

LiDAR 搭載マルチコプターによる風力発電設備の位置姿勢推定手法の開発

吉田 英晴* 中山 恵介** 富田 洋文** 平間 毅*

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が進められている。

2. 目的

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（風車）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、風車の3Dモデル、マルチコプター搭載のLiDARのデータから風車の姿勢を推定する手法と、ブレード先端の位置推定手法を開発する。さらに、風車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、提案手法による位置姿勢の推定精度を評価する。

3. 研究内容

3.1 風力発電設備の位置姿勢推定手法

3.1.1 風力発電設備の位置姿勢とマルチコプターの飛行経路

風車はナセル、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、ピッチ角を推定するためヨー角推定結果をもとにマルチコプターをロータ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。

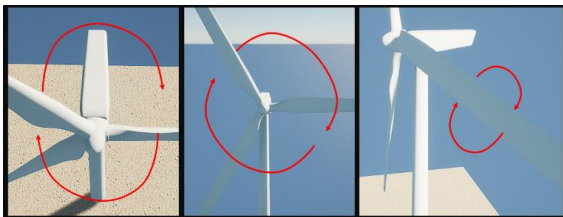


図1 左：タワーに対するナセルの回転角度(ヨー角)
中央：ナセルに対するロータの回転角度(ロール角)
右：ブレードピッチ角(ピッチ角)

3.1.2 ヨー角推定手法

ナセル巡回時に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し、ヨー角を推定した。

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。

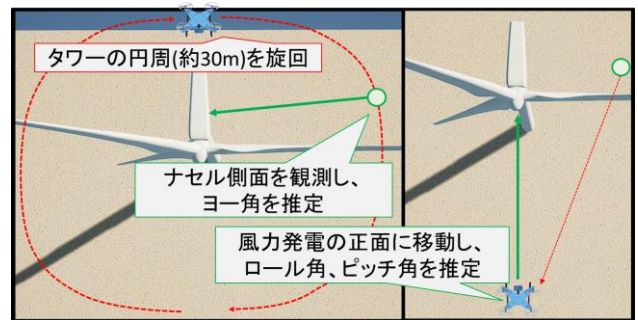


図2 左：ヨー角推定の飛行経路
右：ロール角、ピッチ角推定の飛行経路

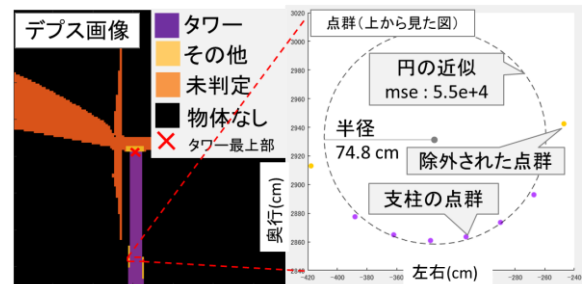


図3 タワー最上部の推定結果の例

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。

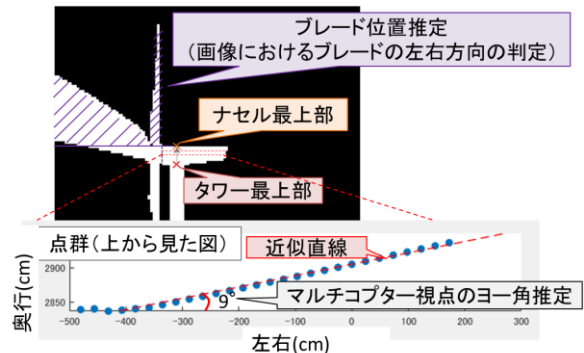


図4 ヨー角推定結果の例

3.1.3 ロール角推定手法

ヨー角推定後、ロータ正面に移動し、LiDARによる撮影を行い、まず、ロータ中央、ブレード根本の検索対象範囲の絞り込みを行った。図5に示すように、各点群に対して、縦、横軸に対して所定の半径内に位置する点群を検索し、各角度について、点群の有無を判定した。その後30°から50°の範囲を持つ物体ありエリアが3つ検索された場合、ブレード3つとロータ

を含んでいると推定した。

次に、そのエリア内の一番手前に位置する点群をロータの中央と判定し、さらに、ロータ中央から3つのブレードを同様に検索し、その各エリアに位置する点群のうち、一番手前に位置する点群をブレード中央とした。そして、図6に示すように、ブレード中央の3点とロータ中央点を使用して、3Dモデルとの位置合わせを行った。最後に、Point Cloud Library¹⁾ (PCL) のPoint to Plane ICP (Iterative Closest Point) による位置合わせを実施し、ロール角を推定した。

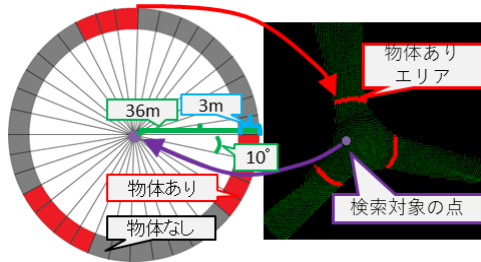


図5 ロータ、ブレード根本の検索対象範囲

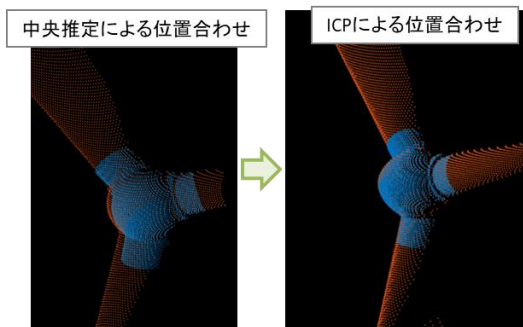


図6 中央推定による位置合わせと ICPによる位置合わせ

3.1.4 ピッチ角推定の手法

ピッチ角推定の概要を図7に示す。推定したロータ中央から、所定位置離れたブレード点群の断面を算出した。その後、3Dモデル断面の点群を所定角度毎に回転させ、LiDAR点群と3Dモデル点群の位置合わせを次の方法で行った。まず、3Dモデル点群から各LiDAR点群の法線の近似的を検索し、その法線を持つ点群から最も近い位置にある点との差を各点の移動量とした。次に、各点の移動量を平均し、LiDAR点群を移動させ、位置合わせを行った。最後に、回転角度毎の3Dモデル点群との近似性を評価し、ピッチ角を推定した。

3.1.5 LiDAR点群の法線推定手法

点群の法線推定の手法のひとつに、PCLを使用した法線推定がある。しかし、図8に示すブレード先端の撮影点群のように、平面に近い物体の表面と裏面を映した点群の法線を推定すると、想定する結果にならない場合があった。そこで、図9の例に示すデプス画像を使用した法線推定を行った。推定する点群と上下左右に位置する点群から、4つの面を作成し、それぞれの面法線を推定した。ただし、上下左右に点が存在しない場合は、点がある領域でのみ面を作成し、面法線

を推定した。その後、算出した面法線の合計値を正規化することで、各点群の法線を推定した。

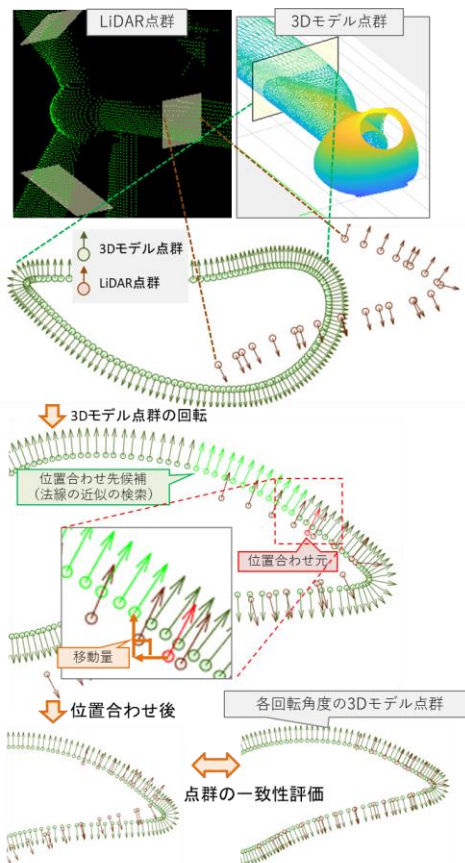


図7 ブレード点群の断面算出とピッチ角推定の手法

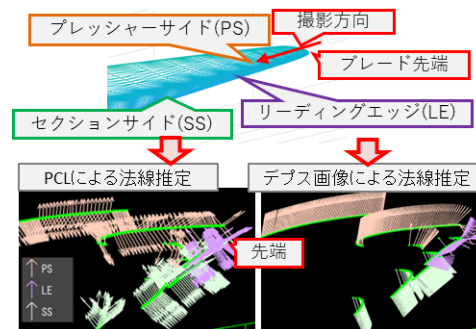


図8 ブレード先端におけるPCLとデプス画像を使用した法線推定の比較

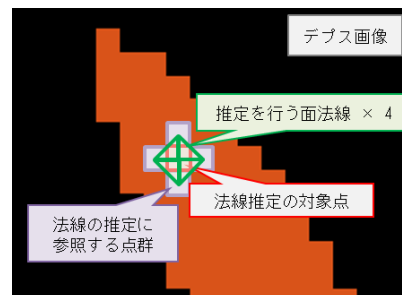


図9 デプス画像による法線推定手法

3.2 シミュレーターによる推定精度の評価

解像度 200×200 のデプス画像を生成可能な LiDAR を搭載したマルチコプターをシミュレーター上に作成

し、ヨー角、ロール角の推定精度の検証を行った。なお、取得したLiDAR測定値に、距離20m当たり2cmの標準偏差を持つガウスノイズを付加した。

3.2.1 ヨー角推定の精度検証

図10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、マルチコプター撮影角度が120°の場合に0.57±0.11°であった。

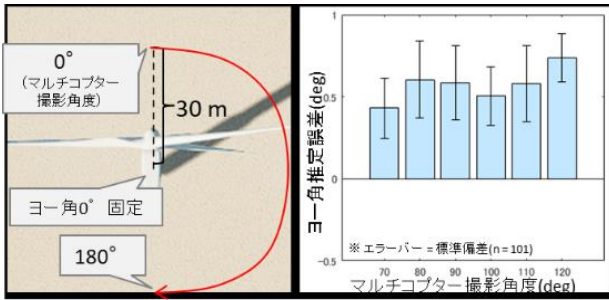


図10 左：ヨー角推定の検証方法
右：ヨー角推定誤差の結果

3.2.2 ロール角、ピッチ角推定の精度検証

3.2.2.1 検証手法

検証方法を図11の左に示す。

支柱から30m離れたロータの正面から撮影を行い、次の条件の場合のロータ各、ピッチ角の推定を行った。

- ・ロール角：-60°から50°間の12角
- ・ブレード1のピッチ角：0°から135°間の8角
- ・ブレード2のピッチ角：15°から150°間の8角
- ・ブレード3のピッチ角：30°から165°間の8角

3.2.2.2 検証結果

ロール角の推定精度結果を図11の右に示す。ロール角推定精度で最も推定誤差の平均が大きかった条件は、ロール角40°の場合であり、0.70±0.61°であった。

ピッチ角の推定精度結果を図12に示す。ピッチ角の推定精度で最も推定誤差が大きかった条件は、ピッチ角-135°の場合であり、3.1±3.7°であった。また、推定精度で最も標準偏差が大きかった条件は、ピッチ角0°の場合であり、0.45±8.1°であった。

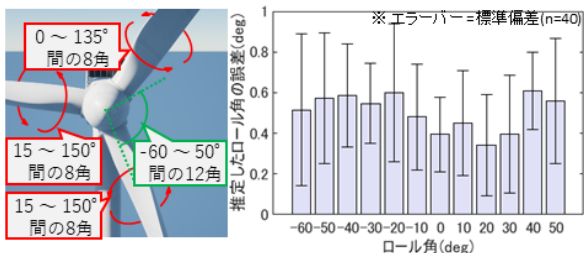


図11 左：ロール角、ピッチ角推定の検証方法
右：ロール角、ピッチ角推定精度の結果

3.3 風車姿勢角推定における考察

姿勢角からブレード先端の位置の算出例を図13に示す。ブレード長30m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、0.74m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た。

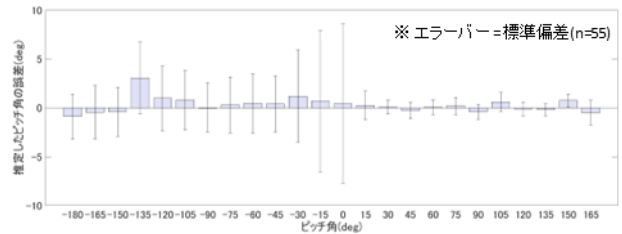


図12 ピッチ角推定精度の結果

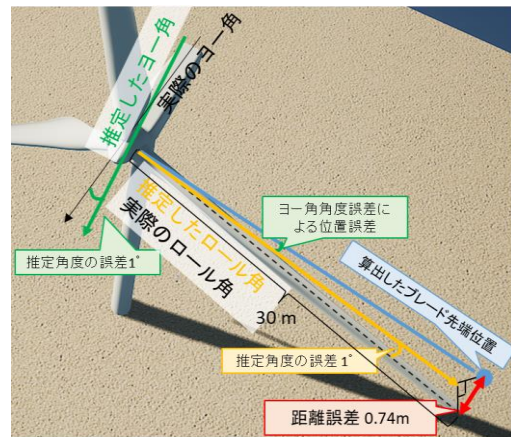


図13 推定角度誤差によるブレード先端の位置誤差

3.4 ブレード先端の位置推定

ブレードの傷を補修する際、傷の位置をあらかじめ記録した上で補修作業を開始することを想定している。また、実際の風車のブレード先端位置を特定できれば、傷の実際の位置を算出できる。そのため、図14に示すように、補修する傷の位置が、ブレード先端付近の場合、ブレード先端の視認と位置を特定し、ブレードの傷の位置を算出できると考えた。

そこで、ブレードに対して平行な位置にいるマルチコプターがブレード先端を視認した場合の、ブレード先端位置の推定方法を開発した。

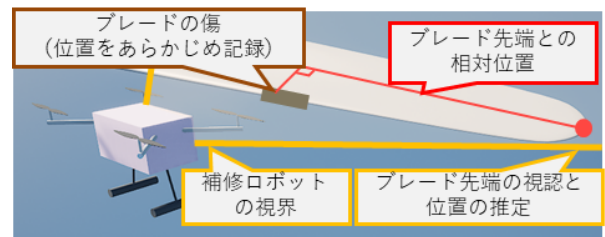


図14 ブレード先端と傷の位置の算出

3.4.1 ブレード先端の判定

LiDARで撮影した点群データの点群の境界は、図15

の例のように、物体の有無、もしくは、画角の見切れによるものがあり、それぞれを区別した。その後、推定した風車の姿勢情報と、ドローンの姿勢情報を用いて、すべての姿勢情報の基準値に置き換えを行った。

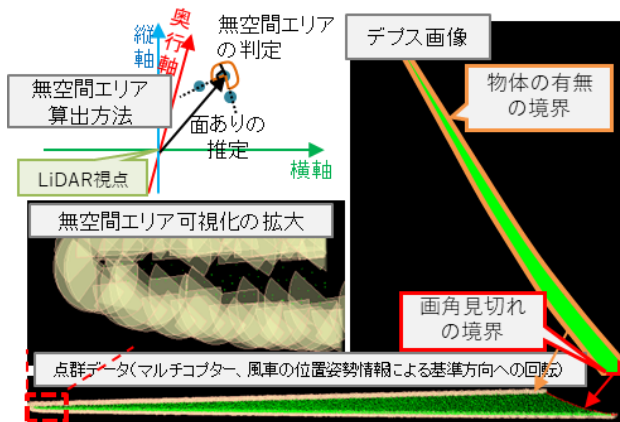


図15 点群の境界の解析と基準方向への回転

その後、横軸根本が画角による見切れにより境界点群があること、さらに、横軸先端に、先端方向への物体なしの境界があることを条件に、ブレード先端が撮影されたか判定した。

ブレード先端が撮影された場合、次の方法で、ブレード先端位置を推定した。まず、図16の例に示すように、最もブレード先端方向に位置する点を参照し、3Dモデルのブレード先端から所定値離れた断面の点群データの法線と最も近似する点を検索した。

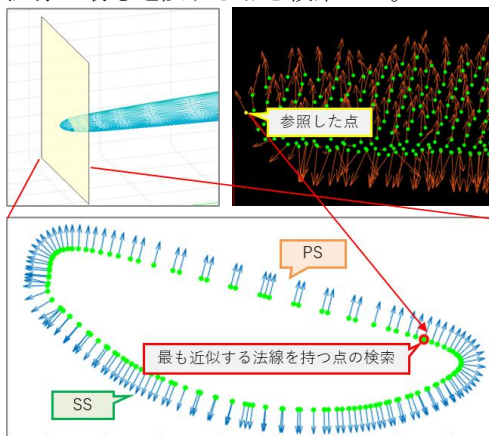


図16 参照した点群を通るブレード切断角度の推定

その後、3Dモデルのブレード先端と検索した点の2点を通る面に沿って切断した点群を算出した(図17)。なお、この面は、風車のヨー角に対し、垂直とする。そして、LiDARの参照点とマルチコプターの位置関係から、マルチコプターが視認できる限界角度を求め、その点をLiDARの参照点と推定し、ブレード先端位置を算出した。

3.4.2 ブレード先端位置の精度検証

搭載したLiDARの解像度を600×600に変更し、下記に示す計108パターンの条件をシミュレートし、ブレード先端位置の精度検証を行った。

- ・ ロール角：0°、120°、240°
- ・ マルチコプターの位置：各ブレードの先端と5m根本方向、また、ロール角に対して垂直に±5m
- ・ マルチコプターの姿勢：ロータに対して正面方向と、それに対するドローンのヨー角±10°
- ・ ブレードのピッチ角：0°、90°

その結果を図18に示す。先端位置の誤差は、ピッチ角0°の場合に、0.19±0.043mになった。

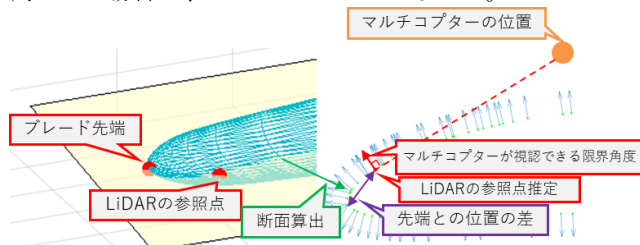


図17 ブレード断面図の算出と、マルチコプターの視野角に対するブレード先端位置の差

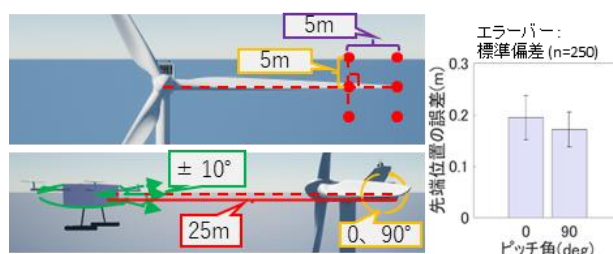


図18 左：ブレード先端位置推定の検証方法
右：ブレード先端位置の推定精度の結果

3.4.3 ブレード先端位置推定についての考察

ブレード先端の位置推定は、ブレード補修に使用することを想定しており、さらなる位置精度向上が必要であると考えている。そこで、図16に示すブレード切断角度の推定手法の見直しと、カメラの撮影画像を使用した精度の向上を考えている。

特に、ブレード切断角度の推定手法について、3Dモデル断面図のPS側の法線が一様であるため、参照した点の法線情報のみを使用する推定手法は課題があると考えており、参照した点の位置情報などを使用する手法を検討している。

4. まとめと今後の課題

本研究では、シミュレーターを使用した風車の姿勢やブレード先端の位置推定を行った。今後は、精度を向上させたブレード先端位置の推定手法の開発や、マルチコプターの実機を使用した検証を行う予定である。

なお、本研究は令和4年度から令和8年度まで文部科学省特別電源所在県科学技術振興事業「次世代メンテナンスビジネスに向けたドローンの高機能化に関する試験研究事業」の一環として実施しているものである。

5. 参考文献等

- 1) <https://pointclouds.org/>