

# マルチスリット光を用いた距離画像センサのぼけを利用した 対応点問題回避による計測範囲拡大

## Measurement range expansion of range image sensor with multi-slit lights by avoiding the corresponding point problem using blur

精密工学専攻 43号 藤井奈穂

Naho Fujii

### 1. 序論

近年、人間の生活空間における自律移動ロボットの運用が期待されている。自律移動ロボットが効率的に活動するためには周囲の環境把握が必要であり、そこで用いられるセンサの一つとして距離画像センサがある。距離画像センサの中でも、アクティブステレオ法は、テクスチャの無い環境でも計測でき、実用性が高いため、多くの研究が行われている<sup>(1)</sup>。

これまでに、マルチスリットレーザを用いた距離画像センサによるヒューマノイドロボットの障害物回避<sup>(2)</sup>や距離画像へのテクスチャマッピング<sup>(3)</sup>が行われてきた。しかし、マルチスリットレーザを使用することにより、画像中のスリットがどのスリットかを判別しなければならないという対応点問題が発生する。この問題を回避するために、計測範囲を限定しなければならなかった。そこで、従来研究<sup>(2)(3)</sup>ではカメラを回転させることにより対応点問題を緩和していた<sup>(4)</sup>。また、対応点問題の緩和のために、ぼけを利用してスリット判別を行った<sup>(5)</sup>。しかし、従来研究と比較して計測範囲をわずかに拡大するに留まった。

本論文では、ぼけによる像の変化を利用し、スリット幅と視差の関係を用いて対応点問題を回避することで、さらなる計測範囲の拡大をすることを目的とする。また、提案手法におけるセンサの精度と有用性について検討を行う。

### 2. センサの構成

本研究で用いる距離画像センサの外観を Fig. 1 に示す。本センサは、レンズの先端にローパスフィルタを取り付けたモノクロ CCD カメラと、マルチスリット光を投影するレーザプロジェクトラから構成される。使用したカメラは Point Grey

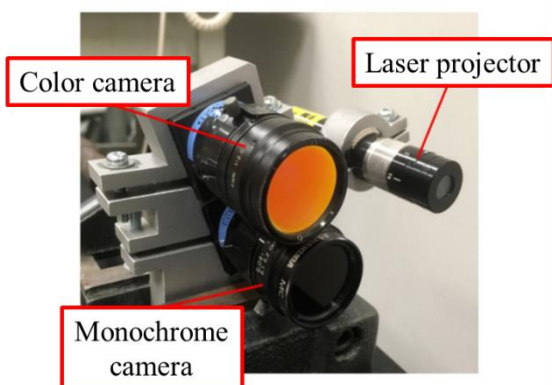


Fig. 1 Sensor appearance

Research Blackfly S であり、画素数は  $1280 \times 1024$  pixel である。また、ローパスフィルタには Kenko R64 を用いており、波長  $640$  nm 以下の光を遮断することで、外乱光の影響を低減させている。レーザプロジェクトラには COHERENT MINI-715L-690-35 を用いている。波長は  $690$  nm, 出力  $35$  mW で、 $15$  本のスリット光を投影し、スリット間の角度は  $2.3^\circ$  である。

### 3. 基本となる距離計測手法

#### 3.1 距離計測原理

本センサは、モノクロカメラ画像上に結像されたスリット像の位置と無限遠を仮定したときのスリット像の位置との視差を求め、三角測量の原理により距離を計算する。Fig. 2 に三角測量の原理の図を示す。基線長を  $b$  [mm], レンズの焦点距離を  $f$  [mm], 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], 無限遠から反射した場合に結像する位置を  $u_\infty$  [pixel], 横座標を  $u$ , 縦座標を  $v$  と定義すると、対象までの距離値  $Z$  [mm] は次式のように表せる。

$$Z = \frac{b \cdot f}{p \cdot (u - u_\infty)} \equiv \frac{a}{u - u_\infty} \quad (1)$$

ここで、 $a$ ,  $u_\infty$  は、各計測点において、既知の距離から最小二乗法によりあらかじめ求めておく。式(1)において、距離計測にはスリット像の結像位置が必要である。従来手法では、結像位置を求めるには、計測範囲内において最小視差と最大視差の中間で結像する位置を基準位置とし、基準位置から左右各一定画素数の探索範囲内で輝度値がしきい値以上の画素を用いて算出していた。この探索範囲は、誤判別を起さ

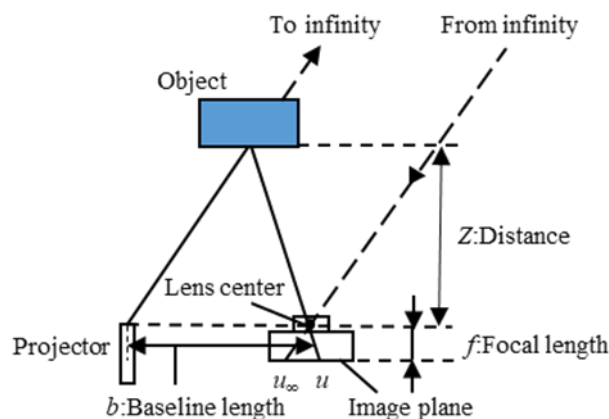


Fig. 2 Triangulation model

ないようにするため、隣り合うスリットと重ならないように設定していた。この対応点問題については3.2節にて説明する。しきい値以上の輝度値を  $D_i$ , その  $u$  座標を  $u_i$  と定義すると、結像位置  $u_g$  は次式のように表せる。

$$u_g = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i \cdot D_i)}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (2)$$

式(2)から求めた  $u_g$  を式(1)の  $u$  に代入し、 $Z$  を求める。画像座標  $(u, v)$ , 画素間隔  $\delta_u, \delta_v$ , 画像中心  $c_u, c_v$ , 3次元座標  $(X, Y, Z)$  とすると次式のように表せる。

$$X = (u - c_u) \frac{\delta_u}{f} Z \quad (3)$$

$$Y = (v - c_v) \frac{\delta_v}{f} Z \quad (4)$$

ここで、 $\delta_u/f, \delta_v/f, c_u, c_v$  は、Zhang の手法<sup>(6)</sup>によりあらかじめ求めておく。

### 3.2 対応点問題

本研究では、カメラを回転させることにより対応点問題を緩和し、計測範囲を拡大している。Fig. 3にカメラを回転しない場合とした場合の探索範囲を示す。カメラの回転角が  $\theta$  の場合、探索範囲は  $1/\cos\theta$  倍に増加する。また、福田ら<sup>(7)</sup>は、視差を利用した距離計測と輝度値を利用した距離計測を組み合わせることにより、スリット判別を行い、対応点問題を回避した。また、藤井ら<sup>(8)</sup>は、視差を利用した距離計測とぼけによるスリットの幅の変化を用いてスリット判別を行い、対応点問題を回避した。

## 4. 計測範囲拡大手法

### 4.1 手法の概要

計測範囲を拡大するには、視差探索範囲を拡大し、探索範囲内に複数のスリットが存在する場合、スリットの内、正しいスリットを判別する必要がある。本研究では、ぼけを利用してスリット判別を行う。Fig. 4に距離と像の関係を示す。Fig. 4に示すように、物体が合焦距離上に存在する場合、像は最も小さくなり、物体が合焦距離より近くまたは遠くに存在する場合、像は大きくなる<sup>(6)</sup>。本研究では、物体までの距離が近いほど像が大きくなるように合焦距離を設定した。提案手法における計測の流れをFig. 5に示す。カメラから画像を取得し、すべての計測点に対してFig. 5の処理を行う。以下の節にて、計測の流れについて述べる。

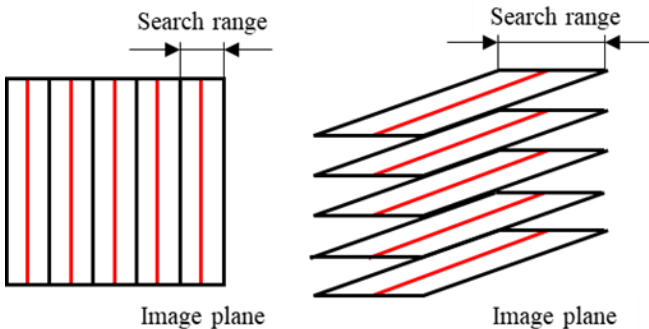


Fig. 3 Search range (left: without rotation, right: with rotation)

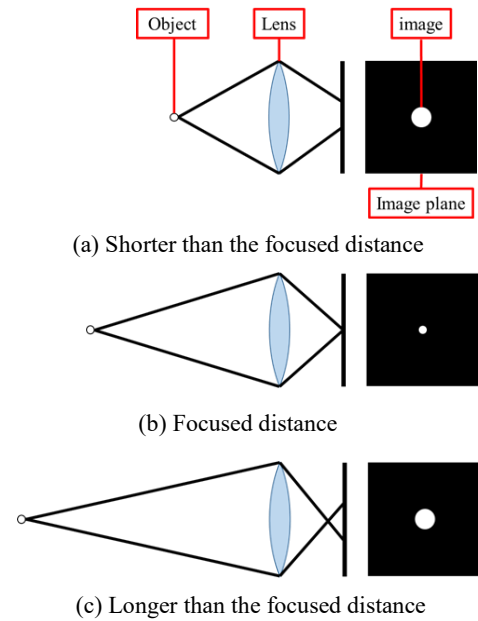


Fig. 4 Relationship between distance and focusing.

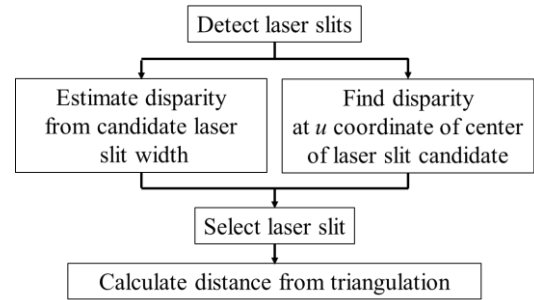


Fig. 5 Flow of distance measurement

### 4.2 スリット検出

本研究では、異なる露出時間で画像を2枚取得する。これにより、拡大した計測範囲においてもスリット検出が可能となる。まず、短い露出時間で取得した画像を用いて、探索範囲内で輝度値がしきい値以上の画素が連続した場合、スリットとして検出する。探索範囲は本センサの最小計測距離である200 mmでの結像位置から無限遠での結像位置までとする。この場合、探索範囲内にスリット候補は1~4本存在する。連続する画素の個数は、あらかじめ各計測点において最小、最大個数を求めておき、その範囲に当てはまる場合のみスリットとして検出する。スリットを検出できなかった場合、長い露出時間で取得した画像を用いて探索範囲内で輝度値がしきい値以上の画素が連続した場合、スリットとして検出する。異なる露出時間で取得した画像を用いることにより、近距離、遠距離共にスリットを検出しやすくなる。Fig. 6,7に白色の壁面を対象とした近距離(200 mm), 遠距離(2000 mm)における異なる露出時間(1 ms, 10 ms)での取得画像を示す。短い露出時間では近距離におけるスリット検出が可能となり、長い露出時間では遠距離におけるスリット検出が可能となる。どちらの画像からもスリット検出できなかった場合、物体が存在しない場合や反射率が極端に小さい物体の場合であると、結像点はなしとする。

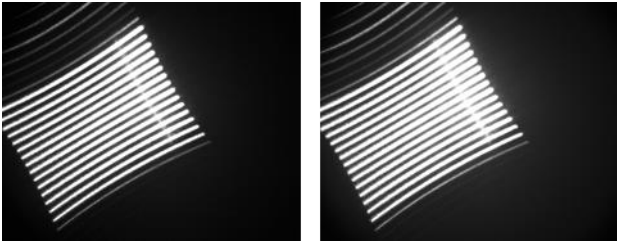


Fig. 6 Acquired image at short distance (200 mm) (left: exposure time 1 ms, right: exposure time 10 ms)

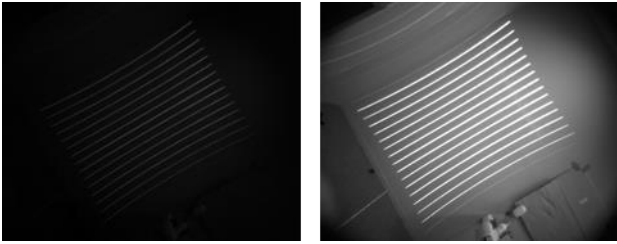


Fig. 7 Acquired image at long distance (2000 mm) (left: exposure time 1 ms, right: exposure time 10 ms)

#### 4.3 スリット候補の幅から視差を推定

画像上のスリットの幅（連続するしきい値以上の画素の個数）と視差には Fig. 8 のような関係がある。視差を  $\Delta$ 、スリットの幅を  $w$  と定義し、1 次近似すると次式のように表せる。

$$w = a\Delta + b \quad (5)$$

ここで、 $a$ 、 $b$  は各計測点において、既知のスリットの幅と視差から最小二乗法によりあらかじめ求めておく。この関係を利用して、スリットの幅から視差を推定する。

#### 4.4 スリット候補の中心の $u$ 座標における視差

複数のスリット候補の中心における  $u$  座標を式(2)の重心位置計算を用いて求める。求めた点における無限遠から反射した場合に結像する位置を  $u_\infty$  とすると、視差  $\Delta$  は次式のように表せる。

$$\Delta = u - u_\infty \quad (6)$$

#### 4.5 スリットの選択

4.3 節と 4.4 節から求めたそれぞれの視差の差が最も小さくなるスリットを正しいスリットとして選択する。選択したスリットの中心から左右 15 pixel 内において輝度値がしきい値以上の画素を用いて、式(2)の重心位置計算を行う。

#### 4.6 三角測量による距離算出

4.5 節で求めたスリットの重心位置を用いて、従来手法と同様に三角測量により距離を算出する。式(1)より  $Z$  を求める。求めた  $Z$  を用いて式(3),(4)より  $X, Y$  を求める。

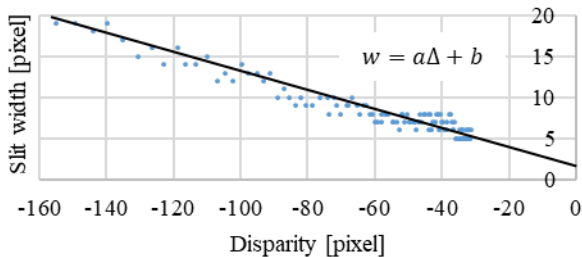


Fig. 8 Relationship between disparity and slit width

## 5. 計測実験

### 5.1 計測範囲拡大評価実験

本手法の計測可能範囲を確かめるために、計測範囲拡大評価実験を行った。計測対象には白色の壁面を使用した。対象までの距離を 200 mm から 2000 mm まで 100 mm 間隔で変化させて計測を行った。距離値を取得する点は、画像の周辺部にあたる上から 1 番目のスリットの  $v$  座標 120 pixel の点 (Point 1) と画像の中央部にあたる上から 8 番目スリットの  $v$  座標 500 pixel の点 (Point 2) の 2 点とした。それぞれの距離で 10 回計測を行った。各距離における平均誤差と標準偏差を Table 1 に示す。平均誤差に着目すると、1000 mm 以降大きくなっているが、正しくスリットを判別できていることがわかる。提案手法により、従来研究<sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup>における手法では 360~800 mm であった計測範囲を 200~2000 mm に拡大できた。また、遠距離になるほど標準偏差が大きくなっているが、本センサのように三角測量の原理を用いた手法では、計測される距離の不確かさが距離の 2 乗に比例して大きくなるためと考えられる。また、本実験では、手でセンサの距離を変化させたため、測定誤差の影響も考えられる。

### 5.2 距離値の異なる物体の計測実験

本手法の有用性を確かめるために、距離値の異なる物体の計測実験を行った。計測対象には、200 mm の位置に木製の板を置き、2000 mm の位置に白色の壁面を使用し、計測を行った。Fig. 9 に実験環境、Fig. 10 に距離画像を示す。

Fig. 10 より、計測できている点においては、ほとんどの点において正確な計測ができていることがわかる。

Table 1 Measurement results (unit : mm)

True value	Point 1		Point 2	
	Mean error	Standard deviation	Mean error	Standard deviation
200	6.4	2.5	4.7	2.1
300	4.7	2.7	1.3	2.2
400	4.5	3.6	0.8	1.8
500	5.4	1.0	1.6	3.4
600	0.2	2.6	-2.5	3.3
700	-4.7	3.9	-6.0	4.9
800	-5.3	5.2	-2.7	3.5
900	-1.8	8.7	-8.4	5.1
1000	-29.2	10.5	-10.6	13.8
1100	-32.5	11.2	-19.0	9.6
1200	-31.5	16.0	-7.3	12.1
1300	-25.2	20.9	-1.7	17.3
1400	-15.0	19.4	6.3	18.3
1500	10.4	15.1	18.4	28.3
1600	14.2	22.2	27.5	24.2
1700	27.4	32.9	15.4	30.5
1800	15.6	17.1	7.5	25.3
1900	-0.7	31.0	10.1	18.5
2000	25.9	35.6	13.8	35.9



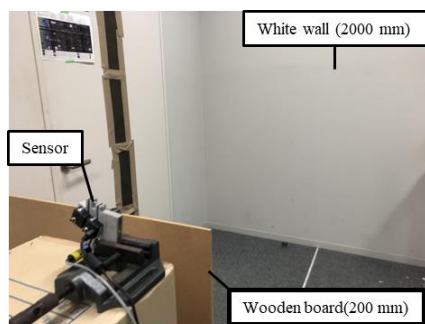


Fig. 9 Experimental environment

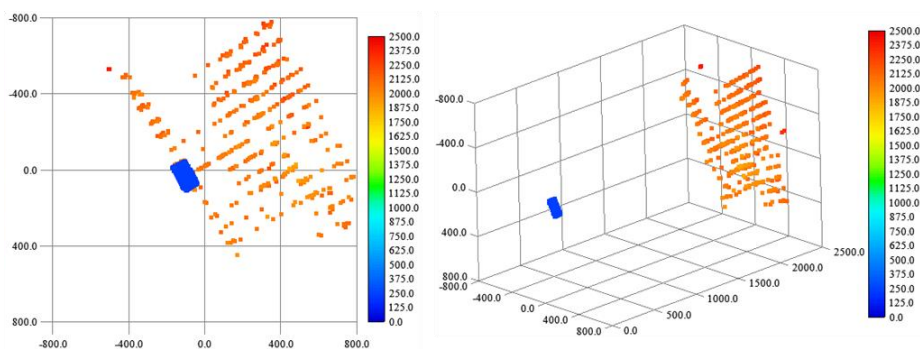


Fig. 10 Range image (left: front view, right: side view)

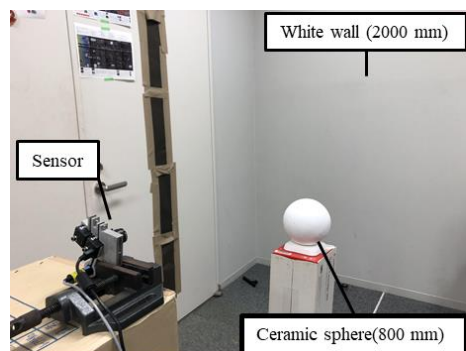


Fig. 11 Experimental environment

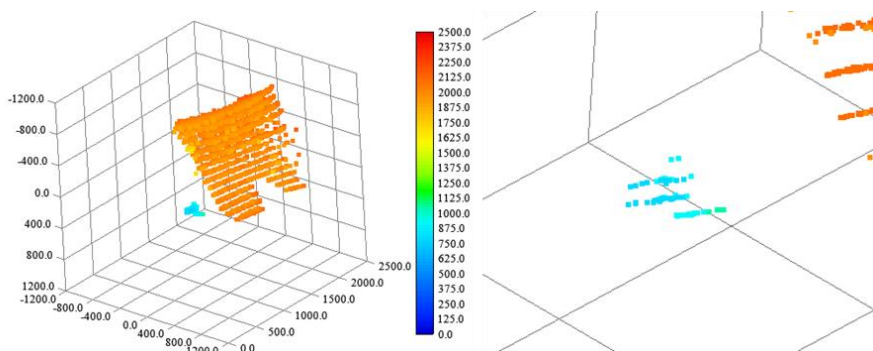


Fig. 12 Range image (left: side view, right: magnified side view)

### 5.3 曲面物体の計測実験

本手法の有用性を確かめるために、曲面物体の計測実験を行った。計測対象には、800 mm の位置にセラミック製の球体、2000 mm の位置に白色の壁面を用いて計測を行った。Fig. 11 に実験環境、Fig. 12 に距離画像を示す。

Fig. 12 より、おおむね正確に対象の形状を計測できており、平面だけでなく、曲面に対しても計測ができていることがわかる。

本実験では比較的反射率の高い物体を計測し、距離値を得ることができた。しかし、反射率の低い物体を計測した際は、スリットを検出できず、距離値を得ることができなかった。

## 6. 結言

本論文では、マルチスリットレーザプロジェクタを用いた距離画像センサにおいて、ぼけによる像の変化を利用し、スリット幅と視差の関係を用いて対応点問題を回避し、センサの計測範囲の拡大を行った。計測実験により、距離画像センサの計測可能範囲と精度、有用性を示した。

今後の展望として、異なる露出時間の画像から物体の反射率を判断し、反射率を考慮した距離計測手法の構築を目指す。

## 参考文献

(1) Furukawa, R., Morinaga, H., Sanomura, Y., Tanaka, S., Yoshida, S. and Kawasaki, H., Shape acquisition and registration for 3D endoscope based on grid pattern

projection, Proc. of 14th ECCV, pp. 399-415, 2016.

(2) 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の計測精度評価およびヒューマノイドへの応用, 第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3I2-4, 2010.

(3) 板垣 文瀬, 木村 優志, 増山 岳人, 梅田 和昇, マルチスリット光を用いたカラーテクスチャ取得可能な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, 1A2-19a6.

(4) Umeda, K., A Compact Range Image Sensor Suitable for Robots, Proc. of 2004 Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 3167-3172, 2004.

(5) 藤井 奈穂, 池 勇勳, 梅田 和昇, マルチスリットレーザプロジェクタを用いた距離画像センサの計測範囲拡大, 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, C63, pp.96-97, 2019.

(6) Zhang, Z., A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Trans. on pattern Analysis and Machine intelligence, vol.22, no.11, pp. 1330-1334, 2000.

(7) 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.

(8) Xiong, Y. and Shafer, S. A., Depth from focusing and defocusing, Proc. of 1993 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 68-73, 1993.