

# 回転翼飛行ロボットの時間遅れ運動制御

橋本 理寛<sup>1</sup>, 本田 泰<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 室蘭工業大学 情報電子工学系専攻

<sup>2</sup> 室蘭工業大学 しくみ情報系

## 概要

4つのプロペラを持つ回転翼型飛行ロボットの反応行動について述べる。本研究の目的は時間遅れを含む飛行ロボットの運動制御を行うことである。本研究の対象とする飛行ロボットにおける時間遅れは最大約 453msec であることがわかった。運動制御には PI 制御を用いる。飛行ロボットは3つの回転自由度を持つ。本研究ではそれらの中の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。また、運動方程式に基づいたシミュレーションを実験結果と比較した。

## Control of motion with dead times for a quad rotor flying robot

Yoshihiro Hashimoto<sup>1</sup>, Yasushi Honda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Division of Information and Electronic Engineering, Muroran Institute of Technology

<sup>2</sup> 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. We clarify a diagram of the control system which includes the dead time. The PI control is used for attitude control of the flying robot. Gains which give convergence of attitude 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[1]。ここで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[2][3]。我々は知的ロボットの構成論的研究として4回転翼自律飛行ロボット(以下、飛行ロボットと呼ぶ)に着目する。

本研究では4回転翼自律飛行ロボットをテーマと

して構成論的に研究するため、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。飛行ロボットの行動において基礎となる運動制御は反応行動に対応していると考えられる。

先行研究[4]では本研究と同じく回転翼型のロボットの運動制御を行っている。回転翼型ロボットは搭載される Inertial Measurement Unit(IMU)により姿勢情報を取得し、その情報を基にPID制御による運動制御を行っている。ここで、IMUによる姿勢検出からモーターによる運動制御までにはデータ処理や通信等には時間がかかる。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。しかし、PID制御を行うにあたり時間遅れが無い状態では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．そのため，運動制御を行うには，時間遅れを含めた運動制御を行う必要がある．

本研究では飛行ロボットにおける時間遅れを計測し，時間遅れを含むPI制御による運動制御を行う．運動制御では飛行ロボットがホバリングすることを目指す．

## 2 飛行ロボットの構成

図1は開発している飛行ロボットと飛行ロボットにおける座標軸を表している．図1の左のように4つのモーターをそれぞれ  $m1, m2, m3, m4$  とし，飛行ロボット上に時計回りに配置する．今回は  $x$  軸周りの運動制御を行うため，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．

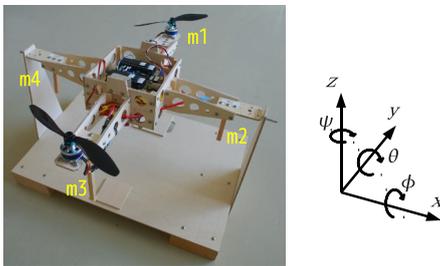


図1: 左:飛行ロボットのモーター配置，右:飛行ロボットにおける座標軸

飛行ロボットの構成を図2に示す．飛行ロボットには姿勢計測のため，加速度センサとジャイロセンサを搭載している．加速度センサからは角度を計測する．ジャイロセンサからは角速度を計測する．各センサのサンプリング間隔は  $\Delta = 33[\text{msec}]$  である．

計測した姿勢状態を基に 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する．ブラシレスモーターの回転数を制御するため，Electronic Speed Controller(以下，ESC と呼ぶ) を搭載する．

また，BC には無線 LAN を搭載している．そのため，ノートパソコンと無線 LAN 通信が可能である．

## 3 時間遅れの計測

時間遅れを含む運動制御のため，実際に飛行ロボットにおける時間遅れを計測した．

まず，飛行ロボットにおけるむだ時間を計測した．図3にその計測結果のダイアグラムを示す．ダイアグラム上の数値は加速度センサから各デバイスにデー

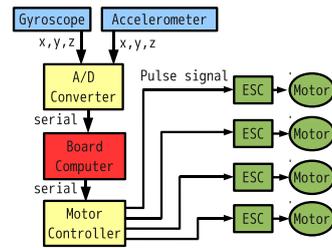


図2: 飛行ロボットのシステム構成

タが到達したときまでにかかるデータ処理・通信時間の積算値である．むだ時間は  $33\text{msec}$  であることがわかった．

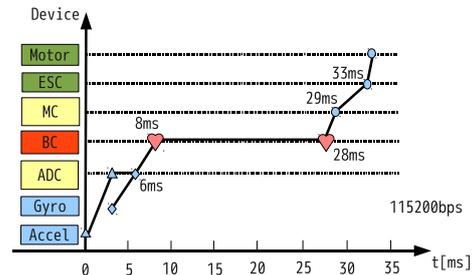


図3: むだ時間ダイアグラム

次に，モーターの出力を変化させ，それにより回転速度が変化しきるまでにかかる時間を計測する．図4はモーターの出力を45%から50%に変化させたときのモーター回転速度の時間変化グラフである．このグラフは5個データを利用し，単純移動平均を行っている．モーターの回転速度が変わりきるまで，最大約  $170\text{msec}$  がかかることがわかった．

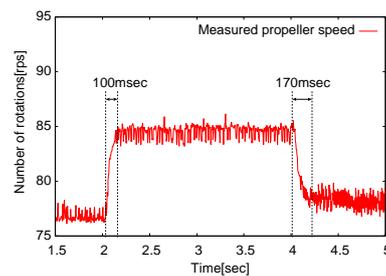


図4: モーター回転速度の時間変化グラフ，プロペラ:GW-EP07060-2P，モーター:HP-Z2205-34

姿勢検出からモーター制御値を決定するまでのむだ時間を  $\delta_1$ ，モーター制御値の決定からモーター回転速度が変わりきるまでの時間遅れを  $\delta_2$  とする．

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

このほかにも，時間遅れを増やす要因がある．

図5は飛行ロボットを水平状態に固定し，モーターを出力50%で回転させたときの加速度センサ値である．加速度センサは $\pm 12[\text{deg}]$ の範囲までモーターの回転に伴う振動を検出している．つまり，飛行ロボットは12度以下の傾きとモーター振動を区別できないことが分かる．

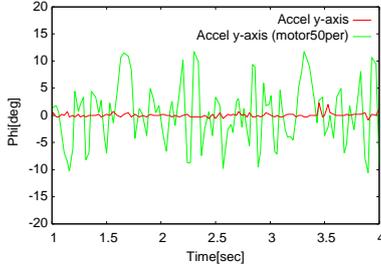


図5: 加速度センサ値によるモーター振動の検出，赤:モーター停止時，緑:モーター回転時

この状態では運動制御は難しいため，加速度センサ値を30個まで利用し，単純移動平均の値 $\bar{\phi}(t)$ を求める．

$$\bar{\phi}(t) = \frac{1}{30} \sum_{j=0}^{29} \phi(t - \Delta j) \quad (2)$$

しかし，移動平均を行うことで得られる加速度センサ値は実際の機体の傾きより遅れる．実際にモーターを回転させず，飛行ロボットを手で保持して動かした時の加速度センサ値を測定した(図6参照)．図6より，赤と緑のグラフを比較すると，山のピークが約250msec遅れていることがわかる．よって，加速度センサ値を30個用いて移動平均を行うことによって約250msecの時間遅れが生じることがわかった．

これらより，飛行ロボットにおける全体の時間遅れはむだ時間，モーター回転速度の時間遅れ，加速度センサ値の時間遅れを合わせて，最大約453msecであることがわかった．

#### 4 飛行ロボットの運動方程式

x軸周りの運動制御について述べる．x軸周りの運動制御を行うには，m1とm3のモーターを制御する必要がある．飛行ロボットの運動制御には時間遅れを含むPI制御を用いる．運動制御ではホバリングすることを目標とする．

$$I_x \ddot{\phi}(t) = U_x(t) \quad (3)$$

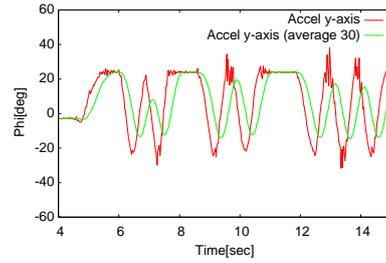


図6: 加速度センサ値における移動平均値のピーク遅れ，赤:センサ値の移動平均なし，緑:センサ値を30個利用した移動平均値

$$U_x(t) = r(F_1(t) - F_3(t)) \quad (4)$$

$$F_i(t) = a\Omega_i(t - \delta_2) + b \quad (5)$$

(3)式はx軸周りの運動方程式である．実測した結果，機体の慣性モーメントは $I_x=0.006[\text{kgm}^2]$ であった．

(4)式におけるトルクはモーター1,3の揚力差によって求める．実測結果より飛行ロボットの中心からモーターまでの距離は $r=0.2[\text{m}]$ である．

(5)式の係数 $a, b$ は実際に計測した結果， $a=0.00138[\text{kgm/s}^2]$ ， $b = -0.0466[\text{kgm/s}^2]$ であった．

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

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

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

(6)，(7)，(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的とするため $\dot{\phi}$ 及び $\bar{\phi}$ の目標値は0である．

記号	定義
$i$	モーター番号
$t$	時刻
$m$	機体重量
$r$	機体の中心からモーターまでの距離
$F_i(t)$	揚力
$U_x(t)$	機体全体のトルク
$\Omega_i(t)$	モーター制御値 ( $0 \leq \Omega_i(t) \leq 300$ )
$I_x$	慣性モーメント
$c$	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

## 5 実機による運動制御実験

実験ではPI制御を用いたx軸周りの運動制御を行った。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た(図1参照)。ホバリングするために必要な揚力を得るためモーターの出力を50%( $c=150$ )に上げ、実験を行った。制御は1秒間に30回行った。

図7は実験結果の一部である。本研究では図7の(a)のような制御結果を発散とし、(b)のような制御結果を収束とする。これらを基に時間遅れを含むPI制御における発散・収束のゲイン領域を求めた(図8)。

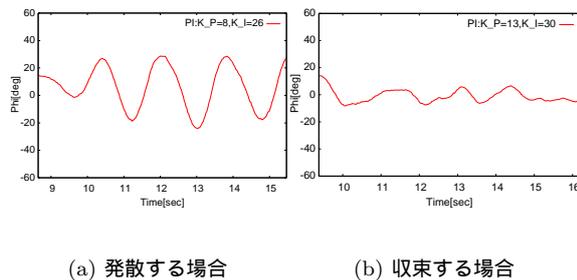


図7: 実験:PI制御におけるx軸周りの運動制御  $\phi(0) = 15[\text{deg}]$ ,  $\dot{\phi}(0) = 0[\text{deg}]$

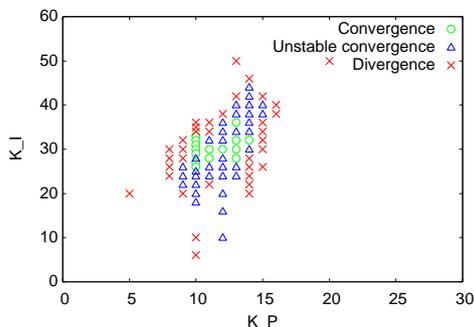


図8: 実験:時間遅れを含むPI制御の発散・収束ゲインを表す相図,  $\phi(0) = 15[\text{deg}]$ ,  $\dot{\phi}(0) = 0[\text{deg}]$

## 6 PI制御のシミュレーション

飛行ロボットの運動方程式に基づいて、修正オイラー法によるシミュレーションを行った。

図9は実験において姿勢の収束が得られたゲイン値を用いたシミュレーション結果の一例である。実験と同様の振る舞いが得られた。

実験(図7)とシミュレーション(図9)を比較する

と、初期角度15度から水平に戻るまで約1秒を要することがわかった。

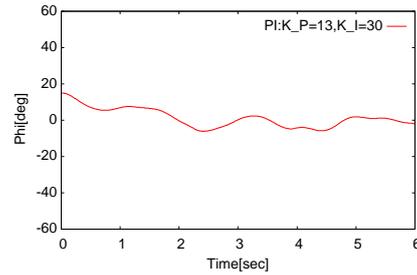


図9: シミュレーション:PI制御におけるx軸周りの運動制御,  $\delta_1 = 0.020[\text{sec}]$ ,  $\delta_2 = 0.225[\text{sec}]$ ,  $\phi(0) = 15[\text{deg}]$ ,  $\dot{\phi}(0) = 0[\text{deg}]$

## 7 まとめ

本研究の対象とする飛行ロボットにおける全体の時間遅れは、むだ時間、モーター回転速度の時間遅れ及び加速度センサ値の時間遅れを合わせて、最大約453msecであることがわかった。

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。また、運動方程式に基づいたシミュレーションを実験結果と比較した。

課題として、本稿ではx軸周りの運動制御を取り扱ったが、今後は3軸周りの運動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[4]。

## 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] 本田泰, 佐々木俊哉, 第14回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集, 25-27, (2008) .
- [3] 佐々木俊哉, 本田泰, 第15回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集, 61-64, (2009) .
- [4] 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.