

屋外照明環境での 200Hz 距離画像計測

○石山英俊(中央大学) 梅田和昇(中央大学)

200Hz range image measurement in outdoor illumination environments

*Hidetoshi ISHIYAMA (Chuo University), Kazunori UMEDA (Chuo University)

Abstract — This paper discusses a high-speed range image sensor using a multi-spot laser projector with optical filters. The sensor can be used in outdoor illumination environments. Range image sensors generally use active illumination, and thus are not easy to use in the outdoor illumination environments. If they are available in the environments, their field of application extends. The proposed range image sensor consists of two optical filters; a low-pass filter and a band-pass filter, a commercially available laser projector and a CCD camera. Its effectiveness and utility of two filters are evaluated by experiments.

Key Words: range sensing, robot vision, range image sensor, multi-spot laser projector, over video rate, robustness for illumination environments

1. 序論

能動計測による三次元センシングにおいて、照射したエネルギーだけを入力データとすることが可能となれば、センサ本来の精度で距離画像計測ができる。計測対象が屋内にあるなど、照明環境を制御できる場合、最適な計測環境で計測を行うことができる。しかし、屋外作業ロボットの外界センシングや、遺跡など持ち出し不可能なものを計測対象とした場合、屋外照明環境での計測が余儀なくされ、その場合外乱光によるノイズの影響を受けてロバストに計測データを得ることが難しい。

この問題に対し、照射するエネルギーの強度を上げる方法や、光学フィルタで必要とする波長の光だけを透過する方法、光学系の工夫などによって外乱光に対処することが出来る[1]。

これまで本研究では市販のカメラを用いて高速距離画像計測を可能とするセンサを構築してきた[2]。屋外での使用に対し、このセンサは太陽光などの外乱光の影響を受け、照度 3000[lx]以上での距離画像計測は難しい。

以上の背景の下、狭帯域バンドパスフィルタをセンサ構成に組み込むことにより、太陽光下の照度においても距離画像を 200[Hz]で取得することが可能なセンサを、従来センサを改良して構築する。また、ロバストな計測を実現するための画像処理アルゴリズムの工夫を提案し、実験結果からその有効性を示す。

2. センサの構築

2.1 センサの構成

構築したセンサの外観を Fig.1 に示す。センサは高速度 CCD カメラと、その光軸に平行に取り付けたマルチスポットレーザプロジェクタによって構成されている。また、センサの内部構成を示すため、Fig.2 にカメラレンズ、フィルタを取り外した状態を示す。レンズの前面と背面にはそれぞれ、ローパス

フィルタ、狭帯域バンドパスフィルタが組み込まれている。

プロジェクタは Stocker Yale 製 Mini-519X を使用している。レーザの波長 785[nm]、出力 35[mW]、先端に取り付けた回折格子によって 19×19 の計 361 点を投影する。カメラは、最大 200[fps]で撮影可能な Point Grey Research 製 Dragonfly Express にレンズ TAMRON 製 13FM081R を取り付けて使用している。光学フィルタは、レンズの前面に波長 720[nm]以下を遮断するローパスフィルタ、HOYA 製 R72 と、レンズの背面に中心波長 785[nm]、半値幅 3[nm]の Edmund Optics 製 高性能レーザラインバンドパスフィルタを取り付けて使用している。

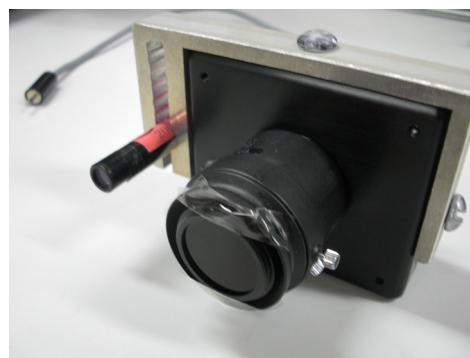


Fig.1 Constructed sensor



Fig.2 Decomposed status. From left, R72 filter, camera lens, band-pass filter, CCD camera.

2.2 計測原理

2.2.1 アクティブステレオ法による距離計測

カメラレンズ中心から、投影されたスポット光までの距離を計測するのに三角測量の原理を用いている[3]。カメラ光軸方向の距離 z は次式によって得られる。

$$z = \frac{b \cdot f}{p \cdot d} \quad (1)$$

b : 基線長[mm]

f : カメラレンズの焦点距離 [mm]

p : 画像素子の配置間隔 [mm / pixel]

d : 無限遠結像位置からの視差 [pixel]

ここで基線長はカメラレンズとプロジェクタ投影部との距離である。一枚の入力画像から距離画像を取得する手法については中澤らによって提案された手法[4]を用いている。

2.2.2 スポット光像の位置計算

カメラとプロジェクタの構成から、エピポーラ線をカメラ画像の横軸に平行にすることができる。スポット光像はこのエピポーラ線上を式(1)を満たしながら移動する。よってエピポーラ線上の画素に対して画像処理を行うことにより、簡単かつ高速に処理を行うシステムを構築できる。式(1)について、 b, f, p は定数であるので、視差 d を決めることにより距離 z を求めることができる。問題となる環境光の影響は光学フィルタによって遮断されている。屋内の照度 500[lx]でのカメラ画像を Fig.3 に示す。光学フィルタは R72、バンドパス両方を取り付けて撮影した。スポット光像を除いて背景が十分に暗いという特徴から、視差を求める際に必要なスポット光像位置には、輝度値の重心位置を用いればよい。また重心演算を用いることにより、サブピクセル精度でスポット光像の位置を計算することができる。

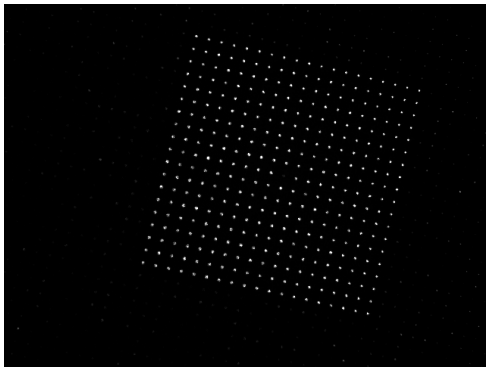


Fig.3 Camera image at 500[lx]

2.2.3 計測範囲

スポット光像の視差を求める際に、エピポーラ線上の画素値を利用している。Fig.3 に示したスポット光像のパターンに対して、一点ごとにエピポーラ線を設定するので、エピポーラ線が重なり対応点問題が生じる。これに対し、投影する格子パターンをカ

メラに対して回転させ、計測レンジの拡大化を図っている[2]。この場合の計測範囲は計算上 736[mm]以上となるが、余裕を持たせて 800[mm]以上と定めている。また、遠方へは無限遠まで誤対応が生じないが、スポット光像の輝度の低下を考慮し、最大計測距離を 2000[mm]までとしている。

2.2.4 センサのキャリブレーション

基線長は約 47.5[mm]、レンズ焦点距離 8[mm]、画像素子の間隔 7.4[μm]である。計測にはさらに視差が必要となる。ここでの視差は無限遠結像位置とスポット光像位置との差のことなので、式(1)における、 d を $(k_{\infty} - k)$ と書くことができる。ここで、 k_{∞} は無限遠での結像位置、 k はスポット光像の位置である。異なる複数の距離 z_i において k を求め、最小二乗法により次式によって k_{∞}, α を求める。

$$\begin{bmatrix} k_{\infty} \\ \alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{n \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2} \begin{bmatrix} n \sum z_i^2 k_i - \sum z_i \sum z_i k_i \\ \sum z_i \sum z_i^2 k_i - \sum z_i \sum z_i^2 k_i \end{bmatrix}$$
$$\alpha = \frac{bf}{p} \quad (2)$$

これより、距離計算に用いる α と k_{∞} を得る。本センサは距離 800[mm]と 2000[mm]においてそれぞれ 10 回各点の k を求め、キャリブレーションを行った。 k_{∞} はそれぞれのスポット光像によるものであるが、 α はどのスポット光像に対してもほぼ同じ値を示し、平均 49,797, min44,733, max51,500 であった。 b, f, p の設計値を用いて計算した値 51,351 と比べてやや小さい値である。

2.3 スポット光像位置探索アルゴリズム

従来[2]は処理の高速化のため、エピポーラ線に沿った探索ラインの幅は 1[pixel]としていた。しかし、カメラとプロジェクタの取り付け位置が厳密でないことや、カメラレンズの歪曲収差により、スポット光像は画像上を水平に移動せず、最大のもので計測範囲の 800[mm]から約 2000[mm]の間に画像の垂直方向へ 5[pixel]以上変動するものもある。このようなスポット光像に対し、従来の 1[pixel]幅の水平探索ラインでは全ての点を計測することが難しく、屋内環境で計測距離 2000[mm]では、画像中心付近の数点を除き、ほとんどのスポット光像を計測することができない。従来はこの問題に対し、カメラのゲインを 20[dB]まで上げることにより、スポット光像を膨張させて問題を解決していた。

後述するが屋外環境においてカメラのゲインを上げると、提案する光学フィルタの構成においても画像全体が飽和する。そのため、ゲインを上げずに計測できるよう、スポット光像の探索ライン設定を改善する必要がある。

そこで、探索ラインを 1[pixel]幅から 3[pixel]幅にし、さらに 800[mm]~2000[mm]間でのスポット光像の

位置から、この二点を直線で結ぶような傾きを考慮した探索ラインを設定するよう工夫した。これにより計測距離 2000[mm]において、全点での計測が可能となった。

レンズの歪曲収差について、OpenCV を用いて Zhang の方法[5]によりその程度を調べた。計算上、画像中心から最も離れたスポット光像は補正した画像に対して 4[pixel]垂直方向に歪む。このことからレンズの歪曲収差の影響を受けてスポット光像が画像上を移動する際、式(1)を満たさないことが予想され、正しく距離の計算ができなくなることが考えられる。しかし、補正にかかる時間が約 24.0[ms]であるため、補正を処理に加えるとセンサの動作速度が落ちる。距離計算に用いる画素のみに補正をかけ、高速化を図ることも可能であるが、今回は実装していない。

2.4 センサの速度

動作環境は PC Dell Dimension 8400, Pentium(R)4 CPU3.20[GHz], メモリ 1[GB], 開発環境は Microsoft VC++.NET2003 を利用している。スポット光像 361 点の距離計測の処理時間は約 2.2[ms]である。カメラが常に最大速度である 200[Hz]で動作することにより、このセンサは 200[Hz]で距離画像を取得することが出来る。

3. 屋外照明環境での距離画像計測

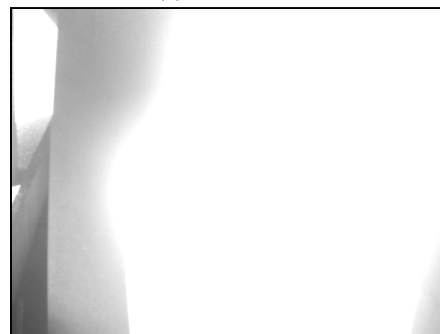
3.1 光学フィルタの評価

屋内照明環境において、カメラ画像は Fig.3 に示した通りである。従来の R72 フィルタのみのセンサ構成においても、同様にスポット光以外の環境光を遮断できる。次に屋外照明環境において、二枚の光学フィルタの評価を目的に、評価実験を行った。結果を Fig.4 に示す。Fig.4(a)は従来の R72 のみの構成によるカメラ画像、Fig.4(b)はバンドパスフィルタのみで構成したときのカメラ画像、Fig.4(c)は R72、バンドパスフィルタを重ねて構成したときのカメラ画像である。実験時の照度は 58,000[lx]であり、画像中央の明るい場所に太陽光が当たっている。カメラゲインは 0[dB]、露出時間 5[ms]、絞りは具体的な数字はレンズの仕様により不明であるが屋内環境での計測時と同じ値にして実験を行った。

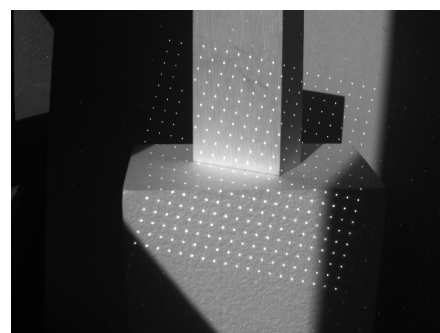
Fig.4 (a)は、画像全体にわたり画素値が飽和していて、スポット光像を判別することができない。また、Fig.4 (b)についても、従来の構成と同じく、スポット光像の判別ができない結果となった。使用したバンドパスフィルタはファブリペロー型誘電体多層膜バンドパスフィルタと呼ばれるもので、周期的な間隔で光を通す波長帯を持つ特徴がある。そのため、太陽光がこの波長帯において外乱光となったと考える。一方、Fig.4 (c)において、スポット光像が判別可能なカメラ画像が得られたと考える。前述したバンドパスフィルタの周期的な間隔で現れる透過波長帯は、バンドパス波長より短い波長に存在する。このことから、バンドパスと R72 を組み合わせたフィルタの構成の有効性が示された。



(a) With R72 filter



(b) With band-pass filter



(c) With both combined filter

Fig.4 Evaluation of filters

3.2 屋外照明環境での距離画像計測

屋内と屋外の計測を定量的に比較するため、次のような実験を行った。MDF(Medium Density Fiber)素材の平板をカメラの光軸に垂直に立て、カメラから平板までの距離を 50[mm]間隔で変化させながら 800[mm]から 2000[mm]までの距離画像を計測した。Fig.5 に実験のイメージを示す。Fig.5 は実験後に撮影したものであり、MDF 板が垂直になっていない。

実験日時は、2008 年 7 月 12 日 13:30 頃、天候は晴れであった。実験時の照度は次の通りである。板と平行に照度計を置いたときの結果は 15,500[lx]であった。太陽に向けて測定したところ 71,800[lx]であった。このときのカメラ画像は屋内における画像 Fig.3 と比べてスポット光像以外の領域が明るくなっており、環境光の影響を受けていることが伺えた。

まず計測距離 1000[mm]における、屋内照明環境と、屋外照明環境の平板の距離画像をそれぞれ Fig.6, Fig.7 に示す。カメラレンズ中心を原点に、画像右方向に x 軸、下方向に y 軸、画面奥行き方向に z 軸のカメラ座標系をとった。図はそれぞれ xz 平面で

表し z 軸方向に拡大して表示している。

Fig.6, Fig.7 について、照度 15,000[lx] 以上において 361 点全点を安定して計測できている。屋外での実験において、地面が水平でなく正確に板との位置関係を保つことが難しいため、板はセンサに対しやや傾いている。

この状況を踏まえて、距離画像の評価を行うことを考え、距離画像全点より平面近似を行い、その平面からの各点の距離の標準偏差を求めた。屋内環境と屋外環境とで求めた結果を Fig.8 に示す。横軸に距離画像の計測距離、縦軸に標準偏差を表している。

式(1)に誤差の伝播則を適用すると、次式が求まる。

$$\sigma_z = \frac{\sigma_k}{\alpha} z^2 \quad (3)$$

ここで、 σ_z, σ_k はそれぞれ計測距離の不確かさ、画像座標上でのスポット光像の位置の不確かさを表す。この式は σ_z が距離 z の二乗に比例することを表している。この理論に則して Fig.8 においても計測距離の二乗に比例して誤差が大きくなっていることがわかる。式(3)より、屋内におけるスポット光像の位置の不確かさは約 0.14[pixel]、屋外においては約 0.27[pixel] となる。屋外で精度が低下する原因として、スポット光像周辺の低輝度部が精度に関係していることより、その周辺部分が環境光により外乱を受け、計測精度が落ちたと考える。いずれにしても、屋内・屋外でこのセンサは平面検知や障害物認識など、ロボットビジョンとして利用可能である精度を持つといえる。

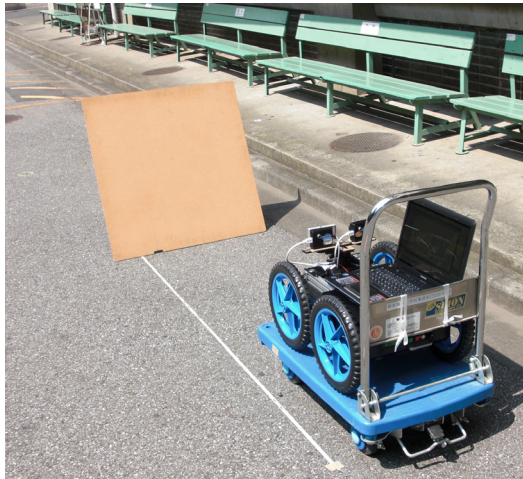


Fig.5 Image of experiment

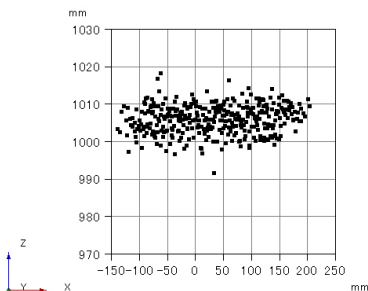


Fig.6 Indoor 500[lx]

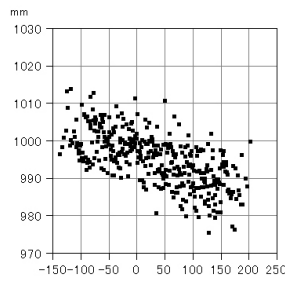


Fig.7 Outdoor 15,500[lx]

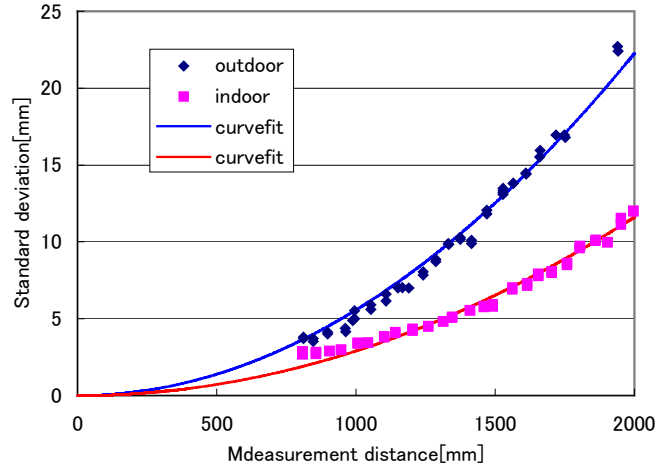


Fig.8 Standard deviation of range measurement

4. 結論

本論文では屋外照明環境でも距離画像を 200[Hz] で取得可能な小型高速距離画像センサを構築した。具体的には、ローパスフィルタに加えて、バンドパスフィルタをセンサ構成に組み込み、カメラ取得画像を改善することにより、屋外での距離画像計測を可能にした。また、実験により屋内、屋外での計測精度評価を行い、センサの有効性を示した。

今後は、高速距離画像計測を行う本センサの有用性を示すため、Fig.7 に示した車輪型移動ロボットに搭載し SLAM(Simultaneous Localization And Mapping) を実現する。それと同時にこのセンサの特徴を生かした新たな環境認識手法を提案していく予定である。

謝辞

本研究は、科研費(20500164)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] “ECO SCAN 距離画像センサ (測定原理)”
http://www.signal.co.jp/vbc/mems/app/item01_1.html
- [2] 立石雅輝, 石山英俊, 梅田和昇: “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), Vol.74, No.739, 2008.
- [3] 奥富正敏 他: “デジタル画像処理”, CG-ARTS 協会, pp. 251-282, 2007.
- [4] K. Nakazawa, C. Suzuki: “Development of 3-D robot vision sensor with fiber grating: Fusion of 2-D intensity image and discrete range image,” Proc. (IECON '91), pp.2368-2372, 1991.
- [5] Zhegyou Zhang, “A Flexible New Technique for Camera Calibration,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Interlligence, Vol.22, No.11, pp.1330-1334, 2000.