

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

名古屋工業大学 電気情報工学科

〒 466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

yasuhito@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

あらまし： 今後世界的に高齢化が進むと、人々の手足の代わりとなって作業をする知能ロボットの必要性がますます大きくなる。このような知能ロボットでは如何に簡単な操作で安定な誘導を行なえるかが重要である。

従来のグローバルカメラ方式での視覚誘導ではステレオ法を用いるために、カメラの内部、外部パラメータが校正されている必要があったが、正確に校正を行なうことは非常に困難である。

そこで、本稿では未校正の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指定する方法を提案する。次に射影不変量を用いることにより、ロボットの制御空間と誘導空間との関係を求め、未校正のロボットを的確に誘導する方法を提案する。さらに実機を用いた実験を行な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, 視覚誘導, ステレオ, 射影変換

Visual Navigation from Uncalibrated Stereo Pointer

Yasuhito Shimizu Jun Sato

Nagoya Institute of Technology

Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, JAPAN

yasuhito@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

Abstract: In this paper we propose a method for navigating robots by pointing specific positions in the 3D space. In previous work of visual navigation, calibrated cameras and calibrated robots are used. However, the calibration of cameras and robots are in fact very difficult.

In this paper, we propose a method which enables us to navigate uncalibrated robots from uncalibrated cameras. We show that, even if the cameras are uncalibrated, it is possible to identify goal positions by using the projective bases. We also show that, even if the robots are uncalibrated, it is possible to derive the relationship between the control space and the real space. The proposed method is implemented and tested by navigating a mobile robot.

Keywords: visual navigation, uncalibrated cameras, stereo, projective transformation.

1 はじめに

今後世界的に高齢化が進むと、人々の手足の代わりとなって作業をする移動ロボットの必要性がますます大きくなる。従来の移動ロボットの視覚誘導では、ロボットを写しているカメラの画像をコンピュータに取り込み、ディスプレイ上で移動ロボットへの指示を与えるという手法が考えられてきた。しかし一般にカメラとユーザの視点は異なるため、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指示を与えることが求められる。そこで本稿では、ユーザが実空間中の目的地を指や棒などで直接指し示すことで、ロボットを誘導する手法を提案する。

このような視覚誘導の方式として、複数のカメラを壁などに取り付け得られるステレオ画像をもとに視野内の移動ロボットを誘導するグローバルビジョン方式が考えられる。これまでのグローバルビジョン方式の視覚誘導では3次元復元を通して移動ロボットの誘導空間を構築する方式が取られて来た。

ユーザが3次元空間中で指し示した位置を求める方法としてはステレオ法などが用いられている。しかしこれまでのステレオ法ではカメラの内部および外部パラメータがともに校正されていることが必要であった。さらに、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場合には、誘導対象であるロボットも校正されていなければならない。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。近年の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形状が復元できることが示された [5, 6]。このような射影復元を通してロボットを誘導する方法も提案されている [4]。しかし射影復元はノイズに対し弱く安定に復元するのは難しい。そこで本稿では誘導空間を平面に制限し、射影平面の特性を利用することにより、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なった例として [7] があるが、ロボットの誘導に画像上で指し示した点とロボットの投影像のずれを最小化する方法が取られていたため、ロボットが指し示した位置に収束するまでに多くの繰り返しを要していた。この研究から明らかかなように、未校正のステレオカメラから得ら

れる情報により未校正のロボットを誘導するには、未校正カメラから得られる射影的情報から如何にしてロボットの制御空間における情報を得るかがポイントとなる。本稿では未校正の移動ロボットに円運動をさせて得られる投影像をもとに射影空間と制御空間の関係を求める方法を示す。このように、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直接求めて利用することにより、未校正のシステムでも効率良く誘導することが可能となる。

以下では、まず射影基底を用いることで未校正なステレオカメラの画像から移動ロボットの目的地を射影平面上で指定する方法を述べる。次に未校正カメラから得られる射影的情報をもとに、如何にして校正されていない移動ロボットを誘導するかを述べる。最後に実機を使った実験を行ない本手法の有効性を示す。

2 未校正ステレオポインタ

従来のステレオ法では、焦点距離などの内部パラメータや2つのカメラ間の位置、姿勢などの外部パラメータが既知でなければならなかった。本節では未校正のステレオカメラにより空間内の目的地を指定する方法について述べる。

指などを使って指し示すことにより空間中の一点を指定するという事は、指し示した方向の直線が空間中の平面や曲面と交差した点を指定していることになる。ここで注意すべきことは、指し示した方向のみを求めても点を指定することはできず、対象となる平面や曲面が存在して初めて一点を指定できるという点である。そこで、本研究では対象となる平面上の射影基底を考え、2つのカメラから得られた画像をこれらの射影基底をもとに統合する。

2.1 空間中の平面の投影

まず図1に示すように、3次元空間中にある平面 Π を考え、この平面 Π から画像面 π への投影を考える。 Π 上の点 $\mathbf{X} = [X, Y]^T$ が画像面 π 上で $\mathbf{m} = [u, v]^T$ に投影されているとする。すると、この投影は平面射影変換を使って以下のように表せる。

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

ここでは、 \mathbf{P} は 3×3 で自由度8の平面射影変換である。また、 $(\tilde{\cdot})$ は齊次座標を表し、 (\sim) は定数倍の不定性を除いて等しいことを表す。

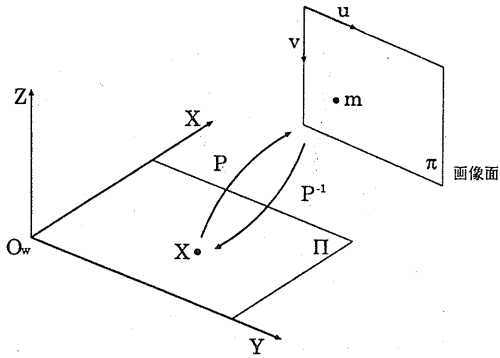


図 1: 空間中の平面から画像面への変換

以上の議論は、空間中の平面をワールド座標で $Z = 0$ と仮定しているが、このように仮定しても一般性を失うことはない。空間中の他の一般の平面においても、対象とする平面上に X 軸, Y 軸がのるように座標系を取ることにより上記の関係が成り立つ。またこの変換は可逆変換であり、 P の逆行列を P^{-1} とすると、 P^{-1} は画像面から空間中の平面への変換となる。

2.2 画像平面間の変換

次に図 2 に示すように、カメラが 2 つある場合を考えよう。ある空間中の平面 Π から最初の画像面 π への射影変換行列を P_π 、同じ平面 Π から第 2 の画像面 μ への射影変換行列を P_μ とすると、 Π 上の点 X の投影は以下のように表せる。

$$\tilde{m}_\pi \sim P_\pi \tilde{X} \quad (2)$$

$$\tilde{m}_\mu \sim P_\mu \tilde{X} \quad (3)$$

ここで m_π , m_μ はそれぞれ π , μ における投影像である。

(2), (3) より X を消去すると、 m_π と m_μ には次の平面射影変換の関係があることがわかる [2, 3]。

$$\tilde{m}_\mu \sim P \tilde{m}_\pi \quad (4)$$

ここで、 $P = P_\mu P_\pi^{-1}$ である。

P は 3×3 で 9 個の要素を持つが、定数倍の不定性を持つので自由度は 8 である。1 組の対応点を与えられると、式 (4) より 2 つの拘束式が得られる。従って、画像面 π と μ の間の 4 組の対応点が

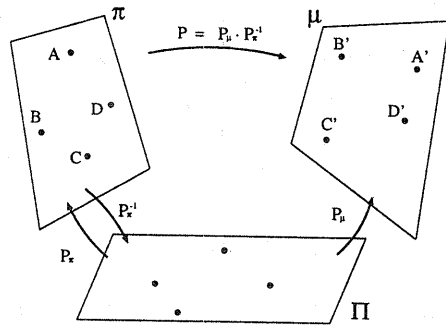


図 2: 画像面から画像面への変換

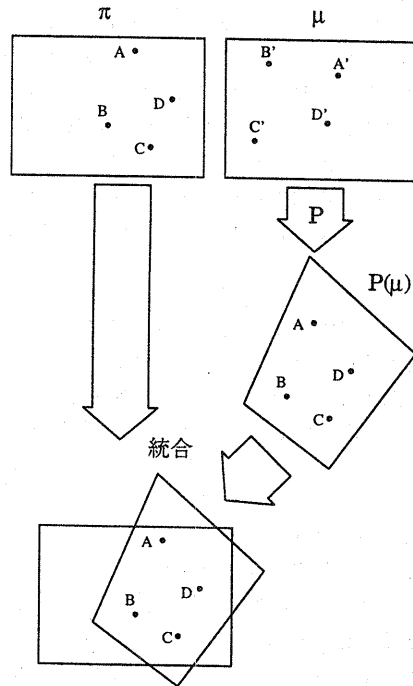


図 3: 画像の統合

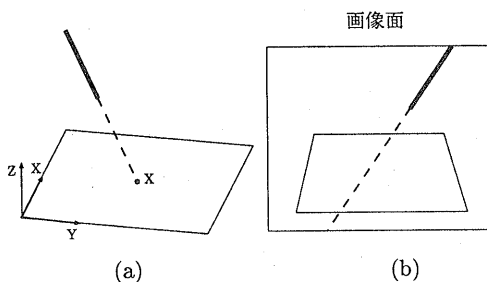


図 4: 棒の画像への投影

与えられれば、 P を求めることができる。平面射影変換は線形法により簡単に求まるが [1]，繰り返し法により最適に求める方法なども提案されている [8]。

2.3 実画像の統合

実際に画像面を統合する場合、統合する画像の座標を基準となる平面に変換する。この基準平面は投射された空間中の平面である必要はなく画像面に取ってもよい。いま、画像面 π と画像面 μ を統合するとして、基準平面を画像面 π にとると、この統合は図 3 のようになる。まず、画像面の基準平面への変換行列 P を 4 組の対応点から求める。それから P を用いて画像面を基準平面に射影変換する。変換した画像を基準平面に重ねれば統合ができる。このとき図 2 に示す統合の対象である平面 Π 上の点は正しく重なり、 Π 上にはない点はずれて現れる。

2.4 未校正ステレオポイント

次に統合画像を使って未校正のステレオカメラで特定の位置をポインティングする方法を述べる。まず、図 4(a) のように、棒などが床面上の一点 X を指しているとする。カメラにはこの様子が図 4(b) のように投影される。1 つのカメラ画像からは X が画像に投影された点 m を一意に特定することはできないが、画像内の棒の延長線上のどこかに m が存在する。同時に別の角度から撮ったカメラ画像があるとすると、2 つの画像を先節で述べた方法で統合すると図 5 のようになる。この統合画像では床面上の点は正しく統合されているので、床面上の点の像 m_π, m_μ は一点で重なる。またこの統合で行なう射影変換では直線性が保たれるため、棒の延長線は統合後も m を通る直線である。統合画像での m は 2 本の棒の延長線上にあるので、この 2 本の延長線の交点に m が存在する。

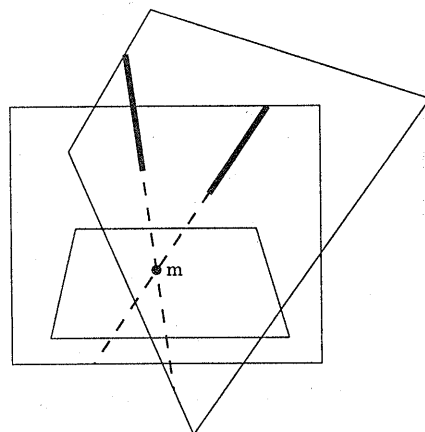


図 5: 統合画像での棒の像

このように統合画像を用いることで、未校正のステレオカメラの画像から、空間中で指し示した点を簡単に求めることができる。

3 移動ロボットの誘導

移動ロボットの誘導は統合画像を使ったビジュアルフィードバック制御により行なう。この方法では、移動ロボットの位置及び姿勢を画像から計算し、画像上において目標地点との位置の差分が 0 となるようフィードバック制御を行なう。

3.1 射影情報からユークリッド情報へ

移動ロボットは 1 自由度の並進と 1 自由度の回転を行なうが、ロボットは未校正なのでロボットに与える制御量とロボットの運動との関係は未知である。また、未校正のステレオポイントで得られる情報はあくまでも射影基底を基準とした射影的情報なので、このままではステレオポイントで得られた目標地点の座標とロボットに送る制御量との関係がわからない。そこで、本節ではステレオポイントにおける射影的情報とロボットに送る制御量との関係を直接求める方法を示す。

ロボットに与える制御量とロボットの運動の関係は未知ではあるが同じコマンドを与えたら同じ運動をするものとする。ここで、ロボットに一単位の並進命令と一単位の回転命令を交互に 4 回送ると、ロボットは平面 Π 上で円に内接する多角形を描いて運動するため、円周上の 5 点 $X_i (i = 1, \dots, 5)$ を定義することができる。ロボットは未校正なのでこの円の直径も多角形の辺どうしの角度も未知

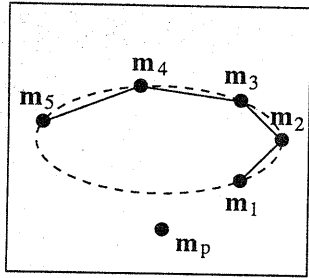


図 6: 射影空間から正規化空間へ.

であるが、円に内接しかつ4辺の長さは等しいという条件を持つ.

図 6 に示すように、透視投影された画像上では、このロボットの運動は楕円上の5点 $m_i (i = 1, \dots, 5)$ として観測される. もしも、この楕円上の点列 m_i から投影前の円上の点列 X_i を正しく求めることができれば、射影情報からユークリッド情報を得たことになる. 但し、大きさの不定性は残るので投影前の円は単位円であると考えことにする. こ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 $X_i (i = 1, \dots, 5)$ への射影変換の中で、単位円上の5点の間の4辺の長さが等しくなるような射影変換 H を求める.

この問題は次のように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.

このような楕円から単位円への変換は射影変換であるから、射影不変量が保存されなくてはならない. すなわち、楕円上の5点 $m_i (i = 1, \dots, 5)$ から計算される射影不変量 I_1 と単位円上の5点

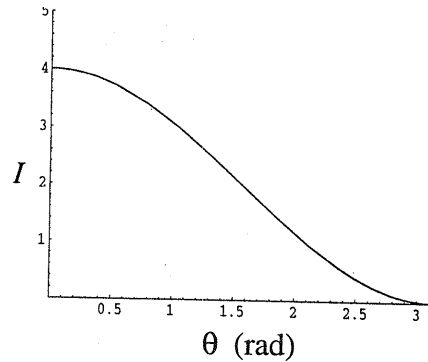


図 7: 不変量 I と θ の関係.

$X_i (i = 1, \dots, 5)$ から計算される射影不変量 I_2 との間には以下の関係が成り立つ.

$$I_1 = I_2 = I \quad (5)$$

ここで、 I_1, I_2 はそれぞれ以下のように表せる.

$$I_1 = \frac{|\tilde{m}_1 \ \tilde{m}_2 \ \tilde{m}_4| |\tilde{m}_1 \ \tilde{m}_3 \ \tilde{m}_5|}{|\tilde{m}_1 \ \tilde{m}_2 \ \tilde{m}_3| |\tilde{m}_1 \ \tilde{m}_4 \ \tilde{m}_5|}$$

$$I_2 = \frac{|\tilde{X}_1 \ \tilde{X}_2 \ \tilde{X}_4| |\tilde{X}_1 \ \tilde{X}_3 \ \tilde{X}_5|}{|\tilde{X}_1 \ \tilde{X}_2 \ \tilde{X}_3| |\tilde{X}_1 \ \tilde{X}_4 \ \tilde{X}_5|}$$

$|\tilde{m}_i \ \tilde{m}_j \ \tilde{m}_k|$ は3つのベクトル $\tilde{m}_i, \tilde{m}_j, \tilde{m}_k$ を横に並べて作った 3×3 行列の行列式である. X_i, X_j, X_k についても同様である.

単位円上の5点 $X_i (i = 1, \dots, 5)$ は未知ではあるが間の4辺が等間隔であるから、 $X = [1, 0]^T$ と置くと、

$$\begin{aligned} X_1 &= R^{-2}X, & X_2 &= R^{-1}X, \\ X_3 &= X, & X_4 &= RX, \\ X_5 &= R^2X \end{aligned}$$

と表せる. ここで、 R は、ある角度 θ だけ回転させる2次元の回転行列である. これらを (5) に代入することにより、以下のように I と θ の関係が求まる.

$$I = 2(1 + \cos \theta) \quad (6)$$

すなわち、投影像 $m_i (i = 1, \dots, 5)$ が与えられると、まず (5) より I が求まり、次に (6) より θ が計算でき、最終的に単位円上の点の並び $X_i (i = 1, \dots, 5)$ を求めることができる. このようにして、

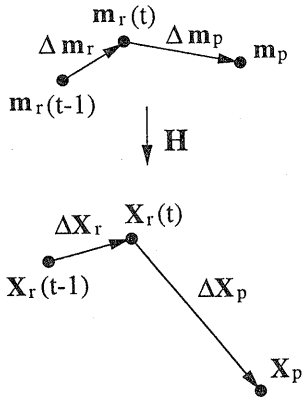


図 8: 移動ロボットの位置及び姿勢

楕円上の 5 点を単位円上の等間隔な 5 点に変換するような射影変換 H を求めることができる。

(6) 式の I と θ の関係をグラフで表すと図 7 のようになる。この図に見るように、 $0 \leq \theta \leq \pi$ の範囲では、 I より θ が一意に決まることがわかる。すなわち、移動ロボットに基準として与えた一単位の回転運動が π ラジアン以下であれば、先の射影変換 H は一意に決定できる。

得られた射影変換 H によりロボットの運動や目標地点を変換すれば、ロボットが運動する平面 Π を真上から見た時の運動と目標地点の位置関係が定数倍の不定性を除いて求まる。このように画像を正規化して得られた空間を正規化空間と呼ぶことにする。正規化空間において次に示すようにビジュアル・フィードバック制御を行えば、ロボットを安定に目的地へと制御することができる。

3.2 移動ロボットのビジュアルフィードバック制御

ステレオポインタで指し示した位置へ移動ロボットを誘導するには、正規化空間においてビジュアルフィードバック制御を行なう。正規化空間における移動ロボットの姿勢 ΔX_r は、画像上での現時刻 t における移動ロボットの位置 $m_r(t)$ と 1 時刻前の位置 $m_r(t-1)$ との差分および H より以下のように求める (図 8 参照)。

$$\Delta X_r = H[m_r(t) - m_r(t-1)] \quad (7)$$

また、ロボットの現位置からステレオポインタで指し示した位置へ向かう正規化空間上でのベクトル

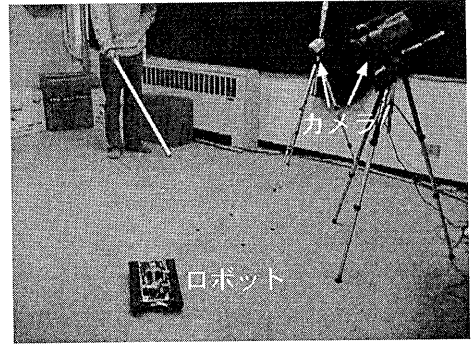


図 9: ステレオポインタによる誘導の様子

ΔX_p は、ロボットの投影点 m_r とステレオポインタで指し示した投影点 m_p より次のように求まる。

$$\Delta X_p = H[m_p - m_r] \quad (8)$$

一単位の回転命令を送った場合の回転角を θ とすると、以下のように回転命令 Y_θ を送ることにより、回転運動に関するフィードバック制御が比例制御により実現できる。

$$Y_\theta = \frac{K_\theta}{\theta} \cos^{-1} \left[\frac{\Delta X_p \cdot \Delta X_r}{|\Delta X_p| |\Delta X_r|} \right] \quad (9)$$

ここで、 K_θ は回転制御のゲインであり、また (\cdot) はベクトルの内積を表す。

次に、並進運動に関するフィードバック制御を考える。正規化空間上でロボットの現位置からポインタで指し示した位置へ向かうベクトル ΔX_p は (8) 式で得られるのであった。一単位の並進命令を送った時の正規化空間上での並進量を τ とすると、以下のように並進命令 Y_τ を送ることにより、並進運動に関する比例制御が実現できる。

$$Y_\tau = \frac{K_\tau}{\tau} |\Delta X_p| \quad (10)$$

ここで、 K_τ は並進制御のゲインである。

このようにして、 Y_θ と Y_τ が十分小さくなるまで回転と並進のフィードバック制御を繰り返すことにより、未校正のロボットをポインタで指し示した位置へと安定に誘導することができる。

4 実験

未校正のステレオポインタを用いた移動ロボットの誘導実験の結果を示す。本実験では移動ロボットに市販のラジコンを用いている。このロボット

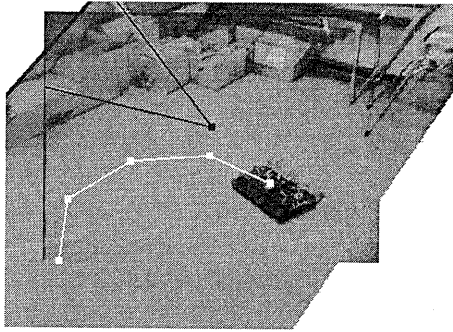


図 10: 円運動による正規化空間の計算

は前後への移動と左右への旋回運動を行なうことができる。

ステレオポイントでの誘導の様子を図9に示す。本実験ではこの図のように、ユーザが指し棒で床面を指し示すことで移動ロボットを誘導する。

ステレオポイントを用いて誘導を行なう時の統合画像の例を図10に示す。この図は2台のカメラからの画像を統合した画像であり、指し棒の特徴点を抽出し、これに対し最小二乗法で当てはめた直線が図の黒線であり、その交点が黒点で示されている。移動ロボットの目的地はこの交点であるから、画像内で移動ロボットの中心とこの交点とが一致するように視覚誘導を行なう。本実験では移動ロボットの中心はトラッキングウィンドウ内の背景差分の重心として計算した。

誘導を行なう前に、ステレオポイント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求めた。図10には、ロボットに一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点が記されている。白点がロボット中心で、黒点は指し棒で示された目的地である。前節に述べた方法でこれら5点から射影変換 H を求めた。射影変換 H をもとに、図10より正規化空間を求めた結果を図11に示す。この図の白点と黒点は図10の点を変換した点である。図中のダンボール箱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分かる。このようにして求めた正規化空間においてロボットの中心と目標位置が一致するようフィードバック制御を行なった。以下では、ステレオポイントでの誘導実験と精度評価について述べる。

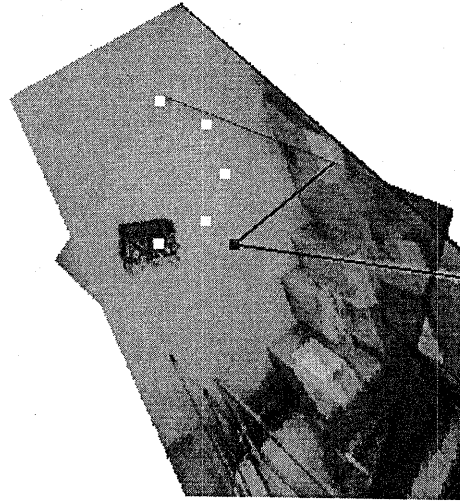


図 11: 正規化空間の計算結果

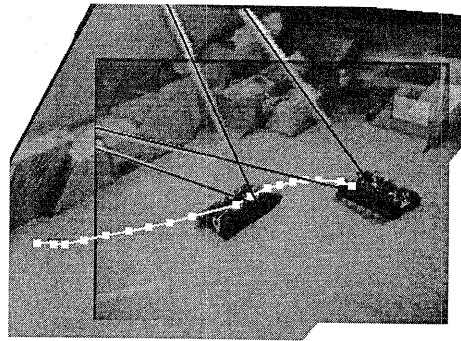


図 12: 移動ロボットの誘導結果

4.1 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なった。移動ロボットを目的地 x_1 へ誘導し到着した後、目的地 x_2 へ誘導した。図12に実験の結果を示す。この図は統合した画像に移動ロボットが動いた軌跡を白線で示したものである。統合画像は移動ロボットが x_1 に到着した時点のもの、 x_2 に到着した時点のものを重ねている。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分かる。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なわれているので、実際には移動ロボットが到達する以前に目的地が変化してもよい。

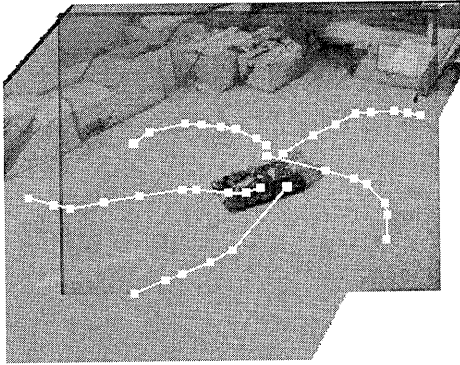


図 13: 同一地点への誘導結果

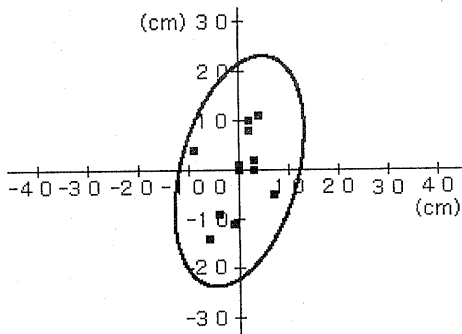


図 14: 誘導の終了位置

次に指し棒を固定して、様々な開始地点から同一の目的地へ誘導を行なう実験を行なった。この結果を図 13 に示す。図中の白線は移動ロボットの軌跡を表す。移動ロボットがどの開始地点からも的確に目的地へ到達していることが分かる。

4.2 誘導の精度

カメラの位置と目的地を固定して誘導を行ない精度を求めた。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の離れた場所で停止するかを床面上で測定した。図 14 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楕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。誘導の精度が荒いのは、本実験で用いたロボットが送信した制御量に対してそれほど正確には動作しないからであると考えられる。

5 まとめ

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、未校正のステレオ画像を射影基底を基に統合することにより、目的地が 2 つの指し棒の像を延長線した時の交点として求まることを示した。次に未校正のロボットに回転命令と並進命令を 4 回送ることにより射影空間から正規化空間への変換が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、リアルタイムに移動ロボットを誘導する実験を行ない、提案した方法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] 佐藤 淳. コンピュータビジョン—視覚の幾何学—. コロナ社, 1999.
- [2] 郡敏昭. 射影平面の幾何学. 遊星社, 1988.
- [3] 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.
- [4] 木下敬介. Uncalibrated stereo と視覚サーボによるロボットの制御. In 画像の認識・理解シンポジウム, volume 2, pages 187–192, 1996.
- [5] O.D. Faugeras. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? In G. Sandini, editor, *Proc. 2nd European Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 563–578, Santa Margherita, Italy, 1992. Springer-Verlag.
- [6] R.I. Hartley, R. Gupta, and T. Chang. Stereo from uncalibrated cameras. In *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 761–764, 1992.
- [7] N.J. Hollinghurst and R.. Cipolla. Uncalibrated stereo hand-eye coordination. *Image and Vision Computing*, 12(3):187–192, 1994.
- [8] K. Kanatani. Optimal homography computation with a reliability measure. In *In Proc. Workshop on Machine Vision Applications*, pages 426–429, 1998.