

光の減衰を考慮した水中画像の色合い補正

藤井 めぐみ 山下 淳 金子 透

静岡大学工学部 〒432-8561 静岡県浜松市城北 3-5-1

E-mail: {f0210122, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

あらまし 本研究では、水中での光の減衰を考慮することにより、水中画像の色合いを補正する手法を提案する。水中では吸収や散乱により光の強度が減衰する。また、赤色等波長の長い光は減衰が大きく、青色等波長の短い光は減衰が小さい。そのため、水中では地上と異なった色合いで対象が観測される。更に同じ水中環境においても、観測位置から対象までの観測距離が変化すると色合いも異なって観測される。そこで本研究では、観測距離や媒質が変化した場合に観測される色合いの変化を推定するとともに、撮影位置の異なる2枚の水中画像の色合いの差より推定した観測距離を用いて色合い補正画像を作成する手法を構築する。実験により提案手法の有効性を検証する。

キーワード 水中画像, 色合い補正, 光の減衰

Color Registration of Underwater Images with Consideration of Light Attenuation

Megumi FUJII Atsushi YAMASHITA and Toru KANEKO

Faculty of Engineering, Shizuoka University 3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

E-mail: {f0210122, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

Abstract Colors of objects observed in underwater environments are different from those in air. This is because the light intensity decreases with the distance from objects in water by light attenuation. In this paper, we propose a color registration method of underwater images with consideration of light attenuation. The effectiveness of the proposed method is verified through experiments.

Keyword Underwater Image, Color Registration, Light Attenuation

1. 序論

近年、水中の環境調査や海底でのサルベージ作業等で水中カメラが盛んに用いられている。水中カメラからの映像を用いることにより、位置や形状を確認しつつ水中構造物を構築することや、色合いを観測して保守・点検を行うこと等が可能である。よって、これらの水中作業においては、観測対象の形状等幾何学的情報と色合い等光学的情報を計測することが必要不可欠である。また、観測対象によっては、それらの情報をデジタル保存することも重要となる[1]。しかし水中でカメラを用いる際には地上とは異なった2つの問題を考慮する必要がある。

幾何学的情報については、光の屈折が問題となる。水中で用いる機器は通常防水用の保護ガラス等に覆われており、空気-ガラス-水と屈折率の異なる媒質間を光が通過する。異なる媒質の境界部分では光が屈折するため、水中で撮影した対象物は歪んで観測される。よって、水中で幾何学的情報を正確に得るには光の屈折を考慮する必要がある。

光学的情報については、光の減衰が問題となる。光

の減衰率は波長によって異なり、波長の長い赤色等の光は減衰が大きく、波長の短い青色等の光は減衰が小さい。このため、水中では撮影距離が遠くなるほど、実際の色合いよりも青色や緑色がかかった色合いに見える。海底に沈む対象物を地上に引き上げると海底での撮影画像よりも鮮明に見えるのは、空気中では光が減衰しないためである。

前者の屈折の問題に対しては、レーザやステレオカメラを用いて、光の屈折を考慮した三角測量を行い、水中環境において対象物までの距離や形状を計測する手法が提案されている[2]。しかし、後者の色合いの問題に関して取り扱った研究はほとんどない。

そこで本研究では、水中での光の減衰を考慮し、水中画像の色合いを補正する手法を提案する。具体的には、撮影画像の対象物の色合いから、

- ・ カメラから対象物までの距離（観測距離）
- ・ 光源から対象物までの距離（光源距離）
- ・ 対象物周囲の液体（または気体）の種類（媒質）

が変化した場合に観測される色合いを推定し、補正画像を作成することを目的とする。また、異なった位置

で撮影した2枚の水中画像より観測距離等の未知パラメータを推定し、その結果を用いて別の条件で観測される色合いに補正した画像を作成する手法を構築する。

2. 水中における光の強度

カメラを用いて対象物を撮影する場合、各画素の色合いはカメラに入射する波長毎での光の強度に応じて決定される。ここで光の強度は、光の減衰と反射を考慮することで求めることができる。

2.1. 光の減衰

水中での光の減衰は、光源からの距離 z の位置における光の強度を $L(z)$ とすると式(1)で表される (図1)。

$$L(z) = L_0 \exp(-cz) \quad (1)$$

ここで、 L_0 は光源での光の強度、 c は消散係数である。消散係数 c は光の吸収と散乱を表す係数であり、光の波長と測定環境の媒質によって定まる。本研究で使用するカメラのCCDでは、光の強度は赤(R)、緑(G)、青(B)の3つの成分で得られるため、各波長に対応する消散係数を c_i ($i=R, G, B$) として表す。同様に光の強度も各成分に対応させ、 $L_i(z)$ と表すこととする。

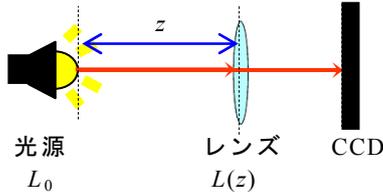


図1 水中での光の減衰と強度

2.2. 光の反射

拡散反射のみを考慮した場合、光の強度は以下のようにモデル化することができる (図2)。

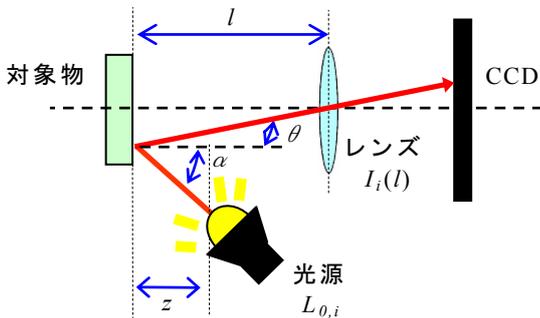


図2 水中での光の反射と強度

まず、空気中での光の反射を考えると、観測距離 l 及び光源距離 z の位置における光の強度 $I_i(l, z)$ は式(2)で表される。

$$I_i(l, z) = \frac{L_{0,i} \kappa_i \cos^3 \alpha}{z^2} \quad (2)$$

ただし、 $L_{0,i}$ は光源での光の強度、 κ_i は対象物面での

光の反射率、 α は光源からの光線と対象物の法線のなす角である。

これに、式(1)の水中での光の減衰を考慮すると、水中における光の強度は式(3)で表される。

$$I_i(l, z) = \frac{L_{0,i} \kappa_i \cos^3 \alpha}{z^2} \exp \left\{ -c_i \left(\frac{z}{\cos \alpha} + \frac{l}{\cos \theta} \right) \right\} \quad (3)$$

ただし、 θ はレンズへ向かう光線とカメラの光軸のなす角である。

3. 画像の色合い補正

撮影画像から得られる光の強度から、色合いを補正した画像を作成する。ここで、作成する画像を補正画像とし、補正画像におけるパラメータにはダッシュ記号 (') をつけて表す。

カメラに入射する光の強度は、観測距離・光源距離・媒質により変化する。そこで、これらの条件が変化した場合の色合い補正手法について示す。

観測距離が l 、光源距離が z 、媒質における消散係数が c_i のときの光の強度を $I_i(l, z, c_i)$ とすると、式(3)より $I_i(l, z, c_i)$ と $I_i(l', z', c_i')$ の関係は式(4)で表される。

$$I_i(l', z', c_i') = I_i(l, z, c_i) \frac{\cos^3 \alpha'}{\cos^3 \alpha} \left(\frac{z}{z'} \right)^2 \times \exp \left\{ -c_i' \left(\frac{z'}{\cos \alpha'} + \frac{l'}{\cos \theta'} \right) + c_i \left(\frac{z}{\cos \alpha} + \frac{l}{\cos \theta} \right) \right\} \quad (4)$$

(4)式を用いることで、撮影画像より得られたRGB成分毎の光の強度 $I_i(l, z, c_i)$ から補正したい条件での光の強度 $I_i(l', z', c_i')$ を求めることができる。よって、撮影画像から、色合いの補正を行うことができる。

4. 未知パラメータの推定

色合い補正手法より、反対に2枚の画像から光の強度を得ることで、観測距離・光源距離・媒質を推定することができる。2枚の撮影画像を画像A、画像Bとし、各画像における撮影時のパラメータには添え字A、Bをつけて表す。

4.1. 観測距離・光源距離の推定

カメラと光源が同時に移動する場合の観測距離・光源距離を推定する。このときカメラと光源の相対的な位置関係は固定されているとすると、フラッシュ(光源)付カメラで撮影を行う場合と同様とみなせる。2枚の画像の撮影時に媒質は同じで、観測距離を l_A から l_B に変化させたとする。ここで、消散係数 $c_{A,i} = c_{B,i}$ と2視点間の距離 $\Delta l = l_B - l_A$ は既知であるとする。光源がカメラの光軸上にある場合を考えると、以下の関係が成立する。

$$l_B = l_A + \Delta l \quad (5)$$

$$z_B = z_A + \Delta l \quad (6)$$

$$\alpha_A = \alpha_B = \theta_A = \theta_B = 0 \quad (7)$$

これらの関係を用いると、式(4)より2枚の画像での光の強度の関係は式(8)で表される。

$$I_i(l_B, z_B, c_{B,i}) = I_i(l_A, z_A, c_{A,i}) \left(\frac{l_A}{l_A + \Delta l} \right)^2 \exp(-2c_{A,i} \Delta l) \quad (8)$$

2枚の画像より光の強度 $I_i(l_A, z_A, c_{A,i})$, $I_i(l_B, z_B, c_{B,i})$ を得ることができるので、未知パラメータは l_A のみとなり、観測距離・光源距離を推定することができる。

ここで、 α と θ は Δl 等の既知のパラメータを用いて表されるので、光源が光軸上以外の位置にある場合にも、同様に未知パラメータを推定することができる。

4.2. 消散係数の推定

2枚の画像において観測距離と光源距離は同じで、媒質のみを変化させたとする。このとき、以下の関係が成立する。

$$l_B = l_A \quad (9)$$

$$z_B = z_A \quad (10)$$

$$\alpha_A = \alpha_B \quad (11)$$

$$\theta_A = \theta_B \quad (12)$$

これらの関係を用いると、式(4)より2枚の画像での光の強度の関係は式(13)で表される。

$$I_i(l_B, z_B, c_{B,i}) = I_i(l_A, z_A, c_{A,i}) \exp\{(c_{A,i} - c_{B,i})(z_A + l_A)\} \quad (13)$$

2枚の画像より光の強度 $I_i(l_A, z_A, c_{A,i})$, $I_i(l_B, z_B, c_{B,i})$ を得ることができるので、例えば1枚の画像を空气中で撮影したときなど消散係数 $c_{A,i}$ が既知の場合には(空气中の消散係数は0)、未知パラメータは $c_{B,i}$ のみとなり、媒質の消散係数を推定することができる。

5. 実験

1枚の水中画像から、観測距離・光源距離が変化した場合に観測される色合い補正画像を作成する(別視点画像生成)。また、2枚の水中画像から観測距離を推定し、その結果を用いて空气中で観測される色合い補正画像を作成する(空气中画像生成)。

5.1. 実験環境

対象物と光源は媒質を満たした水槽中に設置し、カメラは水槽面に密着させて空气中に設置した(図3)。画像の保存には、CCDが感知した光の強度を線形に4096段階(0~4095)で表すRAW形式を用いた。撮影は環境光の影響を除くため暗室で行い、光源は点光源のみとした。また、媒質には水を使用した。このときの波長毎の消散係数は、 $c_R=0.4000$, $c_G=0.0391$,

$c_B=0.0348$ である[3]。カメラと光源の相対位置関係は既知であり、実験中は位置関係を変化させずに、対象物のみを水中で移動させることにより、観測距離・光源距離を変化させた。この条件は、フラッシュ(光源)付カメラを水中で移動させ、静止した対象物を撮影した場合と同様の撮影条件である。

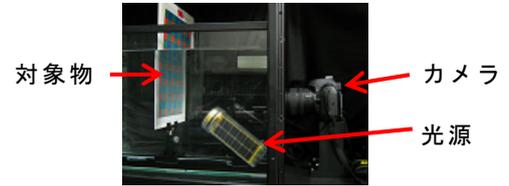


図3 実験環境

5.2. 別視点画像生成

1枚の水中画像を撮影し、別視点画像を作成する。水中画像から光の強度を求め、観測距離・光源距離が変化したときの光の強度を推定して、条件変化後に観測される色合い補正画像を作成する。手法の妥当性を検討するため、補正画像を作成した条件に光源・対象物・カメラを配置して実際に撮影した画像(実画像と呼ぶ)との比較を行う。

ここでは、観測距離 $l=0.80\text{m}$ 、光源距離 $z=0.30\text{m}$ の条件で撮影した水中画像(図4(a))を用いて、観測距離 $l=0.70\text{m}$ 、光源距離 $z=0.20\text{m}$ で観測した場合の別視点水中画像(図4(b))を作成し、実画像(図4(c))との比較を行った。ただし、図4はRAW形式で得た4096段階の光の強度を、bitmap形式で表現できるように256段階(0~255)に線形変換して作成したものである。

撮影画像と実画像を比較すると、撮影画像の方が全体的に暗い色合いとなっている。それに対して、光の減衰を考慮して作成した補正画像は、実画像に近い色合いを示している。



(a) 撮影画像



(b) 補正画像



(c) 実画像

図4 別視点画像への色合い補正結果

また、このときの対象物全体の光の強度の平均を表

1に示す。表1に示す光の強度は、RAW形式で得られたRGB成分毎の4096段階の値である。

撮影画像の光の強度の平均は、実画像の強度の平均の約59.9%であったことに対して、補正画像の強度の平均は約128.1%であった。よって、色合い補正により、実画像との強度の差が縮まり、実画像に近い色合いに補正されたと言える。

以上の実験結果より、別視点での色合い推定の有効性が示された。

表1 RGB成分毎の光の強度

	R	G	B
(a) 撮影画像	1187	1171	291
(b) 補正画像	2689	2429	616
(c) 実画像	2019	1933	496

5.3. 空気中画像生成

2枚の水中画像を撮影し、画像の光の強度の差より観測距離・光源距離を推定する。その結果を用いて、空気中において同じ条件で対象物を観測したときの色合いを推定し、補正画像を作成する。別視点画像生成実験と同様に、補正画像と実画像との比較を行う。

ここでは、観測距離・光源距離の移動量を $\Delta l=0.10\text{m}$ として、2枚の水中画像を撮影した(図5(a)(b))。これらの画像から得られたRGB成分毎の光の強度の変化から、撮影画像1の観測距離を推定した。実際の観測距離が $l=0.80\text{m}$ であったことに対して、推定した観測距離は0.82m(R成分)、0.78m(G・B成分)であり、実際の観測距離との誤差は約2%となった。この結果より、本手法を用いることで観測距離・光源距離を高精度に推定できることが確認された。

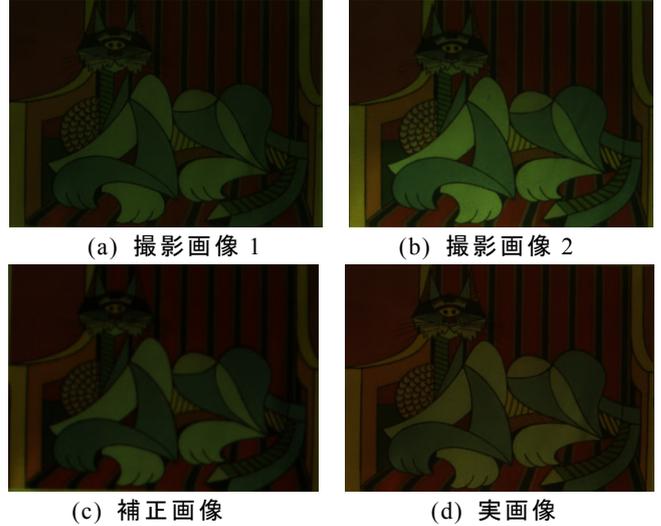
次に、光の減衰の影響が最も大きいR成分での観測距離推定結果を用いて、撮影画像1と同一の条件での空気中補正画像(図5(c))を作成した。また、比較のため、空気中において撮影画像1と同一条件で実画像(図5(d))を撮影した。

撮影画像1と実画像を比較すると、赤色やオレンジ色の部分において、撮影画像1の色合いが特に暗くなっていることが分かる。これは、水中ではR成分の減衰が大きいことが原因である。それに対して、光の減衰を考慮して作成した補正画像では、これらの部分においても実画像に近い色合いとなっている。

また、このときの対象物全体のRGB成分毎の強度の割合(色合い)を表2に示す。ここでは、B成分の光の強度の値を1としたときの、R・G成分の強度の割合を求めた。水中での撮影画像1ではRの割合が小さく、赤色の減衰が大きいことが定量的にも確認できる。それに対して補正画像では、若干R成分の割合が大きいのものの、撮影画像1と比較すると実画像に近い割合(色合い)となった。よって、観測距離を与えることで、水中画像を用いて空気中画像を作成できることが

示された。

以上の実験結果より、移動距離が既知の2枚の水中画像から空気中での色合いを推定する手法の有効性が確認された。



(c) 補正画像 (d) 実画像

図5 空気中画像への色合い補正結果

表2 RGB成分毎の光の強度の割合

	R	G	B
(a) 撮影画像1	3.32	3.49	1
(c) 補正画像	5.06	3.50	1
(d) 実画像	4.21	3.41	1

6. 結論

光の減衰を考慮することによって観測距離や媒質等が変化した場合に観測される色合いの変化を推定し、色合い補正画像を作成する手法を提案した。更に2枚の画像から未知パラメータを推定し、推定した結果を用いて色合い補正画像を作成する手法を構築した。

今後の課題は、光源の種類が変化した場合や環境光の影響がある場合にも、光の減衰を考慮した水中画像の色合い補正画像を作成する手法を構築することである。

謝辞

中央大学梅田和昇氏・小川直哉氏にはRAW画像解析プログラムをご提供頂いたため、ここに謝意を表す。

文献

- [1] 池内 克史, 中澤 篤志, 西野 恒, 小川原 光一: “文化遺産のデジタル保存”, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002)論文集, Vol.1, pp.331-340 (2002)
- [2] 山下 淳, 池田 真輔, 加藤 進, 藤井 彰, 金子 透: “ビジョン技術を用いた水中環境センシング”, 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-05-1~10 / IIS-05-1~10), pp.27-32 (2005)
- [3] E.O.Hulburt: “Optics of Distilled and Natural Water”, Journal of the Optical Society of America, Vol.35, pp.689-705 (1945)