

マルチスポット光を用いた距離画像センサの計測範囲拡大

Expansion of the measurement range of the range image sensor using multi-spot lights

○ 野崎 慎太 (中央大) 学 内田 裕己 (中央大)
正 梅田 和昇 (中央大)

Shinta NOZAKI, Chuo University, nozaki@sensor.mech.chuo-u.ac.jp
Yuki UCHIDA, Chuo University
Kazunori UMEDA, Chuo University

In this paper, we propose a method for expanding the measurement range of the range image sensor using multi-spot lights. This sensor can obtain range and color images at 200Hz. Measurement range of the original sensor is 850~2500[mm]. It is necessary to solve the correspondence problem in order to expand the measurement range. The area of the spot image changes according to the distance. We use the area of the spot image to solve the correspondence problem. The effectiveness of the proposed method is verified by experiments.

Key Words:3D measurement, range sensor, multi spot laser

1. 序論

近年、知的な機械システムの開発が数多く行われている。このような知的な機械システムの実現には外界シーンの理解は必要不可欠である。その手段の一つにリアルタイムでの距離画像の取得があげられる。渡辺ら[1]は、独自に開発した高速ビジョンシステムを用いて 955Hz の距離画像計測を実現している。我々は従来研究[2]において、同軸系テクスチャ付き距離画像センサの構築を行っているが、対応点問題を解決するために計測範囲を制限している。そこで本研究ではモノクロカメラ画像上のスポット光像の変化を用いて、対応点問題を解決し、センサの計測範囲を拡大することを目的とする。

2. 距離画像計測

2.1 センサの概要

本研究に用いたセンサの構成を図 1 に示す。本センサはレーザープロジェクタ及びモノクロカメラを用いて距離画像を、上部に取り付けられたカラーカメラを用いてカラー画像を得ている。中央に取り付けられたコールドミラーにより、距離画像の同軸での計測を実現している。赤外のレーザー光は透過されモノクロカメラへ、可視光は反射されカラーカメラへと分けられる。

次に、構成品の詳細を示す。レーザープロジェクタは StockerYale 社 Mini-519X を使用している。レーザー光の波長は近赤外の 830[nm]、出力は 150[mW]、19×19 の計 361 点を正方形格子状に投影する。二台の CCD カメラは Point Grey Research 社 Dragonfly Express を用いた。レンズは二台とも TAMRON 社 13FM08IR 焦点距離 8mm を取り付けしている。コールドミラーは Edmund optics 社 TECH-SPEC cold mirror を用いている。また、外乱光を低減させるために、モノクロカメラの前面に HOYA 社の R72 フィルタを、レンズ背面に Edmund optics 社ハードコート狭帯域干渉フィルタ (中心波長 830[nm]、半値幅 10[nm]) を取り付けしている

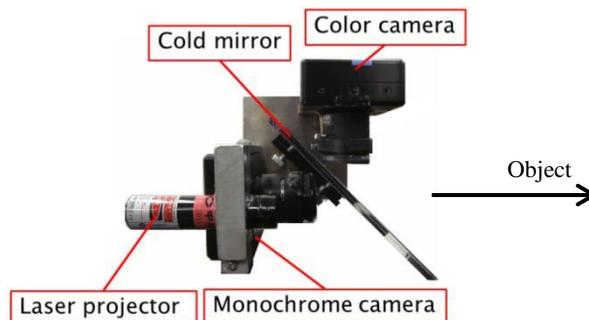


Fig.1 Range image sensor

2.2 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ポット像の位置と無限遠を仮定した時のスポ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。モノクロ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 :CCD カメラのレンズの焦点距離[mm]

p :CCD 一画素の幅[mm/pixel]

$k - k_{\infty}$:視差[pixel]

2.3 計測範囲

2.2 節にて、距離計算には無限遠におけるスポット光の結像位置が必要であると述べた。この位置は各スポット光ごとに異なる。そのため、レーザープロジェクタにより照射されたスポット光とモノクロカメラで観測されたスポット光との対応付けを行う必要がある。従来は各スポット像の移動範囲に対応した探索範囲を設定することで対応点問題を回避した。この時、設ける探索範囲が他の探索範囲と競合しないようにその範囲を調節しなければならない。そのため、探索範囲が制限され、計測範囲が狭められている。本センサの最小計測距

離は幾何学的な関係より約 822mm と求められる。実際の最小計測距離は余裕を持たせ 850[mm]としている。最大計測距離はレーザの照射強度の関係より 2500mm となっている。

3. センサの計測範囲拡大

3.1 対応点問題

2.3 節にて、探索範囲同士が競合しないようにしなければならないことを説明した。ここでは、その理由について述べる。探索範囲同士が競合しないように配置した様子を図 2 に、探索範囲同士が競合している様子を図 3 に示す。探索範囲は本センサの計測範囲内におけるスポット光のモノクロ画像上での移動範囲である。そのため、探索範囲が競合する領域では一つのスポット光が複数の探索範囲で検出される。この時、一つの探索範囲に複数のスポット光が存在する状態となる。本センサでは、探索範囲とその範囲内にあるスポット光を対応付けするため、複数のスポット光が存在すると、どのスポット光と対応付けすればよいのか判別ができない。この問題を解決するための手法を次節にて提案する。なお、本節で述べた探索範囲を以降探索ラインと呼ぶ。

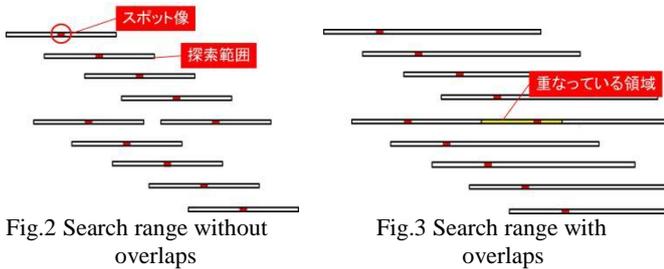


Fig.2 Search range without overlaps

Fig.3 Search range with overlaps

3.2 スポット光像の面積

レーザ光が物体に当たり拡散反射した光は放射状に広がるため、センサからの距離の二乗に反比例して、カメラに入射する光量が変化する。これにより、モノクロカメラに結像するスポット光の周辺部は、遠距離では暗くて検出ができないが、距離が近くなるほど明るくなり、検出できるようになる。そのため、スポット光像の面積は近いほど大きくなる。その様子を図 4 に示す。本研究では、このことをスポット光の判別に用いる。

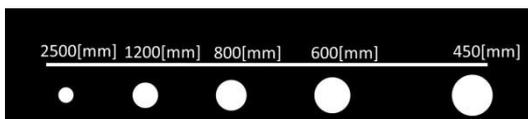


Fig.4 Area of spot light image

3.3 スポット光判別

スポット光像の面積は計測対象の反射率によっても変化する。そのため、反射率の違いによって面積が変化すると考えられる範囲を求める必要がある。この範囲を以後、面積の変化範囲と呼ぶ。本手法では、白い平面を基準となる計測対象(図 5)とし、各距離ごとにスポット光像の座標と面積を記録、それを基に次式で表される近似曲線を作成しておく。

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (2)$$

y : スポット光像の面積

x : スポット光像の座標

a, b, c : 定数

この近似曲線を用いて、上記で述べた面積の変化範囲を求める。範囲内にあるスポット光を探索ラインに対応するスポット光の候補とし、それ以外を候補から除外することで、対応すると考えられるスポット光の候補を絞る。範囲内にあるスポット光が一つである場合、そのスポット光が探索ライン

に対応すると判断する。図 6 に例を示す。図 6 の上部が探索ラインとスポット光、黒円がスポット光のグラフ上での位置、赤で示す範囲が対応するスポット光像の面積の変化範囲を表している。図 6 の場合、探索ライン左側のスポット光は求めた変化範囲の外にあるため、除外され、右側のスポット光が対応するスポット光であると判断される。



Fig.5 Measured object

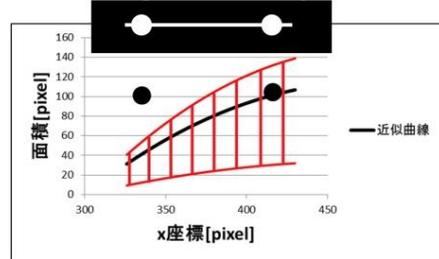


Fig.6 Discrimination of spot light using area

3.4 隣り合う探索ラインの参照

3.3 節にて説明した手法により対応するスポット光を判別するが、外乱光や物体の反射率により、候補が複数残ることがある。この場合、探索ラインに対応するスポット光の判別が不可能となる。そこで、未確定のライン上に残るスポット光が、隣り合う探索ラインですでに対応状態にあるかを確認する。未確定のライン上に、隣り合う探索ラインですでに対応状態にあるスポット光があれば、候補から除外する。これにより探索ライン上の候補が一つとなれば、そのスポット光が探索ラインに対応すると判断する。この様子を図 7 に示す。

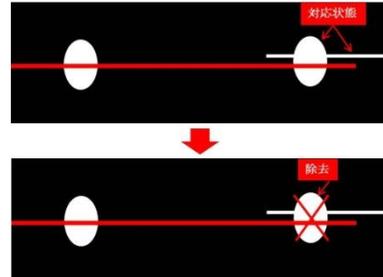


Fig.7 Reference of adjacent lines

4. 実験

4.1 距離計測精度の検証

提案手法を用いて距離の計測精度の検証を行った。木製の平板をセンサ光軸に対して垂直となるよう配置し、そこに折り紙を貼ったものを計測対象とし、距離画像を計測した。この時の平面を最小二乗法により当てはめ、この平面と各計測点との距離を誤差として、各計測距離における標準偏差を測定した。誤計測点はあらかじめ除外している。計測に用いる折り紙は白・灰・黒の 3 種類を用いた。計測距離は 450~2500[mm]、450~500[mm]間は 50[mm]刻み、それ以降は 100[mm]刻みの間隔とした。黒の折り紙では 1500[mm]以降ではスポット光の検出が困難となったため、精度検証は行えなかった。計測対象を図 8, 9, 10 に示す。また、各対象を計測距離 500[mm]、1800[mm]にて計測した際のスポット像を図 11~16 に示す。

ここで、式(1)に誤差の伝播則を用いると次式を得る。

$$\sigma_z = \frac{p \cdot \sigma_{k-k_\infty}}{b \cdot f} \cdot Z^2 \quad (3)$$

σ_z : 距離の計測精度[mm]

σ_{k-k_∞} : スポット像の検出精度[pixel]

σ_{k-k_∞} が計測距離により変化しない定数であると仮定した場合、計測精度 σ_z はこの式より距離の二乗に比例することになる。この式より求めた二次のフィッティング曲線及び実験結果を図 17, 18, 19 に示す。

計測結果より、白・灰・黒全てにおいて 1500[mm]付近では計測精度がフィッティング曲線に沿っていることが分かる。しかし、1000[mm]より近く及び 1800[mm]より遠くでは計測精度はフィッティング曲線に沿っていない。近距離ではボケによる影響により計測精度が悪化したと考えられる。遠距離では、スポット光が弱まり、スポット光の重心演算が正確に行われず、計測精度が悪化したと考えられる。また、反射率が低下するほど標準偏差が大きくなること分かる。これは、観測されるスポット像の輝度値が小さくなるため、精度が低下したと考えられる。

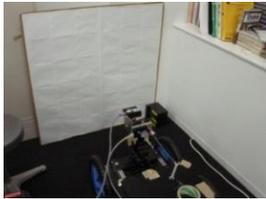


Fig.8 White paper



Fig.9 Gray paper



Fig.10 Black paper



Fig.11 Spot image (white,500[mm])



Fig.12 Spot image (gray,500[mm])

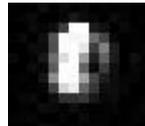


Fig.13 Spot image (black,500[mm])

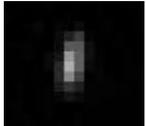


Fig.14 Spot image (white,1800[mm])



Fig.15 Spot image (gray,1800[mm])



Fig.16 Spot image (black,1800[mm])

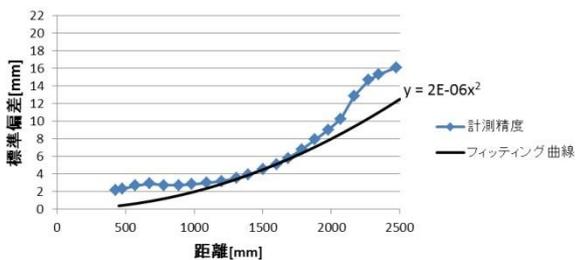


Fig.17 Measurement accuracy (white paper)

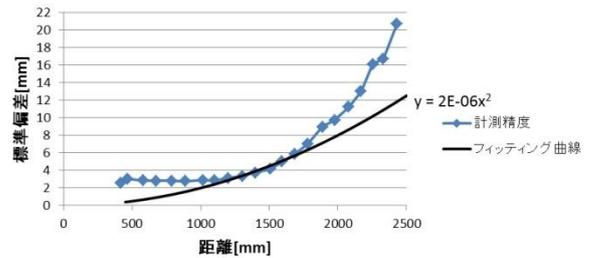


Fig.18 Measurement accuracy (gray paper)

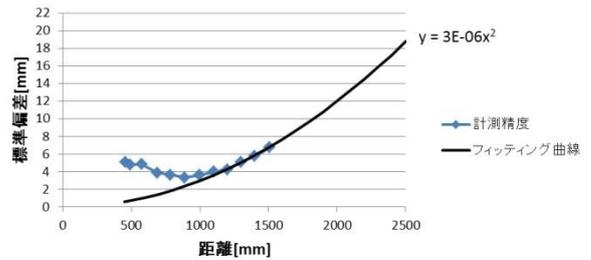


Fig.19 Measurement accuracy (black paper)

4.2 異なる反射率ごとの誤計測率の検証

提案手法を用いて反射率の異なる対象を計測し、誤計測率の検証を行った。計測対象及び計測距離は 4.1 節と同様である。計測結果を表 1 に示す。なお、表 1 には 450[mm], 700[mm], それ以降は 300[mm]ごとの計測結果のみを載せている。スポット光の判別が不能となった割合を未確定率、誤ったスポット光を対応させてしまった割合を誤対応率とする。

実験結果より、白の折り紙では 450~700[mm]においてわずかに未確定率が上昇していることが分かる。これは、マルチスポットレーザの二次回折光をスポット光と検出してしまい、スポット光の選定を困難にしたものと考えられる。その他の距離では、未確定率・誤対応率共に十分に低いため、問題なくスポット光の選定が出来ているといえる。

灰色の折り紙では 450~700[mm]及び 2200~2500[mm]において未確定率が上昇していることが分かる。グレーは白と比較して反射率が低いため、2200~2500[mm]ではスポット光が弱まり、その検出がしづらくなるため未確定率が上昇したと考えられる。450~700[mm]における未確定率の上昇は白の折り紙と同様の理由であると考えられる。

黒の折り紙では 700[mm]付近において未確定・誤対応率が高くなっていることが分かる。黒は反射率が極端に低いため、想定されたスポット光像の面積よりも、検出された面積が小さくなったことが原因であると考えられる。また、1300[mm]以降の距離において未確定率が高くなっていることが分かる。これは、グレーの遠距離において未確定率が上昇したと同様の理由であると考えられる。

Table 1 Rates of measurement failure

計測距離[mm]	未確定率[%]			誤対応率[%]		
	白	灰	黒	白	灰	黒
450	5.0	7.2	5.0	0	0.3	0.3
700	3.3	2.8	33.5	0	0	21.7
1000	0.3	0.6	8.3	0	0	0
1300	0	0.3	33.8	0	0	0

1600	0.3	0.6	80.3	0	0	0
1900	0	1.7	92.0	0	0.3	0
2200	0.8	16.3	98.9	0	0	0
2500	1.7	42.9	98.9	0	0.3	0.3

4.3 距離値の異なる物体の計測実験

異なる距離値の物体に対して計測実験を行った。白い平面を計測対象とした。小さい平面をセンサからの距離 500[mm]付近に、大きい平面を 1500[mm]に設置した。また、小さい平面をセンサから見て右に設置した場合、左に設置した場合の二パターンの計測を行った(図 20, 21)。小さい平面を右側に設置した際の計測結果を図 22, 23に、左側に設置した際の計測結果を図 24, 25に示す。

計測結果より、右側に小さな平面を設置した場合は、いずれの距離においても正確な計測ができていることが分かる。左側に設置した場合は、わずかながら誤計測や消失点が表れていることが分かる。これは、オクルージョンが生じることにより、モノクロカメラに結像されないスポット光が発生したためと考えられる。

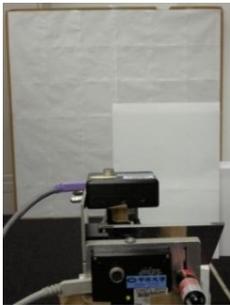


Fig.20 Measured object (right,front)



Fig.21 Measured object (left,front)

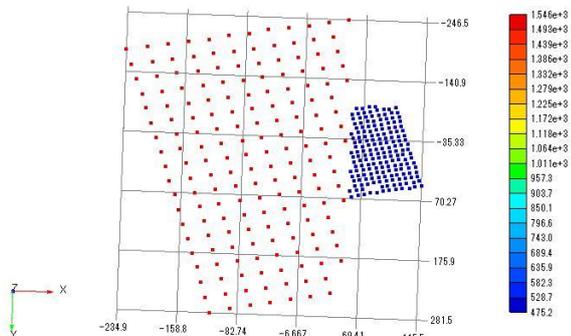


Fig.22 Range image for Fig.20

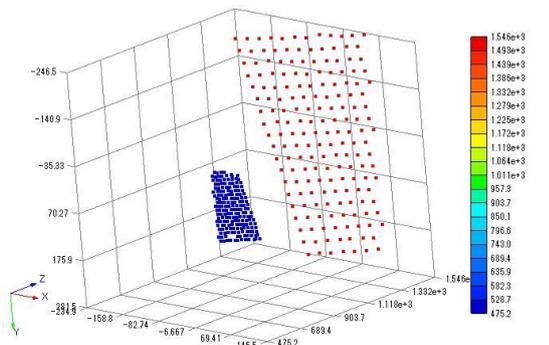


Fig.23 Range image for Fig.20 (different view)

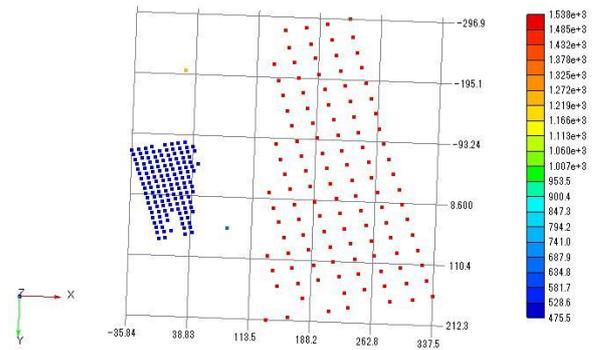


Fig.24 Range image for Fig.21

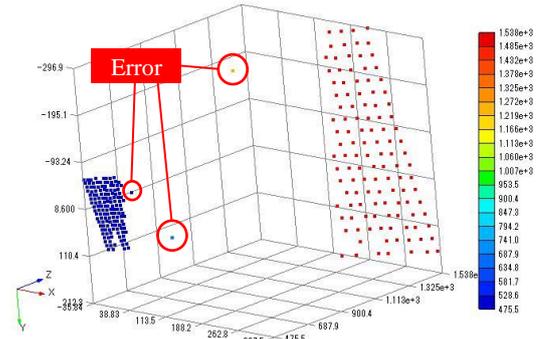


Fig.25 Range image for Fig.21 (different view)

5. 結論

マルチスポット光を用いた距離画像センサにおいて、スポット光像の面積を用いて対応点問題を解決し、センサの計測範囲の拡大を行った。本手法を用いて反射率の異なる平面を対象として計測精度及び誤計測率の検証実験を行った。異なる距離に存在する物体の同時計測により、本手法の安定性の検証を行った。本手法を用いることで、計測範囲を 850~2500[mm]から 450~2500[mm]に拡大できていることを確認した。計測精度及び誤計測率の検証実験により、対象が十分な反射率を持つ場合、誤差は計測距離 450[mm]で約 2.1[mm]、計測距離 2500[mm]で約 16[mm]となり、誤計測率も十分に低いことを示した。しかし、対象の反射率が低下するほど計測精度が低下、誤計測率が上昇することが確認された。また、レーザー光とモノクロカメラとの間にオクルージョンが発生するとわずかに誤計測率が上昇することが確認された。今後はこの問題を解決していく必要がある。

文献

- [1] 渡辺義浩, 小室孝, 石川正俊, “多点瞬時解析高速ビジョンによる運動変形物体のリアルタイム3次元センシング”, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.6, pp.1005-1013, 2007.
- [2] 内田裕己, 寺林賢司, 梅田和昇, “同軸系テクスチャ付距離画像センサの構築”, 第30回日本ロボット学会学術講演会予稿集, I3-3, 2012.9.
- [3] 石山英俊, 寺林賢司, 内田裕己, 梅田和昇, “100Hz テクスチャ付き距離画像計測システムの構築と三次元マッピングへの応用”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.1, pp.62-71, 2012.1.