HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	角田, 久雄; 川村, 秀憲; 山本, 雅人 他
Citation	情報処理学会論文誌, 45(6), 1715-1724
Issue Date	2004-06-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/52036
Rights	ここに掲載した著作物の利用に関する注意 本著作物の著作権は情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。
Type	journal article
File Information	110002712219.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Information Processing Society of Japan

Vol. 45 No. 6 情報処理学会論文誌 June 2004

推薦論文

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

角田久雄[†] 川村秀憲[††] 山本雅人[††]
高谷敏彦[†††] 大内東[††]

バルーンロボットは低エネルギーで3次元空間を安全に移動できるため，人の進入が困難な場所での観測活動やアミューズメントロボット分野などに応用可能であり，室内での新たなタイプのロボットとして注目を集めている．バルーンロボットは浮力により宙に浮くことができる利点を持つ反面，慣性が大きく，微小な気流の影響を受けやすいため制御が困難であるなどの問題点を持つ．このため，様々な外乱を含む環境下において適切な制御方法を確立することができれば，実用的なバルーンロボットへ向けて大きく前進すると考えられる．本論文では，室内での使用目的に適した機体，プロペラユニットの配置などを設計し，室内用のバルーンロボットシステムの構築を行った．また，環境中にランドマークを置き，カメラを用いて認識することで設定した目標地点で留まることと，離れた位置から目標地点へ移動する位置制御に対する実験を行った．そして，PD制御のパラメータの数値設定を数パターン用意して実験を行うことで，目標地点で留まる場合にはP制御が適しており，目標地点へ移動する場合にはPD制御が適していることを示した．

Development of Autonomous Balloon Robot System with Vision Camera and PD Position Controller

Hisao Kadota,[†] Hidenori Kawamura,[††] Masahito Yamamoto,[††]
Toshihiko Takaya[†††] and Azuma Ohuchi[††]

Balloon robots have attracted attention as new type indoor robots for various applications, e.g., observation, guidance, and amusement flying. A balloon robot can float and move long time in 3-dimensional space by low energy. However, it is difficult to control positioning of a balloon robot because it has great inertia and is easily effected by a little air stream of a conditioner. Positioning control under usual indoor environment is key technology to realize an autonomous balloon robot. In this paper, we develop the indoor-type balloon robot system with a light wireless vision camera. The balloon robot is controlled to keep at the target position based on simple vision processing and PD-controller. Vision processing is realized by perceiving a red circle on the floor as a landmark. In the experiments, several PD settings are investigated for positioning control, and we conclude the paper by that P-controller is suitable to keep at the target position and PD-controller successfully works to go in the direction of target from far position.

1. はじめに

ヘリウムを充填し空中を漂いながら移動するバルーンロボットは，小型飛行機やヘリコプタなどと比較して建物内を安全に移動することができる．中性浮力に基づいた空中移動では，移動するために必要なエネルギーコストが小さく，限られた電源においても長時間3次元空間を移動可能であることから，室内での新たなタイプの移動ロボットとして注目を集めている．

バルーンロボットに関する従来研究として，自律型の飛行船に関する研究が行われている．たとえば，全

† 北海道大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Hokkaido University
†† 北海道大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University
††† リコーシステム開発株式会社
RICOH SYSTEM KAIHATU COMPANY, LTD.

本論文の内容は2003年4月の情報処理北海道シンポジウム2003にて報告され，プログラム委員により情報処理学会論文誌への掲載が推薦された論文である．

NII-Electronic Library Service

Information Processing Society of Japan

長200[m]ほどの大型飛行船を成層圏に停滞させて，通信・放送・地球観測などの無線基地として利用する成層圏プラットホームに関する研究[1]や，全長10[m]程度の中型飛行船を交通調査や都市計画のための調査に利用することを目的とした研究[2]などがあげられる．

小型バルーンロボットは災害時の建造物内や高所などの人の進入が困難な場所での観測活動などに応用可能であり，また，空飛ぶロボットとしてアミューズメント分野でも応用が期待される．環境を認識しながら自律で飛行するロボットが実現できれば，様々な応用が可能となる．

小型バルーンロボットは室内の3次元空間を移動できるという利点を持つ反面，小型であるがゆえの問題点を持っている．1つ目の問題点は，大きな浮力を実現することが難しく，十分な出力装置やセンサなどを搭載することが困難なことである．2つ目の問題点は，慣性が大きく，環境中の微小な空気の流れの影響を受けやすいため制御が容易ではないことである．さらに，プロペラのわずかなイレギュラや発生推力の非線形性，バッテリ特性の変化，バルーン形状の歪みなどが複雑に影響してしまうため，人間でさえも思いどおりに制御することは困難である．

しかし，近年の技術の発展により，小型マイクやカメラなどが製品化され，そのようなセンサをバルーンロボットに搭載することが現実的に可能となってきており，搭載物の制限に関する問題は徐々に解決されつつある．このため，様々な外乱を含む環境下において適切な制御方法を確立することができれば，実用的なバルーンロボット実現へ向けて大きく前進すると考えられる．

そこで本研究では，小型室内用のバルーンロボットシステムの構築を行い，基礎的な位置制御の実現を目指す．バルーンロボットシステムの構築にあたっては，室内での使用目的に適したバルーン形状，プロペラユニットの配置などの設計を行う．さらに，カメラ画像からランドマークを認識することで3次元位置を測定し，ランドマークの上空に設定された目標地点へ移動して，その地点で留まることを目的とした位置制御の実現を目指す．室内での限定された実験環境においてさえも空調や温度差による空気の流れを排除することは困難であり，そのような不安定な環境下で位置制御が実現できれば，複雑な移動制御への大きな一歩となることが期待できる．以降，本論文ではバルーンロボットシステムの設計，位置制御のための画像認識システムと制御方法，そして実環境での飛行実験に関して述べる．

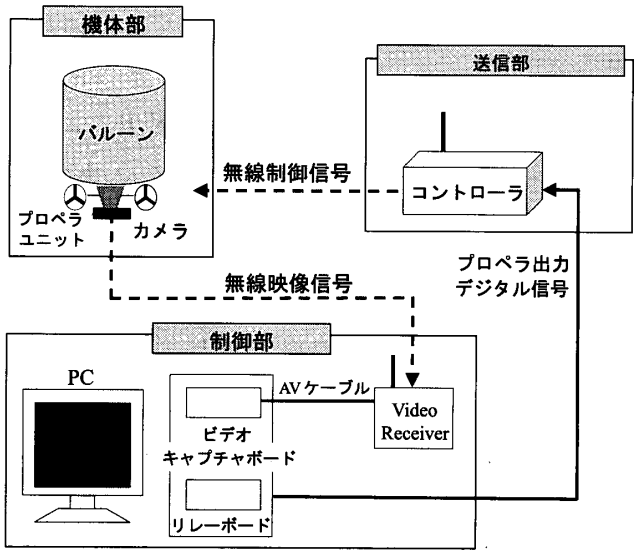


図1 制御システム
Fig. 1 Outline of control system.

2. バルーンロボットシステムの開発

通常，高速移動時の空気抵抗を軽減するために楕円形をした飛行船型のバルーンロボットが一般的である．このような飛行船は，前進・後退，上昇・下降を実現するプロペラ，方向転換するためのプロペラを持ち，力学的にノンホロノミックな系となっている．しかし，室内用のバルーンロボットを考える場合，高速な移動は必ずしも必要ではないため，飛行船型にこだわる必要はない．また，室内の狭い空間を移動することを考えると，機体を旋回させずに水平方向にダイレクトに移動できるようなプロペラ配置が有効であると考えられる．

そこで，バルーン形状を円柱型とし，3次元動座標系において各軸方向にそれぞれ推力を発生できるようなホロノミック系円柱型バルーンロボットの設計を行った．円柱型は体積を大きく作れるためペイロードを多くとることができ，移動方向について偏りの少ない空気抵抗を実現することが可能である．また，プロペラを各軸方向について独立に設置することにより3軸を独立に制御できる．

図1が示すように，バルーンロボットの制御システムは大きく分けて，機体部・制御部・送信部の3つで構成されている．機体部はバルーン・プロペラユニット・カメラから成り立っている．制御部は画像処理や制御のための計算などを行う部分であり，計算量の多い処理が要求されるので，今回は小型のコンピュータをバルーンロボットに搭載することはせず，外部に制御用のPentium III 867 MHzのPCを用意した．

具体的には，機体部のカメラから無線で送られてく

NII-Electronic Library Service

Information Processing Society of Japan

る映像を受信するための映像受信機とPC側に取り付けたビデオキャプチャボードをAVケーブルでつなぐことでカメラ映像を30[fps]のフレームレートでPCに取り込む．そして，取り込まれた画像からサンプリング間隔 $\Delta T = 0.2$[sec] で対象を認識することで各プロペラの出力を決定する．決定された各プロペラの出力はリレーボードを介してデジタル信号で送信部のコントローラへ送信される．コントローラは受信したデジタル信号を制御信号に変換し，機体部の各プロペラユニットに対してそれぞれ異なる周波数帯域で送信する．そして，この制御信号を受信することによりプロペラが駆動するシステムとなっている．

使用するプロペラモータは信号のON-OFFで駆動するものであるため，モータに与える電圧を指定することで発生推力の大きさに比例特性を持たせることはできない．そこで，サンプリング間隔 ΔT 中にプロペラモータ駆動のON-OFFを切り換えるタイミングを k 回設けることでモータの駆動時間比を加減し，擬似的に比例的な推力を発生させる．なお，ここでは $k = 10$ とした．

バルーンロボットを製作するにあたって，プロペラユニット3個で110.86[g]，カメラで45[g]の重量に釣り合う浮力を実現する必要がある．ここで，直径 D[m]，高さ H[m] とすると浮力 B[g] は，空気の密度を $\rho_a = 1226$[g/m^3]（15°C，1atm））として，

$$B = \pi \rho_a H \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (1)$$

と計算される．また，バルーン内に充填させるためのヘリウムの密度は $\rho_h = 178.5$[g/m^3]（0°C，1atm）であり，バルーンを $c = 30$[g/m^2] の膜材で製作すると機体部の総重量 W[g] は，

$$W = \pi \rho_h H \left(\frac{D}{2}\right)^2 + \pi c D \left(H + \frac{D}{2}\right) + 155.86 \quad (2)$$

と計算されるので，浮力 B と総重量 W が等しくなるような直径 D と高さ H の関係をもとに**図2**のような高さ62.5[cm]，直径64.5[cm]の円柱型バルーンロボットを製作した．

このバルーンロボットは鉛直下向きを Z 軸の正方向とする動座標系において，各軸方向に独立に推力を発生できるようにバルーンの下部に XY 平面移動用として2つのプロペラユニット（**図3**参照），上部に Z 軸方向移動用として1つのプロペラユニット（**図4**参照）が取り付けられている．各プロペラユニットは同時に動作するプロペラモータを左右に持ち，正回転・逆回転・停止のいずれかを操作できる．

プロペラの回転の制約から，このバルーンロボットは意図的な旋回を起こすことは不可能であるが，カメラがバルーンの下部に下向きに取り付けられており，外乱による意図しない回転動作が起こっても，カメラ映像に基づいて相対的に進行すべき方向を判断することで，目標地点に到達可能であることがシミュレーション環境において実証されている[3]．

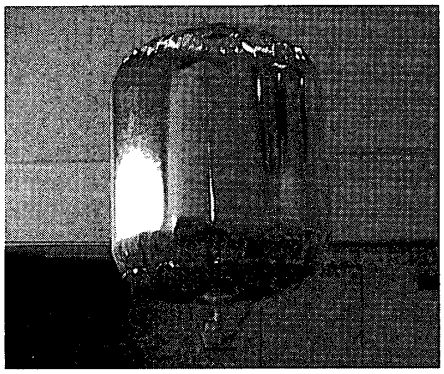


図2 円柱型バルーンロボット
Fig. 2 Pillar-type balloon robot.

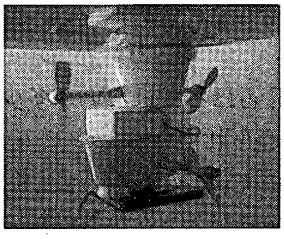


図3 機体下部
Fig. 3 Lower part.

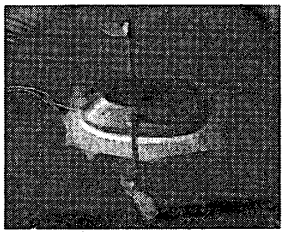


図4 機体上部
Fig. 4 Upper part.

3. 位置制御の実現

3.1 環境設定

バルーンロボットは人の進入が困難な場所における観測活動などの応用が期待される．このような観測活動を実現するためには，目標地点へ移動し，その場所に留まるという位置制御を精度良く行うことが重要であると考えられる．しかし，気温の影響によりヘリウムや空気の密度が変化するため，中性浮力をうまく実現することは困難であり，また，微小な気流の影響を受けやすいため，このような基礎的な位置制御でさえ容易ではない．

そこで，本研究では**図5**に示すような環境で位置制御の実現を目指す．環境中にランドマークとして直径50[cm]の赤色の円を床に置き，カメラ画像から円を認識することで円の中心の上空175[cm]に設定した目標地点にバルーンロボットを制御する実験を行う．環境として選択した空間は，およそ縦600[cm]，横400[cm]，高さ500[cm]程の建造物内の空間で上階と吹き抜けになっている．実験時は空調を停止させる

NII-Electronic Library Service

Information Processing Society of Japan

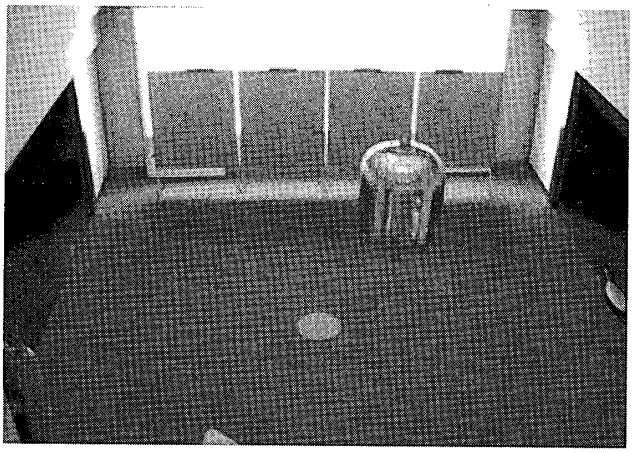


図5 実験環境
Fig. 5 Experimental environment.

が，環境の構造上，人間が感じるほどではないが多少の空気の流れがあることが確められている．

このような環境で位置制御が実現できれば，より気流などの影響が強い環境下でのロバストな位置制御の基礎となると考えられる．

3.2 位置情報の取得

実験では，位置情報を得るために直径50[cm]の赤円を用いる．画像中心を原点とした240[pixel]×180[pixel]の2次元座標でカメラ画像を表すと（以後これをカメラ座標系と呼ぶ），カメラ座標系において円の中心座標 (xc, yc) はバルーンロボットと目標地点の水平面方向の位置関係により変化し，円の直径 d[pixel] は床からのバルーンロボットの高さによって変化する．あらかじめ直径の分かっている円を用いるので，カメラ座標系における円の中心座標と直径が計算されれば，バルーンロボットから見た目標地点の3次元位置情報を取得することが可能となる．

色情報を用いた物体の認識技術を応用した研究例としてはロボカップがあり，あらかじめ形状や色情報を与えられた物体の認識に関して様々な研究がなされている[4)~6)]．本研究では認識対象を赤円で構成しており，単純な画像処理アルゴリズムにより (xc, yc) や d を求めることができる．以下ではそのアルゴリズムについて述べる．

(1) 赤円の色認識

色情報を用いて物体を認識する場合，その物体の色濃度を知る必要がある．ここでは，実験環境における照明条件などから円と他の物体の色濃度を精度良く分離でき，扱いが単純なフルカラーRGB表色系を用いることにした．そして，事前に予備実験として照明条件の異なる様々な位置から赤円の画像を撮影しておき，円を示すRGBの各濃度値に対して上限・下限の閾値を**表1**のように設定した．

表1 色濃度の閾値設定
Table 1 Color levels of red circle.

	R	G	B
下限値	75	25	20
上限値	150	85	115

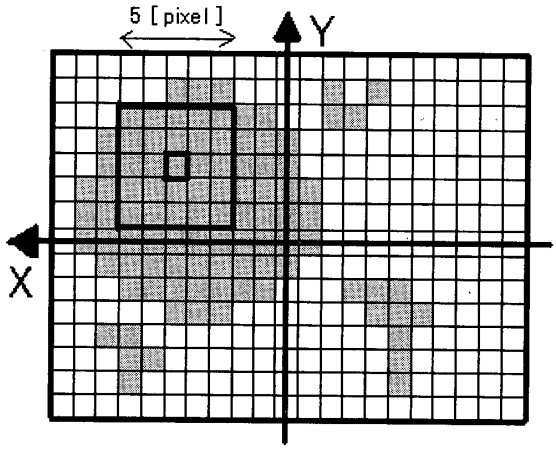


図6 円の内部点の認識
Fig. 6 Recognition of an internal point in circle.

(2) 円の内部点の認識

(1)で設定した閾値の範囲に含まれるすべてのピクセルを円の一部であると見なすだけでは，ノイズの影響によって中心座標や直径の算出が困難になる場合がある．このため，画像中において**図6**のように正方形の25ピクセルすべてが濃度値の範囲に含まれるような領域を1つ求め，その中心を円の内部点として認識する．このとき，走査はカメラ座標系の左上を起点とし，右側に1ピクセルずつ移動しながら行い，右端に来たときには1ピクセル下へ移動し再び左端より再開する．この方法は，ある程度の大きさの領域を考慮して円の内部領域を検出するので，1点のピクセルを用いて円の内部点であると判断するよりも正確に円の内部点を求めることが可能になる．

(3) 領域認識とエッジ点の検出

(2)で求めた円の内部の1点から周囲に画像を走査していき，円と床の境界であるエッジ部分を検出することで赤円の領域を認識する[6)]．通常，物体と物体が隣接する境界では隣接ピクセル間の色濃度値の差が大きくなっていることから，画像処理分野で物体間の境界線を抽出する手段として頻繁に用いられるSobelフィルタ[7),8)]を用いてエッジ部分を検出する．Sobelフィルタは，隣接ピクセルとの色の濃度値の差を出力するものであるため，出力値がある閾値を超えた座標点をエッジであると判断する．Sobelフィルタは，隣接ピクセルだけでなく周囲のピクセルも参照してエッジを

NII-Electronic Library Service

Information Processing Society of Japan

抽出するので，1つのピクセルがノイズの影響を受けていたとしても他の部分で補うことができる．また，X，Y それぞれの方向に対してフィルタ処理を行い，処理後の各方向の濃度値のベクトル和を最終的な濃度値としており，有効な境界線抽出フィルタとして広く利用されている．

(4) 円の中心座標，半径の推測

直線や円など，その形状の関数形が既知である場合，そのような図形の特徴抽出方法としてハフ変換[7]がしばしば用いられる．しかし，円の中心座標 (xc, yc)，半径 d を求める場合これら3パラメータが未知となり，精度良く検出しようとするとハフ変換では計算に時間がかかるなどの問題がある．そこで，以下の方法により簡易的に円の中心座標と直径を推測する．

(3)により求まった全エッジ点からランダムに選択した3点を円の方程式に代入して解を求めることで，画像中で円が欠けて映っている場合でも (xc, yc)，d を推測することができる．ただし，選ばれた3点間のユークリッド距離が近いとき，もしくは，3点の中で1点でも実円上のエッジではない座標を検出してしまった場合には，(xc, yc)，d は誤差を多く含んでしまう．そこで，上述の算出操作を検出されたエッジ点の個数回行い，その平均をとることで検出誤差の軽減を図った．ちなみに(2)〜(4)までの過程で必要な画像処理時間は，およそ20[msec]程度であり，PCに取り込まれる画像のフレームレートが30[fps]であることを考えると十分な処理速度で (xc, yc)，d の検出が可能である．

(5) 位置情報の取得

求められた (xc, yc) と d を用いて，以下の式により各軸方向のバルーンロボットに対する目標地点までの相対偏差 E[cm] を求める．

$$E_X = xc \times l \tag{3}$$

$$E_Y = yc \times l \tag{4}$$

$$E_Z = h - 175 \tag{5}$$

l は円の実直径が50[cm]，画像中の円の直径が d[pixel] であることから，1ピクセルあたりの距離を以下の式で近似したものである．

$$l = \frac{50}{d} \tag{6}$$

また，h は地上からのバルーンロボットの高さを示すものであり，地上からのバルーンロボットの高さとその高さでの円の画像中の直径 d の関係の事前調査から，以下のような近似関係式で与えられることが分かっている．

$$h = \frac{10530}{d} \tag{7}$$

3.3 制御方法

飛行船型のバルーンロボットに関する研究では，Q-Learningを用いてプロペラの出力を学習させる制御[9),10)]や目標地点までの偏差に応じてプロペラの出力を決定するPD制御[11)]などが用いられている．通常の制御系設計は制御対象を正確にモデリングし，そのモデルを用いて極配置などを行い，制御対象を安定に制御できるように制御器を構築するが，バルーンロボットはプロペラモータのバッテリー消耗度から生じる推力変化，バルーンを自作することから生じるバルーン形状の歪み，空調による環境外乱などが大きく影響するため運動特性が複雑であり，モデリングが困難であるため，解析的に制御系を設計することは難しい．

そこで本研究ではモデリングが十分な精度でなされていない状況でも，設計が単純でパラメータを実験的に容易に調整することができるPD制御を用いる．PD制御は運動特性を検討する際に，パラメータ設定を実験的に調節することができ，さらにパラメータ変化に対する運動特性変化の直感的な判断が容易であるので，ここでは有効であると考えられる．一般的にはPD制御[12),13)]に，誤差の積分を制御器に組み込んだPID制御を用いることで制御精度をさらに向上させられることが知られている．しかし，プロペラ出力やバルーン形状の歪みによる空気抵抗などの偏りによる意図しない機体の回転は，各軸方向に対する誤差の積分値の信頼性を低下させ，制御を不安定にする可能性がある[11)]．このため本研究ではI動作を含めずにPD制御を用いている．

PD制御を用いて，任意の時刻 t[sec] におけるプロペラモータに対する操作量 $m(t)$ を以下のように決定する．

$$m(t) = K_P \left\{ E(t) + T_D \frac{E(t) - E(t - \Delta T)}{\Delta T} \right\} \tag{8}$$

このとき，操作量はサンプリング間隔 ΔT に対するモータ駆動時間の割合で与え，モータは $m(t)$ が正の値ならば正回転，負の値ならば逆回転する．

このように決定された $m(t)$ は実数の連続値をとるが，2章で述べたように，モータ駆動時間を離散的に与えることで擬似的に比例的な推力を発生させるため，実際に与える操作量は離散値で与えなくてはならない．そこで，以下の式のように $m(t)$ を離散値 $M(t)$ $(0 \leq M(t) \leq 1)$ に変換する．ただし，前述のとおり $\Delta T = 0.2$，$k = 10$ として実験を行った．

NII-Electronic Library Service

Information Processing Society of Japan

$$M(t) = \begin{cases} [m(t) \cdot k]/k & \text{if} \quad m(t) < 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{9}$$

上式に従うと，時刻 t から $t + M(t)\Delta T$ までプロペラは回転する．そして，時刻 $t + M(t)\Delta T$ にモータの駆動信号は ON から OFF に切り換わり，以後時刻 $t + \Delta T$ までプロペラは回転しない．

X，Y 軸方向に対するプロペラモータへの操作量は上式のように決定するが，Z 軸方向の移動を実現するプロペラは機体の上部に取り付けられているため，上昇に対しての発生推力が小さく，安定して上昇することができなかった．そこで，Z 軸方向に対する操作量 $M_z(t)$ については以下の式のように与える．

$$M_Z(t) = \begin{cases} 0 & \text{if} \quad 0 \leq |m(t)| < 1/k \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{10}$$

ただし，カメラ画像中に円が映っていないときには3次元位置情報を取得できないため，カメラ画像中に円を検出するまでプロペラモータをつねに駆動し上昇させる．

4. 実　　験

4.1 実験設定

2章で説明した環境において，バルーンロボットの位置制御に対する実験を行った．位置制御は大きく分けると，目標地点で留まること，目標地点へ移動することの2つに分けることができる．目標地点で留まることに対しては，気流の影響などによって目標地点から離れてしまったときに素早く目標地点へ戻る必要がある．また，目標地点への移動時には大きく行き過ぎないよう目標地点付近ではゆっくりと移動することを考慮する必要がある．このため，この2つのタスクに適切な制御は異なる可能性がある．そこで，PD 制御のパラメータ設定を数パターン用意して以下の2つの実験を行うことで，目標地点付近で留まる場合と目標地点へ移動する場合のパラメータ設定の違いに対するバルーンロボットの運動特性を考察し，それぞれのタスクに適した制御を明らかにする．

また，実験を行う時間によって温度や気圧が変化するため，できる限り中性浮力を実現できるように実験ごとに浮力の調整を行ったが，完全な中性浮力の実現は困難であり，浮力に若干のばらつきがあった．

- 実験1

バルーンロボットの初期位置を円の中心の上空175[cm]に設定した目標地点とほぼ同様の位置に設置し，目標地点につねに留まらせる位置制御を行う．

- 実験2

バルーンロボットの初期位置を円の中心から水平方向に150[cm]離れた地点に設定する．この初期位置ではバルーンロボットはカメラ画像中に円を検出することができないために上昇する．そして，円を検出した後に円の中心の上空175[cm]に設定した目標地点へ移動し，留まるような位置制御を行う．

表2 実験1におけるパラメータ設定と1秒あたりの目標地点までの水平方向の平均2乗誤差

Table 2 Parameter settings and mean squared error of the horizontal direction per 1 second for Experiment 1.

パラメータ	1-1	1-2	1-3	1-4
K_{P_X}, K_{P_Y}	$\frac{1}{150}$	$\frac{1}{125}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{75}$
T_{D_X}, T_{D_Y}	0	0	0	0
E_h	1264.33	1073.40	886.95	557.16

4.2 予備実験

まずはじめに予備実験として，環境中の気流の影響を調べるために，プロペラモータをまったく駆動させない状況下においてバルーンロボットの移動を計測する実験を行った．バルーンロボットの初期位置は目標地点に設置した．

実験を5回行ったが，すべての実験においてバルーンロボットは徐々に初期位置から離れてゆき，平均50秒程度でおよそ115 cm 移動して，カメラ画像から円を見失った．この結果からバルーンロボットは微小な気流に敏感に反応して，制御を行わない状況下においては目標地点で留まっていることでさえ困難であることが分かった．

4.3 実　験　1

PD 制御では比例ゲイン K_P の値が大きすぎると制御が不安定になり，逆に値が小さすぎると応答性が低下してしまうため，適切なパラメータ設定が要求される．実験1で用いた K_P の各設定値は，予備調査で安定して制御がなされていたときの値を用い，**表2**に示される 1-1～1-4 の4種類とした．また，D 動作は偏差 E の変化が大きいときに強く影響するものであるが，実験1ではバルーンロボットの初期位置が目標地点であるため，大きな移動は考えられない．そこで，実験1に関しては $T_D = 0$，つまり D 動作を含めずに P 制御により実験を行った．

表2の E_h はカメラから検出された XY 平面における1秒あたりの目標地点までの相対偏差の平均2乗誤差を示している．E_h は各パラメータ設定に対して合計10回の実験を行ったときの平均値である．表2

NII-Electronic Library Service

Information Processing Society of Japan

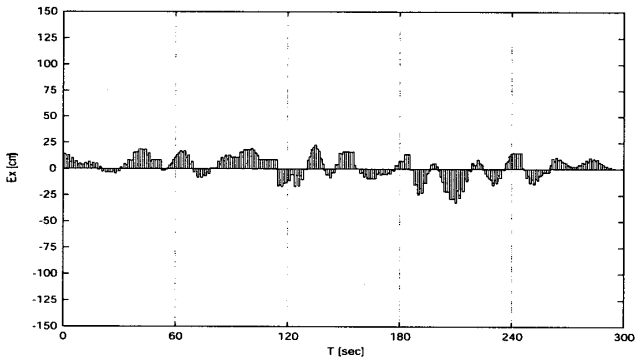


図 7 X 軸方向の制御偏差の推移 (1-4)
Fig. 7 Relative deviation of the x-axis (1-4).

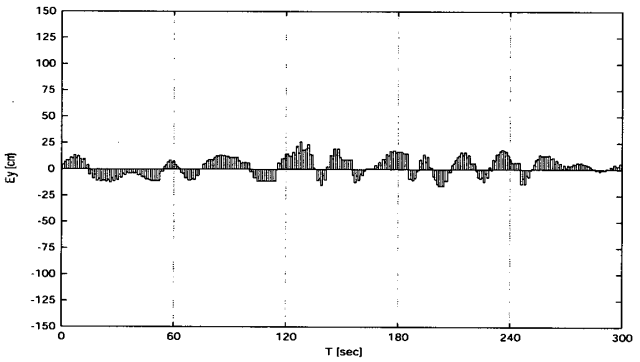


図 8 Y 軸方向の制御偏差の推移 (1-4)
Fig. 8 Relative deviation of the y-axis (1-4).

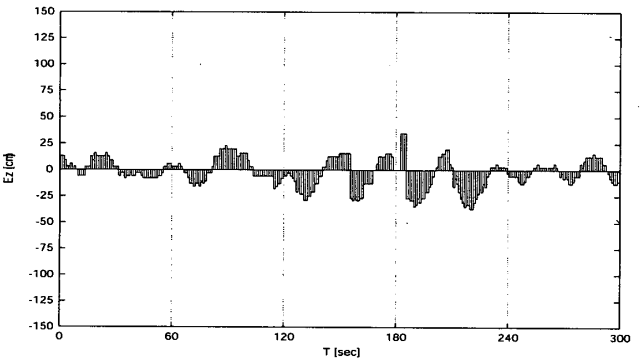


図 9 Z 軸方向の制御偏差の推移 (1-4)
Fig. 9 Relative deviation of the z-axis (1-4).

から，K_P が大きくなるにつれて，E_h が小さくなっていることが分かる．これは，目標地点から離れてしまったときに，K_p が大きいほど発生推力が大きくなり，素早く目標地点に戻ることができるためである．

パラメータ設定 1-4 のときの実験結果 (1 試行の例) を**図 7**，**図 8**，**図 9** に示す．図の横軸は時間経過を示しており，縦軸はカメラ画像から検出された X，Y，Z 軸の各方向における目標地点までの相対偏差を示している．この結果から分かるとおり，バルーンロボットは各軸についてつねに目標地点から ±30 cm 以内で安定して留まっている．このときバルーンロボットは静止することなく目標地点付近を多少振動しながら行動している．これは予備実験で確かめられたような，

表 3 実験 2 におけるパラメータ設定と 1 秒あたりの目標地点までの水平方向の平均 2 乗誤差
Table 3 Parameter settings and mean squared error of the horizontal direction per 1 second for Experiment 2.

パラメータ	2-1	2-2	2-3	2-4
K_{P_X}, K_{P_Y}	$\frac{1}{150}$	$\frac{1}{125}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{75}$
T_{D_X}, T_{D_Y}	10	10	10	10
E_h	1488.63	1321.08	1519.17	1555.00
パラメータ	2-5	2-6	2-7	2-8
K_{P_X}, K_{P_Y}	$\frac{1}{150}$	$\frac{1}{125}$	$\frac{1}{100}$	$\frac{1}{75}$
T_{D_X}, T_{D_Y}	5	5	5	5
E_h	1122.19	1238.70	1304.63	1248.74

微小な気流の影響に対して適切な制御を実現していることを示しており，図 7，図 8，図 9 の結果は，安定して制御されていると考えることができる．また，これらの図は 5 分間の実験結果であるが，実際はバッテリがなくなるまでの約 36 分間，目標地点付近で安定した位置制御がなされていた．

4.4 実 験 2

実験 2 において，実験 1 と同様のパラメータ設定を用いて実験を行ったときには，移動速度に対して抑制力として働く D 動作を含まないため，目標地点へ向かう移動速度が大きくなりすぎてしまい，慣性によって目標地点を大きく行き過ぎ，円を見失ってしまうことが頻繁に起こった．

そこで，実験 2 では $T_D \neq 0$ として D 動作を含めた**表 3** の 2-1～2-8 に示すパラメータ設定において実験を行った．

表 3 からは K_P の違いに対して，結果に大きな差異がないことが分かる．これは D 動作によりバルーンロボットの速度に関する抑制力が強く働き，多少の K_P の値の違いは結果に大きな変化を与えないためであると考えられる．ただし，K_P の値を大きく設定したときには，バルーンロボットの移動速度が大きくなるため，目標地点を大きく行き過ぎてしまい，そのまま円を見失うことが起こりやすくなった．

また，表 3 から T_D の違いに対して結果の違いを観察することができる．D 動作は移動方向と逆方向に力を働かせる役目を持つため，D 動作の働かないときと比べてプロペラの発生推力を抑えることができるが，プロペラモータ駆動時間を調節して推力に比例特性を持たせる場合には，短いモータ駆動時間での発生推力は微小なものとなってしまう．このため，$T_D = 10$ に設定したときには D 動作が強く働き，発生推力が小さくなりすぎてしまうために応答性が低下し，$T_D = 5$ のときと比較すると平均 2 乗誤差も大きくなってしまっていると考えられる．

NII-Electronic Library Service

Information Processing Society of Japan

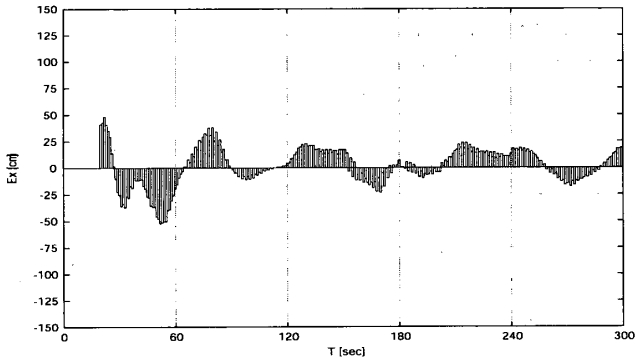


図 10 X 軸方向の制御偏差の推移 (2-5)
Fig. 10 Relative deviation of the x-axis (2-5).

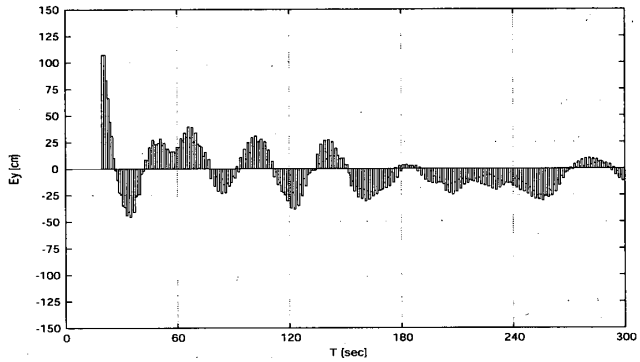


図 11 Y 軸方向の制御偏差の推移 (2-5)
Fig. 11 Relative deviation of the y-axis (2-5).

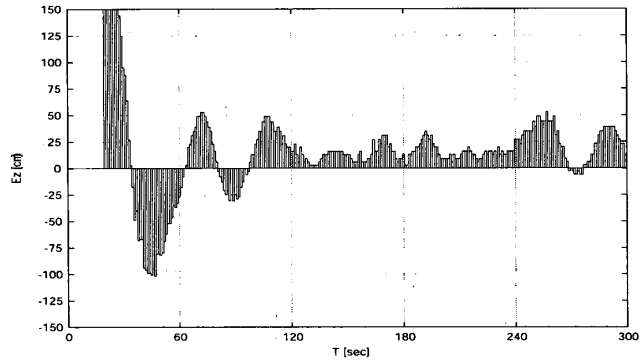


図 12 Z 軸方向の制御偏差の推移 (2-5)
Fig. 12 Relative deviation of the z-axis (2-5).

パラメータ設定 2-5 における実験結果 (1 試行の例) を**図 10**, **図 11**, **図 12** に示す. この実験においてバルーンロボットは, 実験開始から 20 秒後に円を検出し, 目標地点へ向かって移動しているが, 慣性の影響を受けてやや大きく目標地点を通り過ぎてしまっている. しかし, その後短時間以内で目標地点付近へ再び向かってゆき, 実験開始からおよそ 60 秒後からは目標地点付近で行動し, ほぼ定常状態になっている.

4.5 考　　察

実験 1 の結果からバルーンロボットは目標地点付近で安定して行動するためには, K_P の値を大きめに設定することで応答性を向上させることができ, より目標地点付近での行動が達成されるという結果が得られた. しかし, 実験 2 の結果からは, 目標地点への移動に対する制御には K_P を実験 1 で得られた値よりも小さな値に設定し低速度で移動することが望ましいという結果が得られた. これは, 実験 2 では K_P の値が大きいと移動が高速となるため, 慣性により目標地点を大きく行き過ぎてしまい, その繰返しにより運動が振動的になってしまうためである. また, 高速移動が引き起こす目標地点に対する大きな行き過ぎは目標地点を見失う可能性を増加させるため, センサ情報を有効に活用するという面でも目標地点を安定して視野にとらえることが可能な低速移動が有効であると考えられる.

また, 実験 2 から目標地点への移動時には D 動作により抑制力を発生させることで, 移動速度を抑えることが好ましいという結果が得られた. これは, 目標地点への移動時には D 動作を含めることで速度を抑制し, 目標地点に対する行き過ぎを抑えることが可能なためであると考えられる. 一方, 目標地点で留まることに対しては, 発生推力を抑制して応答性を低下させる D 動作は制御に含めないことが好ましいという結果が得られた. 小型のバルーンロボットには軽量なプロペラモータの搭載が現実的であるが, このような軽量なプロペラモータは非力であり, 発生させる推力は大きなものとはならない. 目標地点付近での行動時には抑制力として働く D 動作を含めることで, モータの駆動時間は非常に短かくなってしまう. その結果, 発生推力が小さくなり応答性は低下してしまうと考えられる. したがって, 小型バルーンロボットにおいては, 現実的に搭載可能なプロペラユニットの特性を考慮し, T_D に関しては目標地点へ移動するための位置制御には $T_D \neq 0$ とすることで速度を抑制し, 留まるための位置制御に対しては $T_D = 0$ とし応答性を向上させることが有効であると考えられる.

ゆえに実験結果から, パラメータ設定はバルーンの大きさ, プロペラユニットの仕様によって異なるが, 現実的な小型バルーンロボットシステムを考慮すると離れた地点から目標地点への移動する位置制御に対しては移動速度を抑えることのできる PD 制御が適しており, 目標地点付近で留まる位置制御に対しては, 発生推力を抑制して応答性を低下させてしまう D 動作を含めずに, 移動時の設定値よりも K_P を大きく設定した P 制御が適していると考えられる.

よって, 目標地点への移動と目標地点付近で留まるための制御に関して, PD 制御においてパラメータ設定を変更して制御方法を切り換えることで, より安定した位置制御が実現できると考えられる.

NII-Electronic Library Service

Information Processing Society of Japan

なお，実験1，2における実験動画はWebサイト[14]で公開している．

5. おわりに

本論文では室内におけるバルーンロボットの実現を目的とし，カメラ搭載型のホロノミック系円柱型バルーンロボット製作した．そして，カメラを用いてランドマークを認識することで位置情報を取得し，設定した目標地点へ移動するための制御システムを開発した．制御方法としてはPD制御を用い，複数のパラメータ設定を用いることで，バルーンロボットの運動特性を考察し，目標地点への移動と留まることを適切に行う位置制御を実現できた．今後は，より実環境に近い環境（たとえば，空調を停止させないなど）においても位置制御を実現できるように制御方法を拡張することや，複数設置したランドマーク間の移動制御などを行っていく予定である．

謝辞 本研究を進めるにあたり多大なご協力，ご助言を下さった，株式会社日立東日本ソリューションズの辺見吉克氏，村上仁氏，内海由博氏，株式会社ノーステクノロジーの呉敦氏，秋元憲一氏，株式会社タカラの天野幹俊氏，はこだて未来大学システム情報科学部の鈴木恵二教授，北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻の博士課程本山恵子氏，同専攻修士課程西村絢子氏，柳沢紀子氏に深く感謝いたします．

参考文献

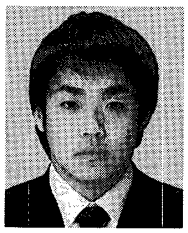
1) 森 幹彦：成層圏プラットフォームとは，電気学会誌，Vol.122, No.8, pp.525–527 (2002).
2) Elfes, A., Bergerman, M., Carvalho, J., Paive, E., Ramos, J. and Bueno, S.: Air-Ground Robotic Ensembles for Cooperative Applications, *Concepts and Preliminary Results, 2nd International Conference on Field and Service Robotics*, pp.75–80 (1999).
3) 柳沢紀子，川村秀憲，山本雅人，大内 東：屋内用バルーン型ロボットの設計とモデル化，エンタテイメントコンピューティング講演論文集，pp.1–6 (2003).
4) Bruce, J., Balch, T. and Veloso, M.: Fast and Inexpensive Color Image Segmentation for Interactive Robots, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol.3, pp.2061–2066 (2000).
5) Jonker, P., Caarls, J. and Bokhove, W.: Fast and Accurate Robot Vision for Vison based Motion, *4th International Workshop on RoboCup, Lecture Notes in Computer Science*, p.782 (2000).
6) Wasik, Z. and Saffiotti, A.: Robust Color Segmentation for the RoboCup Domain, *Proc. 16th International Conference on Pattern Recognition*, Vol.2, pp.651–654 (2002).
7) 安居院猛，中嶋正之：画像情報処理，森北出版株式会社 (2001).
8) ソフトバンク社：C MAGAZINE（2〜7月号）(1999).
9) 本山恵子，鈴木恵二，山本雅人，大内 東：強化学習を用いた小型飛行船の目標位置への誘導，第12回自律分散システム・シンポジウム講演論文集，pp.29–34 (2000).
10) 西村絢子，川村秀憲，山本雅人，大内 東：追跡タスクにおける自律飛行船ロボットの学習制御，エンタテイメントコンピューティング講演論文集，pp.13–18 (2003).
11) Zwaan, S., Bernardino, A. and Santos, J.: Vision based Station Keeping and Docking for an Aerial Blimp, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2000).
12) 山本重彦，加藤尚武：PID制御の基礎と応用，朝倉書店 (2001).
13) 土谷武士，江上 正：新版現代制御工学，産業図書 (2000).
14) AFOプロジェクトホームページ．http://ses3.complex.eng.hokudai.ac.jp/afo/index.html

(平成15年8月4日受付)
(平成16年4月5日採録)

推薦文

点検や監視などの応用が期待できるバルーン型ロボットシステムを開発し、位置制御タスクを実現できる制御法を確立した点が評価できる．

（情報処理北海道シンポジウム2003プログラム委員 大倉和博）

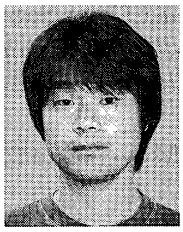


角田 久雄（学生会員）

1981年2月4日生．2003年北海道大学工学部情報工学科卒業，同年同大学大学院工学研究科システム情報工学専攻入学，現在に至る．飛行船ロボット等の研究に従事．

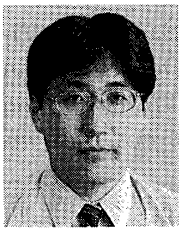
NII-Electronic Library Service

Information Processing Society of Japan



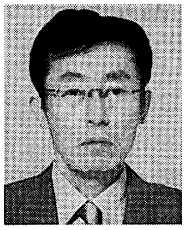
川村　秀憲（正会員）

1973年5月3日生．1996年北海道大学工学部情報工学科卒業，2000年同大学大学院工学研究科博士後期課程期間短縮修了．同年同大学院工学研究科助手．2004年同大学院情報科学研究科助手，現在に至る．飛行船ロボット，マルチエージェントシステム，複雑系工学，観光情報学等の研究に従事．博士（工学）．電子情報通信学会，人工知能学会，計測自動制御学会，日本オペレーションズ・リサーチ学会，観光情報学会，電気学会，AAAI各会員．



山本　雅人（正会員）

1968年7月30日生．1991年北海道大学工学部情報工学科卒業，1996年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了．同年1月日本学術振興会特別研究員（PD），1997年北海道大学大学院工学研究科助手，2000年同大学院工学研究科助教授．2004年同大学院情報科学研究科助教授，現在に至る．飛行船ロボット，DNAコンピューティング，マルチエージェントシステム等の研究に従事．博士（工学）．電子情報通信学会，人工知能学会，計測自動制御学会，日本オペレーションズ・リサーチ学会，日本バイオインフォマティクス学会，観光情報学会各会員．



高谷　敏彦（正会員）

1959年5月2日生．1984年東京理科大学卒業，1994年電気通信大学大学院博士前期課程修了．1984年株式会社リコー入社，画像機器の研究開発を経て，1999年より，リコーシステム開発株式会社事業戦略センターに勤務，事業戦略・技術戦略策定に従事し，現在に至る．飛行船ロボット，数値計算，経営情報システム，ソフトウェア開発の生産性支援システム等の研究に従事．工学修士．日本画像学会会員



大内　　東（正会員）

1945年8月19日生．1968年北海道大学工学部応用物理学科卒業，1974年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了．同年同大学工学部助手，助教授，1989年同大学大学院工学研究科教授．2004年同大学院情報科学研究科教授，現在に至る．飛行船ロボット，DNAコンピューティング，マルチエージェントシステム，医療システム等の研究に従事．工学博士．電子情報通信学会，日本オペレーションズ・リサーチ学会，人工知能学会，計測自動制御学会，電気学会，医療情報学会，観光情報学会各会員．

NII-Electronic Library Service