

マルチロータ機とヘリパッドを接続するケーブルによる位置推定システム

Position estimation system by cable connecting multicopter and helipad

○学 薬師川楓 (東北大) 桐林星河 (東北大)
正 永谷圭司 (東北大)

Kaede YAKUSHIGAWA, Tohoku University, kaede@frl.mech.tohoku.ac.jp
Seiga KIRIBAYASHI, Tohoku University, seiga@frl.mech.tohoku.ac.jp
Keiji NAGATANI, Tohoku University, keiji@ieee.org

When a natural disaster occurs, it is necessary to perform emergency restoration work using an unmanned construction machine. To support the work, the authors are considering a method using wired Micro Unmanned Aerial Vehicles (MUAV) to obtain an external viewpoint for remotely controlling a construction machine. For MUAV's autonomous flight in various outdoor environments, robust position estimation that does not only depend on Global Positioning System (GPS) is necessary. Therefore, we propose a position estimation method by observing the slacked tether. In this paper, we describe a development of the helipad that can estimate the MUAV position by observing the slacked tether, and report evaluation of the position estimation accuracy.

Key Words: Multicopter, Tethered flight, Construction Machine, Position Estimation

1 緒言

地震や噴火に代表される自然災害が発生した際、建設機械を用いた障害物の除去や築堤等の応急・復旧工事を行う必要がある。しかしながら、このような作業には二次災害の危険性があるため、無人化施工という技術が利用されてきた。無人化施工では、操作者は安全な場所から遠隔操作を行うが、重機から操作者の場所が離れているなど、直接目視による操作が困難な場合は、重機に取り付けた車載カメラや外部カメラを利用して操作を行う。さらに、通常の無人化施工では、外部カメラとして高所に設置した固定カメラや専用の移動カメラ車が用いられるが、これらの設置や配備には時間を要するため、応急・復旧作業の初動を鈍くする要因となっている。

そこで本研究室では、有線給電マルチロータ機を建設機械に取り付けたヘリパッドから飛行させ、第三者視点からの映像を取得し、オペレータに提供することを目的としたシステムの研究開発をおこなってきた。この方法では、通常の建機にヘリパッドを追加搭載することで、迅速な対応を可能とする。また、移動カメラ車では移動できない、崖側や上空より得られる自由度の高い第三者視点映像を提供することが可能となる。

有線給電マルチロータ機を飛行させる際、災害現場では目視での飛行が不可能なため、飛行を自動化する必要がある。マルチロータ機の飛行の自動化では、GPSを用いた自動飛行が一般的になっており、市販品にも搭載されている機能である [1]。しかしながら、悪天候時や周囲が木や橋梁などによって塞がれた環境では、GPS精度が悪化し、最悪の場合使用できない。そこでこれまでに、カメラとレーザーレンジファインダを用いた SLAM [2], [3] や単眼のカメラを使用した SLAM による位置推定とナビゲーション [4]、などの位置推定手法が提案されてきた。しかしながら、GPS同様、悪天候時においては使用できない、リアルタイムの制御に用いるためには、マルチロータ機に計算能力の高いコンピュータを搭載する必要があるといった問題点が存在する。

そこで本研究では、有線給電ケーブルの状態推定を行うことで、低計算コストで悪天候時においても使用可能な位置推定の実現を目指すこととする。有線給電マルチロータ機の位置推定に関する研究としては、ピンと張ったテザーと IMU を用いた位置推定 [5] や、GPS なしでテザーを使用して無人ヘリコプターの自動着陸を行った研究 [6] も行われてきた。しかしながら、これらの研究では、テザーがたわんだ状態については考慮されていない。これ



Fig.1: Field test of the developed Helipad

らのことから、本研究では、たわんだ有線給電ケーブルの状態計測を用いた位置推定が可能なヘリパッドの開発を行い、その精度について検証をおこなう。

2 ケーブルによる位置推定手法

これまでに行われたテザーによる位置推定の研究では、テザーは軽く、たるみがない場合についてのものではあった。しかしながら、本研究ではテザーによる給電を行うため、テザー重量が無視できない。また、テザーを弛まないようにするためには、張力を大きくする必要があり、マルチロータ機にとって張力はペイロードそのものであり、可能な限り少ない張力により飛行することが望ましい。そこで本研究では、重量があり、少ない張力によ

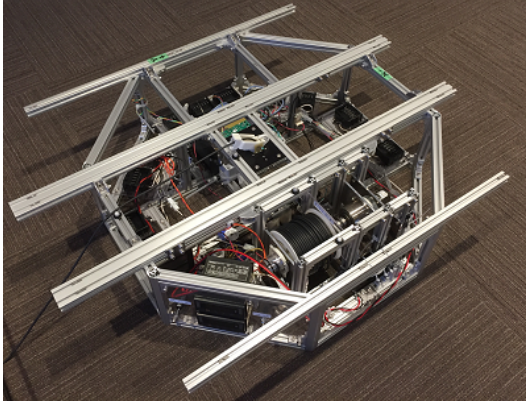


Fig.2: An appearance of developed helipad

りたるんでいるテザーを用いた位置推定手法について提案する。
ある自由な二点間に紐状の物体を垂らすと、その物体の形状はカタナリ曲線となることが知られている。本研究では、マルチロータ機とヘリパッドを結ぶテザーがカタナリ曲線となると考え、それらの相対位置を得る手法を利用することとした。この詳細は[8]で述べた通りであり、ここでは省略するが、ケーブルの線密度を既知とすると、テザー長とテザーのどちらか片端での張力ベクトルを測定することによって、ヘリパッドに対するマルチロータ機の相対位置を推定することが可能である。
マルチロータ機は、ペイロードにより飛行性能が大きく制限されるため、搭載機器は可能な限り少なくすることが望ましい。そこで、本研究ではヘリパッドで張力ベクトルとテザー長の計測を行うことで、位置推定を行うこととした。

3 有線給電ヘリパッドの開発

3.1 概要

第二章で説明した位置推定手法を実現するため、新たに有線給電ヘリパッドの開発を行った。開発したヘリパッドの外観を図2に、仕様を表1示す。このヘリパッドは、テザー飛行を実現するためのテザー巻き上げと、位置推定を行うための計測を実現するため、専用のウィンチ及びテザー排出角度検出機構を有する。以下、これらについての説明を行う。

3.2 可変張力巻取り機構

本論文における有線給電マルチロータ機は、建機上に設置したヘリパッドに離着陸する。そのため、テザーが弛みすぎるとテザーが建機に接触してしまい、最悪の場合、マルチロータ機の墜落を招く。そこでテザーが弛みすぎないように、マルチロータ機に取付けたテザーを適切な張力で巻き上げる張力制御が必要である。張力制御可能なウィンチを使った有線給電マルチロータ機の研究として、Lida Zikouらの研究[9]があり、成功を収めている。ところが、本研究では、建機上にヘリパッド、つまりウィンチを搭載するため、ウィンチには大きな振動や衝撃、つまり加速度が加わる。一般的には、動滑車とバネやロードセル等により張力計測を行うことで張力を制御するが、前述のような加速度外乱が存在する環境下では正しい張力計測が行えず、張力制御を行うことが困難となる。

そこで、本研究ではトルクを任意に指定可能なパウダクラッチを用いることで、直接の張力計測をせずに張力制御が可能なウィンチの開発を行った。開発したウィンチの外観を図3に示す。このウィンチの主要部品は、テザーを巻きとるスプール、モータ、

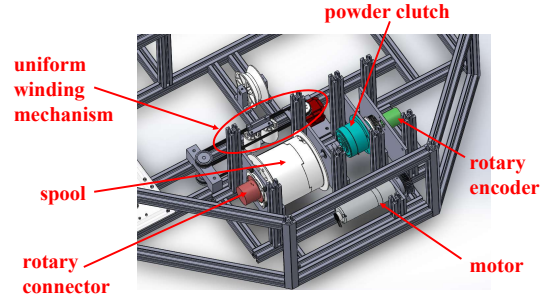


Fig.3: Tether-tension-control winch and its control mechanism

パウダクラッチ、ロータリエンコーダ、スリップリングである。さらに、テザーを密に巻き上げるための機構のため、スマートモータとガイドローラを搭載している。

パウダクラッチは、磁性粉体を利用したクラッチであり、クラッチに流した電流に応じたトルクを伝達する。電流とトルクは一対一対応するため、フィードバックなしに定トルク制御を実現できる。スプールのトルクが制御可能であり、直径が既知となれば、スプール上のテザーの張力計算が可能となるため、張力制御も可能であると言える。

また、ロータリエンコーダはスプールと同期回転し、テザーの繰り出し量、つまり第二章のテザー長の計測を行う。

スリップリングは、テザーによる有線給電および有線通信を行うため、回転するスプールとの電気的接続を行う。

開発したウィンチは以上に示すように特別な機構を有するが、一般的なウィンチと同様、モータでスプールを回しテザーを巻き上げる。ただし、テザーを繰り出すシチュエーションは、本研究ではマルチロータ機が引き出す時のみであるため、モータの駆動はせずに、クラッチの滑りにより、テザーの繰り出しを実現する。

一方、単純なウィンチのみでは、テザーが乱雑に巻かれてしまうため、テザー長の計測及び張力制御に誤差が生じる。この誤差を防ぐために、スプール上にテザーを密に巻き上げる機構を搭載した。この機構は、スマートモータとテザーを挟み込むガイドローラからなり、ウィンチのロータリエンコーダにより取得したスプールの回転数に応じてガイドローラを移動させることでテザーを密に巻き上げる。

以上の機構により、大きな加速度を受けるような環境においても、任意の張力を発生可能なウィンチを実現した。また、第二章で提案した位置推定に必要なテザー長および、張力ベクトルの大きさが、このウィンチにより得られる。

3.3 ケーブル排出角度測定装置

第二章で提案した位置推定を行うためには、残りの情報として張力ベクトルの方向がわかれば良い。そこで、ヘリパッドから排出されるテザーの角度を計測する装置を考える。本研究で開発した有線給電マルチロータ機のシステムでは、ヘリパッド側でテザーの巻き上げを行うため、ケーブルが入りしつ角度を測定する必要がある。さらに、マルチロータ機はヘリパッド上に着陸するため、ヘリパッド上の突起を少なくすることが望ましい。

これらの要求を踏まえ開発したケーブル排出角度測定装置のCAD図を図4に示す。この装置は、上下(ピッチ)方向に可動するアームと、アーム部をヨー方向に旋回するターンテーブルからなる。アームは0から180°の範囲で可動し、ターンテーブルは無限回転可能である。また、テザーの出入りの摩擦を低減するため、アームの付け根には大径のプーリを設置している。テザーがこの機構の内部を通ることで、テザーの排出角度にアームが向く。なお、アームが直上を向く場合には、特異点となりヨー回転力が発生しないが、実際には厳密にマルチロータ機が直上から移動することは難しいため、問題とはならない。

アームとターンテーブルには、それぞれ低フリクションなポテンシオメータが取付けてあり、回転軸の角度を計測可能となっている。この計測したアームおよびターンテーブルの角度から、CAD図面上で計算した係数を用いてテザー角度を算出する。

Table 1: Specification of the Helipad

Weight[kg]	29.0
Dimensions[mm]	780 × 780 × 225
Tether tension[N]	0~15
Maximum Winding Speed[m/s]	2

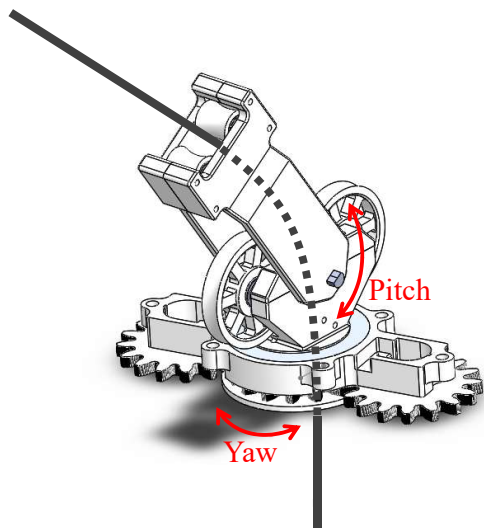


Fig.4: Measurement device of tether outlet direction

これにより、張力ベクトルの三次元方向が計測可能となり、提案するテザーにより位置推定が実現可能となる。

4 位置推定精度検証実験

第二章で手法を提案し、第三章で実機開発したテザーによる位置推定手法の精度検証を行うため実験を行った。本章ではその実験について述べる。

4.1 実験方法

地面に置いたヘリパッドからテザーを引き出し、その移動軌跡について評価を行う。なお、地面を x-y 平面とし、地面に鉛直な方向を z 軸とする。実験室の天井付近 (地面からの高さ約 5 m) に移動可能な滑車を設置し、その滑車にテグスをかける。そのテグスに本システムのテザーを結びつけてテグスのを引っ張ることで、自由な方向にテザーを引き出す。また、テザーの先端にモーションキャプチャシステムである VICON のマーカを取付けたテザーの先端位置を計測する。この VICON による計測したテザー先端の位置軌跡と、提案手法により推定されたテザー先端の移動軌跡とを比較することで、システムの評価を行う。

計測は、テザーをほぼ直上に引き上げた場合と、斜め上方向に引き上げた場合の二通りで行った。張力は過去の実験から十分にたるみが少なくなる値としてわかっている 5.1N とした。また、テザーの引き出しは、十分ゆっくり行うものとする。

4.2 実験結果

直上方向に引き上げた実験の計測結果を Fig.5 に示す。この結果から、一部に多少の水平方向誤差があるものの、最高地点については、よく一致している。

次に、斜め上方向に引き上げた実験の計測結果を Fig.6 に示す。図から、一定の誤差はあるものの、傾向はよく一致していることが見て取れる。

それぞれの実験結果について、代表点として最高高度での計測誤差について比較する。表 2 にそれぞれの実験における最高高度の VICON による計測座標と、提案する位置推定手法による推定座標を示し、また、その誤差を示す。

最高高度点における位置推定誤差は、直上に移動させた場合で 107[mm]、斜め上に移動させた場合で 1045[mm]であった。この値はそれぞれのケーブル長に対して、真上に移動させた場合で、2.3%、斜め上に移動させた場合で 19.4%であった。

Table 2: 最高高度点での位置

	VICON			Helipad 位置推定			距離の誤差 [mm]
	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	
真上への移動	-12.3	114.88	4622.28	-117.5	109.5	4599.4	107.8
斜め上への移動	1630.51	2290.98	4708.62	2512.6	2426.4	4163.4	1045.8

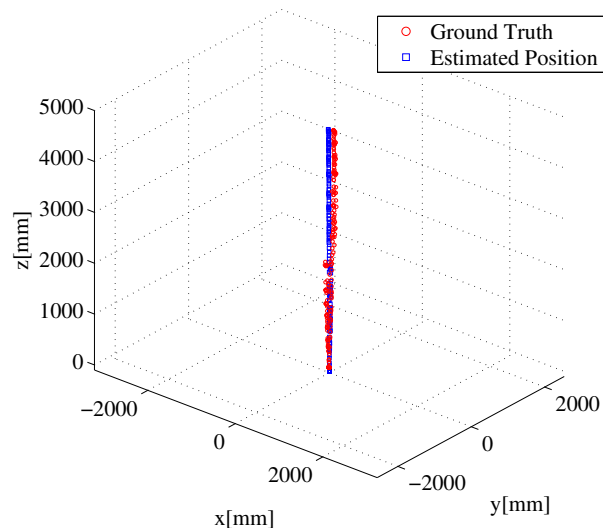


Fig.5: Plot of measured/estimated endpoint of tether for straight-up motion.

4.3 考察

まず、直上に移動させた実験結果から、テザー長つまり弧長の測定精度は良く、テザーを 5m 伸ばした場合でも、誤差は数%程度であることがわかった。

一方で、斜め上方向に移動させた実験結果からは、テザーのヨーおよびピッチ角度方向にある程度の誤差があることがわかった。角度方向の誤差は、次の要因が影響していると考えられる。

- (1) テザー排出角度計測機構の誤差
- (2) テザー張力の誤差
- (3) テザーとカテナリ曲線の一致度

まず、要因 (1) は、位置推定に必要なパラメータとして直接的に影響する。本論文で開発したテザー排出角度計測機構は、複数のテザー径に対応可能としたため、テザー通路に余裕を持たせている。そのため、実際の排出角度と、計測機構のアーム角度との間に不感帯が生じる。特にヨー方向についてはこの不感帯の影響が大きいと考えられ、実験結果のように一定の角度オフセットが載っているような結果を誘因すると考えられる。

次に、要因 (2) についても同様に、位置推定に直接影響するパラメータである。本論文で開発したウィンチでは、直接のテザー張力計測は行わず、ウィンチに与えるトルクから推定している。そのため、機構の摩擦等により誤差が生じると考えられる。ただし、本論文では紙面の関係上割愛したが、予備実験により指定張力と実際に発揮する張力の誤差は十分に小さいことを確認しているため、この項目が大きな影響を与えることは考えにくい。また、本実験では、テザーをゆっくり引き出しているため、ウィンチの慣性による影響についても誤差要因とはなりにくいと考えられる。

最後の要因 (3) は、そもそも推定に用いる計算そのものに誤差が含まれることとなる。本研究では、テザーとして電線を用いるが、電線は構造が不均一であり、また捻じれやヨレによって内力を持ちうる。この項目についても、事前に予備実験として、実験中の様子を撮影した画像を目視で理論的なカテナリ曲線と比較し、大きな誤差がないことは確認している。一方、定量的な評価は行っていないため、どの程度の形状誤差が位置誤差の要因となるか今後検討が必要である。

このように、計測結果には一定の誤差が含まれることがわかったが、提案手法による位置推定が可能であることがわかった。また、誤差の要因としては、テザーの角度計測誤差が主因であると考えられ、テザーが短くなるほど位置誤差そのものは小さくなる特徴がある。本研究で発生した位置誤差は、テザー長が約 5m の時に約 1m 程度であり、これは一般的な GPS の精度よりも十分高いと考えられる。また、本研究が目的としている、建機との相対位置を保つ飛行を考えると、建機上に搭載されたヘリパッドに

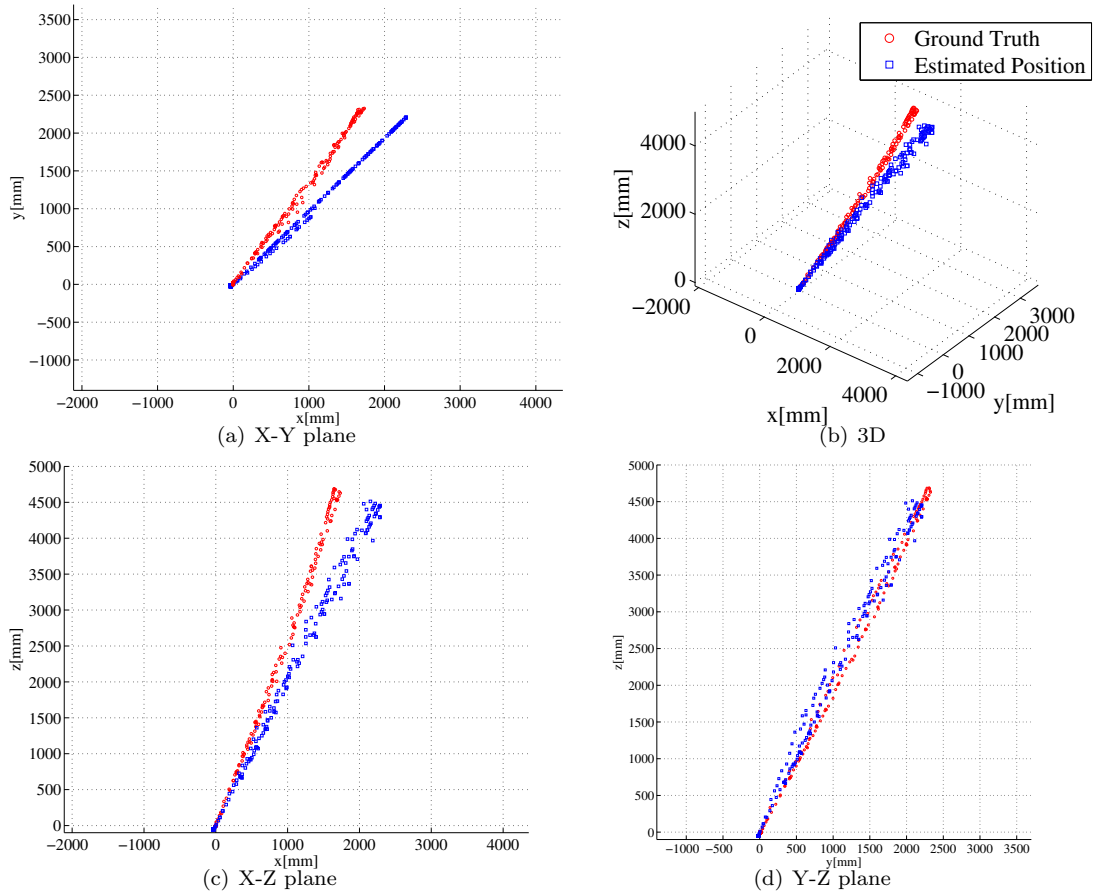


Fig.6: Three-dimensional plot of measured/estimated endpoint of tether for diagonal-up motion.

近づくほど衝突の危険性が高まるため、高い位置推定精度が必要となるが、ヘリパッドに近づくほど位置推定精度が向上する本手法は、自律飛行に有用であると考えられる。

5 結言

本研究では、建機を遠隔操縦するための外部視点を取得するため、有線給電マルチロータ機をGPSに依存せずに飛行させるシステムの開発を目的とした。その方法として、マルチロータ機とヘリパッド間を結ぶテザーを用いた位置推定手法について提案した。次に、提案した位置推定手法を実現するため、張力制御機能およびテザーの排出角度計測機能を有するヘリパッドの開発を行った。最後に開発したヘリパッドを用い、実際に位置推定を行う試験を実施した。その結果、通常のGPSと比較しても遜色のない位置推定が可能であることを示すことができた。

今後は、現状で発生している位置推定誤差についての考察をもとに、より高精度な位置推定の実現を目指す。さらに、現在ではケーブルの静特性のみを評価しているが、マルチロータ機の自律飛行に利用できよう、動的な場合についても検討を行う。

謝辞

本研究は、ImPACT「タフ・ロボティクス・チャレンジ」の支援を受けて、実施されております。

参考文献

- [1] PHANTOM4, DJI, <http://www.dji.com/jp/phantom-4>
- [2] Shaojie Shen, Nathan Michael, Vijay Kumar, "Autonomous Multi-Floor Indoor Navigation with a Computationally Constrained MAV", 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation
- [3] Adam Bry, Abraham Bachrach, Nicholas Roy, "State Estimation for Aggressive Flight in GPS-Denied Environments Us-

ing Onboard Sensing", 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation

- [4] Stephan Weiss, Davide Scaramuzza, Roland Siegwart, "Monocular-SLAMbased navigation for autonomous micro helicopters in GPS-denied environments", Journal of Field Robotics, Volume 28, Issue 6, Pages 854874, 2011
- [5] 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)
- [6] L.A. Sandino, D. Santamaria, M. Bejar, A. Viguria, K. Kondak, A. Ollero, "Tether-guided landing of unmanned helicopters without GPS sensors", 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)
- [7] Vishnu Arun Kumar Thumatty Rajan, Arjun Nagendran, Abbas Dehghani-Sani, Robert C. Richardson, "Tether monitoring for entanglement detection, disentanglement and localisation of autonomous robots", Robotica (2016), volume 34, pp. 527548
- [8] 薬師川楓, 大塚光, 桐林星河, 永谷圭司, "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", 第33回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. RSJ2015AC2H1-03, (2015)
- [9] Lida Zikou, Christos Papachristos, Anthony Tzes, "The PoweroverTether system for powering small UAVs: TetheringLine Tension Control Synthesis", 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)