

# マルチスリットレーザとカメラによる視差と像のぼけを組み合わせた 近距離計測用小型距離画像センサ

## A Small Range-Image Sensor for Short Range Measurement via Combination of Disparity and Defocus with Multi-Slit Laser and Camera

精密工学専攻 10号 大橋嘉倫  
Karin Ohashi

### 1. 序論

近年、画像を利用した三次元計測は産業、民生を問わず広く用いられており、特にIoTやAIといった技術や概念の進歩によりその需要は一層増している。

特に最近では、身近なところにある様々な機器が高度な情報処理能力を有しており、IoT、インターネット接続はもちろんのこと、様々な環境計測機能を持っている。その中にはカメラ等の光学デバイスも含まれている。光学デバイスの中でも様々な距離計測が可能なセンサが開発されている。ステレオカメラやStructure From Motion(SfM)、レンズ焦点法等の時系列データを用いるタイプが広く知られている。

工場内において物体を把持するためにはロボットハンドを持つロボットが必要である。ロボットハンドで把持動作を行う際、把持対象までの距離と形状を計測する必要があるため、使用可能なセンサに限られる。一般には、ロボットハンドと物体計測用のセンサが離れた位置にある場合、ロボットハンド自身によって物体のカメラに対するオクルージョン(隠ぺい)が生じてしまう。ロボットハンドが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。オクルージョンを回避する方法として、ロボットハンドの手先に距離画像センサを装着し、計測対象に対して近距離計測を行うことが考えられる。これを実現するためには、小型かつ近距離計測可能な距離画像センサが必要である<sup>(1)</sup>。

これに対し、パターンを投影し、カメラで撮影、視差を計測して距離を推定するアクティブステレオ方式に基づく手法が多く研究されている<sup>(2)(3)</sup>。岩崎らは、マルチスリットレーザプロジェクトラを使用して超小型距離画像センサを構築した<sup>(1)</sup>。有効計測範囲は100mm~300mmで、これより近距離では、スリット像がぼけるため計測精度が著しく悪化すると報告されている。これに対し馮らは50mmから120mmの近距離においてぼけの大きさを用いた距離計測の手法を提案した<sup>(4)</sup>。福田ら<sup>(4)</sup>はマルチスリットレーザプロジェクトラを用いて視差による距離計測手法を構築し、さらに大橋ら<sup>(5)</sup>はぼけによる距離計測手法のリアルタイム化を行った。本研究ではこれら手法の組み合わせによる精度向上ならびに計測範囲の拡大を目指す。

### 2. センサの構成

本研究では、福田らが構築したセンサ<sup>(4)</sup>を用い、視差による計測と像のぼけによる計測を組み合わせることで距離計測精度の向上ならびに計測範囲の拡大を目指す。使用するセンサをFig.1に示す。先端にローパスフィルタを取り付けたカメラモジュールと、それに平行に取り付けられたレーザモジュール、スポットのレーザ光をマルチスリットに変換する回折光学素子から構成される。レーザモジュールにはEGISMOS H8565050D/Rを用いている。レーザ光の波長は650nm、出力は35mWである。回折光学素子にはHOLOEYE

DE-R213を用い、レーザ光はこの素子を通して、スリット間の角度が3°の11本のスリット光として投影される。カメラモジュールにはmiyoshi UC-01を分解し取り出したカラーカメラを使用している。画素数は640×480pixelである。ローパスフィルタにはFUJIFILM SC-64を用いており、波長640nm以下の光を遮断する。これらの部品を納める筐体は3Dプリンタを用いて作製している。カメラとプロジェクトラの基線長は7.5mmである。センサ全体の寸法は16×10×27mm、質量は6g(ケーブルを含まない)と小型軽量である。USBからの給電のみでレーザとカメラが動作する。

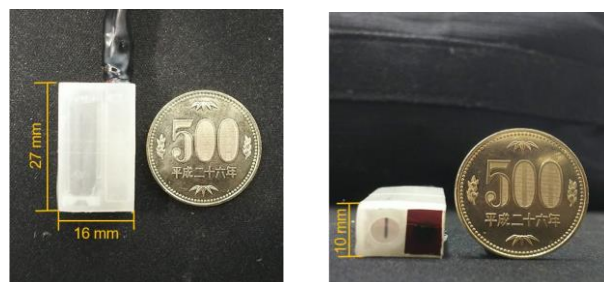


Fig.1 Constructed range image sensor<sup>(4)</sup>

### 3. 距離画像計測手法

本研究のセンサはFig.2に示すようにレーザプロジェクトラから投影されるスリットレーザ光の画像をカメラによって取得する。取得画像から視差、ぼけによる距離の算出を行う。

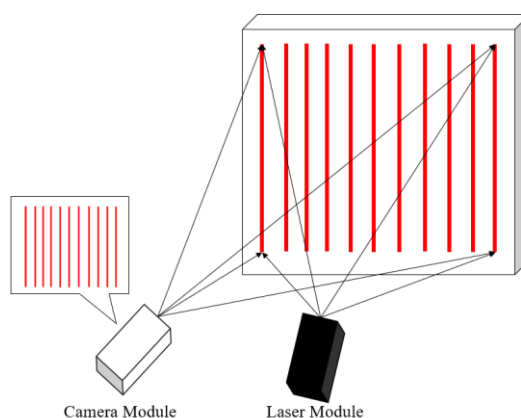


Fig.2 Model of sensor

#### 3.1 視差を用いた距離計測手法

まず、Fig.3に示すように視差を用いた距離計測である三角測量の原理について述べる。基線長を $b$ [mm]、レンズの焦点距離を $f$ [mm]、イメージセンサの画素の幅を $p$ [mm/pixel]、レーザ光の画像平面上での結像点を $u$ [pixel]、無限遠で反射したと仮定した場合に結像する位置を $u_{\infty}$ [pixel]と定義する。

ここで、三角測量の原理より対象までの距離  $z$ [mm]は次の式(1)で表される。

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

この処理を、センサのカメラにより取得した画像のすべての行に対して行う。計 11 本のレーザスリットを、左から順番に 1 番～11 番スリットと番号付けする。仮にレーザ光像が  $n$  番スリットだと仮定した場合、視差によって距離値  $Z_{dn}$ [mm] は次の式(2)に示す。

$$Z_{dn} = \frac{\alpha_{dn}}{x - x_{\infty}} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha_{dn}$ はキャリブレーションによって求まる係数、 $X_{n\infty}$ は対象を無限遠と仮定したときの  $n$  番スリットの結像位置 [pixel]を表す。4 番スリットのある点における距離とスリット像位置の関係を Fig.4 に示す。

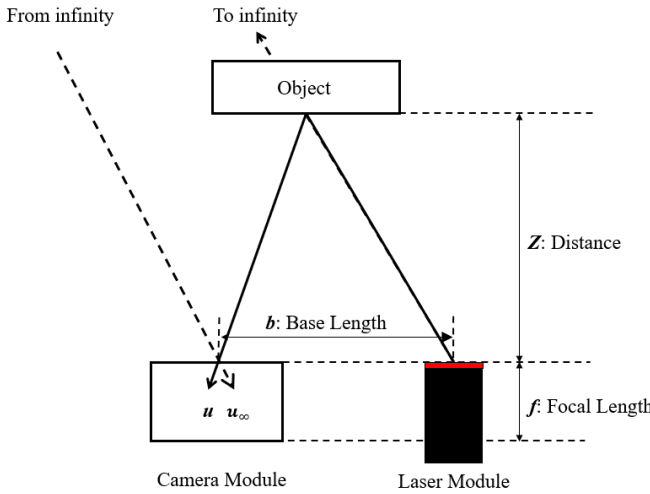


Fig.3 Model of triangulation.

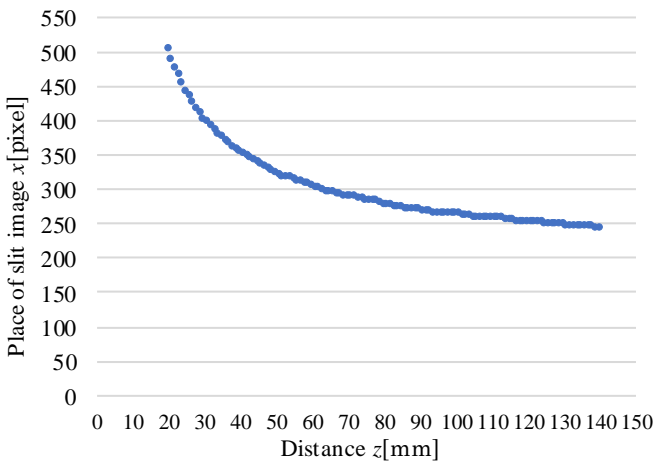
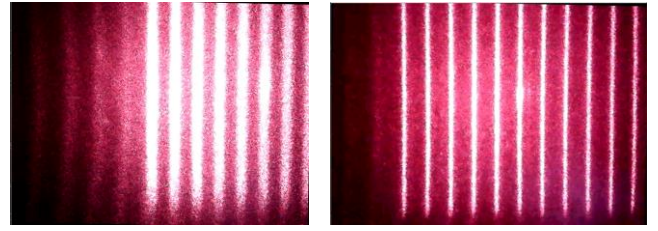


Fig.4 Relationship between distance and place of slit image

### 3.2 ぼけを用いた距離計測手法

カメラで取得した画像はレンズのフォーカスが固定であることにより、Fig.5 に示すようにセンサと物体までの距離が近づくほどぼけ、輝度値分布が広がる。Fig.5(b)におい

て、(0,240)から(640,240)の間の輝度値分布を Fig.6 に示す。この輝度値分布よりぼけによる距離計測を行う。福田らが構築したセンサ<sup>(4)</sup>の視差を用いた距離の計測範囲は 50 mm ~ 250 mm である。そこで、50 mm 以下の近距離で像のぼけを使用して距離計測レンジの拡大を目指す。



(a)50 mm (b) 100 mm

Fig.5 Captured image

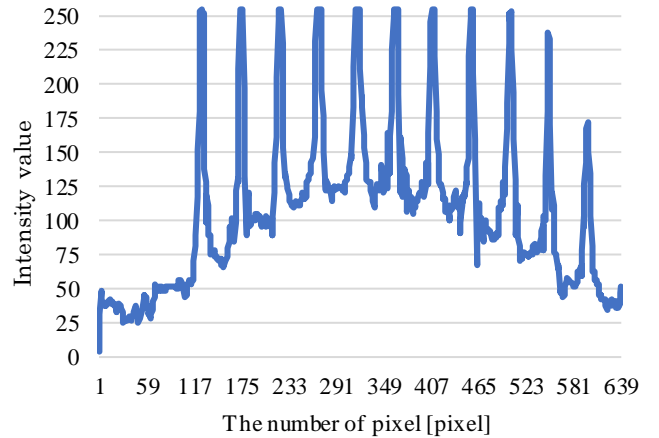


Fig.6 Intensity value of slit image

本研究における像のぼけはカメラで撮影された画像中のスリット像の輝度値の分布により定義され、ぼけ量  $\sigma$  として表される。各スリットの像を抽出し、輝度値  $y$  をガウス分布に近似すると、標準偏差を  $\sigma$ 、画像の座標を  $x$  として次の式(3)で表される。

$$y = k \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

ここで  $k$  は定数、 $\mu$  は  $x$  の平均すなわちスリットの中心を意味している。この式の両辺の自然対数を取ると、

$$\ln y = -\frac{1}{2\sigma^2}x^2 + \frac{\mu}{\sigma^2}x - \frac{\mu^2}{2\sigma^2} + \ln k \quad (4)$$

となる。式(4)より輝度値の対数値に 2 次曲線を線形最小二乗法によりあてはめることで画像の各点においてぼけ量  $\sigma$  の算出が可能である。距離とぼけ量  $\sigma$  の関係を Fig.7 に示す。このように近い距離ではぼけ量  $\sigma$  は大きく、距離が遠くなるにつれてある一定の値に収束していく傾向が見られる。本研究におけるぼけ計測ではこの特徴を利用することでぼけ量から距離値の推定を行う。また、大橋ら<sup>(5)</sup>は、距離とぼけの関係を 2 次関数で近似していたが、本研究では次式のように近似する。

$$\sigma = \frac{a}{X} + b \quad (5)$$

ここで、 $X$ は距離である。事前に距離とぼけに対するキャリブレーションにより係数 $a, b$ を求めておく。計測時には、得られたぼけから式(5)を用いて距離を算出する。

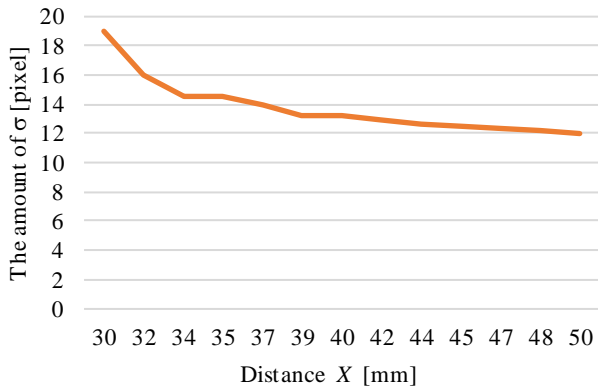


Fig.7 Relationship between distance and the amount of blur

#### 4. 視差とぼけを組み合わせた距離計測

Fig.1のセンサを用いて視差とぼけを組み合わせた距離計測手法を提案する。フローチャートをFig.8に示す。視差とぼけの切り替え手法のイメージをFig.9に示す。上からの様子をFig.9(a)に、撮影された画像を同図(b)に示す。同図(b)の左側は距離50mmより遠いため視差による距離計測が可能に、右側は距離50mmより近いためぼけによる距離計測が可能になる。また50mmより近距離において、Fig.7よりぼけ量 $\sigma$ の大きさが12 pixelを超えた場合にのみぼけによる手法に切り替えるものとする。この拘束条件により、視差の距離計測の誤計算による手法切り替えのエラーを軽減することができる。この手法により、近距離と遠距離どちらも距離計測が可能である距離計測手法を構築する。この手法により距離計測範囲の拡大、さらに距離計測精度の向上を実現する。

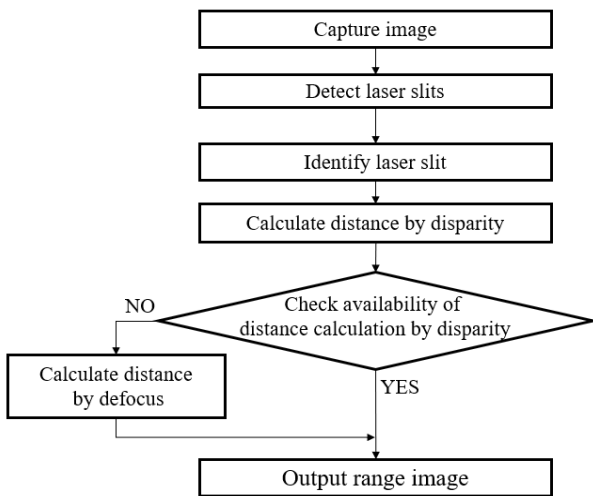
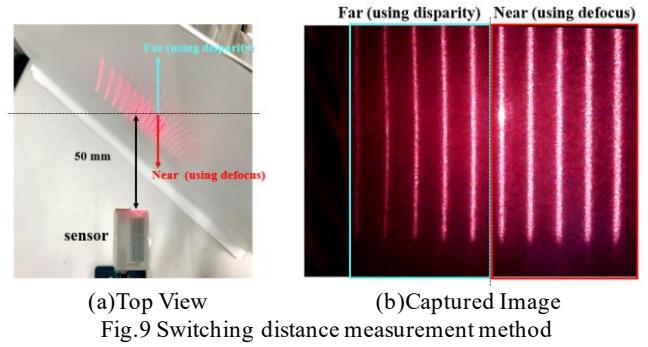


Fig.8 Flowchart of range image measurement



#### 5. 距離計測実験

本研究では、福田らが構築したセンサ<sup>(4)</sup>を平面の計測対象物の正面に設置し、距離計測実験を行った。距離計測範囲は距離30mmから50mmであり、5mmずつ離れた。視差の距離計測の実験結果をTable 1(a)に、視差とぼけを組み合わせた手法の結果を同表(b)に示す。さらに、距離の異なる平面計測において、横からの視点を見Fig.10(a)、前からの視点を見同図(b)、カメラによる取得画像を同図(c)に示す。あるシーンにおいて、視差とぼけ双方の距離計測の精度を確認するために、センサからの前面の距離をぼけ計測の範囲である40mm、後面の距離を視差による計測の範囲である60mmに設置した。距離の異なる平面計測の実験結果をFig.11に示す。Fig.11の(a), (b), (c)は、それぞれ視差のみ、ぼけのみ、視差とぼけ双方を用いて得られた計測結果をヒートマップに示している。また、Fig.12はFig.11(c)の距離計測結果である。近距離になればなるほど色が赤く表示しているため、黄色は近距離、緑色は遠距離を表している。Fig.12より、前面と後面それぞれの箇所は適切な計測をすることができている。しかし、Fig.11(a)において、画像右側の前面は本来ぼけ計測であるにも関わらず、手法の切り替えエラーにより上端と下端において視差による計測が行われている。これはFig.7より、ぼけ量 $\sigma$ のわずかな違いにより距離計測結果がかなり異なる結果になってしまったと思われる。さらに、センサの構造上、前面の影が後面に掛かってしまったため、中央部分にオクルージョンが生じてしまっている。

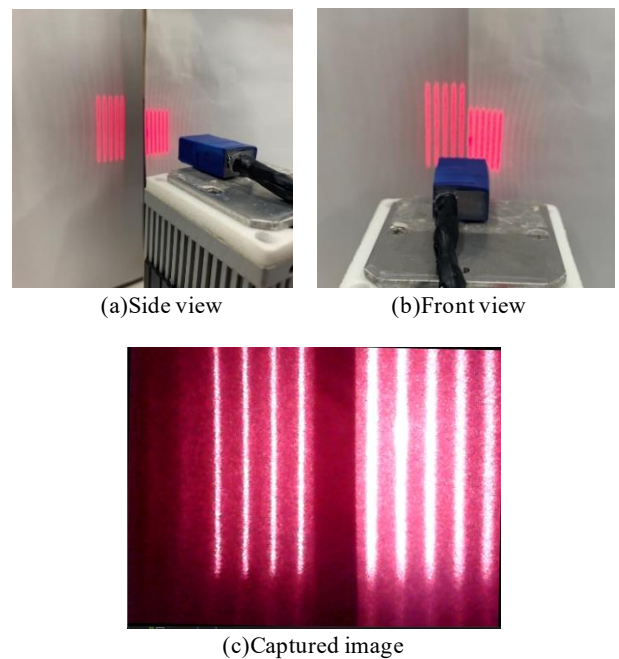


Fig.10 Distance measurement environment

Table 1 Results of distance measurement experiments (unit: mm)

(a)Disparity		
Distance	Average (about 5,200 points)	Standard deviation
30.0	60.1	15.4
35.0	61.3	7.9
40.0	72.1	3.3
45.0	54.5	7.6
50.0	58.9	6.7

(b)Disparity and defocus		
Distance	Average (about 5,200 points)	Standard deviation
30.0	23.7	3.9
35.0	32.6	4.6
40.0	37.2	8.9
45.0	45.3	5.7
50.0	55.7	7.5

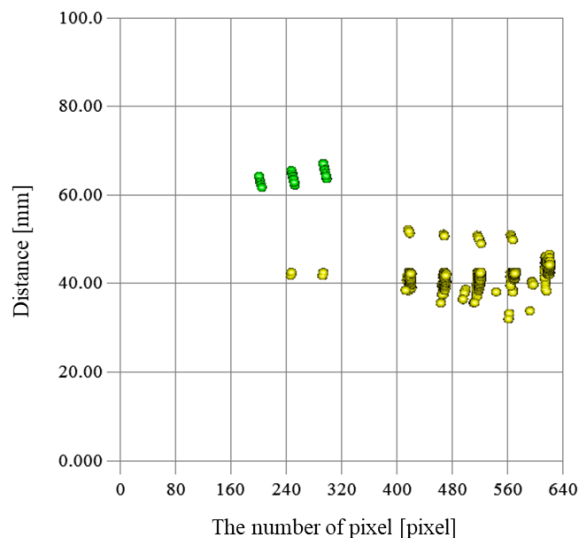
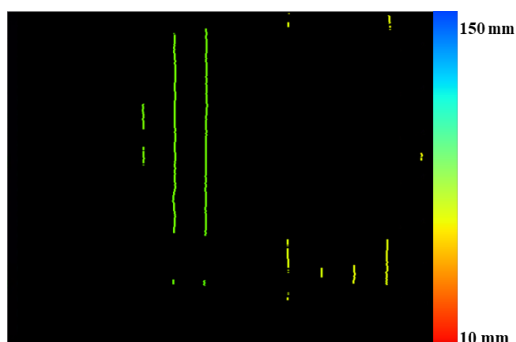
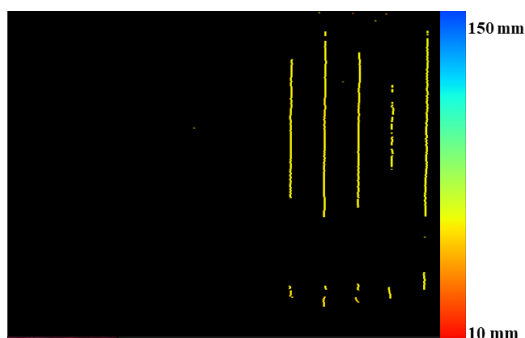


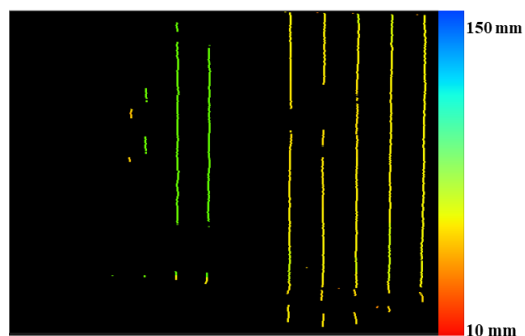
Fig.12 Result of distance measurement experiment



(a)Disparity



(b)Defocus



(c) Disparity and Defocus

Fig.11 Distance measurement experiment

## 6. 結論

マルチスリットレーザとカメラによる視差と像のぼけを組み合わせることで近距離計測用小型距離画像センサの計測範囲の最短距離が 50 mm から 30 mm に拡大できた。しかし、視差とぼけの切り替えがうまく行かない場合もあった。今後は、視差とぼけの計測の切り替え手法ならびにセンサ筐体の構造の改善を目標とする。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19H04191 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- (1) 岩崎 一也, 寺林 賢司, 梅田 和昇, “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”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.803, pp.2451-2459, 2013.
- (2) 古川 亮, 川崎 洋, 佐川 立昌, 佐野村 洋次, 田中 信治, 吉田 成人, “DOE パターン投光器を用いた動的ステレオ 3 次元内視鏡”, 第 22 回画像センシングシンポジウム (SSII2016), IS2-22, 2016.6.
- (3) 馮 益, 木村 優志, 増山 岳人, 梅田 和昇, “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”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集, 1A2-19a7, 2016.6.
- (4) 福田 智章, 池 勇勳, 梅田 和昇, “マルチスリットレーザを用いた近距離計測用超小型距離画像センサの構築”, 第 24 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 5B2, pp.272-274, 2019.3.
- (5) 大橋 嘉倫, 池 勇勳, 梅田 和昇, “マルチスリットレーザと小型カメラによる像のぼけを利用した小型距離画像センサのオンライン計測”, 2020 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, D03, 2020.9.