

マルチスリットレーザプロジェクタを用いた超小型距離画像センサの構築*

岩崎 一也^{*1}, 寺林 賢司^{*2}, 梅田 和昇^{*3}

Construction of a Very Compact Range Image Sensor Using a Multi-Slit Laser Projector

Kazuya IWASAKI, Kenji TERABAYASHI and Kazunori UMEDA^{*3}^{*3} Department of Precision Mechanics, Chuo University,
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8551 Japan

In this paper, a compact range image sensor for measuring objects in a short distance is constructed using a multi-slit laser projector. When a robot executes a task such as grasping an object or avoiding an obstacle, three-dimensional (3D) information of the target is usually necessary. A humanoid generally carries a vision sensor at its head and recognizes, grasps or avoids objects using the vision sensor. Measurement with a sensor attached to a robot's body is often suffered from occlusion by its hand just before grasping an object. The constructed sensor is compact enough to be attached to a robot's hand and thus occlusion can be avoided. The compactness of the sensor is achieved by using a small CMOS camera and a laser projector and setting the baseline length between them as short as possible. The short baseline length also enables measurement in a short distance. Some experiments verify that the constructed sensor can obtain 3D information of objects appropriately in a short distance.

Key Words : Range Image Sensor, Sensor, Active Stereo, Optical Measurement, Shape Measurement, Robot Hand, Robot

1. 序論

ロボットが物体の把持動作や障害物回避を行う場合、対象物体の三次元情報が求められる。ヒューマノイドロボットは一般に頭部のビジョンセンサを用いることで、物体を計測し、把持動作や回避行動を行う。また、産業用のマニピュレータでは、ロボットハンドと離れた位置に設置されたビジョンセンサを用いることで、把持対象であるワークを計測するシステムがある。これらの物体計測には距離画像センサが多く用いられている。

これまでに開発されてきた距離画像センサは多岐にわたる。TOF (Time of Flight) 方式の距離画像センサでは、小型でリアルタイム計測が可能な製品がこれまでに発表されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。また、ステレオカメラ⁽⁴⁾やスリット光⁽⁵⁾⁽⁶⁾を走査して距離画像を得るセンサにおいても、リアルタイム計測が可能なものが提案されている。

一方で、ロボットハンドによる把持動作を考えた場合、有用なセンサは限られる。一般に、ロボットハンドと物体を計測するセンサが離れた位置にある場合、把持前にオクルージョン (隠蔽) が生じてしまう問題がある。確実な物体把持を行うために、オクルージョンに対してロバストな計測が可能なセンサが求められる。距離画像センサを用いる場合、計測対象に対して近距離計測が可能な小型のセンサをロボットハンドに取り付けることでオクルージョンを回避することができると考えられる。湯浅らはヒューマノイドの手先に搭載されたレーザレンジファインダによる高密度な三次元計測を実現している⁽⁷⁾。しかし、手首を回転させて計測を行うため、一度に広範囲の計測を行うことができない。パルステック工業製の3次元スキャナ TDS-A は近距離で高精細な3次元モデルを作成することができる⁽⁸⁾。一方で、処理時間の点からリアルタイムでの計測が難しい。また、長谷川らは、

* 原稿受付 2013 年 3 月 28 日

^{*1} 中央大学大学院理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)^{*2} 正員, 静岡大学工学部^{*3} 正員, フェロー, 中央大学理工学部

E-mail: umeda@mech.chuo-u.ac.jp



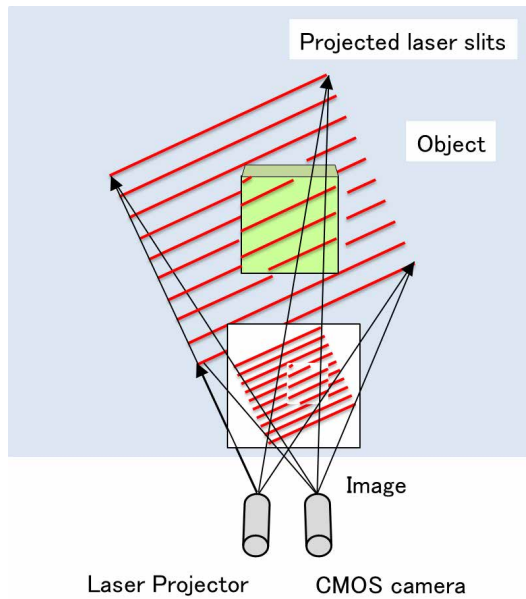
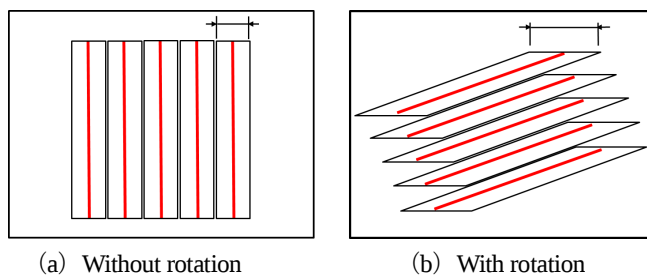
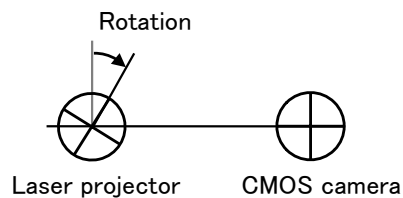


Fig. 1 Structure of the range image sensor using a multi-slit laser projector



(a) Without rotation

(b) With rotation



(c) Rotation of laser projector

Fig. 2 Rotation of CCD camera to increase measurement range

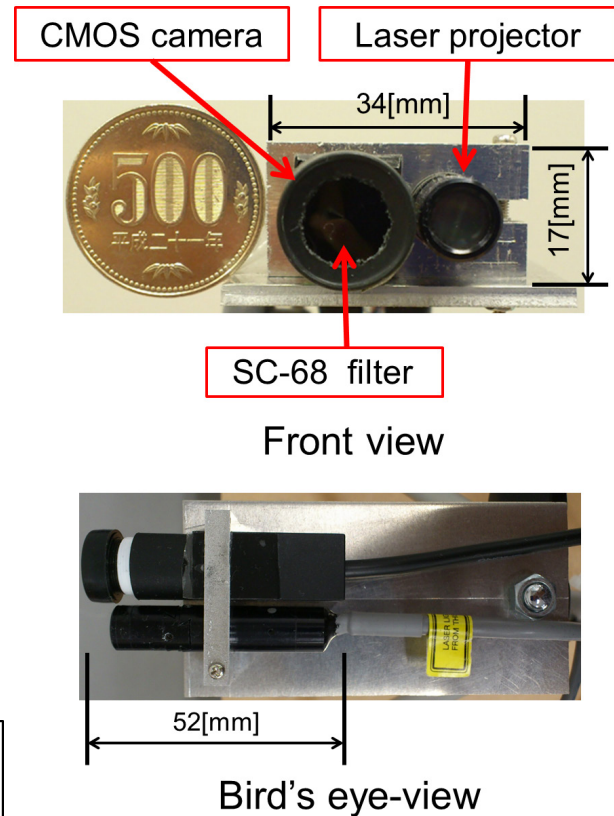


Fig. 3 Constructed compact range image sensor (weight: 40g)

距離画像センサを用いずに、ネット状近接覚センサをロボットハンドの指先に搭載することで、近接から接触までのシームレスな物体の検出により、確実な物体把持を実現している⁽⁹⁾。しかし、物体把持に至るまでに、ロボットハンドと対象物体との大域的な位置合わせが必要である。

我々は、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、ヒューマノイドが障害物を回避するシステムを提案した⁽¹⁰⁾。このような小型距離画像センサをロボットハンドに搭載することで、近距離で精度の良い計測が実現可能であると考えられる。しかし、文献(10)で構築したセンサはカメラとレーザプロジェクタ間の基線長が長く、最短計測距離が 380mm であり、より近距離での計測を実現することが必要であると考えられる。また、ロボットハンドに搭載する場合、さらにセンサを小型化する必要がある。

本論文では、小型の CMOS カメラを用い、カメラとレーザプロジェクタとの基線長を短くすることで、距離画像センサの超小型化を実現する。これにより、近距離でリアルタイム計測が可能な超小型距離画像センサを構築する。実験により、構築したセンサによる近距離での物体計測が可能であることを示す。

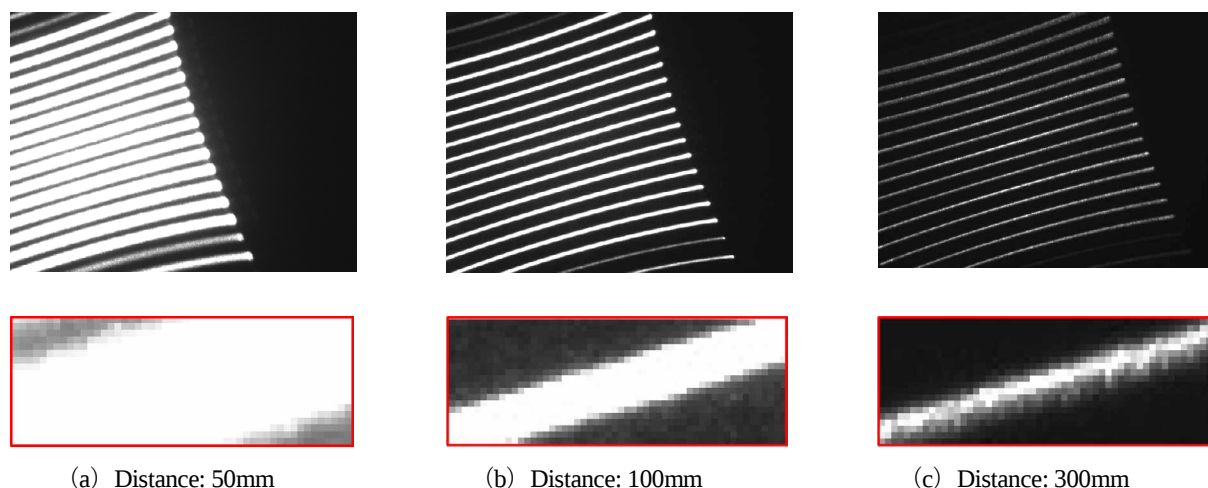


Fig.4 Images of laser slits at different distances

2. 超小型距離画像センサの構築

2・1 センサの構築

図 1 に構築する超小型距離画像センサのイメージ図を示す．センサは小型のレーザプロジェクタと小型の CMOS カメラから構成される．レーザプロジェクタはマルチスリット光を投影するものを用い，投影されたスリット光の画像を CMOS カメラによって取得する．スリット光像の座標値を取得し，三角測量の原理から距離を算出する．ここで，マルチスリット光を用いることから，図 2 (a) のように計測レンジを制限しなければ，スリット光像の移動量が大きい場合に隣接するスリット光間で対応点問題が生じる．そのため，計測レンジを制限する．この時，レーザプロジェクタを CMOS カメラに対して回転させる．これによって，図 2 (b) に示すように各スリット光に割り当てられる画素数を増加させている⁽¹¹⁾．

2・2 構成部品

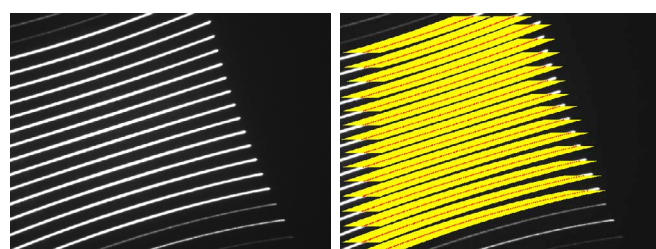
本研究では波長 690nm のスリット光を 15 本投影するレーザプロジェクタ MINI-715L (Coherent) と有効画素数 752×480pixel の CMOS カメラ ARTCAM-022MINI-BW (ARTRAY) を使用する．スリット光の投光角は 45°，隣接するスリット光間の角度は 2.37°である．CMOS カメラには焦点距離 3.6mm のレンズを用いる．また，外乱光の影響を減らすため，680nm 以下の波長をカットする SC-68 フィルタ (FUJIFILM) を用いる．

2・3 ハード構成

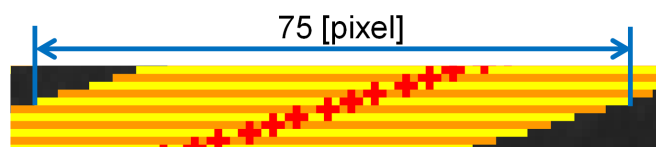
図 3 に構築した超小型距離画像センサを示す．センサは縦 15mm，横 30mm，奥行 47mm，重量は約 40g と小型である．カメラとレーザプロジェクタとの基線長は我々が構築した従来センサでは 60mm としていた．本センサでは基線長を短くするため，カメラとレーザプロジェクタを近づけて配置した．その結果，それぞれの寸法から基線長は 13mm となっている．また，互いの光軸は平行にしておき，レーザプロジェクタを CMOS カメラに対して 70°回転させている．レーザプロジェクタを回転させた場合，各スリット光に割り当てられる画素数は増えるが，スリット光像の幅が大きくなるため，結像位置の計測精度が悪化する．よって，結像位置の精度が影響を与えない範囲でレーザプロジェクタを回転させている．

2・4 センサのキャリブレーション

画像内において，各スリット光像は距離に応じてエピポーラ線上を移動する⁽¹²⁾．キャリブレーションの手順として，まず各スリット光像の移動領域を設定する．各計測距離における取得画像および拡大図を図 4 に示す．図 4 より，近距離での取得画像はスリット光像の幅が大きくなることが分かる．これは，カメラのピンボケやレー



(a) CMOS camera image (b) Assigned regions to obtain disparity



(c) Magnified image of (b)

Fig. 5 Assigned regions to obtain disparity

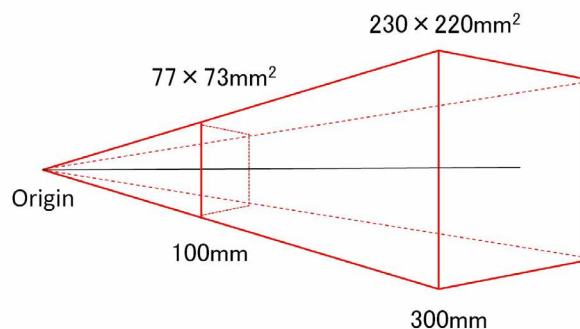


Fig. 6 Measurement space of the sensor

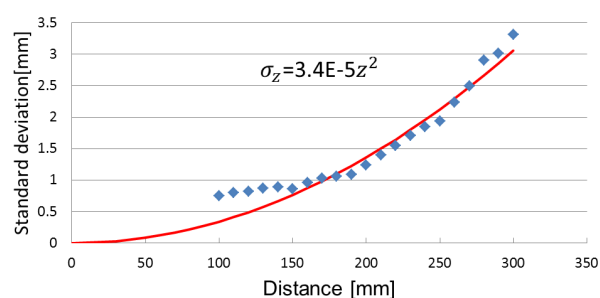


Fig. 7 Standard deviation of the residuals from fitted plane

ザプロジェクトがボケてしまうためである。よって、計測距離 100mm 未満ではスリット光像の結像位置の計測精度が著しく悪化することから、最小計測距離を 100mm とした。また、計測距離 150mm のスリット光像の結像位置を基準位置とした。この最小計測距離より、計測点の移動領域、及び最大計測距離を求める。三角測量の原理から、次式より、無限遠の結像位置からの視差 d が求まる⁽¹³⁾。

$$d = k - k_{\infty} = \frac{b \cdot f}{p \cdot z} = \frac{\alpha}{z} \quad (1)$$

z : 対象までの距離 mm

b : 基線長 mm

f : レンズの焦点距離 mm

p : CMOS イメージセンサー画素の大きさ mm/pixel

d : 視差 pixel

k : 対象で反射したスリット光像の結像位置 pixel

k_{∞} : 対象を無限遠と仮定した時のスリット光像の結像位置 pixel

b , f , p は別々に与える必要は無く、 α のみをキャリブレーションによって求める。 b , f は前述のようにそれぞれ 13mm, 3.6mm, また p はカタログ値より 6.0×10^{-3} mm/pixel であるため、 α は約 7.8×10^3 となる。よって、式 (1) より、計測距離 100mm の位置での視差は 78pixel, 150mm の位置での視差は 52pixel となる。そのため、最小計測距離を満たすスリット光の移動領域は基準位置から左 (近距離側) に 26pixel 設定すればよい。計測距離 150mm におけるカメラの取得画像及び設定した移動領域を図 5 に示す。この移動領域内で計測点の探索を行う。ここで、計測距離 100mm におけるスリット光像の幅は最大で約 20pixel である。よって、スリット光像の幅を考慮した移動領域を 10pixel 追加し、基準位置から左 (近距離側) に余裕を持たせて 40pixel とした。また、各スリット間の幅は最小で約 75pixel である。そのため、基準位置から右 (遠距離側) に 35pixel の移動領域を設定する。ここで、計測距離 300mm の位置での視差は 26pixel であり、スリット光像の幅は最大で約 15pixel である。基準位置から右 (遠距離側) に 35pixel の移動領域を設定したため、最大計測距離として 300mm までは計測が可能である。

Table 1 Comparison with other compact range image sensors

	Constructed sensor	URG-04LX	Cam Board nano
Number of measurement points	About 1800	About 670	19200 (160×120)
Angle resolution [°]	0.25×2.4	0.36	0.56×0.57
Measurement distance [mm]	100~300	60~4095	0~2000
Repeatability [mm]	0.8 (Distance: 100[mm])	10	5
Size [mm]	17×34×52	50×50×70	37×30×25
Weight [g]	40	160	40
Frame rate [fps]	15	10	90

式 (1) を用いて距離 z を算出するには k_{∞} とセンサの内部パラメータ α をあらかじめ求めておく必要がある。式 (1) より、既知の距離 z とそれに対応するスリット光像の結像位置 k に対して次式が成り立つ。

$$z \cdot k_{\infty} + \alpha = z \cdot k \quad (2)$$

この式を異なる 2 箇所以上の距離において求めて連立することで解を求めることができる。

距離算出時は、スリット光像の結像位置を求め、視差 d から式 (1) を用いて距離 z を算出する。

2・5 構築したセンサの仕様

本センサの計測範囲を図 6 に示す。隣接するスリット光間の距離は 100mm の位置で 4.1mm、300mm の位置で 12.4mm である。本センサの計測点数は約 1800 点であり、1 スリットあたり約 120 点である。また、中央のスリットにおいて、隣接する計測点間の角度は 0.25° である。また、フレームレートは 15fps である。図 7 に各計測距離における標準偏差を示す。センサ光軸に垂直な平面を計測対象とし、得られた実距離画像に平面当てはめを行って、当てはめた面からの距離の標準偏差を求めた。なお、平面の傾きは距離計測精度に対して影響がないことが分かっている⁽¹⁴⁾。図 7 より、計測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分かる。三角測量の原理において、誤差の伝播則より計測誤差は距離の二乗に比例して大きくなる⁽¹⁵⁾。図 7 の曲線は、距離の二乗に比例する曲線を当てはめた結果であり、点群がこの曲線におおよそ乗っていることから、本センサにおいても、計測誤差が誤差の伝播則に従ったものと考えられる。また、計測距離が 100mm に近づくにつれて、計測誤差が当てはめた曲線より大きくなっていることが分かる。これはスリット光像の結像位置の計測精度が悪化したためと考えられる。

3. 他センサとの比較

本センサは小型で近距離の計測を目的としているため、小型で近距離計測が可能な市販の距離センサと比較を行う。また、本センサはロボットハンドへの実装を考えており、テクスチャのない物体の計測も想定される。よって、能動的計測のセンサを比較対象とした。そこで、ロボットハンドに搭載可能な小型の距離画像センサである URG-04LX (北陽電機)⁽¹⁶⁾、Cam Board nano (PMD Technologies)⁽¹⁷⁾ を選択した。比較結果を表 1 に示す。

URG-04LX は水平方向にのみ計測を行うセンサであり、距離画像計測時はセンサを動かす必要がある。一方で、本センサは 1 枚の取得画像からスリット光 15 本分の距離画像を得ることができる。計測角度において、本センサはスリット方向に密な計測が可能であることが分かる。また、他のセンサが TOF (Time of Flight) 方式の計測原理を用いているのに対し、本センサの計測原理は三角測量である。そのため、本センサの繰り返し精度は計測距離 100mm において約 0.8mm と、近距離の計測精度では最も精度が高いことが分かる。また、本センサは他のセンサと比較すると小型、軽量であることが分かる。よって、ロボットハンドへの応用を考えた場合、本センサは有用であると言える。

4. 物体計測実験

4・1 静的環境での物体計測実験

構築したセンサを用いて、静止物体の計測実験を行った。まず、センサを壁から 150mm の位置に正対させ、計測対象を壁に接触した状態で計測した。計測対象は LAN ケーブル（直径 6mm）、白色の直方体（縦 50mm×横 25mm×奥行き 25mm）、ピンポン球（直径 40mm）である。次に、センサを壁から 250mm の位置に正対させ、飛行機の模型（縦約 100mm×横約 110mm）を計測した。計測結果をそれぞれ図 8~11 に示す。各図において、(b) の縦軸は垂直方向の座標、横軸は水平方向の座標を表す。また、(c) は (b) と同じ結果の鳥瞰図である。図 8~11 より、LAN ケーブルのような紐状の物体、直方体、ピンポン球のような球体の物体を計測できていることが分かる。図 11 は飛行機の模型の結果であり、複雑な形状を持つ物体も計測できている。なお、左下の計測点は模型の台座の一部が計測された結果である。

4・2 動的環境での物体計測実験

構築したセンサはロボットハンドへの応用を目的としているため、動的な環境での運用が考えられる。そのため、移動物体の計測実験を行った。まず、センサを机に対して仰角約 50°、高さ約 135mm に設置した。次に、300mm/s で走行する飛行機の模型をセンサに向けて移動させた。連続する 6 フレームの計測結果を図 12 に示す。実験結果より、移動物体もその形状や大きさを計測できていることがわかる。以上の結果から、近距離での物体計測において、静的な環境だけでなく、動的な環境に対しても計測対象の形状や大きさを計測できることが分かった。

4・3 ロボットハンドへの搭載実験

構築したセンサをロボットハンドに搭載する予備的な実験を行った。構築したセンサを模型のロボットアーム MR-999（EK JAPAN）のハンド部に搭載した様子を図 13 の左図に示す。本ロボットアームは、ホビー用の小型（最大地上高 510mm）のものであるが、ハンドに対して本センサが小型であることが分かる。図 13 右図は左図において距離画像を計測した例である。直方体は図 9 のものと同一である。ロボットアームをリモコンで動かしながら連続して距離画像を計測できることを確認した。

5. 結論

本論文では、小型の CMOS カメラとレーザプロジェクトを用いた小型距離画像センサの構築を行った。本センサは超小型の CMOS カメラを用い、基線長を短くすることで、縦 15mm、横 30mm、奥行き 47mm と距離画像センサの超小型化を実現した。さらに、短い基線長により、近距離での物体計測が可能となり、実験により本センサが近距離での物体計測を行うことができることを示した。また、移動物体の計測ができたことから、ロボットハンドへ応用した場合の動的な環境においても運用可能であると考えられる。

今後の展望として、ロボットハンドへの応用があげられる。ロボットハンドに搭載して把持動作を行うことで、センサに求められる仕様を明確にしていき、今後のセンサの改良を行う。

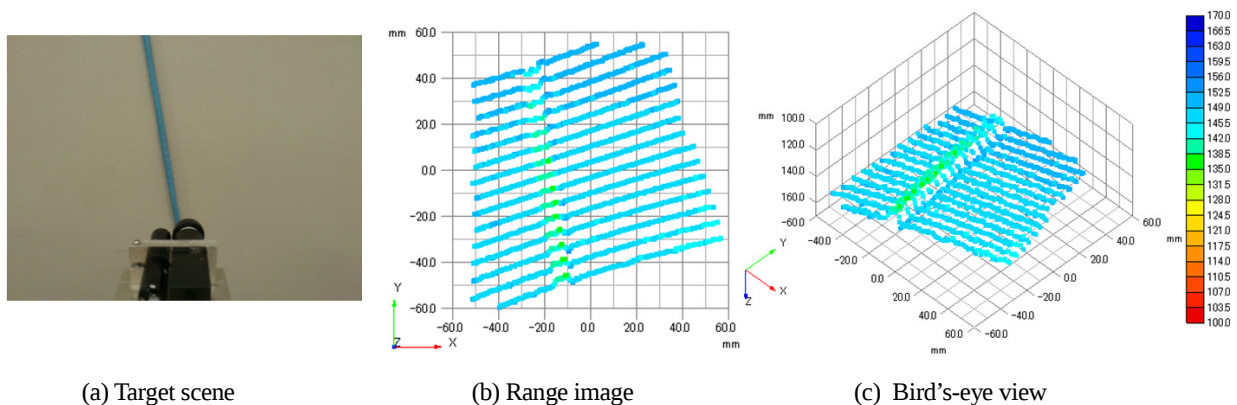


Fig. 8 Range image ($\phi 6$ mm LAN cable)

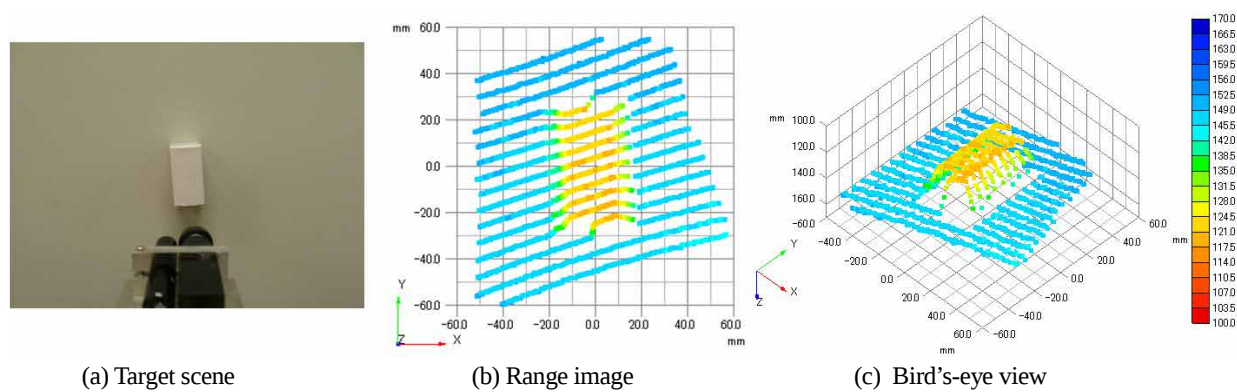


Fig. 9 Range image (50×25×25mm Rectangular parallelepiped)

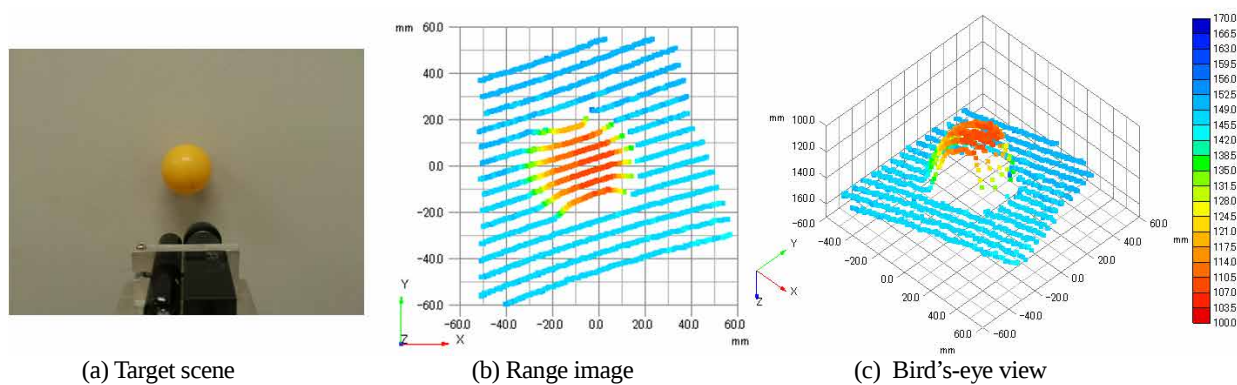


Fig. 10 Range image ($\phi 40$ mm Ping-pong ball)

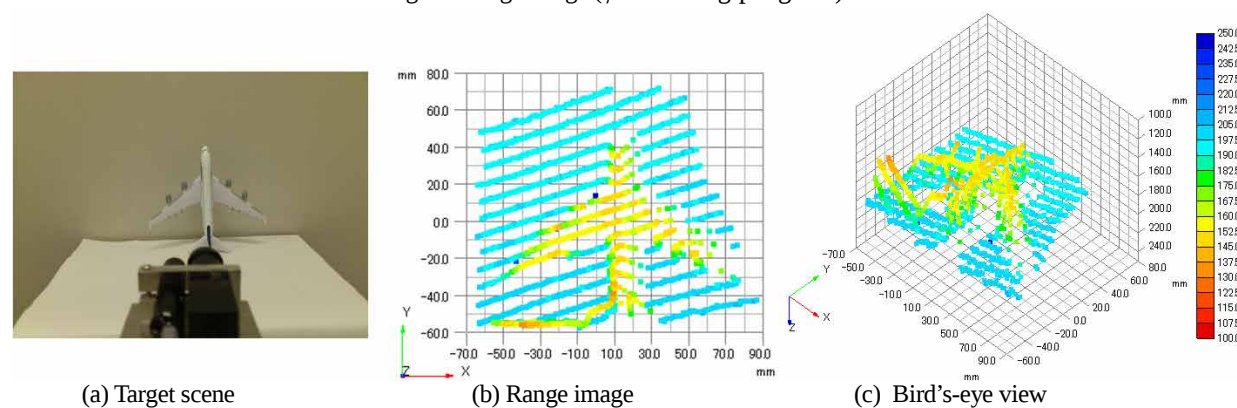


Fig. 11 Range image (100×110mm Plane model)

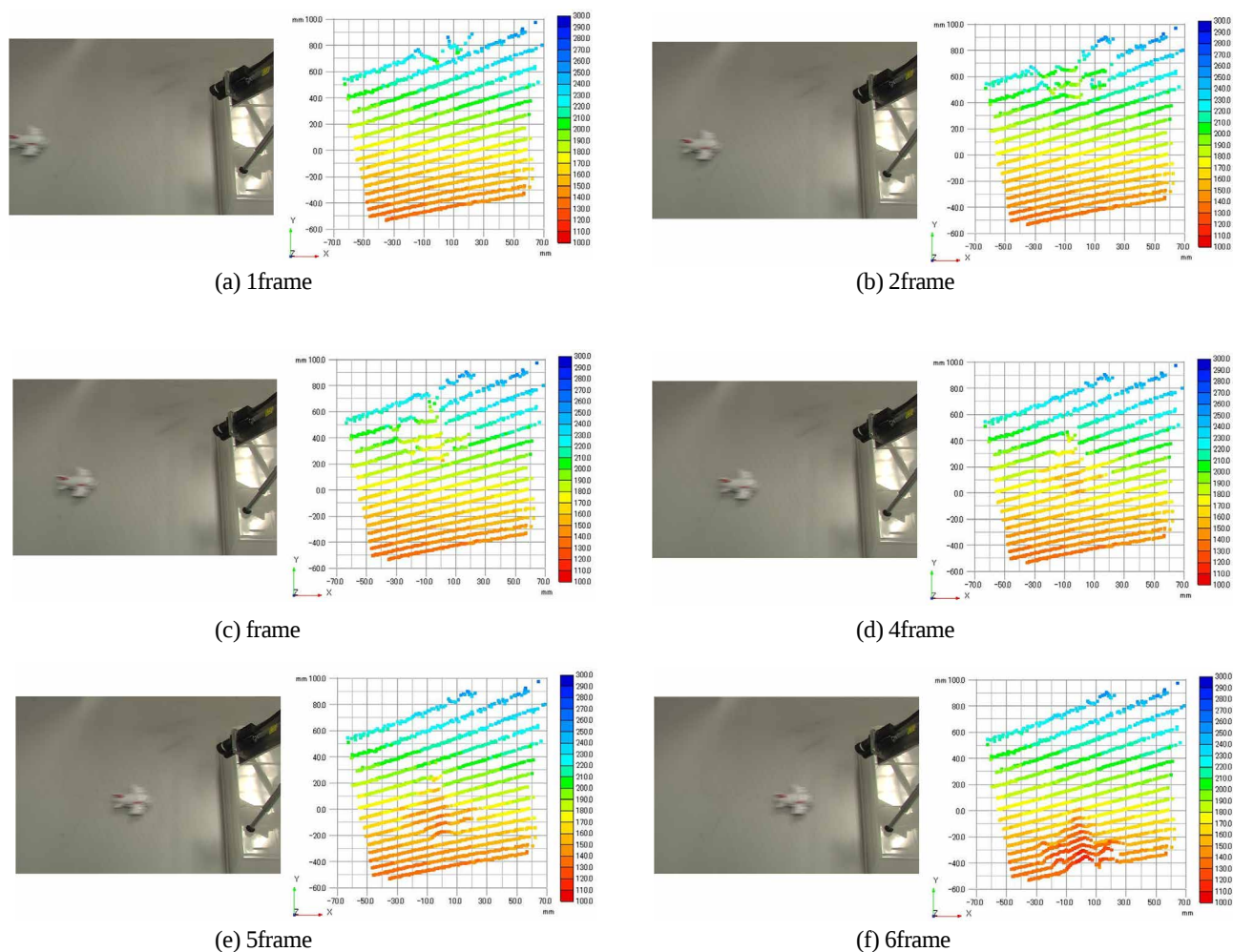


Fig.12 Experimental scenes and range images of a moving object

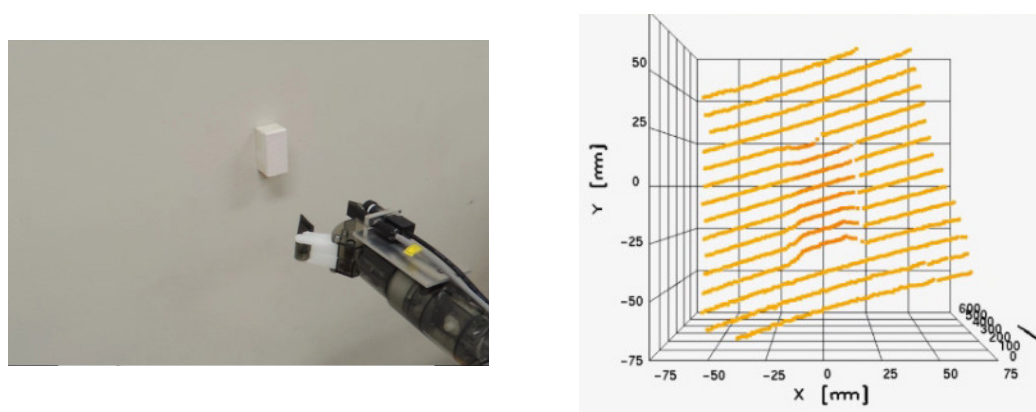


Fig.13 Constructed sensor attached to a robot hand

文 献

- (1) Oggier, T., Kaufmann, R., Lehmann, M., Metzler, P., Lang, G., Schweizer, M., Richter, M., Buttgen, B., Blanc, N., Griesbach, K., Uhlmann, B., Stegmann, K.H., and Ellmers, C., "3D-Imaging in Real-Time with Miniaturized Optical Range Camera", *Proceedings of the Opto-Conference* (2004), pp.89-94.
- (2) Gokturk, S.B., Yalcin, H., and Bamji, C., "A Time-of-flight Depth Sensor, System Description, Issues and Solutions", *Computer Vision and Pattern Recognition Workshop* (2004), p35.

- (3) Oggier, T., Lehmann, M., Kaufmann, R., Schweizer, M., Richter, M., Metzler, P., Lang, G., Lustenberger, F., and Blanc, N., “An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (Swiss Ranger)”, *Proceedings of the SPIE*, Vol.5249 (2004), pp.534-545.
 - (4) Point Grey Research, “Bumblebee-2”, Point Grey Research, <http://ww2.ptgrey.com/stereo-vision/bumblebee-2> (参照日 2013 年 5 月 7 日).
 - (5) Sato, K., Yokoyama, A., and Inokuchi, S., “Silicon range finder - a realtime range finding VLSI sensor”, *Proceedings of Custom Integrated Circuits Conference* (1994), pp.339-342.
 - (6) Kanade, T., Gruss, A., and Carley, L.R., “A VLSI sensor based rangefinding system”, *Robotics Research Fifth International Symposium* (1990), pp.49-56.
 - (7) 湯浅卓也, 怡士順一, 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ー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予稿集, 2B3-3.
 - (8) パルステック工業株式会社, “TDS-A 三次元スキャナ (3D スキャナ) シリーズ”, パルステック工業株式会社, http://www.pulstec.co.jp/pr/opt/pr_o02.html#01 (参照日 2013 年 3 月 19 日).
 - (9) 長谷川浩章, 明愛国, 石川正俊, 下条誠, “指先にネット状近接覚センサを装着したロボットハンド”, ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集 (2010), 2A2-C22.
 - (10) 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によるヒューマノイドの障害物回避”, 第 16 回ロボティクスシンポジア (2011), 1B1.
 - (11) Kuroki, T., Terabayashi, K., and Umeda, K., “Construction of a compact range image sensor using multi-slit laser projector and obstacle detection of a humanoid with the sensor”, *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2010), pp.5972-5977.
 - (12) 中澤和夫, 中島真人, 小林寛, “ファイバグレーティングを用いた 3 次元形状計測システムの開発”, 電子通信学会論文誌 D, Vol.J69-D, No.12 (1986), pp.1929-1935.
 - (13) 鈴木裕史, 寺林賢司, 梅田和昇, “GPU を用いたアクティブ・パッシブ統合距離画像計測の高速化”, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (2010), 3H1-1.
 - (14) 石山英俊, 寺林賢司, 内田裕己, 梅田和昇, “100Hz テクスチャ付き距離画像計測システムの構築と三次元マッピングへの応用”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.1 (2012), pp.62-71.
 - (15) 立石雅輝, 石山英俊, 梅田和昇, “マルチスポットレーザプロジェクトを用いた 200Hz 小型距離画像センサの構築”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.739 (2008), pp.499-505.
 - (16) 北陽電機株式会社, “スキャナ式レンジセンサ (測域センサ) URG-04LX”, 北陽電機株式会社 http://www.hokuyo-aut.co.jp/02sensor/07scanner/urg_04lx.html (参照日 2013 年 3 月 19 日).
 - (17) PMD Technologies, “Cam Board nano”, PMD Technologies, http://www.pmdtec.com/products_services/reference_design.php (参照日 2013 年 3 月 19 日).
-