

回転翼飛行ロボットの時間遅れ運動制御シミュレーション

佐藤 宏樹¹, 橋本 理寛¹, 本田 泰²

¹ 室蘭工業大学 情報電子工学系専攻

² 室蘭工業大学 しくみ情報系

概要

本研究の対象とする飛行ロボット制御系に含まれる時間遅れは最大約 440msec である。運動方程式に基づいて、飛行ロボットの傾きに関する 1 自由度に対する運動制御のシミュレーションを行い、時間遅れを含む運動制御と時間遅れを含まない運動制御を比較した。また、時間遅れを含む運動制御におけるシミュレーションと実機実験結果を比較した。

Simulations for a motion control with dead times in a quad rotor flying robot

Kouki Sato¹, Yoshihiro Hashimoto¹, Yasushi Honda²

¹ Division of Information and Electronic Engineering, Muroran Institute of Technology

² College of Information and Systems, Muroran Institute of Technology

Abstract

A control system of a quad rotor flying robot has dead times which come from data transmission and rotor reactions. At most the dead time is 440msec. We carry out simulations for a one dimensional rotation of the flying robot. Gains which give convergence of rotation are found through comparison between experiments and simulations about the control of motion.

1 はじめに

”ロボットとは「人間の代わりに作業する装置」である” [1] と考えられる。ロボットが人間の代わりとして行動できるということには、ロボット自身が知能を持ち自律行動できることが求められる。自律行動には反応行動、計画行動、適応行動、協調行動が含まれる。自律行動ができる知能ロボットを実現するためには、環境に対して行動を発生させる仕組みを作り、実環境で行動させる”構成論”が不可欠である。我々は知能ロボットの構成論的研究として回転翼飛行ロボット（以下、飛行ロボットと呼ぶ）に着目する [2]。

まずは自律行動のうちすべての基礎となる反応行動から研究を進める。姿勢制御は反応行動に対応していると考えられる。

先行研究 [3] では本研究と同じく回転翼飛行ロボットの姿勢制御を行っている。回転翼飛行ロボットは搭載している加速度センサ及びジャイロセンサによ

り姿勢情報を取得し、その情報を基に PID 制御による姿勢制御を行っている。ここで、センサによる姿勢検出からモーターによる姿勢制御までにはデータ処理や通信等の時間がかかる。この時間を時間遅れと呼ぶ。先行研究では時間遅れの影響を無視しているが、PID 制御においては時間遅れが無い状態で収束するゲインでも、時間遅れがある状態では発散することがある [2]。そのため、姿勢制御を行うには時間遅れを考慮した姿勢制御を行う必要がある。本研究では時間遅れを考慮した PI 制御による姿勢制御を行い、時間遅れを考慮した姿勢制御と考慮していない姿勢制御の比較を行う。また、姿勢制御におけるゲインの安定領域を実機実験及びシミュレーションから求め、もっとも収束するゲインの組み合わせを求める。

2 飛行ロボットの構成

飛行ロボットは4つのモーターを持ち、それぞれ m1, m2, m3, m4 とする [2]. 本研究では x 軸周りの姿勢制御を行うため、その制御とは関係の無い m2, m4 は飛行ロボットに取り付けていない。

飛行ロボットの構成を図1に示す。飛行ロボットには姿勢計測のためのセンサを搭載している。計測した姿勢情報を基に Board Computer (以下、BC と呼ぶ) がモーターに制御値を送り、各モーターを制御する。モーターにはブラシレスモーターを使用し、ブラシレスモーターの回転数を制御するために Electronic Speed Controller (以下、ESC と呼ぶ) を搭載する。BC は無線 LAN を搭載しているためノートパソコンと無線 LAN 通信が可能である。

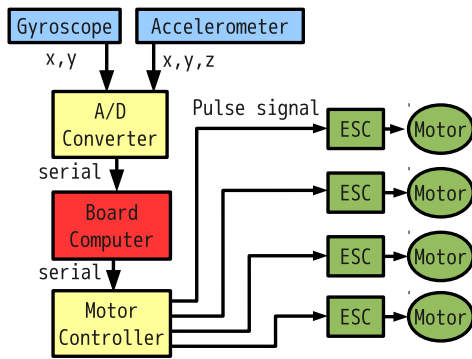


図1: 飛行ロボットのシステム構成

3 時間遅れ

飛行ロボットにおける全体の時間遅れは最大約 440[msec] であることが先行研究でわかっている [2]. その内訳は飛行ロボットの内部処理等にかかる時間 110[msec] (図2にダイアグラムを示す。図上の数字はデータ処理の積算値である)、プロペラ角速度の緩和時間 (τ) が約 60[msec] (モーター制御値上昇時を τ_+ , 減少時を τ_- とし, $\tau_+ = 37$ [msec], $\tau_- = 62$ [msec] である), 加速度センサ値単純移動平均による時間遅れ約 270[msec] である。

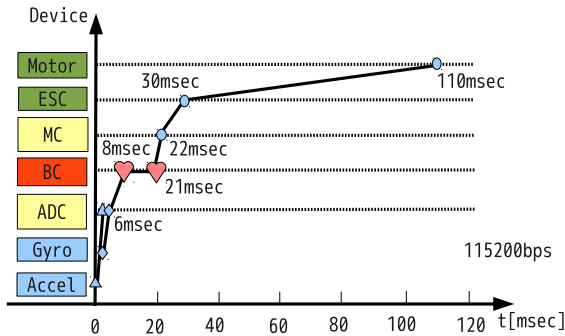


図2: むだ時間ダイアグラム

ここで姿勢検出からプロペラ角速度が変わりきるまでの時間を通信等にかかるむだ時間 δ とする。姿勢検出からモーター制御値を決定するまでの時間を δ_1 , モーター制御値の決定からプロペラ角速度が変わりきるまでの時間を δ_2 とすると, $\delta_1 = 21$ [msec], $\delta_2 = (89 + \tau_{\pm})$ [msec] である。 δ は (1) 式で表すことができる。

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad (1)$$

4 飛行ロボットの姿勢制御モデル

シミュレーションに使用するモデルを作成するため、飛行ロボットにおける x 軸周りの運動方程式を求める。

$$I_x \ddot{\phi}(t) = U_x(t) \quad (2)$$

$$U_x(t) = r(L_1(t) - L_3(t)) \quad (3)$$

$$L_i(t) = a_L \omega_i^2(t) \quad (4)$$

$$\omega_i(t) = a' \Omega_i(t - \delta_2) + b' \quad (5)$$

(2) 式は x 軸周りの運動方程式である。(3) 式におけるトルク $U_x(t)$ は m1, m3 の揚力差によって求める。揚力 L_i は一般にプロペラ角速度 $\omega_i(t)$ の 2 乗に比例することから (4) 式と表せる。(5) 式における $\omega_i(t)$ はモーター制御値 $\Omega(t - \delta_2)$ の関数であることが先行研究によりわかっている [2]. なお, (2)~(5) 式に使用する変数の説明を表1に、各係数値の値を表2に示す。係数値は実機実験から求めた。

記号	定義	単位
i	モーター番号	
t	時刻	[sec]
I_x	慣性モーメント	[kg · m ²]
$U_x(t)$	機体全体のトルク	[kg · m ² rad/sec ²]
r	機体の中心からモーターまでの距離	[m]
$L_i(t)$	揚力	[kg · m/s ²]
a_L	プロペラ角速度を揚力に変換する係数	[kg · m/rad ²]
$\omega_i(t)$	プロペラ角速度	[rad/sec]
a'	モーター制御値を角速度に変換する係数	[rad/sec]
b'	モーター制御値を角速度に変換する係数	[rad/sec]
$\Omega_i(t)$	モーター制御値	[%]
c	ホバリングに必要なモーター制御値	[%]

表1: 数式に使用する記号の定義

次に x 軸周りの姿勢制御について述べる。x 軸周りの姿勢制御を行うには、m1 と m3 を制御する必要がある。飛行ロボットの姿勢制御には時間遅れを含む PI 制御を用いる。

$$\Omega_1(t - \delta_2) = -f_1(\dot{\phi}(t - \delta)) + c \quad (6)$$

$$\Omega_3(t - \delta_2) = f_3(\dot{\phi}(t - \delta)) + c \quad (7)$$

$$f_i(\dot{\phi}(t - \delta)) = K_P \dot{\phi}(t - \delta) + K_I \bar{\phi}(t - \delta) \quad (8)$$

$\bar{\phi}$ は単純移動平均した ϕ の値である [2]. (6)~(8) 式より、モーター制御値を決定する。本研究においてはホバリングを目標とするため $\dot{\phi}_t$ 及び $\bar{\phi}_t$ の目標値は 0 である。

5 姿勢制御における収束判定

PI制御におけるゲインの安定領域を調べるためには、制御における収束・発散の判定基準が必要である。その判定基準を定義するためには収束と発散の境界である振動時における姿勢情報を調べる必要がある。ここでは時間遅れを含まない姿勢制御における振動時の姿勢情報を調べ、そこから収束・発散の判定基準を定義する。

まず、(2)~(5)式をまとめ、以下の微分方程式を導出する。

$$I_x \ddot{\phi}(t) = -\alpha \dot{\phi}(t - \delta) - \beta \bar{\phi}(t - \delta) \quad (9)$$

$$\begin{cases} A = 4a' a_L r (a' c + b') \\ \alpha = AK_P \\ \beta = AK_I \end{cases} \quad (10)$$

ここで、時間遅れがない場合、 $\delta = 0$ 、 $\bar{\phi}(t) = \phi(t)$ とし、(9)式を解く。そうすることで姿勢制御における角度を解析的に求めることができる。

$$\phi(t) = \begin{cases} \frac{\dot{\phi}(0)}{\mu} e^{kt} \sin \mu t & (4I_x \beta - \alpha^2 > 0) \\ \frac{\dot{\phi}(0)}{\mu_s} e^{kt} \sinh \mu_s t & (4I_x \beta - \alpha^2 < 0) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} k = -\frac{\alpha}{2I_x} \\ \mu = \frac{\sqrt{4I_x \beta - \alpha^2}}{2I_x} \\ \mu_s = \frac{\sqrt{\alpha^2 - 4I_x \beta}}{2I_x} \end{cases} \quad (12)$$

次に角速度を求めるため、(11)式を時間微分する。

$4I_x \beta - \alpha^2 > 0$ のとき

$$\dot{\phi}(t) = \frac{\dot{\phi}(0)}{\mu} e^{kt} (k \sin \mu t + \mu \cos \mu t) \quad (13)$$

$4I_x \beta - \alpha^2 < 0$ のとき

$$\dot{\phi}(t) = \frac{\dot{\phi}(0)}{\mu_s} e^{kt} (k \sinh \mu_s t + \mu_s \cosh \mu_s t) \quad (14)$$

以降から $\omega_x(t) = \dot{\phi}(t)$ とする。

ここで、姿勢制御結果における角度及び角速度の時間変化を相空間内の軌道として表す。軌道を表す際、角度と角速度の大きさを揃えるため、 $K_P = 0$ のときにおける μ を μ' とし、

$$\mu' = \sqrt{\frac{AK_I}{I_x}} \quad (15)$$

を角度にかける。 $K_P = 0$ のとき、角度 $\mu' \phi(t)$ 及び角速度 $\omega_x(t)$ の関係は、

$$\begin{aligned} & (\mu' \phi(t))^2 + \omega_x^2(t) \\ &= \left(\frac{\mu' \omega_x(0)}{\mu'} \sin \mu' t \right)^2 + \left(\frac{\omega_x(0)}{\mu'} \mu' \cos \mu' t \right)^2 \\ &= \omega_x^2(0) (\sin^2 \mu' t + \cos^2 \mu' t) \\ &= \omega_x^2(0) \end{aligned} \quad (16)$$

となり、その軌道は図3赤グラフのように半径 $\omega_x(0)$

とする真円として描かれる。このとき、振動した姿勢制御結果が得られる。 $K_P = 0.7$ とし、制御結果が収束する場合、その軌道は初期状態から0に向かうように描かれる(図3緑グラフ参照)。

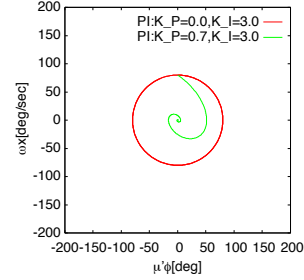


図3: 時間遅れを含まないPI制御におけるx軸周りの姿勢制御赤: $K_P = 0.0$, $K_I = 3.0$, 緑: $K_P = 0.7$, $K_I = 3.0$. $\phi(0)[\text{deg}]$, $\omega_x(t) = 80[\text{deg/sec}]$

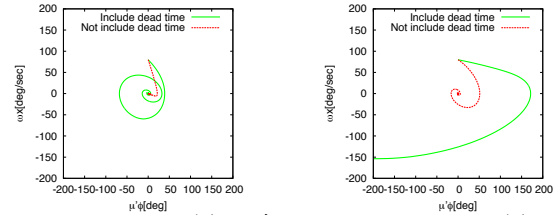
ここから、収束判定を以下の式として定義する。

$$I = \int_0^T \frac{\sqrt{(\mu' \dot{\phi}(t))^2 + \omega_x^2(t)}}{\sqrt{(\mu' \dot{\phi}(0))^2 + \omega_x^2(0)}} dt \quad (17)$$

I は収束発散係数を表し、1未満のときに収束、1以上のときに発散とする。 T は姿勢制御を行った時間を表す。以降(17)式は時間遅れを含む姿勢制御シミュレーション及び実機実験の収束判定に用いる。

6 時間遅れを含まない姿勢制御と時間遅れを含む姿勢制御の比較

飛行ロボットの運動方程式に基づいた修正オイラー法によるシミュレーションを行い、時間遅れを含まない場合と時間遅れを含む場合の姿勢制御結果を比較した(図4参照)。図4赤線は時間遅れを含まない場合、緑線は時間遅れを含む場合である。シミュレーションに使用する各係数を表2に示す。時間遅れを含まない姿勢制御結果は(11)~(14)式を用いて求めた。横軸は角度 $\mu' \phi$ 、縦軸は角速度 ω_x である。



(a) $K_P=3.0, K_I=3.0$ (図6A点) (b) $K_P=0.6, K_I=3.0$ (図6B点)

図4: シミュレーション:PI制御におけるx軸周りの姿勢制御, $\phi(0)=0[\text{deg}]$, $\omega_x(0)=80[\text{deg/sec}]$

図4(b)より、PI制御による姿勢制御では時間遅れを含まない場合に収束するゲインであっても、時間遅れを含む場合に収束するとは限らないことを確認した。

記号	係数值	単位
δ_1	0.021	[sec]
δ_2	$0.089 + \tau_{\pm}$	[sec]
τ_+	0.037	[sec]
τ_-	0.062	[sec]
c	50	[%]
I_x	0.006	[kg · m ²]
r	0.2	[m]
a_L	4.07×10^{-6}	[kg · m/rad ²]
a'	9.81	[rad/sec]
b'	102.70	[rad/sec]

表 2: 時間遅れを含むシミュレーションに用いる係数值

7 シミュレーションと実機による姿勢制御の比較

実験ではPI制御を用いたx軸周りの姿勢制御を行った。x軸周りの回転のみを制御するため、飛行ロボットを装置に設置し、ホバリングに必要な揚力を得るためモーター制御値cを50[%]に上げ、実験を行った。制御は1秒間に約48回行った。実験はPI制御における各ゲインの組み合わせ一つにつき3回行った。

図5赤グラフは実機実験において $I < 1$ が得られた結果の一部である。緑グラフは実機実験と同様の条件で時間遅れを含む姿勢制御シミュレーションを行った結果である。シミュレーションは実験結果と似た振る舞いをした。

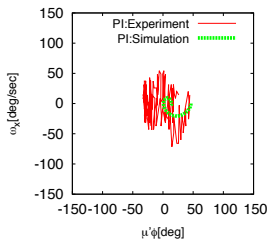
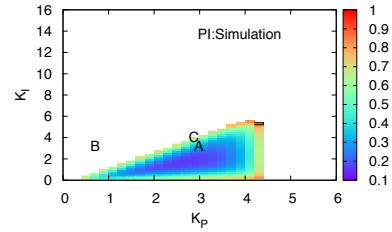


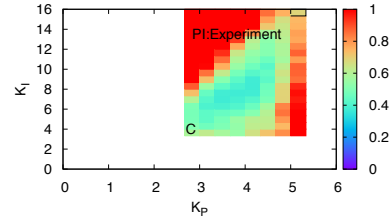
図 5: PI 制御における x 軸周りの姿勢制御, $\phi(0) = 15[\text{deg}]$, $\omega_x(0) = 0[\text{deg/sec}]$, $K_P = 2.7$, $K_I = 4.0$ (図 6C 点)

次に姿勢制御シミュレーションと実機実験との発散・収束のゲイン領域を比較した。図6のカラーマップにおける色は収束発散係数Iの値を表す。図6(b)では3回の実機実験結果から得られたIの平均値を表す。実機実験においてIが1以上である場合はIが1であるときと同じ色で表される。また、白い箇所は実験を行っていない箇所である。シミュレーションにおける白い箇所はIが1以上の箇所である。

シミュレーションにおける飛行ロボットの姿勢が安定するゲイン領域は実機実験におけるゲイン領域と比べ、 K_I の範囲が小さく、 K_P の範囲が広い形状となった。収束発散係数が最も小さなゲインの組み合わせはシミュレーションでは $K_P = 2.8$, $K_I = 1.8$, 実機実験では $K_P = 4.3$, $K_I = 7.3$ であった。実機実験における飛行ロボットの姿勢が安定するゲイン



(a) シミュレーション



(b) 実機実験

図 6: 時間遅れを含む PI 制御の発散・収束ゲインを表す相図. $\phi(0) = 15[\text{deg}]$, $\omega_x(0) = 0[\text{deg/sec}]$

領域の収束発散係数はシミュレーションよりも全体的に大きいことがわかった。

8 まとめ

運動方程式に基づいて、x軸周りにおけるPI制御による姿勢制御のシミュレーションを行った。時間遅れを含む姿勢制御と時間遅れを含まない姿勢制御を比較した。

次に時間遅れを含む姿勢制御におけるシミュレーションを実験結果と比較した。飛行ロボットの傾きに関する1自由度に対する姿勢制御のシミュレーション及び実験を行い、飛行ロボットの姿勢が安定するゲイン領域を求めた。

今後の課題について、シミュレーションにおける飛行ロボットの姿勢が安定するゲイン領域は実機実験におけるゲイン領域とは異なる結果となった。その原因を調べる必要がある。また、本稿ではx軸周りの姿勢制御を取り扱ったが、今後は3軸周りの姿勢制御を同時に行う必要がある。その際、各軸周りの回転によるジャイロ効果の影響を検討する必要がある [3]。

参考文献

- [1] 浅田 稔, 國吉康夫, "岩波講座ロボット学4 ロボットインテリジェンス", 岩波書店, (2006).
- [2] 橋本 理寛, 本田 泰, 第18回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集, 33-36, (2012).
- [3] Samir Bouabdallah, Andre Noth and Roland-Siegwart, "PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor", Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems p.2451.