

3. 大規模倉庫・工場火災を想定した災害対応ロボットシステム

奥川雅之、倉橋奨、落合鋭充

1. はじめに

倒壊建物内のような狭隘閉鎖空間、多重事故が発生したトンネル内のような閉鎖空間、製油／製造プラントのような可燃性ガスの漏洩が問題となる場所で災害が発生した場合、迅速な被害状況調査、人命捜索や被災空間の環境測定など都市型捜索救助技術（USAR: Urban Search And Rescue）が消防隊員に必要とされる。一方で、半倒壊建物内では余震による天井や壁面の崩落や有害ガスの漏洩などにより誘発される爆発など、二次災害の危険がある環境下では、消防隊員の安全を守ることも重要な課題となる。また、ロボットにより取得した調査結果をデジタル化し保存することにより、客観的／定量的な調査が可能となり隊員の経験差や外的ストレスによる人的ミスの防止及び活動の迅速適切化が図られるとともに、調査結果を有機的に活用することにより多様な訓練シナリオ作成が可能となる。前述のような背景のもと、遠隔操縦型移動ロボットによる調査・捜索救助活動支援が期待されている。事故および災害現場への遠隔操縦型移動ロボット導入にあたり、現場でロボットの性能を最大限発揮するためだけでなく、現場で生じる種々のトラブルに対応するために、ロボット操縦者は、ロボットの概要、機能／性能および技術情報を理解するとともに、現場の状況（シナリオ）を想定した操縦訓練を行う必要がある。

本報告では、操縦者の育成および操縦訓練を目的としたロボット操縦トレーニング方法に関する検討結果について述べる。

2. 工場／倉庫火災対応に要求されるロボット性能

工場や倉庫のような低層大空間建屋での火災を想定し、火災発生初期段階における状況調査をロボットの主な役割として設定している。火災発生直後の大空間建屋内は、空気や煙の流れが急激に変化することや防火扉など開ける際、バックドラフトやフラッシュオーバーが発生し、その結果、爆発の誘発や、火災エリアの拡大につながることから、初動時の建屋内への進入はとても危険である。消防隊員が行っている熱画像カメラによる建屋内の温度計測やガス検知器による有害ガス測定を遠隔操縦型ロボットに代替させ、消防隊員の安全性を確保するとともに、火点や有害ガスなど危険物資の発見、建屋内における煙の状態、温度分布概略の把握（熱成層の把握）、要救助者の発見を行う。その後、現場にとどまり消防隊員の活動の様子を本部に配信するなどの支援を行う。

火災発生後は、300℃から500℃になる高温環境であるが、低層であれば、60℃から100℃程度であり煙も薄いため、全高の低い地上移動ロボットが有効である。以下に、想定したシナリオにおけるロボットの性能を挙げる。

（1）障害踏破性能、（2）空間温度測定／熱源探查性能、（3）有害ガス濃度測定性能、（4）通信障害対応性能

3. トレーニング方法の検討

3.1 標準試験法とトレーニング

米国アメリカ国立標準技術研究所（NIST, National Institute of Standards and Technology）のIntelligent Systems Divisionでは、災害対応ロボットの性能評価を目的とした試験方法に関する研究を行なっている¹⁾。消防隊員などユーザーが客観的にロボットの機能や性能を理解するため、災害対応ロボットの機能や性能を定量的に評価することを目的としている。いくつかの標準試験法を組み合わせることにより、シナリオに応じたミッショ

ンを設定することで、ロボット操縦者のトレーニングを行うことが可能となる。NISTが開発した標準試験法のいくつかがASTM（米国試験材料協会）により規格されており、それらを使ってトレーニングが行われている。今回、トレーニング法を検討するにあたり、NISTが提案する標準試験法のコンセプトに準拠することとした。



図1 ASTM主催ロボット操縦トレーニングの様子（カナダトロント警察）

3.2 障害踏破（Kレール／狭隘、Confined K-lane）



図2 プラント及び倉庫内の様子

本トレーニングは、操縦用端末画面に表示されるロボット搭載カメラ映像やセンサ情報をもとに遠隔操縦を行うための基本操作の訓練を目的とする。幅方向に空間的な制約のある直進走行、方向転換（旋回）および比較的に高さの低い段差踏破に関するものである。工場や倉庫内の走行路面は、図に示すように、コンクリート、グレーチング／チェッカープレートなどの材質が多く、対象となる障害物も比較的に高さの低いもの（10cm程度）が多い。そのため、本トレーニングでは、踏破対象として2×4材（断面寸法38mm×89mm）とし、ロボットの進行方向に対して平行および45度方向に配置する。また、幅方向の空間制約は、パイプフレームを用い通路幅が変更可能な柵を設ける。トレーニングフィールドの概要を図に示す。幅方向に制約のある通路を直進走行するとともに、障害を踏破する。その後、旋回し方向を変え、制限時間内に往復を繰り返す。本トレーニングでは、往復回数を評価項目とする。なお1区画は1.2m四方とする。

試験は、制限時間を30分とし、以下の図に示すようなルートで往復走行を繰り返す。途中で、スタックや走行不能状態になった場合は、スタート地点までロボットを戻し、走行を再開する。基本は、ロボットに搭載されたカメラ映像やSLAM情報のみによる遠隔操作とする（フィールド直視は禁止）。初心者の場合は、目視による遠隔操作でも良い。

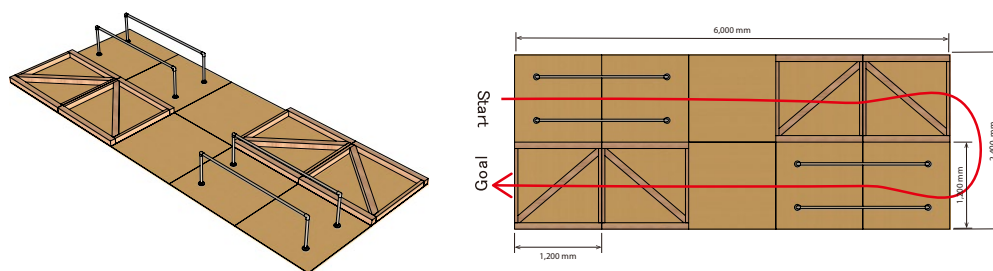


図3 障害踏破トレーニングフィールドおよび走行ルート



図4 障害踏破トレーニングフィールド試作

3.3 空間温度測定／熱源探査（パイプルーム、Temperature and Flashpoint Exploration）



図5 断熱評価試験風景

本トレーニングは、火災発生初期段階での倉庫又は工場内天井や壁面、設備などの表面温度の測定を目的とした訓練である。消防隊員の安全な進入のために、現状、消防隊員はハンドヘルドタイプの熱画像カメラで天井の表面温度を測り、その温度から低層の温度を推測しながら、建物内に進入すると聞いている。熱電対式の温度計などをロボットが搭載し低層（1 m～2 m程度の高さ）の空間温度を測定できれば、より正確な熱成層を把握することができる。しかし、空間温度測定に関する試験環境の準備は検討項目が多いため、今回は天井および壁面の表面温度測定のみとする。

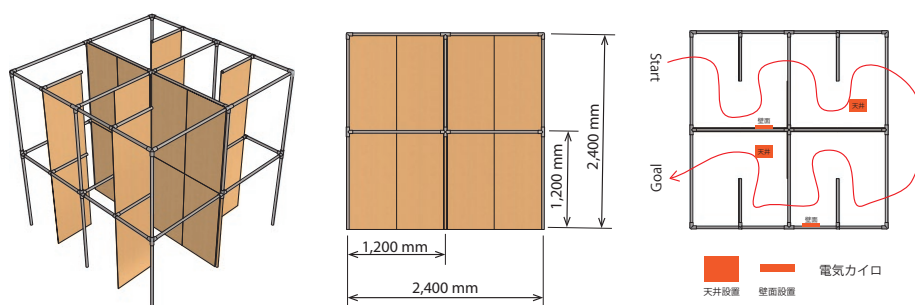


図6 熱源探査トレーニングフィールドおよび走行ルート

本トレーニングでは、天井面および壁面を再現するために、高さ2.4mのパイプフレームを用いた構造物内を移動しながら、電気カイロで再現した熱源周辺の表面温度を測定し、報告することとした。試験は、以下の図に示すようなルートで走行し、熱源を発見するとともに、その場所と高さ、温度を報告する。制限時間内での走行回数を記録する。その他は、障害踏破トレーニングに準拠する。

図7 熱源探索フィールド試作



3.4 総合トレーニング (Complex: Maneuvering/Flashpoint Exploration)

本トレーニングは、障害踏破及び熱源探索を複合した総合的なトレーニングである。倉庫内での火災初動時の調査活動をイメージしたものである。試験方法は、前述の障害踏破および熱源探索トレーニングに準拠する。

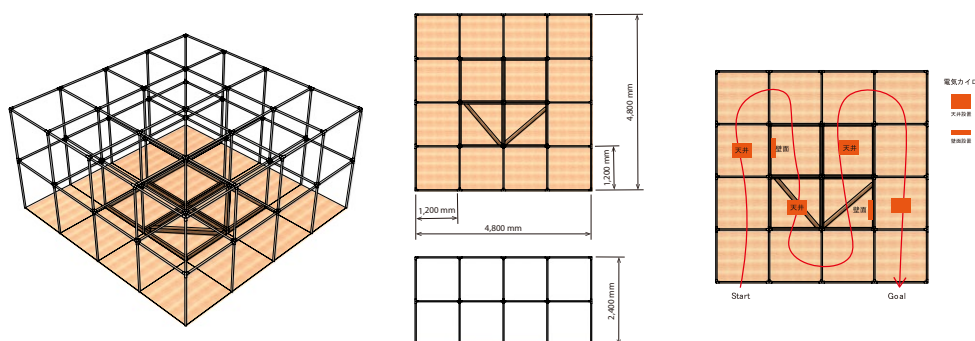


図8 総合トレーニングフィールドおよび走行ルート

4. まとめ

本報告では、工場や倉庫のような低層大空間建屋での火災発生初期段階における状況調査を行う遠隔操縦型ロボットの操縦者育成および操縦訓練を行うためのロボット操縦トレーニング方法について述べた。今年度は、想定しているロボットによる支援活動における特徴を分析し、要求される訓練項目を選定し、訓練コンセプトとフィールドデザインを含む訓練方法を検討し、トレーニングフィールドの試作を行った。

今後は、消防隊員によるトレーニングを行い、提案する訓練方法の有効性を検証するとともに、ロボットの概要、機能／性能および技術情報に関する座学を含むトレーニングカリキュラムの構築を行う予定である。

謝辞

本取り組みは豊田市ものづくり創造補助制度の支援を受けて行ったものである。関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 木村哲也, 災害対応ロボット・ドローンの実用化と標準性能試験法, 計測と制御, Vol.62, No.5, pp.260-263, 2023.
<https://doi.org/10.11499/sicejl.62.260>