

## 展 望

## 軽航空機 (LTA) ロボティクス

Robotics Research Related to Lighter Than Air Aircraft

川 端 邦 明<sup>\*1</sup> 羽 田 靖 史<sup>\*1</sup> 浅 間—<sup>\*2</sup> <sup>\*1</sup>理化学研究所 <sup>\*2</sup>東京大学Kuniaki Kawabata<sup>\*1</sup>, Yasushi Hada<sup>\*1</sup> and Hajime Asama<sup>\*2</sup> <sup>\*1</sup>RIKEN <sup>\*2</sup>University of Tokyo

## 1. はじめに

軽航空機 (LTA: Lighter-Than-Air Aircraft) とは, “空気よりも軽い航空機” という意味合いで用いられ, 基本的には, 機体に内蔵された気密性袋に空気よりも比重の軽い気体 (水素ガス, ヘリウムガス, 熱空気等) を充填し, 機密性袋が排除する体積の空気との重量の差を利用することで, 空中を浮遊するものである.

このような軽航空機の中でも, 動力を備えるものと備えないものとに大別することができる. 一般に, 機体に動力および操縦装置備えたものが, 飛行船 (Airship, Blimp) であり [1], 機体に動力を備えずに浮遊するものやワイヤー等で地上から繫留するタイプのものが, 気球 (Balloon, 以下, バルーン) である (図 1) [2]. 本稿では, 軽航空機の紹介とともに, その特徴を活かしたシステムやロボティクス研究について紹介する.

## 2. 軽航空機の特徴

軽航空機の特徴とは, 他の航空機 (代表的には, 揚力により浮遊し飛行する固定翼機や回転翼機) と比較すると, 表 1 のようになる. このうち, 他の航空機と比較した場合の軽航空機の利点は, 垂直離陸が可能, ホバリング可能, 比較的静かなモータ音等があげられる. さらに言えば, 基本的には機体の浮力により浮いていることから少ない推進力を付加するだけで移動可能であるし, 推力制御や繫留ケーブルの不調等の不足な事態が発生した場合でも, 即墜落にならない可能性が高い.

一般に, 軽航空機は大きく分けて, 飛行船タイプとバルーンタイプに大別される [3]. 以下に, その特徴について記述する.

- 飛行船タイプ... 推進用の動力装置と操縦装置とを備えた軽航空機を指す. 推進用動力装置としては, 蒸気

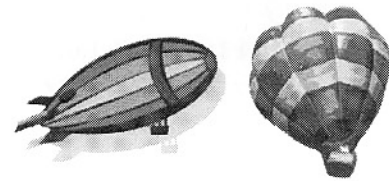


図 1 Blimp and Balloon

表 1 航空機の特徴分類

	速度	ホバリング	機動性	対風	推力	離着陸
固定翼機	高速	不可	高	強	大	滑走要
回転翼機	中速	可	高	強	大	滑走不要
軽航空機	低速	可	低	弱	小	滑走不要

エンジン, 電気モータ, ディーゼルエンジン, ガソリンエンジン等がある. 飛行船を形式の上から分類すると, 硬式飛行船, 軟式飛行船, 半硬式飛行船等がある. 現在はガス袋と空気袋とが船体を形作っている軟式飛行船が主流となっている.

- バルーンタイプ... 軽航空機のうち機体に推進用の動力装置を備えないものを指す. 飛行方法によって自由気球と繫留気球とに分けられる. 自由気球とは, 地表面に対して関係も持たず, 飛行は風次第である. 繫留気球は地表面とケーブル等で結ばれるものである. ガスを使うものや熱空気を用いるものが一般的である.

軽航空機の一般的な用途としては, 移動手段 [4] や宣伝・広告等に用いられ, バルーンはスポーツやレジャーとしても用いられている. また, 上空からの静止画・動画の空撮, 低空高度からの環境観測等にも活用されている. さらに, 長期間に渡り, 安定して滞空飛行が可能なことから, 米海軍においても, ハイテクセンサを搭載した空中監視等に利用されはじめている [5].

他の航空機に対して, 比較的低コストでこれらの機能を達成可能であるが, 機体の通常管理 (場所やメンテナンス), 充填も含めた機体セッティングに時間がかかる, 機体の大きさに対してパイロードが稼げないなどの欠点もある.

原稿受付 2006年8月3日

キーワード: Lighter-Than-Air, Blimp, Balloon, Aero-robotics

<sup>\*1</sup>〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1<sup>\*2</sup>〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-1<sup>\*1</sup>Wako-shi, Saitama<sup>\*2</sup>Kashiwa-shi, Chiba

### 3. 軽航空機ロボティクス関連研究

空中ロボティクスのうち、軽飛行機を利用した研究例、特に近年行われている研究内容について紹介する。基本的には、機体に流体を含むことから複雑さを含んだ制御対象としての研究と、軽航空機ならではの特徴を活かした応用研究に大別されるといえる。

飛行船タイプでは、制御の観点から考えれば劣駆動型のシステムということになるため、制御手法についての研究が行われている。深尾らは、飛行船のモデルを二輪独立駆動移動ロボットの静力学モデルと同等 [6] とみなし、逆最適設計による制御則の導出を行い、全長 1.67 [m] の屋内飛行船によりビジュアルトラッキング課題がロボスタに実行可能であることを実験により確認している [7]。後藤らは、電動モータを用いたベクトルスラスト・タイプの駆動装置を装備した Sky Probe-J という全長 5.5 [m] の飛行船を開発し、飛行船のダイナミクスモデルの同定法について報告した [8]。導出されたモデルに基づいて  $H_\infty$  制御を行うことで、外乱に強い制御システムを構築している。応用研究として、屋外での地雷探査システムとしての利用についても検討されている。福島らは、飛行船制御にオフライン-区分的アファインフィードバックによるモデル予測制御を適用し、Sky Probe-JII (Sky Probe-J を参考にして、筆者らにより製作された機体。後述) という全長 6.5 [m] の飛行船を用いた実験によりその有効に機能することを検証し、ある一定のロボスタ性が確認された。川野は、劣駆動型飛行船の未知風外乱がある環境下での障害物回避のための動作計画として、対空気目標速度軌道をマルコフ決定過程による動的計画法により実現する手法を提案している [10]。前述の Sky Probe-J をモデルとして、シミュレーションにより、有効性を検証している。

飛行船の応用研究としては、恩田らは、先駆的な研究により、空中での宙返り等を実現するアクロスタットを提案した [14]。近年では、アクロバット飛行船ロボット:AAR を開発した。Lacroix らは、山火事監視、消化活動、地雷検出等の危険を伴うミッションに活用するために、Karma と名づけられた全長 9.5 [m] の飛行船プラットフォームと地上車両ロボットを用いたシステムの開発を行っており [11] [12]。上空・陸上のビークルが協調して、環境の三次元マップを作成する手法について、提案を行っている。さらに、Chaimowicz らは、陸上を走行する複数ロボットの群構成 (大きさ、数) を、飛行船により上空から得られた観測情報 (ロボット位置や環境の形状) に基づいて制御するシステムを提案し、群の分離や融合といった制御が可能であることをシミュレーションで示している [13]。また、飛行体を成層圏に滞空させて気象観測・監視や情報通信等の機能を実現するために、成層圏プラットフォームに関する研究も行われた。

河野らは、地上から遠隔操縦モードや自律制御モード等を備える 60 [m] 級の飛行船型プラットフォーム (ペイロード 400 [kg]) を試作し、定点滞空試験を実施した [15]。その用途から、10 [km] 以上の移動距離、10 [m/s] に及ぶ移動速度での、上昇・下降・定点滞留等について実験結果が報告されている。近年では、次世代の成層圏飛行船として、高高度で滞空を行うための飛行船ロボットに関する研究も始められている [16]。

一方で、バルーンを用いたロボティクス研究については、飛行船タイプに比較して事例が少なめであるが、継続的な観測等に非常に優位であることから、近年注目されてきている。小野里らは、広域災害時に被災者支援を行う情報受信用気球として Infoballoon の開発を行い、上空でのバルーン的位置姿勢安定に関する研究を行っている [17] [18]。前田らは、地上と 3 本のケーブルで繋留されたバルーンロボットのバルーン下部に、センサユニットを設置する方法について、風の影響による姿勢安定性について実験により評価し、センサユニットの配置は 3 本よりも 1 本のワイヤで行うほうが風の影響を受けにくいことを明らかにした [19]。

ここでは、多くの研究例について紹介することに努めた。一部の研究は、研究事例紹介の欄でより詳細に説明されている。

### 4. 軽航空機を利用したレスキュー支援システム

文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクトのうち、「レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発」においては、いくつかのミッション・ユニットにより、レスキューロボットおよびシステムに関する研究開発が行われている。その中の一つのミッション・ユニットとして、上空からの情報収集ミッション・ユニット (通称: 上空 MU) が組織されている。上空 MU では、大震災後の被災地の情報収集や被災者探索等を上空から実現するための技術開発を行っている。上空からの被災地情報収集には、航空機や自律ヘリコプターによる迅速なファースト・サーベイ・フェーズも重要であるが、軽航空機もその特徴を活かして、被災地上空に中長期的にとどまることで、機動性の高い航空機では困難な情報収集に貢献することが可能である。具体的にいえば、環境変化を常時監視したり、被災時に寸断した通信網の展開支援、被災者・不明者の安否確認等がそれにあたる。筆者らも、上空 MU において、軽航空機を用いた被災者探索システムについて研究を行ってきた。ここでは、その内容について簡単にご紹介したい。

#### 4.1 自律飛行船を用いた被災地情報収集

あらかじめ屋内に設置されている音声の録音・再生可能かつ、無線ネットワーク通信が可能な小型ユビキタスデバイス [20] を用い、瓦礫内で同時並行的に被災者探索を実現するシステムの開発を行っている (図 2 上)。本システムで

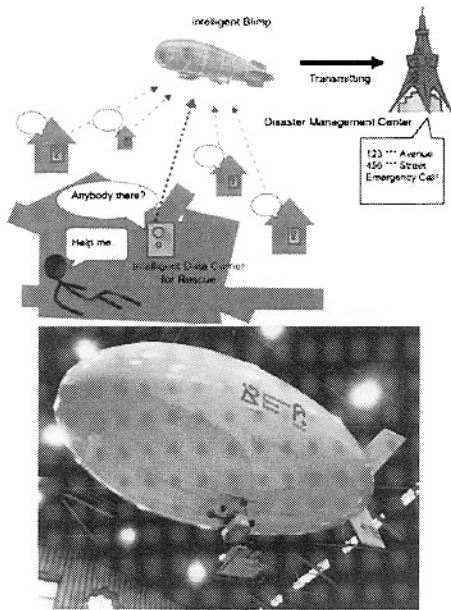


図 2 Concept of victim search system and a prototype of blimp robot: Sky Probe-JII

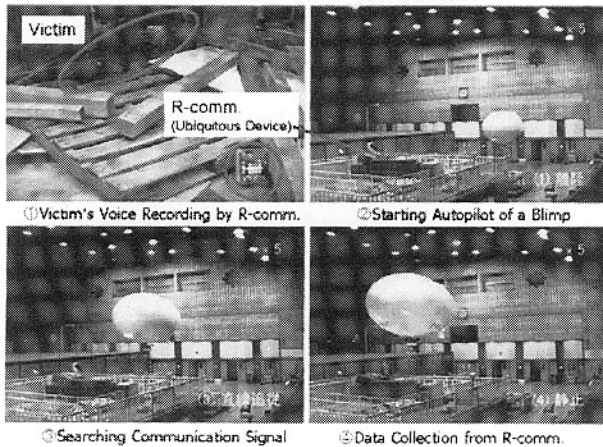


図 3 An outlook of victim search experiment by an autonomous blimp and ubiquitous devices

は、瓦礫内で収集された被災者の音声情報を無線通信により、瓦礫の外に取り出すことを主眼としたものであり、外に送信されたデータを回収するエージェントとして、飛行船が採用されている。このシステムが想定している状況は、大震災発生直後から3日間程度の間被災者所在情報の収集であり、震災直後の瓦礫等に接触したり強力な風圧をかけずに瓦礫にアクセスできるという飛行船のメリットを活かせる。また、重航空機に比較して、静音であることからレスキュー隊員による音声での被災者探索作業を阻むことがないことも大きなメリットである。これまでに、開発した Sky Probe-JII (図 2 下) を用いて、PID 制御器による軌道追従制御や前述のエビキタスデバイスから発せられた電波をキャッチして被災者情報を回収する連携動作 (図 3)

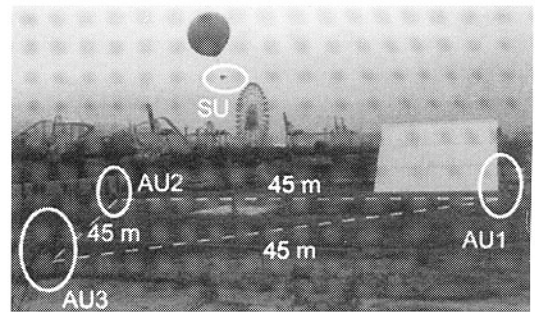


図 4 A prototype of a balloon for rescue use (武村氏に許可を得て掲載)

が実現されている [21]。また、飛行船に距離画像センサを搭載して、飛行中に一覧性が高く、低空からの計測による精度のよい地図 (飛行船の低速移動の特徴を利用) を作成したり、被災者等の環境内動物体を検出する手法についても研究を行っている [22] [23]。

#### 4.2 バルーンロボットによる被災状況監視

上空 MU ユニットでは、前述の小野里らのバルーンシステム開発とは別に、武村ら [24] により、上空からの継続的な環境情報収集のために3本のケーブルにより展開、繫留するタイプのバルーンケーブル駆動ロボット (図 4) を開発している。地上にアクチュエータユニット (AU) を3点設置し、加重負荷を分散させて制御するタイプのシステムであり、バルーン下部にセンサユニット (SU) として、パンチルトカメラを搭載している。無線信号によるバルーンの高度および位置を各ワイヤを制御するとともに、カメラのパンチルト制御を行うことで、広範囲の環境監視や被災者情報収集が可能になっている。

2006 年秋には、山古志村での実証実験が予定されており、バルーンケーブル駆動ロボットを現地に投入し、前述のエビキタスデバイス等と無線通信や画像転送により、被災地での情報収集についてデモンストレーションを行う予定になっている。

#### 5. おわりに

本稿では、空中ロボティクスの中でも、軽航空機 (LTA) 関連のロボット技術や応用例について紹介した。本特集に先立ち、本学会講習会にて、軽飛行機の話が取り上げられる予定である (原稿執筆時の情報)。これらを機会に、軽航空機を用いたロボティクス分野の活発な技術開発が行われることを期待している。

謝辞 本稿において、紹介した研究内容の一部は、文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環として行われ、得られた成果である。ここに、関係者への謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 天野：飛行船—空飛ぶ夢のカタチ—。KTC 出版，2002。
- [2] 矢島，井筒，今村，阿部：気球工学—成層圏および惑星大気に浮かぶ科学気球の技術—。コロナ社，2004。
- [3] <http://www.jal.co.jp/jiten/>
- [4] <http://www.nac-airship.com/flash.html>
- [5] “ハイテク飛行船で空から偵察”，日経サイエンス4月号，p.20，2004。
- [6] T. Fukao, K. Fujitani and T. Kanade: “An autonomous blimp for a surveillance system,” In Proc. of 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), pp.1820-1825, 2003.
- [7] 深尾，神澤，大須賀：“劣駆動飛行船ロボットの逆最適制御”，第11回ロボティクスシンポジウム予稿集，pp.80-85，2006。
- [8] T. Yamasaki, K. Fujita and N. Goto: “Identification of Blimp Dynamics by Constrained Flight Tests,” American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2001-4259, 2001.
- [9] H. Fukushima, R. Saito, F. Matsuno, Y. Hada, K. Kawabata and H. Asama: “Model Predictive Control of an Autonomous Blimp with Input and Output Constraints,” Proceedings on IEEE International Conference on Control Applications, (accepted).
- [10] 川野：“未知風外乱中を航行する自律飛行船の三次元障害物回避”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06講演論文集，2P2-C07，2006。
- [11] S. Lacroix: “Air/Ground Robotics Ensembles for Risky Applications,” 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト 被害者救助等の災害対応戦略の最適化 レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発 第3回国際シンポジウム論文集，pp.63-72，2005。
- [12] E. Hygounenc, L-K. Jung, P. Soueres and S. Lacroix: “The autonomous blimp project at LAAS/CNRS: achievements in flight control and terrain mapping,” Journal of Robotics Research, vol.23, no.4-5, pp.473-512, 2004.
- [13] L. Chaimowicz and V. Kumar: “Aerial Shepherds: Coordination among UAVs and Swarms of Robots,” Proceedings of 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, pp.231-240, 2004.
- [14] M. Onda and Y. Morikawa: “An Acrobatic Airship ‘ACRO-STAT’,” SAE Journal of Aerospace Section 1, pp.2101-2105, 1992.
- [15] 河野，佐々：“成層圏プラットフォーム定点滞空飛行試験における飛行制御”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05講演論文集，2A1-S-062，2005。
- [16] 佐野，恩田：“高度24km長期滞空実証用飛行船ロボットの概念設計”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06講演論文集，2P2-C08，2006。
- [17] 小野里：“被災者支援のための情報気球 InfoBalloon の研究”，文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト第2回国際シンポジウム論文集，pp.291-294，2004。
- [18] M. Onosato and T. Watasue: “Two attempts at linking robots with disaster information: InfoBalloon and gareki engineering,” Advanced Robotics, vol.16, no.6, pp.545-548, 2002.
- [19] 前田，武村，田所：“バルーンケーブル駆動ロボットシステムの姿勢安定性の検討”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06講演論文集，2P2-D31，2006。
- [20] K. Kawabata, Y. Hada, H. Kaetsu and H. Asama: “Ubiquitous Victim Search Device: Intelligent Data Carrier for Rescue,” Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation, pp.4306-4308, 2006.
- [21] Y. Hada, K. Kawabata, H. Kaetsu and H. Asama: “Autonomous Blimp System for Aerial Infrastructure,” Proceedings of the 2nd International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAmI'05), KRW057, 2005.
- [22] 福田，羽田，城間，浅間，川端，松野：“被災地上空からの動物体検出のための三次元地図獲得”，第6回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集，pp.751-752，2005。
- [23] 福田，羽田，城間，浅間，川端，松野：“被災地上空からの動物体検出のための三次元地図生成”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06講演論文集，2P1-C27，2006。
- [24] F. Takemura, M. Enomoto, T. Tanaka, K. Denou, Y. Kobayashi and S. Tadokoro: “Development of the balloon-cable driven robot for information collection from sky and proposal of the search strategy at a major disaster,” Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.658-663, 2005.



川端邦明 (Kuniaki Kawabata)

1997年法政大学大学院工学研究科電気工学専攻後期博士課程修了。博士(工学)。同年、理化学研究所基礎科学特別研究員として生化学システム研究室勤務。2000年理化学研究所工学基盤研究部基盤技術開発室研究員。2002年理化学研究所分散適応ロボティクス研究ユニット研究員。2004年同ユニットリーダー。現在に至る。東京大学人工物工学研究センター客員研究員。法政大学工学研究科非常勤講師。移動ロボット、環境知能化デバイス、レスキューシステム、ライフサイエンス実験装置知能化等に関する研究に従事。2002年計測自動制御学会システム・情報部門部門賞奨励賞受賞。2005年本会論文賞およびファナックFA財団論文賞受賞。IEEE、日本機械学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)



羽田靖史 (Yasushi Hada)

1999年3月筑波大学修士課程理工学研究科理工学専攻修了。2003年4月筑波大学博士課程工学研究科知能機能工学専攻。博士(工学)。文部科学省最先端分野交流学生を経て、2003年より理化学研究所特定協力研究員として勤務。東京大学人工物工学研究センター協力研究員、情報通信研究機構短時間研究員を兼務。自律ロボットシステム、環境知能化、軽航空機、サービス工学等に関する研究に従事。日本機械学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)



浅間 一 (Hajime Asama)

1984年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1986年9月理化学研究所化学工学研究室研究員補。同研究所研究員、副主任研究員を経て、2002年9月分散適応ロボティクス研究ユニットリーダー。2002年11月東京大学人工物工学研究センター教授。自律分散型ロボットシステムの研究や複数自律移動ロボットの協調技術、知的データキャリアとその応用技術の開発、ユビキタスシステム技術やロボット技術を応用したサービス工学の研究、移動知の研究等に従事。1995年日本機械学会ロボメック賞、2001年日本機械学会ロボメカ部門学術業績賞等受賞。2005年より、科研費特定領域「移動知」の領域代表。日本機械学会フェロー、IEEE、日本機械学会、計測自動制御学会などの会員。工学博士(東京大学)。(日本ロボット学会正会員)