

## マルチスリット光の視差とぼけを用いたリアルタイム距離画像センサのキャリブレーション

高津脩史† Sarthak Pathak‡ 梅田和昇‡

†中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻

‡中央大学理工学部精密機械工学科

E-mail: a21.h5gc@g.chuo-u.ac.jp

### 1 序論

近年、自律移動ロボットや、工場で仕分けやピッキングなどの作業を行うロボットが導入される事例が増えている。これらのロボットにおいて、対象物の認識のために距離画像センサが用いられることも多い。距離画像センサは、高精度かつ高速な計測を行うことができ、かつ安価で小型であることが望ましい。これらのセンサとしてステレオ視を行うものが挙げられる。ステレオ視は複数のカメラによる視差を利用するパッシブステレオと、カメラと光源を利用するアクティブステレオに分けられる。

パッシブステレオの研究として距離計測や道路障害物検出に関する研究[1,2]が行われてきたが、これらの手法はカメラ間の対応点に基づく計測であるため、テクスチャレスな環境の計測に向かない。

これに対し、アクティブステレオはテクスチャレスな環境においても計測しやすい。これまで、アクティブステレオの研究として光源にスポット光を用いた研究[3]、スリット光を用いた研究[4]、パターン光を用いた研究[5]が行われてきたが、これらの手法では1枚の画像から得られる点群が少なく、高密度なリアルタイムが困難である。そこで、本研究ではアクティブステレオの光源として、多くの点群を取得でき、高密度な計測を行えるマルチスリットレーザを用いる。

これまでに、マルチスリットレーザを用いたアクティブステレオ法による距離画像センサの研究[6]が行われてきた。この手法では、画像中に複数あるスリットがどのスリットかを判別する必要がある。これはステレオ視における対応点問題の一つといえる。藤井ら[7]は、対応点問題を緩和するために、視差推定にぼけを用いてスリット判別を行った。しかしながら、計測精度が十分でない課題があった。本論文では、正確なキャリブレーション手法を構築することで、より高精度な距離計測を実現することを目的とする。

### 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。レーザプロジェクタとモノクロ CCD カメラ 2 台を組み合わせてセンサを構築している。上側のカメラはキャリブレーション時にのみ使用し、アクティブステレオ計測には使用しない。カメラの画素数はともに  $1280 \times 1024$  pixel である。また、ローパスフィルタをレンズに装着し、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。レーザプロジェクタの波長は 690 nm、出力は 35 mW である。Fig. 2 にレーザプロジェクタから照射されたスリット光を下側のカメラで撮影した画像を示す。



Fig.1 Appearance of sensor

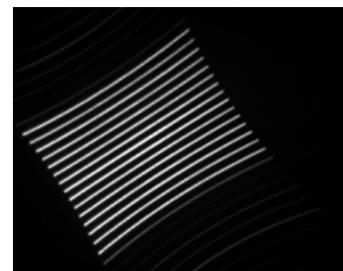


Fig.2 Acquired image

### 3 基本となる計測手法

#### 3.1 三角測量の原理

本センサは、三角測量の原理を用いてカメラの光学中心からスリットが照射された位置までの距離値を得る。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の横座標を  $u$  pixel, 無限遠から反射したと仮定した場合に結像する位置を  $u_\infty$  pixel とすると, 対象までの距離値  $Z$  mm は次式のように表せる.

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

$$\alpha = \frac{b \cdot f}{p} \quad (2)$$

### 3.2 キャリブレーション手法

式(1)で距離  $Z$  と結像点の横座標  $u$  のペアを  $n$  組与えると, 線形最小 2 乗法により,  $u_\infty$ ,  $\alpha$  が次式により求められる.

$$\begin{bmatrix} u_\infty \\ \alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{n(\sum_{i=1}^n Z_i^2) - (\sum_{i=1}^n Z_i)^2} \times \begin{bmatrix} n(\sum_{i=1}^n Z_i^2 u_i) - \left(\sum_{i=1}^n Z_i\right) \left(\sum_{i=1}^n Z_i u_i\right) \\ \left(\sum_{i=1}^n Z_i^2\right) \left(\sum_{i=1}^n Z_i u_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n Z_i\right) \left(\sum_{i=1}^n Z_i^2 u_i\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

キャリブレーションでは式(3)より  $u_\infty$  と  $\alpha$  を各結像点で別個に求める. Fig.3 に実験で用いるセンサと計測対象となる白色壁面, センサを動かすためのリニアガイドを組み合わせた装置を示す.

従来のキャリブレーション手法では, すべての結像点の距離値  $Z_i$  に, 同一の値を用いていた. しかしながら, Fig.3 において, カメラの光軸と白色壁面は厳密には直交していない. したがって, 異なる結像点ではそれぞれ異なる  $Z_i$  を持つと考えられる. そこで本論文では, キャリブレーション用にカメラを 1 台追加して, 2 台のカメラを用いてチェッカーボードのコーナーを対応点とするパッシブステレオを行うことで  $Z_i$  を計測する. パッシブステレオで下側のカメラの光学中心を原点, 光軸を  $z$  軸としたときの白色壁面の式

$$z = ax + by + c \quad (4)$$

を求め, 各結像点における  $Z_i$  を式(4)で求め式(3)に代入するキャリブレーション手法を提案する.



Fig.3 Calibration of the sensor

## 4 実験

提案手法のキャリブレーションを用いた距離計測実験を行った.

実験 1 では, パッシブステレオの評価を行い平面の方程式の係数  $a, b$  を求めた. また, 実験 2 では, アクティブステレオ計測を行い, その精度評価を行った.

### 4.1 実験 1

Fig.4 にパッシブステレオのために上下のカメラを平行化した画像を示す. 対応点を結んだ線分が鉛直方向に引かれており平行化が正確に行われたことがわかる.

センサをリニアガイドを用いて 250mm から 300mm の範囲で手動で 10mm ずつずらし, 各距離 5 枚ずつ計 30 枚画像を取得し, パッシブステレオによる距離計測を行い, 各画像の対応点の 3 次元座標を算出し, 平面近似より式(4)における  $a, b, c$  を求めた. Table 1 に  $c$  を距離の真値として, メジャーによる測定値の誤差および, 各距離ごとに 5 つの計測値の平均を求め, 距離を 10mm ずらした際のその値の差の平均と標準偏差を示す.

実験結果から, ランダム誤差は小さい一方で, 系統誤差が大きいことがわかる. これは, 原点位置と光学中心位置のずれが系統誤差として現れたものと思われる. したがって, アクティブステレオによる計測では測定値にこの値を加えれば良い.

また,  $a, b$  の平均, 標準偏差を Table 2 に示す.

この結果より,  $x$  軸方向に 100mm ずれると 1mm,  $y$  軸方向に 100mm ずれると 4.9mm 程度の  $z$  軸方向の距離ずれが発生することがわかり, 平面が垂直でないことがわかる.

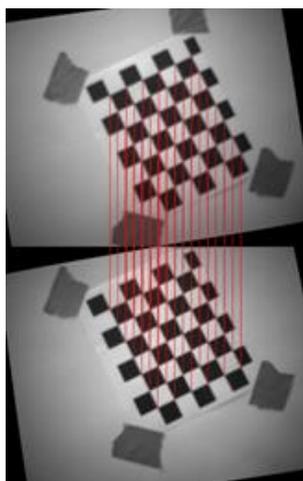


Fig.4 Rectified image

Table 1 Result of passive stereo

	平均[mm]	標準偏差[mm]
誤差	13.362	0.141
各距離間の差	10.063	0.254

Table 2 Parameters of planes

	平均	標準偏差
$a$	-0.0109	0.0492
$b$	0.0009	0.0012

## 4.2 実験 2

実験 1 で用いた白色壁面を計測対象として、距離値を 200mm から 1800mm まで 100mm 間隔で変化させてスリット光を撮影した。15 本のスリット光の縦ピクセルごとに結像点の重心位置を求め、実験 1 で求めた傾きを用いて各点の距離値を計算して式(3)より $u_{\infty}$ 、 $\alpha$ を求めた。

これらの値を用いて、距離値を 200mm から 1500mm まで 100mm 間隔で変化させてアクティブステレオ計測を行い、スリット光の距離画像を取得した。Fig.5~Fig7 に 300mm,600mm,1500mm の距離画像の正面図と上面図を示す。

Fig.5 では、真値から大幅に外れた箇所が多く見られた。これはスリット番号の同定を正しく行えなかったためだと考えられる。

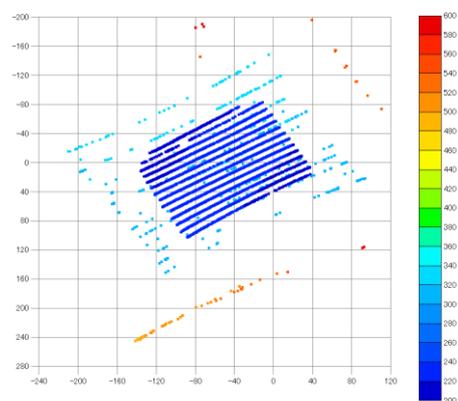
Fig.6 では、画像の左上から右下にかけて距離値の減少傾向が見られた。これは実験 1 で求めた平面の係数の符号を反映したものとなっていると考えられる。

Fig.7 では、Fig.6 で見られた減少傾向が大きくなっ

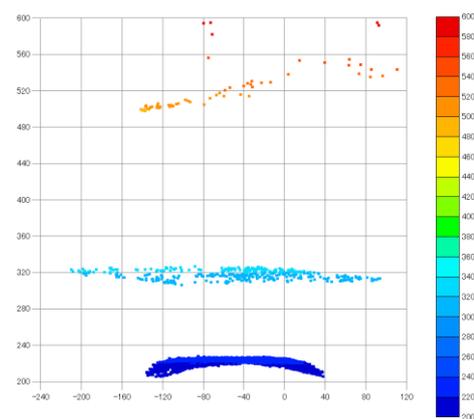
ている。これはスリット光の結像位置が距離の増加とともに主点からより離れたために起こっていると考えられる。

Table 3 にパッシブステレオで求めた各点における  $z$  を真値としたアクティブステレオ計測結果の誤差の平均と標準偏差を示す。この表において真値から 10%以上離れた点は外れ値として除外している。また、200mm の計測では評価を行うための十分な数の点が得られなかったため除外している。

この結果から誤算の平均と標準偏差が距離値の増加とともに増加していることがわかる。これは三角測量による計測において、距離の不確かさが距離値の二乗に比例することに対応していると考えられる。

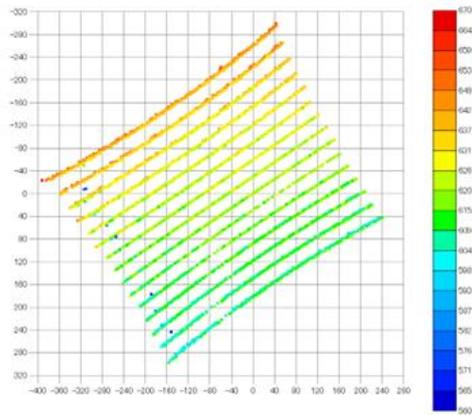


(a) Front view

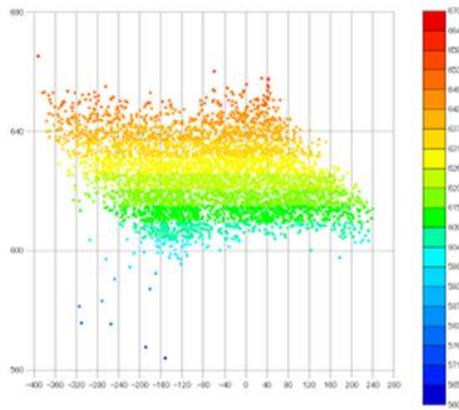


(b) Top view

Fig.5 Range images[300mm]

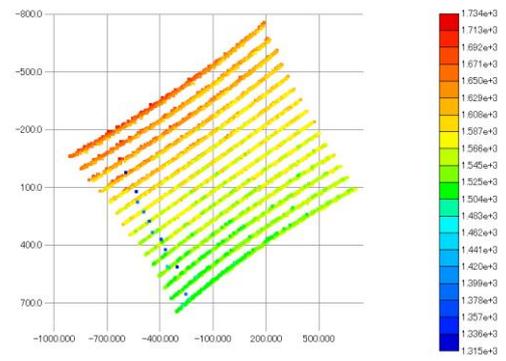


(a) Front view

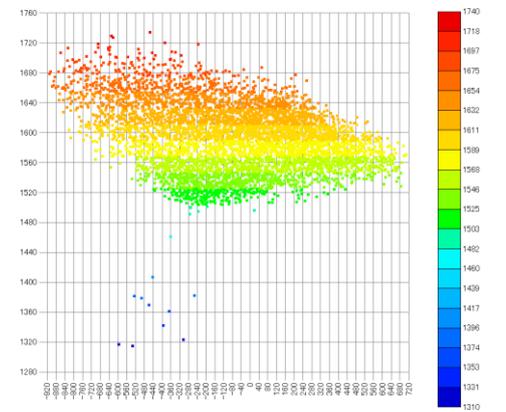


(b) Top view

Fig.6 Range images[600mm]



(a) Front view



(b) Top view

Fig.7 Range images[1500mm]

Table 3 Mean and standard deviation of range image measurement error

距離値[mm]	平均[mm]	標準偏差[mm]
300	3.413	2.007
400	6.271	5.003
500	8.578	5.388
600	10.997	6.645
700	16.939	11.044
800	22.508	15.229
900	28.528	16.680
1000	33.108	18.002
1100	39.907	21.778
1200	47.956	26.105
1300	56.266	28.127
1400	66.586	28.709
1500	78.187	29.263

## 5 結論

本論文では、視差推定手法としてマルチスリット光のぼけ情報を加えて対応点問題を緩和したアクティブステレオ計測のキャリブレーション手法をパッシブステレオを用いて見直し、光軸に対する白色壁面のずれを定量的に示した。また、アクティブステレオ計測を行い計測精度の評価を行った。今後は、計測精度を向上させるためにキャリブレーションに用いるデータ数を増やす他、スリット番号の判定手法を見直す。

## 参考文献

- [1] M.A. Mahammed, A.I. Melhum, F.A. Kochery, “Object Distance Measurement by Stereo VISION,” International Journal of Science and Applied Information Technology(IJSAIT), Vol.2 , No.2, p.05-08 , 2013.
- [2] R. Labayrade, D. Aubert, J.-P. Tarel, “Real time obstacle detection in stereovision on non flat road geometry through “v-disparity” representation,” Intelligent Vehicle Symposium, pp.646-651, 2002.
- [3] 中川 泰夫, 押田 良忠, 二宮 隆典, 佐々木 秀 昭, 計測自動制御学会論文集 Vol.22, No.9, p.982-987, 1986.
- [4] 成瀬 央, 野村 由司彦, 山本 俊雄, 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J69-D, No.12, pp.1888-1895, 1986.
- [5] 土居 謙介, 辻 徳生, 山本 健吉, 石井 抱, 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J91-D, No.5, pp.1359-1368, 2008.
- [6] 福田 智章, 池 勇勳, 梅田 和昇, マルチスリット光を用いたロボットハンドに利用可能な近距離計測用小型距離画像センサの構築, 日本機械学会論文集, Vol. 85, No. 877, p. 19-00087, 2019.
- [7] 藤井 奈穂, 池 勇勳, 梅田 和昇, ぼけを利用したスリット像判別による距離画像センサの計測範囲拡大, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2020 年度精密工学会春季大会 pp. 592-593, 2020.