

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

○黒木崇博 寺林賢司 梅田和昇 (中央大学)

Quantitative Evaluation of Detection of Obstacle Using a Relative Disparity Image Got Compact Range Image Sensor

*Takahiro KUROKI (Chuo University), Kenji TERABAYASHI (Chuo University),
Kazunori UMEDA (Chuo University)

Abstract— We have proposed a method of detecting obstacles using a relative disparity image that is obtained with a range image sensor. This paper evaluates quantitatively the obstacle's height that can be detected by the proposed method with an error analysis and experiments. The first experiment evaluates the method when a biped robot is not walking for obstacles with height 3, 2, 1[mm]. The second experiment verifies that the proposed method can detect an obstacle with 1mm height while the biped robot is walking. Key Words: Compact range image sensor, Relative disparity image, Obstacle detection, Biped robot, Error analysis

Key Words: Compact range image sensor, Relative disparity image, Detection of obstacle

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]。本研究では、二足歩行ロボットに搭載された小型距離画像センサにより得られる基準平面からの相対的な視差のみを用いて、検出可能な障害物の高さに対して定量的に評価を行う。

2. 小型距離画像センサ

二足歩行ロボットに搭載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 (MORITEX SNF-519X) は、波長 670[nm]、361 点 (19 × 19)、2 点ビーム角 0.77[deg] のスポット光をマトリクス状に投影する。CCD カメラとレーザプロジェクタとの基線長は 30[mm] とした。CCD カメラ (Point Grey Research Flea2) の一画素の幅は 4.65[μm] である。また、焦点距離 12[mm] のレンズ (SPACE VP-LE-C-12S) を用いて、先端には外乱光を除去するためのフィルタ (HOYA R64) を取り付けられている。このフィルタによって 640[nm] 以下の波長をカットし、外乱光を除去する。小型距離画像センサを二足歩行ロボット (ZMP e-nuvo WALK3) に搭載した様子を Fig.2 に示す。s, t はスポット光の座標系である。

3. 障害物検出手法

レーザプロジェクタから対象物にマルチスポット光を投影し、そのシーンを CCD カメラで取得し、各スポット光の結像点の検出を行う。取得画像と基準平面時の各スポット光の重心の差を相対視差、また各スポット光の相対視差が形成する画像を相対視差画像と定義

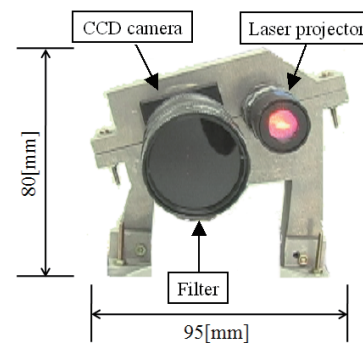


Fig.1 Constructed compact range image sensor

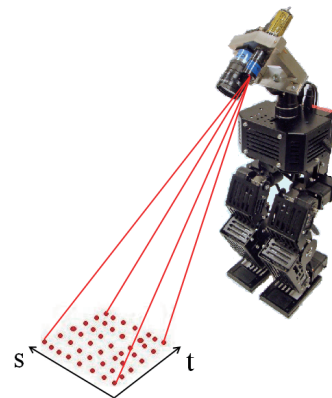


Fig.2 The compact range image sensor and a biped robot

している。実空間での平面は相対視差画像でも平面となるという性質があるため [2]、相対視差画像のみを用いて平面領域の検出が可能である。得られた相対視差画像に障害物が存在する場合において正しい平面領域

を検出するために、LMedS(Least Median of Squares) 推定 [4] を用いる [3]。さらに、推定された平面から外れる相対視差を外れ値とすることで障害物領域と平面領域を検出することが可能である。推定値と相対視差の残差の標準偏差 σ を用いて、平面領域と障害物領域を分ける閾値は 3σ とする。

4. 相対視差と障害物の高さ

相対視差と障害物の高さの関係を調べる。まず、障害物の存在しない平面領域について考える。Fig.3 に床面とセンサの位置姿勢を示す。 s_n, t_n は st 座標系の原点をレーザプロジェクタの中心に移動し、焦点距離に対する比とした座標系である。基準平面を取得した時のセンサの位置姿勢を θ_0, ϕ_0, h_0 とする。センサの位置姿勢が θ, ϕ, h に変化したとき、画像上のスポット光の相対視差 Δk は式 (1) のように表すことができる [5]。

$$\Delta k = \frac{bf}{\epsilon} \left\{ \left(\frac{\cos \theta \sin \phi}{h} - \frac{\cos \theta_0 \sin \phi_0}{h_0} \right) s_n + \left(\frac{\cos \theta \cos \phi}{h} - \frac{\cos \theta_0 \cos \phi_0}{h_0} \right) t_n + \left(\frac{\sin \theta}{h} - \frac{\sin \theta_0}{h_0} \right) \right\} \quad (1)$$

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。

次に、障害物が存在する場合の障害物領域について考える。センサの位置姿勢は Fig.3 と同じであり、Fig.4 のように高さ a の障害物が存在するとする。このとき平面の三つのパラメータのうち h のみが変化する。式 (1) より、障害物領域の相対視差 $\Delta k'$ と Δk との差 $\Delta k' - \Delta k$ と a の関係は次のように表すことができる。

$$\Delta k' - \Delta k = \frac{bf}{\epsilon} \left\{ (\cos \theta \sin \phi) s_n + (\cos \theta \cos \phi) t_n + \sin \theta \right\} \left(\frac{1}{h-a} - \frac{1}{h} \right) \quad (2)$$

$\Delta k' - \Delta k$ は LMedS 推定による推定値と相対視差の残差と考えることができるので、この値が閾値である 3σ よりも大きければ高さ a の障害物を検出することが可能である。また、 a が h より十分小さい時 (障害物

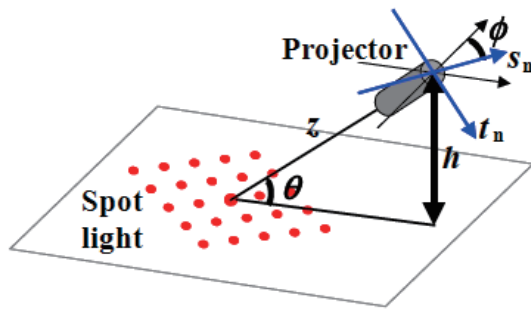


Fig.3 Position and orientation of a projector for the floor

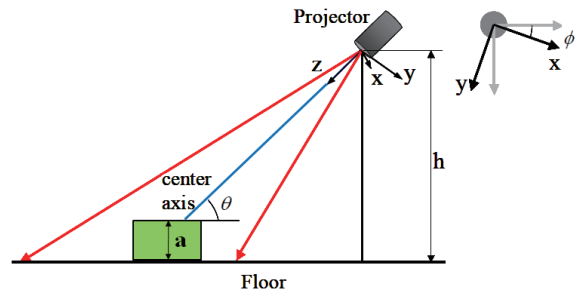


Fig.4 Condition of a obstacle on the floor

の高さが十分低い時)、式 (2) は次のよう近似される。

$$\Delta k' - \Delta k = \frac{bf}{\epsilon} \left\{ (\cos \theta \sin \phi) s_n + (\cos \theta \cos \phi) t_n + \sin \theta \right\} \left(\frac{a}{h^2} \right) \quad (3)$$

すなわち、障害物の平面からの相対視差のずれは障害物の高さに比例し、またセンサの高さ h の 2 乗に反比例することが分かる。さらに、ロール角 $\phi = 0$ の場合には

$$\Delta k' - \Delta k = \frac{bf}{\epsilon} \left(\cos \theta t_n + \sin \theta \right) \left(\frac{a}{h^2} \right) \quad (4)$$

となり、画像の中央部では相対視差のずれがティルト角 θ の正弦に比例することが分かる。

5. 検出可能な障害物の高さに対する定量的評価

本センサシステムにおける検出可能な障害物の高さを検証するため、定量的に評価を行った。実験の様子を Fig.5 に示す。障害物は $55 \times 38 \times 1$ [mm] の板の上に白色の紙を貼ったものを用いて、これを積み重ねることにより 3,2,1 [mm] と障害物の高さを変えて評価を行った。まず小型距離画像センサの位置姿勢が $h = 385$ [mm], $\theta = 40$ [deg], $\phi = 0$ [deg] となるように二足歩行ロボットを静止させる。このときに小型距離画像センサのカメラから得られた画像を Fig.6 に示す。太線で囲まれているマルチスポット光の中心の 5×5 点があたる領域に障害物を配置し、この領域のうちで障害物と検出された点数を評価した。また、 σ はあらかじめ実験によって求めた 0.13 [pixel] とした。

障害物の高さ 3,2,1 [mm] に対して、100 回試行した障害物と検出された点数の結果を Fig.7 に示す。LMedS 推定により正しい平面が明らかに推定できていない場合の試行は Failure とした。また、今回試行した中で Fig.6 に示した領域以外で障害物と誤検出された点はない。障害物の高さが 1 [mm] において、障害物と検出された点数が 16 の試行の相対視差画像と相対視差画像を俯瞰した画像を Fig.8, Fig.9 に示す。Fig.9 の太線で囲まれた領域が障害物と検出された点である。障害物の高さ 3,2 [mm] において Failure の場合を除けば全ての試行で 25 点検出しているが、高さ 1 [mm] においては検出点数が少なくなっている。しかし、全ての試行で 25 点のうち半数以上の点を検出しているため、本セ

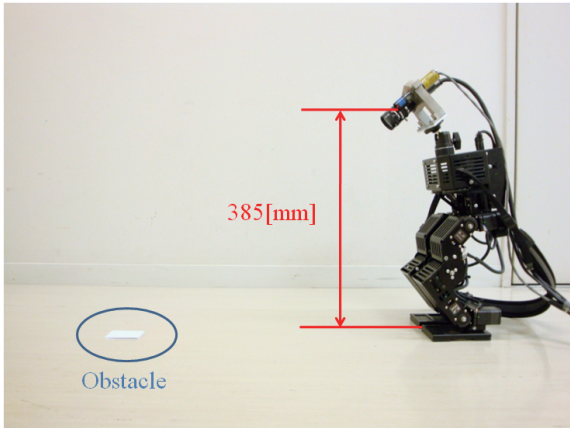


Fig.5 Experimental scene of obstacle detection

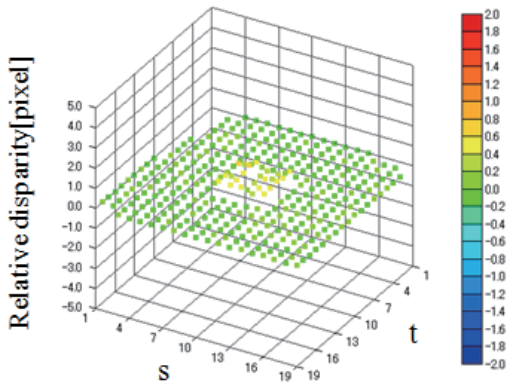


Fig.8 A relative disparity map with an object with 1mm height

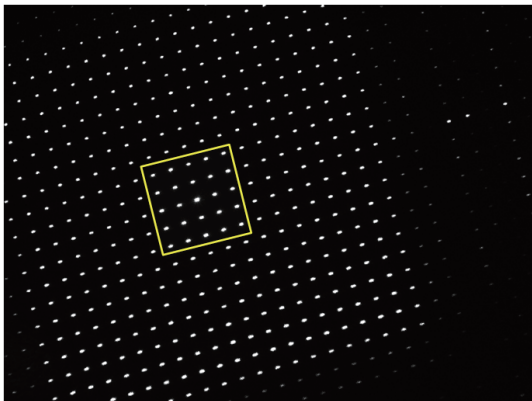


Fig.6 An image by the CCD camera of the sensor

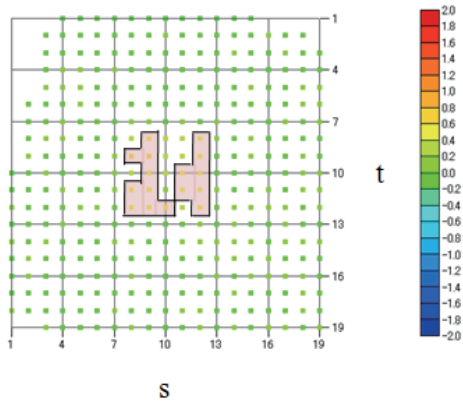


Fig.9 Result of obstacle detection for Fig.8

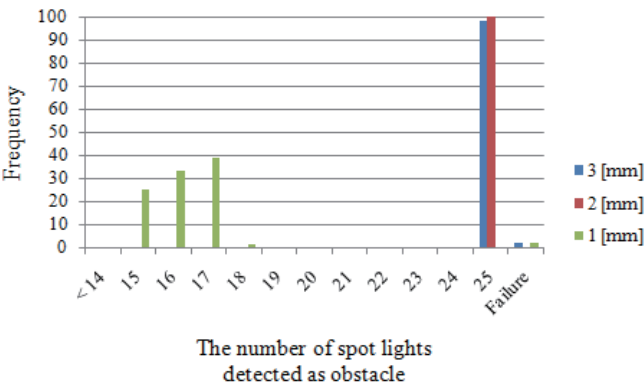


Fig.7 Experimental results of obstacle detection with different height (correct number is 25)

ンサシステムは高さ 1[mm] の障害物検出においても有用であると思われる．式 (4) より求まる理論値は，マルチスポット光の中心の 5×5 点があたる領域に 1[mm] の高さの障害物を置いた際，本実験ではセンサが静止しているため $\Delta k = 0$ とし， $\Delta k' = 0.34[\text{pixel}]$ となった．実際の相対視差は $\Delta k' = 0.42[\text{pixel}]$ (最小 $0.15[\text{pixel}]$ ，最大 $0.64[\text{pixel}]$) であり，ほぼ同等の値であると言える．

6. 二足歩行ロボット歩行実験

二足歩行ロボットの歩行中において，高さの低い障害物を検出できるか検証するため実験を行った．Fig.10 に実験風景を示す．障害物は前章で用いた高さ 1[mm] の板とし，その他の条件は同じにした．まず歩行開始時では床面を計測し，途中で障害物を含んだ床面を計測する．さらに障害物を超え，再度床面を計測する流れである．



Fig.10 Experimental scene with a walking robot

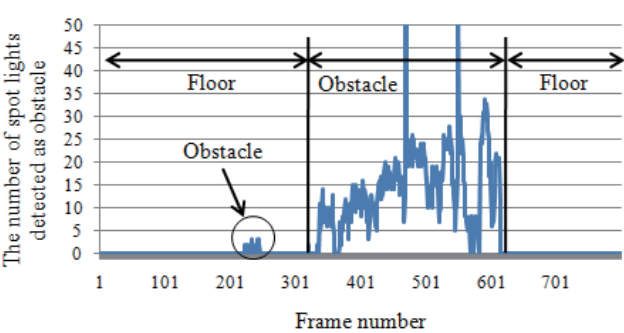


Fig.11 The number of spot lights detected as obstacles

Fig.11 に歩行中に障害物と検出された点数を示す．フレーム番号 224～245，321～614 において障害物が含まれている．まずフレーム番号 321～614 において，フレーム番号が増加するにつれて障害物と検出された点数が増加している．本手法ではレーザプロジェクタが床面に対して斜めに傾いているので，二足歩行ロボットに近い領域では投影されたマルチスポット光の間隔が密になっている．そのため二足歩行ロボットが障害物に近づくにつれて障害物と検出された点数が増加している．フレーム番号 224～245 において障害物が含まれているのは，二足歩行ロボットの歩行によって小型距離画像センサの仰角が変動するため，一時的に障害物を検出している．またフレーム番号 470，550 においては障害物と検出された点数が 50 点を超えているが，これは LMedS 推定により正しい平面が推定できていないためである．

フレーム番号 358 における相対視差画像と相対視差画像を俯瞰した画像を Fig.12，Fig.13 に示す．Fig.13 の太線で囲まれた領域が障害物と検出された点である．基準床面に対して小型距離画像センサの位置姿勢が変化し，二足歩行ロボットに対して遠い領域においても障害物が検出されていることがわかる．

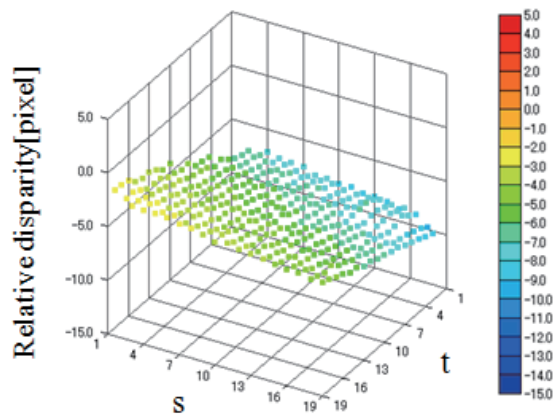


Fig.12 A relative disparity map (frame number:358)

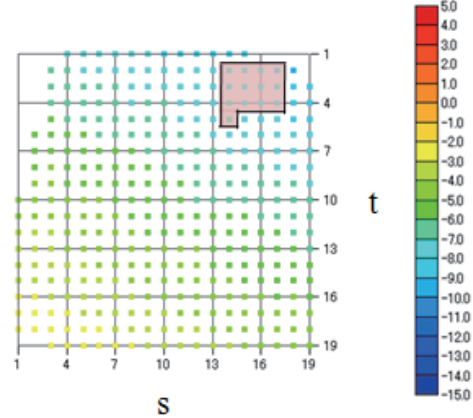


Fig.13 Result of obstacle detection for Fig.12

7. 結論

小型距離画像センサから得られる相対視差のみを用いて障害物検出を行う手法によって，検出可能な障害物の高さに対して定量的に評価を行った．まず，二足歩行ロボットが静止した状態で検出可能な障害物の高さに対して評価した．さらに小型距離画像センサの位置姿勢が変化する歩行中において，高さ 1[mm] の障害物が検出可能であることを示した．今後は障害物の高さだけでなく，検出可能な障害物の色や素材についても定量的に評価を行う予定である．

- [1] 加賀美聡 他：“プレーンセグメントファインダー”，第 5 回ロボティクスシンポジウム予稿集，pp.381-386，2000.
- [2] 梅田和昇：“平面領域検出における相対視差画像の利用の検討”，第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2A16，2002.10.
- [3] 彦坂直孝 他：“相対視差画像を用いた LMedS 推定による平面領域検出”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'2007，1P1-K01，2007.5.
- [4] R.J. Rousseeuw and A.M. Leroy: “Robust Regression and Outlier Detection Detection”，John Wiley & Sons，1987．
- [5] 渡辺圭 他：“小型距離画像センサを用いたヒューマノイド歩行中における障害物認識”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'2006，1A1-D24，2006.5.