

# 100 [Hz] テクスチャ付き距離画像計測システムの構築 と三次元マッピングへの応用

石山 英俊<sup>\*1</sup> 寺林 賢司<sup>\*2</sup> 内田 裕己<sup>\*1</sup> 梅田 和昇<sup>\*2</sup>

## Construction of a 100 [Hz] Sensing System of Textured Range Images and Its Application to Three Dimensional Mapping

Hidetoshi Ishiyama<sup>\*1</sup>, Kenji Terabayashi<sup>\*2</sup>, Yuki Uchida<sup>\*1</sup> and Kazunori Umeda<sup>\*2</sup>

In this paper, a compact high-speed range image sensor that can acquire a range image mapped with a color texture is constructed. The sensor consists of only commercially available products: a monochrome CCD camera, a color CCD camera, a laser projector, and two optical filters. The laser projector projects  $19 \times 19$  multi-spot lights. Using the laser projector and the monochrome CCD camera with the optical filters, range images with  $19 \times 19$ , totally 361 points are measured. As fast as 100 [Hz] measurement of a range image mapped with a color texture is achieved. Additionally, a three-dimensional (3D) mapping method using the constructed sensor is introduced. The performance of the constructed sensor and the 3D mapping method are evaluated by experiments. It is shown that the constructed sensing system can acquire 100 [Hz] real-time textured range images and that it can be applied to 3D mapping by using range and color information.

**Key Words:** Range Image Sensor, Multi-Spot Laser Projector, Texture Mapping, Real-time Vision, 3D Mapping

### 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ている。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]。製品としての距離画像センサも、すでに市場にて求めることができる。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。

Umeda [2] はロボットへの搭載を考え、小型化、低価格化、特に高速化の点から、市販のカメラを用いた小型距離画像センサを構築した。このとき構築されたセンサの速度は 30 [Hz] であった。Watanabe ら [3] は独自に開発した高速ビジョンシステムを用いて、955 [Hz] での距離画像計測を実現している。両者の計測手法には Nakazawa ら [4] が提案したものが用いられている。

立石ら [5] は、高速度カメラを用いて 200 [Hz] での距離画像計測を実現した。速度は、市場の製品が主流とするビデオレートの 6 倍以上である。このセンサは、速度の面で Watanabe ら

のセンサより劣るが、計測範囲が広く、小型軽量であることから移動ロボットへの搭載が見込める点で利点がある。特に、市販製品のみを用いて構築しているため、実装における汎用性が高い。

距離画像の応用に、ロボット分野では 3D モデリングや環境マッピングなどがあり、活発な研究が行われている [6]。Popescu ら [7] は、16 点と解像度の低い距離画像を用いて、連続して取得した距離画像から、対象の 3D モデリングを実現している。ここで使用したセンサは、同時にカラーテクスチャをマッピングする機能を備えている。解像度の低い距離画像情報のみを用いて、距離画像同士の位置合わせ（レジストレーション）を行うことは困難であるが、テクスチャ情報を利用すれば、レジストレーション問題を解くことができる。レジストレーションに限らず、テクスチャは有用な情報と言える。

これらの背景から、本研究では立石らのセンサを基に、カラーテクスチャを取得する機能を加え、高速なテクスチャ付き距離画像計測システムを構築する。また、本センサの応用として外界の三次元マッピングを行う。

### 2. センサの構築

**Fig. 1** に構築したセンサの外観を示す。レーザプロジェクタは多点のスポット光を投射する小型のもので、モノクロカメラに金具で固定されている。モノクロカメラのレンズには、レーザの波長のみを透過するように、前面にローパスフィルタ、背

原 2010 年 10 月 17 日

<sup>\*1</sup>中央大学大学院理工学研究科

<sup>\*2</sup>中央大学理工学部

<sup>\*1</sup>Graduate School of Science and Engineering, Chuo University

<sup>\*2</sup>Faculty of Science and Engineering, Chuo University

■ 本論文は有用性で評価されました。

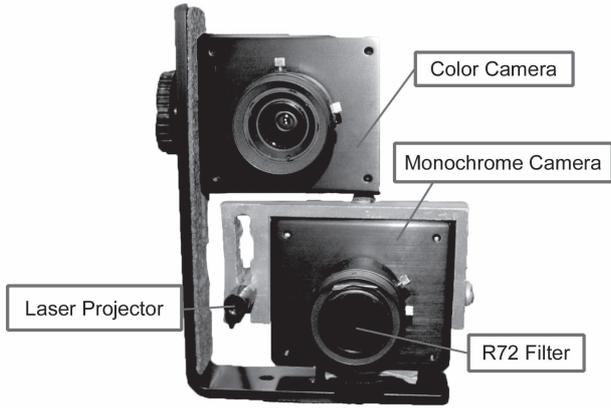


Fig. 1 Constructed sensor

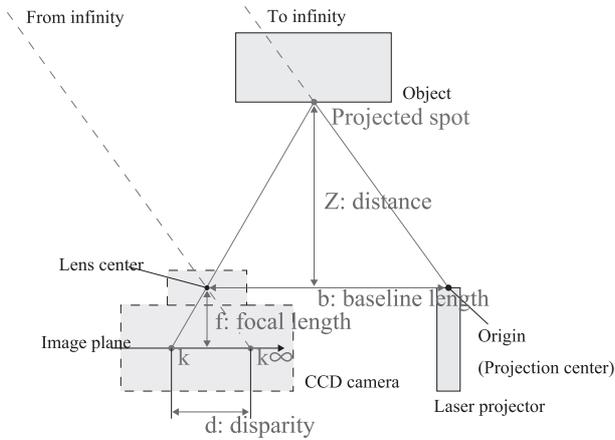


Fig. 2 Measurement model

面にはバンドパスフィルタが取り付けられている。一方、カラーカメラは距離画像センサ上部にカメラ用フレームで固定されている。

### 2.1 距離計測原理

本センサの距離計測には、三角測量の原理を用いている。Fig. 2 にモノクロカメラとプロジェクタを俯瞰した模式図を示す。この図より、距離  $Z$  に関して次式が成り立つ。

$$Z = \frac{\alpha}{k - k_{\infty}}, \quad \alpha = \frac{b \cdot f}{p} \quad (1)$$

$k$  は対象で反射したスポット光の結像位置、 $k_{\infty}$  は対象を無限遠と仮定したときのスポット光の結像位置であり、 $k - k_{\infty}$  が視差となる。なお、これらの単位は pixel である。また、 $b$  は基線長、 $f$  は焦点距離、 $p$  は一画素の幅である。 $b$ 、 $f$ 、 $p$  はセンサに固有の定数であり、距離を算出する際には  $\alpha$  とまとめて考えればよい。

### 2.2 距離計測に必要なパラメータの計測

式 (1) を用いて距離  $Z$  を算出するには、 $k_{\infty}$  と  $\alpha$  をあらかじめ求めておく必要がある。既知の距離  $Z$  とそれに対応するスポット像の位置  $k$  から次式が得られる。

$$Z \cdot k_{\infty} + \alpha = Z \cdot k \quad (2)$$

この式を異なる二つ以上の距離において求めて連立することで

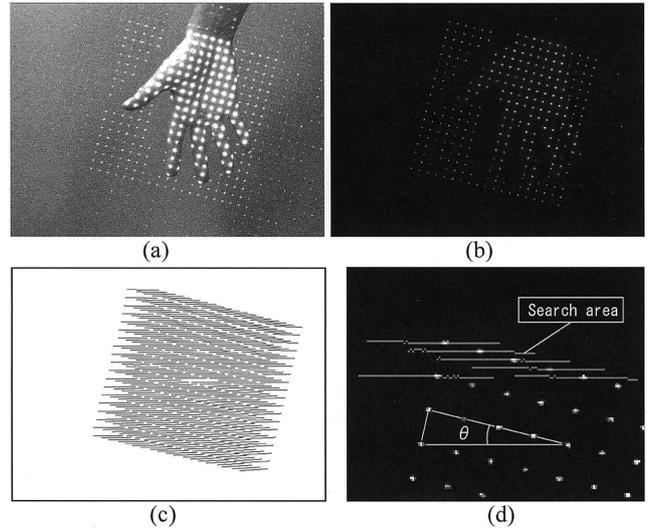


Fig. 3 Monochrome CCD camera image: (a) Original image, (b) With R72 and band-pass filter, (c) Movement of spots (between 500 [mm] and 1,000 [mm]), (d) Magnified image of (b)

解を求めることができる。本論文では、計測誤差を低減するため、 $Z$  と  $k$  の対応を多数とり、最小二乗解を求める。距離  $Z_i$  とスポット像の位置  $k_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) の対応から式 (2) を得て連立させると

$$\begin{bmatrix} Z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ Z_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{\infty} \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \cdot k_1 \\ \vdots \\ Z_n \cdot k_n \end{bmatrix}$$

が成り立つ。この式より、最小二乗解は

$$\begin{bmatrix} k_{\infty} \\ \alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} n \sum Z_i^2 k_i - \sum Z_i \sum Z_i^2 k_i \\ \sum Z_i^2 \sum Z_i k_i - \sum Z_i \sum Z_i^2 k_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$D = n \sum Z_i^2 - \left( \sum Z_i \right)^2$$

で与えられる。

### 2.3 マルチスポット光を用いた距離画像計測

Fig. 3 は本センサの計測時におけるモノクロカメラ画像を示している。マルチスポット光の像の並びは画像に対して回転している。これは、本センサでは計測範囲を制限することで対応点問題を回避しているが、この回転によって計測範囲を広げるためである（詳細は文献 [5] を参照）。スポット像 4 点ごとに水平となるようプロジェクタを  $\theta = \arctan(1/4)$  だけ回転させて固定している。これにより、回転しない場合に比べ、各点の距離計測に割り当てられるエピポーラ線の長さが  $\sqrt{17}$  倍になる。

スポット像の検出には、エピポーラ拘束によりスポット像が画像に対して水平に移動することを利用する。Fig. 3 (c) に示した領域は、対象物までの距離を変えたときにスポット像の重心が移動する軌跡を中心に幅 3 [pixel] で作成した領域である。このスポット像の移動領域における輝度値の重心を求め、スポット像の位置を大まかに特定し、さらに求めた位置の周辺  $7 \times 7$  [pixel]

の輝度値を用いて重心演算を行い、これを検出位置とする。検出位置を  $k$  として式 (1) に代入することにより、スポット像までの距離  $Z$  を計算できる。以上の処理をマルチスポット光に対して適用することで、一枚の画像から距離画像を取得できる (Fig. 3 (b) 参照)。

#### 2.4 テクスチャマッピング

テクスチャマッピングを行うには、前処理として、得られた距離画像の点群に対し面を定義する必要がある。点群に面を張るメッシュ作成には、ドロネー三角形分割が用いられることが多い。ドロネー三角形分割は、不規則な分布の点群に対しても適用可能な強力な手法であるが、計算コストがかかる。実際、本センサに実装したところ、100 [Hz] での処理は実現できなかった。そこで、本センサのスポット像の並びが規則的であることを利用して、単純に隣接する三点を用いて三角形を定義することとした。これをすべての点について行い、あらかじめ面を定義しておく。

テクスチャマッピングは、面を構成している三角形の各頂点に、対応するテクスチャ座標を指定することで行う。指定したテクスチャの三角領域の線形補間によって三角形の内部への塗りつぶしが行われる。

距離画像の点とカラーテクスチャ上の投影点との対応をとるには、透視投影行列を用いる [8]。透視投影行列は、ある三次元点と、そのカメラ画像上の投影点との関係を記述する  $3 \times 4$  の行列である。透視投影行列を

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \quad (4)$$

とおくと、ある三次元点  $\mathbf{X}_w = (X_w, Y_w, Z_w, 1)$  とその投影点  $\mathbf{m} = (u, v, 1)$  との間に

$$\mathbf{m} \sim \mathbf{P} \mathbf{X}_w \quad (5)$$

が成り立つ。 $\sim$  は両辺が定数倍の違いを許して等しいことを示す。

透視投影行列  $\mathbf{P}$  を求めるには、センサより求められるスポット像の三次元座標と、それに対応するカラーカメラ画像上の投影点の座標を多数の点で与えればよい。 $\mathbf{P}$  の成分が以下の式より求められる [8]。

$$\mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{q}. \quad (6)$$

ここで、

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{21} & \cdots & p_{33} \end{bmatrix}^T, \\ p_{34} = 1, \\ \mathbf{A} = \left( \mathbf{B} \mid \mathbf{C} \mid \mathbf{D} \right), \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_{w2} & Y_{w2} & Z_{w2} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_{w2} & Y_{w2} & Z_{w2} & 1 \\ \vdots & & & \end{bmatrix}, \\ \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -u_1 X_{w1} & -u_1 Y_{w1} & -u_1 Z_{w1} \\ -v_1 X_{w1} & -v_1 Y_{w1} & -v_1 Z_{w1} \\ -u_2 X_{w2} & -u_2 Y_{w2} & -u_2 Z_{w2} \\ -v_2 X_{w2} & -v_2 Y_{w2} & -v_2 Z_{w2} \\ \vdots & & \end{bmatrix}, \\ \mathbf{q} = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 & \cdots \end{bmatrix}^T.$$

#### 2.5 構築したセンサ

構築したセンサを以下に示す。レーザプロジェクタには StockerYale 社 Mini-519X を使用している。レーザ波長は近赤外の 785 [nm]、出力は 35 [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  $19 \times 19$  の合計 361 点のスポット像を照射する (Fig. 3 (b) 参照)。隣り合うスポット光線のなす角は  $0.90^\circ$  である。モノクロカメラ、カラーカメラには Point Grey Research 社 Dragonfly Express を使用している。カメラの画素数は  $640 \times 480$  (VGA)、一画素の幅は 7.4 [ $\mu\text{m}$ ] である。レンズには TAMRON 13FM08IR を用いている。焦点距離 8 [mm] で、画角は水平  $34.5^\circ$ 、垂直  $25.7^\circ$  である。モノクロカメラには、レンズ前面に HOYA 社 R72 フィルタ、レンズの背面に Edmund optics 社 785 [nm] バンドパスフィルタを取り付けている。モノクロカメラとレーザプロジェクタとの基線長は 47.5 [mm] としている。なお、距離画像計測部に関しては、バンドパスフィルタを追加した以外は文献 [5] から変更されていない。

センサの大きさは幅 130 [mm]  $\times$  高さ 157 [mm]  $\times$  奥行 70 [mm]、また重量は金具を含め、約 700 [g] である。

すべての画像処理は、PC: DELL XPS XPS720 (Core2 Extreme CPU Q6850 @ 3.00 [GHz], DRAM 4.00 [GB]) を用いて行う。PC と 2 台のカメラとは一枚の IEEE1394b PCI Express Card を介して接続されており、2 台同時に動作させた場合の最大速度は 100 [Hz] である。

### 3. 三次元マッピング

構築したセンサの応用として、外界の三次元マッピングを行う。本センサで得られる距離画像は粗いことから、三次元マッピングに多用されている ICP 法 [9] は利用が困難である。また、三次元的な形状の特徴がない対象 (例えば平面) では ICP 法は利用できない。そこで、本センサでカラー画像が同時に取得できることを生かした手法を、Morisset ら [6] の手法を基にして構築した。手法の流れは次のとおりである。

センサの位置を変えて計測された 2 枚のテクスチャ付き距離画像が与えられているとする。まず、2 枚のカラー画像 (テクスチャ画像) の間の特徴点の対応を求める。次にカラー画像の特徴点の三次元座標を距離画像から求める。これによって特徴点

間の対応が三次元で与えられる。そこで、対応点間の距離の 2 乗和を最小化する問題を解くことで 2 枚のテクスチャ付き距離画像のレジストレーションを行う。レジストレーション後、重ね合わせた距離画像同士を統合する。統合した距離画像と次のフレームで計測した距離画像とで上記の処理を反復して行い、すべてのフレームを用いて統合した距離画像が計測シーンの三次元マップとなる。

以下、それぞれのステップの詳細を説明する。

### 3.1 SIFT を用いた対応づけ

2 枚のカラー画像間の対応を求めるには、SIFT [10] を用いる。構築したセンサは 100 [Hz] と高速な計測を行うため、フレーム間の画像変化は小さく、この処理で多数の対応点を求めることができる。

### 3.2 二次元から三次元への拡張

距離画像同士をレジストレーションするためには、三次元空間での対応をとる必要がある。本センサシステムは対象の距離画像を取得することができる。二次元のカラー画像を距離画像にマッピングすることで SIFT 特徴点を三次元点に拡張する。具体的には、SIFT 特徴点と光学中心を結んで作られるカラーカメラの視線と距離画像を構成している三角メッシュとの交点の三次元座標を計算する。

### 3.3 三次元対応からのレジストレーション

前フレームでの距離画像を  $P = \{p_i\}$ 、現フレームでの距離画像を  $X = \{x_i\}$  とする。このとき  $p_i$  に対応する点  $x_i$  を同一の添え字で表す。対応点間の距離の 2 乗和を最小とするレジストレーション問題を考えたとき、その評価関数は次式となる。

$$f(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{R}p_i - \mathbf{t}\|^2. \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{R}$  は  $3 \times 3$  の回転行列、 $\mathbf{t}$  は並進ベクトルを表す。 $N_p$  は対応の総数である。この最小化問題を四元数を用いた手法で解く [9]。このとき、SIFT 特徴の対応には誤対応が含まれ、そのまま最小化問題を解くと、得られる回転行列、並進ベクトルの誤差が大きくなる。そこで、ロバスト推定の一手法である LMedS 推定 [11] を適用して誤対応を除去してこの処理を行う。LMedS 推定の評価対象は、対応点間の距離である。

### 3.4 誤差だ円体を用いた統合

レジストレーションを行い、距離画像を重ね合わせていくことで三次元マップが得られるが、この際、フレーム間における誤差が累積する。距離画像データが膨大になるという問題がある。そこで、誤差だ円体を用いて距離画像データを統合する。誤差だ円体とは、計測した点を中心として各軸方向の計測誤差を半径とするだ円体のことである。レジストレーションを行った統合データと新しいフレームの距離画像の点群に対して、誤差だ円体の内外判定を行う。同じ誤差だ円体の内部にある点の平均位置を新しい計測点とし、統合に使われた点群を消去する。以上の処理を繰り返すことで、フレーム間の誤差の累積を低減しつつ、点群の局所的な高密度化を回避しながら対象の三次元マッピングを行う。

誤差だ円体の軸は、レーザを照射し、それが当たった点の三次元座標を求めるという本センサの計測原理を考えると、レーザ

の照射方向、ならびにそれに直交する 2 軸を考えるのが適切である。本研究では、レーザプロジェクタの画角が広くなくレーザの照射方向と光軸方向とがなす角度が大きくないことから、だ円体の内外判定などの計算量を減らすために、センサの光軸方向とそれに直交する 2 方向を軸とする誤差だ円体を用いた。この誤差だ円体の光軸方向の半径は以下のようにして求める。式 (1) に誤差の伝播則を用いると次式を得る。

$$\sigma_z = \frac{1}{\alpha} z^2 \sigma_k \quad (8)$$

この  $\sigma_z$  を誤差だ円体の光軸方向の半径とする。 $\sigma_k$  はスポット像の位置の検出精度を表している。 $\sigma_k$  が計測距離により変化しないとすると、 $\sigma_z$  は距離の二乗に比例することになる。

## 4. 実 験

構築したセンサを用いて計測実験を行い、センサの動作速度、計測精度などを検証する。また、前章で示した三次元マッピング手法を用いて計測シーンの三次元モデルを作成する。

### 4.1 動作速度の検証

ここでは、いくつかの実験を通してセンサの動作速度を検証する。

#### 4.1.1 スレッドの処理時間の評価

本センサのシステムは二つのスレッドを用いて動作している。一方はモノクロカメラの画像を入力データとして距離画像を計算するスレッド、もう一方は距離画像とカラー画像を用いてテクスチャマッピングを行い、結果をレンダリングするスレッドである。

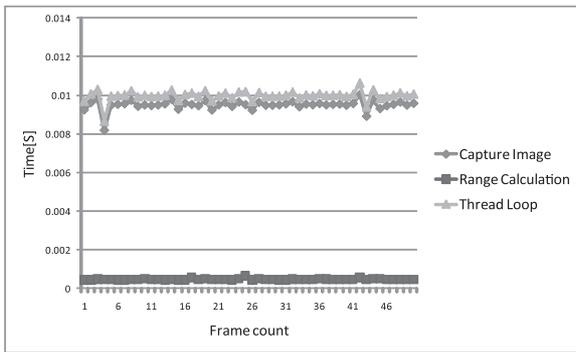
距離画像計測とテクスチャマッピングの二つのスレッドの各ステップにおける処理時間を測定した結果を Fig. 4 に示す。結果から、それぞれのスレッドの平均ループ時間は約 10.0 [ms] であることが分かる。よって、距離画像計測、テクスチャマッピングのレンダリングはともに 100 [Hz] で行えていると言える。

#### 4.1.2 振り子による動作速度の検証

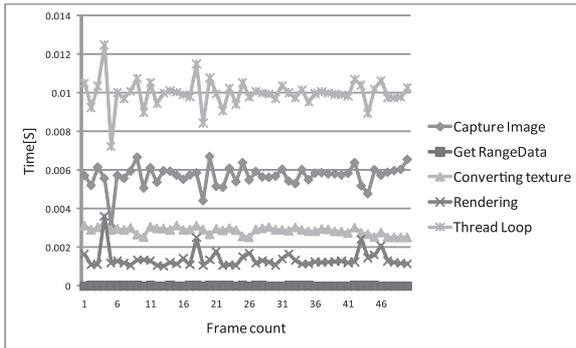
振り子を用いて動作速度の検証を行った。計測対象に直径 90 [mm] のボールを用意し、これを長さ 300 [mm] の細い糸で吊りし単振子を作成した。Fig. 5 に実験の様子を示す。ボールの中心に質点があるとしたときの理論的な周期は 1.18 [s] となる。Fig. 6 は、距離画像より求めたセンサの奥行き方向のボールの距離画像の重心位置を示している。10 周期分のフレーム数を調べた結果、約 1,200 フレームとなった。振り子の周期を理論値と仮定すると、センサは約 102 [Hz] で動作していることになり、振り子の周期の誤差を考慮すると、センサの動作速度が 100 [Hz] であることが示されたと言える。

#### 4.1.3 テクスチャ付き距離画像の検証

ここでは移動物体を計測することで、センサがテクスチャ付き距離画像を正しく得られるかを確認する。前項にて用いた振り子の装置を使用して実験を行った (Fig. 5 参照)。ただし糸の長さを 880 [mm] とした。この単振子の振れ角を変化させ、振動中心において最大速度で横切るボールを計測した。速度は単振動と仮定して、振れ角から求めている。4 種類のボール速度におけるテクスチャ付き距離画像の計測結果を Fig. 7 に示す。結果は計測した距離画像を斜め上の視点からレンダリングした



(a) Range calculation thread



(b) Texture mapping thread

Fig. 4 Processing times of two threads

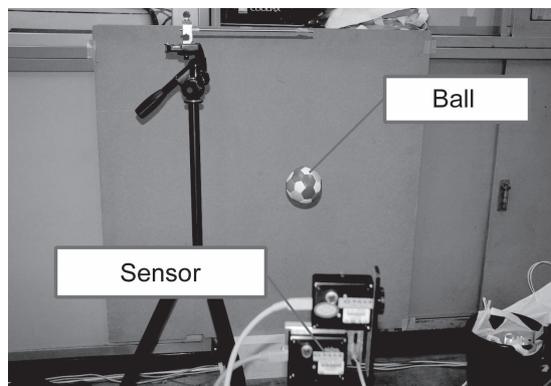


Fig. 5 Experimental scene of the pendulum

ものであり、左から順に連続3フレームを描画している。なお、振り子は右から左へ移動している。

結果から、速度が大きくなるに従い、テクスチャのブレが増す様子が示されている。背景へのボール下部の写りこみは、センサとカラーカメラとのオクルージョンによるものである。2.54 [m/s] 以上では、Fig. 7 (d) のように、ボールの左部に背景のテクスチャが写り込み、テクスチャの左右のずれが目立つマッピング結果となった。

テクスチャのブレはシャッター速度を短くすることで軽減できるが、テクスチャが暗くなってしまうため、限度がある。なお、本実験におけるシャッター速度は両カメラとも5 [ms] としている。一方、テクスチャのずれは、現在のシステムにおいて2台のカメラ間で同期を取っていないことから発生している。両カ

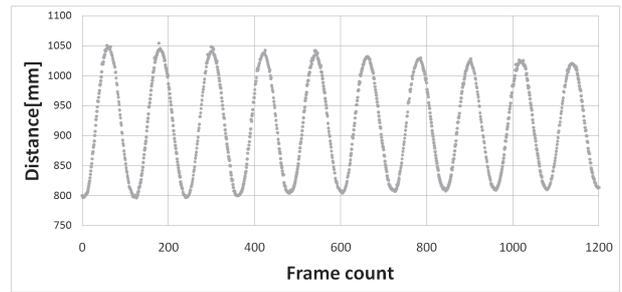
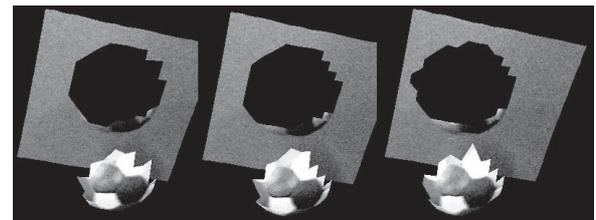


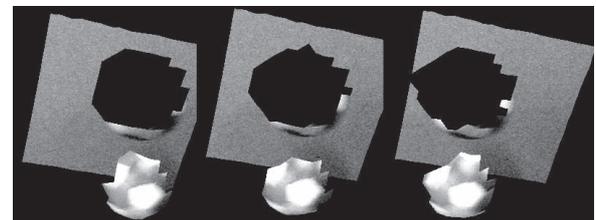
Fig. 6 Distance of the ball's center



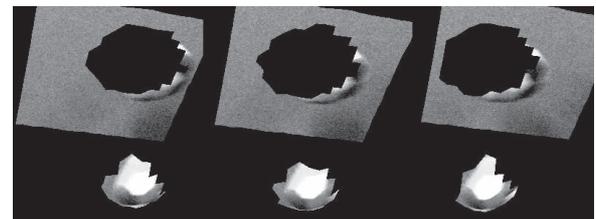
(a) 1.00 [m/s]



(b) 1.47 [m/s]



(c) 2.25 [m/s]



(d) 2.54 [m/s]

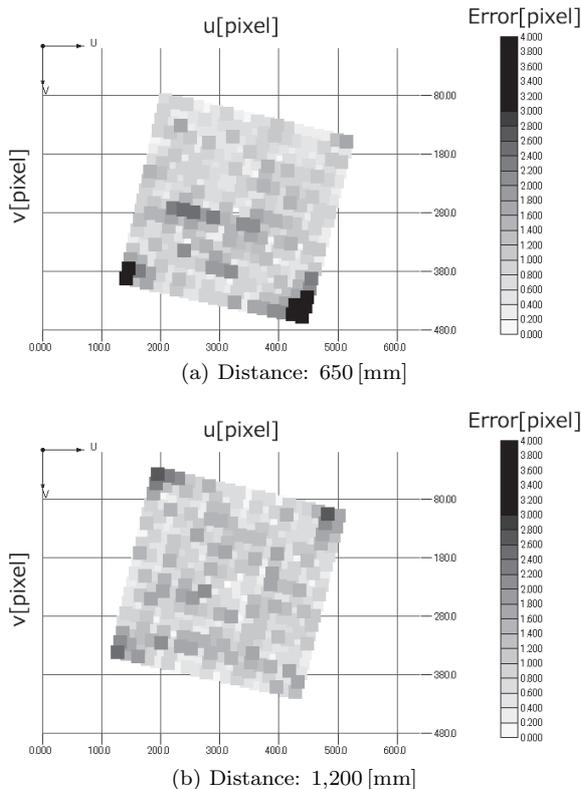
Fig. 7 Textured range images of a moving object (ball of a pendulum)

メラが100 [Hz] で動作しているので、カメラ間で最大10 [ms] の同期ずれが生じ、Fig. 7 (d) の2.54 [m/s] だとテクスチャが最大25.4 [mm] ずれることになる。この問題は、今後両カメラの同期を取るよう改良することで解決できると考えている。

以上、本節の実験により、物体が高速移動時にテクスチャのずれが生じているものの、提案したセンサが100 [Hz] でテクスチャ付き距離画像の取得を実現できていることが示された。

**Table 1** Precision of texture mapping

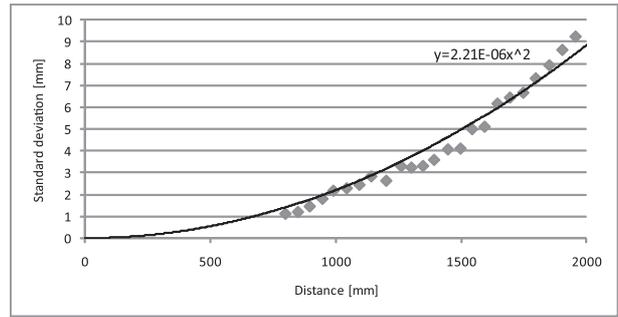
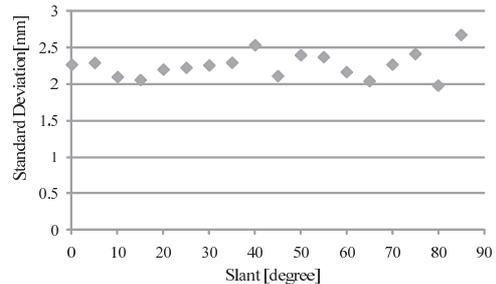
Distance [mm]	S. D. [pixel]	Max. error [pixel]
650	1.09	3.62
1,200	1.01	2.79

**Fig. 8** Errors between the texture coordinates obtained by the system and spot image on the color camera image

#### 4.2 テクスチャマッピング精度評価

本システムではセンサより取得した距離画像とそのときのカラーカメラ画像に写るスポット像の位置を用いて、テクスチャマッピングに用いる透視投影行列を計算する。センサに対して垂直に立てた平板を計測対象として、650 [mm]、1,200 [mm] の計2枚のデータを用いて、透視投影行列を計算した。こうして求めた透視投影行列と距離画像の三次元点群を用いてテクスチャ座標を計算し、実際のカラーカメラ画像上のスポット像の位置と比較した。計測点より求めたテクスチャ座標とカラーカメラ画像に写るスポット像の位置との差を誤差として、標準偏差と最大誤差を求めた。結果を **Table 1** に示す。S.D. は標準偏差を示している。また、画像座標に対する誤差の分布を調べた結果を **Fig. 8** に示す。図は縦横に画像座標軸をとり、誤差が大きいほど暗く示してある。

結果より、画像周辺部にて誤差が大きくなったことから、レンズの歪みが透視投影行列のキャリブレーションに影響を与えていると考える。そこで、レンズ歪みを考慮したキャリブレーションを行うことで、さらなる精度向上が見込めると予想される。しかしながら、テクスチャの歪み補正には計算時間がかかり、100 [Hz] での処理は困難であるので、現段階では導入していない。

**Fig. 9** Standard deviation of the measured distance**Fig. 10** Effect of slant for range measurement

#### 4.3 距離画像の計測精度の検証

距離画像の計測精度を検証した。センサ光軸に垂直な平板を計測対象とし、得られた距離画像に平面フィッティングを行った。得られた平面からの各点のずれの標準偏差を各計測距離において求めた結果を **Fig. 9** に示す。

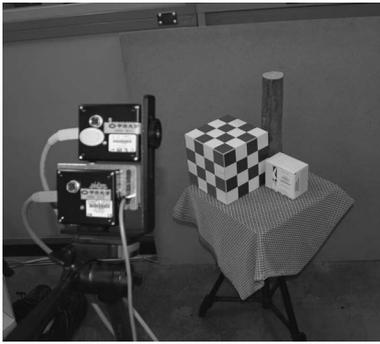
また、これらの結果に原点を通る二次の曲線を当てはめた。ほぼ曲線に沿っていることから、式 (8) の理論式に従った結果であると言える。ここで本センサの構成より  $\alpha$  を求め、式 (8) からスポット像の検出精度  $\sigma_R$  を計算すると、約 0.11 [pixel] となった。よって、サブピクセル精度でスポット像を検出できていると言える。なお、文献 [5] と比較すると、距離計測誤差が約半分になっている。これは、2.3 節に示すスポット像の位置検出の改善による。

さらに、光軸方向に対する面の傾きによる距離計測精度の影響を評価した。センサから約 1,000 [mm] の距離においた平板を鉛直軸回りに回転させたものを計測し、上記と同様に平面フィッティングを行った。このとき、面の傾きによって距離が異なる影響を小さくするため、距離画像の中央の3列の  $3 \times 19$  点を用いた。結果を **Fig. 10** に示す。傾き  $85^\circ$  まで標準偏差は変化せず、面の傾きの影響はほとんどないと言える。

#### 4.4 一般物体の計測例

一般物体を対象とする計測実験を行った。 **Fig. 11** に計測シーンを示す。実験対象は、左からチェック柄の一辺 160 [mm] の立方体、直径 60 [mm] の木製の棒、幅 100 [mm] の白い段ボール箱である。対象までの距離は約 800 [mm] である。 **Fig. 12** に、本センサより取得した 100 [Hz] リアルタイムのテクスチャ付き距離画像を示す。この図は計測したテクスチャ付き距離画像を、様々な角度からレンダリングした結果である。

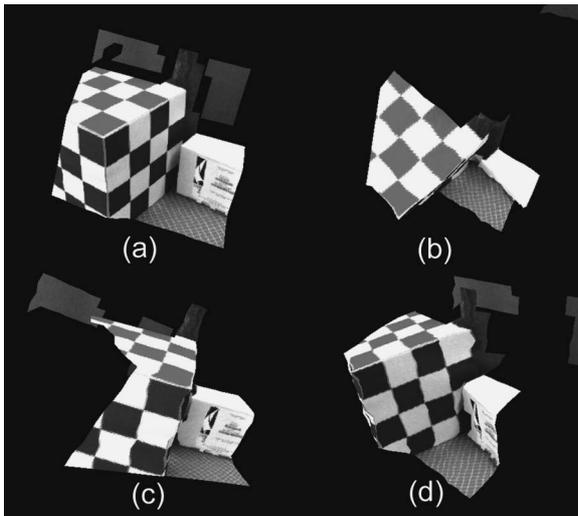
テクスチャ付き距離画像が妥当に計測されていることが示さ



**Fig. 11** Measured objects: from left, a cube with texture, a wooden bar, and a white cardboard box



**Fig. 13** Measured object to evaluate measurement range



**Fig. 12** Textured range images: (a) Front view, (b) Top view, (c) Left-side view, (d) Right-side view

れている。点群のみのデータと比べて、カラーテクスチャが追加されていることで、有用性が増していると言える。なお、カラー CCD カメラに赤外カットフィルタが内蔵されているため、カラーテクスチャにスポット像は写っておらず、距離画像の計測がカラー画像取得に影響を与えないことが示されている。

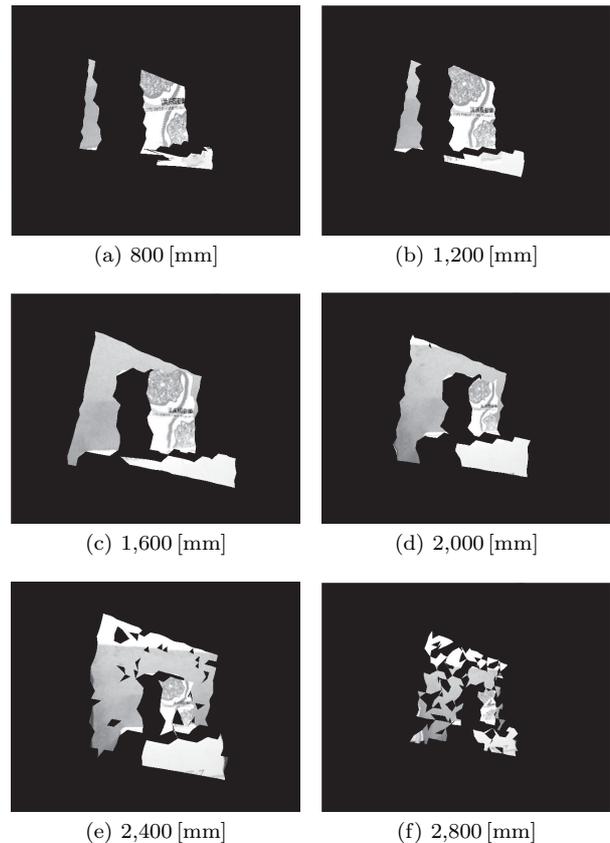
#### 4.5 計測範囲の評価

本センサで安定して距離画像が得られる距離は、Fig. 9 で誤差評価を行っている約 800 [mm] から 2,000 [mm] の範囲であった。この範囲より距離が近いと、スポット像が隣接するスポット光に割り当てられた領域に移動し、誤対応を生じる。また、遠いと、スポット像が暗くなり、計測が困難となる。

例として、**Fig. 13** の計測シーンに対し、距離を 800 [mm] から 400 [mm] ずつ遠ざけたときに得られたテクスチャ付き距離画像を **Fig. 14** に示す。距離が遠くなるに従って計測誤差が大きくなること、および 2,000 [mm] よりも遠くなるに従って、計測できない点が増えていることが示されている。

#### 4.6 三次元マッピング実験

提案した三次元マッピング手法を用いて、対象の三次元マッピングを行った。計測対象は **Fig. 15** に示す床面に新聞紙を敷いた 1 [m<sup>2</sup>] の領域である。センサを手で持ち、ラスタスキャン



**Fig. 14** Textured range images at different distances

をするように動かしながら、多数枚の距離画像を取得した。このとき提案した手法により、距離画像を統合しながら成長していく三次元マップの様子を **Fig. 16** に示す。なお、計測データの取得は 100 [Hz] で行うことが可能であるが、三次元マッピングは、1枚の画像あたり 3~7 [s] を要するため、オフライン処理で行った。

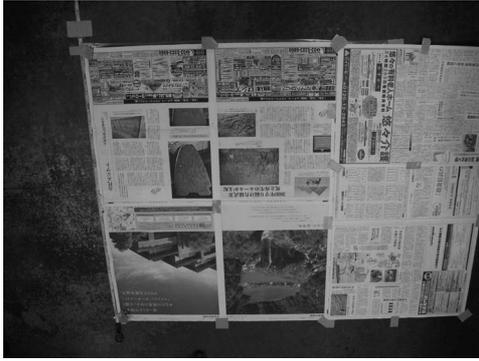
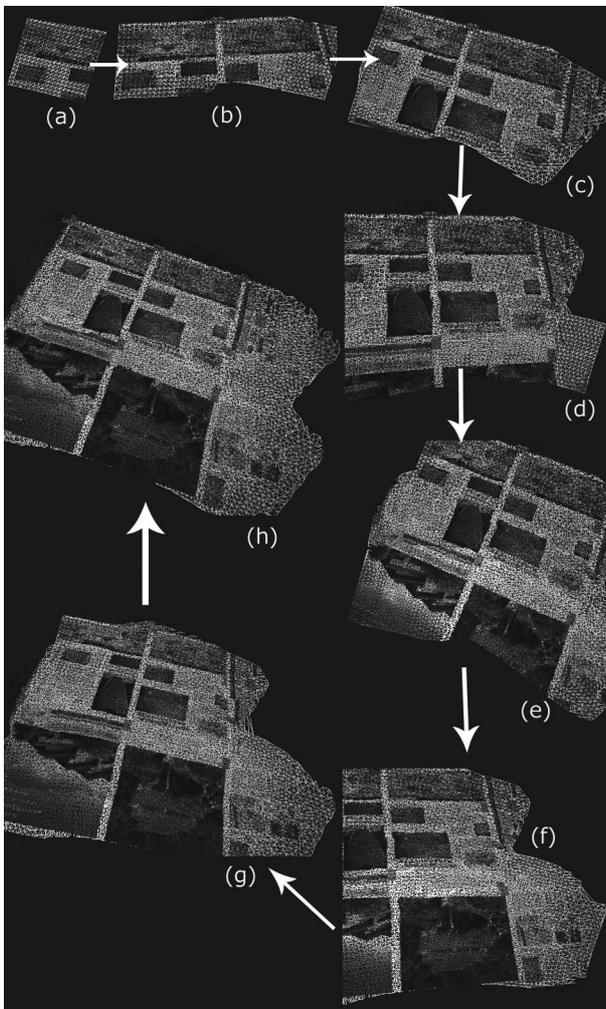
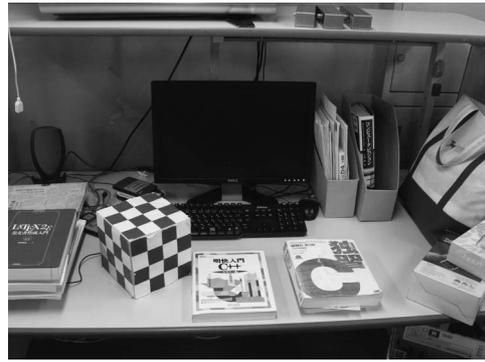
計測対象は平面であるため、構築した三次元マップの点群に平面を当てはめ、この平面から点までの距離を誤差として、標準偏差と最大誤差を求めた。結果を **Table 2** に示す。

結果より、構築された三次元マップはほぼ平面であると言え、提案した手法の有効性が示された。

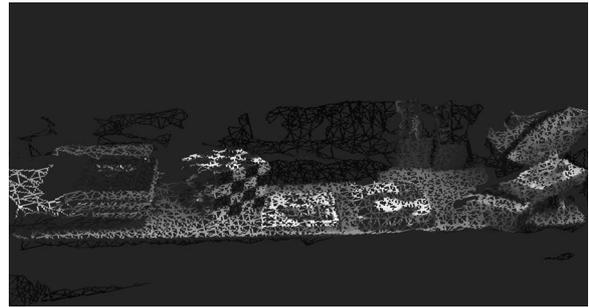
**Fig. 17** に一般シーンの三次元マップの生成例を示す。90枚

**Table 2** The precision of the constructed 3D map

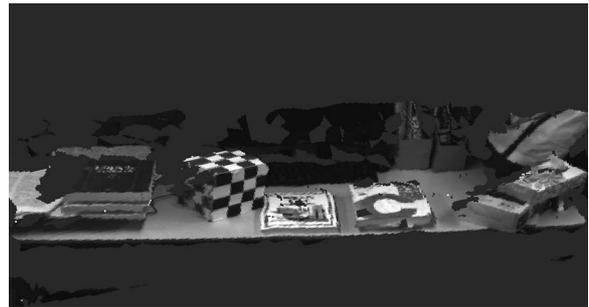
Distance [mm]	S. D. [mm]	Max. error [mm]
800-900	6.28	26.8

**Fig. 15** Measurement object for the 3D mapping: the floor surface textured by newspaper sheets**Fig. 16** 3D mapping results at some frames: (a) 1st, (b) 26th, (c) 63rd, (d) 105th, (e) 154th, (f) 207th, (g) 267th, (h) 340th

(a) Scene



(b) Constructed 3D map



(c) Constructed 3D map with color textures

**Fig. 17** 3D mapping result for a general scene

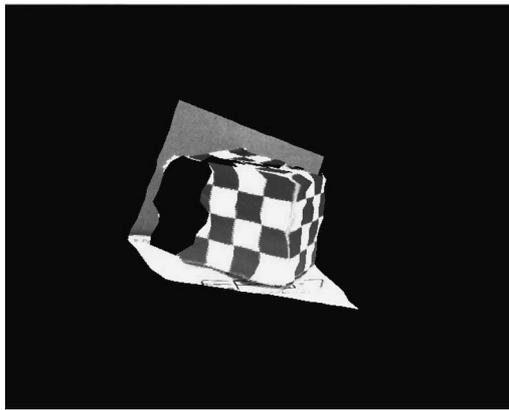
の画像を用いた。かなり複雑なシーンであるにもかかわらず、構築したセンサで三次元マップが生成可能であることが示されている。

以上の実験より、構築したセンサシステムと三次元マッピング手法の一定の有効性が示されたと考える。

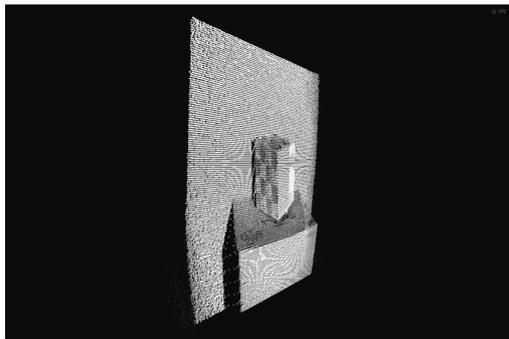
## 5. 考 察

本論文で構築したテクスチャ付き距離画像計測システムは、以下の特徴を持つ。

- 距離画像とカラーテクスチャを同時取得。
- 距離画像は粗いが、カラーテクスチャは高精細。
- 100 [Hz] の高速計測。
- バンドパスフィルタ、ローパスフィルタの利用により、屋外でも利用可能。
- 小型軽量 (130 [mm] × 157 [mm] × 70 [mm], 約 700 [g])。
- 800 [mm]–2,000 [mm] のミドルレンジでの距離計測を実現。
- Off-the-shelf の装置のみで構築。



(a) Constructed sensor



(b) SR4000

Fig. 18 Comparison with MESA SR4000

以上の特徴から、本センサは特に、障害物回避やマッピングなどを行うための移動ロボットの視覚に適していると考えている。また、構築した三次元マッピング手法は、本センサがカラーテクスチャを同時取得できることを生かした手法であり、距離画像が粗いにもかかわらず、比較的複雑なシーンでのマッピングや通常のICP法では不可能な平面のマッピングに適用可能であることが示された。現段階ではマッピングは処理時間がかかるためリアルタイムでの処理は実現できていないが、今後高速化することでオンラインでのマッピングを行うことが期待される。

最近、距離画像をリアルタイムで取得可能な製品もいくつか市販されている。これらの一つであるMESA Imaging社のSwiss Ranger SR4000との比較を行った。SR4000は、三角測量の原理に基づく本センサと異なり、Time of Flight法で距離を計測している。また、反射光強度の画像を同時取得できる。同一対象を計測した結果をFig. 18に示す。SR4000の結果は、付属のビューアで表示したものである。

結果を比較すると、SR4000の画角が広いことが分かる。また、計測点数も、本センサの361点に対し、2万5千点余りとはるかに多い。4.3節に示す手法でSR4000の平面当りはめの標準偏差を求めたところ、1,000 [mm]で3.49 [mm]、2,000 [mm]で8.83 [mm]と構築したセンサと同程度の値であった。一方、サンプリングレートは約33 [Hz]であり100 [Hz]の本センサのほうが速い。また、SR4000が計測点の反射光強度しか求められないのに対し、本センサでは高精細のカラー画像を距離画像のテクスチャとして取得可能である。さらに、SR4000は、屋

外での利用は不可能である。

このように一長一短であるが、高速性や屋外での利用性などから、移動ロボットの視覚などへの利用において、構築したセンサの有効性があると言える。他の製品（例えばMicrosoftのKinect）と比較しても、上記の特徴からの総合的評価で移動ロボットへの利用などで優位性があると考えている。

最後に、本センサのスペックの調整に関して考察する。各種パラメータを変更することで、トレードオフを伴いながらであるが、本センサのスペックを調整可能である。近距離の計測が必要な場合には、基線長を短くすることで、より近距離の計測が可能となる。ただし、計測精度は、式(8)に従って悪くなる。一方、基線長を変えないままでも、CCD上での割り当て画素を変更することで、計測範囲を近い側にずらすことも可能である。ただし、この場合は遠距離で誤対応が生じる可能性がある。遠距離の計測が必要な場合は、よりパワーの大きなレーザを用いる、あるいは外乱光への強さを犠牲にすることである程度は対応可能である。また、SR4000との比較で狭さが示された画角に関しては、より画角の広いマルチスポットのレーザプロジェクタが用意できれば、それに依りて広くすることは可能である。計測点数に関しても、より点数の多いマルチスポットのレーザプロジェクタが用意できれば、増やすことは可能である。ただし、点数の増加に応じて計測範囲は狭くなる。これらを考慮しながら、個々の応用が与えられたときに、それに対応してスペックを調整することが必要であると考えている。なお、テクスチャの付与に関しては、カラー画像の計測がパッシブでありまた画素数も多いため、距離画像センシングのスペックに応じて問題なく対応可能である。

## 6. 結 論

100 [Hz]と高速にテクスチャ付きの距離画像を取得する小型の距離画像センサを、市販製品のみを用いて構築した。構築したセンサを用いて計測実験を行い、センサの動作速度、計測精度、テクスチャマッピングの精度を検証した。テクスチャ付き距離画像を用いて三次元マッピングを行う手法を提案し、本センサによって得られた計測データを用いて、外界の三次元マッピングを行った。また、提案した三次元マッピング手法により構築したマップデータの誤差を評価し、提案手法の有効性を示した。

今後の課題として、カラーカメラとモノクロカメラの同軸化によるテクスチャマッピングの高精度化、三次元マッピング手法などの高速化、構築した三次元マップを用いた物体認識など、本センサの改善と応用が挙げられる。

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] 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] K. Umeda: "A compact range image sensor suitable for robots," Proc. of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3167-3172, 2004.

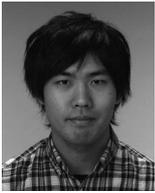
- [3] Y. Watanabe, T. Komuro and M. Ishikawa: "955-Fps Real-Time Shape Measurement of a Moving/Deforming Object Using High-Speed Vision for Numerous-Point Analysis," Proc. of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3192-3197, 2007.
- [4] K. Nakazawa and C. Suzuki: "Development of 3-D robot vision sensor with fiber grating: Fusion of 2-D intensity image and discrete range image," Proc. of 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON'91), pp.2368-2372, 1991.
- [5] 立石, 石山, 梅田: "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", 日本機械学会論文集 C 編, vol.74, no.739, pp.499-505, 2008.
- [6] B. Morisset, R.B. Rusuy, A. Sundaresan, K. Hauserz, M. Agrawal, J.C. Latombe and M. Beetz: "Leaving Flatland: Toward Real-Time 3D Navigation," Proc. of 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3786-3793, 2009.
- [7] V. Popescu, E. Sacks and G. Bahmutov: "The ModelCamera: A hand-held device for interactive modeling," Proc. of Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2003), pp.285-292, 2003.
- [8] 奥富 他: デジタル画像処理. pp.255-256, CG-ARTS 協会, 2007.
- [9] P. Besl and N. McKay: "A method for registration of 3-d shapes," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.14, no.2, pp.239-256, 1992.
- [10] D.G. Lowe: "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," International Journal of Computer Vision, vol.60, no.2, pp.91-110, 2004.
- [11] P.J. Rousseeuw: "Least Median of Squares Regression," J. American Stat. Assoc., vol.79, no.388, pp.871-880, 1984.



石山英俊 (Hidetoshi Ishiyama)

2008年中央大学理工学部精密機械工学科卒業, 2010年中央大学理工学研究科精密工学専攻修士課程修了. 同年フロム・ソフトウェア(株)入社. 小型高速距離画像センサの研究に従事.

(日本ロボット学会正会員)



内田裕己 (Yuki Uchida)

2011年中央大学理工学部精密機械工学科卒業, 現在中央大学理工学研究科精密工学専攻博士前期課程在学中. 小型高速距離画像センサの研究に従事.

(日本ロボット学会学生会員)



寺林賢司 (Kenji Terabayashi)

2004年北海道大学大学院システム情報工学専攻修士課程修了. 2008年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了, 博士(工学). 同年中央大学理工学部精密機械工学科助教, 現在に至る. ヒューマンインタフェース, ロボットビジョン等の研究に従事. 精密工学会, 日本機械学会, 日本バーチャルリアリティ学会等の会員.

(日本ロボット学会正会員)



梅田和昇 (Kazunori Umeda)

1989年東京大学工学部精密機械工学科卒業, 1994年同博士課程修了. 同年中央大学理工学部精密機械工学科専任講師, 2006年より同教授. 2003~2004年カナダNRC Visiting Worker. ロボットビジョンの研究に従事. 2004年MIRU長尾賞受賞, 博士(工学). 日本機械学会, 精密工学会, 電子情報通信学会, IEEE等の会員.

(日本ロボット学会正会員)