

マルチスリットレーザとモノクロカメラによる リアルタイム距離画像センサの構築 —複数露光・ぼけ計測による計測範囲の拡大—

Construction of a real-time range image sensor using a multi-slit laser and a monochrome camera: Expansion of measurement range by multiple exposures and blur measurement

精密工学専攻 29号 佐々木渉

Wataru Sasaki

1. 序論

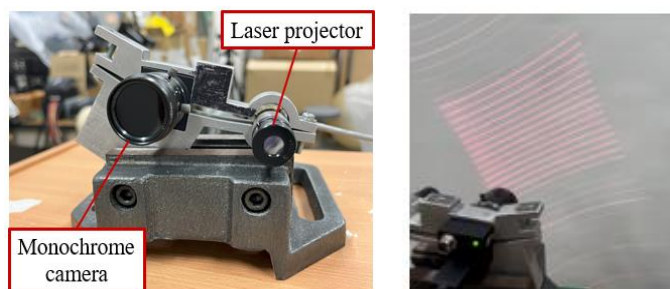
近年、人に代わって作業を行う自律移動ロボットの導入が工場内、災害現場や人の生活環境で広まりつつある。このようなロボットとして、物体の把持から組み立てや溶接作業を行うロボットマニピュレーターや、物体搬送用の移動ロボットなど様々な形が存在する。これらのロボットにおいて、周囲の環境、位置、姿勢に関する情報を得るためのセンシングは重要である。具体的なセンサとして距離画像センサがしばしば用いられ、その場合、高速・高精度な計測が求められる。

ロボットに搭載する距離画像センサの代表的な例として、LiDAR やステレオ視が挙げられる。LiDAR は広い計測範囲を持つが、構造が複雑で高価であることや計測対象の細かな形状や動きを捉えるのに不向きである。これに対し、ステレオ視による計測は、比較的簡単に高精度な計測が実現しやすい。ステレオ視には複数のカメラを用いたパッシブステレオと一つのカメラを光源に置き換えたアクティブステレオがある。両者を比較したとき、アクティブステレオはテクスチャレスな環境に対しても計測しやすい利点がある。

アクティブステレオに関して、移動ロボットへの応用や物体認識の技術として様々な計測手法が提案されている。その例として、光源としてラインレーザをカメラと組み合わせ計測を行うものがある⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。これらは計測対象全体を捉えるのに複数フレームの計測や光源の走査を必要とするため、高速に周囲の環境を把握する事や物体の運動を捉えることに不向きである。また、二次元パターン光を用いたものがあり、例として投影格子に対して位相解析を行い計測する手法が提案されている⁽⁴⁾。このような手法は光源に位相シフト機構を要し、計測装置として構造が複雑になりやすく移動ロボットへの搭載には不向きである。移動ロボットへ搭載した例として、クロスラインレーザを用いた障害物距離計測手法がある⁽⁵⁾。二次元パターン光を用いたリアルタイムの計測を実現しているが、光源の形状から広域に計測するのが困難である。比較的広域な計測を行う例として、Kuroki らは、光源としてマルチスリットレーザを用いることで高密度な計測を実現し、ヒューマノイドの障害物回避に応用した⁽⁶⁾。しかし、計測範囲が限定されており、ロボットの足元前方のみを計測対象としている。これに対し Fujii らは、マルチスリットレーザを用いたアクティブステレオにおいてぼけ情報を付加することで計測範囲拡大を実現した⁽⁷⁾。しかし、オフライン計測に留まっており、移動ロボットなどリアルタイムの処理を要するものに適用できない。そこで、本研究では従来手法⁽⁷⁾をリアルタイム化することで、移動ロボットへの搭載を考慮した、広い計測範囲をもつ高速・高精度な距離画像センサの実現を目指す。

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タから構成される。カメラは Point Grey Research Blackfly S であり、画素数は 1280×1024 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。レーザプロジェクタには 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° である。



(a) Component of sensor

(b) Projected light

Fig. 1 Sensor appearance

3. 基本となる計測原理

本センサは、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算出する。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]、画素の横幅を δ_u [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場合を

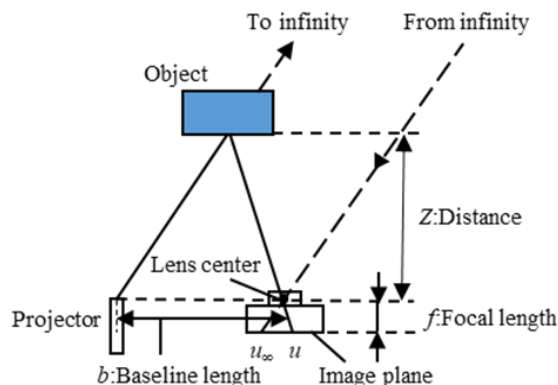


Fig. 2 Triangulation model

仮定したときの結像点の横座標を u_{∞} [pixel]と置くと、対象までの距離値 Z [mm]は次式のように表せる。

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

ここで、 a 、 u_{∞} 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、 u を得るために画像の各行で探索範囲を設け、しきい値以上の画素が一定値以上連続する箇所を検出する。このとき、しきい値以上の輝度値を D_i 、その u 座標 u_i と置くと、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。画像の縦座標を v 、画素の縦幅を δ_v 、画像中心 c_u 、 c_v 、3次元座標 (X, Y, Z) とすると、次が成り立つ。

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

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

ここで、 δ_u/f 、 δ_v/f 、 c_u 、 c_v は、Zhang の手法⁽⁸⁾によりあらかじめ求めておく。

4. 距離画像計測手法

4.1 複数スリットの判別

2章で述べたマルチスリットレーザによる結像点を三次元復元する際、Fig. 3 に示すように一つの探索範囲から複数のスリットが検出されることがあり、これらを判別する必要がある。本研究では、計測点すべてにおいて二通りの方法で視差を取得することで対応付けを行う。

Fig. 4 に異なる距離で取得された二つのマルチスリット像の画像を示す。これらより、距離の変化からスリット像の位置と幅が変化していることがわかる。実際の取得画像においてしきい値以上の連続する画素を数えることによって得たスリットの幅と、重心位置より得られた視差との関係を Fig. 5 に示す。スリット像の各行のスリット幅をぼけ量 w [pixel] と定義し、視差 Δ [pixel] との関係を一近似的に次式のように表す。

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

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基づきキャリブレーションしておく。また、視差 Δ は次式のように表せる。

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

画像の各行でスリットの探索を行い複数のスリットが検出されたとき、式(5)と式(6)から求めた視差の差が最も小さくなるものを正しいスリットと判別する。

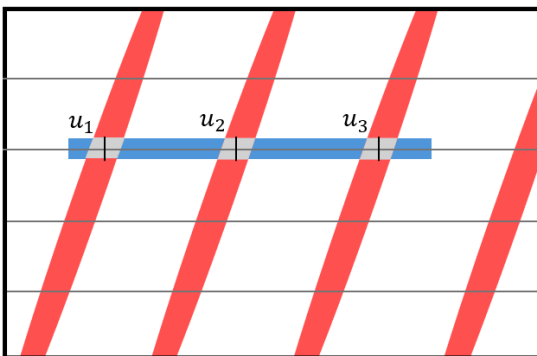


Fig. 3 Multiple slits detected from search range

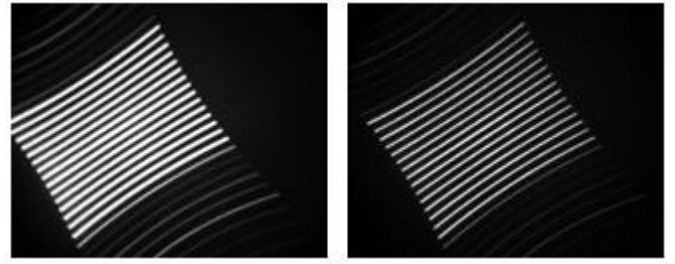


Fig. 4 Acquired image (left: 200 mm, right: 400 mm)

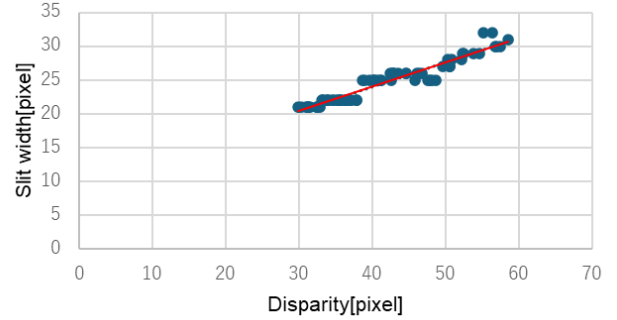
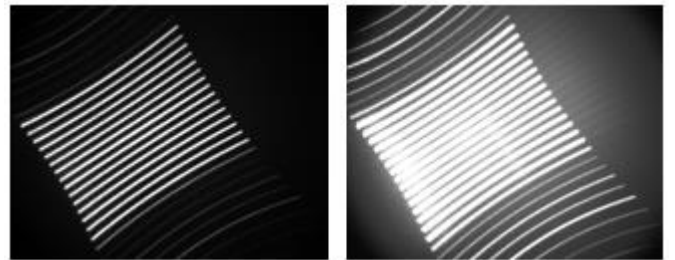


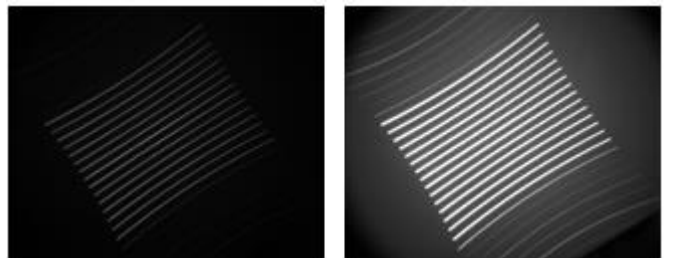
Fig. 5 Relationship between disparity and slit width

4.2 計測範囲拡大手法

モノクロカメラ画像からスリット検出を行う際、ぼけ量が大きく隣接するスリットと重なる場合やスリット部分の画素値がしきい値を下回る場合は正しくスリットを検出することができない。そこで、本研究では計測範囲拡大のため異なる二つの露光時間の取得画像を計測に用いることで計測範囲を拡大する。それぞれの距離において異なる露光時間で取得した画像を Fig. 6 に示す。近距離のとき露光時間 1 ms の画像はスリット検出できるが、露光時間 10 ms の画像では一定の値でしきい値処理したとき、スリット部分以外の画素値の大きさから、各スリットの重心位置を正確に得ることができない。一方、遠距離のときは露光時間 10 ms の画像でスリット検出できるが、露光時間 1 ms の画像ではスリット部分の画素値が小さいため重心位置を取得できない。そこで、



(a) Images acquired from 300 mm



(b) Images acquired from 1000 mm

Fig. 6 Acquired image with different exposure time (left: 1 ms, right: 10 ms)

露光時間の短い画像, 長い画像を組み合わせることで, 近距離, 遠距離いずれでも計測できるようにし, 計測範囲拡大を実現する.

本研究では200 mm から2200 mm の距離値において10 mm 間隔で取得された画像に対して, 適当な二値化のしきい値と露光時間の組み合わせを4通りに分けてキャリブレーションした. 計測時には, この4通りの組み合わせを順番に当てはめ, 条件値を満たすスリットが検出されたとき三角測量により計測する. 各行の処理手順を Fig. 7 に示す.

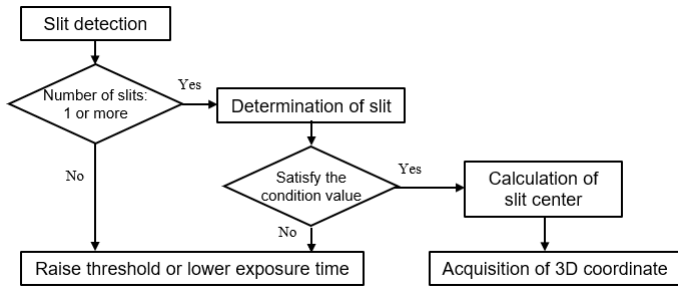


Fig. 7 Method of expanding measurement range

4.2 リアルタイム化

4.1 節にて述べた処理を取得された画像に対して繰り返し高速に行うことでリアルタイム計測を実現する. 処理手順を Fig. 8 に示す. 1 フレームの計測において露光時間の異なる二枚の画像を一台のモノクロカメラによって取得する. この処理を繰り返すため, カメラが露光時間の異なる画像を交互に取得するよう制御した. 二種類の画像を高速で交互に取得する際, カメラのバッファメモリのデータが処理される前に上書きされることが考えられる. そこで, 30 フレームの計測を行う度にバッファメモリを初期化することでこの問題を回避する.

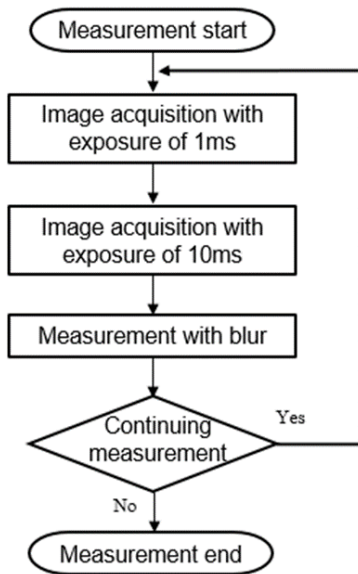


Fig. 8 Method of real-time measurement

5. 距離画像計測実験

5.1 センサの性能評価

従来手法⁷⁾をリアルタイム化し計測実験を行った. まず, 本手法の計測速度を調べるために 1 フレームにかかる処理時間を測った. 30 フレーム間において, 1 フレームあたり

の処理時間は約 62 ms で, 約 16 fps のフレームレートを実現した. 1 フレームの計測に 2 枚の画像取得が必要であることも考慮すれば, 高速なリアルタイム処理が実現できたとと言える.

また, 計測精度を検証するため一定の距離に設置されたホワイトボードに対して計測実験を行った. 実験環境を Fig. 9 に示す. 対象までの距離を計測ステージ上で 200 mm から 2000 mm までを 100 mm ずつ移動させ計測を行った. このとき, 計測点は 5265 点あり, その中でスリットが検出され計測値が得られた点すべてに対して精度評価を行った. 各距離における平均誤差と標準偏差を Table 1 に示す. この評価において, 計測値が得られた点の中で真値±10 %外の値のものははずれ値と見なして除外し, その点の数を記録した. はずれ値による除去点の数から, 誤対応は距離 200 mm の場合を除き, 計測点数の 0.5 %以下と少ない事が言える. 平均誤差に関しては, 500 mm 付近以外は誤差が大きく見られ, キャリブレーションが不十分であることやセンサ座標系の



Fig. 9 Experimental environment

Table 1 Measurement results (unit : mm)

Distance	Mean error	Standard deviation	Number of outliers
200	11.9	1.4	44
300	8.9	2.2	15
400	2.9	3.1	1
500	-1.7	4.2	1
600	-5.5	6.1	0
700	-9.1	7.9	4
800	-13.2	9.9	3
900	-14.4	11.6	5
1000	-17.5	12.8	5
1100	-19.5	13.4	0
1200	-22.7	15.4	0
1300	-25.7	16.5	1
1400	-26.7	17.6	9
1500	-29.4	19.8	5
1600	-29.4	23.2	5
1700	-32.1	26.6	2
1800	-31.7	29.0	3
1900	-33.4	31.1	3
2000	-33.2	32.8	1

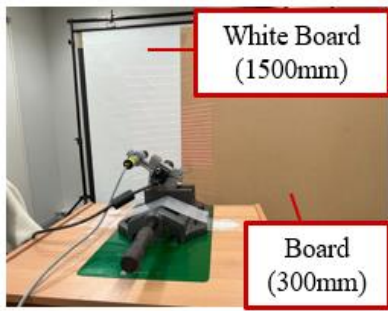


Fig. 10 Experimental environment

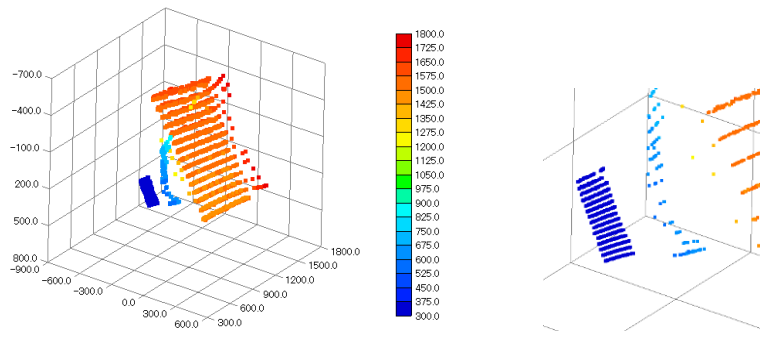


Fig. 11 Range image (left: isometric view, right: magnified isometric view)

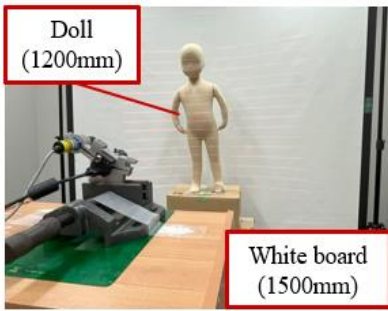


Fig. 12 Experimental environment

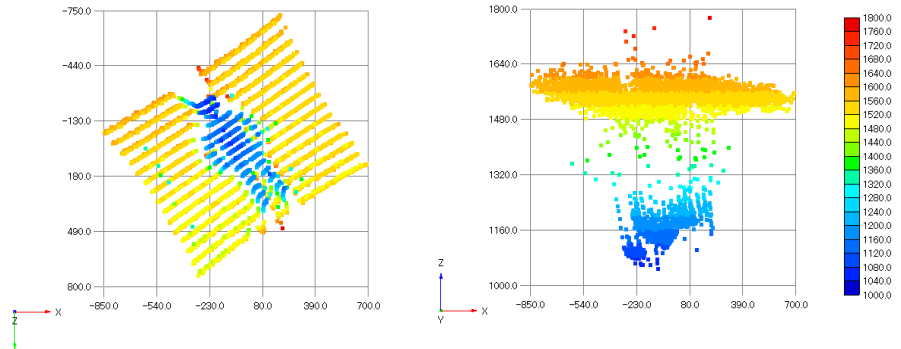


Fig. 13 Range image (left: front view, right: overhead view)

ずれの影響が考えられる。また、標準偏差に関しては、遠距離になるにつれ増加する傾向が見られる。これは三角測量の原理を用いた手法で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ことに対応していると考えられる。

5.2 複雑な環境での計測実験

本手法の有効性を確かめるため、Fig. 10 に示す異なる二つの距離値が存在する環境で計測実験を行った。距離 1500 mm のホワイトボードの手前 300 mm に平板を設置し、両者を同時に計測できるか検証した。Fig. 11 から異なる距離値を同時に計測できていることがわかる。さらに、拡大図からマルチスリットの形状を復元できていることがわかる。しかし、復元した二つの壁面の間に外れ値が存在し壁面の境界部分を誤認識し計測されたことが考えられる。

また、Fig. 12 に示すホワイトボードの前に人形を設置した環境で計測実験を行った。Fig. 13 の正面図よりマルチスリットレーザより得られた点群から人の形状を把握することができる。また、俯瞰図から人形の丸みのある形状を復元できていることがわかる。

6. 結言

本論文では、マルチスリットレーザによるぼけ情報を活用した距離画像センサにおいて、リアルタイム化を実現した。また、複数のスリットを判別する手法により誤対応による外れ値の発生を低減させつつ計測範囲を拡大した。

今後の展望として、計測対象によって反射率を考慮した距離計測手法の構築を目指すことや、複数台のカメラによる計測手法との融合を行うことが挙げられる。

参考文献

(1) Shan, P., Jiang, X., Du, Y., Ji, H., Li, P., Lyu, C., Yang, W. and Liu, Y., A laser triangulation based on 3D scanner used for an autonomous interior finishing robot, 2017 IEEE

International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 475-480, 2017.

- (2) Li, J., Liu, G. and Liu, Y., A dynamic volume measurement system with structured light vision, 2016 31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), pp. 251-255, 2016.
- (3) Ikura, M., Pathak, S., Kasahara, J. Y. L., Yamashita, A. and Asama, H., AdjustSense: Adaptive 3D Sensing System with Adjustable Spatio-Temporal Resolution and Measurement Range Using High-Speed Omnidirectional Camera and Direct Drive Motor, in *Sensors*, vol. 21, 6975, 2021.
- (4) Fujigaki, M., Oura, Y., Asai, D. and Murata Y., High-speed height measurement by a light-source-stepping method using a linear LED array, *Opt. Express*, vol. 21, No. 20, pp. 23169-23180, 2013.
- (5) Mitsuhashi, H., Akamine, S., Itami T. and Yoneyama, J., Autonomous Mobile Robot Equipped with a Monocular Camera and Cross-line Laser that Can Measure Obstacle Distance in Real Time Independent of Brightness, 2023 31st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), pp. 125-130, 2023.
- (6) 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, 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5972-5977, 2010.
- (7) Fujii, N., Ji, Y. and Umeda, K., Measurement range expansion of a range image sensor using a multi-slit laser projector, 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 139-143, 2020.
- (8) 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.