

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560422

研究課題名（和文） 光の伝播特性を考慮した水中画像センシング

研究課題名（英文） Aquatic Image Sensing Considering Properties of Light Propagation

研究代表者

金子 透 (KANEKO TORU)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：50293600

研究成果の概要：水中物体を防水ハウジング中のカメラで撮影する場合、物体からの光はハウジングの境界面で屈折を起こし、形状に歪を生ずる。本研究では、そのような屈折現象を伴った画像から水中物体の3次元形状を取得する方式について検討を行った。また屈折率は波長により異なることから、単色光による計測が分解能の点で有利であることを示した。さらに水中での光の減衰が波長により異なることを考慮した水中画像の色復元法について検討した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：画像処理

科研費の分科・細目：(分科)電気電子工学 (細目)計測工学

キーワード：(1)水中 (2)画像計測 (3)光の伝播特性 (4)コンピュータビジョン (5)画像処理 (6)3次元計測 (7)光の屈折 (8)光の減衰

1. 研究開始当初の背景

コンピュータビジョンとは、画像の形式で与えられたデータを対象に、コンピュータを用いてそこに映し出されている情景を解き明かす技術であり、これまで長年にわたって数多くの研究がなされてきている。しかしコンピュータビジョンが従来から対象としている観測環境は、主として大気中あるいは真空中（宇宙空間）という、光の伝播媒質としては光学的に扱いやすい空間であった。

然るに、海洋の環境保全や開発などを目的とした水中ロボットの必要性が今後さらに増すと思われるが、そのためには下記に示す

光の屈折や減衰の現象を考慮した画像センシング技術を確立する必要があった。

(1) 光の屈折

カメラを防水ハウジングに収納して水中を撮影する場合には、ハウジングの窓を境として屈折率の不連続が生ずることになり、これにより屈折の現象がおこる。そのため撮影画像が幾何学的歪みを受けることになり、画像を用いた三角測量やレーダ測距に重大な計測誤差をもたらす。また水の屈折率は光の波長によっても異なるので、これがいわゆる色収差の現象となって現れる。この色収差は画質劣化を起こすのみならず、形状計測の精

度にも影響を及ぼす。

(2) 光の減衰

水中は光の吸収や散乱による減衰が大きく、大気中・真空中に比べて画像における鮮明度が低い。従ってカメラから離れている被写体を計測することが困難となる。また水における光の減衰率は、例えば赤の波長では青の波長の場合に比べて大きいなど、屈折率同様に光の波長によって異なり、従って水中物体を撮影した画像は被写体の真の色を反映しているとは言い難い。

2. 研究の目的

水中環境における画像センシング技術の確立を図るために、特に次に挙げる水中での光の伝播特性を考慮した計測法について研究する。

(1) 屈折の現象を積極的に利用した水中物体の単眼ステレオ計測

角型ガラス水槽内の物体を、隣合ったガラス壁面がなす稜線の方向から見ると、稜線を挟んだ左右の壁面は互いに直角となっているため、図1に示すように、水槽内の同一の物体を観測しているにもかかわらず、屈折の影響で左右別々に見える。そこで左右画像における対応点を抽出し、その視差を調べて屈折を考慮した三角測量を行うことにより、水中物体の3次元計測が可能となる。この現象を利用した観測光学系を水中カメラに組み入れることにより、単眼の水中3次元計測カメラを実現する。



図1. 複光路による水槽中物体の観測

(2) 波長による屈折率の違いを考慮した光線追跡

水中では、20°Cの場合、波長400nm(青)及び波長700nm(赤)の光の屈折率はそれぞれ1.343と1.330と、可視光領域では波長が短いほど屈折率が大きい。従って、大気中に設置されたカメラで水中物体を観測する場合、波長によって異なる方向から到来する光線が重畳されていることになる。そこでこの現象を考慮した計測処理を行うことにより、計測の高精度化を目指す。

(3) 波長による減衰率の違いを考慮した水中物体の色復元

水中においては大気中・真空中よりも光の減衰が大きいが、この減衰率は均一ではなく光の波長によってそれぞれ異なる。具体的には赤の方が青よりも減衰率が高いため、水中では物体が青みがかって見えることになる。この現象は物体がカメラから遠いほど顕著に現れるので、この性質を利用して計測物体のより真に近い色情報を得ることを目指す。

(4) 全方位カメラを用いた水中画像センシング

全方位カメラによる360度視野の撮影は、広範囲の空間に関する情報を一度に取得する方法としてロボットビジョンによく利用されている。そこで全方位カメラの水中計測に対する適用可能性について検討する。

3. 研究の方法

(1) 水中単眼ステレオ計測

単眼カメラを用いた角型ガラス水槽中の物体の3次元形状計測を行う。図2に示すように、直角をなすガラス壁面の稜線方向から観測すると、水中物体表面上の同一の点の像が、カメラの視野の左と右に分かれて結ばれる。そこで本研究では、画像中の対応点探索を行い、これに光線追跡を適用して、屈折を考慮した三角測量による3次元座標算出を行うシステムを構築する。

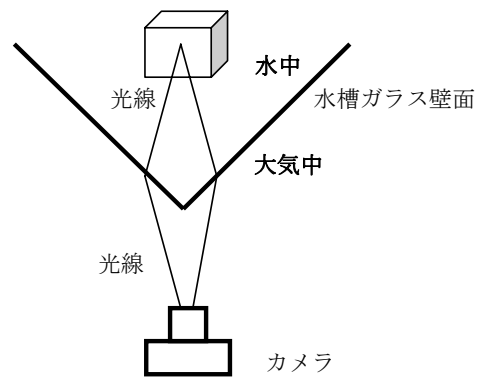


図2. 水中単眼ステレオ計測

(2) 波長による屈折率の違いを考慮した光線追跡

波長により屈折率が異なる現象の計測精度に対する影響を調べるには、観測条件による計測精度の比較が容易な計測方法を採用する必要がある。そこで本研究では、ステレオ計測に比べて計測精度を確保しやすい、アクティブな照明光を利用するセンシング法を用いて、精度の検証を行うこととする。

(3) 波長による減衰率の違いを考慮した水中物体の色復元

光源から光が水中を伝播して物体に到達

し、さらに物体で反射された光が水中を伝播してカメラに到達する一連の過程を明らかにすることにより、水中における光の減衰を伴わない場合の色を復元する方式を構築する。

(4) 全方位カメラによる水中画像センシングシステム

通常のカメラの前面に曲面ミラーを設置することにより、カメラの光軸と直交する方向に360度の視野を有する全方位カメラを構成することができる。本研究では、ミラーとして、画像座標から双曲面の焦点を原点とする球面座標に変換できるという特徴を持つ双曲線ミラーを用いる(図3)。

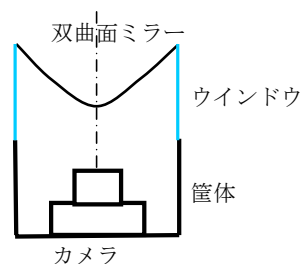


図3. 全方位カメラ

4. 研究成果

(1) 複光路単眼ステレオによる水中物体計測

一般にステレオ計測においては、奥行きの変化に対して視差の変化が大きいほど計測精度は高くなる。両眼視のステレオ計測では、2つのカメラのなす距離(基線長)が長いほど視差の変化が大きくなるが、本研究の単眼ステレオでは、水槽壁面の互いになす角が視差に対する重要なパラメーターであると捉え、その計測精度に与える影響について検討を加えた。

解析の結果、奥行き微小変化に対する視差の変化率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ことがわかった。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こととした。

実験条件として、カメラの焦点距離を4.6mm、カメラから屈折面までの距離を30mm、カメラから対象物までの距離を200mmから500mmの範囲と設定して屈折面角度の最適化を行った。その結果、図4に示すように、屈折面が互いになす角度の最適値は74度となった。

得られた屈折面角度をもとに、図5に示す

ような水中観測用単眼ステレオカメラを製作して計測実験を行ったところ、良好な計測結果を得た。また同様のハウジングにビデオカメラを装着し、これを研究室で製作した簡易型水中ロボットに搭載して、動作の確認を行った。

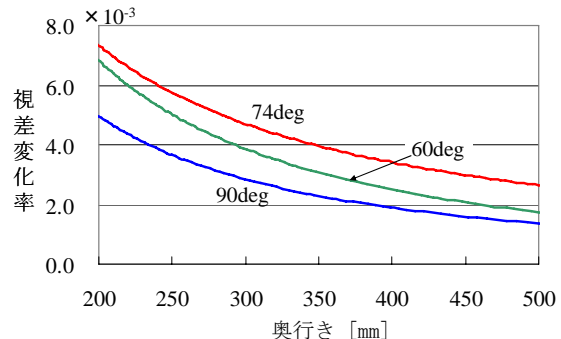


図4. 奥行きと視差変化率



図5. 水中観測用単眼ステレオカメラの構成

(2) 空間コード化法による水中物体計測

波長による屈折率の違いを考慮した光線追跡の効果を検証するためのアクティブな照明を行う計測方法として、パターン光投影法のうちの代表的な手法である空間コード化法(図6)を採りあげて実験を行った。その結果、白色光をプロジェクターで物体に投影してその反射光をグレースケール化するよりも、単色光をプロジェクターで投影してその色成分のみを観測する方が、計測の分解能が高くなり、より精度良く計測できることが示された。

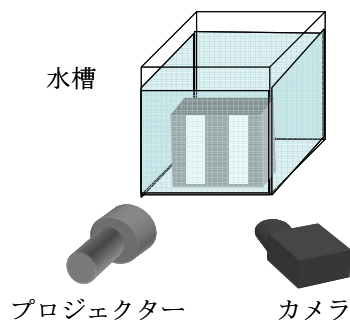


図6. 空間コード化法

(3) 全方位カメラシステムによる水中環境の3次元計測

双曲面ミラーを用いた全方位カメラを円筒形の防水ハウジングに収納し、これを上下に2台連結したステレオ方式の計測システムを構成した(図7)。

全方位カメラを収納するハウジングを円筒形にすることにより、光の屈折は円筒の軸に沿った方向のみを考慮すればよいことになる。また上下のステレオ構成とすることにより、エピポーラ線は円筒の軸方向に沿った直線となり、対応点探索に有利である。計測実験の結果、方式の有効性を確認した。



図7. 全方位カメラを用いた水中ステレオシステム

(4) 水中物体の色復元

媒体中の光の強度は、伝播距離に対して指数関数的に減衰する。この性質を利用することにより、水中での光の減衰係数(消散係数)、水中物体と光源の間の距離、および同物体とカメラとの間の撮影距離がそれぞれ与えられれば、物体を撮影したカメラ画像から、任意の撮影距離・光源距離における水中撮影画像を生成することができる。また撮影距離が不明の場合であっても、撮影距離の相対的な差のみが与えられている2枚の撮影画像が得られれば、撮影距離や光源距離を推定することができる。

図8は実験例の1つを示したものであり、図8(1)は水中撮影画像、図8(2)は、撮影時の撮影距離・光源距離を用いて、別の撮影距離・光源距離における画像を推定したものである。また図8(3)は図8(2)と同じ距離条件で得た実際の画像である。



(1) 撮影画像



(2) 推定画像



(3) 実画像

図8. 色合い推定結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計6件)

- ① 河井 良平, 山下 淳, 金子 透: "光の屈折を考慮した空間コード化法による水中物体の形状計測", 精密工学会画像応用技術専門委員会サマーセミナー2008テキスト, Vol.17, pp.95-98, 那須, August 22, 2008.
- ② 河井 良平, 山下 淳, 金子 透: "空間コード化法を用いた水槽中物体の形状計測", 第14回画像センシングシンポジウム講演論文集, 横浜, pp. IN3-18-1-IN3-18-6, June 13, 2008.
- ③ 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 (ICRA2008), pp.974-979, Pasadena (U.S.A.), May 21, 2008.
- ④ 白根 裕大, 山下 淳, 金子 透: "複光路単眼ステレオによる水中物体の3次元計測", 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-08-1~12/IIS-08-1~12), pp.21-26, 東京, February 22, 2008.
- ⑤ 河井 良平, 山下 淳, 金子 透: "空間コード化法を用いた水中物体の3次元形状計測", 映像情報メディア学会技術報告, Vol.32, No.8, pp.41-44, 横浜, February 16, 2008.
- ⑥ Atsushi Yamashita, Megumi Fujii and Toru Kaneko: "Color Registration of Underwater Images for Underwater Sensing with Consideration of Light Attenuation", Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2007), pp.4570-4575, Roma (Italy), April 13, 2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金子 透 (KANEKO TORU)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号: 50293600

(2) 研究分担者

山下 淳 (YAMASHITA ATSUSHI)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号: 30334957