203 スペックル法による液面変動計測の位置再構築精度の検討

東京大学 田中 源太郎^{*}、岡本 孝司

Evaluation of Reconstructing Accuracy for Specklegram Method

Gentaro TANAKA^{*}, Koji OKAMOTO^{*}

Accuracy for reconstructing algorithm used by Specklegram method was verified. Sine-curve was used as phantom, to calculate the deformation vector. 240x240 size surface was reconstructed using the vector. For each spacial frequency, surface shape was reconstructed and the gain and phase-lag was obtained. The result showed good agreement with the amplitude of the sine-curve. Though, for the case with high spacial frequency, phase-lag has appeared.

Keywords: Specklegram Method, free surface, correlation technique

1. スペックル法

従来、液面の定量的計測を行う際にはレーザーフォーカス変移計や静電容量式の液位計などが広く用いられている。これらの測定装置は高い精度で波高を測定できる平面、点計測に留まるという制約がある。しかしながら、界面での乱れの計測など、液面についての空間的な情報が必要な場合、液面の2次元的な形状を測定する手法が必要となる。

光学的手法を用いることで界面の2次元的な形状を求めることができる。Dabiri[1]らはカラーパレット法を用いて液面の2次元形状を測定した。彼らは色分けされた光を液面にあて、液面での反射光を撮影した。この反射光の色情報を用いることで、反射の法則からその色の光源位置がわかるため、液面での傾きが算出される。また、Suzuki[2]らは照度差ステレオ法を用いて液面形状を算出している。この手法では液面に対して2方向から光をあてている。この手法でも同様に、液面での反射光を液面上部から撮影している。この2方向からあてられた反射光の強度分布を測定することで、同様に液面の傾きが算出される。しかしながら、これらの手法は液面での反射を利用しているため、精度の高い計測のためには、光源の位置を正確に設置する必要がある。そのため測定系は非常に複雑になり、精度の高い計測は事実上困難である。

田中 [3] らは固体の微小変動を計測する手法として広く用いられているスペックル法を自由液面計測に応用した。スペックル法はレーザーを液面下部より照射し、液面変動による屈折の変化によるスペックルパター

ンの変移を計測する。スペックルパターンは液面上部に設置した半透過スクリーンに投影され、その画像をCCDカメラで取得した後、PIVで用いられる相互相関法 [4] によってその変移ベクトルを算出することができる。この変移ベクトルが液面の傾きを表していることをから、逆変換を行うことにより、2次元的な液面形状を算出することが出来る。この方法は、簡易な計測手法でありながら定量的な液面の形状変化を精度良く取得することが可能であると期待される。そこで、本発表では田中らのスペックル法を用い、仮想液面に対する、位置再構築精度の検証をおこなった。

2. 位置再構築精度の検証

スペックル法は相関法によって求めた液面の局所的な勾配をもとに液面形状の再構築を行う。そこで、本研究では正弦波

$$z = f(x) = A \sin\left(\frac{2\pi k}{S}x\right) \quad (1)$$

(A:振幅, k:波数, S:解像度) をファントムとし、振幅 $A = 1$ (スクリーンと液面間の距離 L を 30 とする)、仮想スペックル画像の解像度 $S = 240$ を用いた。スペックル法は自由液面での屈折を用いており、図1より

$$\theta = \frac{\delta}{(n-1)L}$$

θ : 液面の勾配、 δ : スペックルの移動量

n : 屈折率、 L : スクリーンと液面間の距離

が成り立つ。式 (1) の微分値 $f'(x)$ が θ となるので、スクリーン上の任意の点でのスペックルの移動量を簡単に求めることができる。よって上式より、解像度 $S \times S (S = 240)$ [pix] の画像に対して、全画素でスペックルの移動量、つまり格子点上での液面の勾配を算出し、それを元にスペックル法で再構築を行った。再構築の際は、乱数で選んだ格子点付近の液面を、上式で求めた局所的な勾配と合致するように変形させる操作を行っており、これを繰り返し収束計算を行うことで、液面形状を求めている。

正弦波 $z = f(r) = 10 \sin(\frac{2\pi \times 5}{240} r)$ を元に再構築された波面をを図2に示す。原点を中心とし、 $x = y$ 方向に進行する正弦波の形状が再構築されていることがわかる。そこで、再構築アルゴリズムの検証を詳細におこなうため、1次元の正弦波 $y = f(x) = A \sin(\frac{2\pi \times k}{S} x)$ を元に振幅 $A = 1$ 、解像度 $S = 240$ と固定した上で、波数をパラメータとして再構築を行い、ゲイン特性及び位相特性を調べた。結果を図3に示す。再構築の際の収束計算は、10000 ステップに固定して行った。波数が1の場合、液面形状が収束しきっていないために、振幅、位相共大幅なずれが見られる。しかしながら、それ以外は振幅の誤差は5%以内に収まっている。また、振幅が元の波形よりも小さくなっているのも同様に収束しきれていない事が原因と考えられるが、アルゴリズムの特性上、有限回の計算ステップでは完全に収束させることはできない。これは、収束計算の際に用いた緩和係数の影響もあり、係数を収束状況によって書き換えることでより少ない計算ステップで十分な精度を得ることは可能である。また、位相変調は波数が10程度までは 10° 以下と良好な結果であり、つまり画像の解像度に対して10分の1程度の波長の波まで再構築できることになる。

3. 考察・課題

スペックル法の再構築アルゴリズムの検証を行った結果、十分なゲイン特性を示した。振幅の精度は計算ステップによることがわかったが、動的な緩和係数をとることで、十分な計算速度と精度を得ることができる。また、高周波では位相変調が顕著に現れるが、画像の解像度の10分の1程度の波長の波までは十分に再構築できることがわかった。位相変調に関しては、画像の端での境界条件、及び格子点上での勾配と位置のずれが影響していると考えらる。今後、これら点を踏まえてアルゴリズムの改良を行う。

参考文献

[1]Dabiri et al.(1997) , Atlas of Visualization III, New York: CRC Press

[2]Suzuki et al. (1995) ,J. Vis. Soc. Japan, Vol 15: pp.351

[3]Tanaka et al. (1999), Experiments in Fluids (in printing)

[3]M.Raffel et al. (1998) Particle Image Velocimetry. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Figure 1: Refraction at surface

Figure 2: Reconstructed Surface

Figure 3: Diagram of amplitude and phase-lag vs. spacial frequency