

マルチスリット光を用いた小型距離画像センサによる ヒューマノイドの障害物回避

○黒木崇博, 寺林賢司, 梅田和昇 (中央大学)

Obstacle avoidance of a humanoid by a compact range image sensor using a multi-slit laser projector

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

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. We constructed a compact range image sensor using a multi-slit laser projector for detecting small obstacles on a plane. In this paper, we apply the range image sensor to obstacle avoidance of a humanoid in an environment in which there are many obstacles. Measurement errors of a relative disparity map (RDMap) and range image are compared. We constructed a system of obstacle avoidance with an obtained RDMap and range image. Experiments show that a humanoid can avoid obstacles in an environment which is set many obstacles by walking to between obstacles.

Key Words: compact range image sensor, multi-slit laser, relative disparity map, obstacle avoidance, 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、障害物を検出し、回避する必要がある [1]。また、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、小さな障害物でも転倒してしまう恐れがある。小さな障害物の検出のためには高密度な三次元計測が必要である。

近年、いくつかの距離画像センサが市場に出回っている。中でも三次元距離測定赤外線カメラ Swissranger 社製 SR-4000[2] は 1 度に約 25000 の画素から距離を得ることができる。しかし、視野角に比べて画素数が少ないため、紐状の物体などを計測することは困難であると思われる。湯浅ら [3] はレーザーレンジファインダをヒューマノイドの手に搭載し、手首を回転させることで高密度な三次元計測を行った。しかし、時系列の距離データを組み合わせる手法を用いて、動いている物体を計測することは困難である。そこで、我々は、高密度な計測が可能なマルチスリット光を照射するレーザープロジェクタと 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]。このセンサは、CCD カメラから得られる 1 枚の画像から高密度な距離画像を計測することが可能である。また、高さの低い障害物を検出するために、計測誤差が距離に依存しない相対視差画像 [5] を計測している。

本論文では、構築したマルチスリット光を用いた小型距離画像センサを応用して、障害物が多数存在する環境においてヒューマノイドが障害物を回避するシステムを提案する。そのために、まず本センサから得られる相対視差画像と実距離画像の比較を行う。その比較結果に基づいて多数障害物を回避するシステムを考案、構築する。

2. マルチスリット光を用いた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。レーザープロジェクタ (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[mm] に設定し、CCD カメラをレーザー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。本センサは平行ステレオとなっているため、エピポーラ線は取得画像上で水平方向となる。そこで、取得画像上でスリット像の重心位置を各行で求めて視差を計測することができる。

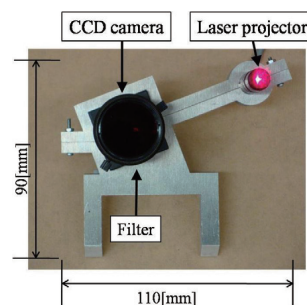


Fig.1 Constructed compact range image sensor

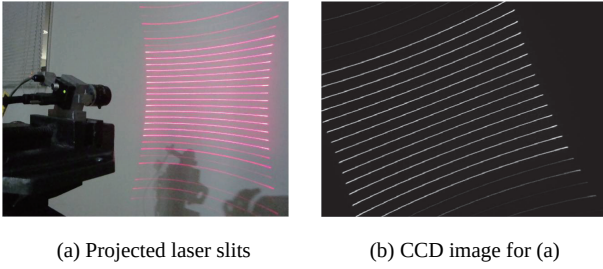


Fig.2 Projected laser slits and corresponding image

3. 相対視差画像と実距離画像

本論文では、構築したセンサを応用して、障害物が多数存在する環境においてヒューマノイドが障害物を回避することを目指している。そのためには、ロボットと障害物の相対的な位置関係を求める必要がある。しかし、相対視差画像のみでは位置関係を求めることができない。また、本センサは相対視差画像と同時に実距離画像を計測することができる。そこで、相対視差画像と実距離画像を組み合わせた障害物回避手法を提案する。そのために、まず本センサから得られる相対視差画像と実距離画像の比較を行う。

3.1 相対視差画像

本センサはヒューマノイドに搭載し、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 (Relative disparity map : RDMap)[5] を計測している。基準平面に対するスリット像の結像位置と計測対象に対する結像位置の差を相対視差、また各計測点における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。

相対視差画像の性質として、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。そのため、相対視差画像のみを用いて平面を推定し、障害物を検出することができる [4]。Fig.3 に床面にテニスボールとダンボール箱を配置した際の相対視差画像の計測例を示す。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。

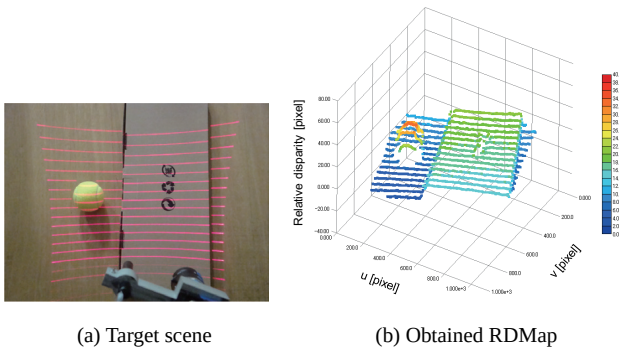


Fig.3 An example of RDMap

3.2 実距離画像の計測

実距離を計測するためにはセンサのキャリブレーションが必要である。キャリブレーションの手順として、まず Fig.2(a) のように、センサの光軸と平面が垂直になるようにセンサを配置する。そのとき、センサと平面の既知の距離におけるスリット像の結像位置を求める。2つ以上の距離における結像位置から、無限遠からの結像位置およびセンサの内部パラメータが求まる。このキャリブレーションによって得られたこれらの値を利用し、三角測量を用いて距離を算出する。Fig.4 に Fig.3 の相対視差画像と同時に計測した実距離画像の例を示す。このときの実距離画像の原点は CCD カメラのレンズ中心である。

3.3 相対視差画像と実距離画像の計測精度評価

相対視差画像と実距離画像の比較として、まず本センサにおける両画像の計測精度を評価した。センサの光軸に垂直な平面を計測対象とし、得られた相対視差画像と実距離画像にそれぞれ平面フィッティングを行う。このフィッティング面からの相対視差および実距離を誤差と考え、各計測距離における標準偏差で計測精度を評価した。また、本センサは隣り合うスリット像の誤対応を起こさないために、計測レンジを限定している。計測レンジは計測したい距離に設定して使用する。本論文ではセンサを小型ヒューマノイドに搭載し、床面を計測するため、計測レンジを 380~800[mm] に設定した。相対視差画像、実距離画像の各計測距離における標準偏差を Fig.5 に示す。グラフから、相対視差画像は距離が変わってもほぼ一定の計測誤差であることがわかる。これは、計測誤差が距離に依存しないという相対視差の性質のためである。また、実距離画像は距離が遠くなるにつれて計測誤差が大きくなっていることがわかる。これは、誤差の伝播則によるものである。

以上の結果をふまえて、相対視差画像と実距離画像を比較して以下の3つのことが言える。

- ヒューマノイドは歩行中にセンサが動いて、対象物までの距離が変わる。実距離画像では異なる距離の物体を計測した際に、誤差の伝播則によって計測点が均質にならない。一方、相対視差画像では計測誤差が距離に依存しないという性質から、距離が変わっても計測点は均質になる。これらのことから、ヒューマノイドにセンサを搭載して平面

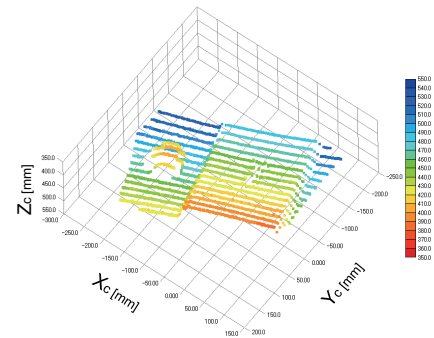


Fig.4 Obtained range image

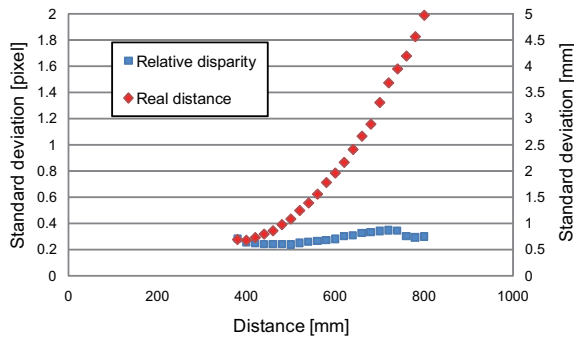


Fig.5 Standard deviation of the measured relative disparity and distance

- の検出をする場合、相対視差画像の方が適していると考えられる。
- 相対視差画像はキャリブレーションがほぼ必要ないが、実距離画像はキャリブレーションが必要なため、計測に人為的な誤差が乗りやすい。このことから、平面の検出には相対視差画像の方が適していると考えられる。
 - 相対視差画像は、実空間における計測対象物の位置情報を得ることができない。実距離画像を用いれば、ロボットと障害物の相対的な位置関係を得ることができ、三次元情報を利用した効果的な回避行動が行えると考えられる。

以上のことから本論文では、距離によらずに高さの低い障害物を検出するため、相対視差画像を用いて平面および障害物の検出を行うこととした。さらに、実距離画像を用いてロボットと障害物の相対的な位置関係を考慮した障害物回避システムを構築する。

4. 障害物回避システム

障害物が多数存在する環境において、ヒューマノイドが障害物を回避するシステムを提案する。そのような環境において、障害物回避するには障害物間の狭い間を回避していく必要がある。そのためには、進行方向上のヒューマノイドの足の幅にある障害物だけを回避すれば良い。本論文では、障害物の相対的な位置関係を得るために、床面に対するセンサのパラメータとヒューマノイドの姿勢を求める。

4.1 小型距離画像センサの搭載

センサを小型ヒューマノイド (FUJITSU HOAP-2) に搭載した様子を Fig.6 に示す。進行方向に対してスリットの方が垂直になるように搭載している。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 床面に対するセンサのパラメータ

ヒューマノイドと障害物の相対的な位置関係を得るために、まず床面に対するセンサのパラメータを求める必要がある。Fig.7(a) にヒューマノイドの直立時、(b) にヒューマノイドが歩行して傾いている床面とセンサの位置関係を示す。歩行中には姿勢が傾いて (b) のよう

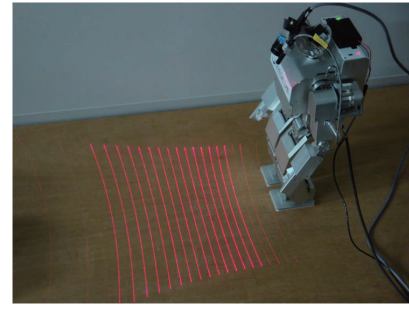
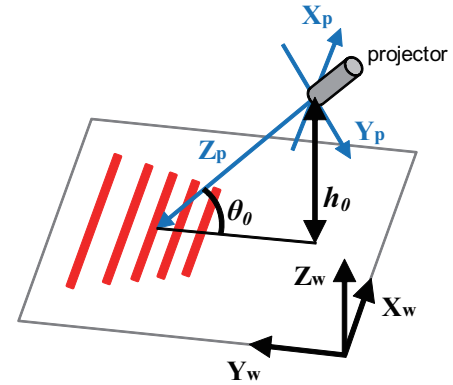
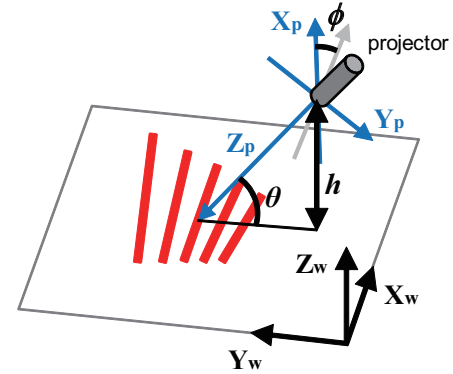


Fig.6 Compact range image sensor and humanoid



(a) Upstanding condition



(b) Inclined condition in walking

Fig.7 Pose parameters of sensor for floor

になる。センサ座標系はレーザプロジェクトの回折格子の位置を原点として考える。Z_p 軸はセンサの光軸、X_p 軸は中央のスリットと平行である。また、進行方向が Y_w 軸方向となるように世界座標系をとっている。h, θ, φ はそれぞれ、センサと床面の高さ、センサの光軸と世界座標系 Y_w Z_w 平面における床面の角度、センサの X_p 軸と世界座標系 X_w Z_w 平面における床面の角度である。また、ヒューマノイドの歩行時に Z_w 軸周りの回転も考えられるが、本論文で使用するヒューマノイドは直進時に、Z_w 軸周りの回転がほとんどないため、考慮しないものとする。

4.3 パラメータの計測

床面に対するセンサのパラメータは、ヒューマノイドの関節角度情報を利用せずに、実距離画像のみで求めることができる。そこで、障害物が存在する床面で

も安定して床面に対するセンサのパラメータを求める手法を提案する．まず，3.3節で述べたように障害物検出は相対視差画像上で行う．そして，平面と検出された計測点を用いて実距離画像上で平面フィッティングを行い h , θ , ϕ を求める．床面に対するセンサのパラメータ計測の手順は以下の通りである．(Fig.7を参照)

1. 相対視差画像において，平面および障害物の検出を行う
2. 実距離画像において，平面と検出された計測点を用いて平面フィッティングを行う
3. センサの原点と平面の距離 h を求める
4. センサ原点と平面の光軸方向の距離と h から θ を求める
5. θ を利用して，センサの座標系 Z_p 軸と世界座標系 Z_w 軸が平行になるようにセンサの座標系を X_p 軸まわりに回転する
6. 回転したセンサの座標系 $X_p Z_p$ 平面において X_p 軸と床面のなす角 ϕ を求める

障害物検出手法として，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RANSAC[6]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]．本研究では，平面状の大きな障害物を歩行可能な平面領域と誤検出するという，この手法が持つ問題を，以下のように解決，改善し，安定的に平面領域を検出する．まず，始めの障害物検出では，全計測点に対してRANSACを用いて平面および障害物を検出する．そして，次の処理では，前の処理で平面として検出された計測点のみに対してRANSACを用いる．このように時系列の平面検出結果を利用することによって，歩行中に平面状の大きな障害物を検出した際でも安定的に平面領域を検出することができる．

4.4 ロボットと障害物の相対的な位置関係を考慮した障害物回避

ヒューマノイドと障害物の相対的な位置関係を得るために，床面に対するセンサのパラメータ h , θ , ϕ を利用し，Fig.8のようにセンサの座標系 $X_p Y_p Z_p$ を足先の床面上に移動する．移動した座標系 $X_f Y_f Z_f$ において足の幅を考慮し，障害物を回避する．ここで，センサの座標系 $X_p Y_p Z_p$ を足先の床面上に移動するためには歩行中のヒューマノイドの姿勢を考慮しなければならない．本論文では，ヒューマノイドの関節角度情報を利用せずに，簡単な直方体のモデルを用いてヒューマノイドの姿勢を求める．Fig.9にヒューマノイドを1つの直方体とみなした際の姿勢を示す．Fig.9(a)はヒューマノイドが横方向に傾いたときのモデルである．このとき，ヒューマノイドの傾いた角度は ϕ と一致する．Fig.9(b)はヒューマノイドが進行方向に傾いたときのモデルでこのときのヒューマノイドの傾いた角度は $\theta - \theta_0$ と一致する．これらの角度を用いて x_m , y_m を求めると，ヒューマノイドが歩行中のときにセンサの座標系を足先の床面上に移動することが可能である．

以上より，カメラ座標系 $X_c Y_c Z_c$ からヒューマノイドの足先の床面上における座標系 $X_f Y_f Z_f$ を得る式は以下のように表すことができる．

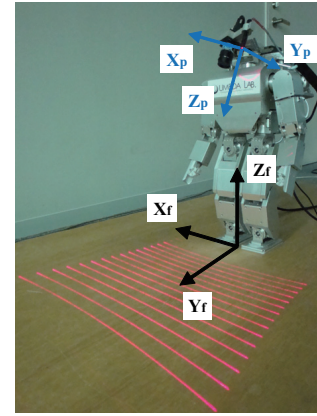


Fig.8 Coordinate transformation

$$\begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \\ 1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}^T ABCD,$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_b & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_m - x_l & y_m + y_l & h & 1 \end{bmatrix}.$$

行列 A は，カメラ座標系をプロジェクタの座標系に変換するための行列である． x_b は基線長， α は X_c と X_p のなす角である．行列 B , C は，それぞれ θ , ϕ の回転行列である．行列 D は並進行列で， x_l , y_l はそれぞれプロジェクタとヒューマノイドの中心までの距離，プロジェクタと足先までの距離である．これらの値を既知としてあらかじめ与えることで，座標系 $X_f Y_f Z_f$ の原点を足先の中央に移動することができる．

このように座標を変換することで，ヒューマノイドと障害物の相対的な位置関係を得ることができる．また，進行方向の足幅内にある障害物だけを回避することで，障害物が多数存在する環境において障害物間の狭い間を回避していくことができる．

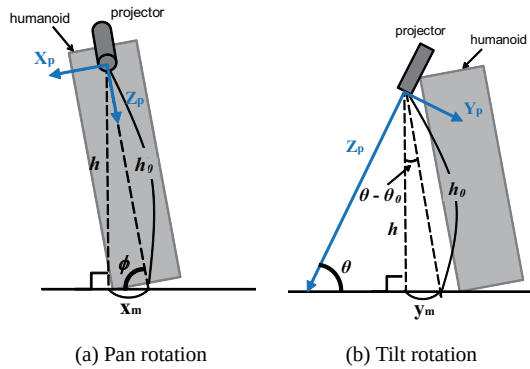


Fig.9 Rotation model of humanoid

5. 障害物回避実験

本システムを搭載したヒューマノイドが、多数障害物が存在する環境において回避でき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、進行方向の足幅の自身に近い領域に障害物が検出されない限りは直進を続けるようにした。その領域内で障害物が検出されると、左右で障害物検出点数が少ない方に旋回をする。本実験では障害物回避を行う領域の X_f 軸の幅を 200[mm] とした。実際のヒューマノイドの足幅は 145[mm] だが、本論文では、簡単な直方体のモデルを用いてヒューマノイドの姿勢を求めているため少し余裕を持たせた。また、RANSAC で用いる平面領域と障害物領域を切り分ける相対視差の閾値は、あらかじめ実験によって求めた 0.9[pixel] とした。

実験の様子とその際に得られた相対視差画像、および座標系 $X_f Y_f Z_f$ に変換した実距離画像を Fig.10 に示す。左上、右上の画像は、進行方向から実験環境を撮影した画像、実験環境を俯瞰した画像である。左下、右上の画像は、得られた相対視差画像、座標変換された実距離画像を示している。相対視差画像では、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。また、座標変換された実距離画像では、相対視差画像による障害物検出結果から得られた平面を薄緑で、同様に得られた障害物領域を平面に赤色で描画している。さらに、障害物回避を行う領域の X_f 軸の幅を平面に灰色で描画している。

ヒューマノイドは歩行中、左右にピンポン球および LAN ケーブルを検出したが回避せずに歩行を続けた。その後、障害物回避を行う領域内で本を検出し、右旋回を行い、領域内から外れたところで歩行を再開した。次に、2本のペンを領域内の右側で検出したため左旋回を行った。歩行を再開したあとは、左右にマスコットと消しゴムを検出したが障害物回避を行う領域内ではなかったため、歩行を続けた。結果から、相対視差画像において LAN ケーブルや消しゴムのように高さの低い障害物でも検出し、適切な回避が行えていることがわかる。

6. 結論

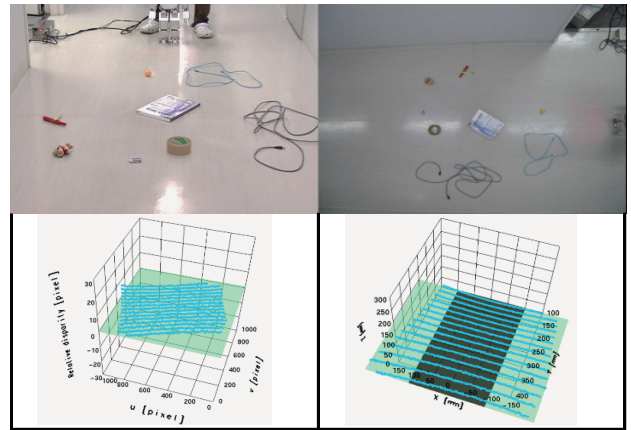
本論文では、マルチスリット光を用いた小型距離画像センサの応用として、障害物が多数存在する環境に

おいてヒューマノイドが障害物を回避するシステムを構築した。システムを考案するために、本センサから得られる相対視差画像と実距離画像を比較した。比較結果から、相対視差画像と実距離画像を組み合わせたヒューマノイドの障害物回避システムを提案した。実験により、障害物が多数存在する環境で高さの低い障害物でも検出し、ヒューマノイドが回避できることを示した。今後の展望として、時系列の実距離画像の情報を用いて、隣接するスリット間に入るような小さな障害物の回避行動の実現などがあげられる。

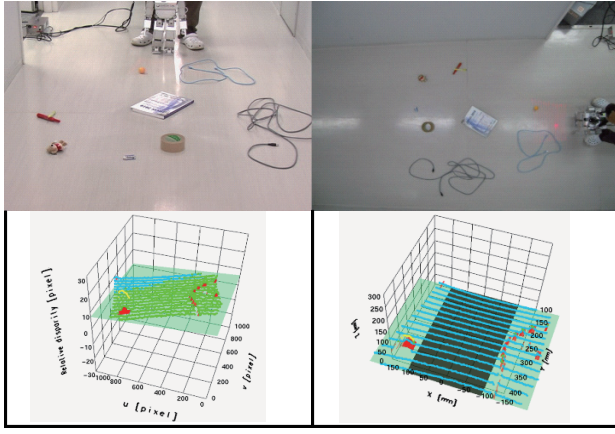
謝辞

本研究は科研費 (20500164) の助成を受けたものである。

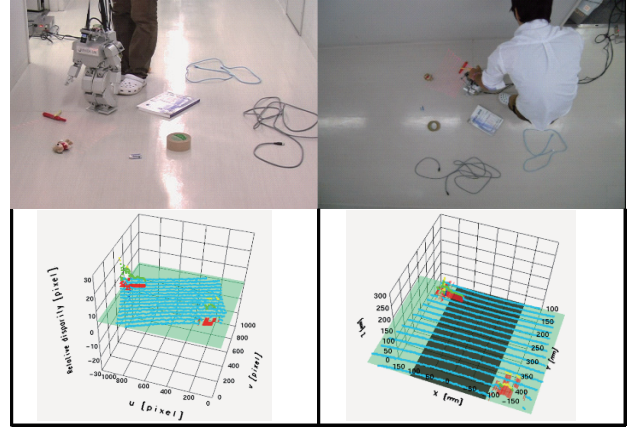
- [1] K. Okada, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue: "Plane Segment Finder: Algorithm, Implementation and Applications," Proc. 2001 Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2120-2125, 2001.
- [2] "SwissRanger SR4000," MESA Imaging AG, <http://www.mesa-imaging.ch/index.php>
- [3] 湯浅卓也, 怡土順一, 栗田雄一, 松本吉央, 小笠原司: "ヒューマノイドによるレーザレンジファインダを用いた三次元地図作成と障害物回避," 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集 (SI2007), 2007.
- [4] Takahiro Kuroki, Kenji Terabayashi, Kazunori Umeda: "Construction of a compact range image sensor using multi-slit laser projector and obstacle detection of a humanoid with the sensor," Proc. 2010 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 5972-5977, 2010.
- [5] K. Umeda: "A Compact Range Image Sensor Suitable for Robots," Proc. 2004 Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3167-3172, 2004.
- [6] 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.



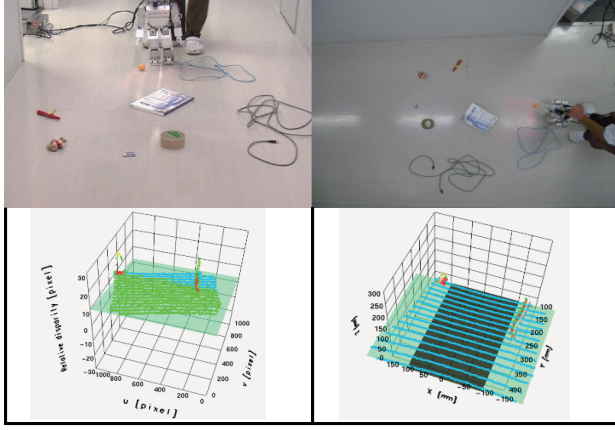
(a) 0[s]



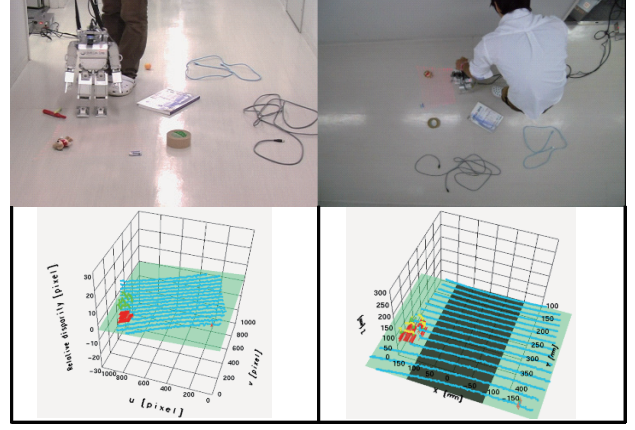
(b) 8[s]



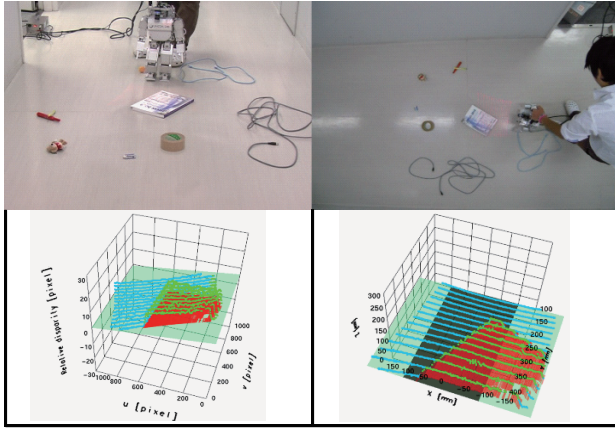
(f) 40[s]



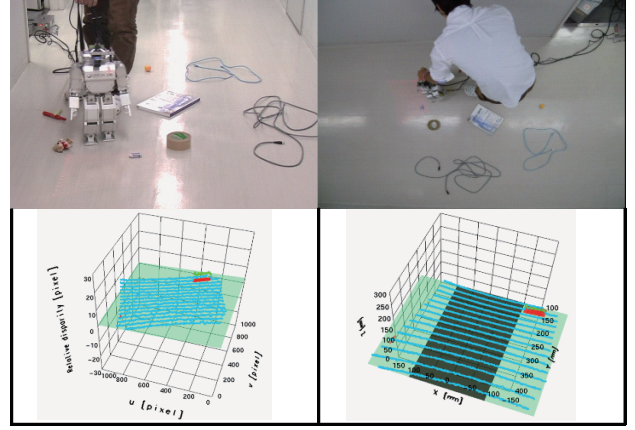
(c) 16[s]



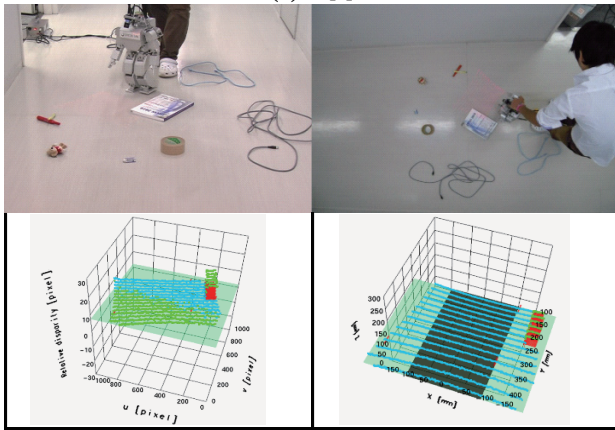
(d) 48[s]



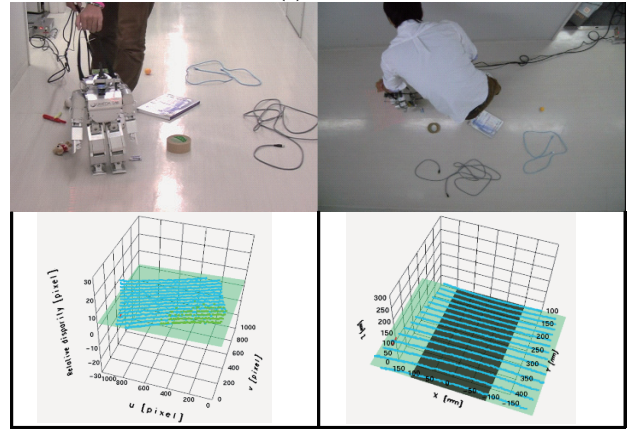
(d) 24[s]



(e) 56[s]



(e) 32[s]



(f) 64[s]

Fig.10 Experimental results of obstacle avoidance of humanoid