

# 博士論文

水平推進システムを備えたマルチロータ UAV

の開発と空中作業への応用

(Development of Multi-rotor UAV with Horizontal  
Propulsion System and Application to Aerial  
Manipulation)

2022年3月

立命館大学大学院理工学研究科

機械システム専攻博士課程後期課程

宮崎 遼

立命館大学審査博士論文

水平推進システムを備えたマルチロータ UAV の  
開発と空中作業への応用  
(Development of Multi-rotor UAV with Horizontal  
Propulsion System and Application to Aerial  
Manipulation)

2022 年 3 月

March 2022

立命館大学大学院理工学研究科

機械システム専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Advanced Mechanical Engineering and Robotics

Graduate School of Science and Engineering

Ritsumeikan University

宮崎 遼

MIYAZAKI Ryo

研究指導教員：下ノ村 和弘教授

Supervisor : Professor SHIMONOMURA Kazuhiro

## 論文要旨

マルチロータ UAV(Unmanned Aerial Vehicle) は、水平移動やブレーキ、また横風に対して機体位置を維持する際には、その飛行原理から姿勢が傾く。このことは、空中マニピュレーションのために機体に搭載しているエンドエフェクタの位置・姿勢を維持したり、水平方向に精密な位置決めを行う際には障害となる。また、水平方向の作業対象に安定して力を発生したい場合には機体姿勢を傾けたまま維持することが必要になり、不安定となる。本研究では、機体の姿勢を水平に維持したまま水平任意方向に安定して力を発生するために、水平推進システムを標準的なマルチロータ UAV に後付け搭載する手法を提案した。後付けした推進システムを、アドオン型水平並進駆動モジュールと呼ぶ。アドオン型水平並進駆動モジュールは三つのダクテットファンから構成される。これらの推力の合力として、水平面上の任意の方位に力を発生することができる。その制御は、マルチロータ UAV の姿勢制御とは独立に行えるため、制御器の設計が簡単であり、比較的精密な位置決めが容易に実現できる。試作したアドオン型駆動モジュールを搭載した UAV の移動特性を実験により評価し、想定した効果を確認した。また、空中作業への応用として、高所で高圧洗浄作業を行う飛行ロボットを開発した。

さらに、アドオン型水平並進駆動モジュールをマルチロータ本体から分離したエンドエフェクタの一部とみなし、マルチロータ機本体と作業対象の間に比較的大きな距離を確保しながら作業を実行するロングリーチ空中マニピュレーションへの応用に展開した。これは、ダウンウォッシュの機体下方の対象物への影響を避けたい場合や、作業点の周囲が狭くマルチロータ機本体が作業点に近づけない場合に有効な手段となる。本研究では、ロボットハンドを搭載したアドオン型水平並進駆動モジュールを、ウィンチ機構を備えたマルチロータ UAV から 2 本のワイヤで吊り下げる手法を提案した。アドオン型水平並進駆動モジュールにより、ワイヤで吊り下げたロボットハンドの揺れを抑えることで、対象物の 5m 上方を飛行しながらピックアンドプレース作

業を実現した。マルチロータ機本体とワイヤで吊り下げたエンドエフェクタ間の無線通信により，水平方向への飛行移動中でもロボットハンドの位置を機体の直下に保つ機能や，地上から一定の高さに維持する機能を実現した。

## Abstract

We propose an add-on planar translational driving system (ATD) which can be equipped on a multirotor platform for aerial manipulation. The device consists of three ducted fans. It uses a simple control method and enables a multi-rotor UAV to perform positioning and generate stable force while keeping the airframe horizontal. It can be more smoothly and easily perform many types of aerial manipulation tasks with higher positioning accuracy. In this study, we mainly show the design, modeling, and control of the ATD. Several preliminary experiments were performed to verify the positioning accuracy and effectiveness of the system. In addition, we successfully performed the push and pull task using a rigid arm. As an aerial application, we developed a aerial robot that can perform high-pressure cleaning work at high altitudes.

Furthermore, the ATD can be considered as a part of the end-effector separated from the main body of the multi-rotor UAVs, and was developed for long-reach aerial manipulation, in which work is performed while maintaining a relatively large distance between the multi-rotor UAV and the work target. This is an effective method to avoid the influence of downwash on the object below the aircraft or when the multi-rotor UAV cannot approach the work point due to the narrow circumference of the work point. In this study, we proposed a method that an ATD equipped with a robotic hand is suspended by two wires from a multi-rotor UAV equipped with a winch mechanism. By suppressing the swinging of the wire suspended robot hand, we realized the pick-and-place task while flying 3.5 m above the object. Wireless communication between the multi-rotor UAV and the wire-suspended end-effector enabled the robot hand to maintain its position directly under the multi-rotor UAV and keep a constant height above the ground during the flight.

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
<b>第2章</b>	<b>マルチロータ UAV とその応用</b>	<b>4</b>
2.1	飛行原理 . . . . .	4
2.2	基本構成 . . . . .	5
2.3	フライトコントローラ . . . . .	7
2.3.1	Pixhawk . . . . .	7
2.3.2	DJI N3/A3 . . . . .	9
2.4	空中マニピュレーション . . . . .	9
<b>第3章</b>	<b>水平推進システムを備えたマルチロータ UAV の構成</b>	<b>14</b>
3.1	ダクテットファンの動作原理 . . . . .	17
3.2	ATD モジュールの設計 . . . . .	19
3.3	マルチロータ UAV への実装 . . . . .	22
3.4	制御システム . . . . .	24
3.5	ATD モジュールの力計測 . . . . .	25
<b>第4章</b>	<b>水平推進システムを備えたマルチロータ UAV の基本特性</b>	<b>27</b>
4.1	通常飛行と ATD 飛行モードの比較実験 . . . . .	27
4.2	位置決め実験 . . . . .	29
4.3	Waypoint 飛行実験 . . . . .	30
4.4	全方位における位置決め実験 . . . . .	31
4.5	ATD モジュールによるマルチロータ UAV の押し引き作業 . . . . .	32
<b>第5章</b>	<b>高圧洗浄作業への応用</b>	<b>35</b>
5.1	高圧洗浄機ノズルの水噴射時の力計測 . . . . .	36
5.2	ATD モジュールの再設計 . . . . .	37

5.3	飛行ロボットシステム	39
5.4	水噴射実験	42
<b>第6章</b>	<b>ロングリーチ空中マニピュレーション</b>	<b>45</b>
6.1	ロングリーチ空中マニピュレーションの応用	49
6.1.1	ピックアンドプレース作業	49
6.1.2	障害物回避およびインフラ点検作業への応用	50
6.2	ウィンチ機構の開発とマルチロータ UAV への実装	52
6.2.1	ウィンチ機構	52
6.2.2	システム構成	55
6.3	ワイヤ懸架ハンドの開発	57
6.3.1	揺れ抑制シミュレーション	57
6.3.2	ワイヤ懸架ハンドの設計	61
6.3.3	システム構築	63
6.4	マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドの通信構築	64
6.5	センシング	69
6.5.1	ピックアンドプレース作業のための画像処理	69
6.5.2	マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドの相対位置推定	71
6.5.3	ウィンチ機構の制御のためのワイヤ懸架ハンドと地面間の距離計測	74
6.6	制御	77
6.6.1	ワイヤ懸架ハンドの揺れ抑制制御	77
6.6.2	ワイヤ懸架ハンドの位置制御	79
6.6.3	通信を介したワイヤ懸架ハンドの位置制御	82
6.6.4	ウィンチ機構の制御	87
6.7	飛行実験	89
6.7.1	揺れ抑制実験	89
6.7.2	ピックアンドプレース実験	92
6.7.3	マルチロータ UAV と通信を介したワイヤ懸架ハンドの制御実験	94
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>103</b>





# 目次

1.1	ドローンの産業利用に関する市場規模予測 ([1] のデータに基づいて作成).	2
2.1	マルチロータ UAV の飛行原理.	4
2.2	マルチロータ UAV の基本システム構成.	6
2.3	Pixhawk フライトコントローラ (左) と DJI N3 フライトコントローラ (右).	7
2.4	空中マニピュレーションにおけるマルチロータ UAV の作業域.	10
3.1	マルチロータ UAV の並進とブレーキ動作に伴う姿勢変化がマニピュレータの効果器に及ぼす影響.	14
3.2	アドオン型水平並進駆動モジュール (ATD) を搭載したマルチロータ UAV (a). 狭い空間, 天井, 壁面などでの高所作業を想定した提案手法の応用 (b-d)[93].	16
3.3	ダクテッドファンの動作原理.	18
3.4	(a) ATD モジュールの全体図と (b) そのモデル. 点線の領域は合成可能な力の領域を示す. 座標軸はマルチロータ UAV の機体座標系と一致する [93].	20
3.5	ATD モジュールを搭載したマルチロータ UAV の全体図と使用デバイス [93].	23
3.6	ATD モジュールとマルチロータ UAV のシステム構成 [93].	23
3.7	力計測の実験風景 [93].	26
3.8	力計測結果に基づく ATD モジュールの入出力関係図. 点線は近似式 $F = 0.0826u_{thrust} + 0.1274$ を示す [93].	26

4.1	通常飛行と ATD 飛行モードの比較実験結果. グラフは各飛行モードにおけるマルチロータ UAV の移動から停止までの速度 (上図) と姿勢 (下図) 変化を示す [93]. . . . .	27
4.2	(a) 通常飛行と (b)ATD 飛行モードの比較実験における連続画像. 画像は左から右の順であり, 図 4.1 の 7-9 秒間と一致する [93]. . . . .	28
4.3	位置決め実験結果 [93]. . . . .	29
4.4	0.2m ごとに目標位置を変化させた場合の位置決め実験結果 [93]. . .	29
4.5	Waypoint 飛行実験結果. . . . .	31
4.6	全方位における位置決め実験方法 (左図) と実験結果 (右図)[93]. . . .	32
4.7	(a) 押しと (b) 引き作業の連続画像. 赤い領域は目標物体を示す [93].	33
4.8	(a) 押しと (b) 引き作業の間のマルチロータ UAV の姿勢変化 [93]. . .	33
5.1	アドオン型水平並進駆動モジュールを搭載したマルチロータ UAV の高圧洗浄作業. . . . .	35
5.2	高圧洗浄機の水噴射時に発生する力の計測実験風景. . . . .	36
5.3	高圧洗浄機ノズルの水噴射時に発生する力の計測結果. . . . .	36
5.4	(a)ATD モジュールのマルチロータ UAV への配置図, (b)ATD モジュールの実装図, (c)ATD モジュールのモデル. . . . .	37
5.5	ATD モジュールの入出力関係図. 点線は近似式 $F = 0.1319u_{thrust} - 0.0706$ を示す. . . . .	38
5.6	ATD モジュールを搭載した高圧洗浄用マルチロータ UAV の全体図.	40
5.7	高圧洗浄用マルチロータ UAV のシステム構成. . . . .	40
5.8	水噴射飛行実験の連続画像. 赤い点線はマルチロータ UAV の移動軌跡を示す. . . . .	42
5.9	水噴射時のマルチロータ UAV の移動軌跡とその時系列データ. . . .	43
5.10	水噴射時のマルチロータ UAV の速度 (上図) と姿勢 (下図) 変化. . . .	43
6.1	ロングリーチ空中マニピュレーションが求められる場面. . . . .	45

6.2	ワイヤ懸架ハンドを利用したロングリーチ空中マニピュレーション. ピックアンドプレース作業時にはワイヤ懸架ハンドをマルチロータ UAV から 3m(左図) 吊り下げた. 遠距離移動時にはワイヤ懸架ハンドをつり上げ(右上図), マルチロータ UAV の直下に収めた状態(右下図)にできる [80](©2019 IEEE). . . . .	48
6.3	ロングリーチ空中マニピュレーションにおけるピックアンドプレース作業. 作業対象が複数ある場合にはワイヤ懸架ハンドを伸ばした状態で作業を繰り返す方が効率が良い, この場合には揺れ抑制が必要となる [80](©2019 IEEE). . . . .	49
6.4	飛行中におけるワイヤ懸架ハンドの状態(マルチロータ UAV は図の左方向を向かって飛行). 左図はワイヤ懸架ハンドに位置制御を適用させない場合の状態を示し, マルチロータ UAV の移動速度が速いほどワイヤ懸架ハンドのずれが大きくなる. 右図は位置制御を適応させた場合の状態を示し, 飛行中に常にハンドをマルチロータ UAV の直下に位置を保つことができる [81]. . . . .	50
6.5	ワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV 間の通信 ([81] により作成). . . . .	51
6.6	通信を介したワイヤ懸架ハンドの位置制御による障害物回避作業の方法 [81] . . . . .	52
6.7	ウィンチ機構の全体図 (version 1)[80](©2019 IEEE). . . . .	53
6.8	ウィンチ機構の全体図 (version 2)[81]. . . . .	54
6.9	ウィンチ機構を搭載したマルチロータ UAV のシステム構成 [58](©2018 IEEE). . . . .	56
6.10	ワイヤ懸架物の揺れを想定したモデル. 揺れはピッチとロール方向に分けて考える. $L_1$ と $L_2$ はワイヤの長さでワイヤ間の距離を示す. ワイヤ懸架物の姿勢とワイヤが傾いた角度は一致すると仮定する [80](©2019 IEEE). . . . .	58
6.11	ワイヤ懸架物の揺れが自然に収まるまでの姿勢変化(上図)とシミュレーションによりその揺れを再現(下図)した結果図. シミュレーター上で調整したパラメーターは揺れ抑制シミュレーションに使用した [80](©2019 IEEE). . . . .	59

6.12	揺れ抑制制御のシミュレーション結果. グラフは, $K_p=0$ にし, $K_v$ だけを調整した場合 (上図), $K_v=0$ にし, $K_p$ だけを調整した場合 (中図), $K_p$ と $K_v$ 両方調整した場合 (下図) の結果を示す [80](©2019 IEEE).	59
6.13	MATLAB 上の揺れ抑制制御シミュレーションのブロック図. . . . .	60
6.14	ワイヤ懸架ハンドの構成図. 左上図と右上図はダクテットファンの配置と座標系, 力の方向を示す. ダクテットファンから発生する推力 ( $F_1, F_2, F_3$ と $F_4$ ) を調整することでロールピッチ方向における揺れを抑えることができる. ワイヤ懸架ハンドには, RGB-D カメラと CPU ボードで構成されるビジョンシステムも搭載されている [80](©2019 IEEE). . .	62
6.15	ワイヤ懸架ハンドの把持とビジョンシステムを含めたシステム構成図 [80](©2019 IEEE). . . . .	63
6.16	通信を介した制御のためのマルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドのハードウェア構成 [81]. . . . .	66
6.17	双方向通信を含めたマルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドのシステム構成 [81]. . . . .	67
6.18	カメラ方向と作業物体の検出. (a) 物体把持まではカメラは斜め下方向を向き, 赤色の領域を検出し, (b) 物体を把持する. (c) 物体が把持できるとカメラは下方向を向き, 物体を置くための場所である青色の領域を検出する. ピックアンドプレース作業のために, 把持物体には赤いマークで囲い, 目標位置には青色のシートを置いた. ([80] により作成, ©2019 IEEE) . . . . .	69
6.19	ピックアンドプレース作業における処理アルゴリズム. . . . .	70
6.20	マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドの座標系. 右上図はマルチロータ UAV に搭載したカメラによるマーク検出結果と画像座標系を示し, 右下図はマルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドの位置関係を示す [81].	73
6.21	ステレオカメラの距離計測方法. . . . .	75
6.22	ステレオ魚眼カメラ (Realsense T265) によりステレオマッチング方法.	76
6.23	揺れ抑制制御実験の風景. . . . .	78
6.24	揺れ抑制実験の結果. ワイヤ長は 3m に設定した [80](©2019 IEEE).	79
6.25	ワイヤ懸架ハンドの位置制御における実験風景. . . . .	80
6.26	ワイヤ懸架ハンドの位置制御の実験結果. . . . .	82

6.27	マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドのモデル (左図). 右図はワイヤ懸架ハンドのダクテットファンの配置を示す [81]. . . . .	83
6.28	通信を介したワイヤ懸架ハンドの位置制御における屋内実験風景. . . . .	85
6.29	ワイヤ懸架ハンドの位置決め実験結果. 上図は制御しない場合, 真中図は揺れ抑制制御を適応させた場合, 下図は通信を介した位置制御を適応させた場合のマルチロータ UAV に対するワイヤ懸架ハンドの位置変化を示す [81]. . . . .	86
6.30	ウィンチ制御の実験風景. . . . .	88
6.31	実験結果. 地面に対する目標高さは 0.8m に設定した. . . . .	89
6.32	ワイヤ懸架ハンドの揺れ抑制の飛行実験方法 [80](©2019 IEEE). . . . .	90
6.33	飛行実験結果. 上図は揺れ抑制をしない場合, 下図は揺れ抑制を適応させた場合のワイヤ懸架ハンドの姿勢変化を示す [80](©2019 IEEE). . . . .	91
6.34	ピックアンドプレース作業の実験方法 [80](©2019 IEEE). . . . .	92
6.35	ピックアンドプレース作業の実験結果. 上図はピックアンドプレース作業の連続画像を示し, ① から f ⑧ の順である. 各画像の左上と右上の画像はワイヤ懸架ハンドに搭載されたカメラからの画像である. 下図はピックアンドプレース作業の間のワイヤ懸架ハンドの姿勢変化を示す [80](©2019 IEEE). . . . .	93
6.36	マルチロータ UAV のウィンチ制御における飛行実験の方法. . . . .	95
6.37	実験結果, 上図はワイヤ懸架ハンドから地面までの距離を示しており, 目標高さは 0.6m に設定した. 下図はワイヤ懸架ハンドの姿勢変化を示す [81]. . . . .	96
6.38	通信を介したワイヤ懸架ハンドの位置制御 (上図) と位置制御を適応しない場合 (下図) の比較実験. 連続画像は 1-4 の順に従う [81]. . . . .	97
6.39	実験結果. 上図は通信を介した位置制御を適応した場合と適応しない場合におけるマルチロータ UAV が進行した方向 ( $X_s$ 軸) のワイヤ懸架ハンドとの相対位置を示し, 下図は進行方向と直行する方向 ( $Y_s$ の相対位置) を示す [81]. . . . .	98
6.40	ワイヤ懸架ハンドの障害物回避実験の方法 [81]. . . . .	99

6.41	障害物回避実験の連続画像 (上図) と実験結果. 連続画像は①-④である. 実験結果のグラフはワイヤ懸架ハンドとその直下の平面間の距離を示す [81]. . . . .	100
6.42	実験結果. グラフは障害物回避実験の間, ワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV の $X_s$ 軸と $Y_s$ 軸上相対位置変化を示す [81]. . . . .	101

# 表 目 次

3.1	ATD モジュールの仕様 . . . . .	20
5.1	高圧洗浄のための ATD モジュールの仕様 . . . . .	38
6.1	ウィンチ機構の仕様 (version 1 と version 2 は同じ仕様). ([58] により作成, ©2018 IEEE) . . . . .	55
6.2	ワイヤ懸架ハンドの仕様 ([80] により作成, ©2019 IEEE). . . . .	63

# 第1章 序論

ドローンと呼ばれるマルチロータ型無人航空機 (UAV : Unmanned aerial vehicle) は近年、世間から多くの注目を浴びるようになってきた。マルチロータ UAV は垂直離着陸が可能で、空中で安定してホバリングすることができる。また、GPS、慣性計測センサ、電子コンパスなどが搭載されており、これらのセンサ情報を統合してプロペラの回転を制御するフライトコントローラーが搭載されるため、手動操作の難易度はかなり低く、これらのセンサデータに基づいた自動飛行も可能である。また、制御が簡単であるため、制御パラメータの調整が手軽に行える。更に、構造は非常に単純であり、メンテナンスもしやすいため、運用コストを低く抑えることができる。これらの性質により、マルチロータ UAV で空撮を行った場合、従来から使われてきたシングルロータ型のヘリコプタでの空撮よりも圧倒的にコストが低く、撮影画像も安定し、高品質であったため、需要が一気に広がり、2010年からは本格的な商用化が進んできた。

マルチロータ UAV が普及し始めた当初では空撮が主な用途であったが、その後、物流や農業の分野での使用も検討され始めた。物流分野では、Amazon やセブンイレブンがマルチロータ UAV を使った宅配サービスの実証実験を行い、物流におけるマルチロータ UAV の活用方法が世界各国で検証されている。農業分野では主に農薬散布の場面でマルチロータ UAV が活躍している。これらのマルチロータ UAV を使った活用方法から始め、現在は土木・建築、防犯、屋内、インフラ点検、モニタリングなどの幅広い場面での使用も検討され、普及されつつある。世界的に少子高齢化に伴う慢性的な人材不足が進んでいる中、マルチロータ UAV の活用が期待される分野が広がりつつあり、その市場規模も大きくなりつつある。インプレス総合研究所が発刊しているドローンビジネス調査報告書 [1] に基づくと、マルチロータ UAV によるサービスの市場規模は、図 1.1 に示すように 2025 年では、屋内使用が 210 億円、物流関連では 797 億円、防犯分野では 131 億円、農業では 1000 億円、インフラなどの点検分野では 1625 億円、土木・建築の分野では 245 億円、空撮では 91 億円へと成長すると予測さ



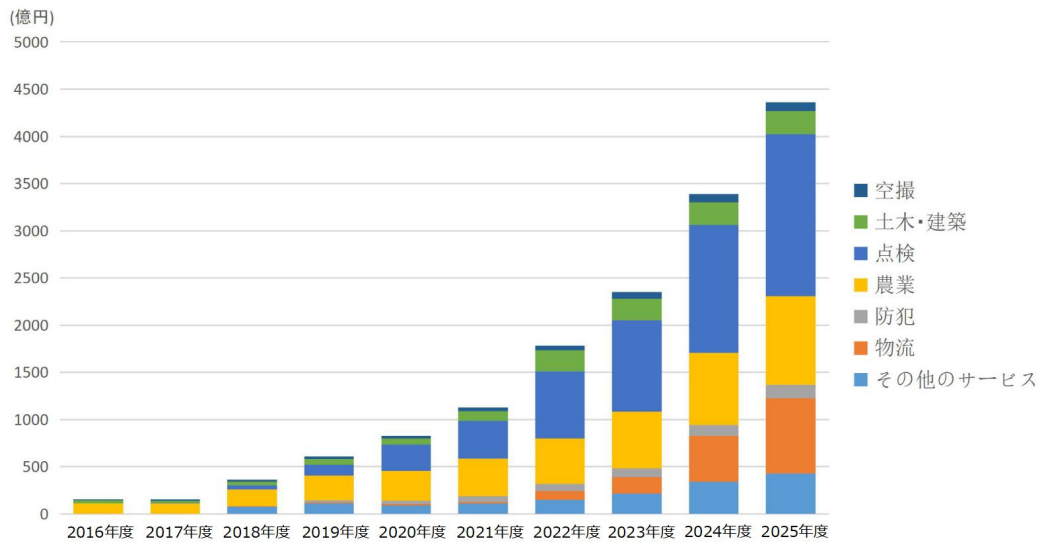


図 1.1: ドローンの産業利用に関する市場規模予測 ([1] のデータに基づいて作成)。

れている。また、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) では現在、「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト」を進めている。このような背景には、深刻な人材不足が加速化していると考えられる。特にインフラ点検に関しては、国土交通省の統計データに基づくと、本来5年に一度点検が義務化されている橋梁やトンネル、湾岸設備などへの点検実施状況は50%未満である。そこで、これらのインフラ点検の現場でマルチロータ UAV が普及し始め、橋梁、鉄塔、発電設備、船舶などを対象とする構造物へのマルチロータ UAV の活用の効果も明確になってきた [1]。

現在、マルチロータ UAV を使用したインフラ点検における活用事例では、主にマルチロータ UAV が安定して空撮が可能である性質を利用し、人の目視作業をマルチロータ UAV に代替している。しかし、インフラ点検では目視作業だけでなく、打音検査を始めとする、構造物への接触が必要な場面も存在する。マルチロータ UAV の次世代の応用として、マルチロータ UAV の自律性、安定性、運動能力に焦点を置き、マルチロータ UAV の本体にマニピュレータを搭載することで、3次元物理空間において、物体操作や接触を行う空中マニピュレーションに関する研究が世界中で行われている。空中マニピュレーションにおける課題としては、作業対象に対する位置決め、力制御が挙げられる。標準的なマルチロータ UAV は構成上、位置と姿勢は連動して

動くようになっており、移動の際には姿勢が傾く。そのため、打音検査などの場面において、細かく位置決めしながら点検作業を実施したい場合への対応が難しい。また、作業対象に安定して力を作用させたい場合は、姿勢を傾ける必要があるが、その反作用力は機体に作用され、バランスを崩しやすくなる。そこで本研究では、マルチロータ UAV に水平推進システムを搭載することで水平方向に安定して力を発生できる手法を提案し、その応用を検討した。更に、水平推進システムをエンドエフェクタとみなし、マルチロータ UAV から吊り下げることによって、機体から距離を確保したい場合の高所作業 (ロングリーチ空中マニピュレーション) への応用に展開できる。

本論文は総7章で構成される。第2章ではマルチロータ UAV が飛翔する基本原理、フライトコントローラ、オンボードコンピュータを介してセンサやアクチュエーターを機体に統合するためのシステムの基本構成、空中マニピュレーションの応用について説明する。第3章では水平推進システムの設計や動作原理、システム構成について説明する。第4章では、開発した水平推進システムの基本特性について説明する。第5章では、水平推進システムを備えたマルチロータ UAV の高所高圧洗浄作業への応用について説明する。第6章では、水平推進システムをエンドエフェクタとして利用したロングリーチ空中マニピュレーションへの応用について説明する。第7章では、これまでに行った研究についてまとめ、今後の課題や展望について説明する。

# 第2章 マルチロータ UAV とその応用

## 2.1 飛行原理

マルチロータ UAV は、プロペラの高速回転により上下方向にて気圧差を生じさせ、揚力が発生する。その推力で空を飛ぶことができ、重力と推力が釣り合ったときに空中でホバリング状態を維持することができる。プロペラの回転数は推力と正比例の関係であり、プロペラの回転数の制御により推力を調整することができる。

マルチロータ UAV の運動は主に、垂直方向における上昇下降、ロール、ピッチ、ヨーの4つの動作で構成される。図 2.1 に示すように、クアットロータを事例にマルチロータ UAV がホバリング状態を維持するために必要な回転数を  $\omega_b$  とする。図 2.1 (1) に示すように、四つのモータの回転数を同時に上げ下げすることで、マルチロー

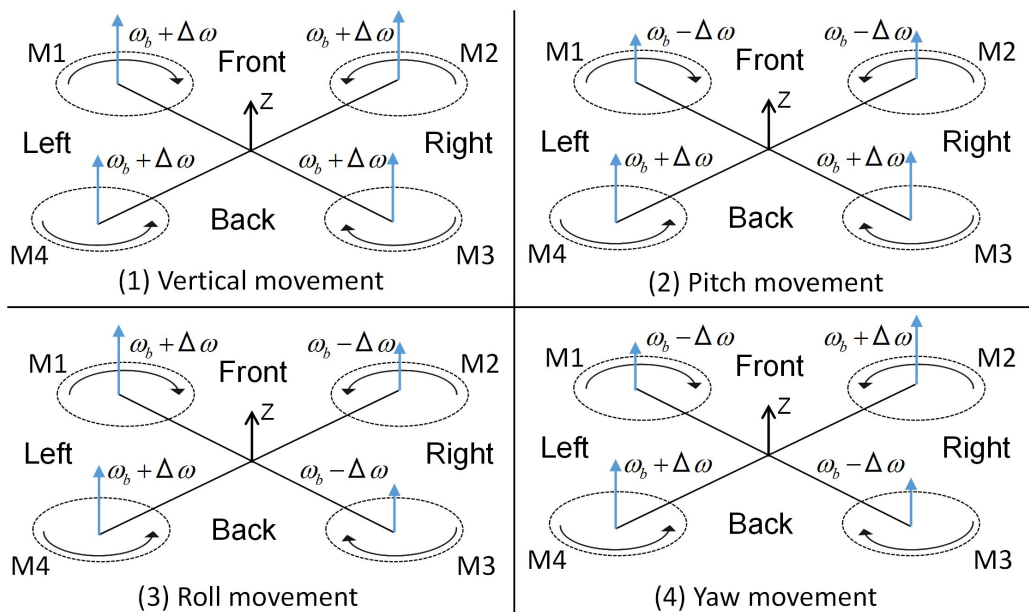


図 2.1: マルチロータ UAV の飛行原理.

タ UAV の上昇下降動作が実現できる．図 2.1 (2) に示すように，マルチロータ UAV をピッチングさせるためには，モータ M1 と M2，モータ M3 と M4 をセットにして同時に回転数を制御することで実現できる．マルチロータ UAV をローリングさせるためには，図 2.1 (3) に示すように，モータ M1 と M4，M2 と M3 をセットに同時に回転数を制御すればよい．ヨーイングに関しては，図 2.1 (4) に示すように，モータ M1 と M3，M2 と M4 をセットに，同じ方向に回転するモータ同士の回転数を制御することで，時計反時計回りに機体を回転させることができる．

マルチロータ UAV は原理的に姿勢と位置は連動して動くものであり，RC 受信機からの信号と慣性計測装置，GPS などのセンサからの情報フィードバックに，上述の四つの動作をプロポの操縦により制御可能にしたものがフライトコントローラである．

## 2.2 基本構成

フライトコントローラはマルチロータ UAV を安定して飛行させるための最も重要なデバイスである．フライトコントローラには 3 軸ジャイロ，3 軸加速度，3 軸磁気センサと気圧センサなどが内蔵されており，機体の姿勢と高度情報が推定できる．また，外部センサとして GPS やコンパスがあり，内部のプロセッサでこれらの情報を統合することでグローバル座標系を基準とする位置推定を行うことができる．推定された位置姿勢情報を元に機体のプロペラの回転数が制御され，一般的な操縦モードで特に操作しない場合は空中でホバリング状態が維持でき，操縦する場合はプロポのスティックを倒した分だけ機体が傾くように制御され，直観的なマルチロータ UAV の操縦が可能となる．

一方，フライトコントローラは外部機器と通信可能なプロトコルが用意されており，Linux の OS が入った CPU ボードとの通信を通じて制御指令を受け取ったり，フライトコントローラの内部情報を CPU ボードに送ることが可能である．空中マニピュレーションにおいて最も一般的な構成を図 2.2 に示す．マルチロータ UAV を直接操縦する場合には CPU ボードなどが必要ないが，自動で作業を行う場合にはフライトコントローラと GPS だけでは位置決め精度が足りず，ロボットアームの制御や位置決め精度を上げるためにはカメラなどの追加のセンサが必要となる．これらの処理は主に CPU ボード上で行われ，例えば，フライトコントローラから受け取ったセンシング情報と追加のセンサの情報を統合することでセンシングを行い，マルチロータ

UAVの制御指令をフライトコントローラに送ることで運動制御を行い、ロボットアームの制御を行うこともできる。これらの処理をオンボード処理と呼び、基本的にマルチロータ UAV のローレベルの制御はフライトコントローラに任せ、CPU ボードでは機体の位置や速度、姿勢を制御入力とするハイレベルな制御を行う。

以上で述べたようにフライトコントローラはマルチロータ機において心臓部にあたり、重要な役割を果たしているため、デバイス自体の精度も空中マニピュレーションを行う上で非常に大事になってくる。現状、研究グループによっては自作のフライトコントローラを用いる場合もあるが、3DR 社が発売しているオープンソースのフライトコントローラ Pixhawk や DJI 社が発売している DJI N3/A3 を使用して二次開発を行うのが空中マニピュレーションに関する研究分野では主流となっている(図 2.3)。フライトコントローラと CPU ボード間の通信を行うには、どちらも ROS(Robot Operating System) が使用でき、Pixhawk の場合は Mavros, DJI N3/A3 の場合は Dji SDK が提供されている。Mavros と Dji SDK を通じて実現可能なことはほぼ同じである。フライトコントローラから受け取られる情報としては、機体の位置姿勢、速度、加速度、ステータス(機体の飛行モード、離着陸状態など)などがある。CPU ボードからフライトコントローラに送信可能な制御入力としては、機体の目標姿勢 (roll,

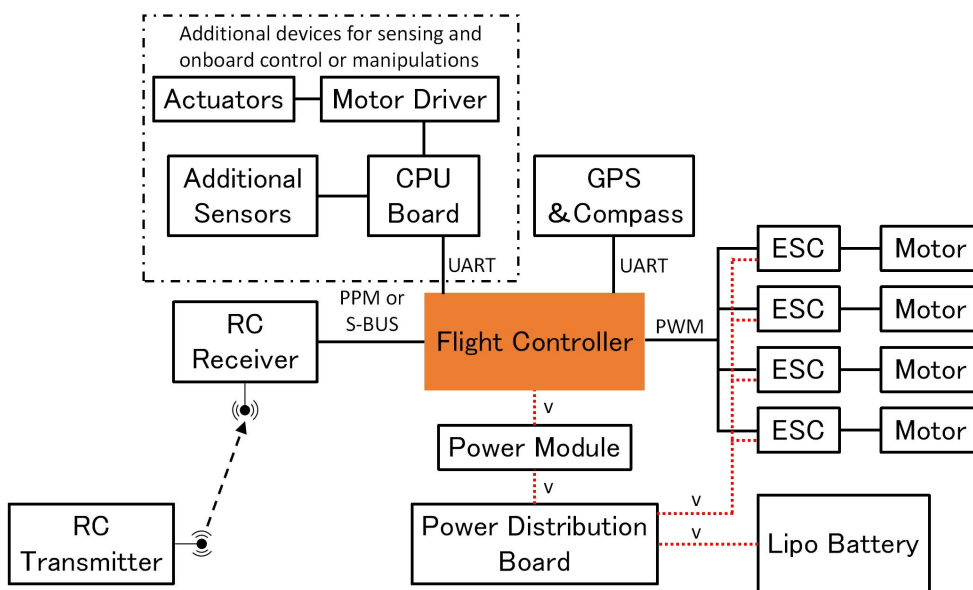


図 2.2: マルチロータ UAV の基本システム構成。

pitch, yaw のラジアン角), 位置, 速度, 加速度があり, 更に機体の起動や離着陸の指令やグローバル座標系に基づく複数の目的地が指定できるウェイポイント飛行などがある. 位置や速度を制御入力としたい場合は, スタンダードなセットアップではフライトコントローラが正確な自己位置や速度が推定できないため, 正確に制御できず, カメラやライダなどの追加のセンサが必要となる. 一方, 位置, 速度, 加速度を制御入力とする場合, Pixhawk では座標系が NED 座標系のみ固定されているため, 目標の位置や姿勢にするためには座標系の変換が必要となり, Dji N3/A3 の場合は予め座標系を NED と機体基準に設定できるため, その分の計算コストは低減できる.

## 2.3 フライトコントローラ

### 2.3.1 Pixhawk

Pixhawk フライトコントローラは世界で最も主流になっているオープンソースのフライトコントローラであり, 導入可能なファームウェアは APM(ArduPilotMega)[53] と PX4[55] がある. 地上局に該当するソフトウェアは APM の場合は Mission Planner, PX4 の場合は Qground Control が対応され, マルチロータ UAV のキャリブレーションや制御パラメータの設定ができる.



図 2.3: Pixhawk フライトコントローラ (左) と DJI N3 フライトコントローラ (右).

APMはファームウェアの名称でもあり、2009年から2012年まで発売されたArduPilot, APM 1, APM 2, APM 2.5/2.6 フライトコントローラの型番も示しており、Pixhawkの前代のフライトコントローラに該当する。APMはDIY Drones コミュニティから開発されたフライトコントローラであり、Atmega2560 プロセッサをベースに3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサ、磁器センサ、気圧センサ、GPS モジュール、電圧計、4Mbのメモリーカードなどを一体化したPCBボードで構成される。このフライトコントローラはArduinoのプラットフォームで開発されたものであるため、Arduino IDEの環境で開発が可能である。しかし、APMは8ビットのプロセッサを使用しており、2012年に発売されたAPM2.5/2.6の時点でプロセッサの処理性能は限界に達したため、複雑な演算に対しては運用しにくくなった。そこで3DR社から発売されたPixhawkが2013に登場した。Pixhawkには二つのプロセッサが内蔵され、一つは演算能力の高い32bit STM32F427 Cortex M4 Core 168 MHz/256 KB RAM/2 MB Flashを採用しており、もう一つは工業用途のプロセッサ32 bit STM32F103を採用しており、このプロセッサの特徴はその安定性にある。つまり、主な演算を行うプロセッサがフリーズしてももう一つのプロセッサの稼働により、安全性を確保できる。また、内蔵されているジャイロ、加速度、気圧センサなどの型番やPCBボードの回路、原理図はすべて公開されている[54]。一方、従来のAPMのソースコードはハードウェア的な制約があったため、Pixhawkのプラットフォームに移植された。

PX4はPixhawkのハードウェアのプラットフォームをベースにスイス連邦工科大学チューリッヒ校の研究グループやAPM, 3D Robotics, international 3DR distributorsの開発者らが共同で開発したファームウェアである。PX4はNuttXリアルタイムシステムを導入しており、ROSと同様に各処理はノードベースに設計されたため、システムの構造が明確になっており、手軽にソースコードを変えることが可能である。しかし、APMに比べ、マルチロータ UAVの飛行安定性は低い問題があり、安定飛行を行うためには細かく制御パラメータを使用機体に応じて飛行させながら設定する必要がある。しかし、APMの場合、ソースコードの構造が非常に複雑である。また、ソフトのリリースにかかわっている開発者が多いため、プログラミングのスタイルは人それぞれになっている。そのため、そのままマルチロータ UAVに使う場合は安定性が高いが、ソースコードを理解するのは難しく、目的に応じて変えるのは非常に時間がかかる。一方、Pixhawkはマルチロータ UAVだけでなく、固定翼型飛行ロボットやVTOL機、シングルロータ型飛行ロボット、地上ロボットや水中ロボットなどのコ

ントローラとしても対応されており、本研究ではワイヤ懸架ハンドの初期バージョンは Pixhawk を用いて開発した。

### 2.3.2 DJI N3/A3

DJI 社は空撮ドローンを主に発売している会社であり、2018 年に Skylogic Research 社が発表したドローン市場調査報告書によると、DJI 社のドローンは市場の 7 割以上のシェア率を占めていた。DJI 社は空撮のためにすべてが一体化した PHANTOM シリーズのドローンだけでなく、DJI Naza シリーズや DJI A2 などのフライトコントローラを単体で発売している。これらのフライトコントローラはセットアップやキャリブレーションが非常に簡単で、マルチロータ UAV の飛行安定性もオープンソースのフライトコントローラに比べ圧倒的に良かったが、ブラックボックス化されており、外部機器との通信も不可能であったため、二次開発で使うのは難しかった。また、これらのフライトコントローラを用いて自動飛行を行いたい場合は、RC 受信機に模擬信号を送るか、あるいは RC 受信機の代わりに PPM や S-BUS 信号をフライトコントローラに送るしかなかったが、フライトコントローラの内部の情報は受け取ることはできない問題があった。

これまでは、研究開発のためのフライトコントローラは自作あるいはオープンソースのフライトコントローラしか選択肢がなかったが、2016 年に DJI N3/A3 シリーズのフライトコントローラが公開された。これらのフライトコントローラもブラックボックス化されているが、SDK が公開されており、これを通じて上述したようにソースコードを変える以外のことはオープンソースのフライトコントローラと同じ程度でできるようになった。Lin らの研究 [56] では DJI A3 のフライトコントローラを使用し、単眼カメラによるナビゲーションを実現した。本研究では DJI S800 及び DJI N3 の機体に DJI N3 のフライトコントローラを用いてマルチロータ UAV のプラットフォームを構築した。

## 2.4 空中マニピュレーション

マルチロータ UAV のプラットフォームにロボットアームを搭載し、飛行しながら空中で作業を行うことを「空中マニピュレーション」と呼び、空中マニピュレーショ



ンに関する研究は世界中で行われている [2]-[4].

空中マニピュレーションはインフラ点検を始めとする高所作業への活用が期待できる. 特に作業員には危険な作業を作業用マルチロータ UAV に任せるのは非常に有益である. 例えば, 橋梁やトンネル, ダムの壁面, 高圧電線, 風力発電設備の点検, 高層ビルの窓洗浄, 高圧電線付近の枝打ち作業などが挙げられる.

マルチロータ UAV による空中マニピュレーションは, 陸上ロボットによる移動マニピュレーションに比べ, 高精度の作業を実現するのは容易ではない. マルチロータ UAV が空中で作業対象に力を作用させる場合, 機体は空中で浮いているため, 作業対象からの反作用力は機体のみで受け止める必要がある. また, 通常マルチロータ UAV の構成上, 水平面上の移動は姿勢変化が伴う. さらに, 前述した作業対象からの反作用力を克服するためには, 機体の姿勢を力の方向に合わせて維持する必要がある. 一方で, マルチロータ UAV に搭載できるペイロードは限られているため, 搭載するロボットアームやセンサ, プロセッサの重量も常に考慮する必要がある. また,

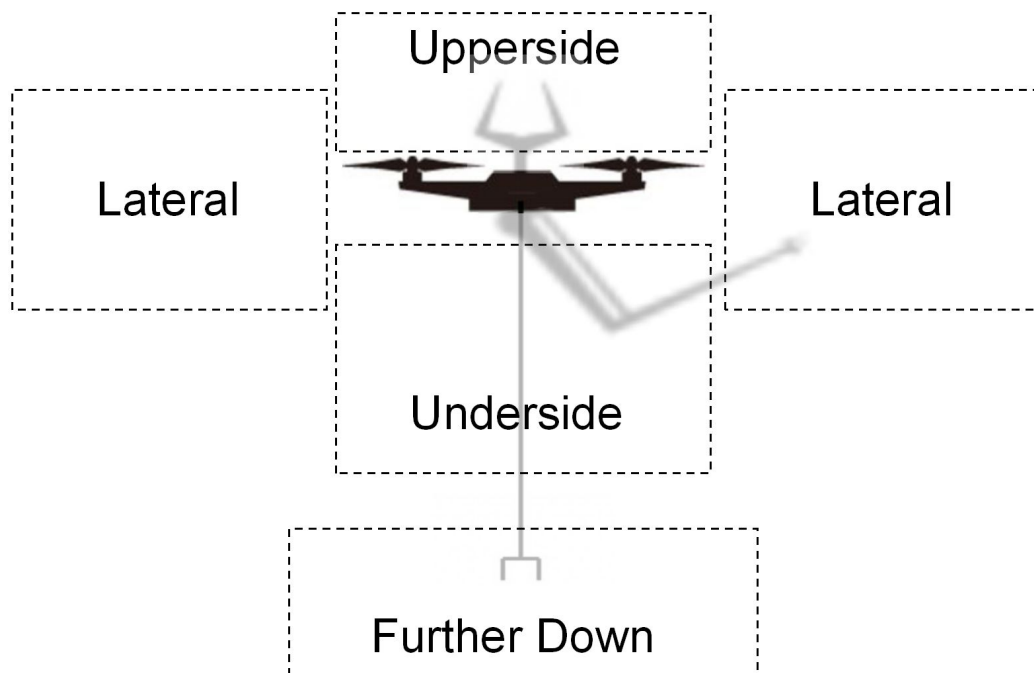


図 2.4: 空中マニピュレーションにおけるマルチロータ UAV の作業域.

オンボード処理によるセンシング情報の統合や制御は空中マニピュレーションを実現するための重要な技術となる。

空中マニピュレーションを実現するためには、まず、ロボットアームをマルチロータ UAV のどの位置に搭載するかを考える必要がある。ロボットアームの付け位置により作業域が決まり、目的の作業を実現することができる。図 2.4 に示すようにマルチロータ UAV の作業域は主に上向き、横向き、下向きに分けることができ、これらに特化した作業は以下に述べる。

- 上向き作業：インフラ点検における橋梁やトンネルの天井検査など作業を行う場合、作業域 [5] はマルチロータ UAV の上向きになり、ロボットアームを機体の上部に搭載するのが一般的である。マルチロータ UAV の上向きを作業域とする空中マニピュレーションに関する研究多くにグループにより発表された [6]-[13]。A.E Jimenez-Cano らの研究 [6] ではマニピュレータをマルチロータ UAV の上側に搭載し、建物の天井壁面の点検のための開発を行った。J. Thomas らの研究 [7] ではグリッパをマルチロータ UAV の上側に搭載し、棒状物へのパーチングを行った。Ikeda らの研究 [8] では橋梁の点検のために、3 自由度のロボットアームをマルチロータ UAV の上部に搭載し、打音検査のための力制御を行った。我々の研究グループでの先行研究でも様々な上向きを作業域とする研究開発を行った [14]-[16]。研究 [14] では、水平移動が可能なグリッパをマルチロータ UAV の上部に搭載し、カメラにより棒状物検出を行い、その情報を元にグリッパを棒状物の把持可能な位置に動かすことで高精度の棒状物把持を実現した。研究 [15] では、インパクト機構を内蔵したグリッパをマルチロータ UAV に搭載し、マルチロータ UAV のヨー方向の回転ができる性質を利用してねじり作業を実現した。研究 [16] では、三つのオムニホイールをマルチロータ UAV の上部に搭載し、天井面における高精度の全方位置移動を実現した。
- 下向き作業：空中マニピュレーションにおける最も多くの研究では、ロボットアームをマルチロータ UAV の下部に搭載し、作業域を機体の直下の範囲に設定している。これらの研究も様々な用途で開発が行われ、報告された [17]-[29]。Mellinger らの研究 [17] では、小型クアットロータの下部に数種類のグリッパを搭載し、マルチロータ UAV の把持能力の評価を行った。Pounds らの研究 [22] や Huber らの研究 [23] ではヘリコプタ型飛行ロボットの下部にマニピュレータ

を搭載し、物体の運搬のための開発を行った。最新の研究では [30]-[33], より広範囲の作業域を確保するために、多自由度のロボットアームを搭載し、狭い空間にある物体把持を実現するための開発が行われている。一方、機能拡張のためにマルチロータ UAV に搭載するロボットアームの数は 2 つに伸びた研究も多く報告されており [34]-[39], 三つのロボットアームを搭載した関連研究 [40] も報告されている。A. Suarez らの研究 [34] では人の腕と同じ大きさのロボットアームをマルチロータ UAV に搭載し、それによる空中マニピュレーションに関する研究が報告された。Prodrone 社の研究 [35] では、二つのロボットアームを有するマルチロータ機による物体のピックアップ作業とレールなどへのパーチングを実現した。C. Korpela らの研究 [36] では二つのロボットアームによるバルブ閉め作業に成功した。我々研究グループの先行研究 [40] では、三つのロボットアームをマルチロータ UAV のランディング脚の代わりに搭載させることでその分のペイロードを稼ぎ、不整地への着陸や物体把持、狭い空間における物理的な衝突回避と言ったマルチタスクが可能な飛行ロボットを開発した。

- 横向き作業：建物やダムなどの壁面検査を想定する場合、作業域はマルチロータ UAV の側方に該当する。垂直離着や姿勢を水平に保ったまま飛行可能な VTOL 機の場合は、プロペラの方向を変えることで水平方向に力を発生することは可能であるが、ロボットアームを搭載することは難しい。マルチロータ UAV の場合はプロペラは固定であるため、水平方向の力を発生するためには機体を傾ける必要があるが、ホバリングしながら安定して力を発生させるのが課題となる。更に、ロボットアームは作業対象に接触するために機体の半径を上回るように設計する必要があるが、飛行のバランスを保つのが課題となる。これらの課題を解決するために、飛行ロボットの側方を作業域とする研究が報告された [41]-[52]。M. Fumagalli らの研究 [41] では小型クアットロータ機の側方に力センサ付きのロボットアームを搭載し、そのフィードバックにより機体の姿勢制御を行い、壁面に対して安定した力制御が可能であることを検証した。S. Liu らの研究 [44] ではクアットロータ機の上下にそれぞれ斜め上と下向きになるようにロボットアームを搭載し、アームの先端には空気圧で制御可能な吸盤を取りつけ、機体の壁面へのパーチングや物体把持などを可能なマルチロータ UAV を開発した。A.Q.L. Keemink らの研究 [49] では機体に搭載したロボットアーム

が壁面に対して多少ずれても安定してコンタクトが可能なアームを設計した。

上述の研究では、作業域を機体の近傍に想定した。一方、空中マニピュレーションでは、上述の作業以外にもマルチロータ UAV と作業対象の離隔を保持したい場合があり、ロングリーチ空中マニピュレーションと呼ばれる高所作業があるが、ほとんど行われておらず、一般的な手法も確立されていない。本研究では、水平推進システムの拡張応用として、作業点をマルチロータから 3m 以上離れた場所に設定することができるロングリーチ空中マニピュレーション手法を開発した。

# 第3章 水平推進システムを備えたマルチロータ UAV の構成

本研究では、これまでに報告された空中マニピュレーションの研究 [86]-[93] における一般課題の解決に着目した。これらの研究では、パーチングや橋梁点検、把持作業、ねじり作業などの空中マニピュレーションの事例を示しているが、外乱の多い屋外の環境ではマルチロータ UAV の高精度な位置決めと作業を両立させるのは困難である。マルチロータ UAV は、その原理から、水平方向に推進力を発生するためには機体を傾ける必要がある。図 3.1 に示すように水平並進移動やブレーキ、また横風に対して機体位置を維持するなど水平方向に力を発生する際には姿勢が傾く。このことは、空中マニピュレーションのために機体に搭載している効果器の位置・姿勢を維持したり、水平面上での位置決めを行う際には障害となる。また、水平方向の作業対象に安定して力を出したい場合には機体姿勢を傾けたまま維持することが必要になり、不安定となる。そのため、空中マニピュレーションにおいて、より高精度な作業を実現するためには、マルチロータ UAV 位置・姿勢制御を独立させる必要がある。

マルチロータ UAV の位置・姿勢制御を独立させるのは、市販の標準的なマルチロータ UAV では不可能であり、特殊な構造を持つマルチロータ UAV の開発に関する研究が報告された [86]-[93]。これらの研究では主に、マルチロータ UAV のプロペラを水平

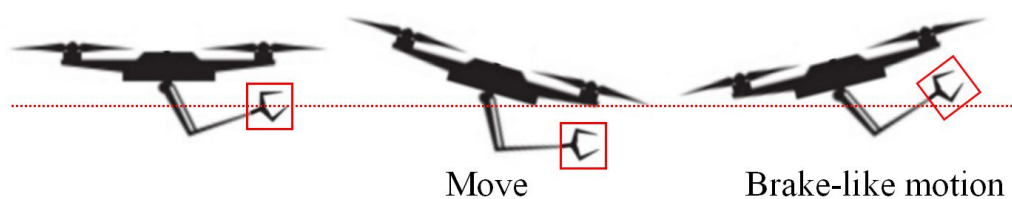


図 3.1: マルチロータ UAV の並進とブレーキ動作に伴う姿勢変化がマニピュレータの効果器に及ぼす影響。

面上から傾いた配置にしたり、あるいはプロペラにチルト機構を搭載する手法を利用した。M.Tognon らの研究 [86] と S.Park 研究 [87][93] らの研究ではプロペラを水平面上から傾いた配置にしたヘキサロータや4つのプロペラを一セットで二セットを用いた特殊な構造のマルチロータ UAV が開発された。プロペラを傾いた配置にした場合、マルチロータ UAV の位置姿勢を独立させて動かすことが可能であるが、垂直方向における推力は水平面から傾いた角度に比例して減少してしまう。また、これらの研究では、マルチロータ UAV のホバリング状態維持する場合、一部のプロペラの推力が内部で打ち消され、同じ仕様の通常のマルチロータ UAV よりも大きな推力が出るようにプロペラを回転させる必要があり、電力消費が大きくなる。A.Oosedo らの研究 [88], M.Allenspach らの研究 [89], M.Zhao[90][91] らの研究ではプロペラにチルト機構を搭載する手法で位置姿勢を独立に制御できるマルチロータ UAV を開発した。A.Oosedo らの研究 [88] では、クアットロータにチルト機構を搭載し、空中でホバリングしながら、機体の姿勢を水平から垂直に変形させることに成功した。M.Allenspach らの研究 [89] では、ヘキサロータにパン・チルト機構を持たせ、空中で位置を保持しながら、機体の姿勢を三次元空間における全方位に変形させることに成功した。M.Zhao[90][91] らの研究では、二つのダクテットファンを一ユニットとして、複数のリンクでつながれた新しい構造のマルチロータ UAV を開発し、空中で自由に變形させることに成功した。しかし、これらの研究では、より複雑な構成のマルチロータ UAV ハードウェアを制御する難易度が高く、高所作業応用にはまだ利用しづらい。

そこで、本研究では、図 3.2 に示すように、水平任意方向に安定して力を発生するアドオン型水平並進駆動モジュール (ATD:Add-On Planar Translational Driving System, 以降 ATD モジュールと呼ぶ) を市販の標準的なマルチロータ UAV に後付け搭載する手法を提案した [93]。ATD モジュールは三つのダクテットファンから構成され、これらの合力として水平面上の全方位に力を発生することができ、マルチロータ UAV の姿勢を水平に保ったまま並進移動することができる。また、制御器の設計が非常に簡単であり、細かい位置決めが容易に実現できる。ATD モジュールを後付けすることで、市販の信頼性の高いマルチロータ UAV をプラットフォームとして利用しながら正確な位置決めと、作業のための安定した力の発生という、空中マニピュレーションの実現に必要とされる性能を強化できることから、様々な高所作業への展開が期待される。空中マニピュレーションにおける天井面の点検作業では、カメラなどのセンサをジンバル制御させる必要があり、更に 2D ライダーは一般的なマルチロータ

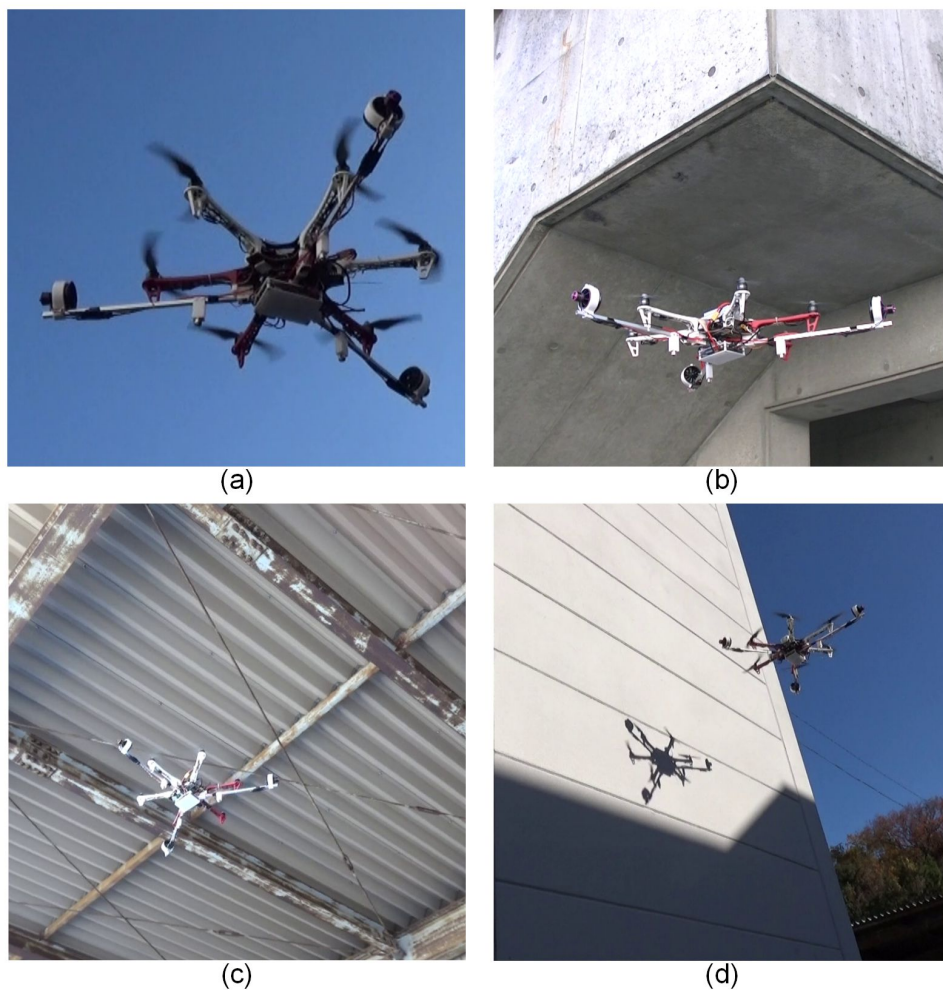


図 3.2: アドオン型水平並進駆動モジュール (ATD) を搭載したマルチロータ UAV (a). 狭い空間, 天井, 壁面などでの高所作業を想定した提案手法の応用 (b-d)[93].

UAV では扱い難かったが, ATD モジュールを使用することでこれらの問題も解決できる. 本研究で提案する ATD モジュールは以下のような特徴がある.

- (1) ATD モジュールの駆動力により, マルチロータ UAV の姿勢を水平に保ったまま移動させることができる. このことは, マルチロータ UAV を細かく位置決めさせる場合に適用でき, より高精度な作業の実現が期待できる.
- (2) 高所作業で対象物に横向きに力を加える場合, 機体の姿勢は水平であるため, 連続して安定して力を加えることができる. さらに, ATD を追加することで, 通

常のマルチロータ UAV のみの場合に比べて、発生させることができる力が大きくなる。

- (3) 垂直方向における力はマルチロータ UAV から発生し、水平面上における力は ATD モジュールから発生するため、水平面上と垂直方向における制御は独立される。そのため、任意の高さに対して、水平面上の全方位に力を出すことが可能となる。
- (4) ATD モジュールを用いてマルチロータ UAV を並進させながら空中マニピュレーションを行う場合、フライトコントローラは主に機体の姿勢を水平に保つように制御され、ATD モジュールの駆動力で風やドリフトなどの外乱を防げるため、ロバスト性も向上できる。
- (5) ATD モジュールは構造と制御が簡単で、マルチロータ UAV に後付けで搭載するため、任意の市販の標準的なマルチロータ UAV の規格に合わせて設計することができ、再利用性が非常に高い。

ATD モジュールは多くの高所作業の応用に活用できる。例えば、接触・非接触点検作業において、姿勢を水平に保ったまま細かい位置決めが可能であるため、図 3.2 (b)-(d) に示すような狭い場所や天井、壁面などの点検作業をより高精度で行うことが期待できる。更に、高圧洗浄や塗布作業など、水平方向に一定の力を加える必要がある高所作業にも活用できる。本研究では、まず ATD モジュールの開発を行い、性能評価や有効性を検証するために、屋外環境で通常のマルチロータ UAV との比較実験を実施し、モーションキャプチャーの環境で移動特性の解析を行い、安定して力を発生できることの検証のために押し引き作業実験を実施した。更に、ATD モジュールを用いた応用として、高所高圧洗浄作業への応用を検討した。

### 3.1 ダクテットファンの動作原理

ATD モジュールからマルチロータ UAV に作用する推力を得るためには、追加のアクチュエーターが必要となる。推力発生装置として、ブラシレスモータで駆動するプロペラとダクテットファンが考えられる。プロペラの場合は、ブラシレスモータの高速回転により、プロペラの下部の気圧が上部の気圧より大きくなり、その気圧差で推



力を得るのが基本原理である。また、プロペラは推力が発生する方向と垂直となる平面上でも気流が発生し、この気流からは推力を得られない。そのため、エネルギー効率が悪く、この気流は騒音が大きくなる原因でもある。

ダクテットファンの場合は、プロペラの外側を筒で囲む形になっているため、上述したような無駄な気流を防ぐことができ、先端部からの気流を上手く誘導できる構造となっているため、エネルギー効率も良くなる。同じ推力が発生できるダクテットファンと通常のプロペラを比べた場合、プロペラはダクテットファンに比べ2倍以上大きくなる。ダクテットファンから発生する推力は下記の式から求めることができる。

$$\begin{cases} \dot{m} = \rho Av \\ F_{thrust} = \dot{m}(v_{in} - v_{ex}) \end{cases} \quad (3.1)$$

ここで  $\dot{m}$  は質量流量、 $\rho$  は気流の密度、 $A$  は断面積、 $v$  は平均流速、 $F_{thrust}$  は推力、 $v_{in}$  はダクテットファンの先端部の気流の流速であり、 $v_{ex}$  はダクテットファンから排出される気流の流速である。ダクテットファンの断面の略図を図 3.3 に示す。また、ダクテットファンの推進力は下記の式で求めることができる。

$$P_{prop} = F_{thrust}v_{ex} \quad (3.2)$$

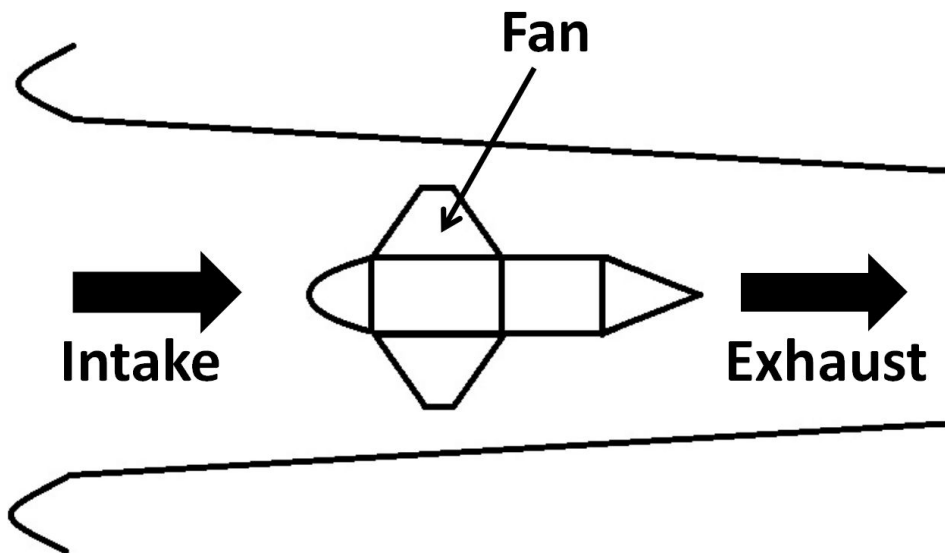


図 3.3: ダクテットファンの動作原理.

$P_{prop}$  は推進力を示しており、これを用いてドライブシステムから提供される電力を求めることができる。

$$P_{drive} = P_{prop} \frac{1}{1 + \frac{v_{in} - v_{ex}}{2v_{ex}}} \quad (3.3)$$

ダクテットファンは固定翼型飛行ロボットに使用される場合が多く、通常のマルチロータ UAV には使用されない。ダクテットファンはプロペラとブラシレスがセットとなっており、モータの回転する平面と直行する方向に推力をバランスよく出すために、工場から出荷時にそのバランス調整を行った状態となっているため、モータとプロペラを自由に分離することはできない。そのため、プロペラが破損した場合はモータまで変える必要があり、マルチロータ UAV のように多くの衝突事故でプロペラが破損してしまう機体ではコストが高くなる。また、ダクテットファンはコンパクトなサイズでも大きな推力を発生することができるが、その力の分布は密接になっているため、マルチロータ UAV に使用する場合はプロペラよりもバランスが悪くなる。更に、出力が高い分消費電力も大きくなるため、航続時間が短い問題もある。

ダクテットファンには上述したようなメリットやデメリットが両立しているが、ATD モジュールの推力装置として非常に相性が良い。マルチロータ UAV をホバリングさせている場合には、ダクテットファンを高速に回す必要がない。ダクテットファンはマルチロータ UAV を並進させる場合と作業対象に対して力を加える場合のみ高速回転しているため、容量が大きいバッテリーでもマルチロータ UAV の航続時間まで稼働させることができる。以上を踏まえ、本研究ではダクテットファンを ATD モジュールのアクチュエーターとして採用した。

## 3.2 ATD モジュールの設計

市販の標準的なマルチロータ UAV に搭載する ATD モジュールを構築するために、ダクテットファンを使用した。ダクテットファンは消費電力はマルチロータ UAV 用のプロペラより大きいですが、軽量かつコンパクトで、比較的大きな推力を得ることができる。ATD モジュールから発生した推力は、マルチロータ UAV に作用され、水平方向への並進力が得られる。ダクテットファンは基本的に一方向でしか力が発生しないため、水平面上の全方位に力を出すためには、三つのダクテットファンが最低限の構成となる。本研究では図 3.4 に示すように設計した。

表 3.1: ATD モジュールの仕様

Gross weight	0.69[kg] without battery
Size	0.7[m](W) x 0.6[m](D) x 0.12[m](H)
Number of ducted fan	3
Ducted fan size / motor	$\phi 50$ [mm] / 4300[KV]
Max thrust	950[g] for each ducted fan
L	0.4 [m] L is adjustable depending on multirotor size.

図 3.4 (a) に示すように、三つのダクテッドファンは推力が機体の中心方向へ出るように設置し、全方位にバランスよく力が出るように 120 度ずつずらして Y 字のように配置した。任意の二つのダクテッドファンの推力を合成することで全方位に力を発生することができる。また、ダクテッドファンの排気がマルチロータ UAV のプロペラのダウンウォッシュと干渉しないように、機体の外側につける構成で設計し、高さはなるべく機体の重心から近くなるようにした。設計した ATD モジュールは三つのダクテッドファン、I2C 信号を PWM 信号に切り替えるインターフェース PCA9685、ダクテッドファンの回転速度を制御するための ESC、CPU ボード (LattePanda Alpha 864)

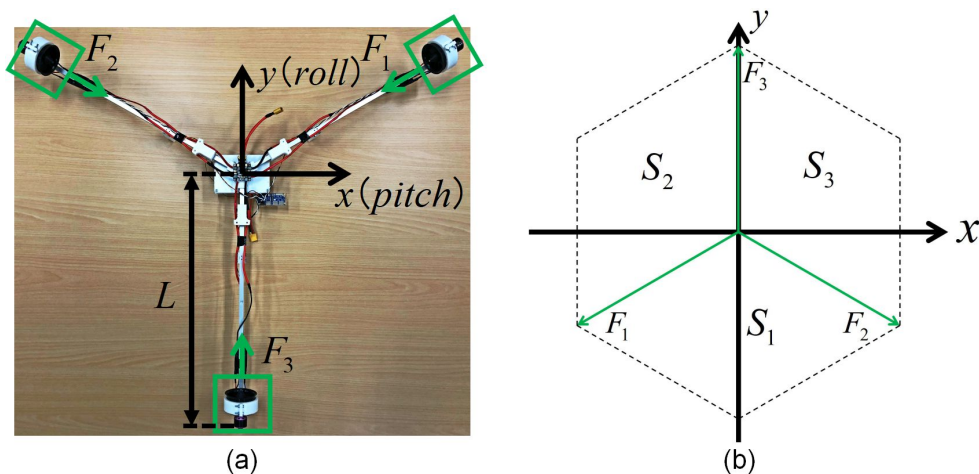


図 3.4: (a) ATD モジュールの全体図と (b) そのモデル。点線の領域は合成可能な力の領域を示す。座標軸はマルチロータ UAV の機体座標系と一致する [93].

で構成される。使用したダクテットファンは直径 50mm であり、最大出力は 0.95kg のものを使用した。ダクテットファンから機体中心までの距離  $L$  は、機体のサイズに合わせて調整することができる。ATD モジュールの仕様を表 3.1 にまとめた。

ATD モジュールを制御するためには、任意の出力が可能な力  $F$  に対して、各ダクテットファンが出力すべき推力を計算する必要がある。設計した ATD モジュールのモデルを図 3.4 (b) に示す。座標系はマルチロータ UAV の機体座標系と一致している。各ダクテットファンから発生する推力を  $F_1, F_2, F_3$  と定義する。三つの合力より発生できる力の領域は図に示す六角形のブロック内となり、任意に二つの合力ごとに領域を  $S_1, S_2, S_3$  に分けると以下の数式で表すことができる。

$$S_1 := \{F \in \mathbb{R}^2 \mid F = \alpha F_1 + \beta F_2; \alpha, \beta \geq 0; \alpha + \beta \leq 1\} \quad (3.4)$$

$$S_2 := \{F \in \mathbb{R}^2 \mid F = \alpha F_1 + \beta F_3; \alpha, \beta \geq 0; \alpha + \beta \leq 1\} \quad (3.5)$$

$$S_3 := \{F \in \mathbb{R}^2 \mid F = \alpha F_2 + \beta F_3; \alpha, \beta \geq 0; \alpha + \beta \leq 1\} \quad (3.6)$$

ここで、 $F_{max}$  はダクテットファンの最大出力を表しており、上式に従い、各ダクテットファンの出力は以下の式により求められる。

$$A = \begin{cases} \begin{bmatrix} k & 1 \\ k & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & (F \in S_1) \\ \begin{bmatrix} 2k & 0 \\ 0 & 0 \\ -k & 1 \end{bmatrix} & (F \in S_2) \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 2k & 0 \\ k & 1 \end{bmatrix} & (F \in S_3) \end{cases}, \quad \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$\pm k$  は各領域の座標系における傾きを表し、本研究の場合はダクテットファンを 120 度ずつずらして配置しているため、その値は  $\pm\sqrt{3}/3$  である。各ダクテットファンへの制御入力  $u_i$  は出力  $F_i$  とは線形関係であり、以下の式により定義することができる。

$$F_i = \zeta u_i + C \quad (0 \leq u_i \leq 100, i = 1, 2, 3) \quad (3.8)$$

$\zeta$ と $C$ は定数であり、次節で説明するダクテットファンの力計測の結果に基づいて求めた。

### 3.3 マルチロータ UAV への実装

図 3.5 に示すように設計した ATD モジュールをマルチロータ UAV に実装した。マルチロータ UAV プラットフォームは、DJI F550 フレーム（本体とプロペラの直径はそれぞれ 550mm と 238mm）と DJI N3 フライトコントローラを用いて構築した。マルチロータ UAV と ATD モジュールは CPU ボードを通して通信され、プロポのスイッチにより飛行モードを切り替えられるように設計した。システムの構成図は図 3.6 に示す。システムは (Robot Operating System) をベースに構築した。CPU ボード内の各ブロックは ROS におけるノードを示しており、データフローは各ノード間で公開・購読されるトピックを表している。ATD モジュールを搭載した場合の移動特性や位置決め精度などを評価するためにモーションキャプチャーシステムを使用した。状態推定は主に、マルチロータ UAV のフライトコントローラの IMU データの情報とステレオカメラ Realsense T265 から得られた速度データを用いて行い、マルチロータ UAV と ATD モジュールの制御器から必要な情報をフィードバック値として利用した。I2C インターフェースは、3つのダクトファンの制御入力を I2C 信号で受信し、PCA9685 の Python ライブラリを使用して対応の PWM 信号に変換され、ESC へ出力される。マルチロータ UAV の制御器における制御入力は、ロール角、ピッチ角、ヨー角速度、スロットル（垂直方向の速度/推力）、ブレーキ機能の有効/無効が含まれる。マルチロータ UAV のブレーキ機能は ATD モジュールで並進させる場合には、フライトコントローラがドリフトしていると認識して動作してしまうため、オフにする必要がある。本研究では、プロポのスイッチのデジタル信号を用いて、自動飛行モード、マニュアル操作による ATD 飛行モード、通常飛行モードの三種類を設計した。各飛行モードの詳細は以下に述べる。

- 自動飛行モード: この飛行モードでは、マルチロータ UAV を与えた目標位置に、姿勢を水平に保ったまま自動で移動させることができる。この場合、マル

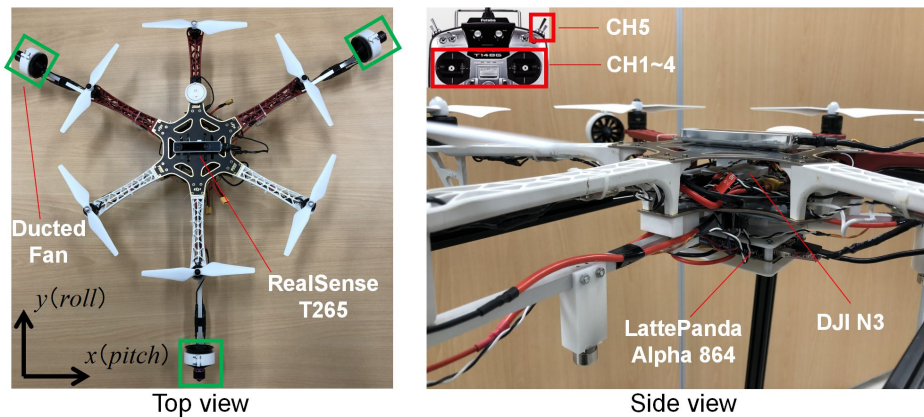


図 3.5: ATD モジュールを搭載したマルチロータ UAV の全体図と使用デバイス [93].

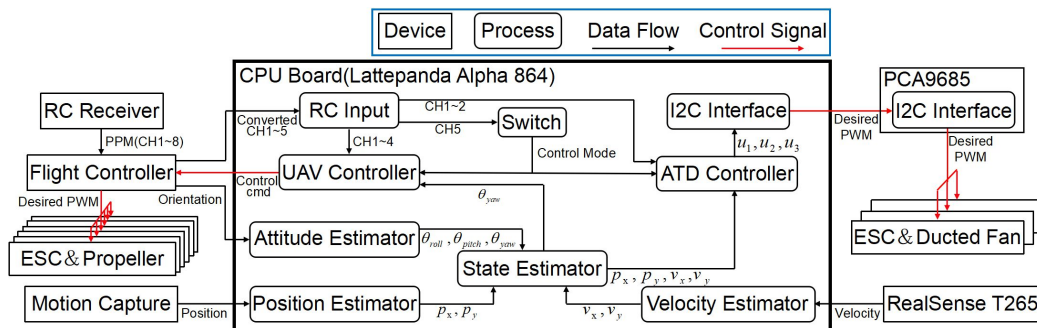


図 3.6: ATD モジュールとマルチロータ UAV のシステム構成 [93].

チロータ UAV の制御では、目標のロール角、ピッチ角は 0 になるように設定し、ヨー角速度はフライトコントローラの IMU データをフィードバックで自動で制御され、スロットル（垂直方向の速度/推力）はプロポの入力で行うように設定した。また、ブレーキ機能はオフにした。ATD モジュールの制御はモーションキャプチャーのデータをフィードバックに自動で行った。

- ATD 飛行モード: この飛行モードは主に、屋外の環境でマルチロータ UAV を ATD モジュールの制御で動かすために設計した。この場合、マルチロータ UAV の制御は、上述の自動飛行モード時と同じく設定した。ATD モジュールの制御では、プロポのスティックのデジタル信号と Realsense T265 カメラから推定された速度情報を用いて、操作直後にはマルチロータ UAV が速やかに停止するように設計した。

- 通常飛行モード: この飛行モードではマルチロータ UAV を通常のように操作できるように設計した. この場合, プロポの二つのスティックのデジタル信号をマルチロータ UAV のロール, ピッチ, ヨー, スロットルの動作に対応させ, ブレーキ機能はオンにした. また, ATD モジュールの制御はオフにした.

### 3.4 制御システム

前節で説明したマルチロータ UAV の飛行モードを数式で示すために, マルチロータ UAV における制御入力は  $u_{roll}$ ,  $u_{pitch}$  (ロール, ピッチ角),  $u_{yaw}$  (ヨー角速度, 時計回りを正とする),  $u_{throttle}$  (垂直方向における速度),  $u_{brake}$  (ブレーキ機能, 1, 0 で有効, 無効に対応する) と定義する. ATD モジュールの制御入力は  $u_x, u_y$  ( $x, y$  軸は機体のロール, ピッチ方向と一致する) と定義する. プロポから受信した操縦スティックとスイッチのデジタル信号は  $u_{ch1} \sim u_{ch5}$  ( $u_{chi} \in \{1, -1\}$ ,  $i=1, \dots, 5$ ) に定義した. また, マルチロータ UAV の速度を推定したデータは  $v_x, v_y$  と定義する.

自動飛行モード, ATD 飛行モード, 通常飛行モードにおけるマルチロータ UAV と ATD モジュールの制御入力は次式のように示すことができる.

自動飛行モード:

$$\begin{aligned}
u_{brake} &= 0, u_{roll} = 0, u_{pitch} = 0 \\
u_{yaw} &= K_{pyaw}e_{yaw} + K_{dyaw}\dot{e}_{yaw} \\
u_{throttle} &= K_{th}u_{ch4} \\
\mathbf{u} &= [u_x \ u_y]^T = K_p \mathbf{e}_{pos} + K_d \dot{\mathbf{e}}_{pos} \quad (u_{ch5} = 1)
\end{aligned} \tag{3.9}$$

ATD 飛行モード:

$$\begin{aligned}
u_{brake} &= 0, u_{roll} = 0, u_{pitch} = 0 \\
u_{yaw} &= K_{pyaw}e_{yaw} + K_{dyaw}\dot{e}_{yaw} \\
u_{throttle} &= K_{th}u_{ch4} \\
\mathbf{u} &= \begin{bmatrix} K_{fmax}u_{ch1} - K_v v_x \\ K_{fmax}u_{ch2} - K_v v_y \end{bmatrix} \quad (u_{ch5} = 0)
\end{aligned} \tag{3.10}$$

通常飛行モード：

$$\begin{aligned}
u_{brake} &= 1, u_{roll} = K_{\theta max} u_{ch1}, u_{pitch} = K_{\theta max} u_{ch2} \\
u_{yaw} &= K_{pyaw} e_{yaw} + K_{dyaw} \dot{e}_{yaw} \\
u_{throttle} &= K_{th} u_{ch4} \\
\mathbf{u} &= [0 \ 0]^T \quad (u_{ch5} = 1)
\end{aligned} \tag{3.11}$$

$e_{pos}$  は x,y 軸における位置誤差を示しており,  $K_p$  と  $K_d$  は PD 制御のゲインであり, 実験的に決めた. 制御入力を  $K_{\theta max}$  はマルチロータ UAV が姿勢を最大に傾ける角度に対応したパラメータであり, 本研究の場合は 25 に設定した.  $K_{fmax}$  と  $K_v$  はマルチロータ UAV をマニュアル操作を行う場合のパラメーターであり,  $K_{fmax}$  が大きいほど素早く動き,  $K_v$  が大きいほど速やかに停止することができ, 実験的に決めた.  $K_{pyaw}$  と  $K_{dyaw}$  はヨーイングさせるための PD 制御パラメータであり, 目標角度誤差を自動飛行の場合にはモーションキャプチャーの座標軸に合わせるように与え, マニュアル操作の場合には下記のように設定した.

$$\begin{aligned}
e_{yaw} &= \theta_{targetyaw} - \theta_{yaw} \\
\theta_{targetyaw} &= \theta_{yaw}(0) + K_{vyaw} \int_0^t u_{ch3} dt
\end{aligned} \tag{3.12}$$

$\theta_{yaw}(0)$  は機体のヨー方向の初期位置での角度を示しており,  $K_{vyaw}$  は実験的に決めた. これにより, 操縦しない場合はマルチロータ UAV の頭向きはその時に向いた方向に固定され, 外乱により機体がねじられても元に戻ることができる.

### 3.5 ATD モジュールの力計測

マルチロータ UAV の飛行中に ATD モジュールが機体に作用される力を確かめ, ダクテットファンへの制御入力と出力の線形関係を推定するために力計測実験を行った. 実験風景は図 3.7 に示すように, フォースゲージとマルチロータ UAV 間をワイヤで結び, ダクテットファンの推力を徐々に上げることで計測を行った. マルチロータ UAV のプロペラは重力に近いほどの推力で固定し, 下部にはボールベアリングを設置した. ボールベアリングと地面の摩擦係数は 0.05 であり, プロペラの推力は約 2.9kg(マルチロータ UAV の総重量は 3kg) に固定したため, 地面との摩擦はほぼ無視できる. ま



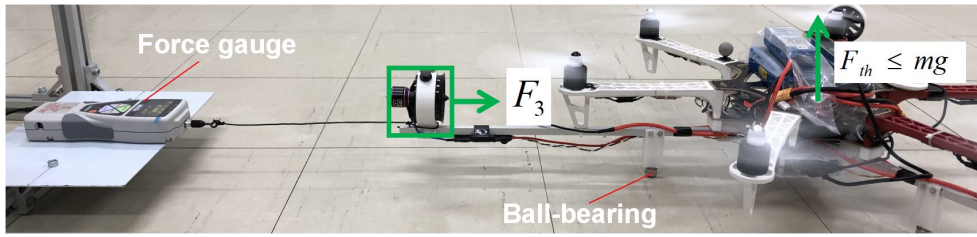


図 3.7: 力計測の実験風景 [93].

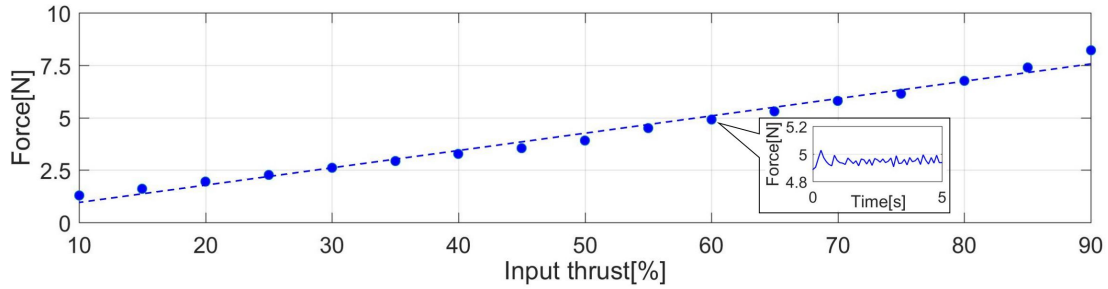


図 3.8: 力計測結果に基づく ATD モジュールの入出力関係図. 点線は近似式  $F = 0.0826u_{thrust} + 0.1274$  を示す [93].

た、機体の頭向きもフォースゲージの設置方向と一致するように固定した。ATD の制御入力 は 90% から始め、5 秒ごとに 5% ずつ 10% となるまで減らした。計測結果を 図 3.8 に示す。

実験結果はダクテットファンの制御入力における出力を示しており、この結果により制御入力 が一定の場合は出力も安定していることが確認できた。また、実測値の近似線を求めることで、ダクテットファンの入出力関係を推定できる。従って、前節で述べたダクテットファンの入出力の関係式におけるパラメーター  $\zeta$  と  $C$  を決めることができた。

# 第4章 水平推進システムを備えたマルチロータ UAV の基本特性

## 4.1 通常飛行と ATD 飛行モードの比較実験

マルチロータ UAV の通常飛行と ATD 飛行モードでの移動から停止までの状態を定量的に評価するために比較実験を行った。ATD 飛行モードの場合、進行方向における制御入力を 50% と固定した。この場合図 3.8 に示す計測結果により、駆動力は約 4.9N であると想定される。通常飛行の場合に、同じ駆動力でマルチロータ UAV を並進させるためには、総重量は約 3kg であり、姿勢を水平方向から約 10 度傾ける必要があると推定できる。以上により、ATD 飛行モードの場合にはダクテットファンへの入力を 50% にし、通常飛行モードの場合は機体の姿勢を 10 度の固定入力することで、両方とも同じ駆動力で並進させることができる。また、どちらの制御モードでも、プロポのスティックを離すと、マルチロータ UAV が速やかに停止できるように設定し

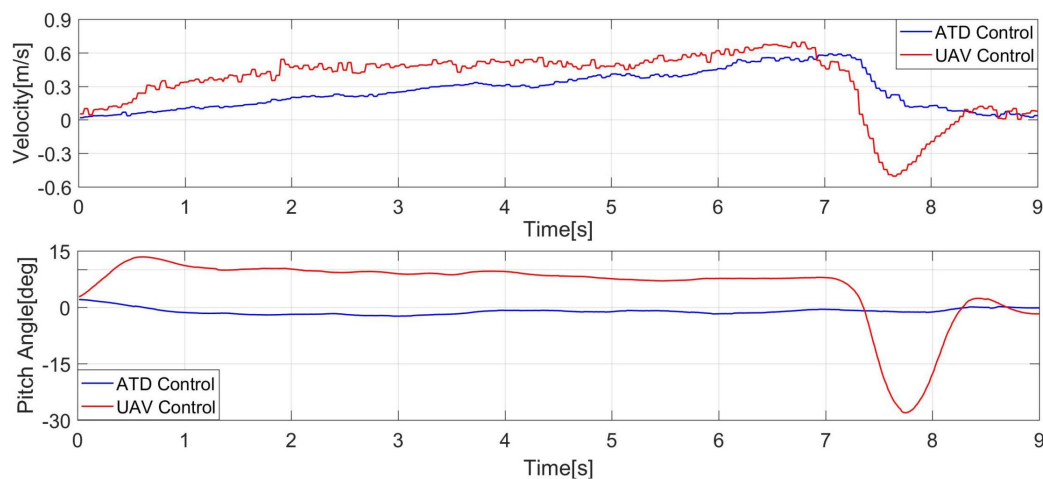


図 4.1: 通常飛行と ATD 飛行モードの比較実験結果. グラフは各飛行モードにおけるマルチロータ UAV の移動から停止までの速度 (上図) と姿勢 (下図) 変化を示す [93].

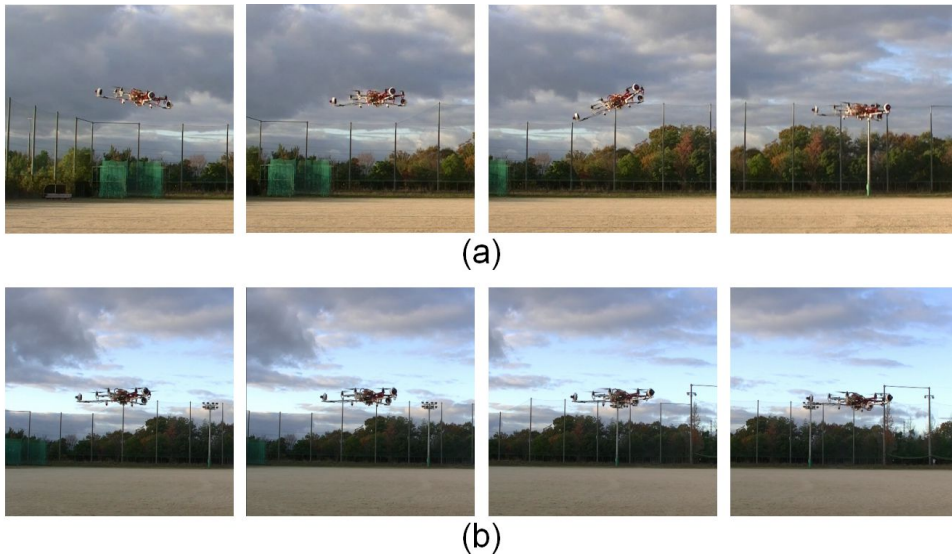


図 4.2: (a) 通常飛行と (b) ATD 飛行モードの比較実験における連続画像。画像は左から右の順であり，図 4.1 の 7-9 秒間と一致する [93]。

た。実験では，マルチロータ UAV ができるべく同じルートを飛行するようにした。実験結果を図 4.1 に示す。

図 4.1 の上のグラフはマルチロータ UAV の速度変化を示しており，下のグラフは姿勢変化を示している。実験結果により，通常飛行の場合，マルチロータ UAV の速度は ATD 飛行モードの場合に比べ，より素早く上昇しているが，ATD 飛行モードの場合の方が速度が安定して上昇していることがわかる。このことは，マルチロータ UAV を細かく位置決めさせながら高所作業を行う場合，ATD 飛行モードの場合の方がより高精度にできると想定できる。また，マルチロータ UAV にブレーキをかけた場合，ATD 飛行モードの方が通常飛行の場合よりも約 0.5 秒ほど早く停止できた。一方，通常飛行の場合は，ブレーキがかかった瞬間には移動中に傾いた角度よりも大きくなっていることが確認できた。これに対し，ATD 飛行モードの場合は移動から停止まで姿勢が常に水平に保たれた。これらの過程の連続画像を図 4.2 に示す。図に示すように，ATD 飛行モードの場合は，移動から停止まで姿勢が常に安定していることがわかる。実験により，提案した ATD モジュールが移動中にも姿勢が水平に保てることを検証できた。

## 4.2 位置決め実験

ATD モジュールの飛行による位置決め精度を確かめるために、位置決め実験を行った。機体の向きはモーションキャプチャーの座標軸と一致するように設定し、目標位置は  $[0, 0]$ 、初期位置は  $[-1, -1]$  と設定した。実験ではマルチロータ UAV が離陸後、初期位置に収束した時点で自動飛行モードに切り替えた。図 4.3 に実験結果を示す。図の上のグラフはマルチロータ UAV の水平面上の位置を示しており、下のグラフは

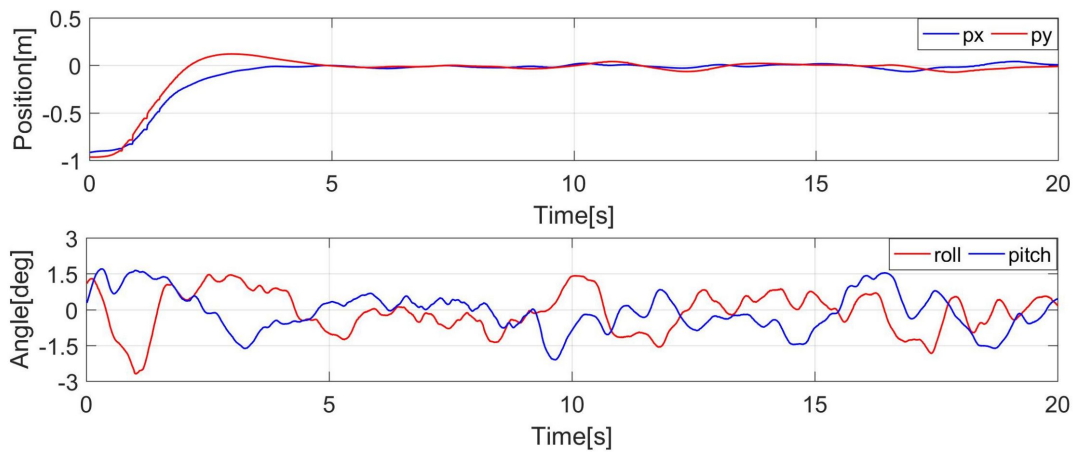


図 4.3: 位置決め実験結果 [93].

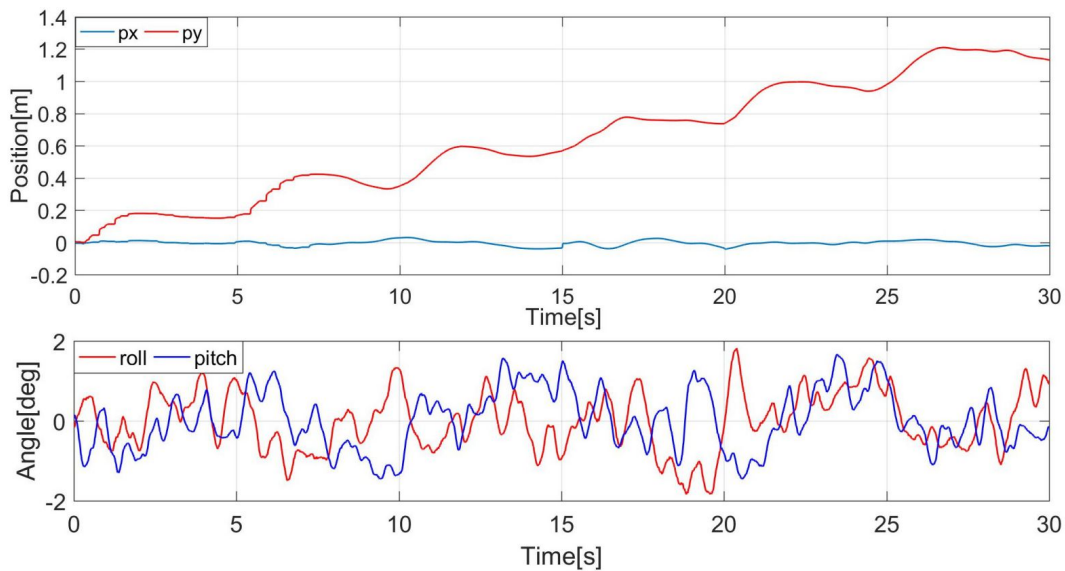


図 4.4: 0.2m ごとに目標位置を変化させた場合の位置決め実験結果 [93].

機体の姿勢変化を示している。実験結果により、マルチロータ UAV の位置決め誤差の平均値は  $x$  軸では 0.0358m であり、 $y$  軸では 0.0188m であることが確認でき、両方とも約  $\pm 0.05\text{m}$  以内の範囲で収束していることが確認できた。また、機体の姿勢は常に  $\pm 2$  度以内であり、ホバリング時と移動時で特に変化がなく、ほぼ水平に保たれたことがわかる。

次に、上述の実験結果に基づき、ATD モジュールより、細かく位置決めが可能であるかを確認するための実験を行った。マルチロータ UAV の位置決め精度は約  $\pm 0.05\text{m}$  であるため、0.2m ごとに位置決めを行う場合は各目標位置での収束具合がはっきり区別できると想定できる。そのため今回は初期位置を  $[0, 0]$  に置き、機体の右方向に目標位置を 0.2m ずつ上昇させながら 1.2m まで設定した。また、前回の実験では、1m の目標位置に対して、約 3 秒で収束したため、今回の実験では 5 秒ごとに目標位置を更新するように設定した。実験結果を 4.4 に示す。実験結果により、マルチロータ UAV の位置決め誤差の平均値は  $x$  軸では 0.037m であり、 $y$  軸では 0.0194m であることが確認できた。また、今回の場合も位置決めは約  $\pm 0.05\text{m}$  以内で収束していることが確認できた。一方、飛行中にマルチロータ UAV の姿勢は  $\pm 2$  度以内であり、図 4.3 に示した実験結果とほぼ同じ結果が得られたことがわかり、細かく位置決めさせた場合も機体の姿勢は常に水平に保たれたことが確認できた。実験により、ATD モジュールで最低限位置決め可能なのは 0.2m ごとであり、さらに高精度な位置決めを実現するためには、ATD モジュールの制御方法を向上し、より高精度なフライトコントローラを用いることが必要と考えられる。

### 4.3 Waypoint 飛行実験

本実験では、マルチロータ UAV に四つの目標位置を与え、目標点に沿って反時計回りに二週させるように設定した。各目標位置に対して、誤差が 0.03m 以内の場合に収束したと判断し、次の目標位置に向かわせるように設計した。実験結果を図 4.5 に示す。目標位置における収束精度は前節で説明した位置決め実験時とほぼ同じ精度で収束しているが、移動軌跡が真っすぐにはなっていないのがわかる。これは、ATD モジュールは二つのダクテットファンの合力により移動しているため、各ファンでの誤差があるためだと考えられる。例えば、マルチロータ UAV を左右に並進させたい場合、図 5.1 で示したように  $F_3$  が  $F_2$  の半分になるように出力する必要があるが、出力

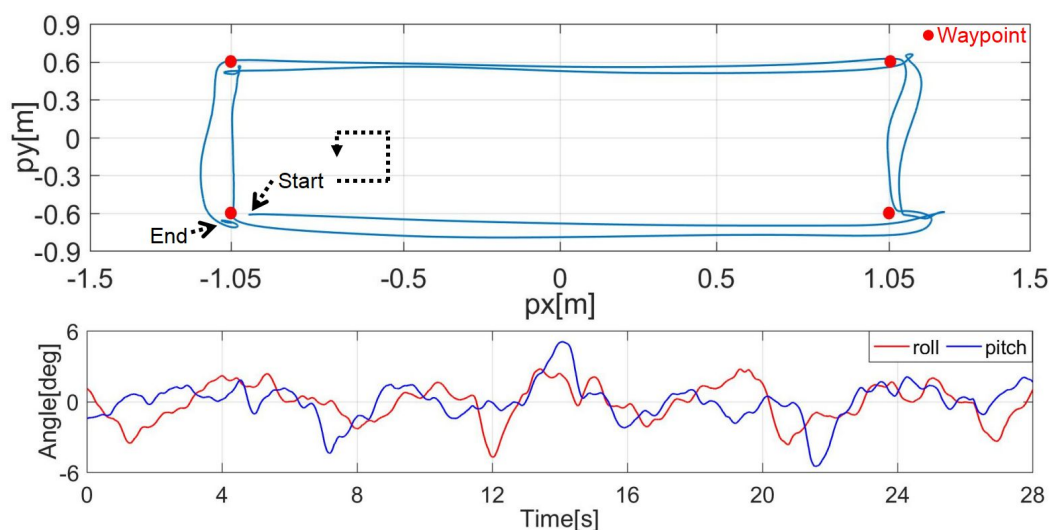


図 4.5: Waypoint 飛行実験結果.

に多少誤差がのるために、進行方向に誤差が生じる。しかし、目標位置付近ではしっかりと収束しており、これはより細かく目標位置を与えれば、直線に近い軌道で並進させることができると考えられる。一方、マルチロータ UAV の移動中に姿勢変化が  $\pm 6$  度であり、前節での位置決め実験よりも姿勢変化が大きくなったことがわかる。姿勢変化が大きかったのは、目標位置が最も長かった場合である。これは、ダクテットファンの高さが設計誤差によりマルチロータ UAV の重心からずれていた上で、ATD モジュールの制御は PD 制御で行われたため、位置誤差が大きくなれば入力値も大きくなり、マルチロータ UAV の垂直方向に対してモーメントが発生したのが原因として考えられる。更に ATD モジュールの設計誤差も原因の一つとして考えられる。これらはダクテットファンの高さを調整したり、より精密に設計したり、制御で最大入力を制限することで解決できる。

#### 4.4 全方位における位置決め実験

本実験は、マルチロータ UAV が ATD 制御により、全方位に位置決めが可能であることを確かめる上、どれだけ方向がずれるかを検証するために行われた。図 4.6 の左図に示すように、マルチロータ UAV の周囲から 0.5m を半径にして、30 ずつずらして目標位置を設定した。実験ではマルチロータ UAV が初期位置に収束してから目標位

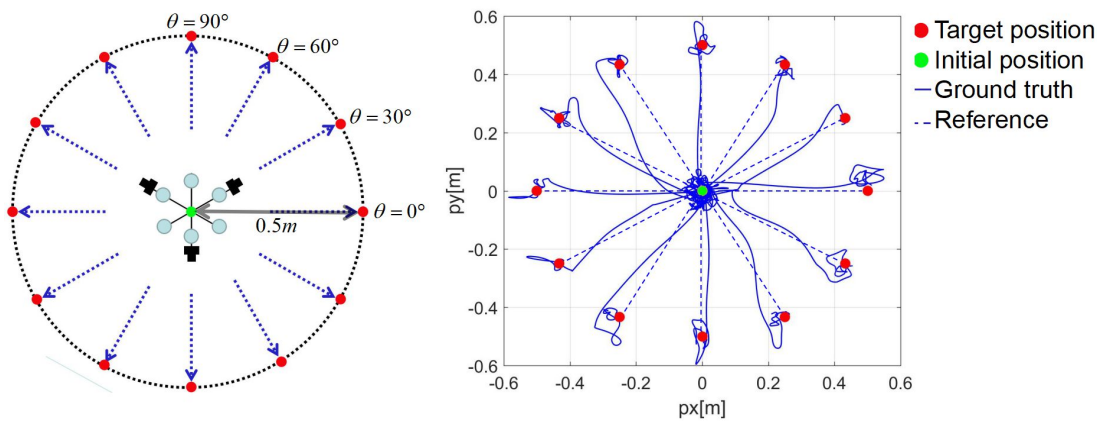


図 4.6: 全方位における位置決め実験方法 (左図) と実験結果 (右図)[93].

置に向かうように設計した。実験結果を図 4.6 に示す。図に示す青線はマルチロータ UAV が移動した軌跡を示しており、点線は初期位置と目標位置を結んだものである。実験結果により、マルチロータ UAV は目標位置が x 軸と y 軸の上にある場合、ほぼまっすぐに移動できたことが確認できた。それ以外の位置では、目的の方向から約 5 度ずれている。その原因としては、前節の Waypoint 飛行実験時と同様に、ATD の設計誤差とダクトファンの ESC からの制御誤差が考えられる。しかし、マルチロータ UAV はいずれの方向においても最終的には、前節で行った位置決め実験時と同じ精度で収束できていることが確認できた。

## 4.5 ATD モジュールによるマルチロータ UAV の押し引き作業

ATD モジュールの空中マニピュレーションへの有効性、つまり安定して作業対象に力を発生できるかを確かめるために、押し引き作業を実施した。マルチロータ UAV にはリジッドなアームを固定し、その先端には円状で平らなプレートを装着した。作業対象としては、垂直な板の上に釘状の物体を差し込んでおり、約 5N 以上の力でないと押し込んだり、引っ張りだせないように釘上の物体とネジ穴の摩擦を調整した。実験では、マルチロータ UAV を飛行させながら作業対象に近づかせ一回目は差し込み、二回目は引っ張り出せるようにマルチロータ UAV を制御した。また、本実験は外乱のある屋外の環境で実施しており、実験時の風速は約 2 – 3m であった。本実験の

連続画像を図 4.7 に示す。図 4.7 (a) はマルチロータ UAV が作業対象を押し込むまでの過程を示しており、図 4.7 (b) は作業対象を引っ張り出す過程を示している。この作業は一般的なマルチロータ UAV では不可能であるが、ATD モジュールを搭載することで実現できた作業である。また、図に示すように、押し引き作業は非常にスムーズに行われたことがわかる。更に、外乱のある環境にも関わらず、マルチロータ UAV は操作しない場合でもドリフトすることなく制御でき、マニュアル操作でも目標物体まで容易に接近させることができた。

実験結果を図 4.8 に示す。図 4.8 (a) はマルチロータ UAV が押し作業を行っている

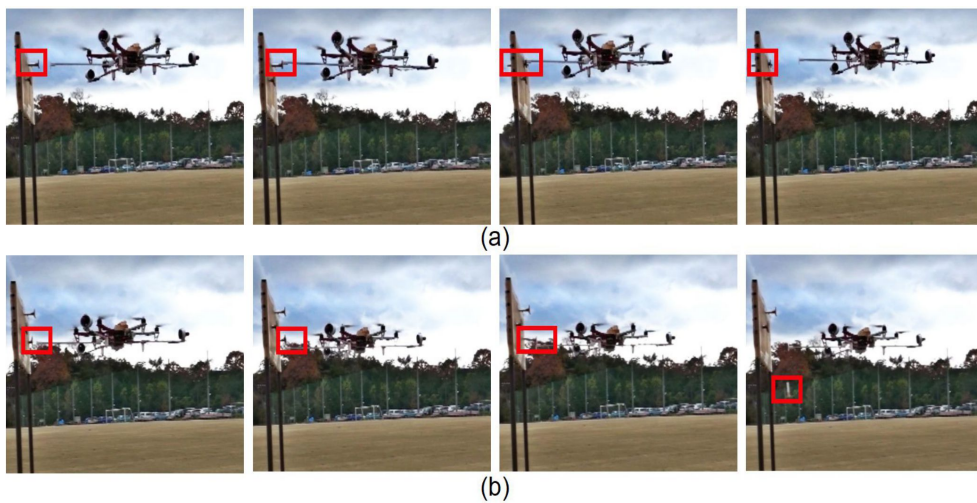


図 4.7: (a) 押しと (b) 引き作業の連続画像。赤い領域は目標物体を示す [93].

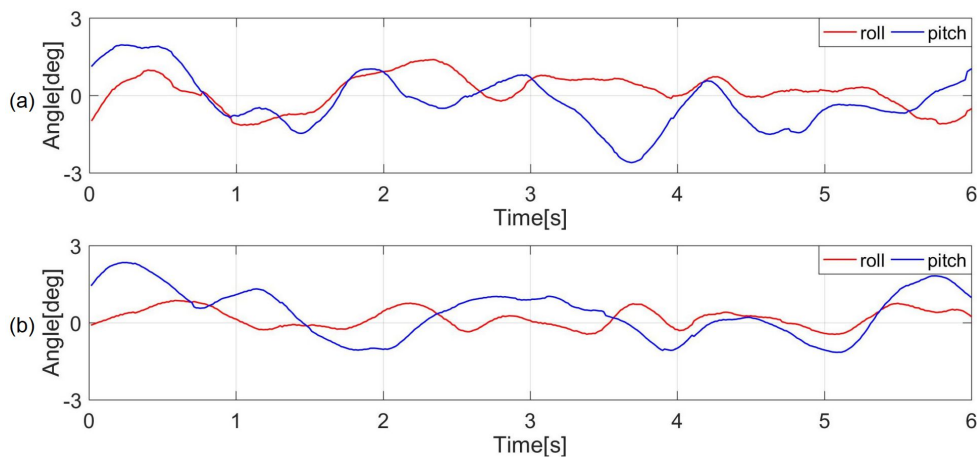


図 4.8: (a) 押しと (b) 引き作業の間のマルチロータ UAV の姿勢変化 [93].



間の姿勢変化を示しており、図 4.8 (b) は引っ張り作業間の姿勢変化を示している。これらのグラフに示すように、マルチロータ UAV の押し引き作業中の姿勢変化は  $\pm 2$  度以内であり、姿勢がほぼ水平上に保たれたことが確認できた。これは位置決め実験の結果と同じであり、押し引き作業は機体の姿勢に影響しなかったことが確認できた。一方、通常飛行により、この作業を試みたが、マルチロータ UAV の姿勢が傾くとアームの先端の位置も変わり、非常に作業対象に当てにくく、また、押し込んだ場合に機体の姿勢が崩れそうになっていた。本実験により、ATD モジュールをマルチロータ UAV に搭載させることで、作業対象に安定して力を発生させ続けることが可能であることが検証できた。

## 第5章 高圧洗浄作業への応用

ATD モジュールを搭載したマルチロータ UAV を用いて、高所高圧洗浄作業 (図 5.1) を実現することを検討した。高所での高圧洗浄作業は、通常、高所作業車やケーブルで吊り下げたゴンドラを用いて実施されており、作業員にとって非常に危険な作業である。マルチロータ UAV により代替できれば、人身事故のリスクをなくすることができる。高圧洗浄作業を実現するためには、高圧の水を噴射する高圧洗浄機ノズルを支えるために適切な反力を発生し、水を目標位置に向かって的確に噴射することが求められる。そこで、本研究では、ATD モジュールを機体に搭載し、その駆動力で反力を抑え、機体の姿勢を水平に保ったまま移動させることにより水を的確に噴射する手法を提案する。本研究では、新たな仕様の ATD モジュールの開発に加え、高圧洗浄作業を実施できる機体の開発を行い、屋外飛行実験により提案手法の有効性を検証した。



図 5.1: アドオン型水平並進駆動モジュールを搭載したマルチロータ UAV の高圧洗浄作業.

## 5.1 高圧洗浄機ノズルの水噴射時の力計測

高圧洗浄機ノズルが水噴射時にマルチロータ UAV に作用する力を確かめるために、力計測を行った。高圧洗浄機は Karcher K2 Classic を使用しており、最大許容圧力は 8Mpa、吐出水量 330L/h、モータ出力 1kW である。水噴射時に方向がずれないように鉄のランスを使用しており、先端にはノズルが取り付けられ、片方には配水管がつながっている。高圧洗浄機ノズルは主に 4 種類に分類でき、水が噴射される時の角度によって、0 度、15 度、25 度、40 度のものに分けることができる。0 度のノズルは最も遠くまで水が飛び、主に隙間など手の届きにくい場所に当てる用途で使用される。それ以外の物は主に面積の広いものの洗浄で使用される。

本実験では上述の四つのノズルで力計測を行った。実験風景は図 5.2 に示すように、高圧洗浄機ノズルを支える配管を摩擦の少ないスライダー上に固定し、水噴射時にその片方がフォースゲージを押さえるようにした。フォースゲージは IMADA 社製の ZTS シリーズの型番のものを使用しており、2-500N の範囲の力が計測できる。高圧

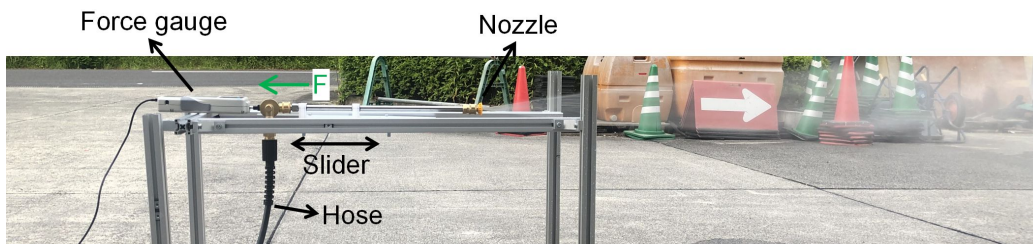


図 5.2: 高圧洗浄機の水噴射時に発生する力の計測実験風景。

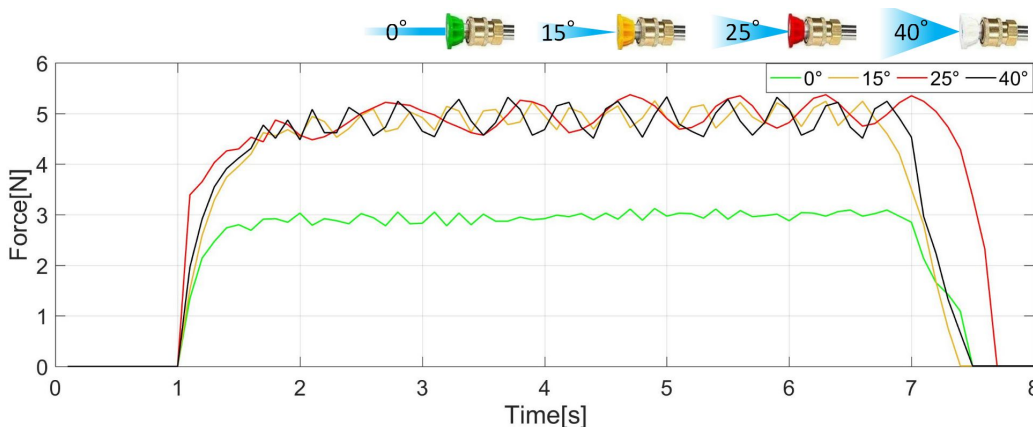


図 5.3: 高圧洗浄機ノズルの水噴射時に発生する力の計測結果。

洗浄機のスイッチを入れてから水が噴射されるまでの時間は配管の長さに依存されるが、一度水を噴射しておく次からは速やかに水が噴射できるようになる。力計測の結果を図 5.3 に示す。高压洗浄機のスイッチを入れると、約 0.5 秒ほどで一定の力が発生しており、スイッチをオフにすると 0.5 秒以内にその反力も消えることが確認できた。図に示すように、ノズルが 0 度の場合には約 3N の一定の力が発生しており、15 度、25 度、40 度の場合には約 5 N の定常的な力が発生する。つまり、高压洗浄機ノズルをマルチロータ UAV に搭載した場合には、水噴射時に約 3N、あるいは 5N の力が定常的に機体に作用されることが確認できた。

## 5.2 ATD モジュールの再設計

水噴射時にマルチロータ UAV に加わる力を抑えながら、マルチロータ UAV の姿勢を水平に保ったまま移動させるために、ATD モジュールの再設計を行った。マルチロータ UAV のフレームはペイロードを考慮し、DJI S800 の機体を使用した。今回の場合、マルチロータのプロペラ間の間隔は十分広いため、図 3.5 に示した初代の ATD モジュールのダクテッドファンの配置を改良し、図 5.4 (a) に示すようにマルチロータ UAV の内側に収める形にし、より軽量でコンパクトな形に設計した。ダクテッドファンは水平面上においては、初代の ATD モジュールと同様に 120 度ずつずらした構成に配置され、垂直方向ではモーメントを発生させないように機体の重心に近い高

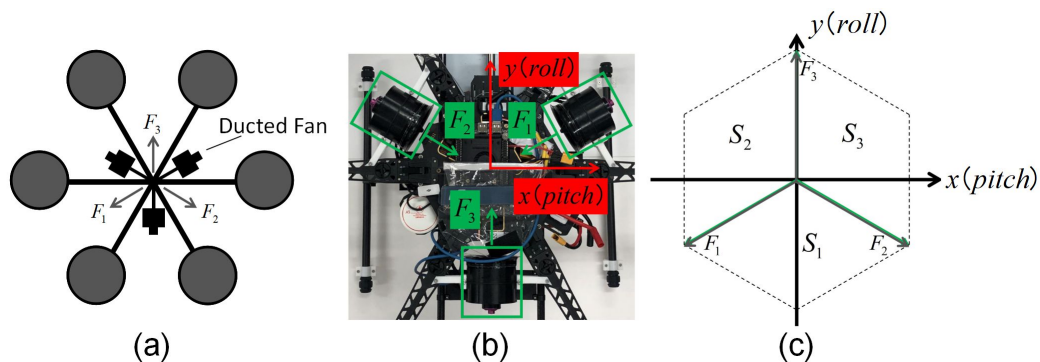


図 5.4: (a)ATD モジュールのマルチロータ UAV への配置図, (b)ATD モジュールの実装図, (c)ATD モジュールのモデル.

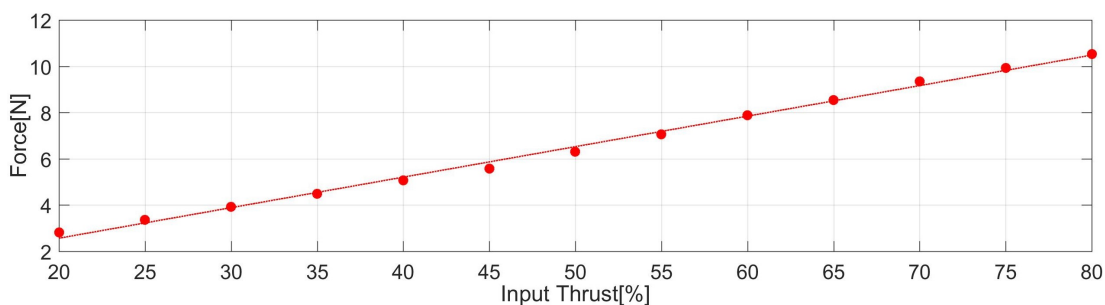


図 5.5: ATD モジュールの入出力関係図. 点線は近似式  $F = 0.1319u_{thrust} - 0.0706$  を示す.

さに設定した. 図 5.4 (b) に示すモデルは, ATD モジュールが発生できる駆動力の領域を機体のロールとピッチ方向を基準座標系にして表したものであり, 式 (5.1)~(5.4) に基づいて, 任意の出力したい方向における力に対し, 各ダクテッドファンが出力すべき推力を求めることができる.

開発した ATD モジュールは表 5.1 に示すように, 総重量は ESC を含め 0.83kg であり, ダクテッドファンは, 前節の行った水噴射時における力計測結果に基づき, 直径 70mm で最大推力は 1.3kg のものを使用した. このスペックであれば高圧洗浄機ノズルから発生する力を十分抑えることが可能である. 次に, ESC を通したダクテッドファンへの入力と出力関係を確かめるために, フォースゲージを用いて力計測を行った. 実験では, フォースゲージは IMADA ZTA シリーズを使用し, 開発した ATD モジュールを搭載したマルチロータにパイプを固定し, フォースゲージを押し込む方法で計測を行った. 計測結果を図 5.5 に示す. ダクテッドファンへの制御入力は 20% から 80% まで 3 秒ごとに 5% ずつ上げながら, 出力の計測を行い, その平均値を計算した. 各入力における出力値によりその漸近線を求め, 式 (5.5) に示したようにダクテッ

表 5.1: 高圧洗浄のための ATD モジュールの仕様

parameter	value
Gross weight	0.83 kg without battery
Number of ducted fan	3
Ducted fan size/motor	$\phi 70$ mm/2800 KV
Max thrust	1.3 kg for each ducted fan

トファンの入出力関係を推定することができ、図 5.5 にて得られた漸近線の数式にて求めることができる。

### 5.3 飛行ロボットシステム

開発した高圧洗浄飛行ロボットは図 5.6 に示す。飛行ロボットは ATD モジュール、マルチロータ、オンボードコンピュータ、高圧洗浄機から構成される。ATD モジュールは前節で説明したものを図に示すようにマルチロータ UAV に搭載した。マルチロータ UAV は DJI S800 の機体と DJI A3 のフライトコントローラーを使用した。機体のフレーム直径は 0.8m であり、プロペラは直径 0.38m のものを使用した。オンボードコンピュータは LattePanda Alpha 864 を使用しており、マルチロータと ATD の制御のために使用した。また、機体にはステレオカメラ Realsense T265 が搭載され、機体を基準とした速度情報をオンボードコンピュータで読み取り、ATD の制御のフィードバック値として使用した。

高圧洗浄機は前節で述べたように、Karcher K2 Classic を使用した。高圧洗浄機のノズルは図 5.6 の左図に示すように、鉄の配管に配置され、配管は機体が前進する方向(ロール方向)と一致するように固定し、図 5.6 の右図に示すように、配管の片方に給水ホースをつなげるように設計した。

飛行ロボットを制御するために、図 5.7 に示すように制御システムを構築した。マルチロータ UAV と ATD モジュールはオンボードコンピュータを通して制御される。フライトコントローラーとオンボードコンピュータは SDK を通じて通信が行われ、フライトコントローラーの内部センサ情報を読み取り、制御指令を送ることができる。ATD モジュールには I2C インターフェース (PCA9685) が搭載され、オンボードコンピュータから制御入力を受け取り、ESC を通じてダクテットファンの制御を行った。開発したシステムには、通常通りに機体の姿勢を傾けながら移動させる通常飛行モードと機体の姿勢を水平に保ったまま移動させる ATD 飛行モードがあり、プロポのスイッチにて飛行モードの切り替えを行えるように設計した。マルチロータ UAV への制御入力はロール角  $u_{roll}$ 、ピッチ角  $u_{pitch}$ 、ヨー角速度  $u_{yaw}$ 、垂直方向へのスロットル  $u_{throttle}$ 、ドリフト防止や自動ブレーキ機能のオンオフが設定できる  $u_{brake}$  がある。ATD モジュールにおける制御入力はマルチロータ UAV のロールとピッチ方向を基準座標系として  $u = [u_x \ u_y]^T$  に設定した。これらの制御入力とプロポから送信され

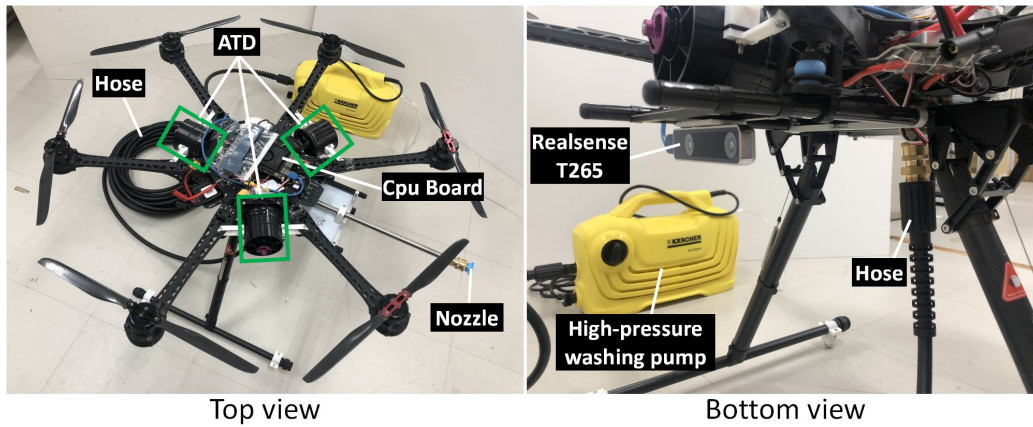


図 5.6: ATD モジュールを搭載した高圧洗浄用マルチロータ UAV の全体図.

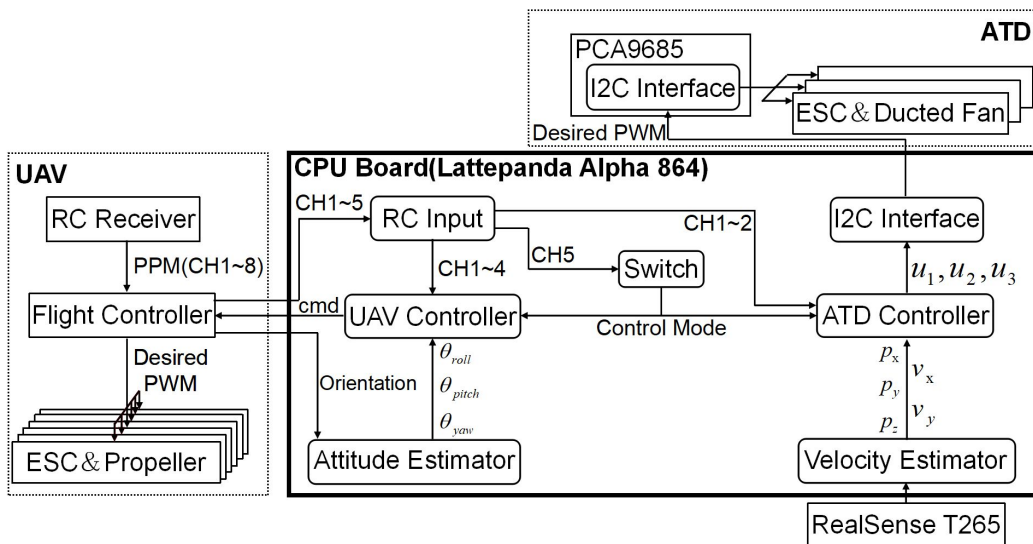


図 5.7: 高圧洗浄用マルチロータ UAV のシステム構成.

たデータ, フライトコントローラーの IMU データを用いて, 通常飛行モードと ATD 飛行モードにおける制御器を設計した. また, 新しく設計した制御器は前述の初代の ATD モジュールのシステム開発から改良を加えたものである. 通常飛行モードと ATD 飛行モードにおける制御入力は次式に示す.

通常飛行モード：

$$\begin{aligned}
u_{brake} &= 1, u_{roll} = K_{\theta max} u_{ch1}, u_{pitch} = K_{\theta max} u_{ch2} \\
u_{yaw} &= K_{pyaw} e_{yaw} + K_{dyaw} \dot{e}_{yaw} \\
u_{throttle} &= K_{th} u_{ch4} \\
u &= [0 \ 0]^T \quad (u_{ch5} = 1)
\end{aligned} \tag{5.1}$$

ATD 飛行モード：

$$\begin{aligned}
u_{brake} &= 0, u_{roll} = 0, u_{pitch} = 0 \\
u_{yaw} &= K_{pyaw} e_{yaw} + K_{dyaw} \dot{e}_{yaw} \\
u_{throttle} &= K_{th} u_{ch4} \\
u &= \begin{bmatrix} K_{fmax} u_{ch1} - K_v v_x \\ K_{fmax} e_y - K_v v_y + u_{eq} \end{bmatrix} \quad (u_{ch5} = 0) \\
e_y &= \begin{cases} P_{tary} - P_y & (u_{ch2} = 0) \\ u_{ch2} & (u_{ch2} \neq 0) \end{cases}, P_{tary} = P_y \quad (u_{ch2} \neq 0)
\end{aligned} \tag{5.2}$$

式 (5.10)(5.11) に示す  $u_{chi}$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) はプロポのコントロールスティックの入力値と切り替えスイッチの値を  $\pm 1$  の範囲に変換したものである。  $K_{\theta max}$ ,  $K_{th}$  はプロポの入力値の範囲をマルチロータ UAV が最大出力可能な範囲に対応させるためのパラメータであり、ロール、ピッチ方向では最大 25[deg]、垂直方向では最大 2[m/s] に入力が可能になるように設定した。ヨー方向に関しては、マルチロータ UAV が外乱などにより回転することを防ぐために、ヨー方向に操縦しない場合にはその時に向いた方向に向きを固定できるように PD 制御を行った。  $v_x$ ,  $v_y$  は図 5.7 で示したようにカメラから読み取った速度データを示している。ATD 飛行モード時にこれらの速度データをフィードバックとして与えることでマルチロータ UAV を速やかに停止させるブレーキ機能やドリフト防止機能を果たすことができる。  $u_{eq}$  は水噴射時の反力を抑えるための入力値であり、図 5.3 と図 5.5 に示した力計測結果に基づき、噴射時には約 3N~5N の推力を発生するように設定した。  $K_{fmax}$ ,  $K_v$  はマルチロータ UAV を ATD 駆動力でスムーズに動かせるための制御パラメータであり、実験的に決めた。  $e_y$  は水噴射方向における誤差を示しており、  $P_{tary}$  は目標位置、  $P_y$  はステレオカメラから推定した現在位置を示している。プロポからの操縦を行う場合には、誤差をプロポのス



ティックの入力を代入し、その間は常に目標位置に現在位置を更新させる。これにより、操縦にない場合は、その時にマルチロータ UAV が止まった場所に位置を固定することができる。一方、マルチロータ UAV のブレーキ機能は ATD 飛行モード時とお互い干渉してしまうため、通常飛行モード時にはオン ( $u_{brake} = 1$ ) にし、ATD 飛行モード時にはオフ ( $u_{brake} = 0$ ) にした。一方、マルチロータ UAV のヨー方向の角度制御における目標角度と誤差は次式のように設定した。

$$e_{yaw} = \theta_{targetyaw} - \theta_{yaw}$$

$$\theta_{targetyaw} = \theta_{yaw}(0) + K_{vyaw} \int_0^t u_{ch3} dt \quad (5.3)$$

$\theta_{yaw}(0)$  は機体のヨー方向の初期位置での角度を示しており、 $K_{vyaw}$  は実験的に決めた。

## 5.4 水噴射実験

開発した飛行ロボットが水噴射時に発生する反力を抑えながら姿勢を水平に保ったまま移動可能かを確認するために屋外飛行実験を行った。実験手順としては、まずマルチロータ UAV を飛行させ、飛行モードを ATD 飛行モードに切り替えた。次に、高圧洗浄機のスイッチをオンにして水噴射を始めた。マルチロータ UAV のホバリング状態における動作確認をした後、機体を図 5.8 に示す画像のようにマルチロータ UAV をジグザグのルートで移動させた。この動作は、マルチロータ UAV で建物などの一

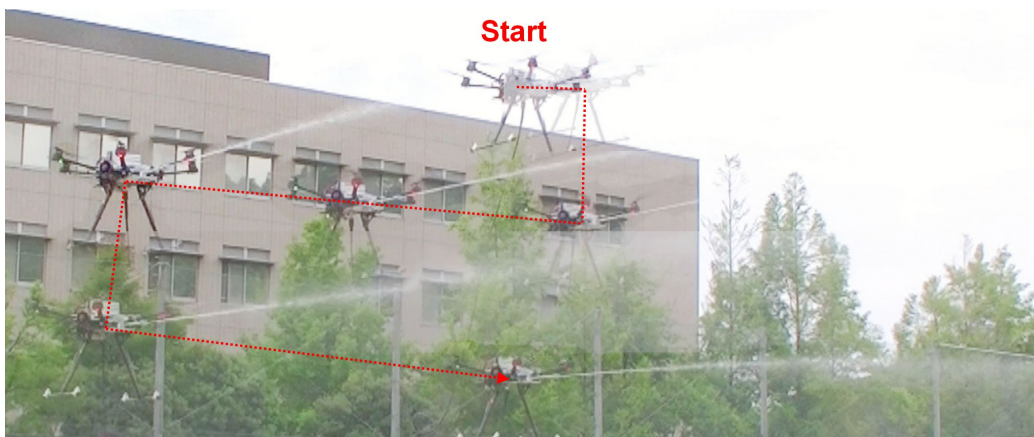


図 5.8: 水噴射飛行実験の連続画像。赤い点線はマルチロータ UAV の移動軌跡を示す。

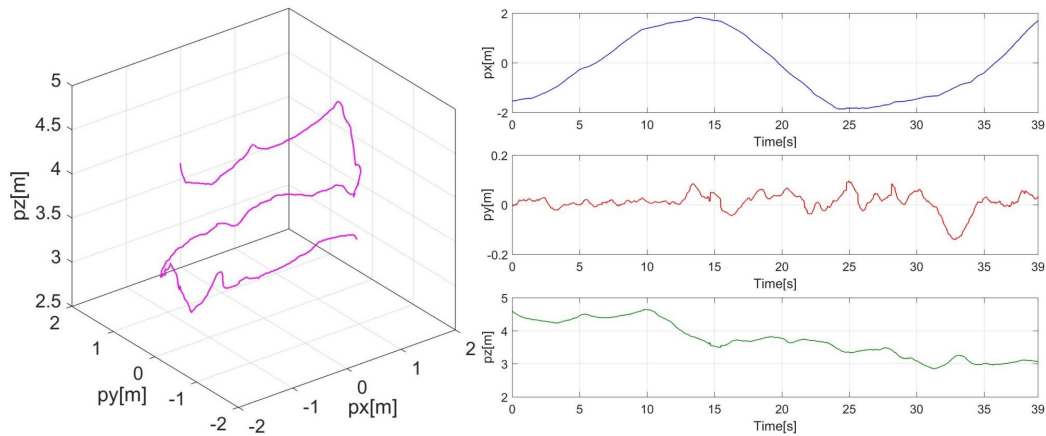


図 5.9: 水噴射時のマルチロータ UAV の移動軌跡とその時系列データ。

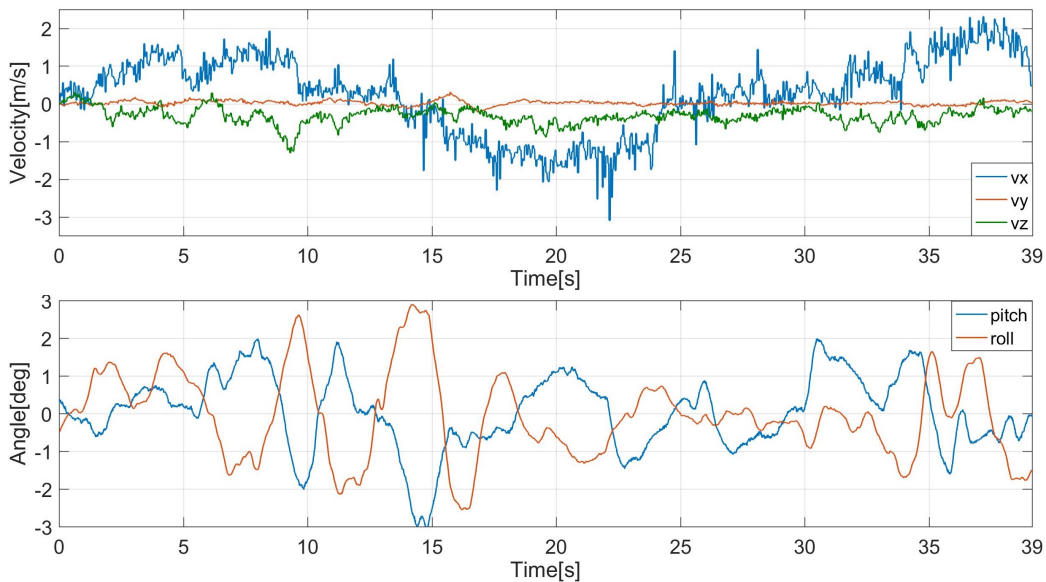


図 5.10: 水噴射時のマルチロータ UAV の速度 (上図) と姿勢 (下図) 変化。

面を洗浄すると想定した動きである。実験において、水噴射方向はステレオカメラのオドメトリデータをフィードバックに自動で指定した位置に場所を固定するように制御され、ヨー方向も指定した方向に固定できるように自動制御を行った。マルチロータ UAV の左右と上下方向の移動はマニュアル操作で行った。

実験結果を図 5.9 と図 5.10 に示す。図 5.9 の左グラフはマルチロータ UAV が移動した軌跡を示しており、右の三つのグラフはこれを時系列で表したものである。図に示すように、水噴射方向では約  $\pm 0.05\text{m}$  の範囲内で位置が制御でき、水噴射時に発生

する反力がしっかり押さえられたことがわかる。また、30~35秒の間、一時的に位置が目標位置から0.2mほどずれたが、これは給水ホースが機体に引っ掛かったことが原因であり、すぐに目標位置に収束し、飛行には影響しなかった。また、移動した軌道に示すように、左右上下方向はマニュアル操作で行ったが、ほぼジグザグのルートに近い動作ができた。図5.10の上のグラフはマルチロータ UAV の移動中の速度を示しており、ステレオカメラから得た速度データから推定した。また、 $v_x, v_y$  の方向は図5.4に示した座標系と一致する。この結果により、マルチロータ UAV がピッチ方向に移動している間、水噴射した方向での速度変化は約 $\pm 0.05\text{m/s}$ 以内であり、水噴射時に発生する反力が確かに抑えられたことが確認できた。図6.1の下側のグラフはマルチロータ UAV の姿勢データを示している。この結果で示すように、マルチロータ UAV の移動中のロール、ピッチ角の変化は $\pm 2$ 度以内であり、姿勢がほぼ水平に保たれたことが確認できた。一方、飛行しながら壁などの物体に水を当てる時にも機体に加わる反力には変化がないことも確認した。以上により、マルチロータ UAV の半自動化による高圧洗浄作業への応用が可能であることが検証できた。

## 第6章 ロングリーチ空中マニピュレーション

これまでの研究では水平推進システム (ATD モジュール) をマルチロータ UAV に搭載することで、空中マニピュレーションにおける一般課題が解決できた。本研究では、ATD モジュールの拡張応用として、空中マニピュレーションにおいて作業対象とマルチロータ UAV に離隔を保持したい場合であるロングリーチ空中マニピュレーションに着目した。ロングリーチ空中マニピュレーションは図 6.1 に示すように、以下のような場面での活用が期待できる。

- ダウンウォッシュ：作業対象が非常に軽い物であったり、バランスを崩しやすいものである場合、作業対象はマルチロータ UAV のプロペラから発生するダウンウォッシュの影響を受けやすくなる。また、我々の先行研究で実現した空中ドッ

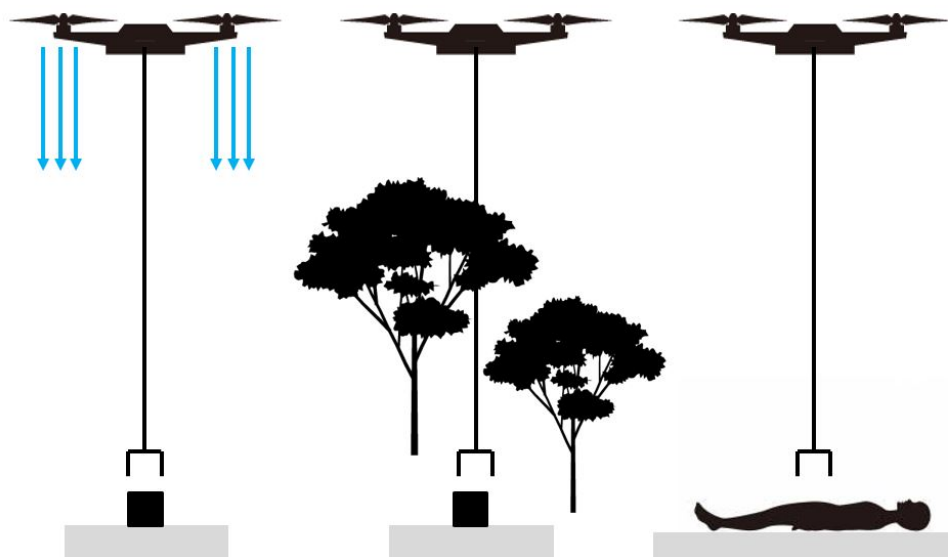


図 6.1: ロングリーチ空中マニピュレーションが求められる場面.

キングの研究 [58] もこの場面に該当する。

- 狭い空間や障害物の多い環境：作業対象が狭い空間や障害物の多い環境にある場合、マルチロータ UAV を作業対象の近傍まで接近させるのは難しくなる。
- 安全確保：災害現場において、人の救助作業を行う場合、プロペラが当たると二次被害が発生するため、安全確保を行う必要がある。J.M. Gomez-de-Gabriel らの研究 [63] では人の災難救助用の飛行ロボットが開発された。災害現場で後から救助隊員が特定された場所まで向かえるように、気を失った人の手首の GPS の設置作業を行う飛行ロボットである。しかし、設置作業時にはマルチロータ UAV と人との距離は 1m 未満であり、十分安全確保がされていない。

ロングリーチ空中マニピュレーションを実現するための一つの方法として、長いロボットアームを機体に搭載することが考えられる。研究 [64]-[67] では、軽量化された長いロボットアームを開発し、機体に搭載した上で、棒状物体へのパーチングや障害物を回避するための動作計画を行った。Kim らの研究 [68] では折り紙構造の伸縮可能なロボットアームを開発し、マルチロータ UAV に搭載することで、機体の直下の物体の把持に成功した。しかし、これらの研究では、ロボットアームが機体のランディング脚より長く伸びているため、離着陸が困難であり、ロボットアームの揺れが機体に影響する。また、高速移動が困難であり、マルチロータ UAV のペイロードとロボットアームの重さにはトレードオフの関係があるため、現状では 0.5~1m の機体の直径に対して 1.5m の長さのロボットアームが限界であり、上述の場面に十分対応できるほどにロボットアームを長く設計するのは難しくなるなど、様々な新しい課題が発生する。そこで、本研究ではロボットハンドを ATD モジュールに搭載し、マルチロータ UAV からワイヤで吊り下げる方法に着目した。

上述の課題に対し、ロボットハンドの吊り下げによるロングリーチ空中マニピュレーション手法では、ロボットハンドの揺れが克服すべき課題となる。これはロボットハンドの作業対象への位置決めに影響を与える。一方、飛行ロボットのワイヤ懸架物を安定化するための研究が発表された [69]-[75]。研究 [69][70] では、揺れ抑制は懸架物自体で行われ、フィンやホイールの制御により実現された。一方、ヘリコプター型飛行ロボットによる姿勢制御により移動中に懸架物の揺れを安定化させた研究も報告されている [71][72]。ヘリコプター型飛行ロボットはマルチロータ UAV に比べ、

運動能力は高いが、設計が複雑であるため、消耗品が多く、維持コストが高い。マルチロータ UAV によるワイヤ懸架物の揺れ抑制に関しては [73][75]、屋内環境での経路計画などを実現しているが、ワイヤの長さは約 1m であり、懸架物の重さは機体に全く影響しないほどに設定して行ったため、外乱の多い屋外の環境で数メートル懸架したロボットアームを想定する場合には、これらの手法は適用しにくい。一方、研究 [76]-[79] では、一本のワイヤでロボットアームを懸架した飛行ロボットによる空中マニピュレーションを実現するために、8つのプロペラを用いて揺れ抑制装置を開発し、シミュレーションを行い [76]、屋内環境における揺れ抑制制御を行い [77]、クレーンで装置を懸架した状態でのピックアンドプレース作業を行った [78][79]。一方、本研究で提案する手法もこれらの研究に類似しているが、開発したワイヤ懸架ハンドはより少ないアクチュエータを用いており、コンパクトな構造で軽量であり、マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンド間の通信も構築した。

開発した飛行ロボットプラットフォームはワイヤ懸架ハンドとヘキサロータ型飛行ロボットで構成される。ヘキサロータにはウィンチ機構と CPU ボード、カメラが搭載されており、ウィンチ機構の制御でワイヤ懸架ハンドの垂直方向における位置制御ができ、CPU ボードのオンボード処理によりフライトコントローラから飛行状態の取得やワイヤ懸架ハンドとの通信を介したウィンチ機構の制御ができる。また、カメラによりワイヤ懸架ハンドとの 3次元の相対位置が推定でき、通信を介してワイヤ懸架ハンドに位置情報を送ることができる。ワイヤ懸架ハンドは4つのダクトファンと IMU センサ、カメラ、CPU ボード、ロボットハンドで構成される。4つのダクトファンと IMU センサ、カメラにより、ワイヤ懸架ハンドの運動状態を推定し、水平面上の揺れを抑制したり、マルチロータ UAV の移動中の位置制御ができる。更に、カメラを用いてワイヤ懸架ハンドの下部の作業対象の検出や位置推定などができ、ロボットハンドによりマニピュレーションができる。

提案手法に基づき開発した飛行ロボットは図 6.2 に示すようである。マルチロータ UAV の作業時にはワイヤ懸架ハンドを 3m 以上懸架した状態で作業を行い、作業エリアまでの移動やマルチロータ UAV の離着陸時にはワイヤ懸架ハンドを機体の直下に引っ込めた状態にすることができる。これにより、これまでに提案された長いロボットアームによるロングリーチ空中マニピュレーション手法 [64]-[67] に関わる問題が解決でき、より安全なロングリーチ空中マニピュレーションの実現が期待できる。更に、ワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV 間に通信を構築することで機能を拡張し、応



図 6.2: ワイヤ懸架ハンドを利用したロングリーチ空中マニピュレーション. ピックアップ・ブレース作業時にはワイヤ懸架ハンドをマルチロータ UAV から 3m(左図) 吊り下げた. 遠距離移動時にはワイヤ懸架ハンドをつり上げ(右上図), マルチロータ UAV の直下に収めた状態(右下図) にできる [80](©2019 IEEE).

用を広げることができる. 通信により, マルチロータ UAV の飛行中にもワイヤ懸架ハンドはその直下に位置を保つことができる. また, ウィンチ機構はワイヤ懸架ハンドのセンシング情報を元に, 自由にワイヤ懸架ハンドと地面間の距離を調整できる. これらにより, この飛行ロボットシステムは, ワイヤ懸架ハンドを自由に長さが調整できるリジッドなアームとして使用することが可能である.

## 6.1 ロングリーチ空中マニピュレーションの応用

### 6.1.1 ピックアンドプレース作業

ロングリーチ空中マニピュレーションの応用としてピックアンドプレース作業が考えられる [80]. 図 6.3 に示すように作業対象が複数ある場合は, 作業エリアにて予めワイヤ懸架ハンドを吊り下げた状態で作業を繰り返すのが効率が良い. この場合, マルチロータ UAV を高速に移動する必要はないが, 移動に伴うワイヤ懸架ハンドの揺れは抑制する必要がある. 一方, 作業対象が狭い空間にある場合は, マルチロータ UAV を対象の上部まで接近させ, ワイヤ懸架ハンドを吊り下げながら把持を行う方法も考えられる.

提案方法におけるピックアンドプレース作業は通常のロボットアームによるマニピュレーションに比べ高い安全性を持つ. 例えば, 飛行ロボットの作業中に風などの影響により, マルチロータ UAV がドリフトしてワイヤ懸架ハンドが壁などに当たった場合でもその衝撃はワイヤで吸収されるため, マルチロータ UAV の飛行への影響は防げる. 図 6.3 で示す作業が実現できれば, 高所における部品の運搬だけでなく, 安全な作業員への荷物の受け渡しや災害現場における遭難者への救助物資の受け渡しができるなど応用が広がる.

これを実現するためには, ワイヤ懸架ハンドの揺れが課題となり克服する必要がある. ワイヤ懸架ハンドの揺れは主に, マルチロータ UAV の移動で発生すると考えられる. ハンドが揺れてしまうと作業対象物に対する位置決めにおいて大きな障害があるため, 本研究ではまず揺れ抑制に着目し, 揺れ抑制装置の開発から始め, この応用

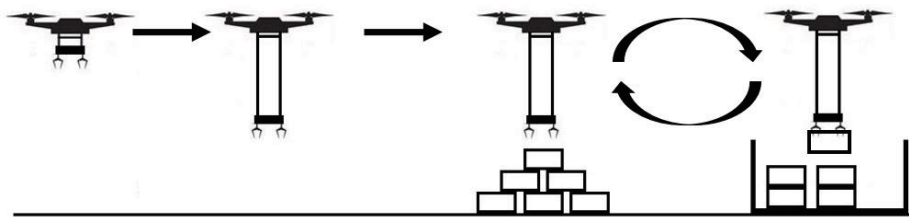


図 6.3: ロングリーチ空中マニピュレーションにおけるピックアンドプレース作業. 作業対象が複数ある場合にはワイヤ懸架ハンドを延ばした状態で作業を繰り返す方が効率が良く, この場合には揺れ抑制が必要となる [80](©2019 IEEE).



の実現に取り組んだ。

### 6.1.2 障害物回避およびインフラ点検作業への応用

上述したピックアッププレイス作業の時にはマルチロータ UAV をゆっくり動かしながら作業対象に接近するば良いため、ワイヤ懸架ハンドの揺れ抑制だけでも十分であるが、一部のインフラ点検作業ではマルチロータ UAV を常に動かし、できるだけ高速に移動させる必要がある。例えば、高圧電線の点検や太陽光パネルの検査作業が挙げられる。しかし、揺れ抑制だけでは図 6.4 に示すように、マルチロータ UAV の高速移動時にワイヤ懸架ハンドが水平方向に大きくずれる現象が生じ、マルチロータ UAV の移動速度が速いほどずれが大きくなる。前述したような場面への応用を実現

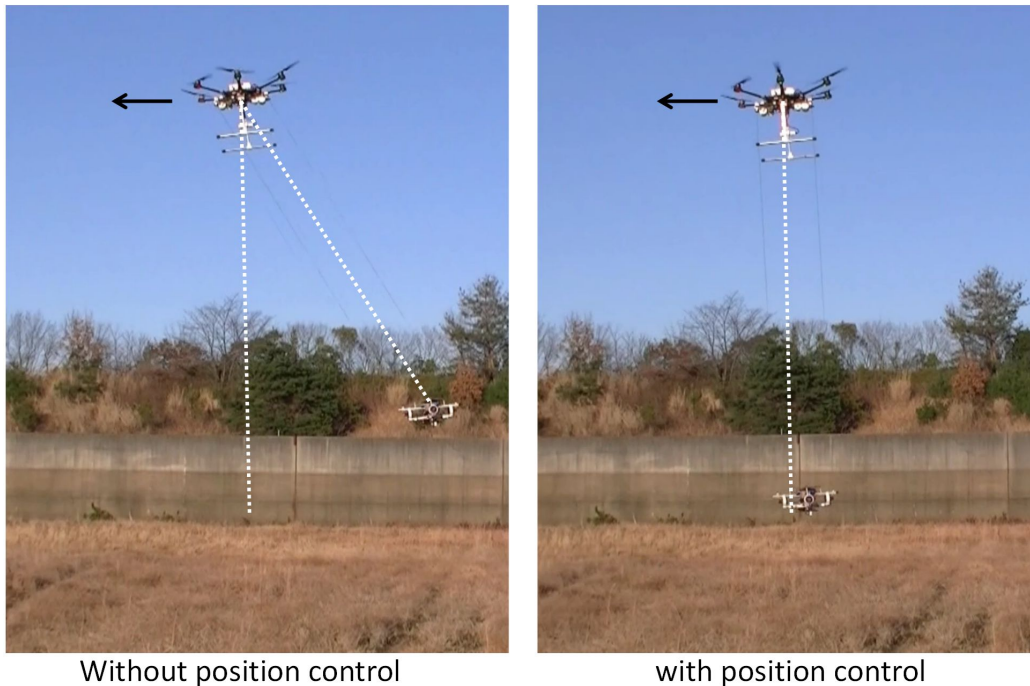


図 6.4: 飛行中におけるワイヤ懸架ハンドの状態 (マルチロータ UAV は図の左方向を向かって飛行). 左図はワイヤ懸架ハンドに位置制御を適用させない場合の状態を示し、マルチロータ UAV の移動速度が速いほどワイヤ懸架ハンドのずれが大きくなる。右図は位置制御を適応させた場合の状態を示し、飛行中に常にハンドをマルチロータ UAV の直下に位置を保つことができる [81].

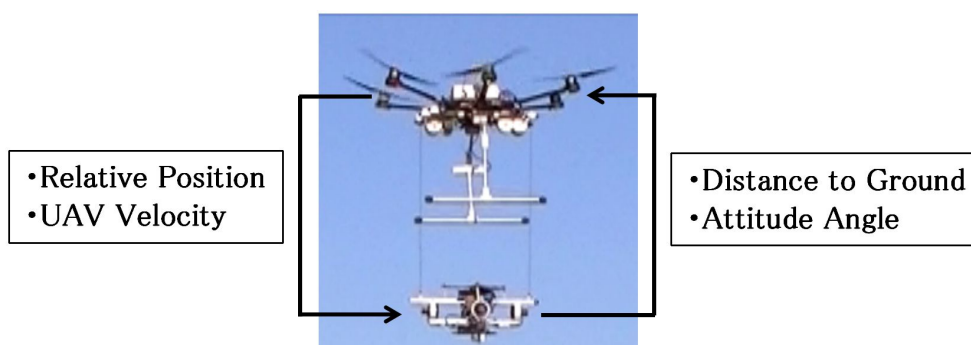


図 6.5: ワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV 間の通信 ([81] により作成).

するためには，ワイヤ懸架ハンドをマルチロータ UAV の直下に保ち，リジットアームとして動作させる必要がある．この問題はマルチロータ UAV からワイヤ懸架ハンドにセンシング情報を送信させ，ワイヤ懸架ハンド自身のセンシング情報と統合し，ダクテットファンにより位置制御を行うことで解決できる．一方，本研究で開発した飛行ロボットは構成的に，ワイヤ懸架ハンドに搭載するダクテットファンの消費電力を抑えるために，ウィンチ機構はマルチロータ UAV 側に搭載する構造を取った．しかし，ウィンチ機構を用いてワイヤ懸架ハンドと地面との距離や作業対象との距離を制御したい場合は，ワイヤ懸架ハンドからのセンシング情報が必要となる．この問題はワイヤ懸架ハンドからのセンシング情報をマルチロータ UAV に送信させ，マルチロータ UAV 自身のセンシング情報と統合し，ウィンチ機構を制御することで解決できる．

以上を踏まえ，本研究ではワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV の一体化のために，図 6.5 に示すような双方向通信システムを提案する [81]．ワイヤ懸架ハンドはマルチロータ UAV から三次元の相対位置と速度情報を受信し，自身の運動状態のセンシング結果と統合して，ダクテットファンの推力を制御することで，ワイヤ懸架ハンドをマルチロータ UAV の移動時にもその直下に保つことができる．マルチロータ UAV はワイヤ懸架ハンドから地面とのセンシング情報と姿勢情報を受信し，自身のセンシング情報と統合することでウィンチ機構の制御を行い，ワイヤ懸架ハンドを地面や作業対象から一定の距離を保ちたり，移動中にも姿勢を常に水平に保つような制御ができる．

提案するシステムの検証や有効性を確認するために図 6.6 に示すような作業を考え

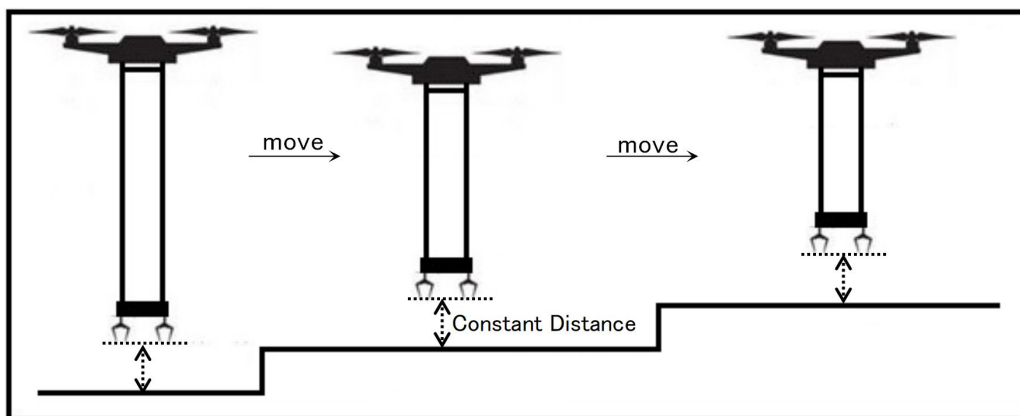


図 6.6: 通信を介したワイヤ懸架ハンドの位置制御による障害物回避作業の方法 [81]

た. マルチロータ UAV はワイヤ懸架ハンドを吊り下げた状態で段差状の障害物を乗り越えており, 移動中にワイヤ懸架ハンドは常にマルチロータ UAV の直下に保たれつつ地面との距離も一定に保つ. これが実現できれば, インフラ点検における高圧電線の検査や太陽光パネルの検査など, 安全確保のためにマルチロータ UAV は作業対象から離れたほうが良いが, 高精度の結果を得るために計測装置は作業対象からなるべく近い位置に置きたい場面での応用が期待できる. 更に作業環境にてワイヤ懸架ハンドの障害物回避もできるなど応用が広がる.

本研究ではこれを実現するために, 前節で述べたピックアンドプレース作業を実現するために開発した, 図 6.2 に示した飛行ロボットをベースに改良を加え, 通信を構築し, ウィンチ機構の制御則やワイヤ懸架ハンドをリジッドなアームとして使用するための制御則を設計した. また, 目的の応用に応じて機構の改良も行った.

## 6.2 ウィンチ機構の開発とマルチロータ UAV への実装

### 6.2.1 ウィンチ機構

ウィンチ機構のワイヤ長はマルチロータ UAV のダウンウォッシュを考慮し, 5m に設定した. ウィンチ機構はワイヤ懸架ハンドのヨー方向の回転や揺れを物理的に抑えるためにワイヤ 2 本でワイヤ懸架ハンドの両端を結ぶように設計した. マルチロータ

UAVの空中ドッキングやピックアップ・アンド・リリース作業を行うにはウィンチ機構はワイヤ懸架や棒状物を上下方向の1自由度の動作さえ可能であれば要求を満たす。

これらの応用に対応するために、本研究ではまず、DCモーター一個を使用して設計を行った。一方、用いるマルチロータ UAV のペイロードは4kgであり、ワイヤ懸架ハンドの総重量は2kgに想定する場合、ウィンチ機構は最低2kg、更にワイヤ懸架ハンドが把持する物体の重さまで考慮すると最低4kg以上持ち上げられるように設計する必要がある。また、マルチロータ UAV に先行研究 [57] のような棒状物などにパーキングし、高所に機体を固定できると、ウィンチ機構はマルチロータ UAV のペイロード以上の物を持ち上げることが可能となる。ウィンチ機構の物体の持ち上げる力をあげるためには用いる DC モーターの減速比を増やせばよいが、減速比を上げすぎると動作が遅くなる。以上を踏まえ DC モーターはマブチモーター RS-540SH-7520 を使用し、減速比 75:1 のギアボックスを取り付けた。このモーターの定格トルクは  $2\text{g}\cdot\text{cm}$  であり、回転数は 14400rpm である。設計したウィンチ機構は図 6.7 に示す。ウィンチ機構はワイヤ懸架ハンドがその下部にしっかり収まることを考慮し、なるべく高さが低くなるように設計した。ワイヤを巻くリールは DC モーターのヘッド部に取り付けたギアを通して回転され、ワイヤ 2 本はそれぞれ機体の左右に伸ばされ、滑車を通してワイヤ懸架ハンドに結ぶように設計した。また、リールの半径は 0.01m、幅は 0.03m であり、ワイヤの直径は 0.002m であり、ワイヤの長さが 5m である場合、リール全体

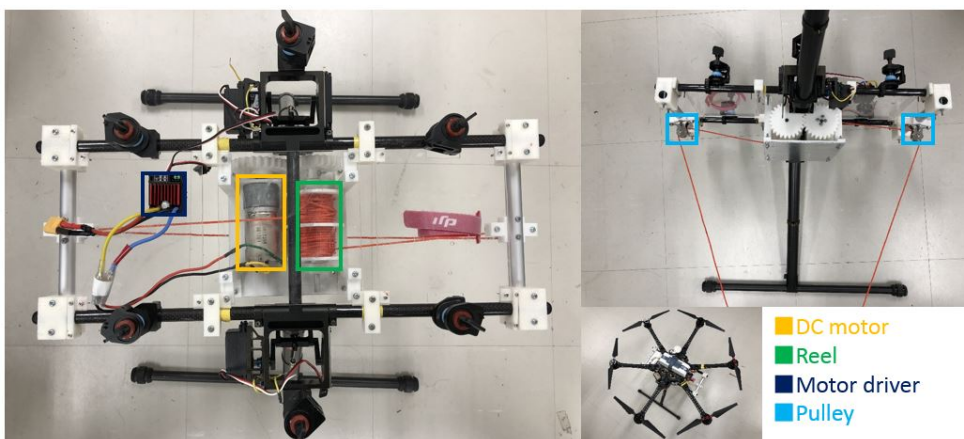


図 6.7: ウィンチ機構の全体図 (version 1)[80](©2019 IEEE).

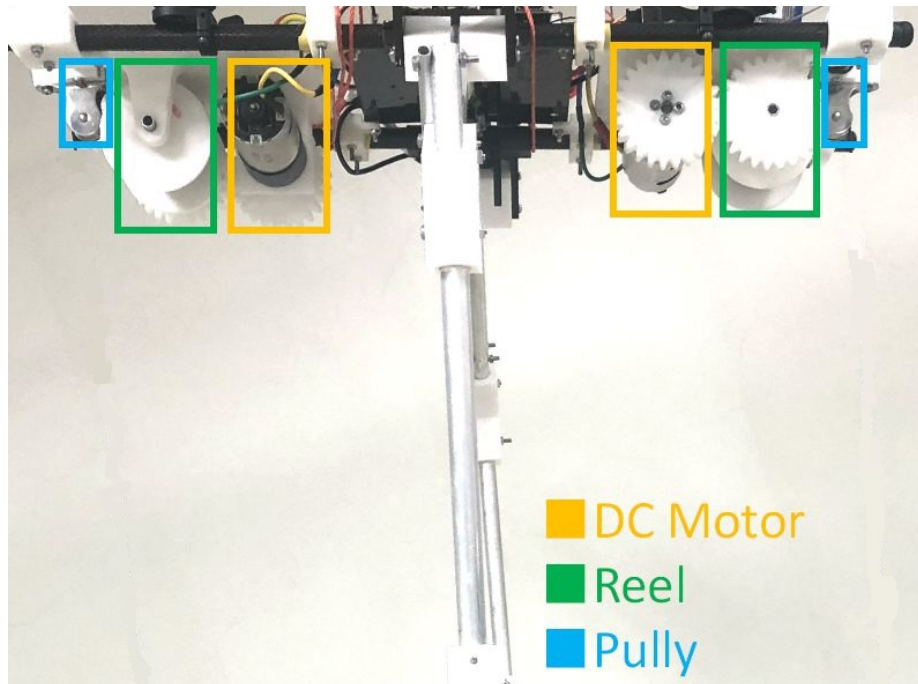


図 6.8: ウィンチ機構の全体図 (version 2)[81].

の半径は  $0.01\text{m}$ ～ $0.018\text{m}$  の範囲で変動する。これらの数値とモータの定格トルクにより、ウィンチ機構は最速  $0.36\text{m/s}$  でワイヤ懸架ハンドを動かすことができ、ハンドの重量込みで最大  $10\text{kg}$  ほどのものを持ち上げることができる。このウィンチ機構は後述する空中ドッキング実験とワイヤ懸架ハンドによるピックアンドプレース実験にて使用された。

一方、マルチロータ UAV が高速に移動する場合は機体が前方に傾くため、ワイヤ懸架ハンドも傾いてしまう。そのため、本研究ではさらにモータ一個を追加してウィンチ機構を設計した。新たに設計したウィンチ機構は図 6.8 に示す。このウィンチ機構は DC モータを 2 個使用しているため、トルクが前に設計したウィンチ機構の DC モータのほぼ半分になるようにタミヤギヤードモータ 380K75 を使用した。また、最大持ち上げ可能な重量や速度も同じくなるようにリールの半径を調整した。モータ 2 個を使用し、ウィンチ機構の 2 本のワイヤの制御を独立させることで、ワイヤ懸架ハンドをマルチロータ UAV が飛行中に傾いても水平になるように制御できたり、作業対象に対して姿勢を制御することも可能になる。設計したウィンチ機構は後述する

表 6.1: ウィンチ機構の仕様 (version 1 と version 2 は同じ仕様). ([58] により作成, ©2018 IEEE)

Parameter	Value
Gross weight	0.47[kg]
Capacity	10[kg]
Wire length/diameter	5[m]/ $\phi$ 2.0[mm]
Max line speed	0.36[m/s]

ウィンチ機構の自動制御実験やワイヤ懸架ハンドの段差状の障害物乗り越え実験に使用された。

設計したウィンチ機構の仕様を表 6.1 に示す。図 6.7 と図 6.8 のウィンチ機構のスペックは自由度以外は同じである。最後にマルチロータ UAV を天井に固定し、ウィンチ機構に 3kg ほどの負荷を持たせ、2 種類のウィンチ機構の動作確認を行った。結果、モーター一個を使用したウィンチ機構は物体の持ち上げる過程で左右にぶれることなく均等にワイヤが巻き上がることが確認でき、モーター二個を使用したウィンチ機構の場合もスムーズに持ち上がることが確認でき、物体の姿勢もしっかり制御できることが確認できた。

## 6.2.2 システム構成

開発した飛行ロボットのマルチロータ UAV 側は主にウィンチ機構、モータードライバー、RC 受信機、ランディングギア、フライトコントローラ、CPU ボード、機体フレームから構成される。モータードライバーは PCA9685 を使用しており、RC 受信機は Futaba R7103SB を使用した。

これらの装置は受信機一個に繋がっており、お互い影響されることなく動かすことが出来る。ウィンチ機構のモーターはモータードライバーに繋がり、受信機からパルス信号を受け取ることでプロポによりウィンチ機構の基本動作（正転、逆転、停止）を行うことが出来る。また、自動制御を行うためには受信機に代わり、CPU ボードからパルス信号をドライバーに送ればできる。ランディングギアはフライトコントローラから制御することも出来るが、応答性を考慮して直接ランディングギアのサーボモーターを受信機に繋ぎ、プロポの操縦により操作が出来るようにした。フライトコントロー

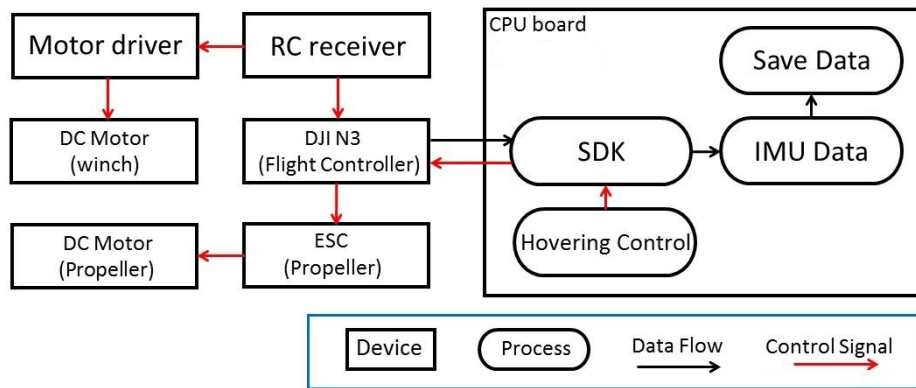


図 6.9: ウィンチ機構を搭載したマルチロータ UAV のシステム構成 [58](©2018 IEEE).

ラと機体フレームは前述したように DJI N3 と DJI S800 を使用し、フライトコントローラは DJI SDK を通じて CPU ボードと通信を行った。CPU ボードは主に前述したダウンウォッシュの計測実験におけるプロペラの回転数の固定や、後述する画像処理や実験データとして機体の IMU データを取得するために搭載した。構築したシステムの構成図を図 6.9 に示す。

## 6.3 ワイヤ懸架ハンドの開発

### 6.3.1 揺れ抑制シミュレーション

本研究で提案するワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV から構成される飛行ロボットは天井クレーンのモデルと類似している。天井クレーンの懸架物の揺れ抑制のための制振制御に関する研究は古くから行われた。懸架物の揺れは単振り子の揺れとみなすことが可能であり、その制振制御は主に懸架物の上部のクレーン装置を左右に動かすことで行う天井クレーン制御 [82]、重心位置の移動による制振制御 [83]、懸架物を上下に動かすことで横揺れを縦揺れに変換し最終的に揺れを収める方法 [84] が挙げられる。しかし、これらの方法はいずれも飛行ロボットの場合には適用しにくい。飛行ロボットの場合は空中に浮いており、天井クレーンのようにしっかり固定されていない。また、ワイヤ懸架物の揺れは天井クレーンの場合には本体への影響は無視できるが、飛行ロボットの場合には無視できず、揺れが激しくなるとマルチロータ UAV 自体が姿勢を水平に保つような制御が働き、より揺れを大きくしてしまう可能性がある。更に、飛行ロボットは天井クレーンのように高精度の軌道制御は、外乱の多い屋外の環境では実現し難い。飛行ロボットの下部にクレーンのような装置を搭載した場合は、マルチロータ UAV のバランスを崩してしまうため、この方法も適用しにくい。

一方、天井クレーンの場合にはワイヤ懸架物は荷物であるため、揺れ抑制装置を荷物に載せる方法は効率が悪く、基本的に考慮されないが、飛行ロボットの場合には揺れ抑制装置を機体とワイヤ懸架ハンドのどちらに載せても機体への負荷は変わらず、ワイヤ懸架ハンドは飛行ロボットの一部となるため、揺れ抑制装置をワイヤ懸架ハンドに載せ、ハンド自体で揺れ抑制を行う方法が十分考えられる。以上を踏まえ、本研究ではワイヤ懸架ハンドで揺れ抑制を行う方法からアプローチした。

ワイヤ懸架ハンドの揺れはハンドのロール、ピッチ、ヨー方向に分解できる。ヨー方向の揺れに関しては、ウィンチ機構からワイヤ懸架ハンドをワイヤ 2 本で吊り下げる方法を取るため考慮しない。そこで、本研究ではワイヤ懸架ハンドの揺れモデルを図 6.10 で示すように考えた。図 6.10 に示す Y-Z 平面では、ワイヤ長  $L_1$  がワイヤ懸架ハンドの両端の距離  $L_2$  より十分長いと想定すると、この平面上の揺れは単振り子の揺れに仮定することができる。つまり、Y-Z 平面と X-Z 平面上の揺れはいずれも単振り子の揺れにみなすことができる。この単振り子のモデルに揺れをより速く収めるこ



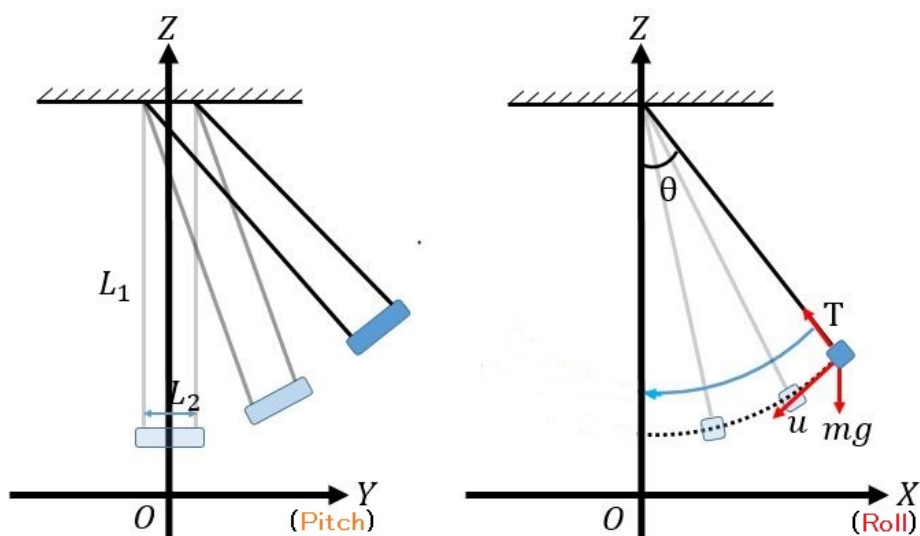


図 6.10: ワイヤ懸架物の揺れを想定したモデル. 揺れはピッチとロール方向に分けて考える.  $L_1$  と  $L_2$  はワイヤの長さと言ワイヤ間の距離を示す. ワイヤ懸架物の姿勢と言ワイヤが傾いた角度は一致すると仮定する [80](©2019 IEEE).

とができ, 運動方向と逆向きに力  $u$  が作用していると仮定すると運動方程式は下記の通りである.

$$m\ddot{\theta} = -\frac{mg}{L_1} \sin \theta - k_1 \dot{\theta} + u \quad (6.1)$$

ここで,  $k_1$  は空気抵抗や摩擦を考慮した粘性係数であり,  $\theta$  はワイヤの角度を示しており, これはワイヤ懸架ハンドが傾いた角度と同じである.  $k_1$  を求めるために実環境でワイヤ懸架物に慣性計測センサ (IMU) を載せ, 初期条件を  $m = 1\text{kg}$ ,  $\theta = 30$  度,  $L_1 = 1\text{m}$ ,  $u = 0$  として単振り子の揺れを観測した. その結果を図 6.11 に示す (上図). 次に, 式を MATLAB に代入し, 前述と同じ初期条件で  $k_1$  を徐々に調整しながら図 6.11 の上図と同じ結果が得られるまでシミュレーションを繰り返す,  $k_1 = 0.03$  の場合に実験と同じ結果が得られることが確認できた. その結果は図 6.11 の下図に示すようである. この結果に基づき, シミュレーション上で PD 制御を行った. 制御入力  $u$  は次式に示すようである.

$$u = -\text{sgn}(\dot{\theta}') K_p \theta' - K_v \dot{\theta}' \quad (6.2)$$

ここで  $K_p$  と  $K_v$  は制御ゲインであり, フィードバック値  $\theta'$  は IMU センサから求めら

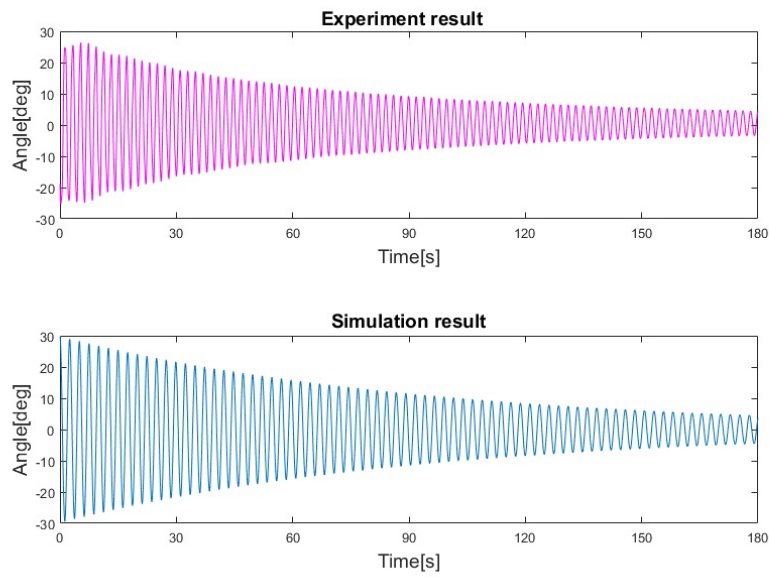


図 6.11: ワイヤ懸架物の揺れが自然に収まるまでの姿勢変化 (上図) とシミュレーションによりその揺れを再現 (下図) した結果図. シミュレーター上で調整したパラメータは揺れ抑制シミュレーションに使用した [80](©2019 IEEE).

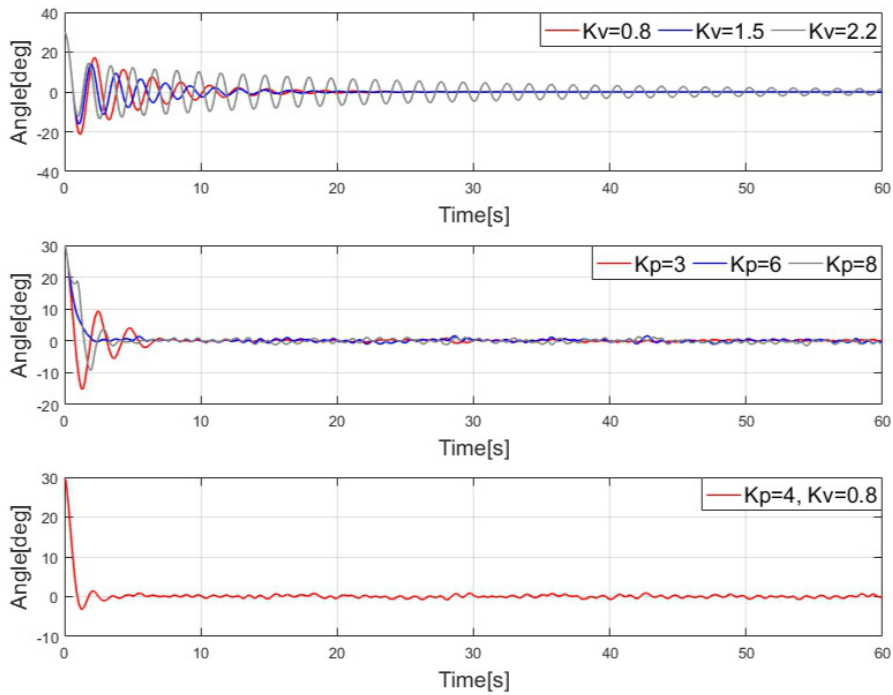


図 6.12: 揺れ抑制制御のシミュレーション結果. グラフは,  $K_p=0$  にし,  $K_v$  だけを調整した場合 (上図),  $K_v=0$  にし,  $K_p$  だけを調整した場合 (中図),  $K_p$  と  $K_v$  両方調整した場合 (下図) の結果を示す [80](©2019 IEEE).

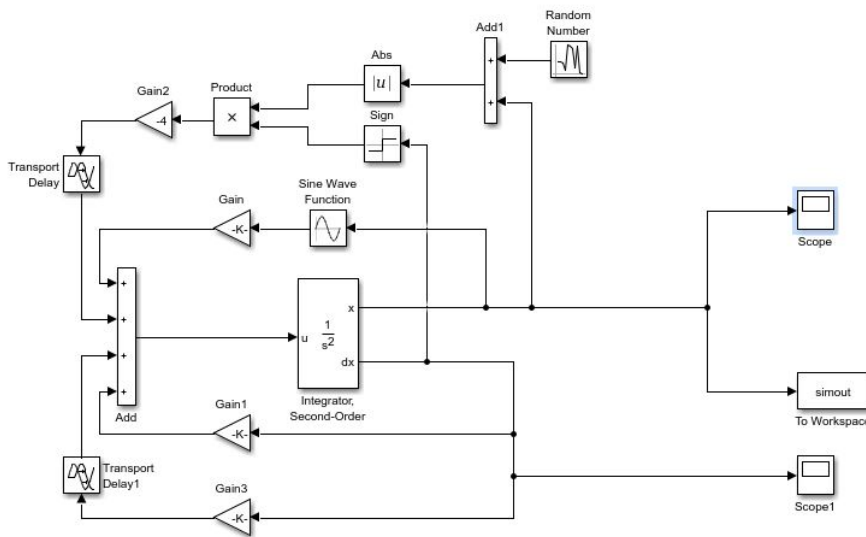


図 6.13: MATLAB 上の揺れ抑制制御シミュレーションのブロック図.

れる場合、センサのノイズを考慮して $\theta$ に $\pm 1^\circ$ の範囲の乱数を追加した。また、遅れの要素も考慮して $0.02s$ の遅れを入れた。シミュレーション結果を図 6.12 に示す。

シミュレーションは $K_v$ だけが有効な場合( $K_p = 0$ )、 $K_p$ だけが有効な場合 $K_v = 0$ 、ゲインが両方とも有効にした場合の3通りで行った。結果により、 $K_p$ だけが有効な場合と両方とも有効な場合に収束時間が最も短くなっており、この二つの場合の収束時間はほぼ同じである。しかし、ワイヤ懸架ハンドのピッチ方向の揺れは揺れが小さいときには水平方向のみの揺れとなるため、IMU センサで検出できず、角度に比例した制御だけではこの揺れに対応しきれない。そのため、本研究ではゲインを両方とも有効にした場合を選んだ。また、更にワイヤ懸架ハンドの速度は角速度に比例しているため、式(6.2)に示す角速度 $\dot{\theta}$ の代わりに速度 $V$ を代用することができる。また、ワイヤ懸架ハンドの速度はIMU センサに内蔵された加速度センサの値から求めることができる。一方、MATLAB でシミュレーションを行うために設計したブロック線図を図 6.13 に示す。

### 6.3.2 ワイヤ懸架ハンドの設計

揺れ抑制シミュレーションの結果に基づき、図 6.14 に示すようにワイヤ懸架ハンドを設計した。ハンドは揺れ抑制装置とビジョンベースの把持システムに分けられる。揺れ抑制装置は4つのダクテットファンと CPU ボード、オープンソースのフライトコントローラから構成される。CPU ボードは Intel 社が発売している AAEON Up Board を使用しており、フライトコントローラは Pixhawk を使用した。ダクテットファンは直径 50mm で発生できる最大推力は 0.95kg である。ダクテットファンを速いレートで IMU センサフィードバックを貰い、制御の遅れを低減するためにフライトコントローラのソースコードを変え、揺れ抑制専用コントローラに改造し、ダクテットファンをフライトコントローラに直接繋いで制御できるようにした。ワイヤ懸架ハンドの姿勢 (ロール, ピッチ, ヨー) は IMU センサから取った 4 元数から下記の計算により求めた。

$$\begin{bmatrix} roll \\ pitch \\ yaw \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \\ \sin^{-1}[2(q_0q_2 - q_1q_3)] \\ \tan^{-1} \frac{2(q_0q_3 + q_1q_2)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

ダクテットファンは図 6.14 の上図に示すように配置しており、ロールとピッチ軸において二つのダクテットファンの回転数をチューニングし、同じ回転数で回すことでファン一個よりも大きな推力を発生することができる。本研究で使用しているダクテットファンは一方向でしか回転できないため、入力がマイナスの場合はダクテットファンの向かい合うファンの値を正にすればよい。例えば、ロール方向における揺れ抑制のために、 $F_1$  と  $F_2$  が同じ回転数で回転している場合は  $F_3$  と  $F_4$  の側のダクテットファンの回転数は 0 を取り、 $F_3$  と  $F_4$  が正である場合は、 $F_1$  と  $F_2$  のダクテットファンの回転は 0 となる。また、ロールとピッチ軸から 45 度傾けてダクテットファンを配置したため、2つのダクテットファンから発生する推力は1つのダクテットファンが発生する推力よりも大きくなる。この配置により、ワイヤ懸架ハンドをよりコンパクトで軽く設計することができた。

構築したシステムの構成を図 6.15 に示す。IMU センサの更新レートとダクテット

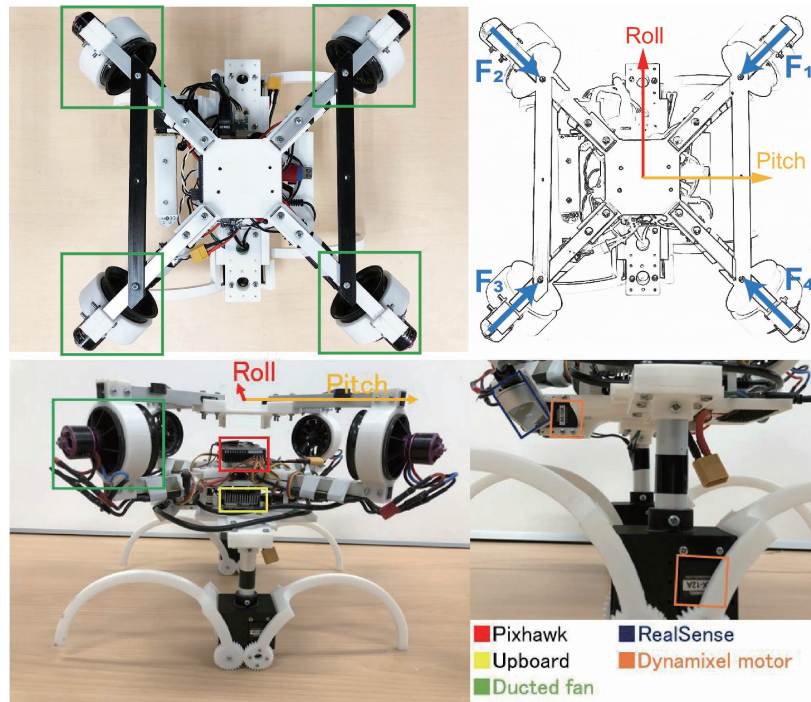


図 6.14: ワイヤ懸架ハンドの構成図. 左上図と右上図はダクテッドファンの配置と座標系, 力の方向を示す. ダクテッドファンから発生する推力 ( $F_1, F_2, F_3$  と  $F_4$ ) を調整することでロールピッチ方向における揺れを抑えることができる. ワイヤ懸架ハンドには, RGB-D カメラと CPU ボードで構成されるビジョンシステムも搭載されている [80](©2019 IEEE).

ファンの制御レートはどちらも 50Hz に設定した. IMU センサは Pixhawk の内蔵のものを使用しており, ジャイロセンサは STMicroelectronics L3GD20H を使用しており, 加速度センサと磁器センサ LSM303D を使用し, MEMS の気圧センサは MEAS MS5611 使用されている. プログラミングでは速度を求めるために, ローパスフィルターを用いて加速度センサの値を計算した. また, 計算結果の累積誤差を減らすために IMU センサが正しく動作しているたびに 0 にリセットされるように制約をつけた. 本研究により開発したワイヤ懸架ハンドのスペックを表 6.2 に示す.

表 6.2: ワイヤ懸架ハンドの仕様 ([80] により作成, ©2019 IEEE).

Gross weight	1.58[kg] without battery 2.0[kg] including battery
Size	0.35[m](W) x 0.35[m](D) x 0.265[m](H)
Number of ducted fan	4
Ducted fan size / motor	$\phi 50$ [mm] / 4300[KV]
Max thrust	950[g] for each ducted fan
L1 / L2	3 [m]* / 0.15 [m] * At the pick and place experiment. L1 is adjustable from 0 to 5 [m].

### 6.3.3 システム構築

構築したシステムの検証とロングリーチ空中マニピュレーションにおけるピックアップアンドプレース作業の実現可能性を確認するためにグリッパを設計し、ビジョンシステムを構築した。これらのデバイスは図 6.14 で示したように揺れ抑制装置の下部に搭載した。また、表 6.2 に示すようにワイヤ懸架ハンドの総重量は 1.58kg であり、サイズは 0.35m × 0.35m × 0.265 m となり、マルチロータ UAV のランディングギアの中にしっかり納まるように設計した。

設計したグリッパとビジョンシステムは RGB-D カメラと二つのサーボモータで構

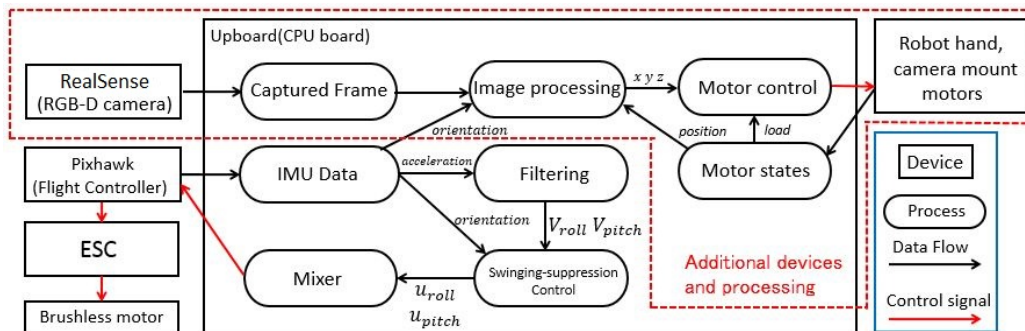


図 6.15: ワイヤ懸架ハンドの把持とビジョンシステムを含めたシステム構成図 [80](©2019 IEEE).

成され、一つのサーボモータはグリッパの開閉のために使用し、もう一つのサーボモータはグリッパが物体把持後に RGB-D カメラの視野がブロックされるのを防ぎ、把持した物体を置く場所も検出するための視野を確保するために使用した。これは物体把持後に RGB-D カメラの向きをサーボモータで変えるように制御することで実現できる。RGB-D カメラは Intel 社の Realsense D415 を使用しており、このカメラは 0.3m ~ 10m の範囲の距離が計測でき、把持対象の検出とカメラまでの相対位置計測および把持物体の置く場所までの相対位置計測に使用された。サーボモータは Dynamixel AX-12A を使用しており、このサーボモータは安定性が非常に高い。カメラの検出範囲を考慮し、さらに検出精度をあげるために、グリッパの開いた状態ではカメラの視覚範囲内に入らないように設計した。また、グリッパの開口径はワイヤ懸架ハンドの高さがマルチロータ UAV の下部に収まるように設計した。また、グリッパのモータ制御やカメラによる画像処理のデータフローは図 6.15 に示す赤い点線の枠内のブロック線図に該当する。

ビジョンシステムは 1 自由度のマウントを取り付けた RGB-D カメラで構成され、グリッパの把持対象と把持後の物体の置く位置の三次元距離計測が可能である。ワイヤ懸架ハンドが把持対象を把持するばでの間や把持後の移動中には揺れ抑制制御が働き、ワイヤ懸架ハンドが揺れることなく作業が行える。また、プレース作業が終了後にはウィンチ機構でワイヤ懸架ハンドを巻き上げ、マルチロータ UAV の下部に収めるために、揺れ抑制が必要なくなる。その場合には揺れ抑制が稼働しないように設計した。

## 6.4 マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドの通信構築

前節まではロングリーチ空中マニピュレーションにおけるピックアンドプレース作業を行うためのマルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドそれぞれのシステム構築について述べた。一方、ワイヤ懸架ハンドの障害物回避や飛行中にもワイヤ懸架ハンドをマルチロータ UAV の直下に保つなどの機能を実現するためには、マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドはセンシング情報を共有する必要がある。そのため、これまでに説明したシステムをベースにして、ワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV 間の通信を構築し、さらに以下に述べるようにカスタマイズを行った。

ワイヤ懸架ハンドのダクテットファンの配置は揺れ抑制のためにマルチロータ UAV

の進行方向と 45 度回転した配置を取ったが、今回はそれをマルチロータ UAV の進行方向と同じになるように配置した。ピックアンドプレース作業のための揺れ抑制の場合はワイヤ懸架ハンドが把持する物体の重量も考慮し、ダクテットファンは最大限に推力を出すことが求められたが、今回の場合はワイヤ懸架ハンドが物体を把持するなどの物理的な接触は行わないためである。また、クロスの方に配置した場合、設計や配置位置が微小にずれたり、また制御の微小な遅れで 2 つのダクテットファンが完璧に同時に回転できなくても揺れ抑制は基本的にワイヤ懸架ハンドがマルチロータ UAV に移動による揺れ、つまり発生する力を打ち消すように働くため、特に問題なく動作できた。しかし、今回の場合はマルチロータ UAV の位置に合わせてワイヤ懸架ハンドをマルチロータ UAV の直下に行くように位置制御を行うため、微小なずれでも位置決め精度に大きく影響する。これらの理由によりダクテットファンの配置をマルチロータ UAV の進行方向に一致させた。また、配置を変えるとワイヤ懸架ハンドがマルチロータ UAV のランディングギアに引っ掛かり、収まることができなくなったためランディングの機構を変え、さらに軽量化も行った。

次にワイヤ懸架ハンドに使用されたデバイスの改良を行った。ワイヤ懸架ハンドに搭載されたオープンソースのフライトコントローラの Pixhawk と Intel 社の AAeon Up Board, Intel 社の Realsense D415 の代わりに Intel 社の Realsense T265 と CPU ボードは LattePanda Alpha 864, モータドライバー PCA9685 を使用した。Pixhawk は IMU センサを CPU ボードで受け取り、加速度センサで速度を推定し、ダクテットファンの制御に使用したが、Realsense T265 を用いることで直接速度情報を取ることができ、Pixhawk のデータの更新レートが 50Hz であることに對し、Realsense T265 の場合は 200Hz に達している。さらに、このカメラには IMU センサも搭載されており、姿勢情報は自ら CPU ボードで行う必要があるが、こちらの更新レートが 200Hz に達している。また、このカメラはステレオ魚眼カメラでもあるため、画像処理にも使える。PCA9685 は I2C 通信規格で、制御レート 70Hz でモータの制御が可能である。これらのデバイスの乗り換えにより Pixhawk と Up Board の組み合わせよりも高精度な制御が可能となる。一方、乗り換えた CPU ボード LattePanda Alpha 864 は Intel 7 世代の CPU が内蔵されており、WI-FI モジュールやコプロセッサとして Arduino Leonardo も内蔵されている。さらにパワーモジュールも内蔵されているため、直接 3S のリポバッテリーをつないで使用することが可能である。一方、Up Board の場合は電源供給のために DC-DC コンバーターが必要であり、WI-FI モジュールも別途で



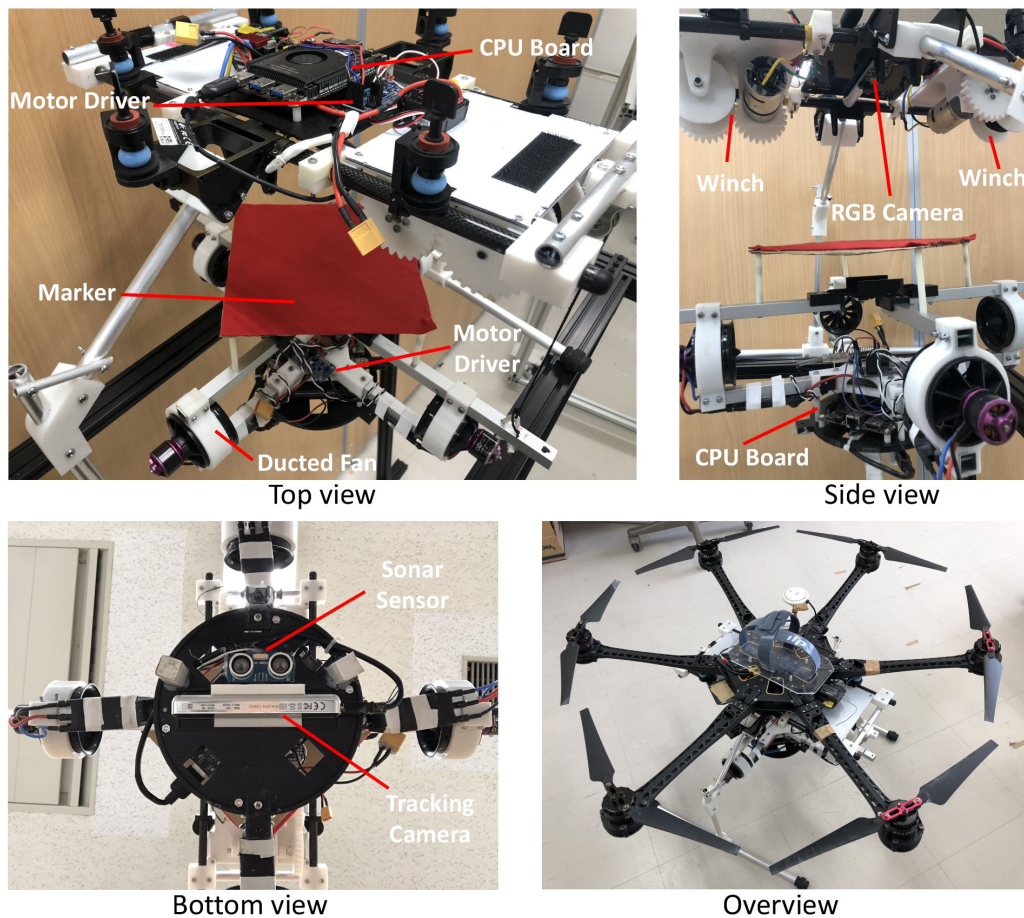


図 6.16: 通信を介した制御のためのマルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドのハードウェア構成 [81].

使用する必要もあり，センサとは直接に通信できない問題があった．CPU ボードを LattePanda Alpha に変えることでワイヤ懸架ハンドの重さも減らすことができ，さらに処理能力も上昇できた．この CPU ボードはワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV 間の相対位置制御，通信のために使用した．また，ハンドの下部に超音波センサを取り付け，地面との距離計測に使用した．用いた超音波センサの型番は HC-SR04 であり，計測範囲は 0.1m～4m であり，更新レートは 20Hz である．

最後にマルチロータ UAV の改良を行った．マルチロータ UAV は CPU ボードとしてワイヤ懸架ハンドと同様に LattePanda Alpha 864 を搭載した．さらに機体の下部に RGB カメラ Logicool C270n を搭載し，ワイヤ懸架ハンドとの相対位置推定に使用

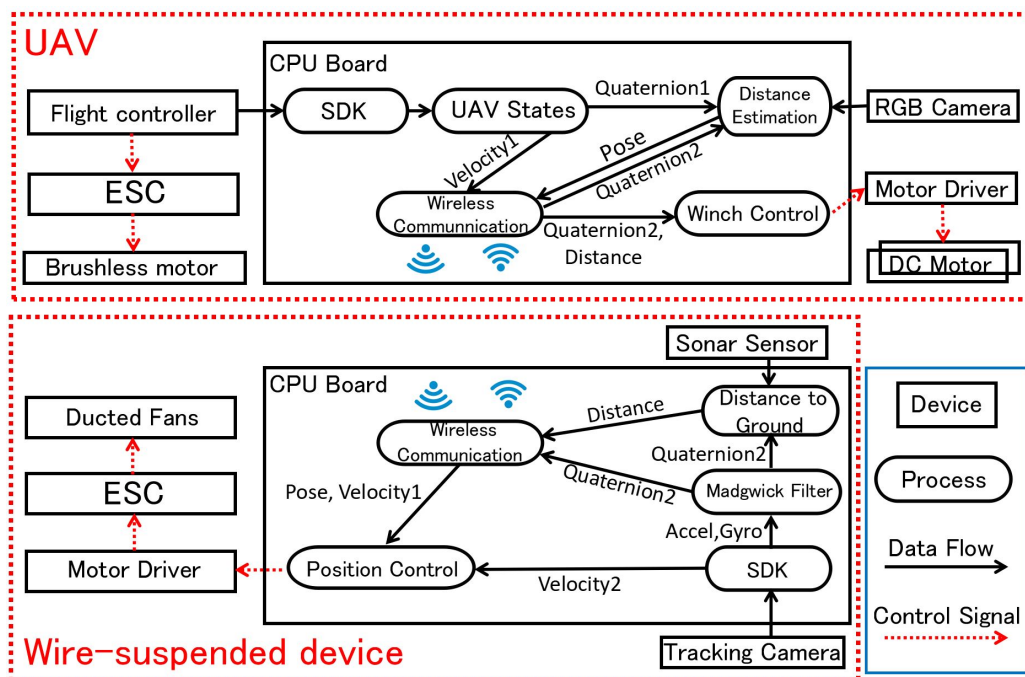


図 6.17: 双方向通信を含めたマルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドのシステム構成 [81].

した. CPU ボードは前述の画像処理に加え, ウィンチ機構の自動制御, ワイヤ懸架ハンドとの通信や実験データの収録に使用した. また, ウィンチ機構は図 6.8 で示したように, ワイヤ懸架ハンドの姿勢制御も可能にするためデュアルモータタイプのウィンチ機構を採用し, CPU ボードを通じて高さの制御だけでなくマルチロータ UAV が飛行中に機体が傾いてもワイヤ懸架ハンドは姿勢を水平に維持できるような制御を行った. 以上で述べたようにカスタマイズした飛行ロボットのハードウェアを図 6.16 に示す.

設計したシステムを図 6.17 に示す. マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンド間の通信を構築するため, ワイヤ懸架ハンドに搭載した CPU ボードに内蔵された WI-FI モジュールをホットスポットとして設定し, 自ら WI-FI の電波を飛ばすようにした. 次にマルチロータ UAV に搭載した CPU ボードに内蔵された WI-FI モジュールでそのアクセスポイント接続することでローカルネットワークが形成できる. その後, 両方の CPU ボードに ROS(Robot Operating System) をインストールし, ワイヤ懸架ハン

ドをマスターに設定した。ROS を通じてマルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドのセンシング情報は共有され、それぞれ必要なセンサ情報を購読できる。構築したシステムの最も大きな特徴は従来の屋外環境において、ROS 環境で飛行ロボットを動かすには WI-FI ルータを通じてマルチロータ UAV に搭載された CPU ボードと操縦者側のノートパソコンと接続し、マルチロータ UAV が自動で飛べる範囲は WI-FI の電波が届く範囲内であったが、本システムはマルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドでのみ通信を行い、ワイヤ懸架ハンドで電波を飛ばしているため、距離の制約を受けない。また、遠距離で飛行状態を観測したい場合は専用の通信モジュールをフライトコントローラに接続し、操縦者側は地上局を通じて観測することができる。

図 6.17 に示したように、センシングのためにトラッキングカメラ (Realsense T265) ではカメラ座標を基準にした速度データと IMU データ (フィルタリングされていない加速度センサとジャイロセンサのデータ) を Intel 社が提供している Realsense 用の SDK を通じて使用した。取った IMU センサのデータから正確な姿勢を計算するために Madgwick フィルタ [85] を用いて角度を計算した。マルチロータ UAV のフライトコントローラからは DJI SDK を通じてフィルタリングされた IMU データと速度データを取った。マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンド間の相対位置を計測するために、マルチロータ UAV の下部に搭載した RGB カメラ (図 6.16, Side view) を用いて、ワイヤ懸架ハンドの上部に載せたマーカの検出を行い、マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドの姿勢を両方用いて相対位置を計算した。超音波センサはワイヤ懸架ハンドの姿勢情報に基づき補正を行い、地面まで垂直方向の距離を計算した。ワイヤ懸架ハンドの位置制御はハンドとマルチロータ UAV の速度情報両方用い、前述したように計算した相対位置情報を用いて制御器の設計を行った。ウィンチ機構の制御は超音波センサの情報を補正したデータとワイヤ懸架ハンドの姿勢情報を用いて制御器を設計した。

## 6.5 センシング

### 6.5.1 ピックアンドプレース作業のための画像処理

ロングリーチ空中マニピュレーションにおけるピックアンドプレース作業を実現するためには、把持対象の検出とそれを置く場所の検出が必要となる。一方、CPUボードの性能や屋外環境におけるロバスト性を考慮し、本研究ではワイヤ懸架ハンドの把持対象をカラーマーカが貼ってある細長い段ボールに設定した。また、これを把持後に置く場所には青色のマーカを置き、その上に落とすことを想定した。把持対象の検出から把持後の処理までの流れを図 6.18 に示す。

カメラの解像度は  $640 \times 480$  に設定し、フレームレートは 30fps に設定した。画像処理は主に 2つのステップに分かれる。ステップ 1(対象物を把持する前の段階)では、図 6.18 (a) に示すようにカメラはグリッパの中心の方に向いており、赤色のマーカを検出する。ここで検出のために OpenCV ライブラリーの `inRange` 関数を用いて HSV

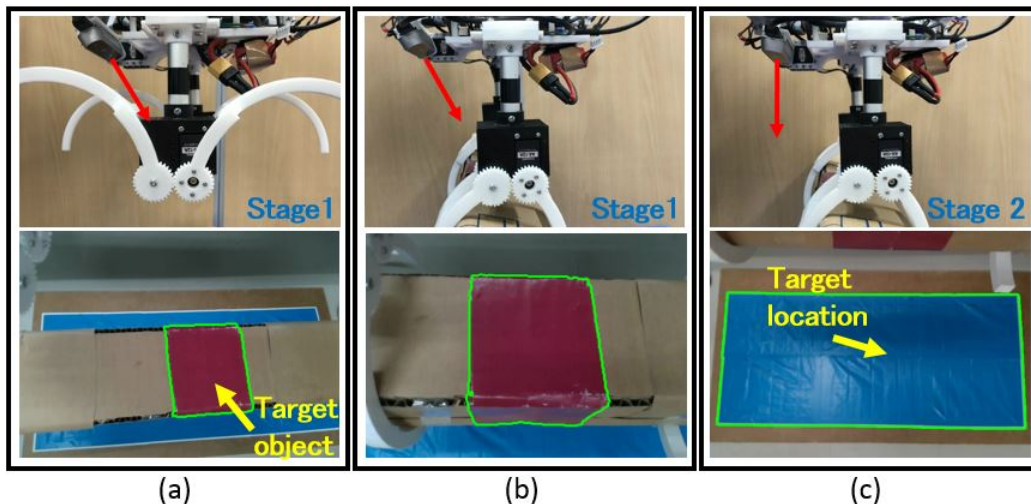


図 6.18: カメラ方向と作業物体の検出. (a) 物体把持まではカメラは斜め下方向を向き、赤色の領域を検出し、(b) 物体を把持する. (c) 物体が把持できるとカメラは下方向を向き、物体を置くための場所である青色の領域を検出する. ピックアンドプレース作業のために、把持物体には赤いマーカで囲い、目標位置には青色のシートを置いた. ([80] により作成, ©2019 IEEE)

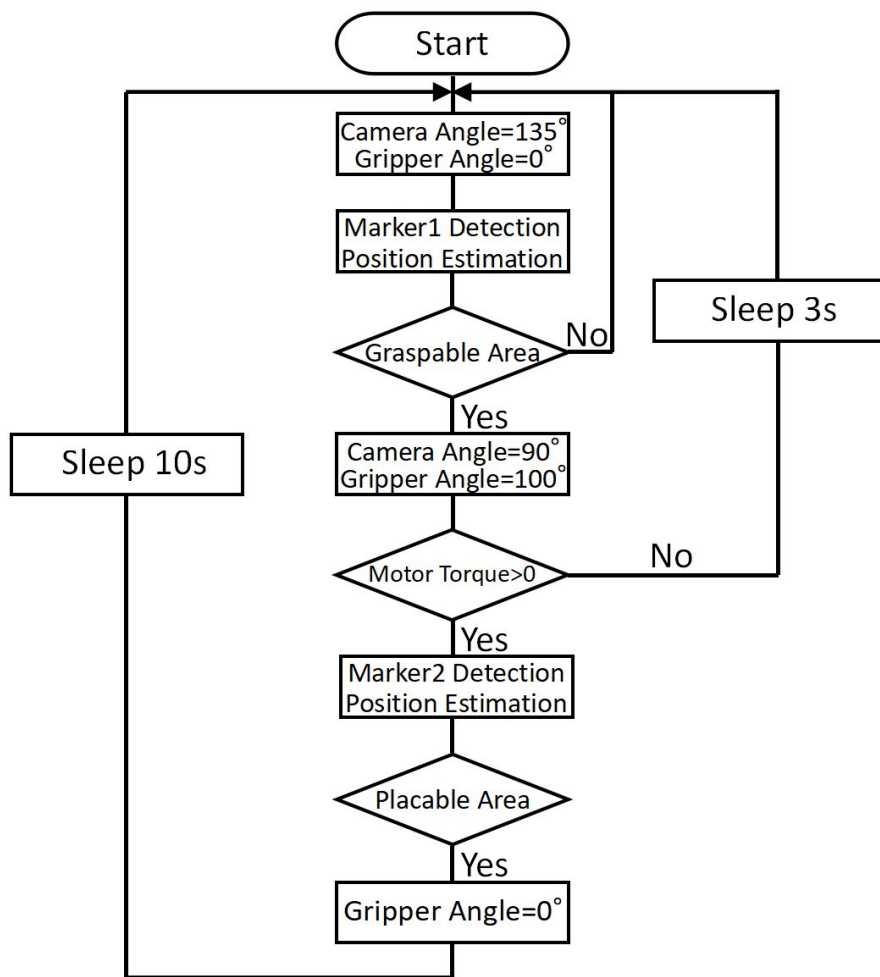


図 6.19: ピックアンドプレース作業における処理アルゴリズム.

カラー空間で検出対象となる色の範囲を指定し抽出を行った。把持対象となる段ボールの三次元位置は検出した領域の重心位置とデプス画像を用いて計算した。この結果に基づき、作業対象がグリッパの把持可能範囲内に入ると図 6.18 (b) に示すようにグリッパを閉じて把持を行う。次に、グリッパが作業対象を確実に把持できているかを確認するためにモータから読み取ったトルクの値でその識別を行った。グリッパが把持に失敗した場合はモータにトルクがかかってないため、この場合は 3 秒間停止してからグリッパは開いた状態に戻り、ステップ 1 に戻る。把持に成功した場合はステップ 2(把持後の処理)に移り、図 6.18 (c) に示すように、カメラは垂直方向に向きを変え、青色マーカの検出を行う。ここでも前のステップと同様に inRange 関数を用いて

検出を行い、領域の重心位置とデプス画像から三次元位置を計算し、その結果に基づき、ワイヤ懸架ハンドが把持物体を置ける範囲に入るとグリッパを開け、ステップ1に戻る。以上で述べた流れのフローチャートを図 6.19 に示す。

カメラのデプス画像が取れる距離範囲は 0.3m から 10m であり、グリッパの把持可能領域は 0.3m 以内となる。そのため、前節で述べた手法と同じ方法を用いて 0.3m 以内の距離計測を行った。まず、マーカとの距離が 0.3m 以上の場合に画像処理により検出したマーカの領域で段ボールの画像上の幅を計算し、その領域のデプス画像により距離を計算して段ボールの実際の幅が計算できる。

$$w = \frac{w'd}{f} \quad (d > 0.3) \quad (6.4)$$

ここで  $w$  は段ボールの実際幅、 $f$  はカメラの焦点距離、 $w'$  は画像上のピクセル幅、 $d$  は距離を表す。この場合にも式 (4.2) に示した方法で十分信頼性のあるデータが得られるまで計算を繰り返すように設計した。次に、距離が 0.3m 以下の場合は距離が計測できる。

$$d = \frac{wf}{w'} \quad (d < 0.3) \quad (6.5)$$

以上の式に基づき、距離が計測でき、三次元の位置が計算できる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\sin(-\phi) \cos(\alpha - \psi) + \frac{(c_u - c_{ud})}{f})d \\ (-\sin(\alpha - \psi) \cos(-\phi) + \frac{(c_v - c_{vd})}{f})d \\ -\cos(-\phi) \cos(\alpha - \psi)d \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

ここで、 $\phi$  と  $\psi$  は IMU センサから計算したワイヤ懸架ハンドの姿勢の角度を示しており、 $\alpha$  はカメラの角度を示し、これはモータから取ったデータである。 $c_u$ 、 $c_v$ 、 $c_{ud}$ 、 $c_{vd}$  はそれぞれ検出した領域の重心座標と画像の中心座標である。一方、ピックアッププレース作業において、把持物体を置く範囲は上式の結果と設計したグリッパの開口径に基づいて設定した。

## 6.5.2 マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドの相対位置推定

通信を介したワイヤ懸架ハンドの制御を行うためにはマルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドの相対位置推定情報が必要となる。この位置推定にはいくつかの方法があ

る。まず、ワイヤの傾きを計測し、ウィンチ機構ではエンコーダーを用いてワイヤの長さを計算して、この二つの情報より相対位置が推定できる。しかし、この方法はワイヤが一本の場合には計測可能であるが、本研究で提案する構成のようにワイヤ二本で吊り下げる場合には対応しにくい。ワイヤの傾き角度の計測には元々ある程度の誤差があり、さらにワイヤ二本の場合はワイヤ懸架ハンドの微小なヨー方向のずれが推定結果に影響するため、ワイヤが長いほどその誤差は大きくなる。更に、エンコーダーでのワイヤ長を計測する場合、時間が経つほど積分誤差が大きくなる問題がある。

そこで、本研究ではカラーマーカのビジュアルトラッキングとIMUセンサを活用した位置推定方法に着目した。一方、ArUco マーカと単眼カメラにより位置姿勢を推定する方法も考えられるが、以下に述べる理由よりカラーマーカとRGBカメラ、IMUセンサを用いる方法を採用した。

- 距離計測が可能な範囲：ダウンウォッシュの計測の結果に基づき、ウィンチ機構のワイヤ長は5mと設定した。そのため、距離計測範囲は5mまで可能である必要がある。一方、ワイヤ懸架ハンドをマルチロータ UAV に引っ込めた状態でも画像範囲内に収まるマーカの最大サイズは0.18m × 0.18mとなる。計測範囲を確かめるため、同じカメラと動作環境の下で、同じサイズのArUco マーカとカラーマーカを用いて比較を行った。その結果、距離計測ができる範囲は、ArUco マーカの場合は0~2.65mであり、カラーマーカの場合は0~4.8mであった。この結果により、ArUco マーカの場合は要求仕様を満たすことができず、カラーマーカの場合は若干範囲が足りないものの十分使える範囲ではあることが確認できた。
- IMUセンサ：ArUco マーカのライブラリでは位置だけでなく、姿勢も計算している。一方、本研究で開発したワイヤ懸架ハンドにはすでにIMUセンサが搭載されているため、姿勢推定をもう一度行う必要はなくなる。さらに、IMUセンサから推定した姿勢情報は非常に安定しており、精度や信頼性もはるかに高い。複数のArUco マーカを使用すると精度も高くなるが、距離計測範囲を縮めてしまう問題が発生する。

図6.20にマルチロータ UAV がワイヤ懸架ハンドを吊り下げて飛行している場合を想定した位置関係やその時の画像検出結果を示す。カメラの解像度は640 × 480に設

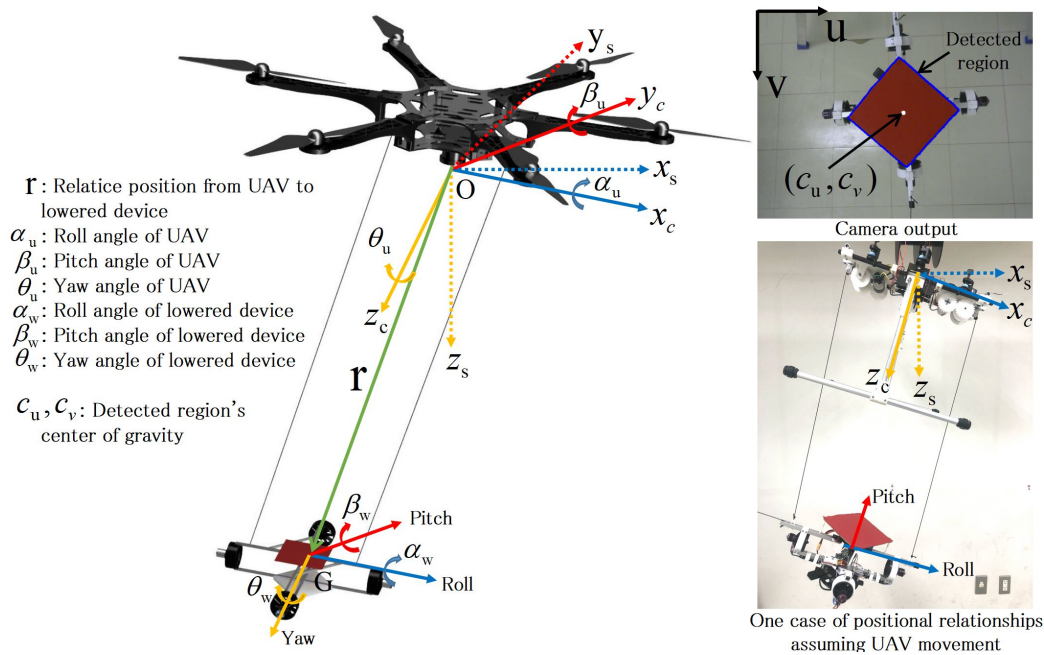


図 6.20: マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドの座標系. 右上図はマルチロータ UAV に搭載したカメラによるマーカー検出結果と画像座標系を示し, 右下図はマルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドの位置関係を示す [81].

定し, フレームレートは 30fps に設定した. カラーマーカーを検出するために OpenCV ライブラリの inRange 関数を使用し, HSV カラー空間にてマーカーの色を抽出した. 検出結果は図 6.20 の右上に示すようであり, 青のラインで表示されている部分である. また, 検出した領域の重心位置を白い点で表示している. 図 6.20 の右下にこの場合のマルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドの相対位置関係を表している. 図 6.20 の左に示しているパラメータに基づき, ワイヤ懸架ハンドのマーカー重心を原点とし, カメラが向いている方向を基準とするカメラの位置座標は下記の式で求まる.

$$\mathbf{c}_p = \begin{bmatrix} c_{p_x} \\ c_{p_y} \\ c_{p_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(c_v - c_{vd})}{c_{p_z} f} \\ \frac{(c_u - c_{ud})}{c_{p_z} f} \\ f \sqrt{\frac{s \cos(\alpha_w) \cos(\beta_w)}{s'}} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

ここで,  $c_{vd}$ ,  $c_{ud}$  は画像中心の座標を表しており,  $f$  は焦点距離,  $s$ ,  $s'$  はマーカーの面



積 (0.18m × 0.18m) と画像上のマーカ面積を示す。また、 $\alpha_w$ ,  $\beta_w$  はワイヤ懸架ハンドのロール、ピッチ角を示しており、IMU センサから求めた。これらの角度データはワイヤ懸架ハンドが傾いた場合、位置がそのままでも画像上の面積が変わることを想定して、傾いた分の補正として計算式に代入した。次に、ワイヤ懸架ハンドの位置制御を正しく行うために必要なのは水平面上における位置であり、マルチロータ UAV が前進時に傾いた角度分補正する必要がある。これを下記の式で示す。

$${}^s\mathbf{p} = \begin{bmatrix} {}^s p_x \\ {}^s p_y \\ {}^s p_z \end{bmatrix} = {}^s R_x(-\alpha_u) {}^s R_y(-\beta_u) \mathbf{c}\mathbf{p} \quad (6.8)$$

ここで、 ${}^s R_x$ ,  ${}^s R_y$  はカメラ基準から水平面基準への回転行列を表しており、機体が傾いた姿勢の角度分回転し戻すことを示している。また、 $\alpha_u$ ,  $\beta_u$  は機体のロールとピッチ角であり、これはフライトコントローラに内蔵した IMU センサから取ったデータである。以上によりマルチロータ UAV 側でワイヤ懸架ハンドとの相対位置が計算しており、この計算結果はマルチロータ UAV の速度情報と一緒にワイヤ懸架ハンドに送られ、ワイヤ懸架ハンドの位置制御のフィードバックとして使用された。

### 6.5.3 ウィンチ機構の制御のためのワイヤ懸架ハンドと地面間の距離計測

マルチロータ UAV と通信を介したワイヤ懸架ハンドの地面との距離をウィンチ機構で制御するためにはワイヤ懸架ハンドから地面までの距離を計測する必要がある。この場合、RGB-D カメラを使用すれば計測可能であるが、第 6 章 3 節で述べたようにワイヤ懸架ハンドに搭載した RGB-D カメラを IMU センサを内蔵したステレオ魚眼カメラに変更したため使用できなくなった。また、RGB-D カメラには屋外環境で反射光の強いなどがあるとデプス画像にノイズが乗ってしまう問題がある。例えば、インフラ点検の一つである太陽光パネルのひび割れ検査を行いたい場合には使いにくい。一方、ワイヤ懸架ハンドに載せた Realsense T265 カメラは IMU センサ情報や速度情報が高速・高精度で取れるため、カメラの機能よりもセンサとして使用することが一般的であり、ほとんどの研究グループでもこのカメラから取れるカメラ画像で画

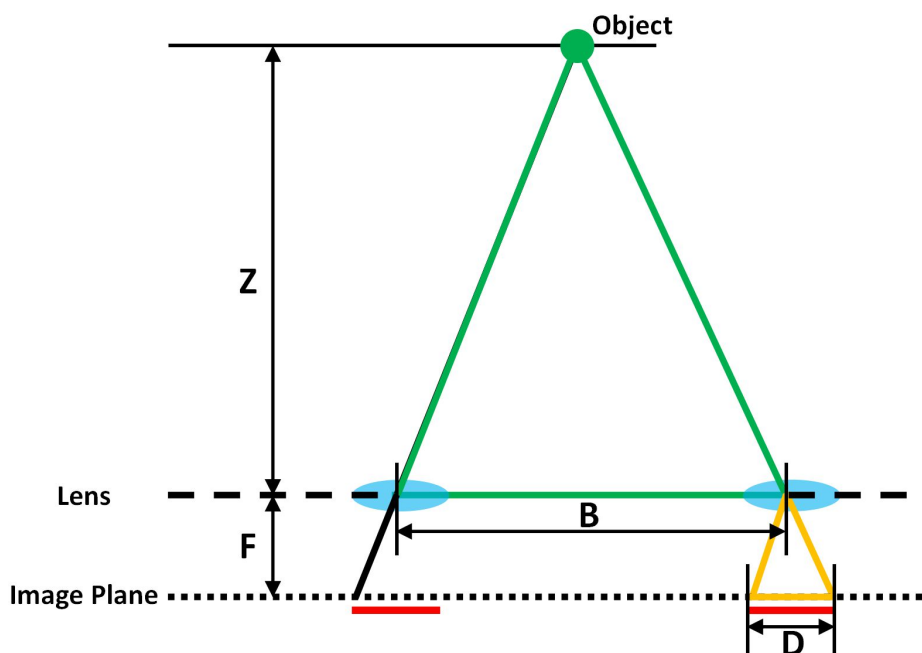


図 6.21: ステレオカメラの距離計測方法.

像処理は行わず，カメラから提供されるセンシングデータを使い，センシングを行っている。

そこで，本研究では Realsense T265 を用いた距離計測を試みた。このカメラはセンサとしてワイヤ懸架ハンドにおける需要は十分満たしているが，画像処理にまで使えるようになると系統的にコストパフォーマンスが非常によくなる。このカメラはステレオカメラであるため，距離計測は可能である。図 6.21 に示すように，カメラの前方に緑点の物体があた場合，カメラレンズのある部分を底辺とする緑色の三角形と撮影面を底辺とする黄色の三角形は相似する。この関係により，ステレオカメラから物体までの距離を下記の式に示したように簡単に求めることができる。

$$Z = \frac{B \cdot F}{D} \quad (6.9)$$

ここで， $Z$  はカメラから物体までの距離を示しており， $B$  はカメラ間の距離であり， $F$  はカメラの焦点距離， $D$  は視差を表す。この原理に基づき，Realsense T265 を用いた距離計測を試した。まず，このカメラは魚眼カメラであるため，歪んだ画像を直す

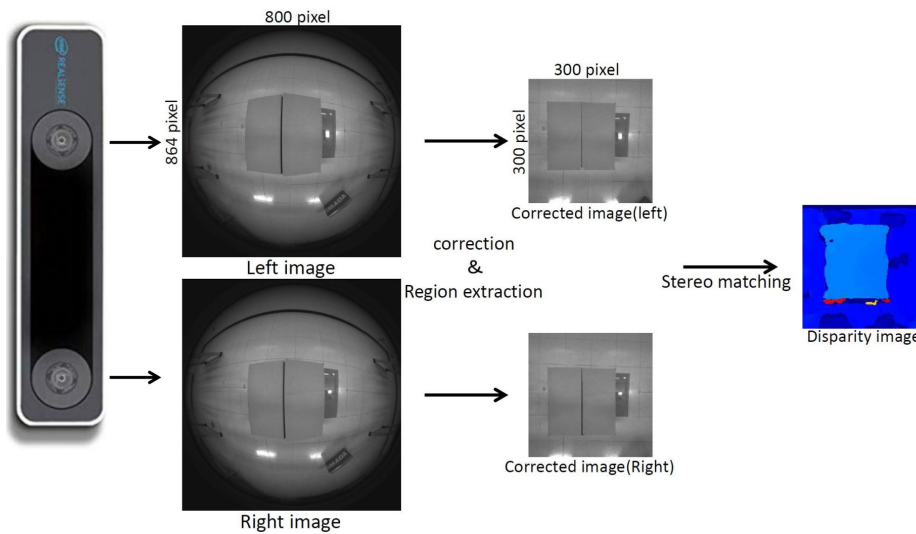


図 6.22: ステレオ魚眼カメラ (Realsense T265) によりステレオマッチング方法.

ためにキャリブレーションを行い、ひずみ補正を行った。次に、Intel 社から提供された Realsense SDK のソースコードからカメラの内部パラメータを取り、CPU ボード LattePanda Alpha 864 にてステレオマッチングを行ってみたが、カメラ画像の解像度が  $864 \times 864$  ピクセルの場合は視差画像のフレームレートが 4fps しかないことが分かった。このフレームレートではウィンチ機構の制御には使いにくいいため、徐々に解像度を落としながら制御に使えるフレームレートが得られるまでこの作業を繰り返した。結果、左右カメラのひずみ補正後の画像解像度を  $300 \times 300$  ピクセルまで落とした場合に 20fps までレートが上がるということが分かった。この一連の流れを図 6.22 に示す。

ここで求めた視差画像を用いて、距離を計測したい領域を特定し、フィルタリングを行えば距離情報が計算できる。しかし、ここで取った距離情報は、ワイヤ懸架ハンドの動きが大きい場合、つまりウィンチ機構がワイヤ懸架ハンドを高速に上下させる場合には距離情報の精度が荒くなる問題があった。

そこで、上述の問題に対して、ワイヤ懸架ハンドに搭載した超音波センサが扱える。この超音波センサを用いることで距離情報の精度をあげることができる。しかし、超音波センサを単体で使う場合には、計測対象の平面がセンサから 30 度以上傾いた場合には距離が計測できなくなる。この場合には、またステレオカメラによる距離計測

が使えるため、この部分が補正できる。以上で述べたように二つの方法で取った距離情報を活用することで地面までの距離を推定することができる。また、ワイヤ懸架ハンドから地面までの垂直方向における距離はIMUセンサから取った姿勢情報で補正でき、下記の式に示すようである。

$$d_{fix} = d_{raw} \cos \alpha_w \cos \beta_w \quad (6.10)$$

ここで、 $\alpha_w$ ,  $\beta_w$  はワイヤ懸架ハンドの姿勢の角度を表し、 $d_{raw}$  は補正前の距離あり、 $d_{fix}$  は補正後距離を示す。以上によりワイヤ懸架ハンドの地面との距離計測ができ、このデータはワイヤ懸架ハンドから通信を介してマルチロータ UAV に送り、ウィンチ機構制御のフィードバックとして使用した。

## 6.6 制御

### 6.6.1 ワイヤ懸架ハンドの揺れ抑制制御

揺れ抑制シミュレーションの結果と開発したワイヤ懸架ハンドのセットアップに基づいて制御則を立てた。図 6.14 で示したように揺れ抑制のためのワイヤ懸架ハンドのロール、ピッチ方向における制御入力は下記のようなになる。

$$\begin{cases} u_{roll} = -\text{sgn}(V_{roll})K_{rp}\psi - K_{rv}V_{roll} \\ u_{pitch} = -\text{sgn}(V_{pitch})K_{pp}\phi - K_{pv}V_{pitch} \end{cases} \quad (6.11)$$

ここで、 $\psi$  と  $\phi$  は IMU センサのデータから計算したハンドのロール、ピッチ角を表しており、 $K_{rp}$ ,  $K_{rv}$ ,  $K_{pp}$ ,  $K_{pv}$  はロール、ピッチ方向の制御入力  $u_{roll}$ ,  $u_{pitch}$  のゲインを示している。一方、ピッチ方向での制御では、ワイヤ懸架ハンドがワイヤ二本で懸架されているため、揺れば微小な場合には姿勢が変化しない。そのため、シミュレーションでは角速度をフィードバック値として使用したが、今回は速度をその代わりに使用した。上式で示す  $V_{roll}$ ,  $V_{pitch}$  はワイヤ懸架ハンドのロール、ピッチ方向における速度を表しており、加速度センサと IMU センサの値にフィルタリングをかけ、計算を行った。この速度を求めるため、まずはローパスフィルターを用いて加速度センサ値の重力加速度とノイズの除去を行った。次に、この値を積分することで速度を求め、IMU センサ値から閾値を決め、一定時間や値を超えるたびに速度をリセットす

るように設計し、積分誤差の影響を低減した。一方、ハンドが収束付近におけるチャタリングを防止するため、ワイヤ懸架ハンドが $\pm 5^\circ$ の範囲ではダクテットファンが推力を発生しないようにゲインを調整した。これらの計算で得た制御入力 $u$ は4つのダクテットファンへの制御入力に計算しなおされており、下記の式に示す。

$$\mathbf{u}_{\text{fans}} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\zeta u_{\text{roll}} + C u_{\text{pitch}} \\ -\zeta u_{\text{roll}} - C u_{\text{pitch}} \\ \zeta u_{\text{roll}} + C u_{\text{pitch}} \\ \zeta u_{\text{roll}} - C u_{\text{pitch}} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

ここで、 $\zeta$ と $C$ はロール、ピッチ方向における制御入力からバランスを取り、正しい出力の範囲内で四つのダクテットファンの推力に変換するためのパラメータあり、このパラメータは実験的に決められた。ここで求めたが結果はPWM信号としてESCに送られ、ダクテットファンの回転数が制御される。

次に、揺れ抑制制御の有効性を確かめるために図6.23で示すようにワイヤ懸架ハン

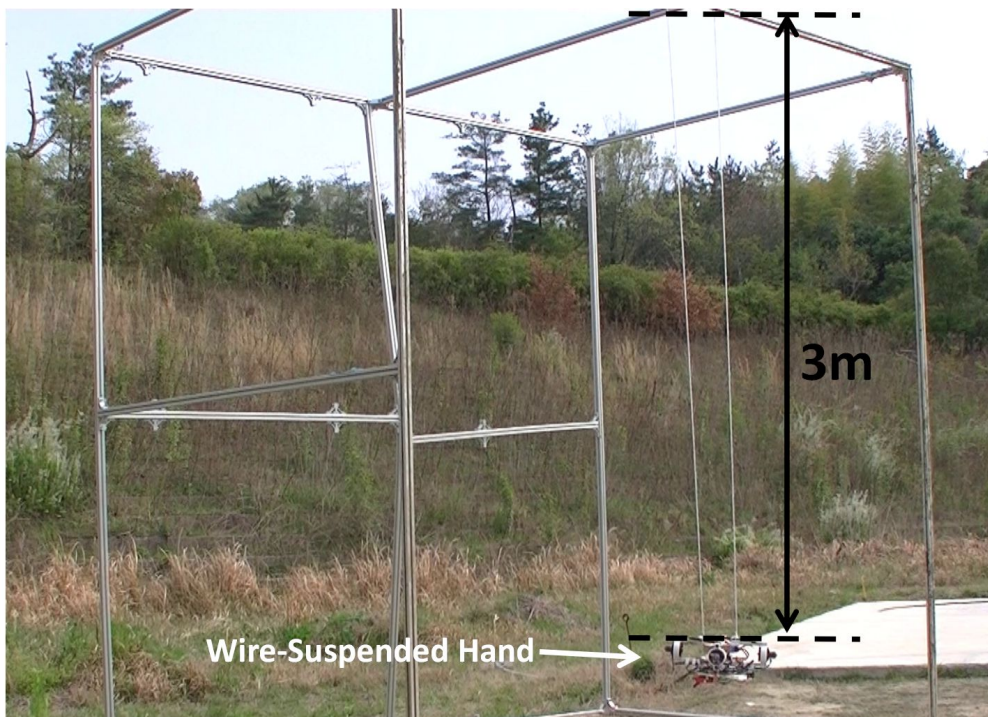


図 6.23: 揺れ抑制制御実験の風景。

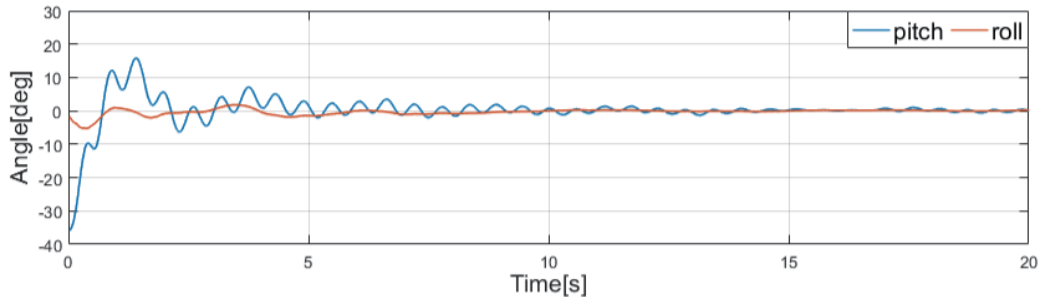


図 6.24: 揺れ抑制実験の結果. ワイヤ長は 3m に設定した [80](©2019 IEEE).

ドが固定のものから吊り下げられた場合の揺れ抑制実験を行った. 図に示すように, ワイヤ懸架ハンドは屋内の環境では 3m ほど吊り下げることができなかつたため, 屋外の環境でアルミを用いた実験装置 (図 6.23) を製作し, ハンドを吊り下げた. 実験ではまず, ワイヤ懸架ハンドを手で持ちながらハンドのピッチ方向に向かって一定距離を進んでから手を離すことで振り子の単振動のような動きを再現し, ワイヤ懸架ハンドが揺れている間に, 揺れ抑制の制御プログラムを開始させ, その様子を観測した. この実験結果を図 6.24 に示す. グラフで示す結果は揺れ抑制が開始されてから記録されたワイヤ懸架ハンドの姿勢変化であり, これを観測することで ワイヤ懸架ハンドの収束具合が判断できる. グラフに示すように, ワイヤ懸架ハンドは初期の揺れ角  $40^\circ$  に対し, 約 5 秒以内に揺れが収まったことがわかる. この結果は図 6.12 で示した揺れ抑制シミュレーションの結果に類似しており, ワイヤ懸架ハンドが期待通りに制御できたことを示す. 一方, ワイヤ懸架ハンドのピッチ角ではノイズのような振動がみられるが, これはワイヤ懸架ハンドのロール軸の微小振動であり, 揺れ抑制には特に影響はしなかった.

## 6.6.2 ワイヤ懸架ハンドの位置制御

前節まではワイヤ懸架ハンドに搭載したダクテットファンを用いて揺れ抑制を行う方法について説明した. 揺れ抑制の本質はワイヤ懸架ハンドが動く方向に対して逆向きに最適な力を発生させることで, ワイヤ懸架ハンドの運動を妨げ, 最終的に移動速度をゼロにすることである.

本研究ではこの発想を逆転して, 今回はこのダクテットファンを用いて積極的に推

力を発生させ、位置決めを行うことができないかを試みた。一方、ワイヤ懸架ハンドでアクティブに位置決めを行う場合、マルチロータ UAV が飛行している時には実現しにくい。この場合、ワイヤ懸架ハンドが特定に位置に固定しつづけるためにはワイヤの張力が働くため、推力を出し続ける必要があるが、力のつり合いによりマルチロータ UAV にもその分の推力が反作用力として働くため、マルチロータ UAV の飛行に影響してしまう。しかし、マルチロータ UAV に先行研究 [14] で開発したグリッパなどで棒状物にパーチングし、高所に機体を固定できる機構を搭載すれば、ワイヤ懸架ハンドの位置決めは実現できるようになる。また、高所に機体を固定してから、ワイヤ懸架ハンドで作業を行うと想定する場合、水平方向の位置決めができれば、ワイヤ懸架ハンドのマニピュレータとしての自由度をアクチュエーターを追加することなく、1 自由度から 3 自由度に増やすことができ、作業域も機体の直下のみから大きく広げることができ、より応用が広がる。

以上に述べたことに加え、本研究では改良後のワイヤ懸架ハンドを用いて空間の固定点 (マルチロータ UAV が高所にパーチングした後) から吊り下げられた場合を想定し、位置決めを行うための制御器を設計した。今回はワイヤの角度をより精密に計測するため、ワイヤ懸架ハンドに搭載した Realsense T265 を使用した。このカメラに

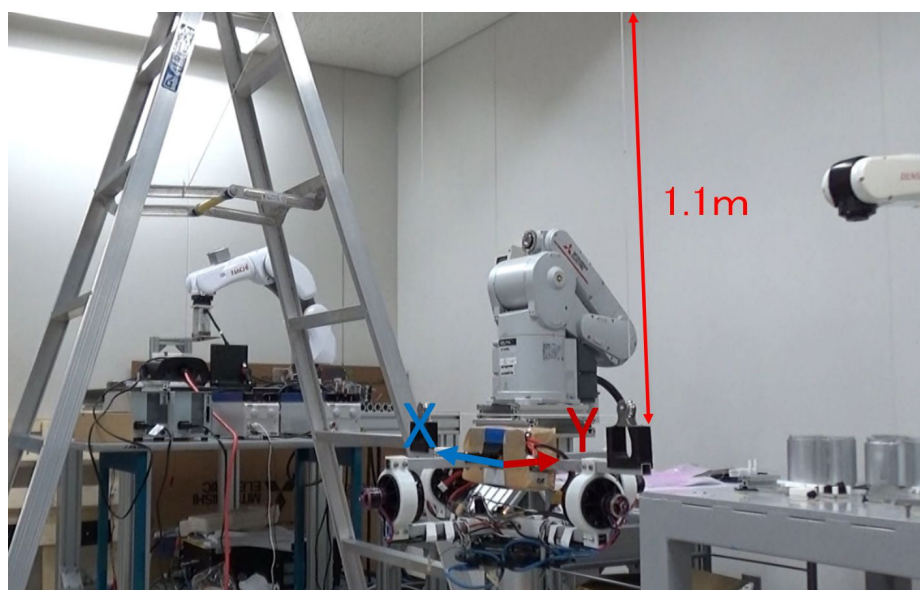


図 6.25: ワイヤ懸架ハンドの位置制御における実験風景。

はこれまで述べた以外にも起動した時点で SLAM を行い、その時点での場所と姿勢を原点と基準座標軸として、自己位置を推定できる機能が搭載されている。ここで取得できる自己位置座標とワイヤの長さが既知であると仮定するとワイヤ懸架ハンドのロール、ピッチ方向におけるワイヤの傾き角度が計算できる。

$$\begin{cases} \theta_x = \tan^{-1} \frac{p_x}{L - p_z} \\ \theta_y = \tan^{-1} \frac{p_y}{L - p_z} \end{cases} \quad (6.13)$$

ここで、 $L$  はワイヤ長であり、図 6.25 で示すように  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  はワイヤ懸架ハンドのロール (X), ピッチ方向 (Y) におけるワイヤ角度を表し、 $(p_x, p_y, p_z)$  はカメラの自己位置推定における三軸座標を示す。また、この方法によるワイヤの角度推定はマルチロータ UAV が飛行中には常にワイヤ懸架ハンドの自己位置が代わり、原点はカメラが起動した場所に固定されたままであるため、ハンドが空間の固定点から吊り下げられた場合のみ上式が適応する。この結果に基づき、ワイヤ懸架ハンドの位置制御式は下記の通りとなる。

$$U_w = K_{pw} e_\theta + K_{iw} \int_0^t e_\theta dt + K_{dw} \dot{e}_\theta + U_{eq} \quad (6.14)$$

ここで、 $U_w$  はワイヤ懸架ハンドのロール、ピッチ方向に対する制御入力であり、 $e_\theta$  は目標位置からその場合のワイヤ角度を計算し、現在のワイヤ角度を引いた誤差を表す。また、 $K_{pw}$ ,  $K_{iw}$ ,  $K_{dw}$  は PID 制御ゲインであり、 $U_{eq}$  は現在位置を維持するために必要な推力を想定し、それに対応した補正值である。次に、設計した制御則による位置決め制御の精度を確かめるため、図 6.25 示したようにワイヤ懸架ハンドを 1.1m 吊り下げ、目標位置を X, Y 軸とも 0.2m に設定して実験を行った。実験結果を図 6.26 に示す。

図 6.26 で示すように、0~10 秒の間はワイヤ懸架ハンドの収束状況を示しており、約 10 秒ほどで目標位置に高精度で収束できることがわかる。次にこの収束した状態で、手でワイヤ懸架ハンドをそれぞれ X, Y 軸方向に動かし、外乱が入った後の収束状況を観測した。30~40 秒の間と 50~60 秒の間が外乱が入った後の収束状況を表しており、外乱が入った後でも約 10 秒後には目標位置に収束することが確認できた。更に、目標位置を遠く設定し、同じ実験を行った結果、ワイヤ長 1.1m に対し最大位置決めが可能な範囲は 0.35m × 0.35m であることを確認した。以上で述べた位置決め方法は後述する飛行実験では使用していないが、上述したようにマルチロータ UAV



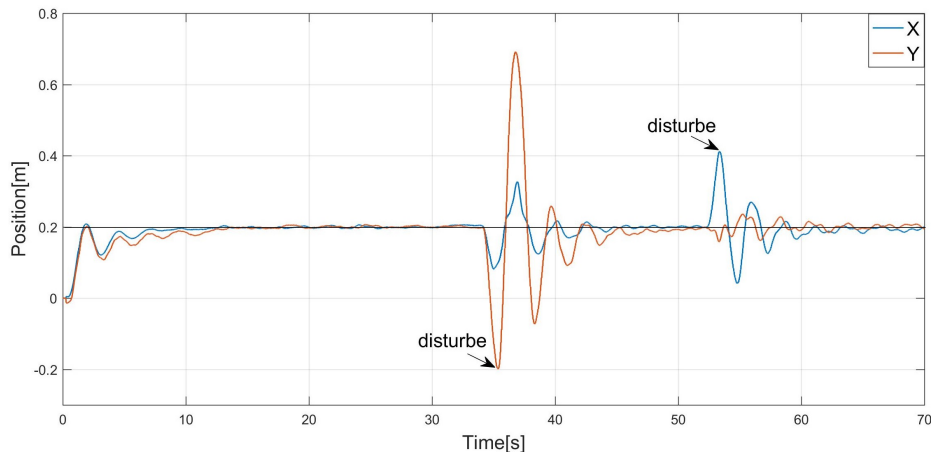


図 6.26: ワイヤ懸架ハンドの位置制御の実験結果.

が高所に機体を固定した後の場面を想定する場合には十分活用でき，ワイヤが長いほど作業域も広くなり，今回の実験結果に基づくワイヤ長 3m の場合はハンドがマルチロータ UAV の直下から 1m × 1m の範囲で位置決めが可能である。

### 6.6.3 通信を介したワイヤ懸架ハンドの位置制御

通信を介したワイヤ懸架ハンドの位置制御は，ロングリーチ空中マニピュレーションにおいてマルチロータ UAV の移動中にもワイヤ懸架ハンドがその直下に位置を保つ目的で行う。また，図 6.16 に示したセットアップに基づいて制御の設計を行った。

図 6.27 に示すようにマルチロータ UAV が  $X_s$  方向に移動していると仮定する。また，マルチロータ UAV が進行方向を変えたい場合はヨー方向の回転で対応できるため，2次元の座標軸のみでの移動を考える。このモデルは図 6.27 の左図で示すようであり，今回はワイヤ懸架ハンドがマルチロータ UAV が移動する方向に力を発生していると仮定すると運動方程式は下記の通りになる。

$$m\ddot{x} = mg\frac{x}{l} - k\dot{x} + u \quad (6.15)$$

ここで  $k$  は空気抵抗や摩擦などを考慮した粘性係数であり，第 6 章 3 節で述べた揺れ抑制シミュレーションにて求めた値であるため，その値をそのまま適用させた。次に，

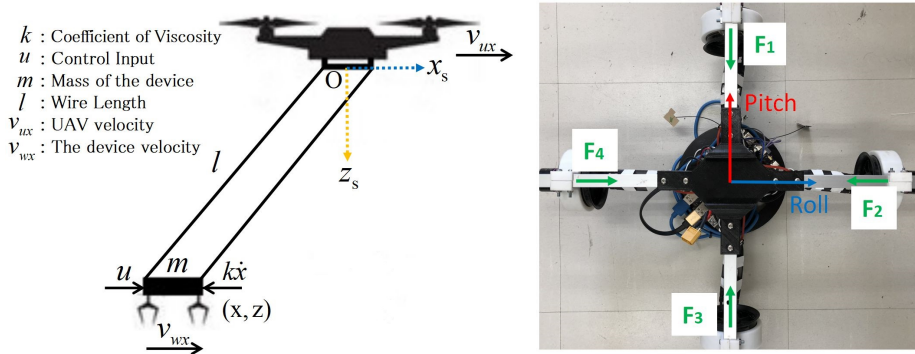


図 6.27: マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンドのモデル (左図). 右図はワイヤ懸架ハンドのダクテッドファンの配置を示す [81].

前節で述べたワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV 間の相対位置計測結果を用いてワイヤの長さ  $l$  を求めることができる.

$$l = \sqrt{{}^c p_x^2 + {}^c p_y^2 + {}^c p_z^2} \quad (6.16)$$

上述の運動方程式に基づいて状態方程式を書くと下記のようなになる.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (6.17)$$

ここで,  $\mathbf{x} = [x \ \dot{x}]^T$  を満たし,  $\mathbf{A}$  と  $\mathbf{B}$  は下記の通りになる.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{g}{l} & -\frac{k}{m} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

線形二次レギュレーター (LQR) は最適制御の一種であり, システムの操作コストを最低限抑えることができる. 本研究ではこの手法を採用しており, 制御ゲインを決めるための評価関数は下記の式で表す.

$$J = \int_0^{\infty} \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + u^T \mathbf{R} u dt \quad (6.19)$$

制御ゲインはこの評価  $J$  を最小にすることで決まり, ここで, 設計パラメータである評価関数の重み行列  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{R}$  を決める必要がある. この二つのパラメータを調整するこ

とで収束時間を短縮させるか、制御入力を小さく抑えるかのバランスを取ることができ、本研究の場合は実験的に調整を行い、 $Q$ と $R$ の値は下記の通りとなる。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, \mathbf{R} = [1], \quad (6.20)$$

上記の結果に基づき、リッカチ (Riccati) 方程式を解くとフィードバックゲインを求めることができる。次に、リッカチ方程式を満たす行列  $P$  が計算できると、評価関数  $J$  を最小にする制御ゲイン  $K$  を下記の式により求めることができる。

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (6.21)$$

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{x} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (6.22)$$

制御ゲインはワイヤ懸架ハンドの CPU ボードにインストールした MATLAB のライブラリーを用いて計算した。また、ワイヤの長さはウィンチ機構を制御することで変わっていくため、制御ゲインはワイヤの長さが変わるたびに計算し直すようにプログラムの設計を行った。以上に基づき、マルチロータ UAV の進行方向におけるワイヤ懸架ハンドの制御入力下記の通りとなる。

$$u_{roll} = K_1^s p_x + K_2(v_{ux} - v_{wx}) \quad (6.23)$$

ここで、 $u_{roll}$  はマルチロータ UAV の進行方向における制御入力を示し、 $\mathbf{K} = [K_1 K_2]$  を満たす。また、 $v_{ux}$  はマルチロータ UAV の進行方向における速度を表し、フライトコントローラから取れる。 $v_{wx}$  はワイヤ懸架ハンドのマルチロータ UAV の進行方向における速度を示しており、ハンドに搭載した Realsense T265 カメラから取得できる。一方、水平面上のマルチロータ UAV の進行方向と垂直する方向に対するワイヤ懸架ハンドの制御に関しては揺れ抑制と同じ制御を行った。その制御式は下記の通りとなる。

$$u_{pitch} = -K_s v_{wy} \quad (6.24)$$

$u_{pitch}$  は上述した方向における制御入力であり、 $v_{wy}$  はその方向における速度を示す。今回の場合はシステムが改良され、角度をフィードバック値として使わなくても揺れ

抑制は十分速くできることが確認できたため、制御器をさらにシンプルな形に設計した。以上により、ダクテッドファンへの制御入力は下記の通りとなる。

$$\mathbf{u}_{fans} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nu u_{pitch} + \xi \\ -\nu u_{roll} + \xi \\ \nu u_{pitch} + \xi \\ \nu u_{roll} + \xi \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

$$\begin{aligned} u_1 &= 0(u_{pitch} > 0) & u_2 &= 0(u_{roll} > 0) \\ u_3 &= 0(u_{pitch} < 0) & u_4 &= 0(u_{roll} < 0) \end{aligned} \quad (6.26)$$

ここで、 $\nu$  と  $\xi$  は4つのダクテッドファンへの制御入力をPWM信号の数値幅に調整するためのパラメータである。ここで計算された値はI2C信号としてCPUボードからモータドライバーに送られ、モータドライバーでこの信号をPWM信号に変換し、4つのダクテッドファンにつないだESCに送られ、回転速度の制御が行える。

設計した制御則の有効性を確かめるため屋内の環境で実験を行った。図6.28で示すようにワイヤ懸架ハンドはマルチロータ UAV から1.5m吊り下げており、マルチロータ UAV は図に示すレール上で移動できるようにセットアップを行った。また、実験ではマルチロータ UAV を手で押しながらこのレール上を往復し、その間のワイヤ懸

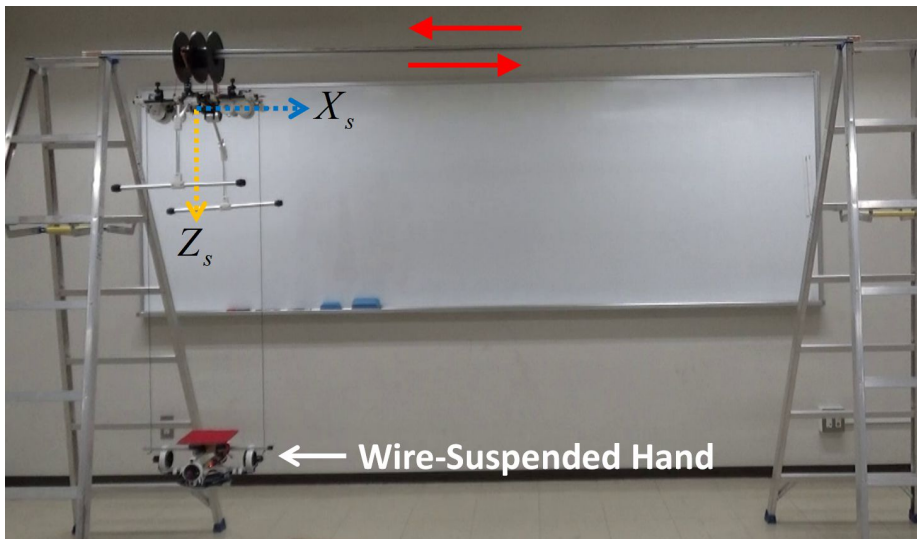


図 6.28: 通信を介したワイヤ懸架ハンドの位置制御における屋内実験風景。

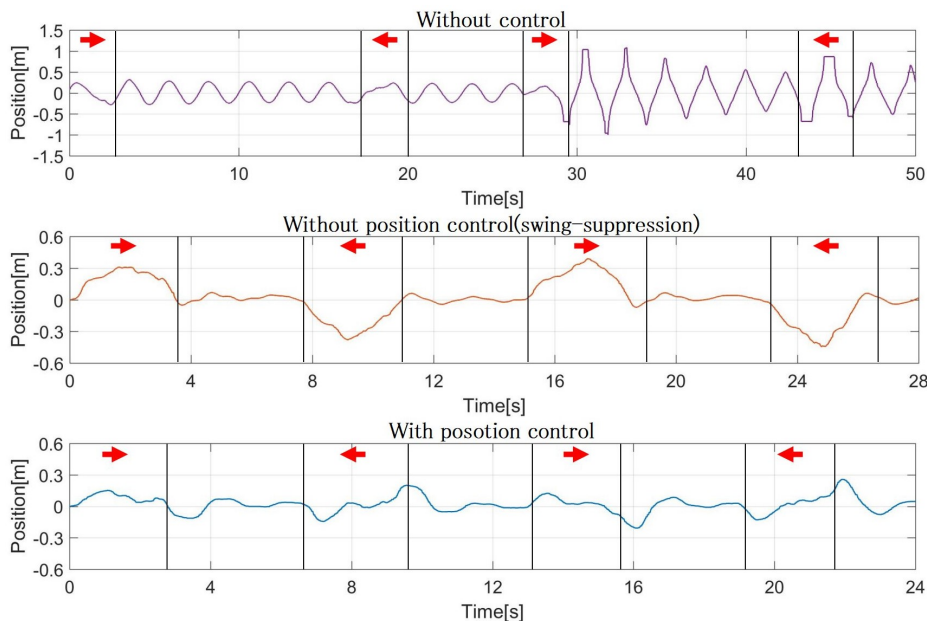


図 6.29: ワイヤ懸架ハンドの位置決め実験結果. 上図は制御しない場合, 真中図は揺れ抑制制御を適応させた場合, 下図は通信を介した位置制御を適応させた場合のマルチロータ UAV に対するワイヤ懸架ハンドの位置変化を示す [81].

架ハンドの様子を観測した. さらに, より具体的に評価を行うため, ワイヤ懸架ハンドが端から端まで着いた時点でマルチロータ UAV を一定時間停止させる時間を設けながら実験を繰り返した. また, 今回の実験では, 位置制御を行う場合, 揺れ抑制を行う場合, 制御をしない場合の三通りで対照実験を行った. その実験結果を図 6.29 に示す.

図 6.29 に示す赤い矢印のあるブロックではマルチロータ UAV が移動している間を示しており, ないブロックではマルチロータ UAV が停止している間を示している. 図に示す三つのグラフは上から下の順にワイヤ懸架ハンドを制御しない場合, 揺れ抑制制御を行った場合, 今回設計した位置制御を行った場合の実験結果を示しており, グラフの数値は  $X_s$  方向におけるマルチロータ UAV に対するワイヤ懸架ハンドの位置を表す. 実験結果により, まず, 制御しない場合はマルチロータ UAV が往復を繰り返せば繰り返すほど揺れが段々大きくなり, 長い時間置いても揺れが収まらないことがわかる. 次に, 揺れ抑制を行う場合は, マルチロータ UAV が移動している間は位置ずれが段々大きくなり, マルチロータ UAV が停止するとすぐに揺れが収まること

わかる。また、マルチロータ UAV が移動の間、位置ずれの最大値は約 0.3m 程であり、ワイヤの長さをもっと長くするとこの位置ずれも更に大きくなる可能性がある。最後に、今回設計した位置制御を行った場合、マルチロータ UAV が動きだした直後には位置が少しずれる傾向があったが、この位置ずれはその後からは段々小さくなる傾向を示した。また、マルチロータ UAV が停止した直後には慣性により少し前進してしまう傾向を示したが、その直後にはすぐにマルチロータ UAV の直下に戻ることがわかる。マルチロータ UAV の移動してる間、ワイヤ懸架ハンドに発生した最大の位置ずれは約 0.15m であり、その直後には約 0.05m と安定した位置にあることがわかった。また、揺れ抑制の場合と比較すると、マルチロータ UAV の移動によるワイヤ懸架ハンドの位置ずれは半分以下に抑えることができたのを確認できる。一方、今回設計した制御則に基づくと、ワイヤが更に伸びた場合でも揺れ抑制の場合のように位置ずれが大きくなる可能性は低く、これは後述する飛行実験にて検証された。以上により、設計した制御則でワイヤ懸架ハンドを期待通りに動かすことができ、その有効性が検証できた。

#### 6.6.4 ウィンチ機構の制御

ウィンチ機構の制御は図 6.6 の応用を実現するために行われる。ウィンチの制御は主にワイヤ懸架ハンドを常に水平方向に保つための姿勢制御、ワイヤ懸架ハンドを地面から一定距離を保つための距離制御が求められ、その制御則は下記のように設計した。

$$\begin{cases} u_{att} = -K_{aP}\alpha_w - K_{aD}\dot{\alpha}_w \\ u_{dis} = K_{dP}d_{err} + K_{dD}\dot{d}_{err} \end{cases} \quad (6.27)$$

ここで  $u_{att}$  は姿勢制御のための制御入力であり、 $u_{dis}$  は距離制御を行うための制御入力である。また、 $K_{aP}$ 、 $K_{aD}$ 、 $K_{dP}$ 、 $K_{dD}$  は各制御入力における PD 制御のゲインである。 $\alpha_w$  はワイヤ懸架ハンドの現在の姿勢と水平方向における姿勢の角度の誤差を表しており、ワイヤ懸架ハンドの IMU センサから計算できる。また、 $d_{err}$  は地面に対するワイヤ懸架ハンドの高さと目標高さの誤差を表しており、これは第 6 章 5 節で述べた方法で求めることができる。次に、これらの制御は場合に常に同時に行う必要があり、図 6.30 に示すように、左側のモータをモータ 1、右側のモータをモータ 2 と

すると、各モータに対する制御入力は下記の通りとなる。

$$\begin{cases} u_{m1} = u_{att} + u_{v2} \\ u_{m2} = u_{dis} \end{cases} \quad (6.28)$$

上式で示すように、一個のモータではワイヤ懸架ハンドの地面に対する距離制御を行っており、もう一つのモータは主にワイヤ懸架ハンドが常に水平になるように制御を行う。また、 $u_{v2}$  はワイヤ懸架ハンドが上下するたびによりスムーズに動作し、片方のモータの回転速度に追いつくための補正值であり、この値はモータ 2 の値に比例して作用するように設計した。以上により、ワイヤ懸架ハンドが距離制御により地面に対する制御ができ、姿勢制御により常に水平方向に保たれ、ダクテットファンの出力を最小限に抑えることも可能であり、目的の作業によってはワイヤ懸架ハンドの姿勢を特定の方向に傾けることも可能となる。

設計したウィンチの制御則の精度を確認するため、図 6.30 で示したようにセットアップを行い、制御実験を行った。ワイヤ懸架ハンドの初期位置は地面から 1.2m 離れた高さに設定され、目標位置は地面から 0.8m に設定した。さらに、ワイヤ懸架ハンドが収束した後は、図に示している段ボール箱をワイヤ懸架ハンドの直下に置くことで、ハンドとその直下の面までの相対距離を変え、目標位置へと収束する様子を観測した。次に段ボール箱をワイヤ懸架ハンドの直下から取り除き、その様子を観測した。この作業は 2 回繰り返した。この実験結果を図 6.31 に示す。このグラフはワイ

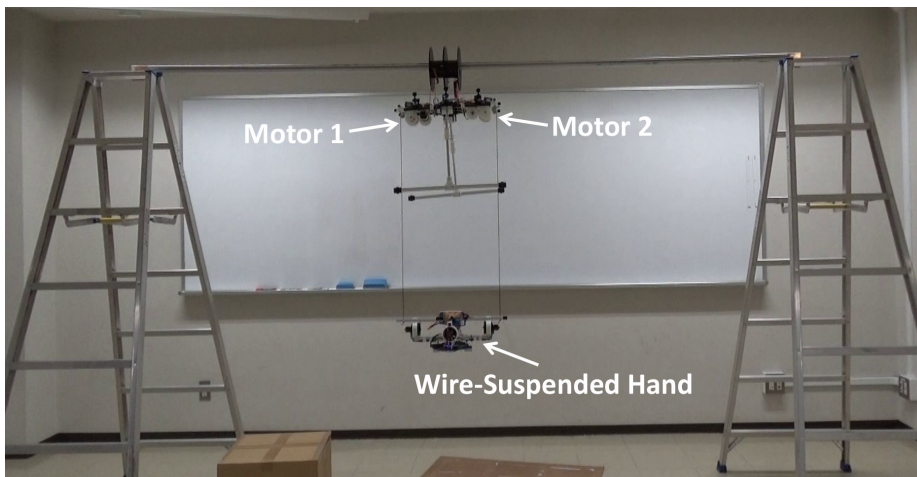


図 6.30: ウィンチ制御の実験風景.

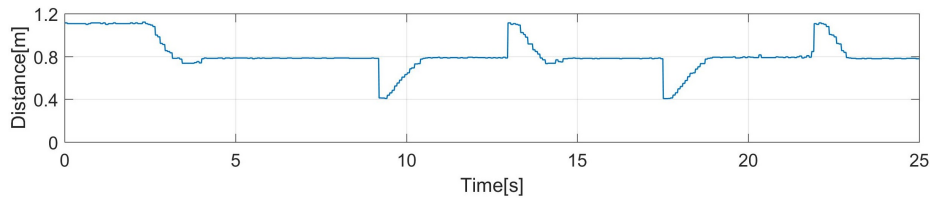


図 6.31: 実験結果. 地面に対する目標高さは0.8mに設定した.

ワイヤ懸架ハンドと地面間の垂直方向における相対距離を示している. 実験結果により, 0.4mの距離誤差に対してワイヤ懸架ハンドが収束するまでは1秒ほどかかることが分かった. また, 収束までには若干時間がかかったが, 収束した後は約0.02mほどの誤差しか残らず, 十分高精度に制御されていることが検証できた.

## 6.7 飛行実験

### 6.7.1 揺れ抑制実験

本実験では, 開発したワイヤ懸架ハンドによる揺れ抑制制御がマルチロータ UAV の飛行状態でも可能であることを確かめるために行った. 実験に使用した機体は空中ドッキング実験に使用した機体と同じセットアップのものを使用した. ワイヤ懸架ハンドは図6.14で示したセットアップを使用した. 揺れ抑制実験を行うまえに, 二本でワイヤで吊り下げたワイヤ懸架ハンドがねじられることなく制御可能な長さ確かめるために, マルチロータ UAV を飛ばし, ウィンチ機構でワイヤ懸架ハンドを吊り下げ, ワイヤの長さを1.5mから5mの範囲で調整した. 結果, ハンドがねじられることなく稼働できるワイヤの最大長は3.5mであることが確認できた.

揺れ抑制実験は図6.32に示すように行った. マルチロータ UAV とワイヤ懸架ハンド間の距離は上述した結果により3.5mに固定した. 実験手順としては, まずマルチロータ UAV を図6.32に示す goal point1 に向かわせる. この方向はワイヤ懸架ハンドのロール方向と一致する. マルチロータ UAV を goal point1 についた時点で20秒ほどホバリングさせ, 次のポイントに向かわせる. この場合のマルチロータ UAV の進行方向はワイヤ懸架ハンドのピッチ方向と一致する. マルチロータ UAV がこのポイントにつき, ワイヤ懸架ハンドの揺れが収まった時点で実験は終了となる. 実験デー



タとしてはワイヤ懸架ハンドのIMUセンサのデータを取った。また、揺れ抑制を行ってない場合と比較するために、前述した手順で、揺れ抑制を行わずにもう一度実験を行った。

揺れ抑制のありと無しの場合の対象実験の結果を図 6.33 に示す。このグラフはワイヤ懸架ハンドのロールとピッチ角の変化を表しており、ワイヤ懸架ハンドの揺れが収まっているかを確認できる。図 6.33 の下図で示すように、ワイヤ懸架ハンドの固定のものから吊り下げた場合の揺れ抑制実験の結果に比べ、ハンドの揺れはマルチロータ UAV がゴールポイントに着いた直後に 2 秒ほど遅れて収まっていることが確認できる。これは、ワイヤの長さが固定のものから吊り下げた場合の実験の時に比べ長くなっており、マルチロータ UAV のように動くものから吊り下げたことなどが原因として考えられる。

一方、揺れ抑制をしない場合は、マルチロータ UAV がゴールポイントに着いた直後からワイヤ懸架ハンドは揺れはじめ、時間が経つと多少揺れが収まる傾向があったが、マルチロータ UAV の小さなドリフトでハンドのピッチ方向で揺れが発生し、この揺れは機体にも影響し始めた。そのため、マルチロータ UAV は姿勢を水平に保つためにフライトコントローラから制御が働き、この動きがかえてワイヤ懸架ハンドの

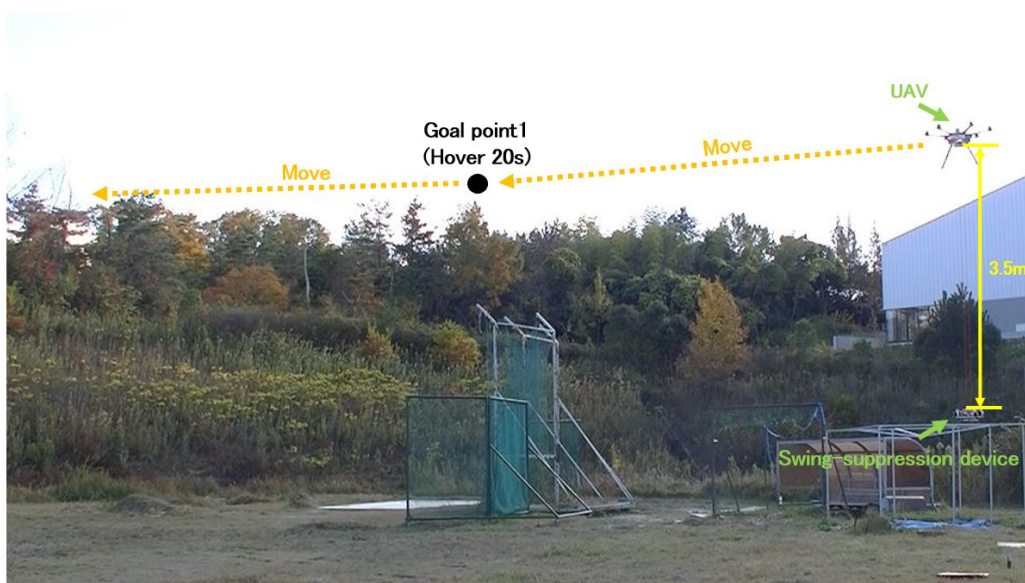


図 6.32: ワイヤ懸架ハンドの揺れ抑制の飛行実験方法 [80](©2019 IEEE) .

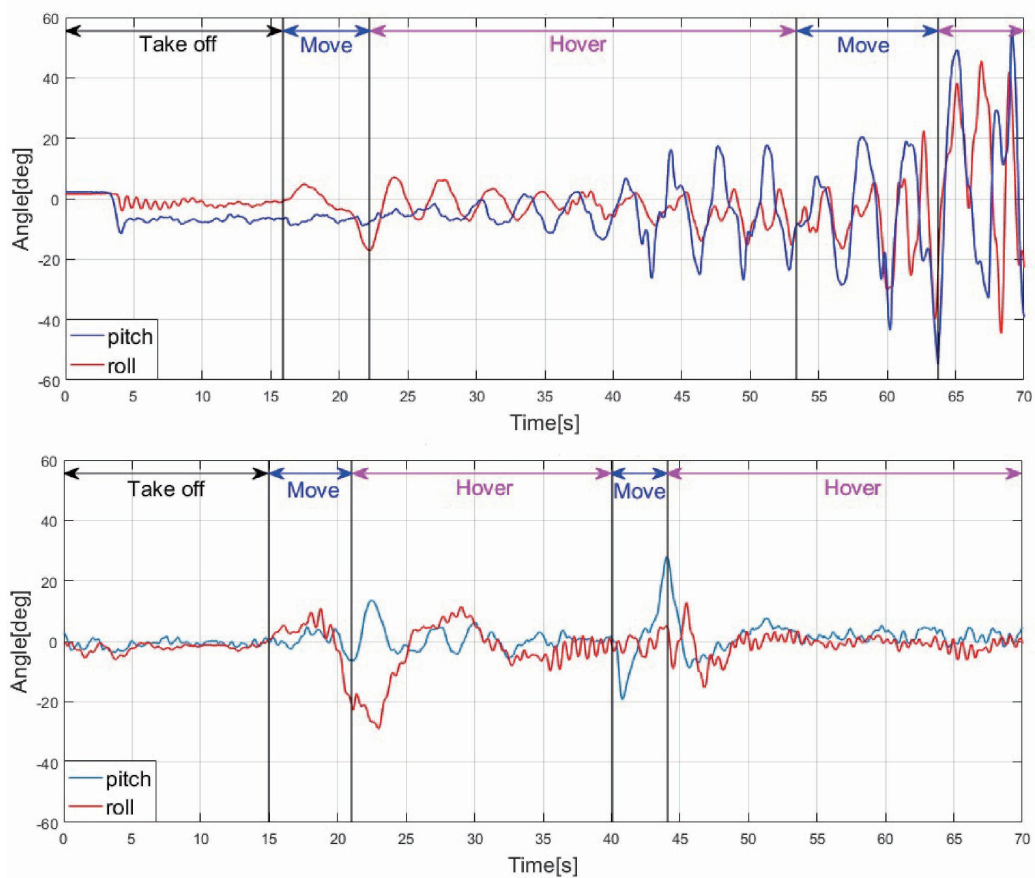


図 6.33: 飛行実験結果. 上図は揺れ抑制をしない場合, 下図は揺れ抑制を適応させた場合のワイヤ懸架ハンドの姿勢変化を示す [80](©2019 IEEE).

揺れを増幅させた. そこで, マルチロータ UAV を動かし, 次のゴールポイントに向かわせながら, この揺れを抑えようとしたが, 揺れ抑制には至らず, 最終的には機体が墜落してしまった.

以上の実験を通じて, ロングリーチ空中マニピュレーションにおいて揺れ抑制が有効であることが検証できた. また, 揺れ抑制実験は想定した通りの結果が得られ, 設計した制御則はマルチロータ UAV の飛行時でも有効であることが確認できた.

## 6.7.2 ピックアンドプレース実験

本実験では提案のロングリーチ空中マニピュレーション手法におけるピックアンドプレース作業の実現可能性を確認するために実施した。実験で用いた機体のセットアップは前節で述べた飛行時の揺れ抑制実験の時の同じものである。また、ワイヤ懸架ハンドのビジョンベースの把持システムを稼働させた。実験では0.3kg, 14.8V, 3000mAhのリポバッテリーをダクテットファンとグリッパやカメラマウントの駆動に使用したモータの電源として使用した。また, 0.12kg, 11.1V, 1500mAhのリポバッテリーをCPUボードの電源として使用した。これらの二つのバッテリーはワイヤ懸架ハンドを約1時間ほど稼働させることができ、これはマルチロータ UAV の稼働時間よりも長い。さらに、この場合のワイヤ懸架ハンドの総重量は2kgほどになり、マルチロータ UAV が負担できる負荷は後2kgほど残る。一方、実験ではマルチロータ UAV をマニュアル操作で動かしていたため、操縦の難易度を減らすためにワイヤの長さは3mに設定した。

実験の手順を図6.34に示す。まず、マルチロータ UAV を飛ばし、ワイヤ懸架ハンドをマルチロータ UAV の直下3mの場所まで吊り下げる。次に、ワイヤ懸架ハンドの揺れ抑制制御が稼働した状態でマルチロータ UAV をゆっくり動かしながら図6.34で示す対象物の近傍まで接近させる。ここで、マルチロータ UAV の位置を調整しな

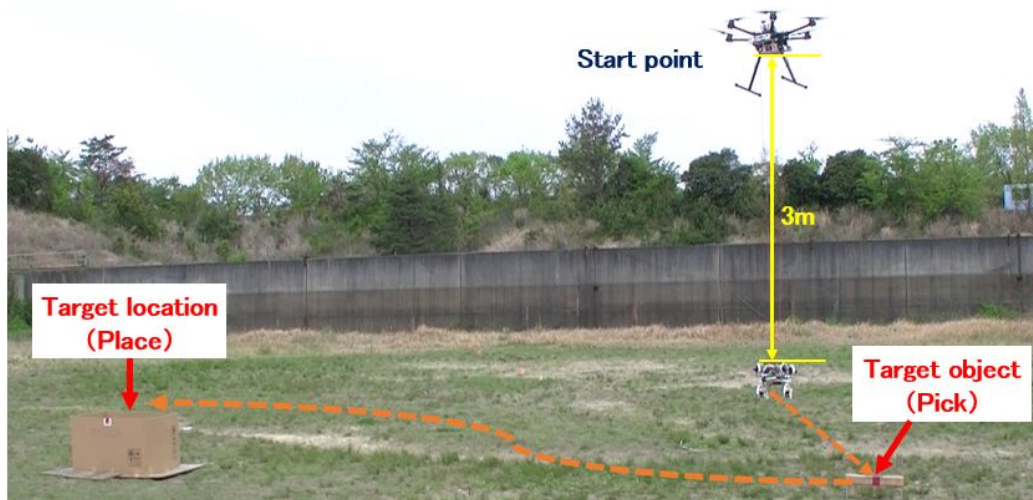


図 6.34: ピックアンドプレース作業の実験方法 [80](©2019 IEEE).

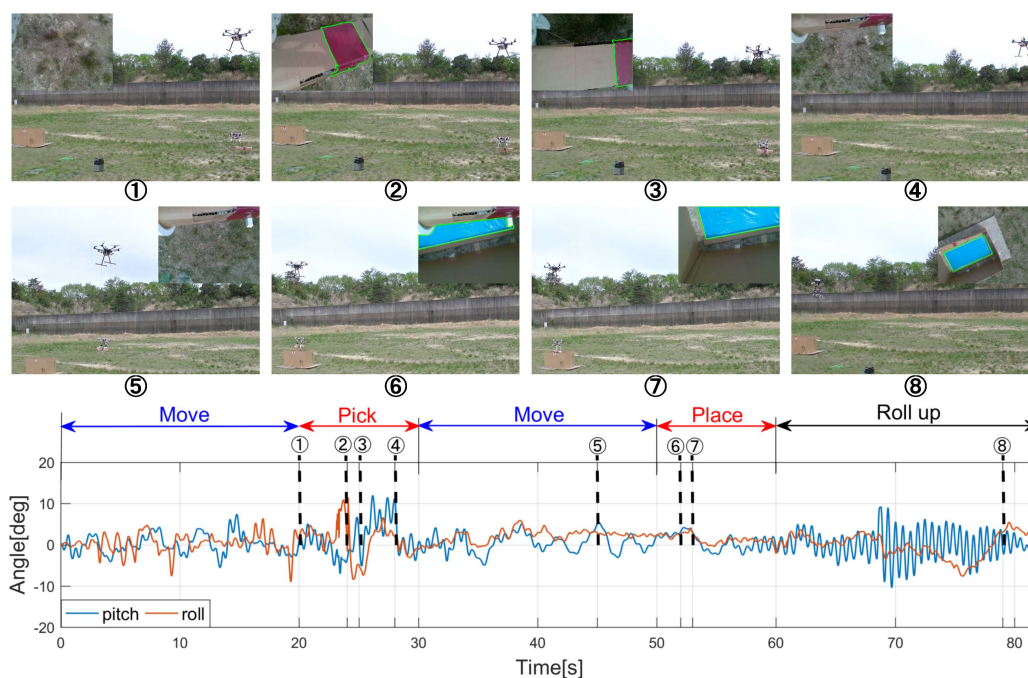


図 6.35: ピックアンドプレース作業の実験結果. 上図はピックアンドプレース作業の連続画像を示し, ① から f ⑧ の順である. 各画像の左上と右上の画像はワイヤ懸架ハンドに搭載されたカメラからの画像である. 下図はピックアンドプレース作業の間のワイヤ懸架ハンドの姿勢変化を示す [80](©2019 IEEE).

がら, ワイヤ懸架ハンドのグリッパが対象物を自動で把持できる範囲入るように動かす. ワイヤ懸架ハンドが対象物に捕まるとマルチロータ UAV を上昇させ, 対象物を置く場所 (図 6.34 の左側で示すボックスの中) へと移動させる. マルチロータ UAV が置き場の近くまで来ると前述したことと同様にマルチロータ UAV の位置を調整しながらワイヤ懸架ハンドがつかんでいる対象物を置ける範囲に入るまで移動させる. 最後にワイヤ懸架ハンドが物体を置けるとウィンチ機構によりワイヤ懸架ハンドをマルチロータ UAV の直下まで戻し, 着陸させる. この時点で実験が完了となる.

実験結果とその連続画像を図 6.35 に示す. グラフで示しているのはピックアンドプレース作業の間のワイヤ懸架ハンドの姿勢である (ロール, ピッチ角). 図で示すように作業の間, ワイヤ懸架ハンドのロール, ピッチ角は  $\pm 7^\circ$  で変動しており, 揺れ抑制制御はマルチロータ UAV の飛行に影響しなかった. 図 6.35 に示す上図の①から④は物体を把持するまでの過程を示しており, ⑥, ⑦では把持物体をボックスの中に入れ

る過程を示し、最後の二枚の図はワイヤ懸架ハンドを巻きあげる様子を示している。また、図の①から④までの左上図と⑤から⑧までの右上図はワイヤ懸架ハンドに搭載した RGB-D カメラから取った画像である。また、上 8 枚の連続画像の番号は下のグラフに示している番号と同一時刻を表す。

実験結果により、ピックアンドプレースの作業において、すべての作業がスムーズに行えることができたのを確認した。また、物体のピックアップ作業において姿勢が大きく変化したように見えているが、これはワイヤ懸架ハンドが物体に把持した時にワイヤが少し緩んだことで起きた現象であり、ハンドが揺れたことはなかった。以上により、本研究で提案するワイヤ懸架ハンドによるロングリーチ空中マニピュレーションの手法の有効性が検証できた。

### 6.7.3 マルチロータ UAV と通信を介したワイヤ懸架ハンドの制御実験

本実験はマルチロータ UAV の飛行中にもワイヤ懸架ハンドをその直下に保つことで、リジットアームとしての使用可能性とウィンチ機構の自動化システムの有効性を検証するために実施した。実験に用いた機体とワイヤ懸架ハンドはピックアンドプレース作業時に使用したセットアップから改良後のシステムを使用した。本実験では次の三つの実験を行った。まず、ウィンチ機構の制御の有効性を確かめるために飛行状態におけるウィンチ機構の制御実験を行った。次に、ワイヤ懸架ハンドの位置をマルチロータ UAV の移動中にもその直下に保つために設計した位置制御の有効性を確かめるためにマルチロータ UAV を飛行させながら揺れ抑制の場合と対照実験を行った。最後に、ウィンチ機構の制御と前述の位置制御が同時に稼働しても飛行に影響しないかを確かめるために、ワイヤ懸架ハンドに段差状の障害物を乗り越えさせることで検証を行った。

#### マルチロータ UAV の飛行時におけるウィンチ機構の制御実験

実験は図 6.36 に示すように行った。ウィンチ機構はワイヤ懸架ハンドと地面との距離を一定に保ち、姿勢を水平に保つように制御された。また、ウィンチ機構のシステムは手動操作と自動制御がマルチロータ UAV を操縦するプロポで切り替えられる

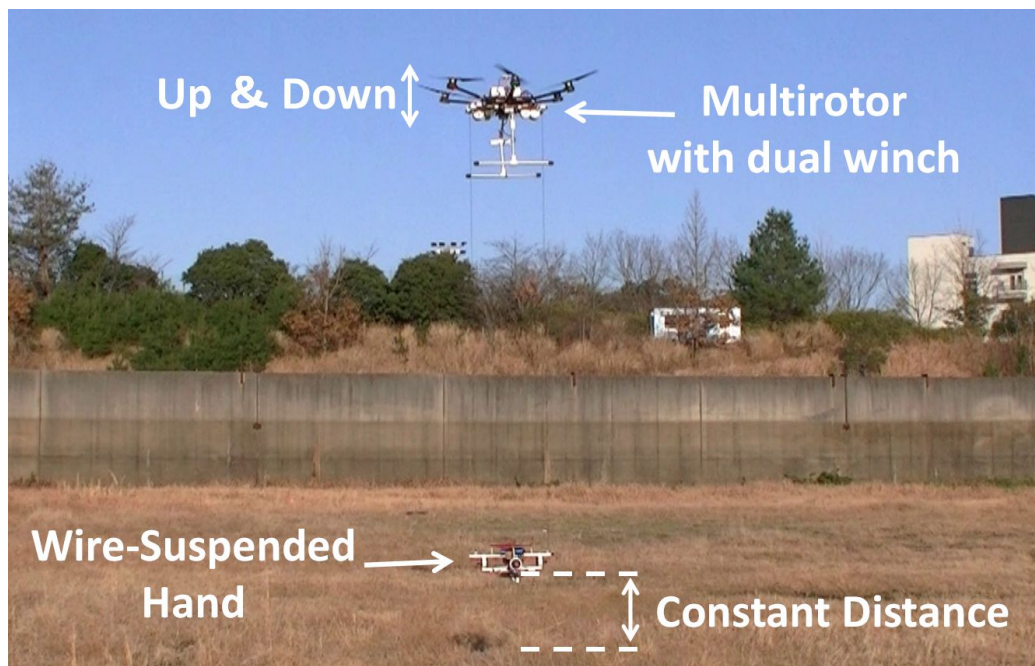


図 6.36: マルチロータ UAV のウィンチ制御における飛行実験の方法.

ように設計した。実験手順は次に述べるようになる。まず飛行ロボットを地面から数メートル離れた場所まで飛ばし、ワイヤ懸架ハンドをマルチロータ UAV から吊り下げた。また、マルチロータ UAV のドリフトによるワイヤ懸架ハンドの揺れを防ぐため、ワイヤ懸架ハンドには揺れ抑制制御を稼働させた。次にウィンチ機構の制御プログラムを開始し、マルチロータ UAV を垂直方向において上昇と下降するように操作を行った。また、このマルチロータ UAV の操作による上昇と下降の動作を 2 往復繰り返し、ワイヤ懸架ハンドの様子を観測した。ここで、ワイヤ懸架ハンドの地面に対する距離は 0.6m に設定した。

実験結果を図 6.37 に示す。上図に示すグラフはワイヤ懸架ハンドと地面間の距離を表しており、これは第 6 章 5 節で述べたように計算し、フィードバック値として使用した。また、グラフにあるブロックはマルチロータ UAV が上昇中であるか下降中であることを示しており、最後の 4 秒間はホバリング状態である。下図に示すグラフはワイヤ懸架ハンドの 2 本のワイヤで制御されたピッチ角を表している。

実験結果に示すようにマルチロータ UAV が上昇と下降している間は約 0.1m の定常偏差が残っている。これは、ウィンチ機構の収束時間が長かったのと、マルチロー

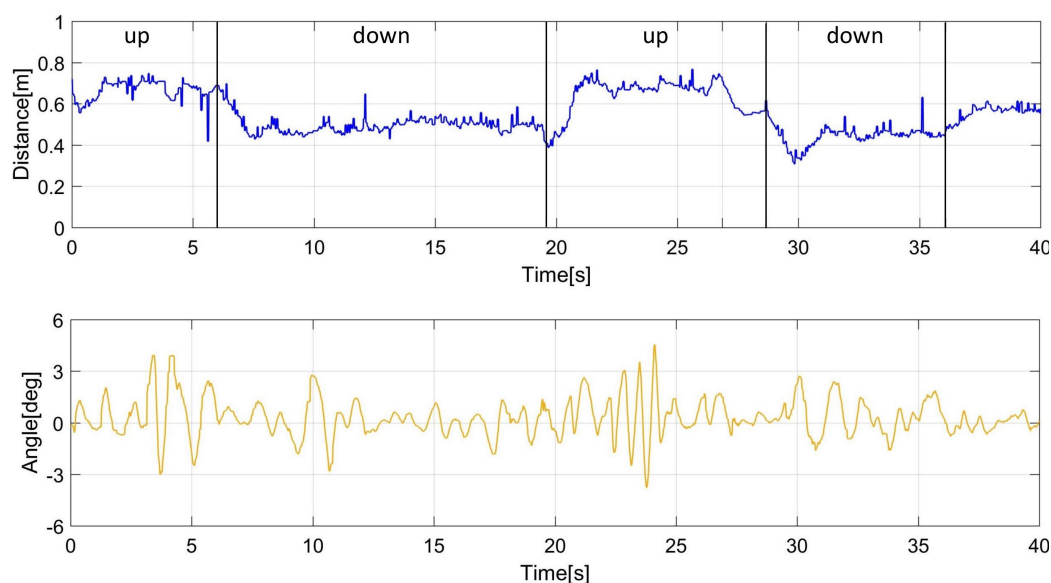


図 6.37: 実験結果, 上図はワイヤ懸架ハンドから地面までの距離を示しており, 目標高さは 0.6m に設定した. 下図はワイヤ懸架ハンドの姿勢変化を示す [81].

タ UAV を任意の速度で動かしたためである. グラフで示す最後の 4 秒の間ではマルチロータ UAV がホバリング状態に入り, その直後にワイヤ懸架ハンドが目標位置にたどり着いたことがわかる. この部分に焦点を置くと実験結果は図 6.31 で示した屋内のウィンチ機構制御実験の時と類似した結果となる. また, グラフでは小さなノイズが観測されるが, これは地面に生えていた雑草などが影響した可能性があるが, 制御には影響しなかった. 一方, 図 6.37 の下図に示すように, ワイヤ懸架ハンドのピッチ角は約  $\pm 3^\circ$  の範囲で制御され, IMU センサの精度から考慮すると, ハンドはほぼ水平に保たれたことがわかった. この実験を通じて, ウィンチ機構の自動制御はマルチロータ UAV の飛行には影響しなかったが, マルチロータ UAV の上昇下降する動作がウィンチ機構の収束に影響を与えたことが分かった. しかし, 本研究で提案する応用では, マルチロータ UAV は基本的に高度を保ったままウィンチ機構のみを動作させると想定しているため, これに基づくとウィンチ機構は期待通りに制御できた.

## マルチロータ UAV の飛行時におけるワイヤ懸架ハンドの位置制御

本実験ではマルチロータ UAV の高さを 5m に設定し、ワイヤ懸架ハンドはその直下 3m に設定した。また、実験の間ではマルチロータ UAV を約 8m/s の速度で移動させた。また、揺れ抑制を行った場合と比較するために、実験は位置決め制御モードで一回行い、揺れ抑制制御モードで一回行った。ここで、マルチロータ UAV を同じルートをほぼ同じ速度で往復させた。また、ワイヤ懸架ハンドの位置制御モードと揺れ抑制制御モードはマルチロータ UAV の操作用のプロポで切り替えられるようにシステムを設計した。実験手順としてはまず、マルチロータ UAV からワイヤ懸架ハンドを吊り下げた状態で、実験環境にて開始位置を決め、そこから約 60m 離れた場所を目的地として設定し、ワイヤ懸架ハンドを位置制御モードに設定した上でマルチロータ UAV を目的地に向かって高速に動かさせた。目的地にたどり着いたらマルチロータ

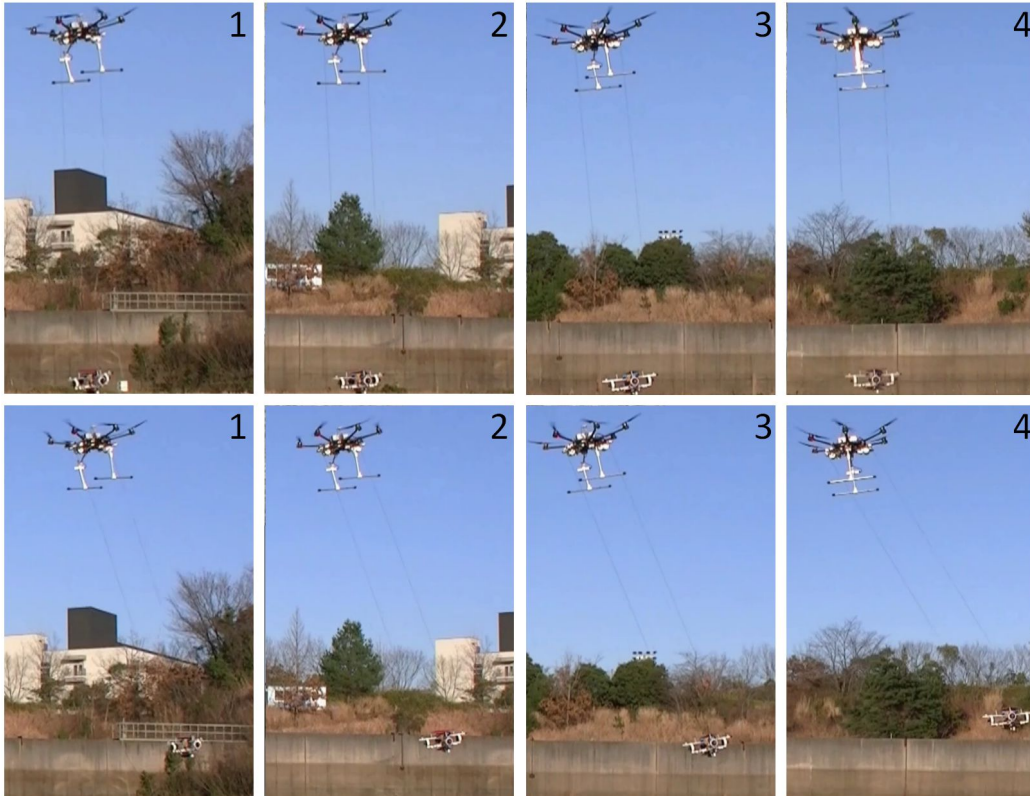


図 6.38: 通信を介したワイヤ懸架ハンドの位置制御 (上図) と位置制御を適応しない場合 (下図) の比較実験. 連続画像は 1-4 の順に従う [81].



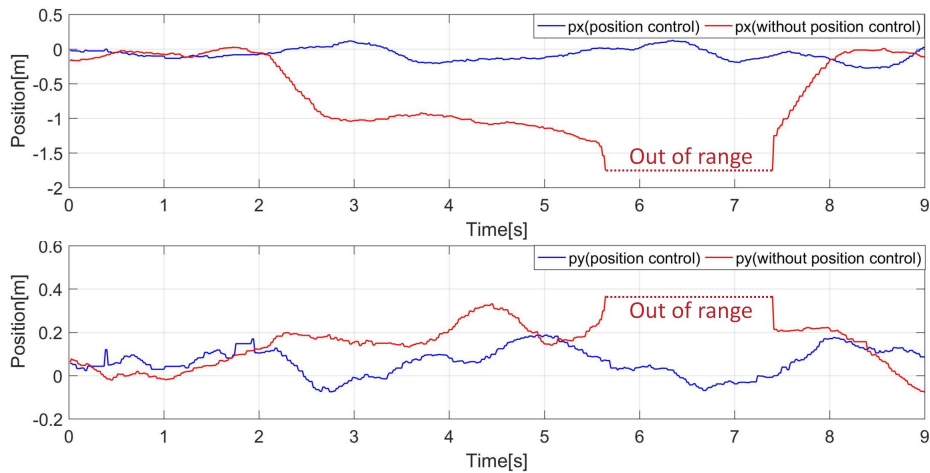


図 6.39: 実験結果. 上図は通信を介した位置制御を適応した場合と適応しない場合におけるマルチロータ UAV が進行した方向 ( $X_s$  軸) のワイヤ懸架ハンドとの相対位置を示し, 下図は進行方向と直行する方向 ( $Y_s$  の相対位置を示す [81].

UAV を最初にスタート位置に戻し, 今度はワイヤ懸架ハンドの揺れ抑制制御モードでマルチロータ UAV を目的地に向かわせた. マルチロータ UAV が目的地に着いた時点で実験は終了となる.

実験過程における連続画像を図 6.38 に示す. 上図の 4 枚の画像はワイヤ懸架ハンドが位置制御を行った場合を示しており, 下図の 4 枚の画像はワイヤ懸架ハンドが揺れ抑制を行った場合である. これらの連続の写真は 1 から 4 の順に動くものである. 一方, これらの連続画像で示すように, ワイヤ懸架ハンドが位置制御モードの場合は, マルチロータ UAV の高速移動中にでもしっかりその直下に位置を保つことができた. 一方, 揺れ抑制制御の場合はマルチロータ UAV の速度が速くなればなるほど, その直下から位置が大きくずれていってることがわかる. これは, 揺れ抑制の場合はワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV 間は通信を行っておらず, ワイヤ懸架ハンド側はマルチロータ UAV の高速移動を揺れとして認識しており, 速度は速いほど揺れが大きいと認識しているため, その揺れを止めるために進行方向とは逆向きに推力発生しているのが位置ずれが大きくなっている原因である.

この実験結果を図 6.39 に示す. 図に示す上側のグラフはワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV 間の進行方向における相対位置 ( $X_s$  軸とする) を揺れ抑制制御モードの場合と位置制御モードの場合で示しており, 下側のグラフは水平面上で前述の方向

に垂直する方向における相対位置 ( $Y_s$  軸とする) を示したものであり、このデータはマルチロータ UAV に搭載した RGB カメラからワイヤ懸架ハンドに載せたマーカ検出から計算したものである。実験結果で示すように、位置制御モードの場合は、マルチロータ UAV の移動中にその進行方向に対して、ワイヤ懸架ハンドは相対位置を約  $\pm 0.1m$  の範囲で保つことができた。この結果は屋内環境でワイヤ長  $1.5m$  で行った実験結果と類似しており、ワイヤ長が伸びてもその影響はあまり大きくないことが検証できた。また、この制御モードはマルチロータ UAV がホバリング状態に入っても揺れ抑制制御モードと同じ機能が働くことがわかる。一方、揺れ抑制制御モードの場合は位置ずれが段々大きくなり、カメラの検出範囲外にまで位置がずれていることがわかる。以上により、本研究で設計したワイヤ懸架ハンドの位置制御モードの有効性が検証でき、揺れ抑制から更に機能拡張することに成功した。

### ウィンチ機構とワイヤ懸架ハンドの制御による段差状障害物回避実験

本実験は前節で行った飛行中のウィンチ機構の制御実験と通信を介したワイヤ懸架ハンドの位置制御実験に基づき、ウィンチ機構の制御とワイヤ懸架ハンドの制御を同

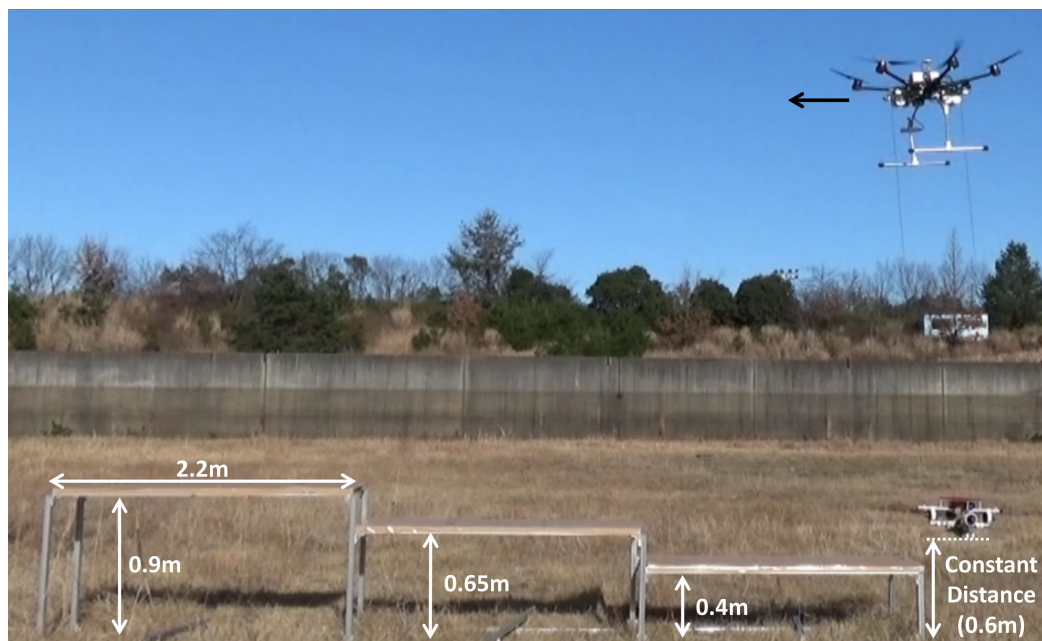


図 6.40: ワイヤ懸架ハンドの障害物回避実験の方法 [81].

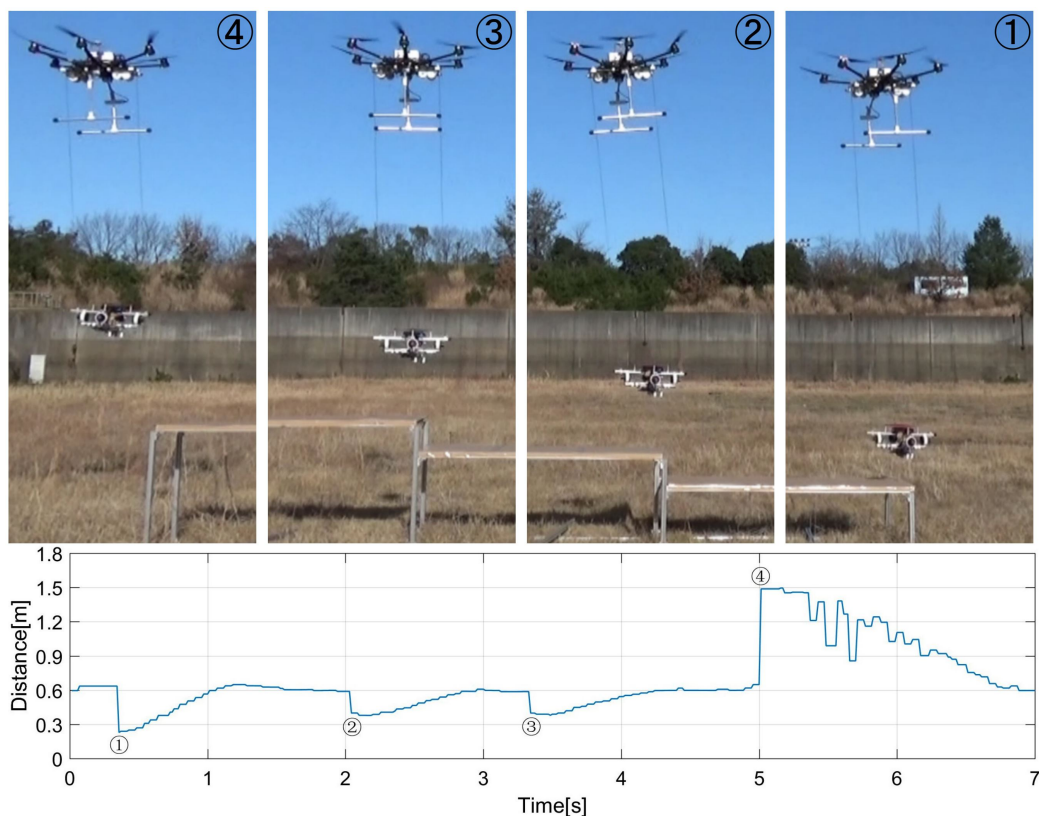


図 6.41: 障害物回避実験の連続画像 (上図) と実験結果. 連続画像は①-④である. 実験結果のグラフはワイヤ懸架ハンドとその直下の平面間の距離を示す [81].

時に行った場合に, 飛行に影響がないかを確認し, マルチロータ UAV の飛行中にワイヤの長さが変わってもワイヤ懸架ハンドはマルチロータ UAV の直下に位置を保てるかを確認することを目的とする. 実験は図 6.40 で示すように行った. 図に示すような規格でアルミパイプを用いて段差状の障害物を設置した. ウィンチ機構の制御におけるワイヤ懸架ハンドと地面の目標距離は 0.6m に設定した. 実験では図 6.40 に示す位置をスタート位置とし, マルチロータ UAV は高さを保ったまま飛行させ, その動きを観測した. ワイヤ懸架ハンドが段差を全部通過した時点で実験は終了とする.

ウィンチ機構の実験結果と実験の連続画像を図 6.41 に示す. 上図に示す番号は下図のグラフに示す番号と同じ時刻を示しており, 下図のグラフはワイヤ懸架ハンドとその直下の表面との距離を表している. さらに, 各番号で示しているのは相対距離が変わった時点である. 実験結果により, ウィンチ機構はスムーズに動作できたことが確

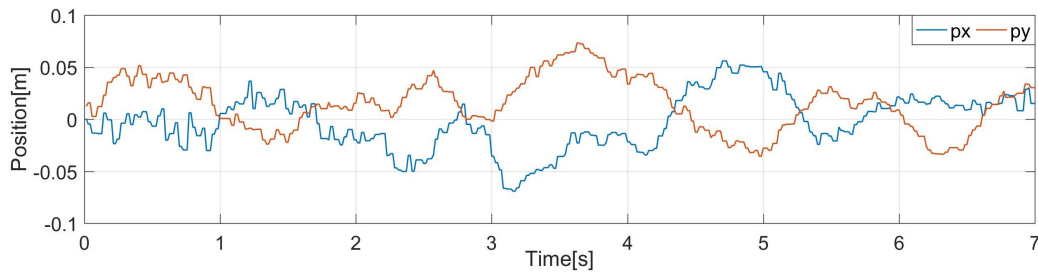


図 6.42: 実験結果. グラフは障害物回避実験の間, ワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV の  $X_s$  軸と  $Y_s$  軸上相対位置変化を示す [81].

認できた. また, この実験結果は屋内のウィンチ機構の制御実験の結果と同じ程度の高精度を出している. 一方, グラフの後半にはノイズのようなばらつきが見られるが (5s~7sの間), これは地面に生えた雑草がセンシングに影響した可能性があるが, 制御には全く影響しなかったことがわかる. 以上により, ウィンチ機構は期待通りに制御できたことを確認した.

位置決め制御の実験結果を図 6.42 に示す. また, 実験で示すグラフは前節で行った飛行中の位置決め実験の場合と同じ座標軸を取っており,  $px$  はマルチロータ UAV の進行方向におけるワイヤ懸架ハンドとの相対距離を表しており,  $py$  は水平面上に進行方向と垂直する方向におけるワイヤ懸架ハンドとの相対距離を表している. このデータも前節と同様にマルチロータ UAV から RGB カメラでワイヤ懸架ハンドに載せたマーカの検出結果である. 実験結果により, マルチロータ UAV の移動中にウィンチ機構の制御により, ワイヤ懸架ハンドの高さが変わり, ワイヤの長さが変わっても影響なく稼働できることが確認できた. 更に, マルチロータ UAV の進行中にはワイヤ懸架ハンドとマルチロータ UAV 間の相対距離は約  $\pm 0.05m$  であり, 前節で行った位置決め実験よりも良い結果となっており, これは前節で行った実験の時よりもワイヤの長さが短かったことが原因である可能性がある.

以上により, 本研究で提案したロングリーチ空中マニピュレーション手法における機能拡張のために改良したシステムの有効性が検証できた. 改良したシステムの最大の特徴は, 通信を構築することで, ワイヤ懸架ハンドのフィードバックでマルチロータ UAV に搭載したウィンチ機構を制御でき, マルチロータ UAV からのフィードバックでワイヤ懸架ハンドの制御ができたことである. これにより, マルチロータ UAV

とワイヤ懸架ハンドは一体化し、ワイヤ懸架ハンドは飛行ロボットの移動中にでもリジッドなアームとして使用することができ、自由にその長さが調整できることも可能である。そのため、今後、本システムを更に拡張することでインフラ点検における太陽光パネルの検査や高圧電線の点検などへの応用が期待できる。一方、今回のセットアップでは障害物がワイヤ懸架ハンドの前方にあった場合は、ウィンチ機構の制御によりそれを乗り越えることはできないが、今回の実証実験の結果に基づき、距離測定のためのセンサをワイヤ懸架ハンドの前方に設置するだけで十分実現可能である。

## 第7章 結論

本研究では、空中マニピュレーションにおけるマルチロータ UAV の位置決めに関する課題に着目し、アドオン型水平並進駆動モジュール (ATD モジュール) を開発した。市販の標準的なマルチロータ UAV は空中マニピュレーション分野の研究でも幅広く活用されているが、このようなマルチロータ UAV は原理的に、移動やブレーキ、強風下では姿勢が傾く問題が存在した。これは、空中マニピュレーションの作業において、マルチロータ UAV に搭載した効果器の位置をずらしてしまい、障害となる。そこで、本研究ではマルチロータ UAV の姿勢を水平に保ったまま移動でき、安定して力を作業対象に作用させることができる ATD モジュールを提案した。ATD モジュールは三つのダクテットファンで構成され、制御方法は非常に簡単であり、精密な位置決めが用意に実現できる等の特徴がある。本研究では、ATD モジュールを開発し、実機実験により移動特性を評価し、屋外実験にて押し引き作業を実施することで有効性と有用性を検証した。ATD モジュールをマルチロータ UAV に搭載する手法は、これまでに空中マニピュレーションにおいて長年議論されてきた位置姿勢制御の独立における課題の解決策の一つとして有効であることが検証できた。

更に、ATD モジュールを利用した応用として、高所高圧洗浄作業への応用を検討し、実機の開発を行った。高圧洗浄作業を実現するためには、水を的確に噴射しながら高圧洗浄機のノズルから発生する反力を抑える必要がある。これらの課題は ATD モジュールを使用することで解決でき、機体の姿勢を水平に保ちながら移動が可能となり、水を的確に噴射することができるようになる。更に、ATD モジュールの駆動力で水噴射時の反力も抑えることが可能になる。提案した手法に基づき、ATD モジュールの再開発を行った。次にダクテットファンの推力を計測し、水噴射時の反力が ATD モジュールの駆動力の範囲内にあることを確認した。最後に ATD モジュールと高圧洗浄機のノズルをマルチロータ UAV に搭載し、システム構築を行った。飛行実験では、ATD 飛行モードでマルチロータ UAV を飛行させながら水噴射を行い、機体の姿勢を水平に保ちながら移動可能で同時に反力も抑えられることが確認でき、提案する

手法による高圧洗浄作業への応用の有効性が検証できた。洗浄対象となる壁などに対してマッピングを行い、位置決めや目標軌道に沿いながら飛行させるなどの動作計画および自動化は今後の課題となる。また、マルチロータ UAV には航続時間が短い課題があるが、これは有線給電方式を用いることで解決できる。高圧洗浄作業の自動化が実現できれば、消防や塗装、墨打ちなどの作業にも活用できる等、応用が広がる。

ATD モジュールをマルチロータ UAV から分離し、エンドエフェクタの一部とみなした応用として、マルチロータ UAV を作業対象から比較的大きな距離を確保しながら作業を実行するロングリーチ空中マニピュレーションの手法を提案した。ロングリーチ空中マニピュレーションは、ダウンウォッシュの影響を避けたい場合や作業対象が狭い空間や障害物の多い環境にあり、直接アプローチしにくい場合に有効的な手段となる。本論文では、前述のロングリーチ空中マニピュレーションが必要な場面について詳しく説明し、現在世界中で行われている関連研究を紹介した上で抱えている問題点を述べた。そこで、本研究では、ATD モジュールをエンドエフェクタの一部とみなし、マルチロータ UAV から吊り下げるロングリーチ空中マニピュレーション手法を提案した。ワイヤでロボットハンドを吊り下げる場合、まずは揺れを抑える必要があるため、揺れ抑制シミュレーションを行い、制御方法を検討した。また、揺れを抑える装置として ATD モジュールを使用した。実機開発により、シミュレーションで行った制御方法を ATD モジュールに適用させ、屋外環境での揺れ抑制実験とピックアッププレース実験によりその有効性を検証した。次に、ワイヤ懸架ハンドをあたかもリジッドなアームとして使用し、ウィンチ機構も自動で動作させることで障害物回避などへ利用するために、マルチロータ UAV との通信を構築した。通信を介したセンシング手法や制御器の設計を行い、屋外環境にて検証実験を行った。以上により提案手法におけるロングリーチ空中マニピュレーションの有効性が検証できた。マルチロータ UAV をホバリングさせた状態にし、ワイヤ懸架ハンドをダクテットファンの駆動力でアクティブに動かす制御手法の確立は今後の課題として残る。これが実現できれば、マルチロータ UAV が作業対象の真上にアプローチしにくい場面での利用が期待できる。また、今後の展望としては、太陽光パネル検査を始めとする産業インフラ点検、水中探索、電線付近での枝打ち作業、災害救助などの場面への活用が期待できる。

## 参考文献

- [1] 春原久徳, 青山 祐介 “ドローンビジネス調査報告書,” 株式会社インプレス, pp.1-486, 2020.
- [2] F. Ruggiero, V.Lippiello, A.Ollero, “Aerial Manipulation: A Literature Review,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.3, no.3, pp.1957-1964, 2018.
- [3] X. Ding, P. Guo, K. Xu, Y. Yu, “A review of aerial manipulation of small-scale rotorcraft unmanned robotic systems,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol.32, no.1, pp.200-214, 2019.
- [4] J. Mendoza-Mendoza, V. J. Gonzalez-Villela, C. Aguilar-Ibanez, M. S. Suarez-Castanon, L. Fonseca-Ruiz, “Snake Aerial Manipulators: A Review,” *IEEE Access*, vol.8, pp.28222-28241, 2020.
- [5] Robert Ladig, Hannibal Paul, Ryo Miyazaki and Kazuhiro Shimonomura, “Aerial Manipulation using Multicopter UAV : A Review from the Aspect of Operating Space and Force,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.33, no.2, pp.196-204, 2021.
- [6] A.E Jimenez-Cano, J. Braga, G. Heredia and A. Ollero, “Aerial Manipulator for Structure Inspection by Contact from the Underside,” *In Proc. of 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp.1879-1884, 2015.
- [7] J. Thomas, G. Loianno, K. Daniilidis and V. Kumar, “Visual Servoing of Quadrotors for Perching by Hanging From Cylindrical Objects,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.1, no.1, pp.57-64, 2016.
- [8] Takahiro Ikeda, Shogo Yasui, Satoshi Minamiyama, Kenichi Ohara, Satoshi Ashizawa, Akihiko Ichikawa, Akihisa Okino, Takeo Oomichi, Toshio Fukuda,



“Stable impact and contact force control by UAV for inspection of floor slab of bridge,” *Advanced Robotics*, vol.32, no.19, pp.1061-1076, 2018.

- [9] Javier Molina Mendez and Shinichi Hirai, “Kinematic Analysis of a Novel Skew-gripper for Aerial Pruning Tasks,” *3rd Int. Conf. on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE 2017)*, pp.134- 138, 2017.
- [10] Varun Nayak, Christos Papachristos, and Kostas Alexis, “Design and control of an aerial manipulator for contact-based inspection,” *arXiv preprint arXiv:1804.03756*, 2018.
- [11] A. Ichikawa, Y. Abe, T. Ikeda, K. Ohara, J. Kishikawa, S. Ashizawa, T. Oomichi, A. Okino and T. Fukuda, “UAV with manipulator for bridge inspection - Hammering system for mounting to UAV,” *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp.775-780, 2017.
- [12] A.E Jimenez-Cano, G. Heredia, and A. Ollero, “Aerial manipulator with a compliant arm for bridge inspection,” *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp.1217-1222, 2017.
- [13] B.B. Kocer, T. Tjahjowidodo, M. Pratama, and G.G.L. Seet, “Inspection-while-flying: An autonomous contact-based nondestructive test using uav-tools,” *Automation in Construction*, vol.106, pp.102895, 2019.
- [14] S. Shimahara, R. Ladig, L. Suphachart, S. Hirai, and K. Shimonomura, “Aerial manipulation for the workspace above the airframe,” *In Proc. of 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.1453-1458, 2015.
- [15] Syohei Shimahara, Leewiwatwong Suphachart, Robert Ladig and Kazuhiro Shimonomura, “Aerial torsional manipulation employing multirotor flying robot,” *In Proc. of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.1595-1600, 2016.

- [16] Robert Oliver Ladig and Kazuhiro Shimonomura, “High precision marker based localization and movement on the ceiling employing an aerial robot with top mounted omni wheel drive system,” *In Proc. of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.3081-3086, 2016.
- [17] D.Mellinger, Q.Lindsey, M.Shomin and V.Kumar, “Design, Modeling, Estimation and Control for Aerial Grasping and Manipulation,” *In Proc. of 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2668-2673, 2011.
- [18] C.M. Korpela, T.W. Danko, P.Y. Oh, “MM-UAV: Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicle,” *J Intell Robot Syst*, vol.65, pp.93101, 2012.
- [19] N. Michael, J. Fink, and V. Kumar, “Cooperative manipulation and transportation with aerial robots,” *Autonomous Robots*, vol.30, pp.7386, 2011.
- [20] M. Bernard and K. Kondak, “Generic Slung Load Transportation System Using Small Size Helicopters,” *In Proc. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*, pp.3258-3264, 2009.
- [21] E.W. Hawkes, D.L. Christensen, E.V. Eason, M.A. Estrada, M.Heverly, E.Hilgemann, H.Jiang, M.T. Pope, A.Parness and M.R. Cutkosky, “Dynamic Surface Grasping with Directional Adhesion,” *In Proc. of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp.5487-5493, 2013.
- [22] P.E.I.Pounds, D.R.Bersak, and A.M.Dollar, “Grasping From the Air: Hovering Capture and Load Stability,” *In Proc. of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2491- 2498, 2011.
- [23] F.Huber, K.Kondak, K.Krieger, D.Sommer, M.Schwarzbach, M.Laiacker, I.Kosyik, S.Parusel, S.Haddadin and A.Albu-Schaffer, “First Analysis and Experiments in Aerial Manipulation Using Fully Actuated Redundant Robot Arm,” *In Proc. of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp.3452- 3457, 2013.

- [24] T.W. Danko, K.P. Chaney, and P.Y. Oh, “A parallel manipulator for mobile manipulating UAVs,” *IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*, pp.1-6, 2015.
- [25] R. Cano, C. P´erez, F. Pruano, A. Ollero, and G. Heredia, “Mechanical design of a 6-DOF aerial manipulator for assembling bar structures using UAVs,” *2nd RED-UAS 2013 Workshop on Research Education and Development of Unmanned Aerial Systems*, pp.1-7, 2014.
- [26] X. Meng, Y. He, F. Gu, L. Yang, B. Dai, Z. Liu, and J. Han, “Design and implementation of rotor aerial manipulator system,” *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp.673-678, 2016.
- [27] C.D. Bellicoso, L.R. Buonocore, V. Lippiello and B. Siciliano, “Design, modeling and control of a 5-DoF light-weight robot arm for aerial manipulation,” *Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pp.853-858, 2015.
- [28] D.Wuthier, D. Kominiak, C. Kanellakis, G. Andrikopoulos, M. Fumagalli, G. Schipper and G. Nikolakopoulos, “On the design, modeling and control of a novel compact aerial manipulator,” *Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pp.665-670, 2016.
- [29] K. Kondak, F. Huber, M. Schwarzbach, M. Laiacker, D. Sommer, M. Bejar, and A. Ollero, “Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 degrees of freedom industrial manipulator,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*, pp.2107-2112, 2014.
- [30] F. Ruggiero et al., “A multilayer control for multicopter UAVs equipped with a servo robot arm,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*, Seattle, WA, 2015, pp. 4014-4020.
- [31] S. Kim, H. Seo, S. Choi and H. J. Kim, “Vision-Guided Aerial Manipulation Using a Multicopter With a Robotic Arm,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1912-1923, Aug. 2016.

- [32] Y. Ohnishi, T. Takaki, T. Aoyama and I. Ishii, “Development of a 4-Joint 3-DOF robotic arm with anti-reaction force mechanism for a multicopter,” *In Proc. of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp.985-991, 2017.
- [33] M. Tognon et al. “A Truly-Redundant Aerial Manipulator System With Application to Push-and-Slide Inspection in Industrial Plants,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1846- 1851, April 2019.
- [34] A. Suarez, P. R. Soria, G. Heredia, B. C. Arrue and A. Ollero, “Anthropomorphic, compliant and lightweight dual arm system for aerial manipulation,” *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC, pp.992-997, 2017.
- [35] PRODRONE, PD6B-AW-ARM, <https://www.prodrone.com/jp/products/pd6b-aw-arm/> [accessed Sep. 20, 2020]
- [36] C. Korpela, M. Orsag and P. Oh, “Towards Valve Turning using a Dual-Arm Aerial Manipulator,” *In Proc. of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp.3411-3416, 2014.
- [37] P. Grau, A. Suarez, V.M. Vega, A. Rodriguez-Castaño, and A. Ollero, “Design of a High Performance Dual Arm Aerial Manipulator,” *Iberian Robotics Conference*, pp.730-741, 2017.
- [38] A. Suarez, A.E. Jimenez-Cano, V.M. Vega, G. Heredia, A. Rodriguez-Castaño, and A. Ollero, “Lightweight and human-size dual arm aerial manipulator,” *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp.1778-1784, 2017.
- [39] A. Suarez, G. Heredia, and A. Ollero, “Design of an anthropomorphic, compliant, and lightweight dual arm for aerial manipulation,” *IEEE Access*, vol.6, pp.29173-29189, 2018.

- [40] Hannibal Paul, Ryo Miyazaki, Robert Ladig, Kazuhiro Shimonomura, “Landing of a Multirotor Aerial Vehicle on an Uneven Surface Using Multiple On-board Manipulators,” *In Proc. of 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.1926-1933, 2019.
- [41] M. Fumagalli, R. Naldi, A. Macchelli, R. Carloni, S. Stramigioli and L. Marconi, “Modeling and Control of a Flying Robot for Contact Inspection,” *In Proc. of 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, pp.3532-3537, 2012.
- [42] T. Bartelds, A. Capra, S. Hamaza, S. Stramigioli and M. Fumagalli, “Compliant Aerial Manipulators: Toward a New Generation of Aerial Robotic Workers,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, no. 1, pp. 477-483, Jan. 2016.
- [43] H. W. Wopereis, J. J. Hoekstra, T. H. Post, G. A. Folkertsma, S.Stramigioli and M. Fumagalli, “Application of substantial and sustained force to vertical surfaces using a quadrotor,” *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Singapore, pp. 2704-2709, 2017.
- [44] S. Liu, W. Dong, Z. Ma and X. Sheng, “Adaptive Aerial Grasping and Perching With Dual Elasticity Combined Suction Cup,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 4766-4773, July 2020.
- [45] Dimos Tzoumanikas, Felix Graule, Qingyue Yan, Dhruv Shah, Marija Popovic and Stefan Leutenegger, “Aerial Manipulation Using Hybrid Force and Position NMPC Applied to Aerial Writing,” *In Robotics: Science and Systems*, July 2020.
- [46] J. Scholten, M. Fumagalli, S. Stramigioli and R. Carloni, “Interaction control of an UAV endowed with a manipulator,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.4910- 4915, 2013.
- [47] T. Ikeda, S. Yasui, M. Fujihara, K. Ohara, S. Ashizawa,A. Ichikawa, A. Okino, T. Oomichi, and T. Fukuda, “Wall contact by octo-rotor UAV with one DoF manipulator for bridge inspection,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.5122-5127, 2017.

- [48] M.J. Kim, K. Kondak, and C. Ott, “A stabilizing controller for regulation of uav with manipulator,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.3, no.3, pp.1719-1726, 2018.
- [49] A.Q. Keemink, M. Fumagalli, S. Stramigioli, and R. Carloni, “Mechanical design of a manipulation system for unmanned aerial vehicles,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*, pp.3147-3152, 2012.
- [50] M. Fumagalli, R. Naldi, A. Macchelli, F. Forte, A.Q. Keemink, S. Stramigioli, R. Carloni, and L. Marconi, “Developing an aerial manipulator prototype: Physical interaction with the environment,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol.21, no.3, pp.41-50, 2014.
- [51] A. Albers, S. Trautmann, T. Howard, T.A. Nguyen, M. Frietsch, and C. Sauter, “Semi-autonomous flying robot for physical interaction with environment,” *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp.441-446, 2010.
- [52] M. Fumagalli, S. Stramigioli, and R. Carloni, “Mechatronic design of a robotic manipulator for unmanned aerial vehicles,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.4843-4848, 2016.
- [53] <http://ardupilot.org/>, last visited 2021-8-8.
- [54] <https://github.com/pixhawk>, last visited 2021-8-8.
- [55] <https://github.com/PX4/Firmware>, last visited 2021-8-8.
- [56] Yi Lin, Fei Gao, Tong Qin, Wenliang Gao, Tianbo Liu, William Wu, Zhenfei Yang, and Shaojie Shen “Autonomous aerial navigation using monocular visual - inertial fusion,” *Journal of Field Robotics*, vol.35, no.1, pp.23-51, 2018.
- [57] Hannibal Paul, Koji Ono, Robert Ladig, Kazuhiro Shimonomura, “A Multirotor Platform Employing a Three-Axis Vertical Articulated Robotic Arm for Aerial Manipulation Tasks,” *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2018)*, pp.478 - 485, 2018.

- [58] R. Miyazaki, R. Jiang, H. Paul, K. Ono, and K. Shimonomura, “Airborne docking for multirotor aerial manipulation,” *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.4708-4714, 2018.
- [59] David Saldana, Parakh M. Gupta, and Vijay Kumar, “Design and Control of Aerial Modules for Inflight Self-Disassembly,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.4, no.4, pp.3410-3417, 2019.
- [60] Karan P. Jain and Mark W. Mueller, “Flying batteries: In-flight battery switching to increase multirotor flight time,” *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.3510-3516, 2020.
- [61] D.Yeo, E.Shrestha, and D.A.Paley, “An Empirical Model of Rotor-craft UAV Downwash Model for Disturbance Localization and Avoidance,” *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, no.AIAA2015-1685, 2015.
- [62] M. G. Müller, F. Steidle, M. J. Schuster, P. Lutz, M. Maier, S. Stoneman, T. Tomic, and W. Sturzl “Robust Visual-Inertial State Estimation with Multiple Odometries and Efficient Mapping on an MAV with Ultra-Wide FOV Stereo Vision,” *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.3701-3708,
- [63] J.M. Gomez-de-Gabriel, J.M. Gandarias, F.J. Perez-Maldonado, F.J. Garcia-Nunez, E.J. Fernandez-Garcia and A.J. Garcia-Cerezo, “Methods for Autonomous Wristband Placement with a Search-and-Rescue Aerial Manipulator,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.7838-7844, 2018.
- [64] A. Suarez, P. Sanchez-Cuevas, M. Fernandez, M. Perez, G. Heredia and A. Ollero, “Lightweight and Compliant Long Reach Aerial Manipulator for Inspection Operations,” *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.6746-6752, 2018.

- [65] A. Suarez, F. Real, V. M. Vega, G. Heredia, A. Rodriguez-Castano and A. Ollero, “Compliant Bimanual Aerial Manipulation: Standard and Long Reach Configurations,” *IEEE Access*, vol. 8, pp.88844-88865, 2020.
- [66] A. Caballero, P.J. Sanchez-Cuevas, M. Bejar, G. Heredia, M.A.Trujillo, and A. Ollero, “An Aerodynamic Extension for Motion Planning with Dynamics Awareness in Aerial Long-Reach Manipulators,” *International Journal of Aerospace Engineering*, vol.2020, Article ID 6348035, pp.1-17, 2020.
- [67] A. Caballero, M. Bejar, A. Rodriguez-Castano and A. Ollero, “Motion planning for long reach manipulation in aerial robotic systems with two arms,” *European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, pp.1-7, 2017.
- [68] Suk-Jun Kim, Dae-Young Lee, Gwang-Pil Jung, Kyu-Jin Cho, “An origami-inspired, self-locking robotic arm that can be folded flat,” *Science Robotics*, vol. 3, Issue 16, eaar2915, 2018.
- [69] E. C. Micale and C. Poli, “Dynamics of slung bodies utilizing a rotating wheel for stability,” *Journal of Aircraft*, vol. 10, pp. 760-763, 1973.
- [70] L. Feaster, C. Poli, and R. Kirchhoff, “Dynamics of a slung load,” *Journal of Aircraft*, vol. 14, pp. 115-121, 1977.
- [71] M. Bernard and K. Kondak, “Generic slung load transportation system using small size helicopters,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.3258-3264, 2009.
- [72] M. Bisgaard, A. la Cour-Harbo, and J. D. Bendtsen, “Adaptive control system for autonomous helicopter slung load operations,” *Control Engineering Practice*, vol. 18, no. 7, pp. 800-811, 2010.
- [73] P. Foehn, D. Falanga, N. Kuppuswamy, R. Tedrake, and D. Scaramuzza, “Fast trajectory optimization for agile quadrotor maneuvers with a cablesuspended payload,” *In Robotics: Science and Systems (RSS)*, 2017.



- [74] S. Tang, K. Sreenath, and V. Kumar, “Multi-robot trajectory generation for an aerial payload transport system,” *International Symposium on Robotics Research (ISRR)*, 2017.
- [75] J. Zeng , P. Kotaru, M.W. Mueller, and K. Sreenath, “Differential Flatness Based Path Planning With Direct Collocation on Hybrid Modes for a Quadrotor With a Cable-Suspended Payload,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.5, no.2, pp.3074-3081, 2020.
- [76] M. J. Kim, J. Lin, K. Kondak, D. Lee, and C. Ott, “Oscillation Damping Control of Pendulum-like Manipulation Platform using Moving Masses,” *IFAC-Papers OnLine*, vol.51, no.22, pp.465-470, 2018.
- [77] Y. S. Sarkisov, M. J. Kim, D. Bicego, D. Tsetserukou, C. Ott, A. Franchi, and K. Kondak, “Development of SAM: cable-Suspended Aerial Manipulator,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5323-5329, 2019.
- [78] J. Lee, R. Balachandran, Y.S. Sarkisov, M.D. Stefano, A. Coelho, K. Shinde, M.J. Kim, R. Triebel and K. Kondak, “Visual-Inertial Telepresence for Aerial Manipulation,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.1222-1229, 2020.
- [79] Y.S. Sarkisov, M.J. Kim, A. Coelho, D. Tsetserukou, C. Ott, and K. Kondak, “Optimal Oscillation Damping Control of cable-Suspended Aerial Manipulator with a Single IMU Sensor,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.5349-5355, 2020.
- [80] R.Miyazaki, R.Jiang, H.Paul, Y.Huang and K.Shimonomura, “Long-Reach Aerial Manipulation Employing Wire-Suspended Hand with Swing-Suppression Device,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.4, no.3, pp.3045- 3052, 2019.
- [81] Ryo Miyazaki,Hannibal Paul, Takamasa Kominami, and Kazuhiro Shimonomura, “Wire-Suspended Device Control Based on Wireless Communication with

- Multicopter for Long Reach-Aerial Manipulation,” *IEEE Access*, vol.8, pp.172096-172104, 2020.
- [82] Shigeo Kotake, Kazunori Yagi, and Tatsuya Takigami, “Application of sampled-data control by using vibration manipulation function to suppress residual vibration of travelling crane,” *In Proc. of Mechanical Engineering Journal*, vol.2, no.3, pp.15-33, 2015.
- [83] Kazunobu Yoshida, Hisashi Kawabe, Itaru Matsumoto and Toru Tsumugiwa, “Vibration Suppression Control for a Variable Length Pendulum system,” *In Proc. of The Institute of Systems*, vol.18, no.7, pp.243-254, 2005.
- [84] Yubin Miao, Fenglin Xu , Yanwei Hu, Jianping An, and Ming Zhang “Anti-swing control of the overhead crane system based on the harmony search radial basis function neural network algorithm,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol.11, no.3, pp.1-10, 2019.
- [85] Madgwick Sebastian, “An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays.” *Report x-io and University of Bristol (UK)*, pp. 113-118 25, 2010.
- [86] M.Tognon, A.Franchi, “Omnidirectional Aerial Vehicles With Unidirectional Thrusters: Theory, Optimal Design, and Control,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.3, no.3, pp.2277-2282, 2018.
- [87] S.Park, J.Lee, J.Ahn, M.Kim, J.Her, G.Yang, D.Lee, “ODAR: Aerial Manipulation Platform Enabling Omnidirectional Wrench Generation,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.23, no.4, pp.1907-1918, 2018.
- [88] A.Oosedo, S.Abiko, S.Narasaki, A.Kuno, A.Konno, M.Uchiyama, “Large attitude change flight of a quad tilt rotor unmanned aerial vehicle,” *Advanced Robotics*, vol.30, no.5, pp.326-337, 2016.
- [89] M.Allenspach, K.Bodie, M.Brunner, L.Rinsoz, Z.Taylor, M.Kamel, R.Siegwart, J.Nieto, “Design and optimal control of a tiltrotor micro-aerial vehicle for effi-

cient omnidirectional flight,” *International Journal of Robotics Research (IJRR)*, vol.39, no.10-11, pp.1305-1325, 2020.

- [90] M.Zhao, T.Anzai, F.Shi, X.Chen, K.Okada, M.Inaba, “Design, Modeling, and Control of an Aerial Robot DRAGON: A Dual-Rotor-Embedded Multilink Robot With the Ability of Multi-Degree-of-Freedom Aerial Transformation,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.3, no.2, pp.1176-1183, 2018.
- [91] M.Zhao, F.Shi, T.Anzai, K.Okada, M.Inaba, “Online Motion Planning for Deforming Maneuvering and Manipulation by Multilinked Aerial Robot Based on Differential Kinematics,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol.5, no.2, pp.1602-1609, 2020.
- [92] S.Park, Y.Lee, J.Heo, D.Lee, “Pose and Posture Estimation of Aerial Skeleton Systems for Outdoor Flying,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*, pp.704-710, 2019.
- [93] R.Miyazaki, H.Paul and K.Shimonomura, “Development of Add-On Planar Translational Driving System for Aerial Manipulation with Multirotor Platform,” *Applied Sciences*, vol.11, no.4, pp.1-14, 2021.

## 謝辞

本研究を進めるにあたり終始あたたかいご指導と激励を賜りました立命館大学工学部下ノ村和弘教授に心から感謝の意を表します。学部時代から大変お世話になっており、時に応じて、失敗を繰り返し、全く成果が出なかった時もやさしく励ましてくださったことを通じて、私自身の至らなさを実感することができたのは今後の努力の糧になるものであります。深くお礼を申し上げます。

立命館大学工学部ロボティクス学科平井慎一教授には、合同ゼミにて大変お世話になりました。本研究について丁寧なアドバイスを頂き、研究をより発展させることができました。また本論文の作成にあたり、副査を引き受けてくださいました。深く感謝の意を表します。

立命館大学工学部ロボティクス学科玄相昊教授には、本論文をまとめるにあたり、副査を引き受けてくださいました。先生には様々な角度からのご質問、また研究内容や発表方法など大変多くのアドバイスを頂きました。深く感謝の意を表します。

立命館大学工学部川村貞夫教授、馬書根教授には研究あるいは授業科目に関して多大なるご指導をいただきました。深く感謝いたします。

立命館大学総合科学技術研究機構王忠奎准教授、立命館大学工学部ソフトロボティクス研究室松野孝博先生には、合同ゼミにて大変お世話になりました。また、研究に向かう姿勢や進め方について親身になって相談にのっていただきました。深くお礼を申し上げます。

立命館大学からは博士課程後期課程研究奨励奨学金を2019年度、2020年度、2021年度にA給付を採択して頂きました。立命館大学の皆様に深く感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり開発や実験に協力してくださったHannibal Paul氏、Jiang Rui氏、小南貴雅氏、Huang Yanzhao氏、小野晃嗣氏、Zhang Borui氏、Wang Yuyan氏に感謝いたします。また、先輩、同僚として数々の助言と暖かい励ましを頂いたLadig, Robert Oliver先生、野津健太郎氏、Ricardo Rosales Martinez氏、Borwonpob

Sumetheeprasit 氏に感謝致します。秘書の菅原裕美子氏には各種申請で何度もお世話になりました。これまで共に励まし会い、助け合ったセンサ知能統合研究室の皆様に感謝いたします。

最後に、これまで私を暖かく応援してくれた母英愛、私を明るく励まし続けた妻利佳に心から感謝します。

本研究の一部は、科学技術振興機構事業研究成果最適展開支援プログラム A-STEP トライアウト (No JPMJTM20PG) の支援を受けました。