

複光路単眼ステレオによる水中物体の 3 次元計測

白根 裕大*, 山下 淳, 金子 透 (静岡大学)

3D Measurement of Objects in Water Using a Difference of Appearance Depending on Optical Paths

Yudai Shirane*, Atsushi Yamashita, Toru Kaneko (Shizuoka University)

Sensing in aquatic environments meets the difficulty that, when a camera is set in air behind a watertight glass plate, image distortion occurs by refraction of light at the boundary surface between air and water. This paper proposes an aquatic sensing method to execute three dimensional measurement of objects in water by taking refraction of light into account. The proposed method is based on a monocular stereo technique using a difference of appearance depending on optical paths. Optimization of the angles of refracting surfaces which are key elements of the sensing device is given to realize the measurement accuracy. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

キーワード: 複光路, 単眼ステレオ, 水中センシング, 光の屈折, 3 次元計測

(Multiple optical paths, monocular stereo, aquatic sensing, refraction of light, 3D measurement)

1. 序論

近年, 水中センシングの研究が盛んに行われている. 海底における環境調査や深海などでは人間の代わりに水中ロボットによる作業が行われることがある. この際, 水中物体の形状の計測や水中ロボットの周辺環境の確認などにおいて, 水中での正確な計測が重要となる.

水中センシングの手法としては超音波⁽¹⁾⁽²⁾やカメラを用いたものがある. 超音波では海底地形の計測や魚群の有無を検知することができるが, 指向角が広いため分解能が低く, 対象物の位置・形状を高精度に求めることは困難である. また, 伝播速度が遅いため 1 回の計測時間が長く, 瞬時に広範囲に渡る計測は不向きである. これに対して, カメラを用いると比較的高精度に計測が行うことが可能である. しかし, 水中においてカメラを用いて計測を行う場合, 光の屈折が問題となる. 具体的には水, 空気, カメラを覆う保護ガラス面といった屈折率の異なる物質間を光が通過する際に, 屈折の影響により撮影画像に歪みが生じる. 図 1 は, 水を満たした円筒水槽中の角柱を空気中から観測したものである. 水と空気の屈折率の違いにより, 水面を境にして画像に歪みが生じていることが分かる. この歪みが画像による正確な計測を困難にする. このように, 水中におけるカメラを用いた計測では光の屈折が問題となり, 水中で正確な計測を行うためには光の屈折の影響を考慮する必要がある.

光の屈折を考慮し, 水中物体を対象とした 3 次元計測に関する研究はこれまでも様々行われている. 例えば, ステレオカメラを用いた手法^{(3)~(5)}やカメラとレーザからなる計

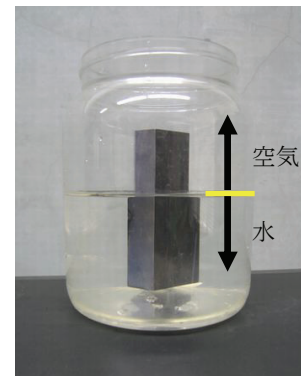


図 1 屈折の影響

Fig. 1. Refraction effects.

測システムを用いた手法^{(6)~(9)}などが提案されており, 水中環境下での 3 次元計測を実現している. しかし, ステレオカメラによる手法ではカメラ 2 台を用いて, 三角測量の原理によって 3 次元計測を行っているため, カメラ 2 台分のキャリブレーションが必要である. また, 対象が特に高速に動く物体の場合, カメラ間の同期を正しくとる必要がある. 一方, カメラとレーザを用いた計測では, 対象を走査する必要があるため動物体の計測は困難である. これに比べ, カメラ単体による計測が可能であればカメラ 2 台やカメラとレーザを扱うより手間が減少する. カメラ単体を用いた研究として, 時空間画像解析による手法⁽¹⁰⁾があるが, この手法では時空間画像取得時にカメラを正確に平行移動させなければならないため装置が大掛かりになり, さらにカメラと水面の位置関係の推定誤差の影響により, 水中物

体の計測精度が低下するという問題がある。

上記の計測法に対し、我々の研究室では複光路による見え方の違いを利用した単眼ステレオ手法⁽¹¹⁾を提案している。複光路による見え方の違いの例として、水槽の角の前方から撮影をすると光の屈折により複数の光路が発生し、図 2 に示すように同一の水中物体に対して見え方の異なる画像が得られる。従来研究⁽¹¹⁾ではカメラの前に屈折面を設置し光路が複数発生するような装置（図 3）を作成し、複光路が発生するような環境を意図的に作り出すことで視差が生じた画像（図 4）を利用し、三角測量の原理を用いることで水中対象物の 3 次元計測を行っている*。

上記の方法を用いることで、単眼カメラを用いて水中環境下に存在する物体の 3 次元計測が可能である。3 次元計測において、高精度な計測を行うためには装置の較正が重要である。本研究では、複光路単眼ステレオ手法において、より高精度な 3 次元計測を行うことを目的とする。高精度な計測を実現するために本研究では、図 3 において屈折面と屈折面がなす角の余角 θ （以下、屈折面角度と呼ぶ）の最適化を行い、最適な屈折面角度を有する計測装置を用いて計測を行うことを目的とする。

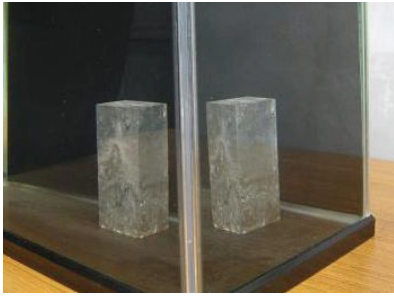


図 2 同一物体の見え方の異なる画像例
Fig. 2. An example of image.

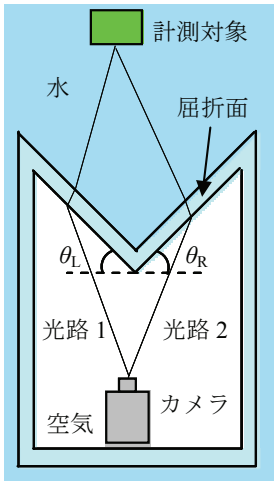


図 3 撮影装置

Fig. 3. Experimental device.

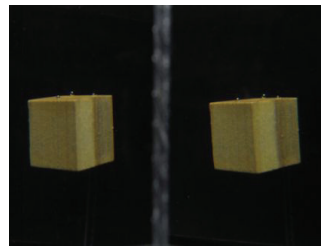


図 4 取得画像例
Fig. 4. Acquired image.

2. 計測原理

本研究では、図3に示すような光路に違いが生じるような装置を作成し、これにより見え方の異なる画像を取得することで単眼カメラによるステレオ計測を実現する。前処理として、装置において光が屈折する面のカメラに対する位置姿勢を推定する。次に取得画像の中心から左側を左画像、右側を右画像とし、両画像から得られる対応点より光の屈折を考慮して求めた3次元データを用いて水中物体の計測を行う。

2.1 光線追跡

水、ガラス、空気と屈折率が変化する部分を光線が通過する際には光の屈折が起きる。その際の入射角と屈折角、屈折率の関係をスネルの法則を用いて求め、それを光線追跡に反映させることで光の屈折の影響を考慮する⁽⁴⁾。カメラ光線 1 と光線 2 をそれぞれ追跡すると、物体の表面においてこれら 2 つの光線が交わる。

ガラス面における光の屈折の様子（光線 1）を図 5 に示す。空気とガラスの屈折率をそれぞれ n_1, n_2 とし、空気からガラスへの入射角を θ_1 、屈折角を θ_2 とする。また、空気中におけるカメラの単位光線ベクトルを $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T$ 、ガラス面の単位法線ベクトルを $(\lambda_1, \mu_1, \nu_1)^T$ とすると、ガラス中を進む単位光線ベクトル $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)^T$ は、

$$\begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} + \left(\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_1} - \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 \right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる。また、水の屈折率を n_3 としガラスから水への入射角を θ_3 とすると水中を進む単位光線ベクトル $(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)^T$ は、

$$\begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \frac{n_2}{n_3} \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} + \left(\sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_3} \right)^2 \sin^2 \theta_2} - \frac{n_2}{n_3} \cos \theta_2 \right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる。ただし、スネルの法則より θ_1, θ_2 には以下の関係が成り立つ。

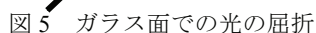
$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) \quad (3)$$

入射角水中側の水槽面の通過点を $(x_2, y_2, z_2)^T$ とすると、光線ベクトル上の任意点 $(x_p, y_p, z_p)^T$ は、

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

と表すことができる。ただし s は定数である。

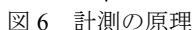
* なお、類似した原理に基づくものとして、空気中の物体に対して複プリズムを通して単眼カメラでステレオ計測をする手法⁽¹²⁾が提案されている。



2.2 ステレオ計測

3. 最適な屈折面角度の検討方法

図6は本研究におけるカメラ光線の屈折の様子を模式的に表したものであり、カメラ正面に対する奥行き方向をZ軸、横方向をX軸として定義し、縦方向(Y軸)に対する屈折面の傾きは無いものとした。また、カメラの光軸とガラスの折れ曲がる部分はカメラの光軸上にあり、光軸に対して各ガラス面は同じ角度であると仮定する。本研究ではZ軸上での精度を考えることで最適な屈折面角度を求める。空気、ガラス、水と屈折率が変化する部分を光線が通過する際には光の屈折が起こる。空気中からガラスへ進む際の入射角 α 、屈折角 β 、ガラスから水中へ進む際の屈折角 γ 、屈折率の関係をスネルの法則を用いて求め、光の屈折の影



響を考慮する．ここで， f は焦点距離， d はカメラから屈折面までの距離， u は視差である．図6において， Z 軸上の計測点に対してカメラ光線は左右対称なので光路1についてのみ考えれば良い．

$$Z = \tan \phi \cdot X \quad (5)$$
$$\tan \phi = \frac{2f}{\mu} \quad (6)$$
$$Z = \tan \theta \cdot X + d \quad (7)$$
$$(x_A, z_A) = \left(\frac{du}{2f - u \tan \theta}, \frac{2fd}{2f - u \tan \theta} \right) \quad (8)$$
$$Z = -\frac{1}{\tan(\theta - \beta)}(X - x_A) + z_A \quad (9)$$
$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \right) \quad (10)$$
$$\alpha = \theta - \phi + \frac{\pi}{2} \quad (11)$$
$$Z = \tan \theta \cdot X + d + \frac{t}{\cos \theta} \quad (12)$$
$$x_B = \frac{x_A \cos \theta + (z_A \cos \theta - d \cos \theta - t) \tan(\theta - \beta)}{\sin \theta \tan(\theta - \beta) + \cos \theta} \quad (13)$$

$$z_B = \tan \theta \cdot x_B + d + \frac{t}{\cos \theta} \quad (14)$$

$$Z = -\frac{1}{\tan(\theta - \gamma)}(X - x_B) + z_B \quad (15)$$
$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_3} \sin \beta \right) \quad (16)$$

カメラ光線（光路 1，光路 2）が最終的に Z 軸上で交わる点 C の奥行きは以下ようになる。

$$z_c = -\frac{1}{\tan(\theta - \gamma)} x_B + z_B \quad (17)$$

式(17)について，変数 x_B は式(13)より，

$$x_B = \frac{x_A \cos \theta + (z_A \cos \theta - d \cos \theta - t) \tan(\theta - \beta)}{\sin \theta \tan(\theta - \beta) + \cos \theta} \quad (18)$$

であり， x_B 内の変数 x_A は式(8)より，

$$(x_A, z_A) = \left(\frac{du}{2f - u \tan \theta}, \frac{2fd}{2f - u \tan \theta} \right) \quad (19)$$

である。 x_A は u からなる変数であるため， z_c も u からなる変数となる。

以上から，式(17)は屈折面角度 θ ，奥行き位置 z_c ，視差 u の関係式となる。式(17)を用いて最適な屈折面角度を求めるが，奥行き z_c の微小変化に対する視差 u の変化率 $\Delta u / \Delta z$ が最大となる屈折面角度は，奥行きの位置によって変化する。例えば，奥行き z_c を 200mm と設定して，視差変化率が最大となる屈折面角度を求めると $\theta=55\text{deg}$ となるが，奥行き z_c を 500mm に変化させると，視差変化率が最大となる屈折面角度は $\theta=53\text{deg}$ となる。このように，最適な屈折面角度は距離によって変化する。

そこで，本研究では視差変化率が最大（精度が最も良い）となる屈折面角度を最適として選択するのではなく，想定する奥行き範囲内 $z_1 \leq z_c \leq z_2$ において，それぞれの屈折面角度での視差変化率の最小（精度が最も悪い）を求め，その中から最大の変化率をもつ屈折面角度を最適とする。

$$\theta_{\text{opt}} = \arg(\max_{\theta} [\min_{z_c} (\Delta u / \Delta z)]) \quad (20)$$

例えば視差の変化率と屈折面角度の関係結果が図 7 のようになった場合，屈折面角度 θ_A について，奥行き z_1 では視差変化率が大きく，高い精度が期待できるが，奥行き z_2 においては変化率は小さく，高い精度が期待できない。一方，屈折面角度 θ_B について，奥行き z_1 では θ_A ほどの精度は出ないが， $z_1 \leq z_c \leq z_2$ においては θ_A よりも視差変化率が大きく，全体として θ_A の最悪精度よりも精度が良いことを保証している。本研究では， θ_B のような角度を最適な屈折面角度とする。

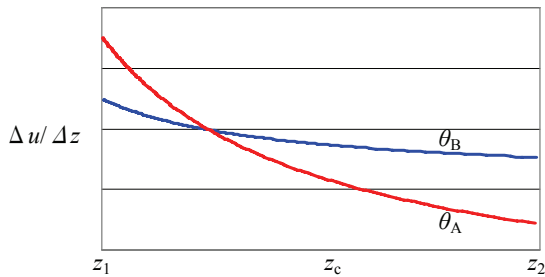


図 7 視差変化率と屈折面角度の関係

Fig. 7. Relation between disparity derivatives and the refracting surface angles.

4. 実験

4.1 最適な屈折面角度の導出

本研究では，焦点距離 $f=4.6\text{mm}$ ，カメラから屈折面までの距離 $d=30\text{mm}$ と定め，カメラから対象物までの距離は，実験環境を考慮し， $200\text{mm} \leq z_c \leq 500\text{mm}$ と設定して屈折面角度の最適化を行った。この範囲内で式(17)において，式(20)の条件を用い，角度 θ を 1deg ずつ変化させて最適な屈折面角度を導出すると $\theta_{\text{opt}}=53\text{deg}$ となった。従来研究⁽¹¹⁾において用いた屈折面角度 45deg と，本研究において算出した角度 53deg ，また，比較のために角度 60deg における視差変化率 $\Delta u / \Delta z$ と奥行き z の関係を図 8 に示す。グラフから，視差変化率 $\Delta u / \Delta z$ はどの奥行きに対しても常に 53deg の方が大きくなっていることがわかる。この結果により，装置の屈折面角度を 53deg として計測を行うことで，理論的には 45deg のときよりも高精度な計測が可能である。

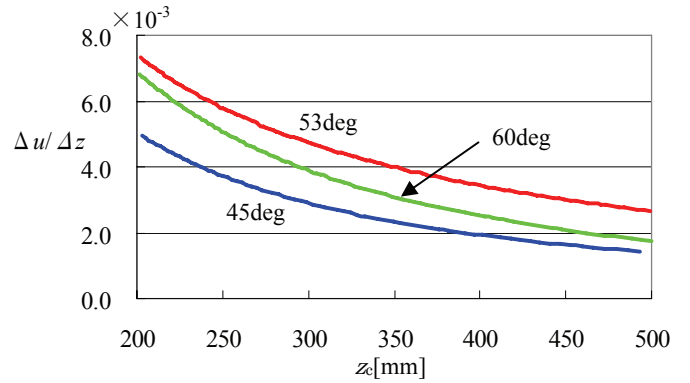


図 8 最適な屈折面角度の決定

Fig. 8. Determination of optimum refracting surface angle.

4.2 計測実験1

本実験では，アクリル板からなる屈折面をカメラ前方に取り付け，カメラ全体が防水されるような装置を作成した。装置は，従来研究⁽¹¹⁾で選択した屈折面角度 45deg ，本研究で求めた屈折面角度 53deg を有するものを1つずつ作成し，これらを利用して水中で対象物を撮影し，精度の比較を行った。図9は計測対象であり，上面が一辺 40.0mm の直方体である。



図 9 計測対象 1

Fig. 9. Measurement object 1.

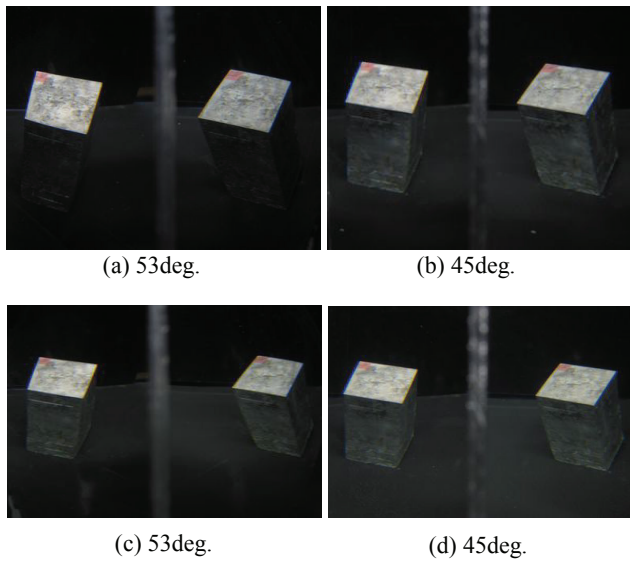


図 10 取得画像 1

Fig. 10. Acquired image 1.

実験は計測対象までの距離を変えて2度行い、それぞれ対象をカメラの前方約200mm, 400mmに設置した。図10(a)(b)は対象をカメラの前方約200mmに設置し、(a)は53deg, (b)は45degの屈折面角度をもつ装置を用いて取得した画像である。図10(c)(d)は対象をカメラの前方約400mmに設置し、(c)は53deg, (d)は45degの屈折面角度をもつ装置を用いて取得した画像である。取得画像のサイズは2048×1536pixelsである。

取得画像の中心から左側を左画像、右側を右画像として、左右画像について光の屈折を考慮したステレオ計測を行い、3次元座標値を算出した。計測を行う前提条件として屈折率を既知とし、それぞれ空気は 1.00, アクリルは 1.49, 水は 1.33 とした。

左右画像の対応点について、計測実験 1 では屈折面角度 53deg と 45deg における精度の比較実験であるため、計測対象の各頂点の対応点は手動で与えた。直方体の上面について、各辺の長さ及びの角度の計測を行った。表 1, 2 はそれぞれ奥行き約 200mm, 400mm での計測誤差の絶対値平均、標準偏差であり、(a)は辺の計測結果、(b)は角度の計測結果である。

表 1 実験結果 1 (奥行き約 200mm)

Table 1. Experimental result 1.

(a) 辺		
	53deg	45deg
平均誤差[mm]	0.70	0.93
標準偏差[mm]	0.37	0.88
(b) 角度		
	53deg	45deg
平均誤差[deg]	0.85	1.15
標準偏差[deg]	0.45	1.01

表 2 実験結果 2 (奥行き約 400mm)

Table 2. Experimental result 2.

(a) 辺		
	53deg	45deg
平均誤差[mm]	1.13	1.18
標準偏差[mm]	0.69	1.15
(b) 角度		
	53deg	45deg
平均誤差[deg]	0.28	1.18
標準偏差[deg]	0.20	0.33

表 1, 2 から屈折面角度 53deg での計測の方が、より精度が高いことがわかる。

4.3 計測実験 2

計測対象を図 11 に示す魚の模型に変えて形状計測実験を行った。対応点探索には正規化相互相関によるテンプレートマッチングを用いた。取得画像を図 12, 形状計測結果を図 13 に示す。

図 13 から全体的に計測対象の形状が得られているのが分かる。孤立した点是对応点探索の際に誤対応を起こしてしまったためであると考えられる。また、計測結果が得られていない部分については、テクスチャの無い部分で特徴が得られず対応点が検出されていない。



図 11 計測対象 2

Fig. 11. Measurement object 2.

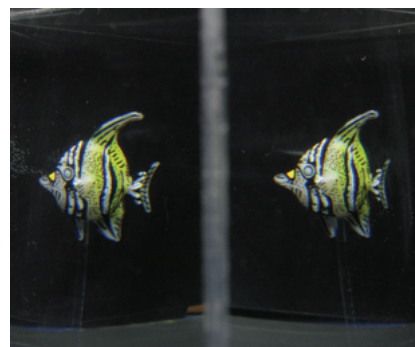


図 12 取得画像 2

Fig. 12. Acquired image 2.

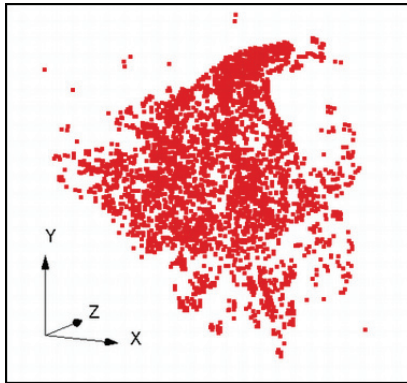


図 13 実験結果 2

Fig. 13. Experimental result 2.

以上より，本手法を用いた水中における形状計測が可能であるという結果が得られた．

5. 結論

光路による見え方の違いを利用することで光の屈折の影響を考慮した単体カメラによる水中センシング手法の提案，及び撮影装置における屈折面角度 θ の最適化を行った．実験により，算出した屈折面角度 53deg で計測を行うことで高精度な計測結果を得た．また，水中物体の形状計測についても対象の形状を確認することができた．

今後の課題として，今回の屈折面角度の検討では Z 軸上での精度について考えたが， Z 軸上以外での屈折面角度の検討を行う必要がある．また，対応点探索における誤対応の低減を行う必要がある．

謝辞

本研究の一部は，科学研究費補助金基盤研究(C)19560422の援助を受けた．

- (1) Behzad Kamgar-Parsi, Lawrence J. Rosenblum and Edward O. Belcher: "Underwater Imaging with a Moving Acoustic Lens", IEEE Transactions on Image Processing, Vol.7, No.1, pp.91-99 (1998)
- (2) Vittorio Murino, Andrea Trucco and Carlo S. Regazzoni: "A Probabilistic Approach to the Coupled Reconstruction and Restoration of Underwater Acoustic Images", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.20, No.1, pp.9-22 (1998)
- (3) 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)
- (4) Atsushi Yamashita, Susumu Kato and Toru Kaneko: "Robust Sensing against Bubble Noises in Aquatic Environments with a Stereo Vision System", Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.928-933 (2006)
- (5) Atsushi Yamashita, Akira Fujii and Toru Kaneko: "Three Dimensional Measurement of Objects in Liquid and Estimation of Refractive Index of Liquid by Using Images of Water Surface with a Stereo Vision System", Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2008), to appear.
- (6) 重松 文治, 守屋 典昭: 「水中レーザ・GPS を用いた大水深測深システムの研究開発」, 写真測量とリモートセンシング, Vol.36, No.5, pp.24-34 (1997)
- (7) 近藤 逸人, 巻 俊宏, 浦 環, 能勢 義昭, 逆巻 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)
- (8) 山下 淳, 林本 悦一, 金子 透: 「レーザレンジファインダを用いた水中物体の 3 次元形状計測」, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.72, No.717, pp.1506-1513 (2006)
- (9) 山下 淳, 樋口 裕和, 金子 透: 「光切断法による水中物体の 3 次元計測」, 精密工学会誌, Vol.73, No.2, pp.265-269 (2007)
- (10) 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)
- (11) 鈴木 陸実, 山下 淳, 金子 透: 「光路差による見え方の違いを利用した単眼ステレオによる水中画像センシング」, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.31, No.14, pp.41-44 (2007)
- (12) DooHyun Lee and InSo Kweon: "A Novel Stereo Camera System by a Biprism", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.16, No.5 pp.528-541 (2000)