画像によるプラットフォーム内観測点から 黄色点字誘導ブロックまでの距離推定[†]

西 部 優 奈*・呉 海 元**・塩 山 忠 義***

Estimating the Distance from View Point to Yellow Tactile Tile on Platform Using an Image[†]

Yuna NISHIBE*, Haiyuan WU** and Tadayoshi SHIOYAMA***

For the purpose of mobility aid for the blind, this paper presents a new method for detecting the position of yellow tactile tile along train platform curb which is one of the most dangerous drop-off, by using an image. In Japan, yellow tactile tiles are usually set along train platform curbs in order to notify the blind of danger. In the method, first, we extract the region of yellow tactile tile in an image with a perceptually uniform color system. And two edge lines of both side of yellow tactile tile are detected by using the Hough transformation. Then vertical lines such as pillars are extracted using information of the width of yellow tactile tile to obtain a surface normal of a platform. Finally, the distance from the blind to the yellow tactile tile is estimated based on 3D vector analysis under the perspective projection. The effectiveness of the proposed method is shown from extensive experiments for real images of subway platform scenes.

Key Words: drop-off, train platform, yellow tactile tile, vector analysis, image

1. はじめに

視覚障害者の歩行補助具として主に白杖が用いられている。しかし、その先端の到達点は足下から 1m 前後であるため、白杖から得られる情報は限られたものである¹⁾。歩行速度によっては段差や障害物の発見が遅くなり、転落、転倒を引き起こすおそれと考えられる。そこで、この白杖の欠点を補うため、超音波やレーザなどを利用し、障害物を検出する ETA(Electronic Travel Aid)が開発されている^{2)~4)}。しかし、それらを利用しても、下方段差を検出するのは非常に困難である。

下方段差の中で最も危険なものの 1 つとして駅のプラットフォーム縁端がある。本論文では、視覚障害者がプラットフォームから転落するのを防ぐために画像を用いて観測点(カメラ

視点)から黄色点字誘導ブロックの外側までの水平距離とその方向を計測することを目的とする。一般に画像による 3 次元計測はステレオ法、またはレンジファインダのような方法が利用される。われわれはステレオ法の対応付け問題を回避し、使用者の負担を軽減するために、単眼法による距離推定を行なうことにする。単眼で 3 次元計測を行なうためには何らかの拘束条件や既知情報が必要となる。たとえば、大きさのわかっているモデル物体を画像と対応させることにより、相対的な奥行き情報が推定できるが、この場合、モデル物体情報が辞書として学習されていなければならない。また、単眼明度情報からの 3 次元相対形状復元(Shape from shading)の場合、光源方向と物体表面の反射率がわかっているなければならない。したがって、既知情報がない未知物体の計測には単眼法は適用できない。このことから単眼法で絶対的 3 次元計測を行なった応用研究は少ないと思われる。われわれは今まで、カメラの高さを既知とし、地下の駅において照明灯と行き先表示板を利用して、画像を用いて観測点からプラットフォーム縁端までの距離を計測する方法を提案した⁵⁾。しかし、この方法ではカメラの方向によっては行き先表示板が画像内になくプラットフォーム平面の法線ベクトルが求められなかったり、観測点がプラットフォーム縁端に近い場合に天井の照明灯が抽出できないという問題点があった。

本論文では、日本ですでにプラットフォーム縁端に沿って貼られている黄色点字誘導ブロックの情報を利用して、一枚のカラー画像から、観測点から黄色点字誘導ブロックまでの距

[†] 第 42 回システム制御情報学会研究発表講演会で発表(1998・5)

* 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科情報生産科学専攻(現和歌山大学システム工学部デザイン情報学科)

** 和歌山大学システム工学部情報通信システム学科

*** 京都工芸繊維大学工芸学部機械システム工学科

* Division of Information and Production Science, Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology (Dept. of Design and Information Sciences, Faculty of Systems Engineering, Wakayama University)

** Dept. of Computer and Communication, Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

*** Dept. of Mechanical and System Engineering, Faculty of Engineering and Design, Kyoto Institute of Technology

(Received January 10, 2002)

(Revised February 3, 2003)

離を計測する方法を提案する。視覚障害者の単独歩行を支援するために、新しく音響案内などのセンサを駅構内に設置する方法も考えられるが、膨大な時間と費用が必要となるため、すぐに実現することが困難であると考えられる。本論文で提案する手法は実用化の際、CCD デジタルカメラとモバイルコンピュータを接続させたものを視覚障害者自身が持ち、情報を受け取るものである。環境によって歩行できる場所を制限されることが少なくなる。本手法ではプラットホーム緑端に近い黄色点字誘導ブロックと柱や電車などのエッジからプラットホーム平面の法線ベクトルを求める方法を用いるため、前述の欠点が無く、カメラの方向に拘らず距離の推定ができる。

提案手法において、まず、事前学習により得られた黄色点字誘導ブロックのカラー空間での黄色分布モデルを用いて、画像から黄色点字誘導ブロックの領域を抽出し、エッジ抽出、細線化、条件付きの Hough 変換などの処理によって黄色点字誘導ブロック両側のエッジ直線を安定に抽出する。そして、プラットホーム平面の法線ベクトルを得るために駅構内の柱や、電車のドア、看板などのエッジから鉛直方向の直線を求める。そこで、エッジ画像から Hough 変換によって鉛直方向の候補となる直線を抽出し、複数得られた鉛直方向の候補となる直線から評価式を用いて最適な 1 本を選出する。このようにして得られた黄色点字誘導ブロックのエッジと鉛直方向のエッジの直線と透視変換の関係から 3 次元空間ベクトルの解析を行ない、観測点から黄色点字誘導ブロック外側までの水平距離とその方向を推定する。

また、駅構内での黄色点字誘導ブロックの設置についてガイドライン⁷⁾で「プラットホーム緑端から 80cm 以上離れた場所に点状ブロックを連続して敷設する」と示されている。そこで黄色点字誘導ブロックからプラットホーム緑端までの距離の代表値がわかっている路線では、プラットホーム緑端までの距離を推定する。黄色点字誘導ブロックとプラットホーム緑端の 3 次元空間と Hough 空間の関係に基づいて、それらの画像上の直線の幾何関係の制約式を導出する。この制約式を用いてプラットホーム緑端の候補直線集合から「真の緑端」を選び出し、観測点（カメラ視点）からプラットホーム緑端までの距離を求める。

駅構内の普通の照明の下で複数種の路線の地下にある駅（以後は地下駅と呼ぶ）で撮影した実画像を用いた実験から、比較的混雑した駅、電車の進入がある場合、また黄色の洋服を着た人がいる場合でも黄色点字誘導ブロックまでの距離およびプラットホーム緑端までの距離が、それぞれ rms 誤差 9cm, 10cm で推定できることが確認できた。

2. 黄色点字誘導ブロックおよびプラットホーム緑端までの距離計測

2.1 黄色点字誘導ブロック

現在、日本のほとんどの駅構内ではプラットホーム緑端に沿って黄色点字誘導ブロックが設置されている。この黄色点

字誘導ブロックの形状や配列が、2001 年に JIS 規格「視覚障害者誘導用ブロック」として制定された。日本では、視覚障害者誘導用ブロックには警告ブロックと呼ばれる点状ブロック (Fig.1(a)) と誘導ブロックと呼ばれる線状ブロック (Fig.1(b)) の 2 種類がある。駅構内での視覚障害者誘導用ブロックの設置については、ガイドラインに「ホームドア、可動式ホーム柵、点状ブロックなどにより転落防止措置を行なう」と示されているように、プラットホーム緑端からの転落を防止するために警告ブロックである点状ブロックが設置されている。本研究ではこのプラットホーム緑端に沿って貼られている点状ブロックの列を検出し、その外側までの距離の測定を行なう。本研究では点状ブロックの色と大きさ（幅）の情報のみを利用するので、線状ブロックに対しても有効であると考えられる。したがって、本論文では視覚障害者誘導用ブロックを黄色点字誘導ブロックと呼ぶことにする。

Fig. 1 Yellow tactile tile

2.2 距離計測の原理

Fig. 2 The relation of lines $l_i, i = 1, 2, 3$, in the 3-D space in a train platform

Fig.2 に示すように 3 次元空間での黄色点字誘導ブロックの外側のエッジ直線 l_1 と内側のエッジ直線 l_2 、プラットホーム緑端の直線 l_3 は平行である。直線 $l_i, i = 1, 2, 3$ の画像上の透視変換像をそれぞれ $L_i, i = 1, 2, 3$ とし、つぎのように表わす。

$$a_i x + b_i y + c_i = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

Fig.3(a) に視点（カメラのレンズ中心）を O とする透視変換における直線 l_i と L_i の関係を示す。ただし、図中の X, Y, Z は空間座標軸を、 x, y は画像面上の座標軸を表わす。直線 L_i と視点 O を含む平面の単位法線ベクトル $\vec{m}_i$ はつぎのようになる。

$$\vec{m}_i = \frac{1}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2 + (\frac{c_i}{f})^2}} (a_i \ b_i \ \frac{c_i}{f})^T, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

Fig. 3 The relation in 3-D space

- (a) The relation between the line L_i and the vector $\vec{m}_i$
 (b) The relation between the planes $(\bar{P}_0, \bar{P}_i)$

ただし, f は焦点距離を表わし, 記号 T は転置を示す. 直線 $l_i, i = 1, 2, 3$ の単位方向ベクトルを $\vec{u}$ とすると, Fig.3(a) からわかるように $\vec{u}$ は $\vec{m}_i$ に直交する.

また, Fig.2に示すように柱のエッジなどの駅構内の鉛直方向の直線を k , その方向の単位ベクトルを $\vec{w}$ とすると, $\vec{w}$ とプラットフォーム平面の単位法線ベクトル $\vec{n}$ は等しくなる. 直線 k の透視変換像を K としてつぎのように表わす.

$$a_k x + b_k y + c_k = 0 \quad (3)$$

また K と視点 O を含む平面の単位法線ベクトルを $\vec{v}$ とすると, $\vec{v}$ は次式で与えられる.

$$\vec{v} = \frac{1}{\sqrt{a_k^2 + b_k^2 + (\frac{c_k}{f})^2}} (a_k \ b_k \ \frac{c_k}{f})^T \quad (4)$$

$\vec{v}$ と $\vec{w}$ は直交するので $\vec{v}$ と $\vec{n}$ は直交する. したがって, 以下の式が得られる.

$$(\vec{u}, \vec{m}_i) = 0, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

$$(\vec{u}, \vec{n}) = 0 \quad (6)$$

$$(\vec{n}, \vec{v}) = 0 \quad (7)$$

ただし $(\bullet, \bullet)$ はスカラー積を表わす.

視点 O を原点とする3次元座標系 (Fig.3(b) 参照) において, プラットホーム平面 $\bar{P}$ を

$$\begin{aligned} n_x X + n_y Y + n_z Z + d &= 0 \\ n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

で表わす. この平面の単位法線ベクトルは $\vec{n} = (n_x \ n_y \ n_z)^T$ となる. d はプラットフォーム平面と視点との間の距離, すなわちカメラから地面までの距離であり, 既知とする. 直線 l_i と視点 O で定まる平面を $\bar{P}_i$ とし, 視点 O を通り, 単位法線ベクトルが $\vec{u}$ の平面を $\bar{P}_0$ とする. 平面 $\bar{P}_0, \bar{P}, \bar{P}_i$ の交点を R_i とすれば, 点 R_i は視点 O から最も近い, 直線 l_i 上の点である.

視点 O と点 R_i との距離を $\overline{OR_i}$ とし, 直線 l_i までの水平距離 h_i は次式で与えられる.

$$h_i = \sqrt{\overline{OR_i}^2 - d^2}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

また, R_i の x 座標の正負により直線 l_i が観測者の左右のどちらにあるかを得る.

2.3 距離計測のアルゴリズム

本システムの流れを Fig.4 に示す. 入力された1枚の

Fig. 4 The flow chart of the proposed system

カラー画像から, まず, 黄色点字誘導ブロックの両側の直線 L_1, L_2 , プラットホーム縁端の直線 L_3 を抽出する. つぎに, エッジ抽出画像から鉛直方向の直線 K を求める. 得られたこれらの情報から以下の手順で黄色点字誘導ブロックの外側までの水平距離およびプラットフォーム縁端までの水平距離を計算する.

Step1 (2)式より, L_1, L_2, L_3 と原点 O を通る平面の単位法線ベクトル $\vec{m}_1, \vec{m}_2, \vec{m}_3$ を求める. 直線 l_1, l_2, l_3 の単位方向ベクトル $\vec{u}$ は (5) 式を満たすため, $\vec{m}_1, \vec{m}_2$ の外積を用いてつぎのように得られる.

$$\vec{u} = \frac{\vec{m}_1 \times \vec{m}_2}{\|\vec{m}_1 \times \vec{m}_2\|} \quad (10)$$

Step2 K と視点 O を通る平面の単位法線ベクトル $\vec{v}$ を (4) 式を用いて計算する.

Step3 (6), (7) 式より, プラットホーム平面の法線ベクトル $\vec{n}$ はベクトル $\vec{u}$ と $\vec{v}$ の外積を用いてつぎの式で表わすことができる.

$$\vec{n} = \frac{\vec{u} \times \vec{v}}{\|\vec{u} \times \vec{v}\|} \quad (11)$$

Step4 計算された $\vec{n}$ から, プラットホーム平面 $\bar{P}$ を (8) 式より求める. 直線 l_1 と視点 O で定まる平面 $\bar{P}_1$, 視点 O を通り, 法線ベクトルが $\vec{u}$ の平面 $\bar{P}_0$ は, $\vec{m}_1 = (m_{1x} \ m_{1y} \ m_{1z})^T$, $\vec{u} = (u_x \ u_y \ u_z)^T$ を用いてつぎのように表わすことができる.

$$\begin{aligned} \bar{P}_1: m_{1x} X + m_{1y} Y + m_{1z} Z &= 0 \\ \bar{P}_0: u_x X + u_y Y + u_z Z &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

3平面 $\bar{P}, \bar{P}_1, \bar{P}_0$ の交点 $R_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$ は, $A = (\vec{m}_1 \ \vec{u} \ \vec{n})^T$, $\vec{R}_1 = (X_1 \ Y_1 \ Z_1)^T$, $\vec{a} = (0 \ 0 \ -d)^T$ としてつぎの式を満たす.

$$A \vec{R}_1 = \vec{a} \quad (13)$$

ただし, A は列ベクトル $\vec{m}_1, \vec{u}, \vec{n}$ を並べて構成される行列の転置である. よって $\vec{R}_1$ はつぎのように得られる.

$$\vec{R}_1 = A^{-1}\vec{a} \quad (14)$$

Step5 点 R_1 から, (9) 式によって, 黄色点字誘導ブロックまでの水平距離 h_1 を計算する. また, 同様にプラットホーム縁端までの水平距離 h_3 を計算する.

式 (13) の解 R_1 の存在についての考察: 行列 A の行列式 $|A|$ は $\bullet$ を内積, $\times$ を外積として

$$|A| = \vec{m}_1 \bullet (\vec{u} \times \vec{n}) \quad (15)$$

と表わされ, $\vec{m}_1$ と $\vec{u} \times \vec{n}$ が直交するときのみ $|A| = 0$ となる. しかし, 本論文では Fig.5 に示すように $d \neq 0$ の場合を取り扱うため, $\vec{m}_1$ と $\vec{u} \times \vec{n}$ は直交することはない, $|A| \neq 0$ となる. よって A の逆行列 A^{-1} が存在し, $\vec{R}_1$ は (14) 式によって得ることができる.

Fig. 5 The relation between the vectors $\vec{m}_1$, $\vec{u}$ and $\vec{n}$

3. 黄色点字誘導ブロック両側の直線の抽出

ここではカラー画像から黄色点字誘導ブロックの両側のエッジ直線を抽出する方法について述べる.

3.1 均等知覚色空間

CIE(国際照明委員会) 表色系, X , Y , Z と NTSC 方式の RGB 表色系との変換はつぎの式で与えられる⁸⁾.

$$\begin{cases} X = 0.619R + 0.177G + 0.204B \\ Y = 0.299R + 0.586G + 0.115B \\ Z = 0.000R + 0.056G + 0.944B \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \end{cases} \quad (17)$$

この式では Y は明るさの情報をもち, x と y は明るさと独立した色の情報を表わす CIE 色度図の座標である. しかし, CIE の色表現には, 色度差が人間の感じる色の差と比例しない問題点がある. そこで, 本研究では, x, y で表わされる色成分を, 心理学者 D.Farnsworth によって提案された, 人間の目の色彩感覚と一致する色表現の尺度である F 氏均等知覚色空間⁹⁾に変換テーブルを参照して変換する.

3.2 黄色分布モデル

安定に黄色点字誘導ブロックの黄色領域を抽出するために, 画像上の各点の色がどのくらいその黄色に似ているかという度合で表現する. 言い替えるとサンプル画像上の黄色点字誘導ブロック領域の色分布に基づいて色空間上のすべての色の黄色類似度の表を作成し, それを利用して黄色を表現する. ここでこの表を黄色分布モデルと呼ぶ. 黄色分布モデルはつぎのような手順で構築する¹⁰⁾.

- 1) ペイントソフトを利用して地下鉄の 12 駅構内で撮影した 12 枚の画像中の黄色点字誘導ブロック以外の部分を白色に塗りつぶす.
- 2) F 氏均等知覚色空間の中に黄色類似度を記録する表を用意し, 0.0 で初期化する.
- 3) 1) で処理した画像に対して, 色が“白”以外の画素の色を F 氏均等知覚色空間に変換し, 黄色類似度表の対応の項目に 1 を加算する.
- 4) 黄色類似度表の中の最大値を見付け, すべての項目の数値をその最大値で割ることにより, 黄色類似度表の正規化を行なう.

こうして構築された黄色分布モデルは, 黄色領域に現れる頻度を 0.0 から 1.0 の間で表現するものである.

3.3 黄色点字誘導ブロック両側の直線の抽出

3.3.1 黄色領域の抽出

黄色分布モデルに基づいて黄色点字誘導ブロック領域を抽出する. この黄色分布モデルはさまざまな状況の黄色点字誘導ブロックを約 65000pixel 取り込んで構築しているのではとんだ黄色点字誘導ブロックを検出することができる. 入力画像から黄色領域を安定に抽出するために, 各画素の色が黄色であるか否かという単純な 2 値化の代わりに, その色がどのくらいその黄色に似ているかを評価し, 0.0 から 1.0 までの連続な値で黄色らしさを表現する. このように黄色類似度で表現することにより, 色情報をより完全に記述できる. 原画像 (Fig.6(a)) から黄色類似度の高い領域を抽出した結果を Fig.6(b) に示す.

3.3.2 2 値化と拡大縮小

この黄色類似度の高さを濃淡値で表わした画像をその濃淡ヒストグラムから統計的に最適閾値を決定する判別分析法¹¹⁾により閾値を決定し, それによって, 画像を 2 値化する (Fig.6(c)). 2 値化画像を拡大縮小法を用いて, 抽出された黄色点字誘導ブロックの中を塗りつぶす. その結果を Fig.6(d) に示す.

3.3.3 エッジ抽出と細線化

拡大縮小法によって黄色点字誘導ブロックの中を塗りつぶされた画像に, Sobel オペレータを用いてエッジ抽出を行ない, その後, Hilditch の細線化アルゴリズムを用いて, 細線化を行なう. Fig.6(d) をエッジ抽出したものを Fig.6(e) に, さらに細線化を施したものを Fig.6(f) に示す.

3.3.4 直線の抽出

細線化された画像に Hough 変換を施す. その際, つぎの条件を満たすものを抽出する.

- 画像の下半分のみを探索する.
- $\rho - \theta$ 空間での度数が閾値 T_Y 以上であること.
- 8 近傍で度数が最大であること.
- 隣接する直線の ρ, θ を ρ_i, θ_i と ρ_j, θ_j とすると, 閾値を $\epsilon_\rho, \epsilon_\theta$ として

$$|\rho_j - \rho_i| \geq \epsilon_\rho \text{ または } |\theta_j - \theta_i| \geq \epsilon_\theta$$

Fig. 6 The lines of yellow tactile tile
(a)Original image (b)Extracted Yellow region
(c)Binary image (d)Erosion and dilation (e)Extracted edges (f)Thinned edges (g)Extracted lines L_1 and L_2

Fig. 7 The case with yellow noises
(a)Original image (b)Candidate lines of L_1 and L_2
(c)Selected lines of L_1 and L_2

であること.

- $|\rho_j - \rho_i| \leq \epsilon_\rho$ かつ $|\theta_j - \theta_i| \leq \epsilon_\theta$ の場合, i, j のピーク値を調べ, より高い方の直線を抽出する.

ここで, ρ は $x-y$ 平面上の直線に原点から下ろした垂線の長さを表わし, θ は垂線と x 軸とのなす角を表わす.

黄色の雑音が多い画像では, 以上の処理を行なっても黄色点字誘導ブロック以外の直線が抽出される可能性がある. i 番目の候補となる L_1, L_2 について h_{1i}, h_{2i} を計算し,

$$\min_i |(h_{1i} - h_{2i}) - 0.30(m)| \quad (18)$$

となる直線を黄色点字誘導ブロックの両側のエッジ直線とする. これは, 黄色点字誘導ブロックの幅が $0.30(m)$ であるという事実に基づいている.

以上の処理により抽出された黄色点字誘導ブロックの両側の直線を Fig.6(g) に示す. また, 黄色の雑音が多い画像での処理結果を Fig.7 に示す. (a) は原画像を, (b) は Hough 変換によって抽出された直線, (c) は (18) 式によって得られた黄色点字誘導ブロックの両側のエッジ直線である.

4. 駅構内の鉛直方向の直線の抽出

画像から得られる柱のエッジや車両のドアのエッジ, 駅構内の看板などの縦方向の直線を駅構内での鉛直方向の直線と

して利用する. 入力画像に Sobel オペレータを施してエッジを抽出し, エッジ画像から Hough 変換によって縦方向の直線を抽出する. その際, つぎの条件を満たすものを抽出する.

- $\rho - \theta$ 空間での度数が閾値 T_v 以上であること.
- 8 近傍での度数が最大であること.
- $|\theta| \leq 5(\text{degree})$ または $|180(\text{degree}) - \theta| \leq 5$ であること.
- 複数得られた直線のうち i 番目の候補直線から黄色点字誘導ブロックの幅 $(h_1 - h_2)_i$ を計算し,

$$\min_i |(h_1 - h_2)_i - 0.3(m)| \quad (19)$$

となる直線を抽出する.

このようにして得られた直線は駅構内への電車の進入などに関係なく抽出でき, 鉛直方向の直線を安定的に得ることができる. 原画像 (Fig.8(a)) からエッジを抽出した結果を Fig.8(b) に示す. Hough 変換によって得られた鉛直方向の候補となる直線を Fig.8(c) に, これらの直線の中から, 評価式 (19) によって得られた鉛直方向の直線を Fig.8(d) に示す. この画像において抽出された鉛直方向の直線は柱のエッジのものである.

5. プラットホーム縁端の直線の抽出

プラットホーム縁端から黄色点字誘導ブロックまでの距離は駅により異なった値をとるが, その代表値 (平均値, メディアンなど) がわかっている路線では, 黄色点字誘導ブロックの両端の直線の情報を用いて, 以下のようにプラットホーム縁端の直線を抽出する. 入力画像に Sobel オペレータを施して得られたエッジ画像に以下の条件の下で Hough 変換を施す.

- 画像の下半分を探索する.
- $\rho - \theta$ 空間での頻度が閾値 T_P 以上であること.
- 8 近傍で頻度が最大であること
- 複数得られた直線から, 直線と原点を通る平面の法線ベクトル $\vec{m}_{3i}$ を求め,

$$|(\vec{u}, \vec{m}_{3i})| < 0.05 \quad (20)$$

を満たすこと.

ここで, 入力画像からプラットホーム縁端の直線を正確に抽出するために, 黄色点字誘導ブロックの両端の直線の情報を利用した以下の制約式 (21) を用いる.

[補題] Z 軸 (カメラ光軸) がプラットホーム平面に平行な場合, つぎの関係が近似的に成り立つ.

$$\left| \frac{\rho_3^{-1} - \rho_1^{-1}}{\rho_1^{-1} - \rho_2^{-1}} \right| \approx \frac{h_3 - h_1}{h_1 - h_2} \equiv \kappa \quad (21)$$

ここで ρ_1, ρ_2 はそれぞれ黄色点字誘導ブロックの外側, 内側の直線に対応する ρ で, κ は, プラットホーム縁端から黄色点字誘導ブロックまでの距離の代表値と, 黄色点字誘導ブロックの幅の比である. 補題の証明は付録で与える. このような関係を最もよく満たす ρ_3 に対応する直線をプラットホーム縁端の直線とする. つまり, $\left| \frac{\rho_3^{-1} - \rho_1^{-1}}{\rho_1^{-1} - \rho_2^{-1}} - \kappa \right|$ が最小

となるような ρ に対応する直線を抽出する. Fig.8(b) から抽出されたプラットフォーム縁端の直線の候補を Fig.8(e) に, 制約式 (21) によって得られたプラットフォーム縁端の直線を Fig.8(f) に示す.

Fig. 8 The Extracted lines
(a)Original image (b)Extracted edges (c)Candidate lines of K (d)Selected lines K (e)Candidate lines of L_3 (f)Selected lines L_3

6. 実験結果

提案手法の有効性を検証するために, ビデオカメラで地下駅の駅構内を撮影した画像を 69 枚用いて実験した. 撮影は京都市内の 3 種類の路線の地下の 24 駅で行なった. 画像の撮影は駅構内の普通の照明の下で, カメラ原点を目の高さに設定して行なった. 比較的混雑した駅, 電車の進入がある場合, 黄色の洋服を着た人があるなど黄色の雑音が多い場合などの画像も含まれている. 用いた画像の一部を Fig.9 に示す. 地上の駅では時間や天候による照明の変化や, 自然環境による黄色点字誘導ブロックの劣化などにより, 黄色点字誘導ブロックの安定的な抽出が困難なため, 実験対象は地下駅とした. 今回の実験を行なった駅の黄色点字誘導ブロック上の照度は $15 \sim 45(lx)$ であった.

Table 1 Median of $H_3 - H_1$ for each line

Line	Image No.	$H_3 - H_1(m)$	median(m)
KYOTO City Subway	1~5	0.7	0.75
	6~8	0.8	
KEIHAN Line	9~15	0.8	0.80
HANKYU Line	16~17	1.20	1.25
	18~19	1.50	
	20~21	1.00	

例に示した画像から得られた結果を Table 2 に示す. ただし, 表中の $h_i, i = 1, 2, 3$ はそれぞれ, 黄色点字誘導ブロックの外側, 内側およびプラットフォーム縁端までの水平距離の画像から求められた計測値を示す. $H_i, i = 1, 2, 3$ はそれぞれ h_i に対する真値を示し, 単位はメートルである. error は h_i の絶対誤差である. 黄色点字誘導ブロック幅 ($h_1 - h_2$) の真値は $0.30(m)$ である. 黄色点字誘導ブロックの外側, 内側, プラットホーム縁端の直線を抽出する際の閾

Fig. 9 Examples of test images

値は経験により, $\epsilon_\theta = 2(\text{degree})$, $\epsilon_\rho = 3(\text{pixel})$, $T_Y = 50$, $T_v = 130$, $T_P = 250$ とした. 評価式 (19) によって得られた鉛直方向の直線は Fig.9 の Image1, Image3, Image4, Image5, Image7, Image8, Image10, Image11, Image12, Image13, Image15, Image17, Image20 では柱のエッジであり, Image2, Image9, Image16 では電車のドアのエッジ, Image6, Image14, Image18, Image19, Image21 では看板の縦方向の直線であった. それぞれの画像の駅の路線名, 黄色点字誘導ブロック外側からプラットフォーム縁端までの距離の真値 $H_3 - H_1$, メディアンを Table 1 に示す. 京都市地下鉄, 阪急電鉄では $H_3 - H_1$ の値にばらつきがある. プラットホーム縁端を抽出する際, 制約式 (21) で用いる ($h_3 - h_1$) の値としてそれぞれの路線ごとのメディアンを用いた. その結果, それぞれの画像で真のプラットフォーム縁端を選び出し,

プラットホーム縁端までの距離を推定することができた。

69枚の実画像に対する実験結果において、観測点から黄色点字誘導ブロックの外側までの水平距離の推定値のrms誤差は0.09mで、絶対誤差は0.01mから0.28mの範囲内であった。また、観測点からプラットホーム縁端までの水平距離の推定値のrms誤差は0.10mで、絶対誤差は0.00mから0.27mの範囲内であった。黄色点字誘導ブロックの外側は、それよりも向こう側の領域は危険なプラットホーム縁端の存在する危険領域であることを示す最も重要な情報である。黄色点字誘導ブロックの外側までの距離推定の最大誤差は0.28mであった。これは、「公共交通機関旅客施設の移動円滑化整備ガイドライン」⁷⁾で「縁端から80cm以上離れた場所に点状ブロックを連続して敷設すること」と記されている80cmよりも短く、今回実験を行なった駅での $H_3 - H_1$ の距離0.70m~1.50mよりも短い結果となった。

7. ま と め

本論文では視覚障害者が歩行する時に最も危険なものの1つである駅のプラットホームの縁端から転落することを防止するために黄色点字誘導ブロックの外側までの水平距離と方向を検知する方法について提案した。実験により、観測点から黄色点字誘導ブロック外側までの距離がrms誤差0.09mで推定でき、この誤差が黄色点字誘導ブロックからプラットホーム縁端までの距離に比べて十分短いことがわかった。また、以前提案した地下の駅において照明灯と行き先表示板を利用した方法⁵⁾では観測点からプラットホームまでの推定距離のrms誤差は0.16mであったので、本論文で提案した手法より、誤差を小さくすることができた。

本システムは実用化の際、小型CCDデジタルカメラを使用者の帽子や、めがねなどに取り付ける。そしてCCDデジタルカメラをモバイルコンピュータに接続し、常時連続動作させ、演算処理の結果(黄色点字誘導ブロックの外側までの距離とその方向)を音声で使用者に伝達する方法を採用する予定であるが、今後視覚障害者による評価実験なども行なって検討していきたい。距離の推定に関しては、推定距離に対応する黄色点字誘導ブロックの幅の誤差 $|(h_1 - h_2) - 0.3|$ が閾値よりも大きくなるときは、その推定値を採用しないという方法により、精度の高い計測値を伝達することができると考えられる。

処理時間に関しては、現在 640×480 画素の画像に対して約3秒($CPU = 366MHz$)であるが、ハーフサイズの画像やCPU速度の速いマシンなどに変更することにより、短縮できると考えられる。

今後は、照明条件の変化が大きい地上駅での黄色点字誘導ブロックの検知および実用化についても検討していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 田内, 大倉: 視覚障害者支援技術の現状と問題点, 単独歩行について, 計測と制御, **34**-2, 140/146(1995)

- 2) L.Kay: A Sensor and to Enhance Spatial Perception of the Blind, Engineering Design and Evaluation, The Radio and Electronic Engineer, **44**-11, 605/629(1974)
- 3) D.L.Morrisette, et al.: A Follow-up Study of the Mowat Sensor's Applications, Frequency of Use, and Maintenance Reliability, J. Visual Impairment and Blindness, **75**, 244/247(1981)
- 4) J.M.Benjamin: The new C-5 laser cane for the blind, Proc. Carnahan Conf. on Electronic Prosthetics, 77/82(1973)
- 5) 西部, 呉海, 塩山: 画像によるプラットホーム縁端の検知, 計測自動制御学会論文集, **37**-11, 1104/1110(2001)
- 6) 交通エコロジー・モビリティ財団: 公共交通機関旅客施設の移動円滑化整備ガイドライン (2001)
- 7) 日本規格協会: 視覚障害者用ブロック等の突起の形状・寸法及びその配列, JIS T 9251, 日本規格協会 (2001)
- 8) 日本色彩学会編: 新編 色彩科学ハンドブック 第2版, 東京大出版会, 986/989(1998)
- 9) 呉海, 陳謙, 谷内田: ファジーパターン照合を用いた色彩画像からの顔検出システム, 電子情報通信学会論文誌, **J80-D-2-7**, 1774/1785(1997)
- 10) H.Wu, Q.Chen and M.Yachida: Face Detection from Color Images using a Fuzzy Pattern Matching Method, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **21**-6, 557/563(1999)
- 11) 高木, 下田: 画像理解ハンドブック, 東京大学出版会 (1991)

《付 録》

A. 補題の証明

空間中での黄色点字誘導ブロック外側, 内側, プラットホーム縁端部の直線をそれぞれ l_1, l_2, l_3 とし, それぞれの透視変換像を L_1, L_2, L_3 とする。視点 O からみた直線 l_1, l_2, l_3 上の最近点を R_1, R_2, R_3 とする。直線 l_1, l_2, l_3 は, これらの単位方向ベクトル $\vec{u}$ と, パラメータ t を用いて,

$$l_i: R_i + t\vec{u}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (A.1)$$

で表わされる。 $R_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ とすると, 直線 l_i の透視変換像は,

$$L_i: \begin{cases} x = f \frac{X_i + t u_x}{Z_i + t u_z} \\ y = f \frac{Y_i + t u_y}{Z_i + t u_z} \end{cases} \quad (A.2)$$

となる。ここで, f はカメラの焦点距離である。(A.2)式よりパラメータ t を消去して,

$$L_i: (u_y Z_i - u_z Y_i)x + (u_z X_i - u_x Z_i)y + f(u_x Y_i - u_y X_i) = 0 \quad (A.3)$$

視点 O から R_i へ向かうベクトルを $\vec{R}_i$ とし, ベクトル $\vec{V} = (x, y, f)^T$ を用いて(A.3)式はつぎのように書き直される。

$$((\vec{u} \times \vec{R}_i), \vec{V}) = 0 \quad (A.4)$$

ここで, $A_i = (\vec{u} \times \vec{R}_i)_x, B_i = (\vec{u} \times \vec{R}_i)_y, C_i = (\vec{u} \times \vec{R}_i)_z$ とし, また, $a_i = \frac{A_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}}, b_i = \frac{B_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}},$

$c_i = \frac{C_i f}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}}$ とすれば(A.3)式は

$$L_i: a_i x + b_i y + c_i = 0 \quad (A.5)$$

と表わされる。

直線の透視変換像 L_i の ρ, θ を ρ_i, θ_i とすれば, L_i は,

$$L_i: x \cos \theta_i + y \sin \theta_i = \rho_i \quad (\text{A.6})$$

となる。(A.5) 式と (A.6) 式を比較して,

$$\begin{aligned} \cos \theta_i &= a_i = \frac{A_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}} \\ \sin \theta_i &= b_i = \frac{B_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}} \\ \rho_i &= -c_i = -\frac{C_i f}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

よって,

$$\begin{aligned} |\rho_1 - \rho_2| &= \left| \frac{C_1 f}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}} - \frac{C_2 f}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2}} \right| \\ &= f \left| \frac{(\vec{u} \times \vec{R}_1)_z}{\sqrt{(\vec{u} \times \vec{R}_1)_x^2 + (\vec{u} \times \vec{R}_1)_y^2}} - \frac{(\vec{u} \times \vec{R}_2)_z}{\sqrt{(\vec{u} \times \vec{R}_2)_x^2 + (\vec{u} \times \vec{R}_2)_y^2}} \right| \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

また, R_i の定義から, $\vec{u} \perp \vec{R}_i$ であるので,

$$\vec{u} \times \vec{R}_i = \|\vec{R}_i\| \vec{m}_i \sin \frac{\pi}{2} \quad (\text{A.9})$$

ただし, $\vec{m}_i$ は直線の透視変換像 L_i と, 視点 O とで定まる平面の単位面方位ベクトルである。

Fig. A.1 Coordinates system and Hough transform

z 軸がプラットホーム平面と平行で直線 l_i と垂直な場合, Fig. 1 より, ϕ_i を $\vec{m}_i$ の Z 軸からの天頂角とし, h_i を直線 l_i までの最短水平距離として

$$\frac{\sqrt{1 - m_{iz}^2}}{m_{iz}} = \tan \phi_i = \frac{h_i}{d} \quad (\text{A.10})$$

ここで m_{iz} は $\vec{m}_i$ の z 成分である。ゆえに

$$\begin{aligned} |\rho_i^{-1} - \rho_j^{-1}| &= f^{-1} |\tan \phi_i - \tan \phi_j| \\ &= f^{-1} \left| \frac{h_i}{d} - \frac{h_j}{d} \right| \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

$$\left| \frac{\rho_3^{-1} - \rho_1^{-1}}{\rho_1^{-1} - \rho_2^{-1}} \right| = \frac{h_3 - h_1}{h_1 - h_2} \quad (\text{A.12})$$

となり, したがって, Z 軸がプラットホーム平面と平行でかつ直線 l_i と垂直な場合, プラットホーム縁端部のエッジから黄色点状ブロックまでの距離と, 黄色点字誘導ブロックの幅の比を κ とすると, $\left| \frac{\rho_3^{-1} - \rho_1^{-1}}{\rho_1^{-1} - \rho_2^{-1}} \right| = \kappa$ が成立する。

つぎに, Z 軸が一般的な場合は (ただし, Z 軸はプラットホーム平面に平行) Z 軸が直線 l_i と垂直な場合の L_i の $\vec{m}_i$ を $\vec{m}_i^*$ として, その Z 成分を m_{iz}^* とする。また, Z 軸が直線

l_i に垂直な場合の Z 軸に対して φ だけ傾いているとして, h_i' を直線 l_i までの φ だけ傾いた水平距離とする。これらの関係を Fig.2 に示す。

Fig. A.2 The case of generalized Z axis

$$\begin{aligned} m_{iz}^* &= \cos \phi_i \\ m_{iz} &= m_{iz}^* \cos \varphi \\ \cos \varphi &= \frac{h_i}{h_i'} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

であるので

$$\begin{aligned} \frac{m_{iz}}{\sqrt{1 - m_{iz}^2}} &= \frac{m_{iz}^* \cos \varphi}{\sqrt{1 - m_{iz}^{*2} \cos^2 \varphi}} \\ &= \frac{d}{h_i' \sqrt{1 + \left(\frac{d}{h_i'}\right)^2 \tan^2 \varphi}} \\ &\approx \frac{d}{h_i'} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{h_i'}\right)^2 \tan^2 \varphi \right\} \\ &\quad \left(\text{for } \left(\frac{d}{h_i'}\right)^2 \tan^2 \varphi \ll 1 \right) \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

$\left(\frac{d}{h_i'}\right)$ の 3 次の項が無視できる場合には

$$\begin{aligned} \frac{m_{iz}}{\sqrt{1 - m_{iz}^2}} &\approx \frac{d}{h_i'} \\ &\quad \left(\text{for } \left(\frac{d}{h_i'}\right)^2 \tan^2 \varphi \ll 1 \right) \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

よって, つぎの関係を得る。

$$\left| \frac{\rho_3^{-1} - \rho_1^{-1}}{\rho_1^{-1} - \rho_2^{-1}} \right| \approx \frac{h_3 - h_1}{h_1 - h_2} = \kappa \quad (\text{A.16})$$

□

[著者紹介]

西 部 優 奈

平成 10 年京都工芸繊維大学工学部機械システム工学科卒業。平成 12 年同大学大学院修士課程了。同年同大学大学院工学科学研究科情報生産科学専攻博士課程入学。平成 13 年同中退。同年和歌山大学システム工学部助手, 現在に至る。コンピュータビジョンの研究に従事。

呉 海 元

昭和59年中国西安交通大学情報と制御工学部制御工学科卒業。昭和62年同大学大学院修士課程了。同年同大学助手。平成2年同大学講師。平成6年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程に入学。平成8年同中退。同年京都工芸繊維大学工芸学部助手。平成14年和歌山大学システム工学部助教授。現在に至る。パターン認識、ヒューマンインターフェースの研究に従事。電子情報通信学会、ヒューマンインタフェース学会、システム制御情報学会各会員。工学博士。

塩 山 忠 義 (正会員)

昭和41年京都大学理学部物理学学科卒業。同年大阪府立工業技術研究所(現産業技術総合研究所)入所。昭和54年同電子部主任研究員。昭和60年京都工芸繊維大学工芸学部機械工学科(現機械システム工学科)に移り。平成4年同教授。現在に至る。パターン認識、コンピュータビジョン、情報システム性能評価などの研究に従事。電子情報通信学会、日本機械学会、システム制御情報学会各会員。工学博士。

Table 2 The results of experiments

	i	$h_i(m)$	$H_i(m)$	error(m)	—	(m)
1	1	2.50	2.45	0.10	$h_1 - h_2$	0.31
	2	2.19	2.15	0.04	$h_3 - h_1$	0.71
	3	3.21	3.15	0.06		
2	1	2.58	2.63	0.05	$h_1 - h_2$	0.27
	2	2.31	2.33	0.02	$h_3 - h_1$	0.71
	3	3.29	3.33	0.05		
3	1	2.06	1.95	0.11	$h_1 - h_2$	0.32
	2	1.74	1.65	0.09	$h_3 - h_1$	0.73
	3	2.79	2.65	0.14		
4	1	2.67	2.80	0.13	$h_1 - h_2$	0.32
	2	2.35	2.50	0.15	$h_3 - h_1$	0.68
	3	3.35	3.50	0.15		
5	1	0.76	0.90	0.14	$h_1 - h_2$	0.29
	2	0.47	0.60	0.13	$h_3 - h_2$	0.75
	3	1.51	1.60	0.09		
6	1	3.23	3.30	0.07	$h_1 - h_2$	0.28
	2	2.95	3.00	0.05	$h_3 - h_1$	0.83
	3	4.06	4.10	0.04		
7	1	4.55	4.64	0.09	$h_1 - h_2$	0.28
	2	4.27	4.34	0.07	$h_3 - h_1$	0.78
	3	5.33	5.44	0.11		
8	1	4.75	4.64	0.11	$h_1 - h_2$	0.30
	2	4.45	4.34	0.11	$h_3 - h_1$	0.83
	3	5.58	5.44	0.14		
9	1	2.36	2.35	0.01	$h_1 - h_2$	0.28
	2	2.08	2.05	0.03	$h_3 - h_1$	0.83
	3	3.19	3.15	0.04		
10	1	2.31	2.35	0.04	$h_1 - h_2$	0.30
	2	2.01	2.05	0.04	$h_3 - h_1$	0.75
	3	3.06	3.15	0.09		
11	1	0.97	0.95	0.02	$h_1 - h_2$	0.30
	2	0.67	0.65	0.02	$h_3 - h_1$	0.73
	3	1.70	1.75	0.05		
12	1	1.13	1.20	0.07	$h_1 - h_2$	0.29
	2	0.82	0.90	0.08	$h_3 - h_1$	0.82
	3	1.95	2.00	0.05		
13	1	1.39	1.35	0.04	$h_1 - h_2$	0.30
	2	1.09	1.05	0.04	$h_3 - h_1$	0.75
	3	2.14	2.15	0.01		
14	1	2.89	2.75	0.14	$h_1 - h_2$	0.25
	2	2.64	2.45	0.19	$h_3 - h_1$	0.84
	3	3.73	3.55	0.18		
15	1	2.09	2.15	0.06	$h_1 - h_2$	0.26
	2	1.83	1.85	0.02	$h_3 - h_1$	0.82
	3	2.91	2.95	0.04		
16	1	1.34	1.31	0.03	$h_1 - h_2$	0.29
	2	1.05	1.01	0.04	$h_3 - h_1$	1.19
	3	2.53	2.51	0.02		
17	1	1.21	1.31	0.10	$h_1 - h_2$	0.30
	2	0.91	1.01	0.10	$h_3 - h_1$	1.13
	3	2.34	2.51	0.17		
18	1	1.85	1.57	0.28	$h_1 - h_2$	0.35
	2	1.50	1.27	0.23	$h_3 - h_1$	1.45
	3	3.30	3.07	0.23		
19	1	1.44	1.57	0.13	$h_1 - h_2$	0.34
	2	1.10	1.27	0.17	$h_3 - h_1$	1.52
	3	2.95	3.07	0.12		
20	1	2.88	2.94	0.06	$h_1 - h_2$	0.30
	2	2.58	2.64	0.06	$h_3 - h_1$	1.04
	3	3.92	3.94	0.02		
21	1	2.85	2.94	0.09	$h_1 - h_2$	0.31
	2	2.54	2.64	0.10	$h_3 - h_1$	1.05
	3	3.90	3.94	0.04		