博士論文

クワッドロータのための
キノダイナミック動作計画

平成 27 年 3 月

本仲 君子

岡山大学大学院

自然科学研究科

論文概要

本論文は運動学的な拘束と動力学的な拘束を同時に解くキノダイナミック動作計画をクワッドロータの制御に実装するための方策を提案する．移動ロボットを実際の環境で制御する場合，大きく分けて２つの拘束が存在する．１つは，運動学的な拘束であり，ロボットの形状や位置・速度に関わる拘束である．運動学的な拘束ではロボットの形状や速度のみが考慮されており，この拘束を解くことで理想の振る舞いが算出される．もう１つは，動力学的な拘束であり，ロボットの力・加速度に関わる拘束である．動力学的な拘束では実際にロボットを動作させる場合に生じる慣性力や加速度についても考慮されるため，この拘束を解くことで実環境における動作を算出することができる．従来の動作計画では，経路計画などを用いて運動学的な拘束を解いた後に，その結果に沿うような制御入力を設計することで動力学的な拘束を解くのが一般的であった．

ここで，キノダイナミック動作計画という概念がある．キノダイナミック動作計画では動作計画に必要な運動学と動力学を同時に考慮し，1 ステップで制御入力を決定することを目指している．キノダイナミック動作計画には一度システムを設計すれば従来の手法よりも単純に制御入力を決定できるという利点がある．このため，現在多くのキノダイナミック動作計画手法が提案されている．その中でも，本研究では HPF（Harmonic Potential Field）を用いたキノダイナミック動作計画を用いる．HPF を用いたキノダイナミック動作計画では，環境全体のポテンシャルフィールドとその勾配を予め生成しておくことで，機体の現在位置における勾配を参照するだけで障害物を避けながら目標点へ向かうための制御入力をリアルタイムで柔軟に生成できるという利点がある．　HPF は停留点のない滑らかなポテンシャルフィールドであり，この勾配を用いると運動学的な軌道はフィールド内のどこからでも指定した目標点へ到達できることが保証されているため，経路計画に多く用いられている．質点を想定した場合の HPF に基づくキノダイナミック動作計画については Masoud によって既に提案されており，HPF の勾配をキノダイナミック動作計画に用いる場合には，制御入力に目標点方向の勾配を付加するとともに，制動力を用いて勾配方向を逸脱しないよう制御する必要があることが報告されている．このとき，制動力に粘性制動力を用いるのが最も簡単な手法であるが，粘性制動力を用いた場合，制御対象を常に低速で移動させることとなる．そこで，粘性制動力に代わる制動力として NADF（Nonlinear Anisotropic Damping Forces）が提案されている．NADF は HPF の勾配方向を考慮し，制御対象が勾配方から逸脱した場合にのみ減速する．また，目標点付近において生じるオーバーシュートや振動を抑制するために，制御対象の位置と速度方向を確認して目標点へ確実に収束させるクランピング制御を用いることも提案されている．ただし，これらの手法は全て質点の制御においてのみその有効性が確認されており，現実的な制御対象への実装については述べられていない．

本研究の最終目的は HPF に基づくキノダイナミック動作計画をクワッドロータ

の制御に適用し，3 次元空間内において指定した任意の位置まで障害物を避けながら自律飛行を行わせることである．そのために，まずは質点を想定して設計された従来のキノダイナミック制御器をクワッドロータを想定した制御器に拡張する．クワッドロータのためのキノダイナミック動作計画は，クワッドロータの姿勢を保つための非ホロノミック制御入力に HPF の勾配から生成する制御入力と制動力とを合成することによって実現する．この拡張した制御器には複数のゲインが含まれており，各ゲインがお互いに干渉しあっているため手動で調整するのが困難であることが予想される．そこで GA (Genetic Algorithm) を用いてゲインの最適化を試み，ゲインの調整によって制御性能が向上することを示す．また，従来の HPF に基づくキノダイナミック動作計画は X-Y 平面上における移動のみを扱っていることから，実環境における移動を想定した場合，空間内を 3 次元的に移動できることが望ましい．そこで 2 次元平面上に生成した HPF を切り替えて用いることで目標点へ移動する手法と，機体の現在位置を含む X-Y，Y-Z，X-Z の 3 つの平面上に生成した HPF を合成することで 3 次元的な誘導を可能にする手法とを考案し，それらの有用性をシミュレーション実験を通して実証する．さらに，提案した制御入力を実機に実装し，その有効性を検証する．

本研究の意義は，キノダイナミック動作計画による実在する自律移動ロボットの制御の実現にある．この実現により，サービスロボットなど自律移動を求められるロボットの動作計画に多大な影響を与えると考えられる．事実，本動作計画の適用により，ロボットは任意の目的地を指示されるだけで障害物を避けながら目的地まで安全に移動することが可能となる．また，本稿においてはクワッドロータを想定して制御入力を拡張したが，姿勢を維持するための動力学モデルに HPF に基づく勾配を基にした制御入力を追加することで，他の制御対象にも適用できると考えられる．以上から，クワッドロータに限らず様々な移動機構を持つロボットの自律移動計画の簡便化に本研究が貢献する可能性がある．

本論文は全 7 章で構成した．まず第 1 章において本研究の背景について関連研究の紹介を含めて説明し，自律飛行ロボットおよびキノダイナミック動作計画の実状について述べた．第 2 章では，本研究において拡張する手法の基礎となる基本的な形式のキノダイナミック動作計画について説明した．ここでは，HPF の生成方法，物体の慣性力による影響を抑えるために付加する 2 種類の制動力，および目標点付近に収束させるために付加するクランピング制御を紹介し，HPF の勾配に粘性制動力のみを付加した制御入力，NADF と呼ばれる制動力を適用した制御入力，および NADF とクランピング制御を適用した制御入力についてそれぞれ説明した．更に，説明した手法を用いることで質点を初期位置から目標位置まで誘導可能であることをシミュレーション上で確認した．このとき，3 種類の制御器を運動学的な軌道との誤差と目標位置への到達時間の観点から比較して考察を行い，NADF を用いた制御器は粘性制動力を用いた制御器と比較して素早く制御対象を目標位置まで誘導できること，また，クランピング制御を用いることで目標位置到達後のオーバーシュートを抑制できることを確認した．

第3章では，第2章において述べた基礎となる制御器を拡張し，より複雑な動力学モデルを持つクワッドロータの制御への適用を行った．ここでは，クワッドロータの概要，クワッドロータの動力学モデルの導出，クワッドロータのダイナミクスを考慮し姿勢制御を行うための非ホロノミック制御入力について述べ，上述した3種類の制御器をクワッドロータを想定して拡張する場合の制御式について解説した．また，拡張した3種類の制御器を用いてシミュレーション上でクワッドロータの制御を行い，質点の場合と同様にクワッドロータを初期位置から目標位置まで誘導可能であることを確認した．同時に，質点の制御において有用であったNADFとクランピング制御が有効であることも確認した．

これらの制御器には複数のゲインが含まれているため，第4章では遺伝的アルゴリズム(GA)を用いてゲインの最適化を行った．本稿では，クワッドロータの飛行シミュレーションにより有用性が実証されたNADFとクランピング制御を用いた制御器に含まれるゲインの最適化を行った．このとき，GAを用いたゲイン最適化の手法とゲインの評価基準について説明した後，実際にGAにより選択されたゲインの値を示し，選択されたゲインを用いることで手動調整したゲインを用いた場合に比べてクワッドロータをより理想的な軌道に沿って誘導できることをシミュレーション上で確認した．

ここまでの手法はX-Y平面上に生成したHPFのみを用いた2次元平面上における制御を前提としていた．そこで第5章では，より現実的な3次元空間における誘導を想定し，提案した制御器を拡張する．このとき，2次元平面上に生成したHPFを複数組み合わせて用いることでクワッドロータを3次元的に誘導する手法を2種類提案した．1つ目はX-Y，Y-Z，X-Zの3つの平面上に生成したHPFを切り替えながら移動する手法，2つ目は3つのHPFを合成して用いる手法である．ここでは，X，YおよびZ方向に移動するための制御入力について述べ，その後2種類の誘導手法についてそれぞれ説明した．更に，各手法を用いた場合のクワッドロータの飛行シミュレーションを行い，制御性能を比較した．その結果，HPFを合成して用いる手法の方がより制御対象を効率的な経路で誘導できることが確認された．

第6章では提案した手法の実機への適用を行った．実機にはParrot社の開発したAR.Droneを用い，基本となる姿勢制御器にHPFの勾配に基づく制御を施すことで初期位置から目標位置への誘導が可能となることを確認した．ただし，機体の位置の計測には，ステレオカメラを用いた3次元位置計測システムを利用した．最後に第7章では，各章で述べた内容を総括し，本論文のまとめを行った．

目 次

図 目 次

表 目 次

第1章　序論

本章では，本研究の背景として自律飛行ロボット，キノダイナミック動作計画に関する研究動向について述べ，それぞれの分野の関連研究を紹介し本論文の位置づけおよび研究目的について述べる．

1.1　研究背景

現在，人の生活する環境で活躍するロボットの開発が期待されている．楠田の報告[(1)]によると，ロボット産業において今後の発展の方向はサービスロボットにあるとされ，特に生活環境内で人と共生するサービス分野への期待が高まっていると述べられている．しかし同時に自律的に動作し人と共生するサービスロボットの現状開発においては，自律化，知能化，環境への対応，移動，人とのコミュニケーションといった様々な問題点がある．これらの問題点は，図 1.1 に示されるように充分に研究された産業用ロボットの技術をベースとして徐々に解決が試みられている．例えば，自動で掃除を行う iROBOT 社の “Roomba”[(2)] や SoftBank 社の “pepper”[(3)]，HONDA 社の “ASIMO”[(4)] などが有名である．この中でも，本研究ではロボットの自律性，特に人の生活環境におけるロボットの自律移動を目指している．本研究における自律移動とは，人間がロボットに任意の目標位置を与えるだけでロボットは指定された位置まで環境内に存在する障害物を自動で避け，自身の姿勢を保ちながら移動することを指す．

人の生活する環境は物体の移動が激しい “動的な環境” である．動的な環境においてロボットが自律移動するには，動作計画を通して環境やロボットの状態を考慮した適切な制御入力をロボットに与える必要がある．移動ロボットを実際の環境で制御する場合，大きく分けて２つの拘束が存在する．１つは，運動学的な拘束であり，ロボットの形状や位置・速度に関わる拘束である．運動学的な拘束ではロボットの形状や速度のみが考慮されており，この拘束を解くことで理想の振る舞いが算出される．もう１つは，動力学的な拘束であり，ロボットの力・加速度に関わる拘束である．動力学的な拘束では実際にロボットを動作させる場合に生じる慣性力や加速度についても考慮されるため，この拘束を解くことで実環境における動作を算出することができる．従来の動作計画では，経路計画などを用いて運動学的な拘束を解いた後に，その結果に沿うような制御入力を設計することで動力学的な拘束を解くのが一般的であった[(5)–(13)]．

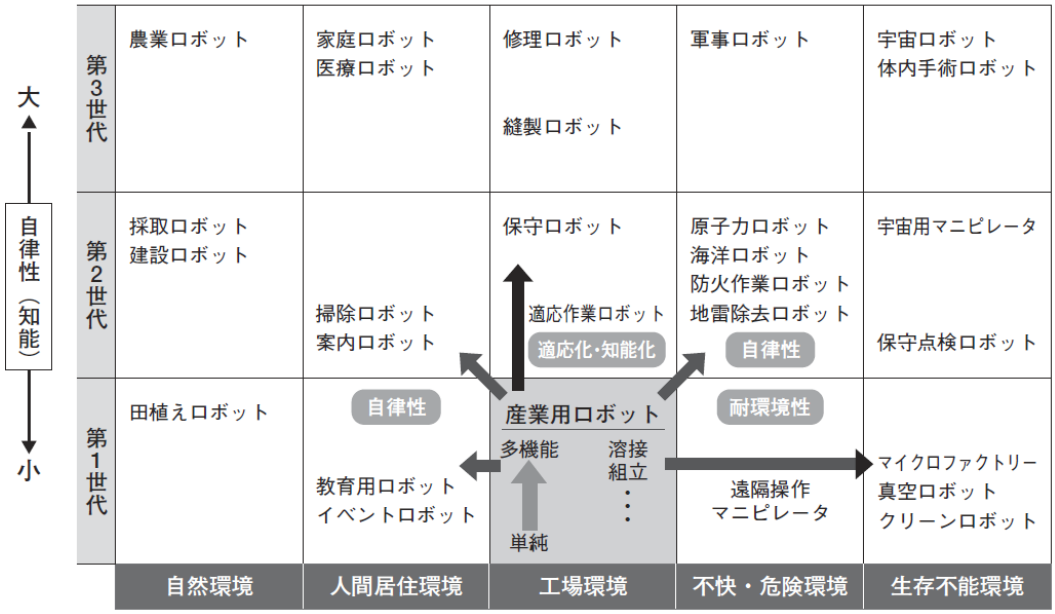


Fig. 1.1: Correlation chart of techniques[1]

一方，1993 年に“キノダイナミック動作計画”という新しい観点を持った動作計画手法が提案された[14]．キノダイナミック動作計画という言葉に含まれる“キノダイナミクス”という単語は，運動学 (kinematics) と動力学 (dynamics) を組み合わせて作られた造語であり，運動学と動力学を同時に扱う分野のことを指す．キノダイナミック動作計画では運動学と動力学を同時に考慮するため，運動学を解いた後に動力学を解くという手順を短縮することが可能である．1993 年に提案された時点においてキノダイナミック動作計画は質点の制御を行うのみであったが，キノダイナミック動作計画は従来手法に比べて単純に運動学と動力学を考慮した制御入力を生成することができる利点があるため，様々な制御対象への適用が試みられた[15]–[18]．本稿では特に飛行ロボットであるクワッドロータへのキノダイナミック動作計画への適用について述べる．

1.1.1 自律飛行ロボット

近年，自律飛行ロボットは非常に注目されているテーマであり，その用途は多岐に渡っている[19]–[21]．空中を移動する飛行ロボットは，地上を移動するロボットに比べ，3 次元的な移動が可能，高い位置からの観測により広域の情報を取得可能，地上を移動する人間の移動や作業の妨げにならないといった利点がある．飛行ロボットの用途は屋外用と屋内用とに大きく別れており，各用途に応じて異なる特徴を持っている．屋外用の飛行ロボットは長距離飛行や外乱に対応するため

Fig. 1.2: An autonomous unmanned helicopter “RMAX TypeIIG” developed by YAMAHA[22]

Fig. 1.3: An unmanned aerial vehicle “RQ-4 Global Hawk” developed by NORTHROP GRUMMAN[23]

Fig. 1.4: A bird-like robot “SmartBird” developed by FESTO[24]

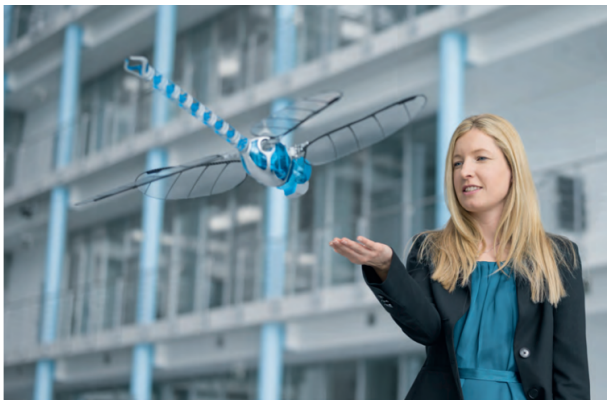


Fig. 1.5: A dragonfly-like robot “BionicOpter” developed by FESTO[25]

Fig. 1.6: A quadrotor to carry products “Amazon Prime Air” developed by Amazon[44]

に大型なものが多く，人を乗せることができるものや荷物を運搬できるものなどがある．これらのロボットは固定翼や大型のプロペラ，エンベロープなどを搭載していることが多い．代表的なものには，YAMAHA の開発した産業用無人ヘリコプター “RMAX TypeIIG” (図 1.2) やアメリカの NORTHROP GRUMMAN 社が開発した無人航空機 “RQ-4 Global Hawk” (図 1.3) などがある．また，FESTO 社の開発した鳥や昆虫を模した “SmartBird” (図 1.4) や “BionicOpter” (図 1.5) なども知られている．

一方で屋内用の飛行ロボットは小型・軽量であることが多く，建物内における点検・監視やガイド，エンターテイメントなどに用いられることが多い[26]–[31]．屋内用の飛行ロボットはサイズも小さく安価に製作できるため，自律飛行を目指した研究も多く行われている[32]–[37]．中でも，機体に搭載された 4 つのプロペラを用いて飛行するクワッドロータがその機動性の高さから空撮やレスキューなどの用途を目的とした研究対象として近年非常に注目を集めている[38]–[43]．クワッドロータはその用途や目的に合わせて様々な機関において開発が進められている．例として，Amazon が開発した荷物運搬用のクワッドロータ “Amazon Prime Air” (図 1.6) や，ホビー用に Parrot が開発した “AR.Drone 2.0” (図 1.7) などがあげられる．

Fig. 1.7: A hobby quadrotor “AR.Drone 2.0” developed by Parrot[45]

クワッドロータの自律移動を目的とした研究は多くなされているが[46][47][48][49]，キノダイナミック動作計画のクワッドロータへの実装例はない．

1.1.2　キノダイナミック動作計画

キノダイナミック動作計画は1993年にDonaldら[14]によって提案されたが，当初のキノダイナミック動作計画は概念を提案したものであり，実際の制御対象を想定したものではなかった．キノダイナミック動作計画では，制御対象の現在の状態から運動学的な拘束と動力学的な拘束を同時に解くことで制御入力を生成することを目的としている．キノダイナミック動作計画は運動学と動力学を同時に考慮するため1ステップで制御入力を決定することができ，一度システムを設計すれば従来の手法よりも単純に制御入力を決定できるという利点がある．このため，現在多くのキノダイナミック動作計画手法が提案されている．例えば，“ランダムキノダイナミック計画”がDavidらによって提案されている[50]．この手法では，ロボットの動力学を考慮したランダム探索を行うことにより目標点までの経路を決定する．このとき，状態空間への変換を用いることでロボットの速度や形状についても同時に考慮されているため，探索された経路は無理の生じない自然な経路であり，想定したロボットは生成された経路を必ず辿ることが可能である．この手法は車輪タイプの移動ロボットやロボットハンドなどに適用され，その有用性が確認されている[51][52][53][54]．また，複数のロボットが協調移動する際にそれぞれのキノダイナミック動作計画と最適制御を組み合わせることで互いに衝突しない現実的な軌道を生成する手法もJufengら[55]によって提案されている．

これらの手法では，事前にロボットの形状を考慮して動作計画を行うことにより目標位置まで移動可能な制御入力を生成している．しかし，あらかじめ目標位置までの制御入力を全て決定してから移動する場合，モデル化誤差や実環境における外乱の影響により機体の軌道にずれが生じた際に，以降の制御入力を補正することが困難であると考えられる．ここで，キノダイナミック動作計画の1つとしてHPF（Harmonic Potential Field）を用いた手法がある．HPFは停留点のない滑らかなポテンシャルフィールドであり，この勾配を用いると運動学的な軌道はフィール

ド内のどこからでも指定した目標点へ到達できることが保証されており[56][57][58]，経路計画に多く用いられている[59][60][61]．よって，このHPFを用いた動作計画が1980年代半ば頃から多く提案されている[62]–[69]．また，Masoudら[71]–[74]はHPFを障害物回避や制御対象の移動方向の拘束に用いることも可能であると述べている．HPFを用いたキノダイナミック動作計画では，環境全体のポテンシャルフィールドとその勾配を予め生成しておくことで，機体の現在位置における勾配を参照するだけで障害物を避けながら目標点へ向かうための制御入力をリアルタイムで柔軟に生成することができるという利点がある．

キノダイナミック動作計画にHPFの勾配を用いる場合には，勾配ベクトルを機体の姿勢を維持するための制御入力に付加するとともに，制動力を用いて常に勾配方向を逸脱しないよう制御する必要がある．このとき，制動力に粘性制動力を用いるのが最も簡単な手法であるが，粘性制動力を用いた場合，制御対象を常に低速で移動させることとなる[70]．そこで，Masoud[75][76]は粘性制動力に変わる制動力としてNADF（Nonliner Anisotropic Damping Forces）を提案した．NADFはHPFの勾配方向を考慮し，制御対象が勾配方向から逸脱した場合にのみ減速させる．同時に，Masoud[77]は目標点付近において生じるオーバーシュートや振動を抑制するためのクランピング制御についても提案し，質点の制御においてこれらの提案が有用であることを確認した．しかしながら，この手法の現実的な制御対象への実装については述べられていない．

1.1.3　研究目的

本研究の最終目的はHPFに基づくキノダイナミック動作計画をクワッドロータの制御に適用し，3次元空間内において指定した任意の位置まで障害物を避けながら自律飛行を行わせることである．そのために，まずは質点を想定して設計された従来のキノダイナミック制御器をクワッドロータを想定した制御器に拡張する．クワッドロータのためのキノダイナミック動作計画は，クワッドロータの姿勢を保つための非ホロノミック制御入力にHPFの勾配から生成する制御入力と制動力とを合成することによって実現する．制御入力の概要図を図1.8に示す．ここで，拡張する制御器には複数のゲインが含まれており，各ゲインがお互いに干渉しあっているため手動で調整するのが困難であることが予想される．そこでGA (Genetic Algorithm) を用いてゲインの最適化を試み，ゲインの調整によって制御性能が向上することを示す．

また，Masoudらの提案したキノダイナミック動作計画はX-Y平面上における移動のみを扱っていた．しかしながら，実環境における移動を想定した場合，空間内を3次元的に移動できることが望ましい．そこで2次元平面上に生成したHPFを切り替えて用いることで目標点へ移動する手法と，機体の現在位置を含むX-Y，Y-Z，X-Zの3つの平面上に生成したHPFを合成することで3次元的な誘導を可能

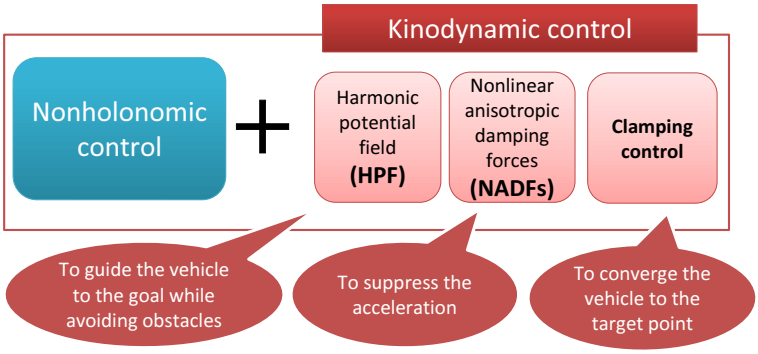


Fig. 1.8: Control input for kinodynamic motion planning for a quadrotor

にする手法とを考案し，それらの有用性をシミュレーション実験を通して実証する．さらに，提案した制御器を実機に実装し，その有効性を検証する．

1.2　本論文の構成

本論文は全 7 章で構成されており，各章の内容は次の通りである．まず第 1 章において本研究の背景について述べた後に，自律飛行ロボットおよびキノダイナミック動作計画の現状について説明する．また，本研究の目的と本論文の構成について述べる．

第 2 章では本研究の基礎となる，質点を想定した HPF に基づく基本的な形式のキノダイナミック動作計画について述べる．ここで，HPF の生成方法，およびキノダイナミック動作計画に用いられる制動力について説明する．このとき，HPF に粘性制動力のみを付加した制御入力，NADF と呼ばれる制動力をを適用した制御入力，および NADF とクランピング制御を適用した制御入力についてそれぞれ述べる．また，HPF に基づくキノダイナミック動作計画を用いることで質点を任意の初期位置から任意の目標位置まで誘導できることをシミュレーション上で確認すると同時に，上述した 3 つの制御入力を運動学的な軌道との誤差と到達時間の観点から比較する．

第 3 章では，HPF に基づくキノダイナミック動作計画を拡張することでクワッドロータに適用可能であることを示す．まず，クワッドロータの概要，クワッドロータの動力学モデルの導出，キノダイナミック動作計画の拡張，およびクワッドロータを想定して拡張した制御器を用いた数値シミュレーションについて述べる．数値シミュレーションでは，3 種類の制御器を比較し，クワッドロータを制御する場合においても NADF およびクランピング制御が有用であることを主張する．

第 4 章では提案した制御器に含まれるゲインの遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた最適化について述べる．GA を用いたゲイン最適化の手法について説明した後に，最適化の結果について述べる．GA により選択されたゲインの妥当性について

飛行シミュレーションを通して確認する．更に，GA による最適化を行う際に使用した学習環境と異なる環境においても飛行シミュレーションを行い，学習環境以外でもクワッドロータを任意の目標位置まで誘導可能であることも確認する．

第 5 章では，2 次元平面上に生成した HPF を複数組み合わせて用いることでクワッドロータを 3 次元的に誘導する手法について 2 種類提案する．まず，X-Y 平面上を移動するための制御入力，Z 方向に移動するための制御入力について述べ，その後 3 つの HPF を切り替えて用いる手法，合成して用いる手法についてそれぞれ説明する．また，各手法を用いた場合のクワッドロータの飛行シミュレーションを行い，その有用性を検証する．

第 6 章では，提案したキノダイナミック動作計画の実機への適用について述べる．実機には Parrot 社の開発した Ar.Drone を用い，HPF の勾配に基づく制御入力を用いることで初期位置から目標位置への誘導が可能となることを確認する．その際に，機体の位置を計測するための手法としてステレオカメラを用いた 3 次元位置計測システムを用いる．本章では，AR.Drone の仕様，ステレオカメラを用いた位置計測の概要，AR.Drone を用いた飛行実験について述べる．

最後に第 7 章では各章で述べた内容を総括し，本論文のまとめを行う．

第2章　HPFに基づくキノダイナミック動作計画の概要

2.1　本章の概要

本章では，質点を制御対象として想定した場合のHPFに基づくキノダイナミック動作計画の概要について述べ，HPFの生成方法，およびキノダイナミック動作計画に用いられる制動力について説明する．このとき，HPFに粘性制動力のみを付加した制御入力，NADFと呼ばれる制動力を適用した制御入力，およびNADFとクランピング制御を適用した制御入力についてそれぞれ述べる．また，HPFに基づくキノダイナミック動作計画を用いることで質点を任意の初期位置から任意の目標位置まで誘導できることをシミュレーション上で確認すると同時に，上述した３つの制御入力を運動学的な軌道との誤差と到達時間の観点から比較する．

2.2　ハーモニックポテンシャルフィールド（HPF）

環境内に存在する制御対象を目標点まで自律的に移動させる際に移動経路を決定するための手法として，“ハーモニックポテンシャルフィールド（HPF）”というポテンシャルフィールドの勾配を用いた動作計画がある．HPFは停留点を持たないなめらかなポテンシャルフィールドであり，その勾配を用いた運動学的な軌道は確実に目標点へ到達できることが保証されている．よって，HPFの勾配に沿って移動することができれば，制御対象は確実に目標点へ到達可能である．HPFに基づく動作計画では，制御対象が移動する環境の境界情報からHPFを生成し，生成したHPFの勾配ベクトルを制御入力として与えることで制御対象を誘導する．以下にHPFの生成手法とHPFの勾配を用いた制御について述べる．

2.2.1　HPFの生成手法

HPFを生成するために，まず環境を任意に指定した大きさの格子状に分割して各格子点(i, j)におけるポテンシャルを計算する．初期状態として，障害物の境界のポテンシャルを1，目標点のポテンシャルを0に設定しておく．HPFの生成には

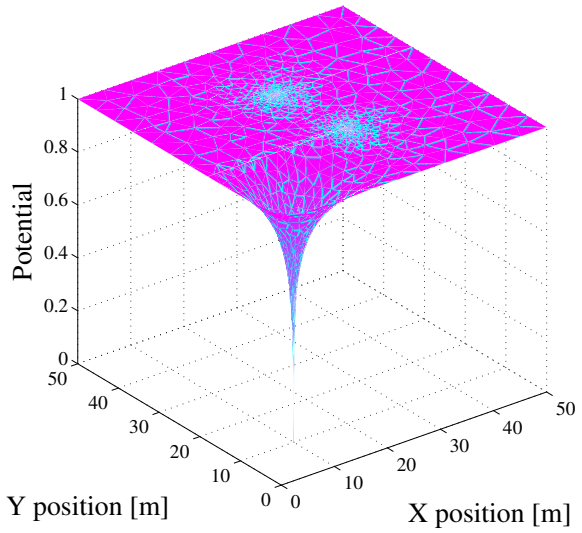


Fig. 2.1: Example of Harmonic Potential Field

以下の式を用いる．

$$U_{(i,j)} = \frac{1}{4}(U_{(i,j-1)} + U_{(i,j+1)} + U_{(i-1,j)} + U_{(i+1,j)}) \tag{2.1}$$

ただし，$U_{(i,j)}$ はフィールド上の位置 (i, j) にある格子のポテンシャルの値とする．式 (2.1) では，各格子の周囲 4 近傍にある格子のポテンシャルの平均が中心にある格子のポテンシャルとして保存されるため，計算を繰り返すことでなめらかなフィールドが生成される．

例として，2 つの壁が障害物として存在する環境におけるポテンシャルの値をグラフに出力した例を図 2.1 に示す．図 2.1 において，ポテンシャルが 0 に沈み込んでいる場所が目標点として設定した位置である．この HPF を用いて各位置の勾配を算出するが，このままでは目標点付近以外の領域はほとんど勾配がなく平坦であるため，格子のサイズを基準として正規化された勾配ベクトルを求める．図 2.2 は図 2.1 の HPF から求められた勾配ベクトルを示している．図中に円で示されている部分は目標点として設定されている位置である．図 2.2 の勾配ベクトルを用いることで，環境内のどの位置を始点としても障害物を避け目標点に辿り着くことができる．

位置 $\boldsymbol{x} = [x\ y]^{\mathrm{T}}$ におけるポテンシャルの値を $V(\boldsymbol{x})$ とすると，$\boldsymbol{x}$ における HPF の表面 (ポテンシャル面) 上の勾配は $-\nabla V(\boldsymbol{x})$ と表される．この勾配を用いると，以下の式により運動学的な軌道を生成できる．

$$\dot{\boldsymbol{x}} = -\nabla V(\boldsymbol{x}) \tag{2.2}$$

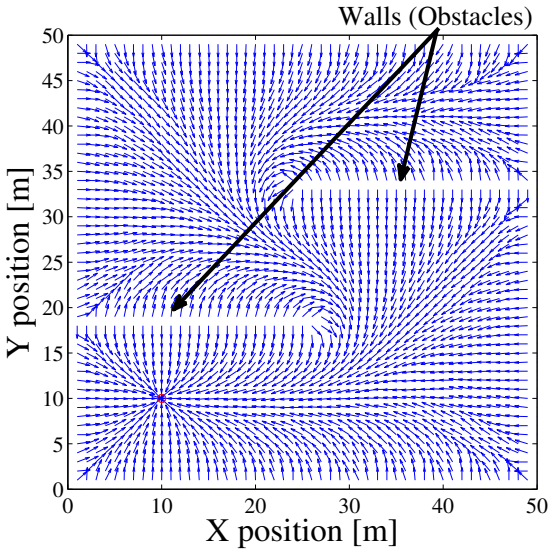


Fig. 2.2: Normalized gradient field

例として式 (2.2) を用い，図 2.2 の環境において設定した 4 か所の初期位置から生成した目標点までの軌道を図 2.3 に示す．図中の A(40, 40)，B(5, 25)，C(45, 30)，D(45, 10) が初期位置として設定した直交座標系 X-Y での点の (x, y) 座標であり，T(10, 10) が目標点の座標である．図 2.3 より，HPF の勾配を用いて環境内の各点から障害物を避け目標点へ到達する経路を生成できることが確認できる．

2.2.2 HPF の勾配に基づく質点の制御

質量を持つ物体を速度変化を伴う条件下で動かす際には，物体の質量，慣性や外力の影響を含む動力学を考慮した制御が必要となる．そこで 1 [kg] の質点が HPF から生成した軌道を追従するための制御を考える．Rimon ら [17] は HPF の勾配を，速度に線形比例する粘性制動力を用いて増幅し，制御に適用する手法を提案した．このとき，制御入力 $\boldsymbol{u}$ は以下のようになる．

$$\boldsymbol{u} = -b_{\mathrm{c}} \cdot \dot{\boldsymbol{x}} - \nabla V(\boldsymbol{x}) \tag{2.3}$$

ただし，b_{c} は正のゲイン定数であり，粘性係数に対応するものである．

式 (2.3) では，現在位置での勾配 $-\nabla V(\boldsymbol{x})$ を入力に与えると同時に，速度に比例した粘性制動力 $-b_{\mathrm{c}} \cdot \dot{\boldsymbol{x}}$ を発生させている．この粘性制動力は，粘性係数の値が増加するほど，また，制御対象の速度が上がるほど増幅し質点の加速を抑制する．

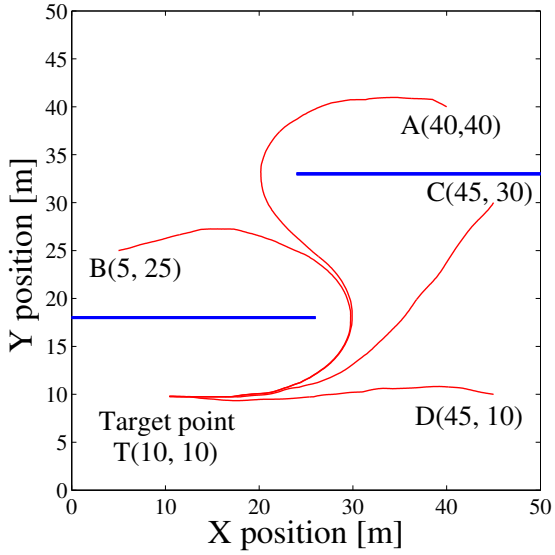


Fig. 2.3: Paths generated by using the gradient of HPF

2.3 NADF とクランピング制御

2.3.1 NADF

前述した HPF の勾配に基づく制御では，HPF のポテンシャルをそのまま用いているため，外力による影響に弱いなどの欠点がある．そこで Masoud らは HPF の勾配と NADF とを組み合わせて用いることで目標点方向へ働く力以外を打ち消し，外力の影響を受けない制御手法を提案した．以下の式は Masoud らによって提案された制御入力である．

$$\boldsymbol{u} = -b_{\mathrm{d}} \cdot \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - k_{\mathrm{v}} \cdot \nabla V(\boldsymbol{x}) \tag{2.4}$$

ここで，b_{d} および k_{v} は正のゲイン定数である．また，$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}})$ は提案された NADF であり，以下の式で表される．

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) = \left[\boldsymbol{n}^{\mathrm{T}} \dot{\boldsymbol{x}} \boldsymbol{n} + \left(\frac{\nabla V(\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}}}{\|\nabla V(\boldsymbol{x})\|} \cdot \dot{\boldsymbol{x}} \cdot \Phi(\nabla V(\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}} \dot{\boldsymbol{x}}) \right) \frac{\nabla V(\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}}}{\|\nabla V(\boldsymbol{x})\|} \right] \tag{2.5}$$

ただし，$\boldsymbol{n}$ は ∇V に直交する単位ベクトルである．

式 (2.5) において，$\Phi(\nabla V(\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}} \dot{\boldsymbol{x}})$ は単位ステップ関数を表している．つまり関数 Φ は，$\nabla V(\boldsymbol{x})^{\mathrm{T}} \dot{\boldsymbol{x}}$ が正ならば 1 を，負ならば 0 をとる．これは，勾配 $\nabla V(\boldsymbol{x})$ と速度 $\dot{\boldsymbol{x}}$ の積をとることで，現在位置の勾配方向と制御対象の速度方向が一致していることを確認するために存在する．勾配と速度の方向が一致していれば，符号は正となるためステップ関数は 1 の値をとり，現在の速度方向へ向かう力が増幅される．一

方で，方向が一致しない場合，例えば外力などにより違う方向への力が強まっている場合には，符号が負となるためステップ関数は 0 の値をとり，現在の速度方向への力を打ち消す力が付加される．同時に HPF の勾配方向への力が付加され，元の軌道へ戻す力が多く働く．よってこの手法は，外力の働く環境内での制御にも適用可能である．

2.3.2　クランピング制御

NADF を用いた制御では，現在の位置 $\boldsymbol{x}$ は外力に左右されず目標点 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{T}}$ へ到達可能であるが，目標点へ到達後に姿勢を維持できず振動や発散が起こる場合がある．そこで，“クランピング制御” を適用する．図 2.4 にクランピング制御の概念図を示す．クランピング制御は図に示す円領域に適用される．円領域は，目標点から半径 σ の範囲である．この範囲内において，速度方向が目標点へ向かっている場合には，クランピング制御は適用されない．一方，範囲内において速度方向が目標点から遠ざかる方向を向いている場合，クランピング制御は目標点の方向に $(\boldsymbol{x}_{\mathrm{T}} - \boldsymbol{x})$ の力を付加し，目標点へ収束させる．NADF を適用した制御入力の式 (2.4) に更にクランピング制御を適用した制御入力は以下のようになる．

$$\boldsymbol{u} = -b_{\mathrm{d}} \cdot \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - k_{\mathrm{v}} \cdot \nabla V(\boldsymbol{x}) - k_{\mathrm{C}} \cdot \boldsymbol{F}_{\mathrm{C}}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) \tag{2.6}$$

ただし k_{C} はクランピング制御にかかるゲインであり，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{C}}$ はクランピング制御のための非線形入力関数であり，以下のように表される．

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{C}}(\boldsymbol{x}, \dot{x}) = (\boldsymbol{x}_{\mathrm{T}} - \boldsymbol{x}) \cdot \Phi(\sigma - |\boldsymbol{x}_{\mathrm{T}} - \boldsymbol{x}|) \cdot \Phi(\dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{T}} - \boldsymbol{x})) \tag{2.7}$$

ここで，単位ステップ関数 $\Phi(\sigma - |\boldsymbol{x}_{\mathrm{T}} - \boldsymbol{x}|)$ は制御対象が領域内に位置することを確認し，$\Phi(\dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{T}} - \boldsymbol{x}))$ は現在の速度方向が目標位置に向かっているかを確認するために導入する．

2.4　数値シミュレーション

前述の 3 つの手法 (HPF と粘性制動力のみ，NADF の適用，NADF とクランピング制御の適用) を比較するためのシミュレーション実験を行う．想定する環境を図 2.5 に示す．想定する環境は 50×50 [m] の空間で，環境内には 2 つの壁が障害物として存在する．この実験では，初期位置 $\boldsymbol{x}_0 = [40\ 40]^{\mathrm{T}}$ [m] にある 1 [kg] の質点を目標値 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{T}} = [10\ 10]^{\mathrm{T}}$ [m] まで移動させることを目標とする．また，図中に描画された軌道は，HPF の勾配を用いて算出された運動学的な軌道である．この運動学的な軌道を目標軌道としてそれぞれの制御結果を比較する．このとき，環境内に外力が発生していない場合と，環境内において制御対象の質点に常に $\boldsymbol{f}_{\mathrm{g}} = [4\ 4]^{\mathrm{T}}$ [N] の外力かかっている場合のシミュレーションについて以下にまとめる．

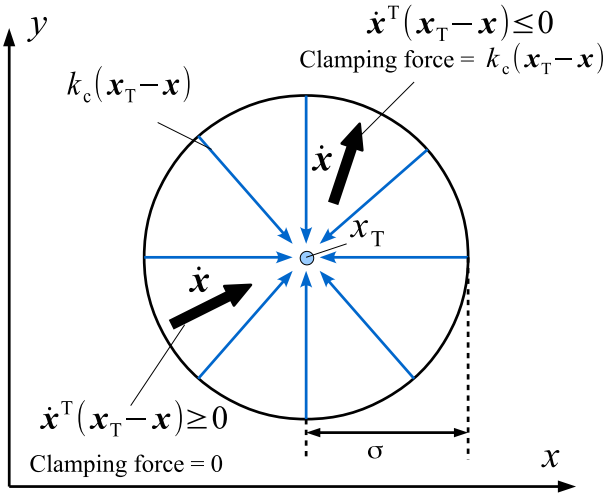


Fig. 2.4: The clamping control

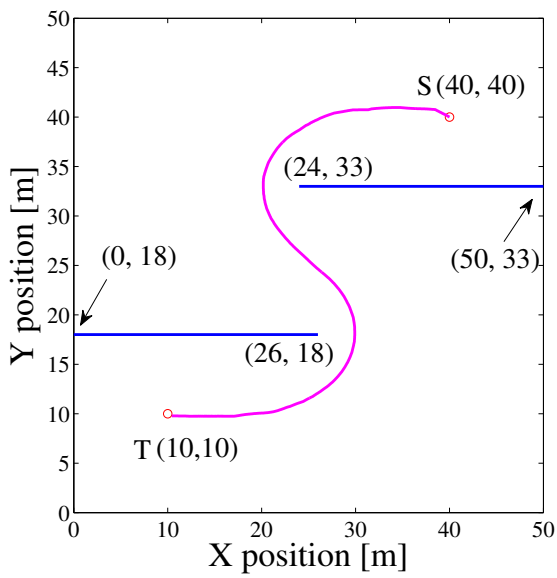


Fig. 2.5: Simulation environment

2.4.1　外力の存在しない環境における制御

まず，外力の存在しない環境において 3 種類の制御手法を比較した．このとき，動力学モデルは，

$$m\ddot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{F} \tag{2.8}$$

となる．ただし，m は質点の質量，$\ddot{\boldsymbol{x}}$ は質点の加速度，$\boldsymbol{F}$ は質点に働く力である．質点の質量 m は 1 [kg] であるため，HPF の勾配と粘性制動力を用いた制御入力における制御対象の動作モデル，NADF を適用した動作モデル，NADF とクランピング制御を適用したモデルは以下のようになる．

$$\ddot{\boldsymbol{x}} = -b_{\mathrm{c}} \cdot \dot{\boldsymbol{x}} - \nabla V(\boldsymbol{x}) \tag{2.9}$$

$$\ddot{\boldsymbol{x}} = -b_{\mathrm{d}} \cdot \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - k_{\mathrm{v}} \cdot \nabla V(\boldsymbol{x}) \tag{2.10}$$

$$\ddot{\boldsymbol{x}} = -b_{\mathrm{d}} \cdot \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - k_{\mathrm{v}} \cdot \nabla V(\boldsymbol{x}) - k_{\mathrm{C}} \cdot \boldsymbol{F}_{\mathrm{C}}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) \tag{2.11}$$

本シミュレーションにおいて 3 つの制御入力に共通の勾配にかかるゲイン k_{v}，およびクランピング制御にかかるゲイン k_{C} は $k_{\mathrm{v}} = 1, k_{\mathrm{C}} = 10$ で一定とし，ゲイン b_{c} および b_{d} のみを変更して結果を比較した．

ゲイン b_{c} および b_{d} を 0.1，1.0，10.0 と変化させた際にそれぞれの制御器を用いた場合の質点の軌道および収束時間をそれぞれ図 2.6〜2.8 に示す．結果の軌道より，ゲインを増加させるにつれて，軌道が運動学的な目標軌道 (図 2.5) に近づいていることがわかる．これは，HPF の勾配のみを用いた制御では，b_{c} の増加に伴って制御対象の速度が抑制されるためである．一方，NADF を用いた制御においては，b_{d} の増加に伴って NADF による勾配方向以外の力を打ち消す力が強まる．結果としてどちらの制御器を用いてもゲインを大きくするにつれて勾配を精度よく辿る結果となっている．経路を見る限り，NADF を用いる場合と用いない場合の制御手法間に大きな違いはないように見えるが，収束時間とその傾向において大きな差がみられる．図 2.6 においては，b_{c} が増加するにつれて収束時間も大きく増加している．一方で，図 2.7 においては，b_{d} が増加するにつれて収束時間が短くなっている．これは，粘性制動力が常に減速することで軌道を保っているのに対し，NADF は制御対象の現在の速度方向と HPF の勾配方向との差を考慮することで，不必要な力のみを抑制しているためである．また，クランピング制御を適用した制御 (図 2.8) においては，途中の軌道や到達時間は NADF を用いたものと全く同じであるが，目標点へ到達後のオーバーシュートが抑制されていることがわかる．

以上より，ゲイン b_{c} および b_{d} の調整によって HPF の勾配を用いて目標点までの誘導が可能であること，また，粘性制動力の代わりに NADF を適用することでより素早く目標点まで移動可能であることが確認できた．また，クランピング制御を適用することにより，制御対象を目標点へ収束できることを確認した．

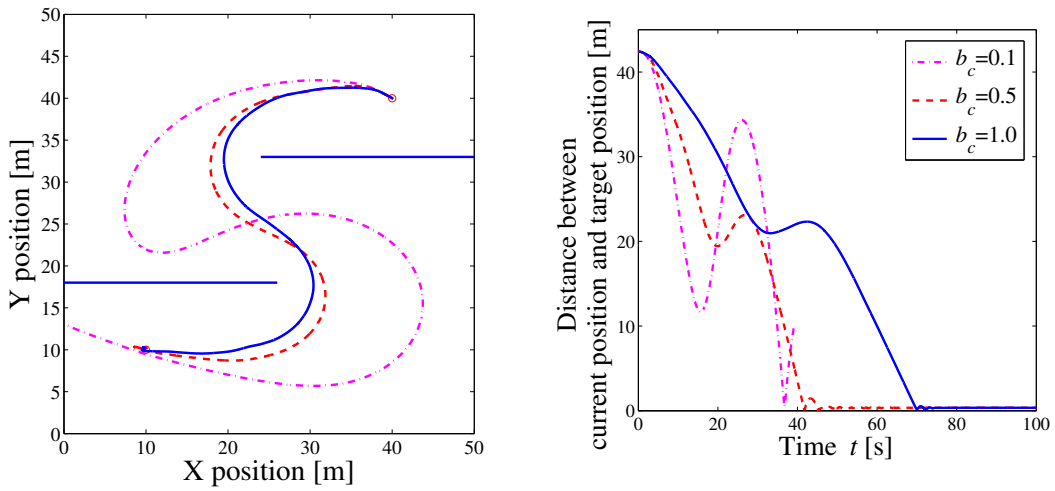


Fig. 2.6: Simulation results using Eq. (2.9) (gain b_c = 0.1, 1.0 and 10.0)

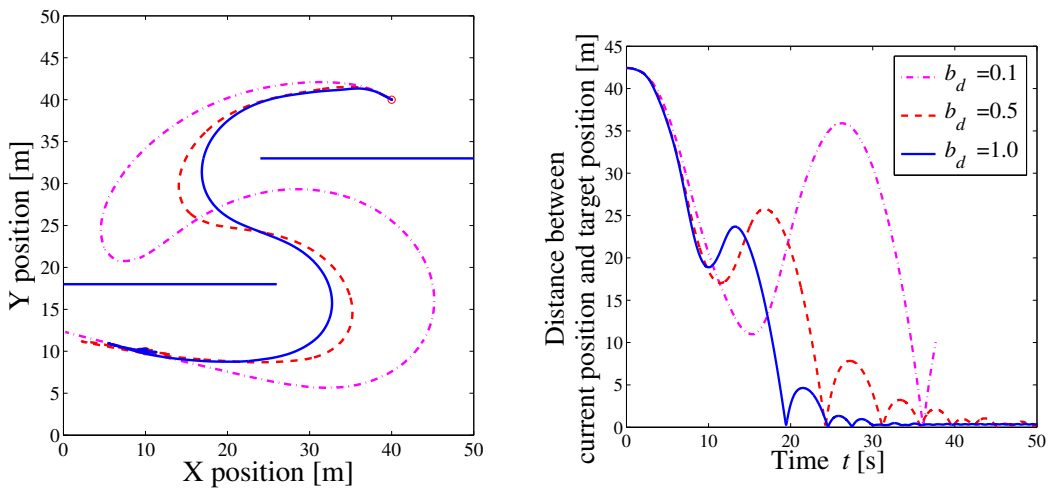


Fig. 2.7: Simulation results using Eq. (2.10) (gain b_d = 0.1, 1.0 and 10.0)

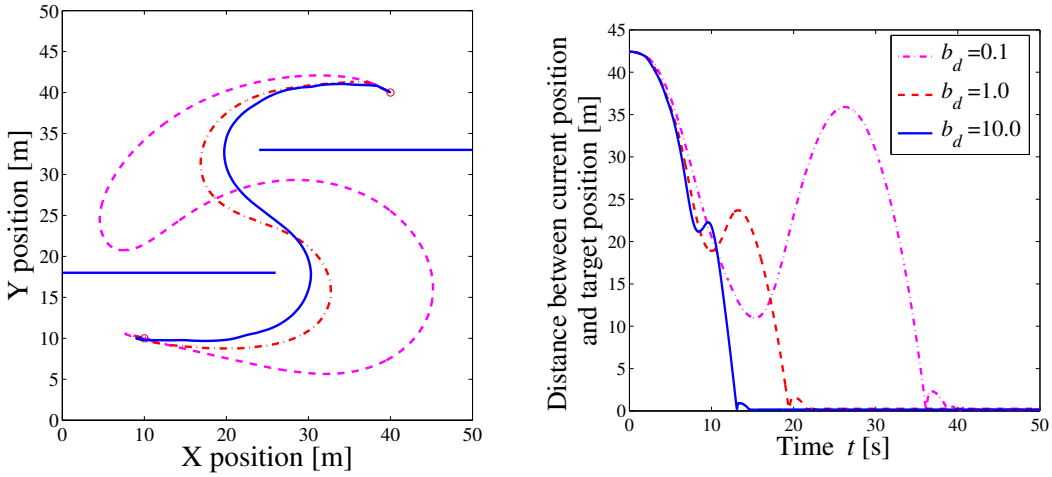


Fig. 2.8: Simulation results using Eq. (2.11) (gain b_d = 0.1, 1.0 and 10.0)

2.4.2 外力の存在する環境における制御

次に，環境内に存在する制御対象に対して常に外力 $\boldsymbol{f}_\mathrm{g} = [4\ 4]^\mathrm{T}$ が働いている環境を想定する．このとき，動力学モデルは，

$$m\ddot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{f}_\mathrm{g} = \boldsymbol{F} \tag{2.12}$$

となる．このとき，それぞれの制御器を用いた場合の制御対象の動作モデルはそれぞれ以下のようになる．

$$\ddot{\boldsymbol{x}} = -b_\mathrm{c} \cdot \dot{\boldsymbol{x}} - \nabla V(\boldsymbol{x}) - \boldsymbol{f}_\mathrm{g} \tag{2.13}$$

$$\ddot{\boldsymbol{x}} = -b_\mathrm{d} \cdot \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - k_\mathrm{v} \cdot \nabla V(\boldsymbol{x}) - \boldsymbol{f}_\mathrm{g} \tag{2.14}$$

$$\ddot{\boldsymbol{x}} = -b_\mathrm{d} \cdot \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - k_\mathrm{v} \cdot \nabla V(\boldsymbol{x}) - k_\mathrm{C} \cdot \boldsymbol{F}_\mathrm{C}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - \boldsymbol{f}_\mathrm{g} \tag{2.15}$$

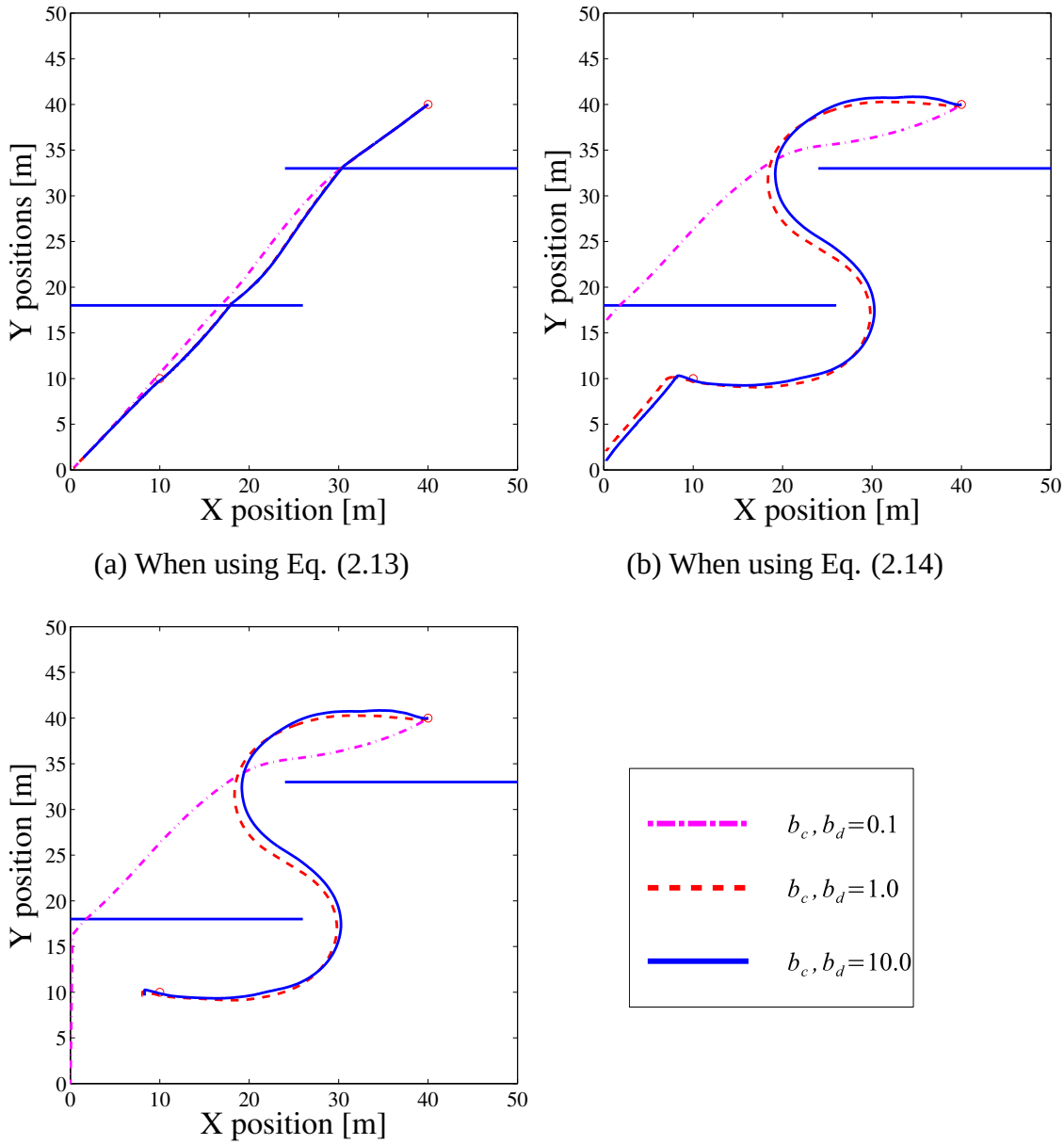
本シミュレーションにおいては，1.4.1 節における数値シミュレーションと同様に質点の質量 $m = 1$ [kg]，ゲイン k_v，k_C は $k_\mathrm{v} = 1$, $k_\mathrm{C} = 10$ で一定とし，ゲイン b_c および b_d のみを変更して結果を比較した．

ゲイン b_c および b_d を 1.0，5.0，10.0 と変化させた際の，HPF の勾配と粘性制動力を用いた軌道，NADF を適用した場合の軌道，クランピング制御を適用した軌道を図 2.9 に示す．HPF のみを用いた制御では，図 2.9 (a) に示されるように外力の影響を抑えきれず経路を逸脱した．一方 NADF を適用した制御では，図 2.9 (b) に示されるように，ゲインを増加させることで，外力によって姿勢が崩れた場合にも補正を行い目標点まで到達させることができた．しかし，目標点へ到達後は姿勢を維持することができず発散してしまった．最後に，クランピング制御を用

いた場合には，図 2.9 (c) に示されるように目標点に姿勢を収束させることが可能となった．以上から，NADF を用いた制御は外力の存在する環境下でも適用可能であること，クランピング制御を組み合わせることで，制御対象を目標点に収束させることができることを確認した．

2.5　まとめ

本章では，質点を制御対象とした場合の HPF の勾配を用いたキノダイナミック動作計画の概要について述べ，そこで用いられる HPF，粘性制動力，NADF，およびクランピング制御の詳細について説明した．また，MATLAB を用いた数値シミュレーションにおいて HPF の勾配ベクトルに粘性制動力を加えて作成した制御器と Masoud らが提案した NADF，クランピング制御を適用した場合の制御器とを比較した．同時に，各制御器についてゲインを変更しながら数値シミュレーション上で目標地点への誘導制御を行い，それぞれのふるまいの変化を運動学的な軌道との誤差，および収束時間の観点から検証した．結果として，HPF の勾配と NADF を用いたキノダイナミック動作計画は粘性制動力を用いた場合に比べて運動学的な軌道に沿って素早く制御対象を誘導制御でき，外力の存在する環境においても制御対象を誘導制御できることを確認した．また，クランピング制御を適用することで目標点への確実な収束が可能となった．



(a) When using Eq. (2.13)

(b) When using Eq. (2.14)

(c) When using Eq. (2.15)

Fig. 2.9: Simulation results when an external force exists (gains b_c, b_d = 1.0, 5.0 and 10.0)

第3章　クワッドロータを想定したキノダイナミック動作計画

3.1　本章の概要

本章では，前章において述べた HPF に基づくキノダイナミック動作計画を拡張することでより複雑な動力学モデルとしてのクワッドロータにも適用可能であることを示す．更に，MATLAB を用いた数値シミュレーションを通して粘性制動力のみを用いたキノダイナミック動作計画と比較してクワッドロータを制御する場合においても前章で述べた NADF およびクランピング制御が有用であることを主張する．以下に，クワッドロータの概要，クワッドロータの動力学モデルの導出，キノダイナミック動作計画の拡張，およびクワッドロータを想定して拡張した制御器を用いた数値シミュレーションについて述べる．

3.2　クワッドロータの概要

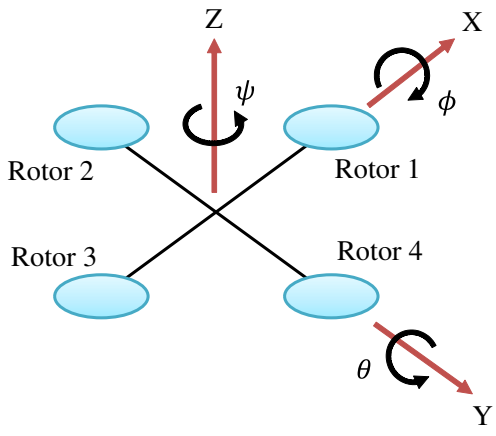


Fig. 3.1: Motional directions of a quadrotor

クワッドロータは機体に搭載された 4 つのロータの推力を個々に変化させることにより X，Y，Z 軸方向への並進運動および ϕ，θ，ψ 角方向への回転運動を行

う．ただし，クワッドロータはその構造から，X 軸方向の並進運動と θ 角方向の回転，Y 軸方向の並進運動と ϕ 角方向の回転を切り離して制御することはできない．図 3.1 にクワッドロータの概要図と，機体の回転方向および並進方向を示す．また，以下にクワッドロータが並進および回転運動を行う場合の各ロータの推力の変化について説明する．なお，図中の $f_1, ..., f_4$ に対応する矢印は各ロータから発生する推力を表している．

- X 軸および θ (ピッチ) 角方向の運動: X 軸方向への並進運動および θ 角運動を行う際の各ロータの推力を図 3.2 に示す．この運動はロータ 2 とロータ 4 の推力を等しく保った状態でロータ 1 とロータ 3 の推力に差を設けることで 実現できる．また，ロータ 3 の推力をロータ 1 よりも大きくして機体を $-\theta$ 方向に傾けた場合に機体は X 軸の正方向へ移動する．

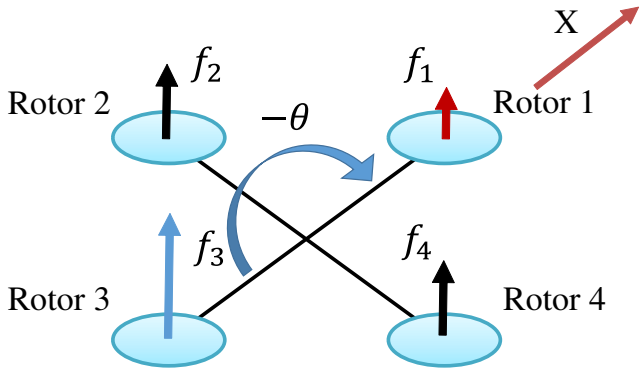


Fig. 3.2: Thrust of each rotor to control the X-directional position and θ angle

- Y 軸および ϕ (ロール) 角方向の運動: Y 軸方向の並進運動および ϕ 角運動を行う際の各ロータの推力を図 3.3 に示す．この運動はロータ 1 とロータ 3 の推力を等しく保った状態でロータ 2 とロータ 4 の推力に差を設けることで 実現できる．また，ロータ 2 の推力をロータ 4 よりも大きくして機体を ϕ 方向に傾けた場合に機体は Y 軸の正方向へ移動する．

- Z 軸方向の運動: Z 軸方向の上昇または下降運動を行う際の各ロータの推力を図 3.4 に示す．この運動は，4 つのロータの推力を等しく増加または減少させることで実現する．4 つのロータの推力を同時に増加させた場合に機体は Z 軸の正方向へ移動 (上昇) する．

- ψ (ヨー) 角方向の運動: ψ 角運動を行う際の各ロータの推力を図 3.5 に示す．この運動は，ロータの回転方向を利用してロータ 2 とロータ 4 の推力を等しく減少または増加させながら，ロータ 1 とロータ 3 の推力を等しく増加または減少させることで実現する．ロータ 2 とロータ 4 の推力をロータ 1 とロー

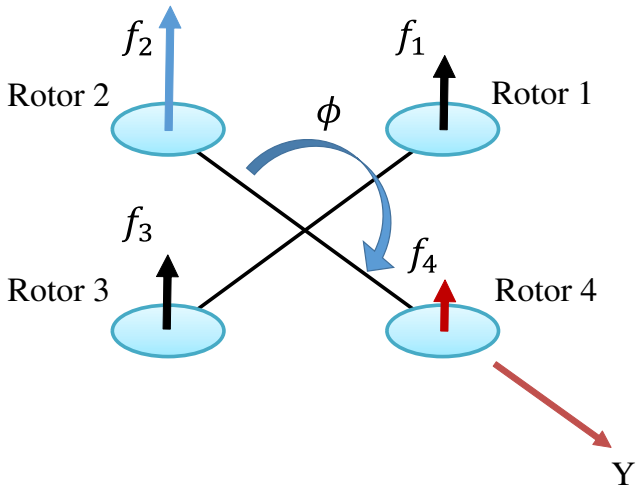


Fig. 3.3: Thrust of each rotor to control the Y-directional position and θ angle

タ 3 の推力より増加させた場合に機体は ψ 角方向へ回転する．ただし，このとき Z 軸方向の運動が発生しないように，4 つのロータから生じる推力の合計を一定に保つ必要がある．

3.3 クワッドロータの動力学モデル

クワッドロータは搭載された 4 つのロータを用いて前後，左右，高さの 3 方向の位置 (x, y, z) と，ロール，ピッチ，ヨーの 3 つの姿勢角 (ϕ, θ, ψ) を制御する．想定するクワッドロータのモデルを図 3.6 に示す．クワッドロータに搭載された 4 つのロータは図 3.6 中の矢印の方向へ回転する．図中の B は機体座標系，E は世界座標系を示している．機体座標系 B はクワッドロータの中心を原点とし，機体に対して鉛直上向きを Z 軸の正とした右手系の座標とする．また，(x, y, z) を機体の重心位置の座標，X 軸，Y 軸，Z 軸周りの機体の回転角を (ϕ, θ, ψ) とした．世界座標系 E も機体座標系と同様に鉛直上向きを正とした右手系とする．このとき，機体座標系 B から世界座標系 E への回転行列 R は次式のように表すことができる．

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \sin\psi\cos\phi & \sin\phi\sin\psi + \sin\theta\cos\phi\cos\psi \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & \sin\theta\sin\psi\cos\phi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

次に，前述のように定義したクワッドロータに対し，ラグランジュ法を用いて動力学モデルを導出する．動力学モデルの導出については Watanabe らの論文を参考にした [79]．並進運動エネルギーを T_{trans}，回転運動エネルギーを T_{rot}，位置エネルギーを U とし，機体の座標を $\boldsymbol{\xi} = [x\ y\ z]^{\mathrm{T}}$，回転角を $\boldsymbol{\eta} = [\phi\ \theta\ \psi]^{\mathrm{T}}$，機体質量を m,

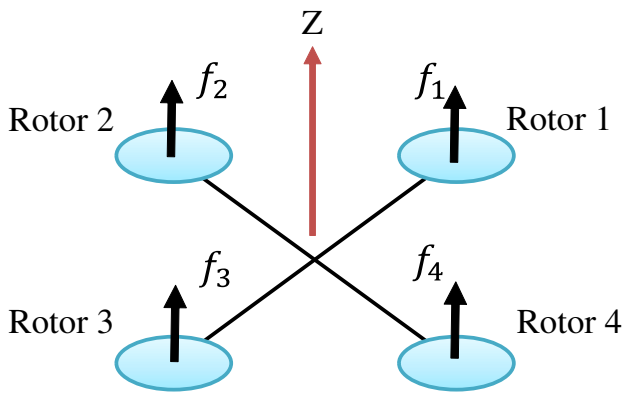


Fig. 3.4: Thrust of each rotor to control the Z-directional position

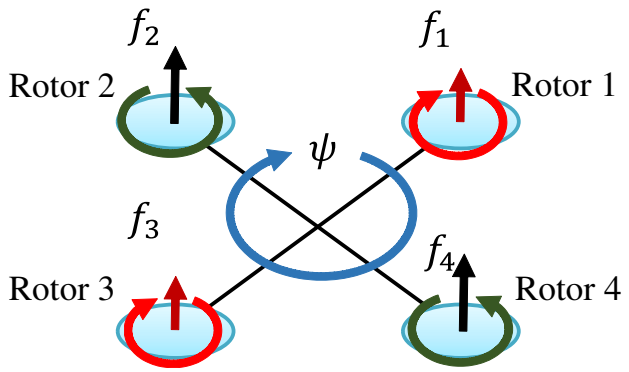


Fig. 3.5: Control of the attitude angle ψ

重力加速度を g，機体座標系回りの慣性行列を J とするとそれぞれのエネルギーは次のように示すことが出来る．

$$T_{\mathrm{trans}} = \frac{1}{2}m\dot{\boldsymbol{\xi}}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\xi}} \tag{3.2}$$

$$T_{\mathrm{rot}} = \frac{1}{2}J\dot{\boldsymbol{\eta}}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\eta}} \tag{3.3}$$

$$U = -mgz \tag{3.4}$$

このとき，ラグランジアンは運動エネルギー T_{trans}，T_{rot} と位置エネルギー U との差で表されるため，次のようになる．

$$L = T_{\mathrm{trans}} + T_{\mathrm{rot}} - U$$

$$L = \frac{1}{2}m\dot{\boldsymbol{\xi}}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\xi}} + \frac{1}{2}J\dot{\boldsymbol{\eta}}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\eta}} + mgz \tag{3.5}$$

ここで一般化座標を $\boldsymbol{q} = [\boldsymbol{\xi}\ \ \boldsymbol{\eta}]^{\mathrm{T}}$ とするとき，一般的にラグランジュの運動方程式

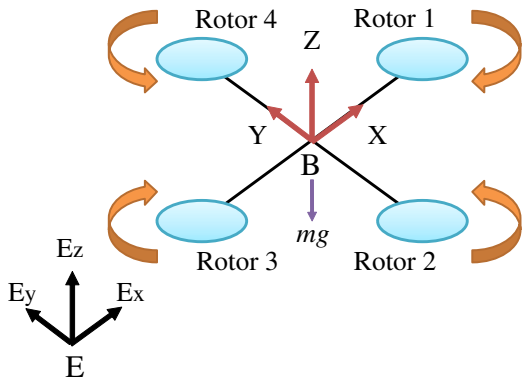


Fig. 3.6: Structure of the quadrotor and the definition of coordinates

は次式のように表される．

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}} - \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{q}} = F \tag{3.6}$$

ただし F は一般化力を表す．式 (3.6) の 3 つの要素はそれぞれ式 (3.5) を微分および偏微分することで以下のように求められる．

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}} = \begin{bmatrix} m\dot{\boldsymbol{\xi}} \\ J\dot{\boldsymbol{\eta}} \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{q}}} = \begin{bmatrix} m\ddot{\boldsymbol{\xi}} \\ \dot{J}\dot{\boldsymbol{\eta}} + J\ddot{\boldsymbol{\eta}} \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{q}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\xi}} \\ \dfrac{1}{2}\dfrac{\partial}{\partial \boldsymbol{\eta}} J\dot{\boldsymbol{\eta}}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\eta}} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

よって，ラグランジュの運動方程式は式 (3.10) のようになる．

$$\begin{bmatrix} m\ddot{\boldsymbol{\xi}} \\ \dot{J}\dot{\boldsymbol{\eta}} + J\ddot{\boldsymbol{\eta}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dfrac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\xi}} \\ \dfrac{1}{2}\dfrac{\partial}{\partial \boldsymbol{\eta}} J\dot{\boldsymbol{\eta}}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{\eta}} \end{bmatrix} = \boldsymbol{F} \tag{3.10}$$

ここで，機体の並進力を F_ξ，機体軸回りのモーメントを ϕ，θ，ψ 角方向のモーメント τ_ϕ，τ_θ，τ_ψ を用いて $\boldsymbol{\tau} = [\tau_\phi \ \ \tau_\theta \ \ \tau_\psi]^{\mathrm{T}}$ と表すと，一般化力 $\boldsymbol{F}$ は以下のようになる．

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} F_\xi \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

ここで，機体座標系での単位ベクトルを $\boldsymbol{e} = [0\ \ 0\ \ 1]^{\mathrm{T}}$ とすると，並進力 F_ξ は以下のようになる．

$$
\begin{aligned}
F_\xi &= \boldsymbol{R}\mathrm{e}U_1 \\
&= U_1 \begin{bmatrix} \sin\theta\cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ \sin\theta\sin\psi\cos\phi - \sin\phi\cos\psi \\ \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.12}
$$

ただし，U_1 はクワッドロータの Z 軸方向の並進力の制御入力である．ロータ i が発生する推力をそれぞれ f_i とすると，並進力を制御するための制御入力 U_1 は以下のように示される．

$$
U_1 = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \tag{3.13}
$$

また，モータ i で発生する回転トルクを τ_{M_i} として，機体の中心からロータの中心までの長さを l とすると機体軸回りのモーメント $\boldsymbol{\tau} = [\tau_\phi\ \ \tau_\theta\ \ \tau_\psi]^{\mathrm{T}}$ は以下のようになる．

$$
\tau_\phi = (f_2 - f_4)l \tag{3.14}
$$

$$
\tau_\theta = (f_1 - f_3)l \tag{3.15}
$$

$$
\begin{aligned}
\tau_\psi &= \tau_{\mathrm{M}_1} + \tau_{\mathrm{M}_2} + \tau_{\mathrm{M}_3} + \tau_{\mathrm{M}_4} \\
&= \sum_{i=1}^{4} \tau_{\mathrm{M}_i}
\end{aligned} \tag{3.16}
$$

以上により F_ξ と $\boldsymbol{\tau}$ から成る一般化力 $\boldsymbol{F}$ を示すことが出来た．次に運動方程式を並進運動と回転運動に分けて記述する．並進運動部分を式 (3.17)，回転運動部分を式 (3.18) に示す．

$$
\begin{aligned}
m\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} &= F_\xi \\
&= U_1 \begin{bmatrix} \sin\theta\cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ \sin\theta\sin\psi\cos\phi - \sin\phi\cos\psi \\ \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.17}
$$

$$
\begin{aligned}
J\ddot{\boldsymbol{\eta}} + (\dot{J}\dot{\boldsymbol{\eta}} - \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{\eta}}\dot{\boldsymbol{\eta}}^{\mathrm{T}}J\dot{\boldsymbol{\eta}}) &= \boldsymbol{\tau} \\
&= \begin{bmatrix} (f_2 - f_4)l \\ (f_1 - f_3)l \\ \sum_{i=1}^{4} \tau_{\mathrm{M}_i} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.18}
$$

ここで式 (3.18) の左辺第 2 項はコリオリ項であり，コリオリトルクとジャイロトルクを表す式はロータの慣性モーメントを J_r，各軸の角速度を $\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix}\dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi}\end{bmatrix}^\mathrm{T}$，ロータ i の角速度を ω_i とすると以下のように示される．

$$\boldsymbol{\omega} \times J\boldsymbol{\omega} + \sum_{i=1}^{4} J_\mathrm{r}(\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{e})\omega_i \tag{3.19}$$

機体座標軸回りの慣性モーメント J は X 軸回りの慣性モーメントを I_x，Y 軸回りの慣性モーメントを I_y，Z 軸回りの慣性モーメントを I_z とすると以下のように示される．

$$J = \begin{bmatrix} I_\mathrm{x} & 0 & 0 \\ 0 & I_\mathrm{y} & 0 \\ 0 & 0 & I_\mathrm{z} \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

ここで

$$J\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} I_\mathrm{x} & 0 & 0 \\ 0 & I_\mathrm{y} & 0 \\ 0 & 0 & I_\mathrm{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_\mathrm{x}\dot{\phi} \\ I_\mathrm{y}\dot{\theta} \\ I_\mathrm{z}\dot{\psi} \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

と示すことが出来る．よって，

$$\boldsymbol{\omega} \times J\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\psi} & \dot{\theta} \\ \dot{\psi} & 0 & -\dot{\phi} \\ -\dot{\theta} & \dot{\phi} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\mathrm{x}\dot{\phi} \\ I_\mathrm{y}\dot{\theta} \\ I_\mathrm{z}\dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I_\mathrm{z} - I_\mathrm{y})\dot{\theta}\dot{\psi} \\ (I_\mathrm{x} - I_\mathrm{z})\dot{\phi}\dot{\psi} \\ (I_\mathrm{y} - I_\mathrm{x})\dot{\phi}\dot{\theta} \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

$$\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{e} = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\psi} & \dot{\theta} \\ \dot{\psi} & 0 & -\dot{\phi} \\ -\dot{\theta} & \dot{\phi} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ -\dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

式 (3.19) の第 2 項を整理すると以下のようになる．

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^{4} J_\mathrm{r}(\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{e})\omega_i \\ &= J_\mathrm{r} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ -\dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_2 + \omega_4 - \omega_1 - \omega_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.24}$$

これらのことから，式 (3.18) を書き直すと以下のようになる．

$$
\begin{aligned}
J\ddot{\boldsymbol{\eta}} + J_{\mathrm{r}} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ -\dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_2 + \omega_4 - \omega_1 - \omega_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (I_{\mathrm{z}} - I_{\mathrm{y}})\dot{\theta}\dot{\psi} \\ (I_{\mathrm{x}} - I_{\mathrm{z}})\dot{\phi}\dot{\psi} \\ (I_{\mathrm{y}} - I_{\mathrm{x}})\dot{\phi}\dot{\theta} \end{bmatrix} \\
= \begin{bmatrix} (f_2 - f_4)l \\ (f_1 - f_3)l \\ \displaystyle\sum_{i=1}^{4} \tau_{\mathrm{M}_i} \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{3.25}
$$

以上より，クワッドロータの動力学モデルの並進部分はベクトル表現では以下のようになる

$$
m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} = U_1 \begin{bmatrix} \sin\theta\cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ \sin\theta\sin\psi\cos\phi - \sin\phi\cos\psi \\ \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}
\tag{3.26}
$$

よって，

$$
\begin{aligned}
\ddot{x} &= (\sin\theta\cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\psi)\frac{1}{m}U_1 \\
\ddot{y} &= (\sin\theta\sin\psi\cos\phi - \sin\phi\cos\psi)\frac{1}{m}U_1 \\
\ddot{z} &= (\cos\phi\cos\theta)\frac{1}{m}U_1 - g
\end{aligned}
$$

また，回転運動部分はベクトル・行列表現ではそれぞれ以下のようになる．

$$
\begin{bmatrix} I_{\mathrm{x}} & 0 & 0 \\ 0 & I_{\mathrm{y}} & 0 \\ 0 & 0 & I_{\mathrm{z}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + J_{\mathrm{r}} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ -\dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} \Omega + \begin{bmatrix} (I_{\mathrm{z}} - I_{\mathrm{y}})\dot{\theta}\dot{\psi} \\ (I_{\mathrm{x}} - I_{\mathrm{z}})\dot{\phi}\dot{\psi} \\ (I_{\mathrm{y}} - I_{\mathrm{x}})\dot{\phi}\dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lU_2 \\ lU_3 \\ U_4 \end{bmatrix}
\tag{3.27}
$$

よって，

$$
\begin{aligned}
\ddot{\phi} &= \dot{\theta}\dot{\psi}\left(\frac{I_{\mathrm{y}} - I_{\mathrm{z}}}{I_{\mathrm{x}}}\right) - \frac{J_{\mathrm{r}}}{I_{\mathrm{x}}}\dot{\theta}\Omega + \frac{l}{I_{\mathrm{x}}}U_2 \\
\ddot{\theta} &= \dot{\phi}\dot{\psi}\left(\frac{I_{\mathrm{z}} - I_{\mathrm{x}}}{I_{\mathrm{y}}}\right) + \frac{J_{\mathrm{r}}}{I_{\mathrm{y}}}\dot{\phi}\Omega + \frac{l}{I_{\mathrm{y}}}U_3 \\
\ddot{\psi} &= \dot{\phi}\dot{\theta}\left(\frac{I_{\mathrm{x}} - I_{\mathrm{y}}}{I_{\mathrm{z}}}\right) + \frac{1}{I_{\mathrm{z}}}U_4
\end{aligned}
\tag{3.28}
$$

b をロータの推力係数，d をロータの抗力係数，ω_i をロータ i の回転速度とすると，$f_i = -b\omega_i^2$，$\tau_{\mathrm{M}_i} = -d\omega_i^2$ となる．また，Ω を全ロータの回転速度の合計，τ_{M_i} をモー

タ i で発生するトルクとすると，Ω，U_1，U_2，U_3，U_4 は以下のようになる．

$$
\begin{aligned}
\Omega &= \omega_2 + \omega_4 - \omega_1 - \omega_3 \\
U_1 &= f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \\
&= b(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\
U_2 &= f_2 - f_4 = b(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\
U_3 &= f_1 - f_3 = b(\omega_1^2 - \omega_3^2) \\
U_4 &= \sum_{i=1}^{4} \tau_{\mathrm{M}_i} = d(\omega_2^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_3^2)
\end{aligned}
\tag{3.29}
$$

以上の結果をまとめると，m [kg] の質量をもつクワッドロータの動力学モデルは，並進位置の制御入力を U_1，およびロール，ピッチ，ヨーの姿勢角の制御入力 U_2，U_3，U_4 を用いて以下のように表される．

$$
\begin{cases}
\ddot{x} = (\sin\theta\cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\psi)\dfrac{1}{m}U_1 \\
\ddot{y} = (\sin\theta\sin\psi\cos\phi - \sin\phi\cos\psi)\dfrac{1}{m}U_1 \\
\ddot{z} = (\cos\phi\cos\theta)\dfrac{1}{m}U_1 - g \\
\ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi}\left(\dfrac{I_\mathrm{y} - I_\mathrm{z}}{I_\mathrm{x}}\right) - \dfrac{J_\mathrm{r}}{I_\mathrm{x}}\dot{\theta}\Omega + \dfrac{l}{I_\mathrm{x}}U_2 \\
\ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi}\left(\dfrac{I_\mathrm{z} - I_\mathrm{x}}{I_\mathrm{y}}\right) - \dfrac{J_\mathrm{r}}{I_\mathrm{y}}\dot{\phi}\Omega + \dfrac{l}{I_\mathrm{y}}U_3 \\
\ddot{\phi} = \dot{\phi}\dot{\theta}\left(\dfrac{I_\mathrm{x} - I_\mathrm{y}}{I_\mathrm{z}}\right) + \dfrac{1}{I_\mathrm{z}}U_4
\end{cases}
$$

3.4 クワッドロータを想定した制御入力の拡張

3.4.1 非ホロノミック制御入力

クワッドロータはロール，ピッチ角と X，Y 方向への並進移動間に拘束が存在する．この拘束条件は，動力学モデルの並進運動を表す式から以下のように示される [78]．

$$
\begin{aligned}
&\ddot{x}\cos\phi + \ddot{y}\sin\phi + \tan\theta(g - \ddot{z}) = 0 \\
&\ddot{x}\sin\phi - \ddot{y}\cos\phi - \sin\phi\sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y} + (\ddot{z} - g)^2} = 0
\end{aligned}
\tag{3.30}
$$

この 2 つの拘束条件に基づくと，4 つの変数からそれ以外の 2 つのパラメータおよびその導関数を推定することができる．例えば，以下のように変形した場合，θ お

よびψを推定することができる．

$$
\begin{aligned}
\theta &= \arctan\left(\frac{\ddot{x}\sin\phi + \ddot{y}\sin\phi}{\ddot{z}+g}\right) \\
\psi &= \arcsin\left(\frac{\ddot{x}\sin\phi - \ddot{y}\cos\phi}{\sqrt{\ddot{x}^2+\ddot{y}^2+(g+\ddot{z})^2}}\right)
\end{aligned}
\tag{3.31}
$$

Bouabdallah ら [46] はクワッドロータが姿勢の回転角は並進位置に依存しないが，並進位置は回転角に依存することに注目し，リアプノフの安定性理論に基づく非ホロノミック制御を提案した．この手法では，クワッドロータの位置 (x, y, z) と姿勢角 (ϕ, θ, ψ) の 6 つの状態のうち，3 つの姿勢角と 1 つの座標の状態が制御可能となる．本論文では，この手法を用いてクワッドロータの z 方向の位置及び姿勢角 (ϕ, θ, ψ) を制御する．以下に非ホロノミック制御入力の構造について述べる．

式 (3.30) に示したクワッドロータの動力学モデルを以下のように状態ベクトル $\boldsymbol{X} = (x_1, ..., x_{12}) \in \Re^{12}$ とする．

$$
\begin{cases}
x_1 = x & x_2 = \dot{x}_1 = \dot{x} \\
x_3 = y & x_4 = \dot{x}_3 = \dot{y} \\
x_5 = z & x_6 = \dot{x}_5 = \dot{z} \\
x_7 = \phi & x_8 = \dot{x}_7 = \dot{\phi} \\
x_9 = \theta & x_{10} = \dot{x}_9 = \dot{\theta} \\
x_{11} = \psi & x_{12} = \dot{x}_{11} = \dot{\psi}
\end{cases}
\tag{3.32}
$$

このとき，クワッドロータのモデルを式 (3.32) と制御入力 $\boldsymbol{u_c} = [u_{c1}\ u_{c2}\ u_{c3}\ u_{c4}]^{\mathrm{T}}$ を用いて状態空間表現の形式 $\dot{\boldsymbol{X}} = f(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{U})$ に書き換えると以下のように表すことができる．

$$
f(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{U}) = \begin{cases}
\dot{x} \\
f_{\mathrm{x}}(\phi, \theta, \psi)\dfrac{1}{m}u_{c1} \\
\dot{y} \\
f_{\mathrm{y}}(\phi, \theta, \psi)\dfrac{1}{m}u_{c1} \\
\dot{z} \\
(\cos\phi\cos\theta)\dfrac{1}{m}u_{c1} - g \\
\dot{\phi} \\
\dot{\theta}\dot{\psi}a_1 + \dot{\theta}a_2\Omega_{\mathrm{r}} + b_1u_{c2} \\
\dot{\theta} \\
\dot{\phi}\dot{\psi}a_3 + \dot{\phi}a_4\Omega_{\mathrm{r}} + b_2u_{c3} \\
\dot{\psi} \\
\dot{\theta}\dot{\phi}a_5 + b_3u_{c4}
\end{cases}
\tag{3.33}
$$

ただし，

$$
\begin{array}{lllllll}
a_1 & = & (I_\mathrm{y} - I_\mathrm{z})/I_\mathrm{x} & b_1 & = & l/I_\mathrm{x} \\
a_2 & = & J_\mathrm{r}/I_\mathrm{x} & b_2 & = & l/I_\mathrm{y} \\
a_3 & = & (I_\mathrm{z} - I_\mathrm{x})/I_\mathrm{y} & b_3 & = & l/I_\mathrm{z} \\
a_4 & = & J_\mathrm{r}/I_\mathrm{y} & f_\mathrm{x}(\phi,\theta,\psi) & = & (\sin\phi\sin\psi - \sin\theta\cos\phi\cos\psi) \\
a_5 & = & (I_\mathrm{x} - I_\mathrm{y})/I_\mathrm{z} & f_\mathrm{y}(\phi,\theta,\psi) & = & (\sin\phi\cos\psi + \sin\theta\sin\psi\cos\phi)
\end{array}
\tag{3.34}
$$

とする．

まず，姿勢制御を行うための制御入力 $u_{\mathrm{c}2}$，$u_{\mathrm{c}3}$，$u_{\mathrm{c}4}$ の導出を行う．姿勢の制御は姿勢の状態変数ベクトルを $\boldsymbol{X}_\alpha = [x_7\ x_8\ x_9\ x_{10}\ x_{11}\ x_{12}]^\mathrm{T}$ としたとき，目標とする姿勢角 $\boldsymbol{X}_\alpha^\mathrm{d} = [x_7^\mathrm{d}\ 0\ x_9^\mathrm{d}\ 0\ x_{11}^\mathrm{d}\ 0]^\mathrm{T}$ へ安定させることを目的とする．目標姿勢 $\boldsymbol{X}_\alpha^\mathrm{d}$ 付近において 1 階微分可能な正のリアプノフ関数 $V(\boldsymbol{X}_\alpha)$ を以下のように表す．

$$
\begin{aligned}
V(\boldsymbol{X}_\alpha) \quad = \quad & \frac{1}{2}(x_7 - x_7^\mathrm{d})^2 + \frac{1}{2}x_8^2 + \frac{1}{2}(x_9 - x_9^\mathrm{d})^2 \\
& + \frac{1}{2}x_{10}^2 + \frac{1}{2}(x_{11} - x_{11}^\mathrm{d})^2 + \frac{1}{2}x_{12}^2
\end{aligned}
\tag{3.35}
$$

一般にクワッドロータの形状は左右対称であるため，$I_\mathrm{x} = I_\mathrm{y}$ である．よって，リアプノフ関数の時間微分 $\dot{V}$ は以下のように示すことができる．

$$
\begin{aligned}
\dot{\boldsymbol{V}} \quad = \quad & (x_7 - x_7^\mathrm{d})x_8 + (x_9 - x_9^\mathrm{d})x_{10} + (x_{11} - x_{11}^\mathrm{d})x_{12} \\
& + x_8\frac{l}{I_\mathrm{x}}u_2 + x_{10}\frac{l}{I_\mathrm{y}}u_3 + x_{12}\frac{1}{I_\mathrm{z}}u_4
\end{aligned}
\tag{3.36}
$$

リアプノフの安定性理論より $\dot{V} \leq 0$ となる場合，この系の平衡点における安定性が保証される．以上より，k_1，k_2，k_3 を正の定数ゲインとすると姿勢の制御器を以下のように決定できる．

$$
\begin{aligned}
u_{\mathrm{c}2} &= -\frac{I_\mathrm{x}}{l}(x_7 - x_7^\mathrm{d}) - k_1\dot{x}_8 \\
u_{\mathrm{c}3} &= -\frac{I_\mathrm{y}}{l}(x_9 - x_9^\mathrm{d}) - k_2\dot{x}_{10} \\
u_{\mathrm{c}4} &= -I_\mathrm{z}(x_{11} - x_{11}^\mathrm{d}) - k_3\dot{x}_{12}
\end{aligned}
\tag{3.37}
$$

確認のため，式 (3.37) を式 (3.36) に代入すると，

$$
\dot{\boldsymbol{V}} \quad = \quad -x_8^2 l\frac{k_1}{I_\mathrm{x}} - x_{10}^2 l\frac{k_2}{I_\mathrm{y}} - x_{12}^2\frac{k_3}{I_\mathrm{z}}
\tag{3.38}
$$

となり，式 (3.38) の各要素は準負定であるため常に $\dot{V} \leq 0$ を満たす．よって，リアプノフの定理よりこの系の平衡点 $\boldsymbol{X}^\mathrm{d}$ における安定性を保証できる．

次に，機体を目標高度 $z = z^{\mathrm{d}}$ に安定させる場合を想定し，高度 z を制御するための制御入力 u_{c1} を導出する．Z 方向の動力学モデルは式 (3.33) の 5 行目 6 行目に式 (3.32) を代入したものであり，以下のとおりになる．

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_6 \\ -g + \cos x_7 \cos x_9 \frac{u_1}{m} \end{bmatrix} \tag{3.39}$$

ここで，$\cos x_7 \cos x_9 \neq 0$ である場合，制御器 u_1 を以下のように決定する．

$$u_1 = \frac{mg}{\cos x_7 \cos x_9} - \frac{m\hat{U}_1}{\cos x_7 \cos x_9} \tag{3.40}$$

このとき，式 (3.39) は次のように書き換えられる．

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_6 \\ \hat{U}_1 \end{bmatrix} \tag{3.41}$$

式 (3.39) を式 (3.41) のように変形すると，正の定数ゲイン k_4，k_5 を用いて $\hat{U}_1 = k_4(x_5 - x_5^{\mathrm{d}}) + k_5 x_6$ とすることで系を線形化でき，高度を安定させることが可能となる．ただし，$\cos x_7 \cos x_9 = 0$ に近い場合には，式 (3.40) がゼロ除算となり特異となる．よって本研究においてはゼロ除算を回避するため $\phi < \frac{\pi}{2}$，$\theta < \frac{\pi}{2}$ の範囲で制御を行うものとする．

以上をまとめると，クワッドロータの z 方向の位置と 3 つの姿勢角を制御する場合の制御入力 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}} = [u_{\mathrm{c1}}\ u_{\mathrm{c2}}\ u_{\mathrm{c3}}\ u_{\mathrm{c4}}\ ]^{\mathrm{T}}$ はそれぞれ以下のようになる．

$$\begin{cases} u_{\mathrm{c1}} = \dfrac{mg}{\cos\phi\cos\theta} - \dfrac{m\hat{U}_1}{\cos\phi\cos\theta} \\ u_{\mathrm{c2}} = -\dfrac{I_{\mathrm{x}}}{l}(\phi - \phi^{\mathrm{d}}) - k_1\dot{\phi} \\ u_{\mathrm{c3}} = -\dfrac{I_{\mathrm{y}}}{l}(\theta - \theta^{\mathrm{d}}) - k_2\dot{\theta} \\ u_{\mathrm{c4}} = -I_{\mathrm{z}}(\psi - \psi^{\mathrm{d}}) - k_3\dot{\psi} \end{cases} \tag{3.42}$$

ただし，$\hat{U}$ は，

$$\hat{U} = k_4(z - z^{\mathrm{d}}) + k_5\dot{z} \tag{3.43}$$

である．

3.4.2 キノダイナミック制御入力

本節では，質点のための制御入力をクワッドロータに適用可能な制御入力 $\boldsymbol{U} = \boldsymbol{u}_{\mathrm{c}} + \Delta\boldsymbol{u}$ へ拡張する．ここで，$\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}$ は前節において述べた姿勢および高度を制御するための非ホロノミック制御に基づく制御入力であり，$\Delta\boldsymbol{u} = [\Delta u_1\ \Delta u_2\ \Delta u_3\ \Delta u_4\ ]^{\mathrm{T}}$ は

キノダイナミック動作計画を実現するために付加する HPF と制動力から構成される制御入力である．

クワッドロータの機体の座標をここでは新たに $\boldsymbol{x} = [x\ y\ z]^{\mathrm{T}}$，HPF の勾配 $\nabla V(\boldsymbol{x}) = [f_{\mathrm{x}}\ f_{\mathrm{y}}\ f_{\mathrm{z}}]^{\mathrm{T}}$ とするとき，粘性制動力を用いたキノダイナミック動作計画による制御入力 $\Delta\boldsymbol{u}$ は以下のように拡張できる．

$$\Delta\boldsymbol{u} = -B_{\mathrm{c}}\dot{\boldsymbol{x}} - K_{\mathrm{v}}\nabla V(\boldsymbol{x}) \tag{3.44}$$

ただし，$B_{\mathrm{c}} \in \mathfrak{R}^{4\times3}$，$K_{\mathrm{v}} \in \mathfrak{R}^{4\times3}$ はそれぞれ速度選択ゲイン行列，HPF の勾配選択ゲイン行列である．

一方，NADF を用いたキノダイナミック動作計画に基づく制御入力 $\Delta\boldsymbol{u}$ は，$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) = [h_{\mathrm{x}}\ h_{\mathrm{y}}\ h_{\mathrm{z}}]^{\mathrm{T}}$ とするとき，以下のように拡張できる．

$$\Delta\boldsymbol{u} = -B_{\mathrm{d}}\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - K_{\mathrm{v}}\nabla V(\boldsymbol{x}) \tag{3.45}$$

ただし，$B_{\mathrm{d}} \in \mathfrak{R}^{4\times3}$ は NADF 選択ゲイン行列である．

さらに，NADF とクランピング制御を適用したキノダイナミック動作計画に基づく制御入力 $\Delta\boldsymbol{u}$ は，クランピング入力を $\boldsymbol{F}_{\mathrm{C}}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) = [F_{\mathrm{Cx}}\ F_{\mathrm{Cy}}\ F_{\mathrm{Cz}}]^{\mathrm{T}}$ とするとき，以下のように拡張できる．

$$\begin{cases} (\text{if}\ \ \sigma \geq \| \boldsymbol{x}_{\mathrm{T}} - \boldsymbol{x} \| \text{ and } \dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{T}} - \boldsymbol{x}) \leq 0) \\ \quad \Delta\boldsymbol{u} = -B_{\mathrm{c}}\dot{\boldsymbol{x}} - K_{\mathrm{v}}\nabla V(\boldsymbol{x}) - K_{\mathrm{C}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{C}}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) \\ (\text{else}) \\ \quad \Delta\boldsymbol{u} = -B_{\mathrm{d}}\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - K_{\mathrm{v}}\nabla V(\boldsymbol{x}) \end{cases} \tag{3.46}$$

ただし σ はクランピング制御の適用範囲の半径，$\boldsymbol{x}_{\mathrm{T}} = [x_{\mathrm{T}}\ y_{\mathrm{T}}\ z_{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ は目標ベクトル，$K_{\mathrm{C}} \in \mathfrak{R}^{4\times3}$ はクランピング入力選択ゲイン行列である．また，質点の制御系においてはクランピング制御の適用範囲内においても制動力に NADF 関数を用いていたが，NADF 関数を用いた制御では目標点付近において急な減速により目標点へ収束しようとする動きが見受けられた．そこで，実際にクワッドロータを制御する上では急ブレーキをかけることなく滑らかに目標点へと収束することが望ましいため，目標点付近においては常に粘性制動力を用いて機体を減速させることとした．

3.4.3　2 次元空間での各選択ゲインの決定

上述の選択ゲイン行列 B_{c}，B_{d}，K_{v}，K_{C} の非零要素の選択方法は，制御対象の運動特性や元の動力学制御則の形 (特に線形則か非線形則か) に依存する．

クワッドロータは姿勢を傾けることにより位置を移動することができる．例えば X-Y 面の 2 次元空間では，機体を $-\theta$ の方向へ傾ければ機体は X 軸方向へ移動し，機体を ϕ 方向へ傾ければ Y 軸方向へ移動する．そこで，非ホロノミック制御器

により一定の高度でホバリングするクワッドロータの X-Y 平面における制御を考える場合，X-Y 平面における各軸方向の HPF の勾配および各制動力を追加の制御入力 $\Delta\boldsymbol{u}$ として非ホロノミック制御入力におけるロール方向 ϕ の制御入力 u_{c2}，およびピッチ方向 θ の制御入力 u_{c3} に付加することで X-Y 方向の制御を実現できると考えられる．

これらの議論から，X-Y 面での運動に限定するとき，各選択ゲイン行列は以下のようになる．

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_i & 0 \\ b_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad K_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_j & 0 \\ k_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.47}$$

ただし，b_i，$k_j > 0$ であり，$i = \mathrm{c}, \mathrm{d}$ および $j = \mathrm{v}, \mathrm{C}$ とする．

以上より，各選択行列を作用させた後の拡張座標ベクトル $\boldsymbol{x}_\mathrm{e} \in \mathfrak{R}^{4\times3}$，拡張ポテンシャル勾配 $\nabla V_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}) \in \mathfrak{R}^{4\times3}$，拡張 NADF $\boldsymbol{h}_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}})$ および拡張クランピング入力 $\boldsymbol{F}_\mathrm{Ce}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}})$ を導入すると，それぞれの HPF の勾配に基づく制御入力は以下のように書ける．

- 粘性制動力を用いた場合

$$\Delta\boldsymbol{u} = -b_\mathrm{c}\dot{\boldsymbol{x}}_\mathrm{e} - k_\mathrm{v}\nabla V_\mathrm{e}(x) \tag{3.48}$$

  ただし，$\dot{\boldsymbol{x}}_\mathrm{e} = [0\ \dot{y}\ \dot{x}\ 0]^\mathrm{T}$，$\nabla V_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}) = [0\ f_\mathrm{y}\ f_\mathrm{x}\ 0]$ である．

- NADF を適用した場合

$$\Delta\boldsymbol{u} = -b_\mathrm{d}\boldsymbol{h}_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - k_\mathrm{v}\nabla V_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}) \tag{3.49}$$

  ただし，$h_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) = [0\ h_\mathrm{y}\ h_\mathrm{x}\ 0]^\mathrm{T}$ である．

- NADF とクランピング制御を適用した場合

$$\begin{cases} (\text{if}\ \ \sigma > \sqrt{(x_\mathrm{T} - x)^2 + (y_\mathrm{T} - y)^2}\ \text{and}\ \dot{\boldsymbol{x}}^\mathrm{T}(\boldsymbol{x}_\mathrm{T} - \boldsymbol{x}) \leq 0) \\ \quad \Delta\boldsymbol{u} = -b_\mathrm{c}\dot{\boldsymbol{x}}_\mathrm{e} - k_\mathrm{v}\nabla V_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}) - k_\mathrm{C}F_\mathrm{Ce}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) \\ (\text{else}) \\ \quad \Delta\boldsymbol{u} = -b_\mathrm{d}\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - k_\mathrm{v}\nabla V_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}) \end{cases} \tag{3.50}$$

  ただし，$\boldsymbol{F}_\mathrm{Ce}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) = [0\ F_\mathrm{Cy}\ F_\mathrm{Cx}\ 0]^\mathrm{T}$ である．

なお，最終的な制御対象への制御入力 $\boldsymbol{U}$ は以下のようになる．

- 粘性制動力を用いた場合

$$
\begin{cases}
U_1 = \dfrac{mg}{\cos\phi\cos\theta} - \dfrac{m\hat{U}_1}{\cos\phi\cos\theta} \\
U_2 = -\dfrac{I_\mathrm{x}}{l}(\phi - \phi_\mathrm{T}) - k_1\dot{\phi} - b_\mathrm{c}\dot{y} - k_\mathrm{v} f_\mathrm{y} \\
U_3 = -\dfrac{I_\mathrm{y}}{l}(\theta - \theta_\mathrm{T}) - k_2\dot{\theta} - b_\mathrm{c}\dot{x} - k_\mathrm{v} f_\mathrm{x} \\
U_4 = -I_\mathrm{z}(\psi - \psi_\mathrm{T}) - k_3\dot{\psi}
\end{cases}
\tag{3.51}
$$

- NADF を適用した場合

$$
\begin{cases}
U_1 = \dfrac{mg}{\cos\phi\cos\theta} - \dfrac{m\hat{U}_1}{\cos\phi\cos\theta} \\
U_2 = -\dfrac{I_\mathrm{x}}{l}(\phi - \phi_\mathrm{T}) - k_1\dot{\phi} - b_\mathrm{d}h(y,\dot{y}) - k_\mathrm{v} f_\mathrm{y} \\
U_3 = -\dfrac{I_\mathrm{y}}{l}(\theta - \theta_\mathrm{T}) - k_2\dot{\theta} - b_\mathrm{d}h(x,\dot{x}) - k_\mathrm{v} f_\mathrm{x} \\
U_4 = -I_\mathrm{z}(\psi - \psi_\mathrm{T}) - k_3\dot{\psi}
\end{cases}
\tag{3.52}
$$

- NADF とクランピング制御を適用した場合

$$
\begin{cases}
U_1 = \dfrac{mg}{\cos\phi\cos\theta} - \dfrac{m\hat{U}_1}{\cos\phi\cos\theta} \\
\text{(if } \ \sigma > \sqrt{(x_\mathrm{T} - x)^2 + (y_\mathrm{T} - y)^2} \text{ and } \dot{\boldsymbol{x}}^\mathrm{T}(\boldsymbol{x}_\mathrm{T} - \boldsymbol{x}) \leq 0) \\
\quad U_2 = -\dfrac{I_\mathrm{x}}{l}(\phi - \phi_\mathrm{T}) - k_1\dot{\phi} - b_\mathrm{c}\dot{y} - k_\mathrm{v} f_\mathrm{y} - k_\mathrm{C} F_\mathrm{C}(y,\dot{y}) \\
\text{(else)} \\
\quad U_2 = -\dfrac{I_\mathrm{x}}{l}(\phi - \phi_\mathrm{T}) - k_1\dot{\phi} - b_\mathrm{d}h_\mathrm{y} - k_\mathrm{v} f_\mathrm{y} \\
\text{(if } \ \sigma > \sqrt{(x_\mathrm{T} - x)^2 + (y_\mathrm{T} - y)^2} \text{ and } \dot{x}^\mathrm{T}(\boldsymbol{x}_\mathrm{T} - \boldsymbol{x}) \leq 0) \\
\quad U_3 = -\dfrac{I_\mathrm{y}}{l}(\theta - \theta_\mathrm{T}) - k_2\dot{\theta} - b_\mathrm{c}\dot{\boldsymbol{x}} - k_\mathrm{v} f_\mathrm{x} - k_\mathrm{C} F_\mathrm{C}(x,\dot{x}) \\
\text{(else)} \\
\quad U_3 = -\dfrac{I_\mathrm{y}}{l}(\theta - \theta_\mathrm{T}) - k_2\dot{\theta} - b_\mathrm{d}h_\mathrm{x} - k_\mathrm{v} f_\mathrm{x} \\
U_4 = -I_\mathrm{z}(\psi - \psi_\mathrm{T}) - k_3\dot{\psi}
\end{cases}
\tag{3.53}
$$

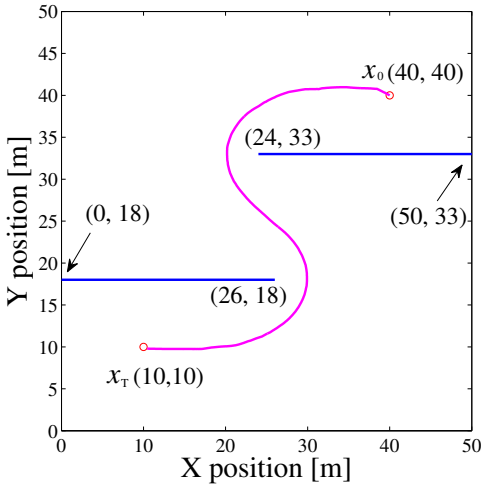


Fig. 3.7: Simulation environment

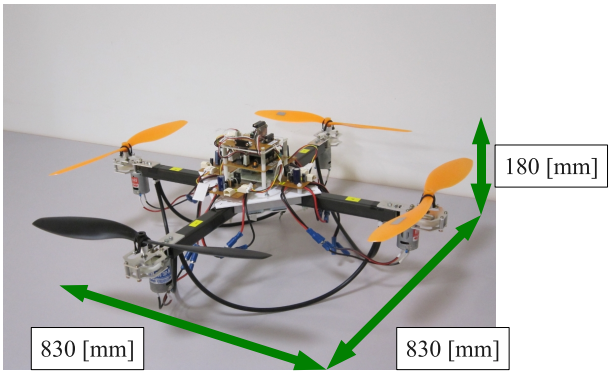


Fig. 3.8: The quadrotor

3.5　数値シミュレーション：3 種類の制御手法の比較

本節では，前章において質点制御を行った環境と全く同じ環境においてクワッドロータの飛行シミュレーションを行い，そのふるまいを確認することで，拡張した 3 種類の制御手法 (粘性制動力を用いた場合，NADF を用いた場合，NADF とクランピング制御を組み合わせた場合) を比較した．

3.5.1　想定環境

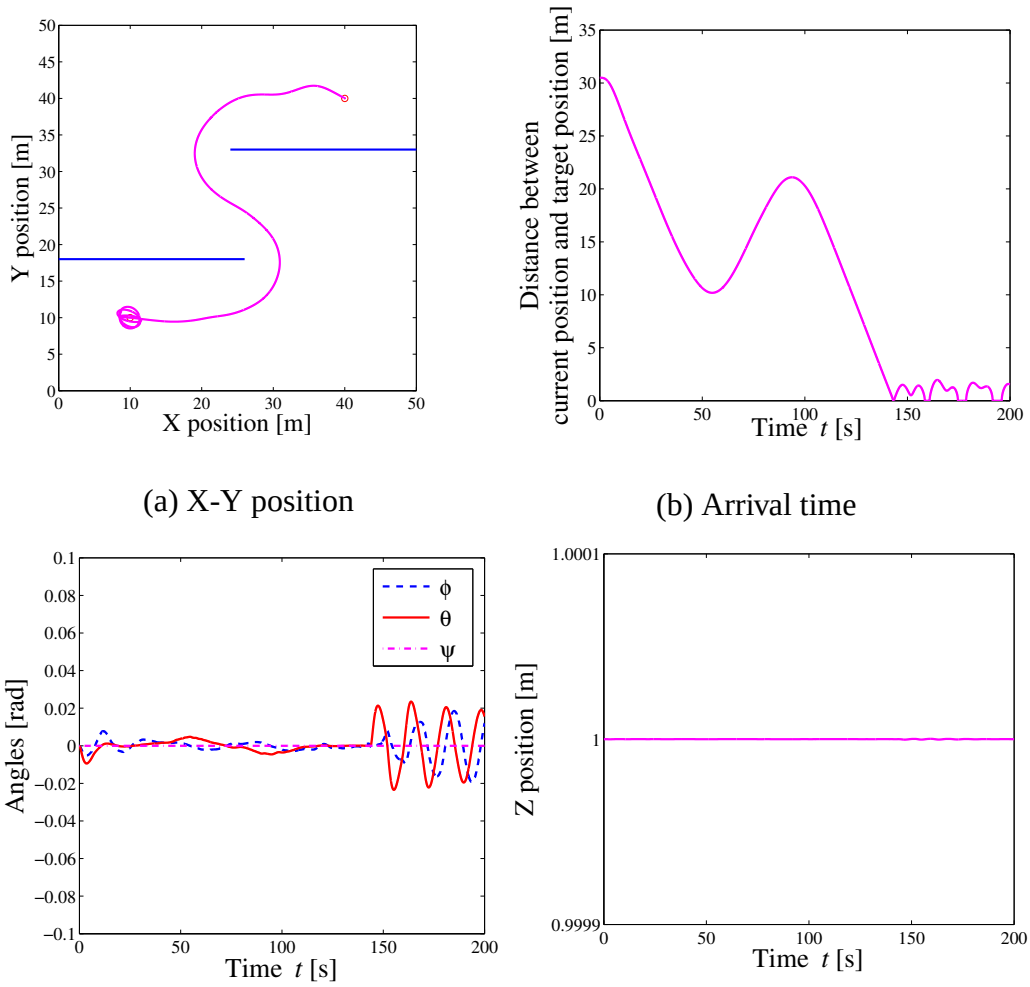
想定する環境内の X-Y 平面における初期位置を図 3.7 に示す．環境内には 2 つの壁が障害物として配置されている．図中に描画されている s 字型の軌道は，HPF の勾配を用いて算出した運動学的な軌道である．本シミュレーションでは，クワッ

Table 3.1: Model parameters for the quadrotor

Parameter	Description	Value	Unit
g	Gravitational acceleration	9.80665	m/s^2
m	Mass	1.3	kg
l	Distance	0.248	m
I_x	Roll inertia	0.01467	$kg{\cdot}m^2$
I_y	Pitch inertia	0.01467	$kg{\cdot}m^2$
I_z	Yaw inertia	0.02331	$kg{\cdot}m^2$
J_r	Rotor inertia	$175.69{\times}10^{-6}$	$kg{\cdot}m^2$
b	Thrust factor	0.0000434	
d	Drag factor	0.000002188	

Table 3.2: Control gains for the quadrotor

Gain	Value	Gain	Value
k_1	0.015	k_2	0.015
k_3	0.007	k_4	10.0
k_5	25.0	k_v	0.001
b_c	0.002	b_d	0.002
k_C	0.004	σ	10



(a) X-Y position

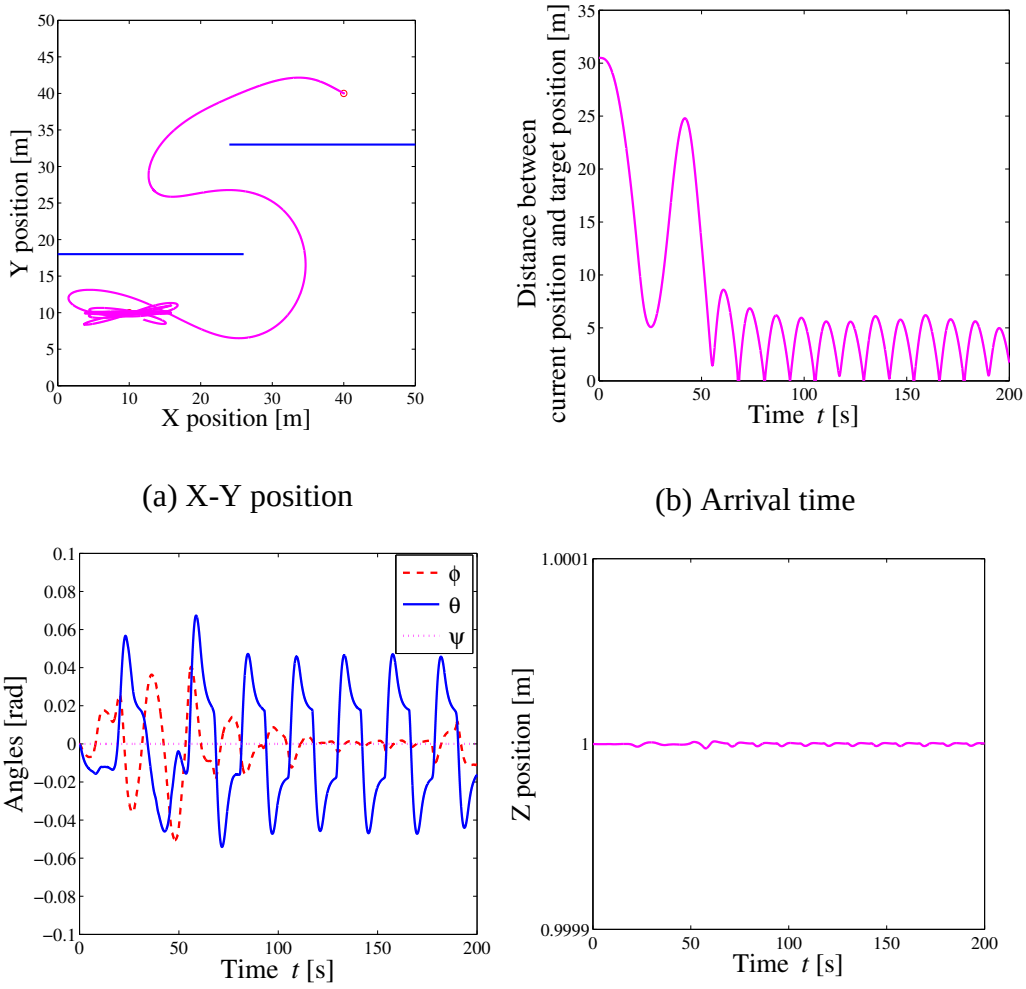
(b) Arrival time

(c) Angles

(d) Z position

Fig. 3.9: Results with viscous damping forces

ドローターが $z = 1$ [m] の高さを保ちながら初期状態 $(x_0, y_0, z_0) = (40, 40, 1)$，から目標点 $(x_T, y_T, z_T) = (10, 10, 1)$ まで移動する．初期姿勢は $(\phi, \theta, \psi) = (0, 0, 0)$ とし，目標姿勢は常に $(\phi_T, \theta_T, \psi_T) = (0, 0, 0)$ として与える．制御対象のクワッドローターは，本研究室において開発された図 3.8 の機体を想定する．ただし，設定したパラメータを表 3.1 に示し，推力係数 b および抗力係数 d は実機を用いた予備実験から求められた値である．このとき，提案したの 3 つの制御入力 (式 (3.51)，式 (3.52)，式 (3.53)) をそれぞれ用いた場合のクワッドローターのふるまいを比較する．なお，各ゲインは経験則より表 3.2 のように設定した．



(a) X-Y position

(b) Arrival time

(c) Angles

(d) Z position

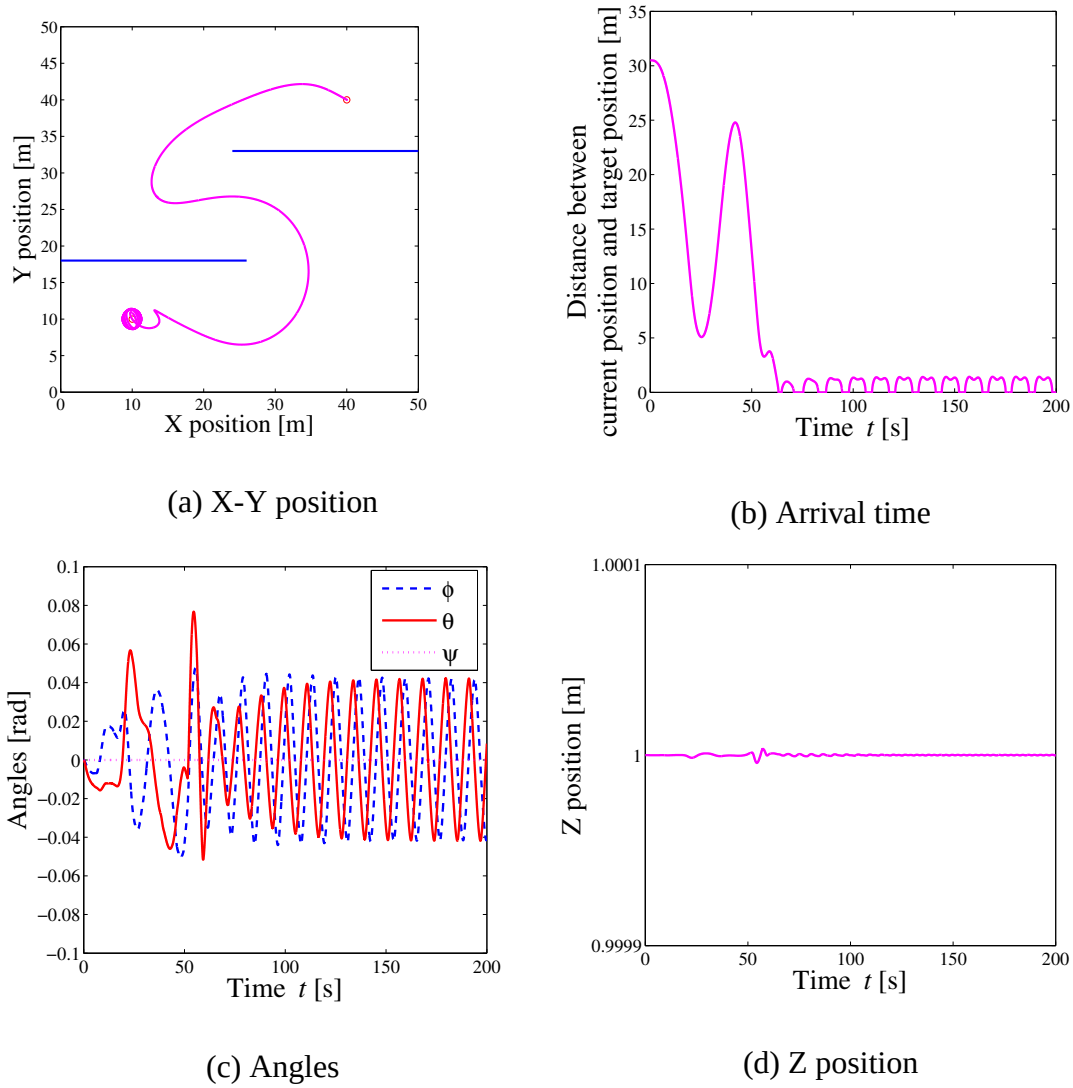
Fig. 3.10: Results with NADFs

3.5.2 シミュレーション結果

結果を図 3.9〜3.11 に示す．図 3.9 は粘性項を用いて制御した場合の X-Y 平面における軌道，z 軸方向の位置（高さ），および状態を示したグラフである．同様に，図 3.10 は NADF を用いて制御した場合，図 3.11 は NADF とクランピング制御を用いて制御した場合のグラフである．

3.5.3 考察

図 3.9〜3.11 (a) の X-Y 平面の軌道より，全ての制御器が障害物を避けながらクワッドロータを目標点へ誘導可能であることが確認できた．また，図 3.9〜3.11 の



(a) X-Y position

(b) Arrival time

(c) Angles

(d) Z position

Fig. 3.11: Results with the combination of NADFs and clamping control

z 軸方向のグラフより，いずれの制御器を用いた場合にも z 軸方向のぶれは極めて少なく，高度を維持しながら移動できていることが確認できた．また，どの制御入力を用いた場合にも ϕ，θ，ψ の角度は ±0.1 [deg] という現実的な範囲に収まっていた．以上より，従来の質点を想定したキノダイナミック制御を応用することでクワッドロータにもキノダイナミック制御が適用可能であることを示した．3 種類の X-Y 平面における軌道を比較すると，粘性項を用いた場合の軌道が最も運動学的な軌道に近い．しかしながら，粘性項を用いた場合と NADF を用いた場合の到達時間を比較すると NADF を用いた場合の方がおよそ 3 倍早く目標点付近へと到達している (図 3.9 (b) と 図 3.10 (b) 参照)．これは，粘性項を用いた制御では常に速度を落とすことで軌道を維持しているのに対し，NADF を用いた制御では現在の

速度方向を確認し，不必要な力のみを抑制することで効率の良い移動が実現したためと考えられる．一方で，目標点付近においては，NADF を用いた場合において顕著な振動が生じている．目標点付近における振動は，クランピング制御を適用することで抑制が可能であったが，制御対象を目標点に静止させるには至っていない．これは，質点制御に比べてクワッドロータの姿勢制御では応答に遅延があることが原因であると考えられる．以上より，提案した制御入力を用いてクワッドロータのキノダイナミック動作計画が可能であること，NADF を用いることで粘性制動力を用いる場合よりも素早く目標点へ移動可能であること，また，クランピング制御を用いることでオーバーシュートを抑制できることを確認した．

3.6 数値シミュレーション：異なる環境における振る舞いの比較

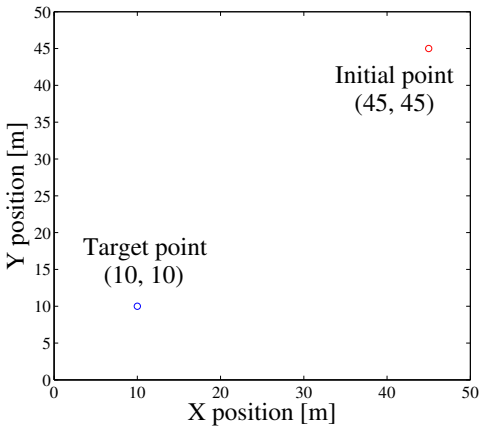
前節では，前章において質点を誘導した環境と全く同じ環境において NADF およびクランピング制御の有用性を検証した．本節では，前節における環境を含む 4 種類の異なる環境においても NADF とクランピング制御の組み合わせを適用したキノダイナミック制御を用いることでクワッドロータが障害物を回避しながら任意の目標点へ移動可能であることを MATLAB を用いた数値シミュレーション上で確認する．このとき，参考のために粘性制動力を用いた場合の挙動についてもシミュレーションを行い比較した．

3.6.1 想定環境

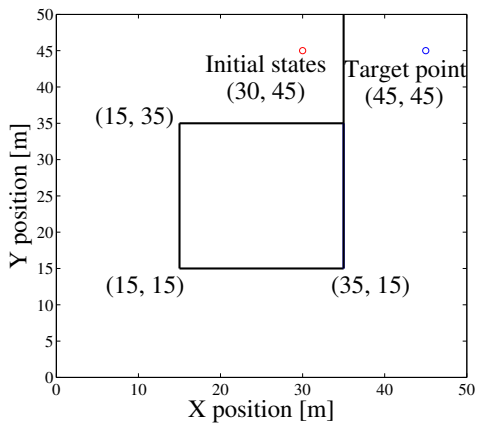
各想定した環境とその環境における初期位置と目標点，障害物の端点 (または頂点) の座標を図 3.12 に示す．環境 1 においては障害物が存在しないが，環境 2〜4 においては環境内に複数の障害物（壁）が存在する．本シミュレーションでは，前節におけるシミュレーションと同様にクワッドロータが $z = 1$ [m] の高さを保ちながらそれぞれの環境内を初期位置 (x_0, y_0, z_0)，から目標点 $(x_\mathrm{T}, y_\mathrm{T}, z_\mathrm{T})$ まで移動する．初期姿勢は $(\phi, \theta, \psi) = (0, 0, 0)$ とし，目標姿勢は常に $(\phi_\mathrm{T}, \theta_\mathrm{T}, \psi_\mathrm{T}) = (0, 0, 0)$ として与える．制御対象のクワッドロータは，本研究室において開発された図 3.8 の機体を想定する．パラメータは前節におけるシミュレーションと同様に表 3.1 のものを用いる．

3.6.2 シミュレーション結果

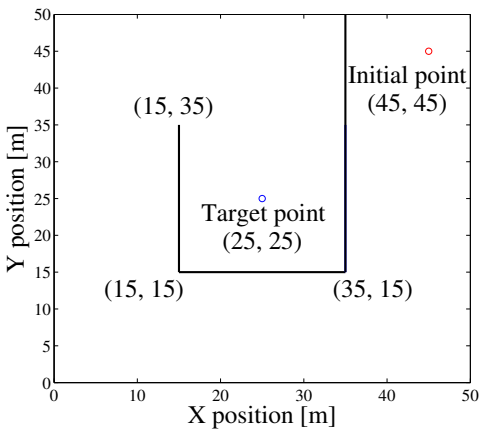
結果を図 3.13〜図 3.15 に示す．図 3.13 (a)，(c) および図 3.14 (e)，(g) 中のピンク色の実線はそれぞれの環境におけるクワッドロータの X-Y 平面上の移動軌跡である．また，赤丸は初期位置，青丸は目標位置である．図 3.13 (b)，(d) および



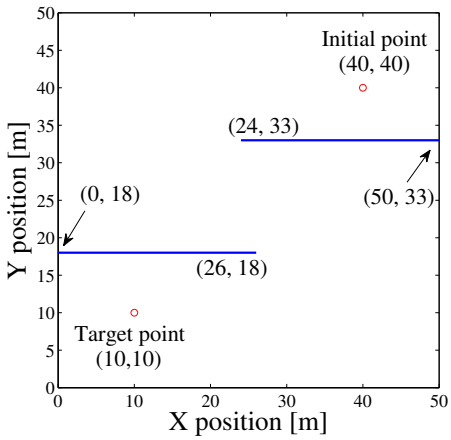
(a) Environment 1



(b) Environment 2

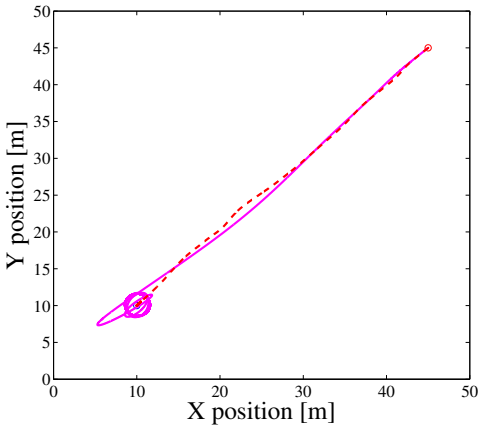


(c) Environment 3

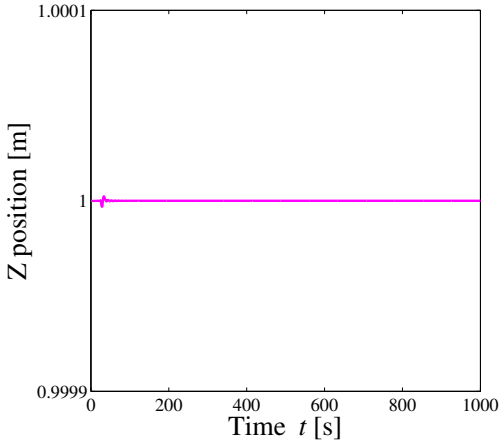


(d) Environment 4

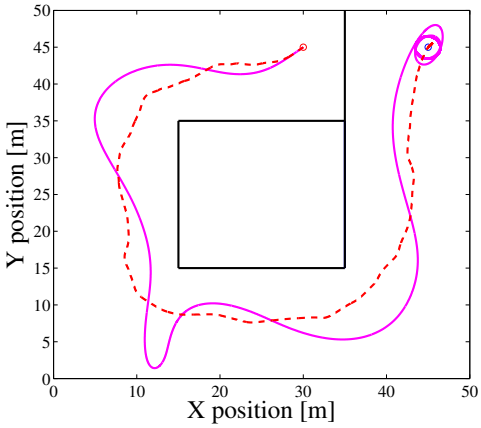
Fig. 3.12: Simulation environments



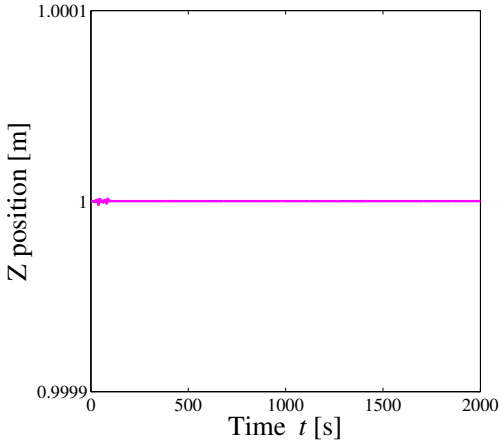
(a) Environment 1



(b) Environment 1

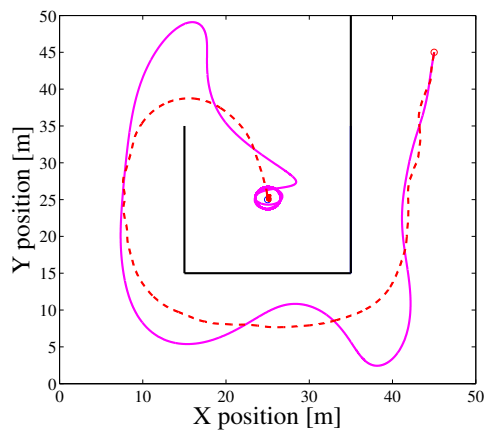


(c) Environment 2

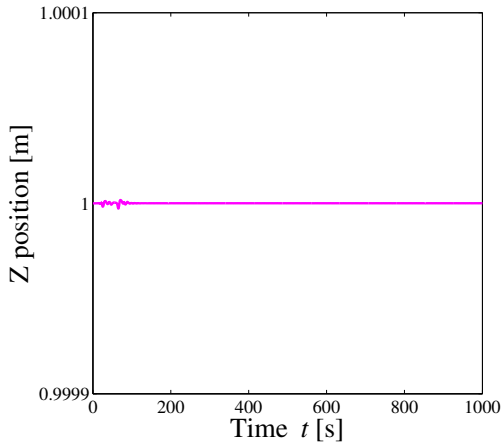


(d) Environment 2

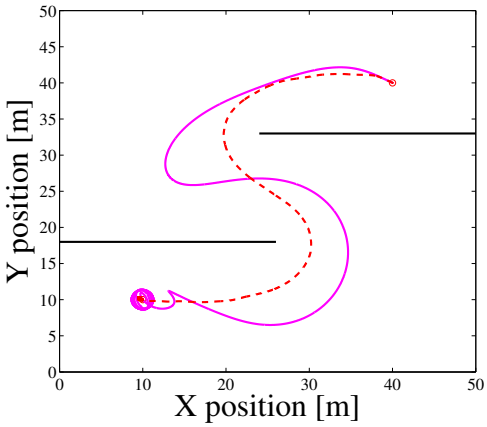
Fig. 3.13: Trajectory and altitude of the quadrotor for environments 1 and 2



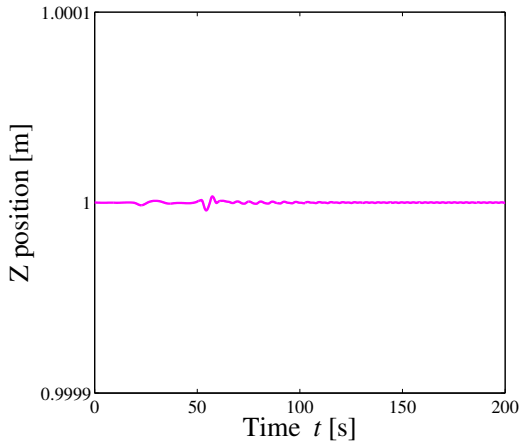
(e) Environment 3



(f) Environment 3

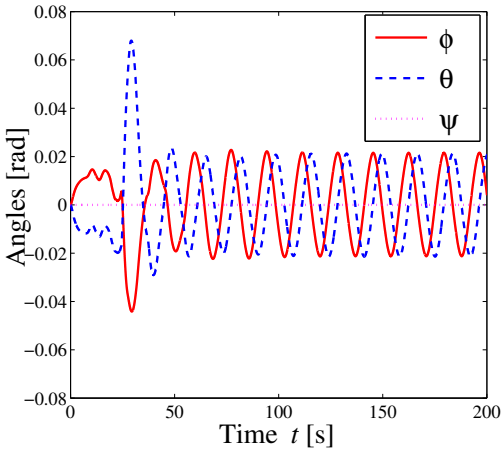


(g) Environment 4

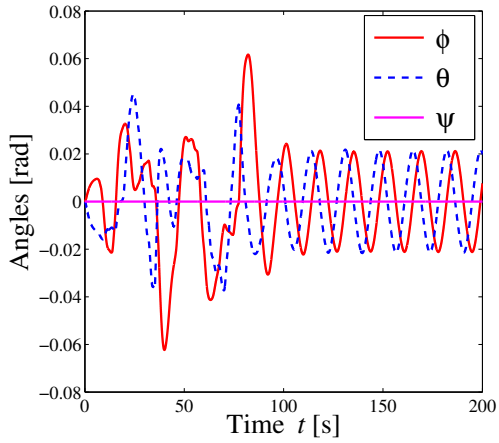


(h) Environment 4

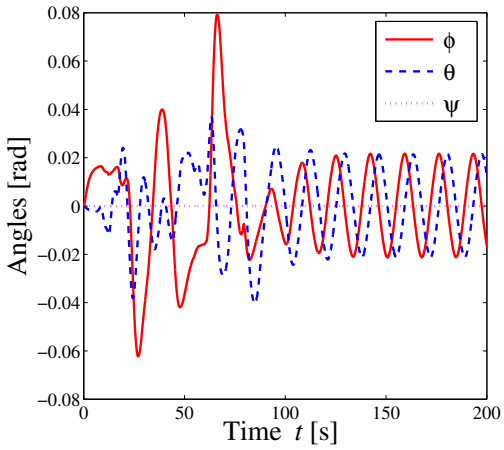
Fig. 3.14: Trajectory and altitude of the quadrotor for environments 3 and 4



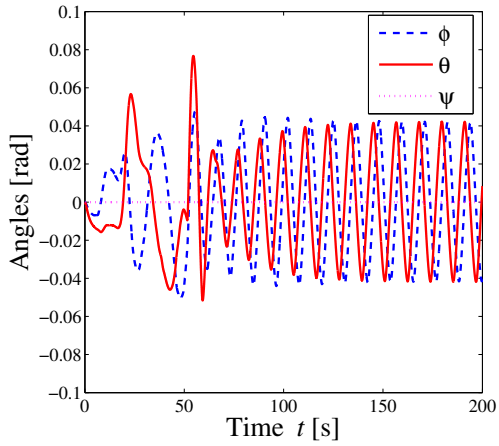
(a) Environment 1



(b) Environment 2



(c) Environment 3



(d) Environment 4

Fig. 3.15: Attitude of the quadrotor in each environment when using the combination of NADFs and clamping control

Table 3.3: Arrival time

	Arrival time [s]	
	The combination of NADFs and clamping control	Viscous damping forces
Environment 1	36.09	492.87
Environment 2	80.60	1135.76
Environment 3	98.22	1133.30
Environment 4	60.83	674.98

図 3.14 (f)，(h) は時間軸に対する z 方向の位置 (機体の高度) を表している．図 3.15 は各環境中を飛行した際の機体の姿勢角 (ϕ, θ, ψ) の変化を表している．表 3.3 は各環境において NADF とクランピング制御の組み合わせを用いた場合と粘性制動力を用いた場合の目標点から半径 2 [m] 以内の位置に到達した時間である．

3.6.3 考察

図 3.13，3.14 より，提案したシステムを用いてクワッドロータを一定高度 (z = 1 [m]) に保ちながら目標点へと誘導できることが確認できた．このとき，粘性制動力を使用した場合の方が精度よく移動できているかのように見えるが，これは粘性制動力が機体を常に減速させ，ゆっくりと移動させているためである．実際に，表 3.3 より，NADF とクランピング制御の組み合わせを用いた場合には，粘性制動力を用いた場合に比べて約 10 分の 1 の時間で目標点付近へ到達できていることが確認できる．また，NADF とクランピング制御の組み合わせを用いてすばやく移動した場合においても，図 3.15 からわかるように機体の傾きは常に ±0.1 [rad] 以内に収まっている．よって，目標点へ到達するまでほぼ傾くことなく安定した姿勢のまま移動できていることがわかる．以上からクワッドロータへ制御対象を拡張した場合においても，無駄な減速を抑え素早い移動が可能となるため，NADF とクランピング制御の組み合わせの適用は有効であるといえる．しかしながら，NADF とクランピング制御の組み合わせを用いた場合，目標点付近に到達後に姿勢を保つことができず，目標点の周辺を旋回する結果となっている．これは，目標点付近では機体を常に減速する制御に切り替えてはいるものの，速度を落とし切れなかったことが原因であると考えられる．この現象を解決し，安定した飛行を実現するには，NADF そのものやクランピング制御にかかる各ゲインを最適化する必要があると考えられる．

3.7　まとめ

本研究では，クワッドロータのキノダイナミック動作計画の実現を目的としてHPF と NADF を組み合わせた制御の拡張を提案した．このとき，非ホロノミック制御とキノダイナミック制御とを合成することでクワッドロータのキノダイナミック動作計画が可能であることをシミュレーションを通して確認した．また，シミュレーションにおいて制動力に粘性制動力を用いた場合と，Masoud の提案した NADF を用いた場合とを比較し，NADF がクワッドロータの制御においても有用であることを確認した．さらに，クランピング制御を適用することでオーバーシュートの抑制が可能であることを確認した．キノダイナミック動作計画のための制御入力には多くのゲインが存在するが，現在はそのすべてを経験則などの試行錯誤によって決定している．よって，今後の課題としては各ゲインを何らかの最適化手法を用いて最適化することがあげられる．ゲインを最適化することにより，オーバーシュートの抑制や，より効率的な移動が期待できるものと思われる．

第4章　GAを用いたゲイン最適化

4.1　本章の概要

前章において述べたクワッドロータのためのキノダイナミック動作計画に用いられる制御器には複数のゲインが含まれており，それらが互いに干渉し合っているため，手動で最適なゲインを見つけることは困難である．そこで本章では提案した制御器に含まれるゲインを遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を用いて最適化する．また，飛行シミュレーションを通して，GA により選択されたゲインの妥当性を検証する．このとき，GA による最適化を行う際に使用した学習環境と異なる環境においても飛行シミュレーションを行い，学習環境以外でもクワッドロータを任意の目標位置まで誘導可能であることを実証する．以下に GA を用いたゲイン最適化の手法，および GA により最適化されたゲインを用いたクワッドロータの飛行シミュレーションについて述べる．

4.2　GA を用いたゲイン最適化の流れ

前章において，NADF とクランピング制御を組み合わせた式 (3.53) を用いることでクワッドロータを効率的に制御することが示されたが，提案した制御入力には複数のゲインが存在している．これらのゲインは互いに干渉し合っており，手作業で最適な値を見つけ出すのは困難である．そこで本章では GA[(80)–(82)] を用いて制御入力式 (3.53) に含まれるゲインの最適化を行う．探索するゲインは，式 (3.53) における b_{c}，b_{d}，k_{v}，k_{C} の 4 つである．ただし，クワッドロータを安定して飛行させるため，並進移動のための制御入力式 (3.53) の結果は，姿勢維持のための制御入力式 (3.42) の結果よりも小さい値である必要がある．よって，本章において探索する式 (3.53) に含まれるゲインは，姿勢制御のための制御式に含まれるゲインより小さい値をとることが望ましい．そこで表 3.2 に示した k_1〜k_5 の値および第 3 章におけるシミュレーション結果からの知見から，ゲインの探索範囲を 0.00001 から 0.00999 に設定した．このとき，各個体の染色体は各ゲインをつなげてビット変換されたものであり図 4.1 のようになる．

個体の評価には，理想軌道からの RMS 誤差 ϵ_{e}，制限時間内に飛行した距離 L，および目標点へ到達した時刻 t_{r} を用いる．理想軌道には，HPF の勾配から算出される運動学的な軌道を使用する．これらを考慮した評価式は以下のようになる．

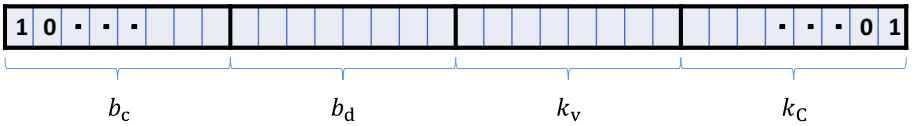


Fig. 4.1: The chrome of the individual

$$V = \frac{k_{e1}}{\epsilon_e + \epsilon} + k_{e2}L + \frac{k_{e3}}{t_r} \tag{4.1}$$

ただし，k_{e1}，k_{e2}，k_{e3} は重み係数であり，ϵ はゼロ除算を防ぐための値である．この評価関数の値が最大になる個体を GA を用いて探索することで，クワッドローターの理想的な飛行を実現するためのゲインを決定する．

本章では，以下の流れの GA を実装する．

1. 図 4.1 に示される構造の遺伝子を持つ初期個体をあらかじめ設定しておいた任意の個数だけランダムで生成する
2. 評価関数により，生成した各個体の評価値をそれぞれ計算する
3. 評価の良い個体を上から順に，設定しておいた個数だけそのまま次世代へコピーする (エリート保存)
4. あらかじめ設定しておいた確率で以下の 3 種類の動作のうちどれかを行いその結果を次世代の個体として保存する
   - 個体を指定した方法で 2 つ選択して指定した方法で交叉を行う
   - 個体を 1 つ選択して突然変異を行う
   - 個体を 1 つ選択してそのままコピーする
5. 次世代の個体数が初期個体と同じ数になるまで上記の動作を繰り返す
6. 次世代の個体数が初期個体と同じ個数になった時点で世代を更新する
7. 2. の動作に戻り，処理を繰り返す.
8. 指定した世代まで更新が進んだところで，個体の中から最も適応度の高い個体を最終的な解とする

GA における処理の流れを図 4.2 に示す.

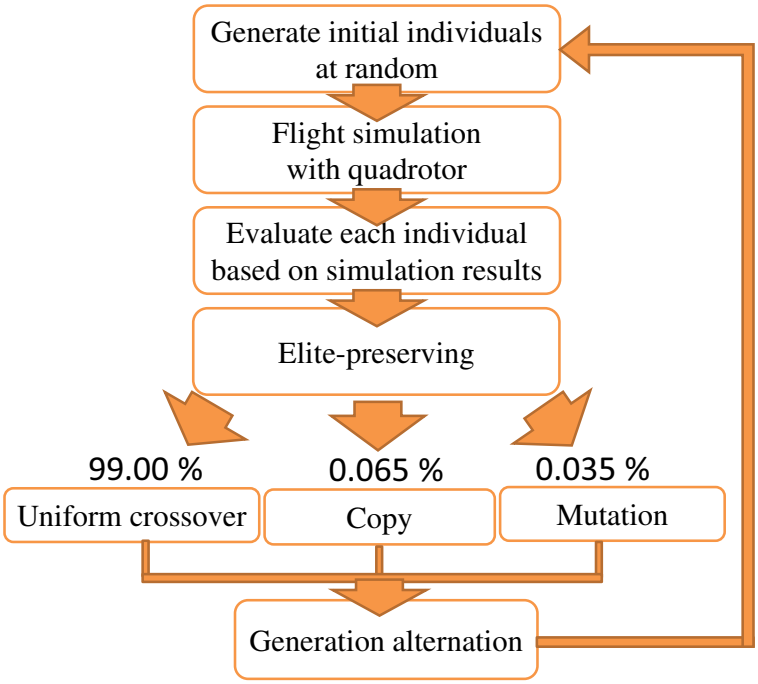


Fig. 4.2: The processing flow of GA

4.3 実験

本実験では，GA を用いてクワッドロータのためのキノダイナミック動作計画における最適なゲインの探索を行う．このとき，得られたゲインによって実際にクワッドロータが目標点へ到達可能となることをシミュレーション上で確認する．また，探索時と異なる環境においても最適化されたゲインを用いることで飛行が可能となることを示す．

4.3.1 実験 1: GA を用いたゲイン最適化

まず，GA を用いてクワッドロータがキノダイナミック動作計画を用いて環境内を移動する際に最適なゲインの探索を行う．

探索条件と環境

GA について，親の選択はトーナメント選択によって行い，交叉は一様交叉とした．トーナメント選択はあらかじめ決めた数の個体を全体の中からランダムで取り出し，取り出した中で最も評価値の高い個体を選択する手法である．また，一様交叉は個体の持つ遺伝子に対してランダムにマスクを作成し，そのマスクに沿っ

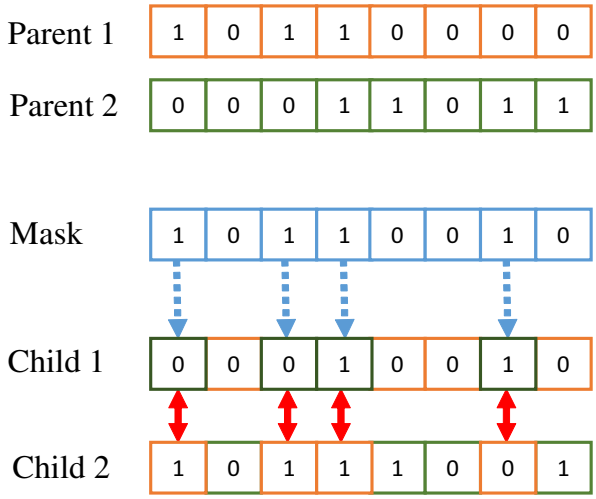


Fig. 4.3: Uniform Crossover

て 2 分の 1 の確率で交叉を行う手法である．一様交叉の模式図を図 4.3 に示す．本実験における GA では突然変異を採用する．突然変異では，選ばれた染色体を個体の染色体長の逆数の確率でビット反転するものとした．本実験では 1 世代の個体数は 50，エリートは 5 体保存するものとする．また，経験則から 1 回の飛行シミュレーションは 200 秒で打ち切りとした．このとき，式 (4.1) における評価関数の重み係数はそれぞれ $k_{e1} = 0.5$，$k_{e2} = 10.0$，$k_{e3} = 100.0$ とし，ゲイン b_c，b_d，k_v，k_C の最適な値を探索した．ただし，$\epsilon = 0.001$ とした．飛行シミュレーションにおいて，クワッドロータの動作モデルには，前述した式 (3.30) を用いる．学習環境および学習環境内の X-Y 平面上における機体の初期位置は図 4.4 に示す．学習環境内には 2 つの壁が障害物として存在する．図中の S 字型の線は，HPF の勾配から算出された運動学的な軌道である．

本実験では，クワッドロータが $z = 1$ [m] の高さを保ちながら初期状態 $(x_0, y_0, z_0) = (40, 40, 1)$ から目標点 $(x_T, y_T, z_T) = (10, 10, 1)$ まで移動する．初期姿勢は $(\phi, \theta, \psi) = (0, 0, 0)$ とし，目標姿勢は常に $(\phi_T, \theta_T, \psi_T) = (0, 0, 0)$ として与える．制御対象のクワッドロータは，本研究室において開発された図 3.8 の機体を想定する．推力係数 b および抗力係数 d は実機を用いた予備実験の結果より表 3.1 のように計算されている．また，非ホロノミック制御入力に用いる各ゲインは経験則より表 3.2 のように設定した．

結果

GA を 100 世代更新し，得られたゲインは $b_c = 0.0044$, $b_d = 0.0089$, $k_v = 0.00006$, $k_C = 0.0005$ であった．図 4.5 はこれらのゲインを用いて飛行シミュレーションを

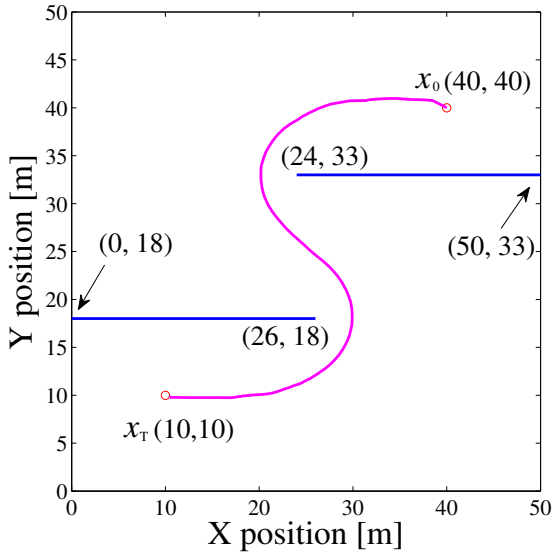
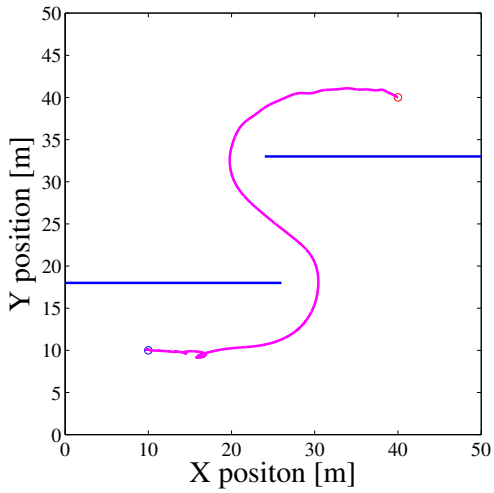


Fig. 4.4: Simulation environment for case 1

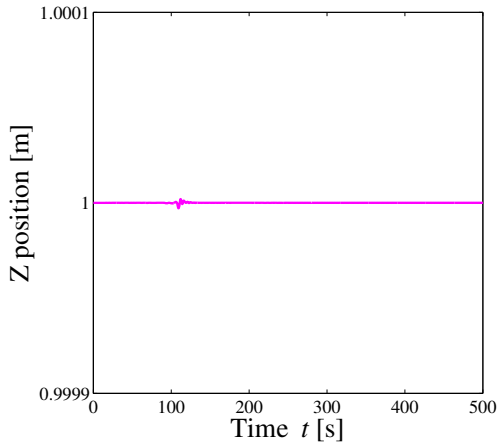
行ったときの結果である．図 4.5 (a) はクワッドロータの X-Y 平面上の軌跡，図 4.5 (b) はクワッドロータの高度，図 4.5 (c) はクワッドロータの姿勢，図 4.5 (d) はクワッドロータの位置と目標位置との距離を示している．

考察

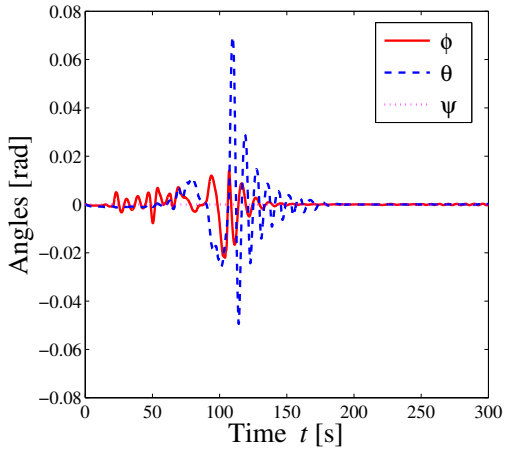
図 4.5 (a) より，GA で探索されたゲインを用いて，クワッドロータは障害物を避けながら目標点へ到達可能であることが確認された．同時に，前章における手動で調整したゲインを用いた場合の実験結果 (図 3.11) に比べ HPF の勾配から導き出された運動学的な軌道に近い軌道上を飛行できていることがわかる．このとき，到達時間は図 3.11 の結果に比べて遅くなっているが，これは GA の評価関数に含まれるゲインにおいて誤差にかかる重みを大きくしているため短時間で目標点へ到達するゲインよりも運動学的な軌道に沿った移動を可能にするゲインが優先して選択されているためである．この評価関数に含まれる重みの選び方によっては運動学的な軌道を外れても短時間で到達可能なゲインを選択することも可能であると考えられる．また，図 4.5 (b) より機体が安定した高度を保ちながら移動できていることもわかる．このとき，図 4.5 (c) より，機体の姿勢は常に ±5 [deg] 以内に収まっている．本実験において想定したクワッドロータは ±20 [deg] 程度の揺れであれば補正して飛行できる仕様であるため，本シミュレーションにおける姿勢角を見る限り安定した飛行が実現できていることがわかる．



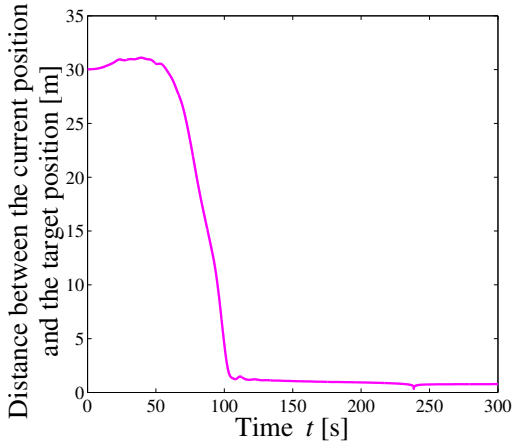
(a) X-Y position



(b) Z position



(c) Attitude



(d) Distance

Fig. 4.5: Simulation results

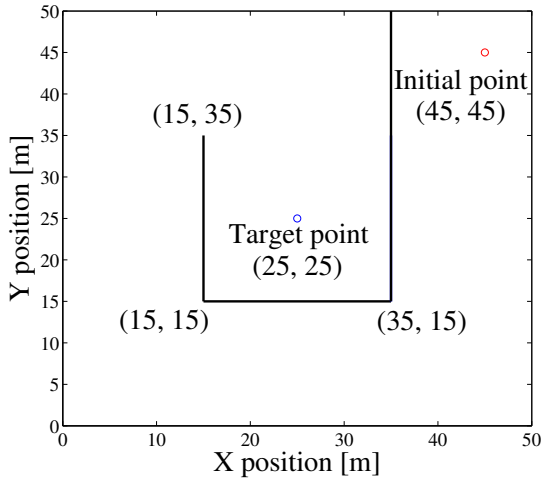


Fig. 4.6: Simulation environment 1 that is unsearched

4.3.2　実験 2：異なる環境におけるゲインの適用

本シミュレーションでは，前述の実験環境 (図 4.4) において最適化されたゲインが異なる環境においても適用可能であるか確認する．

適用環境

図 3.8 のクワッドロータが図 4.6 および図 4.7 に示す環境を飛行する場合を想定する．図 4.6 に示す環境では，環境全体の大きさは学習環境と同じであるが，障害物の配置が異なっている．図 4.7 に示す環境では，環境の 1 辺が学習環境の 10 倍の長さであり，学習環境に比べて非常に広い環境である．また，環境中には 2 つの長方形の物体が障害物として存在している．HPF を算出する際のグリッドサイズは 5×5 [cm] としている．図中の青線で囲まれた部分が障害物，赤線が HPF の勾配を用いて算出した運動学的な軌道である．この 2 つの環境内をそれぞれ初期位置 $(x_0, y_0, z_0) = (45, 45, 1)$ および $(x_0, y_0, z_0) = (450, 450, 1)$ から目標点 $(x_\mathrm{T}, y_\mathrm{T}, z_\mathrm{T}) = (25, 25, 1)$ および $(x_\mathrm{T}, y_\mathrm{T}, z_\mathrm{T}) = (50, 50, 1)$ まで移動することを想定する．本シミュレーションにおいて想定する機体の動力学モデルおよびそのパラメータは前述の実験と同様とする．初期姿勢は $(\phi, \theta, \psi) = (0, 0, 0)$，目標姿勢は $(\phi_\mathrm{T}, \theta_\mathrm{T}, \psi_\mathrm{T}) = (0, 0, 0)$ に設定する．制御器に含まれる各ゲインは前述の実験で得られた通り，$b_\mathrm{c} = 0.0044$, $b_\mathrm{d} = 0.0089$, $k_\mathrm{v} = 0.00006$, $k_\mathrm{C} = 0.0005$ とする．

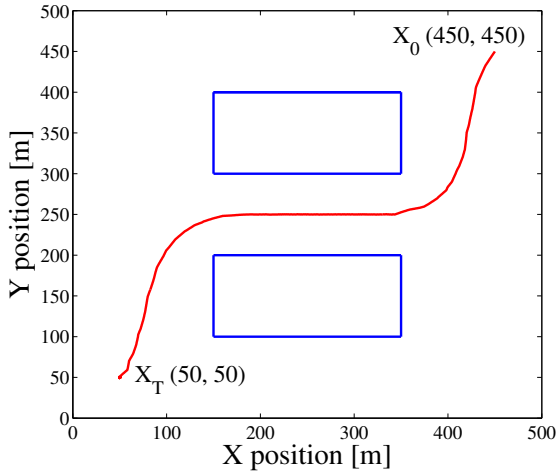


Fig. 4.7: Simulation environment 2 that is unsearched

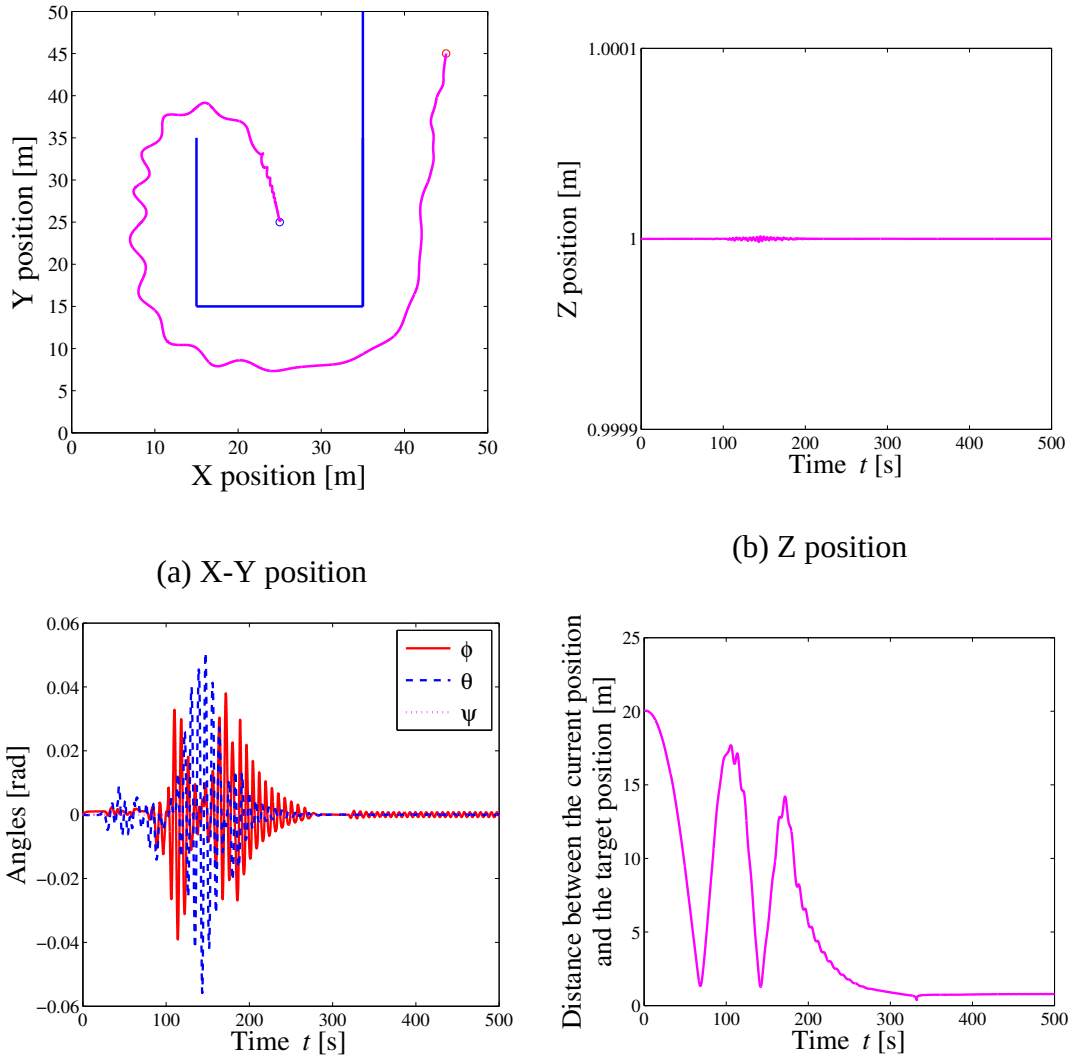
結果

飛行シミュレーションの結果を図 4.8 および図 4.9 に示す．図 4.8(a)，図 4.9(a) に描画されているピンク色の実線は，前述の実験において GA を用いて最適化されたゲインを用いた場合の X-Y 平面上におけるクワッドロータの軌道を示している．図 4.8，図 4.9 の (b) および (c) はクワッドロータの高度 (z 位置) および 3 つの姿勢角を表しており，図 4.8，図 4.9 の (d) はクワッドロータの現在位置と目標点との直線距離を示している．

4.3.3 考察

それぞれ図 4.8，図 4.9 の (a) より，どちらの環境においても前述の実験において最適化されたゲインを用いて，クワッドロータを目標点へ誘導可能であることが確認できた．図 4.8(a) において機体が少し左右に振れる軌道を描いているが，これは学習環境に比べてカーブが緩やかであるため速度が上がり過ぎたために 2 つ目の角を曲がった辺りから振動が発生したと考えられる．しかし，目標点付近ではゆるやかに減速を行い，最終的には目標点へ滑らかに収束できていることが図 4.8(d) より確認できる．また，図 4.9 (a) より，探索環境と大きく異なる環境においても，GA を用いて探索したゲインを用いて，理想的な軌道に近い軌道上を飛行できていることが確認できた．このとき，どちらの環境での飛行シミュレーションにおいても姿勢角の傾きは常に ± 0.08 [rad] 以内に収まっており，目標点到達後も，高度を保ったまま目標点付近に留まっていることが確認できる．

しかしながら，HPF の勾配を計算するためのグリッドサイズを 50×50 [m] の環



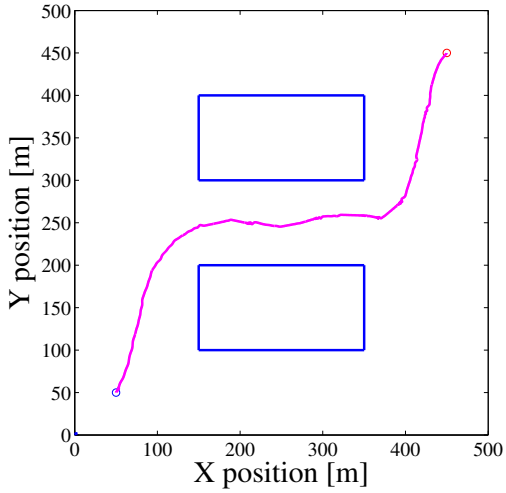
(a) X-Y position

(b) Z position

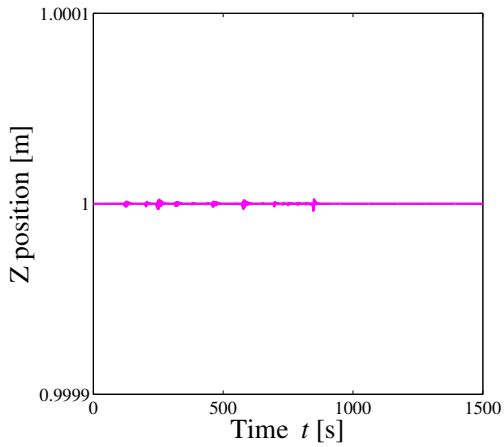
(c) Attitude

(d) Distance

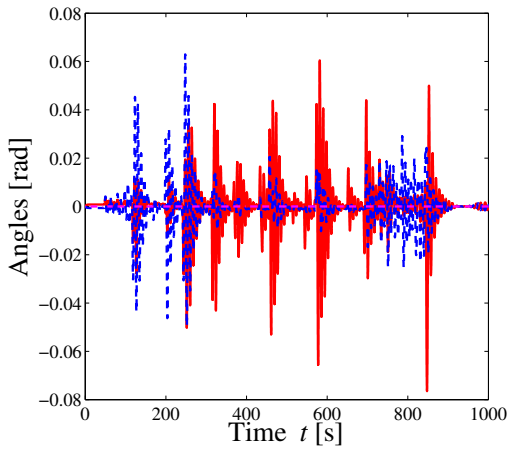
Fig. 4.8: The results of the flight simulation in the case different from the searched environment of GA (shown in Fig. 4.6)



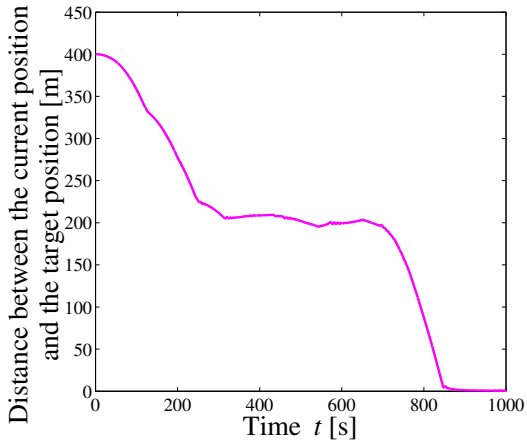
(a) X-Y position



(b) Z position

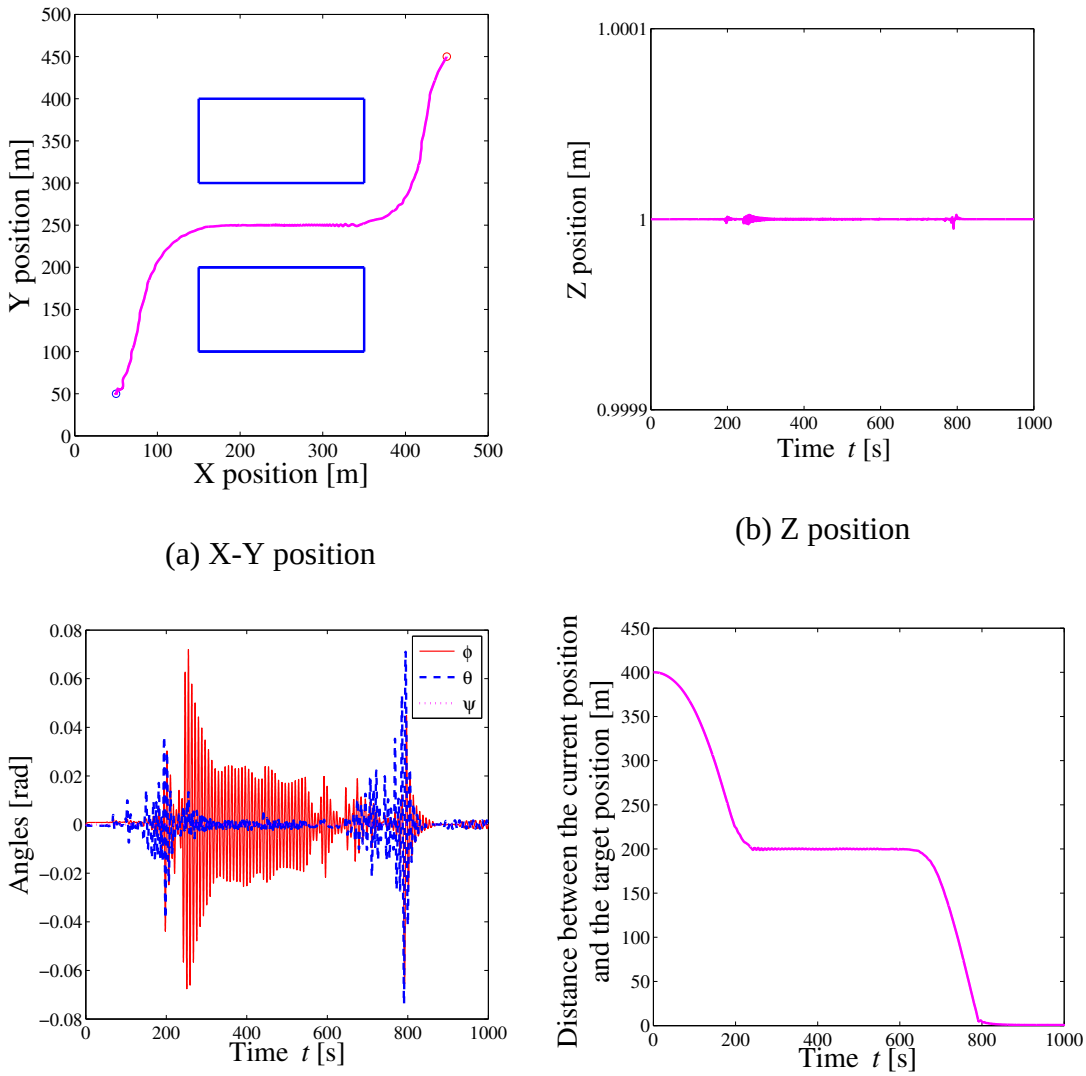


(c) Attitude



(d) Distance

Fig. 4.9: The results of the flight simulation in the case different from the searched environment of GA (shown in Fig. 4.7) with grid size 0.05×0.05 [m]



(a) X-Y position

(b) Z position

(c) Attitude

(d) Distance

Fig. 4.10: The results of the flight simulation in the case different from the searched environment of GA (shown in Fig. 4.7) with grid size 0.5×0.5 [m]

境と同様に 0.05×0.05 [m] に設定した場合，500×500 [m] の環境における勾配を計算するには細かすぎて膨大な時間がかかることが確認された．そこで，グリッドの間隔を 10 倍の 0.5×0.5 [m] に設定し計算を行ったところ，図 4.10 からわかるように元のグリッドの間隔で計算した場合とほぼ同様の結果が確認できた．以上の結果より，GA を用いて探索したゲインは探索環境と異なる環境における飛行にも使用できることが確認できた．一方で，一度に想定する環境の大きさに合わせてグリッドの間隔を自動で調整することも必要であると考えられる．将来的には，障害物の有無を確認してグリッドサイズを調整することも考えられる．例えば，障害物が複数存在し込み入った部分のみグリッドを細かく切って繊細な制御を行い，障害物の存在しない開けた空間においてはグリッドを大きく切って処理時間を短縮するといった処理を実装することも考えられる．

4.4　まとめ

本章では，前章において提案したクワッドロータのキノダイナミック動作計画を実現するための制御入力に含まれるゲインに対して GA を用いた最適化を行った．GA では，トーナメント選択，一様交叉，エリート選択，および突然変異の GA 操作を採用した．また，各個体の持つゲインを用いて障害物の存在する環境における飛行シミュレーションを行い，理想軌道からの RMS 誤差，制限時間内に飛行した距離，および目標点へ到達した時刻を考慮して作成した評価関数を用いて各個体の評価を行った．この結果，GA によって最適化されたゲインを用いることで，クワッドロータを目標点まで自律移動させられることをシミュレーション上で明らかにした．このとき，クワッドロータは高度・姿勢ともに安定した飛行を行っていたことも確認した．更に，最適化されたゲインは GA を用いて探索した環境と異なる環境においても有用であることを検証した．一方で，想定する環境全体の大きさが探索環境と大きく異る場合には，その環境サイズに合わせてグリッドの間隔を調整する必要があることも確認した．

第5章　3次元空間における移動制御への拡張

5.1　本章の概要

前章までの制御手法においては，クワッドロータの姿勢角 ϕ，θ 方向への制御入力にそれぞれ x，y 方向の HPF の勾配ベクトルと制動力を付加することで X-Y 面での 2 次元空間における誘導をおこなっていた．本章では X-Y 平面上での制御に加えて Z 方向の制御を追加することにより，3 次元空間での誘導制御法を構築する．

以下では，X-Y 面上を移動するための制御入力について復習した後，X-Z 面上を移動するための制御入力についての 1 つの制御則を示す．このとき，3 つの 2 次元面上での HPF の勾配を必要に応じて切り替える手法を提案する．さらに，それぞれの 3 つの 2 次元面での HPF の勾配を合成して利用するために，2 つの 2 次元面での HPF の勾配の重複座標軸のものを平均化してその軸方向の勾配とする手法を示す．なお，両手法の有用性はシミュレーションを通して明らかにする．

5.2　各方向へ移動するための制御入力

5.2.1　X-Y 平面上を移動するための制御入力

前章までで説明してきた X-Y 平面上を移動するための制御入力 $\boldsymbol{U}$ は，姿勢と高度を維持するための非ホロノミック制御入力 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}}$ と X-Y 位置を制御する制御入力 $\Delta\boldsymbol{u}$ から構成される． z 方向（高度）および 3 つの姿勢を制御するための非ホロノミック制御入力 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{c}} = [u_{\mathrm{c1}}\ u_{\mathrm{c2}}\ u_{\mathrm{c3}}\ u_{\mathrm{c4}}\ ]^{\mathrm{T}}$ は，前述のとおり以下の式で表される．

$$\begin{cases} u_{\mathrm{c1}} = \dfrac{mg}{\cos\phi\cos\theta} - \dfrac{m\hat{U}_1}{\cos\phi\cos\theta} \\ u_{\mathrm{c2}} = -\dfrac{I_{\mathrm{x}}}{l}(\phi - \phi_{\mathrm{T}}) - k_1\dot{\phi} \\ u_{\mathrm{c3}} = -\dfrac{I_{\mathrm{y}}}{l}(\theta - \theta_{\mathrm{T}}) - k_2\dot{\theta} \\ u_{\mathrm{c4}} = -I_{\mathrm{z}}(\psi - \psi_{\mathrm{T}}) - k_3\dot{\psi} \end{cases} \tag{5.1}$$

ただし，$\hat{U}_1$ は

$$\hat{U}_1 = k_4(z - z_{\mathrm{T}}) + k_5\dot{z} \tag{5.2}$$

とし，k_1〜k_5 は正の定数ゲインであり，z_T は任意の目標高度，$(\phi_\mathrm{T}, \theta_\mathrm{T}, \psi_\mathrm{T})$ は目標姿勢である．

次に，X-Y 位置を制御する制御入力 $\Delta\boldsymbol{u}$ について述べる．$\Delta\boldsymbol{u}$ では θ 及び ϕ 方向の入力に x，y 方向の勾配を加えることで機体を傾け，機体の移動を行う．X-Y 方向の移動には，現在の機体の位置を含む X-Y 平面の HPF を用いる．このとき，NADF とクランピング制御の組み合わせを適用した場合，$\Delta\boldsymbol{u}$ は X-Y 平面上の HPF の勾配を用いて以下のように表せる．

$$\Delta\boldsymbol{u} = \begin{cases} -b_\mathrm{c} \cdot \dot{\boldsymbol{x}}_\mathrm{e} - k_\mathrm{v}\nabla V_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}) - k_\mathrm{C} \cdot \boldsymbol{F}_\mathrm{Ce}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) \\ \qquad \text{if } \ \sigma \geq \sqrt{(x_\mathrm{T} - x)^2 + (y_\mathrm{T} - y)^2} \text{ and } \dot{\boldsymbol{x}}^\mathrm{T}(\boldsymbol{x}_\mathrm{T} - \boldsymbol{x}) \leq 0 \\ -b_\mathrm{d} \cdot \boldsymbol{h}_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) - k_\mathrm{v}\nabla V_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}) \\ \qquad \text{otherwise} \end{cases} \tag{5.3}$$

ただし，b_c，b_d，k_C，k_v はそれぞれ正の定数ゲインである．また，$\boldsymbol{h}_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) = [0\ h_\mathrm{y}\ h_\mathrm{x}\ 0]^\mathrm{T}$，$\dot{\boldsymbol{x}}_\mathrm{e} = [0\ \dot{y}\ \dot{x}\ 0]^\mathrm{T}$，$\nabla V_\mathrm{e}(\boldsymbol{x}) = [0\ f_\mathrm{y}\ f_\mathrm{x}\ 0]^\mathrm{T}$ である．f_x 及び f_y は HPF から算出された x 方向，y 方向の勾配である．式（5.3）において，目標点から半径 σ の範囲内に機体が近づいた段階でクランピング制御 F_Ce を用いた制御式に切り替えている．クランピング制御は，目標点へ確実に収束させるために付加されており，$\boldsymbol{F}_\mathrm{Ce}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) = [0\ F_\mathrm{Cy}\ F_\mathrm{Cx}\ 0]^\mathrm{T}$ である．

5.2.2　X-Z 平面上を移動するための制御入力

X-Z 方向の移動制御には，現在の機体の位置を含む X-Z 平面の HPF を用いる．まず，クワッドロータの姿勢を保つための制御入力 $\boldsymbol{u}_\mathrm{c}$ には式 (5.1) を用いる．ただし，u_c1 は入力線形化により得られた結果であるので，ここでは z 方向の勾配による入力は直接 $\hat{U}_1$ に作用させるものとし，式 (5.2) へ Z 方向の HPF 勾配を k_v 倍して加えると

$$\hat{U}_1 = k_4(z - z_\mathrm{T}) + k_5\dot{z} + k_\mathrm{v} f_\mathrm{z} \tag{5.4}$$

となる．しかし，非ホロノミック入力部の第 1 項の $k_4(z - z_\mathrm{T})$ と HPF の勾配からなる入力項 $k_\mathrm{v} f_\mathrm{z}$ は互いに Z 方向の目標点 z_T に関する情報を含んでいる．このままでは動力学入力と環境の HPF 勾配による入力の両方からの目標点 z_T への移動のための入力寄与を決める必要があり，ゲイン決定が冗長である．そこで，以下では動力学からの Z 方向への位置制御は完了しているとみなし，

$$\hat{U}_1 = k_4 f_\mathrm{z} + k_5\dot{z} \tag{5.5}$$

と簡略化する．ただし，$k_\mathrm{v} = k_4$ とおいた．これにより，目標高度が z 方向の勾配に応じて変化し，HPF に基づいた Z 方向の移動が可能となる．

X 方向へ移動するための制御入力 $\Delta\boldsymbol{u}$ には式 (5.3) を用いる．ただし，X-Z 平面上に生成した HPF からは Y 方向の勾配を算出できないので $f_\mathrm{y} = 0$ である．また，$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}) = [0\ h_\mathrm{y}\ h_\mathrm{x}\ 0]^\mathrm{T}$ とし，Y 方向には常にクランピング制御を付加することで位置を一定に保つ．

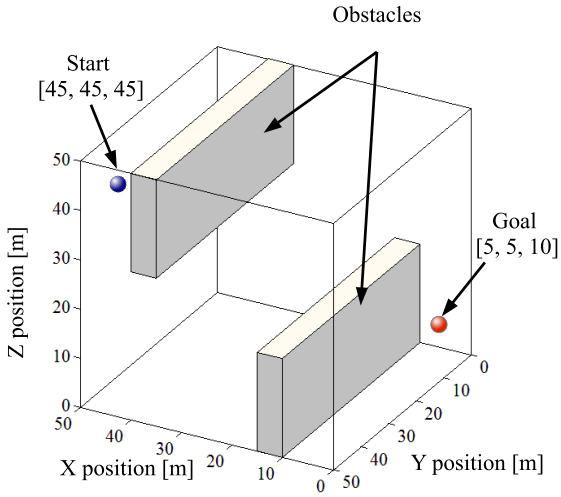


Fig. 5.1: An example environment

5.3 HPF の切り替えを用いた 3 次元空間におけるクワッドローターの誘導

提案手法では，クワッドローターを目標点へ誘導するために 2 次元の HPF を必要に応じて切り替える．まず，現在の機体の位置を含む X-Y 平面上に HPF を生成する．次に，勾配を辿ることで現在の高度 z_0 を保ったまま X-Y 平面上に存在する一時的な目標点 $(x_\mathrm{T}, y_\mathrm{T}, z_0)$ へ到達可能であるかを確認する．到達可能であれば，生成した HPF を用いて一時的な目標点 $(x_\mathrm{T}, y_\mathrm{T}, z_0)$ へ移動する．このとき，目標点へ到達できないことが確認できれば，今度は X-Z 平面上に HPF を生成し，Y 方向の位置 y_0 を保ったまま目標点 $(x_\mathrm{T}, y_0, z_\mathrm{T})$ へ到達可能であるかを確認する．到達可能であれば，生成した HPF を用いて一時的な目標点 $(x_\mathrm{T}, y_0, z_\mathrm{T})$ へ移動する．一時的な目標点へ到達した後は，再び現在の機体の位置と目標点を含む X-Y，X-Z，Y-Z のいずれかの平面上に HPF を生成し，目標点へ移動する．

例として，図 5.1 の環境においてクワッドローターが初期位置 $(45, 45, 45)$ から目標点 $(5, 5, 10)$ へ移動する場合を想定する．このとき，障害物が存在するため初期位置を含む X-Y 平面上において一時的な目標点 $(5, 5, 45)$ へ到達することは不可能である．よって，システムは図 5.2 のように現在位置を含む X-Z 平面上に生成した HPF を用いてまず一時的な目標点 $(5, 45, 10)$ へ誘導する．次に，図 5.3 のように現在位置を含む X-Y 平面上に生成した HPF を用いて目標点 $(5, 5, 10)$ へ移動する．このように，クワッドローターは 2 次元平面に生成した HPF を必要に応じて切り替えることで 3 次元空間内を移動可能となる．

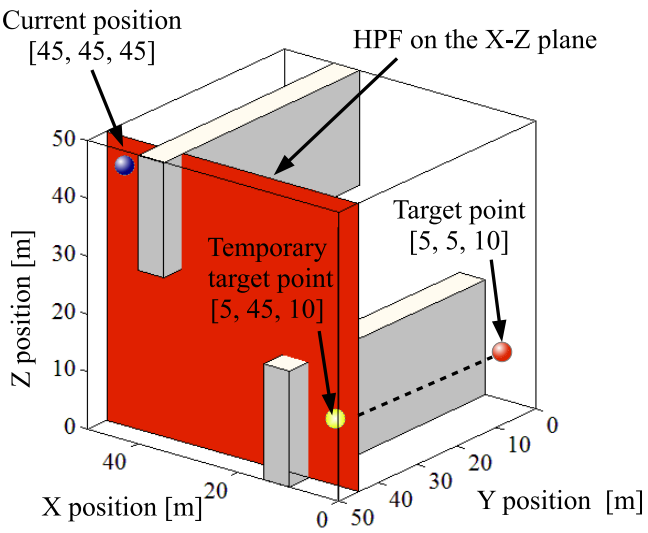


Fig. 5.2: The HPF on the X-Z plane.

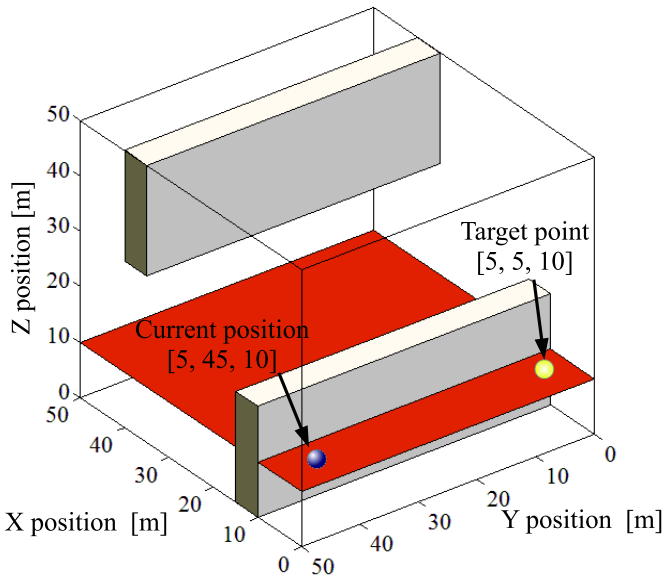


Fig. 5.3: The HPF on the X-Y plane.

Table 5.1: Model parameters for the quadrotor

Parameter	Description	Value	Unit
g	Gravitational acceleration	9.80665	m/s^2
m	Mass	1.3	kg
l	Distance	0.248	m
I_x	Roll inertia	0.01467	kg·m^2
I_y	Pitch inertia	0.01467	kg·m^2
I_z	Yaw inertia	0.02331	kg·m^2
J_r	Rotor inertia	175.69×10^{-6}	kg·m^2
b	Thrust factor	0.0000434	
d	Drag factor	0.000002188	

5.4 数値シミュレーション: HPF の切り替えを用いた 3 次元環境での誘導

提案した，HPF の切り替えを用いた制御手法の有用性を確認するために，3 次元の環境においてクワッドロータを任意の目標点へ誘導可能であることを数値計算ソフト MATLAB を用いたシミュレーションにより確認する．

5.4.1 環境

本シミュレーションでは，図 5.1 のような 2 つの障害物が存在する環境においてクワッドロータが初期位置 $(x_0, y_0, z_0) = (45, 45, 45)$ [m] から指定された目標点 $(x_T, y_T, z_T) = (5, 5, 10)$ [m] へ移動する場合を想定する．クワッドロータの動力学モデルには，第 3 章において導出した式 (3.30) を用いた．また，シミュレーションにおいて使用するパラメータは，第 3 章におけるシミュレーションと同様に研究室において作成しているクワッドロータから算出した数値 (表 5.1) を用いた．また，非ホロノミック制御のためのゲインは表 5.2 の値を，追加部分の制御ゲインは前章において最適化され値 ($b_c = 0.0044$, $b_d = 0.0089$, $k_v = 0.00006$, $k_C = 0.0005$) を用いた．

5.4.2 結果

結果を図 5.4 と 5.5 に示す．図 5.4 中の青色の線はクワッドロータが通過した軌道を，図 5.5 のピンク，青，緑の線は時間ごとのクワッドロータの姿勢角 (ϕ, ψ, θ) をそれぞれ表している．

Table 5.2: Control gains for the quadrotor

Gain	Value	Gain	Value
k_1	0.015	k_2	0.015
k_3	0.007	k_4	10.0
k_5	25.0	σ	5

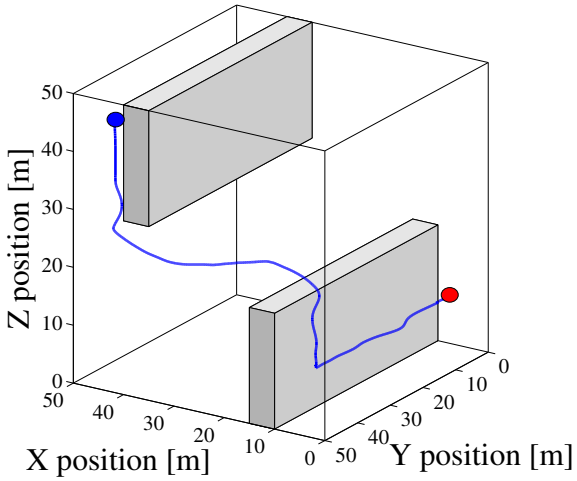


Fig. 5.4: Trajectory of the quadrotor.

5.4.3 考察

図 5.4 より，クワッドロータは X-Z 平面と X-Y 平面に生成された HPF を切り替えて用いることで一時的な目標点 $(5, 45, 10)$ を経由して指定した目標点へ到達できていることがわかる．また，図 5.5 より，クワッドロータの姿勢角は全て ±0.06 [rad] 以内に収まっていることがわかる．本シミュレーションにおいて想定したクワッドロータは ±0.15 [rad] 程度の姿勢角のぶれに対応できることが確認されているので，計測された姿勢角の値は実機が飛行する上で現実的な範囲に収まっているといえる．以上より，提案手法を用いてクワッドロータを目標点まで誘導可能であることが確認できた．

5.5 HPF の勾配を合成して用いる場合

前述した手法では，生成した 2 次元平面上の HPF を切り替えながら用いることで目標点までの誘導を可能にした．本節では，HPF の勾配を合成することでより

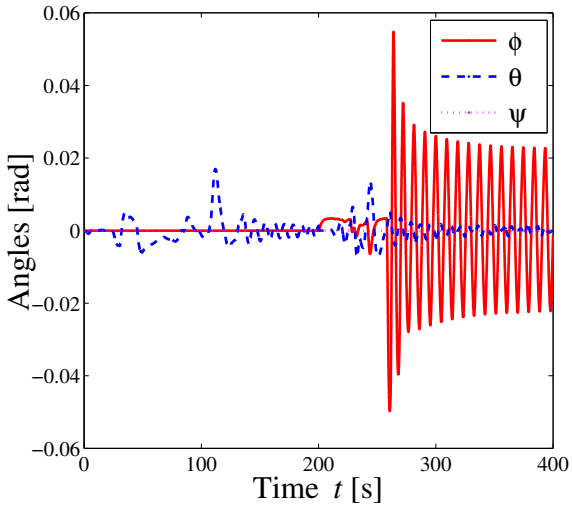


Fig. 5.5: Attitude angles of the quadrotor.

効率よく 3 次元空間を移動するための手法について提案する．

5.5.1 HPF の合成による勾配の生成

提案手法では，クワッドロータを目標点へ 3 次元的に誘導するために X-Y，X-Z，および Y-Z の 3 つの平面上に生成した HPF を用いる．図 5.6 に 3 つの HPF を用いた X，Y，Z 方向の勾配生成のイメージを示す．この手法では，図のように現在の機体位置を含む 3 つの平面上に HPF を生成し，3 つの HPF に含まれる X，Y，Z 方向の勾配を機体に与えることでクワッドロータを 3 次元的に誘導する．図中の f_x，f_y，f_z はそれぞれ HPF の X，Y，Z 方向の勾配である．このとき，各勾配は以下のようにそれぞれの HPF における重複軸方向の勾配の和を平均した値とする．

$$
\begin{aligned}
f_x &= \frac{f_{xy} + f_{xz}}{2} \\
f_y &= \frac{f_{yx} + f_{yz}}{2} \\
f_z &= \frac{f_{zx} + f_{zy}}{2}
\end{aligned}
\tag{5.6}
$$

ただし，f_{xy}，f_{yx} は X-Y 平面上の HPF における X 方向，Y 方向の勾配，f_{yz}，f_{zy} は Y-Z 平面上の HPF における Y 方向，Z 方向の勾配，f_{xz}，f_{zx} は X-Z 平面上の HPF における X 方向，Z 方向の勾配を表している．

例として，図 5.7 の環境内の $(x, y, z) = (45, 25, 10)$ にクワッドロータの現在位置があり，目標点 $(x_T, y_T, z_T) = (5, 5, 10)$ へ向かっているとする．このとき，図 5.8 のような機体の高度 $z = 10$ を含む X-Y 平面上の HPF，図 5.9 のような機体の Y 方向の位置 $y = 25$ を含む X-Z 平面上の HPF，図 5.10 のような機体の X 方向の位置

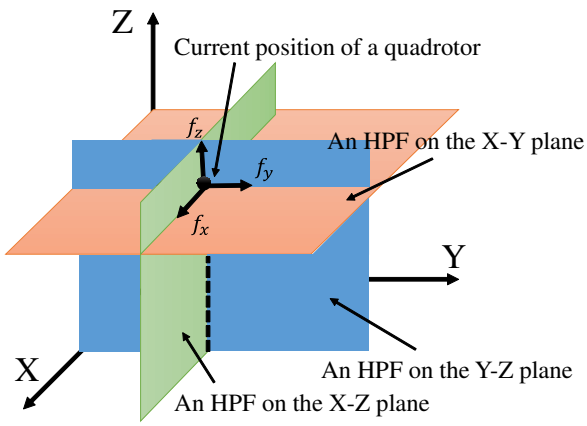


Fig. 5.6: A schema of generating 3-directional gradient using three HPFs

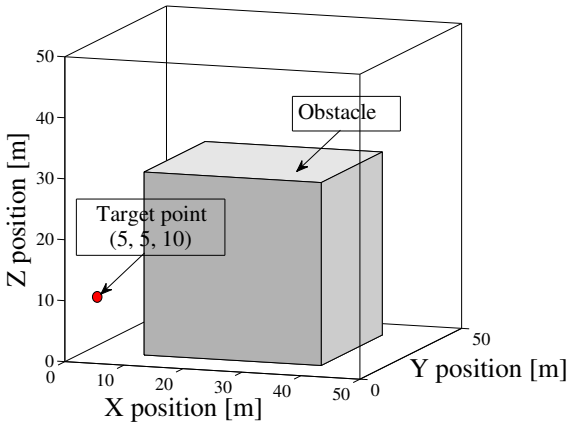
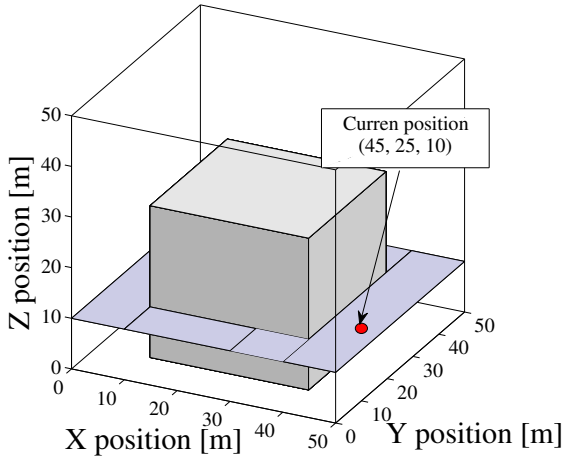


Fig. 5.7: An example environment

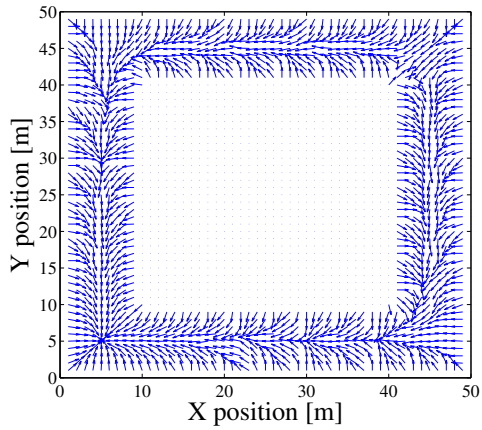
$x = 45$ を含む X-Y 平面上の HPF が生成される．また，図 5.8 においては，目標点を $(x_T, y_T) = (5, 5)$，図 5.9 においては，目標点を $(x_T, z_T) = (5, 10)$，図 5.10 においては，目標点を $(y_T, z_T) = (5, 10)$ としてそれぞれ HPF を生成している．このように図 5.8 (b) 及び図 5.9 (b) で生成される勾配ベクトル場から現在位置の勾配を求めることで，クワッドロータを目標点方向へ誘導する．

5.6 数値シミュレーション

HPF の勾配を合成して用いることで図 5.1 および図 5.7 の環境においてクワッドロータを 3 次元的に誘導可能であることを数値計算ソフト MATLAB を用いたシミュレーションにより確認する．同時に，5.3 節において述べた HPF の切り替えを

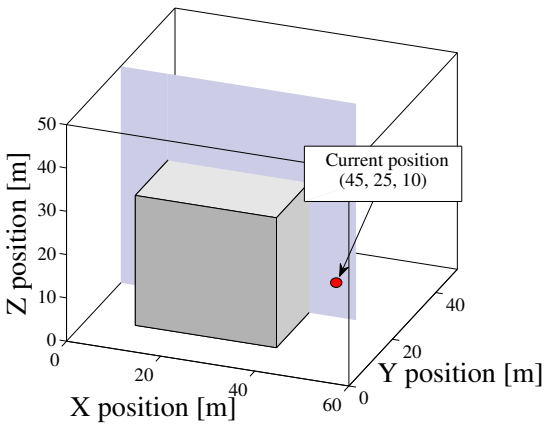


(a) X-Y plane including the current position

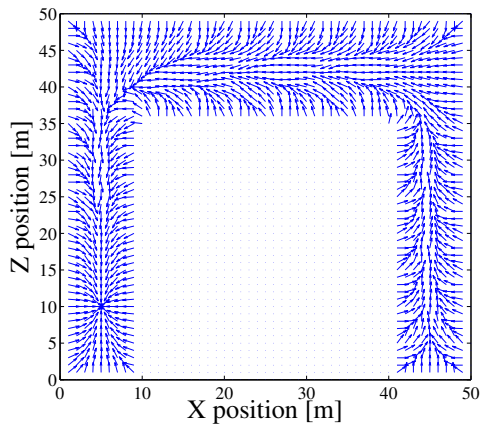


(b) The gradient of the HPF on the X-Y plane

Fig. 5.8: The HPF on the X-Y plane

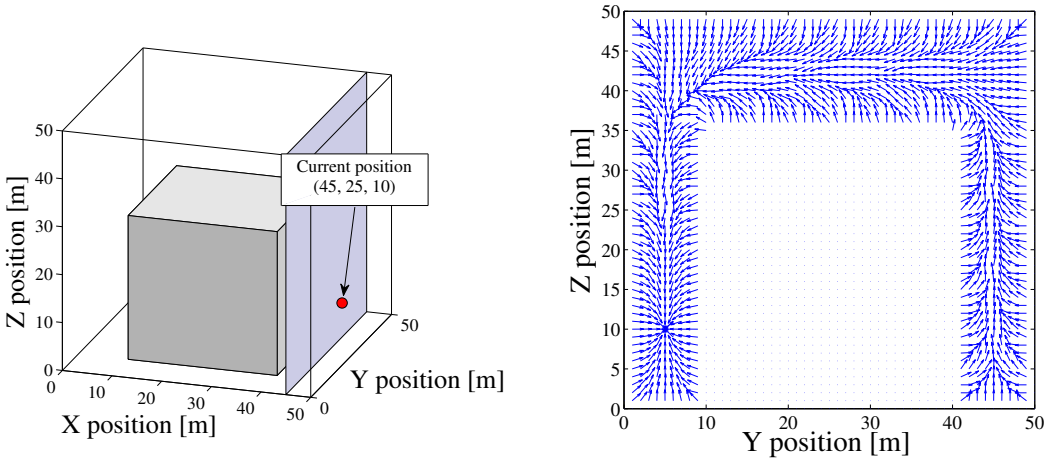


(a) X-Z plane including the current position



(b) The gradient of the HPF on the X-Z plane

Fig. 5.9: The HPF on the X-Z plane



(a) Y-Z plane including the current position (b) The gradient of the HPF on the Y-Z plane

Fig. 5.10: The HPF on the Y-Z plane

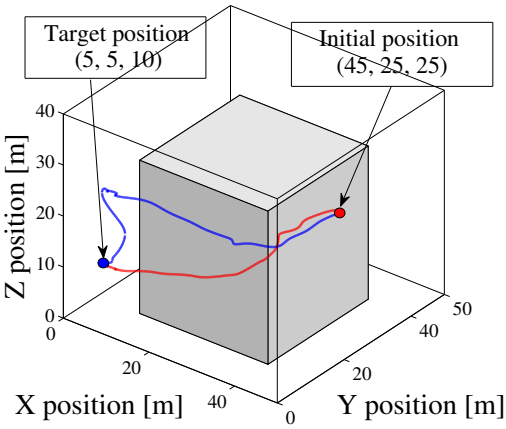
用いた手法との比較を行う．

5.6.1 想定する環境

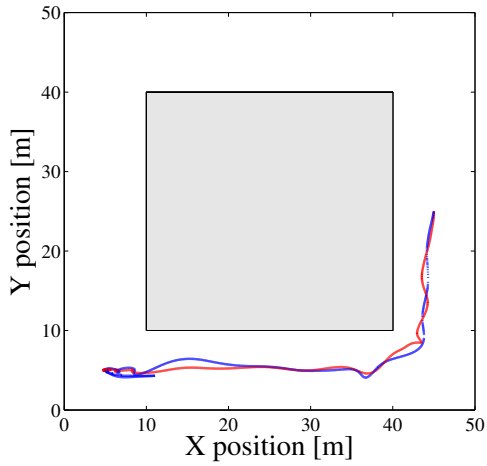
クワッドロータが図 5.7 に示す環境内で初期位置 $(x_0, y_0, z_0) = (45, 25, 25)$ [m] から目標位置 $(x_T, y_T, z_T) = (5, 5, 10)$ [m] まで，図 5.1 に示す環境内で初期位置 $(x_0, y_0, z_0) = (45, 45, 45)$ [m] から目標位置 $(x_T, y_T, z_T) = (5, 5, 10)$ [m] までそれぞれ移動する状況を想定する．姿勢角 (ϕ, θ, ψ) の目標はいずれも $(\phi_T, \theta_T, \psi_T) = (0, 0, 0)$ [rad] とし，クワッドロータの動力学モデルには 5.4 節におけるシミュレーションと同様に式 (3.30) を使用した．また，シミュレーションにおいて使用するパラメータは，第 3 章におけるシミュレーションと同様に研究室において作成しているクワッドロータから算出した数値 (表 5.1) を用いた．また，非ホロノミック制御のためのゲインは表 5.2 の値を，追加部分の制御ゲインは前章において最適化された値 ($b_c = 0.0044$, $b_d = 0.0089$, $k_v = 0.00006$, $k_C = 0.0005$) を用いた．このとき，5.3 節において述べた HPF の切り替えを用いた手法と 5.5 節において述べた HPF の勾配を合成して用いる手法を比較する．

5.6.2 結果

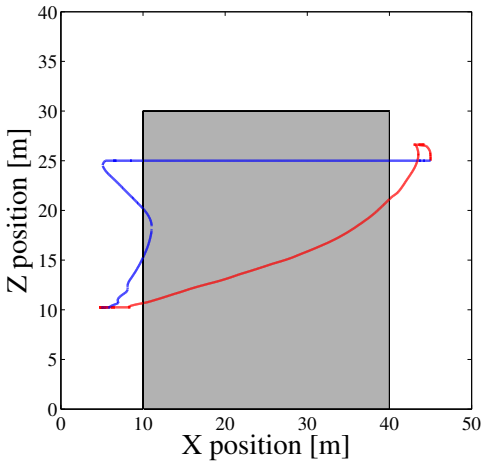
結果を図 5.11〜5.18 に示す．図 5.11〜図 5.14 は図 5.7 の環境における結果，図 5.15〜図 5.18 は図 5.1 の環境における結果である．図 5.11 および図 5.15 中の赤い実線は HPF を合成して用いた場合のクワッドロータの軌道，青い点線は HPF



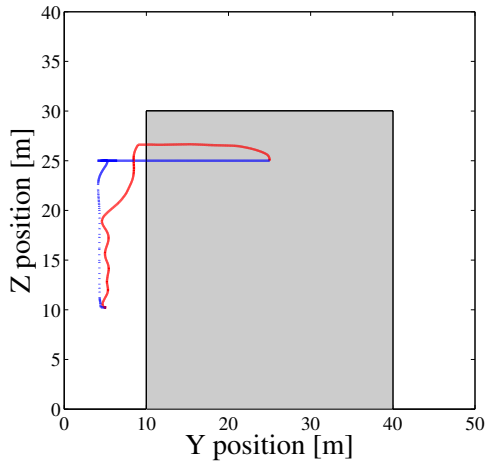
(a) Trajectory in a 3-dimensional space



(b) Trajectory on the X-Y plane



(a) Trajectory on the X-Z plane



(b) Trajectory on the Y-Z plane

Fig. 5.11: The trajectory of the quadrotor in the environment shown in Fig. 5.7

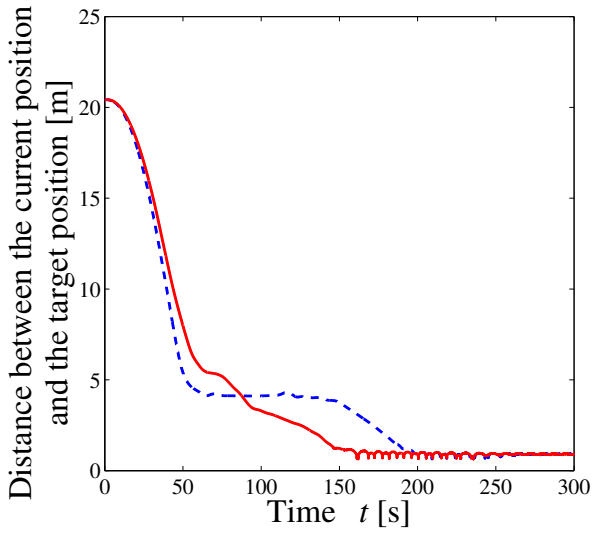


Fig. 5.12: Distance from the target position

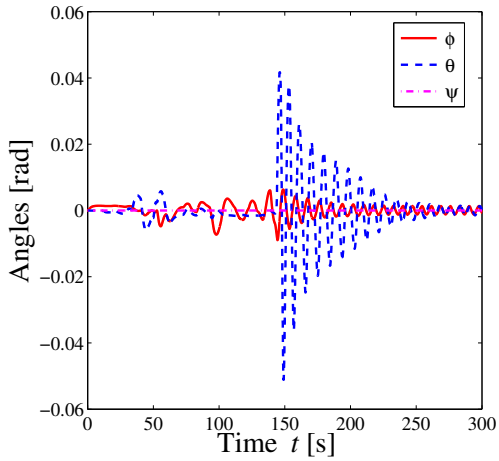


Fig. 5.13: Attitude angles when using the combined gradient

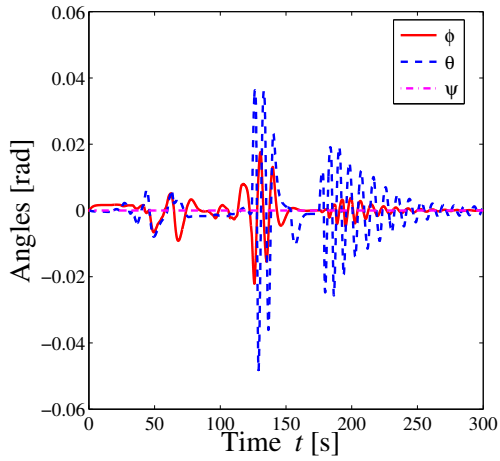
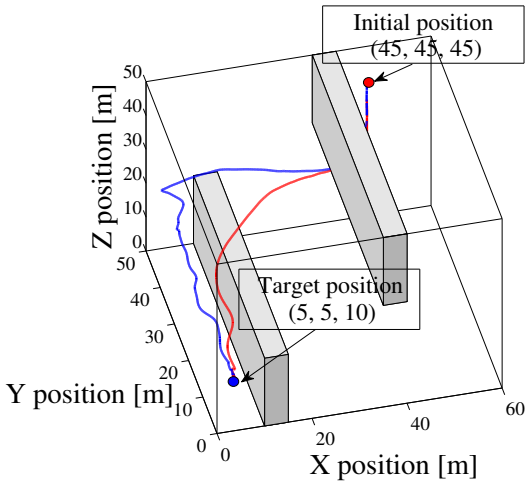
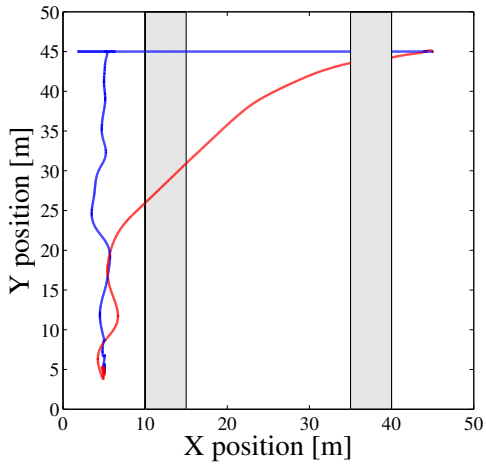


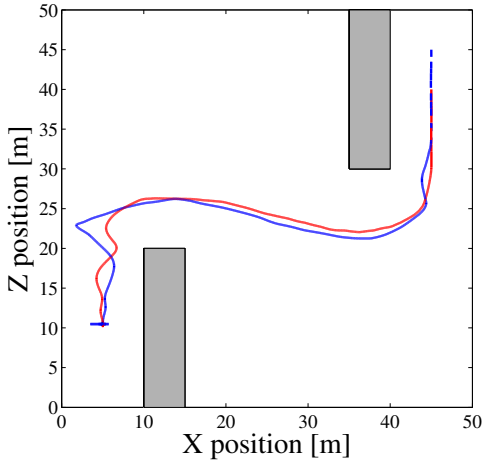
Fig. 5.14: Attitude angles when using the switching HPFs



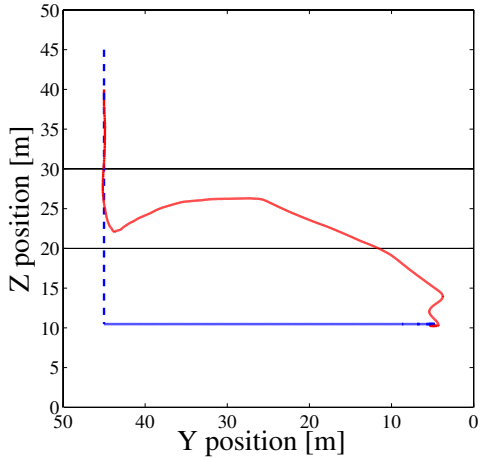
(a) Trajectory in a 3-dimensional space



(b) Trajectory on the X-Y plane



(a) Trajectory on the X-Z plane



(b) Trajectory on the Y-Z plane

Fig. 5.15: The trajectory of the quadrotor in the environment shown in Fig. 5.1

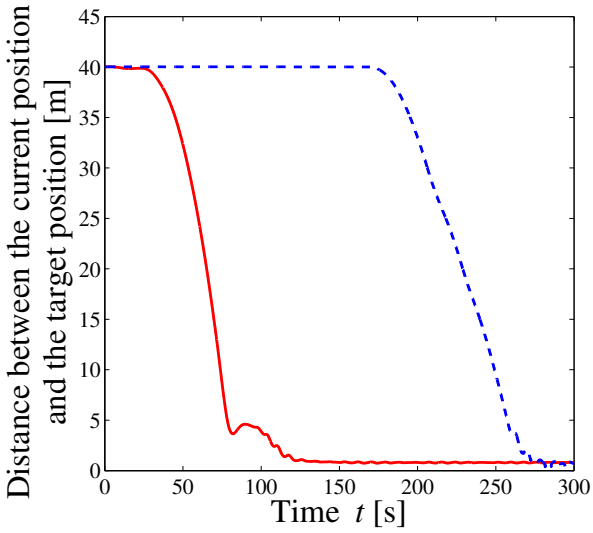


Fig. 5.16: Distance from the target position

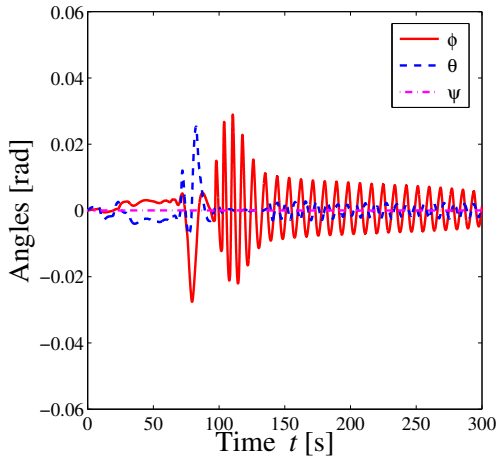


Fig. 5.17: Attitude angles when using the combined gradient

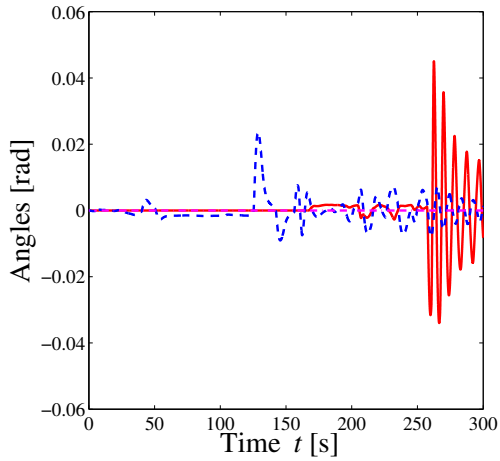


Fig. 5.18: Attitude angles when using the switching HPFs

を切り替えて用いた場合のクワッドロータの軌道を表している．また，図 5.11 および図 5.15 の (a) は 3 次元空間における軌道，(b)，(c)，(d) はそれぞれ X-Y，X-Z，および Y-Z 平面上に投影したクワッドロータの軌道を表している．図 5.12 および図 5.16 中の赤い実線は HPF を合成して用いた場合の，青い点線は HPF を切り替えて用いた場合の機体の現在位置と目標点との直線距離の変化を示している．さらに，図 5.13 と図 5.17 はそれぞれ HPF を合成して用いた場合，図 5.14 と図 5.18 はそれぞれ HPF を切り替えて用いた場合のクワッドロータの姿勢角 (ϕ, θ, ψ) の変化を表している．

5.6.3　考察

図 5.11 と図 5.15 より，HPF を合成して用いる手法および HPF を切り替えて用いる手法のどちらを用いた場合にも 2 つの 3 次元空間内において障害物を避けながら初期位置から目標点まで移動できていることがわかる．同時に，どちらの環境においても HPF を合成して用いた手法の方がより無駄の少ない経路を通って移動できていることがわかる．

実際に，図 5.12 および図 5.16 より，どちらの制御器を用いた場合にも目標点へ到達後はほぼ目標点付近で停留できているが，HPF を合成して用いた制御器 (図中の赤い実線) の方がより短時間で目標点付近へ到達できていることがわかる．また，どちらの手法を用いた場合もわずかな定常誤差がみられた．

図 5.13，図 5.14，図 5.17，図 5.18 より，提案手法を用いた場合の方が姿勢角の振動がわずかに大きくなってしまっているが，どのグラフにおいても姿勢角は常に ± 0.05 [rad] 以内に収まっている．本シミュレーションにおいて想定した機体は ± 0.2 [rad] 程度の姿勢の揺れには容易に対応可能であるため，この結果は現実的な値であると言える．以上の結果より，提案手法を用いることで，より効率的な経路を選択し，従来手法に比べて素早く目標点へ到達可能であることが実証できた．

5.7　まとめ

本章では，2 次元平面において生成した HPF を用いて 3 次元空間中でクワッドロータを任意の目標位置まで誘導する手法を 2 種類提案した．1 つ目は，機体の現在位置を含む X-Y，Y-Z，X-Z 平面上にそれぞれ HPF を生成し，適切な平面を選択し，切り替えて用いながら移動する手法，2 つ目は，機体の現在位置を含む X-Y，Y-Z，X-Z 平面上にそれぞれ HPF を生成した後に，各勾配を合成して 3 次元的な勾配を生成し用いる手法であった．これら 2 つの提案手法はシミュレーション上で動作確認を行い，どちらの手法を用いた場合にも 3 次元空間においてクワッドロータを任意の目標位置まで誘導可能であることを示した．同時に，HPF を切り替え

ながら用いる手法に比べ，HPF を合成して用いる手法の方がよりクワッドロータを効率的に誘導可能であることがシミュレーションにより明らかにできた.

第6章　実機実験

6.1　本章の概要

本章では，提案したキノダイナミック動作計画を実機に適用することを主目的とする．実機にはParrot社の開発したAr.Droneを用い，HPFの勾配に基づく制御入力を用いることで初期位置から目標位置への誘導が可能となることを確認する．その際に，機体の位置を計測するための手法として山田ら[(83)(84)(85)]の開発した，ステレオカメラを用いた3次元位置計測システムを用いる．以下にAR.Droneの仕様，ステレオカメラを用いた位置計測の概要，AR.Droneを用いた飛行実験について述べる．

6.2　AR.Droneの仕様

本実験では制御対象としてParrot社製のUAV，“AR.Drone”を使用する．使用するAR.Droneの外観を図6.1に示す．機体サイズは縦45 × 横29 [cm]，バッテリを含む重量は380 [gf]である．AR.Droneは，速度および姿勢計測のための3軸加速度センサ，2軸ジャイロセンサ，1軸(ヨー方向)ジャイロセンサと高度計測のための超音波センサを搭載している．また，機体の前方及び下部にそれぞれ小型カメラが搭載されている．AR.Droneは姿勢角速度および姿勢角を搭載されたATMEGA8L 8bitマイクロコントローラを用いて制御することで，ホバリング制御を行っている．図6.2にAR.Drone内部の姿勢制御器を図示する．この制御器では外部からの操作入力として各軸方向への速度$V_{\mathrm{X_R}}$，$V_{\mathrm{Y_R}}$，$V_{\mathrm{Z_R}}$，高さZ，ψ角方向の姿勢角速度V_ψを与えることができる．

本実験においては，この姿勢維持のための制御器を提案した制御入力における非ホロノミック制御器と同値であるとみなし，HPF，NADFsおよびクランピング関数に基づく追加制御を付加する．具体的には，前述の制御器におけるϕ，θ，およびZ方向の制御入力に付加していた追加制御器をAR.DroneのV_Y，V_X，およびZ方向の制御入力として与えることでキノダイナミック動作計画を実現する．

Fig. 6.1: Overview of an AR.Drone.

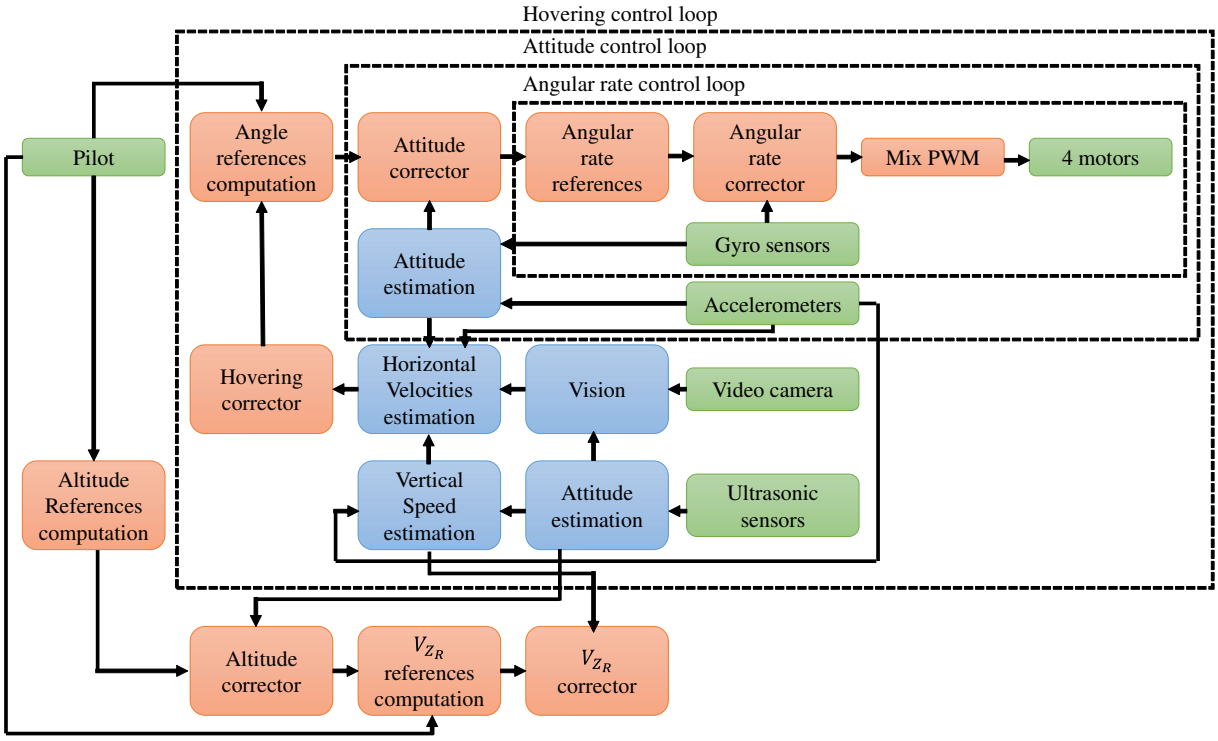


Fig. 6.2: Controller of an AR.drone[86].

6.3　ステレオカメラを用いた位置計測

ステレオカメラを用いた位置計測については多くの研究が成されている[(87)–(90)]．本稿で用いる位置計測システムでは，左右 2 台のカメラを用いて機体に設置された赤外線を発生する球状のマーカを撮影することで機体位置を算出する．計測された位置情報を基に三角測量の原理を利用すると，2 台のカメラの中間点を原点 O(0, 0, 0) とする座標上におけるマーカの 3 次元位置 $(x_{\mathrm{m}}, y_{\mathrm{m}}, z_{\mathrm{m}})$ を算出することができる．

図 6.3 にステレオ視による水平方向位置および奥行き方向の位置計測の概要を示す．カメラ画像の水平方向の解像度を u_{max}, 左右それぞれのカメラの水平方向の画角を $\alpha_{\mathrm{L}}, \alpha_{\mathrm{R}}$, 左右それぞれのカメラ画像上でのマーカの水平方向の位置を $u_{\mathrm{L}}, u_{\mathrm{R}}$ とすると左カメラの水平方向の画角の左端からマーカまでの角度 θ_{L}, 右カメラの水平方向の画角の右端からマーカまでの角度 θ_{R} は次のように表すことができる．

$$\theta_{\mathrm{L}} = \frac{u_{\mathrm{L}}}{u_{\mathrm{max}}}\alpha_{\mathrm{L}} \tag{6.1}$$

$$\theta_{\mathrm{R}} = \frac{u_{\mathrm{max}} - u_{\mathrm{R}}}{u_{\mathrm{max}}}\alpha_{\mathrm{R}} \tag{6.2}$$

ここで，左右のカメラ間の距離を d とするとマーカの水平方向の位置 x_{m}, 奥行き方向の位置 z_{m} は次のように表すことができる．

$$x_{\mathrm{m}} = z_{\mathrm{m}}\tan\theta_{\mathrm{L}} - \frac{d}{2} \tag{6.3}$$

$$z_{\mathrm{m}} = d\,\frac{\cos\theta_{\mathrm{L}}\cos\theta_{\mathrm{R}}}{\sin(\theta_{\mathrm{L}} + \theta_{\mathrm{R}})} \tag{6.4}$$

図 6.4 にステレオ視による水平方向位置および奥行き方向の位置計測の概要を示す．2 台のカメラが水平に設置されているとすると，左右どちらのカメラ画像でも画像上でのマーカの水平方向の位置は等しくなる．左カメラの視点を基準として考え，左カメラの鉛直方向の画角を β_{L}, 左カメラ画像上でのマーカの水平方向の位置を v_{L} とすると，左カメラの鉛直方向の画角の下端からマーカまでの角度 ϕ_{L}, マーカの鉛直方向の位置 y_{m} は次のように表すことができる．

$$\phi_{\mathrm{L}} = \frac{v_{\mathrm{max}} - v_{\mathrm{L}}}{v_{\mathrm{max}}}\beta_{\mathrm{L}} \tag{6.5}$$

$$y_{\mathrm{m}} = z_{\mathrm{m}}\,\tan\left(\phi_{\mathrm{L}} - \frac{\beta_{\mathrm{L}}}{2}\right) \tag{6.6}$$

このとき，実際の計測において左右のカメラからの角度に差が生じるため，左右のカメラで計測した高さの平均値をマーカの鉛直方向の位置 y_{m} として用いた．右

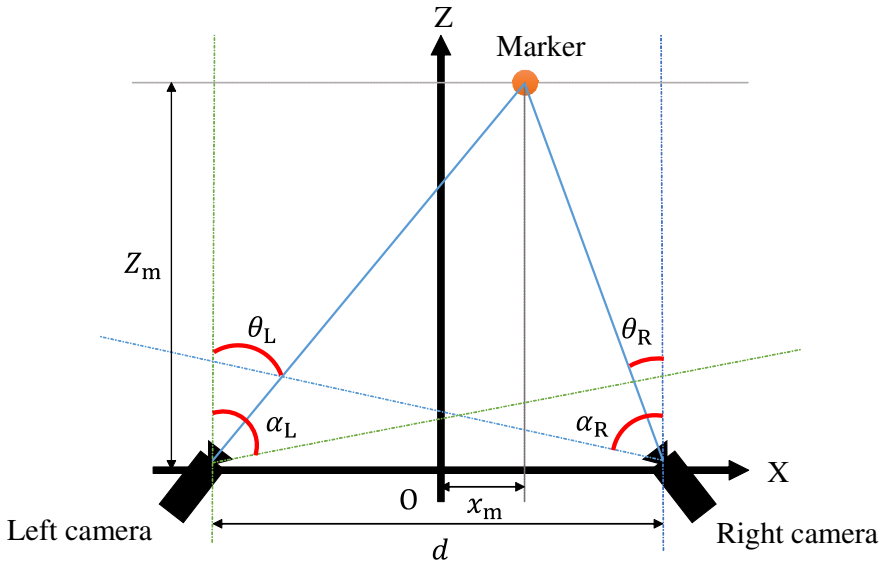


Fig. 6.3: Position measurement in X-Z plane.

カメラの鉛直方向の画角を β_R, 右カメラ画像上でのマーカの水平方向の位置を v_R とすると，右カメラの鉛直方向の画角の下端からマーカまでの角度 ϕ_R, マーカの鉛直方向の位置 y_m は次の式のように表すことができる．

$$\phi_R = \frac{v_{max} - v_R}{v_{max}} \beta_R \tag{6.7}$$

$$y_m = \frac{z_m \tan(\phi_L - \frac{\beta_L}{2}) + z_m \tan(\phi_R - \frac{\beta_R}{2})}{2} \tag{6.8}$$

本章の実験においては，このシステムを用いて外部から AR.Drone の位置を計測する．

6.4 AR.Drone を用いた実験

本節では AR.Drone を用いて提案した制御入力に基づく移動実験を行う．前述したとおり，本実験では提案した制御入力のうち，機体の姿勢を維持するための非ホロノミック制御部分を AR.Drone 内部に実装されている姿勢制御器と同義であるとみなし，HPF の勾配，NADFs，およびクラピング制御に基づく追加制御部分のみを AR.Drone に与えることで誘導を試みる．このとき，AR.Drone への制御入力として各軸方向への目標速度 V_{X_R}，V_{Y_R}，V_{Z_R} を以下のように与える．

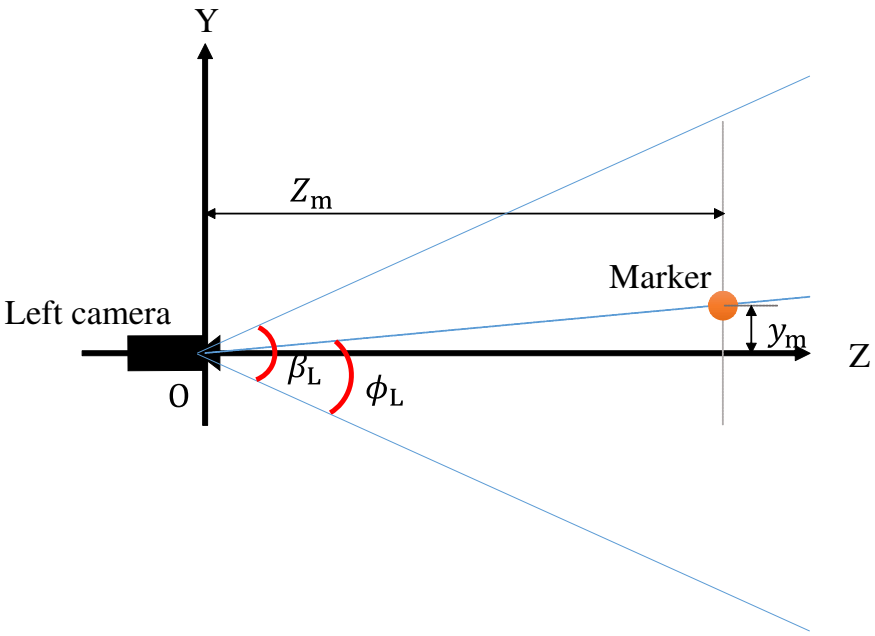


Fig. 6.4: Position measurement in Y–Z plane.

$$
\begin{cases}
(\text{if } \ \sigma \geq \sqrt{(x_T - x)^2 + (z_T - z)^2} \text{ and } [\dot{x}^T(x_T - x) + \dot{z}^T(z_T - z)] \leq 0) \\
\quad -V_{X_R} = -b_{cx}\dot{z} - k_{vx} f_z - k_{Cx} F_{Cz} \\
(\text{else}) \\
\quad -V_{X_R} = -b_{dx} h_z - k_{vx} f_z \\
(\text{if } \ \sigma \geq \sqrt{(x_T - x)^2 + (z_T - z)^2} \text{ and } [\dot{x}^T(x_T - x) + \dot{z}^T(z_T - z)] \leq 0) \\
\quad V_{Y_R} = -b_{cy}\dot{x} - k_{vy} f_x - k_{Cy} F_{Cx} \\
(\text{else}) \\
\quad V_{Y_R} = -b_{dy} h_x - k_{vy} f_x \\
V_{Z_R} = -f_y
\end{cases}
\tag{6.9}
$$

ただし，b_{cx}，b_{cy}，b_{dx}，b_{dy}，k_{Cx}，k_{Cy}，k_{vx}，k_{vy} はそれぞれ正の定数ゲインであり，f_x，f_y および f_z は HPF から算出された x，y，z 方向の勾配である．また，V_{X_R} の値が負となっているのは，後述するように機体座標系と位置計測システムの座標系の不一致を調整するためのものである．なお，クランピング制御の適用範囲は実際は第 3 章で述べたとおり 3 次元空間であることを考慮し，球状に設定することが望ましいが，本実験においては簡便化のため y 軸 (高さ) 方向に対しては適用範囲を定めていない．

本実験では図 6.5 のように AR.Drone に位置計測用のマーカを取り付け，外部か

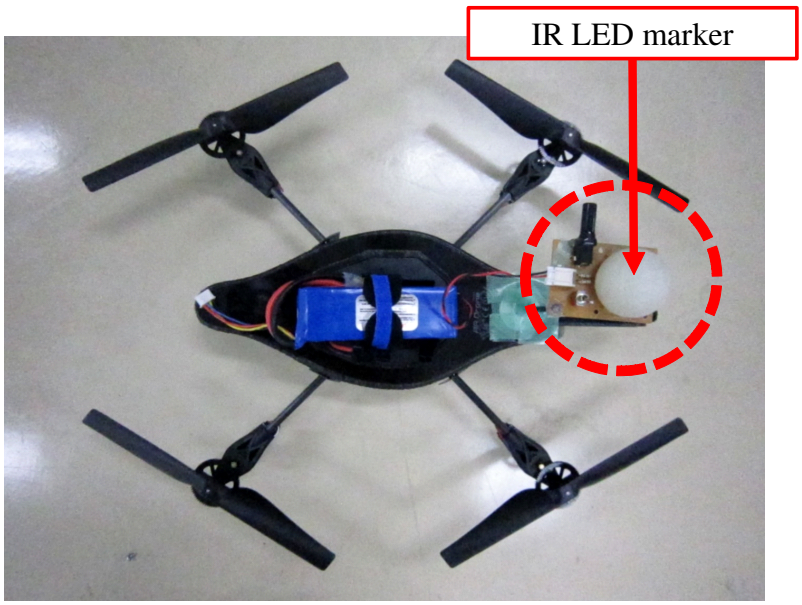


Fig. 6.5: Installation of the marker.

らカメラで位置計測を行い，あらかじめ指定しておいた目標位置へ誘導できているかを確認する．このとき，HPF の勾配および制御入力の算出はデスクトップ PC で行い，Wi-Fi を通して AR.Drone に制御入力を送信する．

6.4.1 実験環境

図 6.6 に実際の実験環境の写真を，図 6.7 に実験環境を上から見た場合の位置関係を示す．図 6.6 にあるように，本実験においては位置計測システムの X 軸の正の方向と機体の Y_R 軸の正の方向，位置計測システムの Y 軸の正の方向と機体

Table 6.1: Control gains for the quadrotor

Gain	Value	Gain	Value
b_{cx}	0.002	b_{cy}	0.0015
b_{dx}	0.002	b_{dy}	0.0015
k_{Cx}	0.002	k_{Cy}	0.0015
k_{vx}	0.02	k_{vy}	0.015
σ	1 [m]		

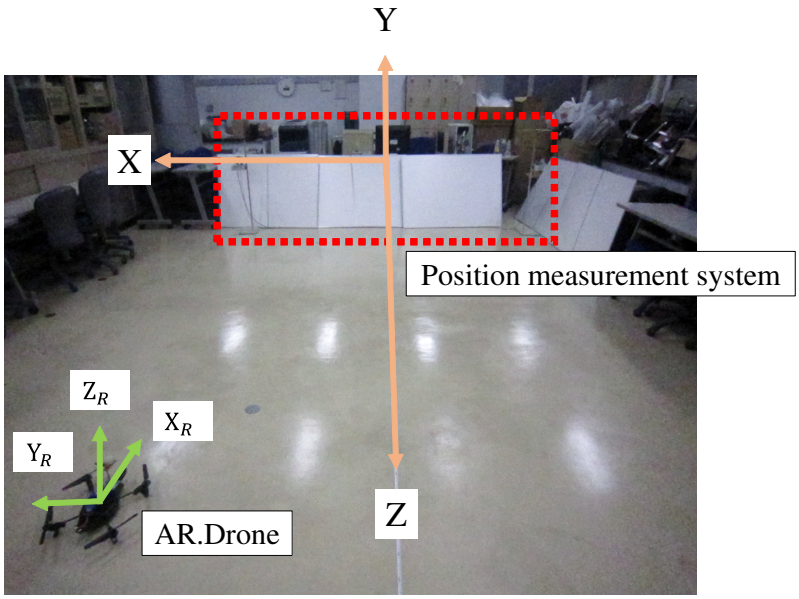


Fig. 6.6: Environment of the position control experiment.

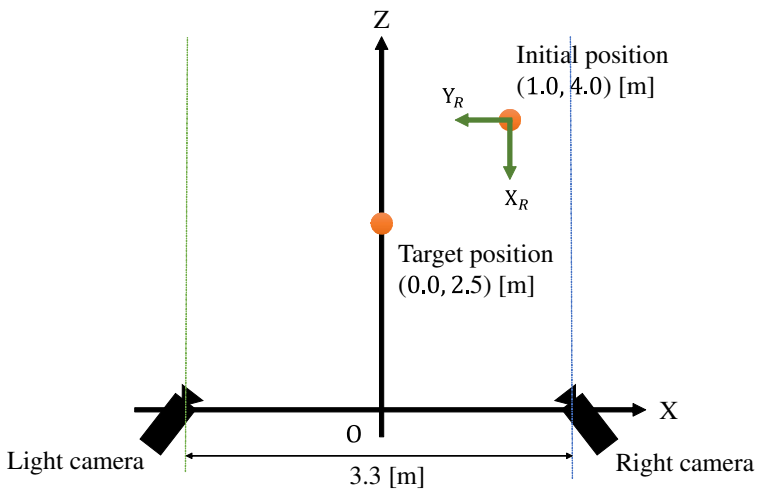


Fig. 6.7: Environment of the position control experiment.

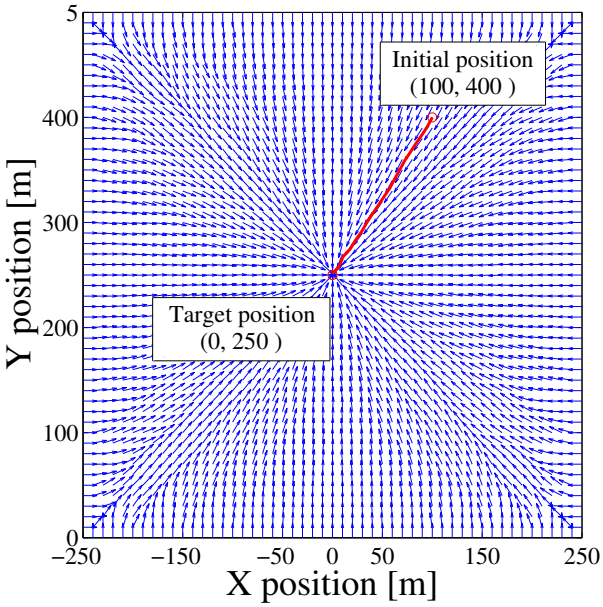


Fig. 6.8: Gradient vectors of the position control experiment.

の Z_R 軸の正の方向，位置計測システムの Z 軸の正の方向と機体の X_R 軸の負の方向が一致するように AR.Drone を初期位置に設置する．また，図 6.7 に示すように，カメラ間の距離は 3.3 [m] に設定し，機体を位置計測システムの座標系における初期位置 $(x_0, y_0, z_0) = (1.0, -0.65, 4.0)$ [m] の位置から離陸させ，目標位置 $(x_T, y_T, z_T) = (0.0, 0.0, 2.5)$ まで誘導し，その軌道を記録する．このとき，ヨー角の目標角速度は常に 0 とする．離陸および着陸動作は手動で行った．HPF を生成する際のグリッドサイズは 5×5 [cm] とする．図 6.7 の環境における X-Y 平面上に生成した HPF の勾配ベクトルおよび運動学的な軌道を図 6.8 に示す．各ゲインは表 6.1 のように設定した．V_x にかかる制御ゲインが V_y にかかる制御ゲインより大きいのは，AR.Drone の X 軸及び Y 軸まわりの慣性モーメントがそれぞれ $I_x = 4.50$ [gm^2], $I_y = 5.10$ [gm^2] であり [91]，制御の効きやすさに違いがあるためである．

6.4.2　結果

飛行実験の結果を図 6.9～図 6.13 に示す．図 6.9 は X-Z 平面上におけるクワッドロータの軌道を表している．また，図 6.10～図 6.12 はそれぞれクワッドロータの X，Y，Z 方向の位置変化，図 6.13 はクワッドロータに実際に与える V_x および V_y 方向の制御入力の変化を表している．

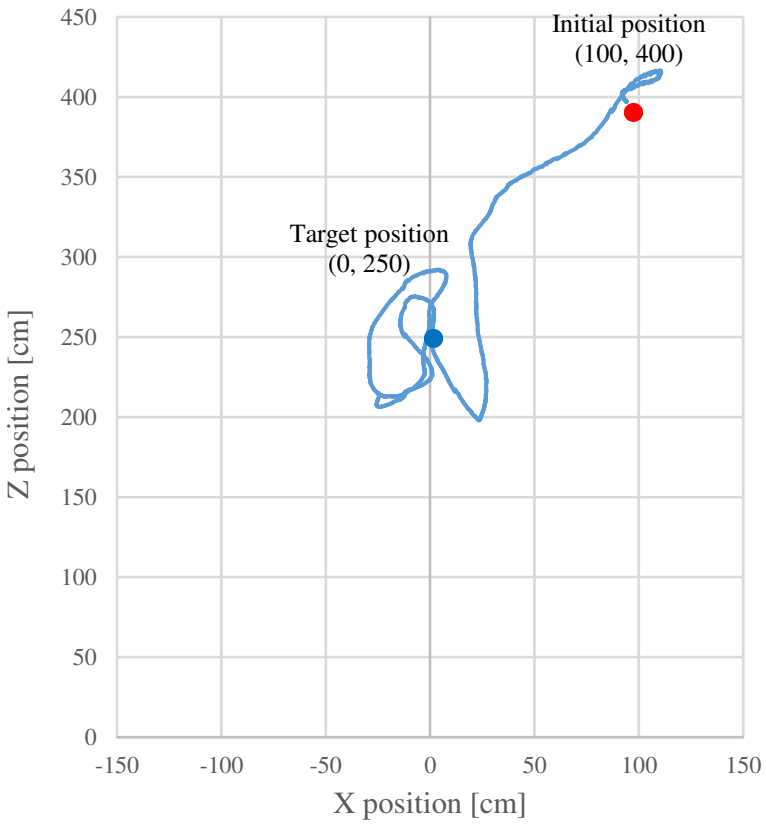


Fig. 6.9: Trajectory of the quadrotor on X-Z plane

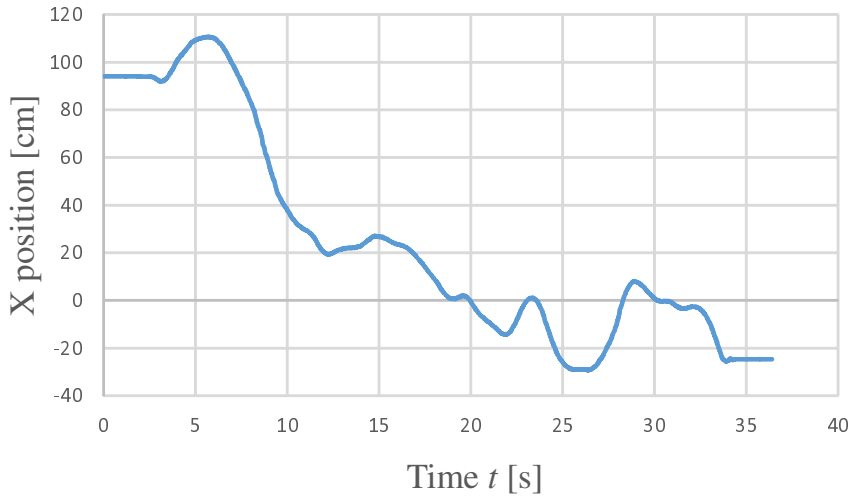


Fig. 6.10: Time response of X position of the quadrotor

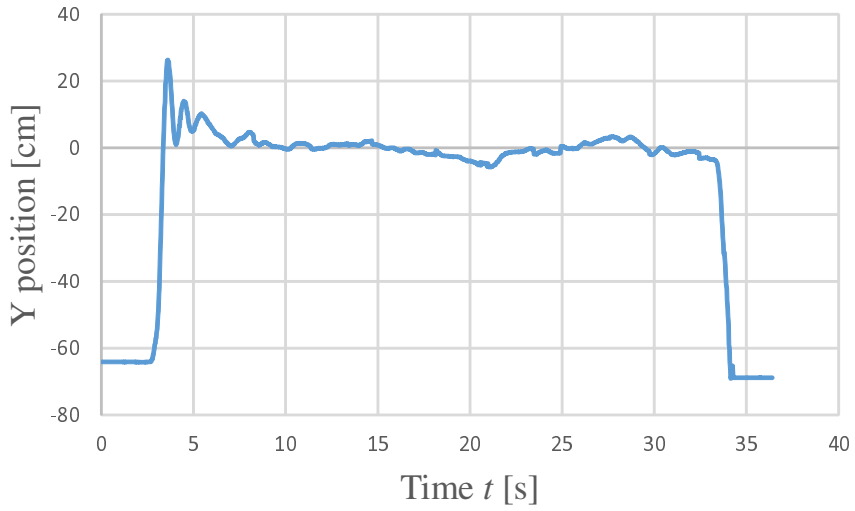


Fig. 6.11: Time response of Y position of the quadrotor

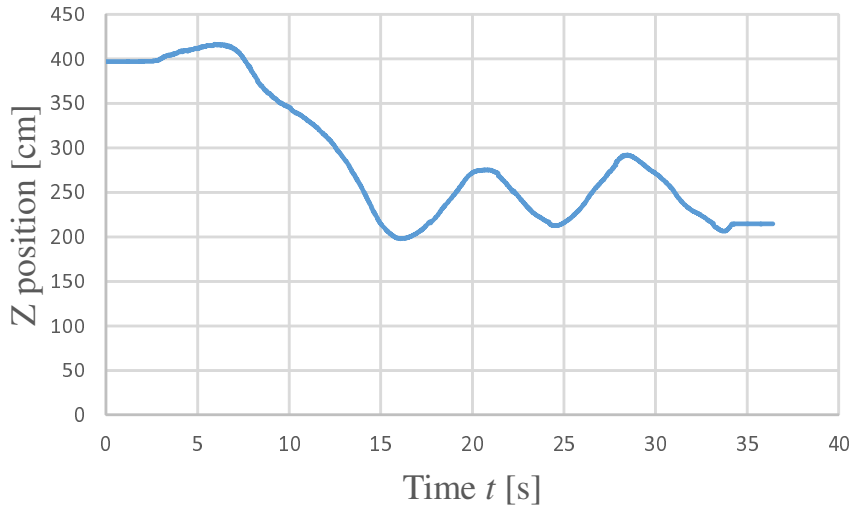


Fig. 6.12: Time response of Z position (altitude) of the quadrotor

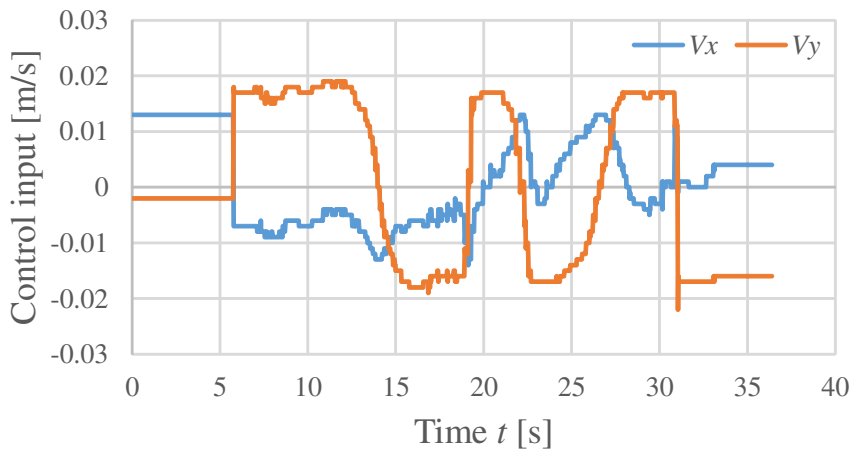


Fig. 6.13: Time history of control inputs

6.4.3　考察

図 6.9 のグラフより，機体は $(x, z) = (4, 4)$ [m] の初期位置から $(x, z) = (0, 2.5)$ [m] 付近まで移動できていることがわかる．このとき，ゆるやかに振動が生じているが，クランピング制御によって位置を補正し，大きく逸脱することなくほぼ目標点付近でホバリングできていることを確認した．図 6.10 および 6.12 より，応答は振動しながらも徐々に目標値付近に収束していることがわかる．また，図 6.11 より高度を安定して保ったまま移動していることも確認できる．AR.Drone へ入力可能な目標速度は安全面の観点から ±0.1 [m/s] に設定されている．図 6.13 より，制御入力の飽和は生じておらず，また，位置の振動を補正するように応答していることが確認できる．以上より，HPF に基づく制御入力を姿勢制御器に付加することで制御対象のクワッドロータを任意の目標点まで誘導できることが実証できた．

6.5　まとめ

本章では，HPF に基づくキノダイナミック動作計画を実機に適用することを主目的とし，実機実験を行った．具体的には，Parrot 社の開発した AR.Drone に搭載された姿勢制御器を提案手法における非ホロノミック制御器の代替としてみなし，HPF の勾配に基づく制御入力を付加し，クワッドロータの誘導を行った．このとき，外部に設置したカメラを用いて位置計測を行い，クワッドロータの軌道を確認した．実機実験の結果，AR.Drone は姿勢を大きく崩すことなく任意の目標位置へ移動し，目標点付近においてホバリングを行うことを検証した．

第7章　結論

本論文ではキノダイナミック動作計画をクワッドロータの制御に実装するための方策について提案した．まず，近年人の生活する環境で活躍するロボットの開発が期待されており，そのためにロボットの自律化が課題となっていることを指摘し，中でも自律飛行ロボットが新たなテーマとして注目されていることについて述べた．その上で，運動学的な拘束と動力学的な拘束を別々に解く従来の動作計画とは異なり，2 つの拘束を同時に解くことを目指したキノダイナミック動作計画をクワッドロータの制御に用いる利点について述べた．また，多数提案されているキノダイナミック動作計画の中でも HPF を用いたキノダイナミック動作計画を用いることで，制御対象が環境内のどの位置にいても HPF の勾配を参照して瞬時に制御入力を生成できることについて説明した．

次に，HPF に基づく従来のキノダイナミック動作計画の概要について述べるため，質点を制御対象として想定した場合について例を挙げ，そこで用いられる HPF，粘性制動力，NADFs，およびクランピング制御の詳細について説明した．また，MATLAB を用いた数値シミュレーションを通して HPF の勾配とともに粘性制動力，NADFs，NADFs とクランピング制御の組み合わせをそれぞれ用いた 3 つの制御器を比較した．任意の目標点への誘導シミュレーションを行ったところ，NADFs を用いた場合，粘性制動力を用いた場合に比べて素早く制御対象を誘導でき，また，外力の存在する環境においても障害物を避けながら制御対象を目標位置まで誘導可能であることを確認した．同時に，クランピング制御を適用することで目標点近傍上に制御対象を収束させられることも示した．

以上の知見の下で，X-Y 平面の 2 次元空間でのクワッドロータの制御を想定して，前述の制御器の拡張を行った．この時，姿勢を維持するための非ホロノミック制御入力と障害物を含む環境の HPF から算出した勾配に基づく制御入力とを合成することによりキノダイナミック動作計画を実現した．特に，クワッドロータの動力学特性を考慮して，X-軸の回転運動 (ロール) と Y-軸の回転運動 (ピッチ) への入力に HPF の y 方向勾配と x 方向勾配をそれぞれ加算することでキノダイナミック動作用の制御入力を設計する方法を提案した．また，本手法を用いることで実際にクワッドロータを障害物の存在する環境内において任意の目標位置に収束させられることを飛行シミュレーションにより確認した．このとき，質点の制御を行った場合と同様にクワッドロータの制御においても，粘性制動力を含む制御器用いた場合よりも NADFs を含む制御器を用いた場合の方が制御対象を，より素早く目標点付近へ誘導可能であることが確認された．同時に，クランピング制御を

用いることで目標点到達後のオーバーシュートを抑制し，クワッドロータを目標点付近でホバリングさせられることも確認した．

しかし，提案した制御器に含まれる複数のゲインを手動で最適なものに調整することは容易な作業ではない．そこでGAを用いてクワッドロータの飛行シミュレーションにおける理想的な軌道からの誤差，飛行距離，到達時間の3つの評価項目を含む評価関数の導入によりゲインの最適化を図った．その結果，GAによって最適化されたキノダイナミック動作計画用のゲインを用いることで，より理想的な軌道上を安定して飛行できるようになることをシミュレーション上で確認した．また，GAの学習環境とは異なる環境においては，環境サイズがゲイン探索時と大きく異なる場合にはHPFを生成する際のグリッドサイズに留意する必要があるものの，同じ探索されたゲインを用いて目標点へと誘導可能であることが確認できた．

上述までのキノダイナミック動作計画においてはX-Y平面上の移動のみについて言及していたが，実環境を想定してクワッドロータを3次元的に動作させるため，2次元平面において生成したHPFを用いて3次元空間中でクワッドロータを任意の目標位置まで誘導する手法を2種類提案した．1つ目は，機体の現在位置を含むX-Y，Y-Z，X-Z平面上にそれぞれHPFを生成し，適切な平面を選択し，切り替えて用いながら移動させる手法，2つ目は，機体の現在位置を含むX-Y，Y-Z，X-Z平面上にそれぞれHPFを生成した後に，各勾配を合成して3次元的な勾配を生成し用いる手法であった．これら2つの提案手法はシミュレーション上で動作確認を行い，どちらの手法を用いた場合にも3次元空間においてクワッドロータを任意の目標位置まで誘導可能であることが検証できた．ただし，HPFを切り替えながら用いる手法に比べ，HPFを合成して用いる手法の方がよりクワッドロータを効率的に誘導可能であることがシミュレーションにより確認できた．

最後に，HPFに基づくキノダイナミック動作計画を実機に適用することを目的とし，基礎的な実機実験を行った．具体的には，Parrot社の開発したAR.Droneに搭載済みの姿勢制御器を提案手法における非ホロノミック制御器の代替としてみなし，HPFの勾配等に基づく制御入力を付加し，誘導を行った．実機実験の結果，提案手法によればAR.Droneは姿勢を大きく崩すことなく任意の目標位置へ移動し，目標点付近においてホバリングを行えることが確認できた．

今後の課題としては，まず，クワッドロータに環境観測のためのカメラや測距計などのセンサを搭載し，自動で環境情報を取得することで機体の周囲にリアルタイムでHPFを生成しながら広範囲かつ長距離を移動できるようにすることがあげられる．次に，動的な障害物への対処があげられる．これについては予測楕円[92]を用いて移動障害物の移動予想をHPFに組み込むことで対処可能であると考えられる．また，本稿において提案した3次元的な誘導手法より更に無駄のないスムーズな移動を実現するため，調和関数を3次元に拡張し3次元空間における滑らかな勾配を生成すること，または環境全体を3次元のグリッドで分割し，各グリッドにおける3次元の勾配を本稿において提案した勾配合成手法を用いて予め

計算しておくことなどが考えられる．更に，本論文において提案したような動作計画をクワッドロータによる (橋やトンネルなどの) インフラ点検へ応用する際の現場サイドでの問題点 (風外乱，点検動作の変更，事前予定の環境と実環境の相違など) に対してロバストな動作計画法の考案が必要であると考えられる．

謝辞

本研究の遂行のみならず，論文作成，学会発表，普段の研究ミーティングなど様々な場面におきまして終始激励と懇切なるご指導，ご鞭撻を賜りました岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻の渡邊桂吾教授に，心より感謝を申し上げます.

博士進学以前よりご指導いただき，本論文の副査をつとめて下さった自然科学研究科産業創成工学専攻の見浪護教授と五福明夫教授に深く感謝いたします.

研究室配属当初よりミーティングや研究会を通して丁寧なご指導を賜りました自然科学研究科産業創成工学専攻の前山祥一講師，実機製作時や研究室生活を送るにあたって多くのご支援を賜りました自然科学研究科産業創成工学専攻の永井伊作助教に感謝いたします．さらに，学部時代より沢山のご指導，ご支援を賜りました自然科学研究科産業創成工学専攻の先生方に感謝いたします.

同研究室在学中，研究の基礎や論文作成など多岐にわたり熱意あるご指導を賜りました加藤達也氏，勉強会や学会活動において親身になって支援して下さった池田将晃氏に感謝致します．また，本研究の遂行にあたり多大な力添えを下さった大内祐介氏，実機実験においてご助力下さった木下敬介氏に心より感謝致します.

最後に6年間という長い間，共に過ごし，支えて下さったメカトロニクスシステム学研究室の先輩，同輩，後輩のみなさんに感謝致します．本当にありがとうございました.

付 録A　ハーモニックポテンシャルフィールド

2 つの実変数 x，y の実関数 $w(x,y)$ がある領域 Ω 内で連続かつ 1 次および 2 次の偏導関数を持ち，以下のような 2 次のラプラス方程式

$$\triangle w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \tag{A.1}$$

を満たすとき，関数 $w(x,y)$ は領域 Ω において調和であるといい，$w(x,y)$ を調和 (ハーモニック) 関数と呼ぶ．調和関数には以下のような性質がある．

- 性質 1 : 調和関数 $w(x,y)$ が領域 Ω 内において定数関数でない場合，$w(x,y)$ は Ω 内で最大値も最小値も取らない
- 性質 2 : ラプラス方程式 $\triangle w(x,y) = 0$ が，境界 S 上で $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$ を満たすとき，領域 Ω 内の全ての点において $w(x,y) = const.$ となる．

ハーモニックポテンシャルフィールド (HPF) を用いる利点は局所最小を排除できることである．以下に文献 [93] を参考として，制御対象の誘導を目的とした HPF の生成について詳細を述べる．

A.1　制御対象の誘導を目的とした HPF 生成の概念

HPF の勾配を用いて制御対象を誘導する手法としては，最終的に制御対象を到達させたい目標位置におけるポテンシャルを最小値に設定することで，制御対象をポテンシャルの高い位置から低い位置へ流れこむように誘導することが考えられる．そこで，HPF における最大値および最小値を定義する必要がある．調和関数においては，関数が領域 Ω の境界上において最大または最小値をとり，領域 Ω の内部において局所的な最大または最小値をとることはない．よって調和関数を用いることで滑らかな HPF を生成することが可能となる．

2 次元領域 $\Omega \subset \Re^2$ を考える時，ラプラス方程式は以下のようになる．

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \tag{A.2}$$

ϕ がハーモニック関数であり，ラプラス方程式 (A.2) を満たすとすると，関数 ϕ は境界 $\partial\Omega \subset \Omega$ においてのみ最大または最小値を持つ．この特徴は，制御対象の誘導において環境における障害物の境界や目標位置の境界を用いて境界条件を定義する上で非常に便利である．

次に，生成した HPF はディリクレ型（ある領域 Ω の境界 ∂O において，設定した任意の値となる調和関数を求める問題）の以下の境界条件を満たす．

$$\phi|_{\partial \mathrm{O}} = c \qquad \phi|_{\mathrm{goal}} = 0 \tag{A.3}$$

ただし，c は定数であり，上記の式では，ϕ が領域 Ω において全ての障害物の境界 (∂O) で最大値を持ち，目標位置 (goal) で最小値を持つように設定されることを表している．この条件で HPF を生成した場合，ポテンシャルは目標位置においてのみ最小となる．

A.2　実空間を想定した HPF の生成

実空間を想定して 2 次元 ($\Re^2$) の HPF を生成する場合を考える．まず，空間を一定サイズのグリッドで区切り，それぞれのグリッドの座標 (x_i, y_j) におけるポテンシャルの値を $\phi(x_i, y_j)$ とする．このとき，各格子点における偏微分方程式の近似値を求める．ϕ の二階微分のための中央差分 (n に対して $n+1$ と $n-1$ との間で差分をとる手法) の式は，テイラー級数展開を用いて以下のように導出できる．

$$\frac{\partial^2 \phi(x_i, y_j)}{\partial x^2} \approx \frac{\phi(x_{i+1}, y_j) - 2\phi(x_i, y_j) + \phi(x_{i-1}, y_j)}{h^2} \tag{A.4}$$

$$\frac{\partial^2 \phi(x_i, y_j)}{\partial y^2} \approx \frac{\phi(x_i, y_{j+1}) - 2\phi(x_i, y_j) + \phi(x_i, y_{j-1})}{h^2} \tag{A.5}$$

ただし，h は x，y 方向の微分を近似するためのステップサイズ (セル間の距離) である．式 (A.4) および (A.5) の代数方程式を用いることから

$$h^2 \left(\frac{\partial^2 \phi(x_i, y_j)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(x_i, y_j)}{\partial y^2} \right) = \phi(x_{i+1}, y_j) + \phi(x_{i-1}, y_j) + \phi(x_i, y_{j+1}) + \phi(x_i, y_{j-1}) - 4\phi(x_i, y_j) \tag{A.6}$$

を得る．このとき $\phi(x_i, y_j)$ が調和関数である場合，$\phi(x_i, y_j)$ は式 (A.2) におけるラプラス方程式を満たすため，式 (A.6) の左辺は 0 となり，$\phi(x_i, y_j)$ は以下のように計算できる：

$$\phi(x_i, y_j) = \frac{1}{4} \Big(\phi(x_{i+1}, y_j) + \phi(x_{i-1}, y_j) + \phi(x_i, y_{j+1}) + \phi(x_i, y_{j-1}) \Big) \tag{A.7}$$

これは，点 (x_i, y_i) におけるハーモニック関数 ϕ の値がそのグリッドの近傍点における ϕ の値の平均となることを表す．これを十分な回数反復することにより HPF は生成される．このとき，HPF においては全ての障害物の境界においてグローバルな最大値を，目標位置においてグローバルな最小値を持つため，HPF の勾配を用いることで制御対象を目標位置に誘導することが可能となる．

参考文献

(1) 楠田喜宏, サービスロボット技術発展の系統化調査, 国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第 5 集, (2005).

(2) iROBOT, “Roomba 800,” http://www.irobot-jp.com/roomba/800series/ (参照日 2014 年 1 月 9 日)

(3) SoftBank, “Pepper,” http://www.softbank.jp/robot/products/ (参照日 2014 年 1 月 9 日)

(4) Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, “The intelligent ASIMO: System overview and integration,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vol. 3 (2002), pp. 2478–2483.

(5) Y. Nakamura and R. Mukherjee, “Nonholonomic path planning of space robots via a bidirectional approach,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 4 (1991), pp. 500–514.

(6) J. C. Latombe, “Motion planning: A journey of robots, molecules, digital actors, and other artifacts,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 18, No. 11 (1999), pp. 1119–1128.

(7) J. Miura and Y. Hirai, “Vision and motion planning for a mobile robot under uncertainty,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 16, No. 6 (1997), pp. 806–825.

(8) H. Choset and K. Nagatani, “Topological Simultaneous Localization and Mapping (SLAM),” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.17, No. 2 (2001), pp.125–137.

(9) S. Kagami and S. Thompson, “自律移動の高速化のための階層的な位置同定, 地図作成, 経路計画, 経路制御システム,” 日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol. 24, (2006), pp. 1E13.

(10) M. Bennewitz, W. Burgard, G. Cielniak, and S. Thrun, “Learning motion patterns of people for compliant robot motion,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 24, No. 1 (2005), pp. 31–48.

(11) F. Dave, K. Nidhi, and S. Anthony, “Replanning with RRTs,” *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, (2006), pp. 1243–1248.

(12) T. Rennekamp, K. Homeier, and T. Kroger, “Distributed sensing and prediction of obstacle motions for unknown moving obstacles,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2006), pp.4833–4838.

(13) E. Frazzoli, MA. Dahleh, and E. Feron, “Real-time motion planning for agile autonomous vehicles,” *J. of Guidance Control and Dynamics*, Vol. 25, No. 1 (2002), pp. 116–129.

(14) B. Donald, P. Xavier, J. Canny, and J. Reif, “Kinodynamic motion planning,” *J. of the ACM*, Vol. 40, No. 5 (1993), pp. 1048-1066.

(15) S. M. LaValle and J. J. Kuffner, “Randomized kinodynamic planning,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 20, No. 5 (2001), pp. 378–400.

(16) Q. Pham, S. Caron, and Y. Nakamura, “Kinodynamic planning in the configuration space via admissible velocity propagation,” *Proc. of Robotics: Science and Systems*, (2013).

(17) E. Rimon and D. Koditschek, “Exact robot navigation using artificial potential functions,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 5 (1992), pp. 501–518.

(18) J. Peng and S. Akella, “Coordinating multiple robots with kinodynamic constraints along specified paths,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 24, No. 4 (2005), pp. 295–310.

(19) 野波健蔵, “民生用自律無人航空機 UAV・MAV の研究開発の現状と展望,” 日本機械学會論文集. C 編, Vol. 72, No. 721 (2006), pp. 2697–2705.

(20) R.W. Beard, T. W. McLain, M. A. Goodrich, and E. P. Anderson, “Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 6 (2002), pp. 911–922.

(21) 三浦龍, 鈴木幹雄, 滝沢賢一, 小野文枝, 辻宏之, 井上真杉, 大和田泰伯, 浜口清, “小型無人航空機を用いた災害時無線中継システムの開発,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, (2013), pp. “SS-69”–“SS-70.”

(22) YAMAHA, “高能率産業用無人ヘリコプター RMAX TypeIIG,” http://global.yamaha-motor.com/jp/news/2002/0925/sky.html (参照日 2014 年 1 月 9 日)

(23) NORTHROP GRUMMAN, “RQ-4 Global Hawk,” http://www.northropgrumman.com/Capabilities/RQ4Block10GlobalHawk/Pages/default.aspx (参照日 2014 年 1 月 9 日)

(24) FESTO, “SmartBird,” http://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/46270/Festo_SmartBird_en.pdf, (参照日 2014 年 1 月 9 日)

(25) FESTO, “BionicOpter,” http://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/248133/Festo_BionicOpter_en.pdf, (参照日 2014 年 1 月 9 日)

(26) 新田亮, 屋比久保史, 杉本雅則, 細井一弘, “自律飛行ロボットを用いた屋内ナビゲーションシステム,” 情報処理学会研究報告. EC, エンタテインメントコンピューティング, (2005), pp. 7–14.

(27) セコム, “小型飛行監視ロボット,” http://www.secom.co.jp/kodomo/l/20140707.html (参照日 2014 年 1 月 9 日)

(28) I. Kroo, M. Shants, P. Kunz, G. Fay, S. Cheng, T. Fabian, and C. Partridge, “The mesicopter: A miniature rotorcraft concept,” *Phase 2 interim report, Stanford University*, USA, 2000.

(29) W. Wang, G. Song, K. Nonami, M. Hirata, and O. Miyazawa, “Autonomous control for micro-flying robot and small wireless helicopter x.r.b,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots (IROS)*, (2006), pp. 2906–2911.

(30) 山田 幸佑, 安達 弘典, 伊丹 誠, 加藤 晋, “橋梁点検用の飛行体ロボットの研究—構造物との接触を回避する制御についての実装—”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会講演論文集, No. 14-2, pp. 2A1-B02(1)–2A1-B02(4), 2014.

(31) 矢野浩史, 竹内栄二朗, 大野和則, 田所諭, “マルチコプタを用いた打音検査の試行,” 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会講演論文集, No. 14-2 (2014), pp. 2A1-G01(1)–2A1-G01(4).

(32) E, Altug, JP. Ostrowski, and C. J. Taylor, “Control of a quadrotor helicopter using dual camera visual feedback,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 24, No. 5 (2005), pp. 329–341.

(33) S. Bouabdallah, P. Murrieri, and R. Siegwart, “Towards autonomous indoormicro VTOL,” *Int. J. of Autonomous Robots*, Vol. 18, No. 2 (2005), pp.171–183

(34) S. Bouabdallah and R. Siegwart, “Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor,” *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*,(2005), pp. 2247–2252.

(35) S. Grzonka, S. Bouabdallah, G. Grisetti, W. Burgard, R. Siegwart, “Towards a fully autonomous indoor helicopter,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Workshop on Visual guidance systems for small autonomous aerial vehicles, (2008).

(36) 鈴木太郎, 天野嘉春, 橋詰匠, 土屋武司, 鈴木真二, 辰己薫, 佐藤幸一, 目黒淳一, 久保大輔, 廣川類, 瀧口純一, “小型自律飛行ロボットを用いた災害時における情報収集システムの構築,” 日本ロボット学会誌 Vol. 26, No. 6 (2008), pp. 553–560.

(37) 新田亮, 屋比久保史, 杉本雅則, 細井一弘, “人間とインタラクションを行う飛行ロボット,” 情報処理学会研究報告. EC, エンタテインメントコンピューティング, (2005), pp. 31–36.

(38) 渡辺桂吾, 泉清高, “ローター型飛行ロボットの操縦性について : なぜ X4 フライヤーの 4 つのローター駆動は有効か？,” 第 7 回システムインテグレーション部門講演会文集, (2006), pp. 820–821.

(39) N. Guenard, T.Hamel, and R. Mahony, “A practical visual servo control for an unmanned aerial vehicle,” *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 24, No. 2 (2008), pp. 331–340.

(40) A. Tayebi and S. McGilvray, “Attitude stabilization of a VTOL quadrotor aircraft,” *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 14, No. 3 (2006), pp. 562–571.

(41) E. Altug, J. P. Ostrowski, and R. Mahony, “Control of a quadrotor helicopter using visual feedback,” *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 1 (2002), pp. 72–77.

(42) H. Boudjedir, O. Bouhali, N. Rizoug, “Adaptive neural network control based on neural observer for quadrotor unmanned aerial vehicle,” *Advanced Robotics*, Vol. 28, No. 17 (2014), pp. 1151–1164.

(43) G. M. Hoffmann, H. Huang, S. L. Waslander, C. J. Tomlin, “Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment,” *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf.*, (2007).

(44) Amazon, “Amazon Prime Air,” http://www.amazon.com/b?node=8037720011 (参照日 2014 年 1 月 9 日)

(45) Parrot, “AR.Drone 2.0,” http://ardrone2.parrot.com/ (参照日 2014 年 1 月 9 日)

(46) S. Bouabdallah, P. Murrieri, and R. Siegwart, “Design and control of an indoor micro quadrotor,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 5 (2004), pp. 4393–4398.

(47) Y. Bouktir, M. Haddad, and T. Chettibi, “Trajectory planning for a quadrotor helicopter,” *Proc. of 16th Mediterranean Conf. on Control and Automation*, (2008), pp. 1258–1263.

(48) Y. Suh, “Robust control of a quad-rotor aerial vehicle,” *Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 18 (2003), pp. 103–114.

(49) S. Bouabdalah and R. Siegwart, “Full control of a quadrotor,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2007), pp. 153–158.

(50) D. Hsu, R. Kindel, J. C. Latombe, and S. Rock, “Randomized kinodynamic motion planning with moving obstacles,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 21, No. 3 (2002), pp. 233–255.

(51) M. Elbanhawi and M. Simic, “Sampling-based robot motion planning: A review,” *Int. J. of IEEE Access*, Vol. 2 (2014), pp. 56–77.

(52) T. Kunz and M. Stilman. “Kinodynamic RRTs with fixed time step and best-input extension are not probabilistically complete,” *Proc. of Int. Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, (2014).

(53) T. Kunz and M. Stilman, “Probabilistically complete kinodynamic planning for robot manipulators with acceleration limits,” *Proc. of IEEE/RSJ Int.l Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2014), pp. 3713–3719.

(54) S. Karaman and E. Frazzoli, “Optimal kinodynamic motion planning using incremental sampling-based methods,” *Proc. of IEEE Conf. on Decision and Control (CDC)*, (2010), pp. 7681–7687.

(55) J. Peng and S. Akella, “Coordinating multiple robots with kinodynamic constraints along specified paths,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 24 (2005), pp. 295–310.

(56) C. I. Connolly, J. B. Burns, and R. Weiss, “Path planning using Laplace’s equation,” *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, (1990), pp. 2102–2106.

(57) I. Tarassenko and A. Blake, “Analogue computation of collision-free paths,” *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, (1991), pp. 540–545.

(58) S. Akishita, S. Kawamura, and K. Hayashi, “New navigation function utilizing hydrodynamic potential for mobile robot,” *Proc. of IEEE Int. Workshop Intelligent Motion Control*, (1990), pp.413–417.

(59) R. Daily and D. M. Bevly, “Harmonic potential field path planning for high speed vehicles,” *Proc. of American Control Conf.*, (2008), pp. 4609–4614.

(60) C. I. Connolly, J. B. Burns, R. Weiss, “Path planning using Laplace’s equation,” *Proc. on IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 3 (1990), pp. 2102–2106.

(61) J. Rosell and P. Iniguez, “Path planning using Harmonic functions and probabilistic cell decomposition,” *Proc. on IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, (2005), pp. 1803–1808.

(62) K. Sato, “Collision avoidance in multi-dimensional space using laplace potential,” *Proc. of 15th Conf. Robotics Society Japan*, (1987), pp. 155–156.

(63) K. Sato, “Deadlock-free motion planning using the laplace potential field,” *Advanced Robotics*, Vol. 7, No. 5 (1992), pp. 449–461.

(64) C. Connolly, R. Weiss, and J. Burns, “Path planning using laplace equation,” *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (IROS)*, (1990), pp. 2102–2106.

(65) E. Prassler, “Electrical networks and a connectionist approach to pathfinding,” *Connectionism in Perspective*, R. Pfeifer, Z. Schreter, F. Fogelman, and L. Steels, Eds. The Netherlands: Elsevier, North-Holland, (1989), pp. 421–428.

(66) I. Tarassenko and A. Blake, “Analogue computation of collision-free paths,” *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (IROS)*, (1991), pp. 540–545.

(67) J. Decuyper and D. Keymeulen, “A reactive robot navigation system based on a fluid dynamics metaphor,” *Proc. of Parallel Problem Solving from Nature, First Workshop*, H. Schwefel and R. Hartmanis, Eds. Dortmund, Germany, (1990), pp. 356–362.

(68) S. Akishita, S. Kawamura, and K. Hayashi, “New navigation function utilizing hydrodynamic potential for mobile robot,” *Proc. of IEEE Int. Workshop Intelligent Motion Control*, (1990), pp. 413–417.

(69) J. Guldner and V. I. Utkin, “Sliding mode control for an obstacle avoidance strategy based on an harmonic potential field,” *Proc. of IEEE Conf. on Decision and Control*, Vol. 1 (1993), pp. 424–429.

(70) V. Jan, “Navigation of mobile robots using potential fields and computational intelligence means,” *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 4, No. 1 (2007), pp. 63–74.

(71) A. Masoud, “An informationally-open, organizationally-closed control structure for navigating a robot in an unknown, stationary environment,” *Proc. of IEEE Int. Symp. Intelligent Control* (2003), pp. 614–619.

(72) A. Masoud and S. Masoud, “A self-organizing, hybrid, PDE-ODE structure for motion control in informationally-deprived situations,” *Proc. of 37th IEEE Conf. Decision and Control*, (1998), pp. 2535–2540.

(73) A. Masoud and S. Masoud, “Evolutionary action maps for navigating a robot in an unknown, multidimensional, stationary environment, Part II: Implementation and results,” *Proc. of 1997 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, (1997), pp. 2090–2096.

(74) A. Masoud, S. Masoud, and M. Bayoumi, “Robot navigation using a pressure generated mechanical stress field, the biharmonic potential approach,” *Proc. of 1994 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, (1994), pp. 124–129.

(75) S. A. Masoud and A. A. Masoud, “Motion planning in the presence of directional and obstacle avoidance constraints using nonlinear anisotropic, Harmonic potential fields: A physical metaphor,” *IEEE Trans. on Systems, Man, & Cybernetics, Part A: systems and humans*, Vol. 32, No. 6 (2002), pp. 705–723.

(76) A. Masoud, “Agile, steady response of inertial, constrained holonomic robots using nonlinear, anisotropic dampening forces,” *Proc. of 45th IEEE Conf. Decision and Control*, (2006), pp. 6167–6172.

(77) A. Masoud, “Kinodynamic motion planning,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 17, No. 1 (2010), pp. 85–99.

(78) Y. Bouktir, M. Haddad, and T. Chettibi, “Trajectory planning for a quadrotor helicopter,” *Proc. of Mediterranean Conf. on Control and Automation*, (2008), pp. 1258–1263.

(79) K. Watanabe, K. Tanaka, K. Izumi, K. Okamura, and R. Syam, “Discontinuous control and backstepping method for the underactuated control of VTOL aerial

robots with four rotors," *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Unmanned Systems (ICIUS)*, (2007), pp. 224–231.

(80) L. Davis 編, 嘉数侑昇, 皆川雅章, 高取則彦, 三上貞芳, 川上敬, 鈴木恵二訳, "遺伝アルゴリズムハンドブック," (1994), 森北出版.

(81) 伊庭斉志, "遺伝的アルゴリズム," (2002), 医学出版.

(82) 三宮信夫, 喜多一, 玉置久, 岩本貴司, "遺伝アルゴリズムと最適化," 朝倉書店 (1998).

(83) 山田裕也, 渡辺桂吾, 永井伊作, "カメラを用いた屋内用 3 次元位置計測システムの開発," 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, (2013), pp. 1060–1063.

(84) K. Watanabe, Y. Yamada, and I. Nagai, "The development of a 3D position measurement system for indoor aerial robots," *Proc. of 2014 14th Int. Conf. on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014)*, (2014), pp.1185–1190.

(85) 渡辺桂吾, 山田裕也, 永井伊作, "屋内用飛行ロボットのための 3 次元位置計測システムの開発," 第 24 回インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN '14), 講演論文集, (2014), pp. 56–61.

(86) P. Bristeau, F. Callou, D. Vissiere, and N. Petit, "The navigation and control technology inside the AR.Drone micro UAV," *Preprint of 18th IFAC World Congress*, (2011), pp. 1477–1484.

(87) 飯塚健男, 中村恭之, 和田俊和, "ステレオカメラによる色ターゲットの 3 次元位置計測," 情報処理学会技術報告 (2007), pp. 65–70.

(88) 高本英典, 高木康博, "モバイル用 HDD でロスプレイへの赤外線ステレオカメラを用いた指先ポインティングの導入," 映像メディア学会技術報告書, Vol. 32, No. 27 (2008), pp. 37–40.

(89) Z. Zhang, "A Flexible New Technique for Camera Calibration," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 21 (2000), pp. 1330–1334.

(90) 久米孝明, 永井伊作, 田中豊, "ステレオカメラを用いたポインティングデバイスの開発－人差し指の 5 自由度運動計測－," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演論文集, (2005), pp. 1A1-N-056(1)–(4).

(91) J. Pestana Puerta, J. L. Sanchez-Lopez, I. Mellado Bataller, C. Fu, and P. Campoy Cervera, "AR drone identification and navigation control at CVG-UPM," *Proc. of CEA XXXIII Jornadas de Automatica 2012*.

(92) N. Pradhan, T. Burg, S. Birchfield, and U. Hasirci, “Indoor navigation for mobile robots using predictive fields,” *Proc. of American Control Conf. (ACC)*, (2013), pp. 3237–3241.

(93) M. Kalavsky and Z. Ferkova “Harmonic potential field method for path planning of mobile robot,” *Proc. of Conf. of Informatics and Management Scisnses*, pp. 41–46.

本論文に関する発表論文

発表論文

1. K. Motonaka, K. Watanabe, S. Maeyama, “Kinodynamic motion planning for an X4-Flyer using a 2-dimentional harmonic potential field,” *International Journal on Smart Material and Mechatronics*, Vol. 1, No. 1 (2014), pp. 16–19.

2. K. Motonaka, K. Watanabe, S. Maeyama, “Offline gain optimization in kinodynamic motion planning based on a harmonic potential field,” *Artificial Life and Robotics*, Vol. 19, No. 1 (2014), pp. 47–54.

国際会議

1. K. Watanabe, T. Goto, K. Motonaka, S. Maeyama, and I. Nagai, “An error model of chained form with two inputs for a generalized stabilization problem,” *Proc. of Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS)*, Fukuoka, Japan, Dec. 2014.

2. K. Motonaka, K. Watanabe, and S. Maeyama, “3-Dimensional kinodynamic motion planning for an X4-Flyer using 2-dimensional harmonic potential fields,” *Proc. of Int. Conf. on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 1181–1184, Korea, Oct. 2014.

3. K. Motonaka, K. Watanabe, and S.Maeyama, “Kinodynamic motion planning for an X4-Flyer by switching harmonic potential fields,” *Proc. of Int. Conf. on Smart Material and Mechatronics (ISSMM)*, Makassar, Indonesia, Sep. 2014.

4. K. Motonaka, K. Watanabe, and S.Maeyama, “Kinodynamic motion planning and control in a 3-dimensional space based on a 2-dimentional harmonic potential field,” *Proc. of SICE Annual Conference, Hokkaido*, pp. 744–747, Hokkaido, Japan, Sep. 2014

5. K. Motonaka, K. Watanabe, and S.Maeyama, “Motion planning of a uav using a kinodynamic motion planning method,” *Proc. of Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 6381–6385, Vienna, Austria, Nov. 2013.

6. K. Motonaka, K. Watanabe, and S.Maeyama, “Kinodynamic motion planning and control for an x4-flyer using anisotropic damping forces,” *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4407–4412, Tokyo, Japan, Nov. 2013.

7. K. Motonaka, K. Watanabe, and S.Maeyama, “Offline optimization of gains for kinodynamic motion planning for X4-Flyer,” *Proc. of SICE Annual Conference*, pp. 2727–2731, Nagoya, Japan, Sep. 2013.

8. K. Motonaka, S.Maeyama, and K. Watanabe, “Offline optimization of gains for kinodynamic motion planning,” *Proc. of Int. Conf. on Electrical Control and Computer Engineering (InECCE)*, pp. 310–315, Kuantan, Malaysia, Aug. 2013.

9. K. Motonaka, K. Watanabe, and S.Maeyama, “Kinodynamic motion planning and control using anisotropic damping forces,” *Proc. of Int. Symp. on Artificial Life and Robotics*, pp. 57–60, Daejeon, Korea, Jan. 2013.

国内口頭発表

1. 本仲君子，渡辺桂吾，前山祥一，“２次元 HPF を用いた X4-Flyer のキノダイナミック動作計画”，第 32 回日本ロボット学会学術講演会，福岡，2014 年 9 月

2. 本仲君子，渡辺桂吾，前山祥一，“X4-Flyer のためのキノダイナミック動作計画における GA を用いたゲイン最適化”，第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，兵庫，2013 年 12 月

3. 本仲君子，渡辺桂吾，前山祥一，“キノダイナミック動作計画の X4-Flyer への適用”，第 31 回日本ロボット学会学術講演会，東京，2013 年 9 月