

不活性ガスカプセルを輸送する航空消火ロボットの開発

Development of an aerial fire extinguisher with an inert gas capsule

○小川慧, 小出真広, 岩谷靖, 鳥飼宏之

○ Satoshi Ogawa, Masahiro Koide, Yasushi Iwatani, Hiroyuki Torikai

弘前大学

Hirosaki University

キーワード： 消火 (fire extinguishment), 不活性ガス (inert gas), 航空ロボット (aerial robot).

連絡先： 〒 036-8561 青森県弘前市文京町 3, 弘前大学 大学院理工学研究科, 岩谷靖

Tel.: (0172)39-3697, Fax.: (0172)39-3697, E-mail: iwatani.at.cc.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

不活性ガスカプセルとは、張力を有するカプセルにヘリウム等の不活性ガスを充填した消火用機器である¹⁾。不活性ガスカプセルを火源に接触させ破裂させることで、高濃度の不活性ガスを火源に直接散布できる。不活性ガスカプセルを利用した消火法は、火源への高濃度不活性ガスの散布による高効率消火を可能であるほか、電気絶縁性・低汚損性の利点を有する。

不活性ガスカプセルを火源に輸送する手段として、著者らは航空消火ロボットの利用を検討している²⁾。具体的には、多数の航空消火ロボット群を用いて不活性ガスカプセルを火源へ輸送し、各ロボットが火源近傍で火災状況に応じた消火戦略を選択して消火カプセルを火源に投入する、自動消火システムを開発することを目指している (Fig. 1)。不活性ガスを充填した消火カプセルを輸送する消火ロボットは可能な限り安価に製作し、消火ロボットの火災現場への大量投入を可能とする。また消火ロボットは使い

捨て型とし、このロボットを消火カプセルと共に火炎へと直接突入させる。消火ロボット群や火災状況の把握は、観測ロボットにより行う。観測状況に基づき最適な消火戦略を実行することで、最も消火が効率的に行われる火炎位置に正確に不活性ガスを供給し、確実に消火を達成す

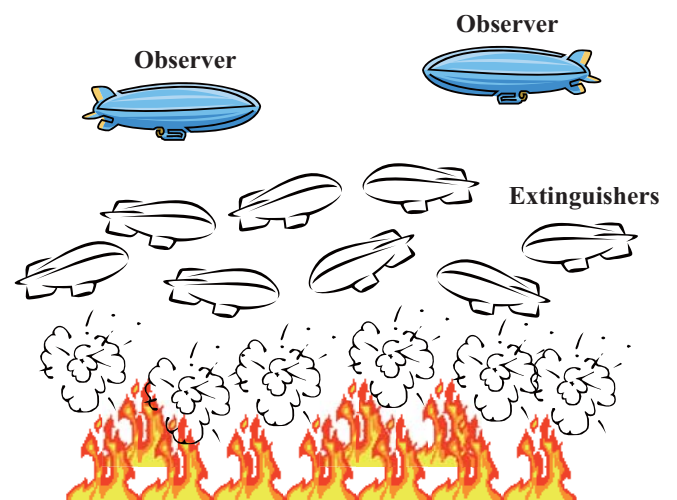


Fig. 1 Our final goal: Fire extinguishment by a swarm of aerial observers and aerial extinguishers.

るロボットシステムを構築することを目指す。このように不活性ガスカプセル消火法を発展させることで、クリーンかつ効果的そして効率的な消火方法を確認することを最終目標としている。

これまでに、航空消火ロボットの試作機を開発し、ガスカプセルの輸送性と消火能力を確認している²⁾。しかし、その試作機は同軸二重回転式の電動ヘリコプタを改造したものであり、その機構的な性質から、輸送できるガス量が約 0.25 L と極めて少なかった。

本稿では、より高い消火特性を得るため、四発ロータ式の電動ヘリコプタを改造した航空消火ロボットを開発する。ガス輸送能力は、ヘリウム 4.5 L 以上であり、メタン 10 L/min. で多孔質バーナ上に形成した拡散火炎を消火する能力を有する。また、ロボットの自動制御系として、二次元深度情報を取得可能な KINECT を基盤とした制御系を設計する。機体上部にアルミニウム箔によるマーカを取り付け、これを上から KINECT で撮影することにより、機体の位置・姿勢を推定する。機体の制御は、既知の火源位置を目標位置として、PID 制御器による軌道追従制御により行う。この構成により、前述のメタン 10 L/min. で多孔質バーナ上に形成した拡散火炎の自動消火が達成できることを確認した。

2. システム構成

システムは、航空ロボット、地上基地局、火源から構成される (Fig. 2)。

航空ロボットは、四発ロータ式の電動ヘリコプタ (HiTEC 社, Q4 Quad Copter) の基盤、モータ、ロータを使う。モータが機体の中心から 159 mm に等間隔に位置するよう、外格を 3D プリンタで作製し、基盤、モータ、ロータを取り付ける。火炎は機体の下側に存在することを想定し、機体下部にカプセルを取り付ける。カプセルはゴム風船であり、ヘリウム 4.5 L を充填する。このとき、カプセル形状は長径 230

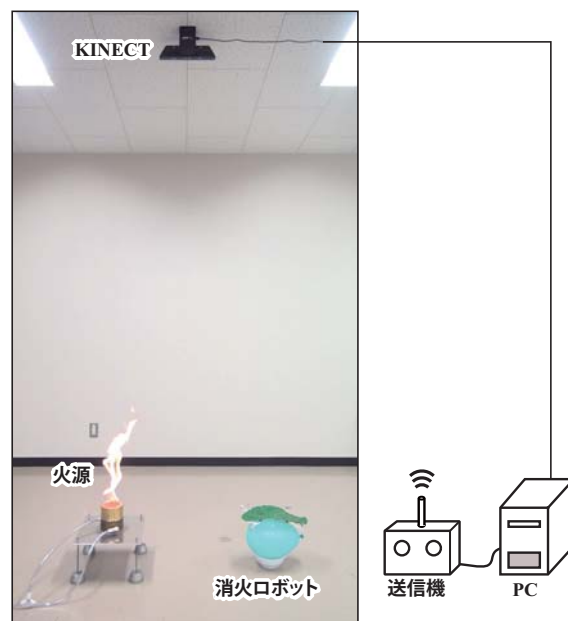


Fig. 2 System configuration.

mm, 短径 160 mm のいびつな楕円球状となる。また、位置推定用に、アルミニウム箔を緑色水性インクで着色したマーカを機体上部に搭載する。着色する理由は、アルミニウム箔に対して KINECT が二次元深度情報を正しく取得できない場合があるからである。マーカ形状は、上からカプセルが見えないように、長径 340 mm, 短径 180 mm の楕円とした。

地上基地局は、KINECT for Windows (Microsoft 社), PC, 無線送信機 (HiTEC 社, Q4 Quad Copter 附属品) から構成される。KINECT が撮影した二次元深度情報を有線で PC に取り込み、PC で位置推定および制御信号計算を行う。制御信号を、無線送信機を介してロボットへ送信し、ロボットを制御する。

火源は、メタン 10 L/min. で多孔質バーナ上に形成した拡散火炎である。燃料となるメタンは、多孔質円盤を通して一様な速度分布で空气中に供給される。バーナの多孔質部の直径は 100 mm, 高さは 120 mm であり、その最高点 (以下、バーナ高さと呼ぶ) は床から 420 mm である。このような多孔質上に形成される火炎は、可燃性固体や可燃性液体の火炎モデルとしてしばしば使用される。

3. 位置推定

流用した電動ヘリコプタの基盤には慣性センサが取り付けられており、機体のピッチ角とロール角を水平に制御するコントローラが内蔵されている。そのため、制御すべき変数は、三次元位置 (x, y, z) とヨー角 θ のみとなる。これらの四変数は、マーカより、以下の手順で推定される。

まず、マーカ領域の抽出を以下の手順で行う (Fig. 3) : (1) ロボット不在時の二次元深度情報を事前に取得し、背景とする。(2) 現在の二次元深度情報と、背景の深度値の差分を計算する。(3) 事前に定めた閾値を用いた閾値処理により、背景との差異部分のみを注目領域として抽出する。(4) 欠損を補う膨張収縮処理を行う。ここで、膨張回数よりも収縮回数を多くすることで、マーカとロータの連結成分を切断する。(5) 得られた画像における最大連結要素をマーカとみなす。

つぎに、マーカの三次元位置・姿勢を以下のように得る。まず、並進位置 (x, y) は、深度情報の二次元平面におけるマーカの重心位置とする。高度 z は、マーカ領域の深度の平均値とする。ヨー角 θ は、画像二次モーメントから得られる慣性主軸の傾き³⁾とする。

4. 制御系設計

火炎の位置は既知とし、事前に定めた軌道に沿って機体を制御する。制御は、軌道追従時は PD 制御器で、位置調整のための定点ホバリング時は PID 制御器で行う。目標軌道は、初期値は 0 次、終端値は 3 次のスプライン関数で作製する。これは、初期値近傍では応答を高速に、終端値近傍ではオーバーシュートを減じるための設定である。最終的には、火源上空での定点ホバリングを行うことで、破裂を伴う不活性ガスカプセルの輸送が完了する。

具体的には以下の手順で制御を行う。

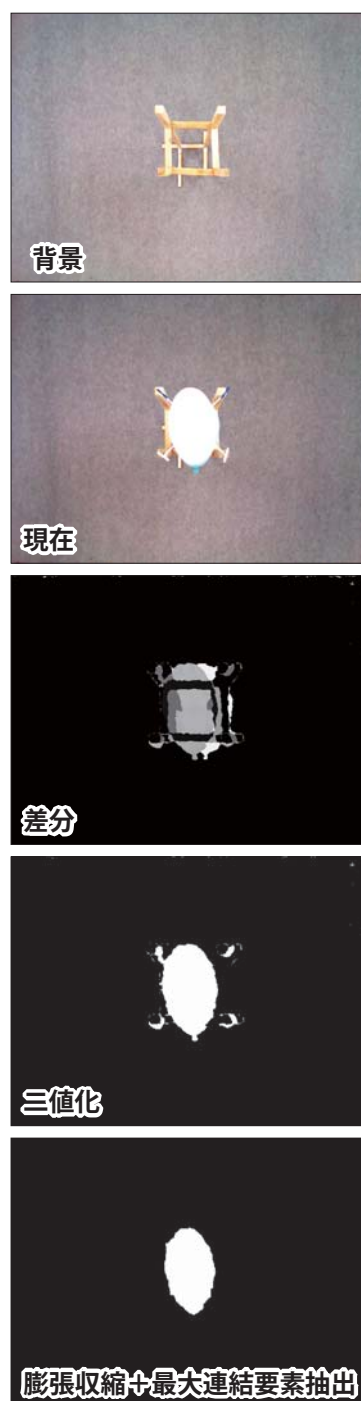


Fig. 3 Marker extraction.

- 1) 初期位置：バーナから 750 mm 後方に設置された台に、ロボットを置く。台上のロボットの高さ（マーカの高さ）は約 200 mm である。
- 2) 離陸：カプセルの高さ方向の中心が、バーナ高さと一致するように高さ方向の目標値を設定する。並進方向の目標値は、変更し

ない。前述のスプライン関数で軌道を生成し、PD 制御により軌道追従を行う。

- 3) 位置調整：離陸の最終目標値に対して、並進方向が 10 pixels の円、高さ方向が ± 50 mm の円柱形状内に機体が 1 秒間連続して存在するまで PID 制御器を用いて位置調整を行う。
- 4) 火源上空への誘導：横方向と高さ方向の目標値は変更せず、前方向の目標値をバーナの中央位置に設定する。前述のスプライン関数で軌道を生成し、PD 制御により軌道追従を行う。
- 5) 火源上空でのホバリング：火源上空の目標値において、並進方向が 10 pixels の円、高さ方向が ± 50 mm の円柱形状内に機体が 1 秒間連続して存在するまで PID 制御器を用いて位置調整を行う。

5. 消火実験

提案した制御系を適用し、メタン 10 L/min. で形成した拡散火炎の消火実験を行った。Fig. 4 の黒線が目標軌道、青線が機体の軌道である。図から確認できるように、機体は概ね目標軌道に沿って移動した。火源上空目標値の近傍において、目標軌道からのずれが確認できる。このずれは、カプセル破裂後の機体の挙動を示していると考えられる。また、Fig. 5 に示すように、ゴム風船が火源に接触し破裂することで、消火を達成していることが確認できる。

6. おわりに

本研究では、ヘリウム 4.5 L を充てんした不活性ガスカプセルを搭載した航空消火ロボットとその制御系を開発した。開発した航空消火ロボットが、メタン 10 L/min. で形成した拡散火炎を消火可能であることを確認した。

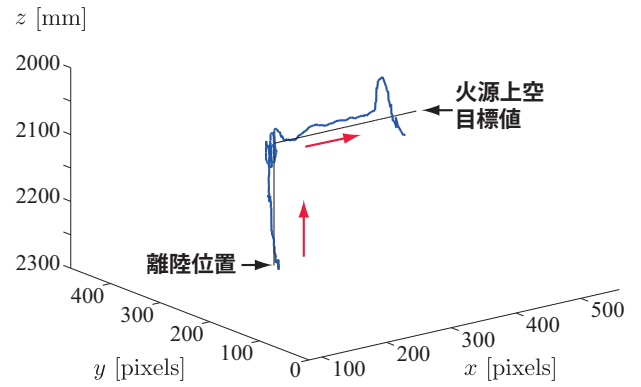


Fig. 4 3D trajectory of the aerial extinguisher.

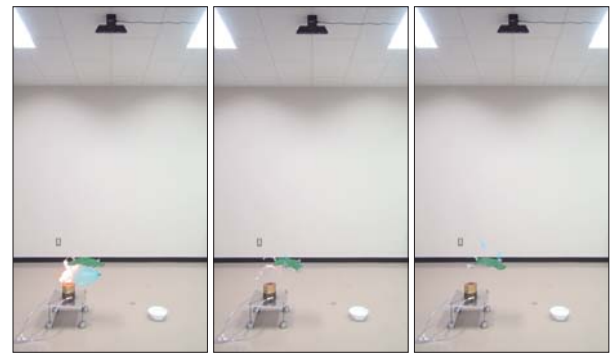


Fig. 5 Three successive photographs of the flame extinguishment.

謝辞

本研究は、公益財団法人 JKA 機械工業振興補助事業 競輪の補助 (26-132) を受けて実施しました。

参考文献

- 1) H. Torikai, M. Narita, and A. Ito, “Extinguishment of pool fire with rubber balloon inflated with inert gas,” *Proc. the 24th International Symposium on Transport Phenomena*, pp. 682-688, 2013.
- 2) Y. Iwatani, and H. Torikai, “Flame extinguishment by a prototype of an aerial extinguisher with an inert gas capsule,” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 7, No. 3, pp.168-172, 2014.
- 3) R. Mukundan and K. R. Ramakrishnan, *Moment Functions in Image Analysis: Theory and Applications*. World Scientific Publishing, 1998.