

クアドローター型 UAV による能動的衝突の制御

The Control of Active Collision for Quadrotor UAV

杉山 敦*¹ 堀 浩一*²
 Atsushi Sugiyama Koichi Hori

*¹東京大学 大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻
 Department of Aeronautics and Astronautics, University of Tokyo

*²東京大学 大学院工学系研究科
 School of Engineering The University of Tokyo

無人航空機 (UAV) は近年様々な環境下における運用法が考案されている。また安全性の要求から衝突回避に関する研究も行われている。しかし衝突回避が難しい状況への対応や大きな力を与えたいといった要求にこたえるには、衝突動作を実際に行った場合の UAV の挙動についての知見が重要となる。本研究ではクアドローター型 UAV が衝突により壁面スイッチを押すという動作について、制御法を提唱しシミュレーションを行う。

1. はじめに

無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) は近年、特殊なタスクに対して有効であるとして注目されている。そして UAV の中でも小型電子素子の発達および制御理論の充実に伴って、小型クアドローターに関する研究が盛んになっている。

研究としては画像処理による航法 [Engel] や 3 機が協調してピンポン玉を投げる [Ritz 12] などの実践例が挙げられる。

本研究では制御理論の応用として、UAV の独力による自律的な屋内走破を目標に据える。具体的なテーマとしては「屋内の照明スイッチを押す」というタスクを考える。このようなタスク設定に至った理由は、屋内飛行に関する研究において空間へ物理的に干渉する方法を検討される機会が非常に限られているからである。すなわち、屋内探査ミッションにおいて、UAV が照明スイッチやドアノブといったヒト用インターフェースへ働きかけることが可能かどうかを考察することがより大きな目標である。さらに UAV の衝突に関する挙動を検討することを通じ、衝突回避が難しい状況で UAV を生存させる方法や、軽量の機体で一瞬だけ大きな力を生じさせる手法を確立することも本研究の狙いである。

このタスク設定では「タイミングはいつでもよいが、与えられた衝突速度で横方向に機体が衝突し、その後に姿勢が不安定化しない」という制御問題を解く事が必要となるので、これについての制御法を設計し、シミュレーションにより挙動を調べる。

2. 力学モデル

2.1 クアドローターの運動に関するモデル

力学モデルは [Madani 07] において示されるものを基本的に用いたが姿勢角表現を修正する。クアドローター機の運動は 6 自由度で表せる。地球固定座標は $\zeta = [x, y, z]^T$ で表し、姿勢はオイラー角 $\Theta = [\phi, \theta, \psi]^T$ すなわちロール、ピッチ、ヨーで表す。ここで、 ζ の軸は x, y, z 軸がそれぞれ北、東、地球中心向きとなるように取る。座標設定を図 1 に示す。

クアドローターのプロペラシステムにより生じる力 F_{prop}

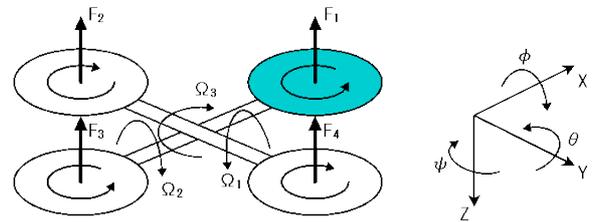


図 1: 座標設定

およびトルク T_{prop} を次のように置く。

$$F_{prop} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\sum_{i=1}^4 F_i \end{pmatrix}, \quad T_{prop} = \begin{pmatrix} d(F_2 - F_4) \\ d(F_1 - F_3) \\ c \sum_{i=1}^4 F_i (-1)^{i-1} \end{pmatrix}$$

ただし c, d は定数であり、これらの力およびトルクの作用は図 2 に示す通りである。このローター推力と空気抵抗を表す K_t, K_r 、また幾何学関係式に基づき定まる変換行列 R_t および R_r によって $\ddot{\zeta}$ および $\ddot{\Theta}$ について以下の式を得る。これは運動方程式を慣性座標系の状態量で表したものである。

$$\begin{aligned} \ddot{\zeta} &= \frac{1}{m} \cdot R_t (F_{prop} - K_t R_t^T \dot{\zeta}) + G \\ \ddot{\Theta} &= (I_T R_r)^{-1} (T_{prop} - I_T \left(\frac{\partial R_r}{\partial \phi} \dot{\phi} + \frac{\partial R_r}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) \dot{\Theta} \\ &\quad - K_r R_r \dot{\Theta} - (R_r \dot{\Theta}) \times (I_T R_r \dot{\Theta})) \end{aligned}$$

そして入力 $u = (u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4)^T$ を以下のように定める。

$$u_i = \dot{F}_i \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

2.2 衝突モデル

本研究では衝突現象についてシミュレーションで扱う必要があるが、球と平面の衝突について議論した研究 [本江 99] では衝突を次のような方程式で近似できるとしており、これを近似的なモデルとして使用する。

$$m\ddot{x} = -\alpha|x|^{0.5}\dot{x} - Kx^{1.5}$$

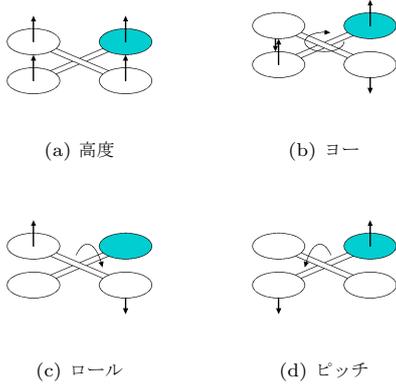


図 2: クアッドローターの推力組み合わせ-運動間関係

ただしここでいう x とは 2 物体の「食い込み」の量であるほか、 K, α は定数である。

本節の中で最も重要になるのは衝突によるトルクである。これは図 3 に示されるようにピッチ絶対値を増加させる。とくに負ピッチでの衝突を行うは衝突後再び壁面に向かうように機体が傾斜し危険であるが、正ピッチでの衝突であれば壁面から離れやすいため、安定性の要求から 0 に近く正であるようなピッチ角で衝突動作を行うことが目標となる。

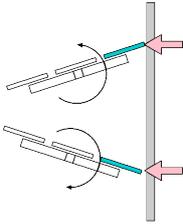


図 3: 衝突によるピッチへの影響 (上:正ピッチの場合、下:負ピッチの場合)

3. 制御器設計

3.1 状態フィードバック

基本的な安定化を行うためクアッドローターの運動方程式をホバー条件すなわち $\dot{x} = \dot{y} = \dot{z} = 0, \phi = \theta = \psi = \dot{\phi} = \dot{\theta} = \dot{\psi} = 0, \ddot{F}_i = 0$ なる条件のまわりで線形化し、入力 \mathbf{u} に正則行列を掛けて得られる仮想的な入力 $u_\phi, u_\theta, u_\psi, u_z$ を定義する。

これにより線形化された方程式は 2 に示す 4 つの運動を行う独立システムに分離されるので、これは推力の実現可能性などを検討して調整することができる。

3.2 衝突運動の最適化

前項のフィードバックは外乱に対する基礎的な安定性を保障するものであるが、衝突動作にあたってピッチや x 方向速度を同時に所定の値にするには不足である。これはシステムの性質上、ピッチ角 θ と \dot{x} のどちらかしか制御対象に選べないことが原因である。そこで最適制御問題の解法に基づいてフィードフォワード成分の入力を設計することでこれらの状態量を同時に指定の終端値に到達させることを考える。

いま特に x 軸方向への一次元運動を考察する。すなわち、前節で述べたような線形化システムのうちピッチ運動に関する式を基に問題を定式化し、評価関数を定める事で最適化を行う。この運動は前節で行った線形化の一部として、次のようなシステムで近似できる。

$$\dot{\xi} = \mathbf{A}_\theta \xi + \mathbf{B}_\theta u_\theta \quad (1)$$

ただし

$$\xi = \begin{pmatrix} x & \dot{x} & \theta & \dot{\theta} & \ddot{\theta} \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_\theta = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_x}{m} & -g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_r}{I_y} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_\theta = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

である。いま、このシステムに対して初期条件および終端条件を次のように設定する。

$$\xi(0) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \quad (5)$$

$$\xi(t_f) = \begin{pmatrix} x_f & v_f & \theta_f & 0 & 0 \end{pmatrix}^T$$

x_f, v_f はタスク要求、つまりスイッチの特性や屋内環境の広さといった制約から定まる。また θ_f はタスク要求からは必要でないが、衝突時に機体へ働くモーメントおよびその後の安定性を考慮した結果、必要であると判断し導入している。すなわち第 2.2 節で触れたように、衝突時に θ が非負であることをなるべく保障しなければならない。また最小化すべき評価関数 J を

$$J = \int_0^{t_f} u_\theta^2 dt$$

と定め、推力が急変化しないような制御解が得るべき最適解であるとした。このとき t_f を自由端とすると $t_f \rightarrow \infty$ で $J \rightarrow 0$ であるため有意義な解が得られないので、様々な t_f に対して終端時間固定の解を求めるようにした。

以上の条件から定式化される最適制御問題を解析的に解くと、 u_θ が以下に示すように 5 つの関数の線形和で表されればよいことが分かる。

$$u_\theta = \varphi \cdot \mathbf{D}$$

ただし

$$\mathbf{D} = (D_1 \ D_2 \ D_3 \ D_4 \ D_5)^T$$

$$\varphi = \left(e^{\frac{k_x}{I_y} t} \ e^{\frac{k_t}{m} t} \ t^2 \ t \ 1 \right)^T$$

つまり、 φ が最適制御解の基底関数を並べたベクトルであり、 \mathbf{D} は境界条件から一意に定まる、基底関数への重みづけである。具体的には、初期条件と制御入力に対して終端値を解析的に求めることができるので、これをもとにして \mathbf{D} を定めればよい。

$$\begin{aligned} \xi(t_f) &= \int_0^{t_f} e^{\mathbf{A}(t_f-\tau)} \mathbf{B} u_\theta(\tau) d\tau \\ &= \int_0^{t_f} e^{\mathbf{A}(t_f-\tau)} \mathbf{B} \varphi(\tau) d\tau \cdot \mathbf{D} \end{aligned}$$

第4章において実際に使ったのは $t_f = 3.0\text{sec}$ かつ $\xi(t_f) = (1.2\text{m } 1.0\text{m/s } 0.01 \ 0 \ 0)^T$ とした場合の解であり、これを4に示す。ここで t_f を必要以上に大きくすると運動は「大きく下がってから勢いを付ける」というものになり、空間制約の厳しい屋内タスクと相性が悪い。逆に t_f を小さくすると必要な推力変動が大きすぎて外乱に対処する余裕がなくなってしまう。 t_f の選定にあたってはこれらの問題を回避していることを確認して解を採択した。

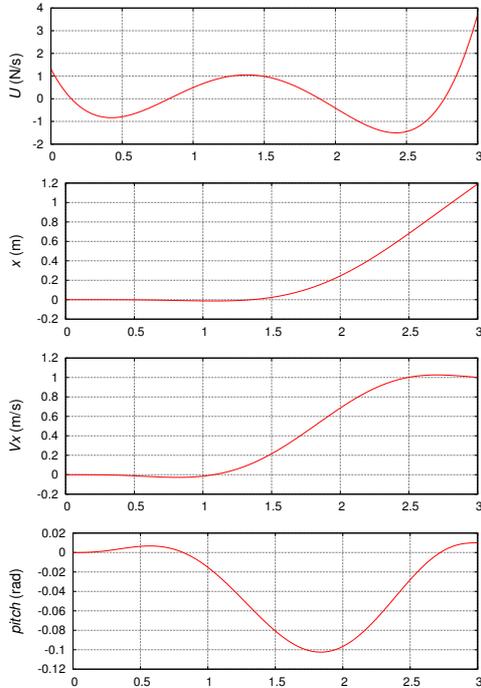


図 4: シミュレーションで用いた最適入力解 (上から順に $u_\theta, x, \dot{x}, \theta$)

4. 実験と評価

4.1 実験設定

第2節で示したダイナミクスの計算は Runge-Kutta 法により行っているほか、衝突現象の計算では時間スケールが小さいことに配慮して通常より時間区切りを細かくし、かつ衝突中も状態量観測の間隔が不変であるように計算を行った。通常のダイナミクス計算間隔およびオブザーブ間隔は $0.01(\text{sec})$ とし、衝突計算時の時間間隔は $1.0 \cdot 10^{-5}(\text{sec})$ とした。

また特にノイズが存在する条件において、単にタスク開始信号の受諾後ただちに加速運動に入るのではなく状態量が十分にゼロ点に近いことを確認してから加速運動を開始するようにした。具体的には次の閾値判定式が真のとき加速運動を開始する。

$$\hat{\mathbf{x}}^T V_w \hat{\mathbf{x}} \leq v_w$$

ただし $\hat{\mathbf{x}}$ は状態量推定値、 V_w は対角成分が正または0である対角行列、 v_w は定数である。つまり、状態量のユークリッドノルムの二乗に重みを付けて判定することを考える。重みは状態量の誤差を距離の次元へ有次元化して決定した。

また、ノイズあり条件に対して先に述べた状態遷移の閾値の有効性を確認するため、タスク開始はシミュレーション開始後3秒の時点で与えるようにした。

4.2 実験結果

4.2.1 外乱及び観測ノイズなし条件

外乱がなく状態量は正確に分かると仮定した場合の計算結果として、横軸を経過時間 t 、縦軸を x, z, \dot{x}, θ としたそれぞれの推移を図5に示す。

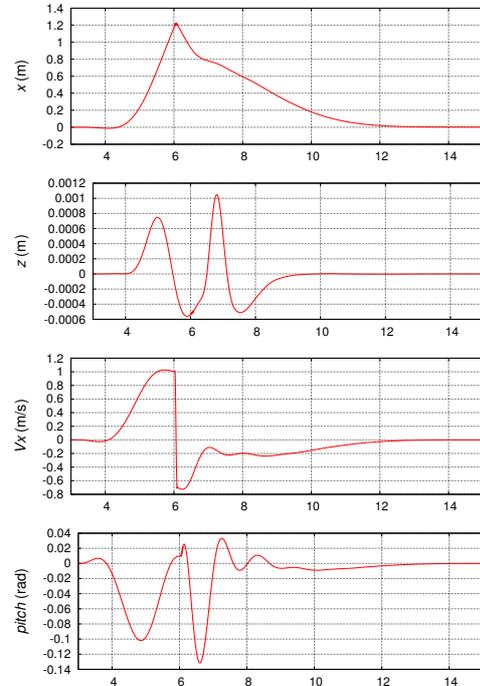


図 5: ノイズがない場合の状態推移 (上から順に x, z, \dot{x}, θ)

特に3秒後から6秒後までの区間を見ると x, \dot{x}, θ の推移はほぼ最適制御解で想定した通りになっているが、ピッチ角がつくとと推力が偏向し z 方向成分が減少するため高度が変動する。これは線形化によって無視された高度-ピッチ間の連成効果であるが値としては小さく、状態フィードバックによっても変動は軽減されている。また θ は衝突により値が大きくなるが、安定性を損ねるほどの動きではないことが分かる。

4.2.2 外乱及び観測ノイズあり条件

外乱が存在し状態量はノイズの乗った観測越しに推定とした場合の結果、および複数回の試行での衝突時におけるパラメータを示す。状態推定には拡張カルマンフィルタ (EKF) を使用している。特に観測ノイズについては AR.Drone (Parrot 社) の搭載センサや同機による画像航法の実践研究 [Engel] を参考に仮定した。この場合の計算結果としては図6のような結果が得られている。

速度は想定通りであり z 座標の誤差も 0.01m 未満に抑えられているが、 y の衝突時の誤差は 0.03m であってタスク上は許容できない。このほか、衝突時ピッチは設計値 $0.01(\text{rad})$ に比べて小さいものの正ピッチであり、衝突の性質としてはよい性質を確保している。

また、推力の推移は図7に示す通りである。釣り合いホバー時のローター1つ当たりの推力 1.23N を中心に 0.3 倍程度の

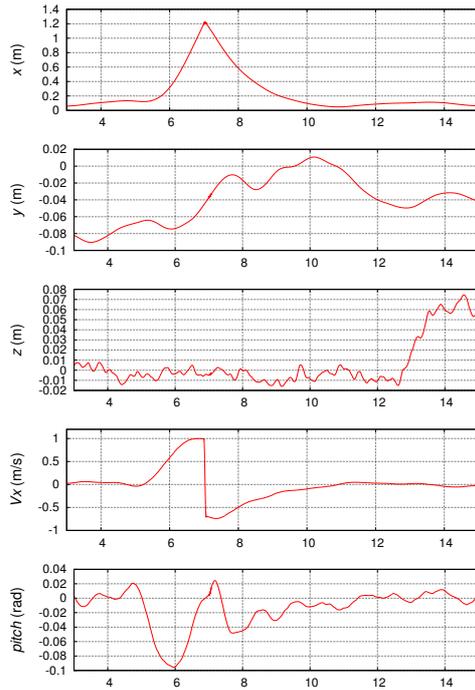


図 6: ノイズがある場合の状態推移 (上から順に x, y, z, \dot{x}, θ)

幅で激しく増減を行っている。これは推力幅としては無理のない範囲に収まっていると思われる。

表 1 では、この条件で 25 秒分のシミュレーションを 20 回繰り返し衝突時に達成された値についての平均および標準偏差を示している。

表 1: 衝突時の達成パラメータ

	$y(m)$	$z(m)$	$\dot{x}(m/s)$	$\theta(rad)$
平均値	-0.019	-0.006	1.00	0.0076
標準偏差	0.063	0.0125	0.028	0.0063

z 方向については 20 回のうち 14 回の試行で誤差 0.01m 以下を達成できており、システム同定が出来ているならば十分な高精度で高度制御ができることが示唆される。これに対し y では z より達成値の精度が悪い。これは推力に関する制約からゲインを取りにくいこと、高度 z よりも y 方向の観測精度が低いとした仮定の帰結であると思われる。

またピッチ角達成値については 1 回の試行を除きすべての試行で値が正であり、すべての試行で衝突後も機体は安定であり続けた。これは衝突動作としては良い性質の衝突が行えていることを示している。つまり、タスクに失敗した場合でも機体は後退したのち状態を安定させ、再びタスク実践を試みることができる。

5. 結論

本研究では壁面のスイッチを押す、より具体的には「壁面上の指定位置へ与えられた速度で衝突し、衝突後に機体を安定させる」というタスクに関して制御法を設計し、その運動をシミュレートした。

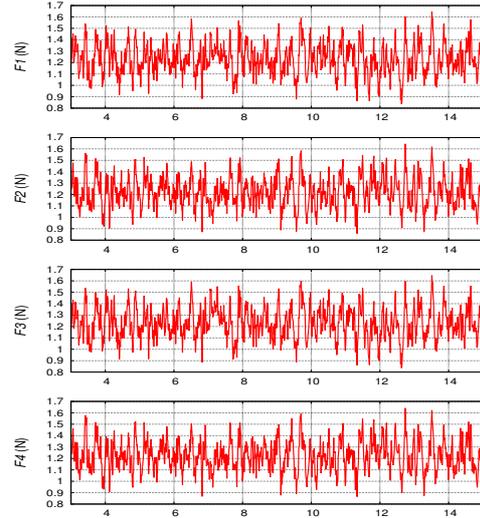


図 7: ノイズがある場合の推力推移

その結果、外乱や観測ノイズがなければ運動は十分な精度で可能であること、および弱い外乱および観測雑音に対しては、精度は不十分であるものの機体安定性を保って衝突動作を行えることを示した。また、より汎用性の高い帰結として衝突時のピッチ角が安定性に与える影響を議論することができた。

今後の課題としては状態量推定誤差の取り扱いやシステムモデル化誤差への対処法を検討する必要があるが、これらを解決することで実機試験への発展と更なる応用が期待できる。

参考文献

- [Engel] Engel, J., Sturm, J., and Cremers, D.: Accurate Figure Flying with a Quadcopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing, *IMU*, Vol. 320, p. 240
- [Madani 07] Madani, T. and Benallegue, A.: Backstepping control with exact 2-sliding mode estimation for a quadrotor unmanned aerial vehicle, in *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 141–146 IEEE (2007)
- [Ritz 12] Ritz, R., Müller, M. W., Hehn, M., and D’Andrea, R.: Cooperative quadcopter ball throwing and catching, in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 4972–4978 IEEE (2012)
- [本江 99] 本江哲行, 佐藤秀紀, 岩田佳雄, 小松崎俊彦, 本郷陽子: 球と平面からなる衝突系のモデル化と解析, *日本機械学会論文集, C 編*, Vol. 65, No. 634, pp. 2287–2293 (1999)