

有線給電型マルチロータ機の飛行位置に対する張力の解析

○芦澤 純(東北大学), 大塚 光(東北大学), 薬師川 楓(東北大学),
桐林 星河(東北大学), 永谷 圭司(東北大学)

Analysis on the Tension of the Power Supply Cable Connected to the Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicle in Hover Flight

○ Jun ASHIZAWA (Tohoku Univ.), Hikaru OTSUKA (Tohoku Univ.),
Kaede YAKUSHIGAWA (Tohoku Univ.), Seiga Kiribayashi (Tohoku Univ.),
and Keiji NAGATANI (Tohoku Univ.)

Abstract : Tether power supply system to multirotor unmanned aerial vehicles (UAVs) can extend the endurance of them in indoor flight for surveillance. In this paper, we estimated the tension of the tether in hover flight using a catenary equation to design the tether control function of the system. Furthermore, based on the estimated tension model, we analyzed a flight range of the tethered UAV and validate the estimated flight range by a tension measurement.

1 緒言

地震大国である日本では、過去に巨大地震が幾度となく発生している。巨大地震発生時には、建物が崩落する可能性に加えて、瓦礫などの障害物の影響で建物内への人の立ち入りが困難となる。しかし、建物の安全性の確認や生存者の捜索のためには、建物内の探査が必要である。そこで、人の立ち入りが困難な環境において、探査活動を行うため、無人地上ロボット(Unmanned Ground Vehicle, UGV)を用いた屋内探査が試みられてきた[1]。UGVによる屋内探査には、階段や瓦礫といった障害物乗り越える走破性能が必要なため、サブクローラを備えたクローラ型移動ロボットが用いられてきた[2]。しかし、UGVの走破性能には限界があり、走破が困難な環境も存在する。そこで、屋内環境における探査範囲を拡大するため、無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)の一種であるマルチロータ機とUGVによる協調探査が提案されており、その有用性が報告されている[3]。しかし、マルチロータ機とUGVの協調探査において、飛行時間の不足[4]、及び地面効果による機体の姿勢の不安定性とUGVに取り付けられた着陸台の狭さによる着陸台への着陸の難しさが指摘されてきた。

そこで、本研究ではこれらの問題の解決方法として、UGV搭載型有線給電システムを提案している。本システムでは、マルチロータ機は大容量のバッテリーを搭載したUGVとケーブルにより接続されており、このケーブルを通じて給電を行うことで長時間の飛行が可能となる。さらに着陸台への着陸の際には、ケーブルを巻き取ることで、地面効果により姿勢が不安定である機体を着陸台へ誘導し、UGV上の狭い着陸台への確実な着陸が可能となる。

一方で、有線給電による飛行においてケーブルが障害物と接触し飛行を阻害する恐れがある。よって、ケーブルの地面との接触を避けるため、有線給電システムでは、ケーブルが過度にたるまないように、ケーブルの長さを調節する必要がある。ここで、マルチロータ機とUGVの位置関係が未知な状況で、ケーブル長を調節する方法として、ケーブルのUGV側(以降、根元)に一定の張力をかける方法がある。ケーブルに張力をかけることで、ケーブルを常に引っ張った状態になり余分なケーブルを巻き取ることができ、地面との接触を防ぐことが可能である。ただし、ケーブルにかかる張力が大きいと、機体への負荷が大きくなり飛行性能に影響を与える。逆に、張力が小さいと余分なケーブルを巻き取ることができず、ケーブルが地

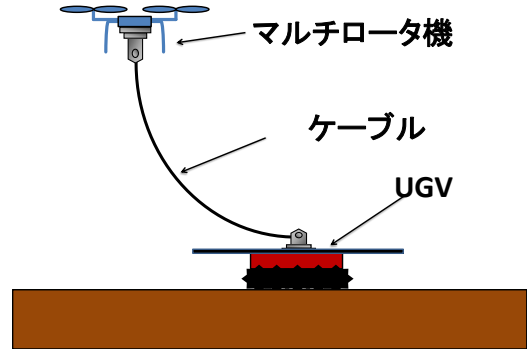


Fig. 1: Power supply system via cable between multi-rotor UAV and UGV.

面と接触してしまう。したがって有線給電では、ケーブルに適切な張力を加える必要がある。

そこで本研究では、有線給電システムの開発に向けて、マルチロータ機のUGVに対する機体の相対位置(以降、機体位置)とケーブル張力の関係を数理モデルに基づいて明らかにした。またケーブルに加える張力と機体の性能によって導かれる飛行可能範囲を検討し、ケーブル張力と飛行可能範囲の関係について実験的に検証した。

2 マルチロータ機の位置とケーブル張力の解析

有線給電システムの概念図をFig.1に示す。本システムにおいて、ケーブルはマルチロータ機とUGVの2点間で接続されており、自重によってたるみを生じている。2点で支持され自重のみが働くケーブルの形状は、理想的にはカテナリ曲線を描くことが知られている[6]。よって、両端の位置と加わる張力からケーブルの形状を推定することが可能である。本章では、この数理モデルを用いて、機体位置とケーブル張力の関係の解析を行った。

2.1 カテナリ曲線を用いたケーブル張力の推定

ケーブルのたるみの頂点を原点とすると、カテナリ曲線の式は以下のように記述される。なお、式中の a はカテナリ数と呼ばれる変数である。

$$z = a(\cosh \frac{x}{a} - 1) \quad (1)$$

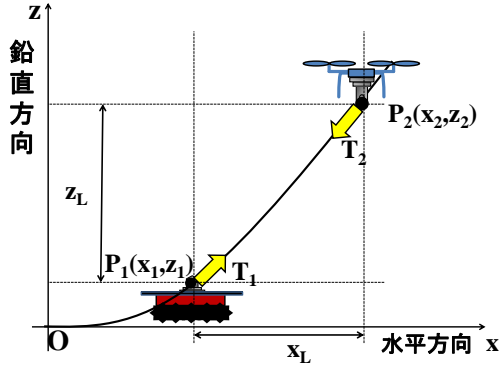


Fig. 2: Coordinate system of the cable based on the Catenary curve.

Fig.2のように UGVの位置を $P_1(x_1, z_1)$ 、機体の位置を $P_2(x_2, z_2)$ とし、また2点間の水平距離を x_L 、高さを z_L とする。但し、 $x_2 \geq x_1 \geq 0$ とし、ケーブルはUGVよりも常に高い位置を維持することで地面との接触を防ぐ。また、ケーブル張力の推定の際、ケーブルの一部がUGVよりも低い位置にある場合は、ケーブルは地面と接触したもとする。点 P_1 、 P_2 がカテナリ曲線上にあることから、式(2)式(3)を得る。

$$z_1 = a \left(\cosh \frac{x_1}{a} - 1 \right) \quad (2)$$

$$z_1 + z_L = a \left(\cosh \frac{x_1 + x_L}{a} - 1 \right) \quad (3)$$

式(2)、(3)を用いて x_1 について解くと次式を得る。

$$x_1 = a \cdot \ln \left(\frac{z_L + \sqrt{z_L^2 + a^2 \left(e^{\frac{x_L}{a}} + e^{-\frac{x_L}{a}} - 2 \right)}}{a \left(e^{\frac{x_L}{a}} - 1 \right)} \right) \quad (4)$$

この時、機体と接続されている点での機体側の張力を T_2 、UGVに接続されている点での根元の張力を T_1 、それぞれの張力の水平方向の成分を T_{1x} 、 T_{2x} とする。また、カテナリ曲線上の任意の点における張力の水平方向の成分はカテナリ数 a [m]、ケーブルの線密度 w [kg/m]及び、重力加速度 g [kg/m²]の積で表わされ、式(5)に示すように、一定であることが知られている。

$$T_{1x} = T_{2x} = awg \quad (5)$$

次に、 T_1 、 T_2 の鉛直方向の成分 T_{1z} 、 T_{2z} を考える。 T_{1z} は、点 P_1 と原点の間にあるケーブル重量と等しい。ここで、この間のケーブルの長さ L_1 [m]は式(6)で表わされる。

$$L_1 = \int_0^{x_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2} dx \quad (6)$$

式(6)より、 T_1 の鉛直方向の成分 T_{1z} について式(7)を得る。

$$T_{1z} = wg \int_0^{x_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2} dx \quad (7)$$

同様に、 T_{2z} について、式(8)を得る。

$$T_{2z} = wg \int_0^{x_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2} dx \quad (8)$$

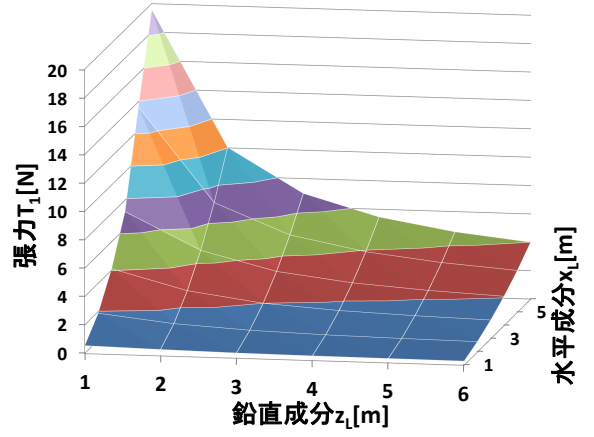


Fig. 3: Relationship of between position of the multi-rotor UAV and tension of the cable at P_1 , the root of the cable based on Catenary equation.

また、 T_1 、 T_2 は水平方向の成分と鉛直方向の成分の合力であるため、根元の張力 T_1 及び、機体側の張力 T_2 は、式(9)、(10)に示すように得られる。

$$T_1 = awg \cdot \cosh \frac{x_1}{a} \quad (9)$$

$$T_2 = awg \cdot \cosh \frac{x_1 + x_L}{a} \quad (10)$$

ここで、式(4)を式(9)、(10)に代入すると、 T_1 、 T_2 は、機体位置 x_L 、 z_L 、及び、カテナリ数 a を変数に持つ関数となる。また、カテナリ数 a は、式(4)や式(6)より、ケーブルの長さや x_1 の値を条件として加えることで求めることが可能である。このように、拘束条件を加えることで、機体位置に対するケーブル張力を算出することが可能である。

2.2 数理モデルによる有線給電時のケーブル張力の推定

2.1節で述べた数理モデルを用いて、機体位置に対する張力の推定を行う。

前述のように、張力を推定するためには拘束条件を追加する必要がある。ここで、式(9)に着目すると、根元の張力 T_1 は $x_1=0$ の時に最小張力を持つことがわかる。このことから、ある位置で飛行している機体が、ケーブルの地面との接触を防ぎながらその位置を維持するためには、根元の張力 T_1 を最小張力以上にする必要がある。そこで、加える条件として、 $x_1=0$ とした。これにより、機体位置に対する、根元にかかる最小張力を推定することが可能となる。なお、式(4)では、解析的にカテナリ数 a の値を得ることが不可能であるため、数値解析により式を満たすカテナリ数 a を導出し、 T_1 を求めた。

数値解析により得た機体位置とそれを実現する最小張力の関係を図3に示す。なお、ケーブルの線密度については、本研究グループが所有する有線給電システムに用いるケーブルと同じ0.11[kg/m]として解析を行った。Fig.3からわかるように、高さが一定の場合、機体位置における水平成分 x_L が大きくなると最小張力は大きくなる。一方で、水平方向の距離が一定の場合、機体位置における鉛直成分 z_L が大きくなると最小張力が小さくなっていることがわかる。以上より、機体位置から根元の張力の推定が可能であることを示した。

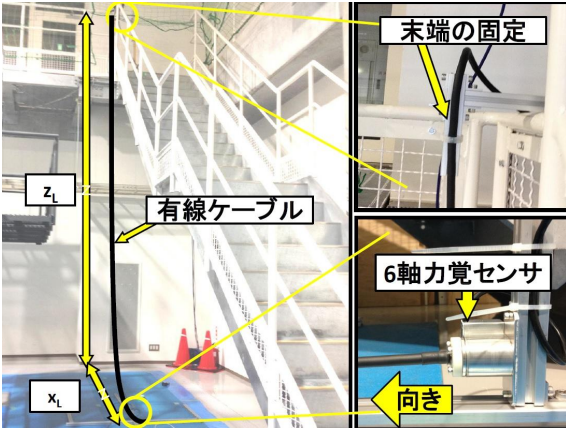


Fig. 4: Measurement system of tension T_1 at root of the cable.

2.3 検証実験

2.2節で述べた機体位置と張力の関係について、本研究で使用した数理モデルの妥当性を実験により検証した。

2.3.1 実験方法

Fig.4に実験時のケーブルと力計測センサの位置関係を示す。まず、ケーブルの機体側を、鉛直方向と平行になるように階段に固定した。次に、固定した場所から水平方向に距離 x_L [m]、鉛直方向に距離 z_L [m]のところに設置された6軸力覚センサ(Leptrino社製 CFS034CA101U)にケーブルの根元側を固定し、根元の張力を測定した。また、ケーブル長は、機体の位置に対して根元の張力が最小張力となるように長さを調節した。機体の位置は、2.2節で解析結果と比較するため、鉛直成分 z_L は1、2、3、4、5、6[m]とし、各高さにおいて、水平成分 x_L を1、2、3、4mとし計測を行った。また、6軸力覚センサを1000[Hz]で5秒間の測定平均を1つの (x_L, y_L) に対して5回づつ測定した。

2.3.2 実験結果および考察

鉛直成分 z_L に応じた、水平成分 x_L と根元の張力 T_1 の関係をFig.5に示す。図中の6本の黒の破線は2.2節で数理モデルによって得られたそれぞれの鉛直成分 z_L に応じた水平成分 x_L に対する張力 T_1 を示している。

実験結果より、 z_L が2mから6mでは、実測値と数理モデルによる推定値がほぼ一致しているが、 $z_L = 1$ mでは差が生じた。 $z_L = 1$ mにおいて推定結果と異なった原因としてケーブル長の調節、及び設置時の調節において生じた誤差が考えられる。Fig.3に示されるように、 $z_L = 1$ mにおいて、機体位置の水平成分 x_L の増加量に対する根元の張力 T_1 増加量は、他の鉛直成分 z_L と比較して大きい。そのため調節時の誤差が測定された張力に大きく影響し、実測値と推定値に差が生じてしまったのだと考えられる。

よって、正確なケーブル長の調節、及び正確なケーブルの設置を行うことが可能であれば、実測値と数理モデルが一致する1ことが期待できる。以上のことから、本実験によりカテナリ曲線を用いた数理モデルが妥当であることを確認した。

3 飛行可能範囲の検討

本章では、2章で検証した数理モデルを基に、有線給電システムにより飛行するマルチロータ機の根元の張力に対する飛行可能範囲の検討と検証を行った。

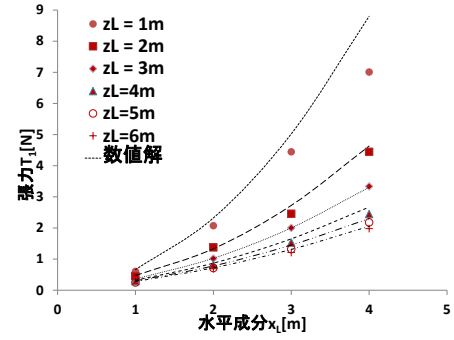


Fig. 5: Relationship between the position of the multi-rotor UAV to the UGV and the tension of the cable at P_1 in different height.

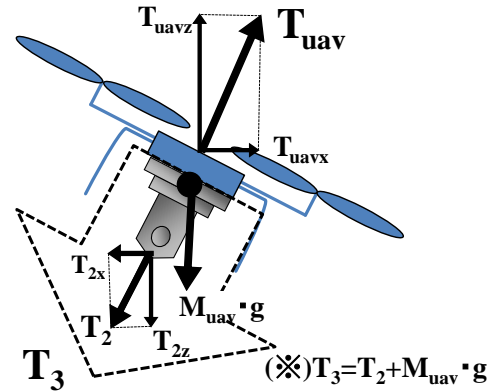


Fig. 6: The force acting on the multi-rotor UAV connected the power supply cable in hover flight.

3.1 機体周りに働く力関係

マルチロータ機は、機体に取り付けられた複数のロータを回転させることで、ロータの回転面に対して垂直方向の推力を得て飛行している。通常、機体には推力と機体重量がかかり、水平方向と鉛直方向においてこれらの力が釣り合うように、機体の姿勢、及び推力を変化させ定点での飛行を維持している。一方、有線給電により飛行している場合、機体にはFig.6のように、推力、機体重量、及びケーブル張力が力としてかかる。よって、定点を維持して飛行するためには、機体の推力がこれら2つの力を合わせた全負荷 T_3 と釣り合う必要がある。なお、実際に飛行する機体は風などの外乱を受けるが、機体重量や張力、及び機体の推力に比べて十分に小さいため、本研究では、これらの外乱を無視した。

ここで、有線給電システムにより飛行する機体が、飛行位置を維持するためには以下の条件を満たす必要がある。

- 条件1. ケーブルが地面と接触しない
- 条件2. 機体の最大推力が機体にかかる全負荷 T_3 を上回り、水平方向と鉛直方向で力の釣り合いを維持する

通常の飛行と異なり、有線給電により飛行する際には、接続されているケーブルが地面と接触することで飛行を阻害する可能性がある。そのため、ケーブルが地面と接触するのを防ぐ必要がある。また、定点でホバリングするためには、機体の推力と全負荷 T_3 が釣り合いを保つ必要がある。

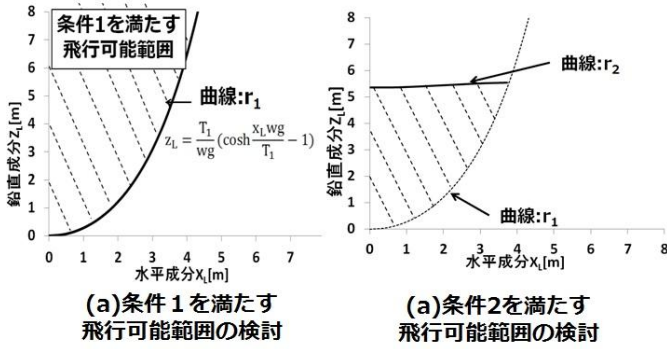


Fig. 7: Flight range of the multi-rotor UAV considering the condition 1 and 2 when T_1 is constant.

が、性能上機体には最大推力がある。そのため、全負荷 T_3 が最大推力を上回ると釣り合いを保つことができず、定点を維持することが困難となる。

以上のように、ある位置を維持して飛行するためには2つの条件を満たす必要がある。以降、それぞれの条件を基に、飛行可能範囲と根元の張力の関係について検討を行った。

3.1.1 付加張力に対する飛行可能範囲

有線給電により飛行する機体が定点でホバリングするためには、3.1節で述べたように、2つの条件を満たす必要がある。以降では、2章で検証した数理モデルを用いて、根元の張力に対して、それぞれの条件を満たす機体の飛行可能範囲の検討を行った。

3.1.2 条件1. ケーブルの地面との接触の回避

2.2節より、ケーブルと地面との接触を防ぐためには、根元の張力を、機体位置に応じた最小張力($x_1=0$ の時)より大きくする必要がある。よって、最小張力が根元の張力 T_1 と等しくなるような機体位置を考える。

最小張力時において、根元側の位置が原点にあることより($x_1=0$)、次式を得る。

$$x_2 = x_L \quad (11)$$

2.1節の式(9)についてカテナリ数 a について整理すると次式を得る。

$$a = \frac{T_1}{wg} \quad (12)$$

更に、式(11)、式(12)を式(3)に代入すると、式(13)を得る。

$$z_L = \frac{T_1}{wg} \left(\cosh \frac{x_L \cdot wg}{T_1} - 1 \right) \quad (13)$$

式(13)を用いることで、最小張力が根元の張力と等しくなる機体位置を求められる。さらに、式(13)に基づいて、根元の張力 T_1 を1.96[N]とした時の、条件1を満たす飛行可能範囲をFig.7の(a)に示す。なお、ケーブルの線密度は0.11[kg/m]とした。Fig.7の(a)において、曲線 r_1 は式(13)に基づいて算出された曲線である。ここで、2.2節で述べたように、最小張力は鉛直成分 z_L の増加、及び水平成分 x_L の減少に伴い増加する。よって、曲線 r_1 上部の範囲は最小張力が1.96[N]であり、飛行可能範囲は斜線の範囲となる。

3.1.3 条件2. 機体の最大推力と全負荷の釣り合いの維持

条件1で求めた飛行可能範囲は、ケーブルが地面と非接触のみを想定しており、機体の推力を考慮していない。そこで、条件1により求めた飛行可能範囲に、機体の推力を考慮した条件2を加え、機体の飛行可能範囲を検討する。

機体の推力及び機体に搭載するセンサを合計した質量を M_{uav} とすると、機体にかかる全負荷の水平方向の成分 T_{3x} と鉛直方向の成分 T_{3z} はそれぞれ以下ようになる

$$T_{3x} = T_2x \quad (14)$$

$$T_{3z} = T_2z + M_{uav} \cdot g \quad (15)$$

機体の推力の水平方向の成分を T_{uavx} 、鉛直方向の成分を T_{uavz} とした時、機体がある位置を維持して飛行するには、機体にかかる全負荷と機体の推力の水平方向の成分、及び鉛直方向の成分が釣り合う必要があることにより、次式を得る。

$$T_{uavx} = T_{3x} = T_2x \quad (16)$$

$$T_{uavz} = T_{3z} = T_2z + M_{uav} \cdot g \quad (17)$$

ここで、 $k = T_1 / awg$ とすると、式(5)、(8)、(16)、(17)より以下の式を得る。

$$\begin{aligned} T_{uav}^2 &= T_3^2 \\ &= \left\{ awg \cdot \sinh \left(\frac{a \cdot \ln(k + \sqrt{k^2 - 1}) + x_L}{a} \right) + Mg \right\}^2 \\ &\quad + (awg)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

ある x_L と根元の張力 T_1 に対して、式(18)を満足するカテナリ数 a を求め、ここに式(4)、(9)を代入することで、機体の飛行可能範囲が求まる。

Fig.7の(b)に、根元の張力を一定にした際の、条件2を満たす飛行可能範囲を示す。

なお、根元の張力 T_1 を1.96[N]、機体の最大推力を19.74[N]とした。また、飛行可能範囲の算出には、式(18)を用いたが、この方程式は解析的に解けないため、数値解析により求めた。Fig.7の(b)において、 r_2 が、根元の張力を一定にした際の飛行位置の軌跡を示している。図上では、曲線 r_1 と曲線 r_2 が $x_L=3.5$ [m]付近交わっており、この点で不連続になっている。これは、地面と接触を防ぐために根元にかける必要はない最小張力が、根元の張力 $T_1(=1.96$ [N])を上回り、ケーブルが地面と接触したことより、計算を止めたためである。この境界線より上の範囲では、機体への全負荷 T_3 が機体の最大推力を上回るため、飛行を維持することができない。よって、飛行可能範囲は、曲線 r_2 より下部の斜線部である。ここで、一般的に水平成分 x_L が大きくなると、ケーブル長が長くなるために機体への負荷が増大し、鉛直方向の飛行可能範囲は減少することが予想される。しかし、実際にはFig.7の(b)では、移動可能範囲の鉛直成分 z_L は大きくなっているおり、予想されたことと矛盾している。高さを一定で水平成分 x_L を大きくした場合、ケーブル長が長くなるために機体側の鉛直方向の力は増大するが、機体の移動に伴いケーブルから受ける根元の張力の向きが変わる。そのため、機体の重量を含めて、力が鉛直方向と水平方向に分散され、結果的全負荷 T_3 が減少する。よって、水平方向の移動に対して機体への全負荷 T_3 が減少し飛行可能範囲が右肩上がりとなった。

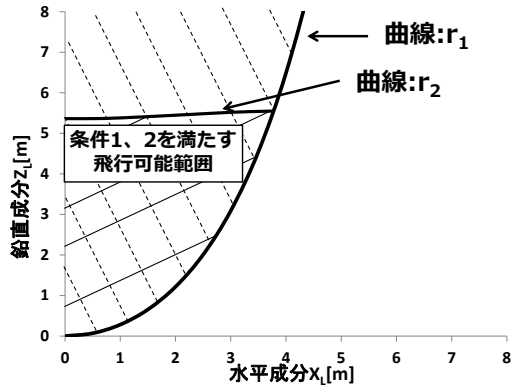


Fig. 8: Flight range of the multi-rotor UAV based on the conditions 1 and 2 when T_1 is constant.

3.1.4 条件1と条件2にを満たす飛行可能範囲

条件1と条件2により、根元の張力 T_1 に対する飛行可能範囲を求めることが可能である。Fig.8に根元の張力 T_1 を1.96[N]に一定にした際の、条件1、及び条件2を満たす飛行可能範囲を示す。なお、機体の最大推力、全質量及び、ケーブルの線密度は3.1.3節と同じとした。Fig.8における曲線 r_2 の下側でかつ曲線 r_1 の上部にある左斜線の範囲が、飛行可能範囲である。このように条件1、及び条件2を基にして、有線給電システムにより飛行する機体が、飛行位置を維持することが可能である飛行可能範囲を推定することが可能である。

3.2 算出された飛行可能範囲の検証実験

3.1節において、推定された飛行可能範囲の妥当性を評価するために、本研究では、2次元平面内での複数点の機体位置に対するケーブル張力を計測し、推定された飛行範囲で条件1、2を満たしているか検証した。

3.2.1 実験方法

条件1については、2次元平面上に格子点を設け、各点における根元の最小張力と曲線 r_1 について比較を行った。曲線 r_1 より上の点では最小張力が1.96[N]よりも小さくなり、下では1.96[N]よりも大きくなる。よって、各点における根元の最小張力を測定することで条件1を満たしているか検証を行った。

条件1の検証には2.3.2節と同様に、ケーブルの機体側を階段に固定し、固定した場所から水平方向に x_L [m]、鉛直方向に z_L [m]離れた位置に設置された6軸力覚センサにケーブルの根元側を接続し、根元の張力を測定した。なお、根元の張力が最小張力となるようにケーブルの長さの調節を行った。

条件2については、条件1と同様に、格子点における機体への負荷と曲線 r_2 について比較を行った。曲線 r_2 より上の点ではその位置での機体への負荷が最大推力19.74[N]よりも大きくなり、下では19.74[N]よりも小さくなる。よって、各点における機体への負荷を測定することで条件2を満たしているか検証を行った。

Fig.9に機体への負荷を測定した際の様子を示す。ケーブルの根元側を点 P_1 に固定し、固定した場所から水平方向に x_L [m]、鉛直方向に z_L [m]離れた位置 P_2 に設置された6軸力覚センサにケーブルの機体側を接続し、機体側の張力を測定した。また、点 P_2 におもり2を乗せることで、機体の重量を模擬している。この時、根元の張力を一定に

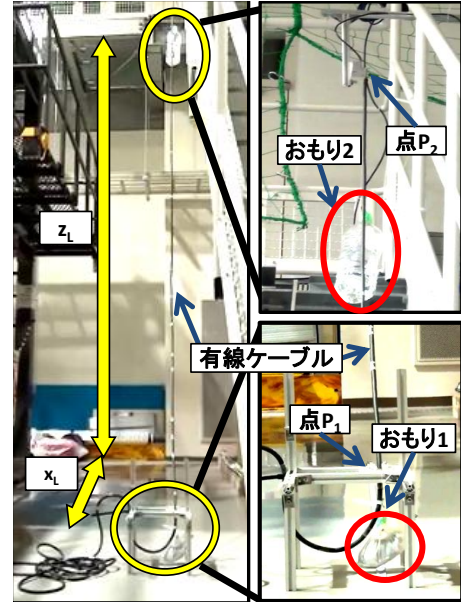


Fig. 9: Measurement system of tension T_3 .

する必要があるため、ケーブルの根元の張力が目標の張力となるように、質量を調節したおもり1を点 P_1 に乗せている。また、測定条件を z_L については4、5、6[m]、 x_L については0、1、2、3[m]と設定し測定を行った。なお、6軸力覚センサとケーブルは2.3節と同じ物を使用し、6軸力覚センサを1000[Hz]で5秒間の測定平均を1つの (x_L, y_L) に対して5回づつ測定した。

3.2.2 条件1における曲線 r_1 の検証結果と考察

機体位置に対する測定された最小張力をTable.1に示す。全ての鉛直成分 z_L に対して、水平成分 x_L の増加に伴い最小張力 T_1 は増加している。一方で、全ての水平成分 x_L に対して、鉛直成分 z_L の増加に伴い最小張力 T_1 は減少傾向にある。このことは、2.2節で述べたことと一致している。

Fig.10に、機体位置に対する測定された最小張力と曲線 r_1 の関係を示す。この図において、黒丸の点はその位置における最小張力が1.96[N]より大きい時、白丸の点は小さい時を示している。つまり、最小張力が1.96[N]となる位置は、これら色の異なる2点の間にあるはずである。Fig.10からは、1.96[N]が境となる2点間に曲線 r_1 が位置していることから、3.1節で求めた曲線 r_1 は条件1を満たしていることがわかる。

Table 1: Relationship between the position of multi-rotor UAV to the the UGV and measured T_1 .

最小張力 T_1 [N]	水平成分 x_L [m]				
	1 [m]	2 [m]	3 [m]	4 [m]	
鉛直成分 z_L [m]	1 [m]	0.61 [N]	2.07 [N]	4.45 [N]	7.01 [N]
	2 [m]	0.46 [N]	1.38 [N]	2.46 [N]	4.45 [N]
	3 [m]	0.28 [N]	1.02 [N]	2.00 [N]	3.34 [N]
	4 [m]	0.29 [N]	0.82 [N]	1.53 [N]	2.45 [N]
	5 [m]	0.25 [N]	0.71 [N]	1.32 [N]	2.18 [N]
	6 [m]	0.35 [N]	0.69 [N]	1.21 [N]	1.98 [N]

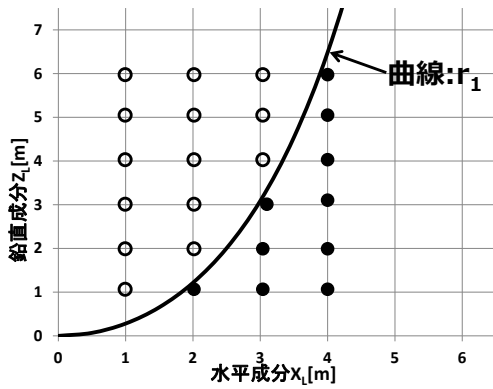


Fig. 10: Comparison between flight range border r_2 and measured T_1 in each cable tip position.

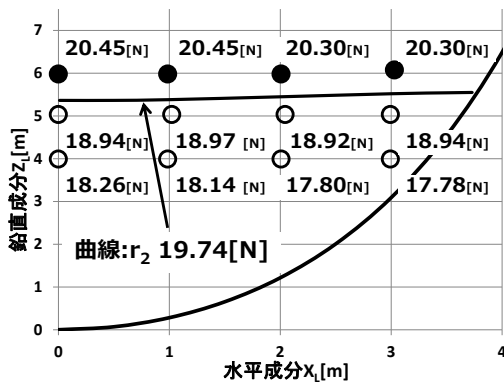


Fig. 11: Relationship between flight range border of r_2 and measured T_3 in each cable tip position.

3.2.3 条件2における曲線 r_2 の検証結果と考察

測定された機体位置に対する全負荷と曲線 r_2 の関係をFig.11に示す。なお、Fig.11の各点に表記されている数値は各点で測定された張力である。また、測定された機体への全負荷が最大推力19.74[N]より大きい時は黒丸の点、小さい時は白丸の点で示している。つまり、機体への負荷が19.74[N]となる位置は、これらの色の異なる2点の間にあるはずである。Fig.11から19.76[N]が境となる2点間に曲線 r_2 があることから、3.1節で求めた曲線 r_2 は条件2を満たしていることがわかる。

また、測定された数値に着目すると、鉛直成分 z_L に対して、水平成分 x_L の増加に伴い、全負荷が減少していることがわかる。よって、機体位置の水平成分 x_L が大きくなるにつれ、全負荷が減少し機体の鉛直方向の飛行可能範囲は大きくなる。このことは、Fig.7の(b)において、機体の鉛直方向の飛行可能範囲が増加していることと一致している。

3.2.4 まとめ

本実験では、3.1節において、数理モデルより推定された、飛行可能範囲の妥当性の評価を行った。実験結果から、曲線 r_1 、及び曲線 r_2 が条件1、2のそれぞれの飛行可能範囲の制限として一致することを確認した。以上のことから、カテナリ曲線を用いた数理モデルを基に推定された、根元の張力 T_1 に対する機体の飛行可能範囲は妥当であることを確認した。

4 結言

本稿では、有線給電システムのケーブル張力制御システムの開発のために、カテナリ曲線に基づいた数理モデルをもとに機体位置とケーブル張力の関係の解析を行い、さらに機体の飛行可能範囲の検討と検証を行った。実験の結果、数理モデルを用いることで、機体位置に対するケーブル張力、及び機体の飛行可能範囲を推定することが可能であることを示し、推定した飛行可能範囲が妥当であることを確認した。

今後の展望として、ケーブル張力制御システムを有した着陸台を用いて、想定している探査範囲の飛行が可能となるように算出された張力で実際にその範囲を機体が飛行することができるか検証を行う。

謝辞

本研究は、公益財団法人NSKメカトロニクス技術高度化財団の研究助成金(2013-2014)の支援を受けて実施されました。

参考文献

- [1] 永谷圭司, 災害現場におけるロボット活用事例, 電子情報通信学会総合大会 予稿集, SS-7 SS- 8.
- [2] Yoshito Okada, Keiji Nagatani, Kazuya Hoshida, Satoshi Tadokoro, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, "Shared Autonomy System for Tracked Vehicles on Rough Terrain Based on Continuous Three-Dimensional Terrain Scanning", Journal of Field Robotics, Volume 28, Issue6, pp875-893.
- [3] Nathan Michael, Shaojie Shen, Kartik Mohta, Yash Mulgaonkar, Vijay Kumar, Keiji Nagatani, Yoshito Okada, Seiga Kiribayashi, Kazuki Otake, Kazuya Yoshida, Kazunori Ohno, Eijiro Takeuchi, Satoshi Tadokoro, "Collaborative mapping of an earthquake-damaged building via ground and aerial robots", Journal of Field Robotics Volume 29, Issue 5, pp.832-841, (2012-08).
- [4] 興野 悠太郎, 米澤 拓郎, 野崎 大幹, 小川 正幹, 伊藤 友隆, 中澤 仁, 高汐 一紀, 徳田 英幸, "着脱可能な有線給電式空中センシングプラットフォーム", 研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信, MBL-70, 2014.
- [5] 芦澤 純, 比嘉 翔弥, Joao Victor Thomsen Sliveira, 大塚 光, 永谷 圭司, 吉田 和哉, "MUAVによる長時間屋内探査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.
- [6] Lida Zikou, Christos Papachristos, and Anthony Tzes, "The Power over Tether system for powering small UAVs Tethering Line Tension Control Synthesis", Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), pp.681-687, IEEE, Torremolinos, 2015.