

# レーザーとラインセンサーを組み合わせた水中三次元形状計測法の高精度化

白石 耕一郎<sup>1</sup>, 澤田 祐希<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

## Accuracy Improvement of 3D Shape Measurement System for Underwater Object Using Combination of a Laser and Line CCD Cameras

Koichiro SHIRAISHI<sup>1</sup> and Yuki SAWADA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Maritime Research Institute, 6-38-1 Shinkawa, Mitaka, Tokyo 181-0004

Abstract: Recently, authors have developed a new 3D shape measurement system for underwater objects using a combination line CCD camera measurement method. In this research, for increasing the accuracy of this system, we have developed a new camera model which can consider refraction by water in tank and measurement window. To verify the effectiveness of the developed model, model experiments has been carried out in the cavitation tunnel of NMRI. 3D shape measurement of the model propeller was carried out in the tunnel. In this paper, the authors show the measurement results of model propeller blade shape. As a result, authors confirmed that the developed model improves measurement accuracy as compared with the conventional model.

**Key Words:** Laser, Line CCD camera, 3D shape measurement, Underwater objects

### 1. はじめに

著者らは、水中で高速に回転する物体の形状を計測することを目的として、組合せライン CCD 法を用いた三次元形状計測システムの開発を行っている<sup>1)2)</sup>。組合せライン CCD 法は、計測対象物にレーザーを照射し、その照射位置を3台のライン CCD カメラで撮影し、それぞれの撮影画像における輝度値のピーク位置から計測点の三次元位置を算出するというものである。水槽内の物体の三次元形状を計測する場合、空気中での計測と異なり、水槽内の水及び観測窓による屈折の影響を受ける。そのため、水中の三次元形状を高精度に計測するためには、屈折影響を考慮した計測手法が必要となる。これまでも屈折の影響を考慮した計測法が開発されているが、そのほとんどがエリアカメラを対象としたものであるため、組合せライン CCD 法に直接使用できる方法は存在しない<sup>3)</sup>。そこで、著者らは組合せライン CCD 法の計測精度向上のために、光線追跡を用いることで屈折影響を考慮したカメラモデルを新たに開発する。そして、模型プロペラの水中三次元形状計測を行い、従来モデルと比較することで開発手法の有用性を検証する。

### 2. 組合せライン CCD 法

#### 2.1 計測原理

本研究で用いる組合せライン CCD 法は、計測対象物にレーザーを照射して発生する散乱光を3台のライン CCD カメラで撮影し、それぞれの撮影画像

のピーク位置から計測点の三次元位置を算出する方法である。本研究で開発した三次元形状計測装置の構成と Fig. 1 に示す。また、Fig. 2 の左図に開発した計測システムの外観と計測風景の写真を示し、右図に計測システムの設置方法を示す。

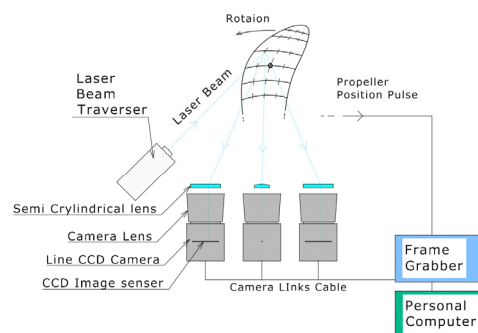


Fig. 1 Illustration of 3D shape measurement system using combination line CCD camera method.

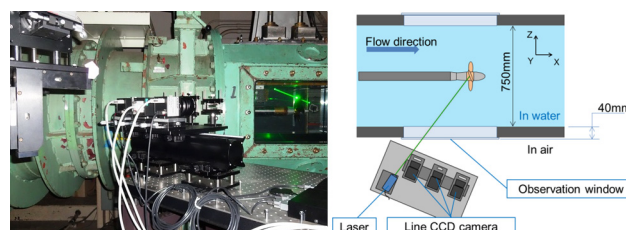


Fig. 2 Photo of the experimental scenery using the developed system and layout at cavitation tunnel.

## 2.2 カメラモデル

これまで3台のライン CCD カメラを組み合わせることで、計測点の2次元座標を構築し、その2次元座標から DLT (Direct Linear Translation) 法を用いて3次元座標を算出していた。その際、カメラモデルとしてピンホールカメラモデルを使用していた。このモデルではカメラからの光線は一直線に進むと仮定しているため、屈折の影響を考慮することができない。計測精度を更に向上させるには、観測窓等による光線の屈折を考慮したカメラモデルが必要である。本研究では、まず、DLT 法を用いてピンホールカメラモデルのカメラパラメータを推定する。得られたカメラパラメータからカメラの光線追跡を媒体が変化する度に行うことで、屈折を考慮した光線ベクトルを算出する。任意の点  $(x_i, y_i, z_i)$  を通りベクトル  $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)^T$  の方向に進む光線を考える。この光線が媒体  $i$  から媒体  $j$  に進む場合、屈折後の光線ベクトル  $(\alpha_j, \beta_j, \gamma_j)^T$  は次式で表される。

$$\begin{pmatrix} \alpha_j \\ \beta_j \\ \gamma_j \end{pmatrix} = \frac{n_i}{n_j} \begin{pmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \\ \gamma_i \end{pmatrix} + k_{ij} \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$k_{ij} = \frac{n_i}{n_j} \cos \theta_i + \sqrt{1 - (n_i/n_j)^2 (1 - \cos^2 \theta_i)} \quad (2)$$

$$\cos \theta_i = \alpha_i \lambda + \beta_i \mu + \gamma_i \nu \quad (3)$$

ただし、 $n_i, n_j$  は各媒体の屈折率、 $(\lambda, \mu, \nu)^T$  は媒体  $i, j$  の境界における法線ベクトルを意味している。

## 3. 三次元形状計測

### 3.1 実験概要

本試験では計測対象として青雲丸 I 世 HSP の模型プロペラ(直径 220mm, 翼数 5)を用いた<sup>1)2)</sup>。5翼のうち1翼はレーザー光の散乱強度を上げるために白色に塗装している。キャリブレーションは、キャリブレーションボードを用いて、ボード上の白点にレーザーのスポット光が重なるようにトラバースし、ライン CCD カメラで撮影した。ライン CCD カメラの撮影は計測点1点に対し100ライン計測した。

また、カメラモデルは従来のピンホールカメラモデルを用いる方法(従来手法)と本研究で開発した屈折を考慮するために光線追跡を行う方法(開発手法)の2つの方法を用いた。そして、それぞれの手法を用いて形状計測を行った結果を比較することで開発手法の有用性を検証した。

### 3.2 計測結果及び考察

本試験で得られた形状計測結果を Fig. 3 に示す。プロペラ翼面形状をワイヤフレームで表示している。赤点は計測点を表しており、それぞれの計測点を三角形補間することで計測した翼面形状を求めている。コンターの数値は計測結果とプロペラ翼面との計測誤差を示している。この図より計測誤差は最大でも約 0.9mm 程度となっており、十分な計測

精度を有していることが確認できる。誤差が最大となっている部分はキャリブレーションの範囲外であるので、この範囲を拡げれば更に精度向上が期待できる。Table 1 に従来手法と開発手法の比較結果を示す。この表から開発手法によって平均誤差が約 25% 減少し、計測精度の向上を確認できる。

Table 1 Comparison of measurement error between previous system and improved system.

	Previous	Improved	Difference
Ave. error	0.450 [mm]	0.347 [mm]	25.0 [%]
Std. error	0.324 [mm]	0.313 [mm]	3.0 [%]

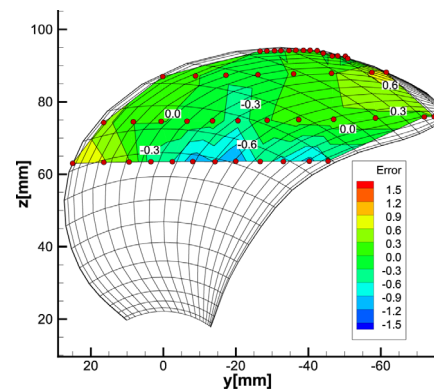


Fig. 3 Results of 3D shape measurement of model propeller (HSP) using developed camera model.

## 4. まとめ

本研究では、組合せライン CCD 法のカメラモデルとして水槽の観測窓及び水槽内の水による屈折を考慮した新たなカメラモデルを開発した。模型プロペラの水中三次元形状計測を行い、従来モデルと開発モデルの精度を比較した結果、従来モデルに比べ平均誤差が約 25% 減少し、計測精度が向上することを確認した。今後は本装置を用いた新しい計測対象への応用を目指す。

## 謝辞

本研究の一部は公益財団法人精密測定技術振興財団の助成を受けて実施した。

## 参考文献

- 1) 澤田ら：組合せライン CCD 法を用いた三次元形状計測システムの開発(可視化情報全国講演会講演論文集, 2015) p.51-52.
- 2) 白石ら：組合せライン CCD 法を用いた三次元形状計測システムの高精度化について(情報処理学会第 78 回全国大会講演論文集, 2016) .
- 3) 中山ら：ステレオ視によるガラス水槽中物体の 3次元計測のための観測パラメータ取得(電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No12, 2001) p.2684-2689.