

LiDAR 搭載マルチコプターを用いた風力発電設備の位置姿勢推定手法の開発

吉田英晴† 平間毅† 中山恵介† 富田洋文† 青木邦知†
 茨城県産業技術イノベーションセンター†

1. はじめに

昨今、脱炭素社会の実現に向け大型風力発電設備が注目されているが、設備維持のために定期的な点検や補修が必要となる。現状では高所作業車やロープアクセスによる作業が主流であるが、安全性向上や運用コスト低減に向けて自律飛行型マルチコプターやロボットの利活用が期待されており、ロボットによる補修地点へのアクセス方法などの研究[1]が進められている。

マルチコプターが特定の作業位置まで安全に飛行するためには、マルチコプターと風力発電設備の位置姿勢関係を把握する必要がある。そこで本研究では、風力発電設備の3Dモデル、マルチコプター搭載のLiDARのデータから風力発電設備の位置姿勢を推定する手法を開発した。さらに、風力発電設備のフィールドやマルチコプターを模擬したシミュレーション環境を構築し、提案手法による姿勢推定精度を評価した。

2. 風力発電設備の位置姿勢推定手法

2.1 風力発電設備の位置姿勢とマルチコプターの飛行経路

風力発電設備はナセル、ロータ、ブレード、タワーの4部位で構成され、図1に示す3自由度を有する。本研究では、まず、ヨー角推定のためナセル高さでタワーを中心とした巡回飛行を行い、次に、ロール角推定のためヨー角推定結果をもとにマルチコプターをハブ正面へ移動する飛行を行った。図2に飛行経路の例を示す。

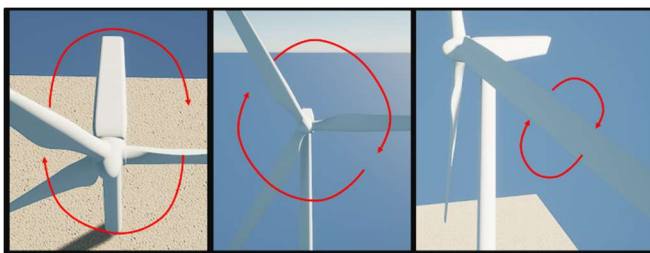


図1 左：タワーに対するナセルの回転角度(ヨー角)
 中央：ナセルに対するロータの回転角度(ロール角)
 右：ブレードピッチ角(ピッチ角)

2.2 ヨー角推定手法

ナセル回転時にLiDARで取得したデプス画像からタワー

最上部を検出し、タワー最上部から所定の高さにある点群データを直線で近似することでヨー角を推定した。

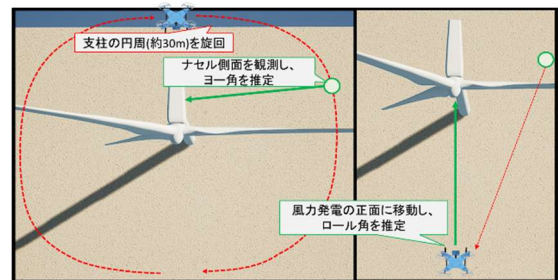


図2 左：ヨー角推定の飛行経路
 右：ロール角推定の飛行経路

図3にタワー最上部推定の例を示す。デプス画像の下部から円の近似を求め、さらに上方向に連続して円と判定された部位をタワーとし、タワー最上部の位置を検出した。なお、デプス画像の上下方向とデプス画像中のタワーの鉛直方向はほぼ同じであると仮定した。

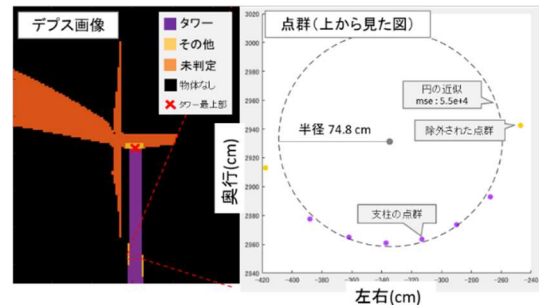


図3 タワー最上部の推定結果の例

次に、タワー最上部の上部にある物体の最上部をナセルの最上部とし、ナセル最上部より高い位置にある物体をブレードとみなすことで、画像上におけるブレードの左右関係を推定した。さらに、タワー最上部とナセル最上部のおおよそ中央の高さに位置する点群の近似直線を求め、ヨー角を推定した。ヨー角推定結果の例を図4に示す。

2.3 ロール角推定手法

図5左に示すように、デプス画像にブレード全体が映っていることを確認し、デプス画像中にある物体の上端、下端、右端、左端に位置するものを各ブレードの頂点と推定した。

Wind Turbine Posture Detection Using Multicopter Equipped with LiDAR
 †Hideharu Yoshida, Takeshi HIRAMA, Keisuke Nakayama, Hirobumi Tomita,

Kunitomo Aoki, Industrial Technology Innovation Center of Ibaraki Prefecture.

次に、各ブレード頂点を結ぶ三角形の外心からロール角を推定した。ロール角推定結果の例を図 5 右に示す。

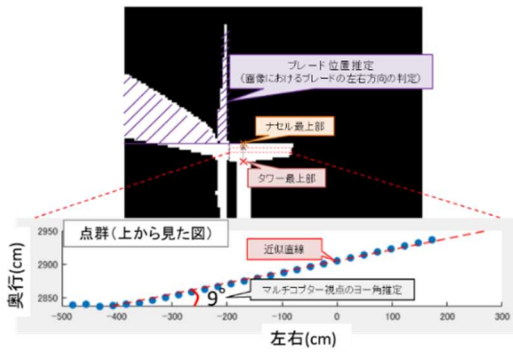


図 4 ヨー角推定結果の例

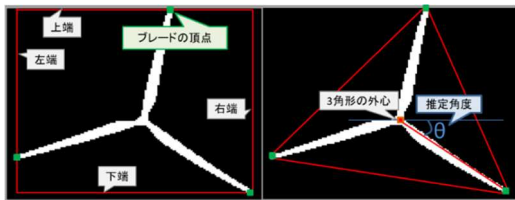


図 5 左：ブレード頂点の推定
右：ロール角推定結果の例

3. シミュレーターによる推定精度の評価

LiDAR を搭載したマルチコプターや、タワーの高さ 40 m の風力発電設備を模擬したシミュレーターを使用し、ヨー角、ロール角の推定精度の検証を行った。また、取得した LiDAR 測定値に、距離 20 m 当たり 2 cm の標準偏差を持つガウスノイズを付加した。

3.1 ヨー角推定の精度検証

図 6 に、ヨー角推定の検証方法とその結果を示す。ヨー角は、 0° に固定し、タワーから 30m 離れた 0° から 180° の区間の飛行経路で LiDAR での撮影を行った。その結果 0° から 60° 、 130° から 180° では、ヨー角は推定されず、ヨー角推定誤差の最大は、ヨー角 120° の場合に $0.57 \pm 0.11^\circ$ であった。

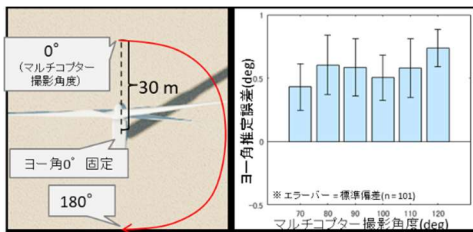


図 6 左：マルチコプターによるヨー角推定の検証方法
右：ヨー角推定角度の結果

3.2 ロール角推定の精度検証

ロータ正面から 45 m 離れた位置から、LiDAR でブレード全体を撮影し、ロール角推定を行った。図 7 で示すように、ピッチ角を 0° と 90° また、ロール角は -60° から 50° で撮影を行い、ロール角を推定した。結果、ロール角推定の誤差

の最大はピッチ角 0° ロール角 40° の場合に $0.73 \pm 0.021^\circ$ であった。検証結果の詳細を図 8 に示す。

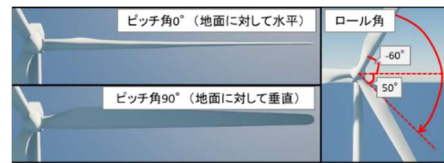


図 7 ロール角推定の検証を行ったピッチ角とロール角

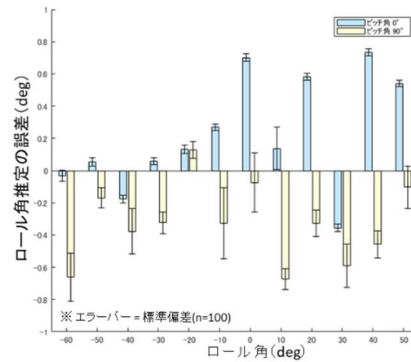


図 8 ロール角推定誤差の結果

4. 考察

ヨー角推定について、マルチコプター撮影角度が 0° から 60° の場合は、ブレードとナセル、またはタワーが重なりあった、また 130° から 180° の場合は、ナセル側面の点群数が十分取得できなかったため、ヨー角推定がされなかった。

ロール角推定の誤差について、ロール角、ピッチ角の各条件間に、バラつきがみられた。これはブレード先端が丸みのある形状のため、各条件間で、ブレード先端の判定位置に差が生じたことが推定誤差の主要因であると考えられる。

ブレード長 30 m の風力発電設備のヨー角、ロール角の誤差が 1° の場合、ブレード先端の位置の誤差は、0.74 m になる。ヨー角、ロール角ともに誤差の最大は 1° と考えると、ブレード先端等の所定の地点へ直接アクセスことは、誤差が大きく難しい。そこで、所定の地点へ接近し次第、カメラや LiDAR による対象物検出を用いてアクセスすることを考えている。

5. まとめと今後の課題

本研究では、マルチコプターを用いた風力発電設備のヨー角、ロール角の推定手法の開発とその精度検証を行った。シミュレーターによる検証の結果、ヨー角、ロール角の推定誤差の最大は $0.57 \pm 0.11^\circ$ 、 $0.73 \pm 0.021^\circ$ であった。今後は、ピッチ角推定手法の開発や、衝突を回避しつつ所定の地点にアクセスする手法を開発する。

参考文献

[1] Josef Franko, "Design of a Multi-Robot System for Wind Turbine Maintenance"