

□石油化学コンビナート火災・爆発対応のための 消防ロボットシステムの研究開発

研究開発の概要と一次試作した単体ロボットの 消防本部における試験評価

消防庁消防研究センター 天野久徳

1. はじめに

東日本大震災ではガスホルダーヤードにおいて火災・爆発が発生した。現在、南海トラフ地震や首都直下地震の発生が懸念される中、自然災害によって石油コンビナートや化学プラントといったエネルギー・産業基盤施設において大規模な火災が発生することも考えられる。自然災害ばかりでなく、平成24年の姫路市における化学プラントの爆発事案においては、消防隊員1名が殉職し、また多くが負傷した。ここ数年間は事故件数も増加傾向にある。

これら基盤施設の火災・爆発は市民生活に大きく影響を与え、市民の日常生活に支障をきたす。自然災害や事故時に避難を強いるばかりでなく、その後の地域の復興や市民生活の復旧には、エネルギー・産業基盤が不可欠である。したがって、災害を早期に抑制することが重要である。

しかしながら、これらの火災・爆発現場は特殊な状況であるため、消防隊員が火災に近接して活動することは困難を伴う。遠隔操作機器での対応にも通信距離の限界が、また、単体のロボットでは大規模な災害に対して、有効な対応が難しいと

一方で、自律的に動作し、互いに協調連携ができる複数のロボット等でロボットシステムを構成し、対応することが有効と考えられる。そこで、平成26年度から5年計画にて、消防ロボットシステムの研究開発を進めてきている。本稿では、消防ロボットシステムの研究開発のコンセプト及び平成28年度に完成した消防ロボットシステムを構成する各単体ロボットの一次試作機を消防本部において試験評価した結果の概要を紹介する。

2. 想定事案と活動

開発する消防ロボットシステムによって対応を想定している事案及び活動は

- (1) 石油タンクヤード内における火災発生に対して、隣接する石油タンク等周辺施設への延焼を阻止するため、周辺施設を冷却する活動。
- (2) 火災が発生した危険物施設に対して、当該危険物施設を冷却し、火災による倒壊や爆発を防ぐ活動。
- (3) 石油タンク火災が発生した状況下において、火災を抑制する（鎮圧まではできなくても、火災の拡大をコントロールできる）活動。

(4) 前述(1)～(3)の活動に伴う偵察・情報収集活動とする。なお、表現の煩雑さを避けるため、以下においては、放水及び泡放射を特段の必要が無い限り「放水」とまとめて表記する。

3. 構成と各ロボットの役割

開発中の消防ロボットシステムの活動イメージを図1に示す。消防ロボットシステムは飛行型偵察・監視ロボット、走行型偵察・監視ロボット、放水砲ロボット、ホース延長ロボットの4種類のロボットと、消防隊員の判断や指令等を入力し、各種情報を表示するコンソールを備えた指令システムで構成される。なお、放水のためにホースを敷設することを消防では「延長」と言う。

ロボットシステムを積載した車輛が現場に到着

し、システムを立ち上げると、コンテナに設置されたGPSの位置データから、プラントの電子地図を自動的に読み込む。読み込まれた電子地図に発災タンク等の危険物施設を入力すると、システムが自動的に風向風速等を考慮し、上空から災害の状況を偵察するための飛行型偵察・監視ロボットの飛行経路を提案する。図2にシステムが提案した飛行経路の表示画面のイメージを示す。提案された経路が、風下側を除き、円弧状に示されている。システムからの提案を消防隊員が必要に応じて修正し決定する。次に、この偵察・監視飛行経路へ到達する複数の経路をシステムが提案する。図2に点線で二つの経路が示されている。周囲の状況を考慮し、消防隊員が選択し決定する。なお、飛行は当該敷地内の最高高さの施設等から十分な安全距離を確保した高度とし、タンクの直上は飛



図1 消防ロボットシステムの概要

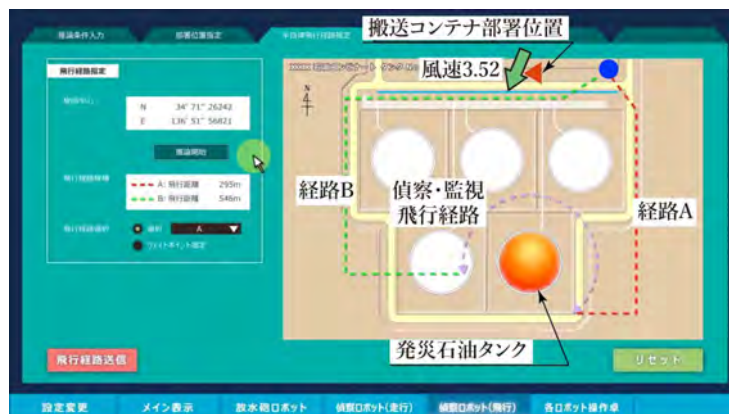


図2 飛行経路の表示画面イメージ

行しない等の制約を組み入れる。

飛行経路の決定と共に、飛行型偵察・監視ロボットは自律的に離陸、飛行し、搭載された可視光カメラ及び熱画像カメラの映像、放射熱や燃焼ガス検知器などの計測データを指令システムに伝送するなど上空から偵察活動を行う。走行型偵察・監視ロボットも同様に、走行経路をシステムが複数提案し、消防隊員が選択決定することにより、自律的に走行し、偵察を行う。

偵察活動を行っている間に、ホース延長ロボット及び放水砲ロボットの稼働準備を進める。ここでも、システムが放水砲ロボットの部署位置を複数提案する。表示画面のイメージを図3に示す。図の中に提案された放水部署位置が、①、②、③と示されている。システムが提案した放水部署位置周辺の画像等、偵察・監視ロボットから送られてきた情報を確認し、消防隊員が部署位置を選択する。飛行型偵察・監視ロボットの飛行経路と同様、選択された部署位置への移動経路が複数提案される。消防隊員が選択し決定することによって、放水砲ロボットが自律的に移動を開始するとともに、ホース延長ロボットが自律的に放水砲ロボットを画像認識し、追従移動を開始する。

放水砲ロボットが部署位置に到着すると、ホース延長ロボットは追従移動モードから、自律移動・ホース延長モードに切り替わり、移動してきた経路を逆向きに走行し、ホースを延長する。

ホース延長ロボットが、消防隊員が活動可能な、安全な領域まで戻ると、消防隊員が加圧送水装置等に水源にホースを接続し、放水準備が完了となる。

システムは、発災石油タンクの高さ、放水部署位置からタンクまでの距離、風向風速、活動の内容等から、放水砲の俯仰角及び旋回角を算出し、提案する。算出された値を消防隊員が確認し、決定するとロボットに取り付けられた放水砲が算出された向きに設定される。放水砲の設定が完了し、消防隊員が水源から送水し、放水が開始される。

放水開始後、放水の状況を、偵察・監視ロボットが継続的に監視する。偵察・監視ロボットが撮影する熱画像等から、放水の到達位置を自動認識し、風向風速の変化等によって目標位置から放水が外れた場合、自動的に修正する。偵察・監視ロボットからの画像情報を指令システムで解析し、放水砲ロボットを制御する協調連携技術によって実現する。

本消防ロボットシステムのオペレーターとなる消防隊員は、システムから提案される選択肢を選ぶ、あるいは、提案を確認修正することが主な作業である。また、過度なロボット技術の開発に偏るのではなく、安全に活動ができる領域では、消防隊員が作業を行うことにより、効率的に災害被害を最小化することを目指している。



図3 放水部署位置の提案画面イメージ

4. 一次試作各単体ロボット

全システムをコンテナにパッケージ化し、10トン車に積載できること、連続10時間以上稼働可能なこと等をシステム全体の概略仕様としている。なお、ロボットの寸法については、大災害対応ばかりでなく、工場火災等に対応できることにも配慮した。消防ロボットシステムを構成する各単体ロボットの一次試作機の概観及び概要を写真1～4、表1～4に示す。

耐放射熱性能については、国内最大級の石油タンクの火災において、想定事案に示した活動を実施するために、放水砲ロボットは20.0kW/m²、偵察・監視ロボットについては8.0 kW/m²とした。300m程度の走行が必要と推定し、ホースを延長する距離を300mとした。既存の放水砲ロボットより長い距離のホース延長が必要となり、ホースを延長するロボットが必要となった。これは世界初の開発である。また、本消防ロボットシステムにおいては、放水砲ロボットが高い放射熱環境下で活動するため、耐放射熱性能の高いホースが必要となり、新たに開発した。

各単体ロボットともに耐放射熱繊維で覆う必要があるが、飛行型偵察・監視ロボットだけが耐放射熱繊維で被覆した状態である。各ロボットの耐放射熱繊維による被覆は脱着式となっており、走行型偵察・監視ロボット及びホース延長ロボットは外した状態である。放水砲ロボットは、撮影用の耐放射熱繊維を装着した状態である。

飛行型偵察・監視ロボットは、ある程度の悪天



写真1 飛行型偵察・監視ロボット一次試作機の概観

表1 飛行型偵察・監視ロボット一次試作機の概要

寸法	機体 長さ:1.5m, 幅:0.5m, 高さ:1.0m プロペラ径 2.6m
質量	69kg
飛行方式	同軸二重反転, バッテリー/モーター駆動
最高速度	時速約 60km (16.0m/s)
搭載機器	カメラ, 熱画像カメラ 燃焼ガス検知器, 放射熱量計
情報伝送	無線
制御機器	高精度 GPS, 慣性航法装置など
自律機能	電子地図上の指定位置への飛行, 自動帰還, 目標物へのカメラ自動追尾
耐放射熱	8.0 kW/m ²
耐風性能	風速 12m

候下でも運用できるように、風速12mでの飛行を可能としている。

走行型偵察・監視ロボットはこのシステムの中では最初に被災敷地内を走行するため、飛散物が散乱した状況での走行も想定し、車輪、履帯の2



写真2 走行型偵察・監視ロボット一次試作機の概観

表2 走行型偵察・監視ロボット一次試作機の概要

寸法	長さ:1.3m, 幅:1.0m, 高さ:1.8m (アンテナ等を含む)
質量	230kg
走行方式	車輪 (後輪駆動, 前輪操舵), 履帯 バッテリー/モーター駆動
最高速度	時速約 5.5km (1.5m/s)
搭載機器	マニピュレータ, カメラ, 熱画像カメラ 燃焼ガス検知器, 放射熱量計
情報伝送	無線 (中継器を自ら搬送設置)
制御機器	高精度 GPS, 回転式レーザー距離計 車輪回転計, 慣性航法装置など
自律機能	電子地図上の指定位置への走行
耐放射熱	8.0 kW/m ²
段差乗越	40cm
その他	電子地図生成機能

つの走行機構を備えている。履帯は、悪路や障害物に対する走破性能は高いが、移動速度が遅く、自律走行精度が低い。そこで、障害物等が検出されない範囲では、車輪で走行し、高速・高精度の自律走行を実現する。

放水砲ロボット及びホース延長ロボットは基本的に同じ走行機構を利用しており、車体の幅と長さが異なる。サスペンション機構を備えた4輪駆動であり、農業用の部品を多く利用しているため、地震時の地盤の液状化等に対応できる。

新たに開発したノズルは、広角噴霧放水、ストレート放水、泡放射をノズルの形状切り替えだけで実現している。泡放射は、放水軌跡の安定性並びに泡発泡性状の両立を実現できるセミアスピレート方式を採用している。消防隊が所有する最大級のポンプで送水可能な放水量4000ℓ/min、放



写真3 放水砲ロボット一次試作機の概観

表3 放水砲ロボット一次試作機の概要

寸法	長さ:2.0m, 幅:1.4m, 高さ:2.2m
質量	1,600kg
走行方式	4輪駆動, 前輪操舵, バッテリー/モーター駆動, サスペンション機構
最高速度	時速約7.2km(2.0m/s)
搭載機器	カメラ, 熱画像カメラ, 風向風速計 燃焼ガス検知器, 放射熱量計
情報伝送 制御機器	有線(自動繰り出し, 巻き取り) 高精度GPS, 回転式レーザー距離計 車輪回転計, 慣性航法装置など
自律機能	電子地図上の指定位置への走行
耐放射熱	20.0kW/m ² (自衛噴霧機構付)
放水ノズル	放水:広角, ストレート 泡放射:セミアスピレート
その他	4,000ℓ/min, 1.0MPa(有効射程75m) 電子地図生成機能



写真4 ホース延長ロボット一次試作機の概観

表4 ホース延長ロボット一次試作機の概要

寸法	長さ:2.4m, 幅:1.8m, 高さ:2.2m
質量	2,800kg
走行方式	4輪駆動, 前輪操舵, バッテリー/モーター駆動, サスペンション機構
最高速度	時速約7.2km(2.0m/s)
搭載機器	カメラ, 燃焼ガス検知器, 放射熱量計
情報伝送 制御機器	有線(自動繰り出し, 巻き取り) 高精度GPS, 回転式レーザー距離計 車輪回転計, 慣性航法装置 ホース張力検出装置など
自律機能	電子地図上の指定位置への走行, ホースの敷設
協調連携	先行者(放水砲ロボット)追従走行
耐放射熱	放水砲ロボットと同程度
搭載ホース	直径150mmホース, 300m(耐放射熱)

水圧1.0MPaをノズルの仕様とした。

前節で説明した自律及び協調連携のうち、自律走行及び放水砲ロボットとホース延長ロボット協調追従走行については既の実現できている。また、自律走行においては、ある程度の大きさであれば、障害物の回避が可能である。走行型偵察・監視ロボットおよび放水砲ロボットには自律走行に使用する電子地図生成機能も組み込まれている。

5. 消防本部等における試験評価

完成させた各単体ロボットの一次試作機を、2ヶ所の消防本部に、それぞれ約2ヶ月間試験を依頼し、評価を行った。試験評価において認識された主な問題点についてここで紹介する。

一次試作では、ロボット単体を中心に試作を進

めたため、指令システムの作り込みが十分でなかった。自律走行で使用する電子地図を生成するためのデータ計測や補正、また、自律走行を行う指令の入力や状態の監視において、入力方法等の指摘を受けている。また、指令システムのコンソールを使用して遠隔操縦による走行も可能であるが、操縦方法の指摘を多く受けている。これらは主に、指令システムのソフトウェアの改良によって問題解決が可能と考えている。

試験評価を依頼した各消防本部管内の石油コンビナート企業の協力の下、石油コンビナート内での試験も実施した。これらの試験では、自律走行について、これまで認識されていなかった問題も明らかになっている。石油コンビナートにおける評価試験の様子の一例を写真5に示す。



写真5 石油コンビナートにおける試験評価の状況

石油コンビナート内は比較的平坦であると想定していたが、石油タンクに近接するために、流出油防止堤や大口径の配管を乗り越えるための斜路を通過する必要があることがわかった。一次試作機では、自律走行で使用する電子地図を平面地図

としているため、斜路を経路上の障害物と誤認識し、通過できない状況があった。そこでこの平面地図に高さ情報を埋め込み、経路の傾きを認識することによる問題解決を進めている。

このほかに、搬送車両への積載を考慮した、各ロボットの小型化、折りたたみ収納方式の導入等を進めている。また、放水砲ロボット及びホース延長ロボットと指令システムの通信ケーブルとして、耐放射熱性能が高いケーブルを開発したが、より安定した通信を実現するために、金属ケーブルから光ファイバーケーブルへ変更すること等の改良を進めている。

6. おわりに

試験評価の結果を基に消防ロボットシステムの再設計を行い、搬送車両も含め、現在、実戦配備が可能なタイプの研究開発を進めている。これまで進めてきた分散・協調・連携技術、自律化技術の研究成果を基に、実用可能なレベルに引き上げ、消防ロボットシステムへの組み込みを進めている。本年度（平成30年度）後半から、実戦配備タイプを用いて石油コンビナート内での試験を繰り返し実施し、本年度中に実戦配備タイプを完成させる。完成後は、消防本部に配備し、データを蓄積し消防本部にとって使いやすいロボットシステムに改良を進める計画である。完成時には、実戦配備する消防ロボットシステムの実演公開を予定している。