

光の屈折を考慮したレーザレンジファインダによる水中物体計測

○池田 真輔 山下 淳 金子 透
静岡大学工学部機械工学科

Measurement of Objects in Water with a Laser Range Finder in Consideration of Light Refraction

○Shinsuke Ikeda, Atsushi Yamashita, Toru Kaneko
Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

Abstract: In this paper, we propose a 3-D measurement method of objects in aquatic environments with a laser range finder. When we apply vision sensors to measurement of objects in liquid, light refraction is an important problem. Image distortion caused by light refraction brings errors in triangulation for the range measurement. Therefore, by taking light refraction into account, our method achieves an accurate measurement in liquid, and estimates unknown parameters for the measurement. Experimental results have shown the effectiveness of our method.

Key Words: 3-D measurement, Aquatic environment, Light refraction, Laser range finder

1. 序論

物体の3次元形状や位置・姿勢をビジョンセンサを用いて非接触で計測することは計測技術として極めて重要な技術であり、これまでに数多くの研究開発がなされてきている。これらの技術は空気中の物体を前提としたものが多いが、水中物体の計測も重要な課題として種々報告されている。ビジョンセンサによる水中物体の距離・形状計測で問題となるのは、1つは光の屈折の影響であり、従来の計測機器と撮影機器が同一屈折率環境であるという前提の技術をそのまま適用することは困難である。従って屈折率の変化を考慮した計測技術を確立することが必要となる。水中物体計測の応用として代表的な例は水中ロボットであり多数の研究がなされているが、その他に水槽中の物体を外部から形状計測することも応用として考えられる。

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。水面を境にして画像に歪みが生じていることが分かる。屈折は水面のように屈折率の境界において発生する。そして、屈折により生じたこの歪みが計測の誤差を引き起こしてしまう。この現象は海中環境計測においても同様の影響を及ぼす。水中計測ではカメラはガラス製の防水ケースに保護されているので、カメラの画像には、空気-ガラス-水という屈折率の異

なる媒体を介し屈折の影響を受けた結果が映るためである。本研究では、水中計測における諸問題のうち、上記のような「屈折の起こす影響」に注目し屈折の影響を考慮した計測手法を提案する。具体的には、図1のような液体を満たした水槽容器中の水中物体の計測を行う。

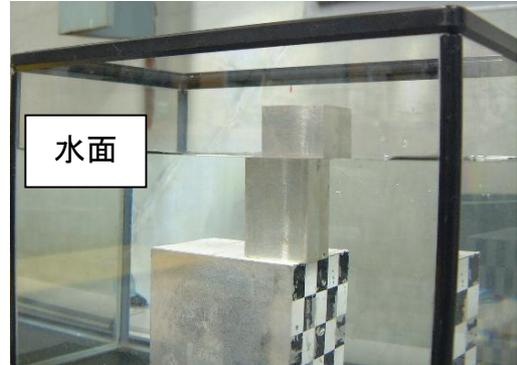


図1. 屈折による画像の歪み

水中計測の従来研究としては、水中ロボットにビジョンセンサを搭載した研究があるが[1,2,3]、画像上における屈折の影響を予め計算しておき、画像補正している。しかしこの手法は、水槽を外部から自由な距離・姿勢で観測する場合には適用が難しく、また液体の屈折率が変化した場合には再びキャリブレーションを行う必要がある。また、本研究と同様に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[4,5,6]がなされている。しかし、[4]はモーシヨンステレオの原理を用いており、高精度かつロバストな計測

を常に行える保証がない。更に、[5]や[6]に関しては、高精度な計測が出来ているが、①計測対象を回転させて計測位置を変えている、②屈折率の境界が既知である、③液体の屈折率が既知である、など汎用性に欠ける問題がある。

そこで本研究では、屈折率の境界となる水槽容器の形状が未知の場合で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）を搭載したマニ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。本研究では、以下のように上記問題を解決する。

まず①に関しては、本手法では観測者が動くことにより計測対象を動かすことなく計測を行える環境を構築して解決する。②に関しても、本手法では屈折率の境界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を提案する。

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 のように、本研究では LRF を搭載したマニピュレータにより液体が満たされた水槽容器中の水中物体を計測する。ここで LRF とは CCD カメラとレーザから構成される計測系を示している。なお、レーザはスポット光を利用しており、CCD カメラとレーザの位置関係については予め求めておく。

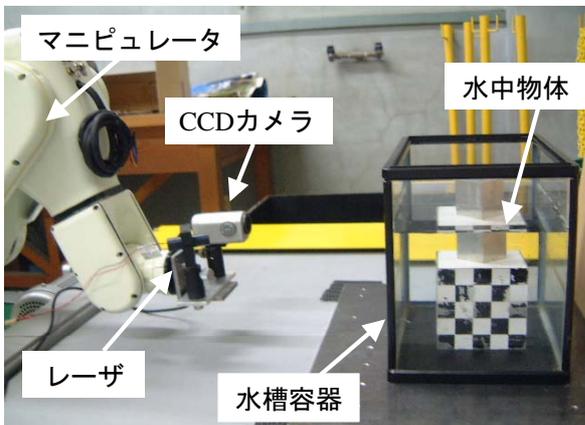


図 2. 本研究におけるシステム構成の外観

3. 計測原理

本研究では、カメラ光線とレーザ光線をそれぞれ屈折を考慮しながら追跡し、この 2 光線の交点を求めることにより計測を行う [7].

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。同様にレーザ原点である点 L_0 を出発したレーザ光線ベクトル \vec{d}_{l1} もそれぞれ点 L_1, L_2 で屈折し、最終的には \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、レーザ光線ベクトルの交点が水中物体の表面（屈折率の境界）となる。

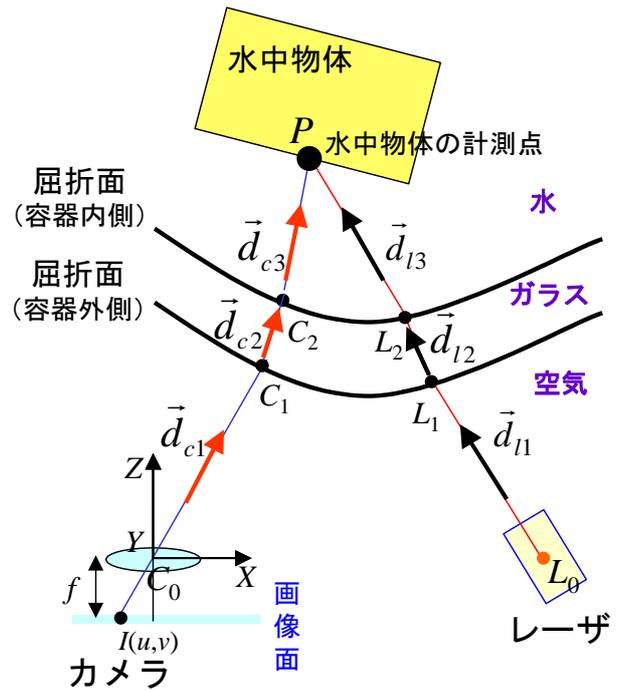


図 3. 光線追跡の様子

この計測を実現するためには、a)水槽容器表面の法線ベクトル、b)各領域の屈折率、c)画像上の水中物体表面の反射光（図 3 における点 I ）が必要である。

水中物体にレーザを照射すると、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（図 4 参照）。本手法ではこれを利用し、容器形状を計測により求める。そして、求めた容

器形状データから水槽容器表面の法線ベクトルを計算し、水中物体計測に利用する[5].

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分かれば、それぞれを抽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。

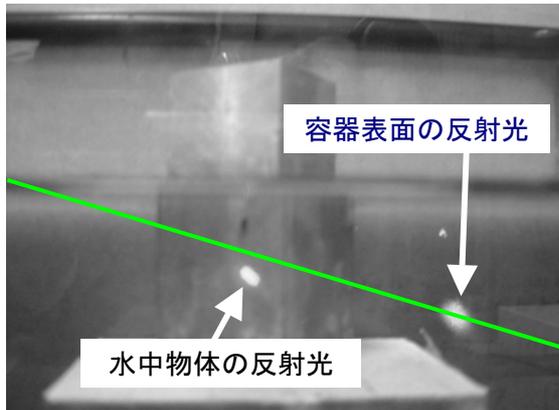


図4. レーザを照射した水中物体

(図中を横断する線が算出したエピポーラ線)

また、屈折率の推定方法については第5章で説明する。本研究では、既知物体が視界内にある場合には、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、容器内の屈折率の推定を行う。

4. 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。また、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 レーザ反射光の抽出

取得画像からレーザー反射光を抽出する手順は、1) 差分画像の作成、2) レンズの収差補正[8]、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。なお差分画像は、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光を表す領域となる。

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光の各領域から水槽容器表面のレーザー反射光を抽出して、三角測量によりその点の3次元座標を算出する。容器表面の反射光は屈折を考慮する必要がないため、容易に三角測量を適用できるからである。この反射光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、容器形状を再構築する。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。そこでマニピュレータの移動量を利用し、世界座標(固定座標)系に変換する。以下では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光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。なお、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の計測点候補とみなす。しかし、エピポーラ線上に存在する容器の計測点候補は、容器表面における計測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右側の反射光領域を容器表面の計測点とし、抽出した計測点の領域の重心を算出する。図3におけるカメラ・レーザー光の位置関係より最初に水槽容器表面の位置 L_1 において得られる反射光は、画像上の反射光の中で一番右側に映るからである。

図4において画像を横断する線は、エピポーラ線として撮影画像に重畳表示したものである。エピポーラ拘束を利用すると、図4のようにエピポーラ線上に存在するレーザー反射光が容器表面の反射光(容器の計測点)として抽出される。

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光を抽出し水中物体の3次元形状計測を行う。計測手法は[5]の手法を利用し、カメラ・レーザ光線それぞれ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や画像ノイズの影響により、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5参照)。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。

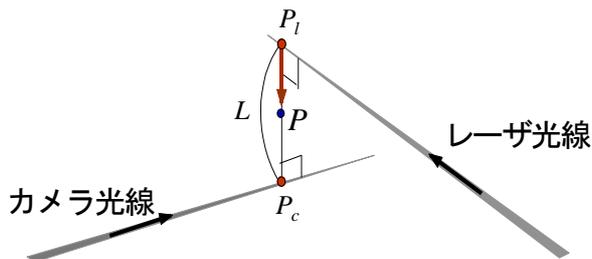


図5. 計測点 P の位置

4.4.2 水中物体の計測点の抽出

容器の計測点は、4.3.2 のように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光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だからである。そのため、真の計測点における L の値は、他の点での L の値よりも小さいことを利用して判別ができる。

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。屈折率の推

定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、未知屈折率を変化させて計測結果を求め、既知物体の形状特徴と計測結果から得られる形状特徴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。

ここで、実際の計測対象の i 番目の既知の形状特徴を $F_{T,i}$ とする。未知屈折率 n として、 n を変化した計測結果から得られる計測対象の特徴を $F_{M,i}(n)$ とすると、以下の式を最小にする $F_{M,i}(n)$ の場合の n が求める屈折率である。

$$\alpha_i \sum_i (F_{T,i} - F_{M,i}(n))^2 \rightarrow \text{Min} \quad (1)$$

ここで、 α_i は特徴量 i における重みである。

6. 実験

6.1 既知屈折率における水中物体計測

今回の実験ではガラス製角型水槽中の角柱物体の計測を行った。マニピュレータはほぼ水槽前面に沿って水平方向に 50mm 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反射光が来るように 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6参照)。なお、水の屈折率 1.33 と水槽ガラスの厚さ 2mm を既知情報として用いた。

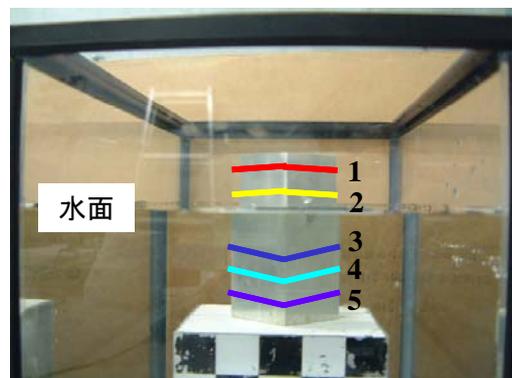


図6. 本実験で使用する計測対象

(1~2: 空気中での計測・3~5: 水中での計測)

図 7 は計測から得られた画像にエピポーラ拘束を適用した結果の例である。図 7 では 3 つのレーザ反射光領域があるが、4.3.2 の原理に基づきエピポーラ線上で一番右側の反射光が容器表面の計測点として抽出される。

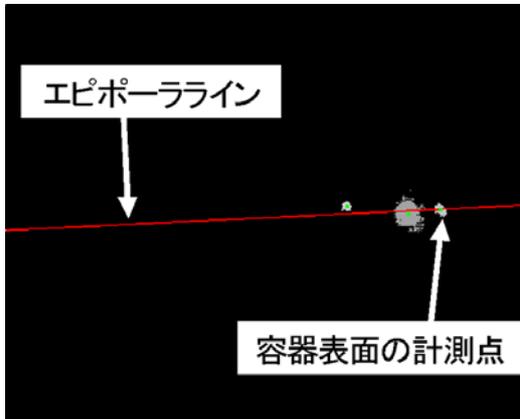


図 7. エピポーラ拘束適用結果

次に、図 8 に実験の結果得られた計測点の鳥瞰図を示す。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。この結果から水槽容器と水中物体の同時計測が出来ていることが分かる。

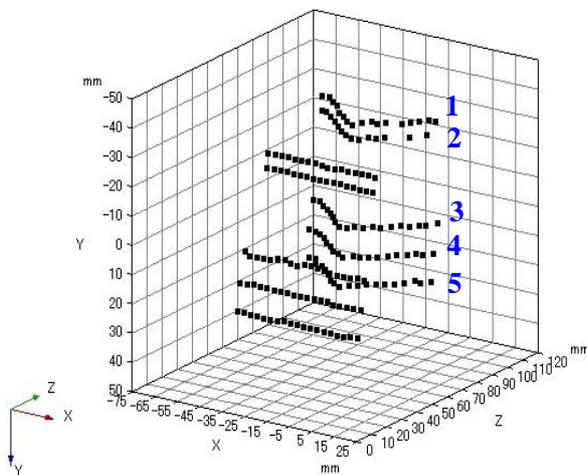


図 8. 計測結果（鳥瞰図）

また、図 9 に屈折率の影響を考慮しない場合と考慮した場合での計測結果を示す。図 9 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。左側の図から空気中での計測結

果 (1,2) と水中での計測結果 (3,4,5) 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ことが分かる。

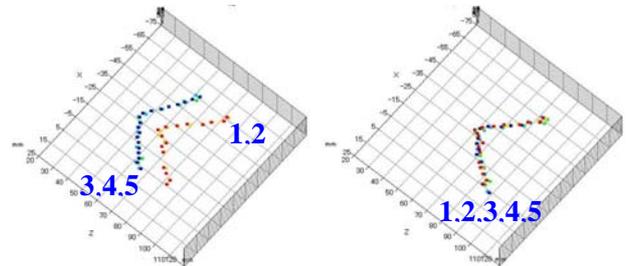


図 9. 屈折の影響を考慮した場合としない場合の比較（左：屈折考慮なし，右：屈折考慮あり）

6.2 未知屈折率における屈折率の推定

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、この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。今回の実験では、既知形状物体の特徴として、物体の 2 辺のなす角度を利用した。既知形状物体の 2 辺のなす角度は測定の結果 $F_T = 90 \text{deg}$ であった。

まず、未知屈折率を $n=1.0 \sim 2.0$ まで 0.1 刻みで変化させ n と $F_M(n)$ の関係を求めた結果、2 辺のなす角度 $F_M(n)$ が 90deg 付近を取るのは $n=1.3 \sim 1.4$ の間に限定された。次に $n=1.3 \sim 1.4$ において刻み幅 0.01 で n を変化させ、 $F_M(n)$ が 90deg となる n を求めた。この結果、2 平面のなす角度が 90deg となるのは、水の屈折率が $n=1.36$ の時という結果が得られた。図 10 は水の屈折率を変化させた場合の角柱物体の 2 辺のなす角度を調べたものである。

水の屈折率は 1.33 であるので推定結果は妥当な結果であると言える。実際の屈折率と推定結果のズレは、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。そのため、キャリブレーションを改善することにより、推定精度は向上するものと考えられる。

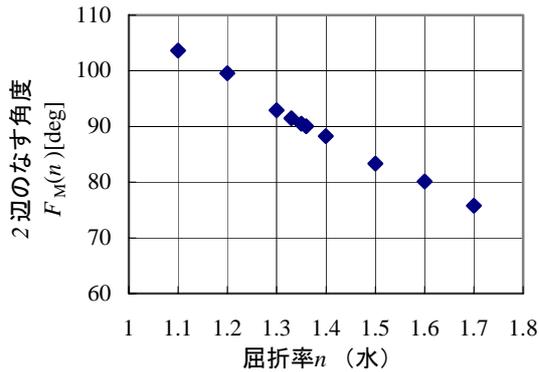


図 10. 水の屈折率と 2 辺のなす角の関係

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、水中物体上の反射光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反射光の 3 次元座標を取得した。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を数値解析によって推定する方法を提案した。その場合には既知物体の形状特徴を利用した。

実験では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。また屈折率の推定に関しては、妥当な結果が得られ有効性を示すことが出来た。しかし、キャリブレーションによる計測誤差の影響が考えられるため、今後は計測精度を向上させることにより屈折率の推定結果の精度も向上させることを目指す。

謝辞

本研究の一部は、財団法人中部電力基礎技術研究所の補助を受けた。

参考文献

- [1] 柳 善鉄, 浦 環, 藤井 輝夫, 近藤 逸人: “人工水中ランドマークと推測航法を利用した自律型水中ロボットの航法”, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp.290-298, 2002.
- [2] 近藤 逸人, 卷 俊宏, 浦 環, 能勢 義昭, 坂巻 隆, 稲石 正明: “自律型水中ロボットによる構造物観測システム～光切断法を用いた測距システムによる相対航法～”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2A1-L2-28, pp.1-4, 2004.
- [3] 酒井 浩, 田中 敏成, 大畑 智海, 石井 和男, 浦 環: “水中におけるモザイク画像取得に関する研究”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2A1-L2-27, pp.1-4, 2004.
- [4] 河村 拓史, 斎 藤英雄, 中島 真人: “時空間画像解析による水中物体の 3 次元形状計測”, 計測自動制御学会論文集, Vol.32, No.4, pp.607-609, 1996.
- [5] 山下 淳, 林本 悦一, 金子 透, 川田 善正: “円筒状透明容器中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.
- [6] 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.
- [7] 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*, Vol.22, No.2, pp.364-375, 1997.
- [8] Juyang Weng, Paul Cohen and Marc Herniou: “Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.10, pp.965-980, 1992.