

# マニピュレータ搭載の LRF による水槽面と水中物体の 3 次元形状計測

伊部 公紀<sup>†</sup> 山下 淳<sup>‡</sup> 金子 透<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部情報科学専攻 〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

<sup>‡</sup> 静岡大学工学部機械工学科 〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

E-mail: <sup>†</sup> f5745016@ipc.shizuoka.ac.jp, <sup>‡</sup> {tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

**あらまし** 本研究ではカメラとスポット光レーザからなるレーザレンジファインダ (LRF) をマニピュレータに搭載し、水槽面と水中物体からのレーザ反射光をカメラで取得することにより水槽面と水中物体の両方を計測する手法を提案する。レーザ光は水槽面および水中物体からだけでなく様々な経路で反射し、カメラ画像に映り込む。そのため、水槽面と水中物体からの反射光を判別する手法が必要となる。そこで、水槽面からの反射光については LRF の姿勢を変化させることで特定する方法を、水中物体からの反射光については光線追跡における光線間距離を用いて特定する方法をそれぞれ構築する。また、曲面形状の水槽に入れられた水中物体を提案手法により計測し、その計測結果から手法の有効性を示す。

**キーワード** 水中センシング, 光の屈折, レーザレンジファインダ, マニピュレータ, 3 次元計測

## 3D Measurement of Water Tank Surface and Submerged Objects by a LRF Mounted on a Manipulator

Hirotoishi IBE<sup>†</sup> Atsushi YAMASHITA<sup>‡</sup> and Toru KANEKO<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University 3-5-1, Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561 Japan

<sup>‡</sup> Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University 3-5-1, Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561 Japan

E-mail: <sup>†</sup> f5745016@ipc.shizuoka.ac.jp, <sup>‡</sup> {tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

**Abstract** In this paper, we propose 3D measurement methods of water tank surface and submerged objects by using a laser range finder (LRF) which consists of a camera and a spot light laser mounted on a manipulator. When applying our methods to measure water tank surface and submerged objects, we meet with the problem of recognition of reflected light from water tank surface and submerged objects in an image. Therefore, we propose methods to recognize these reflected lights. To recognize reflected light from water tank surface, the method uses LRF to variations of LRF posture. In addition, to recognize reflected light from submerged objects, the method uses distance between laser and camera ray in ray tracing. Experimental results show the effectiveness of our proposed methods.

**Keyword** Aquatic Sensing, Refraction of Light, Laser Range Finder, Manipulator, 3D-Measurement

### 1. 序論

海中生物などの標本は長期間の保存のために、水やホルマリンといった液体で満たされた透明な水槽に入れられる。標本の中には貴重なものも多く、標本の形状や色などの情報を計測し、デジタルアーカイブ化することで標本の共有が可能となる。このため、水中標本（以下、水中物体）の形状計測手法は重要である。

カメラ画像を用いた計測手法はミリメートルから数メートルオーダーの物体において高精度に計測でき、

水中物体の計測に有効であると考えられる。しかし水中物体の計測では、カメラ、水槽および水中物体がそれぞれ空気、ガラスそして水（またはホルマリンなどの液体）と屈折率が異なる環境下にある。このため、カメラ-水槽表面（容器の外側）と水槽裏面（容器の内側）-水とで光の進む方向が変わる屈折現象が起きる。図 1 は水槽中の物体を半分だけ水に入れた状態で、水槽の外側からカメラにより撮影したものである。水面を境に物体の輪郭が不連続になり像が歪んでいること

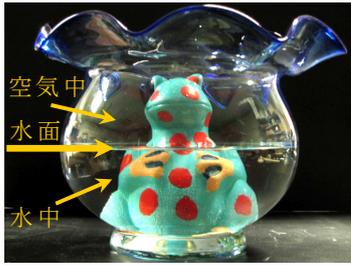


図1 光の屈折による像の歪み

が確認できる．このため，カメラ画像を用いて水中物体を計測するには光の屈折を考慮する必要がある[1]．

この問題を解決するために，光線追跡により光の屈折を考慮して計測する手法が用いられる[2]．光線追跡を用いた従来手法としては，ステレオカメラによる計測法[3]およびパターン光投影法による計測法[4]などがある．これらの手法で光線追跡を行うためには光が屈折する水槽面（水槽表面，水槽裏面）の位置形状とカメラとの位置関係を事前に調べておく必要がある．

水槽面の位置形状と水中物体形状の両方を取得する方法として，マニピュレータに搭載されたスポット光レーザとカメラからなるレーザレンジファインダ（LRF）を用いた手法が提案されている[5]．この手法はレーザから照射されたスポット光が水槽表面に入射した際にわずかながら反射した光（水槽面反射光）と，水槽面を透過し水中物体表面において反射した光（水中物体反射光）をカメラにより取得することで画像計測を行う．取得された水槽表面反射光からピンホールカメラモデルに基づいて水槽表面の位置形状を計測し，水中物体反射光から光線追跡を用いて光の屈折を考慮することにより水中物体を計測する．

上記手法では画像から水槽表面反射光を抽出するために，空気中におけるエビポラ拘束を用いている．しかし，画像にはレーザの照射口が水槽表面で反射した映り込みや水槽内においてレーザが乱反射した光などが存在し，それらがエビポラ線上に位置するケースがある．このため，エビポラ拘束のみを用いて水槽面反射光を特定することは困難である．

そこで本研究では，LRFの姿勢変化とエビポラ拘束を利用して水槽表面反射光を特定する手法およびレーザ光線とカメラ光線をそれぞれ光の屈折を考慮して光線追跡し，それらの最小光線間距離により水中物体反射光を特定する手法を提案する．また，提案手法の有効性を検証するために，水槽に入れられた水中物体の3次元形状計測を行うことを目的とする．

## 2. 処理の概要

本研究では，マニピュレータに搭載されたLRFを水槽に沿って移動させ，スポットレーザ光を水槽に照射し，その反射光を撮影して計測を行う．

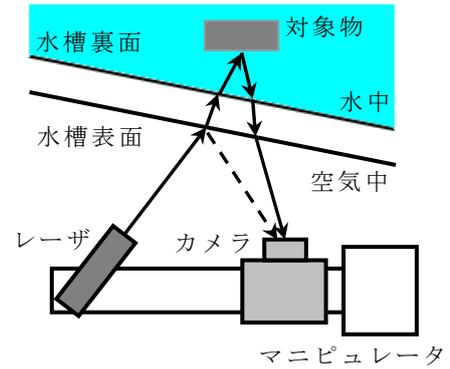


図2 計測モデル

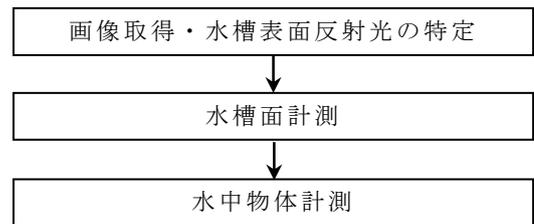


図3 処理手順

提案手法の計測モデルを図2に示す．レーザから照射されたスポット光は水槽表面に入射した際にその一部が散乱反射しカメラに到達する（図2破線矢印）．また，水槽表面を透過した光は水槽表面と水槽裏面で屈折し，水中物体に入射する．水中物体から反射した光は再度，水槽裏面と水槽表面で屈折して水槽の外側に進みカメラに到達する（図2実線矢印）．本手法では水槽表面反射光と水中物体反射光をカメラにより撮影し水槽表面と水中物体の両方を計測する．

計測の処理手順を図3に示す．マニピュレータによりLRFを各計測位置に移動させて画像を撮影する．この際，水槽表面反射光の認識が困難な場合はLRFの姿勢を変化させて画像を取得し，水槽表面反射光の特定を行う．すべての計測位置において画像を撮影し，水槽面の計測を行う．次に，光線追跡により屈折を考慮して水中物体の計測を行う．

## 3. 計測原理

### 3.1. 水槽表面反射光の特定

画像上の反射光の候補点を抽出するために，取得画像に対してグレースケール化，閾値処理および領域分割を行い，得られた各領域について輝度重心座標を算出し，これを各候補点の位置とする．

水槽表面反射光の画像座標 $(u, v)$ はレーザとカメラの位置姿勢からエビポラ拘束により次式を満たす．

$$|v - (\alpha u + \beta)| < T_e \quad (1)$$

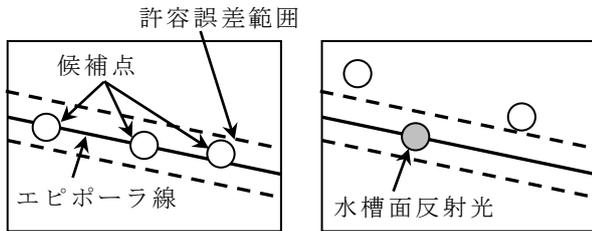
ここで， $\alpha$ と $\beta$ はエビポラ拘束により定まる定数で， $T_e$ はノイズの影響を許容するための定数である．

画像から抽出された各候補点についてエピポーラ拘束を満たしているか調べ、満たさない候補点を除外する。従来研究[5]では LRF の配置 (図 2 のようにレーザーがカメラの左側に位置する場合) からエピポーラ拘束を満たす候補点の中から最も左側 (LRF の配置が逆の場合は最も右側) に位置するものを水槽表面反射光として抽出する。この方法は取得画像中に水槽表面反射光と水中物体反射光しか存在しない場合は適切に抽出することができる。しかし、水槽内に入射した光が水中物体と水槽面との間で乱反射した光やレーザー装置の放射口が映り込む場合など様々な要因により画像上に候補点が生じる。このため、エピポーラ拘束と LRF の配置による条件だけでは誤抽出することがある。

本手法では、エピポーラ線上に複数の候補点が存在する場合に、水槽表面の形状が滑らかであることを前提として、LRF をマニピュレータにより姿勢変化させて画像を取得し、画像上の候補点を追跡することで水槽表面反射光を特定する。LRF の姿勢変化における候補点の移動を図 4 の模式図に示す。円は候補点、実線はエピポーラ線そして破線はエピポーラ線からの許容誤差範囲を表している。図 4(a)において LRF の姿勢を変化させる前ではエピポーラ線上に 3 つの候補点が存

在している。図 4(b)に示すように LRF の姿勢を変化させると、水槽面反射光の候補点はエピポーラ線上を移動するが、水槽面反射光以外の候補点はエピポーラ線から離れて移動する。

エピポーラ線上の候補点が複数存在する場合に LRF の姿勢変化を利用して水槽表面反射光を特定する手順を図 5 に示す。まず、計測位置における画像を取得しエピポーラ線上の候補点を抽出する。ここで、候補点が 1 つである場合、それを水槽表面反射光として処理を終了する。候補点が複数存在する場合は、LRF を姿勢変化させ画像を取得し、画像上の候補点の抽出を行う。姿勢変化前のエピポーラ線上の候補点について姿勢変化後の画像から抽出された候補点の中から最も近いものを対応する候補点として追跡する。追跡した候補点について式(1)によりエピポーラ拘束を満たすか調べ、満たさないものを追跡から除外する。追跡している候補点が複数存在する場合は姿勢変化と追跡を繰り返す。候補点の数が 1 つに絞られた場合、それを水槽表面反射光として特定し、LRF の姿勢を元の姿勢に復帰する。



(a) 姿勢変化前 (b) 姿勢変化後  
図 4 LRF の姿勢変化による候補点の移動

### 3.2. 水槽面計測

水槽面 (水槽表面, 水槽裏面) の計測はまず水槽表面反射光の画像座標から水槽表面の計測を行う。次に、得られた水槽表面の計測点群から水槽表面を表す近似モデルを求める。そして、水槽表面上の法線ベクトルを近似モデルから求め、水槽の厚さが均一であると仮定し、水槽裏面の位置を推定する。また、水槽表面と同様に水槽裏面の近似モデルを求める。

### 3.3. 水中物体計測

水中物体の計測はレーザー光線とカメラ光線 (反射光の画像座標から算出) を追跡して行う。それぞれの光線について、水槽表面との交点位置と交点位置における法線ベクトルを水槽表面の近似モデルを用いて求める。屈折を考慮し、法線ベクトルにより水槽内における方向ベクトルを求める。次に、水槽裏面についても同様に交点位置と法線ベクトルを水槽裏面の近似モデルにより求め、水中における方向ベクトルを算出する。光線追跡により求めた水中におけるレーザー光線とカメラ光線の交点位置を水中物体の 3 次元位置として求める。一般的に、ノイズにより光線は交わらず交点は存在しない。そこで、光線間の距離が最小となる位置においてその中点として 3 次元位置を求める。水中物体の計測には、画像中から水中物体反射光を抽出する必要がある。そこで、画像上の各候補点について、カメラ光線の光線追跡を行い、水中におけるレーザー光線との光線間距離を求める。光線間距離が最小となる候補点を水中物体反射光として抽出する。

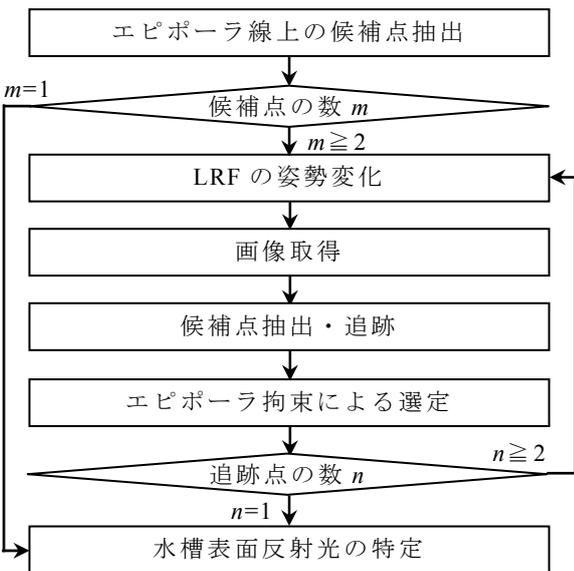


図 5 LRF の姿勢変化による水槽表面反射光の特定

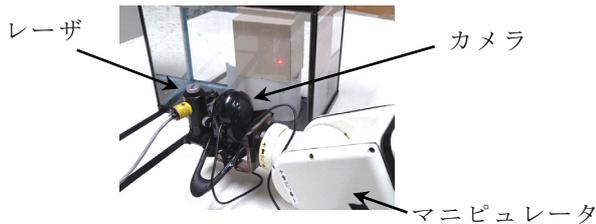


図 6 実験装置



図 7 水槽（金魚鉢）



図 8 水槽表面反射光

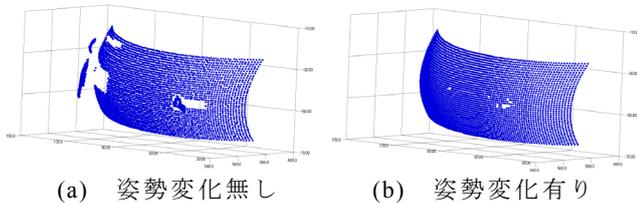


図 9 LRF の姿勢変化による水槽表面（鳥瞰図）

## 4. 実験

実験に用いる装置を図 6 に示す．カメラの左側にレーザを配置した LRF をマニピュレータの手先に固定する．実験では，マニピュレータは平行移動で動作させ，水槽面に沿って 1mm 間隔で計測を行った．また，水槽面の近似モデルには 2 次曲面を採用した．

### 4.1. 水槽表面計測

提案手法を用いて図 7 に示す曲面形状の水槽（金魚鉢）の水槽表面計測を行った．図 8 にカメラにより取得した画像を示す．エピポーラ線上には 2 つの反射光の候補点が存在しているが，左の候補点はレーザの照射口が水槽表面で反射し映り込んだものであり，右は水槽表面反射光である．この場合，従来手法を用いると左の候補点を水槽表面として誤抽出するが，LRF の姿勢変化と候補点の追跡を行った結果，右の候補点が水槽表面反射光として特定された．

従来手法を用いて水槽表面反射光を抽出し，水槽表面の計測を行った結果を図 9(a) に示す．また，提案手法を用いた場合の結果を図 9(b) に示す．従来手法では水槽表面反射光の誤抽出により計測結果の 1 部が崩れているが，提案手法では誤抽出がなく水槽表面の形状を計測できた．

### 4.2. 水中物体計測

図 10 の 90deg の角を持つアングル材と図 10 のイルカの模型を水中物体として，それぞれ計測を行った．



図 10 アングル材



図 11 イルカの模型

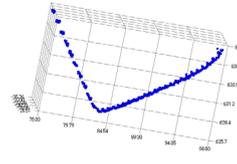


図 12 アングル材（上面図）

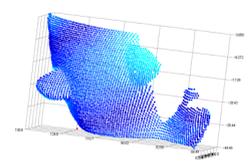


図 13 イルカの模型（鳥瞰図）

図 12 はアングル材の，図 13 はイルカの模型の計測結果である．図 12 の結果から，それぞれの面の最小 2 乗平面の成す角は 88.3deg となり，アングル材の形状を再現できている．また，図 13 の結果からイルカの尾ビレや胸ビレの形状が再現できている．

## 5. 結論

本研究で，マニピュレータに搭載した LRF により水槽面と水中物体の両方の形状計測を行う手法と，水槽表面反射光と水中物体反射光を特定するための手法を提案した．その結果，水槽表面反射光と水中物体反射光を誤抽出することなく抽出し，水槽表面と水中物体の形状を計測できることが確かめられた．

今後の展望として，カメラにより得られる色情報を用いて水中物体の色を復元することが考えられる．

## 文 献

- [1] 山下淳，池田真輔，加藤進，藤井彰，金子透：“ビジョン技術を用いた水中環境センシング”，電気学会研究会資料（情報処理/産業システム情報化合同研究会 IP-05-1～10/IIS-05-1～10），pp.27-32，（May 2005）
- [2] Rongxing Li, Haihao Li, Weihong Zou, Robert G. Smith and Terry A. Curran: “Quantitative Photogrammetric Analysis of Digital Underwater Video Imagery”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 22, 2, pp.364-375, (Apr. 1997)
- [3] 山田孝司，平野太郎，山下淳，金子透：“魚眼ステレオカメラを搭載した水中ロボットによる 3 次元計測”，映像情報メディア学会技術報告，35，8，pp.93-96，（Feb. 2011）
- [4] Ryohei Kawai, Atsushi Yamashita and Toru Kaneko: “Shape Measurement of Underwater Objects by Using Space Encoding Method”, Proceedings of the 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 1A2-16, pp.1-5, (Nov. 2009)
- [5] Atsushi Yamashita, Shinsuke Ikeda and Toru Kaneko: “3-D Measurement of Objects in Unknown Aquatic Environments with a Laser Range Finder”, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3923-3928, (Apr. 2005)