

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

皆川良弘¹, 川村秀憲^{1,3}, 山本雅人^{1,3}, 高谷敏彦^{1,2}, 大内東^{1,3}

1, 北海道大学大学院情報科学研究科

2, リコーソフトウェア

3, 有限会社ソリューションテクノロジー

概要

近年、室内バルーンロボットをエンタテインメントの分野に応用する研究が盛んになっている。エンタテインメント飛行を実現する場合、長時間の飛行を考える必要がある。バルーンロボットは浮力の原理を利用して空中に浮くため、重量があり長時間駆動可能であるバッテリーを搭載することができない。このため、長時間のエンタテインメント飛行を実現する方法として、バルーンロボットが自律的に充電を行う方法が考えられる。本研究は、室内バルーンロボットにおける自律充電システムの開発を行う。バルーンロボットの特徴を考慮した充電地点を作製し、充電地点へ向かうドッキング制御を実現する。

Docking Control of Autonomous Recharging for Indoor Balloon Robot

Yoshihiro Minagawa¹, Hidenori Kawamura^{1,3}, Masahito Yamamoto^{1,3},

Toshihiko Takaya^{1,2}, Azuma Ohuchi^{1,3}

1, Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

2, Ricoh Software Inc.

3, Solution Technology Co.Ltd.

Abstract

In this paper, we propose a method of docking control of autonomous recharging for indoor balloon robot. Indoor balloon robot might be applied to entertainment flight in an event hall, such as synchronized flight of multiple balloon robots, interactive balloon robot. It might be necessary for long term flight to achieve entertainment flight. However, indoor balloon robot cannot load heavy battery for long term flight. To achieve long term flight, one approach is autonomous recharging. In the case of low battery remainder, indoor balloon robot moves to charging station for recharging. For autonomous recharging, we designed charging station and docking control for indoor balloon robot.

1. はじめに

室内バルーンロボットは浮力を利用して空中に浮き、三次元空間を移動することができるロボットである。バルーンロボットは、充電機などのエネルギーが少ないバッテリーでの駆動が可能である、階段や段差などの地形に依存しない移動が可能である、という特徴を有している。こうした特長を持つ室内バルーンロボットを、人が発する拍手に反応して動作を変化させるエンタテインメントロボットの開発

[1]といった研究や、複数のバルーンロボットによるシンクロ飛行といったアプリケーションが考えられ、エンタテインメント分野への応用が盛んになっている。エンタテインメントロボットとしてのバルーンロボットを考えた場合、時として長時間の飛行を考える必要があると考えられる。浮力を利用して空中に浮いているため、長時間駆動可能な重量のあるバッテリーを搭載すること困難になる。十分な浮力を確保するには大きめのバルーンを作製しなければならない

が、室内を飛行するためバルーンを大きくするのは望ましくない。これらの状況を考慮し、長時間の飛行を実現するための一手法として、バルーンロボットがバッテリーを自律的に充電する手法が考えられる。

バルーンロボットにおける自律充電を実現するためには、充電地点の作製と、充電地点へ向かう制御方法の確立することが必要であると考えられる。バルーンロボットは地上を移動するロボットと異なり、ちょっとした慣性の影響を受けやすく、ペイロードに制限があるという問題点がある。このため、充電地点の作製や充電地点へ向かう制御方法は室内バルーンロボットに特化したものである必要がある。

本研究では、室内バルーンロボットに特化した充電地点を作製し、充電地点へ向かう制御方法を確立することを目的とする。本研究で提案する充電地点は、二本のポールから成る。こうした充電地点を作製し、充電地点へ向かうドッキング制御方法を開発する。

2. 関連研究

地上を移動するロボットでは、自律充電を行うシステムが提案されている。Seungjunらの研究[2]では、赤外線を発生するビーコンを用いて充電地点を作製している。ロボットは、充電地点から発せられる赤外線を感知し、充電地点へ向かう自律充電を行う。また、Silvermanらの研究[3]では、充電地点としてロボットに備え付けたポールと接触するパーツを作製した。ロボットは、一定の時間が過ぎた後、充電地点へ戻ってくる。このとき、初期位置がある程度離れた位置、ドッキング地点との姿勢がずれていても、高い精度で充電地点への接触に成功している。産業界では、AIBO[4]や wakamaru[5]といった移動ロボットに自律充電システムが組み込まれた事例がある。

これら、地上ロボットに自律充電システムが組み込まれているのに対して、空中を移動するロボットの自律充電システムに関する研究事例はない。これは、空中ロボットが持つ次の問題点から生じていると考えられる。

- 慣性の影響を受けやすい
- ペイロードに制約がある

慣性の影響を受けやすいため、充電地点へ移動を行う場合、接触が困難になると考えられる。また、ペイロードに制限があることから、充電地点との接触部分に重量のあるパーツを採用できず、中性浮力を実現することが困難になる。このため、空中ロボットでの自律充電システムを実現す

るためには、上記の問題を考えた上で取り組む必要がある。

3. 室内バルーンロボット

本研究で使用するバルーンロボットは、ヘリウムガスを重点させ浮力を得るエンベロープ部と、センサ入力を受け取り、制御を決定する駆動部からなる。バルーンロボットのエンベロープ部はアルミ蒸着フィルムにより製作する。エンベロープ部の大きさは、駆動部に搭載するハードウェアの重量を考慮したサイズにする必要がある。本研究で使用するエンベロープ部は、高さ 80cm、直径 110cm の円柱型であり、円柱型であるため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。ペイロードを多く取ることができ、CPU やセンサが一体になった駆動部を搭載することができる。

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。制御に関しては、T-Engine システムはモータ制御ボードが接続され、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。このようにプロペラを配置することで、任意の方向にダイレクトに移動することが可能となる。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ようになる。

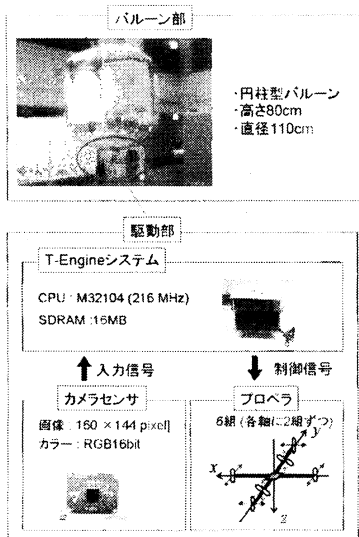


Fig1. 室内バルーンロボットのハードウェア構成

4. 自律充電のアプローチ

室内バルーンロボットが自律充電を実現する際、充電地点を作製すること、充電地点へ向かう制御を実現することが必要である。

本研究で作製したバルーンロボットの充電地点は、高さ130cmの二本のポールからなる。ポール的一方に正の電極、もう一方に負の電極をとりつける形態となる。また、バルーンロボットにポールとドッキングを行うパーツを取り付ける。ポールとパーツがドッキングすることで、バルーンロボットの自律充電を行う仕組みとなる。また、充電地点周囲の床面にランドマークを敷き詰め、充電地点であることをバルーンロボットに認識させる。ポールのみを用いる充電地点では、バルーンロボットは充電地点であると認識できる可能性が低い。このため、充電地点の周囲にはバルーンロボットに認識させるための設定が必要となる。これらを考慮した充電地点を図2に示す。

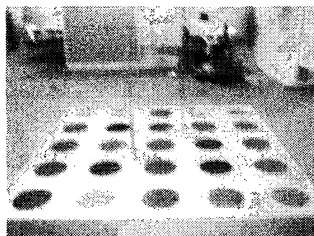


Fig2. 充電地点

充電地点への制御方法は、次の三つの課程を踏むこと

で実現されるものと考えられる。

1. 充電地点の上空付近へ移動する。
2. 充電地点とドッキングする角度を調節する。
3. 角度調節後、充電地点へ向かってまっすぐに下降する。

バルーンロボットが任意の位置から充電を行う場合、充電地点へ移動する必要がある。その方法のひとつとして、充電地点の上空へ移動する方法がある。直接充電地点へ向かった場合、高さがあるポールのため、角度の調節や高さの調節が困難になる。このため、上空へ向かう移動を行い、角度調節を行う必要があると考えられる。バルーンロボットは充電地点の上空付近で角度調節後、充電地点へ向かってまっすぐに下降する。バルーンロボットはちょっとした風の影響を受けやすく、まっすぐに下降することは困難であるが、ポールとドッキングパーツがある程度の精度で近寄れば十分となる充電方式を用いることで、ポールとのドッキングが可能になると考えられる。

自律充電を行うために、充電地点にランドマークを敷き詰めた。床面に敷き詰めたランドマークから、バルーンロボットの位置を計算する研究[6]を応用して、バルーンロボットの制御を行う。室内バルーンロボットの制御方式としてはPID制御を用いる。PID制御は、慣性に対してロバストであるという特徴をもつ制御方式であり、バルーンロボットの研究でも使用されている[7]。本研究では計5つの制御量を決定する必要がある。

5. 実験

5.1 実験設定

実験環境は図2で示した充電地点上で行う。実験環境を上空から見た外観図を図3に示す。

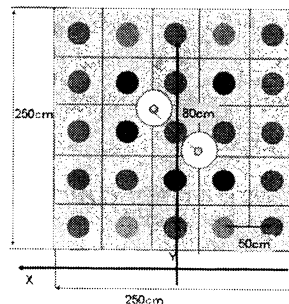


Fig3. 実験環境の外観図

バルーンロボットは、幅250cm、奥行き250cm、高さ500cmの空間を移動するものとする。充電地点となる二本

のポールは、 $x-y$ 平面に対して図3の角度で配置する。また、ポールの間隔は 80cm とする。充電地点付近のランドマークの配置は、バルーンロボットの位置が計算しやすいように配置する。ランドマークとしては、直径 30cm の円を用いる。ランドマークの色は、赤、青、緑の三色のみを用いる。ランドマークを認識する場合、赤、青、緑の円の基準値を予め定めておく必要がある。エンタテインメント飛行を考えた場合、ランドマークの見え方が照明等の影響で異なる見え方になることが考えられる。各色の基準値を求める際には、輝度の成分をもつ YUV 表色系を用いる。YUV 空間では、輝度値である Y の値が照明等に影響されて変化することが考えられる。このため、円の認識には UV のみを用い、様々な照明下で各色の基準値を定める。予備実験から、本研究で用いる赤、青、緑の UV 基準値を次のように決定した。

$$\begin{pmatrix} (R_U, R_V) = (-18, 21) \\ (G_U, G_V) = (-16, -13) \\ (B_U, B_V) = (19, -20) \end{pmatrix}$$

バルーンロボットは、充電地点へ向かう際に複数の中継地点をたどる。中継地点をたどることで、精度の高い充電地点とのドッキングを目指す。バルーンロボットは、初期位置として充電地点の上空付近から制御を開始する。その後、次に示す中継地点を経て、充電地点へ向かう制御を実現する。

$$P_1 = (x_1, y_1, z_1, \theta_1) = (0, 100, 190, 0.79)$$

$$P_2 = (x_2, y_2, z_2, \theta_2) = (0, 100, 170, 0.79)$$

$$P_3 = (x_3, y_3, z_3, \theta_3) = (0, 100, 150, 0.79)$$

$$P_4 = (x_4, y_4, z_4, \theta_4) = (0, 100, 130, 0.79)$$

中継地点を設定し、バルーンロボットは中継地点を次々と切り替えていくことで充電地点である P_4 に向かう制御を行う。中継地点の切り替えとして、次式を 10 秒間満たした場合に次の中継地点に向かう。

$$(DX)^2 + (DY)^2 + (DZ)^2 \leq DIST$$

ここで、DX, DY, DZ はそれぞれ中継地点とバルーンロボットの x, y, z 座標の差を示す。また、DIST は 5000 と設定する。 P_4 を充電地点として設定し、バルーンロボットは、およそ 60[sec] 程度で充電地点へのドッキングを試

みる。

5. 2 実験結果

充電地点へ移動を行った際のバルーンロボットの移動軌跡を示す。二本のポールに着陸する格好になるため、 z 座標の推移が特に重要となる。 $x-y$ 座標についての推移を観察すると、目標地点からおおよそ 20cm 以内の範囲で移動していることがわかる。また、 z 座標の推移からは、本研究のアプローチにより目標位置をおおよそ追従することができているといえる。

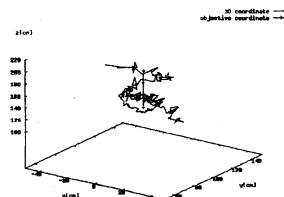


Fig4. バルーンロボットの三次元移動軌道

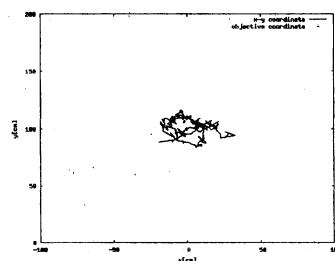


Fig5. $x-y$ 座標の移動軌道

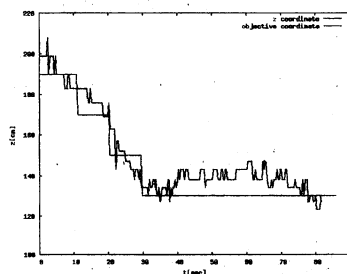


Fig6. z 座標の移動推移

6. 考察

バルーンロボットの軌跡の履歴から、目標地点との偏差を考える。同じ環境下でポールとドッキングする制御を 10 回行った場合の、目標地点との平均的な偏差を示す。中継地点を目標地点として、バルーンロボットの現在位置と中継地点の位置から求める。この偏差は、移動時間中は

常に目標地点を追従できているかを評価するための指針となる。

Table1. 目標地点との平均的な偏差

	平均的な偏差
x座標	12.91[cm]
y座標	15.68[cm]
z座標	17.54[cm]
ヨー角 θ	0.129[rad]

偏差をみると、ヨー角に関しては目標地点との差はそれほど大きくない。x, y 座標に関する目標地点との差よりも、ドッキングするためには z 座標の差について考える必要がある。z 座標の偏差が x, y に比べて大きいのは、バルーンロボットの中性浮力を保つことが難しいためであるといえる。また表から、ポールとドッキングするパーツとしては直径およそ 20cm 程度のパーツを取り付ければ高い精度でドッキングが可能であると考えられる。

続いて、最終目標地点となる充電地点に最も近づいた時の時間とその時間での x, y, z 座標およびヨー角の偏差を求める。この値は、最終的にドッキングが可能であるかを評価するための評価になると考えられる。充電地点に近づいたとする評価尺度には、x, y, z 座標の充電地点とのユークリッド距離を用いる。次式を評価に用いるユークリッド距離とし、このユークリッド距離が最小になる地点を求める。

$$dist = \sqrt{(DX)^2 + (DY)^2 + (DZ)^2}$$

また、ヨー角 θ について、次の判定式を満たした時のユークリッド距離が最小となる位置を評価対象とする。ここで、 $D\theta$ は充電地点とバルーンロボットの θ との偏差である。

$$-0.1 \leq D\theta \leq 0.1$$

先ほど求めた偏差と同じデータを使って、評価を行う。この結果、 $(dist, D\theta) = (15.8895, 0.0177)$ となった。バルーンロボットが充電地点とドッキングするためには 20cm 程度のドッキングパーツで充電可能であるということがいえる。

7. おわりに

本研究では、室内バルーンロボットが自律充電を行うた

めの方法として、バルーンロボット用の充電地点を作製し、充電地点とドッキングする制御方法について議論した。今後は、T-Engine システム上で充電回路を作製し、充電地点とのドッキングを試み、実際に充電を行うシステムの開発を行う。

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] 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.
- [2] Seugjun Oh, Alexander Zelinsky, Ken Taylor, “Autonomous Battery Recharging for Indoor Mobile Robots”, Proceedings of Australian Conference on Robotics and Automation, 2000.
- [3] Milo C.Silverman, Dan Nies, Boyoon Jung Gaurav S.Sukhatme, “Staying alive: A Docking Station for Autonomous Robot Recharging”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002.
- [4] <http://www.jp.aibo.com/>
- [5] <http://www.mhi.co.jp/kobe/wakamaru/>
- [6] 角田久雄, 川村秀憲, 山本雅人, 高谷敏彦, 大内東, “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, 45 巻, 6 号, pp. 1715-1725, 2004.
- [7] Hisao Kadota, Hidenori Kawamura, Masahito Yamamoto, Toshihiko Takaya, Azuma Ohuchi, “PI D Orbit Motion Controller for Indoor Blimp Robot”, Proceedings of the 10th International Symposium on Artificial life and Robotics, 2005.