

# アクティブステレオ法による距離画像センサー

梅田 和昇・寺林 賢司

## Range Image Sensors Using Active Stereo Methods

Kazunori UMEDA and Kenji TERABAYASHI

Active stereo methods, which include the traditional light-section method and the talked-about Kinect sensor, are typical and important range imaging methods. In this paper, the outline of the active stereo methods is introduced, and then our high-speed compact range image sensor is described that uses a multi-spot laser projector. It consists of a commercially available laser projector and a high-speed CCD camera. Although the acquired range image is sparse, the sensor is thought to be adequate for several applications such as robot vision because of its 200 Hz high-speed imaging, compactness, and robustness to disturbance light. A sensing system that combines the range image sensor and a color CCD camera is also introduced. A range image with a color texture can be acquired at 200 Hz with the system. Three-dimensional mapping result is shown as an example of the sensor application.

**Key words:** active stereo, range image sensor, multi-spot laser projector, triangulation, robot vision

距離画像センサーは、3D モデリング、ロボットビジョン、測量、産業応用などさまざまな分野で重要性が高く、これまでに多くの計測手法が研究開発されている<sup>1-3)</sup>。

距離画像の計測原理のひとつにアクティブステレオ法がある。約40年前に Shirai によって提案され、さまざまに実用化されている光切断法<sup>4)</sup>は、アクティブステレオ法の代表的な手法である。また、現在最も注目されている距離画像センサーである Microsoft 社の Kinect<sup>5)</sup>もアクティブステレオ法を用いている。

本稿では、まずアクティブステレオ法の位置づけ、原理、分類を簡単に示す。さらに、アクティブステレオ法を用いた距離画像センサーの具体的として、筆者らの研究グループがおもにロボットビジョン用として開発してきた、マルチスポット光を用いた高速小型距離画像センサーについて紹介する。

## 1. アクティブステレオ法

### 1.1 距離計測の基本原則

これまでに実現されている距離計測手法のほとんどは、距離を計測するために、(a) 光の飛行時間、(b) 光路のず

れ、のいずれかを利用している (図1参照)。

(a) は、対象に投影した光が反射して戻ってくる時間を測定し、光の速度を掛け (て2で割) ることで距離を得るというものであり、飛行時間法 (TOF 法, time-of-flight method) とよばれている。超音波やマイクロ波を用いた距離計測と同じ原理である。実用化されているセンサーの多くは、時間を直接計測するのではなく、光の強度を数十 MHz 程度で変調して投影し、投影光と反射光との間の位相差を計測することで間接的に時間を計測している。

(b) は、複数の計測位置における距離に応じた光路のずれを利用し、三角測量の原理に基づいて距離を得るというものである。最も代表的なものが、2台 (以上) のカメラを用い、各カメラの画像の間に生じる視差から距離を得る、ステレオ法である。また、焦点調節によって距離を得る手法 (shape from focus/defocus) も、レンズの各部に入射する光の光路のずれを利用しているといえる。

なお、(a) と (b) では、計測対象までの距離に対する計測誤差の特性に大きな違いがある。(a) では、時間計測の誤差が距離の影響をそれほど受けないため、不確かさが距離にそれほどよらない。一方 (b) では、対象が遠くな

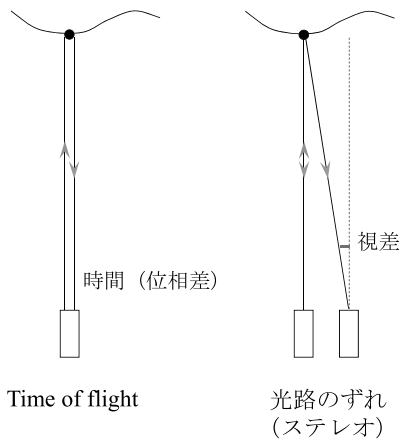


図1 距離計測の基本原理.

るに従い、光路のずれが急速に小さくなって不確かさが大きくなる。これによる不確かさは距離の2乗に比例する。以上の特性により、一般に、遠距離の計測では(a)が、近距離の計測では(b)が有利である。また、(a)では光を投影するアクティブな手法しか存在しないが、(b)ではアクティブ、パッシブの両手法が存在する。

### 1.2 アクティブステレオ法とは

アクティブステレオ法は、ステレオ法のカメラの1台を何らかの光の投影器に置き換え、対象に投影された光をカメラで検出し、光が投影された箇所までの距離を求める一連の手法である。通常ステレオ法(パッシブステレオ法)では、両画像での対応づけを行うのがテクスチャーの少ない対象などで困難であるという対応点問題が生じるが、アクティブステレオ法では対象に投影された光を画像中から検出すればよいので、この問題が回避される。実用性が高いため、多くの研究開発が行われており、商品化されたものも多い。

### 1.3 アクティブステレオ法の分類

アクティブステレオ法は、投影する光の種類や投影の仕方によって、例えば以下のように分類される。

- (1) スポット光のスキャン
  - (2) スリット光のスキャン
  - (3) マルチパターン光の利用
- 以下、各手法を簡単に説明する。

(1)は、方法としては最も単純であり、スポット光を投影し、投影された点までの距離を三角測量で求める。距離画像を得るには二次元方向にスキャン(走査)する必要があり、一般に計測時間を要することから、実用化されているセンサーは多くはないが、巧みなスキャンのメカニズムによって高品質の距離画像の取得を実現したカナダNRC(国立研究所)のSynchronized Laser Scanner<sup>2,6)</sup>は有名で

ある。本センサーは、光源としてR, G, Bの3色のレーザーを合成した白色レーザーを用いることで、カラー情報も同時に取得可能であり、文化遺産の三次元アーカイブ作成(最近ではモノリザ)、映画製作における三次元モデル取得、スペースシャトルでの耐熱タイルのはがれの検査など、広く用いられている。

(2)は、アクティブステレオ法の代表である光切断法<sup>4)</sup>がこれである。スリット光を投影して画像を入力し、スリットの位置を得ることで、1列分の距離を計測する。スリット光を一次元方向にスキャンすることで距離画像を得る。このとき、スキャンする回数分の画像を入力する時間が必要であり、一般的なCCDカメラを使うと距離画像の計測に時間を要するが、高速なCCDの使用などで高速化が図られている。また、光切断法の一種の拡張として、符号化されたオン/オフパターンの画面を時系列に投影することで、 $n$ 回の投影で $2^n$ 回のスキャンと等価とする時系列符号化法が知られている<sup>7,8)</sup>。また、オン/オフパターンではなく正弦波パターンを時系列に投影し、位相情報から対応を求める空間位相シフト法も提案され、製品化もされている。

(3)は、スポット光やスリット光を一度に多数投影し、各投影光像までの距離をスキャンレスで計測するというものである。投影光像が多数になることにより対応点問題が再度生じるが、計測レンジを限定する、投影光をエンコードするなどの手法で、この問題が回避されている。対応点問題とのトレードオフなどから、計測点数を増やすのが困難という欠点はあるが、機械的な可動部がなく、また全画面の距離画像を一度に計測できるため移動している物体でも計測が可能という、他の方式にない大きな利点がある。

中沢らは、光ファイバグレーティングを回折格子として利用して多点スポット光の投影を実現し、マルチスポット光を用いた距離画像センサーを提案した<sup>9)</sup>。渡辺ら<sup>10)</sup>は、マルチスポット光プロジェクターと彼らが開発した高速カメラを用いて、動作速度がほぼ1kHzという超高速なセンサーを提案している。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。また、われわれのグループも、移動ロボットなどでの利用を想定し、市販のマルチスポット光レーザープロジェクターとCCDカメラとを用いて、同様の高速小型距離画像センサーを開発している<sup>11,12)</sup>。このセンサーに関しては次章で詳しく説明する。

他のこの枠組みに含まれるセンサーでは、Kinect<sup>5)</sup>が、密なランダムドットパターンを投影光として用いたアクティブステレオを実現している。佐川ら<sup>13)</sup>は、色を用い

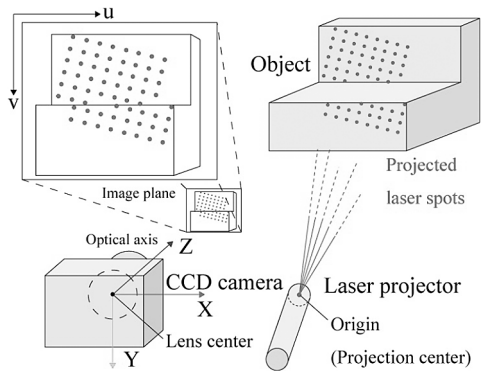


図2 マルチスポット光プロジェクターを用いた距離画像計測.

てエンコード化されたグリッドパターンを液晶プロジェクターで投影し、高速かつ高密度の距離画像計測を実現している。また、モアレ法<sup>14)</sup>もこの枠組みに含まれると考えられる。

## 2. マルチスポット光を用いた 200 Hz 小型距離画像センサー

われわれが構築したセンサーを、アクティブステレオ法の具体例として示す。おもにロボットビジョンとして利用することを想定して開発したものである。小型軽量で、また 200 Hz という高速な距離画像計測が可能であり、ロボットがリアルタイムで周辺環境や対象物体を計測するのに用いることができる。また、プロジェクター、カメラ、PC など、市販品のみで構築しているため、汎用性が高い。

以下、本センサーの原理、スペックなどを示す。

### 2.1 センサーの原理

本センサーの主要部は、レーザープロジェクターと高速 CCD カメラである。プロジェクターはマルチスポット光を投影し、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2参照)。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(以下、距離を光軸方向の距離の意味で用いる)を算出する。無限遠を基準とした視差を  $k$  とすると、距離  $z$  は

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

によって算出される。ここで、 $b$  は基線長、 $f$  は焦点距離、 $p$  は CCD 一画素の幅である。

画像内において、各スポット光像は距離に応じてエピポラ線上を移動する<sup>7)</sup>。本センサーでは、エピポラ線は画像の横軸にほぼ平行である。ここで、スポット光を格子状に投影しているため、画像の同じ行内に複数のスポッ

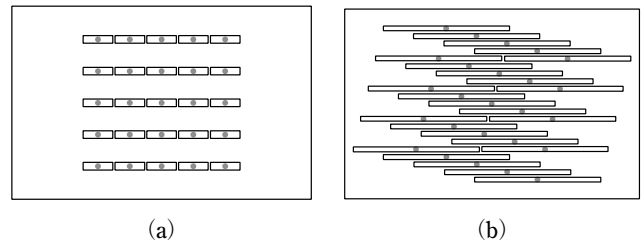


図3 各スポット光像への割り当て画素。(a) 回転なし、(b) 回転あり。

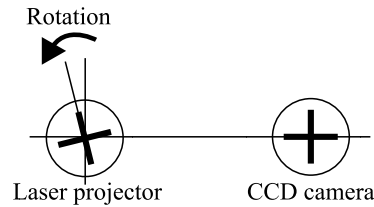


図4 レーザープロジェクターの回転。

ト光像が存在し、対応の一意性が保てなくなってしまう(対応点問題)。そこで、計測レンジを制限することで、図3(a)に示すように、各スポット光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4に示すように、レーザープロジェクターを CCD カメラに対して回転させている。これにより、図3(b)に示すように各スポット光像に一意に割り当てられる画素数が増加し、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。

### 2.2 構築したセンサー

構築したセンサーの外観を図5(a)に示す。寸法は  $100 \times 70 \times 73 \text{ mm}^3$  と小型であり、移動ロボットなどへの搭載も可能である。レーザープロジェクターには StockerYale (現 Coherent) 社製の Mini-519X を用いている。波長 785 nm、出力 35 mW で、先端に取り付けてある回折格子によって  $19 \times 19$  の計 361 点を投影できる。隣接するスポット光間の角度は  $0.90^\circ$  である。CCD カメラは最大 200 fps で画像入力可能な Point Grey Research 社製の Dragonfly Express を用いている。画素数は  $640 \times 480$ 、CCD 一画素の幅は  $7.4 \mu\text{m}$  である。焦点距離 8 mm のレンズを用い、レンズ前面に 720 nm 以下の波長の光をカットする Hoya 社製 R72 フィルター、背面に Edmund Optics 社製 785 nm バンドパスフィルターを取り付けており、外乱光の影響を低減させている(図5(b)参照)。レーザープロジェクターと CCD カメラとの基線長は 47.5 mm としている。レーザープロジェクターの回転角は図3(b)に示すように  $\arctan(1/4) = 14.0^\circ$  としており、各スポット光像に割り当てられる画素数は約 70 である。

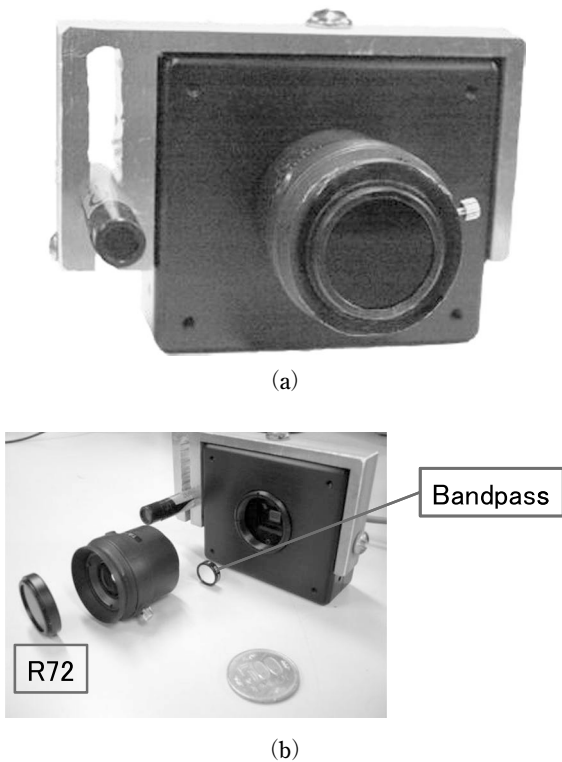


図5 構築した距離画像センサー。(a) 外観図(左:マルチスポットレーザープロジェクター, 右:高速 CCD カメラ), (b) 光学フィルターの配置。

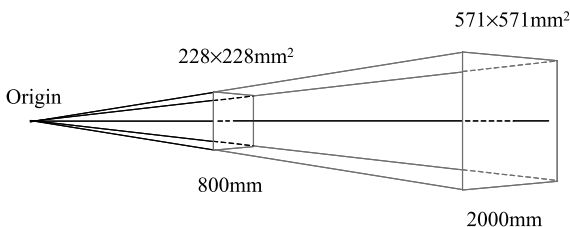


図6 計測範囲。

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。すでに述べたように、本センサーのエピポーラ線は画像の横軸に平行なので、スポット光像の探索は水平方向に限定できる。各スポット光に水平方向に割り当てられた画素における輝度値の重心を求めてスポット像のおおよその位置を特定し、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、スポット像の検出位置としている。

## 2.3 センサースペック

### 2.3.1 計測範囲

構築したセンサーの計測範囲を図6に示す。距離が800mm(より正確には、計算上733mm)より小さくなると、スポット光像が割り当て画素領域を超えることによる誤対応が生じる。一方、遠距離は、スポット光像の明るさ

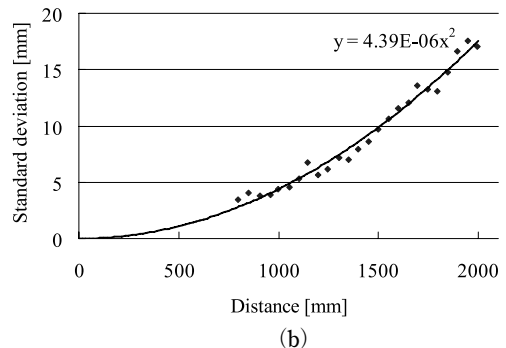
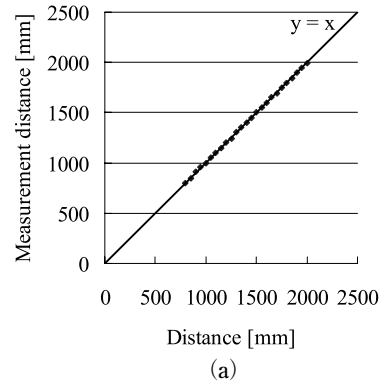


図7 計測誤差。(a) 平均, (b) 標準偏差。

低下ならびに計測精度が距離の二乗に反比例することから、良好な計測ができるのは2000mm程度までである。隣接したスポット光間の間隔は、距離800mmで12.6mm、2000mmで31.5mmである。

### 2.3.2 距離計測精度

図7に、平板の距離を変えながら距離計測を行ったときの、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点の平均と標準偏差を表している。距離が偏りなく計測できていること、また誤差が距離の二乗に比例していることがわかる。

本センサーによる実物体の距離画像計測例を図8に示す。(a)は計測対象をわかりやすくするためにフィルターを外して取得した画像である。計測対象は  $200 \times 200 \times 300 \text{ mm}^3$  のスチロールのブロックと  $60 \times 120 \times 200 \text{ mm}^3$  の木材である。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。また、図9に太陽光下で得られた画像を示す。強い外乱光下でも、フィルターの効果でスポット光が明瞭に観測できていることが示されている。

## 2.4 カラー CCD カメラの追加

上記のセンサーにカラー CCD カメラを付加してカラーテクスチャーを取得する機能を加え、高速なテクスチャー付き距離画像計測システムを構築した<sup>12)</sup>。

図10に、本システムによって物体を計測している様子

を示す。下部が図5の距離画像センサー、上部が付加したカラー CCD カメラである。カラー CCD カメラは、距離画像センサー部と同様に Dragonfly Express を用いており、200 fps での画像入力が可能である。カラー CCD カメラで得られるカラー画像を、距離画像にテクスチャーマッピングする。距離画像の各点を事前にキャリブレーションして求めた透視投影行列<sup>7)</sup>を用いてカラー画像に投影することで、距離画像の点とテクスチャー上の投影点との対応を得る。

図10の計測で得られた結果を図11に示す。計測したテクスチャー付き距離画像を、さまざまな角度からレンダリングしたものである。対象物体は、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、対象までの距離は約800 mmである。テクスチャー付き距離画像が妥当に計測されていることが示されている。なお、文献<sup>12)</sup>では100 Hzとなっているが、その後のソフトウェアの改良により、200 Hzでのテクスチャー付き距離画像の計測を実現している。また、カラー CCD カメラに赤外カットフィルターが内蔵されているため、カラーテクスチャー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わかる。

さらに、本システムを環境の三次元マッピングに応用した。連続して計測した複数のテクスチャー付き距離画像を位置合わせ(レジストレーション)し、つなげて三次元マップを生成する(手法の詳細は文献<sup>12)</sup>を参照された)。図12に三次元マップの生成例を示す。90枚の画像を用いた。かなり複雑なシーンであるにもかかわらず、構築したセンサーで三次元マップが生成可能であることが示されている。なお、画像取得自体は上述のように200 Hzでリアルタイムに行うことが可能であるが、レジストレーションは現段階ではオフラインで行っている。

本稿では、アクティブステレオ法に関して述べた。まず、アクティブステレオ法の距離画像計測手法における位置づけ、原理を述べ、スポット光、スリット光、マルチパターン光を用いた手法への分類を行った。

次に、われわれが開発したマルチスポット光を用いた高速小型距離画像センサーを、アクティブステレオ法の一例として紹介した。本センサーは、200 Hzという高速な距離画像計測を実現している。また、市販品のみから構成されているため、汎用性が高い。計測点数が少ないため対象物の精密な形状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、さらには太陽光下でも利用可能である

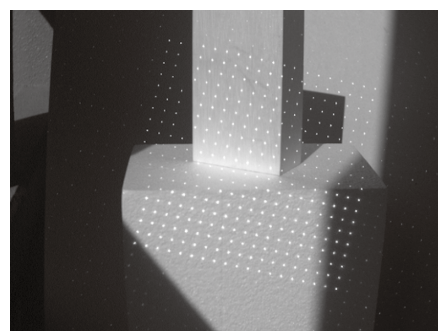


図9 太陽光下(58000 lx)でのスポット光像。

ことから、本センサーはロボットの視覚などに適していると考えている。また、カラー CCD カメラを付加してテクスチャーマッピングも行うシステムを示し、三次元マッピングへの応用例を示した。なお、誌面の関係で省略したが、マルチスリット光プロジェクターを用いた、より計測点数が多く、ヒューマノイドロボットなどへの応用に適したセンサーも開発している<sup>15)</sup>。

Kinectの登場により、アクティブステレオ法を用いた距離画像センサーの利用の裾野が大きく広がりつつある。この分野のセンサーの開発や応用がますます進むことを期待している。

本研究は、科学研究費(16700191, 20500164)の助成を受けたものである。

## 文 献

- 1) P. Besl: "Active, optical range imaging sensors," *Mach. Vision Appl.*, **1** (1988) 127-152.
- 2) F. Blais: "Review of 20 years of range sensor development," *J. Electron. Imaging*, **13** (2004) 231-240.
- 3) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測(昭晃堂, 1990).
- 4) Y. Shirai: "Recognition of polyhedrons with a range finder," *Pattern Recognit.*, **4** (1972) 243-244.
- 5) 日経エレクトロニクス: "Kinectに見るジェスチャー入力の可能性", *日経エレクトロニクス*, No. 1046 (2010) 73-85.
- 6) M. Rioux: "Laser range finder based on synchronized scanners," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3837-3844.
- 7) 松山隆司, 久野義徳, 井宮 淳: コンピュータビジョン技術評論と将来展望(新技術コミュニケーションズ, 1998).
- 8) 佐藤幸男, 長谷川一英: レンジファインダ Cubicscope の実用的諸応用, *Robomec '99 講演論文集*, 2P2-72-061 (1999).
- 9) 中沢和夫, 中島真人, 小林 寛: "ファイバースコーピングを用いた3次元形状計測システムの開発", *電子情報通信学会論文誌 D*, **J69-D** (1986) 1929-1935.
- 10) 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* (Roma, 2007) pp. 3192-3197.
- 11) 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タを用いた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*, **74** (2008) 499-505.
- 12) 石山英俊, 寺林賢司, 内田裕己, 梅田和昇: "100 Hz テクス

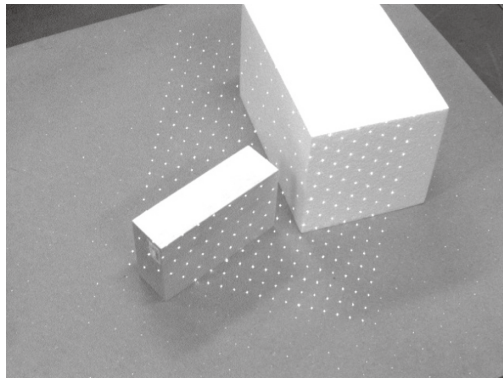


チャ付き距離画像計測システムの構築と三次元マッピングへの応用”, 日本ロボット学会誌, **30** (2012) 62-71.

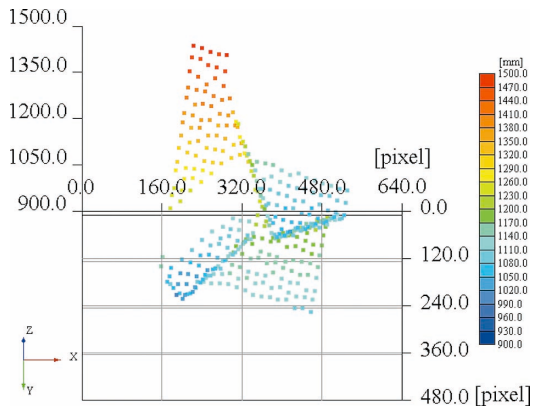
- 13) 佐川立昌, 川崎 洋, 古川 亮, 清田祥太: “平行線投影を用いた連続領域の検出による高密度なワンショット形状復元”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011) OS3-1 (2011).
- 14) 吉澤 徹: 最新光三次元計測 (朝倉書店, 2006).
- 15) T. Kuroki, K. Terabayashi and K. Umeda: “Construction of a

compact range image sensor using multi-slit laser projector and obstacle detection of a humanoid with the sensor,” *Proc. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (Taipei, 2010) pp. 5972-5977.

(2011年12月21日受理)



(a)



(b)

図8 距離画像計測例。(a)対象物体に投影されたスポット光像,(b)得られた距離画像(鳥瞰図)。



図10 カラー CCD カメラを加えたシステムによる物体計測の様子。

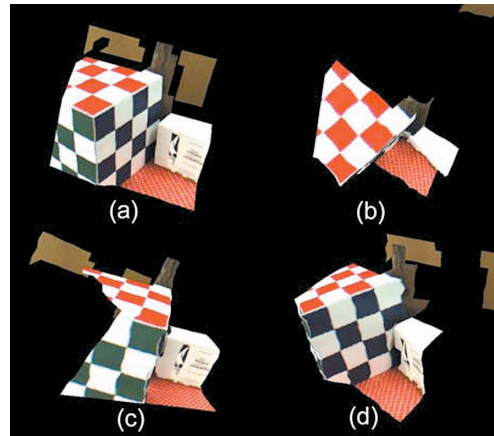


図11 図10に対して計測されたテクスチャー付き距離画像。



(a)



(b)

図12 複数のテクスチャー付き距離画像を用いた三次元マッピング例。(a)対象シーン,(b)構築されたカラーテクスチャー付き三次元マップ。