

同軸系テクスチャ付距離画像センサの構築

○内田裕己 (中央大) 寺林賢司 (静岡大) 梅田和昇 (中央大)

1. 序論

近年、幅広い分野において、距離画像の需要が高まってきた。距離画像センサに対する要求に、用途に応じて高精度化、高密度化、小型化、高速化、低価格化、計測範囲の拡大などが挙げられるが、ロボティクス分野では特に高速化が重要である。

これまで様々な距離画像の取得方法が光学、コンピュータビジョン、ロボットビジョンの分野で考案されてきた [1]。その中でもレーザ光などを照射するアクティブセンサは高速、高精度な距離計測が可能である。立石らはマルチスポット光を投影するレーザプロジェクタを使った距離画像センサを構築している [2]。このセンサは 200[fps] で 361 点の距離画像計測が可能であるが、距離計測のスパースさのために三次元マッピングのようなロボティクス応用に不向きであった。石山らはカラーカメラを追加し距離画像に加えてカラー画像も同時に取得することでこの問題を解決している [3]。このセンサは同軸系として構築されていないため距離画像とカラー画像間の計測する範囲にずれが生じるという問題があった。同軸で距離画像とカラー画像を取得することができればずれを生じず正確なテクスチャマッピングが期待できる。

本論文では、石山らのセンサを改良し距離画像とカラー画像を同軸で計測可能なセンサを構築する。同軸系を構築するためにコールドミラーを用いる。

2. センサの構築

図 1 はセンサの構造を表している。提案するセンサを構成する部品はコールドミラーとレーザプロジェクタを除き過去に我々が提案したセンサ [4] と同じである。距離画像は CCD モノクロカメラとレーザプロジェクタを使って取得している。コールドミラーは赤外光を透過し可視光を反射する特性を持っている。このミラーの特性を利用することで投影したスポット光はミラーを透過しモノクロカメラで観測され、それ以外の可視光は反射してカラーカメラで観測される。

2.1 ハードウェア

図 2 に構築したセンサを示す。レーザプロジェクタは StockerYale 社 Mini-519X を使用している。レーザ波長は近赤外の 830[nm]、出力は 150[mW] である。プロジェクタの先端に取り付けられた回折格子によって 19×19 の合計 361 点のスポット像を照射する。モノクロカメラ、カラーカメラはどちらも Point Grey Research 社 Dragonfly Express を使用している。カメラの解像度は 640×480(VGA) である。カメラは 2 台とも焦点距離 8[mm] のレンズ (TAMRON 社 13FM08IR) を用いている。モノクロカメラのレンズ前面には HOYA 社 R72 フィルタを取り付けている。基線長は 52.2[mm] としている。コールドミラーは Edmund optics 社 TECH-

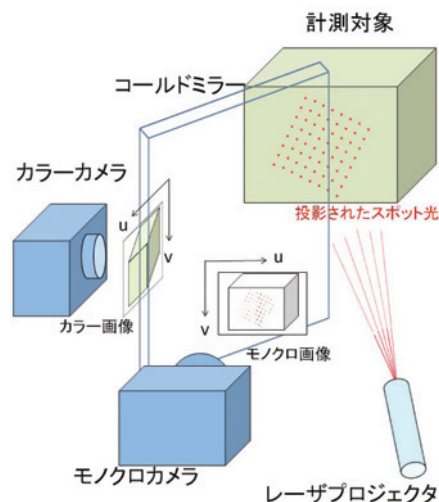


図 1 同軸系テクスチャ付距離画像センサの構造

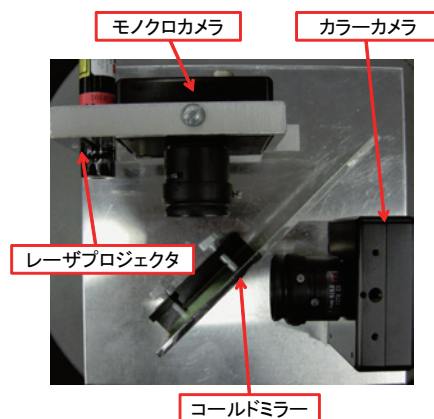


図 2 構築したセンサ

SPEC cold mirror を使用している。このミラーは可視光の 95% を反射し、赤外光の 90% を透過する。厚さは 3[mm]、屈折率は 1.472(波長 830[nm]) である。

本システムでは以下のコンピュータを動作環境として使用している。DELL XPS XPS720 OS: Windows Vista Ultimate デスクトップ PC Intel(R) Core2 Extreme CPU Q6850 @ 3.00[GHz] DRAM 4.00[GB]。

2.2 距離画像計測

本センサの距離計測には、三角測量の原理を用いている [3]。距離 Z は次式から求めることができる。

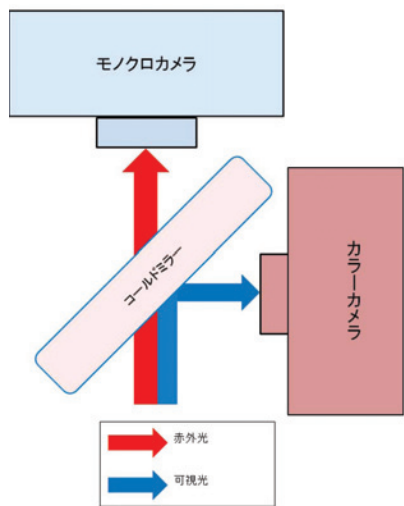


図 3 センサの配置

$$Z = \frac{\alpha}{d}, \quad \alpha = \frac{b \cdot f}{p} \tag{1}$$

- b: 基線長 [mm]
- f: レンズの焦点距離 [mm]
- p: CCD イメージセンサー画素の大きさ [mm/pixel]
- d: 無限遠の結像位置 (k_{∞}) からの視差 [pixel]
- k_{∞} および α は 2 箇所以上の既知の距離におけるスポット光像の結像位置から最小二乗法により求める。

2.3 同軸系

コールドミラーは、赤外光を透過し可視光を反射する特性を持っている。この特性から図3のようにミラーに対してモノクロカメラとカラーカメラを鏡像関係になるように配置すると、プロジェクトから投影された赤外のレーザ光はミラーを透過しモノクロカメラで観測され、可視光はミラーで反射しカラーカメラで観測される。このようにしてモノクロカメラとカラーカメラで同じシーンを観測することができる。

ただし、赤外光はミラーを透過する際には屈折により、横に約1.06[mm]ほどずれるためその点を考慮してカメラを配置している。また、カラー画像はミラーの反射によって左右反転しているため再反転するための処理が必要となる。

2.4 計測スピード

図4は本センサの計測時間を表している。構築したセンサは2つのスレッドを並列処理している。一つ目のスレッドはカラー画像とモノクロ画像を取得するためのもので、二つ目のスレッドはカラー画像の反転と距離画像計算を行っている。モノクロ画像とカラー画像は200[fps]で取得しており、全ての処理は4.8[ms]で処理している。つまりこのシステムは200[fps]のスループット、4.8[ms]のレイテンシで動作している。我々が過去に提案したセンサ[4]と比べるとカラー画像を反転する処理を追加した点が異なっているが処理時間自体は変わっていない。

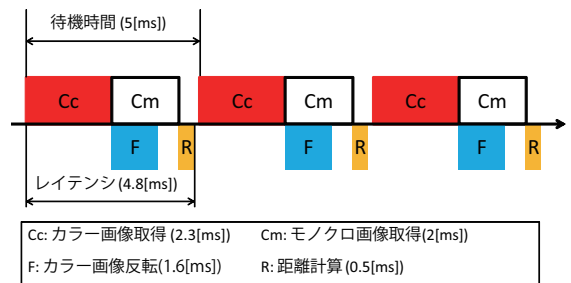


図 4 計測時間

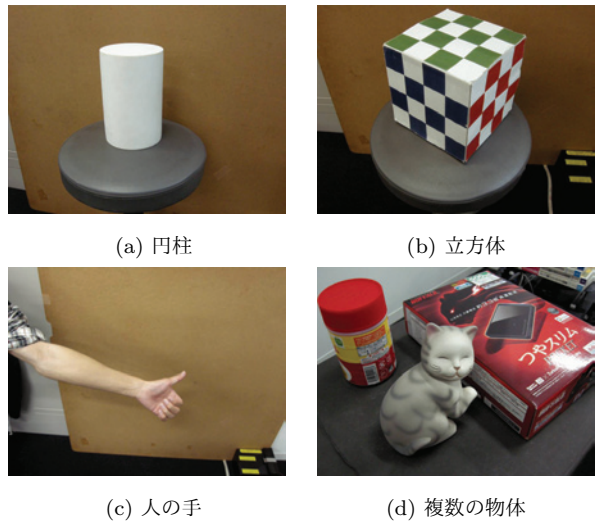


図 5 計測対象

3. 実験

3.1 計測例

構築したセンサを用いて、計測実験を行った。計測対象は図5の4種類とした。

計測結果を図6～9に示す。図6, 7の結果から平面や曲面の計測ができていることがわかる。また人の手のように光の反射が弱い物体であっても計測ができていることが図8の結果から確認できる。図5(d)のような複雑な形状を持つ対象を計測する場合、図9(a), (c)のようにスパースな距離画像では、大まかな形状しか取得することができないので距離画像のみの場合には何を計測しているのかを判断することは困難であるが、図9(b), (d)のようにテクスチャ情報を付加することでその判断が可能になる。このように距離画像のスパースさをカラー画像によって補うことができるため、カラー情報と距離情報、両方を取得することは有用であると言える。なお、距離値が部分的に取得できていない箇所が見られる。これはオクルージョンによりレーザが返ってきていない、または物体のエッジ部分にレーザが当たったため反射したレーザが弱く、検出が不安定になったためである。

3.2 距離画像の精度評価

提案するセンサでは、レーザプロジェクトを石山らのセンサ[3]で用いていた波長785[nm]、出力35[mW]

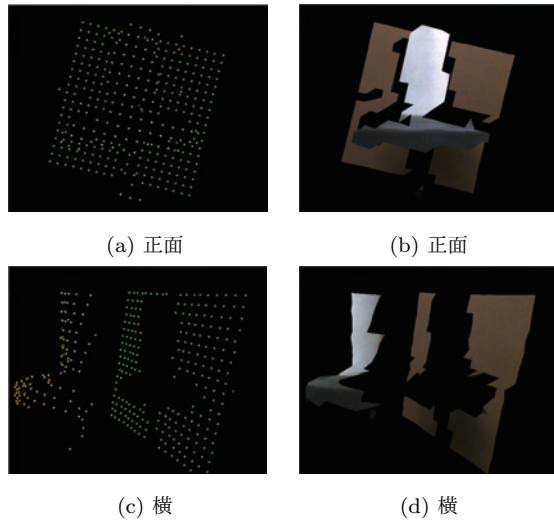


図 6 円柱の計測結果 (左: 距離画像のみ, 右: テクスチャ付距離画像)

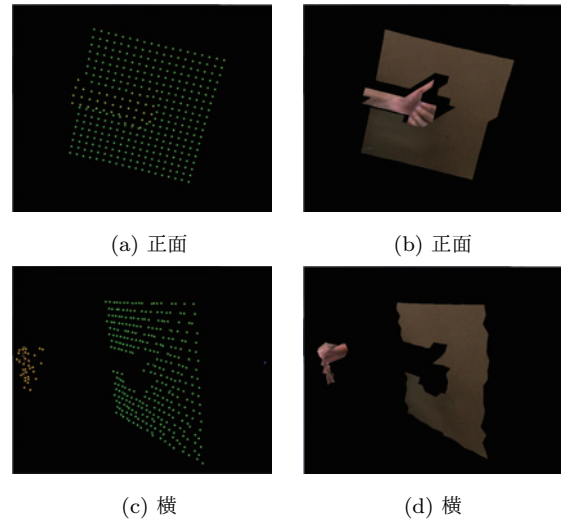


図 8 人の手の計測結果 (左: 距離画像のみ, 右: テクスチャ付距離画像)

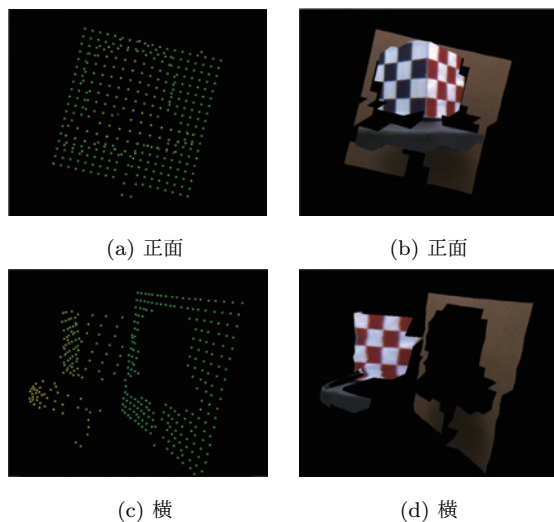


図 7 立方体の計測結果 (左: 距離画像のみ, 右: テクスチャ付距離画像)

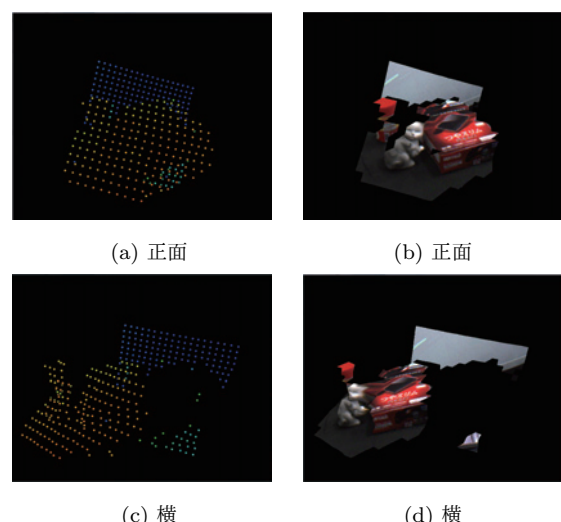


図 9 複数物体の計測結果 (左: 距離画像のみ, 右: テクスチャ付距離画像)

のものから波長 830[nm], 出力 150[mW] のものに変更している。そこで距離画像の計測精度を検証するために評価実験を行った。計測対象はセンサ光軸に垂直な平板とした。

計測した距離画像データを用いて平面フィッティングを行い、この平面からの距離を誤差と考え、各計測距離における標準偏差を求めたものを図 10 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。

$$\sigma_z = \frac{1}{\alpha} z^2 \sigma_k \quad (2)$$

σ_z : 距離の計測精度 [mm]

σ_k : スポット像の検出精度 [pixel]

σ_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。ほぼフィッティング曲線に沿う結果から、理論通りの精度が出ているといえる。

図 10 の結果から石山らのセンサに比べて本センサの精度が向上していることがわかる。本センサの構成より α を求め、式 (2) からスポット像の検出精度 σ_k を計算すると約 0.078[pixel] となった。同じように石山らのセンサにおける σ_k を求めると約 0.149[pixel] となるので本センサのほうがスポット像の検出精度が高いことがわかる。このことから計測精度が高くなったのはレーザの出力が大きくなったことによりスポット像が検出しやすくなったためであると考えられる。

3.3 同軸の評価

モノクロカメラとカラーカメラ間の視点のずれが解消され、同軸系センサが構築されていることを検証す

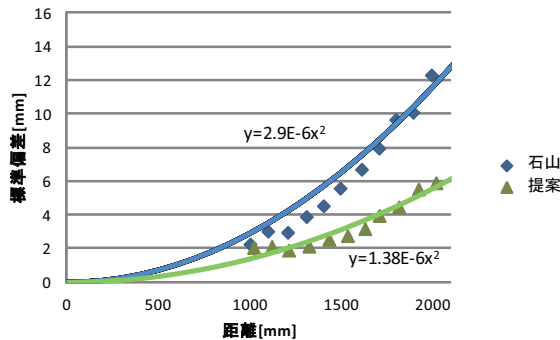


図 10 距離画像の計測精度

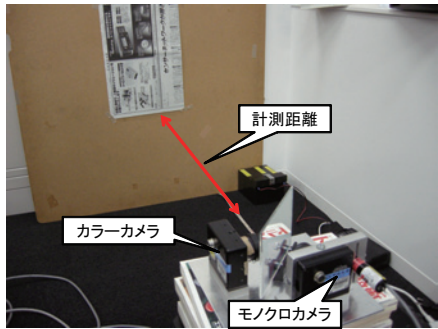


図 11 実験環境

るため、両カメラ間の画像の視差を評価した。図 11 に実験環境を示す。実験手順は次の通りである。まず本センサを使って計測対象（新聞紙が貼られた木の板）のモノクロ画像とカラー画像を取得する。次に両画像間の視差を計算する。最後に石山らのセンサでも同じようにして画像の視差を計算し、結果を比較する。

結果を図 12, 13 に示す。この結果から石山らのセンサに比べて本センサは縦方向、横方向の視差ともほぼ 0 になっていることがわかる。センサが同軸系になっている場合、視差は 0 になるので同軸系センサは正しく構築できていると言える。図 14 は石山らのセンサと本センサの計測結果の比較である。石山らのセンサの計測結果は前側の物体の模様が後ろ側の壁に映りこんでしまっているが、提案するセンサの結果では映りこみがなくなっている。この結果からも距離画像とカラー画像のずれが解消されていることがわかる。

4. 結論

本論文では距離画像とカラー画像を同軸で取得することができるセンサを構築した。このセンサは CCD モノクロカメラ、CCD カラーカメラ、レーザプロジェクタ、コールドミラーから構成されている。本センサは三角測量を用いて距離画像を計測し、200[fps] のスループット、4.8[ms] のレイテンシにより動作する。計測実験により本センサがモノクロカメラとカラーカメラ間でずれのない画像を取得することができていることを示した。

今後はセンサの計測範囲の拡大、計測のロバスト化、小型化、実応用への検討を行っていく。

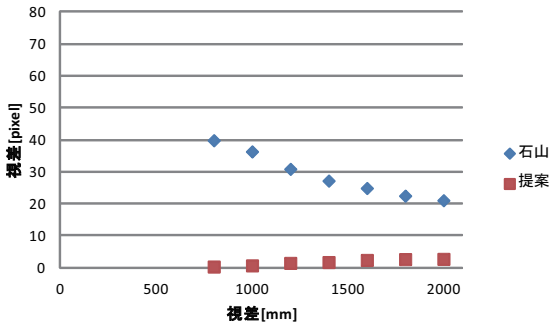


図 12 水平方向の視差

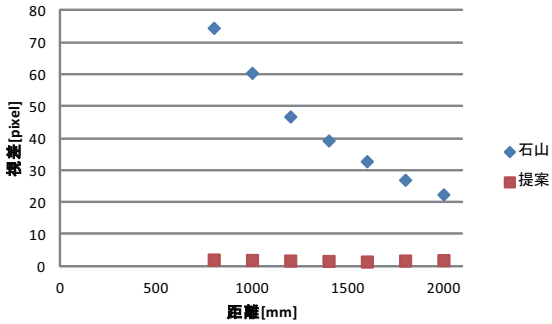
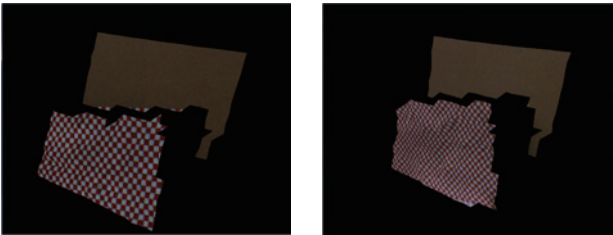


図 13 垂直方向の視差



(a) 石山のセンサ (b) 提案したセンサ

図 14 石山のセンサとの比較

参考文献

[1] F. Blais, “A review of 20 years of range sensor development,” Videometrics VII, Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE Volume 5013, pp.62-76, 2003.

[2] M. Tateishi, H. Ishiyama, and K. Umeda, “A 200Hz small range image sensor using a multi-spot laser projector,” Proc. of 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3022-3027, 2008.

[3] Hidetoshi Ishiyama, Kenji Terabayashi, Kazunori Umeda, “A 100Hz Real-time Sensing System of Textured Range Images,” Proc. of 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies, SP-SH-7, 2010.10.

[4] 内田 裕己, 寺林 賢司, 梅田 和昇, “テクスチャ付距離画像計測システムの高速化と同期機能の追加,” 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 3B3-2, 2011.12.