法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-01

τ-マージンを用いた飛行ロボットの制御

SHIMADA, Yasuhiro / 島田, 靖広

(発行年 / Year)
2009-03-24
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2009-03-24
(学位名 / Degree Name)
修士(工学)
(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)

２００８年度　修士論文

τ-マージンを用いた飛行ロボットの制御

指導教員　伊藤一之専任講師

法政大学大学院　工学研究科
システム工学専攻　修士課程
07R6120

シマダ　ヤスヒロ
島田　靖広

もくじ

1. はじめに　4
2. 生態心理学における τ-マージン　6
3. タスク　8
4. 従来手法　9
5. 提案手法　10
5.1. 光の特性を用いた τ-マージンの取得　10
5.1.1. τ-マージン取得回路　10
5.1.2. τ-マージン取得回路の評価実験　15
5.2. 飛行ロボットの構造　18
6. モデリングと制御系設計　20
6.1. モデリング　20
6.2. 制御系設計　22
6.3. シミュレーション　24
7. 実験　28
7.1. 電球追従実験　28
7.2. τ-マージンによる上下飛行性能の評価実験　28
7.3. 姿勢制御性能評価実験　29
8. 結果　30
8.1. 電球追従実験結果　30
8.2. τ-マージンによる上下飛行性能の評価実験結果　31
8.3. 姿勢制御性能評価実験　34
9. おわりに　34

謝辞　35
参考文献　36

Abstract

Recently autonomous robots which are designed on the basis of biological mechanism have attracted much attention. In this paper, we focus on mechanism of timing control studied by ecological psychology, and apply the framework to controlling of flying robot. In addition, we conduct the real-time control of the flying robot with the analog circuit. Experiments using real robots have been conducted and effective behaviors have been realized.

***Key Words**: ecological psychology, flying robot, tau-margin*

１．はじめに

近年，ロボットの活躍が期待される範囲は，工場などの比較的単純な既知環境から，家庭，宇宙開発，災害救助活動などの複雑な未知環境へと拡大してきている．このような流れに伴い，ロボット工学において自律的に行動が可能なロボットの実現は一つの目標となっている．中でも，生物の振る舞いを規範とした制御手法や，環境との相互作用を取り入れた機構などの研究は盛んに行われている[1]-[7].

ロボットが三次元空間内を自律的に移動する場合，従来のロボットは，距離を計測することにより，環境情報モデルを得る手法が一般的であった．これには特に，レーザレーダ距離センサや，超音波距離センサ，ステレオカメラによる距離測などが利用されている．しかしながら，空間のスキャンや，画像処理などを必要とするこれらの手法は，ロボットの敏捷性の妨げになっている．さらに,近年のロボットの多自由度により,従来手法によるロボットの制御では,複雑で未知な環境において，実時間に行動することは困難である.

一方，人間などの生物に目を向けてみると，その多くは距離を直接知覚する器官を持っていない．生態心理学では，生物の多くが τ-マージンによって空間情報モデルを得る必要なく自律行動を行っていると考えられている．τ-マージンとは，生物がタイミングを計る際に利用しているとされている光学的な要素の拡大率に関係した量であり，これが直接的に対象と接触するまでの残り時間を特定する.

また，生物の身体は自由度も多く，感覚器官から得る情報量も多い．しかしながら，未知で複雑な環境においても適応的に振る舞うことができ，ロボットにおける実時間での情報処理の問題も見られない．生物の脳が優れているためという見方もされるが，脳の小さな昆虫等でも，実時間で自律的に行動が可能である[1]-[4].

ヘリコプタ型の飛行ロボットは,垂直離着陸,ホバリング等の飛行特性から,狭小な場所や，摩擦の多い地面や過度な段差のある地面など，移動ロボットで

は移動困難な状況の場での活躍が期待されているロボットの形態である．しかしながら，制御には三軸加速度センサ，三軸ジャイロセンサ，三軸磁気センサなどを同時に用いる手法が一般的である. さらに, 自律的な行動を行う際には，環境情報モデルを得る為の距離センサやカメラ，自己位置特定の為に GPS を用いる場合も見られ，多くの情報処理が必要とされると言われている．従来手法では制御系が複雑になってしまう傾向があり，飛行ロボットを実時間で制御することは，高速な計算機を用いなければ困難である[8]-[10].

また，従来の飛行ロボットの研究では，生物を規範としていない．ほとんどの飛行ロボットの研究で用いられる加速度センサやジャイロセンサ，磁気センサのような感覚器官を，生物は持っていない.

本研究は，実際の生物を規範としたロボットの実現を目標とし，特に，複雑な情報処理を必要としないヘリコプタ型の飛行ロボットの制御を行う．電球のある環境下において，τ-マージンの理論を用い，飛行ロボットのロール角，ピッチ角と高度の制御を行う．ロール角とピッチ角と高度の制御により，飛行ロボットは 3 次元空間の任意の位置への移動が可能となる．また，制御系をアナログ回路にて実現し，回路から実時間で応答を得る．アナログ回路による計算処理は，ダイナミックレンジによる制限や，ノイズに対する欠点もあるが，入力に対し即座に応答が得られる.

２．生態心理学における τ-マージン

ここでは，生態心理学における τ-マージンについて述べる．

生物の多くは，対象までの距離を直接知覚するような器官を有していない．人間のように，立体視によって距離を把握出来る生物もあるが，正確に距離を把握できるのも手の届く範囲のみであると言われており，この範囲外では誤差が大きく距離の測定は困難である．しかしながら，人間は遠くから飛んできたボールをタイミングよくキャッチする事や，物体が勢いよく近づいてきた際にはタイミングを計り，回避が可能である．これは，対象物が未知の物体であったとしても，同様の反応が可能である．

生態心理学の分野では，生物は物体との接触までの残り時間を，光学的な情報 τ-マージンを用いて特定していることが知られている[1]-[4]．生物がタイミングを計る際の行動は，光学的流動の中で特定される光学的情報である τ-マージンによって制御されているという．

ここで，図 2.1 に，対象の大きさを l，観測者から対象までの距離を Z，観測者から見えるキメの視野角を ϕ として，観測者が対象に接触する際の模式図を示す．

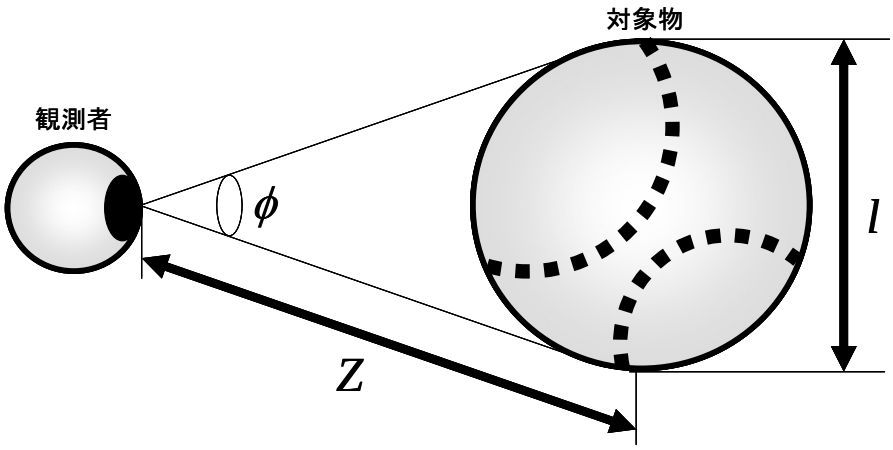

図 2.1　τ-マージン

今，対象物が観測者に対して接近しているとする．ここで，(2.1)式は τ-マージンの定義である.

$$\tau = \frac{\phi}{\dot{\phi}} \tag{2.1}$$

立体角の定義から(2.1)式は(2.2)式のように変形することができる．これは $\phi/\dot{\phi}$ が $-Z/2\dot{Z}$ と等価である事を表している．ここで $Z/\dot{Z}$ は対象が観測者に衝突するまでの残り時間であり，(2.2)式は距離情報（Z および $\dot{Z}$）を用いることなく，視覚情報（ϕ および $\dot{\phi}$）のみで衝突までの残り時間が得られることを意味している[1]-[4].

$$\tau = \frac{\phi}{\dot{\phi}} = \frac{\pi l^2 / 4Z^2}{-\pi l^2 \dot{Z} / 2Z^3} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{Z}{\dot{Z}} \tag{2.2}$$

観測者は z や $\dot{z}$ を直接知覚するのではない. 直接知覚するのは ϕ もしくは $\dot{\phi}$ である.

３．タスク

本研究では以下のようなタスクを用意する．図 3.1 は，このタスクを図示したものである．飛行ロボットは上部の電球を追尾するように，制御を行う．位置制御・姿勢制御，共に電球から得られる情報によって行う．

ただし，使用する電球は飛行ロボットにとって未知である．そこで実験は消費電力の異なる明るさの違う電球を使用し，数回行う．このとき，制御系への変更は与えない．

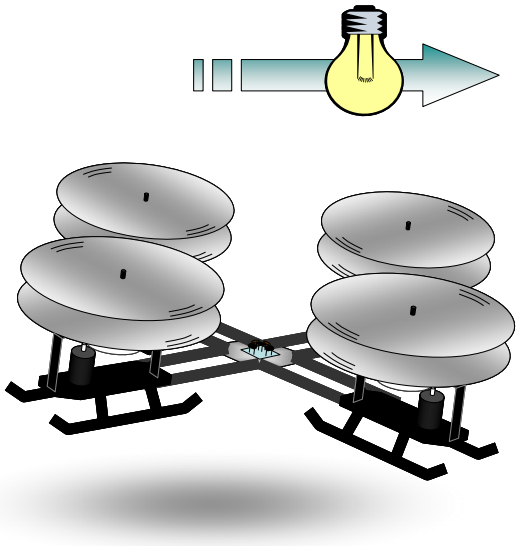

図 3.1 タスク

４．従来手法

従来の手法でこのようなタスクを行う場合，三軸加速度センサ，三軸ジャイロセンサ，三軸磁気センサなどを用い，ここから三軸の姿勢角度を導くという手法が主に取られてきた．近年ではこれらのセンサが小型ユニット化されており，そのような小型センサユニットを用いた研究も盛んに行われている．しかしながら，この小型センサユニットで特定できるのは三軸での姿勢角度となるため，位置を求めるためには，GPS やオブザーバを用いる手法が取られる．しかし，このような手法では，３次元空間内での姿勢と位置の特定には多くの計算が必要となる[8]-[10].

また，カメラを用いて位置・姿勢制御を行う研究も見られるが，これらの研究は，姿勢制御に同様に小型センサユニットを併用している場合が多く，ここに画像処理が加わるため情報処理量はさらに増してしまう．

一方でカメラだけを用いて位置・姿勢制御をするという研究も行われている[8]．しかしながら，自己位置を特定するため，ほとんどの場合が壁にマーカーを取り付けると同時に，床にもマーカーを用意し，それぞれのマーカーを撮影するためにカメラが２台用意されている．このため，画像処理は２台のカメラ分行う必要があり，１台のカメラで同様の事をするには，距離センサなどが必要と考えられる．

いずれにおいても，複雑で未知な環境に対して適応的に振る舞う生物とは，大きく異なる．生物は，昆虫のような脳の小さな生物でも，実時間で自律行動が可能である点も，従来手法と生物の異なる点である．

５．提案手法

５．１．光の特性を用いたτ-マージンの取得

５．１．１．τ-マージン取得回路

多くの生物は高い精度の距離センサは持ち合わせておらず，環境情報モデルの作成も行っていない．生態心理学では，生物はτ-マージンによって，環境情報モデルの作成を行わずに自律的に行動しているという[1]-[4]．本来，２章のように，τ-マージンは見かけ上の大きさの変化によって取得される．そこで，飛行ロボットの上下方向の制御を，τ-マージンを用いて行う．また，本研究では，τ-マージンを電球の照度の変化から取得する．そこで，光源からτ-マージンを取得する回路について説明する．

光学的なτ-マージンの取得のために，照度の逆２乗則を用いる．光源の光度をI [cd]，光源までの距離をx [m]とすると，照度E [lx]は次のように表されることが知られている．

$$E = \frac{I}{x^2} \tag{5.1}$$

この関係式から，τ-マージンを取得する．光量は CdS セルによって取得する．CdS セルの写真を図 5.1 に示す．CdS セルは，光量によって抵抗値が変化する素子である．少ない光量であるときに高い抵抗値を示し，光量が多いときは抵抗値が低くなる．

図 5.1　CdS セル

予備実験として，光源との距離と CdS セルの抵抗値との関係を調べた．電球は 10W クリア電球を使用し，10 cm おきに距離と CdS セルの抵抗値との関係を測定した．また，10 cm~50 cm 間の結果に最小二乗法による 2 次曲線近似を行った．図 5.2 にこのグラフを示す．

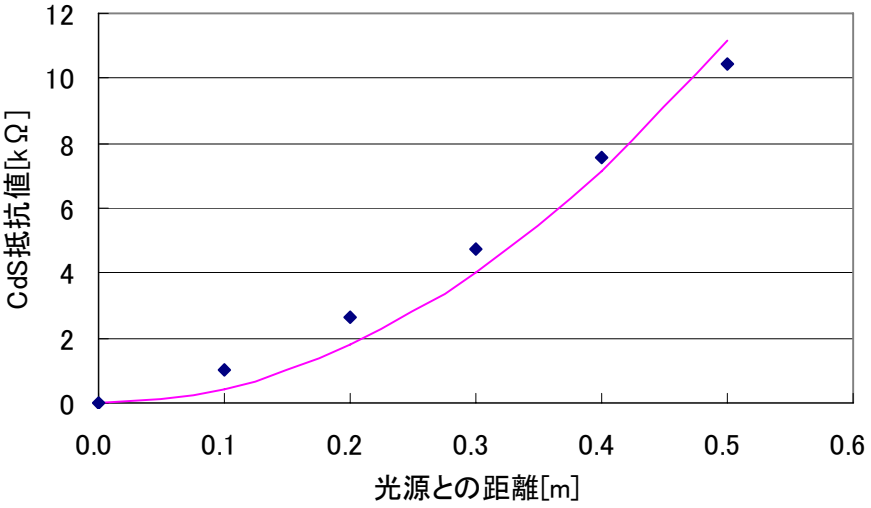

図 5.2　光源との距離と CdS の抵抗値

これにより CdS の抵抗値と光源との距離を(5.2)式のように表す.

$$R_{CdS} = ax^2 \tag{5.2}$$

ここで, R_{CdS} を抵抗値, x を距離とした.

いま, この CdS セルを用いて, 図 5.3 に示す回路を実現する. 回路の出力 P は $P = -(R / R_{CdS}) \cdot V_i$ となる.

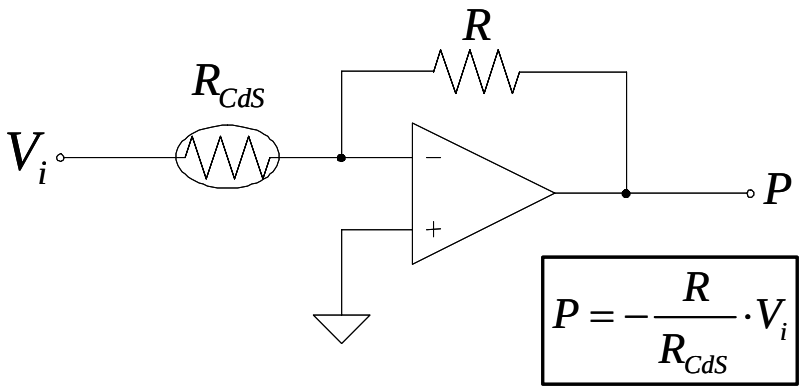

図 5.3　増幅回路

この P を用いて, $P/\dot{P}$ を実現すると, (5.3)式に示すように, τ-マージンが取得可能となる.

$$\frac{P}{\dot{P}} = \frac{-\dfrac{R}{R_{CdS}}V_i}{\dfrac{d}{dt}\left(-\dfrac{R}{R_{CdS}}V_i\right)} = -\frac{R_{CdS}}{\dot{R}_{CdS}} = -\frac{ax^2}{2ax\dot{x}} = -\frac{x}{2\dot{x}} = \tau \tag{5.3}$$

CdS セルを用いて取得するのは P であり, 距離センサも使用しないため, 距離情報を用いずに τ-マージンが取得される.

この $P/\dot{P}$ を実現させるため，割り算にはオペアンプによる対数増幅回路を使用した乗除算回路を使用する．

乗除算回路の回路図を図 5.4 に示す．

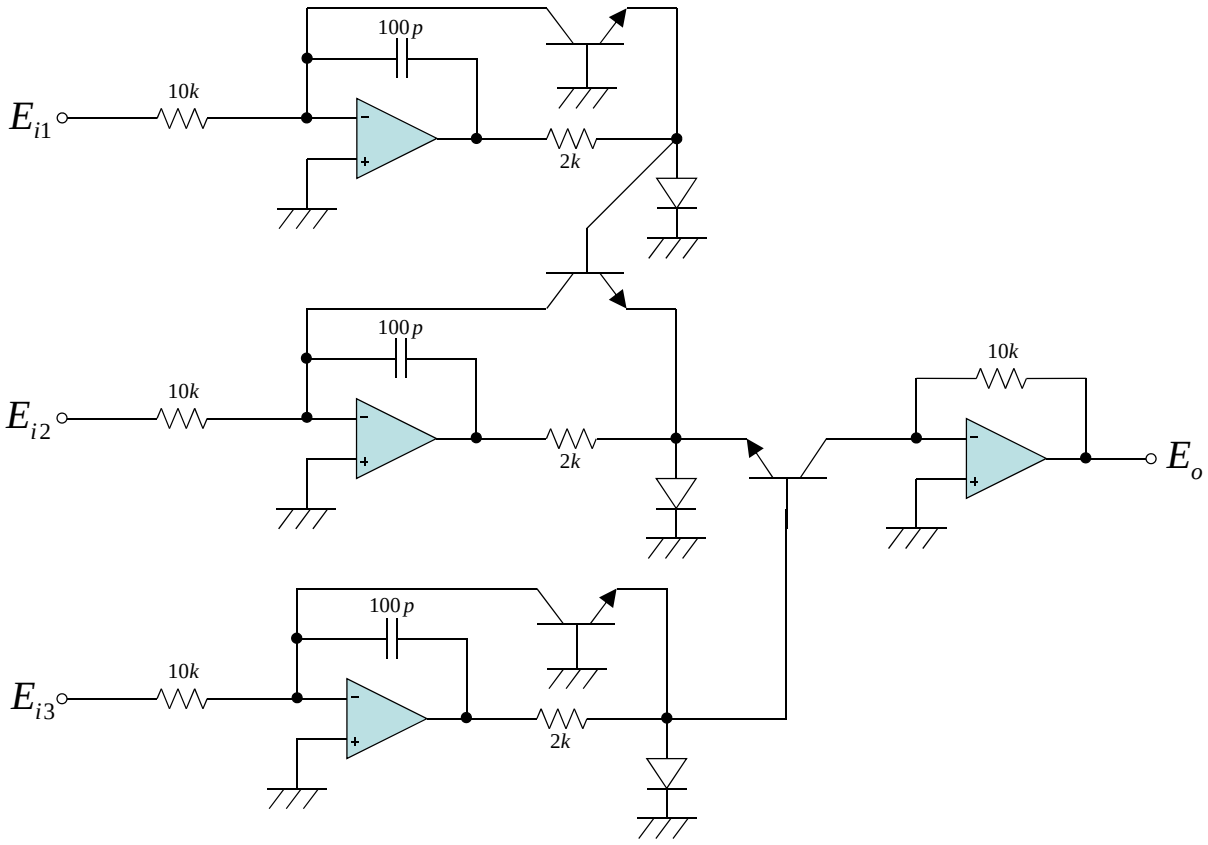

図 5.4　除算回路

このとき，出力 E_o は，

$$E_o = \frac{E_{i1} \cdot E_{i2}}{E_{i3}} \tag{5.4}$$

となる．ただし，τ-マージン取得回路においては，E_{i1}，E_{i2}，E_{i3} は(5.5)式のように設定する．

$$\begin{cases} E_{i1} = 1 \\ E_{i2} = P \\ E_{i3} = \dot{P} \end{cases} \tag{5.5}$$

また，$\dot{P}$ を出力するために P を微分する必要があるが，一般的に微分に用いられるオペアンプの不完全微分回路では理論的な微分値との誤差が大きくなってしまう為，本研究では図 5.5 で示すな微分回路を用いる．オールパスフィルタを用いて遅れた P を元信号の P と差分することで微分値を得ることにより，不完全微分に対して高い精度を持つ．最終段にはアンプによって理論値に近い出力を得るように増幅を行う．図 5.5 が今回の微分回路の回路図である．

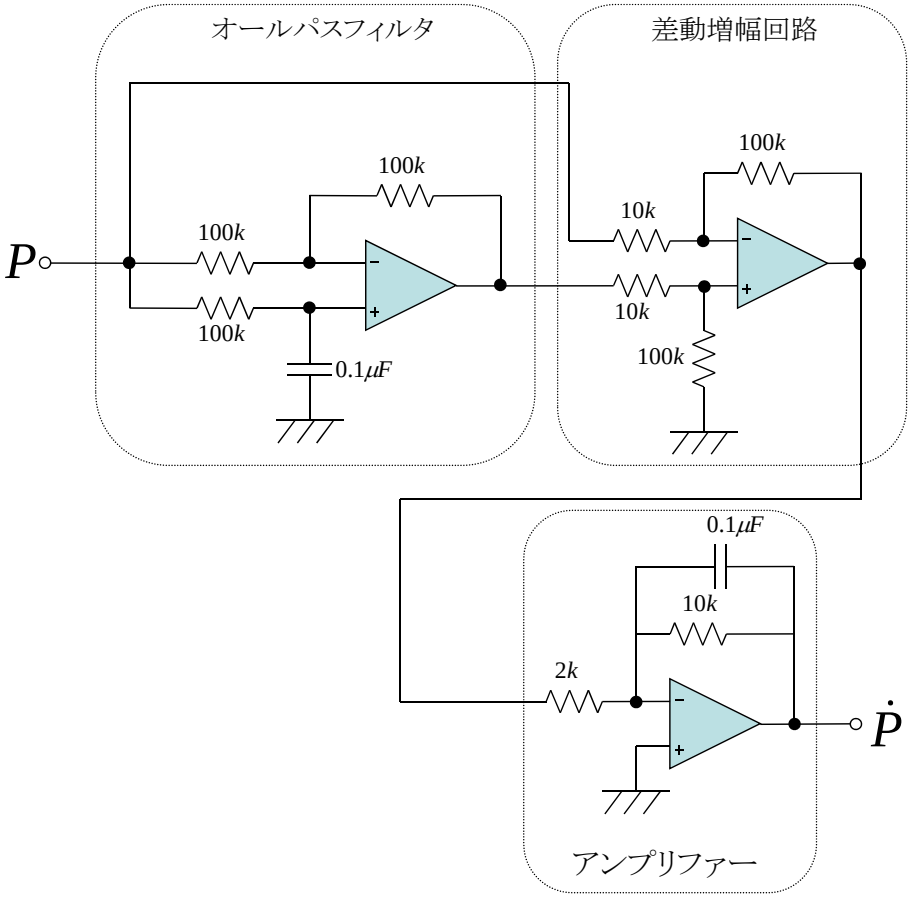

図 5.5　微分回路

この回路の評価実験を行った．入力信号として，約 0.5Hz，振幅２の三角波を発生させたときの出力を調べる．結果は図 5.6 のようになり，概ね理論値に近い出力を得ている．

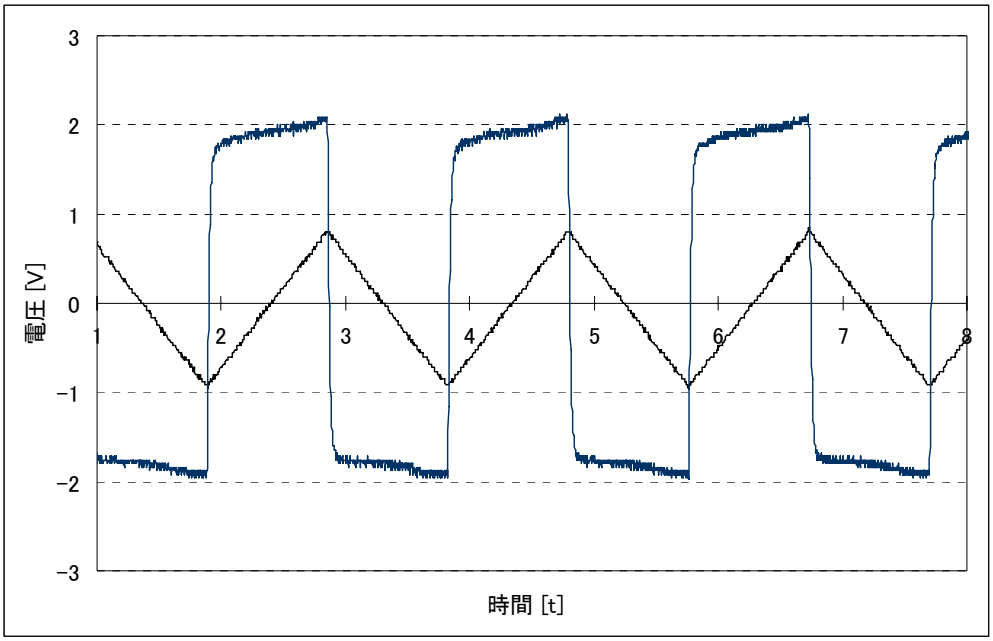

図 5.6　微分回路性能実験

５．１．２．τ-マージン取得回路の評価実験

今，光の特性を用いたτ-マージン取得回路の妥当性と有用性を評価するため，移動ロボットによる実験を行う．実験では逃走ロボットと追跡ロボットの２台の移動ロボットを用いる．逃走ロボットにはτ-マージン取得回路を搭載し，追跡ロボットには光源を搭載する．逃走ロボットは，τ-マージン取得回路の出力をもとに，追跡ロボットに接触される直前のタイミングになると逃走を開始する．

また，τ-マージンは見かけ上の大きさの変化から特定される値である．よって，τ-マージン取得回路の評価実験の際には，追跡ロボットに搭載する光源の

明るさを未知とする．本実験では，３０Ｗと６０Ｗの電球を利用し，２度の実験を行う．ただし，どちらも同じτーマージン取得回路を用い，回路の各設定も一切変化を加えない．

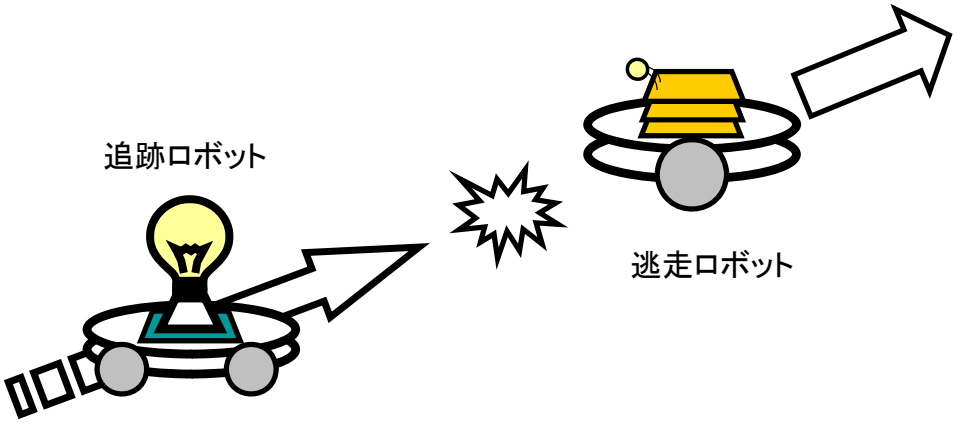

図 5.7　τ-マージン取得回路の評価実験

逃走ロボットの推進力F_fは，(5.6)式で与える．

$$F_f = \begin{cases} k & (\tau < T_f) \\ 0 & (\tau \geq T_f) \end{cases} \tag{5.6}$$

T_fは逃走のタイミングである．kは十分に逃走が可能なトルクを示す．

図 5.8 と図 5.9 はこの実験の結果である．電球の明るさが変わっても，それぞれ 3.0s から 4.0s のほぼ同じタイミングで逃走が開始されていることが確認できる．これにより，光の特性を利用したτ-マージン取得回路による実際の移動ロボットの制御の妥当性が確認された．

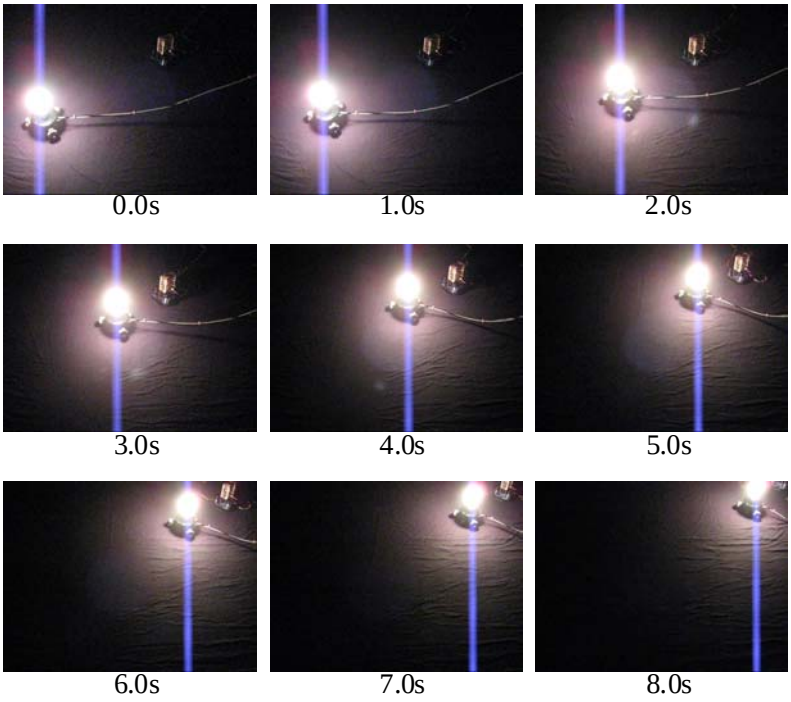

図 5.8　移動ロボットによる評価実験結果(30W)

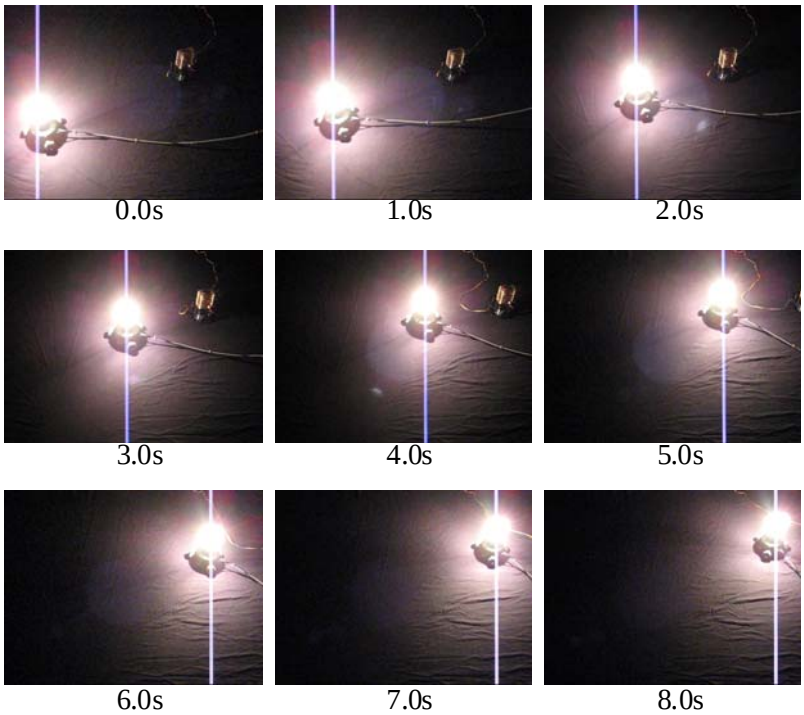

図 5.9　移動ロボットによる評価実験結果(60W)

５．２．飛行ロボットの構造

飛行ロボットは，ホビー用 R/C ヘリコプタを使用する．このホビー用 R/C ヘリコプタの機体にはロータが２枚，上下に並んで用意されており，２枚のロータがそれぞれ双方逆回転をする．これによって，カウンタートルクを打ち消す為，テールロータがなくとも，機体が回転しない．これは一般に２重反転ロータと呼ばれている．このホビー用 R/C ヘリコプタ４機を，十字型のフレームの先端にそれぞれ取り付け，それぞれの機体を制御する事で，３次元空間での任意の位置に移動することが可能となる．この構造はクアッドロータという構造を元に構成した[11].

完成した飛行ロボットの全景を図 5.10 に示す．飛行ロボットの最大幅は，ロータを含め，約 900mm であり，重量は 0.65kg である．電源や，制御系の回路は有線にて接続されている．

図 5.10　飛行ロボット

また，飛行ロボット中心にはセンサモジュールを取り付ける．図 5.11 はセンサモジュールを示している．センサモジュールには５章１節における τ-マージン取得のための CdS セルが中心に上向きで取り付けられている．

また，別に４つの CdS セルを用いて，一般にバランス回路と呼ばれる回路を

２組用意する．中心に対して対角に位置する CdS セル同士が１組である．これにより飛行ロボットと光源との相対的な角度を取得し，光源に追従するための情報とする．

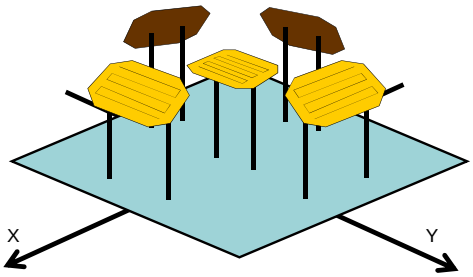

図 5.11　センサモジュール

以下に, このバランス回路について説明する. 光源の角度はX方向とY方向, それぞれ独立して取得するが，ここでの説明は簡単のため，X 方向の光源角度を取得するバランス回路についてのみおいて行う．図 5.2.3 はバランス回路の回路図である．CdS セルは，２つをそれぞれ４５度曲げ，背中合わせになるように設置する．電球の位置により，CdS セルに入る光量に差が生じる．このとき，CdS セルの抵抗値のバランスによって，出力が変化し，電球の角度を特定することが可能となる．センサモジュール中央に光源が位置したときに，出力は GND になる．

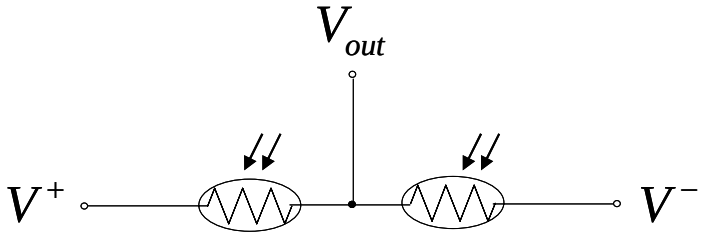

図 5.2.3　バランス回路

このようなバランス回路を，２組，　X 方向・Y 方向のそれぞれ直交するように設置する．X 方向と Y 方向それぞれの光源の角度を取得することで，距離情報や，加速度，機体角度，現在の位置情報は取得せずに，光源の追従を行う．

６．モデリングと制御系設計

６．１．モデリング

制御系設計の為のモデリングを行う．ここで，図 6.1 において左上から時計回りで飛行ロボットの各ロータの組から出力される力をF_1， F_2， F_3， F_4のように番号を振りわけ表記する．

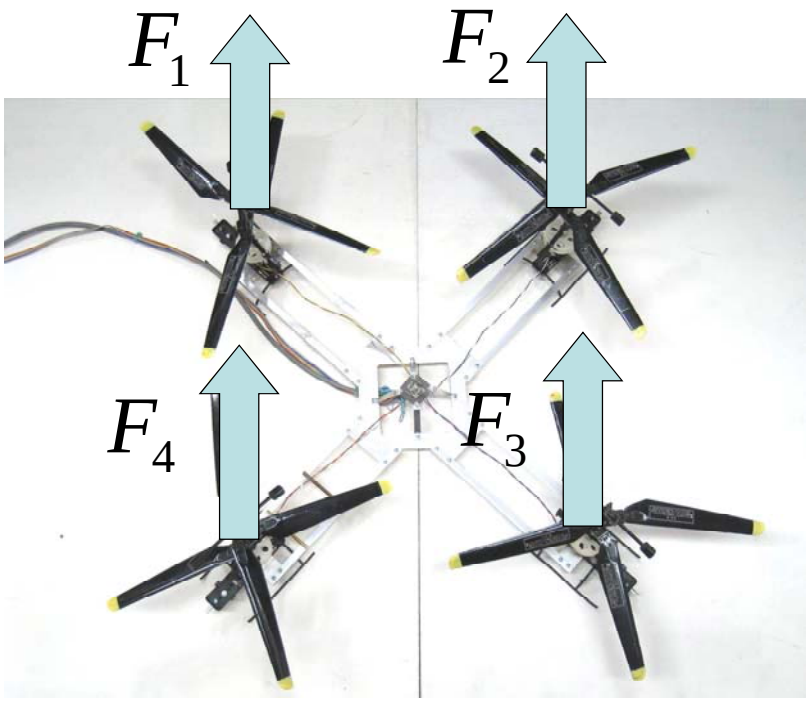

図 6.1　ロータの揚力F_1， F_2， F_3， F_4

ここでは簡単のため，X-Z 方向のみの説明を行う．飛行ロボットを図 6.2 および(6.1)式にてモデル化する．ここで，飛行ロボットの重量をm，重力加速度をg， Cは空気との粘性摩擦係数である．

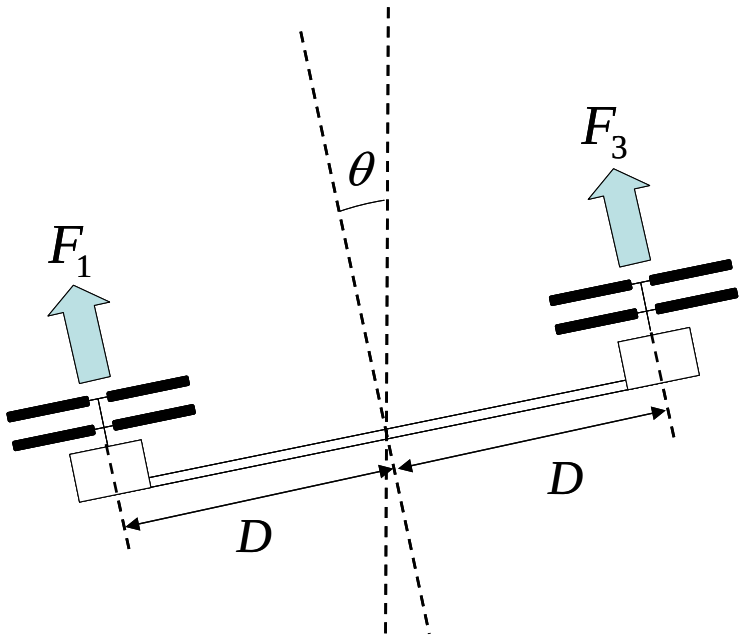

図 6.2　飛行ロボットのモデル 1

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) = -F_1 \sin\theta_{13} - F_3 \cos\theta_{13} - C\dot{x}(t) \\ m\ddot{z}(t) = F_1 \cos\theta_{13} + F_3 \cos\theta_{13} - C\dot{z}(t) \\ I\ddot{\theta} = DF_3 - DF_1 \end{cases} \tag{6.1}$$

さらに，以下の (6.2)式を用い，このモデルを図 6.3 および (6.3)式に変換する．ここで，ロータによる揚力を F，飛行ロボットの重心のまわりのトルクを T とする．

$$\begin{cases} T = DF_1 - DF_3 \\ F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = F \\ \dot{\Theta} \cong \dot{\theta} \end{cases} \tag{6.2}$$

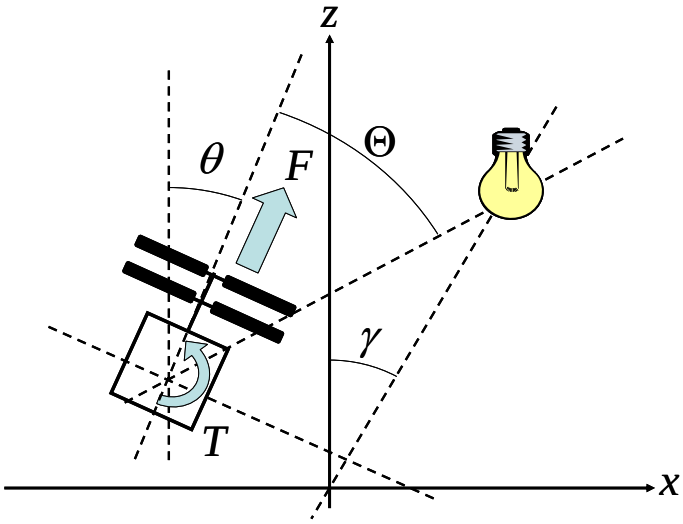

図 6.3　飛行ロボットのモデル 2

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) = -F\sin\theta - C\dot{x}(t) \\ m\ddot{z}(t) = F\cos\theta - mg - C\dot{z}(t) \\ I\ddot{\theta}(t) = T \end{cases} \tag{6.3}$$

６．２．制御系設計

前節(6.3)式で表される制御対象に対し，以下のような制御系を構成する．ここで，k_τ，k_θ は比例ゲインである．

$$\begin{cases} F = -k_\tau \dfrac{1}{\tau} + \dfrac{mg}{2} \\ T = -k_\theta \dot{\theta}(t) \end{cases} \tag{6.4}$$

この制御系にさらに，電球を追従するための項を追加し，Θ が以下の範囲のとき，T を以下の式のように与える．ここで，v_r は飛行ロボットを目標方向へ

移動させるための定数であり，α は移動を行うか否かの閾値である．

$\Theta < -\alpha, \alpha < \Theta$ のとき

$$T = -k_\theta \dot{\theta}(t) + v_r \tag{6.5}$$

以上の制御系を満たすように，実際の各ロータには，(6.6)式，(6.7)式のように入力を与える．ここでΘは CdS セルを用いたセンサモジュールによって取得される飛行ロボットと電球との相対角度である．

$-\alpha < \Theta < \alpha$ のとき，

$$\begin{cases} F_1 = k_\Theta \dot{\Theta}_{13} - \dfrac{k_\tau}{\tau} + \dfrac{mg}{4} \\ F_2 = k_\Theta \dot{\Theta}_{24} - \dfrac{k_\tau}{\tau} + \dfrac{mg}{4} \\ F_3 = -k_\Theta \dot{\Theta}_{13} - \dfrac{k_\tau}{\tau} + \dfrac{mg}{4} \\ F_4 = -k_\Theta \dot{\Theta}_{24} - \dfrac{k_\tau}{\tau} + \dfrac{mg}{4} \end{cases} \tag{6.6}$$

$\Theta < -\alpha, \alpha < \Theta$ のとき，

$$\begin{cases} F_1 = (v_r + k_\Theta \dot{\Theta}_x) - \dfrac{k_\tau}{\tau} + \dfrac{mg}{4} \\ F_2 = (v_r + k_\Theta \dot{\Theta}_l) - \dfrac{k_\tau}{\tau} + \dfrac{mg}{4} \\ F_3 = -(v_r + k_\Theta \dot{\Theta}_x) - \dfrac{k_\tau}{\tau} + \dfrac{mg}{4} \\ F_4 = -(v_r + k_\Theta \dot{\Theta}_l) - \dfrac{k_\tau}{\tau} + \dfrac{mg}{4} \end{cases} \tag{6.7}$$

実際の制御系は全てアナログ回路で実現する．アナログ回路による演算は，入力に対して即座に出力を得られる．よって，従来の飛行ロボットの制御に必要とされた高速なコンピュータによるデジタル的な計算処理が不要となる．

６．３．シミュレーション

図 6.3 や，(6.3)式のモデルから設計した(6.4)式，(6.5)式の制御系の妥当性の検討のため，シミュレーションを行う．ただし，シミュレーションは X-Z 空間にて行う．そこで，シミュレーションに用いた運動方程式は(6.3)式を基に(6.8)式とする．

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) = -F\sin\theta - C\dot{x}(t) \\ m\ddot{z}(t) = F\cos\theta - mg - C\dot{z}(t) \\ I\ddot{\theta}(t) = T \end{cases} \tag{6.8}$$

このときの制御系は(6.4)式と(6.5)式を基に，(6.9)式と(6.10)式のように表す．

$-\alpha < \Theta < \alpha$ のとき，

$$\begin{cases} F = -k_\tau \dfrac{1}{\tau} + mg \\ T = -k_\theta \dot{\Theta}(t) \end{cases} \tag{6.9}$$

$\Theta < -\alpha, \alpha < \Theta$ のとき

$$T = -k_\theta \dot{\Theta}(t) + v_r \tag{6.10}$$

また，シミュレーションにおける各パラメータの設定値を表 6.1 に示す.

表 6.1　各パラメータ設定値

g	9.8[m/s^2]
m	0.65[kg]
I	1[kg・m^2]
C	5
α	5[°]
k_τ	10
k_θ	3
v_r	9

シミュレーションは以下の図 6.4 のように設定して行う．電球の位置は固定であり，飛行ロボットの初期位置を原点位置とする．飛行ロボットは初期状態のとき，どの方向にも速度をもっておらず，また一切傾きの無いものとする.

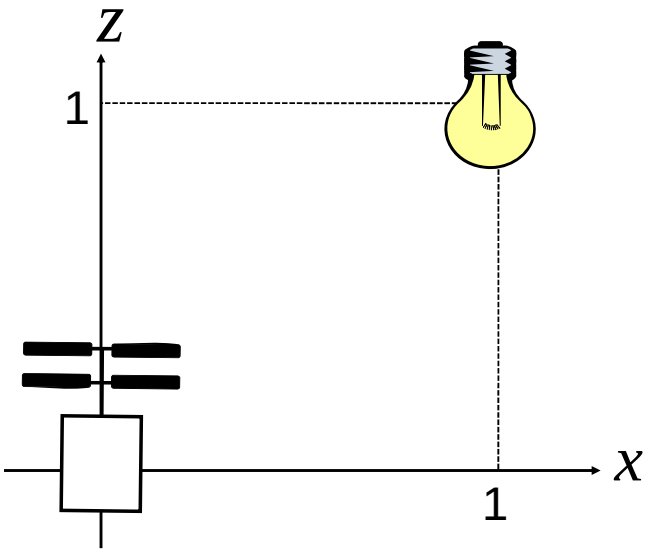

図 6.4　シミュレーション初期状態

シミュレーションの結果を以下に示す．図 6.5 は飛行ロボットの X 方向の移

動を示すグラフで，図 6.6 は Z 軸方向の移動を示す.

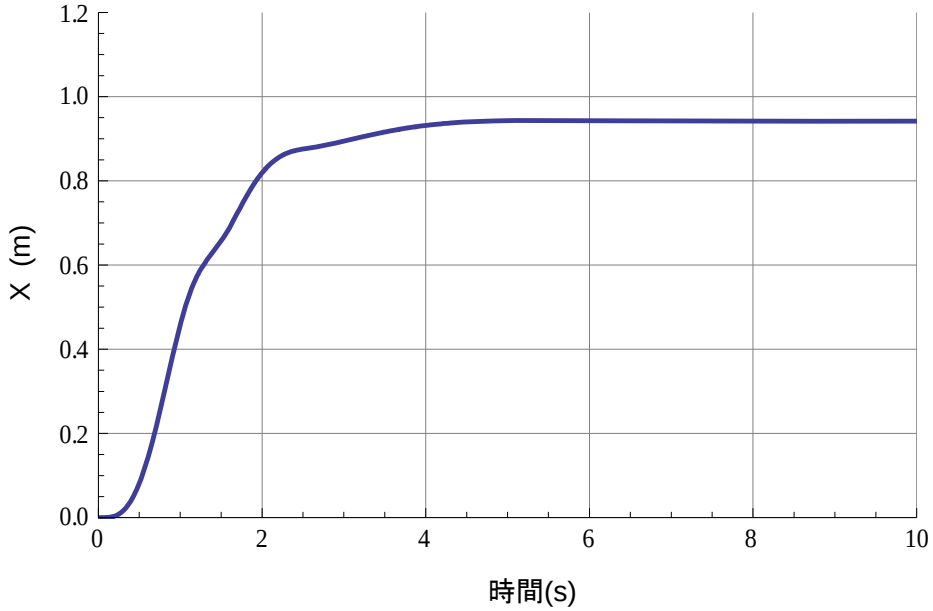

図 6.5　シミュレーション結果（X 方向）

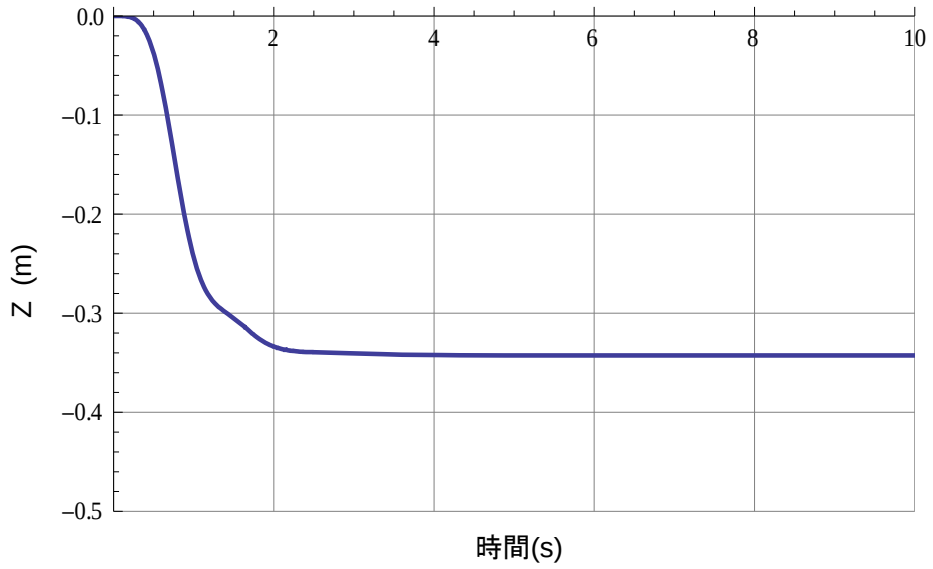

図 6.6　シミュレーション結果（Z 方向）

また，このときの飛行ロボットが取得した τ-マージンより，$1/\tau$ の値をグラフ化し，図 6.7 に示す.

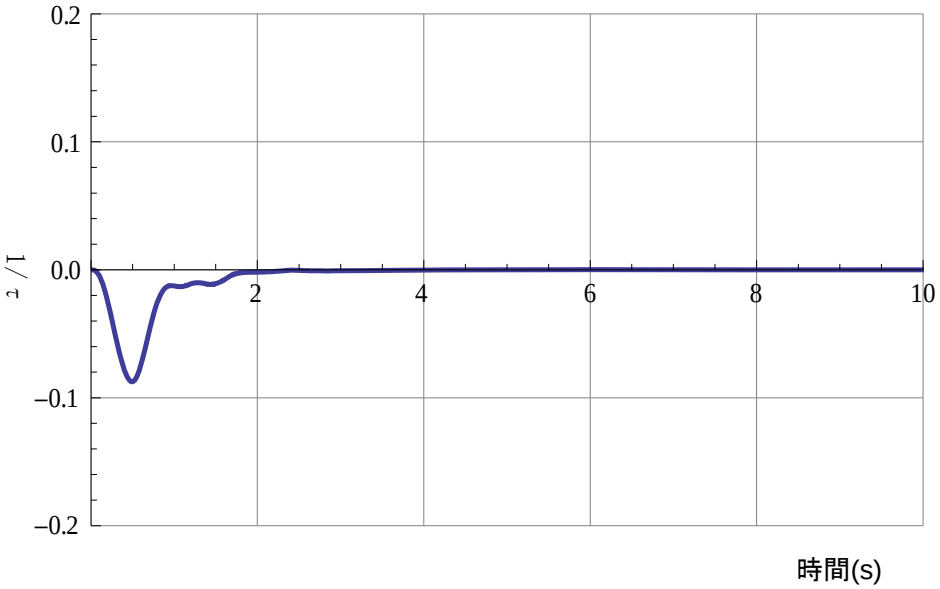

図 6.7　シミュレーション結果（$1/\tau$）

図 6.5 より，電球への追従が確認できる．

ただし，電球位置が X 軸の 1m の位置に対し，0.05m の誤差を残したまま収束している．これは電球に追従するための制御系の切り替えが Θ が±5 度を閾値にしているためだと考えられる．

図 6.6 では，飛行ロボットの高度が徐々に下がり，一定値に収束されていることが確認できる．図 6.5 と比較すると，X 軸方向の収束と Z 軸方向の収束が同時に行われていることがわかる．これは，出力される τ-マージンの値が 0 になるように制御され，電球との距離が近づく X 軸の正方向で高度が下がった為である．図 6.7 では，$1/\tau$ の値をグラフにして示したが，ここでも 0 に追従していることが確認できる．

以上のシミュレーション結果から，６章２節の制御系が飛行ロボットのモデルに対し妥当であると考え，実際の飛行ロボットの制御系に(6.6)式，(6.7)式を適用する．

７．実験

７．１．電球追従実験

ここでは，３章におけるタスクを実際に行い，飛行ロボットが電球を追従する様子を評価する．電球は自由にX，Y，Z空間を移動させる．

τ-マージンは, 距離や, 対象物の大きさを元に求めるものではない. そこで, 実験では, 電球を３０Wと６０Wに替えて２度実験を行う．それぞれの実験で同じ回路を用いることにより，τ-マージンによって制御が行われているか確認する．また，制御系を示す(6.6)式，(6.7)式におけるαは５度とする．このαの値は，以下の実験においても共通して５度に設定する．

７．２．τ-マージンによる上下飛行性能の評価実験

電球をZ方向にのみ上下させ, 飛行ロボットのτ-マージンによる制御に対して評価を行う．この実験の場合も，電球を３０Wと６０Wの２種類を用い，実験を２回行う．

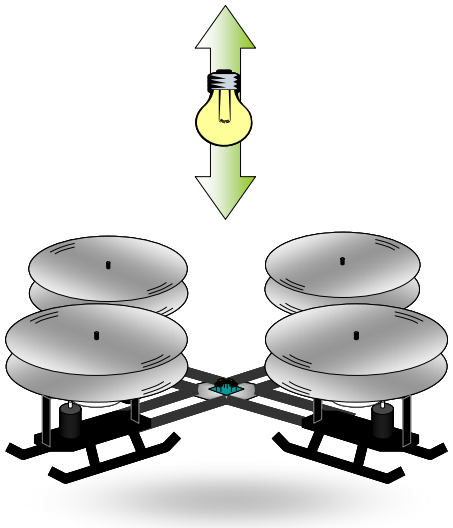

図 7.1　τ-マージンによる上下飛行性能の評価実験

７．３．姿勢制御性能評価実験

ここでは，飛行ロボットを地面に置き，飛行ロボットから 1m 離れた位置の高度 1m に 30W の電球を固定する．飛行ロボット起動から 20 秒間，飛行ロボットの軌跡を調べ, 水平方向の電球追従性能と姿勢制御性能について検討する．これは，６章３節のシミュレーションと近い実験であるため，この実験結果からシミュレーション結果との比較も行う．

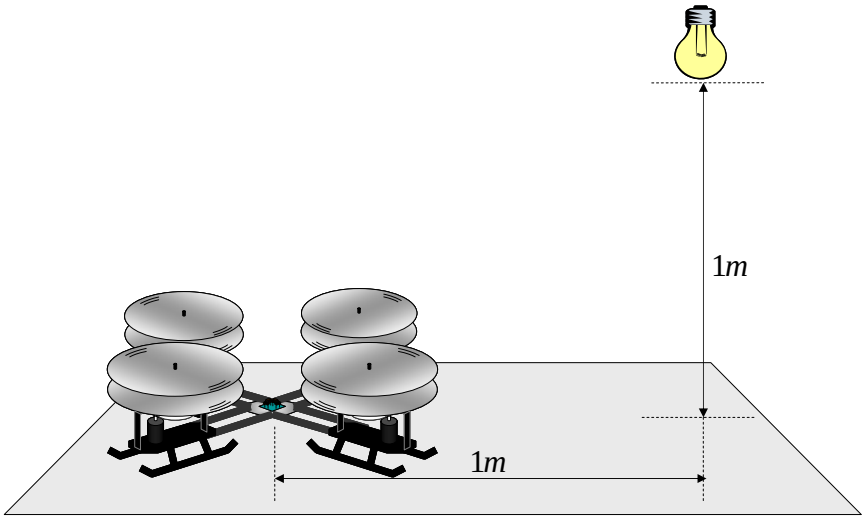

図 7.2　姿勢制御性能評価実験

８．結果

８．１．電球追従実験結果

以下，図 8. 1 と図 8.2 に，電球追従実験の結果を１秒毎の連続写真で示す．

実験では 30W と 60W の電球を用いているが，どちらの場合でも，自由に動く電球に対し，飛行ロボットが同様に追従していることが確認できる．

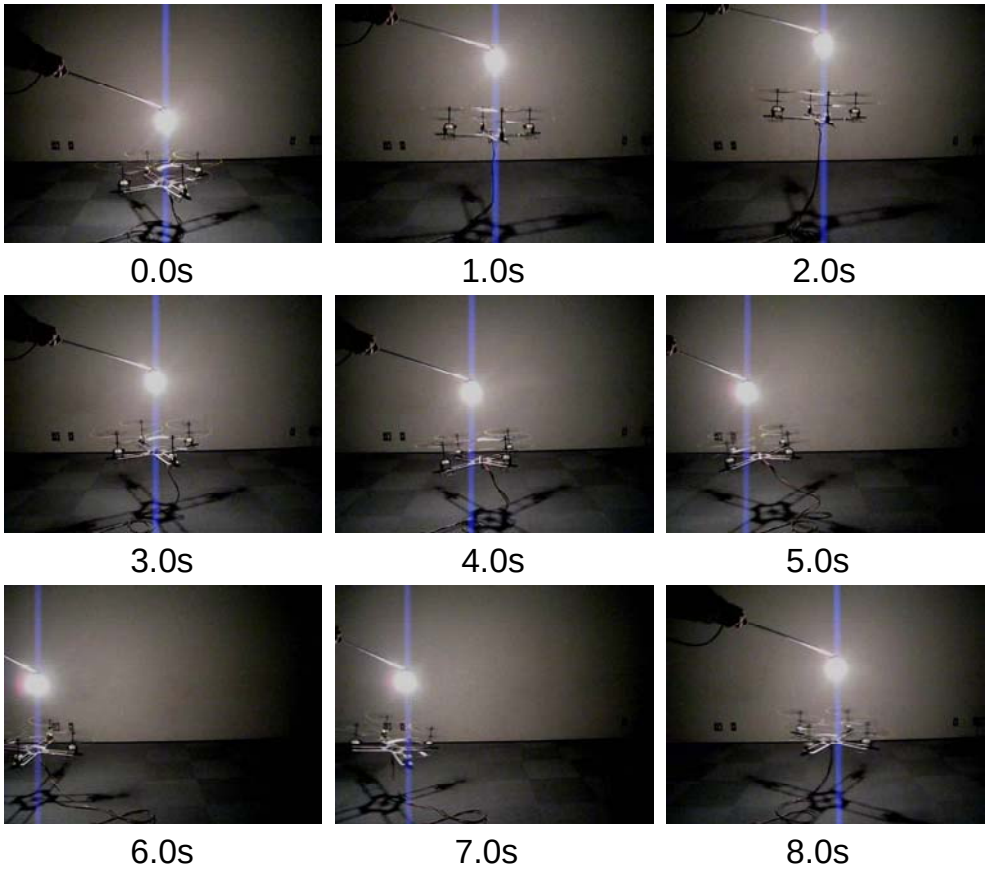

図 8.1 飛行ロボット制御実験結果（30W 電球）

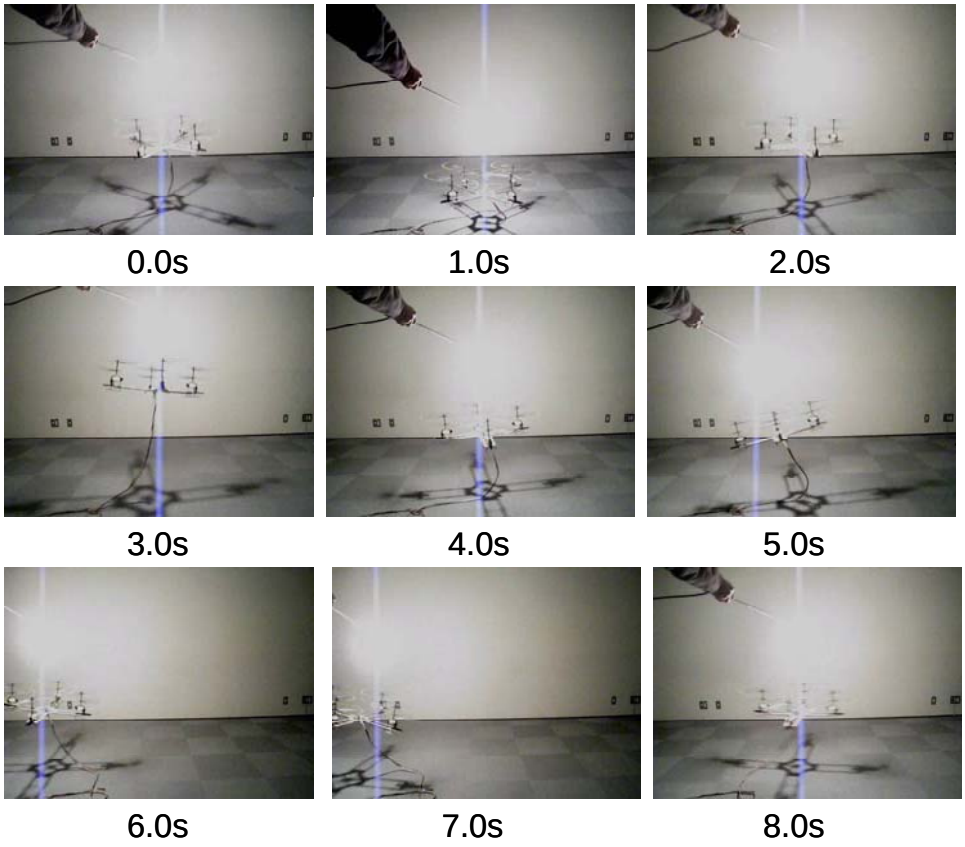

図 8.2 飛行ロボット制御実験結果（60W 電球）

８．２．τ-マージンによる上下飛行性能の評価実験結果

図 8.3，図 8.4 はτ-マージンによる上下飛行性能の評価実験の結果である．1/2 秒毎に電球と飛行ロボットの高度を測った．電球の高度変化は破線で，飛行ロボットの高度変化は実線で示す．

図 8.3 と図 8.4 のそれぞれにおいて電球への追従が確認できる．同じ回路や制御系を用いているが，電球の明るさが変化しても，距離を測らずに同様の追従が行われた．

ただし，一度飛行ロボットと電球との距離が開くと追従性能が下がっていることも確認できる．これは，τ-マージンが衝突までの残り時間を特定することから，飛行ロボットと電球との距離が大きくなると得られるτ-マージン出力が

下がってしまう事に原因があると考えられる．一度追従が遅れ，電球と飛行ロボットとの距離が離れてτ-マージンの出力が小さくなってしまうと，６章２節における制御系では，追従には不完全である．

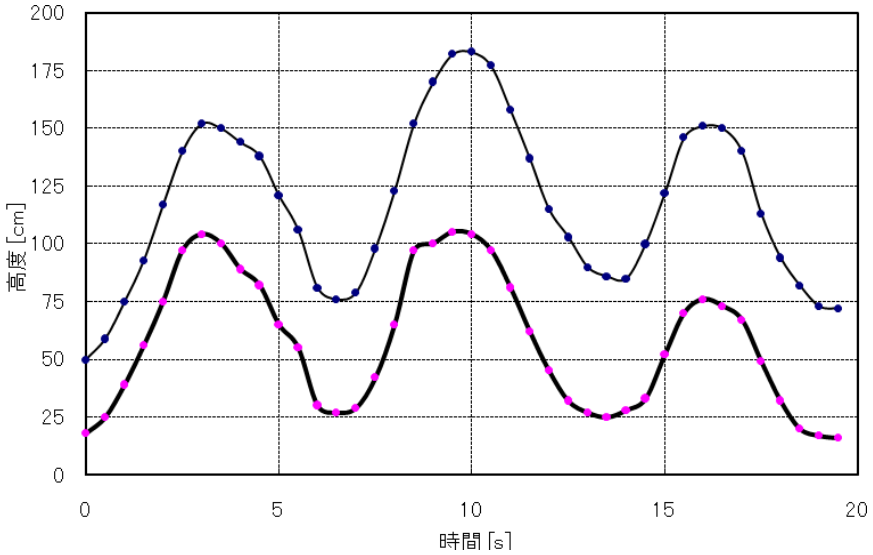

図 8.3　τ-マージンによる制御実験結果（30W）

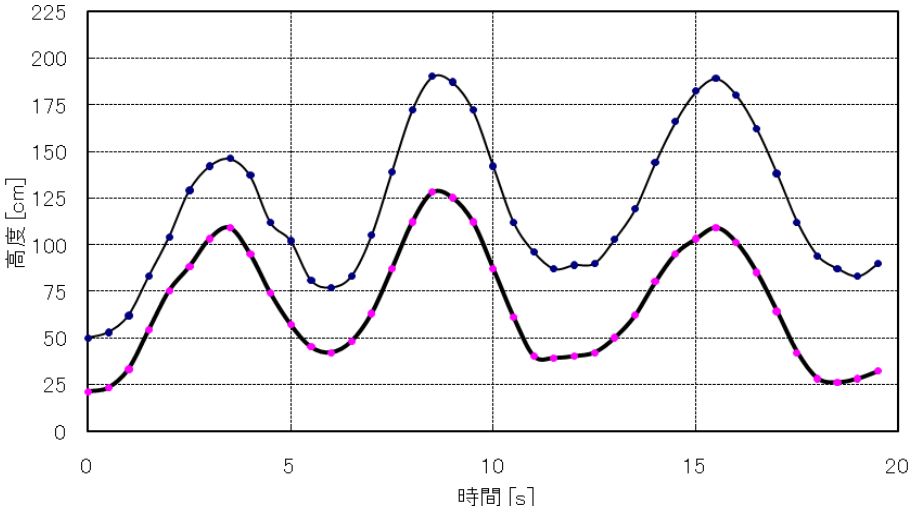

図 8.4　τ-マージンによる制御実験結果（60W）

８．３．姿勢制御性能評価実験

図 8.5 は姿勢制御性能評価実験の結果である．0.33s 毎に X 軸方向，Y 軸方向の位置を測定した．電球は．原点の位置に固定されている．電球の真下に入ってからの振動は半径約 100mm の円内に収まっていることが確認できる．飛行ロボットが約６秒から７秒で安定した飛行に移行していることも確認できる．ただし，安定した飛行が行われているのが約 100mm 程度，原点から離れた位置であることも確認できる．この原因は，６章３節のシミュレーションにおける結果の図 6.5 と同様で，電球の追従を行う制御系に切り替える閾値Θを±5 度で設定しているため，電球を追従しなくなる範囲がある程度の範囲で存在するからだと考えられる．

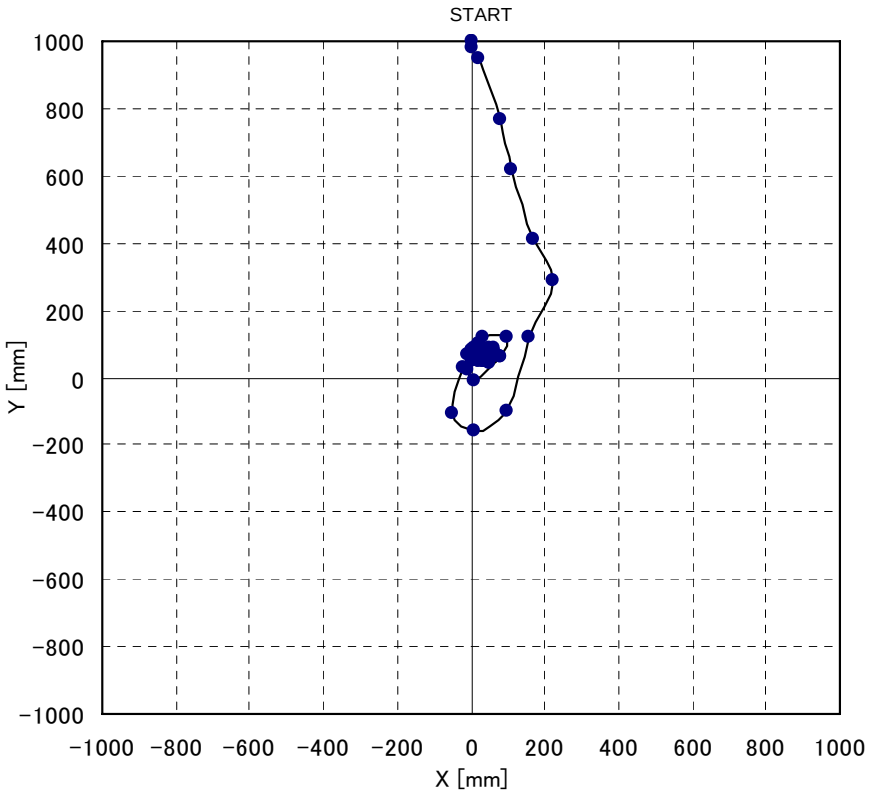

図 8.5　姿勢制御実験結果

９．おわりに

本研究では生態心理学における τ-マージンの理論を飛行ロボットへ適用し，電球を用いた制御を行った．また，制御系は全てアナログ回路で実現した．

実験の結果から，τ-マージンの理論を用いる事により明るさが異なる未知の光源に対して，一切，距離および速度を測定することなく，飛行ロボットの制御が可能であることを確認した．また電球のある環境設定と，２重反転ロータを４組使用する飛行ロボットの構造によって，飛行ロボットの制御には，加速度センサやジャイロセンサ，磁気センサ，また，カメラや GPS も使用せずに，安定した飛行ロボットの制御を実現した．本研究では従来手法に対し，単純な構成で飛行ロボットの制御が可能であることを示した．また，制御系を含めたすべての回路をアナログ回路によって実現したことにより，実時間で制御が可能となった．同時に，アナログ回路の有用性を示した．

実際の生物を規範とし，生態心理学における τ-マージンの理論を用いた飛行ロボットの制御は，有効な結果を得ることができた．

謝辞

最後に，本研究に際して多大なるご指導，ご協力をいただいた法政大学工学部伊藤一之専任講師, 伊藤研究室の方々に心から感謝いたしております. また，今後の皆様のご健闘を願うとともに，法政大学における各研究において，本論文がほんの僅かながらでも参考になればと願うものであります.

参 考 文 献

1) 佐々木正人:アフォーダンス-新しい認知の理論-，岩波書店，1994

2) 三嶋博之:エコロジカル・マインド-知性と環境をつなぐ心理学-，NHKブックス，2000

3) Lee DN: The optic flow field-The foundation of vision. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, 290(1038), 169-179, 1980

4) Lee DN, Reddish PE: Plummeting gannets-a paradigm of ecological optics, Nature:293-294, 1981

5) 佐々木正人:アフォーダンス入門-若きロボット研究者とのQ&A-，日本ロボット学会誌，Vol.24，No.7，791-796，2006

6) 古山宣洋:運動を導く知覚システム，日本ロボット学会誌，Vol.24，No.7，840-806

7) 伊藤一之，大須賀公一，石黒章夫，古山宣洋:実世界の性質を利用した知覚と制御，日本ロボット学会誌，Vol.24，No.7，807-811，2006.

8) 森亮介，平田健一，玉置健，米沢直晃:視覚情報に基づく小型無人ヘリコプタの誘導制御，日本ロボット学会誌，Vol.26，No.8，905-912，2008

9) 辛振玉，藤原大悟，羽沢健作，野波健蔵:小型無人ヘリコプタのモデルベース最適姿勢制御および位置制御，日本機械学会論文集(C集)，70巻，697号，2631-2637，2004

10)王偉，平田光男，野波健蔵，宮澤修:超小型・超軽量マイクロフライングロボットのモデリングと自律制御，日本ロボット学会誌，Vol.25，No.1，121-129，2007

11) Erdinc¸ Altu˘g, James P. Ostrowski, Camillo J. Taylor：Control of a Quadrotor Helicopter Using Dual Camera Visual Feedback，The International Journal of Robotics Research，Vol. 24， No. 5， May 2005，329-341