

時系列ステレオ画像の対応探索

松田伸広 大田友一

筑波大学 電子・情報工学系

本報告では、ステレオカメラを移動して撮影した時系列ステレオ画像において、カルマンフィルタを用いて対応の予測、及び、対応結果の累積を行う手法について述べる。

ステレオ画像から得られる3次元情報は、通常のシーン空間中の3次元座標としてではなく、各時点のステレオ画像に付随する対応空間中の3次元座標として表現する。時系列として得られる3次元情報のカルマンフィルタによる累積操作も、この対応空間中で行う。

CCDカメラで室内を撮影した時系列ステレオ画像に適用し、本手法が距離精度の向上に有効であることを確認した。

Correspondence Search on a Sequence of Stereo Images

Nobuhiro MATSUDA and Yuichi OHTA

Institute of Information Sciences and Electronics

University of Tsukuba

Ibaraki, 305, Japan

This paper describes a scheme to make a correspondence search on a sequence of stereo images. A Kalman filtering technique is applied to accumulate the results of stereo correspondence and to predict the position of corresponding point pairs.

3D information obtained from stereo images is not represented as 3D coordinate in the ordinary scene space. It is represented as 3D coordinate in a "correspondence space" attached to each stereo image pair. Kalman filter works in this space.

Experiments using an actual stereo image sequence of indoor scene showed that the scheme is effective to improve the accuracy of 3D information obtained by stereo.

1. はじめに

自律走行車が3次元環境を認識するためのセンシング技術は、レーザ光などの能動要素を用いる手法と、テレビカメラなどの受動要素のみを用いる手法に大別される。一般には、能動要素を用いた手法が、得られる距離情報の質や、センシングに必要な時間などの点で優れており、テレビカメラで受動的に観測した画像のみを利用する手法は、道路上の白線検出など、比較的単純な状況設定が可能な場合に限られている。

しかし、能動要素を用いる手法では、不特定多数の同種のシステムの混在が許されず、また、レーザ光照射の安全性の面からも、自律走行車が一般環境で定常的に用いるセンサとしては問題が多い。

受動的に観測できる画像のみから、3次元距離情報を直接的に獲得することは、複数の視点から同一対象を観測した複数枚の画像を用いて、ステレオ視、shape-from-motionの手法により実現できる。

自律走行車のように自らが移動する観測者が、複数の視点からの画像を得る手段は、

- 1) 観測者に固定した座標系上で複数視点をもつ
 - 2) 観測者自身が移動することにより複数視点をもつ
- の二つあり、1) では、さらに、複数の固定したカメラを利用する場合と、一台のカメラを精密に制御して移動させる場合⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾とが有り得るが、後者の場合は、観測地点で観測者が静止する必要がある、自律走行車の撮像系としては適当ではない。

観測者自身が移動する場合には、一般には回転移動成分や平行移動成分などの移動パラメータは未知であり、ステレオ法を適用する場合には、デッドレコニングやshape-from-motionの手法により移動パラメータを推定する必要がある。しかし、ステレオ輻輳角成分における移動パラメータの推定誤差は、距離決定精度に重大な影響を及ぼすこと、観測者の進行方向がカメラの光軸方向に近い場合には、実質的なステレオ基線長が短くなることなどの理由により、高精度の距離獲得は期待できない。

以上に述べた考察から、自律走行車における複数画像の獲得とその利用法としては、

- a) 観測者に固定し、正確に調整された複数台(2台)のカメラを用いたステレオ視により距離獲得を行い、
 - b) 観測者の移動に伴い得られる時系列画像のもつ冗長性を、a)の処理に導入し、精度向上などを図る、
- のが、適当と思われる。

時系列で観測されるノイズを含んだデータから真値を推定する問題は、カルマンフィルタリング⁽⁴⁾の枠組みで取り扱うことができる。

Matthies⁽¹⁾らは、山本⁽²⁾Bolles⁽³⁾と類似の撮像系で得られる時系列画像の対応点探索と距離決定にカルマンフィルタリングを応用し、隠れの発生の少ない短い基線長のステレオ系において、高精度の距離情報を得ている。

Ayache⁽⁴⁾らは、複数の地点からステレオ視により観測された3次元情報を、カルマンフィルタリングにより融合する手法を検討している。この場合、ある特定の視点に固定した座標系で3次元情報を表現し、時系列情報の累積を行う枠組みが用いられている。

しかし、時間的に継続して得られる3次元情報を、過去の特定の時点で固定した座標系で表現するのは必ずしも適当ではなく、常に、現在の視点を基準にした座標系で表現の方が望ましい。さらに、ステレオ画像上の対応点座標とシーン空間の3次元座標の間の変換は射影変換で非線形であり、シーン座標系で表現されている3次元情報を対応探索処理に反映させるためには、画像座標系とシーン座標系の間で、非線形変換を往復させなければならない。

すなわち、ステレオ対応探索という観点からは、得られた対応結果を、常時、通常の3次元シーン座標系に変換する必要はなく、対応探索結果の表現に適した空間を設定し、その中で、カルマンフィルタリングによる時系列情報の累積を行い、シーン座標系での表現が必要な場合のみ、逆射影変換を施せばよい。

我々は、上記の目的に適当な空間として、対応空間を提案し、カルマンフィルタリングによる対応結果の累積を対応空間内で行ない、また、累積された情報の対応探索への活用する枠組みを開発した。

2. 時系列ステレオ画像

2.1 カメラモデル

本研究で使用したステレオ視のカメラモデルを図1に示す。原点を左のカメラのレンズ中心Lとして、3次元空間中に直角座標系をとり、右のカメラのレンズ中心Rをx軸上に配置する。いずれもレンズ光軸がZ軸に平行で、画像面がXY平面に平行な $Z=f$ (f :焦点距離)なる平面で、走査線方向がX軸に平行になるように正規化されているものとする。シーン中の点に対応する各画像面上の像はエピポーラ線上に拘束され、上記の設定ではエピポーラ線が走査線と一致するので、左右画像間の対応探索は、左

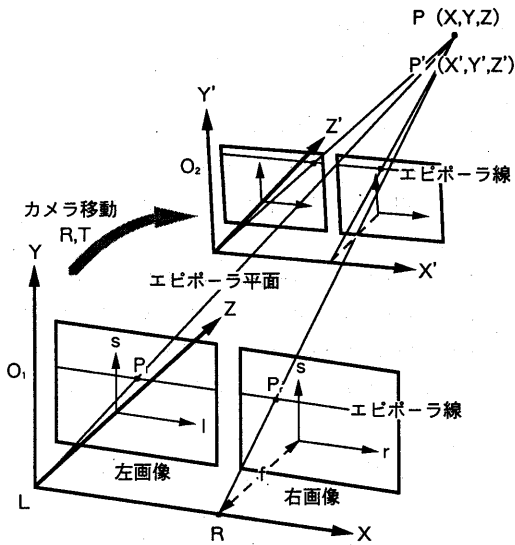


図1 時系列ステレオ画像のカメラモデル

右同一指標の走査線間の対応探索問題に帰着する。

左右の画像面上に、各レンズ光軸との交点を原点としX軸に平行にl軸、r軸を各々設け、Y軸に平行に走査線の指標を決める共通のs軸を設ける。基線長LRをb、点P_l、P_rの座標を各々(1, s)、(r, s)とすると、3次元空間中の点P(X, Y, Z)は、次式で求めることができる。

$$X = b \frac{l}{l-r}, \quad Y = b \frac{s}{l-r}, \quad Z = b \frac{f}{l-r} \quad (1)$$

逆に、点Pの座標が既知の場合、左右画像上の点P_l(1, s)、P_r(r, s)の座標は、

$$l = f \frac{X}{Z}, \quad r = f \frac{X-b}{Z}, \quad s = f \frac{Y}{Z} \quad (2)$$

となる。

そして、ステレオカメラが観測地点O₁から観測地点O₂に移動したとき、座標系O₁の点P(X, Y, Z)は、XYZ軸回りの回転移動Rと各軸方向の平行移動Tの合成によって、座標系O₂の点P'(X', Y', Z')に変換できる。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P' = R(P+T)$$

2.2 対応空間

ステレオ視の対応探索によって求められた一対の点P_l、P_rを対応点p(l, r, s)とし、対応点pをlrs軸で構成される空間中で表現する。この空間を対応空間と呼ぶ。対応空間はシーン空間と一対一対応を持つ。また、シーン空間が無限に広がるのに対して、対応空間は有限であり、シーン空間中では、遠方の点ほど誤差が大きいというステレオ視の性質も対応空間では現われない。従って、対応空間はステレオ視における誤差に対して「均一性」を持ち、ステレオ視により求められる距離情報を表現する上で好都合である。

シーン点Pの距離情報は、対応点pの座標値として対応空間中で蓄積する。ステレオカメラの移動に伴い、対応空間中の対応点も移動するので、対応空間は各観測地点毎に更新される。対応点pの座標値がもつ誤差は、各成分方向で広がりをもった楕円体で表現する。その楕円体内で、真値のとり得る確率は、計測値を中心に正規分布をなすと仮定する。

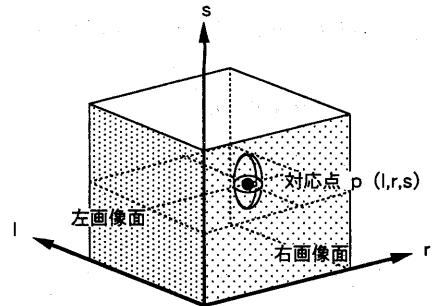


図2 対応空間

2.3 処理の概要

図3は、ある観測地点でシーン点の座標を求めるステレオ画像の対応探索処理の流れを示す。対応空間中で表現したシーン距離情報が処理結果となる。

最初に、現時点のステレオ画像と直前のステレオ画像との間で同一シーン点を示す数個の顕著な特徴点の追跡を行う。この特徴点の移動ベクトルに基づいて、ステレオカメラの各観測位置間での移動パラメータ(回転, 平行移動)を算出する。

次に、このカメラ移動パラメータと先に得られているシーン距離情報を基に新しい対応空間を構成し、現ステレオ画像上における対応点の存在範囲を予測する。対応探索処理におけるコスト評価には、この対応点座標の予測値に基づく評価も組み込む。

最後に、対応探索処理によって求められた対応点座標

を用いて、カルマンフィルタによりシーン距離情報が更新される。

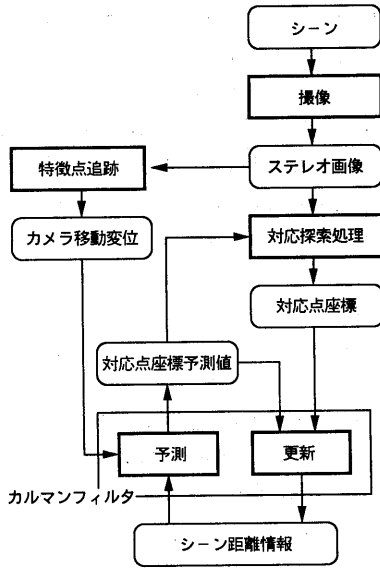


図3 時系列ステレオ画像の対応探索処理

3. 時系列ステレオ画像の対応探索

3.1 ステレオ画像の対応探索

一対のステレオ画像における対応探索には、左右走査線対のエッジに挟まれた区間を対応評価の単位とする、動的計画法に基づいた区間対応探索法⁹⁾を用いた。

図4 (a) の様な凸型の物体を観測したとき、左右走査線上のエッジ位置を示す直線を各々縦横に引いた図4 (b) のような探索平面を設定する。この平面上で、対応点の候補となる各直線の交点をノードと呼ぶ。ノードは、動的計画法における決定段階に相当し、各ノードにおいて、そこに至る最小コストを持つものを選択する操作を行なう。縦横の直線で区切られた矩形が左右走査線上一対の区間の対応の可能性を表す。左右一対の対応を示すパスを原子パスと呼ぶことにすれば、左右走査線の対応は、探索平面上で左下から右下へ至る、原子パスを連結したパスによって表現される。そして、パスが通過したノード (●印) を対応点として決定する。

3.2 予測値を導入したコスト評価

時系列ステレオ画像の対応探索処理では、対応点の予測位置に基づく評価をコストに導入した次の漸化式を評価することにより、探索平面上で最適パスを引き対応点を決定する。

$$D(m) = \min_{\theta} \{ d(m, m-i) + D(m-i) - R(m) \} \quad (4)$$

m : ノードの指標

$D()$: そのノードへ至る最適パスのコスト

$d()$: 2つのノード間の原子パスのコスト

$R()$: 予測位置に基づくノードの評価

原子パスのコストは、左右のエッジに挟まれた区間に含まれる画素の濃度値の分散に基づいて評価する。対応させようとする2つの区間の画素の濃度値を、 a_i ($i = 1 \dots p$), b_j ($j = 1 \dots q$) とすると、濃度値の平均 μ と分散 σ^2 は、

$$\mu = \frac{1}{2} \times \left\{ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p a_i + \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q b_j \right\} \quad (5)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} \times \left\{ \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (a_i - \mu)^2 + \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q (b_j - \mu)^2 \right\}$$

原子パスのコスト d は、分散 σ^2 に原子パスの長さを掛けた次式で定義する。

$$d = \sigma^2 \sqrt{p^2 + q^2} \quad (6)$$

また、対応点の予測位置に基づいて、パスがノードを通過する可能性を評価し、ノードにコストを与えた。これは、予測値と実際に観測されたノードとの距離に依存

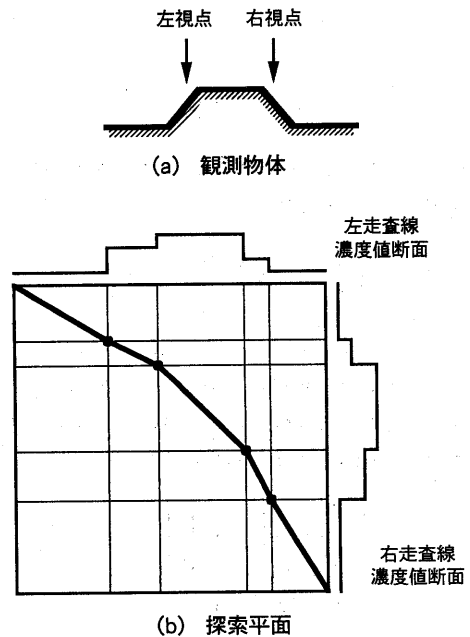


図4 走査線対の区間対応探索法

するものとした。但し、同じ距離であっても予測値の精度が曖昧な場合はコストへの影響は小さく、予測値の精度が高い場合には、コストへの影響を大きくするようにし、(7)式でそれを評価した。

現ステレオ画像の走査線 s の探索平面上のノードを $m(l, r, s)$ 、対応空間内の予測値を $m^-(l, r, s)$ とし予測値がもつ共分散行列を P とする。ノード m に対するパス通過の可能性 $R(m)$ は、3変数正規分布を用いた次式で定義する。

$$R(m) = k (\det B)^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (m - m^-)^T B (m - m^-) \right\} \\ B = P^{-1}, k = \text{const} \quad (7)$$

4. カルマンフィルタを用いたシーン情報の予測と累積

雑音に乱された観測値から信号あるいは未知パラメータを推定する問題は、最小2乗法を始め様々なフィルタリング理論を用いて解くことができる。カルマンフィルタはその一理論である。カルマンフィルタは要約すれば、(1) 信号を生成するシステムの動特性、(2) 雑音の統計的性質、(3) 初期値に関する先験情報、及び(4) 時々刻々与えられる観測データを用いて、システムの状態の最小2乗推定値を逐次的に与えるオンラインデータアルゴリズムであるといえる。⁽⁶⁾

本研究では、対応空間中の対応点座標をシステムの状態として適用した。ステレオカメラの移動に伴い対応空間中の状態は遷移し、各地点で対応探索によって観測データである対応点座標が与えられる。状態を遷移させるカメラ移動パラメータや、観測データにも画像の標本化等による誤差が含まれている。これらに基づいてカルマンフィルタにより最適な対応点の座標値を推定する。

次式で示される線形離散時間確率システムを想定する。

$$\begin{aligned} u_t &= F_t u_{t-1} + w_t & w_t &\sim N(0, Q_t) \\ d_t &= H_t u_t + v_t & v_t &\sim N(0, R_t) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 u_t は n 次元状態ベクトル、 d_t は p 次元観測ベクトル、 w_t は n 次元プラント雑音、 v_t は p 次元観測雑音、 F_t は $n \times n$ の状態遷移行列、 H_t は $p \times n$ の観測行列である。さらに、 w_t 、 v_t は平均値 0 のガウス白色雑音ベクトルで、各々の共分散行列は Q_t 、 R_t である。また、初期状態 u_0 は、ガウス分布に従い、その平均値及び共分散行列は、

$$E[u_0] = u_0, \quad \text{cov}[u_0] = P_0 \quad (9)$$

であり、かつ雑音 $w_t, v_t, (t = 0, 1, \dots)$ は独立であるとする。

このときのカルマンフィルタは、予測及び更新の2つのフェーズで表わした次式で与えられる。

Prediction phase

$$\begin{aligned} \bar{u}_t &= F_{t-1} \bar{u}_{t-1} \\ P_t^- &= F_{t-1} P_{t-1}^+ F_{t-1}^T + Q_t \end{aligned} \quad (10)$$

Update phase

$$\begin{aligned} u_t^+ &= \bar{u}_t + K_t [d_t - H_t \bar{u}_t] \\ P_t^+ &= [I - K_t H_t] P_t^- \\ K_t &= P_t^- H_t^T [H_t P_t^- H_t^T + R_t]^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

I : $n \times n$ 単位行列

最適予測値 \bar{u}_t を前状態 \bar{u}_{t-1} によって与え、また、その推定誤差共分散 P_t^- を前状態 P_{t-1}^+ で与える。 P_t^- に基づきカルマンゲイン K_t を計算し、そのカルマンゲインにより P_t^- の更新値 P_t^+ を算出する。 d_t が観測されると、予測値との残差 $d_t - H_t \bar{u}_t$ をカルマンゲイン K_t で重み付けし、予測値 \bar{u}_t に加えることで更新値 u_t^+ が得られる。このカルマンフィルタのブロック図を図5に示す。

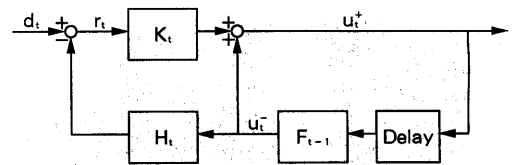


図5 カルマンフィルタブロック図

各観測地点での対応探索によって得られる左右画像の対応点の座標 (l_t^r, r_t^r, s_t^r) を観測ベクトル d_t 、また、その対応点を対応空間内で表現した座標 (l_t, r_t, s_t) を状態ベクトル u_t とする。

$$d_t = \begin{bmatrix} l_t^r \\ r_t^r \\ s_t^r \end{bmatrix}, \quad u_t = \begin{bmatrix} l_t \\ r_t \\ s_t \end{bmatrix} \quad (12)$$

観測行列 H_t は、 3×3 の単位行列となる。これにより、更新フェーズに必要な観測行列 H_t の逆行列の計算を回避できる。

$$H_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

状態ベクトル u_t は、ステレオカメラの各観測位置間の軸回りの回転移動 R と軸方向の平行移動 T によって遷移し、式(1)(2)(3)より、次の非線形関数 G_t で表わすことが

できる。

$$G_t = \begin{pmatrix} g_t^1(u_t) \\ g_t^2(u_t) \\ g_t^3(u_t) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$g_t^1(u_t) = f \frac{r_{11}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_1) + r_{12}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_2) + r_{13}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_3)}{r_{31}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_1) + r_{32}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_2) + r_{33}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_3)}$$

$$g_t^2(u_t) = f \frac{r_{11}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_1) + r_{12}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_2) + r_{13}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_3) - b}{r_{31}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_1) + r_{32}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_2) + r_{33}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_3)}$$

$$g_t^3(u_t) = f \frac{r_{21}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_1) + r_{22}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_2) + r_{23}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_3)}{r_{31}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_1) + r_{32}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_2) + r_{33}(b \frac{l_t}{l_t - r_1} + t_3)}$$

カルマンフィルタは、システムの線形性を仮定しているので、非線形関数 G_t が滑らかであるという仮定の下に推定値 u_{t-1} のまわりで G_t を線形化した状態遷移行列 F_t を用いて適用する。これは、時間的に連続するステレオ画像間では、ステレオカメラの移動量は小さいという仮定に基づいている。

$$F_t = \begin{pmatrix} \frac{\partial G_t}{\partial u_t} \end{pmatrix}_{u_t = u_{t-1}} \quad (15)$$

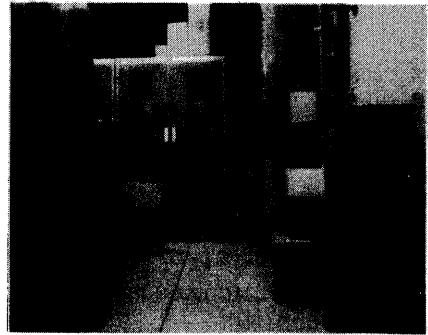
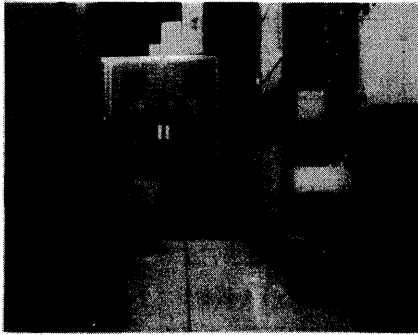


図6 入力されたステレオ画像 (第0フレーム)

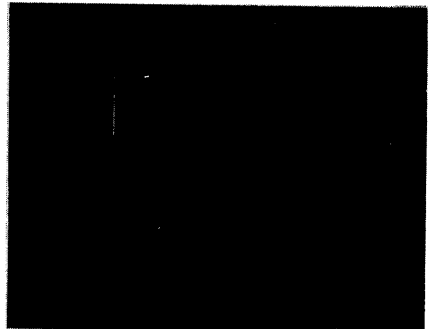
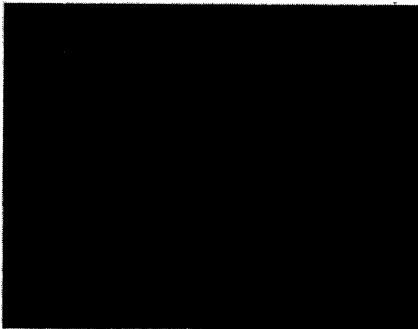


図7 図6のエッジ画像

そして、この状態遷移に伴うプラント雑音 w_t の共分散 Q_t は、平行移動成分 t_x, t_y, t_z 、回転移動成分 r_x, r_y, r_z 、計6のカメラパラメータのもつ共分散行列 C_{RTt} が、関数 G_t で伝播した、

$$Q_t = J_t C_{RTt} J_t^T \quad (16)$$

である。

ここで、

$$J_t = \frac{\partial u_t}{\partial (t_x, t_y, t_z, r_x, r_y, r_z)} \quad (17)$$

また、観測に伴う雑音 v_t は、画像の標準化誤差に起因し共分散行列 R_t で表現する。対応探索によって得られる対応点の各座標値は各々無相関であるとした。

$$R_t = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

5. 実験結果

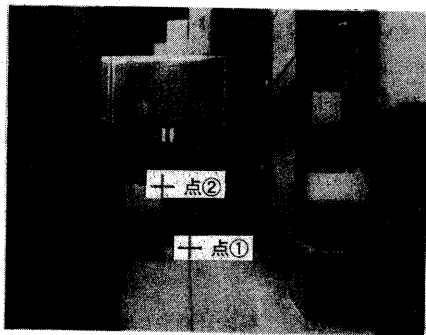
以上に述べたアルゴリズムの有効性を調べるために、合成ステレオ画像系列、及び、CCDカメラで室内を撮影した実際のステレオ画像系列により実験を行った。以下、実画像系列についての実験結果を示す。

2台の2/3インチCCDカメラを、左右カメラ間の基線長が20cmとなるように配置し、ほぼ光軸方向に一定距離間隔22.5cmずつ移動して室内を撮影した、大きさ430×512画素、濃淡8ビットの12組ステレオ画像系列を用いて実験を行った。第0フレームを図6に示す。

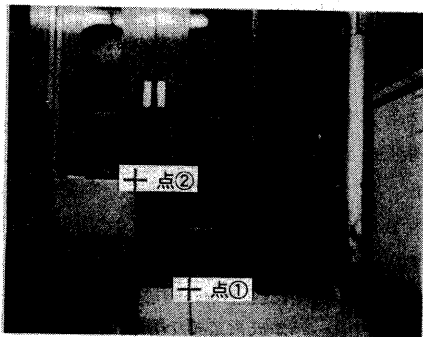
2.1で述べたカメラモデルを正確に満たすように、各フレームの入力ステレオ画像を正規化し再量子化した。対応探索において必要となるエッジは、走査線に沿った、1×2画素 (n=1,2,3,4) の大きさの一次微分オペレータによる微分値が、極大、極小をとる位置として求めた。図7は、図6から抽出したエッジを示す。

ステレオカメラの各観測位置間でのカメラ移動パラメータは、同一シーン点を示す特徴点を、カメラ移動前後の画像上で、点近傍の相関に基づいて半自動的に対応付け、その移動ベクトルを入力として解析的に求めた⁶⁾。移動パラメータの推定誤差に関する共分散行列も同時に得られる。

最終の第11フレームまで追跡された対応点のうち図8上に示した2個の点①②について、対応点座標 (l, r, s)



(a) 第1フレーム(左画像)



(b) 第11フレーム(左画像)

図8 入力された画像系列

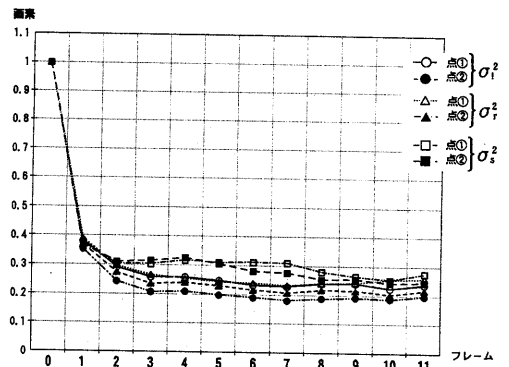


図9 対応点座標(点①②)の分散の推移

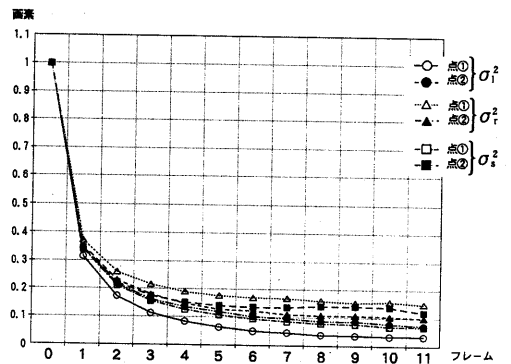


図10 対応点座標(点①②)の分散の推移

(カメラ移動パラメータの推定誤差を0と仮定した場合)

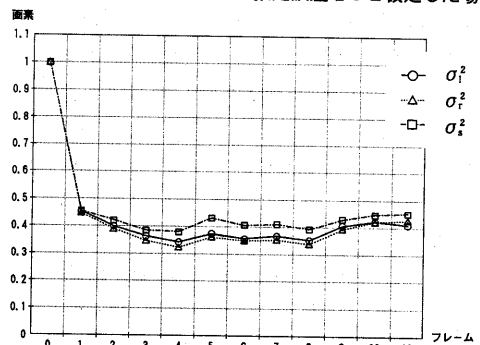


図11 対応点座標の分散の平均

の各成分の分散 σ_1^2 , σ_r^2 , σ_s^2 の推移を図9に示す。各画像上での対応点座標の観測値の分散は全て1に設定した。従って、(9)式で示した対応点座標の分散の初期値は各成分とも1となる。

観測を重ねるごとに分散が減少していることが確認できるが、第4フレーム以降ではその値が0.2~0.3付近に推移している。これは、カメラ移動パラメータの推定誤差による影響と考えられる。比較のため、図11に、カメラ移動パラメータの推定誤差を0と仮定したときの分散の

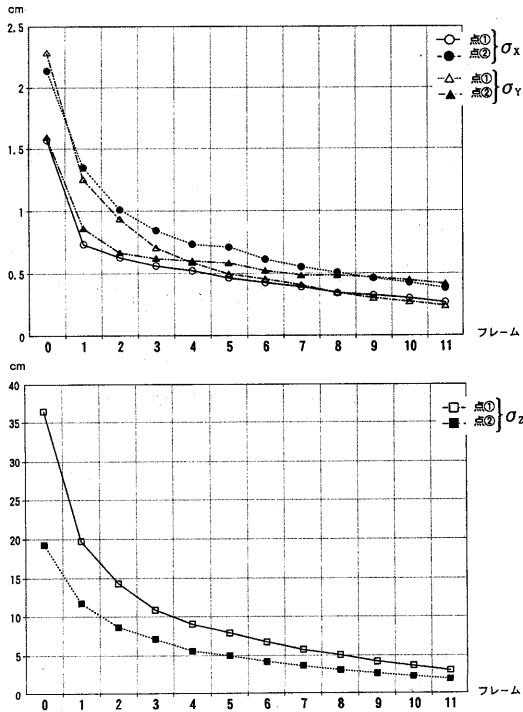


図12 シーン座標決定の精度

推移を示す。この場合、0.1付近まで単調に減少している。

各フレーム上のすべての対応点座標の各成分ごとの平均値の推移を図11に示す。最終フレームまで追跡された対応点の分散が0.2付近まで減少しているのに対し、すべての対応点の平均では0.4前後である。これは、フレーム間の追跡がとぎれた対応点や、各フレーム上で新たに出現した対応点は、初期状態としてカルマンフィルタに入力されるためである。また、最終フレーム近くでは、分散が増加傾向にある。これは、観測しているシーン点が近接したため、対応点の対応空間中での遷移量が増大し、その分散が、カメラ移動パラメータの推定誤差が、対応点の分散に大きく反映されるためと考えられる。各成分により分散の推移が異なっているのは、画像の標本化の原因で、観測値が真値からずれる量が異なるためである。

図12は、対応点①②で決定されるシーン座標(X, Y, Z)の誤差を標準偏差で示したものである。第0フレームにおいてカメラからの奥行(Z)方向の距離は、点①で540cm、点②で434cmであった。各成分とも誤差が減少している。図9において、第4フレーム以降対応点座標の分散が減少していないのに対し、シーン点の標準偏差が減少しているのは、カメラがシーン点に近接したことによる。

6. むすび

受動要素を用いた自律走行車の視覚機能の実現を目的に、センサに2台のカメラを導入し、ステレオカメラの移動によって撮影された時系列ステレオ画像から距離情報獲得を行なう手法について述べた。ステレオ画像から得られる3次元情報を、各地点のステレオ画像に付随する対応空間中で表現し、この空間中で、カルマンフィルタにより累積操作も行なう枠組みを開発した。実験により、本手法が距離精度の向上に有効であることを示した。

謝辞 本研究をすすめるにあたり御討論を頂いた京都大学工学部池田克夫教授に感謝する。なお、本研究の一部は、昭和63年度稲盛財団 助成金による。

参考文献

- (1) L. Matthies, R. Szeliski, and T. Kanade: "Kalman Filter-based Algorithms for Estimating Depth from Image Sequences". Proc. Image Understanding Workshop. pp. 199-213 (1987)
- (2) 山本: 能動的視覚システムによる3次元環境の認識, 情報処理学会 CV 研資, 45-3(1986)
- (3) R. C. Bolles and H. H. Baker: "Epipolar-plane Image Analysis: A Technique for Analyzing Motion Sequences" Preprints of the 3rd International Symposium of Robotics Research, pp. 192-199, (1985)
- (4) N. Ayache and O. D. Faugeras: "Building, Registrating, and Fusing Noisy Visual Maps". Proc. ICCV-87. pp. 73-82, (1987)
- (5) 大田, 正井, 池田: "動的計画法によるステレオ画像の区間対応法". 信学論, vol. J68-D, no. 4, pp. 554-561, (1985)
- (6) Donald B. Gennery: "Stereo camera calibration", Proc. Image Understanding Workshop. pp. 101-107, DARPA (1979)
- (7) 日本写真測量学会編: 写真による3次元測定. 共立出版社, 1983
- (8) 片山 徹: 応用カルマンフィルタ. 朝倉書店, 1983.
- (9) 西村敏充: カルマン・フィルタ理論の飛翔体システムへの応用. システムと制御, vol. 22, 'no. 1, 10-19. (1978)
- (10) H. Moravec: "Visual mapping by a robot rover" Proc. 6th IJCAI, pp. 598-600 (1979)