

有線給電用テザーと力覚センサを用いた マルチロータ機の位置推定手法の提案

○薬師川 楓 大塚 光 桐林 星河 永谷 圭司 (東北大学)

1. はじめに

近年、橋やトンネルといった屋外構造物の検査や災害現場などの人の立ち入りが制限される地域の調査のために、小型無人航空機であるマルチロータ機を利用する手法が検討され、実用化に向けて研究開発が進められている [1]. このマルチロータ機による継続的な探査活動を行うためには、飛行時間の延長が求められているが、その有力な手段として、有線給電を用いた飛行が検討されている [2]. 有線給電では、地上局とマルチロータ機を給電線でつなぎ、電力を供給することで、長時間の飛行が可能となる。また、有線給電を用いた手法の場合、給電テザーをけん引することで飛行範囲を制限することができるため、マルチロータ機が飛行中に制御不能となっても、被害が及ぶ範囲を最小限にとどめることが可能となる。

また、マルチロータ機による屋内探査では、自己位置推定が必要とされており、これを実現するために、レーザ距離センサの搭載やモーションキャプチャの利用が検討されてきた。しかしながら、レーザ距離センサの搭載は大きな重量増加となり、小型の機体には取り付けられない。さらに、計算コストも増大することが予想されるため、機体に搭載するコンピュータによるリアルタイムの自己位置推定は、困難である可能性が高い [3]. モーションキャプチャを用いた位置推定では、外部の装置が必要となるため、災害調査など、移動地点に事前に装置が設置できない場合の探査活動には向いていない。

一方、有線で繋がれたマルチロータ機の位置推定については、飛行しているマルチロータ機の位置を、ピンと張られたテザーの張力から推定することが試みられている [4]. この手法では、屋内などの電波の届かない環境でも、移動ロボットとの相対位置を精度よく取得することが可能であると同時に、有線給電により飛行時間を延長することが可能となることが期待できる。さらに、これまで、有線給電テザーの張力の計測による張力補償制御 [5] や、位置が測定可能な場合にカテナリー曲線から形状推定し、線状柔軟物のマニピュレーションを行うこと [6] などが行われているが、張力とテザーの長さから位置推定を行うことについての検討は、不十分である。

以上より、本研究では、移動ロボットに有線給電用テザーで接続されたマルチロータ機の位置を、テザーの懸垂線(カテナリー曲線)により推定する手法を提案し、その有用性を検討する。本稿では、この位置推定手法について紹介すると共に、屋内での基礎実験を通じた、実現性の検討結果を報告する。

2. テザーによる位置推定手法

テザー終端のマルチロータ機の位置は、テザーの長さが既知である場合、マルチロータ機側の張力を計測し、

カテナリー曲線を描くことで推定することができる。

図1にカテナリー曲線による位置推定モデルを示す。なお、この二次元平面上に、テザーは位置し、カテナリー曲線に対して、その最小点が y 軸上となるように座標系を設定する。このとき、頂点からの弧長が s_0 であるような点 $A_0(x_0, y_0)$ において、張力の x 軸方向を T_{0x} 、 y 軸方向を T_{0y} とする。また、頂点からの弧長が s_1 であるような点 $A_1(x_1, y_1)$ において、張力の x 軸方向を T_{1x} 、 y 軸方向を T_{1y} とする。このとき、テザーに働く力の釣り合いを考える。重力加速度を g 、曲線の線密度を W 、テザーの全長を S とすれば以下の式 (1)~(4) を得ることができる。

$$T_{0y} = Wgs_0 \quad (1)$$

$$T_{1y} = Wgs_1 \quad (2)$$

$$-T_{0x} = T_{1x} = k \quad (3)$$

$$s_0 + s_1 = S \quad (4)$$

ただし、このとき k は頂点での張力である。ここで、 $k/wg = a$ とおき、頂点の座標を $(0, a)$ として上記の式を解くとカテナリー曲線の式は次の式 (5) のように表すことができる。

$$y = f(x) = a \cosh\left(\frac{x}{a}\right) = a \left(\frac{e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}}}{2} \right) \quad (5)$$

さらに、マルチロータ機側の張力ベクトル (T_{1x}, T_{1y}) とテザーの全長 S が既知であるとき、式 (2),(3) より s_1, T_{0x}, k を求めることができる。次に、式 (4) より、 s_0 を求めることができる。ここから式 (1) により、 (T_{0y}) を求めることができる。ここで、式 (5) を微分することに

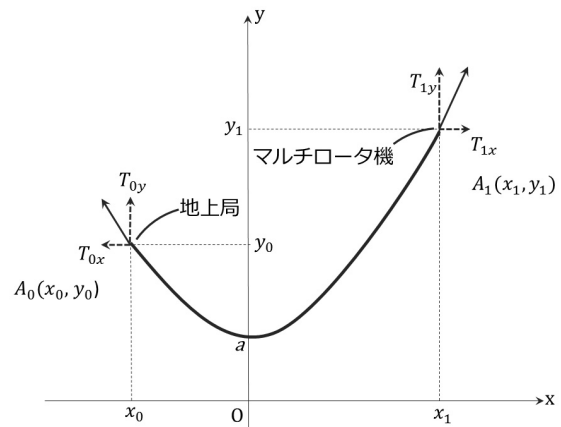


図1 テザーのモデル

より、次の式 (6) を得ることができる。

$$x = a \times \ln \left(f'(x) + \sqrt{(f'(x))^2 + 1} \right) \quad (6)$$

以上に示した通り、張力 $(T_{0x}, T_{0y}), (T_{1x}, T_{1y})$ からテザーの傾き $f'(x_0), f'(x_1)$ を求め、 x_0, x_1 を推定することができる。さらにこの値を式 (5) に代入することにより、点 $A_0(x_0, y_0)$ と点 $A_1(x_1, y_1)$ の座標を求めることができる。このようにマルチロータ機側の張力 (2 軸方向のベクトル) から、2 次元平面上での地上局とマルチロータ機の相対位置を導出することができる。この手法を拡張することにより、三次元空間でも同様にマルチロータ機の張力ベクトルから、相対位置の導出が可能である。

3. 位置推定手法の検証実験

前章で示した手法の実現性を検証するため、本研究ではまず、二次元平面上にマルチロータ機と地上局を模擬した装置を設置し、マルチロータ機側の張力を力覚センサで計測することで、相対位置の推定が可能であるかを検討することとした。なお、本実験では、二次元平面上的の複数点における、相対位置の推定精度を評価対象とした。

図 2 に実験装置を示す。アルミフレームを用いた骨組みに、地上局を模擬した装置とマルチロータ機側を模擬した装置を設置した。なお、マルチロータ機側では力覚センサを用いて、3 軸方向の力と 3 軸周りのモーメントを測定することとした。使用した力覚センサは Leptrino 社製 6 軸力覚センサ CFS034CA101U である。また、今回、有線給電用テザーは、富士電線工業株式会社製ソフト VCTF(ラバロン 300, 公称断面積 2mm^2) を利用した。

なお、本実験では、屋内探査を想定し、5メートル以内の比較的短いテザーを使用することとした。また、相対位置の範囲は限定的ではあるが、同じ相対位置で、テザーの長さや張力が異なる場合と、同じテザーの長さで、相対位置が異なる場合において、どのような違いが出るかを確認できるようにした。

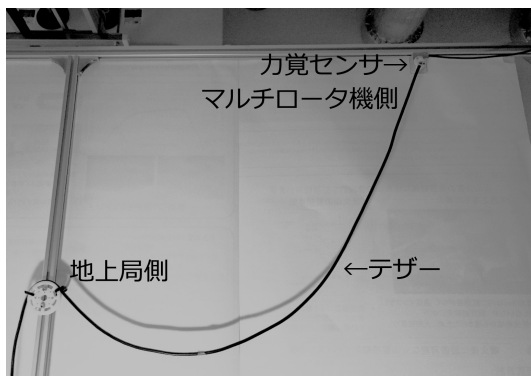


図 2 実験装置

4. 実験結果

今回実験を行った結果の例を図 3~5 に示す。図 3, 図 5 は、テザーの推定形状と実際のテザー端点の位置を表しており、曲線の左端が地上局側、右端がマルチロータ

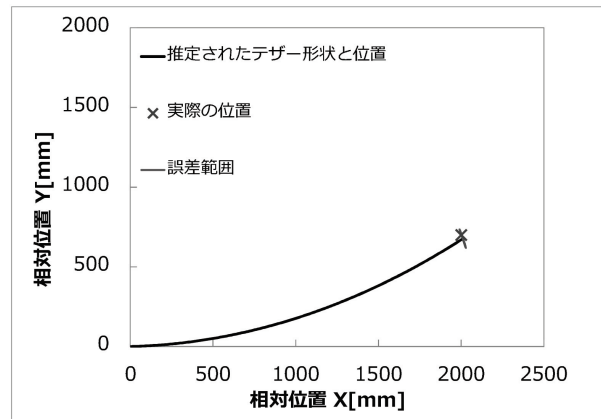


図 3 位置推定の実験結果 (テザー長さ 2150mm 相対位置 X:2000mm Y:700mm)

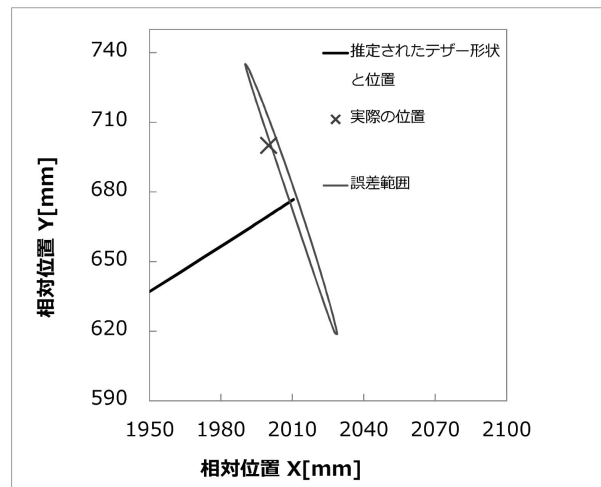


図 4 位置推定の実験結果のテザー端拡大図 (テザー長さ 2150mm 相対位置 X:2000mm Y:700mm)

機側を表している。なお、実際のマルチロータ機側の位置については、×印で示し、力覚センサの測定値から計算で求めたテザーの推定形状を実線で示した。さらに、力覚センサで測定している張力の値が、 0.1N の範囲で誤差があった場合の誤差範囲を、図中に誤差楕円で示した。なお、図 4 は、図 3 のテザーの、マルチロータ機側の端点の拡大図である。また、テザーの姿勢推定には、第 2 章で述べた計算方法を利用した。これらの図より、力覚センサとテザー長さから推定したマルチロータ機の位置は、力覚センサの精度に比較的大きく依存するが、推定可能であることが分かった。

他の条件で行った実験を含めた結果を表 1 に示す。これより、複数の条件において、誤差が、実際の値に対して 20% 以内の範囲で検出可能であることがわかる。また、テザーがたわんでいるときほど、推定位置の誤差は大きくなることがわかった。一方、地上局側とマルチロータ機側の相対位置が同じ場合、テザーが強く張られているときの方が、精度よくマルチロータ機側が自己位置を推定できていることがわかる。テザーの長さが同じで相対位置が異なる場合も、テザーが強く張られているとき

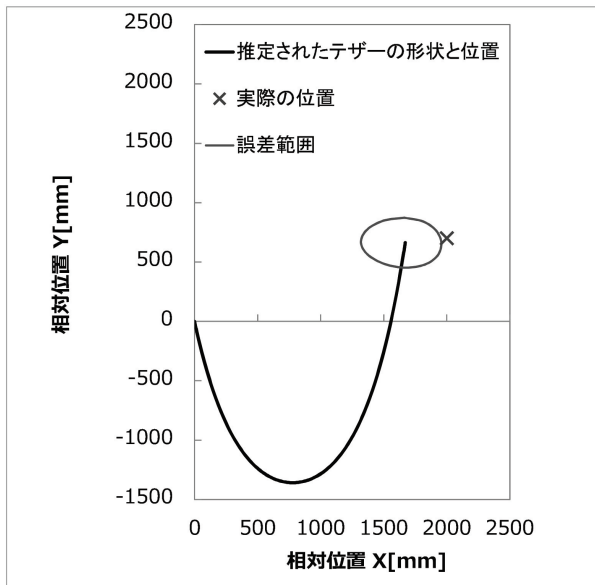


図5 位置推定の実験結果 (テザー長さ 4000mm 相対位置 X:2000mm Y:700mm)

の方が、精度よく自己位置を測定できていた。

5. 考察

測定誤差が20%以内の範囲で検出可能であったが、これは、屋内での簡易な自己位置推定としては利用可能なものと考えられる。また、テザーにかかる張力が大きいほど、自己位置推定の精度が高いことがわかった。張力の大きさが位置推定の精度に影響した原因として、センサの計測精度の影響が考えられる。今回実験に用いたセンサは、定格が100Nと大きいものであり、張力が小さい場合に計測精度が不十分であった。よって張力が大きくなることで、測定値に対する誤差の割合が小さくなったため、推定位置の誤差が小さくなったと考えられる。また、張力が大きい方が、テザーについているくせにより、理論上のカテナリー曲線からのずれが少なく

なるため、位置推定誤差が小さくなったと考えられる。よって、選定するテザーの材質を柔らかいものにする事で、位置推定の誤差が小さくなることが期待できる。さらに、地上局側で巻き取る量を調整し、張力を強めに保つことで、位置推定の精度を改善できることが実験によって示された。なお、今回の実験では、実際のマルチロータ機に搭載した際のテザーの揺れを模擬できていないため、テザーの揺れによる位置推定精度への影響については、今後検証が必要である。

6. おわりに

本稿では、有線給電用テザーと力覚センサを用いてカテナリー曲線からマルチロータ機の自己位置推定が可能であるかどうかの検討を行った。この実験により、実際の位置と比較して、推定位置の誤差が20%以内の範囲でテザー端の位置が推定検出可能であることが分かった。

この手法による位置推定精度は、テザーの長さがそれほど長くない場合、GPSによる位置推定精度よりもよい。ため、橋梁点検用の有線給電型マルチロータ機などにおいて、屋外での位置推定への適用についても期待できる。また、実際のマルチロータ機の位置推定には、三次元での位置推定が必要であるため、二次元平面上での位置推定手法をもとに、三次元に対応できるような測定手法が必要である。さらに、今回の実験は、テザーが静止した状態で位置推定を試みたが、実際にマルチロータ機が飛行する際には機体の揺れとロータからの風によってテザーが振動する可能性がある。このテザーの振動が位置推定精度へ及ぼす影響の検証も必要である。今後、有線給電による屋内環境探査の実現に向けて、これらの課題の解決を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 国土交通省: “次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進: 災害調査技術の現場検証・評価の結果”, <http://www.mlit.go.jp/common/001083017.pdf>, 2015.
- [2] 芦澤純, 比嘉翔弥, Joao Vitor Thomsen Silveira, 大塚光, 永谷圭司, 吉田和哉: “MUAVによる長時間屋内探査

表1 テザー先端位置の推定結果

テザー全長 [mm]	相対位置 [mm]		測定結果 [mm]		誤差 [%]	
	X	Y	X	Y	X	Y
2150	2000	700	2010	677	0.52	-3.32
2700	2000	300	1924	323	-3.80	7.60
	2000	500	1897	532	-5.14	6.42
	2000	700	1931	735	-3.45	4.94
	2550	300	2565	277	0.60	-7.64
	2550	500	2569	464	0.73	-7.25
3000	2550	700	2573	641	0.92	-8.47
	2000	1200	1917	1261	-4.14	5.09
	2000	1500	1942	1566	-2.89	4.43
4000	2000	1960	1974	2054	-1.28	4.79
	2000	700	1671	663	-16.45	-5.24

を目的とした不整地移動ロボット搭載用有線給電システムの開発”, 第15回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 論文集, pp.266-270, 2014.

- [3] Markus Achtelik, Abraham Bachrach, Ruijie He, Samuel Prentice, Nicholas Roy: “Stereo vision and laser odometry for autonomous helicopters in GPS-denied indoor environments”, 2009 SPIE-The International Society for Optical Engineering ,vol.7332, 733219,1-10, 2009.
- [4] Sergei Lupashin, Raffaello D’Andrea: “Stabilization of a Flying Vehicle on a Taut Tether using Inertial Sensing”, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.2432-2438, 2013.
- [5] 今津篤志, 野口博貴, 川合忠雄: “地上局とケーブルでつながれたヘリコプターの制御に関する研究”, 計測自動制御学会論文集, vol.50, no.12, pp.821-828, 2014.
- [6] 久野温, 安孫子聡子, 榎崎翔太正, 大瀬戸篤司, 國分祥平, 姜欣正, 内山勝: “カテナリー曲線による形状推定に基づいた UAV の線状柔軟物マニピュレーション”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2A2-F01, 2015.