A107 画像解析による非定常波高分布計測法の開発に関する研究 — 色分布のある光源からの反射光による計測 —

野々村 良輔[○] (ジャトコ・トランステクノロジー(株)), 鈴木 敏夫(大阪大学)

The development of a technique to measure unsteady wave height distributions by the image analysis

— Measurement by the reflected light from the light source with the color distribution —
Ryosuke NONOMURA and Toshio SUZUKI

ABSTRACT

The ocean wave information is indispensable to grasp the ocean environment and also important to navigate ships economically and safety. Therefore, many research works about the way of measuring it have been done.

Remote sensing technology using a satellite image is the useful way to measure it. This technology isn't suitable for getting the more detailed information of the limited part, though it is suitable for getting the average information of the large area.

The projected light distribution method was kept proceeding to measure the detailed wave height distribution of the limited part. But, it's very difficult to exceed a laboratory scale

This paper presents the way to measure the unsteady wave height distributions using the wave surface inclination distributions. The wave surface inclination distributions are analyzed images of the reflected light from the surface light source with the color distribution, by applying the Photometric stereo method. An unsteady wave height distribution is measured by this method and compared with the results measured by super-sonic wave height meters. The results show good agreement with them.

Keywords: Photometric stereo method, wave surface inclination, surface light source, color information

1. 緒 言

海洋波浪情報は海洋環境を把握する上で必要不可欠なものであり、また、船舶の安全かつ経済的な運航にとっても重要である。ゆえに、その計測法に関する多くの研究がさかに行われてきている。なかでも、人工衛星を用いたリモートセンシングは、機動性、広域性、連続性等の特徴を持つことから、非常に有用な計測法とされている。しかし、このような計測法は、広範囲の平均的な情報を得るのには適しているが、より局所の詳細な情報を得るのには適していない。

以前より、本研究室では、水中に設置された点光源から発せられた光が水面で屈折したもの、すなわち、水面からの屈折光によって、水面よりやや上に設置されたスクリーンに映し出される明暗分布を画像解析することにより、局所の詳細な波高分布を再現する手法が研究されてきた。しかし、この手法は、水面とスクリーン間の距離にかなりの制限があり、また、スクリーンを用いるということ自体からも、実験室レベルを超えることは非常に困難である。

加えて、境界値不定による波高再現精度の問題も無視できない。

本研究の目的は、照度差ステレオ法といわれる、物体表面の形状を計測する手法を応用し、空气中に設置された面光源から発せられた光が水面で反射したもの、すなわち、水面からの反射光をカメラで撮影し、得られる画像の色情報 (R, G, B) における濃度データを用いて対応光源位置を決定し、波面傾斜分布を算出する手法を開発することである。この手法により、光源、及び色情報として自然現象を利用することができれば、実海域の波高分布を計測することが可能となり、また、1 点の波高 (初期条件) が既知であれば、解析領域全体の波高分布が再現でき、波高再現精度が向上するといった利点がある。

2. 理論

被写体の見かけの明るさは、被写体表面の材質、及び視線方向、面素方向、光源方向が織りなす 3 つの角度によって決定される。したがって、被写体から視点 (カメラ) へ向かう方向と光源へ向かう方向がそれぞれ決定されれば、

面素方向, すなわち, 波面傾斜が明らかになる.

Fig2.1 理論座標系

Fig. 2.1 に示す座標系において, 任意の波面素 (X_w, Y_w) からカメラへ向かう単位ベクトルを v , 単位法線ベクトルを n , また, カメラ位置を $(0, 0, H)$ とすれば,

$$v = \frac{(-X_w, -Y_w, H)}{\sqrt{X_w^2 + Y_w^2 + H^2}}, n = \frac{(-p, -q, 1)}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \quad (2.1)$$

とおける. なお,

$$p = \frac{\partial \zeta}{\partial X_w}, q = \frac{\partial \zeta}{\partial Y_w} \quad (2.2)$$

である. また, 波面素 (X_w, Y_w) から光源 (X_s, Y_s) へ向かう単位ベクトルを s とし,

$$s = (s_x, s_y, s_z) \quad (2.3)$$

とする. 水面を正反射と考えれば,

$$s = 2(v \cdot n)n - v \quad (2.4)$$

が成り立つので, 式 2.4 に式 2.1 を代入し, 右辺を計算, 整理し,

$$H = ks_z + \zeta(X_w, Y_w) \quad (2.5)$$

より

$$k \cong \frac{H}{s_z} \quad \because H \gg \zeta(X_w, Y_w) \quad (2.6)$$

とすると, 対応する光源位置 (X_s, Y_s) は,

$$\begin{aligned} X_s &= X_w + ks_x = X_w + \frac{H(-X_w p^2 + X_w q^2 - 2Y_w p q - 2H p + X_w)}{(-H p^2 - H q^2 + 2X_w p + 2Y_w q + H)} \\ Y_s &= Y_w + ks_y = Y_w + \frac{H(Y_w p^2 - Y_w q^2 - 2X_w p q - 2H q + Y_w)}{(-H p^2 - H q^2 + 2X_w p + 2Y_w q + H)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

となる. これらを p, q に関する非線形連立方程式として解くことにより, 各波面素 (X_w, Y_w) における波面傾斜を算

出することができる.

3. 数値シミュレーション

本理論の有効性を確認するため, 光源, 波面, 及びカメラによる波面撮影画像をコンピュータで作成し, その画像を用いて波面傾斜分布を算出した.

なお, 面光源には, 色情報 (R, G, B) の各濃度を, y 軸正方向, y 軸負方向, x 軸負方向に, それぞれ $0 \sim 255$ 変化させたものを, 波面には, $y = x$ 方向に進行する, 振幅 $2(\text{mm})$, 波長 $50(\text{mm})$ の $\sin$ 波を用いた. 解析結果を Fig. 3.1 にそれぞれ示す.

Fig3.1 波面傾斜断面比較図

4 実験的検証

4.1 実験装置及び設定

Fig4.1 超音波波高計測実験装置概観

まず, 非定常かつ不規則な波高の時系列データを得る

ことを目的として、Fig. 4. 1, Fig. 4. 2 に示すように、超音波波高計を A~D の 4 ヶ所に配置し、球体を自由落下させることによって生じる波高を計測する。

光源として用いた画像は Fig. 4. 3 に示すものであり、Fig. 4. 3 にしめす色情報 (R, G, B) 3 成分の濃度配置のものを用いた。

Fig. 4.2 画像計測実験装置概観

	G: 80~179 G: 179~80 G: 80~179		
R: 80~179	B: 170	B: 180	B: 190
R: 179~80	B: 140	B: 150	B: 160
R: 80~179	B: 110	B: 120	B: 130
R: 179~80	B: 80	B: 90	B: 100

Fig. 4.3 光源画像濃度配置図

4.2 解析手法

Fig. 4.4 に解析手順を示す。ここで、解析の際、特に問題となる濃度補正法について述べる。

1. 撮影画像から数値データへの変換
2. 透視変換
3. 撮影画像のノイズ除去処理
4. 撮影画像の濃度補正
5. 対応光源位置の決定
6. 波面傾斜分布の算出
7. 波高分布の再現

Fig. 4.4 解析手順

前章で行った数値シミュレーションにおいては、水面での完全反射を想定しているため、光源から発せられた光が水面で反射し、カメラで撮影される経緯において、色情報 (R, G, B) における各成分の濃度は変化しない。よって、任意の波面素 (x_p, y_p) において認識された色情報から光源位置 (x_s, y_s) を決定することは極めて容易である。

しかし、実際にカメラを用いて波面を撮影した場合、水面の反射率、及び暗電流雑音、各成分間の濃度干渉、カメラの γ 補正等が含まれているため、入力 (光源) 濃度と出力 (撮影画像) 濃度とは必ずしも一致しない。そこで、画像計測実験を行う前に、様々な色情報をもった単色光を光源として用い、静水面を撮影することによって、その補正特性を調査し、入出力間の濃度関係を明らかにした。

Fig. 4.5 入出力濃度関係図

Fig. 4.5 は、色情報 (R, G, B) における各単成分のみの濃度を 0~255 変化させ、他の 2 成分を 0 に固定した単色光を光源とし、静水面を撮影した場合の入出力濃度間関係を示したものである。

こうした特性を把握した上で、入力濃度の推定を行った。

つぎに、本解析理論により算出された波面傾斜を用いた波高再現法について述べる。まず、点 A において計測された超音波波高計計測値 $\zeta(x_0, y_0, t)$ を初期条件として、

$$\begin{aligned} \zeta(x_{k+1}, y_0, t) = & \zeta(x_k, y_0, t) + hp(x_k, y_0, t) \\ & + \frac{h^2}{2} \{p_x(x_k, y_0, t) + p_y(x_k, y_0, t)p(x_k, y_0, t)\} \end{aligned} \quad (4.1)$$

により、 x 軸方向 1 ラインの波高を算出する。次に、これらを初期条件として、

$$\begin{aligned} \zeta(x, y_{k+1}, t) = & \zeta(x, y_k, t) + hq(x, y_k, t) \\ & + \frac{h^2}{2} \{q_x(x, y_k, t) + q_y(x, y_k, t)q(x, y_k, t)\} \end{aligned} \quad (4.2)$$

により、解析領域全体の波高分布を再現した。

ここで、 h は画素間の距離である。

4.3 解析結果

Fig. 4.6 計測結果時系列

B : $r = 0.848459$ C : $r = 0.897441$ D : $r = 0.771485$

Fig. 4.7 計測結果時系列比較図

まず, 4.2 で述べた手法により再現された, 解析領域内の点 B, C, D における波高と, それぞれと同一点において計測された超音波波高計測値とをタイムスケールで比較したものを Fig. 4.6 に示す.

また, B, C, D 各点における, 超音波波高計測値と解析結果との相関図, 及び相関係数を Fig. 4.7 に示す. 波高再現性の性質に依存して, 初期条件として設定した点 A か

らの距離が大きくなるにつれて相関が悪くなるが, 各比較点において, 定量的に良好な結果が得られているといえる.

3. 結言

数値シミュレーションを行った結果, 定性的, 定量的にほぼ正しい結果が得られ, 本理論の有効性を確認した. さらに, 実際の波面を対象とした画像計測実験により, 超音波波高計測値との比較を行った結果, 多少の計算誤差等があるものの, 定量的に良好な結果が得られ, 本手法の実用性, 及び精度を確認した.

これにより, 以前より開発されてきた波高分布計測法に比べ, 計測装置, 及び波高再現精度等の問題が改善され, 実海域における, 局所の詳細な波高分布計測の可能性を高めたといえる. なお, 実海域の波高分布計測において, 光源, 及び色情報といった自然現象を利用する際の問題点を解決する必要がある, 今後の課題となる.

参考文献

- 1) 根本敦記：水面透過光分布を用いた波形解析システムの構築に関する研究, 大阪大学修士論文, 1998
- 2) 亀井宏行他：点光源照明ステレオ法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J71-A, No. 4, 1988
- 3) 住野和哉：照度差ステレオを用いた波高計測法における基礎的研究, 大阪大学修士論文, 1995
- 4) 高木幹雄他監修：画像解析ハンドブック, 東京大学出版会.