

状態遷移量に基づく屋内小型自律飛行船の動作設計に関する検討

Autonomous Indoor Blimp Robot Motion Design Based on State Value

高谷 敏彦* 川村 秀憲** 山本 雅人** 大内 東**
Toshihiko TAKAYA Hidenori KAWAMURA Masahito YAMAMOTO Azuma OHUCHI

要 旨

屋内飛行船は、ヘリウムガスを利用して中性浮力を得て飛行を行う。建物内を安全に移動することが可能であり、移動に必要なエネルギーが小さく三次元空間を移動可能であるために、新しいタイプの移動ロボットとして注目され、種々の応用研究が行われている。

一方、アプリケーションを実現する際の課題として、目標状態に対する高い制御精度、目的達成までの継続飛行、外乱や気圧等の環境条件に対して影響されないことが必要である。

従来研究では制御に関するものが主で、基本動作となる定点保持や直進移動に関する研究、基本動作を組み合わせて円や三角形の軌道を移動する制御研究が行われてきた。制御手法としては、PID制御やファジィ制御、行動価値関数制御、学習制御等が研究されている。

しかし、飛行船は慣性や外乱の影響が大きく、目標位置へ高精度で到達する制御は困難であった。この問題を解決するために、気流や慣性の影響も認識する位置と速度を情報量として用い、直線移動と回転の同時実行で複雑な動作を実現する。また、本研究では、飛行船の状態量を導入して状態遷移法を用いることにより、飛行船の動作設計を容易に行うことが可能なことを示す。本研究は二次元移動体に関しても適用が可能である。

ABSTRACT

This paper describes indoor balloon operation based on state diagram using PID controller. The design of operation was enabled for control of an indoor blimp robot of operation in the formation propriety of each state by state change. By using the indoor blimp robot control method of this paper, the design of an indoor blimp robot of operation can be performed simply.

By determining the parameter which can realize a benchmark, we showed that an airship applicable to various applications, such as entertainment and round surveillance, is realizable. For these features, indoor balloon robots have enormous potential for applications such as entertainment flight, automatic surveillance and searching activities in the destructive buildings.

* リコーソフトウェア株式会社 事業戦略室

Business Strategy Center, Ricoh Software Inc.

** 北海道大学情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

1. 序論

屋内飛行船は、ヘリウムガスを利用して中性浮力を得て飛行を行う。建物内を安全に移動することが可能であり、移動に必要なエネルギーが小さく三次元空間を移動可能であるために、新しいタイプの移動ロボットとして注目され、種々の応用研究^{14, 15, 19, 20)}が行われている。

一方、アプリケーションを実現する際の課題として、目標状態に対する高い制御精度、目的達成までの継続飛行、外乱や気圧等の環境条件に対して影響されないことが必要である。

従来研究では制御に関するものが主で、基本動作となる定点保持¹⁾や直進移動²⁾に関する研究、基本動作を組み合わせて円や三角形の軌道を移動する制御³⁾研究が行われてきた。制御手法としては、PID制御³⁾やファジィ制御⁴⁾、行動価値関数制御⁷⁾、学習制御^{18, 22, 23)}等が研究されている。

しかし、飛行船は慣性や外乱の影響が大きく、目標位置へ高精度で到達する制御は困難であった。この問題を解決するために、気流や慣性の影響も認識する位置と速度を情報量として用い、直線移動と回転の同時実行で複雑な動作を実現する。また、本研究では、飛行船の状態量を導入して状態遷移法を用いることにより、飛行船の動作設計を容易に行なうことが可能なことを示す。

2. 小型自律飛行船の設計

2-1 ハードウェアフレームワーク

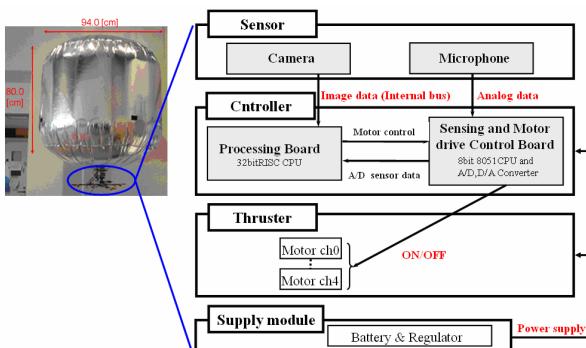


Fig.1 Diagram of the autonomous blimp research platform.

本稿で用いる自律制御飛行船はFig.1に示すように、バルーン、外部状況検出センサ、センサからの入力処理やプロペラの出力を行うための制御、推進、電源の5つの部位に分けて設計しており、バルーンの浮力はバルーンの体積を調整して、全体の総重量543.5[g]以上を達成するために、高さH=0.80[m]、直径D=0.94[m]として浮力567.2[g]を達成した。²⁴⁾

飛行船は、床面に配置されたランドマークから位置を算出するためのカメラを装備し、3次元空間を自由に移動可能とするために、および 軸方向に推力を発生するプロペラを装着している。そして、電源としては LiPo 7.2V400mAhrのバッテリーを搭載し、レギュレータで+5Vに調整して用いる。²⁴⁾

2-2 飛行船の動作遷移

Fig.2に状態遷移図の基本構成を示した。

飛行船は、状態Aの遷移条件を満足した場合、A+1移行して動作を行う。動作遷移の基本構造は遷移条件の組み合わせで決定し、遷移条件を達成するまで動作制御する。

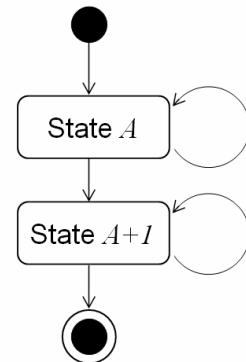


Fig.2 State diagram.

2-3 飛行船への入力と状態量

状態量は、位置情報の取得方法として、環境中に配置されたランドマークの画像処理によりカメラ座標系を取得する¹¹⁾。飛行船はこれらの画像処理により、絶対座標系における位置情報と角度、 x, y, z, θ を取得する。

速度情報は、位置情報の移動推移の近似を利用し、時刻 t での位置情報を $(x(t), y(t), z(t), \theta(t))$ としたとき、

各軸の速度情報は次の式で表すことができる.

$$vx(t) = \frac{x(t) - x(t - \Delta T)}{\Delta T} \quad (3)$$

$$vy(t) = \frac{y(t) - y(t - \Delta T)}{\Delta T} \quad (4)$$

$$vz(t) = \frac{z(t) - z(t - \Delta T)}{\Delta T} \quad (5)$$

$$\omega \theta(t) = \frac{\theta(t) - \theta(t - \Delta T)}{\Delta T} \quad (6)$$

$\Delta T = 0.3[\text{sec}]$ は画像のサンプリング時間である.¹⁴⁾

飛行船は、上記の位置および速度情報を状態量として毎時刻取得する. 定点保持や回転動作等では、状態の継続時間や回転回数の副次的な状態量を用いることで動作が可能になる.

以上飛行船の状態量は、式(7)として表現できる.

$$S(t) = (x(t), y(t), z(t), \theta(t), vx(t), vy(t), vz(t), \omega \theta(t), ct(t), cr(t)) \quad (7)$$

ここで、 $ct(t)$ は状態の継続時間、 $cr(t)$ は回転回数を意味する.

2-4 制御層：行動設計

飛行船の動作設計は、飛行船が移動する理想的な軌道が、直線や曲線等の設定した移動軌道上を正確に移動することである. 移動ロボットの移動方法として、実験環境中に目標地点を設置しその間を移動することで望ましい軌道を移動する方法^{11, 12)}を用いた. 飛行船の移動方法としても実験環境中に目標地点を設定し、目標地点間を移動することで設定軌道に近づくと考えられる.

ここで、目標行動を *Action*、目標状態を *A* とする. 目標行動は目標状態の系列として次のように表現される.

$$Action = (A1, A2, \dots) \quad (8)$$

各目標状態は、

$$Ai = (oxi, oyi, ozi, o\thetai, ovxi, ovyi, ovzi, o\varpi\thetai, octi, ocri) \quad (9)$$

という状態量のベクトルで表現できる. $ox, oy, oz, o\theta$ はそれぞれ x 座標、 y 座標、 z 座標、 θ の目標値であり、 $ovx, ovy, ovz, o\varpi\theta$ はそれぞれ $vx, vy, vz, \varpi\theta$ の目標値である. また、 oct は動作を継続する時間で、 ocr は回転回数を表す. 目標状態の各要素に対して、実数値と * を指定することができる. ここで、* は目標状態量を

指定しないという意味である. *oct* および *ocr* に関しては、制御軸と直接関係のない目標状態である.

制御軸に関する状態量から飛行船の制御システムについて述べる. 先ず、同軸に対して位置と速度を同時に指定した場合の飛行船の行動設計は、飛行船が移動する理想的な軌道は直線や曲線等の軌道上を移動することである. ロボットの移動方法として、環境中に目標地点を設置しその間を移動することで所望の軌道を移動する方法が示されている^{11, 12)}.

飛行船の移動方法としても実験環境中に目標地点を設定し、目標地点間を移動していくことで所望の軌道に近づく.

同軸に対して位置と速度を同時に指定した場合、PID制御に基づく屋内飛行船の飛行制御システムの開発では、本稿で用いた機体では、5軸を制御するため目標状態が異なり困難になる. 位置と速度の目標値が与えられる場合、 x 軸に関して考えると次の4通りが想定できる.

- case1 : $(ox, ovx) = (*, *)$
- case2 : $(ox, ovx) = (given, *)$
- case3 : $(ox, ovx) = (*, given)$
- case4 : $(ox, ovx) = (given, given)$

ここで、*given* は目標値が与えられるという意味である. 飛行船の位置は速度の積算値で表現することが可能である. その結果、目標とする速度を実現することで、速度を指定することにより位置が指定されている目標状態に到達することが可能であると考えられる. 本研究の飛行制御システムでは制御出力を決定するために速度を利用する.

上記の4通りの条件に対してそれぞれ制御出力を決定する速度を計算する規則を決定することにより、飛行船は最適行動ができる. ここで、制御に用いる目標値を *evx* とする. 4通りに対して飛行船の最適戦略を検討する.

case1では、位置も速度も目標値として指定しない. この場合、制御対象となる軸に対して目標値が決定できないため、*evx* = 0 とする.

case2では、目標位置が指定されている. 目標値に速度を用いるため、位置から速度に変換する規則を設定す

る必要がある。飛行船が目標位置に速度が0で到達するのが望ましいと考え、次の式(10)で目標値を決定する。

$$evx = \alpha_x dx \quad (10)$$

ここで、 dx は目標位置と現在の飛行船の位置との偏差であり、 α は比例定数である。各軸に対する比例定数を予備実験からTable 1に決定した。

Table 1 Proportional constant for each axis.

α_x	α_y	α_z	$\alpha\theta$
0.1	0.1	-0.05	0.25

この比例定数は、目標位置に対して到達する時間から決定する。本件等では、目標値に対して20[sec]程度で到達することを目標として比例定数を決定した。また、比例定数はパラメータとして変更可能であり、動作目的に合わせた定数を用いることが望ましい。

case3の場合、速度の目標値が指定されているため、 $evx = ovx$ として指定する。最後にcase4の場合、case2およびcase3で設定される目標値のどちらかを用いることを考慮する。飛行船はバッテリー容量に制約があるために、短い時間で目標状態に到達することが望ましい。このためcase4の場合、下記の式(11)で目標速度を決定する。

$$evx = \begin{cases} \alpha_x dx & \text{if } (\alpha_x dx) > |ovx| \\ ovx & \text{if } (\alpha_x dx) < |ovx| \end{cases} \quad (11)$$

式(11)では、case2およびcase3で計算される目標速度の最大値をとるため、飛行船は目標の状態に早い時間で到達することが期待される。しかし、 $\alpha x dx$ と ovx の正負が異なる場合、プロペラの回転が正回転と逆回転で推力が異なるために、状態量を同時に満たすことが困難になる。このとき、飛行船は現在の目標状態に到達することを破棄し、次の目標状態に到達する行動を実行する。 x 軸だけでなく、 y, z, θ の軸に対しても同様の規則によって目標速度を決定することにより飛行船は目標状態に到達する制御を実行する。行動を指定し実行するだけで、飛行船はひとつの行動のみを実行する。 A の行動をしている飛行船が A_{i+1} に遷移する条件について述べる。

遷移条件として、 $SA = (sx, sy, sz, s\theta, svx, svy, svz, s\omega\theta, st, sr)$ を設定する。 A の要素のうち、目標値が *given* である各軸の位置と速度の要素が、対応する遷移条件を満たしたときに次の行動に遷移する。

$$|S(t) - A| \leq SA_i, \forall i = \text{given}, \quad oa_i \in A_i \quad (12)$$

ここで、 $S(t)$ は時刻 t での状態量であり、各軸の位置 $(x(t), y(t), z(t), \theta(t))$ と速度 $(vx(t), vy(t), vz(t), \omega\theta(t))$ および状態の継続時間 $ct(t)$ 、回転回数 $cr(t)$ である。遷移条件の $S(t)$ には、式(10)の状態を継続する時間を指定し、 srt には(12)式を満足する回転数を指定する。指定がない場合には、*とする。

遷移条件は目標状態ごとに設定する。しかし、設定条件により飛行船が移動可能な時間が変化する。設定条件を詳細にすると、次の目標状態に遷移しない。このため、遷移条件の初期値をTable 2に設定した。

Table 2 Transition condition for next action.

sx	sy	sz	$s\theta$	st
20.0	20.0	20.0	0.2	*
svx	svy	svz	$s\omega\theta$	sr
1.0	1.0	-2.0	0.1	*

遷移条件は飛行船の移動目的に合わせて設定可能であり、例えば三次元空間上のある点を保持するという定点保持を行う際には、状態の継続時間で st を指定することにより可能となる。また、目標地点まで数cm要求事項のタスクを行う際には、 sx や sy の値が満足するように設定する。

2-5 目標位置移動制御

飛行船の行動として、実験環境中に配置された目標地点から動作を開始し、その動作タスクを行った後に目標地点に到達する動作遷移を考える。

目標地点に着地する制御を考えた場合、次の要素が必要になると考えられる。ある地点から動作を開始し、そのタスクを行った後に開始地点に定点保持する動作を考える。

- ・確実に目標地点に定位置保持する移動方法
- ・飛行船が定位置保持成功したと判断する方法

- ・目標地点着地する実現する制御システム

このような事例として、二次元移動ロボットでは、ドッキング着地点を設置し、ロボット自身のバッテリー残量が少なくなったときに自律的に充電する方法が研究されてきた^{9, 10)}。二次元移動ロボットの研究と同様に、飛行船においても同様に目的位置への正確な移動が必要である。

本研究では飛行船の目的位置として、定位置保持から移動して目標位置を通過し、最終的な目標位置での着地動作を行う一連の動作設計をして実験で確認する。

本研究における飛行船の目的位置での定位置保持の概要をFig.3に示す。

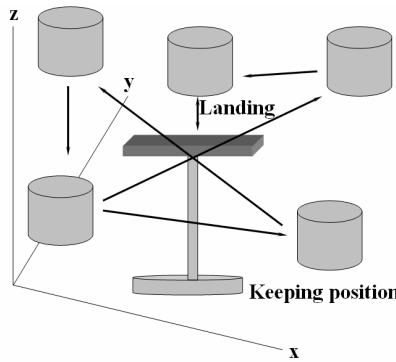


Fig.3 Movement and landing operation.

状態遷移図に示すとFig.4になる。

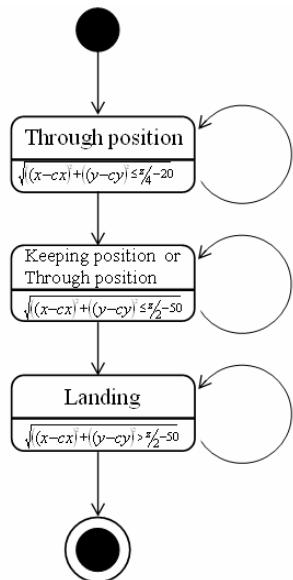


Fig.4 State diagram for blimp robot motion design.

以上の条件から、プロペラ／モータユニットに取り付けられた部品が確実に定位置保持または着地する精度は次の三つの式から半径を決定することで求めることができる。

$$R = \sqrt{(x-cx)^2 + (y-cy)^2} \leq OR \quad (13)$$

$$|d\theta| \leq od\theta \quad (14)$$

$$|v| \leq Vz_{down} od\theta \quad (15)$$

ここで、 cx, cy は目標位置中心の x, y 座標であり、 OR は円の半径を表し、 $d\theta$ は目標位置と飛行船の θ の偏差、 $od\theta$ はその目標偏差を意味する。

また、 Vz_{down} は下降の最大速度である。本研究では、円の半径を $OR=10[\text{cm}]$ とし、 θ に関する目標偏差を $od\theta=0.2[\text{rad}]$ 、 $Vz_{down}=5[\text{cm/s}]$ として設定する。

着地地点の距離を $75[\text{cm}]$ とし、高さ $130[\text{cm}]$ とした着地点は絶対座標系において $\theta=0$ として設置する。着地制御の場合には、目標位置の上空から下降を行う必要がある。目標位置から付近に下降を行うだけでは、突発的な外乱や空気の流れが発生した場合にもう再着地を試みることが困難になる。このため、確実な着地制御を行うために着地部分付近の制御を多段階に分割する。本研究では、着地部分を含む付近の領域を三分割する。

分割する領域を飛行船の x, y および z 座標を変数とした条件式で表現し、条件を満たした場合に制御する領域が決定される。着地条件を包括する分割領域の条件式をTable 3にまとめた。

Table 3 Divided area for target point.

Domain name	Condition formula
area1	$\sqrt{(x-cx)^2 + (y-cy)^2} \leq \pi/4 - 20$
area2	$\sqrt{(x-cx)^2 + (y-cy)^2} \leq \pi/2 - 50$
area3	$\sqrt{(x-cx)^2 + (y-cy)^2} > \pi/2 - 50$

また、分割される領域の概観図をFig.5に示す。

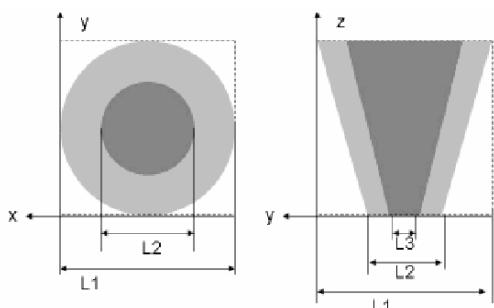


Fig.5 Divided area for motion include landing motion.
(upper view(left) and aspect view(right))

目標地点への到達だけがタスクの目的の場合には、area3の設定を除外して、area2の条件によって制御する。

各領域に存在している飛行船の移動方法は、飛行船がarea1の条件式を満たした場合、目標位置へ向かって速度の制御を行う。このとき、目標状態として下降の場合、 $(ox,oy,o\theta,ovz)=(cx, cy, 0, \mathbf{V}z_{down})$ を指定し x, y 座標と θ, vz を制御する。area2に存在している場合、飛行船は着地点の中心座標 (sx, sy) に向かい、area1の領域への移動を試みる。このとき、目標状態として $(ox, oy, o\theta)=(cx, cy, 0)$ のみを指定する。また、area3に存在している飛行船は目標位置の中心上空へ向かい、area1およびarea2の領域への移動を試みる。目標状態として $(ox, oy, oz)=(cx, cy, cz)$ を指定することで、目標位置の中心上空へ移動することが可能になる。

領域を分割したとき、条件により複数の領域中に飛行船が存在する可能性がある。このとき、飛行船は条件が厳しくなる領域が優先的に選択される。即ち、area1の条件とarea2の条件を満たす場合にはarea1が選択される。また、領域を分割することにより突発的な外乱や空調の影響を受け、飛行船が流された場合であっても、初期領域に依存せず最終的にはarea1への移動を試みるために、着地は確実に実行可能である。定点保持および目標点通過では、下降制御が行われず、area2までの制御となる。

2-6 PID制御

本研究では、飛行船の制御方法としてPID制御を利用する。PID制御は、制御モデルが単純で広く制御の分野で使用されている制御方法であり、飛行船の制御方法としても利用されている^{3,5)}。

PID制御を利用する場合、目標となる状態量と現在の状態量との偏差が必要となる。飛行船の制御では位置の偏差から操作量を計算する研究が行われてきた。しかし、慣性が大きい場合、目標状態に制御することが困難であるという問題がある。本稿では、目標速度と現在速度の偏差から操作量を計算するPID制御を用いる。

飛行船は制御軸として x, y, z, θ を有する。各軸に対する操作量を $m(t)$ とし、目標速度と現在の速度との偏差を $e(t)$ とすると、各軸の操作量は次のようになる。

$$m_x(t) = K_{px}e_x(t) + K_{Ix}\sum e_x(t)\Delta T + K_{Dx}\frac{De_x(t)}{\Delta T} \quad (16)$$

$$m_y(t) = K_{py}e_y(t) + K_{Iy}\sum e_y(t)\Delta T + K_{Dy}\frac{De_y(t)}{\Delta T} \quad (17)$$

$$m_z(t) = K_{pz}e_z(t) + K_{Iz}\sum e_z(t)\Delta T + K_{Dz}\frac{De_z(t)}{\Delta T} \quad (18)$$

$$m_\theta(t) = K_{p\theta}e_\theta(t) + K_{I\theta}\sum e_\theta(t)\Delta T + K_{D\theta}\frac{De_\theta(t)}{\Delta T} \quad (19)$$

ここで、 $K_p \cdot K_I \cdot K_D$ は比例・積分・微分ゲインであり、また $De(t) = e(t - \Delta T)$ である。

PID制御では、各操作量の比例項、積分項、微分項を決定する必要がある。各項の求め方としては、Ziegler-Nicholsによる限界感度法やステップ応答法が知られている¹³⁾。

飛行船が飛行する環境および動作特性から安定点に到達することが困難であるため、ステップ応答法を用いて各項を求める。ステップ応答法におけるPID制御の各項は、制御の特性を示す反応曲線より求め、反応曲線の変曲点に接線を引き、接線と横軸が交わる時刻を T 、変曲点の時刻との差応答の定常値を K とする。このとき、各項は $K_p = 1.2T/K_L$ 、 $K_L = 0.6T/K_{L2}$ 、 $K_D = 0.6T/K$ として求めることができる。

上記の式に基づき各項を決定する。しかし、この値をそのまま適用することは飛行船の動作特性から難しい。そのために、求められた値から予備実験により精

度の高いパラメータを求める必要がある。

2-7 出力層：プロペラ回転時間

出力層では、PID制御を基に計算した x, y, z, θ の操作量からプロペラの回転時間を計算する。各軸に対する操作量を駆動部の6個のプロペラに与えることで飛行船を制御する。

プロペラへ与える操作量を $m_0(t), \dots, m_5(t)$ とすると、これらの操作量は次の式で表すことができる。 θ に関しては、独立に扱うためのプロペラが存在しないため x 軸および y 軸の操作量に足し合せて制御を行う。

$$m_0(t) = m_y(t) + m_\theta(t) \quad (20)$$

$$m_1(t) = m_x(t) + m_\theta(t) \quad (21)$$

$$m_2(t) = m_y(t) - m_\theta(t) \quad (22)$$

$$m_3(t) = m_x(t) - m_\theta(t) \quad (23)$$

$$m_4(t) = m_z(t) \quad (24)$$

$$m_5(t) = m_z(t) \quad (25)$$

上記操作量を基にプロペラの回転時間が決定される。回転数rk[rpm]と発生推力Th[g]の関係を計測した結果から、正回転では最大30[g]程の推力を発生可能であるのに対して、逆回転は最大15[g]までの推力しか得られないために、正回転・逆回転の推進力の差を考慮して回転数の制御を行い²⁴⁾、モータの性能から最小回転時間を0.01[sec]とする。 $m_0(t), m_1(t), m_2(t), m_3(t)$ から回転時間に写像して、 θ 軸の制御を行う。 θ を制御する際、 $m_0(t), m_1(t), m_2(t), m_3(t)$ に関する正の回転時間と逆回転に合せる必要があり、逆回転の推力の最大値はおよそ15[g]であることから、 $m_0(t), m_1(t), m_2(t), m_3(t)$ に関して正回転の最大回転時間を0.21[sec]とする。

3. 実験

3-1 実験環境

飛行実験環境をFig.6に示す。

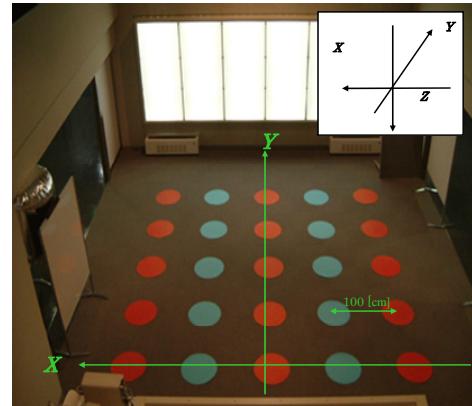


Fig.6 Experimental environment.

環境中には赤と青のランドマークを100[cm]間隔で配置し、着地動作を行う着地点をランドマークの中心付近に配置する。実験環境では、飛行船が飛行可能な領域が、 $-200 \leq X \leq 200$, $-50 \leq Y \leq 350$, $100 \leq Z \leq 300$ として定義される。また、 θ に関しては任意の方向に制御可能であるため $-\pi \leq \theta < \pi$ の範囲とする。飛行船の飛行環境は、空調や気流の影響が常に発生しており、飛行条件が実験ごとに異なる。

本研究ではPID制御の偏差に速度を用いているために、空調や気流の影響を飛行船が自律的に認識して制御が可能である。このため、飛行条件が異なる場合でも指定された同一軌道を移動可能にした。

3-2 実験設定

直線移動に関するベンチマークをTable 4にまとめ、直線移動を組み合わせた中央部への到達定在動作の実験結果をFig.7に示す。

Table 4 Benchmark : linear motion.

3-dimensional target coordinates	ox	oy	oz
P_1	-150.0	0.0	150.0
P_2	150.0	0.0	250.0
P_3	-150.0	300.0	250.0
P_4	150.0	300.0	250.0

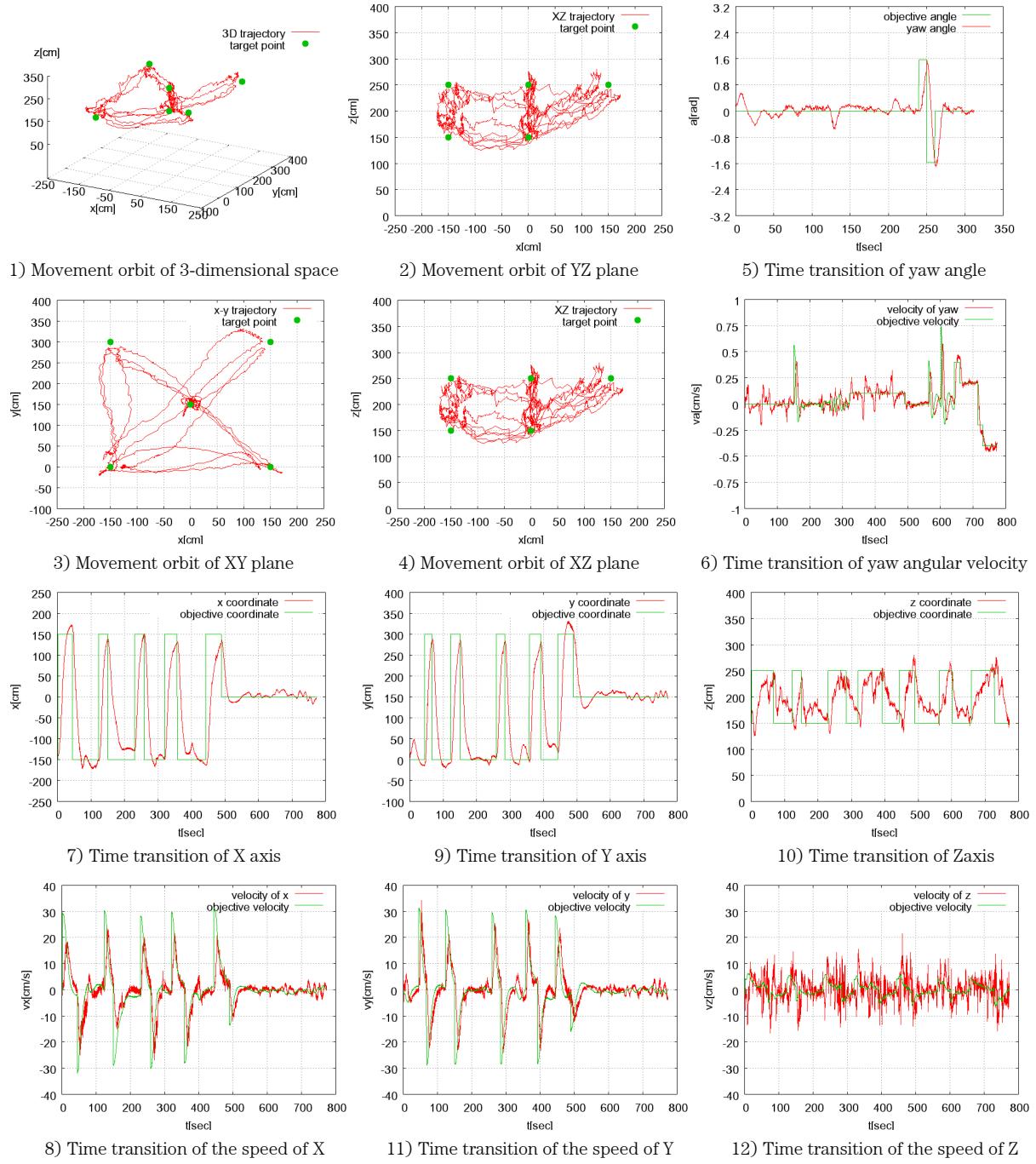


Fig.7 Benchmark experiment result.

基本動作を実現するベンチマークでは、前述した要素を組み合わせた設定を作製する必要がある。ベンチマークとなる実験設定をTable 5に示す。Table 5のベンチマークには、直線移動や定点保持を実行中に回転角を制御する、直線移動中に回転速度を制御する、等の複数の軸が混在しているため制御が困難である。このため、ベンチマークの再現性が可能であれば、飛行船

ロボットは定義された環境の中ですべての目標状態を実現することが可能であり、飛行制御システムが有効であることが示される。ベンチマークを行う飛行船ロボットの初期位置を $(x, y, z) = (-150.0, 0.0, 150.0)$ とする。

同じ実験設定で20回実験を行い、各目標状態に到達した時の偏差をTable 6にまとめた。

Table 5 Objective state of benchmark motion.

Target state	ox	oy	oz	$o\theta$	$o\omega\theta$	oct
A_1	150.0	0.0	250.0	*	*	*
A_2	-150.0	300.0	250.0	*	*	*
A_3	-150.0	0.0	150.0	*	+	*
A_4	150.0	300.0	250.0	*	+	+
A_5	-150.0	0.0	150.0	$3\pi/4$	+	+
A_6	150.0	0.0	250.0	$3\pi/4$	+	*
A_7	-150.0	300.0	250.0	$3\pi/4$	*	+
A_8	-150.0	0.0	150.0	$3\pi/4$	*	*
A_9	150.0	0.0	250.0	$-3\pi/4$	0.1	*
A_{10}	-15.0	300.0	250.0	*	0.1	*
A_{11}	-150.0	0.0	150.0	+	0.1	*
A_{12}	150.0	300.0	250.0	*	0.1	*
A_{13}	0.0	150.0	250.0	*	*	30.0
A_{14}	0.0	150.0	350.0	$\pi/2$	*	30.0
A_{15}	0.0	150.0	150.0	$-\pi/2$	*	30.0
A_{16}	0.0	150.0	150.0	*	0.4	30.0
A_{17}	0.0	150.0	250.0	*	0.2	30.0
A_{18}	-0.0	150.0	250.0	*	-0.2	30.0
A_{19}	0.0	150.0	250.0	*	-0.4	30.0

Table 6 Deviation mean of objective state.

objective state	dx [cm]	dy [cm]	dz [cm]	$d\theta$ [rad]	$d\omega\theta$ [rad/sec]
A_1	9.21	10.20	19.20	*	*
A_2	12.54	14.33	12.30	*	*
A_3	7.84	8.12	17.90	*	*
A_4	15.84	10.19	15.48	*	*
A_5	18.73	3.27	13.52	0.044	*
A_6	6.53	9.47	16.68	0.063	*
A_7	12.20	12.09	10.14	0.086	*
A_8	5.73	7.99	18.87	0.028	*
A_9	16.46	8.54	8.08	*	0.0081
A_{10}	14.43	11.88	6.16	*	0.0082
A_{11}	6.59	12.48	17.46	*	0.0110
A_{12}	18.55	6.50	11.22	*	0.0092
A_{13}	8.12	7.16	13.15	*	*
A_{14}	4.32	6.85	12.83	0.055	*
A_{15}	6.06	8.63	11.41	0.088	*
A_{16}	5.08	6.83	6.58	*	0.0326
A_{17}	4.22	7.03	13.16	*	0.0184
A_{18}	7.65	13.08	4.64	*	0.0512
A_{19}	7.39	7.68	6.33	*	0.1880

X, Y 平面の移動軌跡から、飛行船は初期位置を出発し、目標状態への移動を次々と実行している。四角形の移動を行っているとき、目標状態間の移動時間はおよそ40[sec]から60[sec]である。中央上空へ移動した後、飛行船は θ を $\pi/2$ と $-\pi/2$ へ制御され、中央に設置された着地部へ、着地を試みていることが z 座標の時間推移にあらわされている。着地を試みている段階では飛行船は分割された領域による制御に従う。分割された領

域を移動し、最終的に目標点へ着地していることが Y, Z 平面の移動軌跡からわかる。

Fig.7から、本稿の提案する飛行動作制御方法を用いて飛行船は目標地点への到達定在及び着地動作が可能なことが示された。

次に、定点保持について考える。定点保持動作では、飛行船は目的状態量を一定の時間継続する必要が生じる。また、定点保持を実行している間プロペラ出力が小さいため、外乱や空調が影響した場合でも定点を保持する必要がある。このため、定点保持を行う三次元空間の位置の座標を実験環境の中心座標である(ox, oy) = (0.0, 150.0)に設定した。

定点保持に回転動作を加えた場合でも、直線移動・定点保持のみと同程度の精度で制御が可能であるため、目標状態の指定に関係なく目標状態に到達可能であることが示され、目標速度を追従することにより、目標状態を実現する制御システムを構築した。本実験により、 z 座標および vz は目標状態への追従が他軸に比べ困難であることがわかる。飛行船は浮力をを利用して浮遊しているため、気温や気圧が変化した場合に自身の浮力を変化する。このため、 z 軸の制御に関して特にパラメータの最適化を行う。

飛行制御方法で、目標速度を計算する比例定数およびPID制御のパラメータが変更可能である。これらのパラメータは繰り返し実験を行い求めていく。最適パラメータを決定する評価量として、最適制御問題²¹⁾の評価量を利用する。

本稿の飛行制御では、目標速度を追従すれば目標状態に到達することが可能であるため、各時刻における速度偏差を小さくすることで改善される。従って、最適制御問題のひとつである最小コスト問題として評価量を決定した (Table 7)。

飛行船の状態は離散時間で取得されるため評価量 E は次の式で表現される。

$$E = K_{px} e_x(t) + \sum_{t=1}^T (v(t) - OV(t)) \quad (26)$$

パラメータの評価量として式(26)を選択したため、評価量は小さい値ほど好ましい。

Table 7 Evaluation value for minimum cost problem.

	$T[\text{sec}]$	e_x	e_y	e_z	e_θ
Parameter 1	773.45	141388.10	138857.30	62518.10	30.232
Parameter 2	973.71	84163.26	86860.82	36390.53	26.077
Parameter 3	773.45	77961.75	87239.43	58574.09	26.773
Parameter 4	738.11	83201.11	91771.92	55488.33	31.462
Parameter 5	808.79	79597.28	83620.15	44228.98	28.028

飛行時間の関わらず、目標速度を追従する飛行制御の実現のために、Table 7からパラメータ2をベンチマークに最適なパラメータとして選択する。選択されたパラメータを用いてベンチマークを実行した結果をFig.8に示す。Fig.7に比べ、飛行時間は長くなる。しかし、目標状態に対してより正確な移動が可能であり、目標速度への追従が滑らかになることがわかる。

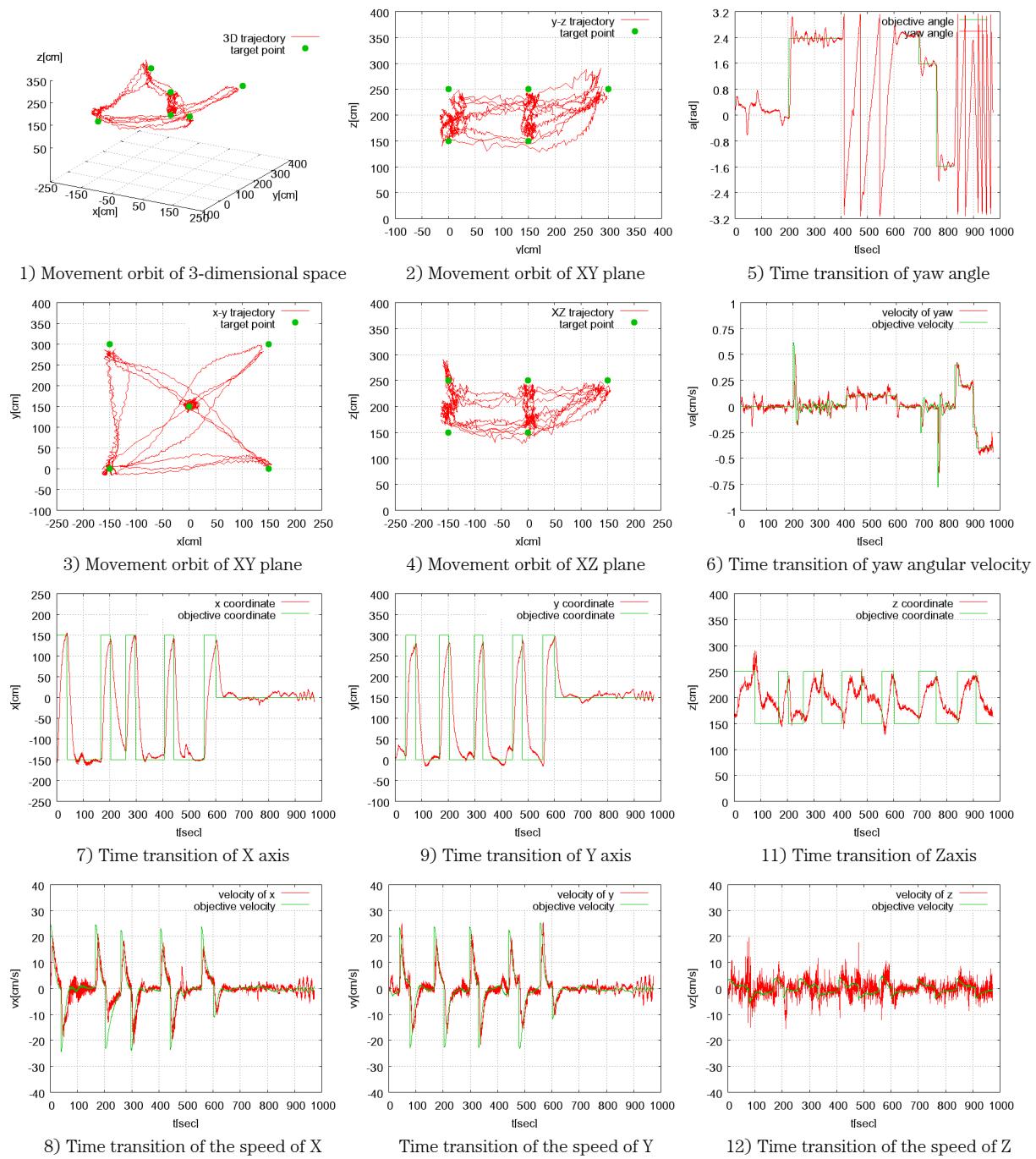


Fig.8 Benchmark result using adjusted parameters.

4. 結び

飛行船の動作制御を、状態遷移によって、各状態の成立可否で動作設計を可能にした。

本稿の飛行船制御方法を用いることにより、飛行船の動作設計を簡易に行うことができる。つまり、状態遷移と判定条件を設定するだけで、飛行船の三次元的な動作を決定できることを示した。また、システムのパラメータを最適化することで飛行船はより精度の高い動作制御が可能になることを示した。

直線移動や定点保持専用のパラメータを探索することも可能である。しかし、飛行船のアプリケーションを考える場合には、全ての動作を網羅するパラメータを決定する方がパラメータの決定コストは小さい。精度が高いベンチマークを実現できるパラメータを決定することにより、エンタテインメントや巡回監視等さまざまなアプリケーションへ適用可能な飛行船が実現できることや、ベンチマーク動作は有効であることを示した。

参考文献

- 1) Zwaan,S., Bernardino,A. and Santos-Vitrol,J. : Visual station keeping for floating robots in unstructured environments, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol.39, pp.145-155 (2002).
- 2) Kobayashi,J., Akatsuka,Y. and Ohkawa,F. : Flight Control of Blimp Robot Based on CCD Camera Images, *Proceedings of International Symposium on Advanced Control of Industrial Processed*, pp.269-274 (2002)
- 3) Kawamura,H. et al. : Motion Design for Indoor Blimp Robot with PID Controller, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.17, No.5, pp.500-508 (2005)
- 4) Sugisaka,M. et al. : Development of the Fuzzy Control for a GPSlocated Airship, *Proceedings of the 10th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, (2005)
- 5) Kadota,H. et al. : PID Orbit Motion Controller for Indoor Blimp Robot, *Proceedings of the 10th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, (2005)
- 6) Minagawa,Y., et al. : Learning landing control of indoor blimp robot for autonomous energy recharging, *Proceedings of the 12th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, (2007)
- 7) Motoyama,K., et al. : Design of Action-value Function in Motion Planning for Autonomous Blimp Robot, *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, Vol.10, No.124, pp.1930-1937, (2004)
- 8) Jonker,P., Caarls,J. and Bokhove,W. : Fast and Accurate Robot Vision for Vision based Motion, *International Workshop on RoboCup (Robot World Cup Soccer Games and Conference)*, Lecture Notes in Computer Sciences, pp.72-82 (2000)
- 9) Silverman,M., Nies,D., Jung,B., Sukhatme,S. : Staying alive : A Docking Station for Autonomous Robot Recharging, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2002)
- 10) Oh,S., Zenlinsky,A. and Taylor,K. : Autonomous Battery Recharging for Indoor Mobile Robot, *Proceedings of Australian Conference on Robotics and Automation*, (2000)
- 11) Roy,N. and Thrun,S. : Coastal Navigation with Mobile Robots, *Neural Information Processing Systems* 12, pp.1043-1049, (2000)
- 12) Bruce,J. and Veloso,M. : Real-Time Randomized Path Planning for Robot Navigation, *Intelligent Robots and Systems*, (2002)
- 13) Ziegler,J.G., Nichols,N.B. : Optimum Settings for Automatic Controllers, *Transaction of American Society of Mechanical Engineers*, 64, p.759, (1942)
- 14) 川村秀憲 他 : ホバリング制御に基づくエンタテインメントバルーンロボットの開発, *知能情報ファジィ学会誌*, Vol.17, No.2, pp.203-211, (2005)
- 15) 高谷敏彦 他 : 屋内小型自律飛行船の自動巡回システム, *第22回ファジィシンポジウム講演論文集*, 8A1-1, (2006)

- 16) 角田久雄 他 : カメラ搭載型バルーンロボットシステムの開発と PD 制御による位置制御の実現, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.6, pp.1715-1724, (2004)
- 17) 鈴木恵二, 岡田孟, 三ツ井裕勝 : 視覚情報とポテンシャル法の融合による小型自律飛行船制御, 第 22 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 8A1-4, (2006)
- 18) 皆川良弘 他 : 充電地点へのドッキングを行う室内バルーンロボットの学習制御, 第 5 回情報技術フォーラム講演論文集, J-050, (2006) 19) 藤内武之, 小野里雅彦 : 被災地の探査を目的とした小型飛行船の開発, 第 3 回計測自動制御学会 SI 部門講演会予稿集, Vol3.3, pp.17-18, (2002)
- 20) 新田亮 他 : 自律飛行船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, 2005-EC-2, pp.7-14, (2005)
- 21) 近藤文治, 藤井克彦 : 制御工学, オーム社, (1972)
- 22) R.R.Sutton ; Learning to predict by the method of temporal differences, Machine Learning, 3:pp.9-44, (1988)
- 23) C.J.C.H.Watkins : Learning from delayed rewards. PH.D. thesis, Cambridge University, (1989)
- 24) 高谷敏彦 他 : 小型自律飛行船研究プラットホームの実現, 電気学会論文誌 C Vol.127, No.9, pp.1419-pp.1429 (2007)