

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

白石 耕一郎† 澤田 祐希† 星野 邦弘†

国立研究開発法人 海上技術安全研究所†

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^{[1][2]}。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。ライン CCD カメラは、低コストでありながら高速かつ高分解能という特徴を有している。

本システムに関わらず、画像計測を用いる場合、カメラキャリブレーションによるカメラパラメータの推定精度が計測精度に大きく影響する。これまでに高精度なキャリブレーション方法が開発されているが、ほとんどがエリア CCD カメラを対象としたもので、本システムに直接使用できる方法は存在しないため、独自にキャリブレーション方法を開発する必要がある。そこで、著者らは本システムの計測精度向上のために、非線形最適化を用いた非線形解法によるカメラキャリブレーション法を新たに開発する。そして、従来の最小自乗法を用いた線形解法と比較することで、開発手法の有用性を検証する。

2. 組合せライン CCD 法

ライン CCD カメラは 1 次元センサーであり、本機のみでは三次元空間の撮影は不可能である。そこで、星野らはライン CCD カメラの前に半円筒型のセミシリンジカルレンズを配置することで三次元空間の計測を可能とした^{[1][2]}。計測する位置にレーザーを照射し、計測対象から反射されたレーザー光はセミシリンジカルレンズを通ることで、ライン CCD 素子上へと集光するというものである。組合せライン CCD 法はこの原理を利用し、ある計測対象から反射されたレーザー光を 3 台のライン CCD カメラで撮像することで、それぞれの輝度分布のピーク座標から三角測量の原理よりレーザースポット光位置の三次元座標を求める計測方法である。図 1 は組

合せライン CCD 法における奥行き方向の計測原理を示している。P(X_0, Y_0, Z_0)は計測点、A および B は左右のライン CCD カメラの設置位置である。三角測量の原理より、レーザースポット光の三次元座標は以下の式より算出できる。

$$Z_0 = d \cdot f / (X_L - X_R) \quad (1)$$

$$X_0 = d \cdot X_L / (X_L - X_R) = X_L \cdot Z_0 / f \quad (2)$$

$$Y_0 = d \cdot Y_C / (X_L - X_R) = Y_C \cdot Z_0 / f \quad (3)$$

ここで、 X_L, X_R, Y_C は撮影画像上におけるレーザーのピーク位置($X_L - X_R$)は左右のカメラの視差、 d は A 点と B 点の距離、 f はカメラの焦点距離である。

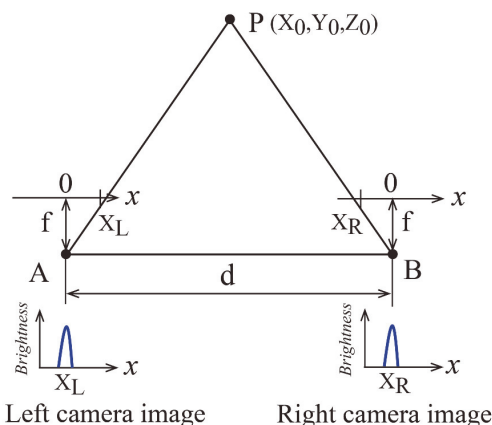


図 1 三角測量を用いた組合せライン CCD 法の計測原理

3. カメラキャリブレーション

本システムは、まず最小自乗法を用いた線形解法によってカメラパラメータを算出する^[3]。次に線形解法によって推定したカメラパラメータを用いて、マーカの位置を再投影し、その再投影位置と実際のマーカ位置の誤差が最小となるような最適なカメラパラメータを非線形最適化手法によって探索する。本研究では、次式で定義される再投影誤差 E を目的関数として用いる。

$$E = \sum_{j=1}^N e_j \quad (4)$$

$$e_j = \sqrt{(x_{p,j} - x_{m,j})^2 + (y_{p,j} - y_{m,j})^2 + (z_{p,j} - z_{m,j})^2} \quad (5)$$

Improvement of the three-dimensional measurement system using a combination line CCD camera measurement method
Koichiro SHIRAIISHI†, Yuki SAWADA†, Kunihiro HOSHINO†
† National Maritime Research Institute†

ここで、 N はキャリブレーションにおける計測点の数、 $x_{p,j}, y_{p,j}, z_{p,j}$ は再投影した j 番目の計測点の x, y, z 座標、 $x_{m,j}, y_{m,j}, z_{m,j}$ は j 番目の計測点に対応するマーカの x, y, z 座標を表す。そして、再投影誤差を最小化する非線形最適化手法として滑降シンプレックス法を用いる[4]。本手法は、目的関数の勾配を必要としないため、非線形関数にも適用でき、解空間が高次元でも比較的短時間で優良な解を探索できる手法である。

4. 三次元形状計測

4.1 実験概要

本試験では計測対象として青雲丸I世の模型プロペラ(直径220mm, 翼数5)を用いた[5]。5翼のうち1翼は指定した半径比ごとに翼弦長を約10等分した位置にマーキングし、その交点にそれぞれ白点を描画した。三次元形状計測装置と計測時の写真を図2に示す。図中央にあるラインCCDカメラとその周りの光学系が開発した計測装置である。キャリブレーションはキャリブレーション翼の翼面上のマーキングの白点にレーザーのスポット光が重なるようトラバースし、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。本計測では、プロペラトップをプロペラ角度0degとし、反時計回りを正とした。カメラキャリブレーションはプロペラ角度+10degと-10degの2つの角度で行い、プロペラ翼の形状計測はプロペラ角度0degの位置で行った。プロペラの回転数は15rpsである。

カメラキャリブレーションは従来の線形解法を用いる方法(従来手法)と本研究で開発した非線形解法を用いる方法(開発手法)の2つの方法を用いてカメラパラメータを推定する。そして、それぞれのカメラパラメータ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する。

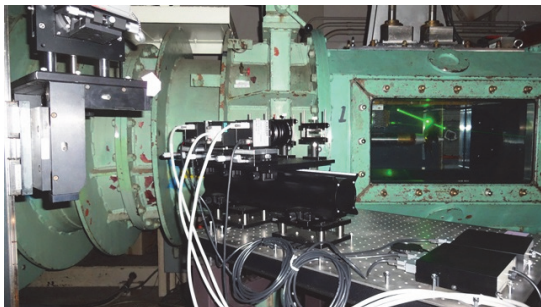


図2 三次元形状計測装置及び計測風景

4.2 計測結果及び考察

本試験で得られた形状計測結果を図3に示す。プロペラ翼面形状をワイヤーフレームで表示した。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。図3より計測誤差は最大で1.6mm程度あったものの、全体で1.0mm以下に収まっており、十分な計測精度が得られていると考えられる。従来手法の平均誤差は0.885mm、一方、開発手法の平均誤差は0.890mmとなっており、開発手法によって約0.5%程度計測精度が向上していることを確認した。翼の前縁及び後縁部は校正範囲外であったため、計測精度が若干落ちておりと考えられる。本問題は、校正点数および範囲を拡大することでより解決可能である。

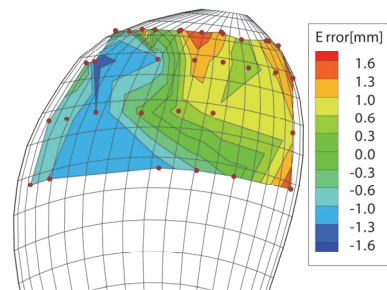


図3 開発手法による三次元形状計測結果の比較

5. おわりに

本研究では、組み合わせラインCCD法を用いた三次元形状計測法のカメラキャリブレーションについて、非線形最適化手法を用いる方法を開発した。その結果、従来方法に比べ平均で約0.5%精度が向上することを確認した。今後はカメラレンズの歪みや計測窓の屈折を考慮したカメラモデルを構築し、更なる精度向上を図る。

参考文献

- [1] 星野邦弘, 田村兼吉, 松岡猛: 水中3次元形状計測システムの開発, 独立行政法人海上技術安全研究所研究発表会論文集, Vol.6, (2006), pp.109-114.
- [2] 澤田祐希, 白石耕一郎, 星野邦弘: 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), pp.51-52.
- [3] 財団法人 画像情報教育振興協会(CG-ARTS 協会): デジタル画像処理, 日興美術株式会社.
- [4] William H. Press, William T. Vetterling, Saul A. Teukolsky, Brian P. Flannery: Numerical Recipes in C, Cambridge University Press.
- [5] 工藤達郎, 右近良孝, 黒部雄三, 谷林英毅: 模型プロペラ翼面上に発生するキャビティ形状の計測, 日本造船学会論文集, Vol.166, (1989), pp.93-103.