

# 日本機械学会論文集 Transactions of the JSME (in Japanese)

# マルチスリット光を用いたロボットハンドに利用可能な 近距離計測用小型距離画像センサの構築

福田 智章<sup>\*1</sup>, 池 勇勳<sup>\*2</sup>, 梅田 和昇<sup>\*3</sup>

# Development of a small range image sensor for short distance measurement suitable for robot hands using a multi-slit laser projector

Tomoaki FUKUDA<sup>\*1</sup>, Yonghoon JI<sup>\*2</sup> and Kazunori UMEDA<sup>\*3</sup> \*1.\*2.\*3 Department of Precision Mechanics, Chuo University

1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

# Received: 1 March 2019; Revised: 19 May 2019; Accepted: 8 August 2019

### Abstract

This paper proposes a structure and a measurement method of a very small range image sensor for short distance measurement using a multi-slit laser projector. In recent years, industrial robots used in production lines have become widespread, and development of humanoid robots that operate in the same environment as humans is also proceeding. Many of these robots have an arm mechanism for gripping an object. In order to grasp an object, it is necessary to measure the distance and the object, so these robots are equipped with range image sensors. However, if the position of the range image sensor is away from the arm end, occlusion occurs by the arm during the gripping operation, and the object to be gripped cannot be measured. Therefore, a very small range image sensor that can be attached to a robot hand is required. The sensor used in this research projects multi-slit laser and measures the distance by the disparity of the detected laser light. For measurement, it is necessary to identify the number of each slit laser. Therefore, for the discrimination, the intensity information of the laser light image is used. The effectiveness of the proposed sensor is verified through short-range object measurement experiments.

Keywords : Small sensor, Range image sensor, Multi-slit laser projector, Robot hand, Image processing

# 1. 緒 言

近年,工場のオートメーション化は高品質なものづくり,人件費の削減を始めとする製品のコスト削減を目的 として広く進められている.工場内で稼働する産業用のロボットは増え続け,新興国においても普及が見込まれ る.今後も産業用ロボットは世界中で需要が期待される.これらのロボットは,物体を把持するためのロボット ハンドとアーム機構を持つことが多い.ロボットハンドで把持動作を行う際,把持対象までの距離と形状を計測 する必要がある(湯浅他,2007)(森川他,2006).このような物体計測には距離画像センサが多く用いられてい る.これまでに開発された距離画像センサは多岐にわたる.例として,ステレオカメラや TOF (Time of Flight) 方式の距離画像センサが挙げられる,一方で,ロボットハンドによる把持動作を考えた場合,有用なセンサは限 られる.一般に,ロボットハンドと物体を計測するセンサが離れた位置にある場合,把持前にオクルージョン(隠 蔽)が生じてしまう問題がある.確実な物体把持を行うために,オクルージョンに対してロバストな計測が可能 なセンサが求められる(Khokar et al.,2010)(Arisumi et al.,2011).オクルージョンの発生を回避する方法として, ロボットハンドの手先に距離画像センサを装着し,計測対象に対して近距離計測を行うことが考えられる.これ を実現するためには,小型かつ近距離計測可能な距離画像センサが必要である.

No.19-00087 [DOI:10.1299/transjsme.19-00087], J-STAGE Advance Publication date : 23 August, 2019

<sup>\*1</sup> 中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

<sup>\*2</sup> 中央大学理工学部精密機械工学科

<sup>\*3</sup> 正員,フェロー,中央大学理工学部精密機械工学科

E-mail of corresponding author: fukuda@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

E-mail of corresponding autior. Tukuda@sensor.mech.chuo-u.a



Fig. 1 Appearance of constructed range image sensor.

Fig. 2 Internal structure of sensor.

平山ら(平山他, 2005)は、2次元測域センサを搭載したロボットハンドをチルト回転させることで3次元情 報を獲得し、把持対象が置かれた面のデータを平面ハフ変換を用いて取り除くことで把持対象物のデータのみを 抽出することを実現している.しかし、計測時に必ずハンドをチルト回転させる必要があるという問題がある. 岩崎ら(岩崎他, 2013)は、マルチレーザスリット光を用いた小型距離画像センサを構築し、100mmから 300mm までの範囲での高精度の距離計測を実現している.しかし,100 mm 以下ではスリット光像のぼけにより計測精 度が大きく低下するという問題がある.また、スリット光の対応付けの問題が発生する近距離では計測ができな い. これに対し、馮ら(馮他, 2016)は、マルチスリットレーザを照射するレーザプロジェクタとカメラを組み 合わせた小型距離画像センサを構築し、カメラで取得したレーザ光像のぼけ量の変化を利用した距離計測を実現 している.しかし、計測対象の反射率によって計測値が変化する問題があり、また、計測精度にも改善の余地が ある. 古川ら(古川他, 2016)は直線グリッド段差パターンを投影するレーザプロジェクタとカメラを組み合わ せた超小型距離画像センサを構築した.パターンの横軸の位置は3段階で変化しているため、各交点に3種類の コードを割り振ることができ、このコード情報を利用し画像上のレーザ位置の対応をとることで対応点問題を解 消している.しかし、このセンサは内視鏡診断時の食道や胃内部などの、外乱光がほとんどないシーンでの計測 を目的としており,照明がある場所での使用は考慮されていない. 上野ら(Ueno et al., 2013)は、メインレンズ と CMOS イメージセンサの間にマイクロレンズを入れた、参照光源などを使わずに取得した画像から距離を求め るパッシブ型の距離画像カメラモジュールを開発した. このセンサは小型(8.5×8.5×6.0mm) でありながら 1 フ レームの撮影で200万画素相当の2次元可視画像と26,000点の距離画像を出力できる.しかし,処理時間につい ては言及されていない.

本論文ではマルチスリットレーザを照射するレーザプロジェクタとカメラを組み合わせた小型距離画像センサ の構築と、それを用いた近距離における距離画像計測手法を提案する.距離値の計測は取得したレーザ光像の視 差を用いて行う.近距離計測時にマルチスリット光を使用すると、視差が大きいため対応付けの問題が発生する. そのため、取得したレーザ光像がどのスリットに対応するか判別する必要がある.そこで、レーザ光像の輝度情 報を用いて各スリットの判別を行う.このような処理を行うことで、従来の視差またはぼけのみを用いた手法で は計測できなかったシーンでも計測可能となる.また、計測処理時の計算負荷が小さいため、およそ 25fps での 高速な計測が可能である.

#### Fukuda, Ji and Umeda, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.85, No.877 (2019)



# 2. センサ構築

馮らが構築したセンサでは、レーザプロジェクタに Coherent MINI-715L を用いたが、このレーザプロジェクタ を使用した場合、センサの小型化に限界があり、寸法 38×30×48 mm、質量 40g にとどまっていた.本研究では、 さらなるセンサの小型化を目標とする.そのために、より小型レーザモジュールの使用や、レーザモジュールと 回折光学素子を別途選定して専用の筐体を設計することによる、レーザプロジェクタと筐体の一体化を行う.

構築したセンサの外観を図1に、内部の構造を図2に示す.先端にローパスフィルタを取り付けたカメラモジュールと、それに平行に取り付けられたレーザモジュール、スポットのレーザ光をマルチスリットに変換する回 折光学素子から構成される.レーザモジュールにはEGISMOS H8565050D/Rを用いた.レーザ光の波長は650 nm, 出力は35 mW である.回折光学素子には HOLOEYE DE-R213 を用いた.レーザ光はこの素子を通して、スリッ ト間の角度が3°の11本のスリット光として投影される.カメラモジュールには miyoshi UC-01を分解し取り出 したカラーカメラを使用する.画素数は640×480 pixel である.ローパスフィルタには FUJIFILM SC-64 を用いて おり、波長 640 nm 以下の光を遮断する.これらの部品を納める筐体は、光造形システムを用いた 3D プリンタで ある XYZprinting Nobel 1.0A を用いて作製した.カメラとプロジェクタの基線長は7.5 nm である.センサ全体の 寸法は16×10×27 nm、質量は6g(ケーブルを含まない)である.馮らのセンサと比較すると、体積は7.8%、 質量は15%である.USB からの給電のみでレーザとカメラが動作する.計測の対象となる距離は、レーザスリ ットを検出可能な 50 nm から 250 nm の範囲である.

### 3. 距離画像計測手法

# 3・1 手法の概要

距離画像計測の流れを図3に示す.センサのカメラから画像を取得し、その画像のすべての行に対して図3の 灰色部の処理を繰り返す.11本のレーザスリットを、左から順番に1番スリットから11番スリットと番号付け する.まず、レーザ光像を検出し、検出した画像上の位置に写る可能性のあるスリットの候補を選択する.次に、 検出したレーザ光像が候補となったスリットのうちの一つのものであると仮定し、視差を利用した手法と輝度値



Fig. 6 Movement of laser slit.

Fig. 7 Relation between measurement depth and laser light intensity.

を利用した手法により距離値を計算する. 視差を利用した場合,実際のスリットとは異なるスリットであると仮 定すると,真値とは大きく離れた距離値が求まる. 一方,輝度値を利用した場合,実際とは異なるスリットであ ると仮定しても,ある程度真値に近い距離値が求まる. この特性を利用して,候補となったすべてスリットにお いてこの処理をし,視差によって求めた距離値が輝度値によって求めた距離値に最も近いときに,仮定したスリ ット番号が検出したレーザ光像のスリットの番号であると確定する. そして,スリットの番号が確定したレーザ 光像から視差によって求めた距離値を計測値として出力する. 3・2~3・7節で,図4に示すような,段ボール箱 の上に直径 10 cm,高さ 10 cmの灰色の発泡スチロールの円柱を置いたシーンを計測した際の画像を例として使 用し,各処理の内容を説明する.

#### 3・2 レーザ光検出

レーザ光像を抽出するために、取得した画像をグレースケールに変換する. 図4に示す計測を行った際の取得 画像を図 5(a)に、グレースケール画像に変換した画像を図 5(b)に示す.次に、あるしきい値を設け、グレースケ ール画像上から輝度値がしきい値以上の画素を抽出する.そして、抽出した画素が行方向に一定の画素連続して ある場合、その範囲をレーザ光像として検出する.この処理を、しきい値を変更して繰り返すことで、レーザ光 像を検出する.レーザ光像として検出する画素数は7 pixel 以上 25 pixel 以下、しきい値は 200, 150, 120, 90, 60, 30, 20, 10 とした.しきい値は 8 通りなので、画素の抽出とレーザ光像の検出の処理は 8 回行われる.8 回の処理で 1 度でも検出された画素はレーザ光として今後の処理を行う.このようにしきい値を変化させることで、計測環境 が明るい場合や計測対象までの距離が近い場合でも安定してレーザ光像を抽出することができる.グレースケー ル画像から検出したレーザ光像のみを抽出し、分かりやすいようにガンマ値を 2 としてガンマ補正を行い赤色で 表示した画像を図 5(c)に示す.次に、レーザ光像の中心の座標を求める.レーザ光の輝度値を重みとして、検出 した座標の重み付き平均をレーザの中心座標とする.レーザ光像の中心を求めた画像を図 5 (d)に示す.

#### 3・3 検出位置からのレーザスリット判別の候補選択

本センサで計測対象とする距離は 50 mm から 250 mm までとしているが,計測対象までの距離が近距離の場合 と遠距離の場合で,画像上でのレーザスリットの位置がスリット間隔以上に大きく移動する.図6にそれぞれ距 離 50 mm,250 mm の平面を計測した際のスリットの移動量を示す.岩崎らは,レーザスリットごとに探索範囲 を限定することで各スリットの判別を行っていたが,本センサでは同じ位置に結像する可能性のあるレーザスリ ットが複数あるため,同様の手法でスリットの判別を行うことはできない.この段階では,まずレーザ光像を取 得した位置に結像可能性のあるレーザスリットを候補とする.例として,レーザ光像を取得した点のX軸座標が 400 pixel であった場合,その点に結像する可能性があるのは5~7番スリットなので,これらを候補とする.

#### 3・4 輝度値による距離値計算

3・2節で検出した、グレースケール画像上の各行の各レーザ中心位置において、レーザ中心とその左右 10 pixel の画素の平均輝度値を求める.計測対象までの距離Z [mm]と輝度値Iの関係は次式のようにモデル化できる.

$$I = (aZ^{-2})^{\gamma} \tag{1}$$

a:キャリブレーションにより求まる係数

y:カメラのガンマ値

式(1)より、レーザ光像がn番スリットだと仮定した場合、輝度値によって距離値Z<sub>in</sub> [mm]は次式で求められる.

$$Z_{in} = a_{in}I^{-\frac{1}{2\gamma}} = a_{in}I^{-b_{in}}$$
(2)

a<sub>in</sub>, b<sub>in</sub>: キャリブレーションにより求まる係数 (n 番スリット時)

*a<sub>in</sub>*, *b<sub>in</sub>*は、レーザ中心の Y 座標と *n* の値によって変化する. そこで、これらの係数をキャリブレーションによ り求める. 各スリットの結像位置で、計測対象までの距離を変化させながら輝度値を取得した. 計測対象にはカ メラの光軸に対して垂直な木製の板を使用した. 例として、画像の左上にあたる 1 番スリットの Y 軸座標 40 pixel の点 (Point 1) と、画像中央にあたる 6 番スリットの Y 軸座標 240 pixel の点 (Point 2) での、計測対象までの距 離と輝度値の関係を図 7 に示す. *b<sub>in</sub>*は理論上はカメラのガンマ値によって定まる定数となるはずであるが、キャ リブレーション結果からこのような変数とした.

#### 3・5 視差による距離値計算

三角測量の原理から、無限遠の結像位置からの視差 d は次式により表される.

$$d = x - x_{\infty} = \frac{b \cdot f}{p \cdot z} = \frac{\alpha}{z}$$
(3)

z:対象までの距離 [mm]

b: 基線長 [mm]

f: レンズの焦点距離 [mm]

```
p: イメージセンサー画素の大きさ [mm/pixel]
```

*d*: 視差 [pixel]

**x**:対象で反射したスリット光の画像上の位置 [pixel]

 $x_{\infty}$ :対象を無限遠と仮定した時のスリット光の画像上の位置[pixel]

式(3) より、レーザ光像が n 番スリットだと仮定した場合、視差によって距離値 $Z_{dn}$  [mm]は次式で求められる.

$$Z_{dn} = \frac{\alpha_{dn}}{x - x_{n^{\infty}}} \tag{4}$$

 $\alpha_{dn}$ はキャリブレーションによって求まる係数, $x_{n\infty}$ は対象を無限遠と仮定した時の n 番スリットの結像位置 [pixel]を示す.

### 3・6 レーザスリット判別

3・1節で述べたように、検出したレーザ光像のスリット番号の仮定が間違っていた場合、視差による計測値は 真値と大きく異なるが、輝度値による計測値はある程度真値に近いものとなる.よって、候補となったすべての



(a) Wooden board.

Fig. 10 Measurement objects with different reflectance.

スリットに対して視差による距離値を求め、輝度値による距離値に最も近い値となるスリットを対応するスリッ トと判別する.このとき、視差から得られる距離値を最終的な結果とする.

#### 3·7 距離画像の出力

3・2~3・6節の処理をグレースケール画像のすべての行のレーザ光像検出箇所に行うことで距離画像を生成す る. 同じ行内で,同じレーザスリットであると判別されたレーザ光像検出箇所が複数あった場合は,それらの中 で最も輝度から得られる距離値と視差から得られる距離値の差が小さかった値のみを使用する.図4に示す計測 を行った際の距離画像を図8に、3次元点群で表示した画像を図9に示す.

#### 4. 計測実験

#### 4·1 平面計測実験

本センサの計測精度を検証するために,反射率の異なる複数の平面を対象に計測実験を行った.計測対象には, 木製の板(中密度繊維板)、銀色のプラスチックケース、黒画用紙の3つを使用した.これらにレーザを照射した 際の画像を図 10 に示す. 計測は対象までの距離を 50 mm から 250 mm まで 25 mm 間隔で変化させて行った. 距 離値を取得する点は、画像の周辺部にあたる1番スリットのY軸座標40 pixelの点(Point1)と、画像中央にあ たる6番スリットのY軸座標240 pixel の点(Point2)の2点とした.計測はそれぞれの距離で5回行った.計測 結果を表 1 に示す. 木製の板を計測した結果, どちらの計測点でも常に真値に近い計測値が得られた. 一方, プ ラスチックケース、黒画用紙を計測した結果、距離値が取得できない場合や真値から大きく離れた値となる場合 がみられた. 図 11 に距離 50 mm でプラスチックケースを計測した際の画像を示す. プラスチックケースを計測 した場合は、反射率が高いため、Point 2 を含む画像中心付近において対象までの距離が 150 mm 以下の場合レー

#### Fukuda, Ji and Umeda, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.85, No.877 (2019)



#### Table 1 Results of plane measurement experiment.



(a) Acquired image. (b) Range image. Fig. 11 Measurement failure example of high reflectance (Plastic case: 50 mm). (a) Acquired image.(b) Range image.Fig. 12 Measurement failure example of low reflectance (Black paper: 250 mm).

ザ光像を正確に検出できず,また,175 mm 以上ではレーザ光像を1つ左のスリットのものと誤判別したと考えられる.図12に距離250 mm で黒画用紙を計測した際の画像を示す.黒画用紙を計測した際は,反射率が低いため,Point2を含む画像中心付近において対象までの距離が150 mm 以下の場合,レーザ光像を1つ右のスリットのものと誤判別したと考えられる.また,対象までの距離が大きくなるにつれてPoint1のような画像周辺部ではレーザ光を検出できず距離値を取得できなくなった.

鏡面反射成分の大きい対象や反射率が極端に小さい対象では、計測範囲内であってもレーザスリットを検出で きなかった.また、計測対象の反射率がキャリブレーションを行った対象と大きく異なる場合、スリット番号を 誤判別し、真値と大きく異なる計測値が求まることがあった.しかし、スリット番号を正しく判別できている場 合、馮らの提案したぼけを利用した手法と比較するとより真値に近い計測値が得られた.また、馮らの手法では 標準偏差が計測距離の約4%であったが、本手法での標準偏差は計測距離の1%未満であった.把持直前となる 至近距離での計測時の誤差は1.5mm以下,把持前の中距離での計測時の誤差も5%以下となっているため、一般 的な把持動作に用いるには十分な精度が得られたと考えられる.また、馮らの行った、計測対象を白い紙から段 階的に暗い色の紙に変更して計測する実験では、対象が変わるたびに計測値が変化していたが、本センサではス リットの誤判別が生じない程度の反射特性の変化であれば、常に正確な距離値が取得できたため、対象の反射率 の変化へのロバスト性は向上したと考える.

#### 4·2 一般物体計測実験

本センサでの物体形状計測における有用性を検証するために、いくつかの物体で計測実験を行った.計測対象 には、光沢のある飛行機の模型、表面が毛布状のコアラの人形、暗い色の恐竜の模型を使用した.それぞれの計 測対象の計測シーンを図13に、距離画像を図14に、3次元点群を図15に示す.計測面の光沢が強い飛行機模型 と、反射率の低い暗い部分が多い恐竜模型では、一部でスリットの誤判別による誤計測が発生した.しかし、誤 計測の発生した部分は少なく、すべての計測対象で形状を把握することができる距離画像を得られた.

これらの結果から、本センサはキャリブレーション対象と極端に反射特性が異なる対象でなければ形状計測が 可能であり、ロボットハンドに搭載した際の物体形状計測に有用だと考える.



## 5. 結 言

本論文では、マルチスリットレーザを照射するレーザプロジェクタとカメラを組み合わせた小型距離画像センサ を構築し、それを用いた距離画像計測手法を提案した.従来のマルチスリット光を利用したセンサから小型化を 実現するとともに、従来手法では対応付けの問題から計測ができなかった近距離での高精度な計測を実現した. 計測実験により、近距離において正確な距離値を計測できるが、反射率が極端に高いあるいは低い計測対象では 計測が不安定になるという結果を得られた.

今後は、取得したカラー画像から計測対象の反射特性の変化を判断することで、リアルタイムにキャリブレー ションする機能の追加を検討している.これにより、多様な計測対象においてより高精度な距離画像計測を目指 す.そのために、反射率が既知な対象の計測実験を行い、より詳細な反射率と計測結果の関係性の考察を行う. また、本センサで馮らが提案した計測手法による距離画像計測を行い、従来センサとの比較を行う.これらの検 証を行ったのち、本センサを実際にロボットハンドに取り付け、有用性を検証する実験を行う.

# 文 献

- Arisumi, H., Kwak, N. and Yokoi, K., Systematic touch scheme for a humanoid robot to grasp a door knob, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (2011), pp.3324–3331.
- 馮 益,木村 優志,増山 岳人,梅田 和昇,スリット像のぼけの計測と視差計測とを組み合わせたマルチスリットレーザプロジェクタを用いた小型距離画像センサの構築,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集 (2016), 1A2-19a7.
- 古川 亮, 川崎 洋, 佐川 立昌, 佐野村 洋次, 田中 信治, 吉田 成人, DOE パターン投光器を用いた動的ステレ オ 3 次元内視鏡, 第 22 回画像センシングシンポジウム (2016), IS2-22.
- 平山喬之,前山祥一,永谷圭司,田中豊,手先に搭載した測域センサを用いた移動マニピュレータによる把持動 作計画,第6回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会論文集 (2005), pp.575-576.
- 岩崎一也, 寺林賢司, 梅田和昇, マルチスリットレーザプロジェクタを用いた超小型距離画像センサの構築, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.803 (2013), pp.2451-2459.
- Khokar, K., Reed, B, K., Alqasemi, R. and Dubey, R., Laser-assisted telerobotic control for enhancing manipulation capabilities of persons with disabilities, Proc. of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2010), pp.5139–5144.
- 森川翔,並木明夫,石川正俊,小型軽量高速ビジョンを搭載したロボットマニピュレータによる実時間障害物回 避行動,第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (2006), 2B18.
- Ueno, R., Suzuki, K., Kobayashi, M., Kwon, H., Honda, H. and Funaki, H., Compound-eye camera module as small as 8.5 × 8.5 × 6.0 mm for 26 k-resolution depth map and 2-Mpix 2D imaging, IEEE Photonics Journal, Vol.5, No.4 (2013).
- 湯浅卓也,怡士順一,栗田雄一,松本吉央,小笠原司,ヒューマノイドによるレーザーレンジファインダを用いた三次元地図作成と障害物回避,第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会予稿集 (2007),2B3-3.

#### References

- Arisumi, H., Kwak, N. and Yokoi, K., Systematic touch scheme for a humanoid robot to grasp a door knob, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (2011), pp.3324–3331.
- Feng, Y., Kimura, M., Masuyama, G. and Umeda, K., Development of compact range image sensor with multi-slit laser projector that uses disparity and blur, Proceedings of The Robotics and Mechatronics Conference (2016), 1A2-19a7 (in Japanese).
- Furukawa,R., Kawasaki, Y., Sagawa, R., Sanomura, Y., Tanaka, S. and Yoshida, N., Dynamic stereo endoscope using DOE pattern projector, The 22<sup>nd</sup> Symposium on Sensing via Image Information (2016), IS2-22 (in Japanese).
- Hirayama, T., Maeyama, S. and Tanaka, Y., Grasping motion planning of the mobile manipulator using the laser range sensor, Transactions of System Integration Division Annual Conference (2005), pp.575-576 (in Japanese).
- Iwasaki, K., Terabayashi, K. and Umeda, K., Construction of a very compact range image sensor using a multi-slit laser projector, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.79, No.803 (2013), pp.2451-2459 (in Japanese).
- Khokar, K., Reed, B, K., Alqasemi, R. and Dubey, R., Laser-assisted telerobotic control for enhancing manipulation capabilities of persons with disabilities, Proc. of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2010), pp.5139–5144.
- Morikawa, S., Namiki, A. and Ishikawa, M., Real-time obstacle avoidance behavior by a robot manipulator equipped with a lightweight high-speed vision, Proceedings of The Robotics Society of Japan Conference (2006), 2B18 (in Japanese).
- Ueno, R., Suzuki, K., Kobayashi, M., Kwon, H., Honda, H. and Funaki, H., Compound-eye camera module as small as 8.5 × 8.5 × 6.0 mm for 26 k-resolution depth map and 2-Mpix 2D imaging, IEEE Photonics Journal, Vol.5, No.4 (2013).
- Yuasa, T., Ido, Z., Kurita, Y., Matumoto, Y. and Ogasa, G., 3D map creation and obstacle avoidance using laser range finder by humanoid, Proceedings of System Integration Division Annual Conference (2007), 2B3-3 (in Japanese).