

スリット像のぼけの計測と視差計測とを組み合わせた マルチスリットレーザプロジェクタを用いた 小型距離画像センサの構築

Development of Compact Range Image Sensor with Multi-Slit Laser Projector that Uses Disparity and Blur

馮 益 (中央大)
増山 岳人 (中央大)

○ 木村 優志 (中央大)
正 梅田 和昇 (中央大)

Yi FENG, Chuo University
Masashi KIMURA, Chuo University
Gakuto Masuyama, Chuo University
Kazunori UMEDA, Chuo University

In this paper, development of a compact and light weight range image sensor is presented. The sensor is designed for installing on a robot hand to help it sense the target or avoid the obstacle. The sensor we present can obtain 3D distance information at a range of 50mm – 300mm, which is simply made by a USB video device class camera and a multi-slit laser projector. The improvement over the previous sensor is a newly added method of the range measurement. The new sensor can measure the distance by using both disparity and blur. A method of Gaussian curve fitting to quantify the image blur is presented to obtain the range image at a distance closer than 100mm.

Key Words: Range image sensor, Multi-slit laser, Disparity measurement, Blur measurement

1. 緒言

ロボットハンドによって物体の把持などの操作を行うためには、対象物体の距離情報を正確に取得可能なセンサが不可欠である。ロボットハンドの手先にセンサを設置することでオクルージョンのない距離計測が可能となる。しかし、ハンドに設置するためには、対象物体の操作を妨げない小型かつ軽量のセンサが必要となる。更に、ロボットハンドにより近距離計測を行う場合が多いため、100mm以下の近距離計測が可能であることが望ましい。

市販されているセンサの一例として、パルスステック工業製の3次元スキャナ TDS-A[1]の計測距離は90-120mmである。我々も、CMOSカメラとマルチスリットレーザプロジェクタを組み合わせた小型距離画像センサを構築している[2][3]。本研究では、このセンサを改良し、2つの計測手法により計測範囲を広げ近距離計測が可能小型距離画像センサを構築することを目的とする。また、USB Video-device Class (UVC)カメラを使用することで様々なロボットハンドの装着への汎用性を向上する。

2. センサの構築

2.1 センサの概要

Fig. 1に構築した小型距離画像センサを示す。センサは左右に設置される小型のマルチスリットレーザプロジェクタとカメラから構成される。レーザプロジェクタは、従来研究[2][3]と同じく、波長690nmのスリット光15本を45°の角度で投影するMINI-715L (Coherent)を用いた。

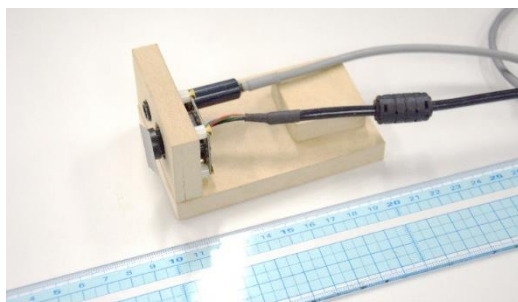


Fig. 1 Sensor structure

一方、カメラはセンサの柔軟性に配慮するため、PC側ドライバ不要なUVCクラスのUSBインタフェースカメラを使用する。本研究では、解像度が1280×720pixel、フレームレート30fpsのUVCZBS-002ボードタイプCMOSカメラを用いた。

外乱光による影響を考慮し、ローパスフィルタFUJIFILM SC-64をレンズ前に設置している。これにより640nm以下の波長の光を遮断する。

構築したセンサのサイズは縦28mm、横40mm、奥行53mm、重量50gとなっており、ロボットハンドへの搭載も十分に可能な仕様であると考えられる。

2.2 計測原理

計測の際は、レーザプロジェクタから投影されるスリット光の画像をカメラによって取得する。本研究では、計測対象との距離に応じて2つの計測手法を切り替えて用いる。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従来研究[2][3]の手法に加え、スリット光像のぼけを利用した距離計測手法を提案する。近距離の場合、スリット光のぼけの分布に表れる特徴から距離を算出する。

各スリット光に割り当てられる画素数を増加させるため、レーザプロジェクタをカメラに対して回転させている。

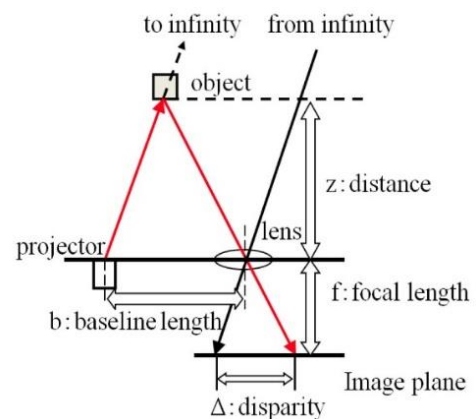


Fig. 2 Distance measurement by Triangulation

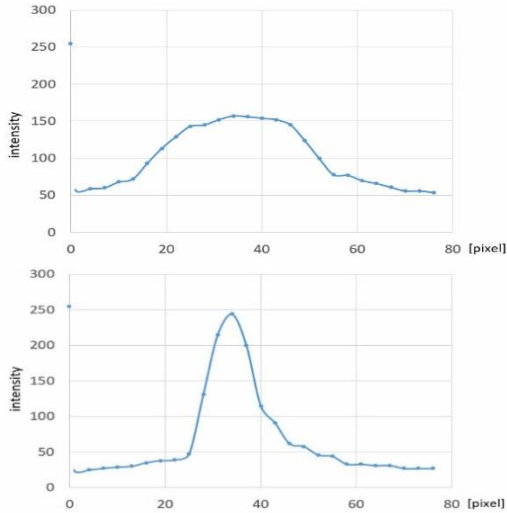


Fig. 3 Slit intensity at distance 60mm (up), and 120mm (down)

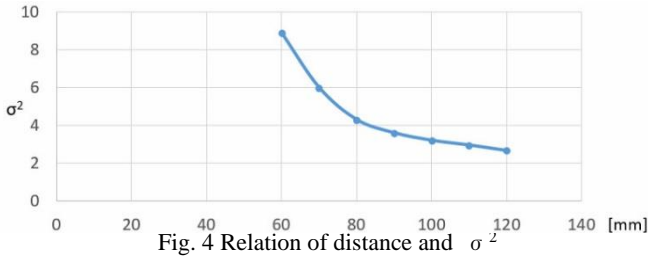


Fig. 4 Relation of distance and σ^2

Fig. 2 のように CMOS カメラ画像上に結像するマルチスリットの座標と無限遠における座標との視差を求め、三角測量の原理により距離を計算する。カメラの光軸方向の距離 Z は次式によって得られる。

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

b : 基線長[mm] f : 焦点距離[mm] p : 画素の幅[mm/pixel]
 $k - k_\infty$: 無限遠におけるスリット像の結像座標との視差[pixel]

一方、ぼけを利用した計測は、Fig. 3 に示すように距離に応じて生じるぼけの分布に対して、次式のガウス分布をフィッティングすることで行う。

$$f(x) = s \cdot \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

μ : 中央値[pixel] s : 比例定数 σ^2 : 分散[pixel²]

最小二乗法で式(2)の分散 σ^2 を求める。分散 σ^2 が小さいほどぼけが少なく、レンズのピントが合っている状態である。逆に、分散 σ^2 が大きいときは、ぼけが激しく発生して、ピントが合っていないと判断される。Fig. 4 に示すように距離によって生じる分散 σ^2 の変化を用いて距離を検出する。

2.3 計測手順

Fig. 5 に示すように、画像内において、各スリット光像に対する計測範囲は隣接スリットが観測されないよう 75 pixel とする。視差を用いた計測は各計測範囲の輝度重心の視差を取得し距離値を得る。計測対象の距離が 100mm 以下の場合、スリット光像にぼけが生じる。そのため、輝度重心を高精度に求めることが困難となるため、ぼけを用いた計測に切り替える。各探索範囲に最小二乗法で輝度値分布に対しガウス分布をフィッティングする。求めたガウス分布の分散値と、各距離で求めた分散値から予め作成したテーブルとを照合することで距離値を得る。

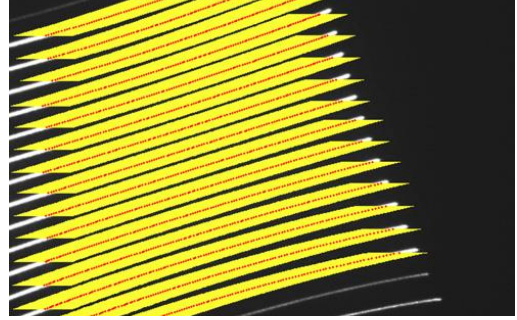


Fig. 5 Definition of the measurement area in the image

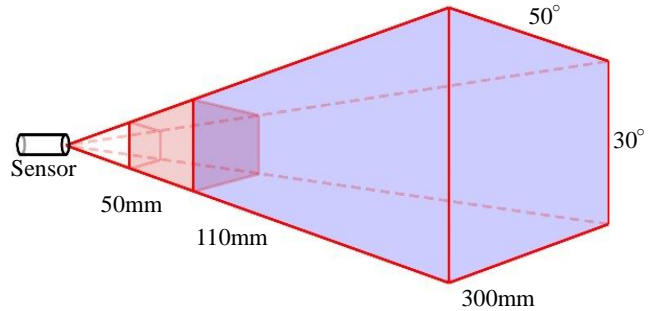


Fig. 6 Measurement range of the sensor

2.4 構築したセンサの仕様

Fig. 6 に示すように、構築したセンサの画角水平 50° 垂直 30° である。視差による計測距離は 100-300mm である。一方、レンズの合焦距離を 150mm に設定し、ぼけによる計測距離は 50-120mm となった。計測可能な範囲は、距離 50mm で 50×30mm²、距離 300mm で 250×150mm² となる。

視差を用いた計測の計測点数は約 2000 点である。リアルタイムでのフレームレートは約 30fps である。一方、ぼけを用いた計測の計測点数は約 1200 点で、現状ではオフラインで処理を行っている。

3. 計測実験

3.1 計測精度実験

構築したセンサの距離計測精度を検証する実験を行った。まず、視差を用いた計測手法について、構築したセンサを用いて、計測範囲の 100mm から 300mm の中で 50mm ずつ離して正対した白い平面の距離画像を取得する実験を行った。実験の様子を Fig. 7 に示す。全計測点の距離値の平均誤差及び標準偏差によって計測精度を評価した。実験結果を Table 1 に示す。



Fig. 7 Accuracy experiment using disparity

Table 1 Results of disparity measurement experiment

Real distance [mm]	100	150	200	250	300
Measurement error [mm]	-4.22	-0.72	3.58	7.12	13.72
Standard deviation [mm]	3.54	1.06	2.13	3.34	6.51

ぼけを用いた距離計測手法を用いた距離計測の精度評価を行うため実験を行った。計測距離を 50-120mm とし、20mm 間隔で計測を行った。計測対象を反射率の異なる平面とし、全計測点の距離値の平均誤差及び標準偏差によって計測精度を評価した。計測対象は白い平面（反射率 100%）、ライトグレー平面（反射率 75%）、ミドルグレー平面（反射率 35%）、ダークグレー平面（反射率 10%）とした。実験の様子を Fig. 8, 距離計測の精度評価結果を Table 2-5 に示す。

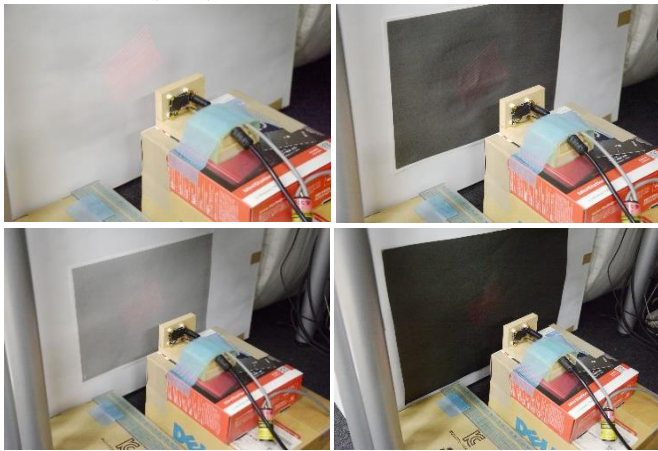


Fig. 8 Accuracy experiment using blur

Table 2 Results of blur measurement against white wall

Real distance [mm]	50	70	90	110	120
Measurement error [mm]	0.50	0.79	-0.51	-3.44	-3.8
Standard deviation [mm]	1.82	1.94	3.15	5.65	6.07

Table 3 Results of blur measurement against light gray wall

Real distance [mm]	50	70	90	110	120
Measurement error [mm]	0.61	0.41	-0.51	4.16	5.64
Standard deviation [mm]	1.88	2.01	3.13	5.78	6.87

Table 4 Results of blur measurement against middle gray wall

Real distance [mm]	50	70	90	110	120
Measurement error [mm]	1.32	2.64	2.81	6.44	8.08
Standard deviation [mm]	3.19	2.02	4.37	6.73	12.90

Table 5 Results of blur measurement against dark gray wall

Real distance [mm]	50	70	90	110	120
Measurement error [mm]	2.4	7.08	7.91	11.56	18.2
Standard deviation [mm]	7.57	8.16	10.87	14.75	22.07

3.2 物体計測実験

Fig. 9 に示すように、視差とぼけを用いた計測手法で静止物体の計測実験を構築したセンサで行った。壁に正対させて静止物体を計測した。計測結果を Fig. 10-12 に示す。計測対象は木の直方体（縦 50mm×横 25mm×奥行き 25mm）、ピンポン球（直径 40mm）、飛行機模型（縦約 55mm×横約 50mm）である。

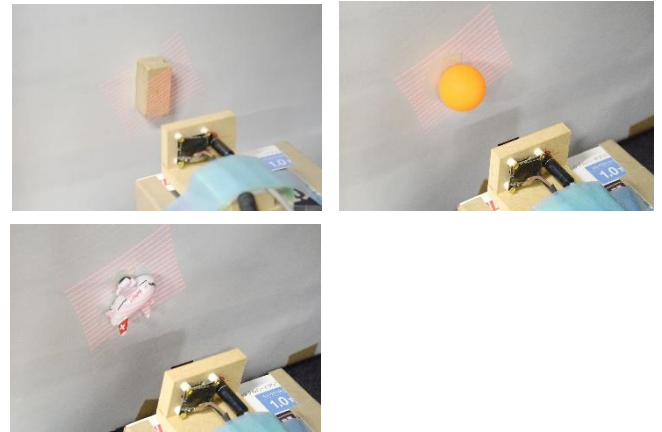


Fig. 9 Experimental scenes of object measurement using disparity and blur

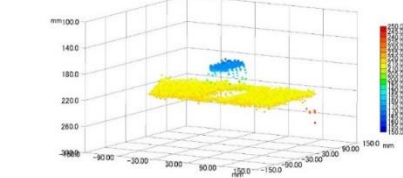
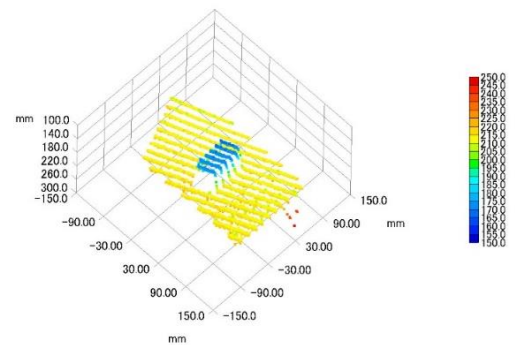


Fig. 10 Rang image of box using disparity

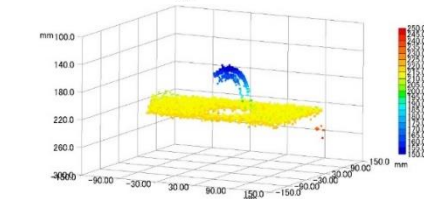
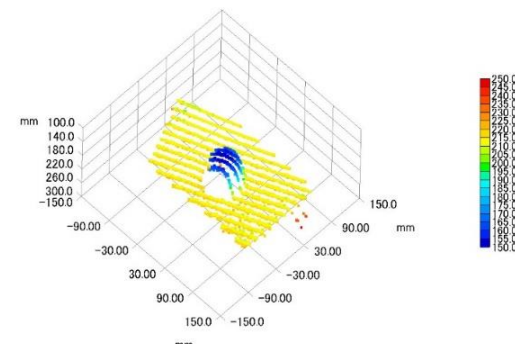


Fig. 11 Rang image of ball using disparity

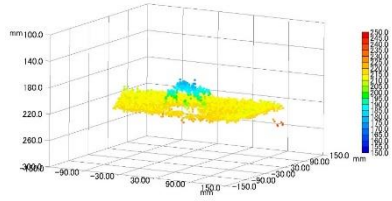
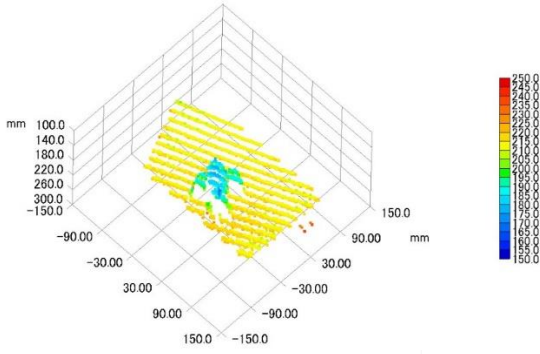


Fig. 12 Rang image of plane model using disparity

Fig. 10 より，視差を用いた計測では直方体までの距離を計測できていることが分かる．Fig. 11 より，小型の球体の形状を計測できていることが分かる．また，Fig. 12 より，複雑な形状の飛行機模型を計測できていることが分かる．

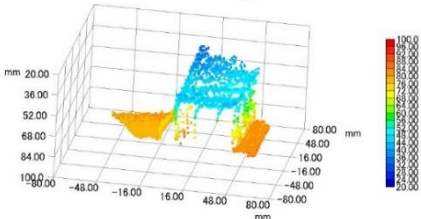
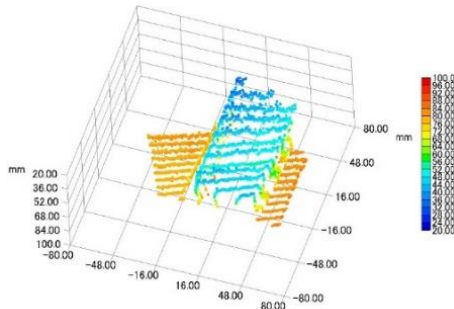


Fig. 13 Rang image of box using blur

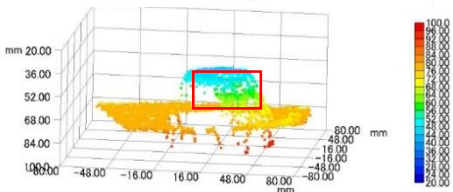
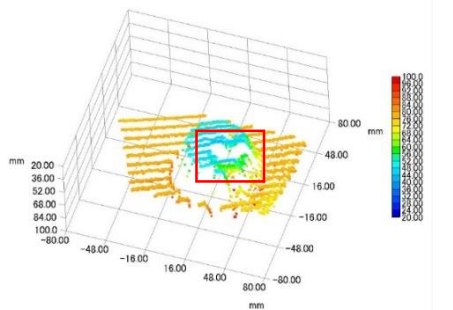


Fig. 14 Rang image of ball using blur

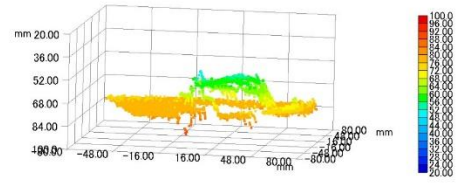
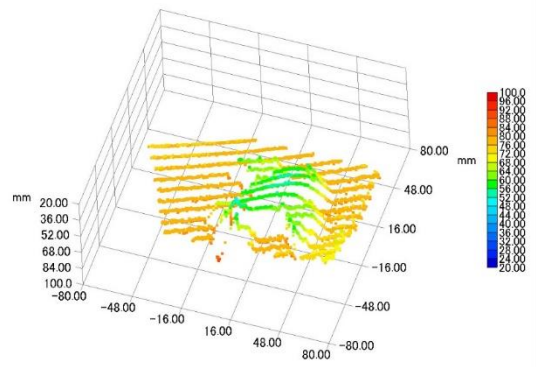


Fig. 15 Rang image of box using blur

Fig. 13 より，ぼけを用いた計測では直方体の形状が確認できる．しかし，平面が視差を用いた計測より粗いこともわかる．Fig. 14 より，ピンポン球の一部の距離計測ができていることが分かるが，枠で囲まれている部分が欠損していることが分かる．原因として，スペックルパターンが発生し，輝度分布がガウス分布に従っていないためと考えられる．Fig. 15 より，複雑な形状の飛行機模型を計測できていることが確認できる．

視差とぼけを用いた計測の物体計測実験の結果により，本研究で構築したセンサは近距離の小型対象物の距離画像を取得できることが分かる．

4. 結論

本研究では，小型のカメラとマルチスリットレーザプロジェクトを用いた超小型距離画像センサを構築し，センササイズの小型化を実現した．スリット光像のぼけを用いた距離計測手法を導入し，視差とぼけを利用した2つの計測手法を用いることで広い計測範囲を実現した．今後の展望としては，構築したセンサの精度検証が挙げられる．また，2つの計測手法の切り替えの自動化を検討する．

本研究は JSPS 科研費 26330205 の助成をうけたものである．

参考文献

- [1] パルステック工業のホームページ，
http://www.pulstec.co.jp/pr/opt/pr_o02.html
- [2] Yi Feng, Shinta Nozaki, Gakuto Masuyama, Kazunori Umeda, "Development of Miniature Range Image Sensor Using Multi-Slit Laser Projector and Endoscopy Camera", ICAM2015, 2015.12.
- [3] 馮 益, 野崎 慎太, 増山 岳人, 梅田 和昇, "マルチスリットレーザプロジェクトと内視鏡用カメラを組み合わせた超小型距離画像センサの構築", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 1A1-H07, 2015.5.