

RGB-D カメラと加速度センサを併用した 歩行可能な平面領域の検出

今井 健太^{1,a)} 北原 格^{1,b)} 亀田 能成^{1,c)}

1. はじめに

現在,日本の視覚障がい者は約31万人に達している[1].視覚障がい者は,歩行時に,白杖を用いて歩行可能な領域を調べるのが普通である.白杖で調べられる範囲は使用者から1,2歩先までである.それより遠くの障害物や段差を見つけることはできない.また,白杖では路面より低い陥没等については,検知できない場合がある.視覚障がい者がより安全で安心して単独歩行を楽しめるようにするために,より広い範囲で歩行可能な平面領域を検出し,それを利用者に伝える方法が望まれている.

この問題に対して,白杖より高機能な歩行支援システムの研究開発が行われている.レーザレンジファインダ(LRF)やMicrosoft社のKinectを用いて,歩行者前面の進捗情報を解析するアプローチが主流である.このような深度画像センサを用いて,歩行可能な平面領域を検出することが本研究の目標である.

本研究では,屋内外に関係なく深度画像を常に得られるIntel社のRGB-DカメラR-200を歩行中に前面に向け,そこから得られる深度画像を元に,凹凸の無い歩行可能な平面領域を検出し,安全に歩ける範囲を認識する方法を提案する.

我々の考えるアプローチでは,歩行可能な領域を検出するために対象者はカメラを構える.つまり,路面に対するカメラの位置姿勢は一定の拘束の元にあることになる.カメラの姿勢についてはさらに加速度センサから状態を得ることで,深度画像から歩行可能な平面領域を安定して求めることを実現する.我々は,実際に,R-200をMicrosoft社タブレット端末Surface 4に接続したプロトタイプシステムを構築し,提案手法が有効であることを確認した.

2. 関連研究

センサ等を用いた視覚障がい者の単独歩行支援として,後藤ら[2]は,LRFを用いた歩行支援システムを提案している.2,3歩先の地面に向けてレーザを照射しているため,階段などの段差の検知は可能である.しかし,直線状の検

知に頼るため,進行方向の路面上全体を調べようとすると,向きを変えていく必要がある.滝沢ら[3]は,白杖とMicrosoft社のKinectを組み合わせたシステムを提案している.白杖にKinectを取り付け,取得した深度画像からエッジを抽出する.抽出したエッジから,床面や障害物,階段等を検出する手法を提案している.しかし,Kinectは直射日光下での使用ができないため,屋外歩行には難がある.

Sondaら[4]は,超音波センサと単眼カメラを用いて,障害物および,階段を検出する手法を提案している.超音波センサにより,進行方向について直線状に距離を取得し,SVMにより,物体を識別している.本手法は直線状の広範囲の検出ではあるが,面での検出は出来ず,白杖のように,路面全体に向きを変えて調べる必要がある.

3. 路面上の歩行可能な平面領域の検出

本研究では,RGB-Dカメラと加速度センサを併用し,歩行可能な平面領域を検出する方法を提案する.

RGB-Dカメラは歩行者の胸部近辺にあり,その視野が歩行方向の路面を広く覆うように,やや下に向けてあるものとする.プロトタイプシステムで用いたR-200には加速度センサが内包されていないため,R-200をSurface 4に一体型で取り付け,Surface 4内臓の加速度センサをR-200の加速度センサと見なす.

この状況の下では,歩行可能な平面領域は,カメラから鉛直方向に一定の距離にあり,かつ鉛直方向を法線とする平面小領域の集合から成ると考えられる.そこで,この条件に合致する平面領域を検出する手順を以下に示す.その概要を図1に示す.

まずRGB-Dカメラで取得した深度画像から3次元点群を作成する.3次元点群の座標について,加速度センサから得られる鉛直方向の情報を用いて,鉛直方向を軸の一つとする直交座標系で表現する.これによって,観測各点について,鉛直方向に沿った高度情報を得る.

同時に,3次元点群の各点の法線ベクトルを算出する.

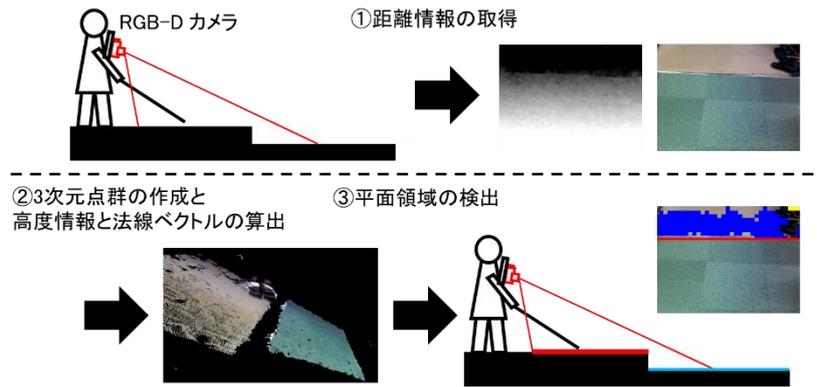


図 1 処理の概要

平面領域の推定を効率化するために、3次元点群を小矩形領域に分割し、それぞれについて高度情報と法線方向の条件を確認することで、歩行に適した小矩形領域を求める。最後に、小矩形領域の連続した広がり距離を算出することで、歩行可能な平面領域とその遠端を認識する。



図 2 変換する RGB 画像と深度画像

4. 高度情報と法線ベクトルの算出

4.1 高度情報の算出

本研究の仮定では、カメラから路面までの高さはほぼ一定である。そこで、深度画像の各点の座標を変換し、鉛直方向に沿った高度情報を求める。

RGB-D カメラの内部パラメータに基づいて、深度画像の各点は、カメラ固有の三次元直交座標 Wc で表される。これに対して、鉛直方向を一つの軸とし、歩行者の進行方向を別の軸とする三次元直交座標を Wf とする。カメラの光軸が歩行者の進行方向と鉛直軸によって張られる平面上にあると仮定するならば、 Wc から Wf へ写像は、加速度センサが示す鉛直方向からの回転量 θ に基づく回転変換で記述できる。 Wf の鉛直軸に対応する座標成分が高度情報となる。

図 2 と図 3 に R-200 を用いた高度情報算出の様子を示す。図 2 左は RGB 画像で、画面中央に下り段差が存在する床面を斜めに見下ろしたカメラ構図になっていることがわかる。このとき同時に得られる深度画像を濃淡で合したのが図 2 右であり、明るいほど近いことを示す。このうち、赤線部の断面を、 Wc で示したのが図 3 上である。図 2 の下端が図 3 の左端に相当する。これに対して、加速度センサからの回転量 θ に基づいて Wf に変換した結果が図 3 下である。縦軸が鉛直軸方向の座標値、すなわち高度情報に相当する。

この例の場合、対象は下り段差の前後で平面であるので、高度情報も前後それぞれで一定であるべきである。得られた高度情報も画像の中央の画素位置にあたる 145 付近前後で、ほぼ一定であることから、算出が正しく行えているとわかる。

なお、より実利用に近い環境では、カメラが光軸周りに

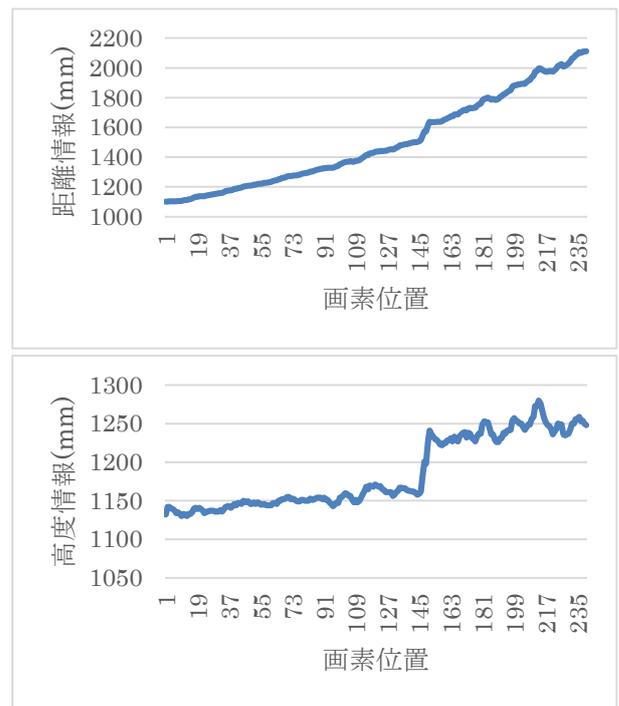


図 3 高度情報の算出

回転してしまう、いわゆる深度画像が傾いた状況になる可能性がある。この場合でももう一つの回転量を利用することで高度情報を正しく求めることは可能である。しかし、そもそも深度画像の上端・下端が右端と左端で異なるのは歩行の安産確保上望ましくないため、カメラはできるだけ傾かずに路面に向いていることとする。

4.2 法線ベクトルの算出

本研究では、高度情報に加え、法線ベクトルを利用する。法線ベクトルの算出は、深度画像を基にして、S.Holzor ら

[5]の手法を用いて高速に行われる。この手法により、観測した 3 次元点群それぞれについて法線ベクトルが得られる。

5. 小矩形領域を用いた歩行可能領域の検出

5.1 小矩形領域における閾値処理

算出した高度情報と法線ベクトルについて閾値処理を行うことで、歩行可能領域を検出する。本研究では、画素単位での検出を行うのではなく、深度画像を図 4 右のように同じ大きさの小矩形領域で分割し、その小矩形領域ごとに検出をする。これは、深度画像におけるノイズの影響を緩和するためである。

各小矩形領域において、高度情報の平均値と平均法線ベクトルを求める。高度情報は、路面上であれば、カメラの路面からの高さが真値となる。また路面が水平面であれば、路面上の法線ベクトルは鉛直方向を向く。そこで、高度情報に対しては、一定の閾値範囲内、法線ベクトルの鉛直方向からの角度に関しても、一定の閾値範囲内の小矩形領域を路面候補領域とする。それ以外的小矩形領域は非路面候補領域とする。

プロトタイプシステムにおいて、本処理を行った結果を図 4 に示す。図 4 左は取得した RGB 画像で、図 4 右は処理結果を RGB 画像に重畳した画像である。赤枠が 1 つの小矩形領域に相当する。図 4 右の黄色の部分が高歩行可能な平面より高い位置にある非路面候補領域で、青色の部分が歩行可能な平面より低い位置にある非路面候補領域である。

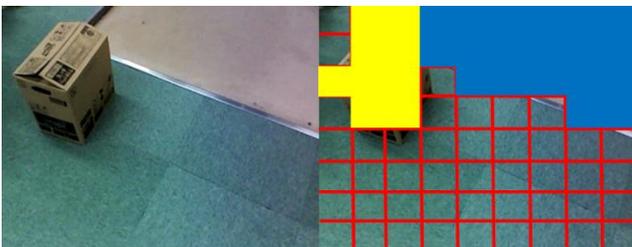


図 4 小矩形領域ごとの路面候補領域の検出

5.2 フレーム間参照におけるノイズ除去

R-200 で取得した深度画像には、ノイズが発生することがある。ノイズが強い状態で、5.1 節の処理を行うと、本来は路面候補領域であるにもかかわらず、非路面候補領域と判定される場合がある。

深度情報に含まれるノイズの傾向として、時間的連続性は低く、発生は当該フレームのみに限定される。本システムの想定使用環境は歩行中であることから、障害物や段差は時間方向では連続性をもつ。そこで、フレーム間参照によって、誤判定除去を行う。プロトタイプシステムは 20fps 前後で動作するため、N 番目のフレームにおいて、小矩形領域が障害物や段差等のために非路面候補領域となった場合は、N-1 番目のフレームにおいても、同位置またはその

4 近傍の小矩形領域は非路面候補領域となるはずである。そこで、N 番目のフレームで、非路面候補領域とされた小矩形領域があっても、N-1 番目のフレームの同位置の小矩形領域が路面候補領域であり、かつ、その 4 近傍の小矩形領域も路面候補領域であれば、対象の小矩形領域を路面候補領域と再判定する。

5.3 非路面候補領域までの水平距離算出

本研究では、カメラは光軸周りに回転をほぼしていないため、深度画像の下端から上端へ向かって走査をして、最初に非路面候補領域を見つけたところまでが、歩行可能な平面領域ということになる。その境界線について、加速度センサの回転量を利用して、歩行者から境界までの距離を求める。

6. 検証実験

6.1 実験概要

提案手法を評価するために、屋内外の複数の路面にて、提案手法に基づくプロトタイプシステムで歩行可能な平面領域の検出を行った。R200 の深度計測可能範囲は 0.5m～4.0m である。R200 は屋内では赤外線を照射し、デプスデータを取得している。また屋外では、赤外線の照射を止め、2 眼カメラによる深度情報算出を行っている。

本実験では、R200 を固定した Surface 4 タブレット端末を高さ約 110cm のところで保持した。実験実施の各箇所において、使用者から最も近くに存在する非路面候補領域までの距離を求め、その真値との比較を通じて性能に関する考察を行う。今回検証した場所は、屋内外において、前方に下り段差、上り段差、障害物が存在する箇所である。Surface 4 の CPU は Intel Core i7 2.20GHz で、システム実行時のフレームレートは約 20fps であった。

6.2 実験結果

実験結果を図 5 に示す。上から下り段差、上り段差、障害物のある状況、左列が屋内、右列が屋外である。各箇所 2 枚の画像を示し、各箇所において、左が取得した RGB 画像、右の結果画像では、路面候補小領域には RGB 画像のテクスチャをそのまま提示し、黄色は路面より高いことの検出、青色は低いことの検出を意味している。結果画像中の赤線は使用者から最も近くに存在する非路面候補領域の位置を表す。以下、各箇所について解説する。

- ・下り段差<屋内>【図 5 左上】：前方に約 6cm の段差が存在する。段差後の路面を非路面候補領域としており、赤線までの推定水平距離は 134cm となっている。使用者から段差までの実際の距離は約 140cm であった。

- ・上り段差<屋内>【図 5 左中】：前方に各段約 10cm の昇り階段が存在する。階段および壁を非路面候補領域としており、赤線までの推定水平距離は 140cm となった。実際の距離は約 150cm であった。

・障害物<屋内>【図 5 左下】：前方に高さ約 20cm の障害物が存在する。障害物を非平面候補領域としているが、この床の材質上、距離情報のノイズが増えてしまうため、平面な床であっても、非平面候補領域としてしまう。そのため、今後床面の材質の違いによる影響と色情報を用いた補間について検討していく。

・下り段差<屋外>【図 5 右上】：前方に各段約 12cm の下り階段が存在する。図中では 2 段目以降は見えていない。下り階段の始まる辺縁までを非路面候補領域としており、赤線までの推定水平距離は 210cm であった。実際は約 200cm であった。

・上り段差<屋外>【図 5 右中】：前方に各段約 10cm の上り階段が始まる。階段より先を非路面候補領域としており、赤線までの推定水平距離は 205cm であった。実際には 215cm であった。

・障害物<屋外>【図 5 右下】：前方に自転車が存在する。その障害物を非路面候補領域としており、赤線までの推定水平距離は 195cm であった。実際は約 200cm であった。

他にも様々な状況で検証を行った結果、約 1m から 2m までの範囲であれば期待する結果をほぼ得ることができた。このことは、白杖よりも遠距離まで段差および障害物の検出が出来ることを意味している。水平距離が 2m から 3m 以上になると、深度画像にノイズが多く含まれ、歩行可能な平面領域の検出が安定しなくなる傾向が見られた。これについては、RGB 画像におけるテクスチャの一貫性を手掛かりに平面領域の推定を拡張する方法を検討している。

7. おわりに

本研究では、RGB-D カメラと加速度センサを用いて、白

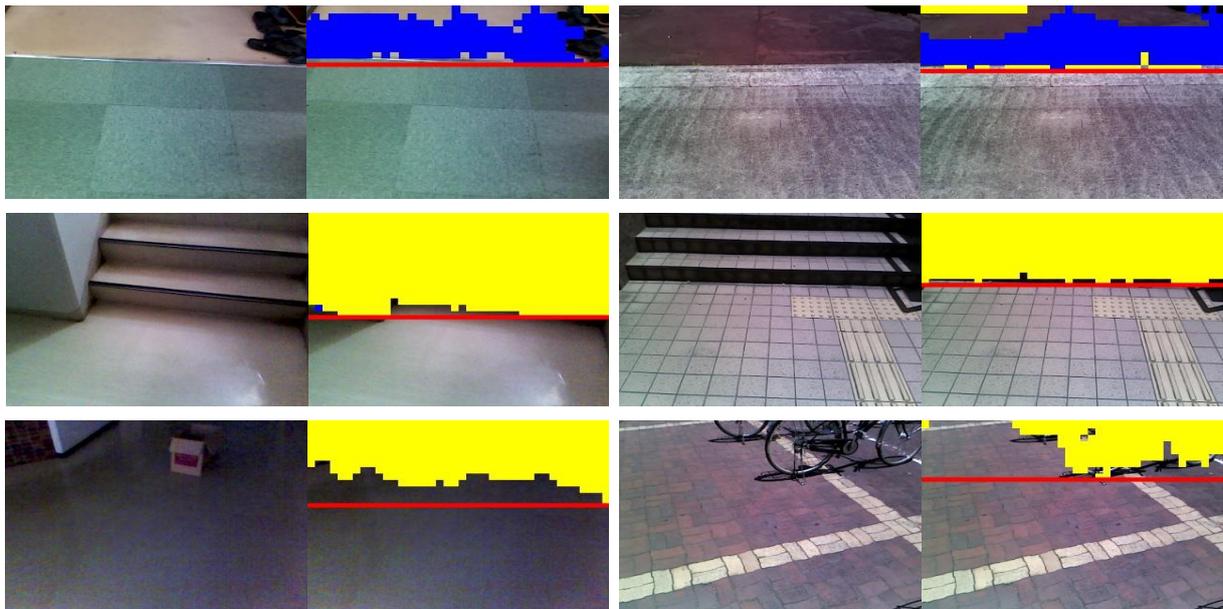


図 5 実験結果

杖よりも広い範囲を対象とする、歩行可能な平面領域の検出方法を提案した。これにより、視覚障がい者が、より安心・安全な単独歩行できる社会の実現に一歩近づくことができた。

Intel 社 R-200 の RGB-D カメラを基にしたプロトタイプシステムでの実証を通じて、屋内外の障害物や段差がある状況で、本提案手法が初期の目的を達成できることを確認した。今後は、より利用状況に近い環境での実験検証と、安全な歩行領域の限界を通知する UI の設計に取り組んでいきたい。本研究の一部は JST-RISTEX と科研費 17H01773 の助成を受けた。ここに謝意を表する。

References

- [1] “平成 18 年度身体障害児・者実態調査結果”, 厚生労働省, 2008.
- [2] 後藤伸也, 渡邊謙太郎, 戸田英樹, チャビ・ゲンツィ. “視覚障害者のための LRF を用いた障害物段差検出機能を持った歩行支援システム”, 信学技報, Vol.111, No.57, pp35-38, 2011.
- [3] H. Takizawa, S. Yamaguchi, M. Aoyagi, N. Esaki, and S. Mizuno. “Kinect cane: an assistive system for the visually impaired based on the concept of object recognition aid,” Personal and Ubiquitous Computing, Vol.19, No.5, pp.995-965, 2011.
- [4] SA Bouhamed, IK Kallel, DS Masmoudi. “New electronic white cane for stair case detection and recognition using ultrasonic sensor”, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, VoL.4, No.6, 2013.
- [5] S. Holzer, R. B. Rusu, M. Dixon, S. Gedikli, and N. Navab. “Adaptive neighborhood selection for real-time surface normal estimation from organized point cloud data using integral images,” Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.2684–2689, 2012.

¹ 筑波大学

^{a)} s1620749@u.tsukuba.ac.jp

^{b)} kitahara@iit.tsukuba.ac.jp

^{c)} kameda@iit.tsukuba.ac.jp