実海域における水中ビデオ撮影法と流速計測の一事例

Techniques for Takeing High Quality VTR-Pictures and Measuring Flow Field in Real-sea

古川 恵太・細川 恭史

Keita Furukawa, Yasushi Hosokawa

VTR-Pictures taken under water are contain valuable and various information. For evaluating quality of the pictuers, and studying about a model of light-transmission, experiments and real-sea observations are done. New evaluate method that uses a pattern-board is presented.

Motion-analysis of suspended tracers are attempted for its application. The method is based on travel distance between a pair of serial scenes. This method is applied for the study of velocity near the sea-bed. It shows good ability of advanced application of the pictuers.

(Keywords : VTR-Pictures, Image-processing, Motion-analysis)

1. はじめに

港湾構造物を建造する前後において、生態系への影響調査が行われている。その調査項目は、水質の化学的分析結果や生物種の同定など多岐にわたり、総合的な評価をするには、専門的な知識が必要である。そこで、多くの情報を含み、誰にでも判りやすく調査結果を示すための補助的な手段として、水中ビデオカメラによる現場海域周辺の撮影が行われている。海域を可視化した情報は、直感的で判りやすい。本研究では、そうした目的で撮影された水中ビデオ画像をより高度に利用するため、水中ビデオ画像の特性を抽出し、適当な撮影方法について検討することを目的とする。

また、画像の高度利用法の一例として、トレーサの写し込み画像から流速場を推定する方法を検討し、実海域での流速計測に利用した例を示す。

2. 水中ビデオ画像の特性

今回撮影および画像の収録に用いたシステムは、図-1に示すように画像の収録部および処理部に分けられ、収録部では水中ビデオカメラからVTRでビデオテープに画像を収録し、処理部では、VTRを用いてビデオテープより読みだした画像情報を画像処理装置を用いて量子化し、画像の輝度値をRGBの三原色に分けて、測定することができる。また、得られた画像にフィルターを作用させる等、各種処理を行うと共に、画像情報をファイル化し、保存することができる。使用した機器の諸元を、表-1に示す。

図-1 画像処理システム

表-1 用いた装置の諸元

装 置	項 目	装置の諸元	装 置	項 目	装置の諸元
水中カメラ (白黒)	撮 像 素 子	2/3"CCD	画像処理装置	画 素 数	512×512Pixel, 256階調
	最 低 照 度	10Lx		画 面 数	16画面(カラー5画面)
	走 査 方 式	2:1 インターレス		画 像 変 換	2値化, 擬似カラー
	信 号 出 力	NTSC 1Vp-p		フ ィ ル タ ー	平滑化, 強調, メディアン, 凡用
	制 御	ライト, 焦点, 絞り, シャッタースピード		2値画像処理	拡大, 縮小, 細線化, 特性量計算
投 光 器		ハロゲン 500W×2灯	C P U	演 算 能 力	16bit, 10MHz

*) 運輸省 港湾技術研究所 海洋水理部 海水浄化研究室 (239 横須賀市長瀬3-1-1)

**) 運輸省 港湾技術研究所 海洋水理部 海水浄化研究室長

2. 1 大きさの分解能

対象物の明るさを測定する方法として、その物体の平均的な明るさを測定するために、画面上で測線を設定し、測線上の輝度値を画像処理装置より読み取り、平均する方法を用いた。対象物が小さく、この測線が短いときには、輝度値が見かけ上小さくなっていることが測定された。これは、画像中に含まれるノイズや画素の分解能の制限があると考えられ、対象物を写し込む時の幾何学的制約条件となる。例えば、図-2は、図左に示したアクリル板に描かれた大きさの異なる白色円盤を対象として、直径方向に設定された測線上の輝度値 q の分布を図右に示したものである。

この図では、一番小さい円に対応する輝度値が他の輝度値に比べて小さくなっており、減衰を受けていることが判る。そこで、減衰を受けていないと考えられる輝度値（この場合大きい方から2番目までの円に対応する輝度値）を平均し、これを基準として、それぞれの大きさに対応する輝度値を無次元化した。この無次元輝度値を画面上の大きさ（画素数）について整理したものが、図-3である。

図-2 大きさの分解能測定方法

図-3 大きさの分解能測定結果

図中に示されたプロットは、それぞれカメラから対象までの距離が20cm~90cmで、○印は海水中、□印は空気中の画像から得たデータを用いている。傾向はよく一致し、画面上の画素数が11~12 Pixelになるところから、大きさによる減衰が生じていることが判る。また、対象物そのものの大きさには関係していないことより、この減衰は、システムに依存していることが予想され、以下の測定・解析においては、最低画素数を20として、大きさの影響を受けないように考慮した。

2. 2 色の分解能

a) カラー画像の情報量

一般に水中のビデオ画像は青みがかったり、そのことが、かえって水中であることの雰囲気強調し、鑑賞用の画像としては、好ましいと感じられることもある。しかし、画像の情報を利用する立場からは、カラーであることによる情報の豊富さが活かされておらず、情報量の欠落が生じていると考えられる。どのくらいの情報量の欠落が生じているかの指標として、ここではRGB信号のそれぞれの輝度値をパラメータとして主成分分析を行い、各主成分の寄与率を比較した。

主成分分析には、実海域での収録画像の中から特徴的と思われる画像を抽出し、そこに現れているRGB信号の強度をデータとして用いている。例えば、捨石の画像であれば、凹凸の情報が測線上で現れるように、個々の捨石にまたがった測線を設定した。

主成分分析の結果を表-2に示す。ほとんどの画像で第一主成分が卓越しており、RGB表色系の3成分が互いに従属関係にあることが判る。また、第一主成分の構造を見

表-2 カラー画像の主成分分析

ファイル名	平均	分散	第1主成分*	寄与率
明るい海中	R 106	12	a 11	69
	G 185	10	b 9	
	B 213	10	c 6	
岩と海草	R 185	28	a 27	82
	G 146	22	b 20	
	B 17	15	c -8	
砂場	R 0	1	a 0	56
	G 146	8	b 6	
	B 224	8	c 6	
日向の岩場	R 10	8	a -1	76
	G 75	6	b 4	
	B 146	16	c 16	

*) 第1主成分 = $a \cdot R + b \cdot G + c \cdot B$

ると、H S I 表色系¹⁾の I 成分（明度）に対応していることが判り、ほとんどのカラー画像の情報量が白黒画像の情報量と等価であることが判る²⁾。

b) 輝度値の情報量

前節の検討により、色の情報は画面上の輝度値の差として表される。したがって、色の分解能は輝度値によって説明される。ここで、輝度値とは、カメラによって捉えられた光量が、画像処理装置によって0～255の値に変換された量のことである。輝度値の変化について説明するため、水中における光の伝達を以下のようにモデル化した。

用いた光の伝達モデル³⁾は、図-4に示されるように、光源としてライトによる投光と、太陽光やライトの光が水中に散乱されて生じる環境光を想定した。Q_{in}を、撮影対象前面における光強度、Q_{ot}をカメラ前面における光強度として以下のように定式化する。

$$Q_{in} = Q_{01} + k_1 \cdot Q_{11} \quad (1)$$

$$Q_{ot} = Q_{02} + k_3 \cdot Q_{12} \quad (2)$$

ただし、

$$Q_{01} = Q'_{01} + Q''_{01} \quad (3)$$

$$Q_{02} = Q'_{02} + Q''_{02} \quad (4)$$

$$Q_{12} = k_2 \cdot Q_{in} \quad (5)$$

図-4 光の伝達モデル

図-5 光伝達モデルのパラメータの変化

である。ライトの光はQ₁₁の強度を持ち、対象物前面に到達するまでにk₁の減衰を受ける。その光が対象物の表面でk₂の割合で反射し、カメラ前面に到達するまでにk₃の減衰を受ける。環境光は、対象物の前面とカメラ前面での強さをそれぞれQ₀₁、Q₀₂で示している。環境光の起源としては、自然光とライトによるものが考えられ、それぞれQ' ₀₁、Q'' ₀₁ (Q' ₀₂、Q'' ₀₂) で表される。実海域で透明度が高い場合一般には、Q' ₀₁ > Q'' ₀₁ (Q' ₀₂ > Q'' ₀₂) である。この伝達モデルは、光の伝達特性を支配している吸収、散乱といった個々の要因の結果として現れるその場の光強度を元にして組み立てられているのが特徴である。

それぞれのパラメータは、図-5に示すような変化を示すと考えられる。Qは、画面上で得られる輝度値であり、Lは、カメラ前面から対象物までの距離である。Q_{ot}は、白色の対象物から得られる輝度値に対応し、Q₀₂は、黒色の対象物から得られる輝度値であることを考えると、図中Q_{ot}とQ₀₂で囲まれた領域が、カメラで得られる対象物に関する情報量を示している。なお、Q_{ot}' はk₁=k₃=1つまり水中での光の減衰が無いとした場合の白色の対象物から得られる輝度値を表している。色の分解能は、環境光が一定となるL₀から情報量が0となるL_{max}にかけて減少していくことが予想される。

2. 3 画像のキャリブレーション

水中ビデオ画像を、より高度に利用して行くためには、画像の均質化を図る必要がある。しかし、水中ビデオの撮影時のダイバーの作業量を増やすことや、難しい操作を行うことは避けるべきである。そこで、パターンボードを用いた簡便なキャリブレーション法を提案する。

使用するパターンボードは、図-6に示すように、白・黒・赤・黄色のカラーブロックパターンと、大きさを変えたスケールパターンおよびスケールが必要である。パターンボードの大きさは、ダイバーが片手で持ち運べる範囲に制限される。また、パターンボード自体がハレーションを起こさぬように、素材、着色に気を配る必要がある。

使用法の概要は、あらかじめカメラ前面から対象物距離までの間で、数回の写し込みを行い、カラーブロックパターンを用いて、絞り、シャッタースピード、光源の強さ・向き等を調整する。また、スケールパターンは、対象物に対する焦点合わせ、フレーミングの決定の手がかりとする。スケールは、画角、距離の確認用である。

カラーブロックパターンでは、白と黒のパターンの輝度差が、図-3で示した情報量を示している。撮影したい範囲の近距離と遠距離の代表点において、白と黒が良好に分離できるようであれば、撮影範囲が L_0 と L_{max} の間にあることが確認できる。また、白と黄のパターンの輝度差を用いて、近距離の撮影時のハレーションや絞りの開けすぎを調整し、黒と赤のパターンを用いて、遠距離の撮影時の絞りの閉めすぎや環境光の強度とのバランスを調整することができる。各色はモニター上で分別し易いように隣接して描かれ、境界の画像より判断をする。特に、対象物の色や大きさがあらかじめ限定される時には、それに近い色をカラーブロックパターンに加えて、さらに細かい調整をすることが望ましい。図-7にパターンの見え方の分類を示し、表-3に画像評価の一覧を示す。

図-6 パターンボード例

図-7 パターンの見え方の分類

表-3 画像評価の一覧

	白黄 黒赤	a b c		
		a	b	c
A		露出不足	← 環境光<ライト	
B			適正	
C			環境光>ライト	→ 露出過多

3. 流速計測

画像を利用して、流れ場を解析することができれば、従来型の流速計による測定に比べて3つの利点がある。第1に非接触で計測できることであり、微細な流速場を測定する際には重要なことである。第2に空間的に広がりを持った場を同時に取り扱えることである。このことは、多点計測ができるという意味の他に、測定値のチェックのために、互いのデータを参照することができるという精度保証上の利点もある。第3に測定している場の原画像が残ることで、感覚的な現象の理解のためには、それだけで強力な手段となる。

しかし、以上に述べた利点があるとしても、計測に使用する機材、人材の準備は大きな障害となる。したがって、他の水中ビデオ撮影を伴う調査との同時実施が有利であり、そのデータを高次利用する形が望ましい。そのためにも、前章で述べた画像評価をして良好な画像を得る必要がある。

流速の推定は、測定したい対象近傍にトレーサを投入し、その移動の状況を写し込んだ画像から個々のトレーサの流跡線を追跡することによって行った。主な問題点としては、①トレーサの分離と、②流跡線の推定方法がある。以下にこれらを説明する。

3.1 トレーサ画像の特性

流速計測に用いるトレーサは目的の場の流速を代表するものであるから、その材質や、大きさに留意する必要がある。水中の計測であるのでなるべく沈降速度の小さいものがよい。また、大きさは、画像に収録することを

考えるとなるべく大きい方が分解が良く、流れへの追随性を考えると小さい方がよい。色は、背景と明確に分離できることが必要である。今回は、簡単に入手可能なものの内から、径1～2mmの白色スチレンビーズと3×1mmの黄色紙片を用いた。また、比較のためマリンスノーの画像もトレーサ画像として評価してみた。それぞれのトレーサの特徴を大きさと比較すると、黄色紙片とマリンスノーは比較的大きく、スチレンビーズは小さい。色の観点から見ると、黄色紙片とスチレンビーズは明るい色であり、マリンスノーはもやもやとした微小体の集合であるので、くすんだ色合いである。

図-8 各トレーサの輝度分布

各トレーサの画像から、トレーサを横切る測線上の輝度分布を抽出すると、図-8のようになる。図中↓のあるところにトレーサが存在している。各画像を比較すると、いずれの画像も、多くのノイズを含み、S/N比は良くないことが判る。その中でも、黄色紙片の画像が最もよく背景と分離されている。

さらに、S/N比を上げるために、フィルターを作用させてみる。図-9にはカラー撮影されたマリンスノーの画像をメディアンフィルターで処理した例を示す。ノイズが抑えられ、マリンスノーの単体が分離されていることが示されている。撮影時に分離しやすいトレーサを選択することが第一に重要なことであるが、撮影がうまく行かなかった場合でも、このようなフィルタリングの手法を用いて、限られたデータからの情報の再構成を試みることも大切である。

3. 2 流速推定法

得られる画像の特性および、計算時間等を考慮して、本論文では、著者らによって開発された3画面間参照のトレーサ追跡法による流跡線の推定を行った⁴⁾。

3. 3 計測事例

実海域における計測例として、海底面に対して鉛直下向きにセットされた水中ビデオカメラで流速を測定した例を示す。測定点は、図-10に示すように、防波堤端部から港外側に向かってA、B、Cの3点である。下げ潮時の測定であったので、港外側には図中白抜き矢印で示した方向に卓越する流れが観測されている。測定点に示した矢印は、カメラの視準方向で、画面上方が矢印の先端方向となっている。海底面とカメラの距離は約70cmであり、トレーサは海底付近でダイバーにより流れの上手から静かに投入され、海底より約10cmの高さを水平に流下していることを目視

図-9 メディアンフィルターで処理した画像

図-10 流速測定点

で確認している。トレーサとしては、背景との色の分離が良好であった $3 \times 1 \text{ mm}$ の黄色紙を一昼夜水に付け込んだものと径 $1 \sim 2 \text{ mm}$ のスチレンビーズを用いた。

平均流速は、画面を16分割してそれぞれの交点での値をトレーサの流跡から内挿して求めた。それぞれの測点に対する平均流速ベクトルを図-11に示す。各図の上に、カメラの視準方向が併記してある。トレーサが画面中央を横切るように留意したため、画面周辺のデータはトレーサが少なくなり、変動の激しいものになっている。

図-11 平均流速ベクトル

しかし、画面中央9点のデータは、ほぼ同じ値を示し、信頼性の高い流速データが得られていると思われる。この流速ベクトルを図-10に重ねて見ると、潮流流が防波堤近傍で加速されており、ポテンシャル流れに近い様子が観測されていることが判る。

4. おわりに

水中ビデオ画像を用いた調査は、その情報量の多さと、現象の理解のしやすさから、広範囲に利用される可能性を持っている。最低限のキャリブレーションを行うことによって、他の画像との比較検討や、画像の高度利用を進めることができると考え、キャリブレーション法の提案を行うと共に、一例として流速計測を行った。

本論文で得られた結果をまとめると、以下のようになる。

水中ビデオ画像の特性として、

- ① カラー撮影した画像と白黒撮影した画像を比較した場合、色の情報量は、同等となる場合が多い。
- ② 大きさの分解能は、機械的な分解能（1画素）より低い値（10画素程度）になる。
- ③ 水質・ライティングの条件により、撮影可能範囲（ L_0 、 $L_{\max}$ ）が規定される。

こと等が確かめられた。また、

- ④ パターンボードによる撮影条件のキャリブレーション法を提案した。

次に、流速推定法についての検討より、

- ① 流速推定のために写し込むトレーサとして、 $3 \times 1 \text{ mm}$ の黄色紙片が良い。
- ② 画像のノイズの消去にメディアンフィルター等のフィルタリングが有効である。
- ③ トレーサの移動距離・方向、トレーサの大きさを判定条件にした移動計測プログラムは、流跡線を良好に分離し、実海域の流速を高精度に測定することが可能である。

等を示した。

<参考文献>

- 1) 福江ら, HSI-RGB変換に関する諸方式の比較, 第1回色彩工学シンポジウム, pp.91-94, 1984
- 2) 石谷ら, 視界情報による潜水艇の制御情報取得に関する考察, 日本造船学会論文集, vol.164, pp.221-230, 1988
- 3) 細川ら, 水中ビデオ画像の特性と利用, 港湾技研資料, No.683, 1990
- 4) 古川ら, 水中ビデオ画像の特性と利用, 第15回土木情報システムシンポジウム, pp.263-270, 1990