

NAIST-IS-MT1651060

修士論文

マルチコプターによる持ち上げ不能な物体の押し動作

白倉 尚貴

2018 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

白倉 尚貴

審査委員：

小笠原 司 教授	（主指導教員）
杉本 謙二 教授	（副指導教員）
高松 淳 准教授	（副指導教員）
丁 明 助教	（副指導教員）

マルチコプターによる持ち上げ不能な物体の押し動作*

白倉 尚貴

内容梗概

マルチコプターは高所での点検作業や、空中輸送などへの活用が期待されている。現在普及しているマルチコプターの活用先は、非接触の点検や撮影などにとどまっているが、マルチコプターによってマニピュレーションを行う「空中マニピュレーション」についても近年注目を集め、研究が進められている。空中マニピュレーションの手段として、マニピュレータを搭載する手法が多く見られる。この手法では、マニピュレータの動作がマルチコプター本体の姿勢制御に影響を与えるため、マニピュレータとマルチコプターの複合制御に関する研究がすでに行われている。しかしながら、マニピュレータによって物を持ち上げて操作する研究において、多くの場合、操作対象となる物体は、マルチコプターの制御に影響を与えにくいような軽い物体のみである。本研究では、マルチコプターによって持ち上げてることができない物体のマニピュレーションについて検討する。具体的なアプローチとしては、操作対象物を押したり、引きずったりすることで操作する。マルチコプターによる押し引き動作を実現するために、本研究では物理モデルを構築し、制御を行う。また、シミュレーション実験及び実機実験によって、構築した物理モデル及び押し動作制御の有効性を証明する。

キーワード

マルチコプター, 押し動作, マニピュレーション, 空中マニピュレーション, フィジカルインタラクション

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1651060, 2018 年 3 月 15 日.

pushing motion for an unliftable object using a Multi-Copter*

Naoki Shirakura

Abstract

Multi-copter is expected to be used for inspection work at a high place and for air transportation because it has an advantage that it can fly. Currently, popular applications of multi-copter are limited to non-contact inspection and photography, but research on "aerial manipulation" that manipulates with multi-copters has also been attracting attention in recent years. In many cases, the aerial manipulation is performed with a manipulator mounted on a multi-copter. In this method, the motion of the manipulator affects attitude control of the multi-copter. Therefore, composite control of manipulator and multi-copter have already been studied. However, the object to be manipulated in the study of aerial manipulation is only a light object that does not affect the control of multi-copter. This research manipulates objects that can not be lifted by multi-copter. In the proposed method of this research, target objects are operated by pushing or dragging. Construction of a physical model is required to realize pushing motion. Further, the effectiveness of the proposed method is proved by simulation experiment and actual machine experiment.

Keywords:

Multi-copter, pushing motion, manipulation, aerial manipulation, physical interaction

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651060, March 15, 2018.

目次

図目次	v
-----	---

表目次	vi
-----	----

第 1 章	緒言	1
1.1	研究背景	1
1.2	関連研究	2
1.2.1	空中マニピュレーション	2
1.2.2	ロボットによる押し動作	3
1.2.3	マルチコプターによる環境接触動作の制御	3
1.3	研究の目的	4
1.4	本論文の構成	5
第 2 章	提案手法	6
2.1	押し動作のモデル化	6
2.1.1	鉛直方向の運動方程式	6
2.1.2	水平方向の運動方程式	7
2.2	制御手法	8
2.2.1	押し動作コントローラ	9
	鉛直方向の制御	9
	水平方向の制御	10
2.2.2	姿勢制御コントローラ	14
2.2.3	コントローラ間の接続	15
2.3	制御アルゴリズム	16
第 3 章	システム構成	18
3.1	概要	18
3.2	自己位置推定	18
3.3	安全対策	20

第 4 章	実験結果	23
4.1	シミュレーション実験	23
4.1.1	姿勢制御の実験	23
4.1.2	位置制御の実験	23
4.1.3	押し動作の実験	23
4.2	実機実験	31
第 5 章	結言	32
5.1	まとめ	32
5.2	今後の課題	32
謝辞		33
参考文献		34

図目次

2.1	Flow of control multi-copter	6
2.2	Physical model of pushing motion by multi-copter	7
2.3	Flow of calculating multi-copter's inputs	8
2.4	Example of horizontal force	12
2.5	Model of copter control	14
2.6	Flowchart of pushing motion	17
3.1	System overview	19
3.2	Multi-copter : Erle-copter	19
3.3	PWM signals for rotors	21
3.4	State transition diagram of safety controller	21
3.5	Circuit of safety controller	22
4.1	Result of orientation control	24
4.2	Result of horizontal position control	25
4.3	Result of vertical position control	25
4.4	Flow of Position control	26
4.5	Multi-Copter and End-effector	26
4.6	Scene of simulation experiment	27
4.7	Flow of simulation experiment	28
4.8	Results of simulation experiment 1 [kg]	29
4.9	Results of simulation experiment 2 [kg]	30

表目次

3.1	Truth table of safety controller	20
4.1	Paramaters of Multi-Copter	24

第 1 章 緒言

1.1 研究背景

マルチコプターは飛行機と比べて制御が容易な航空機として、空撮 [1] や空中輸送 [2] などへの活用が進められてきた。またリチウムポリマーバッテリーのような大容量バッテリーの出現や、ジャイロセンサー等の普及によってマルチコプターの小型化が進むに連れ、単なる航空機としてだけではなく、飛行できるモバイルロボットとしての認識も高まり、橋下の点検 [3] や壁面検査 [4] といった作業への活用も行われている。

現在普及しているマルチコプターの活用事例は、非接触の検査や点検等にとどまっているが、マルチコプターによってマニピュレーションを行う「空中マニピュレーション」についても近年注目を集め、研究の対象となっている。空中マニピュレーションの研究では、マルチコプターにマニピュレータを搭載し、マニピュレーションを行う研究が多く見られる。この場合、マニピュレータの動作がマルチコプター本体の制御に影響を与えるため、その影響を軽減する手段について様々なアプローチで研究がすでに行われている。また、マルチコプターで物体の把持、操作を行う研究も取り組まれている。しかしながら、空中マニピュレーションの研究において、多くの場合操作対象の物体は、マルチコプターの制御に影響を与えにくいような小さく軽い物体のみである。大きさや重量によりマルチコプターで持ち上げることができないような物体については、持ち上げるのではなく別の方法で操作することを考える必要がある。単純に操作対象物を移動させたいだけであれば、持ち上げる必要はなく、接地状態で押したり、引きずったりして操作することが可能である。特に、重い物やサイズが大きいものについては、押したり、引きずったりして操作することを前提として作られているものが多く、例えば椅子や台車などのようにキャスターなどが取り付けられている物もある。そのような物の操作に関しては、持ち上げるよりも、押したり、引きずったりして操作する方が最適であると言える。

マルチコプターによる押し動作はマルチコプターの特徴である飛行可能という点を生かして、瓦礫が散乱する災害現場や、階段の移動などが想定される建物内での

マニピュレーションに活用可能である。活用例の一つとして、地上移動型のロボットとの作業分担による協調作業が考えられる。地上移動ロボットでは侵入することが困難な、障害物に遮蔽された場所に侵入し、地上移動型のロボットがマニピュレーション可能な場所まで操作対象物を移動させるという活用法が考えられる。地上移動ロボットと作業分担を行うことにより、不整地に弱い地上移動ロボットと、発揮可能な出力に劣るマルチコプターで互いに欠点を補いながら作業を行うことができる。物を移動させる以外にも、ドアの開閉や、機器の操作など人工物の操作に活用することも可能である。マルチコプターの活用場所として、事故が発生した原子力発電所など、人が侵入することが困難でかつ、障害物により地上移動ロボットでは移動が困難な場所での作業が考えられる。そういった場所でドアの開閉や、機器の操作などの作業を行うという活用方法も考えられる。

1.2 関連研究

1.2.1 空中マニピュレーション

空中マニピュレーションの問題として、マニピュレータとマルチコプターの複合制御がある。通常のマルチコプターの制御では、マルチコプター自体の姿勢制御のみを考えれば良いが、マニピュレータを搭載したマルチコプターでは、マニピュレータの動作や状態によって物理パラメータがダイナミックに変化するため、その変化に対応できる制御が必要である。大西らの研究 [5] ではマニピュレータの動作による反動を打ち消すことができる重心移動機構をマルチコプターに搭載することによって対策を行っている。ハードウェアによってマニピュレータの動作の影響を打ち消しているため、マルチコプターの制御には、従来使用されているコントローラをそのまま活用できるという利点がある。一方で、機械的構造の複雑化による故障のリスクや、重心移動機構自体の重さによる可搬重量の圧迫が課題として考えられる。Stefano らの研究 [6] では、マニピュレータも含めたマルチコプターの物理モデルを構築し、そのモデルに基づいて制御を行うことによりマニピュレータとマルチコプターの複合制御の問題を解決している。この手法では、機体、搭載するマニピュレータのパラメータに合わせた専用のコントローラを用いる必要があり、従来のマルチコプター単体用のコントローラは使用できないが、ソフトウェアで問題

を解決することでハードウェア構造は単純化できるという利点がある。

マルチコプターとマニピュレータの複合制御の次に検討すべきこととして、実際に物の把持や操作を行うことが考えられる。Garimella らの研究 [7] では、2 自由度のマニピュレータをマルチコプターに搭載し、実機実験で空中での物体の把持に成功している。この研究では、対象物の把持までを述べており、十分な精度で把持を実現しているが、把持した後の物体の操作等については述べられていない。また、操作対象の物体はマルチコプターの制御に影響を与えないような軽い物体に限定している。

1.2.2 ロボットによる押し動作

押し動作の研究に関しては、地上移動型のロボットを用いた研究が行われている。小島らの研究 [8] では、複数の移動ロボットを使った協調押し動作について述べている。押し動作の際の制御誤差を各ロボットにコンプライアンスを持たせることで、軽減している。この研究では協調作業のためにコンプライアンスを持たせているが、地上移動型のロボットよりも正確な位置制御が困難なマルチコプターについても、同様なアプローチが有効であると考えられる。

袴田らの研究 [9] ではヒューマノイドロボットによる押し動作について述べている。この研究では押し動作の物理モデルに基づいた制御を行うことで、押し動作の反作用によってロボットが転倒することがないように制御している。マルチコプターは飛行ロボットであるため、転倒することはないが、押し動作による反作用が本体の姿勢制御に影響を与えられられる。そのため、マルチコプターによって押し動作を行う場合は、マルチコプターによる押し動作の物理モデルを構築した上で、地上移動型のロボットとは異なるアプローチが必要である。

1.2.3 マルチコプターによる環境接触動作の制御

空中マニピュレーションでは操作対象物や壁などの周辺環境との接触が生じるため、環境接触が制御に与える影響や接触力の制御などについて研究が行われている。杉山らの研究 [10] では、マルチコプターが壁面に能動的に衝突する際の制御につい

て述べている。マルチコプターが壁に接触した際に、姿勢を維持することができれば、壁面に設置された押しボタンの操作などに活用可能であるとして、状態フィードバックによる姿勢の安定化を行なっている。シミュレーション実験の結果から衝突時の外乱が十分に予測可能な場合については飛行を継続することが可能なレベルで機体を安定化できるとしている。

池田らの研究ではマルチコプターによる橋梁の点検を目的として、衝突を含む接触力制御について述べている。この研究ではエンドエフェクタを可変なバネ-マス-ダンパ系としてモデルを構築し、接触力の制御を行なっている。また、エンドエフェクタ先端に衝撃吸収用のバネ-ダンパ系を搭載しており、衝突時の外乱を軽減している。押し動作においても、衝突時の外乱の軽減、接触力の制御は重要な問題であり、この研究のようにエンドエフェクタに専用の機構を設けることも有効な対策であると言える。

Gioioso らの研究 [12] では、ハプティックデバイスを使用してマルチコプターを力ベースでコントロールするインタフェースを開発している。このインタフェースを用いたシミュレーションにおいて、操作者が力のフィードバックを受けながらマルチコプターを操作し、レール上に配置された物体を押すという実験を行なっている。この研究では、接近と押し動作のフェーズ分割により、ゆっくりと物体に近づくことで弾性衝突を避け、制御を行いやすくしている。また、この研究では人が力の指令値を決定しているが、力の指令値を目的の移動距離、時間等に基づいて計算し、自動で与えることも可能であると考えられる。

1.3 研究の目的

本研究の目的は、マルチコプターによる押し動作を実現することにより、持ち上げ不能な物体のマニピュレーションを可能にすることである。なお、持ち上げ不能とは、重さによる制限だけでなく、形状、大きさ、表面の物理特性など様々な条件を含むものとする。この目的を実現することにより、従来研究で触れられていた軽い物体以外にも、大きさや重さの都合から、本来マルチコプターによってマニピュレーションできない物体の操作が可能になると考えられる。

1.4 本論文の構成

本論文では第2章にてマルチコプターによる押し動作の提案手法について述べる。提案手法では、マルチコプターによる押し動作実現のために構築する物理モデル、物理モデルに基づいた運動方程式の活用、物理モデルに基づいた押し動作制御の流れについて述べる。

第3章では、実験に使用するマルチコプター及びシミュレーション環境を含めたシステム全体の概要について説明する。また、実機実験に伴って必要になったマルチコプター屋内飛行実験の際の安全対策についても説明する。

第4章では、提案手法により構築した物理モデルの有効性を証明するための検証実験について述べる。本研究でおこなったシミュレーション実験及び実機実験について、実験設定及び、実験結果を示す。

第5章では実験結果から得られた結論を述べる。また、今後の本研究の課題についても述べる。

第 2 章 提案手法

Fig. 2.1 にマルチコプター制御の流れを示す．マルチコプターの制御は位置制御コントローラをマスタ，姿勢制御コントローラをスレーブとするカスケード制御で行う．姿勢制御コントローラは，搭載された高度計とジャイロセンサの情報を元に， x, y, z 軸周りの姿勢 ϕ, θ, ψ と高度 z の制御を行う．姿勢制御は IMU センサの計測値に基づいた状態フィードバック制御によって行われる．位置制御コントローラはマルチコプターの物理モデルから導かれた運動方程式に基づいて，目標の移動量に必要な姿勢を決定し，姿勢制御コントローラへの指令として送る．本研究では，位置制御コントローラを，操作対象物も含めた物理モデルに基づいて押し動作コントローラとして設計することで押し動作を達成する．

2.1 押し動作のモデル化

Fig. 2.2 にマルチコプターによる押し動作の物理モデルを示す．本研究ではまず操作対象物を一方向に押すことを考え，奥行き方向と上下方向の動作を考慮した二次元の物理モデルを構築した．

2.1.1 鉛直方向の運動方程式

鉛直方向の運動方程式は，重力との釣り合いを考える．マルチコプター質量を M_c ，重力加速度を g とすると運動方程式は

$$M_c \ddot{z} = F_z - M_c g \quad (2.1.1)$$

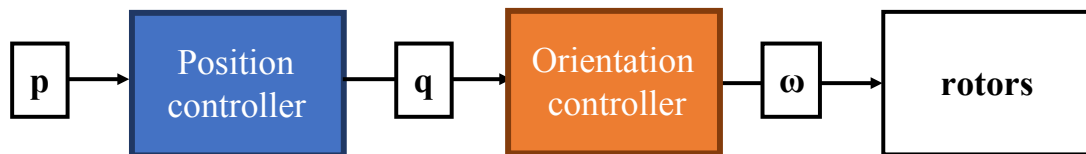


Fig. 2.1 Flow of control multi-copter

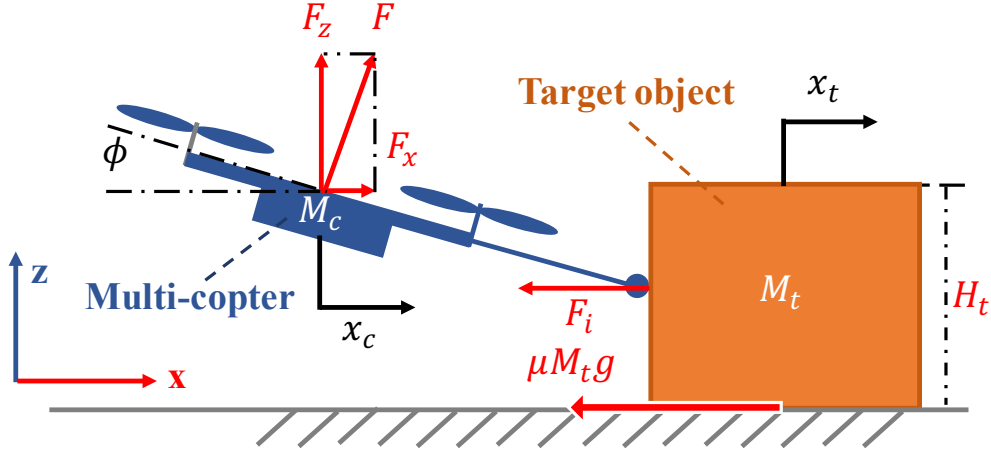


Fig. 2.2 Physical model of pushing motion by multi-copter

と表される．なお， F_z はマルチコプターの垂直方向への推力 F の鉛直成分であり，マルチコプターの姿勢 ϕ を用いて

$$F_z = F \sin \phi \quad (2.1.2)$$

と表される．

2.1.2 水平方向の運動方程式

水平方向の運動方程式は，マルチコプターと操作対象物についてそれぞれ考えることができる．マルチコプターの運動方程式については，マルチコプターの水平方向の位置 x_c ，操作対象物から受ける反力 F_i を用いて

$$M_c \ddot{x}_c = F_x - F_i \quad (2.1.3)$$

と表される．なお， F_x は推力 F の水平成分であり

$$F_x = F \cos \phi \quad (2.1.4)$$

と表される．操作対象物の運動方程式は地面との間に生じる摩擦力を考慮する必要がある．操作対象物と地面との間に生じる摩擦力 F_r は，摩擦係数 μ ，操作対象物の質量 M_t を用いて

$$F_r = \mu M_t g \quad (2.1.5)$$

と表される．操作対象物の運動方程式は操作対象物の水平方向の位置 x_t と式(2.1.5)を用いて

$$M_t \ddot{x}_t = F_i - \mu M_t g \quad (2.1.6)$$

と表される．マルチコプターと操作対象物は棒状のエンドエフェクタで接触する．エンドエフェクタと操作対象物は密着しているものとする，エンドエフェクタを搭載したマルチコプターと操作対象物体の加速度は等しくなるので

$$\ddot{x}_c = \ddot{x}_t = \ddot{x} \quad (2.1.7)$$

が成り立つ．式(2.1.3)，式(2.1.6)，式(2.1.7) からマルチコプターによる押し動作の運動方程式は

$$(M_c + M_t) \ddot{x} = F_x(t) - \mu M_t g \quad (2.1.8)$$

と表される．

2.2 制御手法

構築した物理モデルから目的の押し動作に必要な制御量を決定する．Fig. 2.3 に提案手法による制御量決定の流れを示す．システムは押し動作コントローラとマルチコプターのコントローラから構成される．押し動作コントローラは入力として操作対象物の移動距離 d を受け取り，運動方程式を用いて必要な水平，鉛直方向の力 F_x , F_z と押し時間 T_{push} の目標値を出力する．出力された力の目標値は変換器に

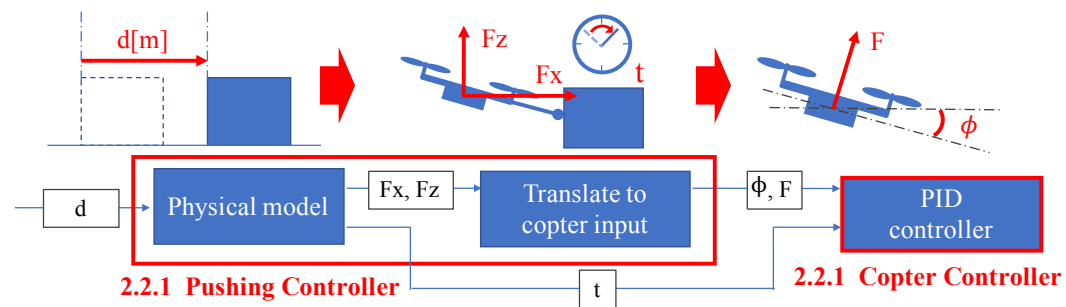


Fig. 2.3 Flow of calculating multi-copter's inputs

よってそれを発揮するために必要なマルチコプターの推力 F ，姿勢 ϕ の目標値に変換され，マルチコプターのコントローラへと受け渡される．推力と姿勢の目標値を受け取ったマルチコプターのコントローラは目標の運動を達成する．

2.2.1 押し動作コントローラ

押し動作コントローラでは押し動作に必要な水平，鉛直方向の力 F_x ， F_z 及び押し時間 t を入力として与えられた目標移動距離 d から運動方程式を用いて算出する．

鉛直方向の制御

まず，鉛直方向の力について考える．提案手法では，奥行き方向の位置制御を行うことから，高度を一定に保ったまま押し動作を行うことができれば良い．高度を一定に保つためには初期位置，初期速度，加速度について

$$z(0) = h_r \quad (2.2.1)$$

$$\dot{z}(0) = 0 \quad (2.2.2)$$

$$\ddot{z} = 0 \quad (2.2.3)$$

の条件を満たす必要がある．なお， h_r はマルチコプターの目標の押し動作高度を表している．式 (2.1.1) と式 (2.2.3) から，鉛直方向の力は

$$F_z = M_c g \quad (2.2.4)$$

となる表される．なお，式 (2.2.1) と式 (2.2.2) は押し動作開始時点でマルチコプターが目標高度に達していること，マルチコプターの高度が変化しないことを意味している．

水平方向の制御

次に、水平方向の力について考えていく．式 (2.1.8) で表される水平方向の運動方程式を時間について区間 $(0 \leq t \leq T)$ で積分すると

$$\dot{x}(T) = \frac{1}{M} \int_0^T F_x(t) - A dt + V_0 \quad (2.2.5)$$

$$x(T) = \frac{1}{M} \int_0^T \int_0^T F_x(t) - A dt^2 + V_0 t + X_0 \quad (2.2.6)$$
$$(A = \mu M_t g), (M = M_c + M_t)$$

となる．なお、 T は制動時間も含めた押し動作が完了するまでの時間を表しており、 V_0 は操作対象物体の初期速度を表す．提案手法では操作対象物体を静止した状態から押すことを考えるため

$$V_0 = 0 \quad (2.2.7)$$

が成り立つ．ここで、 X_0 は操作対象物体の初期位置を表す．提案手法において、入力として与えられる値は、目標の移動距離 d であり、初期位置からの変位として考えることができるため

$$d = x(T) - X_0 \quad (2.2.8)$$

が成り立つ．式 (2.2.5), 式 (2.2.6), 式 (2.2.8) から

$$\int_0^T F'_x(t) dt = M \dot{x}(T) \quad (2.2.9)$$

$$\int_0^T \int_0^T F'_x(t) dt^2 = M d \quad (2.2.10)$$

を得る．なお、 F'_x は摩擦力も含めた水平方向の力であり

$$F'_x = F_x(t) - \mu M_t g \quad (2.2.11)$$

と表される．式 (2.2.9) と式 (2.2.10) は、終端条件 $x(T) = d, \dot{x}(T) = 0$ 及び、所要時間または押す力のどちらかを与えることで解くことができる．ここでは、操作対象物の物理パラメータから、その物体を押して動かすことができる十分な力を先に決めることで式 (2.2.9) と式 (2.2.10) を解いていく．

操作対象物を押して動かすには、その物体の静止摩擦力を超える水平方向の力を加える必要がある。すなわち、物体を押すために必要な最低限の力 F_{min} は操作対象物の静止摩擦係数 μ_s を用いて

$$F_{min} = \mu_s M_t g \quad (2.2.12)$$

と表される。操作対象物の動摩擦係数が静止摩擦係数より十分に小さいと仮定すれば、 F_{min} を水平方向の力としてマルチコプターで与えることができれば、操作対象物を押して動かすことが可能である。実際には、確実に押し動作を行うためにある程度の余裕が必要になると考えられるため、 F_{min} は式で示した値よりも少し大きい値をとるように設定する。

次に、 F_{min} を用いてマルチコプターによって操作対象物に与える力をモデル化する。水平方向の力はマルチコプターの姿勢を傾ける事によって発生させることが可能である。しかし、マルチコプターの姿勢を変更するにはわずかだが時間がかかる。そのため、水平方向の力も F_{min} に達するまでに時間がかかる。水平方向の力が F_{min} に達するまでにかかる時間を T_{tran} とすると、この時間は、目標の姿勢に依存すると考えられるため、目標の姿勢 θ を用いて

$$T_{tran} = f(\theta) \quad (2.2.13)$$

と表される。水平方向の力は T_{tran} の遷移期間を経て、目標の力 F_{min} に達し、押し動作の所要時間 T 経過後、再び T_{tran} の遷移期間を経て 0 に戻ると考えられる。これらを整理し、水平方向の力を

$$F_x(t) = \begin{cases} \frac{F_{min}}{T_{tran}} t & (t < T_{tran}) \\ F_{min} & (T_{tran} \leq t < T - T_{tran}) \\ -\frac{F_{min}}{T_{tran}} t + \frac{F_{min}(T - T_{tran}) + F_{min}T_{tran}}{T_{tran}} & (T - T_{tran} \leq t) \end{cases} \quad (2.2.14)$$

として定義する。

Fig. 2.4 にモデル化した水平方向の力のグラフの例を示す。Fig. 2.4 の上段のグラフは式 (2.2.11) で表される力と水平方向の摩擦力を表している。Fig. 2.4 の中段のグラフは、式 (2.2.11) の力と摩擦力の合成 $F'_x(t)$ を表している。Fig. 2.4 の下段の図は $F'_x(t)$ を積分したグラフを表している。ここで、式 (2.2.9) 及び式 (2.2.10) に

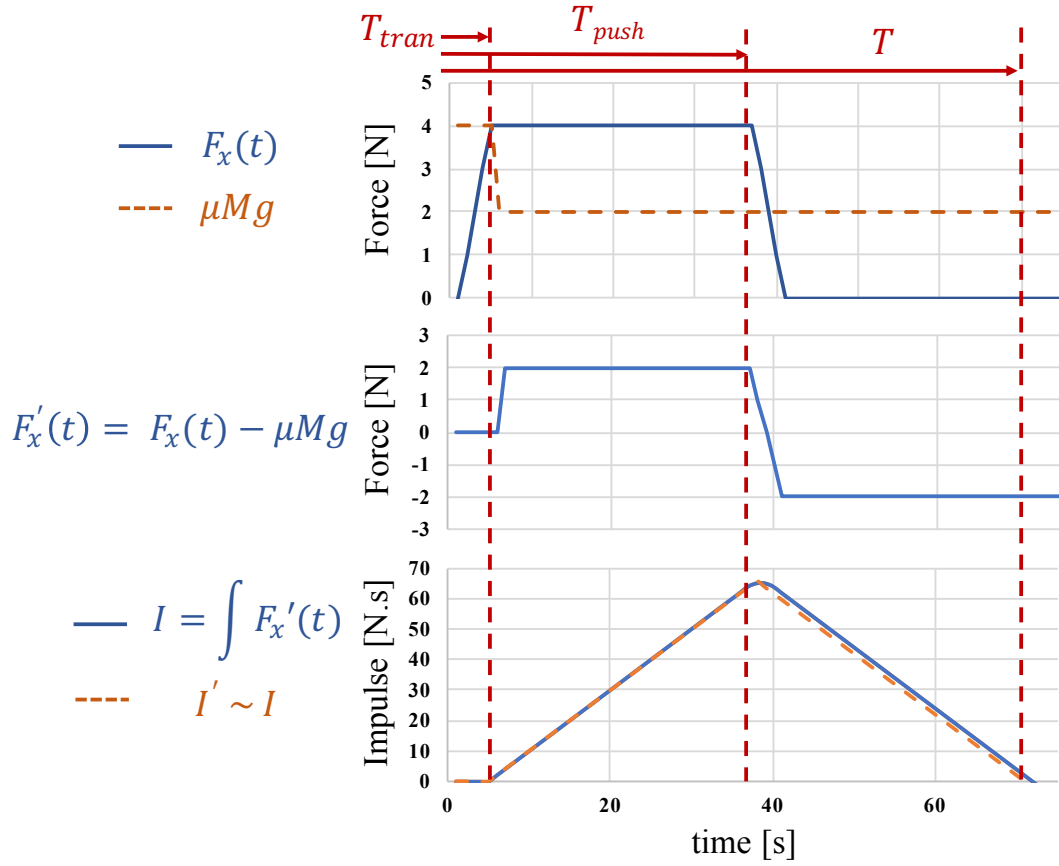


Fig. 2.4 Example of horizontal force

このモデル化された力を適用する，式 (2.2.9) は下段のグラフを表している，ここで，押し動作の終端条件として

$$v(T) = \dot{x}(T) = 0 \quad (2.2.15)$$

を与える，これは押し動作完了時に操作対象物が静止していることを表す，式 (2.2.9) と式 (2.2.15) から

$$\int_0^T Fx'(t)dt = 0 \quad (2.2.16)$$

を得る，この式は Fig. 2.4 の下段のグラフの近似線及び横軸によって囲まれる図形が底辺の長さが T の三角形になることを示す，この三角形の高さ h について左斜

辺の傾きと右斜辺の傾きから

$$h = (F_{min} - A')T_1 = A'T_2 \quad (2.2.17)$$

$$(A' = \mu M_t g, T_1 = T_{push} - T_{tran}, T_2 = T - T_{push}) \quad (2.2.18)$$

が成り立つ。また、この三角形の面積は式 (式 (2.2.10)) を表していることから

$$\frac{1}{2}h(T_1 + T_2) = Md \quad (2.2.19)$$

が成り立つ。式 (2.2.17) と式 (2.2.19) から

$$\begin{cases} (F_{min} - A')T_1 = A'T_2 \\ A'T_2(T_1 + T_2) = 2Md \end{cases} \quad (2.2.20)$$

を得る。式 (2.2.20) の上の式を T_2 について整理し

$$T_2 = \frac{(F_{min} - A')T_1}{A'} \quad (2.2.21)$$

を得る。式 (2.2.21) を式 (2.2.20) の下の式に代入すると

$$\begin{aligned} T_1(F_{min} - A')(T_1 + T_1 \frac{F_{min} - A'}{A'}) &= 2Md \\ T_1^2(F_{min} - A') \frac{F_{min}}{A'} &= 2Md \\ T_1^2 &= \frac{2MdA'}{F_{min}^2 - F_{min}A'} \\ T_1 &= \pm \sqrt{\frac{2MdA'}{F_{min}^2 - F_{min}A'}} \end{aligned} \quad (2.2.22)$$

となる。ここで式 (2.2.18) より

$$\begin{aligned} T_{push} &= T_1 + T_{tran} \\ &= \sqrt{\frac{2MdA'}{F_{min}^2 - F_{min}A'}} + T_{tran} \end{aligned} \quad (2.2.23)$$

を得る。 T_{push} は水平方向に力 F_{min} を加えるとき、目標の移動距離 d を達成するために押し続けなければならない時間を表している。すなわち、力 F_{min} で T_{push} 秒間押し続けられれば、目標の移動距離を達成することが可能である。

2.2.2 姿勢制御コントローラ

姿勢制御コントローラでは目標の姿勢を達成するための各モータへの入力を PID 制御によって制御する. Fig. 2.5 にクアドロータータイプのマルチコプターの物理モデルを示す. マルチコプターの姿勢に関する運動方程式は, 各軸周りの慣性モーメントを I_x, I_y, I_z とすると, オイラーの運動方程式より

$$\begin{cases} M_c + M_t g \ddot{z} &= F \cos \phi \cos \theta \\ I_x \ddot{\phi} &= \tau_1 + (I_y - I_z) \dot{\theta} \dot{\psi} \\ I_y \ddot{\theta} &= \tau_2 + (I_z - I_x) \dot{\phi} \dot{\psi} \\ I_z \ddot{\psi} &= \tau_3 + (I_x - I_y) \dot{\phi} \dot{\theta} \end{cases} \quad (2.2.24)$$

と表される. なお, F は垂直方向の推力, τ_1, τ_2, τ_3 はそれぞれ各軸周りのトルクであり各ローターの回転数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ を用いて

$$\begin{cases} F &= (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4) C_1 \\ \tau_1 &= (\omega_3 - \omega_4) C_2 \\ \tau_2 &= (\omega_2 - \omega_1) C_2 \\ \tau_3 &= (\omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_2^2) C_3 \end{cases} \quad (2.2.25)$$

で表される. なお, C_1, C_2, C_3 はそれぞれプロペラの回転数から力及びトルクを求めるための係数を表す. ここで各軸周りの角速度について

$$\dot{\phi} \ll 1, \dot{\theta} \ll 1, \dot{\psi} \ll 1 \quad (2.2.26)$$

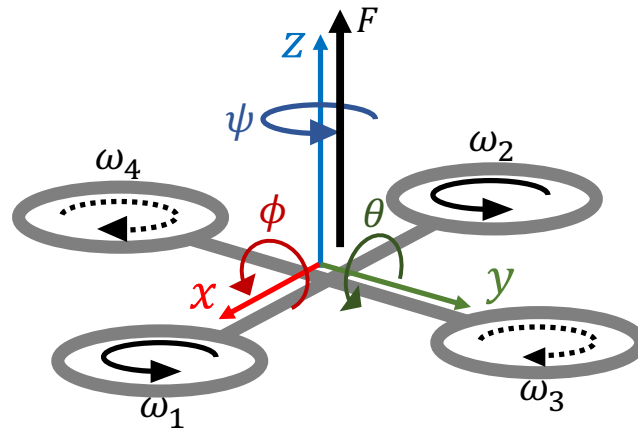


Fig. 2.5 Model of copter control

を仮定する．式 (2.2.26) から，式 (2.2.24) は改めて

$$\begin{cases} M_c \ddot{z} + M_t g & \simeq F \\ I_x \ddot{\phi} & \simeq \tau_1 \\ I_y \ddot{\theta} & \simeq \tau_2 \\ I_z \ddot{\psi} & \simeq \tau_3 \end{cases} \quad (2.2.27)$$

と表される．式 (2.2.27) から，高度 z は垂直方向の推力 F ，各軸周りの姿勢 ϕ ， θ ， ψ はそれぞれ，トルク τ_1, τ_2, τ_3 に依存していることがわかる．式 (2.2.25) と式 (2.2.24) から，各姿勢の制御量 $\mathbf{u}$ とモーターの回転数 $\boldsymbol{\omega}$ の関係は

$$\begin{bmatrix} u_1 + u_m \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (2.2.28)$$

と表される．なお， u_m は重力保証項であり，マルチコプターの自重を支えることができるローターの回転数を表す．

姿勢の PID 制御では姿勢の目標値との差分から制御量を決定する．姿勢の目標値との差を e とすると制御量は

$$u = eK_p + \int e dt K_i + \dot{e} K_d \quad (2.2.29)$$

と表される．なお， K_p ， K_i ， K_d はそれぞれ PID 制御の比例，積分，微分ゲインを表している．姿勢制御コントローラでは式 (2.2.29) を用いて，目標値との差分から制御量を決定し，式 (2.2.28) によって各モーターへの回転数指令を決定している．

2.2.3 コントローラ間の接続

押し動作コントローラによって必要な水平方向と鉛直方向の力が得られた時，マルチコプターの姿勢制御コントローラへの入力は

$$\begin{cases} z & = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \phi & = \tan^{-1} \frac{F_z}{F_x} \\ \theta & = 0 \\ \psi & = 0 \end{cases} \quad (2.2.30)$$

と表すことができる。なお、本研究では y 方向へ押すことは想定していないため θ と ψ についてはいずれも $0[\text{deg}]$ を目標としている。

2.3 制御アルゴリズム

押し動作に必要なパラメータを物理モデル及び運動方程式によって決定したら、それに基づいてマルチコプターの制御を行なっていく。この時、設定した物理モデルの条件に近い形で制御を行う必要がある。まず、運動方程式を解く際に、初期速度 $V_0 = 0$ としたため、静止した状態から押し動作を開始する必要がある。その際、Gioioso らの研究 [12] にならい、制御のフェーズを分割しゆっくり近づいてから、押し動作を開始することにする。

Fig. 2.6 にフェーズ分割による押し動作制御のフローチャートを示す。フェーズはゆっくりと操作対象物に近づく Approaching phase 実際に押し動作を行う Pushing phase に分割した。Approaching phase では操作対象物との距離を測定し、エンドエフェクタが操作対象物に接触するまでゆっくりと接近する。操作対象物に接触した場合、押し動作を行う Pushing phase へと移行する。Pushing phase では、操作対象物の物理パラメータと目標の移動距離から、前節の手法によってマルチコプターへの入力を計算する。なお、本研究では操作対象物の物理パラメータは既知であるとしてあらかじめ与えておくものとする。マルチコプターへの入力を決定した後は、目標の押し動作時間を達成するまで、マルチコプターの姿勢及び推力の制御を行う。マルチコプターの制御には PID 制御を利用している。

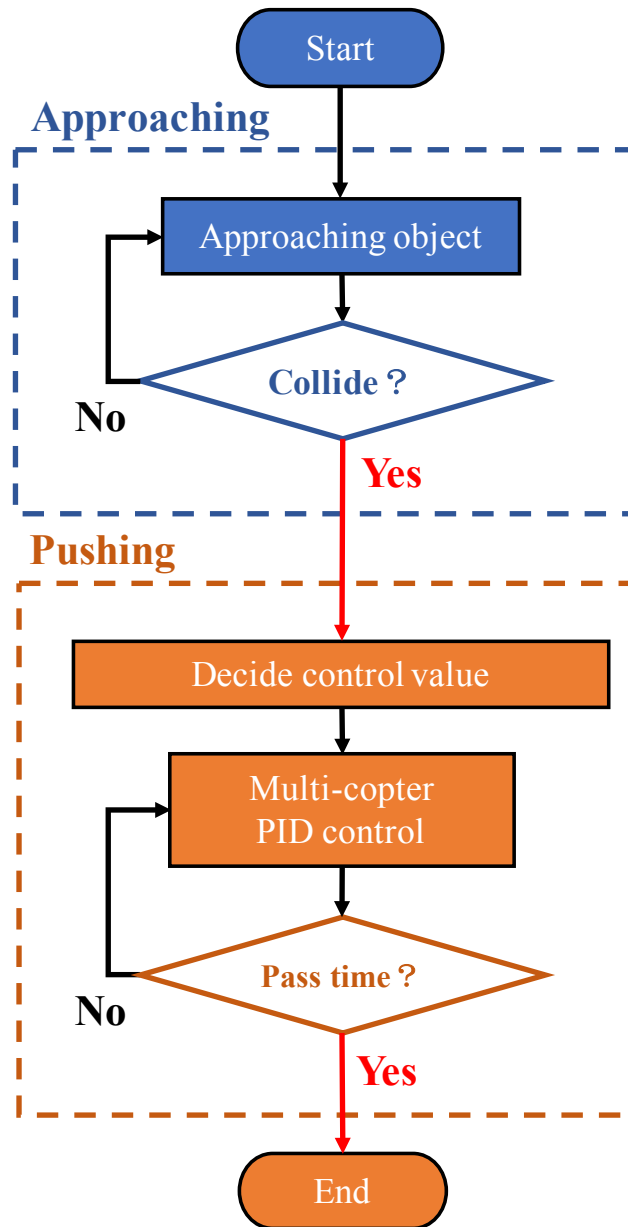


Fig. 2.6 Flowchart of pushing motion

第 3 章 システム構成

3.1 概要

Fig. 3.1 及び Fig. 3.2 に使用したマルチコプターとその制御システムの概要を示す。システムは福井らの研究 [13] を参考にした。システムはマルチコプター及び地上からマルチコプターを制御するための Ground Control Station (GCS) で構成されている。本研究ではマルチコプターとして、Erle Robotics 社製のクアドコプター「Erle Copter」を使用した。Erle Copter には機体を制御するためのハードウェア Flight Control Unit (FCU) として Erlebrain 2 が搭載されている。Erlebrain 2 には FCU のオープンソースソフトウェアである ArduPilot Mega (APM) がインストールされている。

地上からマルチコプターを制御するための Ground Control Station (GCS) には Think Pad T450 を使用した。マルチコプターと通信は無線 LAN 経由で行っている。通信プロトコルには Micro Air Vehicle Protocol (MAVlink) を使用している。システムは ROS ベースで構築されているため、MAVlink の ROS プラットフォームである MAVLink on ROS (MAVROS) が使用されている。シミュレーション環境には Erle-robotics 社から提供されている gazebo ベースの環境を使用した。シミュレーション環境には APM がプラグインとして実装されているため、実機と同じように MAVROS を介して制御を行うことができる。本研究では押し動作のエンドエフェクタと、自己位置推定用のカメラ、カメラ制御用のコンピュータを追加で搭載した。また、GCS で提案手法による押し動作コントローラを動作させる。

3.2 自己位置推定

提案手法による押し動作では、操作対象物との相対位置が必要になる。本研究では、マルチコプターに搭載されたカメラと、操作対象物に貼り付けた AR マーカーを利用することで相対位置を取得する。Erle Copter に搭載されている ErleBrain 2 を使用してカメラを制御することも可能だが、フライトコントローラの動作を安

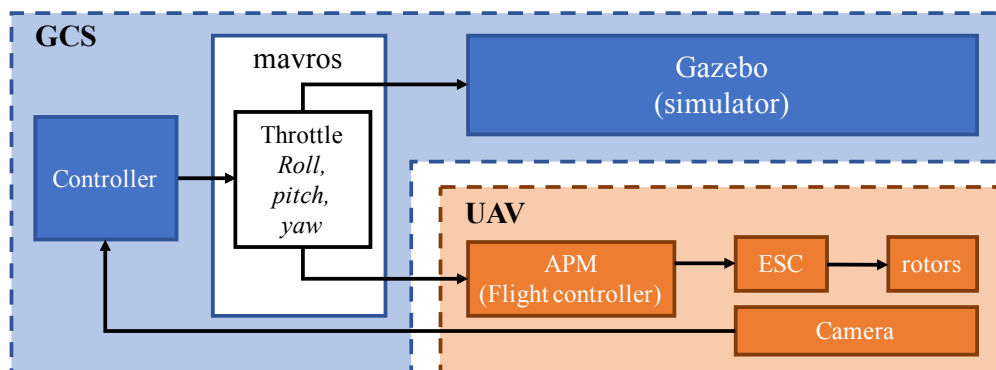


Fig. 3.1 System overview



Fig. 3.2 Multi-copter : Erle-copter

定させること，及び自己位置推定処理のフレームレートを可能な限り高めるために，別途 Intel ComputeStick STK2MV64CC（以下 Stick PC と呼ぶ）をカメラ制御用に搭載した．Stick PC には OS として Ubuntu14.04 LTS がインストールされている．AR マーカーのライブラリには ArUco[14] を使用した．自己位置推定を行うプログラムは ROS ノードとして作成した．作成したノードはカメラ画像から，マーカーの位置情報を抽出し，ROS の message として配信する．ROS の message として配信することで，無線 LAN 経由で GCS が message を購読しマル

チコプターと AR マーカーの相対位置を押し動作コントローラで利用することができる。

3.3 安全対策

提案システムでは APM によるコントロールの中でも、安全設計がなされている位置制御ではなく、十分な安全性が保証されていない姿勢制御にて実験を行う必要があった。そのため、安全に実験に取り組むことができるように有線の緊急停止装置の実装を行なった。Fig. 3.5 に緊急停止用に作成した回路図を示す。制御回路は 1.8 ~ 5.5 [V] という広い動作電圧範囲を持ち、PWM 出力を 4 チャンネル持つマイクロコントローラ PIC18f14k50[15] を用いて作成した。

Table. 3.3 に実装した機能を示す。Fig. 3.4 にシステムの状態遷移図を示す。また、Fig. 3.3 に各機能により出力される PWM 信号を示す。回路には sw1 及び sw2 の 2 つのボタンが取り付けられており、それぞれのボタンを押すことで、着陸モード、停止モードへと状態遷移する。着陸用のスイッチはマルチコプターを着陸させたい場合に押す。このスイッチが押されるとシステムは着陸モードに入り、マルチコプターが降下する際の回転数が PWM 信号として出力される。停止用のスイッチはマルチコプターのローターを停止させたい時に使用する。このスイッチが押されるとシステムは停止モードに入り、ローターが停止する際の回転数が PWM 信号として出力される。それぞれの機能には状態遷移図で示すように優先度が割り振られており、高優先度設定の停止ボタンが押された場合、着陸ボタンの状態に関わらずローターの回転を停止する。

sw1	sw2	function
L	L	flight mode
H	L	land mode
×	H	stop mode

Table. 3.1 Truth table of safety controller

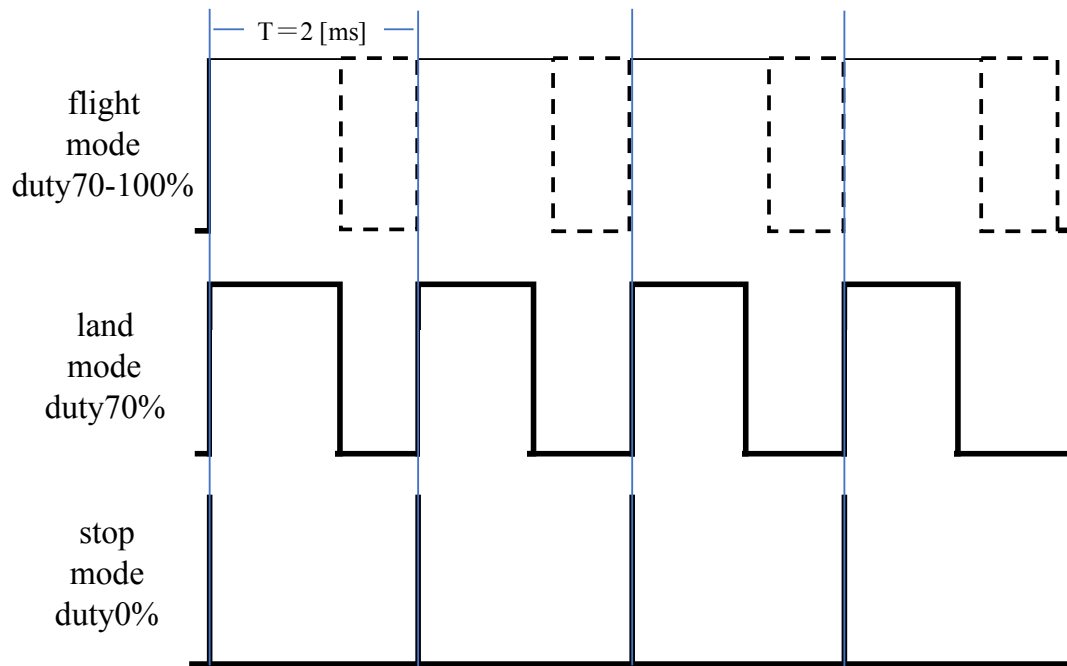


Fig. 3.3 PWM signals for rotors

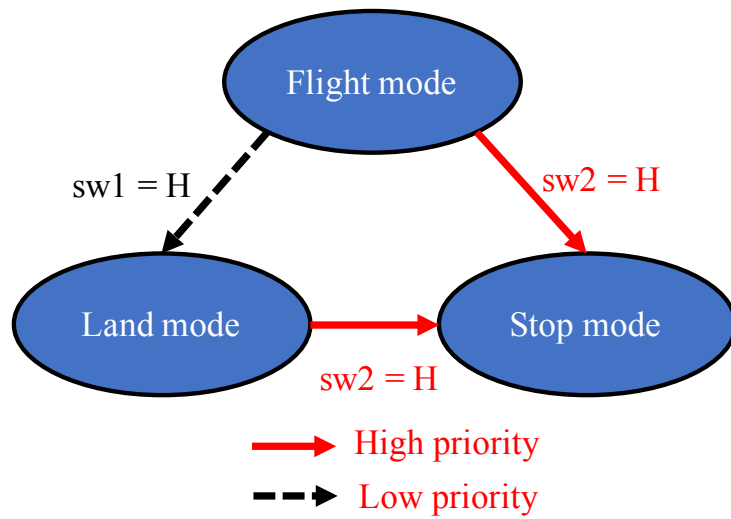


Fig. 3.4 State transition diagram of safety controller

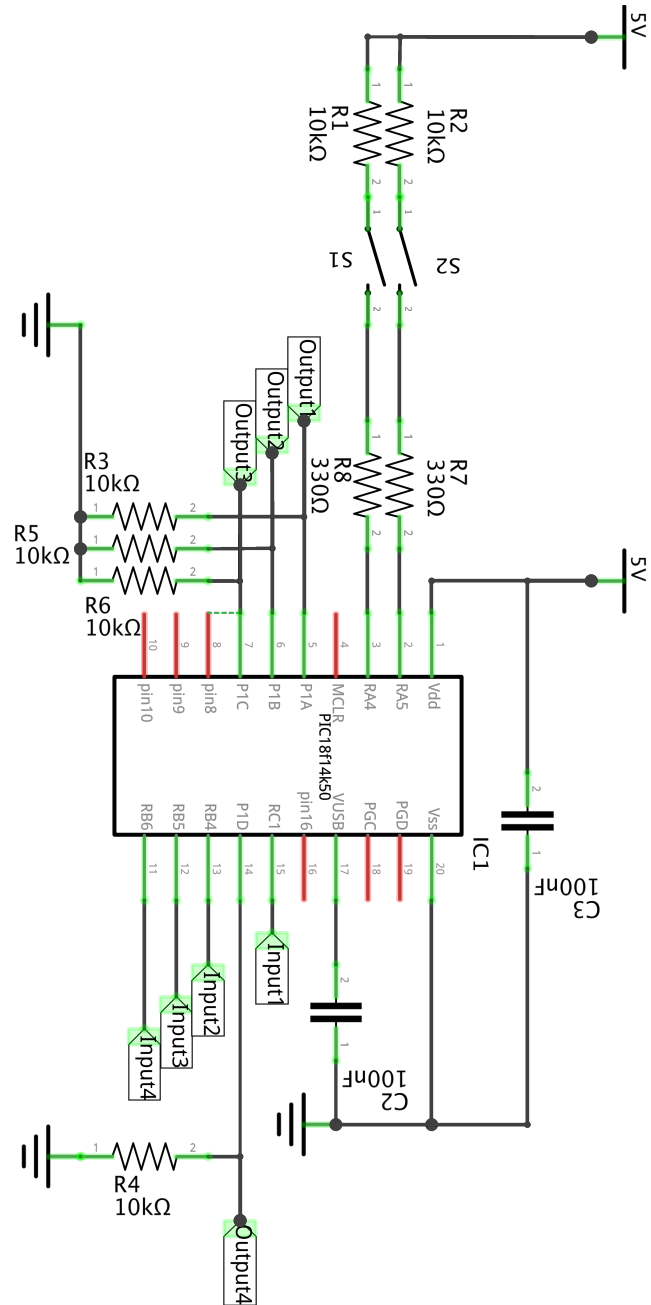


Fig. 3.5 Circuit of safety controller

第 4 章 実験結果

4.1 シミュレーション実験

4.1.1 姿勢制御の実験

押し動作に必要な力を正確に得るために，マルチコプターの姿勢制御の検証を行った．Fig. 4.1 に姿勢制御の実験結果を示す．実験では，目標の姿勢を $0.4[\text{rad}]$ として姿勢制御を行なっている．Fig. 4.1 から目標に収束していることが確認できる．

4.1.2 位置制御の実験

離着陸，及び操作対象物への接近のため，位置制御コントローラの検証を行った．Fig. 4.2, Fig. 4.3 に位置制御の結果を示す．また，Fig. 4.4 に位置制御による移動の様子を示す．実験では， x 及び， z 方向の移動を含む 3 点を指定し，マルチコプターを移動させている．Fig. 4.2, Fig. 4.3 から，目標の移動をしていることが確認できるが，遅延や目標値とのわずかな差も確認できる．これは位置制御及び姿勢制御に用いている PID 制御のゲインが関係していると考えられる．PID ゲインを最適な値に調整することで，改善が期待できる．

4.1.3 押し動作の実験

シミュレーションにて提案手法によるマルチコプターの押し動作実験を行なった．シミュレータはマルチコプターの販売元である Erle Robotics 社から提供されている環境 [16] を使用した．Fig. 4.5 にシミュレーションで使ったマルチコプターを示す．また，Table. 4.1 にシミュレータ上でのマルチコプターの設定を示す．マルチコプターには押し動作を行うためのエンドエフェクタとして，平行な 3 つの棒状リンクを取り付けた．押し動作実験は $1, 2[\text{kg}]$ の異なる質量と，目標移動距離 $1, 1.5 [\text{m}]$ の組み合わせで，合計 4 パターン行なった．いずれの実験においても，操作対象物と地面との摩擦係数は，静止摩擦係数 $\mu_s = 0.2$ ，動摩擦係数

$\mu_d = 0.1$ としている。また、マルチコプターに搭載したエンドエフェクタと操作対象物との摩擦係数は、 $\mu_s = \mu_d = 1$ としている。なお、この実験において対象物の質量、摩擦係数などの物理係数は既知であり、制御プログラムに与えられているものとする。Fig. 4.6 及び Fig. 4.7 にシミュレーション実験の様子を示す。また、Fig. 4.8, Fig. 4.9 にシミュレーション実験の結果を示す。Fig. 4.8 から目標として与えた距離に対応した押し動作が生成されていることが確認できる。また、Fig. 4.8 の (a) 及び Fig. 4.9(a) から、対象物の質量変化にも対応することができることが確認できる。

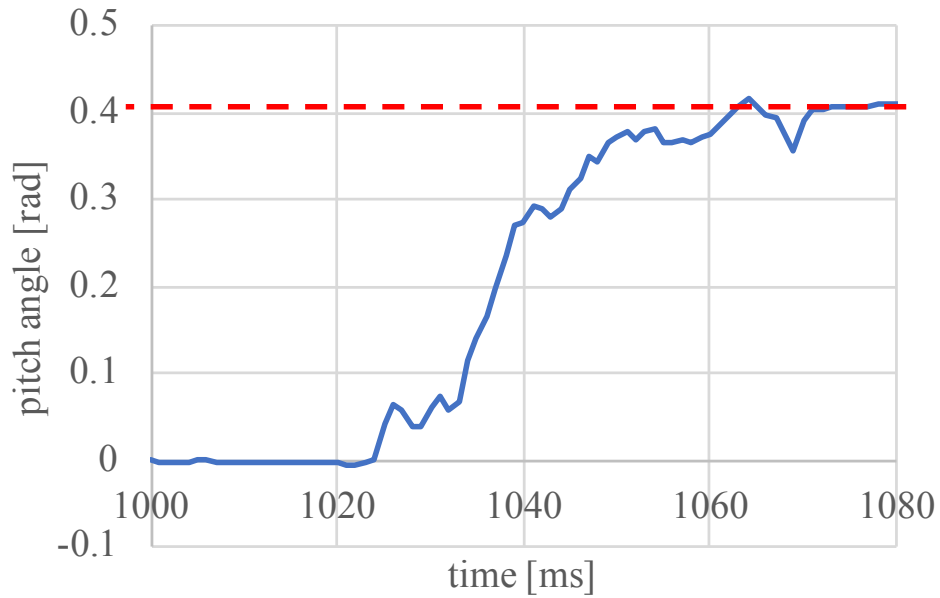


Fig. 4.1 Result of orientation control

Mass of Multi-Copter	1.15 [kg]
Mass of End-effecotr	0.04 [kg]
Length of End-effector	0.25 [m]

Table. 4.1 Paramaters of Multi-Copter

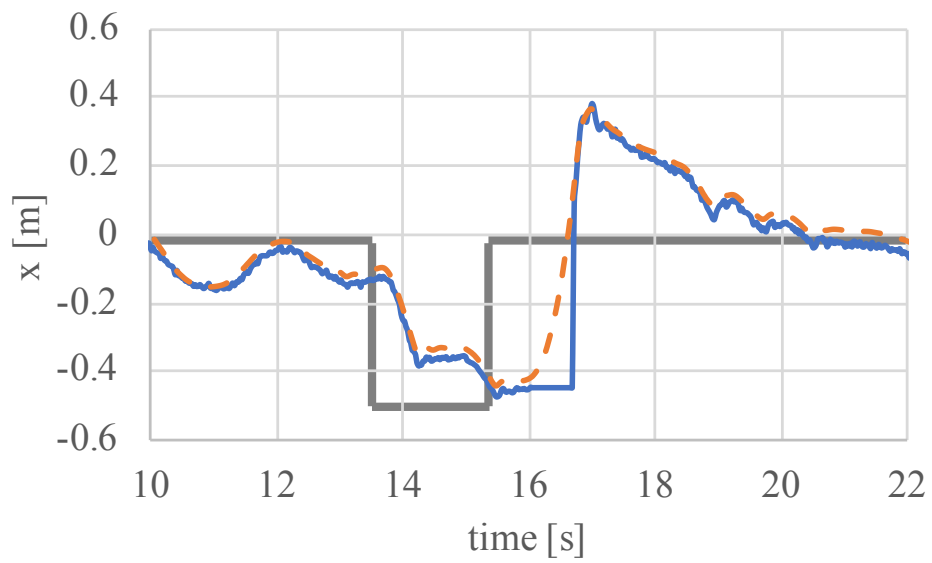


Fig. 4.2 Result of horizontal position control

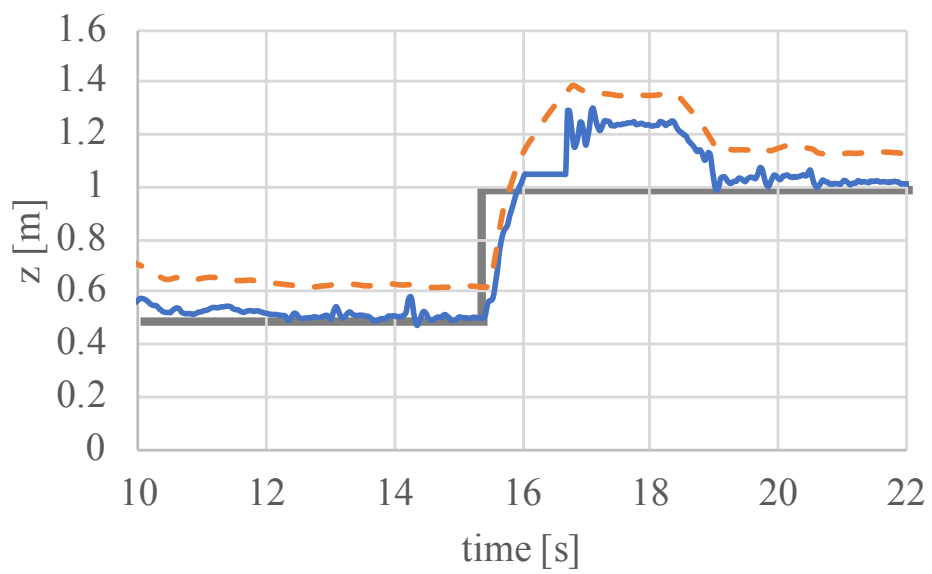


Fig. 4.3 Result of vertical position control

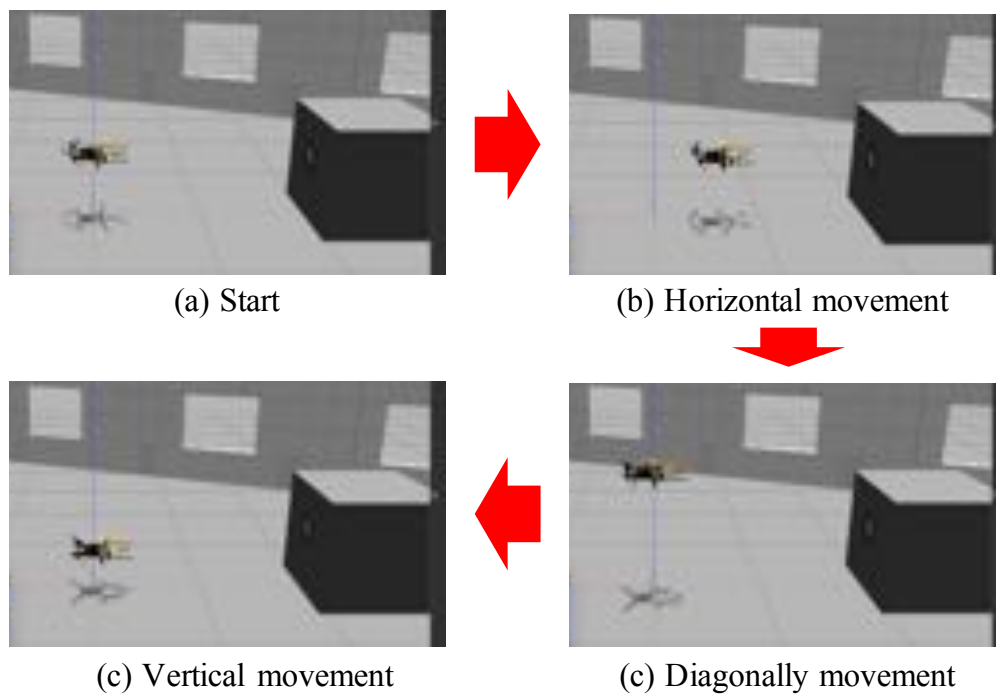


Fig. 4.4 Flow of Position control



Fig. 4.5 Multi-Copter and End-effector

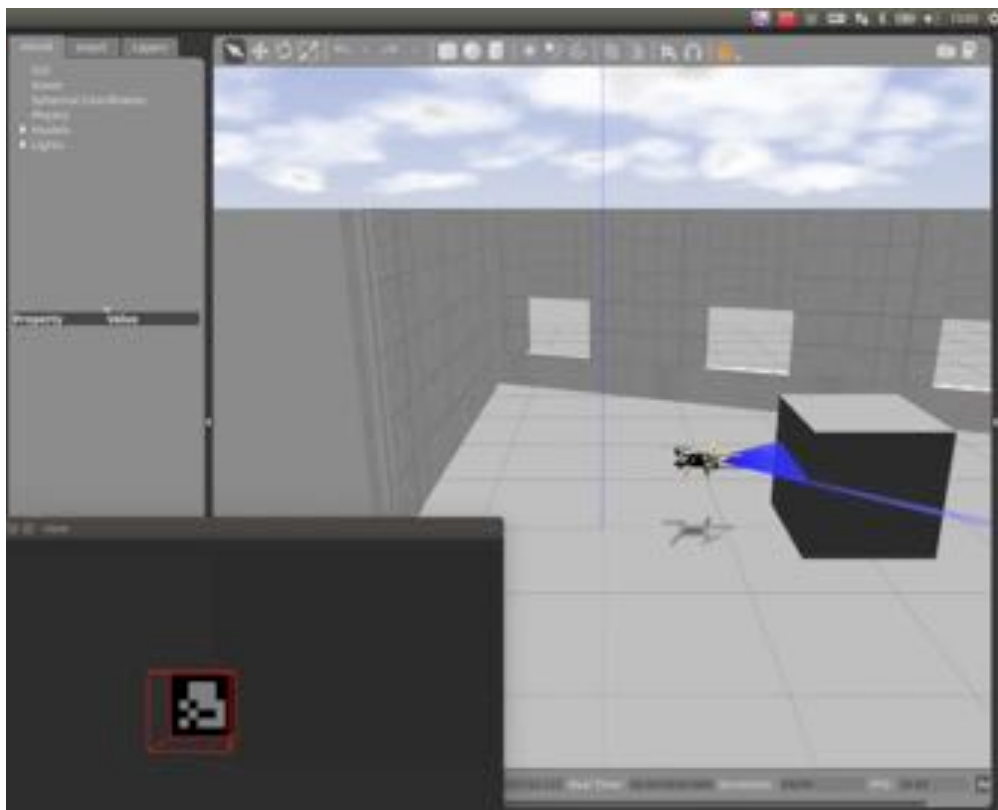


Fig. 4.6 Scene of simulation experiment

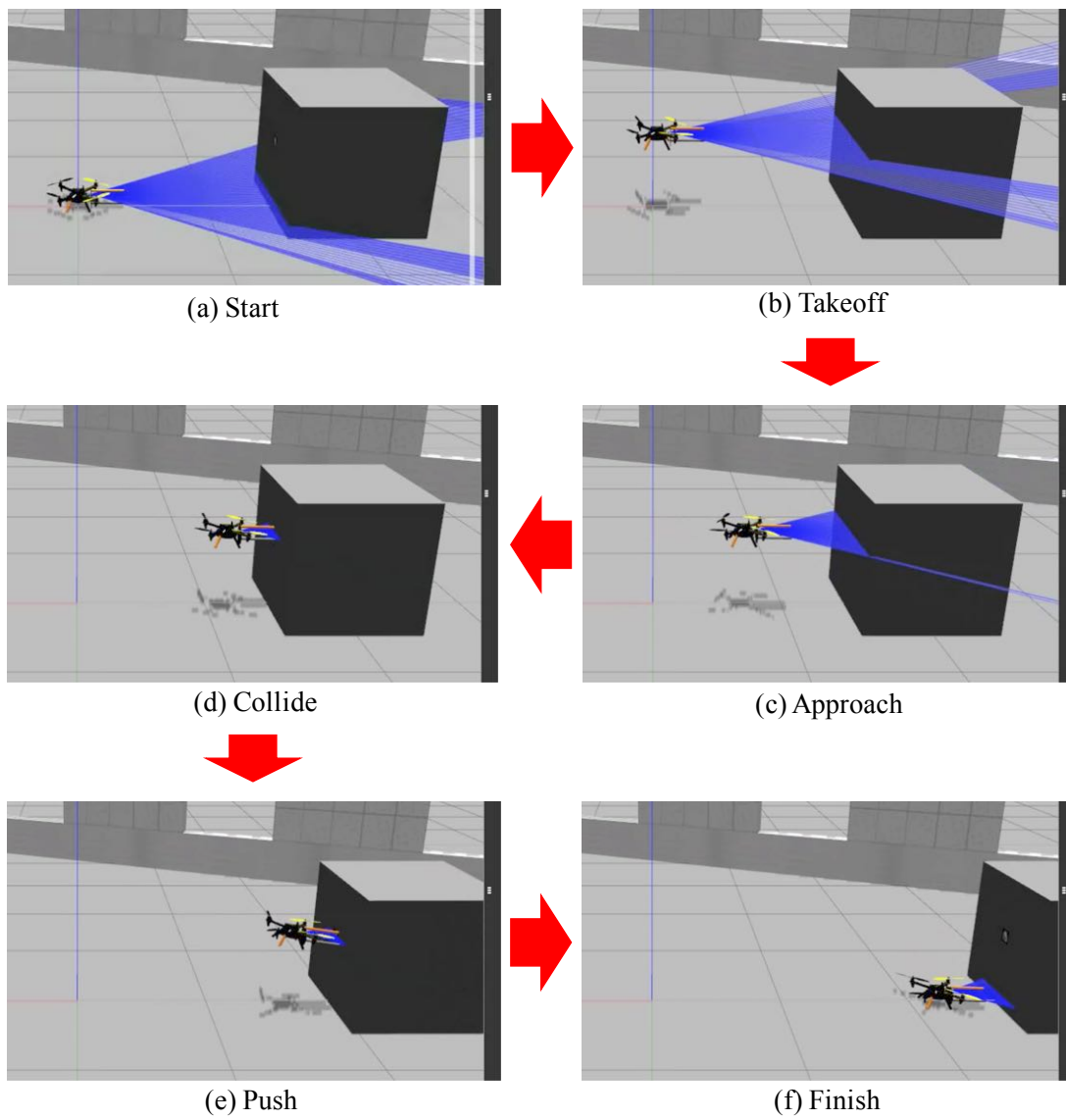
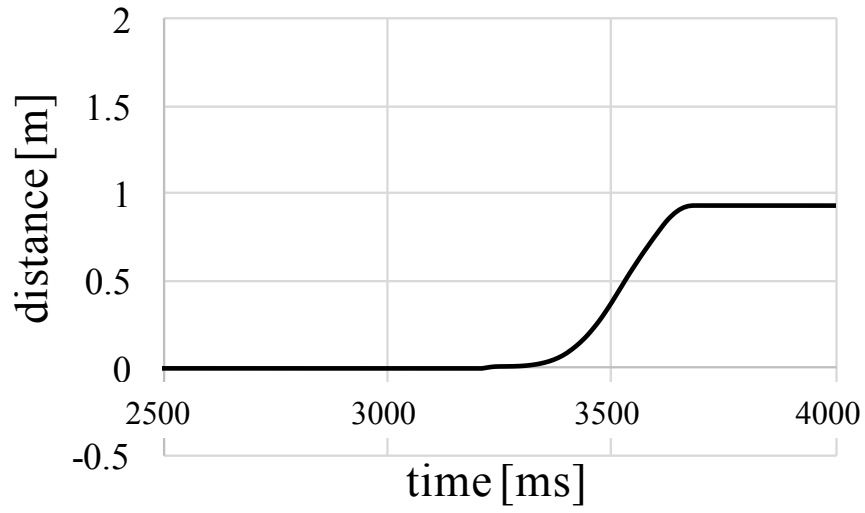
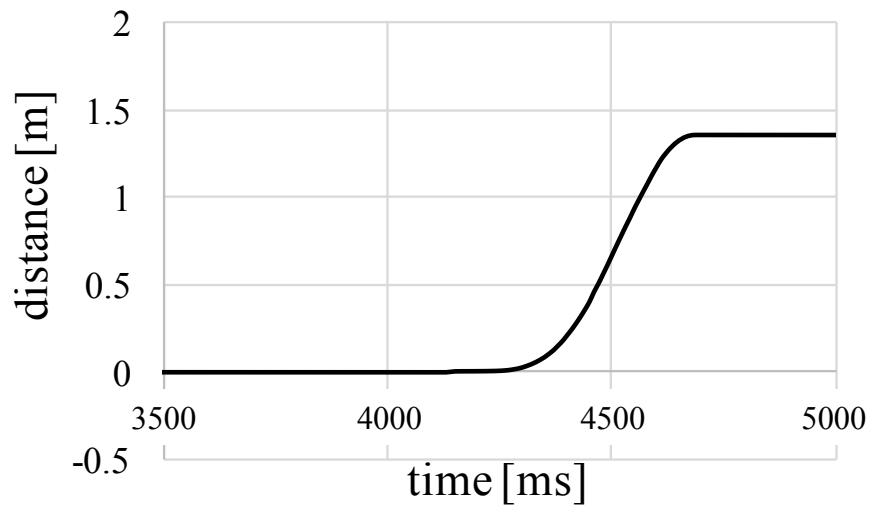


Fig. 4.7 Flow of simulation experiment

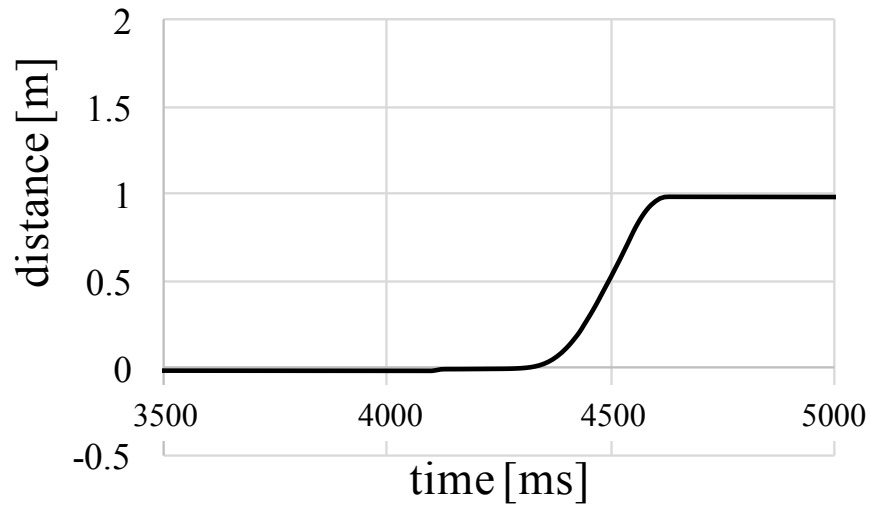


(a) 1 [m]

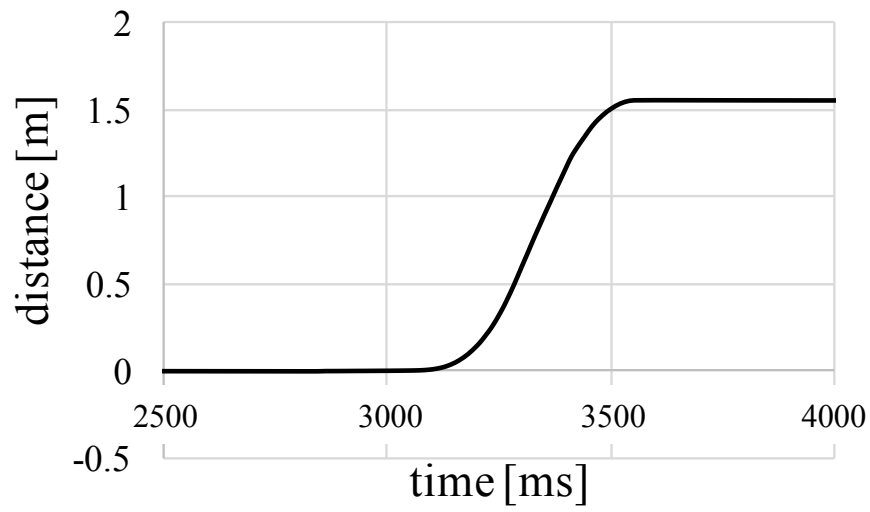


(b) 1.5 [m]

Fig. 4.8 Results of simulation experiment 1 [kg]



(a) 1 [m]



(b) 1.5 [m]

Fig. 4.9 Results of simulation experiment 2 [kg]

4.2 実機実験

実機実験については押し動作の簡易的な実験を試みたが、AR マーカーを利用した自己位置推定システムで安定した飛行ができなかった。この原因としては、シミュレーション環境と比較して、AR マーカー位置の推定精度が低かったこと、カメラ画像取得のフレームレートが低かったことが挙げられる。AR マーカー位置の推定精度については、マーカーのサイズを大きくすることや、複数のマーカーを用いることなどで改善が期待できる。また、カメラのフレームレートについては、カメラ画像取得用の ROS ノードの設定を変更することや、使用するカメラを変更することなどで改善が期待できる。これら自己位置推定の問題を解決し次第、実機実験に取り組みたいと考えている。

第 5 章 結言

5.1 まとめ

本研究では持ち上げ不能な物体の操作を目的としてマルチコプターによる押し動作を行った。マルチコプターによる押し動作を達成するために、マルチコプターと操作対象物の力学モデルを構築し、それらを組み合わせて押し動作の物理モデルとすることで、操作対象物の位置制御を可能にした。また、シミュレーション環境において提案手法の有効性を証明するために、異なる移動距離、重さの物体を対象として押し動作を行った。シミュレーション実験の結果から、期待する距離の押し動作を重さの変化に対してロバストに達成できることを確認した。シミュレーション実験の結果からは目標の距離に対して僅かな差が見られた。これは、AR マーカーによる自己位置推定の精度が十分でなかったことにより、操作対象物に十分に接近できていなかったことや、シミュレータ上で操作対象物が床にめり込むなどの物理エンジンの不具合が発生したことなどが原因であると考えられる。自己位置推定精度についてはマーカーのサイズを大きくすることやマーカーを複数設定することで、ある程度の改善が期待できる。物理エンジンの不具合については、接触面の設定を変更することや、接触面積を大きくするなどの対策が考えられる。

5.2 今後の課題

本研究では押し動作について述べたが、同様なアプローチで引き動作を行うことも可能であると考えられる。引き動作を行うことで、引き出しの操作やドアの開閉などへの応用も可能になると考えられる。また、本研究では簡略化のため、一方向に押すことを考えたが、ドアの開閉などへの応用を考えた場合、曲線を描きながら押し動作を行う状況も考えられる。その場合、2次元移動に対応した押し動作を検討する必要がある。今後の課題。

謝辞

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報科学専攻ロボティクス研究室で博士前期課程在籍中の研究成果をまとめたものである。

同専攻領域の小笠原司教授には本研究を遂行するにあたり様々なご指導，ご助言を賜りました。また，持病によって休みがちになった際にはご相談に乗っていただき，様々なご配慮を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

同専攻領域の杉本謙二教授には研究の中間報告に際し，様々なご指導，ご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

同専攻領域の高松淳准教授には，研究テーマや研究の進め方，論文の書き方などについて，様々なご指導，ご助言を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

同専攻領域の丁明助教には，実験設備や実験環境に関する相談に乗っていただき，様々なアドバイスを賜りました。ここに深く御礼申し上げます。

本研究室博士研究員の GARCIA RICARDEZ Gustavo Alfonso 氏には研究がうまく進まない際のアドバイスや英語添削などにおいて，様々なご指導を賜りました。ここに深くお礼申し上げます。

本研究室秘書の大脇美千代氏，池田美輝氏には，研究生活や事務手続きにおいて様々なサポートをいただきました。ここに深くお礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり，様々な意見やご助言をいただいた先輩，同期，後輩の皆様には深く感謝いたします。

最後に，母，祖父母には学費や持病の療養のため，経済的な面だけでなく精神的な面でも大きな支えになっていただきましたことに，心から感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] クオリティソフト株式会社 IOT ソリューション部, "ドローン空撮サービス", <https://drone-bc.jp/service/index.html>, (2018 年 1 月 23 日参照)
- [2] Amazon, Amazon prime air, <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?node=8037720011>, (2018 年 1 月 23 日参照)
- [3] 国土交通省, "平成 27 年度 次世代社会インフラ用ロボット (橋梁維持管理)", <http://www.mlit.go.jp/common/001107198.pdf>, (2018 年 1 月 23 日参照)
- [4] 計測検査株式会社, "ドローンによる目視検査", <http://www.keisokukensa.co.jp/drone2.pdf>, (2018 年 1 月 23 日参照)
- [5] 大西 義典, 高木 健, 青山 忠義, 石井 抱: "マルチコプタのための反動抑制機構を備えたロボットアームの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会公演概要集, No. 17-2, 1P1-R02, 2017.
- [6] Stefano Di Lucia, Gian Diego Tipaldi, Wolfram Burgard: "Attitude Stabilization Control of an Aerial manipulator using a Quaternion-Based Backstepping Approach," European Conference on Mobile Robots, DOI: 10.1109/ECMR.2015.7324191, 2015.
- [7] Gowtham Garimella, and Marin Kobilarov: "Towards Model-predictive Control for Aerial Pick-and-Place," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4692-4697, 2015.
- [8] 小島 宏行, 楽 燕群, 呉 大鵬, 高田 嘉之: "受動的コンプライアンス機構を有する 3 台の移動ロボットを用いた直方体形物体の押し搬送 (クロソイド曲線を用いた軌道計画と押し搬送の実験)", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.692, pp.994-1001, 2004.
- [9] Yuya Hakamata, Satoki Tsuchihiro, Jun Takamatsu, and Tsukasa Ogawara: "Whole body motion generation of humanoid robot using a predicted reaction force," IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2016), pp.95-100, 2016.
- [10] 杉山 敦, 堀 浩一: "クアドローター型 UAV による能動的衝突の制御", 人工知能学会全国大会, 2014.

- [11] 池田 貴公, 安井 彰悟, 藤原 元春, 大原 賢一, 芦澤 怜史, 市川 明彦, 沖野 晃久, 大道 武生, 福田 敏男:” マニピュレータを搭載した橋梁点検用 UAV ー第 1 報: 1 自由度マニピュレータを用いた床版への衝突を含む接触力制御の安定性ー”, 日本ロボット学会誌, Vol. 36, No. 1, pp. 57-65, 2018.
- [12] Guido Gioioso, Mostafa Mohammadi, Antonio Franchi, and Domenico Prattichizzo: “A Force-based Bilateral Teleoperation Framework for Aerial Robots in Contact with the Environment," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 318-324, 2015.
- [13] 福井友季也, Gustavo Alfonso Garcia Ricardez, 高松淳, 小笠原司:” マルチコプターの屋内利用に向けた飛行制御プラットフォームの開発”, 第 17 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, 3I3-5, 2016.
- [14] Applications of Artificial Vision (A.V.A) of the University of Cordoba, "ArUco: a minimal library for Augmented Reality applications based on OpenCV," <http://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26>, (2018 年 1 月 23 日参照)
- [15] Microchip Technology Inc., "PIC18F/LF1XK50 データシート", http://ww1.microchip.com/downloads/jp/DeviceDoc/41350D_JP.pdf, (2018 年 2 月 1 日参照)
- [16] <http://docs.erlerobotics.com/simulation>, (2018 年 1 月 25 日参照)