マルチスポットレーザプロジェクトを用いた 200 Hz 小型距離画像センサの構築*

立石 雅輝^{*1}, 石山 英俊^{*2}, 梅田 和昇^{*3}

A 200 Hz Compact Range Image Sensor Using a Multi-Spot Laser Projector

Masateru TATEISHI, Hidetoshi ISHIYAMA and Kazunori UMEDA^{*4}

^{*4} Department of Precision Mechanics, Chuo University,
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551 Japan

In this paper, a high-speed range image sensor using a multi-spot laser projector is constructed. Several high-speed range image sensors have been developed recently. Their sampling rate is around the video rate (30 Hz or so) and a faster sensor is required such as the 1 ms vision developed by Ishikawa for measurement of ordinary images. The proposed sensor has achieved 200 Hz measurement. It consists of a commercially available laser projector and a high-speed CCD camera. The distance to each projected spot is measured by triangulation. To achieve fast measurement, each spot image is searched in one line (epipolar line). The laser projector is rotated by 14 deg. and consequently, the number of pixels assigned to each spot is magnified by more than 4 times. The number of pixels of the constructed sensor is 361 and its measurement range is 800-2 000 mm. Although the acquired range image is sparse, the proposed sensor is thought to be adequate for several applications such as robot vision because of its high-speed imaging and compactness. Some characteristics such as measurement errors are discussed, and the effectiveness of the proposed sensor is verified by experiments.

Key Words: Sensor, Shape Measurement, Optical Measurement, Range Image Sensor, Multi-Spot Laser Projector, 200 Hz Fast Measurement, Real Time Vision, Robot Vision

1. は じ め に

距離画像センサは、3D モデリング、ロボットビジョン、産業応用などで重要性が高く、これまでに各種の計測手法が研究開発され、利用されてきている⁽¹⁾⁽²⁾。距離の計測原理は様々であるが、距離に応じて光路差が生じることを利用した手法（三角測量を利用した手法、焦点ぼけを利用した手法）と照射した光が戻ってくるのに要する時間あるいは位相差を利用する手法（Time of flight）が代表的である。

近年、ビデオレート以上に高速な画像入力が求められるようになってきており、高速なカメラに関する研究・開発が行われてきた。なかでも、石川ら⁽³⁾⁽⁴⁾による 1ms ビジョンは大きなインパクトを与えた。このような高速度カメラを実際のロボットに利用した研究には、高速移動するボールを三次元的に捕捉し打ち返すバッティングロボットの視覚への利用⁽⁵⁾や、パン・チ

ルトカメラを搭載したロボットのテクスチャのみでの移動物体トラッキング⁽⁶⁾などがある。

一方、距離画像センサでも、高速な画像入力が可能なものがいくつか提案されてきている。その一方式として、撮像素子を工夫することで、変調させた LED 光を照射してスキャンレスで多点で Time of flight の原理で距離画像を得るセンサが発表された⁽⁷⁾⁽⁸⁾。これらのセンサはビデオレート (30Hz) 程度の距離画像計測が可能である。また、ステレオカメラ⁽⁹⁾や、スポット光⁽¹⁰⁾、スリット光⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を走査して距離画像を得るものでも、高速計測が可能なのが提案されている。

一方、中澤らは、マルチスポット光を用いた距離画像センサを提案した⁽¹³⁾。マルチスポット光の生成には、ファイバーグレーティングを利用している。渡辺ら⁽¹⁴⁾は、マルチスポット光プロジェクトと高速度カメラを用いて、動作速度 1kHz 弱という高速なセンサを提案している。ただし、ロボットなど他機器への搭載に簡易な装置構成ではなく、一般的でない。

本研究でもこれらの研究と同様にマルチスポット光プロジェクトを用いる⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。市販の高速カメラ、プ

* 原稿受付 2007 年 8 月 30 日。

^{*1} 中央大学大学院理工学研究科(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) [現：富士フィルム(株)]。

^{*2} 中央大学理工学部。

^{*3} 正員、中央大学理工学部。

E-mail : umeda@mech.chuo-u.ac.jp

Fig. 1 Structure of the range image sensor using a multi-spot projector

ロジクタ, PC のみを用いて, 200Hz で動作する小型でロボットなどに利用可能な距離画像センサを構築する⁽¹⁶⁾.

2. センサの原理

2.1 マルチスポットレーザプロジェクトを用いた距離画像計測 本センサはレーザプロジェクトと CCD カメラから構成される。プロジェクトはマルチスポット光を投影し, 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。図 1 にセンサの構成を示す。スポット光像を画像内で抽出して座標値を取得し, その値から視差を求めて三角測量の原理により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。以下, 距離を光軸方向の距離の意味で用いる。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 (プロジェクト-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]

b, f, p は別々に与える必要は無く, α のみをキャリブレーションにより求めて与えれば良い。

2.2 レーザプロジェクトの回転 画像内において, 各スポット光像は距離に応じてエピポーラ線上を移動する⁽¹⁷⁾。本センサでは, エピポーラ線は画像の横軸にほぼ一致している。スポット光を格子状に投影しているため, 同じ行内で対応の一意性が保てなくなってしまう対応点問題が生じる。そこで, 計測レンジを制限することで, 図 2(a) に示すように, 各スポット光

Fig. 2 Restriction for epipolar line of each spot

Fig. 3 Rotation of laser projector

像の移動範囲の重複がないようにし, 対応点問題を回避する。

さらに, 図 3 に示すようにレーザプロジェクトを CCD カメラに対して回転させることで計測レンジに対する制限を緩和する。図 2(b) に示すように各スポット光像に割り当てられる画素数が回転しない場合より増加する。この工夫により, 計測レンジが広がる, あるいは (基線長を大きくして) 同じ計測レンジとするなら計測精度が改善されることとなる。これは, 元々使われていなかった画像領域を, 回転させることにより効率的に利用していることになる。ただし, 回転角が小さすぎると隣接する 2 点のエピポーラ線が近づきすぎて誤対応が生じうるので注意が必要である。

2.3 センサの特性

2.3.1 センサのパラメータの関係 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。 $n \equiv k_1 - k_2$ は各スポットに割り当てられる画素数を表す。式 (1) より次式が成り立つ。

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

隣接するスポット光間の角度が与えられれば, n を計算することができる。スポット光間の角度を d rad とする。また, 2.2 の手法により割り当て画素が増加する割合を m とする。このとき,

$$n = m \cdot \frac{d \cdot f}{p} \quad (3)$$

式 (2) および式 (3) より,

$$b \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} \right) = m \cdot d \quad (4)$$

センサのパラメータはこれらの式により関係づけられる。 p は CCD カメラ (と画像ボード) を選択した時点で与えられる。 f は全てのスポット光を観察するのに必要な画角から決定される。よって、計測レンジ (z_1 と z_2) と基線長 b の関係が式 (4) により与えられる。計測レンジが与えられれば基線長 b が定まり、反対に基線長が決まれば計測レンジが求められることになる。

スポット像の明るさは、距離の 2 乗に反比例する。よって、 z_2 はスポット像の明るさによって制限される。しかしながら、例えば対象物が鏡面である場合は、距離が大きくてもスポット像が明るくなることがあり得る。そこで、 z_2 を無限大とすることが、計測レンジをはずれることによる誤対応を防ぐ上で妥当であると言える。この時、式 (4) は次式のように簡単化される。

$$z_1 = \frac{b}{m \cdot d}. \quad (5)$$

2.3.2 距離計測の誤差解析 画像内のスポット光の位置は、スポット光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 とすると、距離はおおよそ n/σ_k の段階で計測できることになる。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、計測距離の精度 σ_z が

$$\sigma_z = \frac{1}{\alpha} z^2 \sigma_k. \quad (6)$$

で与えられる。誤差が距離の二乗に比例することが示されている。式 (6) に式 (2) を代入すると、

$$\sigma_z = \frac{z_2 - z_1}{z_1 z_2} z^2 \frac{\sigma_k}{n}. \quad (7)$$

z_2 を無限大とすると、式 (7) は

$$\sigma_z = \frac{z^2}{z_1} \frac{\sigma_k}{n} \quad (8)$$

となる。

$z = z_1$ の時、式 (8) は

$$\sigma_z = z_1 \frac{\sigma_k}{n} \quad (9)$$

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。

3. センサの構築

3.1 ハードウェア構成 構築したセンサの外観を図 4 に示す。小型であり、移動ロボットへの搭載なども可能である。レーザプロジェクトには StockerYale 製の 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。隣接するスポット光間の角

Fig. 4 Constructed range image sensor (left: laser projector, right: CCD camera. 100×70×73mm³, including the lens)

度は 0.90° である。CCD カメラは Point Grey Research 製の Dragonfly Express を用いている。このカメラは IEEE1394b, PCI Express と高速なインタフェースを用いて最大 200fps で画像入力が可能である。画素数は 640×480, CCD 一画素の幅は 7.4μm である。 $f=8\text{mm}$ のレンズに Hoya 製 R72 フィルタを取り付けており、720nm 以下の波長の光をカットすることで、室内における照明などの環境光の影響を低減させている。レーザプロジェクトと CCD カメラは平行に設置し、基線長は 47.5mm である。レーザプロジェクトの回転角は図 2(b) に示すように $\arctan(1/4)=14.0^\circ$ としている。これによって各スポット光像に割り当てられる画素数は $\sqrt{17}$ 倍と大きく増加している。またこのとき隣接する点のエピポーラ線の間隔は 4.1pixel で、誤対応は生じない。各スポット光に割り当てられる画素の数は式 (3) より約 70 である。

3.2 高速計測のための処理 200Hz での距離画像計測を実現するためには、CCD カメラで取得した画像の処理を 5ms 以内で行う必要がある。すなわち、図 5 に示すように、カメラが画像を取得している間に、その一つ前のフレームの画像を処理し距離画像を計算する。

距離を求めるにはスポット光像の位置を得る必要がある。スポット像はエピポーラ線上を探索すれば良い。既に述べたように、本センサのエピポーラ線は画像の横軸にほぼ一致しているので、スポット光像は画像内を水平方向に探索すれば検出できる。計算コストを減らすため、各スポットに対し、1 ラインのみで探索を行う。しきい値処理を行った後、重心位置を求め、スポット像の位置とする。以上の処理を用いて入力された画像から距離画像を求めるのにかかる時間は、Pentium4 3.2GHz, メモリ 1024MB の PC(DELL Dimension8400) を用いて 1ms 以内と十分高速である。

Fig. 5 Process flowchart

Fig. 6 Measurement space of the sensor

なお、式(1)の α はキャリブレーションにより各スポットごとに求めておく。 b, f, p の設計値を用いて α の値を計算すると、51351となる。一方、既知の距離に置かれた平面を複数の距離に対して計測することで各スポットごとに α を求めた結果、48227から55187までの値となった。

3.3 構築したセンサの特性

3.3.1 計測レンジ 構築したセンサの計測範囲を図6に示す。隣接したスポット光間隔の間隔は、距離800mmで12.6mm、2000mmで31.5mmである。基線長を47.5mmとしたことと、レーザプロジェクトを14°回転させていることより、スポット光像の探索制限を越えることによる誤対応が生じずに計測できる最短距離は式(5)より733mmと計算される。従って、本センサでは、多少の余裕を持たせて計測レンジを800mm以上としている。一方、遠距離は、スポット光像の明るさならびに計測精度が距離の二乗に反比例することから、良好な計測が出来るのは2000mm程度までである。

3.3.2 距離計測精度 図7, 8に、平板の距離を変えながら距離計測を行った時の各距離での計測値の平均と標準偏差を示す。距離50mmごとに得られた、361点の平均(図7)と標準偏差(図8)を表している。距離が偏りなく測定できていること、また式(6)に示すように誤差が距離の二乗に比例していることがわかる。

Fig. 7 Relation between the actual and measured distances

Fig. 8 Standard deviation of the measured distance

また、計測レンジの中央付近での計測結果を図9に示す。上記と同様に361点の平均と標準偏差を求めた結果で、エラーバーは標準偏差を示している。この結果からもセンサが偏りなく正確に計測できていることが分かる。

また、図8で得られている $4.39E-06$ と $\alpha=51351$ とを用いて式(6)よりスポット像の位置計測誤差 σ_k を求めると、0.225pixelとなる。

4. 実 験

4.1 距離画像計測例 構築したセンサを用いた距離画像計測例を図10, 11に示す。各図の(a)は計測対象をわかりやすくするためにフィルタを外して取得した画像である。計測対象は図10が $200 \times 200 \times 300 \text{mm}^3$ のスチロールのブロックと $60 \times 120 \times 200 \text{mm}^3$ の木材、図11が高さ約250mmの人形である。いずれも安定に距離画像が得られている様子がわかる。スポット光の数が361点と少ないため、得られた距離画像は密ではないが、三次元形状を大まかには認識することができる。

Fig. 9 Relation between the actual and measured distances (at the middle of the measurement range)

4.2 200Hz 計測の検証 次に本センサが 200Hz で動作していることを検証するための実験を行った。実験装置として紐と直径 90mm 弱のボールからなる振り子を用意し、センサに対して前後に揺らしてその重心位置を計測した。図 12 はフィルタを外して取得した画像である。振り子の紐の長さは約 350mm で、周期は約 1.2s である。図 13 に計測結果を示す。横軸は時間、縦軸は取得した重心位置までの距離を示す。また、図 14 は、図 13 の 1.2s から 1.4s を拡大した図である。5ms 毎に重心位置が計測されており、本センサが 200Hz で距離画像を取得できることがわかる。

200Hz の有効性を示すために、さらに実験を行った。図 15 に示すように、センサの前でボールを自由落下させ、距離画像を計測した。ボールの直径は約 70mm、背景の板までの距離は約 1300mm、ボールまでの距離は約 950mm で、ボールは距離画像センサの視野内を 150ms で横切り、その間に 30 枚の距離画像が得られた。図 16 に得られた距離画像のうち連続する 2 枚 (24, 25 フレーム) を示す。y 軸が鉛直下向きを示す。この時のボールの速度は約 2.86m/s であった。距離画像が各フレームで得られていること、また、ボールがかなり高速であるにも関わらず、200Hz の高速計測により距離画像の変化が小さい (ボールの移動量約 14.3mm) が示されており、高速計測の有効性が分かる。

5. お わ り に

本研究では、マルチスポットレーザプロジェクトを用いた小型距離画像センサを構築した。市販のレーザ

(a)Scene with projected spot lights

(b)Obtained range image

(c)Bird view

Fig. 10 Range image of rectangular parallelepipeds

プロジェクト、CCD カメラ、PC のみを用いて 200Hz という高速な距離画像計測を実現した。実験により、物体の概形を認識可能であること、また、200Hz での計測を実現していることを検証した。計測点数は 400 点以下と少なく対象物の精密なモデリングなどには向かないが、小型で高速の計測が可能であることから、本センサはロボットの視覚などに適していると考えている。

今後の展望としては、高速な距離画像入力が求められる用途に本センサを利用し、その有用性を示すこと

(a) Scene with projected spot lights

(b) Obtained range image

(c) Bird view

Fig. 11 Range image of a doll

が挙げられる。

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。

文 献

- (1) Besl, P., Active, Optical Range Imaging Sensors, *Machine Vision and Applications*, Vol.1, No.2 (1988), pp.127–152.

Fig. 12 An experiment to verify 200Hz measurement

Fig. 13 Center of gravity of the pendulum

Fig. 14 1.2~1.4s of Fig.13

- (2) Blais, F., A Review of 20 Years of Ranges Sensor Development, *Videometrics VII, Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, SPIE Volume 5013 (2003), pp.62–76.
- (3) Ishikawa, M., Massively Parallel and Ultra-high Speed Vision Chip and Its Applications, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.13, No.3 (1995), pp. 335–338.
- (4) Nakabo, Y., Ishii, I., Ishikawa, M., 1ms Target Tracking System Using Massively Parallel Processing Vision, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.15, No.3 (1997), pp.417–421.
- (5) Tsuji, T., Yamamoto, K., Ishii, I., Batting Robot for Hitting Ball at 160 km/hr Speed, *Proc. Robotics and Mechatronics Conference* (2006), 1A1-E11.

Fig. 15 Scene of measuring a falling ball with the constructed sensor

Fig. 16 Measurement of a falling ball

- (6) Oaki, J., Application of 1,000 fps High Speed Image Processing to Active Camera System -Tracking of Unspecified Moving Object under Ordinary Illumination and Cluttered Background- *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.23, No.3 (2005), pp.282-285.

- (7) Oggier, T. et al., 3D-Imaging in Real-Time with Miniaturized Optical Range Camera, *Proc. of the Opto-Conference* (2004).
- (8) Gokturk, S.B., Yalcin, H., Bamji, C., A Time-of-flight Depth Sensor, System Description, Issues and Solutions, *Proc. IEEE Workshop on Real-Time 3D Sensors and Their Use in conjunction with CVPR* (2004).
- (9) Point Grey Research Inc. <http://www.ptgrey.com/>
- (10) Beraldin, J.A., Blais, F., Rioux, M., Domey, J. and Courmoyer, L., A video rate laser range camera for electronic boards inspection, *Proc. Vision '90 Conference* (1990), pp.4-1-4-11.
- (11) Sato, K., Yokoyama, A. and Inokuchi, S., Silicon range finder - a realtime range finding VLSI, *Proc. Custom Integrated Circuits Conf.* (1994).
- (12) Kanade, T., Gruss, A. and Carley, L.R., A VLSI sensor based rangefinding system, *Robotics Research Fifth Int. Symp.* (1990), pp.49-56.
- (13) Nakazawa, K., Nakajima, M., Kobayashi, H., Development of 3-D Shape Measurement System Using Fiber Grating, *Trans. IEICE*, Vol.J69-D, No.12 (1986), pp.1929-1935.
- (14) Watanabe, Y., Komuro, T., and Ishikawa, M., 955-fps Real-Time Shape Measurement of a Moving/Deforming Object Using High-Speed Vision for Numerous-Point Analysis, *Proc. 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (2007), pp.3192-3197.
- (15) Umeda, K., A Compact Range Image Sensor Suitable for Robots, *Proc. 2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (2004), pp.3167-3172.
- (16) Tateishi, M., Umeda, K., A 200Hz small range image sensor, *Proc. Robotics Symposia* (2007), pp.240-245.
- (17) Faugeras, O., *Three-Dimensional Computer Vision* (1993), MIT Press.