

## ステレオ画像を利用した階段の空間位置推定

田中 健一<sup>†</sup> 奥富 正敏<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻  
E-mail: †{tanaka,mxo}@ok.ctrl.titech.ac.jp

あらまし 本手法は、ステレオカメラで撮影した画像を利用し、階段の位置・形状を推定するものである。一般に階段の画像では各段の面のテクスチャが乏しく、また構造上、各段の直線に沿って類似パターンが数多く表れる。そのため画像間の対応点探索で誤対応が生じる可能性が高い。提案手法では、3次元モデル空間中に階段の位置やステップ幅などを表わす、7自由度のパラメータで決まる階段モデルを考える。各画像から、階段から得られる直線の性質を考慮して、階段の直線のみを抽出し、さらにそこから階段パラメータを求める。最後に階段モデルをステレオ画像に投影したものと、実際の画像上において階段から生じる画像エッジの誤差を評価し、この誤差を小さくするようにパラメータを最適化する。このような方法を取ることで、ステレオ画像間の対応点探索を行なう必要がない。

### 3-D Reconstruction of Staircase Using Stereo Images

Kenichi TANAKA<sup>†</sup> and Masatoshi OKUTOMI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Mechanical and Control Engineering  
Graduate School of Science and Engineering  
Tokyo Institute of Technology  
E-mail: †{tanaka,mxo}@ok.ctrl.titech.ac.jp

**Abstract** We propose a method for 3-D reconstruction of a staircase using stereo images. In the images of a staircase, there are many similar patterns along edges and poor textures on the surface of each step. Therefore mis-correspondences will very likely occur when doing stereo matching. In the proposed method, we model a staircase using several parameters. These parameters are estimated by using extracted lines of the staircase and optimized to minimize the displacement between the projected model and extracted edges on each image. Consequently, it is not necessary to search the correspondence between images.

#### 1. はじめに

今日、さまざまなタイプのロボットの研究開発が行なわれている。これらのロボットの中には階段を昇降できる機能を有するものもある[1][4][7]。これらのロボットが階段を昇降するためには、階段の位置および形状を高精度に推定する必要がある。

階段の位置および形状を推定する手法として、ステレオ画像間の対応点探索によって奥行きを推定するステレオマッチングを利用する方法が考えられる。ステレオマッチングにより得られた奥行き情報を利

用して、階段および異なる高さを持つ複数の平面の形状を推定する手法は、これまでに複数の研究が報告されている[3][6][7]。[3]では、奥行きデータの曲率を利用することにより、曲率の大きい階段の角の直線部分の位置推定を行ない、さらにそれら直線群に平面を当てはめることで階段の勾配とステップ幅を推定している。[6][7]は、得られた奥行きデータを各平面部分にセグメンテーションし、それぞれに平面を当てはめて高さの異なる段差を推定している。しかし、図1に示される階段画像の例のように、一方の

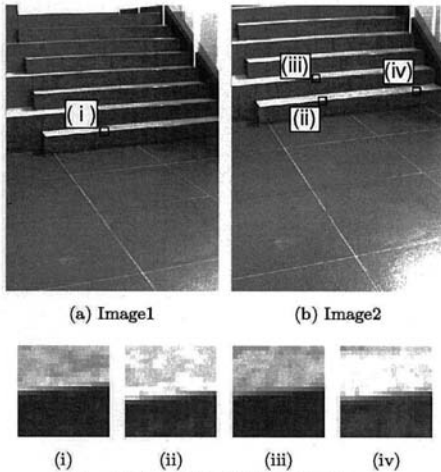


図1 階段のステレオ画像と類似パターン  
Fig.1 Stereo images of staircase and similar patterns.

画像 (a) のある小領域 (i) に対しては、もう一方の画像 (b) の小領域 (ii), (iii), (iv) に表わされるような類似パターンが数多く存在している。また一般に階段は各段の平面領域のテクスチャが乏しいため、ステレオマッチングでは誤対応が生じやすい。またそれによって得られた奥行き情報から、階段のステップ幅などの大きさを推定するためには、奥行き情報に階段のモデルを当てはめるなどの処理が必要であるが、初期値の問題や誤対応などによって生じる外れ値の取り扱い等、解決しなければならない問題は多い。

階段の形状を推定する手法には、他にも1台のカメラを利用するもの [8] [9] [10] がある。これらは階段の直線が平行直線群であることに注目して、画像内における直線群の消失点を求めることにより、階段の向きや勾配の角度を推定する手法である。同時に、手すりなど段を登る方向の複数の直線に対する消失点を求めると、これら2つの消失点から階段の勾配に対して平行な平面的法線ベクトルを推定することができる。カメラが1台のシステムの場合、装置構成や画像処理システムが簡便になるという利点がある。しかしカメラ1台では幾何学的拘束が弱く、付加的な拘束なしに階段の位置および形状を一意に決定することができない。

本論文で提案する手法は、ステレオカメラを利用して3次元空間における階段の位置および形状を推定する方法である。提案手法では、3次元モデル空

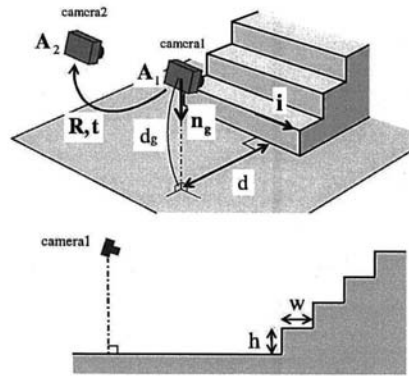


図2 階段を表現するパラメータ  
Fig.2 Parameters that represent staircases.

間中に階段の位置やステップ幅などを表わす、7自由度のパラメータで決まる階段モデルを考える。各画像から、階段から得られる直線の性質を考慮して、階段の直線のみを抽出し、さらにそこから階段パラメータを求める。最後に階段モデルをステレオ画像に投影したものと、実際の画像上において階段から生じる画像エッジの誤差を評価し、この誤差を小さくするようにパラメータを最適化する。このような方法を取ることで、ステレオ画像間の対応点探索を行なう必要がない。

## 2. 階段の位置形状推定

### 2.1 階段を表現するパラメータ

提案手法では、階段を図2に示すパラメータで表現する。

- 地面の平面的法線ベクトル  $n_g$
- カメラ1と地面間の距離  $d_g$
- 階段の直線群の方向ベクトル  $i$
- カメラ1から1段目までの距離  $d$
- 階段のステップの高さ  $h$  および奥行き  $w$

ワールド座標系はカメラ1座標系とし、ワールド座標系からカメラ2座標系への回転行列を  $R$ 、並進ベクトルを  $t$  とする。また、カメラ1およびカメラ2の内部パラメータをそれぞれ、 $A_1, A_2$  とおく。上記外部パラメータおよび内部パラメータはあらかじめキャリブレーションしており、これらは既知であるとする。これらのパラメータが決まると、3次元空間中に生成した階段モデルを各画像に投影することが

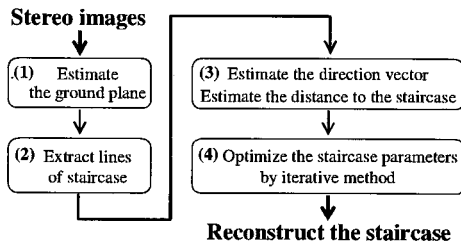


図3 処理のフロー

Fig. 3 Flow of the overall process.

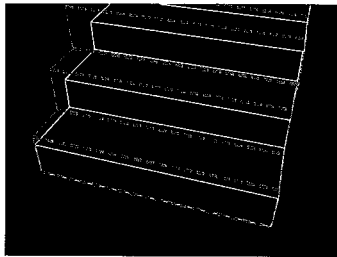


図4 投影された階段モデルとエッジとの間の誤差

Fig. 4 Difference between edges and projected model.

できる。提案手法では、投影された階段モデルを利用して階段パラメータの推定を行なう。

## 2.2 提案手法の概要

図3に基づいて、前節で示した階段パラメータの推定の流れについて説明する。(1) まず始めに、ステレオ画像から地平面パラメータ  $n_g, d_g$  を推定する。地平面パラメータは、地平面に対するステレオ画像間の射影変換を求めることにより推定する手法 [11][12] を利用する。(2) 次に、パラメータ推定に利用する階段の直線を各画像から抽出する。直線抽出には Hough 変換を利用するが、それだけでは画像中のあらゆる直線が抽出されてしまう。そこで、階段の直線がお互いに平行であることと地平面領域には存在しないという、階段の直線の性質を利用して、不要な直線を削除する。(3) 抽出された階段の直線を利用して、階段の直線の方向ベクトル  $i$  および階段までの距離  $d$  を求める。(4) 最後に、推定された  $i, d$  に加え、まだ推定を行っていないステップの高さ  $h$  および奥行き  $w$  の4つのパラメータを最適化する。 $h$  および  $w$  に初期値を与えると全ての階段パラメータが決まり、階段モデルを各画像のエッジ抽出画像に投影し

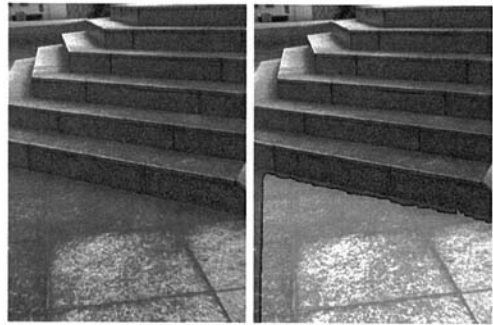


図5 原画像

図6 推定された地平面領域

Fig. 5 Original image.

Fig. 6 Ground plane region.

た例が図4である。この図は画像のエッジを実線で、投影されたモデル(ワイヤーフレーム)を破線でそれぞれ表わしている。パラメータの最適化を行っていない段階では、階段モデルの各直線はエッジからずれた位置に投影される。本手法では、太い破線で示されている横方向の直線に着目し、これらの直線群の各点における、エッジからのずれ量を総和した値を評価する。この値が小さくなるように繰り返し推定によってパラメータを最適化することにより、階段の位置・形状を推定する。

次節以降、各ステップの処理について詳しく説明する。

## 2.3 地平面パラメータの推定

地平面パラメータの推定は、地平面に対するステレオ画像間の射影変換行列を求めることにより推定する方法 [11][12] を利用する。この手法は、射影変換行列によって画像2を変形した画像と画像1との差分を評価し、ガウス-ニュートン法により平面パラメータの推定を行なう。また画像間の差分が小さくなる領域が地平面であると考えられることから、画像1における地平面領域を推定することができる。図6は、図5で示される原画像の地平面領域を明るく示した画像である。この領域は次の直線抽出で利用する。

## 2.4 直線抽出

階段パラメータ推定に利用するために、両画像から Hough 変換 [2][5] を利用して階段の直線を抽出する。ただし図7に示されるように、ただ単に Hough 変換を行なっただけでは、階段の直線だけでなく画像中の

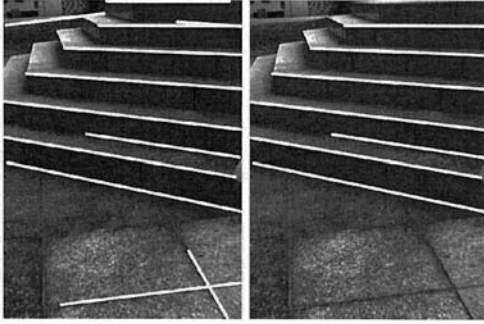


図7 Hough変換により抽出された直線  
Fig.7 Extracted lines by Hough Transform.

図8 抽出された階段の直線  
Fig.8 Extracted lines of staircase.

さまざまな直線が抽出されてしまう。そこで次に階段のものではない直線を取り除く処理を行なう。抽出したい階段の直線群の性質としては、地平面領域上には存在しないこと、平行直線群であるため画像上において同一の消失点を通ることが挙げられる。地平面領域は先に推定されたものを利用し、この領域上の直線を削除する。階段の直線群の消失点については、抽出されている直線の多くが集まる点を求めることによって推定し、この消失点を通らないものを削除する。以上の方法で階段の直線のみを取り出した結果が図8である。地平面領域内にあった右下の2つの直線、左上にある階段のものではない直線、および上段の抽出精度の悪い直線が取り除かれている。この処理によって十分な数の直線が抽出されなかった場合、画像内には階段が存在しないと考えられる。そこで本手法では、設定したしきい値を越える数の直線が抽出された場合に、以降のパラメータ推定を行なう。

### 2.5 階段の方向ベクトル $i$ と距離 $d$ の推定

まず方向ベクトル  $i$  を推定する。抽出された階段の直線を3次元空間に逆投影して生成される平面を考えると、図9で表わされるように方向ベクトル  $i$  はこの平面に対して平行である。よってこの平面の法線ベクトルと  $i$  は直交する。ここで、画像  $c$  から抽出された  $k$  番目の直線  $l_{c,k}$  と、それを3次元空間に逆投影して得られる平面の法線ベクトル  $n_{l_{c,k}}$  および方向ベクトル  $i$  の関係は式 (1) で表される。

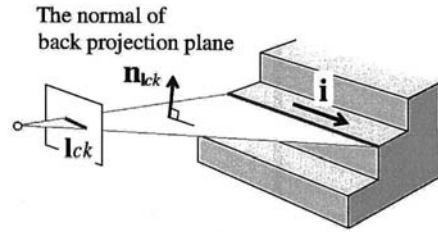


図9 逆投影した平面の法線ベクトルと方向ベクトル  
Fig.9 The normal of the back projection plane and direction vector.

$$n_{l_{c,k}}^T i = 0$$

$$\Leftrightarrow l_{c,k}^T A_c R_c i = 0 \quad (c = 1, 2) \quad (1)$$

$R_c$  はワールド座標系からカメラ  $c$  座標系への回転行列を表し、すなわち  $R_1$  は単位行列であり、 $R_2 = R$  である。画像1および画像2から抽出された直線すべてについて上の式の関係が得られ、これらの関係式から最小二乗法により推定する。方向ベクトルのノルムが1であるという拘束条件のもとでは、この最小二乗解は両画像から抽出された直線数の合計が2以上であれば推定することができる。

階段までの距離  $d$  は、地面と階段の境界となる直線までの距離である。画像1から抽出した直線群のうち地面と階段の境界に当たる、画像中で一番下の直線を取り出し、それを3次元空間に逆投影して得られる平面と、推定されている地平面との交線を求める。得られた3次元直線までの距離を  $d$  の推定値とする。

### 3. コスト関数最小化による階段パラメータの最適化

最後に、前節で推定した階段の直線の方向ベクトル  $i$  および階段までの距離  $d$  に加え、ステップの高さ  $h$  と奥行き  $w$  の4つのパラメータを繰り返し推定によって最適化する。  $h$  および  $w$  に初期値を与え、生成される階段モデルをステレオ画像に投影する。各画像において投影されたモデルの直線群の各点に対して、そこから一番近い画像エッジまでの距離をすべて総和した値を評価し、この値が小さくなるように階段パラメータを推定する。本手法では各ピクセルについて最も近い画像エッジまでの距離を輝度値で表わした画像を利用する。本論文では、この画像のこと

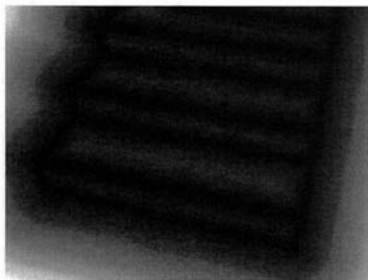


図 10 エッジからの距離を表わす画像  
Fig. 10 Distance-from-edge image.

を距離画像と呼ぶこととする。図 10 が図 4 のエッジ画像に対する距離画像であるが、この画像はエッジ上で 0 を取り、エッジから離れるほど輝度値が大きくなっている。この距離画像を利用すると、階段モデルの直線が各距離画像に投影されたピクセル位置の輝度値を総和した値は、前に述べた評価値と同様の意味を持つものになると考えられる。そこで、階段モデルが投影された位置における距離画像の輝度値の二乗和を、実際に最小化するコスト関数とする。画像 1 および画像 2 の距離画像を  $I_1, I_2$  とすると、コスト関数は式 (2) で表される。

$$e(\alpha, d, w, h) = \sum_{c=1}^2 \sum_{m_n \in S_c} (I_c[m_n])^2 \quad (2)$$

式中の  $S_c$  とは、階段モデルが画像  $c$  に投影された直線部分の領域を表し、 $I_c[m_n]$  はその領域中の点  $m_n$  における距離画像の輝度値を表す。また方向ベクトル  $\mathbf{i}$  は単位ベクトル、かつ地平面の法線ベクトル  $\mathbf{n}_g$  と直交しているので、自由度は 1 である。そこで図 11 で表されるように、 $\mathbf{i}$  をカメラ 1 座標系の  $X$  座標軸を地面に射影したベクトル  $\mathbf{X}'$  からの角度  $\alpha$  で表す。階段モデルが投影されるそれぞれの領域  $S_1, S_2$  は、階段パラメータが与えられれば決定され、それによりコスト関数の値も定まる。よって、コスト関数  $e$  はパラメータ  $\alpha, d, w, h$  の関数として表される。階段パラメータが初期値から微小量変化したときのコスト関数  $e$  の変化量を初期値回りでテーラー展開し、2次以降の項を省略すると、微小量変化したコスト関数は次のように表わされる。

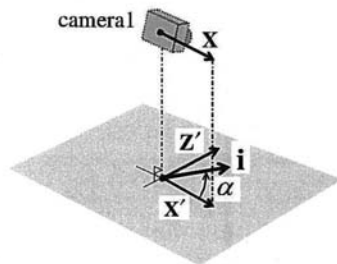


図 11 方向ベクトルの角度  $\alpha$   
Fig. 11 Angle  $\alpha$  of the direction vector.

$$e + \Delta e \simeq \sum_{c, m_n} \left( I_{c0} + \frac{\partial I}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial I}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial I}{\partial w} \Delta w + \frac{\partial I}{\partial h} \Delta h \right)^2 \quad (3)$$

$I_{c0}$  は初期値パラメータで生成される階段モデルが投影される位置の各点における距離画像の輝度値である。この式を各階段パラメータ  $\alpha, d, w, h$  で偏微分した値が 0 である 4 つ条件式を連立し、パラメータ更新分を求める。4 つの条件式を行列のかたちで表すと以下ようになる。

$$S p_{\Delta} = -b \quad (4)$$

$$S = \begin{bmatrix} \sum \left( \frac{\partial I}{\partial \alpha} \right)^2 & \sum \frac{\partial I}{\partial \alpha} \frac{\partial I}{\partial d} & \sum \frac{\partial I}{\partial \alpha} \frac{\partial I}{\partial w} & \sum \frac{\partial I}{\partial \alpha} \frac{\partial I}{\partial h} \\ \sum \frac{\partial I}{\partial \alpha} \frac{\partial I}{\partial d} & \sum \left( \frac{\partial I}{\partial d} \right)^2 & \sum \frac{\partial I}{\partial d} \frac{\partial I}{\partial w} & \sum \frac{\partial I}{\partial d} \frac{\partial I}{\partial h} \\ \sum \frac{\partial I}{\partial \alpha} \frac{\partial I}{\partial w} & \sum \frac{\partial I}{\partial d} \frac{\partial I}{\partial w} & \sum \left( \frac{\partial I}{\partial w} \right)^2 & \sum \frac{\partial I}{\partial w} \frac{\partial I}{\partial h} \\ \sum \frac{\partial I}{\partial \alpha} \frac{\partial I}{\partial h} & \sum \frac{\partial I}{\partial d} \frac{\partial I}{\partial h} & \sum \frac{\partial I}{\partial w} \frac{\partial I}{\partial h} & \sum \left( \frac{\partial I}{\partial h} \right)^2 \end{bmatrix}$$

$$p_{\Delta} = \begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta d \\ \Delta w \\ \Delta h \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} \sum I_{c0} \frac{\partial I}{\partial \alpha} \\ \sum I_{c0} \frac{\partial I}{\partial d} \\ \sum I_{c0} \frac{\partial I}{\partial w} \\ \sum I_{c0} \frac{\partial I}{\partial h} \end{bmatrix}$$

よってパラメータ更新分は  $p_{\Delta} = -S^{-1}b$  として求めることができる。具体的にパラメータ更新値を求めるためには  $S$  および  $b$  の各要素に含まれる 4 つの偏微分値を計算する必要があるが、これらの値は式 (5) のように距離画像の  $x$  方向および  $y$  方向の勾配を表す部分 (右辺の左側) と、階段パラメータの変化による階段モデル投影位置の各点の移動を表すヤコビアン (右辺の右側) に分解することができる。



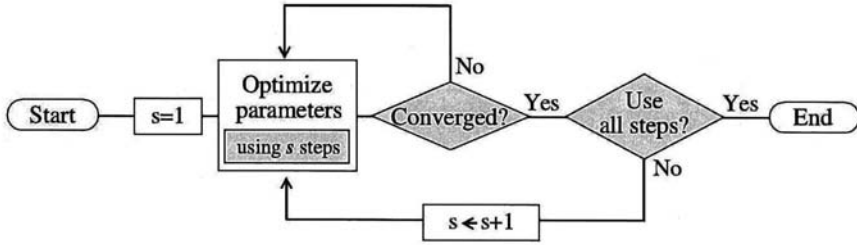


図 12 パラメータ更新のフロー  
Fig. 12 The flow of updating parameters.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \frac{\partial I}{\partial \alpha} & \frac{\partial I}{\partial d} & \frac{\partial I}{\partial w} & \frac{\partial I}{\partial h} \end{bmatrix} \\
 = & \begin{bmatrix} \frac{\partial I}{\partial x} & \frac{\partial I}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \alpha} & \frac{\partial x}{\partial d} & \frac{\partial x}{\partial w} & \frac{\partial x}{\partial h} \\ \frac{\partial y}{\partial \alpha} & \frac{\partial y}{\partial d} & \frac{\partial y}{\partial w} & \frac{\partial y}{\partial h} \end{bmatrix} \quad (5)
 \end{aligned}$$

距離画像の勾配は求めることができ、また階段モデルが各画像に投影される点はパラメータで表現できるので式 (5) 右辺の右側のヤコビアンもモデル投影位置の各点で計算が可能である。よってパラメータの更新値を計算することができ、この処理を繰り返し収束するまでおこなうことにより、階段パラメータの最適化を行なうことができる。

本手法では推定するパラメータとして階段の幅や段数を含めていないが、階段モデルが投影された領域  $S_c$  の各点から一番近いエッジまでの距離を最小化するようにパラメータ推定を行なうため、計算領域  $S_c$  は画像中の階段の領域内に設定する必要がある。ここでは階段モデルの幅を直線抽出で得られた、地平面と階段との接線の線分の幅とし、段数は各画像で抽出された直線の数として設定している。

またステップの奥行き  $w$  とステップの高さ  $h$  をパラメータとして推定している。これらの値が真値に対して誤差を持った場合、上段に行くほど誤差が蓄積される。そのため誤差が大きい場合、上の方の段では最も近いエッジが本来合わせるべきエッジとは異なる場合があり、パラメータの推定に悪影響を及ぼす。そこで提案手法では、パラメータ最適化に使用する階段モデルの段数を段階的に増加させることにより、この問題を解決する。図 12 がその流れを示したフローチャートである。まずこれまでに推定したパラメータを初期値として設定し、1 段だけの階段モデルを利用してパラメータ推定を行なう。ステップ幅の誤差は下の段ほど影響が少ないため、一番近

いエッジが本来合わせるべきエッジであるとみなせるため、この推定は安定に収束することができる。このあとパラメータの値が収束したかどうかを判定し、十分収束するまで繰り返す。収束したら、使用する段数を 1 段増やして再度繰り返し推定を行なう。この 2 重の繰り返し処理により、上方の段を利用して推定するときには、パラメータの誤差が十分少なくなっているので、安定に行なうことができる。

#### 4. 実験結果

本章では、提案手法を合成画像および実画像に対して適用した結果について述べる。まず、階段パラメータの真値が分かっている CG を利用して合成したステレオ画像に対して、本手法による階段パラメータ推定を行ない推定されたパラメータの精度について評価および検討を行なう。実験で使用した合成画像は、図 13 の (a), (b) で示される 2 枚の画像であり、画像サイズは  $640 \times 480$  のグレースケール画像である。この画像を生成するにあたって、カメラの内部パラメータ、2 台のカメラの位置関係を表す外部パラメータ、地平面パラメータおよびその他の階段パラメータはあらかじめ既知の値を利用している。地面の平面パラメータは、本来は画像から推定するのであるがこの部分は既存手法であるため、ここでは以下の真値を使用することで代用した。推定されたパラメータの初期値、推定値および真値を比較した結果を表 1 に示す。方向ベクトルの角度については、階段の直線を利用して推定した段階での誤差が  $+0.305[\text{deg}]$  であるが、最適化を行なった推定値における誤差は  $-0.025[\text{deg}]$  となっており、最適化により精度のよい推定結果が得られていることが分かる。階段までの奥行き  $d$  については直線を利用した推定値に対して大きな改善は見られなかったが、最終的な誤差が  $+1.04[\text{cm}]$  で

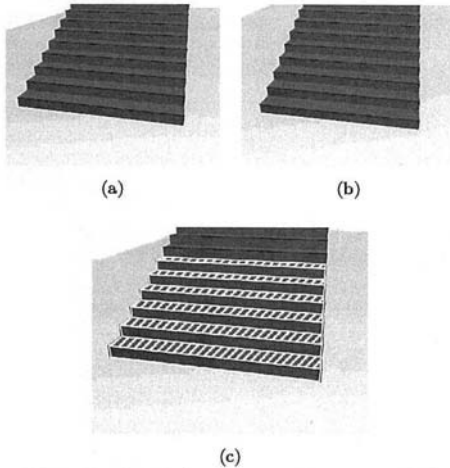


図 13 合成画像に対する結果:(a) 画像 1, (b) 画像 2, (c) 推定結果

Fig. 13 Experimental result of synthesized images. : (a)Image1, (b)Image2, (c)Estimation result

表 1 合成画像実験に対する推定値と真値の比較

Table 1 The estimation results and ground truth of synthesized images.

	Initial value	Estimated value	Ground truth
$\alpha$ [deg]	-12.890	-13.220	-13.195
$d$ [m]	3.3163	3.3173	3.3069
$w$ [m]	0.20	0.2957	0.3000
$h$ [m]	0.20	0.1512	0.1500

推定された。ステップ幅については、初期値をともに  $0.2[\text{m}]$  <sup>(注1)</sup> に設定しパラメータ推定を行なったところ  $w$  は  $-4.3[\text{mm}]$ ,  $h$  は  $+1.2[\text{mm}]$  の誤差で推定され、これもまた十分な精度で推定することができた。図 13 の (c) は、推定された階段を画像 1 に改めて投影したものを示している。図中では推定された階段を白い枠で表示し、さらに各ステップの踏み面を斜線で示した。階段の幅および段数は、計算に利用した領域に基づいている。投影された階段モデルと画像の階段がぴったりと重なっていることが分かる。

続いて、実際にステレオカメラで撮影した階段画像に対する実画像実験の結果について説明する。実画像実験は三脚に固定されたステレオカメラで撮影した画像を利用し、カメラ間の距離は約  $20[\text{cm}]$  である。実画像実験では、階段パラメータの真値との比

(注1): 一般的な階段のステップの高さおよび奥行きは、 $0.15 \sim 0.35[\text{cm}]$  程度の範囲であるため、実験では初期値をこの値に設定した。

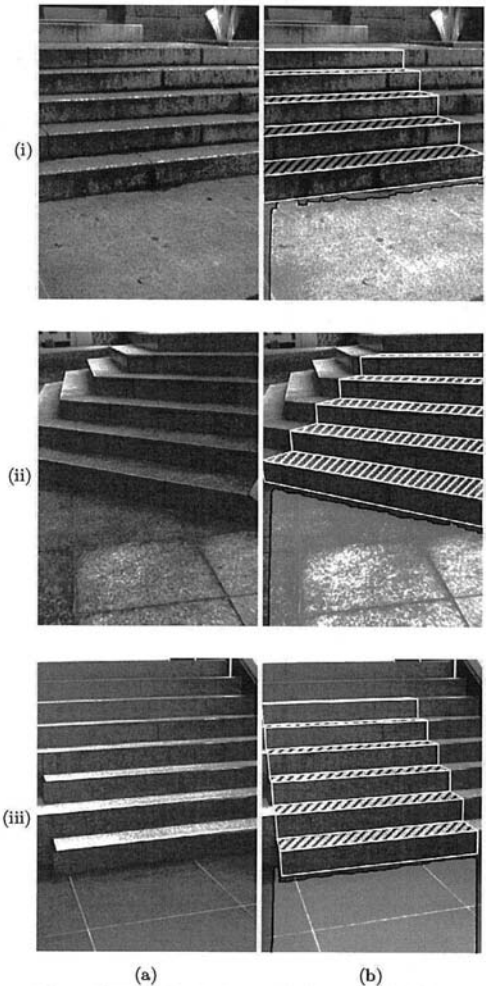


図 14 実画像実験の結果 : (a) 原画像, (b) 推定結果

Fig. 14 Estimation result of real images. :

(a)Original image, (b) Estimation result

較を行なうことが困難であるため、推定された階段モデルを画像に投影したものを示す。図 14 は、左の列に撮影した画像の 1 つを、右の列に推定された地平領域を明るくし、同時に推定された階段モデルを投影した画像を示した。投影された階段モデルが各画像の階段とぴったり重なっており、この結果から実画像に対して本手法を利用して階段の位置・形状を推定することができていることが分かる。

## 5. おわりに

本論文ではステレオカメラで撮影した階段画像から、階段の位置および形状を推定する方法について提案した。本手法では、まず3次元空間中における階段モデルを表現するパラメータを定義する。各画像から抽出される階段の直線等を利用し、求められる階段パラメータを推定する。最後に、階段モデルをステレオ画像に投影したものと、画像中の階段から生じる画像エッジとの距離の総和をコスト関数として定義し、このコスト関数が小さくなるように繰り返し計算を行ない、各パラメータの最適化を行なう。そのため本手法では、ステレオ対応探索を行わずに階段の位置・形状を推定することができる。実験ではまず合成画像に対して本手法を適用し、各パラメータが真値に対して精度よく推定されていることを示した。次に実画像に対する実験を行ない、実際の階段に対して位置や形状を求めることができ、提案手法の有効性を示した。

本論文で提案した手法では、ある時刻に撮影されたステレオ画像を利用して階段の位置・形状を推定する手法である。ステレオ動画像に対して階段の位置・形状を推定することを考えた場合、前時刻の推定結果を現時刻の推定に利用することにより、よりロバストな推定が行なえたと考えられ、それについて検討する必要がある。

## 文 献

- [1] R. Cupec, G. Schmidt, and O. Lorch. Experiments in vision-guided robot walking in a structured scenario. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vol. 4, pp. 1581–1586, June 2005.
- [2] R.O. Duda and P.E. Hart. Use of the hough transform to detect lines and curves in pictures. In *Communications of the ACM*, Vol. 15, pp. 11–15, 1972.
- [3] J. S. Gutmann, M. Fukuchi, and M. Fujita. A floor and obstacle height map for 3d navigation of a humanoid robot. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1066–1071, 2005.
- [4] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka. The development of honda humanoid robot. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 2, pp. 1321–1326, May 1998.
- [5] P.V.C. Hough. Methods and means for recognizing complex patterns, 1962. U.S. Patent 069654.
- [6] X. Lu and R. Manduchi. Detection and localization of curbs and stairways using stereo vision. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 4648–4654, 2005.
- [7] K. Okada, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue. Plane segment finder : algorithm, implementation and applications. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 2, pp. 2120–2125, 2001.
- [8] S. Se. Zebra-crossing detection for the partially sighted. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Vol. 2, pp. 211–217, 2000.
- [9] S. Se and M. Brady. Vision-based detection of staircases. In *Proceedings of the 4th Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*, Vol. 1, pp. 535–540, January 2000.
- [10] S. Se and M. Brady. Road feature detection and estimation. In *Machine Vision Applications (MVA)*, Vol. 14, pp. 157–165, 2003.
- [11] A. Seki and M. Okutomi. Robust obstacle detection in general road environment based on road extraction and pose estimation. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2006)*, pp. 437–444, 2006.
- [12] 関晃仁, 奥富正敏. ステレオ動画像を利用した平面抽出による障害物検出. 情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 2004-CVIM-143, No. 26, pp. 17–24, 2004.