

屋外歩行者支援用地理情報システム作成のための ステレオ画像を用いた歩道境界検出

Sidewalk Border Detection using Stereo Images for

香山 健太郎^{1*} 矢入 (江口) 郁子^{1,2}
Kentaro Kayama¹ Ikuko Eguchi Yairi^{1,2}

¹ 独立行政法人 情報通信研究機構

¹ National Institute of Communications and Technology (NICT)

² 上智大学

² Sophia University

Abstract: We propose an algorithm to extract sidewalk regions and recognize components of sidewalk border, width of sidewalk, and existence of bottleneck points and opening points from outdoor road images obtained from a stereo vision camera mounted on a low-speed vehicle. The elevation map is constructed by removing noises from the inputted stereo images. The probability that each point belongs to the sidewalk border is calculated from the map, and the closed loop that is considered to be corresponding to the sidewalk border is extracted. Then, the type (such as curb and wall) of border component is determined. The sidewalk attributes such as width, components of borderline, presence of bottleneck point, and opening point are obtained by integrating these results among a series of inputted images. We applied this algorithm to the images obtained from a low-speed, outdoor vehicle (based on a commercial electric scooter) and calculated its efficiency.

1 はじめに

日本では、2006年の「高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律」の施行などにより、各自治体で施設のバリアフリー情報をまとめたバリアフリーマップの作成が進むなど、近年、高齢者・障害者の自宅外での行動支援環境が整ってきている。

これに対し、我々は、個々人の身体状況や好みに応じたルート検索が可能な地理情報システム (GIS) を提案し、一部地域についてインターネット上などで試験公開をしている [1, 2]。このシステムは、各歩道 (分岐点から分岐点までの1ライン) あたりに道幅・境界構成物・傾斜など125種類の情報を設定している。そして、出発地・目的地・身体状況が指定されると、それぞれのラインの属性と身体状況とからそのラインを通るのに必要なコストを計算し、最小コストとなるルートを検索してユーザに提示する。

しかし、これらの情報を新規に収集し、あるいは既に集められた情報を更新して最新の状態に保つには多大なコストを要する。現在のシステムでは、調査員が

実際に街中を踏破し、調査票に状況を書き込むことによって情報を収集しているが、東京都小金井市の場合では、約 11km^2 に対して80人日の労力を要した。これに対し、自転車や歩行に困難な方々が外出に利用する電動車椅子等に安価なカメラを設置し、その画像から歩道情報を自動的に抽出することができれば、情報収集のコストが低減されることが期待できる。

そこで、本研究では、そのための第一歩として、低速移動ビークルにステレオカメラを搭載した上で、その画像列から対象となる歩道を適切に抽出し、道幅・ボトルネックポイント (道幅が著しく狭くなっている場所) の有無・開口部 (歩道境界が途切れている部分) の有無を求めるアルゴリズムを提案する。

まず、2章において、歩道境界検出における関連研究について述べ、本論文における問題を明確化する。

3章では、ステレオ画像から計算した各画素の3次元座標から、ノイズを取り除いて平滑化し、最終的に2次元平面に射影して高さ地図を作る方法を述べる。4章では、高さ地図から、各点が歩道境界に属する確率を求める方法について述べる。5章では、そこから歩道境界候補を抽出し、6章ではさらに各ラインについての道幅などの属性を抽出する。

また、このアルゴリズムを実環境に対して適用した

*連絡先: 独立行政法人 情報通信研究機構
ユニバーサルシティグループ
〒619-0289 京都府相楽郡精華町光台 3-5
E-mail: kayama@nict.go.jp

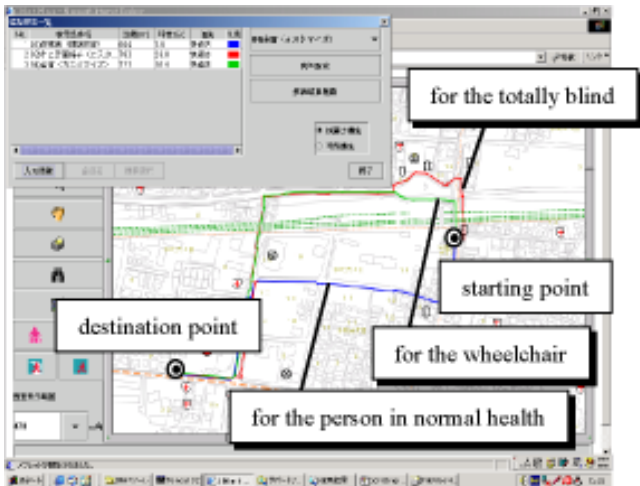


図 1: Pedestrian supporting Geographic Information System

結果を 7 章で述べる。

2 問題設定

2.1 関連研究

道路境界を認識する問題は、車道については古くから様々な手法が提案されている。車道は道幅や境界構成物(主に白線)が法令で定められており、比較的構造化されている環境であるため、レーン検出技術はほぼ実用化されている。

また、移動ロボットにおいて、ノイズのあるセンサ情報を適切に処理して可動領域を求める手法も数多く提案されている。

一方、縁石やガードレールなどの一般的な道路境界を、移動の障害物としてではなく、ある程度まとまった道路境界という意味を持つものとして求める問題、いわゆる「curb detection」についての研究はそれほど多くはない。

この縁石検出問題は、主に 2D センサ(レーザーレンジファインダ 1 台など)を用いる場合と 3D センサ(ステレオカメラや複数台のレーザーレンジファインダなど)を用いる場合とに分けられる。

2D センサを用いるものは、CMU の NAVLAB11 [3]、ドイツ・ウルム大の Weiss ら [4]、シンガポールの Kodagoda ら [5] のシステムがある。これらは、センサとして高精度のレーザーレンジセンサを使い、レーザ反射面が垂直となっていると思われる部分を距離ヒストグラムを用いて求めたり、カルマンフィルタで走査中に値が不連続に変化する部分を求めたりして、その部分を縁石

とみなしている。ただし、原理的に、センシング方向とほぼ直交する境界しか検出はできない。

3D センサを用いるものは、カリフォルニア大の Lu, Manduchi ら [6] のように曲率の変化点を求めた上でハフ変換を使う方法がある。ただし、この手法はノイズに敏感なため、平滑化を徹底的に行うか、高精度なセンサを用いる必要がある。

このほか、DARPA Urban Challenge に参加した各チームでは、Laser Range Finder など、高精度のセンサを多数使用して縁石を検出している [7]。

2.2 歩道のモデル化

本研究では、歩道領域の道幅・凹凸やその境界の構成物の情報を自動的に求めることが最終的な目的である。

すなわち、可動領域を求めるだけでなく、何らかの手法によって歩道の構造的な境界を求める必要がある。

ここで、屋外歩道環境の特性として、次のようなことがあげられる。

- 屋外歩道環境は、屋内や車道ほどは構造化されていない
- 綺麗な直線・平面では構成されていない
- 路面のステレオ視はノイズがのりやすい
- 縁石の場合は、10cm ~ 20cm くらいの高さの差しかない

このため、単純なモデルのあてはめがしにくくなっており、また、単純な部品(白線や段差)の抽出では、候補が大量に出たり全然出なかったりするということが起こる。

まとめると、

- 路面のステレオ視はノイズの影響が大きいので慎重な平滑化
- 境界を構成する様々な部品に対応した条件を統合すること
- 候補の絞込みに、空間的な制約を入れること

が必要ということになる。

そのために、まず検出対象である歩道を次のようにモデル化する。

- 「主路面」(平面に近い曲面、高さがあまり変動しない)を持つ
- ビークルの正面 2×2 [m] の大半は主路面に属する

- 主路面は、滑らかな直線あるいは曲線からなる「歩道境界」で取り囲まれる
- 歩道境界は、段差あるいは特定の幅を持った白線で構成される

また、センサとしては低速移動ビークルの前面に搭載したステレオカメラを用いる。

2.3 処理の流れ

これをもとに、以下のような手順で処理を行う。

- 前処理: 入力されたステレオ画像からノイズを除去し、主路面と、主路面の高さを0とした高さ画像を求める
- 点の処理: 高さ画像の各点について、それが歩道境界に属する確率を計算する
- 点列の処理: 歩道境界候補となる点列を求める
- 道路情報抽出: 歩道境界候補線に対応する歩道境界構成物を推定し、また、歩道境界で囲まれる領域の性質(道幅など)を求める

次章からの各章でそれぞれの処理について述べる。

3 前処理

3.1 処理の流れ

本章では、低速移動ビークルの前面に取り付けたステレオカメラで撮影したステレオ画像から、画像上の各画素が表す3次元座標を求め、それから高さ地図を作るところまでを述べる。

その処理の流れを Fig.2 に示す。

3.2 3-D 座標計算

入力されたステレオ画像の右目画像を $I(u, v)$ とする。

まず、この $I(u, v)$ の各 pixel に対する視差 $d(u, v)$ を求める。ただし、道路画像はテクスチャの変化に乏しいことが多いため、まず解像度の低い状態で大体の視差を求め、探索空間を狭めてから詳細な視差を求めるなどの工夫が必要である。

本論文では、青木らの提案した位相限定相関法 [?] を用いて精度を上げている。

次に、 $d(u, v)$ とステレオカメラの設置されている位置・角度・ベースラインの情報から、ビークル座標系での

各 pixel の3次元座標 $P_1(u, v) = (x_1(u, v), y_1(u, v), z_1(u, v))$ を計算する。なお、本研究では、ビークルの進行方向を y 軸とし、進行方向に向かって右手方向を x 軸、高さ方向を z 軸とする。

3.3 主路面の決定と平滑化

しかし、屋外走行の場合、路面は完全な平面ではないことが多い上、凹凸によって無視できないほどの傾きが生じることも多い。そこで、ビークルの前方 2×2 [m] の領域で、最も面積が大きく、かつ平面に近い曲面を「主路面」とし、その高さが0に近くなる ($z = 0$ となる) ような処理を行う。

本研究では、ハフ変換で主路面を求めている。すなわち、ある点 (x_1, y_1, z_1) を含む平面の方程式は

$$\rho = (x_1 \cos \phi + y_1 \sin \phi) \sin \theta + z_1 \cos \theta$$

と書けるので、 $|x_1| < 100$ [cm], $y_1 < 200$ [cm], $|z_1| < \epsilon$ を満たす $P_1(u, v)$ の各点について、 θ, ϕ を少しずつ変化させて ρ を求め、その θ, ϕ, ρ に対して投票を行う。そして、もっとも票の多かった θ, ϕ, ρ を主路面とし、それが $z_2 = 0$ となるように $P_1(u, v)$ を $P_2(u, v)$ に座標変換する。

このような平面を求める手段としては、岡田、加賀美らの提案した Plane Segment Finder [8] のように任意の3点から法線ベクトルを求め、それについて投票することで計算量を減らす手法が広く使われているが、本研究の環境では、ノイズが多く安定した検出ができなかったため、計算量が多いが単純な方法を用いた。

さらに、このように求めた $P_2(u, v)$ についてガウシアン平滑化を行った上で、 (u, v) 空間において 5×5 の範囲で $z_2 = au^2 + buv + cv^2 + du + ev + f$ となる2次曲面あてはめを行う。さらに、その周辺 5×5 の範囲で求めた2次曲面パラメータ ($a \sim f$) について、もっともあてはまる点数の多いものをその pixel の周辺を近似するパラメータとして採用し、その y 値をその pixel に対応する新しい値 $z_3(u, v)$ とする (横矢らの提案した高さ画像平滑法 [9] による)。

3.4 高さ地図の作成

最後に、擬似透視変換を行う。すなわち、 $z_3 = 0$ と仮定したときに各 (u, v) の pixel が取るべき x_3, y_3 が求まるので、それを $P_3(u, v)$ の x, y の値とする。ここで、 x_2, y_2 をそのまま用いない理由は、 x_2, y_2 にもノイズが含まれるため、特に垂直面の付近では次の処理で z_4 が適切な値にならないからである。

そして、 $x - y$ 平面を 2.5×2.5 [cm] の格子に分割し、各格子 (X, Y) で最も大きな z_3 の値を $z_4(X, Y)$ とする。

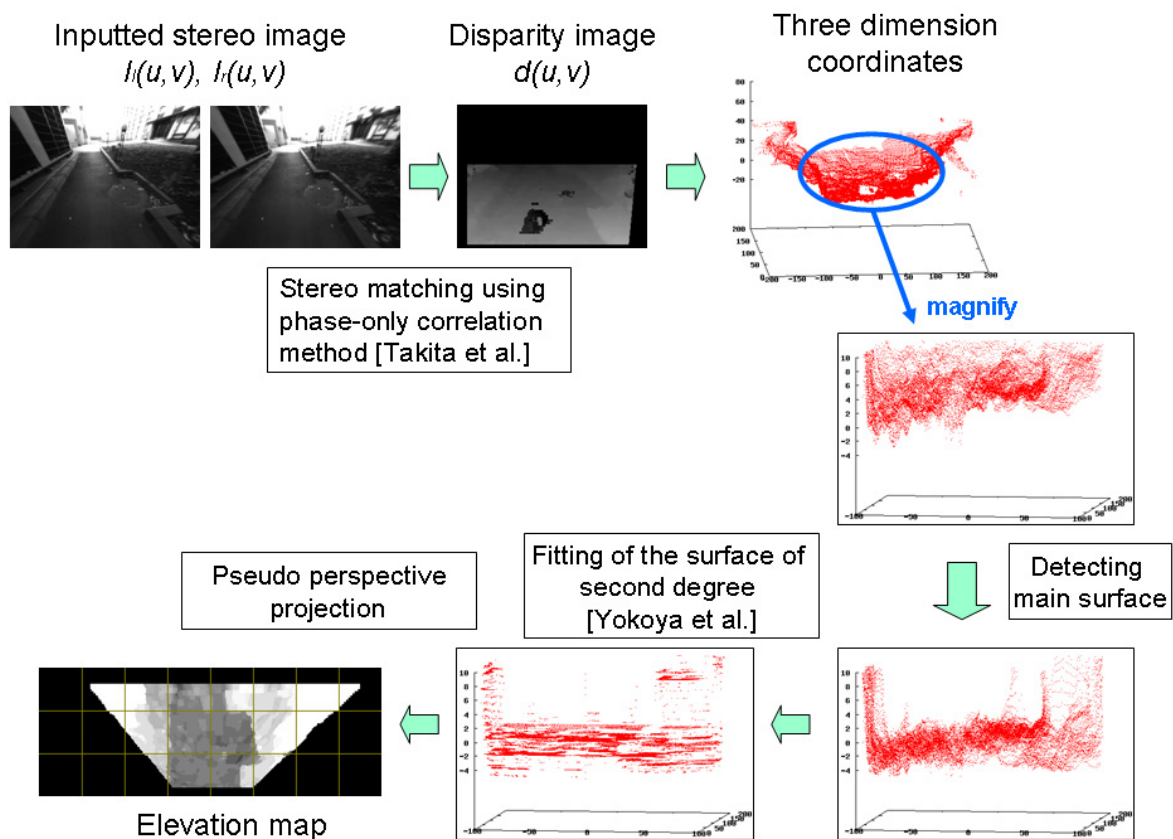


図 2: Preprocessing flow and its example

このとき、ピークルから遠い、すなわち y の大きなところでは格子一つあたりの pixel 数が少なくなる。そこで、その周辺の格子に対応する z_3 も含めて最大の z_3 をその格子の高さ z_4 として選ぶ。

4 点の処理

前章のように作成された $z_4(X, Y)$ から、各格子が歩道境界に属すかどうかの評価値 $P(X, Y)$ を求める。歩道境界は次のような性質を持つ。

- 主路面の周辺に位置するため、歩道境界の高さは主路面とほぼ同じ ($|z_4| < \epsilon$) である
- ある程度の大きさの段差があれば (縁石は 15cm 程度の高さであることが多い) それは歩道境界である可能性が高い
- 輝度値のエッジが出る部分は歩道境界である可能性があるが、必ずしもそうであるとは限らない

- 歩道境界はある程度の長さで連続した滑らかな直線・曲線となる

これをそれぞれ数値化して評価値に反映する。このために、まず次のように各格子の高さ差分 $J(X, Y)$ を求める。

$$J(X, Y) = \max |z_4(X+i, Y+j) - z_4(X, Y)| \quad (-2 \leq i, j \leq 2)$$

また、 $J(X, Y) > 3[\text{cm}]$ となる点を抽出した後、ハフ変換を行ってある程度連続した直線部分を求め、それを $J_E(X, Y)$ とする。 $J_E(X, Y)$ は 0 か 1 の値を持つ。また、元画像 $I(u, v)$ について輝度値のエッジを求め、それを $X - Y$ 空間に写像したものを $E(X, Y)$ とする。 $E(X, Y)$ は 0 か 1 の値を持つ。

これらから、次のように $P(X, Y)$ を求める。

$$P(X, Y) = ag(J(X, Y), |z_4(X, Y)|) + bJ_E(X, Y) + cE(X, Y)$$

$g(x, y)$ は、次のような性質を持つように設定している。

- 0, 1 の間の値をとり、 x (高さ差分) について単調増加であるが、 $x = 15[\text{cm}]$ 程度で飽和する

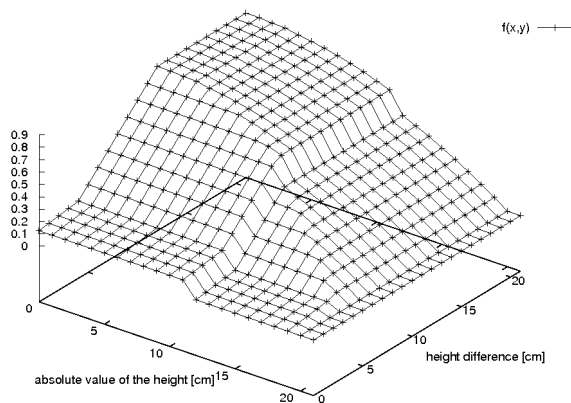


図 3: Boundary probability function

- y (高さの絶対値) が一定の場合、 y が小さいほど、 x が変化したときの $g(x, y)$ の最小値・最大値とも大きくなる

本研究で用いた $g(x, y)$ の形状を Fig.3 に示す。

また、本研究では、 a, b, c の値は実験的に $a = 256, b = 32, c = 4$ と設定している。

5 点列の処理

前章で設定した $P(X, Y)$ に、外周を表す値を加えたうえで、 $P(X, Y)$ の大きな点をつなぐ閉曲線を求め、それを $I(u, v)$ における歩道境界候補線とする。

この閉曲線は、ある程度の連続した長さを持つ直線や曲線から構成される。本研究では、 $P(X, Y)$ にガウシアン平滑化を行ったものをエネルギー画像、 $|z_4(X, Y)| < 4$ [cm] となる領域のうち最大のものを初期領域としたうえで、動的輪郭モデルを使用し、歩道境界候補線となる閉曲線を求めている。

具体的には、初期領域の輪郭線 8 画素ごとに制御点を設置した上で、それらの点を結んだ図形が滑らかに、かつなるべく $P(X, Y)$ の大きな点を通るように制御点列を動かして最終的な閉曲線を求める。

6 道路情報抽出

前章で求めた境界線を、長さ 20 [cm] ごとに分割し、それぞれが

- 縁石タイプ
- 壁・ガードレールタイプ
- 溝タイプ

- 白線タイプ
- 境界ではない

のどれに属するかを求める。

ここでは、境界線の左右 5 ~ 30 [cm] の地点での高さ $z_4(X, Y)$ の平均と、その区間の直線度を判別に用いている。

また、境界線と垂直な方向に進んでどの程度で再度境界線と交差するかを求め、それを道幅としている。なお、視界内に境界線が存在しない場合もあり、その場合は道幅の下限値を求める。

さらに、これらの判別結果を、連続している他の入力画像からの結果も含めて数メートル分統合し投票を行うことによって、その区間の境界構成物・道幅・開口部の有無を決定している。

7 実験

7.1 走行環境

本研究では、市販の高齢者向け低速移動ビークルであるスズキ社のセニアカーを改造した車両に、ステレオカメラとして PointGrey 社の Bumblebee を搭載して実験用の画像を取得した。セニアカーは、最高速度が 6 [km/h] であり、歩道を走行することが法的に可能である。

走行した環境は次の通りである。

- 独立行政法人情報通信研究機構小金井本所 (東京都小金井市) 内の歩道・車道が一体化した道路
- 独立行政法人情報通信研究機構けいはんな研究所 (京都府精華町) の構内道路および周辺の歩道
- 降雪時の札幌市土木センター (北海道札幌市) 周辺の、除雪車により除雪を行った後の歩道

7.2 歩道境界抽出

走行中のある瞬間から得られたステレオ画像について、前章までで示した処理をほどこした結果を Fig.4 に示す。

最上段が入力左目画像 $I(u, v)$ である。

二段目は、入力画像を擬似透視変換したのち、各地点が歩道境界に属する確率 $P(X, Y)$ を示した画像であり、明るい部分ほど値が大きいことを示す。

三段目は $P(X, Y)$ に動的輪郭モデルを適用して求められた歩道境界候補の閉曲線を重ねて表示した結果である。

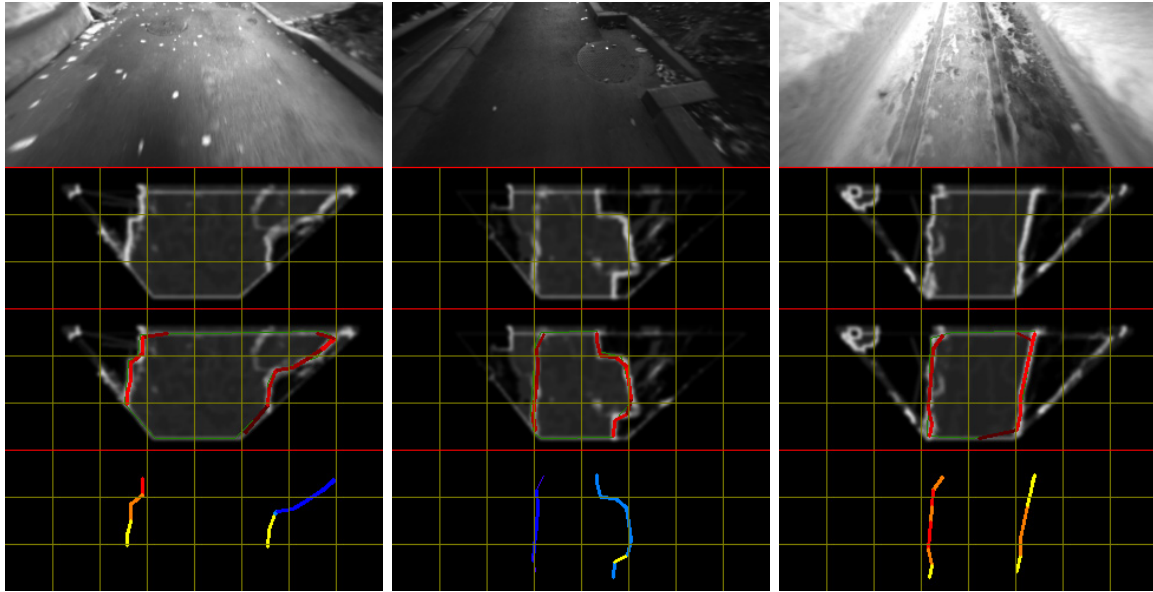


図 4: Results of the detection of the borderline

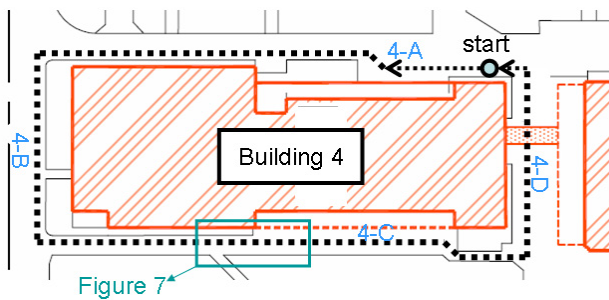


図 5: Running environment: building 4 of NICT Koganei headquarter

四段目は歩道境界候補線の種別を判別した結果である。赤・橙は壁タイプ、黄色は壁タイプまたは縁石タイプ、青・水色は縁石タイプの可能性が高いことを示す。

また、二段目～四段目の黄色の格子の一边は1[m]を示す。

7.3 歩道属性抽出

6章にて述べた歩道属性抽出を、Fig. 5の建物周辺を1周するルートに対して適用した結果をTable 1に示す。また、その一部ルートの属性抽出結果をFig. 6に示す。

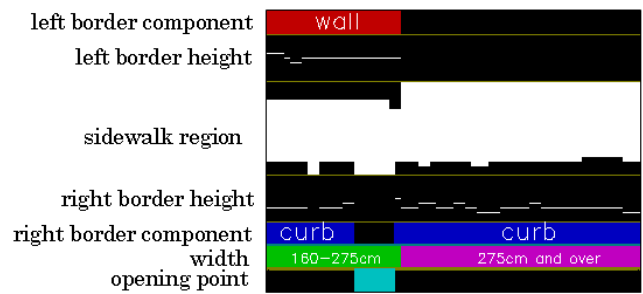


図 6: Sidewalk attributes recognition

8 おわりに

本論文では、低速移動ビークルに搭載したステレオカメラにより得られた屋外道路の画像から、歩道領域を抽出し、歩道境界構成物・道幅・開口部・ボトルネックポイントを求めるアルゴリズムについて述べた。

まず、ステレオ画像の情報からノイズを取り除き、高さ地図を作成する。そこから、各地点が歩道境界に含まれる確率を求め、その確率の高い点を滑らかに結ぶ閉曲線を求めて歩道境界線候補とする。そして、その歩道境界線候補を短く分割した上で、各部分が歩道境界にふさわしいか、ふさわしいとしたら境界のタイプ(縁石・壁など)は何か、との判別を行う。そして、これらの情報を複数入力画像間で統合して歩道の属性を求めた。

今後の課題として、処理速度をさらに上げること、点列の処理を行うアルゴリズムを改良して抽出の精度を

表 1: Abstracted sidewalk attributes

line	length	border component (left)	border component (right)	width	bottleneck point	opening point
4-A	19m	none	none	275 cm and over	none	none
	31m	wall	none	275 cm and over	none	two (5m: 4m and over, 14m: 1 – 2.5 m)
4-B	15m	curb	none	275 cm and over	none	one (10m: 1 – 2.5 m)
4-C	23m	wall	curb	160 – 275 cm	none	one (20m: 1 – 2.5 m)
	25m	none	curb	275 cm and over	none	none
	15m	curb	curb	80 – 160 cm	here	none
4-D	15m	none	none	275 cm and over	none	none

上げること、ビークルに GPS を搭載するなどして、地理情報システム (GIS) に既に蓄えられている情報を積極的に利用して認識を行うことなどがある。

謝辞

参考文献

- [1] 矢入 (江口) 郁子, 猪木誠二, “高齢者・障害者を含むすべての歩行者を対象とした歩行空間アクセシビリティ情報提供システムの研究”, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.12, pp.2940–2951, 2005.
- [2] I. E. Yairi and S. Igi, “Mobility Support GIS with Universal-designed Data of Barrier/Barrier-free Terrains and Facilities for All Pedestrians Including the Elderly and the Disabled”, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp.2909–2914, 2006.
- [3] R. Aufrere, C. Mertz, and C. Thorpe, “Multiple Sensor Fusion for Detecting Location of Curbs, Walls, and Barriers”, *Proceedings of the 2003 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 126–131, 2003.
- [4] Thorsten Weiss and Klaus Dietmayer, “Automatic Detection of Traffic Infrastructure Objects for the Rapid Generation of Detailed Digital Maps using Laser Scanners”, *Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 1271–1277, 2007.
- [5] K. R. S. Kodagoda, W. S. Wijesoma, and A. P. Balasuriya, “CuTE: Curb Tracking and Estimation”, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 14, No. 5, pp. 951–957, 2006.
- [6] Xiaoye Lu and Roberto Manduchi, “Detection and Localization of Curbs and Stairways Using Stereo Vision”, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4648–4654, 2005.
- [7] <http://www.darpa.mil/GRANDCHALLENGE/>
- [8] K. Okada, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue, “Plane Segment Finder: Algorithm, Implementation and Applications”, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2120–2125, 2001.
- [9] 横矢直和, Martin D. Levine, “微分幾何学特徴に基づく距離画像分割のためのハイブリッド手法”, 情報処理学会論文誌, Vol. 30, No. 8, pp. 944–953, 1989.