

マンピュレータ搭載のレーザレンジファインダによる水中物体の3次元形状計測

池田 真輔[†] 山下 淳[†] 金子 透[†]

[†]静岡大学工学部機械工学科 〒432-8561 静岡県浜松市城北 3-5-1

E-mail: †{f0330008, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

あらまし 本研究は、屈折率の変化に対応した3次元計測手法を構築することを目的とする。具体的には、液体で満たされた水槽容器中の物体を空気中から観測してその3次元形状を計測する。ここで、正確な計測を行うためには光の屈折を考慮する必要がある、これを実現するためには屈折率の不連続面である水槽容器表面の形状を知ることが不可欠である。本研究では、物体にレーザを照射し、カメラで観測した画像上に水中物体表面の計測点と同時に容器表面の計測点が得られることを利用し、容器形状と水中物体の同時計測を実現する。

キーワード 3次元計測, 屈折, 水中物体, 三角測量, レーザレンジファインダ

1. 序論

水槽容器中の物体を空気中から観測して、その形状を計測した場合、光の屈折の影響により正確な計測は困難となる。図1は水を満たした水槽中の角柱を空気中から観測したものである。水面を境にして水と空気の屈折率の違いにより画像に歪みが生じていることが分かる。この歪みが画像処理による正確な計測を困難にする。このような現象は、海中などに防水ケースで保護されたカメラを沈めて3次元計測を行う場合にも、防水ケースのガラス面が屈折率の不連続面となるため問題点となって現れる。

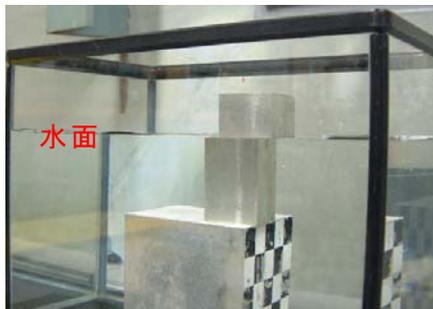


図1. 屈折による画像の歪み

本研究の目的は、屈折率の変化に対応した3次元計測手法を構築することである。本研究と同様の研究としては、液体で満たされた容器中の物体を外部から観測する場合についての報告[1,2]がなされている。しかし、これらの手法は、①計測対象を入れた容器を回転台に載せて回転させなければならない、また、②容器形状が既知である、③屈折率が既知である、など汎用性に欠ける問題があった。

そこで本研究では、容器形状が未知である場合にも適用可能な水中物体の形状計測手法として、レーザレンジファインダ（以下LRFと略す）を搭載したマンピュレータを移動させて観測画像を取得することにより、容器形状と物体形状を同時に計測する方法を提案する。本手法の特徴は、上記問題点を解決できることである。

まず①に関しては、本手法ではマンピュレータを用いて、計測対象を動かすことなく観測者がアクティブに計測可能である。②に関しても、本手法では容器形状を計測によって求めるので、未知形状であっても適用可能である。また③に関しても、未知屈折率を推定する方法について提案する。

以下では、本手法の計測原理、及び本手法の有効性を示す実験について述べる。

2. システム構成

図2に本研究の外観を示す。液体が満たされた水槽容器中の水中物体をLRFを搭載したマンピュレータにより計測する。ここでLRFとはカメラとレーザから構成される計測系を示している。

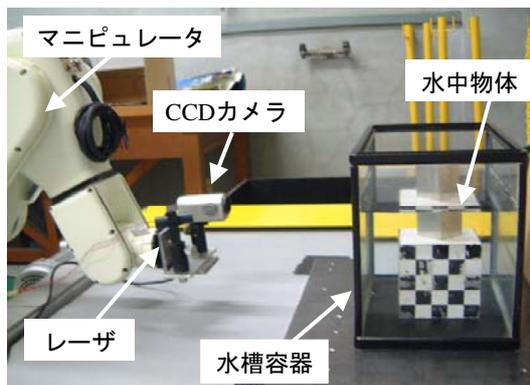


図2. 本研究の外観

3. 計測原理

本研究では、カメラ光線とレーザ光線それぞれを屈折を考慮しながら追跡し、この2光線が交わる点（水中物体の計測点）を求めることにより計測を行う。

図3の場合、カメラ光線ベクトル \vec{d}_{c1} はレンズ中心 C_0 を出発し、容器表面の点 C_1 で屈折する。その後、水槽ガラス内をベクトル \vec{d}_{c2} として直進し、水槽壁面裏側の点 C_2 で屈折する。そして、点 C_2 で屈折したカメラ光

線ベクトルは \vec{d}_{c3} となり、水中を直進し、水中物体表面の点 P に到着する。同様にレーザー光線ベクトル \vec{d}_{l1} もそれぞれ点 L_1, L_2 で屈折し、最終的にはベクトル \vec{d}_{l3} となり、水中を直進し、水中物体表面の点 P に到着する。すなわち、水中におけるカメラ、レーザー光線の交点を求めることにより水中物体を計測可能である。

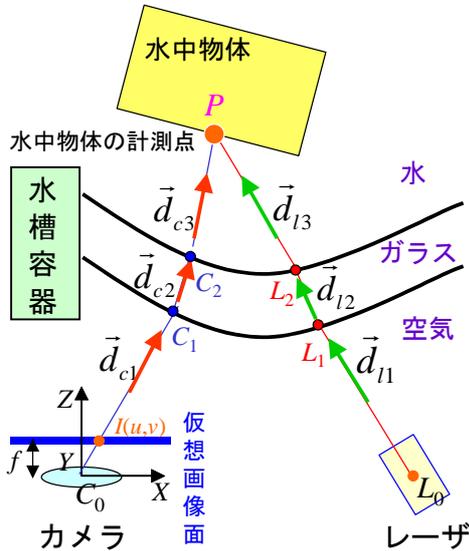


図 3. 光線追跡の様子

この計測を実現するためには、a)水槽容器の形状、b)各領域の屈折率、c)画像上における水中物体上の反射光の位置が必要である。

水中物体にレーザーを照射すると、水中物体表面だけでなく、容器表面でもある程度の反射光が得られる。本手法ではこれを利用し、容器形状を計測により求める(図4参照)。そして、求めた容器形状データを水中物体計測に利用し、水中物体形状を復元する[3]。

このことから観測画像中のどの点が容器表面の反射光なのか、また水中物体の反射光なのかが分かれば、それぞれを取り出し、計測に利用することが出来る。第4章では、それぞれの反射光の抽出方法を説明する。

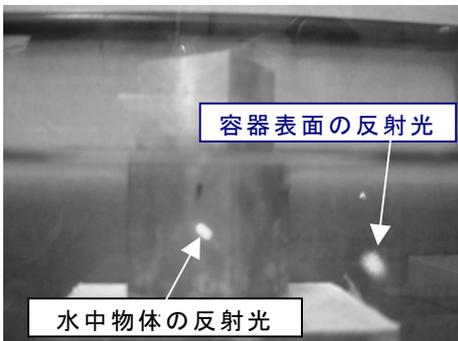


図 4. レーザを照射した水中物体

また、既知物体が視界内に1個以上ある場合には、予め分かっているその物体の形状情報と計測結果を比較することにより、容器内の屈折率を求めることが出来る(第5章参照)。

4. 処理手順

本方式の処理手順を図5に示す。以下、各処理の詳細について説明する。

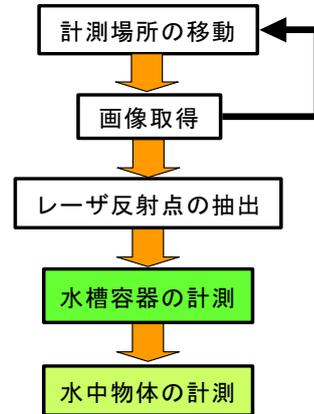


図 5. 計測処理手順

4.1. 計測位置の移動と画像取得

LRFを搭載したマニピュレータを容器の周りで周回させて水中物体上にレーザー光を照射し、観測画像を取得する。1回の計測で、画像と共にその画像におけるマニピュレータの位置・姿勢データも蓄積していく。この作業を繰り返し、計測に必要なデータを収集する。

4.2. レーザ反射点の抽出

取得画像からレーザー反射点を抽出する手順は、1)差分画像の作成、2)レンズの収差補正、3)2値化処理、4)ノイズ除去、5)ラベリングによる領域分割、である。差分画像は、レーザーを照射した場合の画像と照射しない場合の画像の差分を取ることで作成する。上記手順で得られた各領域がレーザー反射点を表す領域となる。

4.3. 水槽容器の計測

4.3.1. 水槽容器の計測原理

領域分割により得られたレーザー反射点の各領域から水槽容器表面の点を抽出して、三角測量によりその点の3次元座標を算出する。この点を水槽容器表面の計測点と呼ぶ。上記作業を取得画像全てに対して行い、全ての計測終了後、計測データを統合し、容器形状を推定する。得られる容器表面の計測点の3次元座標はカメラ座標(移動座標)系における座標値である。そこで世界座標(固定座標)系に変換する。以下ではその計測点の抽出方法を説明する。

4.3.2. 容器表面の計測点の抽出

観測画像上に映った複数のレーザー反射光の中から容器表面の計測点に対応する領域を抽出するには、エピポーラ拘束を利用する。容器表面までレーザー光は空気中を進むので、容器表面上のレーザー反射点はカメラで撮影した画像中のエピポーラ線上に位置が拘束される。エピポーラ線はレーザーとカメラのキャリブレーション結果から得ることができる。

そこでエピポーラ線上に存在する領域を容器表面上のレーザ反射点候補とみなす。しかし、エピポーラ線上に存在するレーザ反射点候補は、容器表面における照射点の他に複数存在することがある。その場合はエピポーラ線上で最もレーザ光源の位置に近い反射点領域を容器表面の計測点として採用し、抽出した計測点は領域の重心として算出する。

図6に実際の抽出結果を示す。図6はレーザ反射光の抽出処理の結果であり、画像を横断する線がエピポーラ線である。エピポーラ線上に存在するレーザ反射光が2点あるので、今回はレーザ光源に最も近い右側の点が容器の計測点として抽出される。

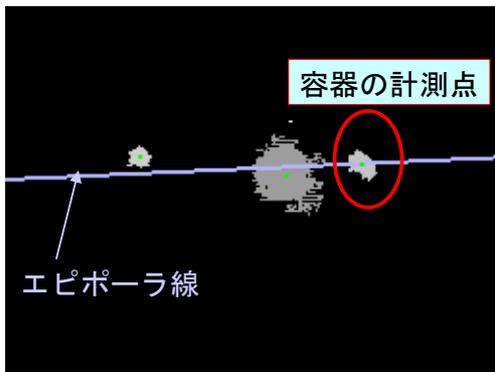


図6. エピポーラ拘束

4.4. 水中物体の計測

4.4.1. 水中物体の計測原理

観測画像から水中物体上のレーザ反射点を抽出し、水中物体の3次元形状計測を行う。計測手法は[2]の手法を利用し、カメラ・レーザ光線それぞれを屈折を考慮して追跡する。光線追跡の結果、水中におけるカメラ・レーザ両光線ベクトルの交点の座標値を求めることで実現する。しかし、キャリブレーションなどの誤差の影響でこれら光線同士が交わらない場合が多い。そこで両光線の最短距離 L を求め、その中点の座標値を求める座標値 P とする(図7参照)。なお、図中の P_l と P_c はそれぞれ両光線が最短距離をとる時のレーザ光線、カメラ光線の位置である。

最後に容器表面形状の推定と同様、カメラ座標系から世界座標系に変換し、物体形状を復元する。

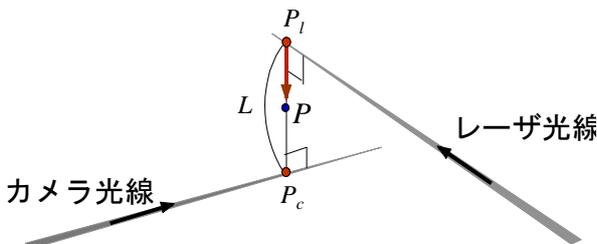


図7. 計測点 P の位置

4.4.2. 水中物体の計測点の抽出

容器の計測点は、計測点の特徴から計測する前に判

別可能である。それに対し水中物体の計測点の抽出は、実際に光線追跡を行わない限り判別することが難しい。そこで、容器の計測点を除く反射点全てに対して光線追跡を行い、計測点の判別を行う。具体的には、光線追跡の結果から得られる L の値が最小になる点を水中物体の計測点とみなす。真の計測点であれば、理論上カメラ・レーザの光線ベクトルが物体表面で交わるはずである。そのため、計測結果から得られる最短距離 L の値は、他の点でのそれよりも小さいと推測するため、上記手法により判別が可能となる。

5. 屈折率の推定

ここでは、屈折率が未知の場合でも計測によって屈折率を推定する方法を説明する。屈折率の解析には既知形状の物体が視界内に存在していればよい。

推定方法としては、まず4.4までの計測手順に従い、水中物体の計測を行う。この時に、屈折率を変化させて計測を行い、既知形状の物体の特徴(辺の長さや2面のなす角度など)と計測結果が適合するかどうかを調べる。得られた結果から物体の特徴と適合する屈折率を推定し、最適な屈折率の範囲を絞っていく。順次同様の解析を行い、未知屈折率を推定する。

6. 実験

6.1. 屈折率既知における水中物体計測

今回の実験では簡単のために、屈折率と容器のガラスの厚さを既知情報として、ガラス製角型水槽中の角柱物体の計測を行った。計測対象は水槽壁面に対して、角を向けて配置してある。マニピュレータはほぼ水槽前面に沿って水平方向に5cm平行移動させる走査を5回、異なる高さについて実行した。5回のうち3回は水中の物体上にレーザ照射点に来るようにLRFの高さを設定し、また2回は物体が水面の上に出ている部分を走査するようにLRFの高さを設定した(図8参照)。

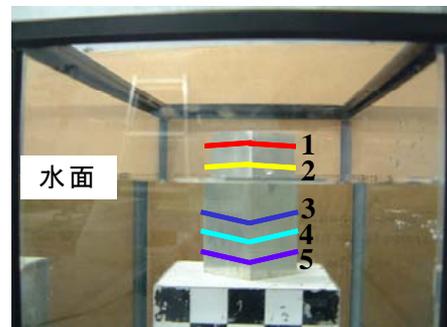


図8. 本実験で使用する計測対象

実験の結果得られた計測点の鳥瞰図を図9に示す。手前にある5本の直線が水槽表面の上にある点であり、水槽の奥に位置する5本のL字型の線分対が計測物体上の点である。

また、屈折率の影響を考慮しない場合とした場合での計測結果を図 10 に示す。図 10 は水槽の底面に沿った平面図であり、左側の図は屈折の影響を考慮せず計測を行った結果を示しており、右側の図は屈折の影響を考慮して計測を行った結果を示している。左側の図から水中での計測結果(3,4,5)と空気中での計測結果(1,2)に大きなズレが生じていることが分かる。それに対して、右側の図は水中と空気中での計測結果が良く一致していることが理解できる。これらの結果から屈折の影響を考慮することにより正しく計測ができる。

6.2. 未知屈折率における屈折率の推定

水の屈折率を数値解析的に推定した。この実験では、水中物体は既知形状の物体を使用し、計測対象として直方体物体を水槽に入れて計測を行った。実験 1 と同様水槽壁面のガラスの厚みは既知とした。

図 11 は水の屈折率を変化させた場合の角柱物体の 2 平面のなす角を調べたものである。まず、屈折率を 1.0 から 2.0 まで 0.1 刻みで変化させ屈折率と 2 平面のなす角の関係の傾向を掴み、2 平面のなす角が 90 度付近を取る 1.3 と 1.4 の間で、今度は刻み幅 0.01 で屈折率を変化させ、2 平面のなす角が 90 度となる屈折率を求めた。この結果、2 平面のなす角が 90 度となるのは、水の屈折率が 1.36 の時であった。本来、水の屈折率は 1.33 付近の値が期待される結果であったが、今回得られた結果を考察すると、キャリブレーションによる計測誤差の影響ではないかと推測される。

7. 結論

本研究では、LRF を用いた透明容器内の水中物体 3 次元形状計測の手法を提案した。本方式では、LRF を搭載したマニピュレータを移動させて画像を取得する際に、水中物体上の計測点のみならず水槽容器表面のレーザ反射光が抽出できることを利用する。処理手順としては、まず LRF のキャリブレーションによって得られるエピポーラ拘束を用いて容器表面でのレーザ反射光を抽出し、通常の三角測量にて表面上の点の 3 次元座標を取得する。そしてマニピュレータの移動により得られる多数の容器表面上の計測点座標から容器の形状を推定し、これを利用して屈折を考慮した光線追跡を行い水中物体の 3 次元座標を算出した。

また、本手法を用いて、未知屈折率の推定を数値解析によって行う方法を提案した。その場合には既知形状の物体の特徴を利用し、屈折率を推定した。

予備実験として角型のガラス水槽を用いた計測を行い良好な結果を得たが、今後はさらに様々な容器形状と物体形状に対して本方式の有効性を確認することが主要な課題である。

屈折率の推定に関しては、今回の実験では計測の誤

差の影響により期待する値を得られなかったが、計測精度が向上すれば、屈折率の推定結果の精度を向上させることができると考えられる。

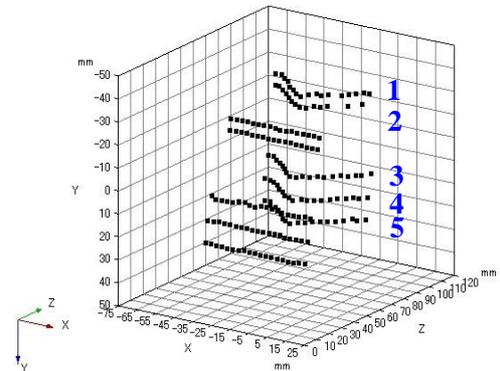


図 9. 計測結果 (鳥瞰図)

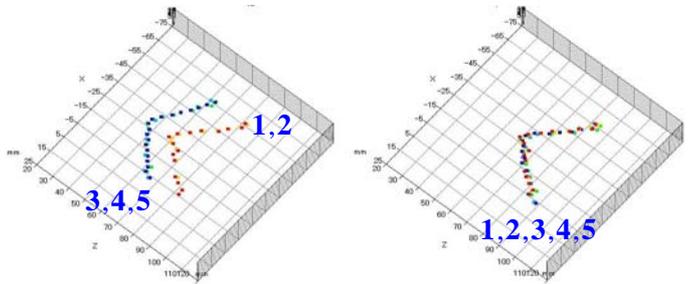


図 10. 屈折の影響を考慮したときとしない場合の比較 (左: 屈折考慮なし, 右: 屈折考慮あり)

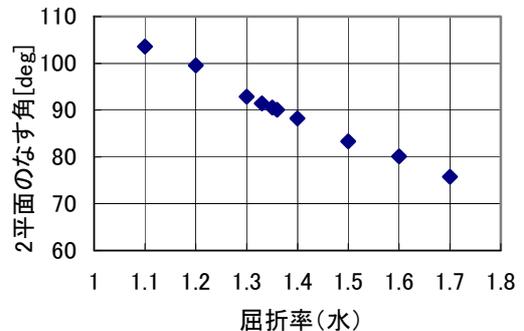


図 11. 水の屈折率と 2 平面のなす角の関係

文 献

[1] 山下 淳, 林本 悦一, 金子 透, 川田 善正: “円筒状透明容器における水中物体のレーザ光による 3 次元形状計測”, 第 9 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.63-68, (2003)

[2] 山下 淳, 樋口 裕和, 金子 透, 川田 善正: “光切断法による水中物体の 3 次元計測”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2K21, pp.1-4, (2003)

[3] 池田 真輔, 山下 淳, 金子 透: “マニピュレータ搭載のレーザレンジファインダによる水中物体の 3 次元形状計測”, 第 10 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.333-338, (2004)