

J_050

充電地点へのドッキングを行なう室内バルーンロボットの学習制御 Learning Control of Indoor Balloon Robot for Docking to Recharging station

皆川 良弘[†] 川村 秀憲[†] 山本 雅人[†] 高谷 敏彦^{†, ‡} 大内 東[†]
Minagawa Yoshihiro Kawamura Hidenori Yamamoto Masahito Takaya Toshihiko Ohuchi Azuma

1. はじめに

近年、浮力を利用して三次元空間を移動できる室内バルーンロボットに関する研究が盛んに行われている。飛行制御に関する研究[1]だけでなく、音に反応して自身の行動を変化させる研究[2]や、ジェスチャーに反応して人間とのインタラクションを行なう研究[3]がといったエンタテインメント性のある研究が行なわれている。こうしたアプリケーションを考えた場合、長時間の飛行が必要になる。バルーンロボットは積載重量の制約から、長時間駆動可能なバッテリーを搭載できない。このため、長時間の飛行を実現する方法のひとつとして自律充電が考えられる。

本研究では、バルーンロボットの自律充電システムについて議論する。すでに著者らは[4]で自律充電システムについて提案している。より精度の高いドッキングを目指し、制御フローを確立し、学習制御を採用する。PID制御によるドッキングと学習制御によるドッキングを比較し、学習制御によるドッキングの有効性を検証する。

2. 室内バルーンロボット

本研究で使用されるバルーンロボットは、浮力を得るバルーン部と、センサ入力を受け取り制御の決定を担う駆動部からなる。バルーン部は積載重量を考慮に入れて、アルミ蒸着フィルムにより自作する。バルーンは直径 94cm、高さ 80cm の円柱型であり、外部から均一な空気抵抗を受ける。また、長さが同程度の楕円型バルーンに比べて体積が大きいため、より多くのヘリウムを充填することができる。

駆動部は、T-Engine システムからなる。T-Engine システムは、CPU やメモリ、カメラセンサ等が一体になったシステムであり、無線等外部からの信号を受けることなくバルーンロボットが自律的に制御可能となる。T-Engine システムはモータ制御ボードに接続され、T-Engine システムで決定した制御信号が制御ボードを通してプロペラに伝わる。X、Y、Z の各軸に 2 個のプロペラを用い、計 6 個のプロペラを使用してバルーンロボットの制御を行う。X、Y 軸方向のプロペラは別々の制御信号が送信され、Z 軸方向のプロペラには同じ制御信号が送信される。このため、T-Engine システムでは 5 つの異なる制御信号を決定する必要がある。これら、本研究で用いる室内バルーンロボットのハードウェア構成をまとめると、図 1 のようになる。図 1 のようにプロペラを配置することで、任意の方向に向かって進むことが可能となる。

[†] 北海道大学大学院情報科学研究科複合情報学専攻

[‡] リコーソフトウェア株式会社

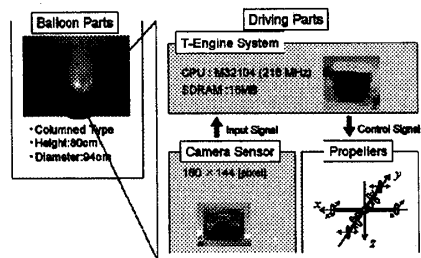


Fig1. Hardware Configuration of Indoor balloon robot

3. バルーンロボットのドッキング

3.1 ドッキングの制御フロー

バルーンロボットのドッキングは、ヘリポートに着陸するように、充電地点に対して充電地点の上空から下降を行なうことを意味する。このとき、充電地点とのドッキングを正確に行なうために、1) 高さを除いた平面の位置を合わせること、2) 着陸する速度を制御し、バルーンが破損しないこと、3) 充電地点から離れた場合でも、ドッキングを再試行すること、が求められる。これらの条件を満たすために、バルーンロボットの制御フローを決定する必要がある。

バルーンロボットのドッキング制御は、カメラセンサから得られた画像を基に行なう。床面に配置されたランドマークから自身の三次元座標、ヨー角、速度等のバルーンロボットの状態量を計算する。カメラセンサによる状態量の計算には[4]の手法を用いる。バルーンロボットの制御は計算された状態量から一意に決定する。

制御エリアの概略図と制御フローを図 2 に示す。バルーンロボットの制御は、三次元座標とヨー角を基準とした領域から決定される。領域内であっても、画像にはノイズが入る場合があり、状態量を正しく計算できない可能性がある。状態量を正しく計算できない場合、ランドマークを認識させるために上昇制御を行なう (Control No2)。ただし、上昇させてもランドマークが認識されず、状態量が正しく計算されない場合は下降制御を行なう (Control No1)。No1、No2 以外の制御則を表 1 にまとめる。

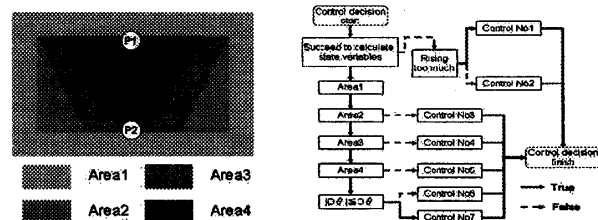


Fig2. Control decision area diagram (Left), Control decision flow diagram (Right)

Table1. Control decision of blimp robot

Name	Condition	Control
Control No3	Area1	X, Y, Z, ヨ一角
Control No4	Area2	Z (上昇)
Control No5	Area3	X, Y
Control No6	Area4	ヨ一角
Control No7	Area4 $ D\theta \leq 0\theta$	VZ (下降)

Control No3はP1に移動する。P1に移動後、Control No7によりP2への下降を試みる。しかし、状態量により精度よくドッキングできない場合がある。このため、Control No4, No5, No6ではドッキングに必要な状態量を満たす制御を行なう。また、制御エリアには包含の関係があるため、あるエリアにいない場合は番号の低い制御が選択される。

図2のように制御エリア、制御フローを確立し、表1の制御則を決定することにより、先述した三つの要素を実現することが期待される。

3.2 学習制御

バルーンロボットの制御方法に学習制御[5]を用いる。ここでの学習制御は、横軸に目標地点との偏差、縦軸に目標速度の偏差をもつ学習テーブルを更新していくことで学習を行なう。学習テーブルには、初期テーブルとして予め望ましい出力を記録させておく。また、初期テーブルに制御軸を設定し、この制御軸を変化させていくことで学習を行っていく。①または②を満たした状態の速度をPvとして記録する。また、Dxは位置の偏差、DVxは速度偏差、tは時刻を表す。

$$C1 = \begin{cases} Dx_{t-1} > 0 \wedge Dx_t < 0 & \textcircled{1} \\ Dx_{t-1} < 0 \wedge Dx_t > 0 & \textcircled{2} \end{cases} \quad C2 = \begin{cases} DVx_{t-1} > 0 \wedge DVx_t < 0 & \textcircled{3} \\ DVx_{t-1} < 0 \wedge DVx_t > 0 & \textcircled{4} \end{cases}$$

学習制御の目的は、目標位置および目標速度を実現することにある。学習テーブルの更新は、表2の条件で起こる。

Table2. Update rule of learning table

C1	C2	テーブルの更新	制御軸
①	③	Pv < DVx のテーブル更新	右へ移動
①	④	Pv > DVx のテーブル更新	右へ移動
②	③	Pv > DVx のテーブル更新	左へ移動
②	④	Pv < DVx のテーブル更新	左へ移動

4. 実験

4.1 実験設定

4.1.1 実験環境設定

実験環境を図3に示す。ランドマークとして、直径50cmの円を選び、円中心の距離を75cmとして配置する。図3のように配置した場合のバルーンロボットの飛行範囲は、 $-200 \leq X \leq 200$, $-50 \leq Y \leq 350$, $100 \leq Z \leq 300$ である。バルーンロボットはS=(0, 0, 200)を初期位置として、ドッキング地点であるP2=(0, 187, 130)へ移動する。P2の上空の地点として、P1=(0, 187, 200)を設定する。充電地点の上空から下降制御を行なうことで、充電地点とのドッキングを試みる。

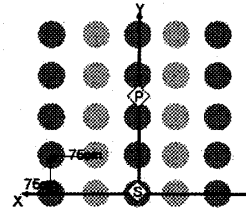


Fig3. Experimental environment

4.1.2 制御エリア設定

制御エリアの設定を表3に示す。バルーンロボットがArea2の範囲内にいない場合、Area1の制御が実行される。また、Area2, Area3, Area4に関して、Z座標の条件は $130 \leq Z \leq 200$ であるとする。エリアごとに、条件としてバルーンロボットのX, Y, Z座標を変数とした方程式からAreaを決定する。

Table3. Control area configuration

Area	Condition
Area1	Area2の範囲外
Area2	$X^2 + (Y - 187)^2 \leq 80^2$
Area3	$X^2 + (Y - 187)^2 \leq (\frac{4}{7}Z - 240/\frac{7})^2$
Area4	$X^2 + (Y - 187)^2 \leq (\frac{23}{70}Z - 250/\frac{7})^2$
0θ	0.2

4.1.3 学習制御設定

制御に関しては、X, Y, Z, θ, VZの制御を行なう。VZの学習テーブルは、41個の要素からなる一次元の学習テーブルを用い、X, Y, Z, θに関しては、41×41の要素からなる二次元の学習テーブルを用いる。学習テーブルの初期状態は、位置の偏差が負の場合には0、偏差が正の場合には1とする。移動開始から300[sec]経過から充電地点へのドッキングを試みる。これは、学習テーブルが十分に更新され、バルーンロボットの状態量を安定化させるためである。

4.1.4 終了条件設定

ドッキングに成功した場合を終了条件として実験を行なう。ドッキングに成功する条件は、充電地点の形状から計算される。本研究ではヘリポートに着陸するような制御をドッキングと呼ぶが、先回の研究と比較を行なうため同様の形状を持つ充電地点から成功する条件を記述する。成功の条件を示す。ここで、DX, DY, Dθは充電地点との偏差であり、ZはZ座標である。この条件を満たすまでバルーンロボットを飛行させ、制御の比較を行なう。

$$\begin{cases} DX_t^2 + DY_t^2 \leq 10^2 \\ |D\theta_t| \leq 0.2 \\ Z_{t-1} \geq 130 \wedge Z_t < 130 \end{cases}$$

4.2 実験結果

充電地点へ移動を行なった際のバルーンロボットの移動軌跡を示す。Z座標の推移から、学習が完了してから状態量

にしたがい下降を行なう様子が確認できる。また、Z座標の速度を観察すると、下降速度は最大でも-5[cm/s]程度であり、バルーンロボットを破損させずに充電地点とドッキング可能であることが確認できた。

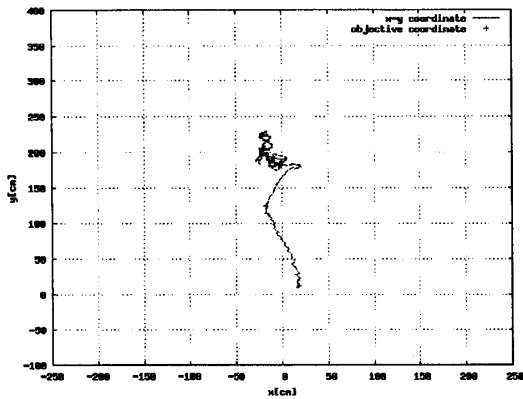


Fig4. X-Y Trajectory of balloon robot

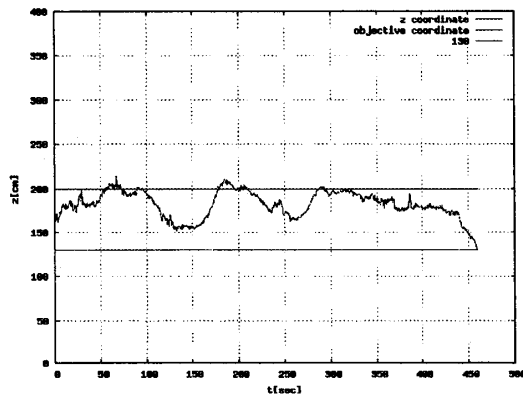


Fig5. Z coordinate transition of balloon robot

5. 考察

学習制御とPID制御の比較を行なう。比較する指標を、最適制御問題[6]として捉える。最適制御問題では、終了時刻までの時間が与えられていない場合、1)最小コスト問題、2)終端値制御問題、に分類できる。それぞれの問題に対する指標をF1, F2, とし、以下の値を用いる。ここで、Oは目標とする状態量、X(t)は時刻tでの状態量である。

$$\begin{cases} F1 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (X(t) - O)(X(t) - O) \\ F2 = X(T) - O \end{cases}$$

学習制御およびPID制御を用いて実験を行う。F1, F2それぞれ5回の実験結果の平均を求めた結果を表4に示す。F1として、バルーンロボットの状態量のうち、X-Y平面での目標地点との距離をRとし、R, Z座標、ヨー角を状態量として指標を計算する。F2に関しては、距離Rとヨー角を状態量として指標を計算する。最適制御問題としてとらえると、各指標は小さい値をとるほうが望ましい。このため、PID制御と学習制御を比べ、各指標に関して小さい値である制御がドッキングに適した制御である。

Table4. Comparison of Learning Control with PID Control

Value	Learning Control	PID Control
F2 (R)	1528.79	2198.33
F2 (Z)	863.47	1728.79
F2 (θ)	0.875	2.492
F3 (R) [cm]	5.956	7.157
F3 (θ) [rad]	0.039	0.079

表4からF1, F2のそれぞれの指標に関して、学習制御を利用したドッキングのほうが優れていることがわかる。したがって、本研究で目指すドッキングに関して、PID制御よりも学習制御のほうが適しているといえる。

6. まとめ

本研究では、室内バルーンロボットが自律充電を行なうための方法として、充電地点とのドッキングについて議論した。実験から、PID制御に比べ、学習制御を利用したドッキングのほうが適した制御方法であることが確認された。

今後の課題としては、1)充電回路の作製、2)巡回動作や回転動作を組み込んだ自律充電、があげられる。これらの課題をクリアすることにより、エンタテインメント性のある飛行を長時間行なうことができると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたって多大なご協力、ご助言をいただいた、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、はこだて未来大学情報科学部の鈴木恵二教授に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Hidenori Kawamura, Hisao Kadota, Masahito Yamamoto, Toshihiko Takaya, Azuma Ohuchi, "Motion Design for Indoor Blimp Robot with PID Controller", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.17, No5, pp.500-508, 2005.
- [2] 川村秀憲, 角田久雄, 山本雅人, 高谷敏彦, 大内東, "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・ファジイ学会論文誌, Vol. 17, No. 2, pp. 29-37, 2005.
- [3] 新田亮, 細井一弘, 屋比久保史, 杉本雅則, "人間とインタラクティブを行なう飛行ロボット", 情報処理学会報告, エンタテインメントコンピューティング, pp.31-36, 2005.
- [4] 皆川良弘, 川村秀憲, 山本雅人, 高谷敏彦, 大内東, "室内バルーンロボットにおける自律充電のドッキング制御", 情報処理学会研究報告, 2005-EC-2, pp.1-5, 2005.
- [5] 三浦宏文, "ロボットと人工知能", 岩波書店, 2004.
- [6] 近藤文治, 藤井克彦, "制御工学", オーム社, 1972.