マルチスリット光を用いた小型距離画像センサの計測精度評価 およびヒューマノイドへの応用

黒木崇博 寺林賢司 梅田和昇(中央大)

Accuracy evaluation of a compact range image sensor using a multi-slit laser projector and obstacle detection humanoid with the sensor

*Takahiro KUROKI (Chuo Univ.), Kenji TERABAYASHI (Chuo Univ.), Kazunori UMEDA (Chuo Univ.)

Abstract— Detection of obstacles on a plane is important for a mobile robot that moves in a living space, especially for a humanoid that falls down even with a small obstacle. In this paper, a range image sensor for detecting small obstacles on a plane measures a relative disparity map (RDMap) whose measurement errors are not affected by the distance. The measurement accuracy of the obtained RDMap is evaluated with theoretical formula. Experiments show that planes can be obtained with small errors in RDMaps with the constructed sensor, and that a humanoid with the constructed sensor can detect small obstacles such as a moving ping-pong ball and a LAN cable on a plane by the proposed methods while walking.

 ${\bf Key}$ Words: compact range image sensor, multi-slit laser, relative disparity map, obstacle detection, humanoid

1. 序論

人間の生活する環境など多くの障害物が存在する環 境でロボットが移動する場合, 平面領域を検出する必 要がある[1].我々は,簡易に平面領域を検出するため に,基準平面からの相対的な視差のみを用いた手法を 提案した [2]. さらに,二足歩行ロボットが歩行中でも 安定して平面領域を検出できる手法を構築してきた[3]. しかし,二足歩行ロボットは車輪型ロボットに比べて 移動が不安定なため小さな障害物の検出が必要である. そこで,我々は,以前から構築してきたマルチスポッ ト光を用いた小型距離画像センサ [3] より, 密な計測が 可能な、マルチスリット光を照射するレーザプロジェ クタと CCD カメラを組み合わせた小型距離画像セン サを構築した[4].本論文では,マルチスリット光を用 いた小型距離画像センサの計測精度評価を行う. さら に,センサを搭載したヒューマノイドが歩行中に床面 上の小さな障害物を検出し,自律的に回避することを 目指す.

2. 小型距離画像センサ

本研究で使用する小型距離画像センサを Fig.1 に示 す.レーザプロジェクタ (Stocker Yale Mini-715L) は, 波長 660[nm],出力 35[mW] で,15本のスリット光を 投影できる.隣接するスリット間の角度は 2.3°であ る.CCD カメラ (Point Grey Research Flea2) は解像 度 1296×964,CCD 一画素のサイズは $3.75 \times 3.75 [\mu m^2]$ である.また,CCD カメラには焦点距離 4[mm] のレ ンズ (μ TRON VP-FV0420)を取り付け,レンズの先端 にはフィルタ (Kenko R64)を取り付けて使用している. このフィルタによって 640[nm] 以下の波長の光をカッ トすることで外乱光の影響を低減させている.基線長 は 60[nm] に設定し,CCD カメラをレーザプロジェク タに対して 70°回転させている.センサを壁に向けた 様子とその際に取得した画像を Fig.2 に示す.得られた スリット像の重心位置を各行で求めて視差を計測する.

3. 計測精度評価

3·1 相対視差画像の計測

本センサは実距離計測も可能であるが,センサを移動ロボットに搭載し,小さな障害物を検出するため,計測誤差が距離に依存しない相対視差画像 (RDMap)[2]を計測する.基準平面に対する計測点の位置と計測対象に対する計測点の位置の差を相対視差,また各計測



Fig.1 Constructed compact range image sensor





(a) Projected laser slits(b) CCD image for (a)Fig.2 Projected laser slits and corresponding image

点の相対視差が形成する画像を相対視差画像と定義し ている.

Fig.3 に床面とセンサの位置関係を示す.また,Fig.4 に本センサによって得られた相対視差画像の一例を示 す.基準平面は θ =66[deg], ϕ =0[deg],h=445[mm]の パラメータで取得し,hのみh=495[mm] に変更して箱 (185[mm]×455[mm]×30[mm])とテニスボール(直径約 70[mm])を床面に配置して計測した.相対視差画像上 のu,vはセンサの初期設定のときに得た計測点の位置 である.実空間での平面は相対視差画像上でも平面と なり,テニスボールを計測した点は非平面となってい ることが分かる.

3·2 相対視差の計測精度評価

実空間の距離と相対視差の関係について述べる.センサを Fig.2(a) のように平面に対して正対させた時 (θ =0[deg], ϕ =0[deg]),相対視差 Δk は式 (1) のよう に表すことができる [2].

$$\Delta k = \frac{bf}{\epsilon} (\frac{1}{h} - \frac{1}{h_0}) \tag{1}$$

 b, f, ϵ はそれぞれ基線長,焦点距離,CCDカメラの 1 画素の幅であり既知である.また, h_0 は基準平面を 取得した時のセンサと平面の距離である.

本センサにおける相対視差の計測精度を評価するため,式 (1) より得られる理論値と実測値を比較した. Fig.2(a)のように,センサを壁に対して正対させて配置した. h_0 =490[mm]として,その際の計測レンジであるh=360~800[mm]の距離を20[mm]間隔で変化さ



Fig.3 Pose parameters of range image sensor



せながら相対視差を計測した.理論値と実測値を Fig.5 に示す.実測値は,各計測点から得られた全点の相対 視差の平均値を用いている.なお,この実験での計測 点数は4721点であった.Fig.5より,理論値と実測値 はほぼ一致していることが分かる.なお,相対視差は 計測誤差が距離に依存しないが,計測レンジの近距離 と遠距離で若干の誤差が生じている.これは,CCDカ メラを h=490[mm]の距離でスリット像にピントが合 うようにチューニングしているため,その距離から外 れるにつれてピンぼけしてしまい,スリット像の重心 位置の計測誤差が大きくなることが原因であると考え られる.

小型距離画像センサのヒューマノイドへの応用

4.1 小型距離画像センサの搭載

本センサをヒューマノイド (FUJITSU HOAP-2) に 搭載した様子を Fig.6 に示す.ヒューマノイドの足下が 計測できるように,ヒューマノイドが静止時に,床面に 対して θ =66[deg], ϕ =0[deg],h=445[mm]のパラメー タになるようにセンサを搭載した.また,進行方向に 対してスリットの方向が垂直になるようにした.この ようにすることで,隣接するスリットの間に入ってし まう小さな障害物でも移動中に計測することができる.

4·2 予備実験

我々は,実空間での平面は相対視差画像上でも平面 となるという性質から,相対視差画像に対してロバス ト推定を用いて平面領域を推定し,障害物領域を検出 する手法を提案してきた[4].本論文では,ロバスト推 定手法として RANSAC[5]を用いる.



Fig.5 Relation between the relative disparity and distance



Fig.6 Compact range image sensor and humanoid

RANSAC で用いる平面領域と障害物領域を切り分け る閾値を決定するために実験を行った.センサの床面 に対するパラメータを Table 1 に示すように変化させ, 相対視差画像を計測した.基準平面は, Referenceのパ ラメータで取得した.Candition2,4,5,6の際に計測 された相対視差画像を Fig.7 に示す.相対視差画像は 平面となっていることが分かる.計測された相対視差 画像に対して,最小二乗法で平面当てはめを行った際 の残差の標準偏差を Fig.8 に示す. 残差の標準偏差は, センサの位置姿勢が変わってもほぼ一定であることが 分かる.

 Table 1 Experimental conditions

Condition	θ [deg]	ϕ [deg]	h [mm]
Reference	66	0	445
1	61	0	445
2	71	0	445
3	66	-5	445
4	66	5	445
5	66	0	395
6	66	0	495



Fig.7 RDMap for several conditions



Fig.8 Standard deviations of the residuals from fitted plane

この結果から,相対視差は計測誤差が距離に依存し ないため,ヒューマノイドのように移動中にセンサの 位置姿勢が変わるロボットに適していると考えられる. また,この結果から平面領域の残差の標準偏差 σ は約 0.25[pixel] である. RANSAC で用いる平面領域と障害 物領域を切り分ける閾値は,通常の3σに少し余裕を持 たせて 0.9[pixel] とした.

4·3 障害物回避実験

本センサを搭載したヒューマノイドが小さな障害物 を検出し,自律的に回避することを検証するために実 験を行った.ヒューマノイドは,障害物が検出されな い場合は直進を続け,障害物が検出されると,障害物 が検出されなくなるまで旋回を続けるようにしている. また,足下に近い位置で急に障害物が検出された場合 は,5[s] 立ち止まるようにした.小さな障害物として, ピンポン球 (直径 40[mm]) と LAN ケーブル (太さ約 6[mm])を選択した.ピンポン球はヒューマノイドの足 下に転がし, LAN ケーブルはあらかじめ床に配置して おいた.基準平面はヒューマノイドが静止している際 に取得した.

実験の様子とその際に得られた相対視差画像を Fig.9 に示す.相対視差画像中に,RANSACによって推定さ れた平面を薄緑で,検出された障害物領域を推定され た平面に赤色で描画している.まず,ヒューマノイド は歩行中,急に足下に現れたピンポン球を検出し,立 ち止まった.その後,歩行を再開し,LAN ケーブルを 検出して左に旋回し,再び歩行することで自律的に障 害物を回避した.障害物領域として検出された計測点









(c) 4[s]

(g) 14[s]



(b) 2[s]

(d) 6[s]



(h) 16[s]



(k) 22[s]

(l) 24[s]

Fig.9 Experimental results of obstacle detection by walking humanoid

の数を Fig.10 に示す.フレーム番号 200 付近でピンポ ン球を検出,フレーム番号 500~800 付近で LAN ケー ブルを検出している.また,本実験においてセンサは 30[Hz] 以上で障害物検出を検出していた.約 20[s] に おける相対視差画像を Fig.11 に示す.平面領域および LAN ケーブルが検出されていることが分かる.また, 本実験の結果と比較するために,以前構築したマルチ スポット光を用いたセンサ [3] で LAN ケーブルを検出 した一例を Fig.12 に示す.マルチスポット光が照射さ れている領域において,LAN ケーブルの一部しか検出 できていないことが分かる.これは,紐状の障害物は スポット光間に入ってしまうため計測が行えないこと が原因である.この結果から,マルチスリット光を用 いた本センサは小さな障害物検出に適していると考え られる.

5. 結論

本論文では、マルチスリット光を用いた小型距離画像 センサの計測精度を定量的に評価した.さらに、ヒュー マノイドが小さな障害物を検出し、自律的に回避する ことを目的としてセンサをヒューマノイドに応用した. 実験により、ヒューマノイドがピンポン球とLANケー ブルを検出し、自律的に回避できることを示した.今 後の展望として、障害物が多数配置されている環境に おける、相対視差画像と実距離画像を組み合わせた障 害物回避の実現などがあげられる.

謝辞

本研究は科研費 (20500164) の助成を受けたもので ある.

 K. Okada, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue:" Plane Segment Finder: Algorithm, Implementation and Applications, "Proc. 2001 Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2120-2125, 2001.



Fig.10 The number of points detected as obstacles



Fig.11 An RDMap with the detected plane and an obstacle (LAN cable)



Fig.12 Result of obstacle detection by a sensor using multi-spot laser projector

- [2] K. Umeda:" A Compact Range Image Sensor Suitable for Robots, "Proc. 2004 Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3167-3172, 2004.
- [3] 黒木崇博, 寺林賢司, 梅田和昇: "小型距離画像センサ により得られる相対視差画像からの障害物検出の定量的 評価,"第27回日本ロボット学会学術講演会講演概要集, 3R2-07, 2009.
- [4] 黒木崇博, 寺林賢司, 梅田和昇: "マルチスリット光を用いた小型距離画像センサの開発と障害物検出への応用,"ロボティクス・メカトロニクス講演会'10, 1P1-E03, 2010.
- [5] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography," in Comm. of the ACM, Vol 24, 1981, 1981.