

## E-11 視覚障害者の安全歩行を目的とするステレオ画像を用いた階段の検知 Detection of Stairs Using Stereo Images as a Walking Aid for Visually Impaired Persons

速水 正樹<sup>†</sup>      ヒルド ミハエル<sup>†</sup>  
Masaki Hayami      Michael Hild

### 1 はじめに

現在、わが国には30万人以上の視覚障害者がいると推定されている [1]。彼らが街中を歩行することを考えると、転倒や転落の可能性がある階段は危険な場所である。そのため、階段の存在を視覚障害者に音声でアナウンスするシステムは有意義だと考えられる。このような背景から、単眼カメラを用いた階段検知の研究が報告されている [3][4]。[3]では、階段画像から抽出した直線と、その直線を逆投影して得られる直線、これら2直線によって定まる平面の法線ベクトルを利用して階段認識を行っている。また、[4]では3次元空間上の平面を透視変換した際に得られる不変量から、画像上に複数の平面が規則的に写っているか判定することで階段の検知を行っている。しかし、[3][4]共に単眼カメラを用いていることから、3次元データを復元できないため、カメラから階段までの距離を測定するためには、強い幾何拘束が必要である。一方、ヒューマノイド・ロボットの開発を目的とした階段の形状推定 [2] や、車椅子の階段から転落防止を目的とした研究 [5] も発表されている。[2]は、まず2台のカメラから地面の法線ベクトルを求め、[3]でも利用されている法線ベクトルを含めた「階段モデル」を作成している。その後、階段モデルを画像に投影して得られる直線と、階段画像で抽出した直線が一致するように階段パラメータを最適化している。この手法では高精度な階段の形状推定が行えると主張されているが、階段の1段目の段差と地面との交線が必要となる欠点がある。[5]は、下り階段を対象としており、ステレオ画像ペアで抽出した直線群と、各画像平面を縦方向に4等分する直線群との3つの交点を求めている。そして、その3交点のステレオ画像間の対応から、大まかな3次元ポイントを計算して、階段の傾斜を推定している。しかし、この手法ではステレオ問題について深く議論されておらず、例えば階段を正面から撮影した場合は認識が不可能である。

以上に述べた先行研究 [2] - [5] では基本的に、正確な3次元データを取得していない。この理由は、3次元データを取得するために必要なステレオマッチングを階段画像に対して行ったとき、一意な対応が得られないケースが多いからである。しかし、階段の3次元データを取得することができれば、安定に階段認識や階段までの距離推定が可能になる。3次元データを取得する方法としては、レンジファインダーを用いること

が考えられるが、視覚障害者が装着することを想定すると、価格や不便さの面から実用化は難しい。そこで本研究では、ステレオカメラシステムによって撮影した階段画像のペアにおいて、「階段の特徴を利用したマッチング法」を提案する。そして求めたマッチから復元した3次元データを利用した階段認識法について言及する。以下、2節では階段のステレオ画像を対象としたステレオマッチングの問題について述べ、3節では「階段の特徴を利用したマッチング法」を含めた階段認識アルゴリズムを解説し、4節で、そのアルゴリズムの評価実験を示す。そして、最後に5節でまとめを記す。

### 2 階段のステレオ画像におけるマッチング問題

2台のカメラが左右に配置されたステレオカメラシステムで撮影した階段のステレオ画像ペア (図1) に対してステレオマッチングを行うと、対応が一意に決定できないことが多い。その原因は一般的な階段が、図1のように垂直面と水平面でテクスチャが欠乏しており、複数の対応候補が存在するからである。また階段の「段鼻」(図1)で検出可能なエッジ点(段鼻エッジ点)を用いてステレオマッチングを行っても、複数の対応候補が存在しているため、対応を一意に決定できない。そこで段鼻エッジ点を利用するために、ステレオカメラシステムをベースラインが地面に直交するように回転させる(図2参照)。この回転させた状態で撮影したステレオ画像ペアの例を図3に示す。ただし、図2の「上カメラ」で撮影した画像を  $I^T(u, v)$ 、「下カメラ」で撮影した画像を  $I^B(u, v)$  としている。

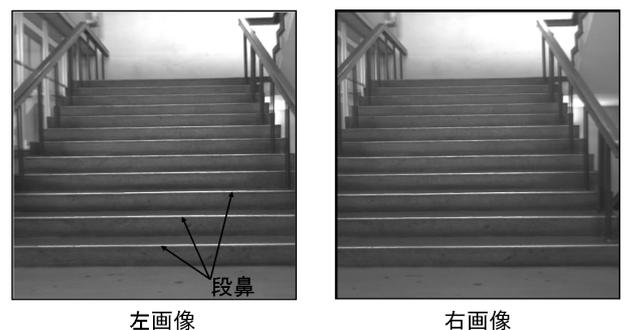


図1: ステレオ画像ペア (左右)

段鼻エッジ点を利用したマッチングでは、上画像  $I^T(u, v)$  上の注目しているエッジ点を中心にした小領域内の明度パターンと、下画像  $I^B(u, v)$  上のエッジ点の上にあるそれぞれのエッジ点を中心にした小領域内の明度パターン

<sup>†</sup> 大阪電気通信大学大学院 工学研究科  
Osaka Electro-Communication University  
Graduate School of Engineering

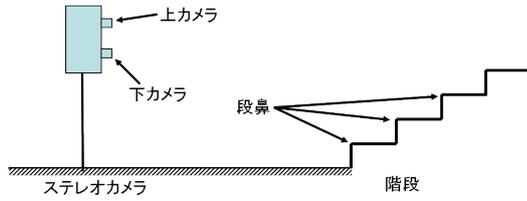


図 2: 階段とステレオカメラの配置

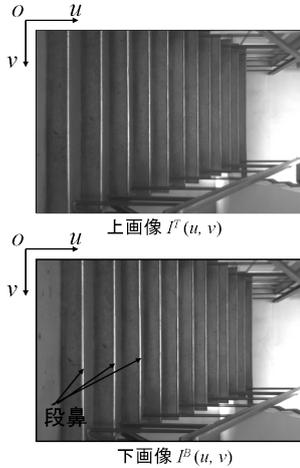


図 3: ステレオ画像 (上下)

のマッチングを行う。このとき、エピポーラ線上に存在する段鼻エッジ点におけるそれぞれの小領域がよく似ていることが多いため、求められた対応付けが誤る可能性がある。従って、この問題を避けるために、主に段鼻で存在する階段上のエッジ点をまず「直線」にグルーピングし、その直線に基づいたより頑健なマッチングを行う方法を提案する。

### 3 提案アルゴリズム

#### 3.1 アルゴリズムの概略

提案アルゴリズムでは、まずステレオ画像ペアでエッジ点を検出し、ハフ変換を行う。次にハフ空間上でピークを求め、そのピークによって定まる直線をステレオ画像間で対応付ける。そして、対応している直線ペアの近隣に存在するエッジ点のみでマッチングを行う。最後に、「画像平面上の直線」の近隣エッジ点で計算した 3 次元ポイントに対して直線を当てはめ、その「3 次元空間における直線」の特徴を用いて階段の認識処理を行う。このとき、階段が存在していると判断された場合、それをユーザー（視覚障害者）にアナウンスする。以下、アルゴリズムをまとめて示す。

STEP 1: マッチングのための前処理

STEP 1-1: エッジ点検出

STEP 1-2: ハフ変換, ハフ空間内のピーク検出

STEP 2: マッチング

STEP 2-1: 直線の対応付け (ハフ空間内のピークを対応付ける)

STEP 2-2: エッジ点におけるサブピクセル精度のマッチング及び 3 次元の直線当てはめ

STEP 3: 階段の認識

#### 3.2 マッチングのための前処理

本項で述べる前処理は、ステレオ画像ペア  $I^T(u, v)$ ,  $I^B(u, v)$  の 2 画像に対して行っているが、説明上、原画像を  $I(u, v)$  とする。

##### 3.2.1 エッジ点の検出と選択及び分類

エッジ点検出では、まず原画像  $I(u, v)$  に対して LOG フィルタをかけることによって  $F(u, v)$  を得る。そして  $F(u, v)$  の全てのピクセルにおいて零交差点の計算を行い、もし零交差点が存在していれば、その位置を保存する。次に零交差点において、「階段画像の段鼻における特徴」を明らかに示していない零交差点を削除する。ここで「階段画像の段鼻における特徴」とは (1) エッジ強度  $f$  が強いこと、(2) 画像に写っている段鼻の直線方向が、 $v$  軸方向に近いこと (図 4 参照) である。したがって、各エッジ点の位置における勾配ベクトルを計算し、そのエッジ強度  $f$  とエッジ方向  $\theta$  が、 $(f > t_f)$  かつ  $(t_{\theta 1} < \theta < t_{\theta 2})$  を満たすエッジ点のみを選択して残す ( $t_f, t_{\theta 1}, t_{\theta 2}$  は閾値)。この選択処理によって、例えば階段の手すり (図 4) で現れるような、階段認識に不要なエッジ点を排除できる (図 5 参照)。

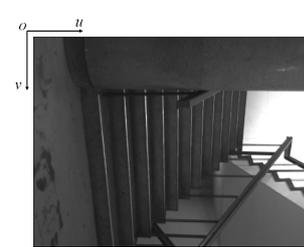


図 4: 階段画像  $I(u, v)$

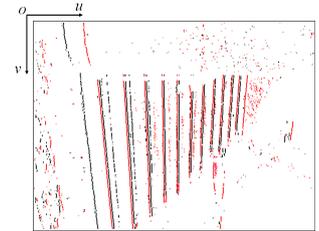


図 5: エッジ点の選択を行った、図 4 のエッジ点画像

##### 3.2.2 ハフ変換、ハフ空間上のピーク検出

本項では、3.2.1 で検出したエッジ点をハフ変換して、直線を抽出する手法を述べる。ハフ変換では、「木」や「テクスチャがある床」が写っている画像 (図 7 参照) で検出された多くのエッジ点をハフ空間へ写像させた場合、ハフ空間上で鋭いピークが現れないことが多い。そこでハフ空間におけるピークを先鋭化するために、エッジ点を 2 種類に分類して、エッジ点の種類ごとに別々のハフ空間へ写像させる。具体的には、エッジ点位置における原画像  $I(u, v)$  の  $u$  方向偏微分  $I_u(u, v)$  が  $I_u(u, v) > 0$  ならば、そのエッジ点をハフ空間  $H_1(\theta, \rho)$  へ写像させ、 $I_u(u, v) < 0$  ならばそのエッジ点をハフ空間  $H_2(\theta, \rho)$  へ写像させる。例えば、図 6 において破線で囲まれたエッジ点群  $a$  と  $c$  の各エッジ点では  $I_u(u, v) < 0$  であるため、各エッジ点は  $H_2(\theta, \rho)$  へ写像される。一方、エッジ点群  $b$  と  $d$  の各エッジ点では  $I_u(u, v) > 0$  であるため、各エッジ点は  $H_1(\theta, \rho)$  へ写像される。

そして、全てのエッジ点を種類ごとに  $H_m(\theta, \rho)$  ( $m = 1, 2$ ) へ写像させた後、両方のハフ空間におけるピークを検出す

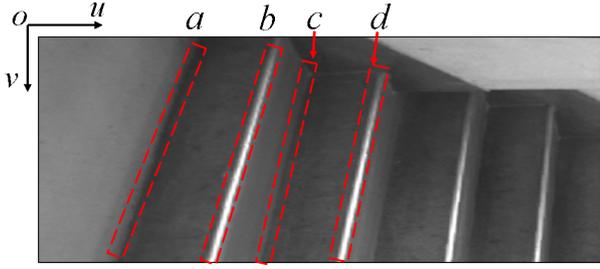


図 6: 階段画像

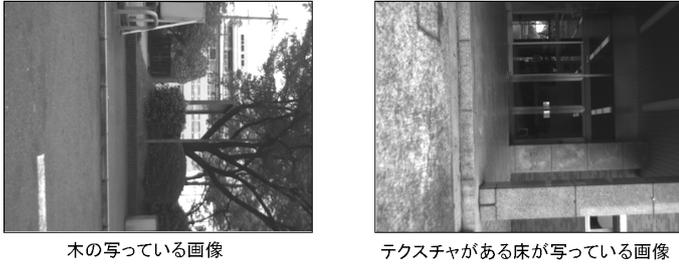


図 7: エッジ点が多く検出されるシーン

る。このとき  $m$  番目のハフ空間における  $n$  番目のピークの位置を  $(\theta_{m,n}, \rho_{m,n})$  とする。また、上画像に対応しているハフ空間を  $H_m^T(\theta, \rho)$  ( $m = 1, 2$ )、下画像に対応しているハフ空間を  $H_m^B(\theta, \rho)$  ( $m = 1, 2$ ) とする。

### 3.3 マッチング

#### 3.3.1 直線の対応付け

次に、図 8 で示されている階段のステレオ画像ペアにおける、主なエッジの直線の対応付けを求める。これらの直線は前節で説明したハフ空間  $H_m^T(\theta, \rho)$ ,  $H_m^B(\theta, \rho)$  ( $m = 1, 2$ ) におけるピークにより表現されているため、この直線の対応付けを「ハフ空間におけるピークの対応付け問題」として解く。

対応付けの手順については、図 8 のステレオ画像ペアから求めたハフ空間  $H_1^T(\theta, \rho)$  と  $H_2^T(\theta, \rho)$  及び、ハフ空間  $H_1^B(\theta, \rho)$  と  $H_2^B(\theta, \rho)$  (図 9 参照) を利用して説明する。

前提条件として、ピークの対応付けは  $H_1^T(\theta, \rho)$  と  $H_1^B(\theta, \rho)$  の間と、 $H_2^T(\theta, \rho)$  と  $H_2^B(\theta, \rho)$  の間のみで行う。対応付けの手順は、まず図 9 における  $H_1^T(\theta, \rho)$  のピークの位置  $(\theta_{1,1}^T, \rho_{1,1}^T)$  に注目して、 $H_1^B(\theta, \rho)$  上で対応するピークを探す。対応するピークの条件は、 $(\rho_{1,1}^T < \rho_{1,n}^B)$  かつ  $(\theta_{1,1}^T \cong \theta_{1,n}^B)$  である。これらの条件を満たすピークを  $\rho$  の昇順で探して、最初に満たすピークが  $(\theta_{1,1}, \rho_{1,1})$  の対応となる。図 9 では、 $(\theta_{1,1}^T, \rho_{1,1}^T)$  と破線で結ばれている  $(\theta_{1,1}^B, \rho_{1,1}^B)$  が対応となる。次に  $(\theta_{1,2}^T, \rho_{1,2}^T)$  に注目して、対応するピークを探す。このとき、すでに対応付けされている  $(\theta_{1,1}^B, \rho_{1,1}^B)$  は対応候補から外す。図 9 の場合は  $(\theta_{1,2}^T, \rho_{1,2}^T)$  と  $(\theta_{1,2}^B, \rho_{1,2}^B)$  が対応となる。 $H_2^T(\theta, \rho)$  と  $H_2^B(\theta, \rho)$  の間でも同様の処理によって対応付けを行う。対応付けを行った結果、求めたピークの対応は、図 9 の破線で結ばれている。

以上の手順で決定したピークの対応によって定まる上画像における直線群を  $L_i^T (i = 1, 2, \dots, N)$  とし、下画像における直線群を  $L_i^B (i = 1, 2, \dots, N)$  とする。

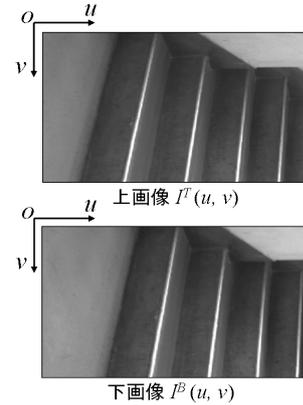


図 8: ステレオ画像ペア

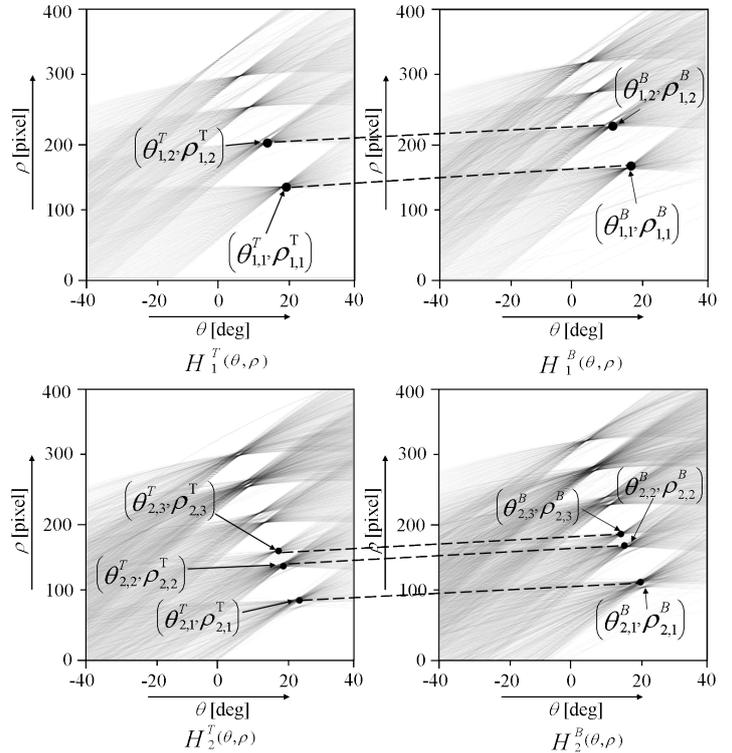


図 9: ハフ空間におけるピークの対応付け

#### 3.3.2 エッジ点のマッチング及び 3 次元ポイントの直線当てはめ

ここでは、まず 3.3.1 で求めた階段のステレオ画像間で対応付けられている上画像の直線群  $L_i^T (i = 1, 2, \dots, N)$  と、下画像における直線群  $L_i^B (i = 1, 2, \dots, N)$  を利用して、エッジ点のマッチングを行う。エッジ点のマッチングの手順としては、最初に上画像の  $i$  番目の直線  $L_i^T$  の近隣に存在する複数のエッジ点から、 $i$  番目の直線  $L_i^T$  に属しているエッジ点群を決定する。続いて、決定した  $i$  番目の直線  $L_i^T$  に属しているエッジ点群において、1つのエッジ点に注目する。次に、

この注目しているエッジ点に対応しているエピソード線と、上画像の  $i$  番目の直線  $L_i^T$  に対応している下画像の  $i$  番目の直線  $L_i^B$  との交点を求める。そして求めた下画像における交点の近隣に存在するエッジ点を対象として、上画像で注目しているエッジ点のマッチングを行う。最後に、ピクセルレベルで決定したエッジ点のマッチを基準として、サブピクセル精度の視差を求める。以上のマッチングからサブピクセル精度の視差計算までの処理を、上画像における  $i$  番目の直線  $L_i^T$  に属している全てのエッジ点に対して行う。

ここで、階段認識を行うために上画像の  $i$  番目の直線  $L_i^T$  に属しているエッジ点群における視差から、3次元ポイント群を復元する。そして、その3次元ポイント群に対して直線当てはめを行う。このとき、当てはめた  $i$  番目の3次元直線を  $L_i$  とする。同様の処理を、全ての上画像における直線  $L_i^T (i = 1, 2, \dots, N)$  に対して行い、3次元直線群  $L_i (i = 1, 2, \dots, N)$  を求める。ここで、求めた3次元直線群を用いて階段の認識を行う。

### 3.4 階段の認識

ここでは、まず階段の認識に用いる特徴について記述する。その後、具体的な階段認識アルゴリズムについて示す。

本稿の階段認識手法では、多くの階段を表す条件の中から、以下の2つのみを用いる。

条件(1) 階段の段鼻(図10における太線)はそれぞれ互いに平行である。

条件(2) ある段と次の段における高さの差を  $\Delta Y$  (図10参照)、ある段と次の段における奥行き差を  $\Delta Z$  とすると、 $(\delta_{Y1} < \Delta Y < \delta_{Y2})$  かつ  $(\delta_{Z1} < \Delta Z < \delta_{Z2})$  が成り立つ ( $\delta_{Y1}, \delta_{Y2}, \delta_{Z1}, \delta_{Z2}$  は適切な閾値である。)

なお、 $\Delta Y, \Delta Z$  を用いる前提として、カメラ座標系における3次元データが、階段の段鼻とX軸が平行になるように変換されており、Y軸は地面にほぼ垂直であるとしている。

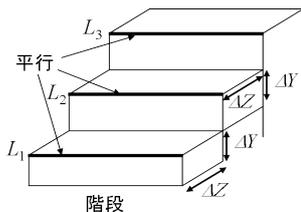


図10: 階段の概念図

階段認識処理では、まず3次元直線群  $L_i (i = 1, 2, \dots, N)$  において、条件(1)を明らかに満たさない直線を消去する。続いて、条件(2)を満たすか判定するために図11に示しているような平面  $C$  を考える。この平面  $C$  は地面に垂直であり、残っている直線群  $L_i (i = 1, 2, \dots, M)$  全てに対して直交に近くなっている。次に、平面  $C$  と残っている直線群との

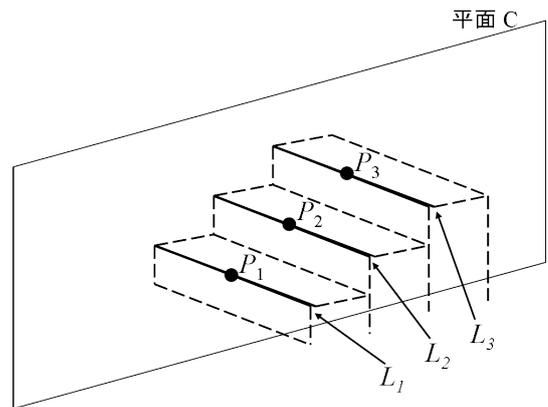


図11: 平面  $C$  と直線群との交点  $P_i$  の概念図

交点群  $P_i (X_i, Y_i, Z_i) (i = 1, 2, \dots, M)$  (図11参照) を求める。ただし、1つの段鼻において複数の3次元直線が得られていた場合、隣接した交点が複数現れるため、その中から最適な交点のみを選択する。ここで求めた交点群を用いて、階段の認識を行う。

階段認識の方法について図12の階段の断面を用いて説明する。図12は、交点  $P_i$  が6点得られた例である。このとき、最初は  $P_1$  に注目して、 $P_2, P_3, P_4$  と順次、「条件(2)を満たす交点の組み合わせ」が存在しているかチェックしていく。 $P_1$  と  $P_2$  の場合は  $\Delta Z$  の条件を満たしているが、 $\Delta Y$  の条件を満たしていないため、組み合わせにはならない。 $P_1$  と  $P_3$  も同様の理由で組み合わせにはならない。さらに、 $P_4$  についてチェックすると、条件(2)を満足するため、組み合わせ  $(P_1, P_4)$  を決定して、注目する交点を  $P_2$  に移す。 $P_2$  に対しても同様の処理を行うと、 $(P_2, P_5)$  という組み合わせが決定される。この後、注目交点を更新しながら同様の処理を行うと、最終的に  $(P_1, P_4), (P_2, P_5), (P_4, P_6)$  という3つの組み合わせができる。ここで、「組み合わせの数」が2組以上ならば、「階段が存在する」と判定する。そのため、図12では階段が存在すると判定される。もし階段の存在が確認された場合は、求めた組み合わせの要素の中で、添え字  $i$  が最小である交点  $P_i$  の  $Z_i$  をステレオカメラシステムから階段までの距離とする。

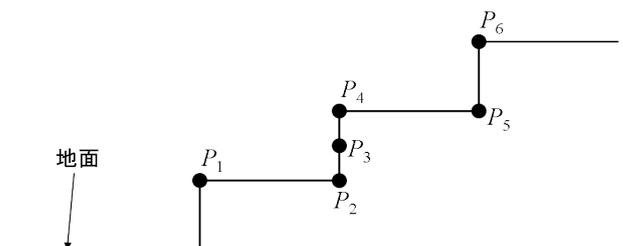


図12: 階段の断面図と交点  $P_i$

ここで、「1段のみの段差」の認識についても、階段認識と類似した手法で行うことが可能だが、今回は詳細を省略する。

## 4 実験結果

階段認識アルゴリズムの評価実験は、4箇所の階段を対象とした。1箇所の階段においては、ステレオカメラシステムから階段までの距離  $Z$  を  $200\text{ cm}$  から  $400\text{ cm}$  まで  $50\text{ cm}$  ごとに变化させて撮影を行った。また、1箇所の階段に対して正面方向と斜め方向から撮影し、合計 40 組のステレオ画像ペアを評価実験に使用した。実験に用いた上画像の一例を図 13 に示す。なお、4箇所の階段における1段の奥行きと高さは、階段ごとに若干の差異はあるが、奥行きが  $29\text{ cm}$ 、高さが  $17\text{ cm}$  程度であった。

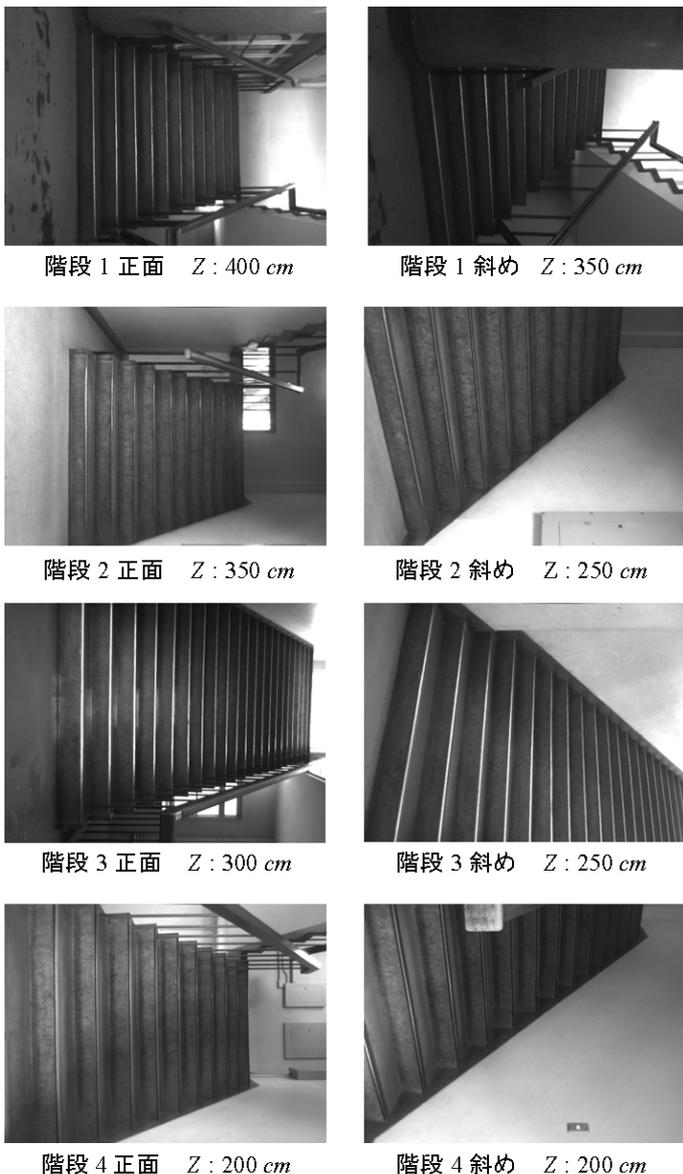


図 13: 実験に用いた画像の一例

以上に述べた 40 組のステレオ画像ペアに対して、3 節で述べた閾値を、 $\delta_{Y1} = 13\text{ cm}$ 、 $\delta_{Y2} = 21\text{ cm}$ 、 $\delta_{Z1} = 24\text{ cm}$ 、 $\delta_{Z2} = 34\text{ cm}$  として評価実験を行った。その結果、40 組全てにおいて、階段の存在を認識することができた。さらに、階段 1 の正面と階段 3 の斜めにおいて、ステレオカメ

ラシステムから階段までの推定距離  $Z'$  を求めた結果を表 1 に示す。表 1 では、実測距離  $Z$  と推定距離  $Z'$  との誤差が 2% 以下となっており、これは他のステレオ画像ペアでも同様であった。

表 1: 推定距離の一例

$Z(\text{cm})$	階段 1 正面の $Z'(\text{cm})$	階段 3 斜めの $Z'(\text{cm})$
200	203	201
250	247	254
300	305	303
350	352	355
400	407	394

## 5 おわりに

本稿では、階段のステレオ画像ペアを対象とした頑健なマッチング法について提案した。また、この手法によって得られた 3 次元データを用いた階段認識法の有効性を示した。今後は、下り階段や一段のみの段差を含めた、マッチング法と階段認識法を考える必要がある。

## 参考文献

- [1] 平成 17 年度版 障害者白書 内閣府発行
- [2] 田中, 奥富, ステレオ画像を利用した階段の空間位置推定, IPSJ SIG Notes.CVIM 2007(31), 63-70, 2007.
- [3] 山中, 呉, 塩山, 画像による視覚障害者の単独歩行支援システムの開発: 階段の検知, Technical Report of IEICE, PRMU 100 (565), 9-16, 2001.
- [4] 山中, 呉, 塩山, 画像による階段の検知と距離推定, Technical Report of IEICE, PRMU 101 (569), 31-38, 2002.
- [5] 小河原, 福田, 中, Hough 変換を用いた下り階段の実時間認識, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C 70 (695), 1971-1976, 2004.