frac{\pi}{2}, \frac{2\pi}{3}, \pi$ の 4 通りの場合であり, それぞれ図 3

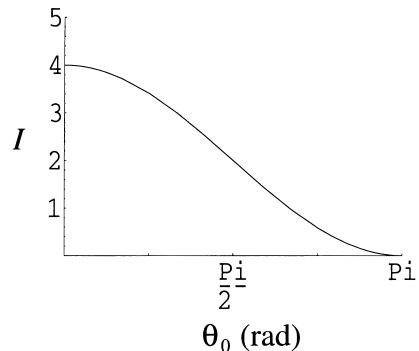


図 2 不変量 \mathcal{I} と回転角 θ_0 の関係
Fig. 2 Invariants and rotation angles.

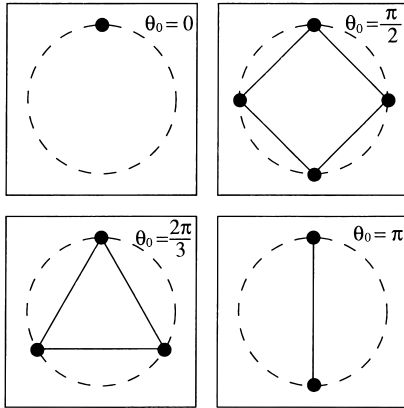


図3 正規化が不可能な4種類の運動
Fig. 3 Singular cases of normalisation.

に示すように、正規化を行うときのロボットの停止位置が、単一点、正方形上の4頂点、正三角形上の3頂点、及び2点上で重なっている場合である。

このような特異な場合を除けば、前章で述べたように不変量を用いて正規化を行うことができる。

4. 未校正ステレオポイント

次に正規化空間を利用してユーザの指し示した点を求める方法について考える。図4に示すように1組のステレオ画像が得られているとき、各々の画像を正規化空間に変換する射影変換行列 H_i ($i = 1, 2$) を計算する。ステレオ画像を H_i ($i = 1, 2$) を用いて変換すると、図4に示すような正規化ステレオ画像が得られるが、3次元空間中において平面 Π 上に存在する点はこの正規化ステレオ画像においては同じ点に投影される。また、射影変換のもとでは直線性は保存されるので、指し棒で指し示された点は正規化ステレオ画像上においても指し棒の像を延長した直線上に存在する。したがって、図4に示すように正規化ステレオ画像における二つの指し棒の像を延長した交点（図中の白丸）が実際にユーザが指し示した点となる。

このようにステレオカメラが未校正であっても正規化空間を用いることによりユーザの指示した点を求めることが可能となる。ただし、このようにして得られる目的地の情報はあくまでも正規化空間における情報であることに注意が必要である。

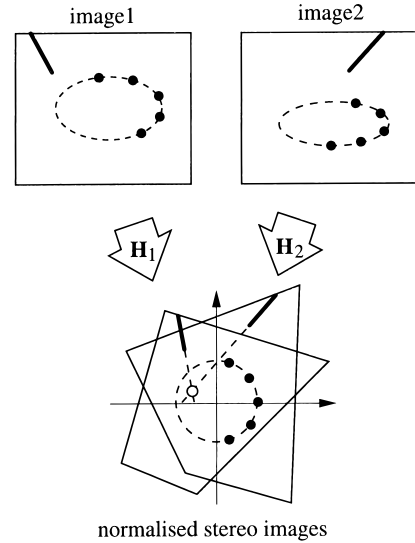


図4 ステレオ画像の正規化。ステレオ画像上の5点（黒丸）から正規化ステレオ画像が計算できる。指し棒によって指された目的地は正規化ステレオ画像における指し棒の像の交点（白丸）として求まる。
Fig. 4 Normalisation of stereo images.

5. 未校正ロボットの視覚誘導

次に、正規化空間において指し示された目的地へと未校正のロボットを制御する方法について考える。

先に述べた画像の正規化において、1単位の並進命令を送ったときにロボットが正規化空間上で τ_0 だけ並進し、1単位の回転命令を送ったときに θ_0 だけ回転したとする。2. で述べたように、正規化空間では回転と並進の両方が線形に制御できる。したがって、正規化空間において現在ロボットが向いている進行方向と目的地の方向との差 θ を用いて、回転のフィードバック制御を次のように実現することができる。

$$Q_\theta = K_\theta \frac{\theta}{\theta_0} \quad (7)$$

ここで K_θ は回転制御のフィードバックゲインを表す。

同様に正規化空間における現在の位置と目的地のとの距離 τ を用いて、並進のフィードバック制御が次のように実現できる。

$$Q_\tau = K_\tau \frac{\tau}{\tau_0} \quad (8)$$

ここで K_τ は並進のフィードバックゲインを表す。

θ と τ が十分に小さくなるまでこのようなフィードバック制御を繰り返すことで、ロボットが未校正で

あっても指し棒で指し示された目的地へと的確に誘導することができる。

6. 実験結果

次に未校正のステレオポインタを用いた未校正ロボットの誘導実験の結果を示す。本実験では図 5 に示すように、指し棒で指し示された位置へ移動ロボットを誘導する（ただし、この図では説明のためにカメラの高さや間隔などを実際の実験時の配置より小さくしてある）。

移動ロボットには市販のラジコン戦車を用いた。このロボットは前方への並進運動と左右への回転運動を行うことができる。2 台のカメラの相対的な位置や姿勢、内部パラメータ等は一切不明とした。また、並進コマンドと回転コマンドを実行したときのロボットの運動の量も未知である。実際にはこれら二つのカメラを床面から約 2 m の高さに設置し、二つのカメラの間隔を 2.5 m 程度とした。ロボットの運動開始位置とカメラとの距離は 4 m 程度である。実験時にはロボットの運動が画像中にできるだけ大きく投影されるよう、カメラのズームを適当に調節している。リアルタイム性を出すために入力画像のサイズは 320×240 とした。

ロボットには進行方向を示すマーカなど特殊な指標を取り付けていないため、画像上でのロボットの進行方向はこのままではわからない。そこで、並進制御と回転制御を必ず交互に行うこととし、並進時におけるロボットの移動ベクトルを画像上でのロボットの進行方向として用いた。

誘導を行う前に、ステレオポインタにおける射影空間と移動ロボットの制御空間との関係を正規化により

求めた。図 6 (a), (b) の白点は、ロボットに 1 単位の回転命令と並進命令を交互に 4 回送って得られたロボット中心の 5 点である。2. に述べた方法によりこれら 5 点から射影変換 H を求めた。射影変換 H をもとに、図 6 (a), (b) より正規化空間を求めた結果を図 6 (c) に示す。この図の白点は図 6 (a), (b) の 5 点を変換した点であり、それぞれが円上の同一の 5 点に変換されていることがわかる。また、2 本の黒線は指し棒に対し直線を当てはめた結果であり、黒点はこれらの直線の交点として目的地を求めた結果である。図中の本棚の角がほぼ直角になっていることから正しく正規化されていることがわかる。なお、ロボットや差し棒の抽出は、これらが存在しない状態での画像との差分により行った。

このようにして求めた正規化空間においてロボット中心と目的地が一致するようフィードバック制御を行った。以下では、ステレオポインタでの誘導実験と精度評価について述べる。

6.1 誘導実験

まず、移動ロボットを連続して誘導する実験を行った。移動ロボットを目的地 x_1 へ誘導し到着した後に、目的地 x_2 へ誘導したときの誘導結果を図 7 に示す。この図は正規化ステレオ画像に移動ロボットが動いた

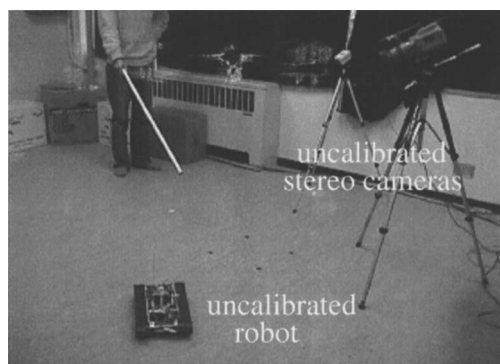


図 5 ステレオポインタによる誘導の様子
Fig. 5 Visual navigation from stereo pointers.

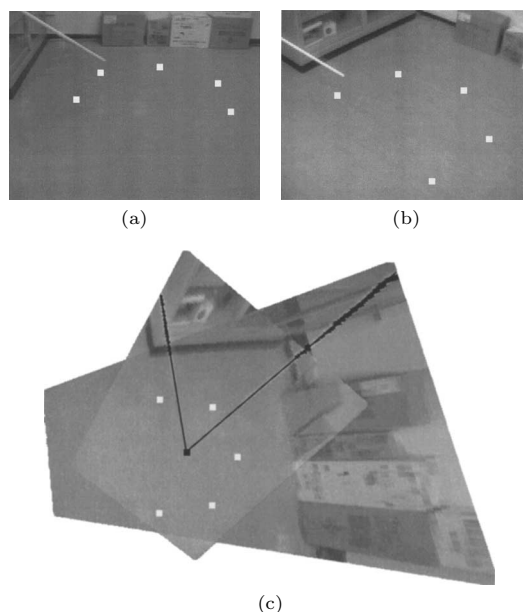


図 6 円運動による正規化空間の計算
Fig. 6 Computation of normalised space.

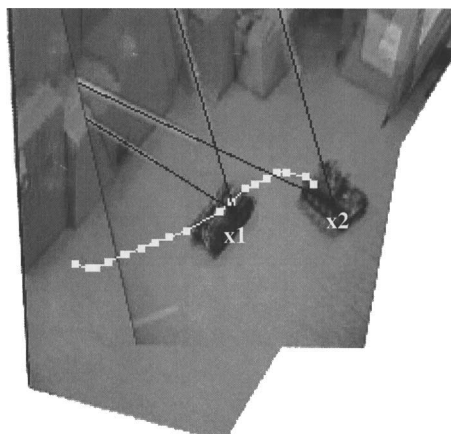


図7 移動ロボットの誘導結果

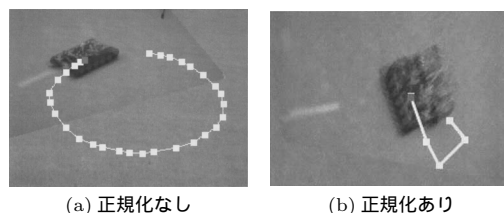
Fig. 7 Results from the proposed visual navigation.

軌跡を白線で示したものであり、移動ロボットが x_1 に到着した時点のものと、 x_2 に到着した時点のものを重ねて表示してある。軌跡から移動ロボットが的確に目的地に向かって移動し、到達していることがわかる。この実験では移動ロボットが到着した後に目的地を変化させたが、目的地への誘導はリアルタイムで行われているので、実際には移動ロボットが到達する以前に目的地を変更してもよい。

正規化の有無による誘導性能の違いを実験により調べた結果を図8に示す。(a)は正規化を行わなかった誘導の結果であり、(b)は正規化を行った誘導の結果である。同じ場所と姿勢から同じ目的地へと誘導を行ったときの軌跡が図中の白線である。これら二つの制御の差が出やすいように目的地は進行方向のほぼ真後ろとした。

正規化を行わない場合には画像情報とロボット制御量との関係を射影幾何的に求めなければならないが、回転運動を射影幾何的に扱うことはできないため、この場合には回転制御量に関する指標が得られない。したがって(a)ではある一定の微小回転と並進を繰り返さなければならない(並進は、前述のとおりロボットの画像上での進行方向を得るために行っている)。この結果(a)では非常に無駄の多い誘導となっている。また、回転の制御量を大きくすると制御が収束しないなどの問題が発生する。

これに対して(b)では正規化を行っているので目的地方向への回転制御量が適切に求まり、一度前進をして進行方向の情報を得た後に大きく回転をしてすぐに



(a) 正規化なし

(b) 正規化あり

図8 正規化の有無による軌跡の変化

Fig. 8 Comparison of trajectories in the normalised and unnormalised images.

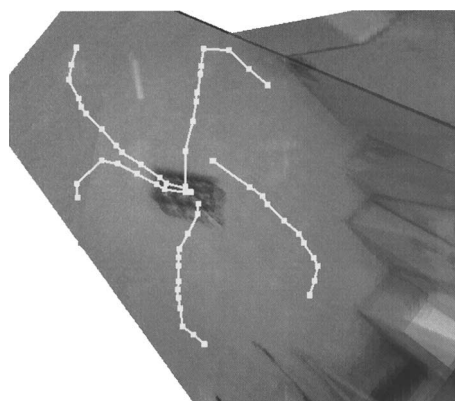


図9 同一地点への誘導結果

Fig. 9 Visual navigation from various initial positions and orientations.

目的地に到達している。この結果からわかるように正規化を行うことで回転の制御量が正確に求まり、安定で効率の良い誘導をすることが可能となる。

次に指し棒を固定して、様々な開始位置及び姿勢から同一の目的地へと誘導を行った。この結果を図9に示す。図中の白線は移動ロボットの軌跡を表す。開始地点と姿勢をどのように選んでも、移動ロボットが的確に目的地へ到達していることがわかる。

6.2 誘導の精度

次に6.1と同一の条件で誘導の開始位置と姿勢を様々に変化させ、移動ロボットが目的地からどれだけ離れた場所で停止するかを床面上で測定した。図10にこの結果を示す。図の黒点は移動ロボットの停止位置を表した円はこれらの点から計算した 3σ (σ は標準偏差) の不確定領域を示す。誘導の精度が粗いのは、本実験で用いたロボットが一定量の制御コマンドに対して一定量の運動を行わないことや、誘導時にロボットの位置を画像上のロボットの重心で得ているが、ロボットに高さがあるため正確な位置が得られないなど

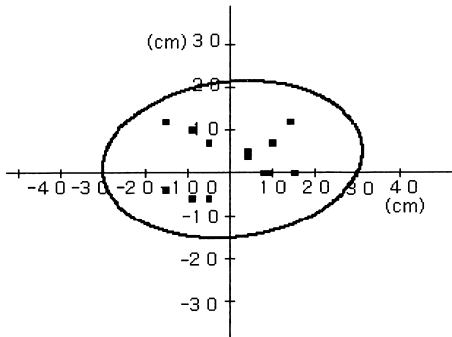


図 10 誘導の精度
Fig. 10 Accuracy of navigation.

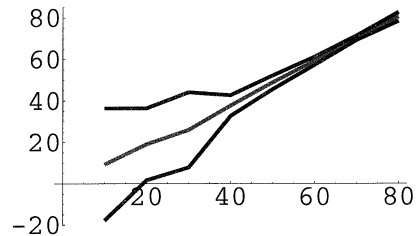
の原因が考えられる．ロボットの高さの影響を少なくするためには，ロボットを薄型にするほかに，ロボットに複数個のマーカを取り付け，これらのトラッキング結果をもとに床面上の重心位置を推定したり，ロボットの 3 次元モデルを当てはめながら床面上の重心位置を計算するなどの方法が考えられる．

6.3 正規化の安定性

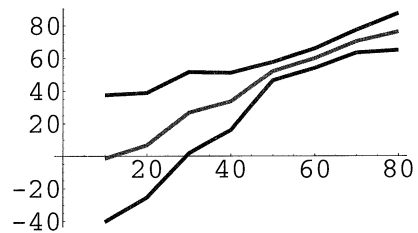
次に，不変量を用いた画像の正規化が，画像ノイズやロボットの運動誤差の影響をどの程度受けるかを評価した．ロボットの回転角や運動回数などの条件などを様々に変化させた場合の正規化の理論的な精度を明らかにするために，ここでは現実の状況を模擬したシミュレーション実験により評価した．

正規化では，1 単位の回転と並進を 4 回繰り返して円上の 5 点の投影像を画像上で求め，これらをもとに不変量を用いてもともと与えた回転角を推定する．与える回転角が小さい場合には運動が直線状となり，画像ノイズやロボットの運動誤差に対して回転角の推定が不安定になることが考えられる．そこで，ランダムな画像誤差とランダムなロボット運動誤差を加えながら，与えた回転角の大きさによって不変量から求まる回転角の安定性がどの程度変化するかを調べた．

実機の実験とほぼ同じ条件とするために，カメラの高さは 2 m とし，ロボットの運動開始位置とカメラとの距離は 3.5 m とした．正規化のためのロボット運動は，並進の大きさを 1 回当たり 1 m とし，回転の大きさは 10° から 80° まで 10° 刻みで変化させた．ロボットの運動誤差を考慮するため，並進運動時には標準偏差 1 cm と 5 cm のランダムな並進誤差を与えた．また回転運動時には，標準偏差が与えた回転角の 1% 及び 5% となるようなランダムな回転誤差を加えた．



(a) 運動誤差 1% の場合



(b) 運動誤差 5% の場合

図 11 回転角と正規化の安定性
Fig. 11 Stability of normalisations.

この運動をカメラに投影するのであるが，正規化におけるロボットの運動は画像中でできるだけ大きく投影されている方がよい．実機による実験はできるだけこの条件となるようカメラのズームを調節している．そこで，このシミュレーション実験でもロボットの運動が画像の大きさに対して 80% の大きさとなるよう仮想的なズームをかけて投影した．そして投影像に対して標準偏差 1 画素のランダム画像ノイズを加えた．

このような条件のもとでそれぞれの回転角に関して 100 回正規化を繰り返し，求めた回転角の平均値と不確定領域を図 11 に示す．(a) はロボット運動の誤差が 1% の場合であり，(b) は 5% の場合である．それぞれにおいて，横軸は与えた回転角であり，縦軸は正規化により求めた回転角を表す．中央の線は平均値であり，上下の線は 1σ の不確定領域の範囲を表す．図より，与える回転角が小さい場合には，不変量による回転角計算は不安定であるが，与える角度が大きくなるにつれ計算の安定性が急激に増すことがわかる．しかし，ある一定の回転角以上では精度が向上しない．これはもともとのロボットの運動に誤差が存在するためと考えられる．また， 80° 付近で再び安定性が劣化するのは，3. で述べたとおり，正規化には 90° において特異点が存在するため，この付近では正規化の計算が不安定となるためである．

次に，回転と並進の繰返し数を増やして，5 点より

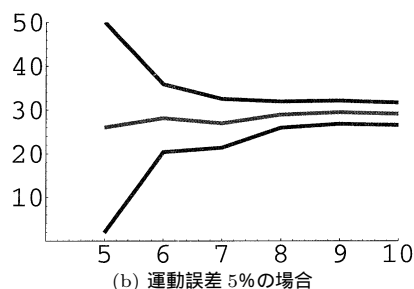
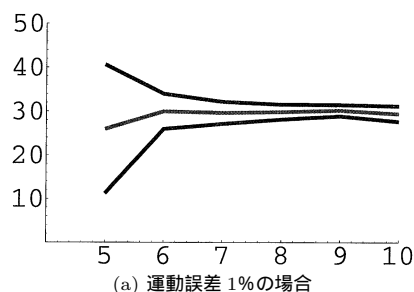


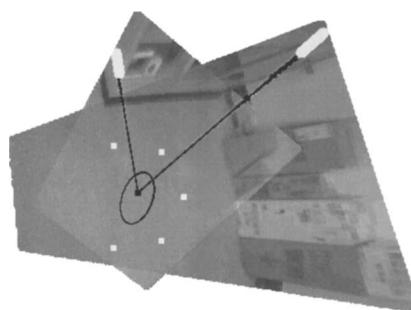
図 12 点の数と正規化の安定性
Fig. 12 Stability of normalisations.

多くの点を用いて正規化を行った場合の安定性を調べた．正規化に用いたロボットの回転角は 30° であり，先と同様にロボット運動には標準偏差 1% と 5% の誤差を加え，画像には標準偏差 1 画素の画像ノイズを乗せた．回転と並進を繰り返して得られた点の中から可能なすべての 5 点の組合せを選んで不変量により角度計算を行い最小 2 乗法により回転角を推定した．このような正規化を 100 回繰り返して，推定した回転角の平均値と不確定領域を図 12 に示す．(a) はロボット運動の誤差が 1% の場合であり，(b) は 5% の場合である．中央の線は推定した回転角の平均値であり，上下の線は 1σ の不確定領域である．図より，回転と並進の繰り返し数を少し多くするだけで，不変量による回転角計算が大幅に安定化することがわかる．

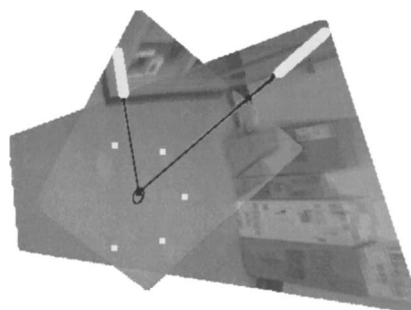
以上より，提案した正規化は，ロボットの回転角を大きく取り，運動回数を増やすことで，安定した計算が行えることがわかる．

6.4 ポインタの安定性

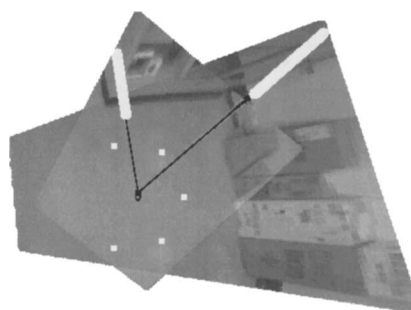
次に，ステレオポイントの安定性について評価する．ステレオポイントは，指し棒の画像上での長さが長いほど，その位置決めが安定する．そこで，指し棒の画像上での長さとしてステレオポイントによる位置決めの安定性の関係を調べた．図 6 に示した状況において，指し棒の画像上での長さを 25 画素から 100 画素まで 25



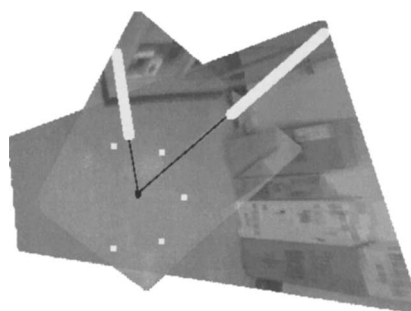
(a) 指し棒の大きさが 25 画素の場合



(b) 指し棒の大きさが 50 画素の場合



(c) 指し棒の大きさが 75 画素の場合



(d) 指し棒の大きさが 100 画素の場合

図 13 ステレオポイントの安定性
Fig. 13 Stability of stereo pointers.

画素きざみで変化させ，指し棒の像に対して標準偏差 1 画素の画像ノイズを乗せながら，当てはめた直線の

交点を求めた．それぞれの長さにおいて 100 回計算を行い，得られた位置に対する不確定領域を計算した結果を図 13 に示す．(a)，(b)，(c)，(d) は，指し棒の像の大きさがそれぞれ 25 画素，50 画素，75 画素，100 画素の場合の結果である．図中の白い太線は評価に用いた指し棒の長さを表しており，楕円は求めた位置に対する 3σ の不確定領域を表している．これらの図より，指し棒の大きさが 75 画素以上ではステレオポイントによる位置決め標準偏差がほぼ 1 画素以下となり，十分な安定性が得られることがわかる．

7. む す び

本研究では，未校正のステレオポイントを使って指し示した位置に未校正の移動ロボットを視覚誘導する方法を提案した．

まず，ロボットに回転命令と並進命令を 4 回送ることにより，未校正画像の射影空間と未校正ロボットの制御空間との関係を直接的に求めて画像を正規化する方法を示した．

次に，未校正のステレオ画像を射影基底をもとに統合することにより，目的地が二つの指し棒の像を延長したときの交点として求まることを示した．

このようにして求めた正規化空間において，指し示した位置に対するビジュアルフィードバック制御をかけることにより，ロボットを的確に目的地へと誘導できることを示した．実際に，移動ロボットをリアルタイムに誘導する実験を行い，提案した方法の有効性を確認した．

本論文で提案した画像の正規化はロボットの制御命令を基準とした一種のセルフキャリブレーションと考えることもできる．この正規化をいかに安定に行うかは今後更に検討が必要である．

謝辞 本研究は財団法人堀情報科学振興財団の助成を受けて行った．

文 献

- [1] 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．
- [2] N.J. Hollinghurst and R. Cipolla，“Uncalibrated stereo hand-eye coordination,” Image and Vision Computing, vol.12, no.3, pp.187-192, 1994.
- [3] 出口光一郎，ロボットビジョンの基礎，コロナ社，2000．
- [4] R. Basri, E. Rivlin, and I. Shimshoni，“Visual homing: Surfing on the epipoles,” Proc. 6th International Conference on Computer Vision, pp.863-869, Bombay, India, 1998.

- [5] P. Beardsley, I.D. Reid, A. Zisserman, and D.W. Murray，“Active visual navigation using non-metric structure,” Proc. 5th International Conference on Computer Vision, pp.58-64, Cambridge, USA, 1995.
 - [6] 佐藤岳晴，佐藤 淳，“未校正カメラによる未校正ロボットの視覚サーボ”，信学論 (D-II)，vol.J83-D-II, no.4, pp.1110-1118, April 2000.
 - [7] O.D. Faugeras，“What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?,” Proc. 2nd European Conference on Computer Vision, pp.563-578, Santa Margherita, Italy, 1992.
 - [8] R.I. Hartley, R. Gupta, and T. Chang，“Stereo from uncalibrated cameras,” Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.761-764, 1992.
 - [9] 佐藤 淳，コンピュータビジョン—視覚の幾何学，コロナ社，1999．
 - [10] K. Kanatani，“Optimal homography computation with a reliability measure,” Proc. Workshop on Machine Vision Applications, pp.426-429, 1998.
- (平成 12 年 8 月 7 日受付，13 年 5 月 23 日再受付)



清水 康人 (学生員)

平 11 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，視覚誘導の研究に従事．



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，幾何学的不変量，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)など．BMVC'94 最優秀科学論文賞，BMVC'97 最優秀科学論文賞など受賞．情報処理学会会員．