

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20500164

研究課題名(和文) 屋外利用可能な高速小型距離画像センサの構築と三次元環境モデリング応用

研究課題名(英文) Construction of a fast and compact range image sensor that can be used in outdoor environments and its application to 3D modeling of environments

研究代表者

梅田 和昇 (UMEDA KAZUNORI)

中央大学 理工学部 教授

研究者番号：10266273

研究成果の概要(和文)：ロボットの眼として用いるために、多数の点を一度に投影できるレーザプロジェクタと高速な CCD カメラを組み合わせ、距離画像(明るさではなく距離で構成される画像)を一秒間に 200 枚と高速に取得できる小型センサを開発した。太陽光の下でも利用可能である。また、カラー画像の同時取得を可能にし、複数の画像をつなげることで環境の 3 次元マップを取得する手法も確立した。さらに、点ではなく多数の線を投影するプロジェクタを利用したセンサも開発した。

研究成果の概要(英文)：We developed a fast and compact range image sensor that captures range images at 200Hz for using robot vision. The sensor consists of a laser projector that projects multiple spotlights and a fast CCD camera. It can be used even under sun lights. Furthermore, we added a color CCD camera, and developed a method to construct a 3D map of a scene by connecting multiple range and color images. We also developed a sensor that uses a projector of multiple slit lights.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：ロボット工学、計測工学

科研費の分科・細目：情報学 知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：距離画像センサ、環境モデリング、ロボットビジョン、3次元センシング、マルチスポットレーザ、マルチスリットレーザ、アクティブステレオ

## 1. 研究開始当初の背景

近年のロボットビジョンにおける重要な成果の一つに、東大の石川らが提案した 1ms ビジョン、ならびにそれに続く高速なビジョンシステムに関する研究成果が挙げられる。ロボットビジョン・マシンビジョンで使われる典型的な CCD カメラは、テレビのビデオレートに支配された 30Hz がほとんどであった。このスピードはロボットビジョン用途として必ずしも十分な速度ではなかった。これに対し、石川らは、撮像素子レベルから新た

に設計することにより、画像入力ならびに簡単な画像処理を 1ms という、従来よりもはるかに高速に実現することに成功した。一方、3次元画像である距離画像を入力する手法は、これまでにこのように高速なものはほとんど実現されておらず、高速なものでもビデオレート程度(30~50Hz)での計測が可能なシステムがいくつか発表されているにすぎない。これに対し我々は、市販のマルチスポット光プロジェクタと高速 CCD カメラとを組み合わせることで、200Hz で距離画像取得が

可能なセンサを既に開発している。しかしながら、屋外では利用不可能であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、当初以下の2つを研究目的とした。

### (1) 屋外利用可能なセンサの構築

これまでに我々が構築したセンサを発展させ、200Hzの高速性や移動ロボット搭載可能な小型さは維持したまま、照度10万ルクスに達する屋外でも利用可能な高速距離画像センサを構築する。

### (2) 三次元環境モデリングへの応用

本センサを用いて高速に環境の3次元モデルを構築する手法を確立する。センサが高速であるため連続する距離画像間での変動が小さいことを積極的に利用することで、計測点数が少なくても動く、複数距離画像のレジストレーション手法を確立する。本センサを移動ロボットに搭載して、実際に3次元モデルの構築が可能であることを検証する。

## 3. 研究の方法

### (1) 屋外利用可能なセンサの構築

高速かつロバストな距離算出アルゴリズムの構築、ならびにレーザープロジェクタの光学フィルタの工夫などのハードウェアの改良により、200Hzで屋外利用可能なセンサを実現した。さらに、カラーCCDカメラを付加することで、カラー画像つき距離画像の取得を実現した。

### (2) 三次元環境モデリングへの応用

複数の距離画像を取得し、それらを位置合わせ（レジストレーション）して統合することで、環境の三次元モデルの生成を実現する。

本センサで得られる距離画像は、計測点数が少ない（粗い）ため、レジストレーションを行うのに、距離が密なことを前提とした一般的な手法（ICP法など）の利用が困難であることが判明した。そこで、密な画像が得られるカラー画像で特徴を抽出し、カラー画像間で対応を求めた上で、距離画像（3次元座標）の対応を求める手法を構築した。

## 4. 研究成果

### (1) 屋外利用可能なセンサの構築

#### ①高速かつロバストな距離算出アルゴリズムの構築

高速かつ外乱光にロバストな距離画像センサを構築するためには、単に高速なカメラやプロジェクタを組み合わせれば良い訳ではなく、距離算出のための画像処理をいかに軽量化し高速にするかが大きなポイントとなる。そこで、マルチスポット光が投影された画像から各スポット光の視差情報を、高速かつロバストに検出するアルゴリズムを構築した。具体的には、カメラとプロジェクタ

とを平行に設置し、エピポーラ線を画像の水平方向に平行となるようにした上で、エピポーラ線上の1ラインのみのスキャンでのインテリジェントな重心演算によって各スポット光の位置を計測する。

#### ②外乱光に強いセンサの製作

200Hzでの画像計測が可能な高速CMOSカメラとマルチスポット光プロジェクタとを組み合わせ、小型距離画像センサを構築した。画像情報はIEEE1394によりPCに取り込み、上記で開発した高速な距離算出アルゴリズムを適用することにより、200Hzで距離画像計測が可能な、高速な小型距離画像センサを実現した。レーザープロジェクタにはStockerYale社Mini-519Xを用いた。19x19点のレーザースポット光を投影する。波長は近赤外の785nmとし、中心波長785nmの狭帯域バンドパスフィルタと波長720nm以下の光をカットするR72フィルタを組み合わせた。これにより、外乱光が極めて強い晴天の屋外でも計測可能なセンシングシステムを実現した。距離画像の画素数は361点、計測レンジは約2m、距離計測精度は距離1mで標準偏差約2mmを実現した。

#### ③カラー画像の同時取得の実現

上記の小型距離画像センサシステムに高速カラーCCDカメラを付加することで、距離画像にカラー画像をテクスチャマッピングした画像をリアルタイム取得できるセンサシステムを構築した。カラー画像と距離画像の同時計測で100Hzを実現した。

図1に構築したセンサの外観を示す。下部のレーザープロジェクタとモノクロカメラとの組み合わせで距離画像を計測し、上部のカラーカメラでカラー画像を取得する。図2に屋外での計測の様子を示す。図2(a)に示すように太陽光が照射しているシーンでも、図2(b)のモノクロカメラの画像が示すように、投影されたスポット光が明確に抽出可能である。抽出された各スポット光に対して三角測量の原理で距離を計測する。

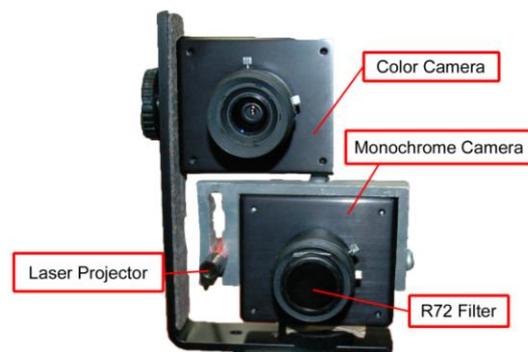
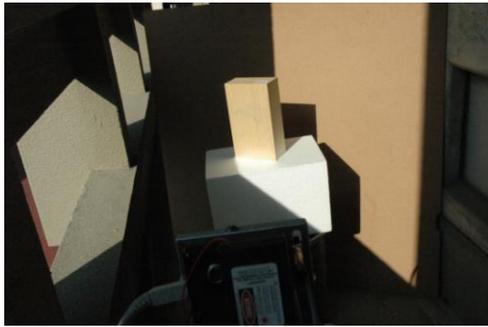
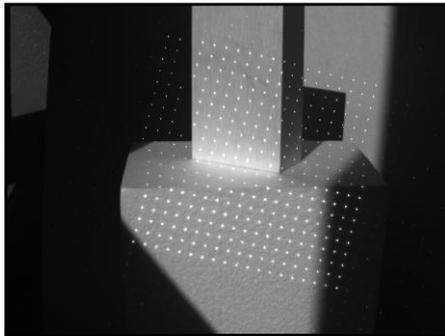


図1 構築した距離画像センサ



(a) 計測の様子

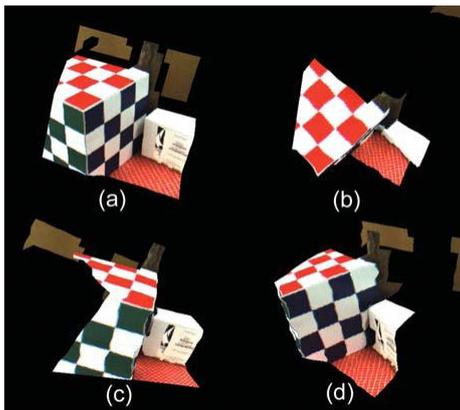


(b) センサのモノクロ CCD カメラの画像

図 2 屋外環境での計測



(a) 計測の様子



(b) 得られたカラーテクスチャつき距離画像  
(視点を変えて表示)

図 3 構築した距離画像センサでの計測例

図 3 に、構築したセンサでのカラー画像も含めた計測例を示す。距離とカラーとが共に計測できていること、両画像の位置合わせが問題なく行えていることが分かる。

## (2) 三次元環境モデリングへの応用

上述のように、距離画像のみでの複数画像のレジストレーションが困難であったため、カラー画像と距離画像とを組み合わせた 3 次元モデル構築手法を構築した。複数のカラー画像で特徴を抽出し、複数画像間での対応づけを求め、距離画像から対応点の 3 次元座標を得、複数画像間の回転・並進のパラメータを求めるという手法を構築した。これにより、多くの凹凸があり複雑なオフィス環境、ならびに特徴がなく平坦であるがテクスチャはある環境のいずれにおいても、移動ロボットなどで取得される画像シーケンスから 3 次元モデルの構築を実現した。

カラー画像から抽出する特徴には、SIFT 特徴量と KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) Tracker とを検討した。一般に、SIFT 特徴量の方が、複数画像間でのロバストな対応付けが可能である一方、処理コストが大きい。本研究では、センサ自体が高速であることから、連続する画像間の変位が大きくなり、特徴の差が小さい。そこで KLT でも必要十分なマッチングを実現できることが分かった。さらに、2 次元座標から 3 次元座標を求める時の処理などを GPU (Graphics Processing Unit) を用いた並列化により高速化した。以上の KLT, GPU の利用により、リアルタイムではないものの、かなり高速に三次元マッピングを実現できるようになった。例えば、156 枚の画像からの 3 次元モデルの作成がトータルで 215 秒であった。

図 4 に、複雑なシーンに対し提案手法で 3 次元モデルの作成を行った例を示す。この例では 190 枚の画像からモデルを作成している。(b) は距離画像のみから構築されたモデル、(c) はさらにカラー画像 (テクスチャ) を貼り付けた結果である。距離画像が粗いにも関わらず、詳細な 3 次元モデルの構築に成功していることが示されている。

## (3) マルチスリットレーザープロジェクタを用いた距離画像センサの構築

当初想定していなかった新しい研究として、マルチスポットではなくマルチスリットを用いた距離画像センサのプロトタイプの構築を行い、さらに構築したセンサのヒューマノイドロボットへの応用を試みた。

15 本のスリット光を照射するプロジェクタ (Stocker Yale Mini-715L) と CCD カメラとを組み合わせ、約 30fps で 4000 点以上の点からなる距離画像の取得を実現した。マルチスポット光では、二方向いずれも距離画像が粗くなるのに対し、マルチスリットを用いることで、一方向に関しては密な計測を実現している。なお、このセンサでは、さらなる小型化を優先するため標準的な速度の CCD カメラを用いたことから、高速な距離画像取得

は実現していない。

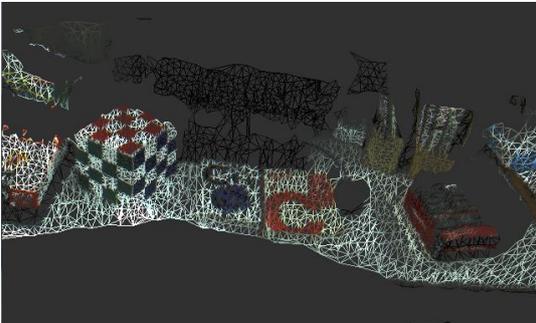
このセンサを用いて、平面上の障害物をリアルタイムに検出することを実現した。さらにヒューマノイドロボットに搭載することで、高さ 5mm 程度の小さな障害物や、ケーブルのような細長い障害物を、歩行中に安定して検出し、回避できることを示した。

図 5 に構築したセンサの外観とヒューマノイドロボットに搭載した様子を、図 6 に構築したセンサでの距離画像の取得例を示す。スリット方向の計測が密に実現できていることが示されている。

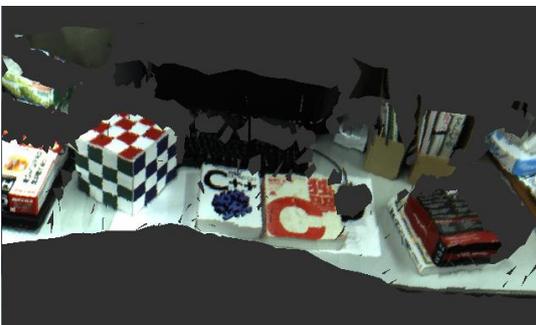
以上、研究目的に即した 2 つの結果 (1), (2) と、想定していなかった新たな結果 (3) を示した。ロボットビジョン, あるいはモデリングに利用可能な、有用なセンサを構築することが出来、さらにその応用としても意味のある手法を構築できたと考えている。



(a) 対象シーン

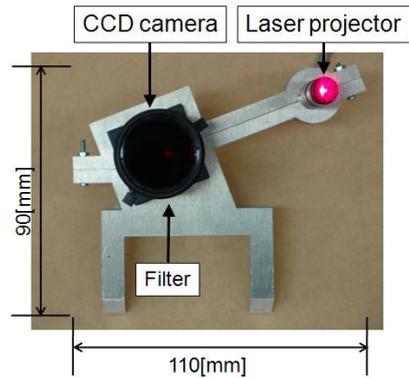


(b) 構築された三次元モデル (テクスチャなし)

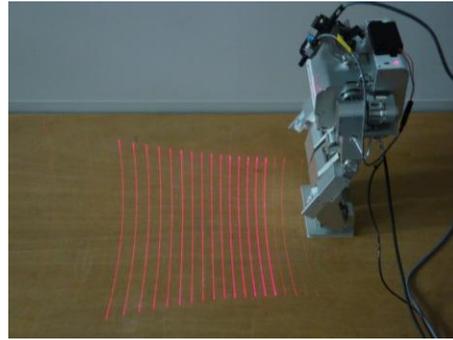


(c) 構築された三次元モデル (テクスチャあり)

図 4 三次元環境モデリングの例: 190 枚の画像から構築

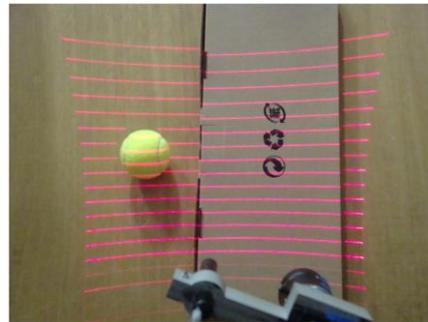


(a) センサ外観

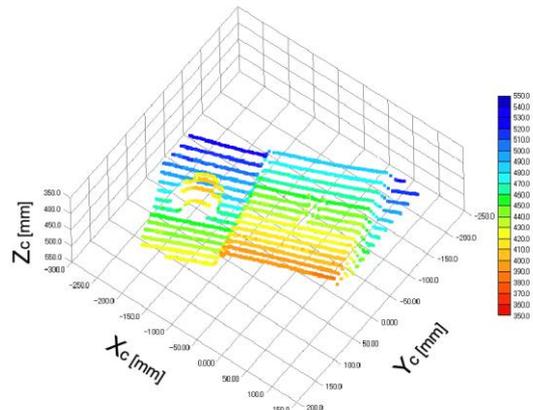


(b) ヒューマノイドロボットに搭載した様子

図 5 構築したマルチスリットレーザプロジェクタを用いた距離画像センサ



(a) 対象シーン



(b) 得られた距離画像

図 6 距離画像の計測例

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

以下の4件はいずれも査読あり。また、発表者は研究室の院生である([2]以外)。

[学会発表] (計 10 件)

[1] 黒木崇博：“マルチスリット光を用いた小型距離画像センサによるヒューマノイドの障害物回避”，第16回ロボティクスシンポジウム予稿集，指宿，2011-3-14.

[2] Kazunori Umeda：“A 100Hz Real-time Sensing System of Textured Range Images,” ISOT 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies, Toronto, Canada, 2010-10-25.

[3] Takahiro Kuroki：“Construction of a Compact Range Image Sensor Using Multi-Slit Laser Projector and Obstacle Detection of a Humanoid with the Sensor,” 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010), Taipei, Taiwan, 2010-10-21.

[4] Hidetoshi Ishiyama: Real-time Sensing of Textured Range Images for Localization and Mapping, Proc. of 15th Japan-Korea Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2009), Andong, Korea, 2009-2-6.

[その他]

(ホームページ)

<http://www.mech.chuo-u.ac.jp/umedalab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

梅田 和昇 (UMEDA KAZUNORI)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：10266273

### (2) 研究分担者

寺林 賢司 (TERABAYASHI KENJI)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：20509161