

レーザレンジファインダによる透明容器と液中物体の3次元形状計測

○ 伊部 公紀†, 山下 淳‡, 金子 透*, 小林 祐一*

○ Hirotoshi IBE †, Atsushi YAMASHITA ‡, Toru KANEKO and Yuichi KOBAYASHI

†: 静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部, f5745016@ipc.shizuoka.ac.jp

‡: 東京大学大学院工学系研究科, yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp

*: 静岡大学工学部, {tmtkane, tykobay}@ipc.shizuoka.ac.jp

マニピュレータに搭載したカメラとレーザで構成されたレーザレンジファインダにより透明容器内の液中物体の3次元形状を計測する手法を提案する。光の屈折を考慮して正確に計測するためには、屈折境界面である透明容器の位置形状も計測する必要がある。照射したレーザ光が容器と液中物体で反射した光を撮影したカメラ画像を用いて3次元位置を計測するには、撮影画像中から容器と液中物体からの反射光を正確に抽出する必要がある。そこで本手法では、容器からの反射光の抽出にエピソード拘束とレーザレンジファインダの姿勢変化を用いる方法および液中物体からの反射光の抽出に光線追跡を用いる方法をそれぞれ提案する。実験により提案手法が正確に反射光を抽出し、容器と液中物体を共に精度良く計測できることを確認した。
<キーワード> 液中画像計測, レーザレンジファインダ, 3次元計測, エピソード拘束, 光線追跡

1. はじめに

遺跡や彫像などの歴史的資料を3次元形状計測することによりデジタルアーカイブ化する試みが進んでいる。これにより貴重な資料を情報媒体に保存することで閲覧や研究資料として用いることが可能となる[1]。

従来、アーカイブ化の対象として計測される資料は主として空気中に置かれているものであるが、深海魚の液中標本など液中保存されているものにも貴重なものが多く、液中物体をデジタルアーカイブ化するために、その計測技術が求められる。

一般に液中物体は液体で満たされた透明容器内に保存されており、容器越しに非接触で計測することのできる手法として画像計測が有効であると考えられる。しかし、光が液体、容器そして空気へと屈折率が異なる媒質へ進む際に光が屈折するため、撮影される画像に歪みが生じる。そこで、Liらは光線追跡とスネルの法則を用い、屈折を考慮して光の進行方法を算出し、撮影画像から正確に液体環境下の物体を計測する手法を提案している[2]。

スネルの法則により屈折方向を計算するためには屈折が生じる屈折境界面である容器の位置形状情報

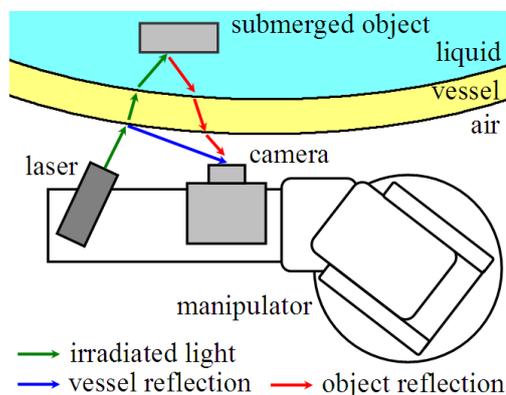


図1 レーザレンジファインダ

が必要となるが、Yamashitaらはカメラとスポット光源のレーザを組み合わせたレーザレンジファインダ(LRF)をマニピュレータに搭載し、レーザから照射した光が容器表面と液中物体で反射した光(以降、容器反射光および液中物体反射光と呼ぶ)をカメラにより撮影することで、容器の位置形状を計測してから液中物体を計測する手法を提案している(図1)[3]。これにより容器と液中物体の両方を非接触に計測することが可能となる。しかし、Yamashitaらの手法では撮影画像中に容器反射光と液中物体反射光以外の反射光が存在する場合、誤計測することがある

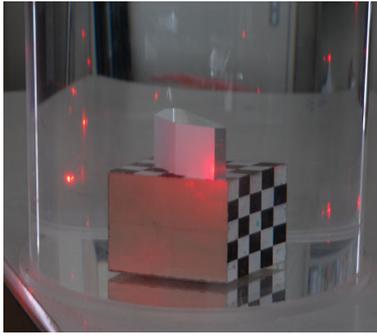


図2 レーザ反射光

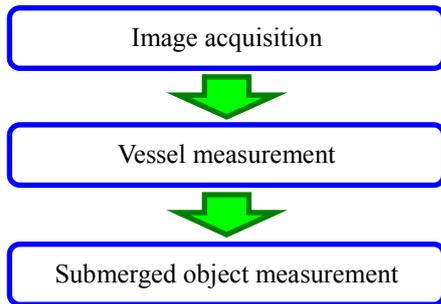


図3 計測手順

という問題点がある。

図2は円柱容器内の液中物体に赤色レーザを照射した際の反射画像を撮影したものである。レーザ光は容器と物体間で複雑に反射し、様々な経路によりカメラ画像に映り込む。これらの反射光は同じレーザ光源に由来するため色特性などにより識別することは困難である。

そこで本論文では、カメラとレーザのエピポーラ拘束と LRF の姿勢変化を用いて容器反射光を抽出し、また光線追跡により液中物体反射光を抽出する方法を提案する。これにより誤抽出することなく透明容器と液中物体の両方を計測することができる。

2. 計測手順

本研究では Yamashita ら[3]と同様に図1に示す構成のマニピュレータに搭載された LRF により透明容器と液中物体を計測する。提案手法の計測手順を図3に示す。

マニピュレータにより LRF を計測位置に移動させレーザを透明容器に照射した際の反射画像をカメラにより撮影する。撮影画像中からレーザ反射光の候補点を抽出し、容器反射光を特定する。あらかじめ指定した全ての計測位置において画像取得および容器反射光の特定を行う。

撮影された画像群のそれぞれについて得られた容器反射光から容器表面を3次元計測する。また、容器表面の計測点群から容器表面の位置形状を表す容器形状モデルのパラメータを推定する。なお、容器裏面の形状モデルは推定された容器表面モデルから容器の厚みを一定かつ既知として推定する。

最後に、各撮影画像から光線追跡により液中物体反射光を特定し、液中物体の3次元位置を計測する。

3. 計測原理

3.1 候補点抽出

液中物体反射光が物体からの反射であることからその輝度が安定しているのに対し、容器反射光は透明物体からの反射であるためその輝度は不安定に変化する。そのため容器反射光の輝度が極端に低くなった場合、2値化などの手法では抽出に失敗する可能性がある。そこで本研究では反射光の候補点を輝度画像中の局所的ピーク位置として抽出する。

取得した反射光の RGB カラー画像をレーザとカメラの色特性を考慮し、グレースケール化により輝度画像に変換する。平滑化により輝度画像のざらつきを除去する。着目画素の輝度値が近傍画素の中で最大であるか調べ、最大であるならピーク画素としようでないなら非ピーク画素として2値のピーク画像を生成する。ピーク位置において輝度が飽和している場合など同じ輝度値で複数の画素に跨るケースのためにラベリングによりピーク画素を連結し、その重心位置を候補点の位置として抽出する。候補点の位置はピクセル単位で抽出し、サブピクセル位置は容器反射光と液中物体反射光のそれぞれについて計測時に推定する。

3.2 透明容器計測

LRF の計測モデルを図4に示す。本研究ではピンホールカメラモデルを採用し、LRF の座標系の原点をカメラの光学中心に置く。レーザは LRF 座標系に固定し、位置ベクトルと方向ベクトルにより表される。なお、LRF 座標系はマニピュレータにより移動される移動座標系である。マニピュレータの位置およびレーザの位置、方向ベクトルは既知とする。

画像中から容器反射光の位置を取得するために、従来研究ではエピポーラ拘束を用いている[3]。エピポーラ拘束はレーザ照射光を表すレーザ光線ベクトルと画像面上の画素へ入射した光を表すカメラ光線ベクトル（図および計算上では逆向きにしている）

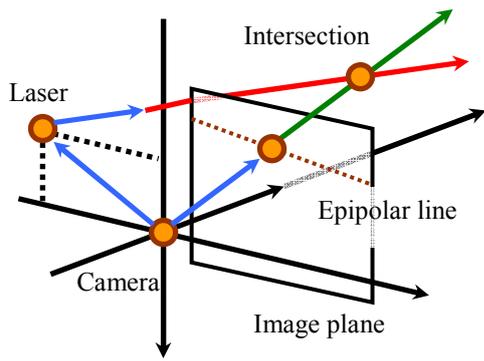


図4 計測モデル

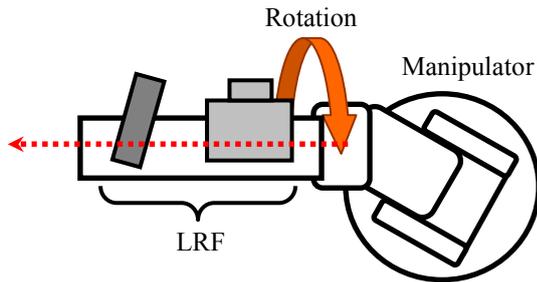


図5 LRFの姿勢変化

が1点で交差するための制約であり、レーザ光線の位置、方向ベクトルおよびカメラ光線の方向ベクトルが同一平面状に拘束される。このとき、レーザ光線の位置、方向ベクトルが固定かつ既知であるため、この拘束を満たす画像面上の画素の位置は直線で表される(エピポーラ線)。

従来研究ではエピポーラ線上の最も左側(図4のようにレーザを左に配置した場合、画像面上の左側ほどLRFに近い位置にある物体からの反射となる)に位置する候補点を容器反射光として抽出しているが他の反射光がエピポーラ線上の左側に映り込んだ場合に誤抽出することになる。

そこで、画像中に映る反射光の中でエピポーラ拘束を満たすのが容器反射光のみであると仮定し、LRFの姿勢をマニピュレータにより変化させることで容器反射光を特定する手法を提案する。なお、容器反射光以外の反射光は光の屈折や鏡面反射などの光学的な影響により厳密にはエピポーラ拘束を満たさない。

容器反射光の特定は画像群取得と合わせて、図6の手順で行う。まず、マニピュレータにより最初の計測位置へLRFを移動させ反射画像を撮影する。撮影画像から候補点を抽出し、容器反射光をマニピュレータによりLRFの姿勢を変化させて特定する。図7は姿勢変化による特定を図示したものである。エピポーラ線から誤差を許容した領域内にある候補点

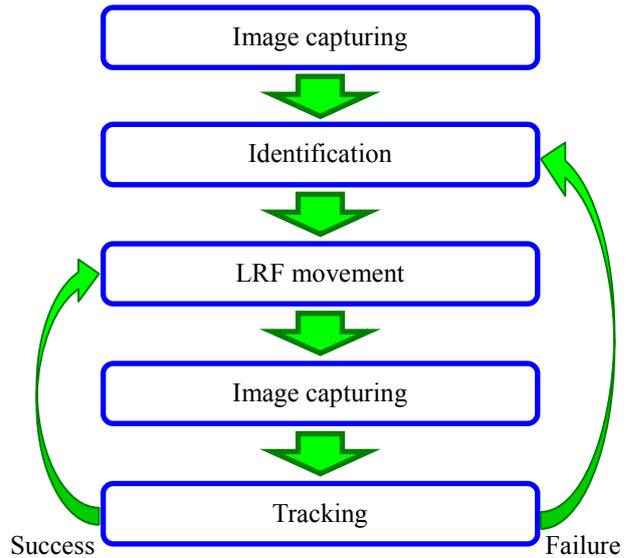


図6 画像群と容器反射光の取得

- Epipolar line
- Error tolerance
- Candidate point
- Previous point

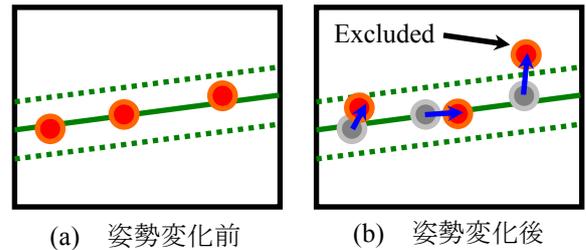


図7 容器反射光の特定

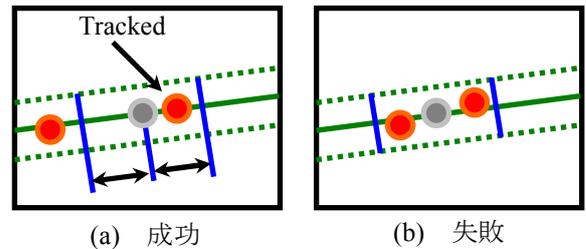
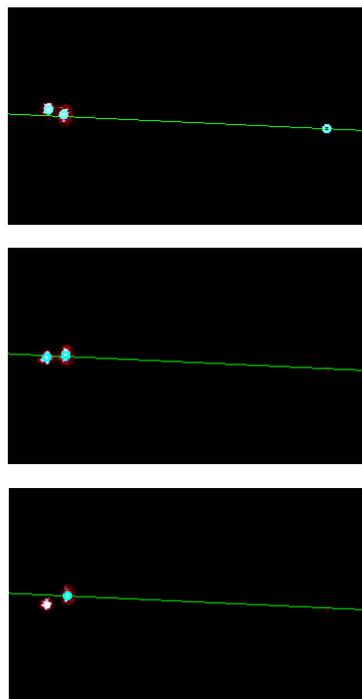
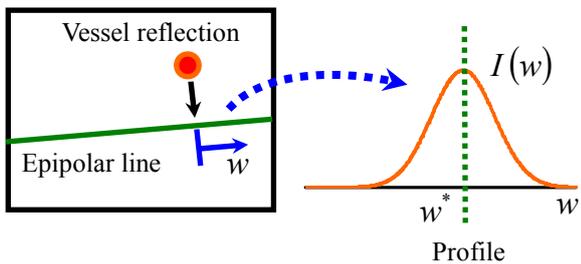


図8 容器反射光のトラッキング

に対象を絞る。LRFの姿勢変化後の撮影画像から候補点を抽出し、変化前の候補点と対応させる。このとき、領域外に移動した候補点を除外し、領域内の候補点が1つになるまで処理を続ける。特定終了時にLRFを元の姿勢に戻す。

姿勢変化による特定は処理時間が掛かるため、特定後はトラッキングにより容器反射光を取得する。次の計測位置へLRFを移動させ、撮影した画像からエピポーラ線の誤差許容領域内で図8(a)に示すように移動前の計測位置において得られた容器反射光の位置を中心に領域を狭め、その中にある候補点が1つであればそれを容器反射光として取得する。しか

し、図 8 (b)に示すように領域内に複数の候補点が存在する場合は姿勢変化による特定処理を行う。



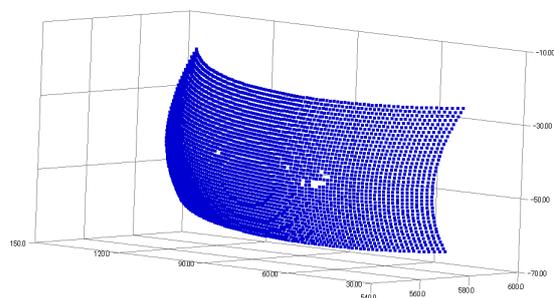
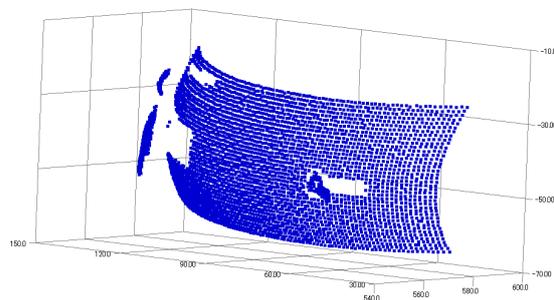
3.3 液中物体計測

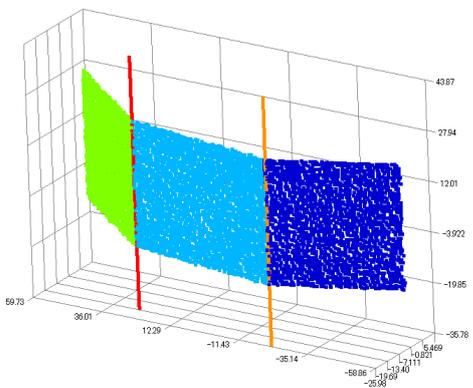
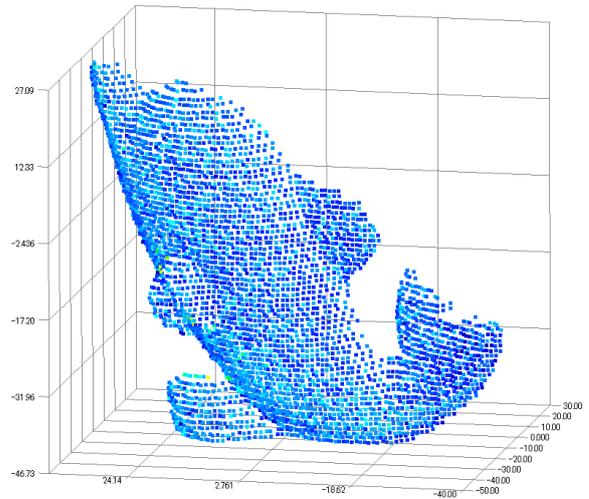
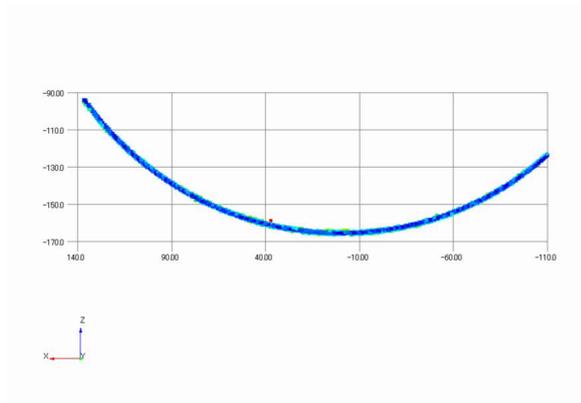
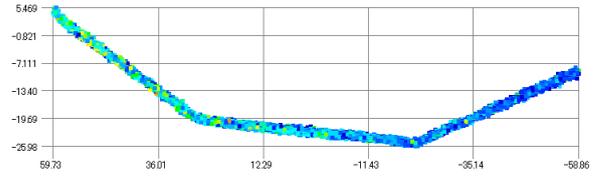
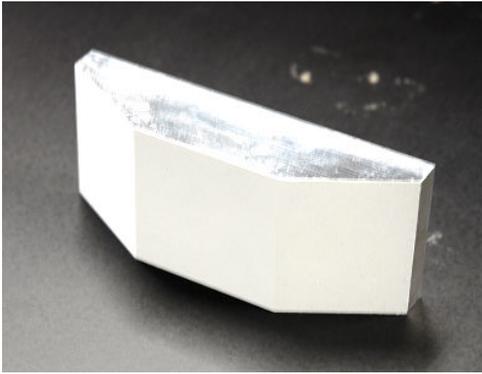
ここでは、液中物体計測について説明する。



4. 実験

ここでは、実験について説明する。





5. むすび

LRF 画像における反射光を誤抽出することなく、透明容器と液中物体を計測する手法を提案し、その計測精度を評価した。今後の展望として複数の方向から液中物体を計測、統合することで液中物体をデ

デジタルアーカイブ化することなどが考えられる。

参考文献

- [1] Atsuhiko Banno, Tomohito Masuda, Takeshi Oishi and Katsushi Ikeuchi: “Flying Laser Range Sensor for Large-Scale Site-Modeling and Its Applications in Bayon Digital Archival Project,” *International Journal of Computer Vision*, Vol.78, No.2-3, pp.207-222, 2008.
- [2] Rongxing Li, Haihao Li, Weighong Zou, Robert G. Smith and Terry A. Curran: “Quantitative Photogrammetric Analysis of Digital Underwater Video Imagery,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.22, No.2, pp.364-375, 1997.
- [3] 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, 2005.