

汎用小型距離画像センサの構築

○立石雅輝（中央大学） 梅田和昇（中央大学）

Construction of a versatile compact range image sensor

*Masateru TATEISHI(Chuo University), Kazunori UMEDA(Chuo University)

Abstract— This paper discusses a range image sensor using a multi-spot laser projector. Range image sensors are generally large and expensive, and thus not easy to use. If a range image sensor becomes easy to introduce, its field of application will extend. This paper proposes a compact and inexpensive range image sensor which consists of a commercially available laser projector and a CCD camera. Its effectiveness is evaluated by experiments.

Key Words: range image sensor, multi-spot laser projector, calibration, robot vision, compactness

1. 序論

近年、距離画像センサは3Dモデリングをはじめ、ロボットビジョン、医用分野への応用など多目的に使用されている。しかし、市販の距離画像センサは、その大きさや価格などの面から、簡単に導入出来るものではない。このような背景から、距離画像センサの構築の研究はこれまで数多く行われてきている。その中で中澤らは、マルチスポット光を投影して距離画像を得る手法を提案している [1]。

本論文では、マルチスポット光を投影できる小型で安価な市販のプロジェクタを用いて距離画像センサを構築し [2]、その特性の評価を行なう。

まずはじめにセンサの距離計測の原理について述べる。次に構築したセンサ、改善点、及びその特性について述べ、最後に計測結果とその評価について示す。

2. 距離画像計測

構築するセンサはレーザプロジェクタと CCD カメラから構成される。プロジェクタはマルチスポット光を投影できるものを用い、CCD カメラによってスポット光が投影されている画像を取得する。スポット光を画像内で抽出し座標値を取得した後、その値を用いて三角測量の原理から各スポット光が投影された点への光軸方向の距離を算出する。ここでマルチスポット光を用いていることから、各スポット光の対応点問題が生じるが、これは各スポット光の計測レンジを制限することによって対処する。詳細については次章以降で述べる。距離は次式によって算出される。

$$z = \frac{\alpha}{k}, \quad \alpha = \frac{b \cdot f}{p} \quad (1)$$

- b : 基線長 (プロジェクタ中心とレンズ中心間の距離) [mm]
- f : CCD カメラのレンズの焦点距離 [mm]
- p : CCD 一画素の幅 [mm]
- k : 無限遠からの視差 [pixel]

式 (1) において b, f, p は独立して与える必要は無い。

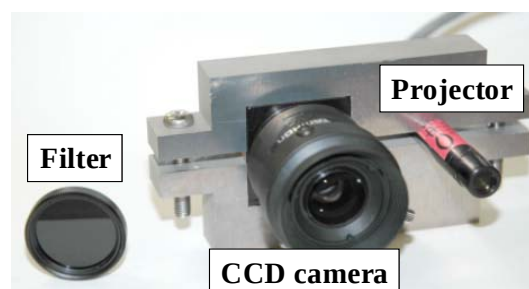


Fig.1 Constructed range image sensor

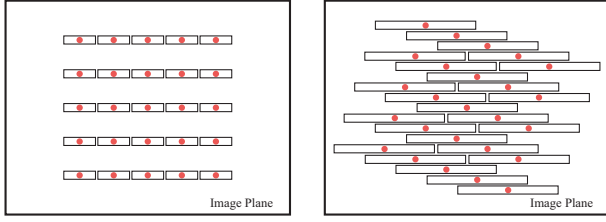
3. センサの構築

3.1 構成

Fig.1 に構築したセンサを示す。レーザプロジェクタには Moritex Mini-519X を用いている。波長 785nm 、出力 35mW で、先端に取り付けてある回折格子によって 19×19 の計 361 点を投影できる。隣接するスポット間の角度は 0.90° である。CCD カメラは IEEE1394 カメラの PGR Flea を用いており、 $f = 8\text{mm}$ のレンズを取り付けてある。このカメラの CCD 一画素の幅は $4.65\mu\text{m}$ である。レンズには Hoya R72 フィルタが取り付けられており、 720nm 以下の波長の光をカットすることで環境光の影響を低減させている。基線長は 40mm に設定してある。

3.2 計測レンジの改善

前章で触れたように、本センサにおける計測レンジは、Fig.2 に示すように対応点問題に対処するために制限されている。画像内において、各スポット光は距離に応じてエビボラ線上を移動する [3]。従って格子状にスポット光を投影している本センサでは、このように計測レンジを制限しないと、スポット光の移動量が大きいときに同じ行内で対応の一意性が保てなくなってしまう。この要因による計測レンジの制限を緩和するために、本センサでは Fig.3 に示すように CCD カメラをレーザプロジェクタに対して 18.5° 回転させる。これによって、Fig.2(b) に示すように各スポット光に割り当てられる画素数がスポット光間の距離の $\sqrt{10}$ 倍へ



(a) Without rotation (b) With rotation
Fig.2 Restriction for epipolar line of each spot

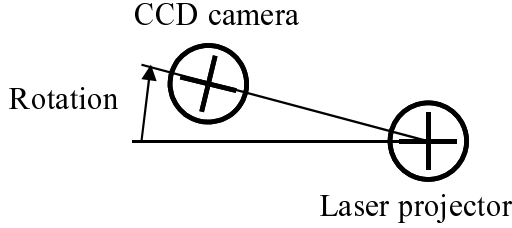


Fig.3 Rotation of CCD camera

と大きく増加している．この手法と同じ考えは [1] でも暗に導入されている．この操作は，結果的に計測レンジを大きくする，または，同じ計測レンジにおける計測精度を改善するとも言える．

3.3 センサの特性

画像内のスポット光の位置は，スポット像の重心位置を得ることによって，サブピクセルの精度で計測できる．精度を σ_k ，各スポット光に割り当てられる画素数を n とすると，距離はおおよそ n/σ_k の段階で計測できる．

計測レンジを z_1 と z_2 の間として，それぞれの視差を k_1 ， k_2 とすると， $n = k_1 - k_2$ となる．式 (1) より，

$$n = k_1 - k_2 = \frac{b \cdot f}{p} \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} \right) = \alpha \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} \right) \quad (2)$$

この式のセンサのパラメータのうち， p は CCD カメラとイメージボードを選択した時点で与えられる． f は全てのスポット光が観察できる視野角が得られるように決定される．従って，計測レンジが決まれば自動的に基線長 b が定まり，反対に基線長が決まれば計測レンジが自動的に定まることになる．

また，式 (1) から計測距離の精度が得られる．誤差の伝播則を適用することにより，

$$\sigma_z = \frac{p}{b \cdot f} z^2 \sigma_k = \frac{1}{\alpha} z^2 \sigma_k. \quad (3)$$

ここで， σ_z は計測距離の精度である．三角測量の原理からよく知られるように，計測距離の誤差は距離の二乗に比例する．式 (3) に式 (2) を代入すると，

$$\sigma_z = \frac{z_2 - z_1}{z_1 z_2} z^2 \frac{\sigma_k}{n}. \quad (4)$$

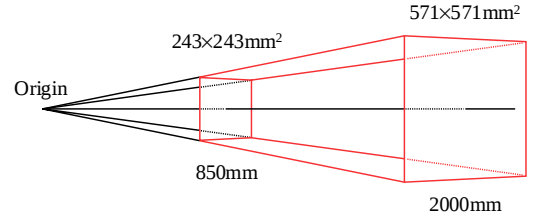


Fig.4 Measurement space of the sensor

z_2 を無限大にとると，式 (4) は

$$\sigma_z = \frac{z^2}{z_1} \frac{\sigma_k}{n} \quad (5)$$

となる．更に $z = z_1$ とすると，式 (5) は

$$\sigma_z = z_1 \frac{\sigma_k}{n} \quad (6)$$

となる．

これは最も近距離での分解能が，距離を n/σ_k で割ったもので得られることを示している．

また，このセンサは，計測時にレーザの表面反射の違いから濃淡画像を取得することができる．作成される画像は，距離濃淡画像 [4] やリフレクタンス画像 [5] と呼ばれる．

Fig.4 はセンサの計測範囲を表した図であり，隣接したスポット光間の距離が，850mm の位置で 13.4mm，2000mm の位置で 31.5mm である．計測レンジは 850mm 以上であるが，三角測量の原理による距離計測は，精度が距離の二乗に反比例するので，スポット像の明るさが小さくなることも加味し 2000mm までに設定している．

3.4 センサの精度

Fig.5 は，実験により得られたセンサの距離計測の誤差を示している．この図から，三角測量の原理によって精度が距離の二乗に反比例することがわかる．Fig.6 は，計測レンジの中央付近での計測距離と実際の距離との関係を示し，エラーバーはその距離での標準偏差を示している．本センサでは，対象物を距離 1000 – 2000mm 間の 1000mm 移動させると，CCD カメラで得られる画像ではスポット光が約 30[pixel] 移動する．このことと Fig.5 の結果，及び式 (1)，式 (3) より，構築したセンサはスポット像の位置計測誤差が 0.3[pixel] であることを表している．Fig.5, 6 で示されている精度は様々な応用が可能な値であり，例えばロボットへ搭載し障害物の回避などを行うことに使用可能である．

4. 実験

Fig.7 に屋外での計測の様子を示す．このときの天候は薄日が射している状態であったが，R72 フィルタの効果により，計測が可能である．

構築したセンサを用いて距離画像計測を行った．Fig.8 にその結果を示す．得られた距離画像は密ではないが，3D 形状を認識することができる．Fig.8(c) は距離濃淡画像であり，19 × 19 の解像度しかないが 2D の大まかな形状を認識することが可能である．

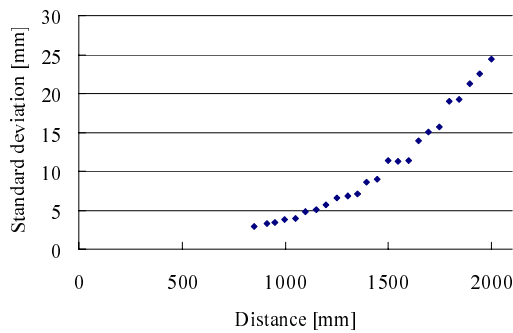


Fig.5 Standard deviation of the measured distance

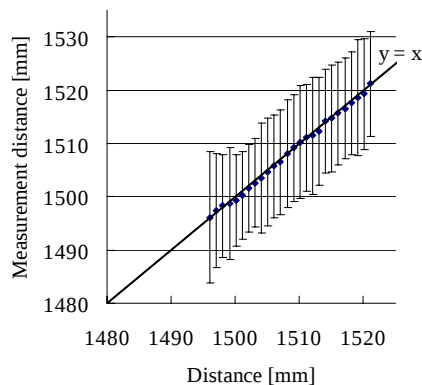


Fig.6 The relation between the actual and measured distances

Fig.9, Fig.10 に近距離及び遠距離での計測結果を示す．遠距離での計測は可能ではあるが，近距離での計測結果に比べ解像度，精度が低いことがわかる．

5. 結論

本研究では，汎用小型距離画像センサの構築について述べ，市販のレーザプロジェクタ及び CCD カメラを用いてセンサを実際に構築した．さらに実験により，本センサの有効性について示した．

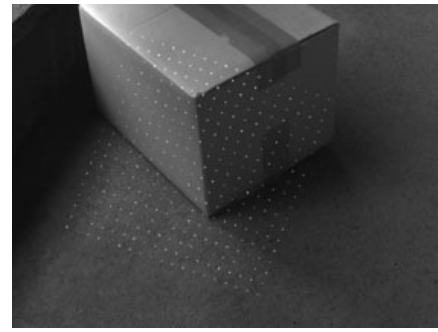
今後の展望としては，本センサを用いた 3D モデリングやアプリケーションへの応用などがあげられる．

謝辞

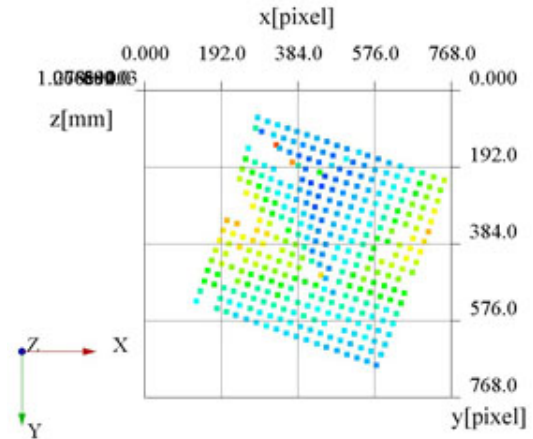
本研究の一部は，科学研究費補助金・若手研究(B)16700191 の補助により行われた．

参考文献

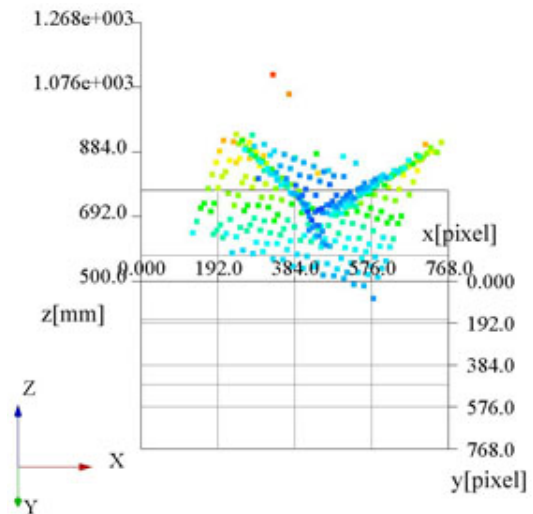
- [1] K. Nakazawa, C. Suzuki: "Development of 3-D robot vision sensor with fiber grating:Fusion of 2-D intensity image and discrete range image", Proc. 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON '91), pp.2368-2372, 1991.
- [2] Kazunori Umeda: "A Compact Range Image Sensor Suitable for Robots", Proc. 2004 Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3167-3172, 2004.



(a)With sunlight(6200 ~ 6300[lux])



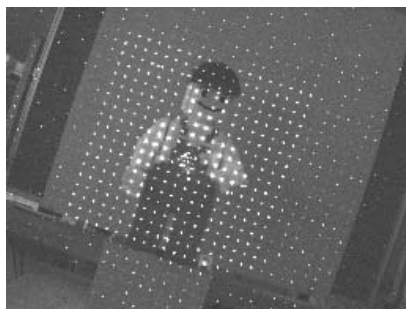
(b)Range image1



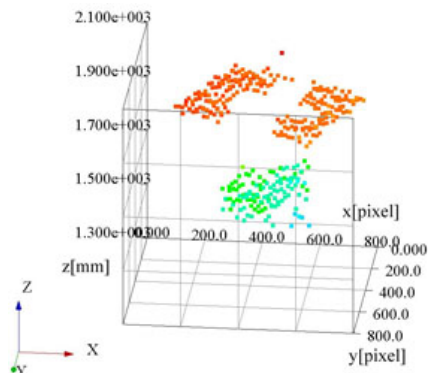
(c)Range image2

Fig.7 Effect of R72 filter

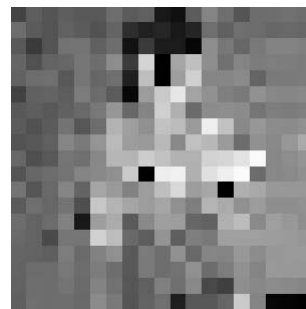
- [3] O.Faugeras: "Three-Dimensional Computer Vision", MIT Press, 1993.
- [4] Kazunori Umeda, Guy Godin, Marc Rioux: "Registration of Range and Color Images Using Gradient Constraints and Range Intensity Images", Proc. ICPR2004, 3, pp.12-15, 2004.
- [5] R. Kurazume et al.: "Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute", Proc. of Fifth ACCV, pp.99-106, 2002.



(a)Original image

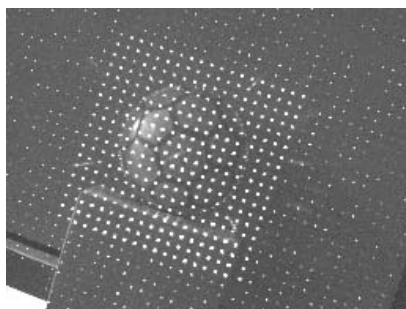


(b)Range image

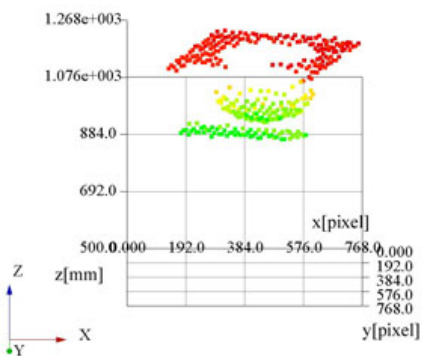


(c)Range intensity image

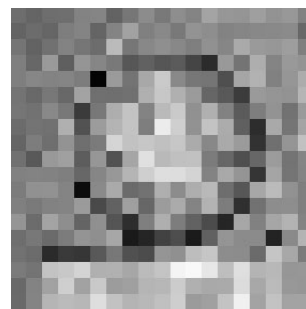
Fig.8 Example of an obtained range and intensity image: Doll



(a)Original image

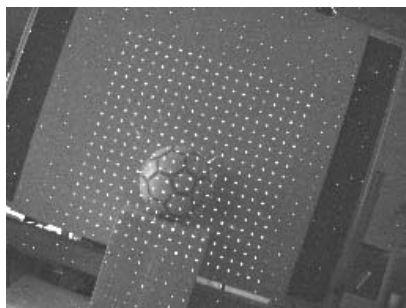


(b)Range image

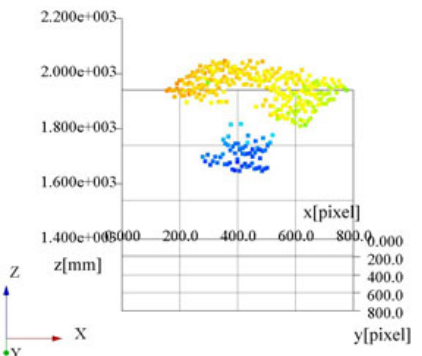


(c)Range intensity image

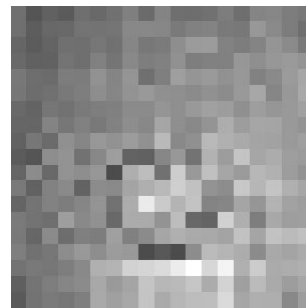
Fig.9 Example of an obtained range and intensity image: Soccer ball (at 1000mm)



(a)Original image



(b)Range image



(c)Range intensity image

Fig.10 Example of an obtained range and intensity image: Soccer ball (at 2000mm)