

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03980

研究課題名（和文）ヘリコプターから懸下したマルチコプターを用いた消火システムの実証と制御法開発

研究課題名（英文）Firefighting system with water discharge multicopter suspended from fire helicopter

研究代表者

今津 篤志（IMADU, Atsushi）

大阪公立大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：80440246

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は高層ビル火災への放水を想定し、タンクを持つ大型のヘリコプターから放水ノズルを備えた小型のマルチコプターを懸下し、ノズルのみが近接して放水を行うシステムの実現を目指し、クレーンで吊り上げたタンクから30mのホースでノズルマルチコプターを吊り下げ、重力による放水を行いつつノズルマルチコプターを振り上げる制御を実現した。またディープラーニングを用いた画像処理により放水着水点を推定し、放水から着水までの遅れを考慮したフィードバック制御によって放水を命中させる制御手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、懸下型マルチコプターと放水の組み合わせの有効性と実現性を実験的に示すことができたこと、放水の着水点が画像処理によって検出できる可能性を示したこと、放水から着水までの遅れを考慮した制御が放水の自動命中制御に効果があることが示されたこと、に意義がある。

社会的には、スプリンクラー設備のない古い高層建築や、スプリンクラーの使えない災害時に、高層建築の火災に対する対策の一つとなりうる可能性を示したことに意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a system for firefighting in high-rise building fires by deploying a small multicopter equipped with a water nozzle suspended from a large helicopter with a water tank. The nozzle multicopter approaches the fire to discharge water while the tank helicopter keeping away from the fire. We achieved control of the nozzle multicopter suspended by a 30-meter hose from a tank lifted by a crane, enabling water discharge by hydraulic head of gravity. Additionally, we proposed a control method that targets the water discharge point using image processing with deep learning to estimate the landing point of the water and a feedback control that accounts for the delay from discharge to landing.

研究分野：ロボティクス・メカトロニクス

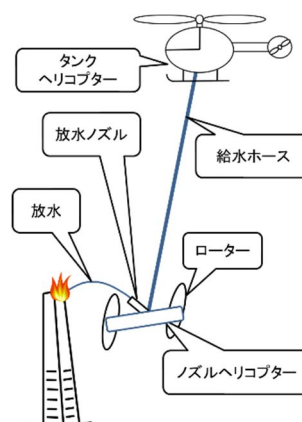
キーワード：マルチコプター 消防

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高層ビル火災においては、はしご車の放水が水圧の不足で届かず、内部のスプリンクラーや防火壁を頼りにしている。消防用のヘリコプターも存在するが、大型のヘリコプターが建築物に近づくのは、それ自体が危険である。

そこで申請者らは、タンクを持つ大型のヘリコプター(以下、タンクヘリコプター)から、放水ノズルを備えた小型のマルチコプター(以下、ノズルマルチコプター)を懸下しノズルマルチコプターのみが近接して放水を行うシステムを提案してきた。



模式図

2. 研究の目的

本システムの実現性をより具体的に明らかにすることを目的とし、より具体的には

- ・タンクヘリコプターとノズルマルチコプターの相互作用を確認する

- ・実用スケールの機体に必要なスペックを求める相似則を導く

- ・自動で放水を命中させる手法を開発する

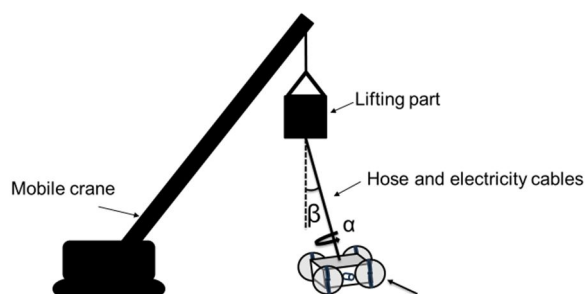
ことを目的とする。

3. 研究の方法

タンクヘリコプターを想定したマルチコプターを固定し、下方の風速を測定した。次に固定したマルチコプターから懸下したノズルマルチコプターの振り上げ制御を行い、最後にタンクヘリコプターを飛行させながらノズルマルチコプターも同時に制御する予定であった。

タンクヘリコプターを想定したタンクをクレーンで吊り上げ、そこからホースで懸下したノズルマルチコプターで放水を行う。30mの高さまでつり上げ、高低差による放水を行いながらのノズルマルチコプター制御実験を行った。

その結果をふまえて、外乱抑制のために可変ピッチプロペラ機構による水平プロペラを追加する機体の改善を行った。



タンク吊り上げ実験模式図

また、放水量やホース長さをより実用スケールに近づけたときの放水反力等を推測するための相似則を求めるため、タンクから重力により放水を行い、そのときの流速と放水反力と求める実験を行った。

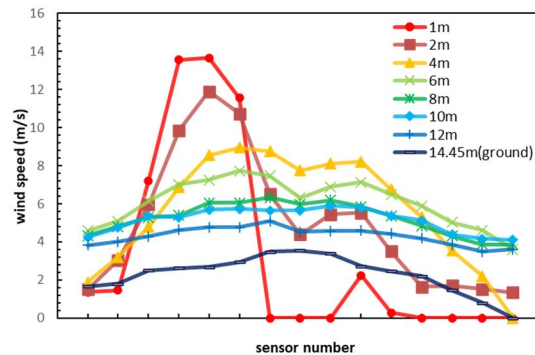
自動で放水を行うシステムを実現するため、

- ・画像から着水点を推定する機械学習器の学習を行った。具体的には Resnet18 の後段に全結合層を経た線形出力を追加することにより、回帰を行った。

- ・放水から着水までの遅れを考慮し、放水角度と放水地点の関係をリアルタイムにシミュレーションを行い放水角度の制御にスミス補償を行う手法を適用した。シミュレーションと実機により確認を行った。

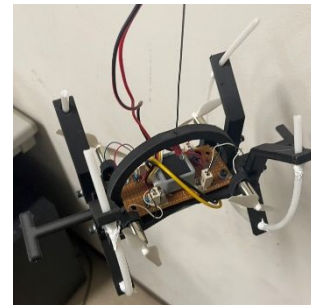
4. 研究成果

タンクヘリコプターを想定した推力 61N のマルチコプターを渡り廊下からはみ出した形で固定し、その下方 15m までの風速を、流速センサアレイを用いて測定した。その結果、ローター直下では 14m/s であり、ローターから離れるにつれて分布が広がり、流速が遅くなることが確認できた。10m を越えると風速 5m/s 未満となった。ただし、この結果はマルチコプター以外に起因する自然の風速の影響を受けており、再現性の確保が難しいと判断したこと、上下方向の投影面積が小さいノズルマルチコプターへの吹き下ろしの影響は小さいと考えられたことから、風速測定はここまでとした。



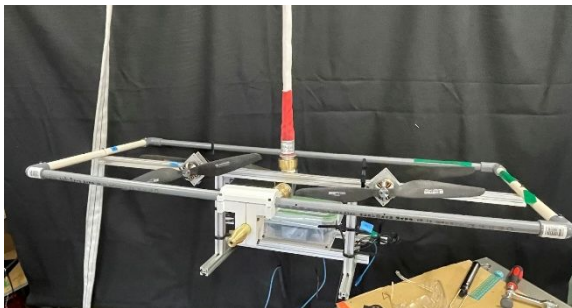
風速測定結果

次に、マルチコプターを用いてノズルマルチコプターを吊り上げ、同時に制御する実験を行うために、DC モータを用いたマイクロウッドサイズのノズルマルチコプターを製作し、単体での振り上げ制御ができることを確認した。しかし、タンクヘリコプターを模したマルチコプターの実験システムにトラブルがあり、十分な実験を行うことができなかった。本実験は提案システムの実現性の確認に重要な実験であるため、今後も継続して確認していく予定である。



マイクロノズルマルチコプター

作成した 15 インチプロペラ 4 発のノズルマルチコプターと、タンクをクレーンで吊り上げている途中の実験の様子を示す。



25A 口径放水ノズルマルチコプター



タンクを 30m クレーンで吊り上げている様子

また、振り上げて放水を行っている様子と、振り上げ角度を示す。なお、放水の動画を以下の Web ページで公開している

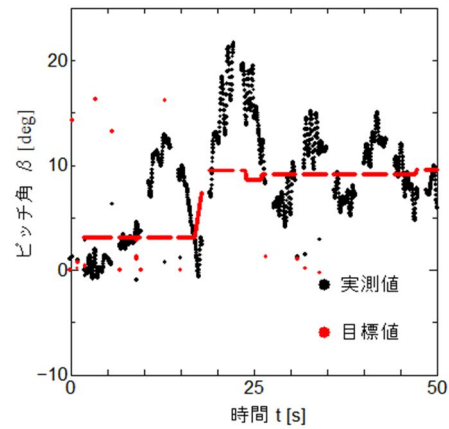
(<https://www.omu.ac.jp/eng/intelligent-systems/multicopter/index.html>)

吊り上げたタンクからの重力による圧力によって、十分放水が可能であり、制御ゲインに調整の余地はあるものの、放水しながら振り上げてほぼ静止することができることが確認できた。

一方、課題として、実験を海に面した広場（大阪南港 ATC）で行ったこともあって横風の影響が大きく、ホースが大きく撓む状態にもなったことから、横風による外乱の抑制が必要であることが分かった。またホースと電源ケーブルの取り回しも問題となることが分かった。



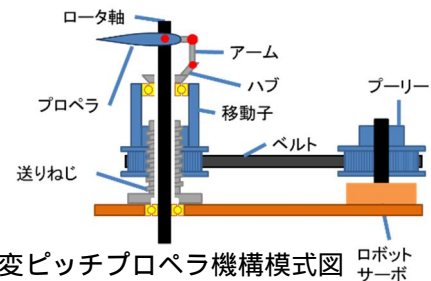
振り上げての放水の様子



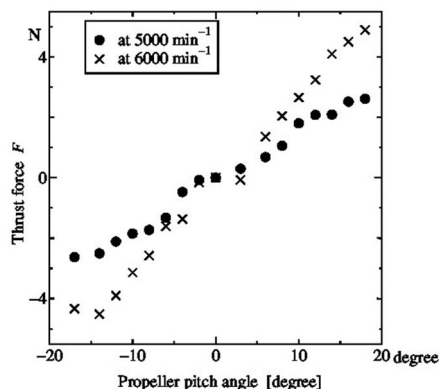
振り上げ角度の時刻歴

(矢印の先にノズルマルチコプターがある。電源ケーブルの左に沿うように赤実線、放水の上に沿うように赤点線を記入した。ノズルマルチコプターが電源ケーブルで吊られた形となり、ホースが弛んでしまっている)

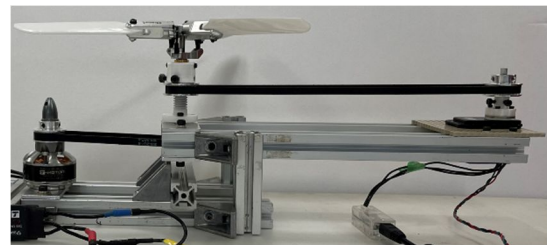
放水実験で横風の影響が大きかったことを受け、横方向に直接推力を出力するローターの追加を考えた。横方向は正負の推力が必要であるため、可変ピッチプロペラ機構とし、送りねじを用いた新規の機構を開発した。機構の軽量化が間に合わなかったため搭載には至らなかった。



可変ピッチプロペラ機構模式図



可変ピッチプロペラ機構推力



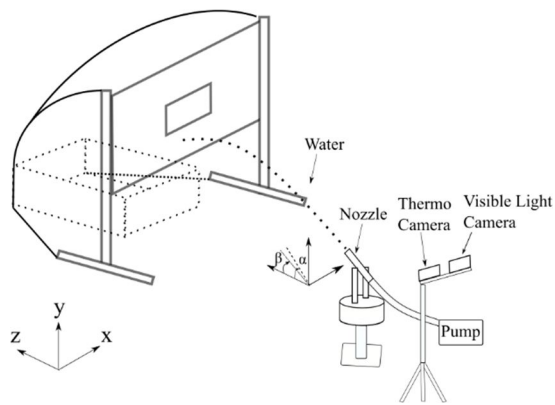
可変ピッチプロペラ実験機

放水流速や放水反力のスケール則を確認するため、口径 25A ホースとノズルを用いて放水反力の実験を行い、理論値と比較した。実験の結果、ホース長さ 20m の場合、口径 25A で約 10N、40A で約 50N の放水反力であった。理論値はベルヌーイの式から求められる流速と、ノズルマルチコプター上での流路の方向変化とノズルにおける運動量変化によって見積もることができ、実験値とほぼ同じ値であることが確認できた。この理論式に外挿すると口径 65A、長さ 100m のホースを用いたとき放水反力が 536N (流量 740L/min) となるが、バルブ等を使って流量を 500L/min に抑えると放水反力は 244N となる。

まず、ディープラーニングを用いた画像解析により着水点を推定する学習器を、約 2 万 2 千枚のアノテーション済み画像 (640 × 480) を用いて学習した。その結果、5m 先で 30cm 程度の推定精度が得られた。入力画像の画素数と学習データを増やすことで、より精度、汎化性を改善していくことができると考えている。

放水から着水までの遅れを考慮し、リアルタイムにシミュレーションを行ってスミス補償を行う制御が放水マルチコプタにも有効であることを、シミュレーションで確認した。

砲台型の放水実験機を作成し、着水点を検出しながらフィードバック制御を行う実験を行い、8m 先の 50cm × 30cm の窓の中に放水した水の質量比 17.1% を到達させることができた。



砲台型放水実験のセットアップ



放水の様子

(青四角が目標。赤丸が着水推定点。放水軌跡の上に沿って赤点線を記入)

結果のまとめ

タンクヘリコプターとノズルマルチコプターの相互作用については、同時飛行の実現に至らず、検証が不十分な結果となった。今後も作成中の実験システムの改良を継続し、本システムの有効性を検証していく予定である。

ホース 30mの実験を実施し、重力のみで放水を行いつつノズルマルチコプターの振り上げ制御ができることが確認できた。また、放水反力を求める理論式が妥当であることが確認でき、実スケールでの実現に必要なノズルマルチコプターの推力を見積もることができた。

画像処理を用いた着水点推定を用い、放水方向を制御して放水を目標点に着水させる自動制御システムを構築した。

以上

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1．発表者名 本田義博
2．発表標題 送りねじを用いた可変ピッチプロペラ機構の提案
3．学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4．発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------