

マルチスリット光を用いた超小型距離画像センサの構築

○岩崎一也 寺林賢司 梅田和昇(中央大)

1. 序論

ロボットハンドが物体の把持動作を行う場合、対象物体の三次元形状を計測する必要がある。把持動作を行うために、小型距離画像センサを手先に搭載することで、近距離で精度の良い計測が可能であると考えられる。湯浅らはヒューマノイドの手先に搭載されたレーザレンジファインダによる高密度な三次元計測を実現している[1]。しかし、手首を回転させて計測を行うため、一度に広範囲の計測を行うことができない。長谷川らは、ネット状近接覚センサをロボットハンドの指先に搭載することで、近接から接触までのシームレスな物体の検出により、確実な物体把持を実現している[2]。しかし、物体把持に至るまでに、ロボットハンドと対象物体との大域的な位置合わせが必要である。

我々は、マルチスリット光を照射するレーザプロジェクタとCCDカメラを組み合わせた小型距離画像センサを構築し、ヒューマノイドが障害物を回避するシステムを提案した[3]。しかし、レーザプロジェクタとCCDカメラとの基線長が長いため、近距離での計測が困難である。また、ヒューマノイドの手先に搭載する場合、さらにセンサを小型化する必要がある。

本論文では、小型のCMOSカメラを用い、カメラとレーザプロジェクタとの基線長を短くすることで、近距離の計測を可能とし、超小型化を実現した距離画像センサを構築する。実験により、構築したセンサによる近距離での物体計測が可能であることを示す。

2. 超小型距離画像センサの構築

2.1 センサの原理

図1に構築する超小型距離画像センサのイメージ図を示す。センサは小型のレーザプロジェクタと小型のCMOSカメラから構成される。レーザプロジェクタはマルチスリット光を投影するものを用い、投影されたスリット光の画像をCMOSカメラによって取得する。スリット光像の座標値を取得し、三角測量の原理から距離を算出する。また、マルチスリット光を用いるため、各スリット光間で対応点問題が生じる。そのため、計測レンジを制限する。この時、レーザプロジェクタをCMOSカメラに対して回転させる[4]。これによって、図2に示すように各スリット光に割り当てられる画素数を増加させている。

2.2 構成部品

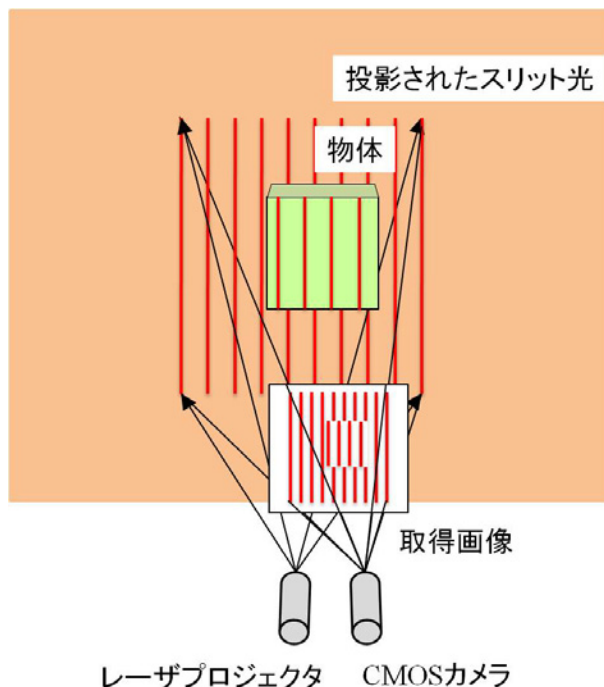


図1 センサの原理

本研究では波長 690[nm]、投光角 45[deg] のスリット光を 15 本投影するレーザプロジェクタ MINI-715L (Coherent) と有効画素数 648×488[pixel] の CMOS カメラ MO-S3788-3D (MISUMI Electronics) を使用する。スリット光の投光角は 45[deg]、隣接するスリット間の角度は 2.37[deg] である。CMOS カメラには焦点距離 3.9[mm] のレンズを用いる。また、外乱光の影響を減らすため、680[nm] 以下の波長をカットする SC-68 フィルタ (FUJIFILM) を用いる。さらに、近距離計測の場合、スリット光像が明るすぎるため、ND フィルタ (FUJIFILM) を用いることで明るさを抑えている。本研究で用いる CMOS カメラはアナログカメラであり、出力が NTSC 信号であるため、コンバータ DFG/USB2-lt (IMAGING SOURCE) を用いて画像をキャプチャする。

2.3 ハード構成

図3に構築した超小型距離画像センサを示す。センサは縦 15[mm]、横 30[mm]、奥行 47[mm] であり、重量は約 30[g] である。カメラとレーザプロジェクタとの基線長は 10[mm] とし、互いの光軸は平行にしている。また、レーザプロジェクタを CMOS カメラに対して 70[deg] 回転させている。

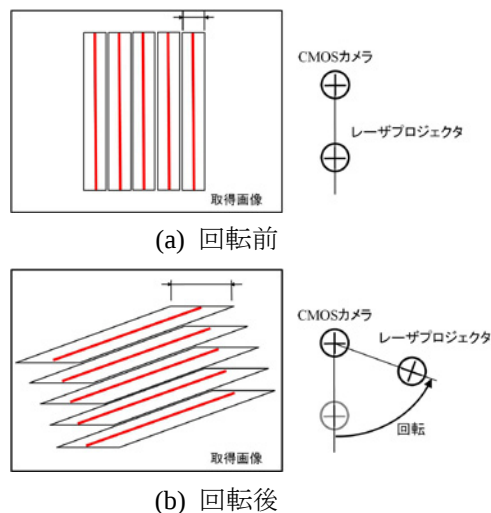


図 2 計測レンジの制限の緩和

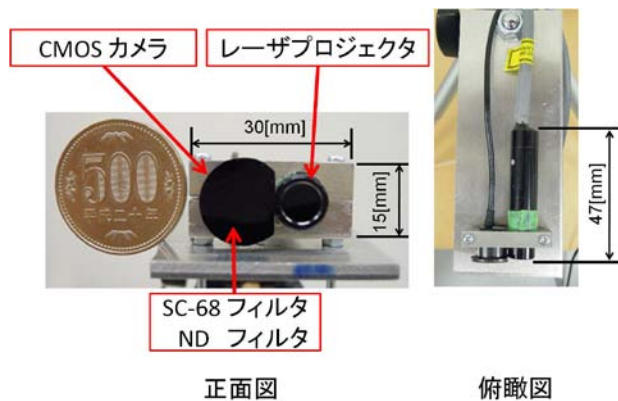


図 3 超小型距離画像センサ

2.4 センサのキャリブレーション

キャリブレーションの手順として、まず計測点の移動領域を設定する。本センサは近距離計測を目的としている。ここで、カメラのピンボケやレーザプロジェクタの仕様上、計測距離 100[mm]未満はスリット光像の結像位置の計測精度が著しく悪化する。そこで、計測距離 150[mm]のスリット光像の結像位置を初期位置とし、最小計測距離を 100[mm]とした。また、レーザプロジェクタの反射光の強さの関係から、最大計測距離を 200[mm]とした。この計測範囲より、計測点の移動領域を求める。三角測量の原理から、式(1)より、無限遠の結像位置からの視差 d が求まる[5].

$$d = \frac{b \cdot f}{p \cdot z} \tag{1}$$

- z : 対象までの距離[mm]
- b : 基線長[mm]
- f : レンズの焦点距離[mm]
- p : CMOS イメージセンサー画素の大きさ[mm/pixel]
- d : 視差[mm]

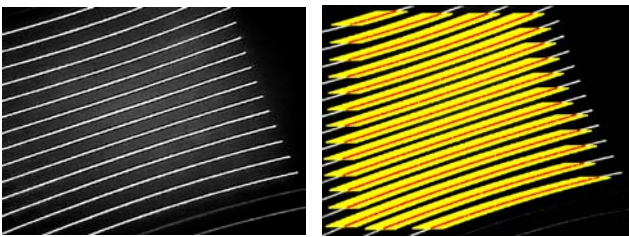


図 4 取得画像と移動領域 (計測距離 150[mm])

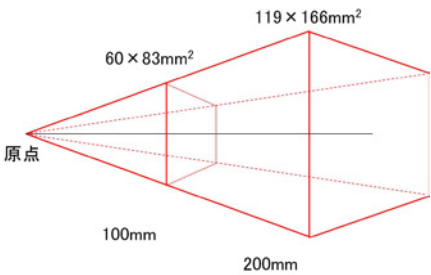


図 5 計測範囲

式(1)より、計測距離 100[mm]の位置での視差は約 69[pixel], 200[mm]の位置での視差は約 35[pixel]となる。そのため、各スリット光間に約 34[pixel]の移動領域を設定すればよい。ここで、各スリット間の幅は最小で約 65[pixel]である。そのため、移動領域が 65[pixel]を超えると、誤対応の問題が生じてしまう。初期位置から左右に 32.5[pixel]の移動領域を設定した場合、理論上は約 90[mm]～500[mm]の計測範囲となる。しかし、移動領域ではスリット光像の幅を考慮する必要がある。計測距離 100[mm]でのスリット光像の幅は最大で約 25[pixel], 計測距離 200[mm]の場合は、約 15[pixel]である。そのため、移動領域を初期位置から左(近距離側)に 40[pixel], 右に 20[pixel]と余裕を持たせて設定した。計測距離 150[mm]のカメラの取得画像及び設定した移動領域を図4に示す。この移動領域内で計測点の探索を行う。

次に、2 箇所以上の既知の距離におけるスリット光像の結像位置から、無限遠の結像位置およびセンサの内部パラメータを求める。キャリブレーションによって得られた値より、三角測量を用いて距離を算出する。

2.5 構築したセンサの仕様

本センサの計測範囲を図 5 に示す。隣接するスリット光間の距離は 100[mm]の位置で 4.1[mm], 200[mm]の位置で 8.3[mm]である。本センサの計測点数は約 1700 点であり、1 スリットあたり約 110 点である。また、中央のスリットにおいて、隣接する計測点間の角度は 0.25[deg]である。

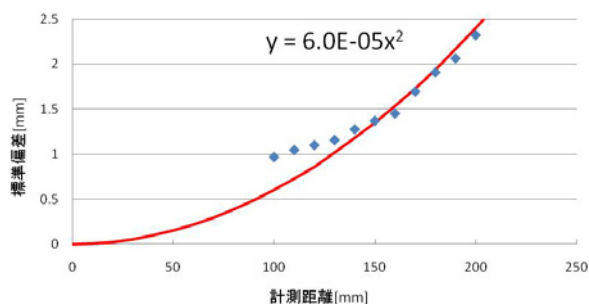


図 6 計測誤差

3. センサの精度

計測精度の評価として、各距離における計測誤差を評価した。センサの光軸に垂直な平面を計測し、得られた実距離画像に平面フィッティングを行って、フィッティング面からの距離の標準偏差を求めた。結果を図 6 に示す。図 6 より、計測距離が遠くなるにつれて計測誤差が大きくなっていることが分かる。三角測量の原理において、誤差の伝播則より計測誤差は距離の二乗に比例して大きくなる[6]。本センサにおいても、計測誤差が誤差の伝播則に従ったものと考えられる。

4. 物体計測実験

構築したセンサを用いて、物体の計測実験を行った。センサを壁から 150[mm]の位置に正対させ、物体を壁に接触した状態で配置した。計測対象物は平面、LAN ケーブル（直径 6[mm]）、白色の直方体（縦 50[mm]×横 25[mm]×奥行き 25[mm]）、ピンポン球（直径 40[mm]）とした。

計測結果を図 7～10 に示す。各図において、左グラフの縦軸は垂直方向の距離、横軸は水平方向の距離を表す。また、右グラフの縦軸は垂直方向の距離、横軸はカメラのレンズ中心を原点とした対象物までの光軸方向の距離を表す。図 7, 8 はそれぞれ平面と LAN ケーブルの計測結果である。平面の計測結果と比較すると LAN ケーブルのような紐状の物体を計測できていることが分かる。また、図 9, 10 は直方体とピンポン球の計測結果である。直方体やピンポン球のような球体も計測できていることが分かる。以上の結果から、近距離での物体計測において、計測対象の形状や大きさを計測できることが分かった。計測範囲を拡大することで、さらに大きな物体の計測も可能であると考えられる。

5. 結論

本論文では、小型の CMOS カメラとレーザプロジ

ェクタを用いた超小型距離画像センサの構築を行った。本センサは超小型の CMOS カメラを用い、基線長を短くすることで、距離画像センサの超小型化を実現した。さらに、短い基線長により、近距離での物体計測が可能となり、実験により本センサが近距離での物体計測を行うことができることを示した。

今後の展望として、より広角なレンズを用いることによる、計測範囲の拡大などがあげられる。

参 考 文 献

- [1] 湯浅 他：“ヒューマノイドによるレーザーレンジファインダを用いた三次元地図作成と障害物回避”，SI2007, 2B3-3, 2007.
- [2] 長谷川 他：“指先にネット状近接覚センサを装着したロボットハンド”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2A2-C22, 2010.
- [3] 黒木 他：“マルチスリット光を用いた小型距離画像センサによるヒューマノイドの障害物回避”，第 16 回ロボティクスシンポジウム, 1B1, 2011.
- [4] T.Kuroki, et al., “Construction of a compact range image sensor using multi-slit laser projector and obstacle detection of a humanoid with the sensor”, Proc. 2010 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 5972-5977, 2010.
- [5] 鈴木 他：“GPU を用いたアクティブ・パッシブ統合距離画像計測の高速化”，第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 3H1-1, 2010.
- [6] 立石 他：“マルチスポットレーザプロジェクトを用いた 200Hz 小型距離画像センサの構築”，日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.739, pp.499-505, 2008.3.

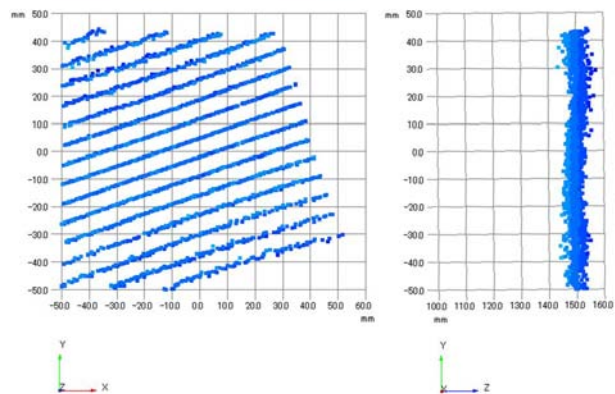


図 7 物体計測：平面

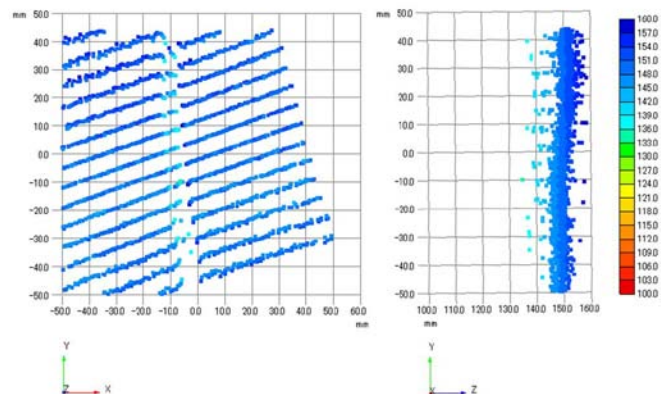


図 8 物体計測：LAN ケーブル

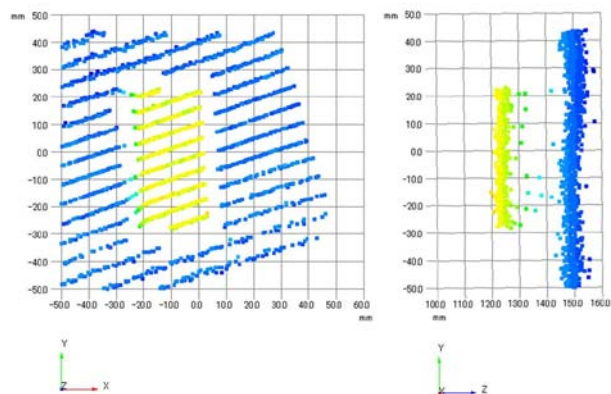


図 9 物体計測：直方体

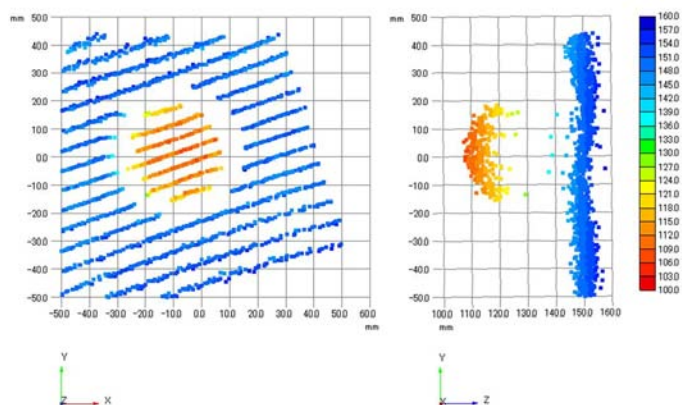


図 10 物体計測：ピンポン球