

マイクロロボットによる被災地の要救護者探索においてマイクロロボットの性能や機能が目標発見に与える影響の評価

原田 稔[†] 小泉 佑揮[†] 渡部 康平[†] 大崎 博之[†] 今瀬 真[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: [†]{m-harada,ykoizumi,k-watabe,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし マイクロロボットと呼ばれる数センチメートルから数ミリメートル以下の小さなロボットの開発が進んでいる。医療や産業などの分野、または宇宙や被災地などの場所でのマイクロロボットの応用が検討されている。しかし、マイクロロボットを運用するにあたり、マイクロロボットの性能や機能が目標発見に与える影響は十分に議論されていないのが現状である。本稿では、被災地の要救護者探索に焦点をあて、マイクロロボットの性能や機能が目標発見に与える影響を評価する。シミュレーションにより、マイクロロボットの移動速度や目標検知範囲などの性能向上は目標発見率の上昇にほとんど寄与しないことがわかった。一方で、構造物の端を検出し下層への落下を確率的に選択する機能を付与することで、50%程度のマイクロロボット数で機能を付与しない場合と同等の目標発見率を達成できることがわかった。さらに、構造物の壁面を登る機能をマイクロロボットに付与した場合の目標発見率の上昇は顕著であることがわかった。ただし、構造物が空間を占める割合が低くなると、壁面を登る機能よりも構造物の端を検出する機能をマイクロロボットに付与した場合の方が、目標発見率が高くなる場合があることがわかった。

キーワード マイクロロボット、被災地、目標探索

On Evaluating the Effect of Micro-Robot Functionality on Target Discovery in Survivor Discovery Systems in Disaster Areas

Minoru HARADA[†], Yuki KOIZUMI[†], Kohei WATABE[†], Hiroyuki OHSAKI[†], and Makoto IMASE[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
Yamadaoka 1-5, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: [†]{m-harada,ykoizumi,k-watabe,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract With the development of a sub-centimeter or sub-millimeter scale robots called micro-robots, many applications of micro-robots, such as drug delivery systems, environmental monitoring systems, planetary exploration systems, and survivor discovery systems in disaster areas, are proposed. However, the effect of functionality or abilities of micro-robots on the performance of such applications is not discussed appropriately. In this paper, we focus on a survivor discovery systems in disaster areas, in which survivors are in rubble made by a broken building and micro-robots search for these survivors, among such applications and evaluate the effect of abilities and functionality of micro-robots on target discovery. Through simulation, we show that the improvements in the abilities of micro-robot, movement speed or target detection range, have the little effect on the target discovery ratio. In contrast, an additional function, which allows micro-robot to detect the edge of rubble and to determine whether or not to fall down lower layer of the rubble stochastically, enables to achieve the same target discovery ratio with about 50% of micro-robots compared to that without this function. Furthermore, adding the function of climbing wall of rubble greatly improves the target discovery ratio. We also show that the function detecting the edge of rubble outperforms the function climbing wall in the sparse rubble.

Key words Micro-robot, disaster area, target discovery system

1. はじめに

マイクロロボットと呼ばれる数センチから数ミリメートル以下の小さなロボットの開発が進んでいる。本稿では、数センチから数ミリメートル以下のロボットをマイクロロボットと呼び、それより大きなサイズのロボットを単にロボットと呼ぶ。障害物の検知やマイクロロボット同士の通信が可能な機能を備えた3 mm程度のマイクロロボット [1] や、大きさが1 mm以下の移動可能なマイクロロボット [2] などが開発されている。

マイクロロボットの応用先として、医療や産業などの分野、宇宙や被災地といった場所が検討されている [1,3-6]。例えば、医療の分野では、薬物を直接患部に届けるドラッグデリバリシステムへのマイクロロボットの応用が期待されている [3]。産業の分野では、工場のエラー検知、故障した機械の修理、細いパイプ内の点検や、大気中の成分や水質など環境モニタリングへの応用が考えられている [1,4]。宇宙開発では、大型の探査ロボットと多数のマイクロロボットを用いた惑星探査が検討されている [6]。さらに、文献 [5] では、地震やテロの被災地で瓦礫に埋もれた要救護者のマイクロロボットによる探索が検討されている。瓦礫内の探索は、大型のロボットでは困難であり、マイクロロボットは体積の小ささを活かして、瓦礫の中に埋もれた人を探索できると期待されている [5]。このように、多くの研究でマイクロロボットの応用が検討されており、マイクロロボットへの期待の高さがうかがえる。

多くのマイクロロボットの応用が検討されているものの、マイクロロボットを運用する際に要求される性能や機能に関しては、十分に議論されていないのが現状である。文献 [7] では、既存のマイクロロボットを用いて、マイクロロボット同士の協調行動による目標の探索に関する研究が行われている。マイクロロボット同士の協調行動による目標発見にかかる時間の変化について示されている。しかし、目標の探索にどの程度のマイクロロボットの移動速度や目標検知範囲が必要であるのか、または、どのような移動機構が必要なのかについては明らかにされていない。さらに、文献 [7] は2次元平面上の目標探索を対象としており、被災地の要救護者探索のような複雑な構造物内の探索は評価されていない。

本稿では、マイクロロボットによる被災地の要救護者探索に焦点を当て、マイクロロボットの性能や機能が目標発見に与える影響を評価する。はじめに、目標の発見に影響するマイクロロボットの要因を検討する。その中で、マイクロロボットの性能に属するマイクロロボットの移動速度やセンサーデバイスの目標検知範囲、または、マイクロロボットの機能に属する移動機能やフィールドの環境把握機能などマイクロロボットのハードウェアなど、マイクロロボットの技術開発に大きな影響を与えうる要素に焦点をあて、それらの目標発見への影響をシミュレーションにより評価する。

本論文の構成は以下の通りである。はじめに、2章でマイクロロボットに関する技術やマイクロロボットのアプリケーションを紹介し、3章でマイクロロボットによる目標の発見に影響するマイクロロボットの要素を議論する。次に、4章でシミュ

レーションによりマイクロロボットの性能や機能の目標発見への影響を評価する。最後に、5章で本論文のまとめと今後の課題を述べる。

2. マイクロロボット技術とアプリケーション

本章では、マイクロロボットに関する技術やマイクロロボットの応用について紹介する。

2.1 マイクロロボット技術

マイクロロボットの移動機構が数多く研究されており、これまでに匍匐、跳躍、飛行、および水泳などの移動機構を有したマイクロロボットが開発されている [1-3,8-10]。平面上を這って移動する匍匐には、振動を利用した移動方法 [1] や、ボディーの伸縮を利用した移動方法 [2] などが提案されている。ただし、匍匐では凹凸のある領域の移動は困難であり、昆虫のように壁を移動する技術や、跳躍による凹凸のある領域の移動が必要だと言われている [6]。文献 [8] では、138 cmの高さの跳躍力を有する5 cm程度のマイクロロボットが開発されている。さらに小型のロボットとして、文献 [9] では跳躍機能を有するミリメータサイズのマイクロロボットの開発も進められている。文献 [10] では、ロボットの胴の左右に取り付けられた羽の羽ばたきにより飛行するマイクロロボットの開発が進められている。水や血液中を移動するために、磁力によりマイクロロボットを移動させる技術も開発されている [3]。

移動機構以外にも、マイクロロボットの機能開発に関する研究が進められている。文献 [11] では、自身の重量の30倍以上に相当する2.5 gの物体の運搬が可能である15 × 5 mmのマイクロロボットが紹介されている。また、通信機能やプロセッサなどを有し協調行動などが可能な、I-SWARM [1] やJasmine [12] などのマイクロロボットも開発されている。

2.2 マイクロロボットのアプリケーション

マイクロロボットは、医療や産業などの分野、宇宙や被災地といった場所での応用が検討されている [1,3-6]。本章では、現在検討されているマイクロロボットの応用例を紹介する。

医療の分野では、マイクロロボットのドラッグデリバリシステムへの応用が検討されている。ドラッグデリバリシステムとは、体内で薬物が必要な箇所に集中して投薬し、体内の薬物の分布を量的、空間的、時間的に制御するシステムである [13]。文献 [3] では、マイクロロボットを用いて体内の患部に直接薬物を運搬および投与するフレームワークが提案されている。

産業の分野では、工場や細いパイプの点検へのマイクロロボットの応用が提案されている [4]。文献 [4] では、農場モニタリング、動物の生態モニタリング、大気モニタリング、機械内の回路の異常検出などのアプリケーションの可能性に言及している。文献 [14] では、マイクロロボットによる清掃が提案されており、清掃範囲内のゴミを複数のマイクロロボットに持ち帰らせるアプリケーションが検討されている。

未開の惑星探査や宇宙ステーション建設など宇宙開発にもマイクロロボットの応用が検討されている [6]。例えば、マイクロロボットによる惑星探査用ロボットの支援が提案されている。このアプリケーションでは、マイクロロボットが惑星探査

用ロボットの周辺を自律的に探索し、詳細な探索が必要な地点へローパーを誘導することが検討されている。

地震やテロなどの被災地では、マイクロロボットによる瓦礫に埋もれた人の探索が考えられている [5]。自然災害やテロの被災地は救護する側にとっても危険な地帯であり、二次災害を引き起こす可能性が高い。そのため、ロボットによる無人探索が有用である。文献 [15] では、危険地帯の救護活動にロボットの使用が検討されている。しかし、大型のロボットでは、瓦礫の中に埋もれた人の探索は困難であり、瓦礫の隙間に侵入可能なマイクロロボットを用いた要救護者探索が期待されている [5]。

本章では、紹介したマイクロロボットの応用の中でも被災地の要救護者探索に焦点を当て、目標発見に影響するマイクロロボットの要素を検討する。

3. 目標発見に影響するマイクロロボットの要素

本章では、マイクロロボットによる被災地の要救護者探索に焦点を当て、目標である要救護者を漏れなく迅速に発見するなどの要求条件に影響するマイクロロボットの要件を検討する。被災地の要救護者探索では、マイクロロボットが目標を発見し、発見した目標の情報を探索実施者へ伝達する [7]。本研究では、要救護者探索の第一段階である目標を発見する過程に焦点を当てる。目標を発見する過程では、目標の漏れのない迅速な発見が必要である。これに影響するマイクロロボットの要素は多岐に渡るため、本章で議論する。

目標を漏れなく迅速に発見する単純な方法として、目標の探索に大量のマイクロロボット投入が挙げられる。文献 [7] では、マイクロロボットの投入台数を増やすことで、全目標発見までの時間が減少することが示されている。これは、被災地の要救護者探索でも大量のマイクロロボットにより、前述の要求を満たせる可能性を示唆している。ただし、マイクロロボットの投入台数に比例して、マイクロロボットの調達コストも増加する。したがって、目標発見の要求を満たすために必要なマイクロロボットの投入台数の評価は重要な一つの課題である。

マイクロロボットの投入台数以外に、マイクロロボットの移動速度や目標検知範囲といった性能が目標の発見に影響を与える可能性がある。目標の発見に迅速さが要求される状況では、マイクロロボットの移動速度が速いほど目標の迅速な発見が期待できる。さらに、センサーデバイスの目標検知範囲が大きいほど、漏れのない目標発見が期待できる。マイクロロボットのハードウェアの開発は盛んに行われており [1-3, 8-10]、マイクロロボットの性能が目標発見効率に与える影響を明らかにすることは、マイクロロボットを開発する指針として有用である。

マイクロロボットのモビリティも目標発見に影響を与える要因の一つである。モビリティが目標発見に与える影響はこれまでも研究されている [16, 17]。文献 [16] では、Random Walk と Lévy Flight モビリティモデルを用いた場合の探索効率を比較し、Lévy Flight は Random Walk より探索効率が優れていることを示している。Random Walk は移動方向と移動距離をランダムに決定し別の地点への移動を繰り返すモデルであり、Lévy Flight は Random Walk の移動距離がべき分布に従う

モデルである。これらの知見はマイクロロボットを用いた目標探索でもモビリティが重要な要素であることを示唆している。

マイクロロボットの移動範囲は、フィールドの環境とその環境の把握能力、および、マイクロロボットの移動機構に影響を受ける。フィールドとは、例えば被災地の建物が倒壊した瓦礫などである。瓦礫などの構造物内をマイクロロボットが移動する場合、多くの障害物や落下する場所が存在すると考えられる。このようなフィールドでは、障害物への衝突や落下によりマイクロロボットが移動できる領域が制限される。瓦礫の中を探索することを考えると、壁面を移動する機能 [18] やジャンプする機能により、移動の制約を軽減できる。壁面を移動する機能などを持たないマイクロロボットでも、赤外線センサーなどによりフィールドの環境が把握できると、障害物への衝突や落下を避けることができる。例えば、落下位置を検知し構造物の下部への落下を避けることで、構造物内の未探索の領域を減少させることができる。

探索に複数のマイクロロボットが投入することを考えると、個々のマイクロロボットの性能以外に、マイクロロボット同士の協調行動も目標の発見に影響を与える重要な要素になり得る。例えば、個々のマイクロロボットが独立して探索を実施する、複数のマイクロロボットが同じ領域を探索する冗長な探索が発生するが、マイクロロボットの協調行動によりこの問題を回避することが可能である。文献 [19] では、能力の低い原始的なロボットを用い、楕円、同心円、多角形などの隊列を自己組織的に形成する方法が提案されている。このようなロボットの隊列形成を応用することで、冗長な探索の影響を軽減できる可能性がある。文献 [7] では、協調行動するマイクロロボットによる目標探索が研究されている。マイクロロボット同士の距離が近いと反発することで、全目標の探索にかかる時間を削減している。このように、協調行動を応用することで個々のマイクロロボットを単独で運用する場合と比較して効率的な目標発見を実現できる可能性がある。

本研究では、マイクロロボットの移動速度や目標検知範囲などの性能や、マイクロロボットの移動機構やフィールドの環境把握機能など、マイクロロボットの技術開発に大きな影響を与えるハードウェアに関連する側面に焦点を当て、それらの機能が目標発見に与える影響を評価する。

4. マイクロロボットの性能や機能が目標発見に与える影響の評価

本章では、シミュレーションにより、ビルなどが倒壊した瓦礫を想定した構造物内の目標探索において、マイクロロボットの性能や機能が目標の発見率に与える影響を評価する。

4.1 シミュレーションの概要と性能指標

本評価では、ビルの倒壊を想定し、フィールドの大きさを $50\text{ m} \times 20\text{ m} \times 5\text{ m}$ 、目標の大きさを $150 \times 50 \times 20\text{ m}$ とする。探索範囲の3次元フィールドを直方体に分割したものをセルとして、隣接する複数のセルによって構造物や目標を表現する。セルの大きさは $10 \times 10 \times 5\text{ cm}$ とする。

図1に、本シミュレーションの構造物の生成方法を示す。

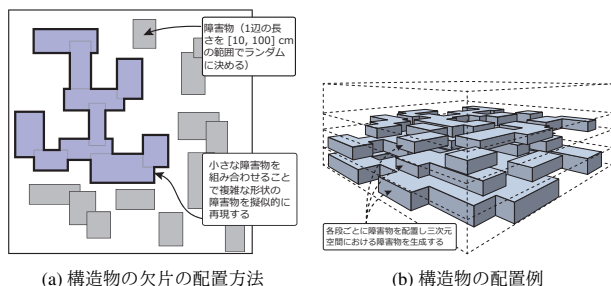


図1 シミュレーション評価における構造物の作成方法の概要

図1(a)に示すように、高さ5 cmの構造物の欠片をフィールドの一段目に配置する。この構造物の欠片は、縦横の長さを10 cmから100 cmの間でランダムに決定する。構造物の欠片を組み合わせることで複雑な形状の瓦礫を擬似的に再現する。指定した割合だけ構造物の欠片が埋まるまで、構造物の欠片を配置する。この構造物の欠片がフィールドを占める割合を空間占有率と呼ぶ。二段目以降は、構造物の欠片が浮遊することを避けるため、配置する構造物の下段に1セル分は構造物が存在する条件で、一段目と同様に構造物の欠片を配置する。図1(b)は、上記の手順を3段目まで実行した例である。これを3次元フィールドの高さだけ繰り返す。本研究では、構造物の複雑さを表すため、構造物の各段の空間占有率に10%の幅を持たせて一様にランダムに構造物の欠片を生成する。構造物全体の空間占有率を平均空間占有率と呼ぶ。

マイクロロボットは構造物や目標のない空のセルを移動する。マイクロロボットの移動には、探索効率が良くとされているLévy Flightモビリティモデルを利用する[16,17]。ただし、マイクロロボットが落下により裏返り動けなくなる可能性について本シミュレーションは考慮しない。マイクロロボットの移動機構は多く開発されており、裏返った状態から元に戻る事が可能であるマイクロロボットも開発可能であると考えている。

評価指標として目標発見率を利用する。これは、発見すべき全探索目標に対する24時間以内にマイクロロボットにより発見できた探索目標の割合である。人は生き埋めになってから24時間以上経過すると急激に生存率が低下するとされているため、24時間以内の発見を目標とする。本評価では10回のシミュレーション評価の平均値を評価値として用いる。

4.2 構造物内3次元フィールドにおけるマイクロロボットの機能や性能が目標発見に与える影響の評価

はじめに、マイクロロボットの性能が目標発見におよぼす影響を評価する。マイクロロボットは、水平方向の移動と落下によってのみ移動するものとし、移動速度と目標検知範囲を変化させる。構造物の平均空間占有率を65%とする。図2にマイクロロボットの移動速度に対する目標発見率の変化を示す。横軸はマイクロロボットの投入台数、縦軸は目標発見率である。マイクロロボットの移動速度を10倍にしても、マイクロロボットの投入台数が同じ場合、最大0.1%目標発見率が上昇するのみである。次に、図3にマイクロロボットの目標検知範囲に対する目標発見率の変化を示す。横軸と縦軸は図2と同じであり、各

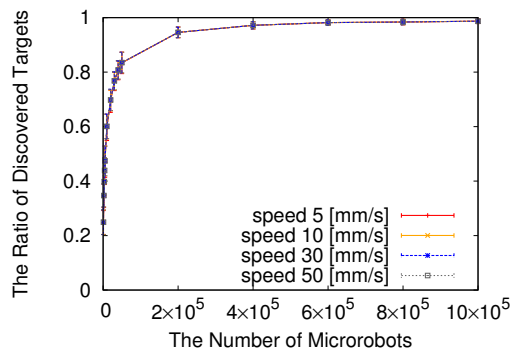


図2 マイクロロボットの移動速度に対する目標発見率の変化

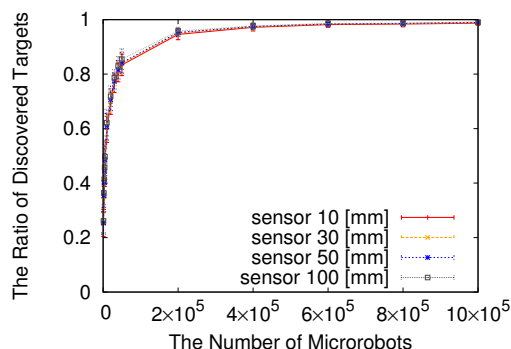


図3 マイクロロボットの目標検知範囲に対する目標発見率の変化

線はマイクロロボットの目標検知範囲を表す。この場合も、マイクロロボットの目標検知範囲を10倍にしても、同じマイクロロボット投入台数時の目標発見率の上昇は最大で2.5%である。マイクロロボットの性能向上が目標発見率の向上に寄与しない要因を調査するため、時間経過と構造物のくぼみに落ちたマイクロロボット数の関係を図4に示す。構造物のくぼみとは、四方を構造物に囲まれた領域である。横軸は評価開始からの経過時間、縦軸は構造物のくぼみに落下したマイクロロボット数である。図4より、探索開始から10時間後には、95%以上のマイクロロボットが構造物のくぼみに落下している。このように、複雑な構造物内では、早い段階で探索に寄与するマイクロロボットの数が大幅に減少する。したがって、マイクロロボットの性能向上が目標発見率の改善に与える影響は小さい。そのため、マイクロロボットの性能を向上する以外に、構造物のくぼみに落ちない、もしくは落ちた場合でもそのくぼみから抜け出すための機構をマイクロロボットに付与する必要がある。

次に、マイクロロボットへの機能付与による目標発見率への影響を示す。図5に、図2と同様、マイクロロボットの投入台数と目標発見率の関係を示す。図の“edge reflect”は構造物の端を検出し、構造物の1つ下の層への落下を遅らせる機能を付与した場合の結果である。以降、この機能をエッジ機能と呼ぶ。エッジ機能では、マイクロロボットが落下してから一定時間経過するまで、構造物の下層へ落下しないものとする。もちろん、下層への落下を確率的に選択する方法も考えられるが、評価の結果、落下までの時間を遅らせる方法の方が目標発見の効率が良いことがわかっている。紙面の都合上、この結果は省略

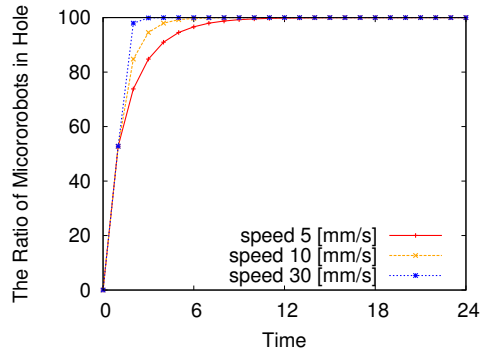


図4 構造物のくぼみに落ちたマイクロロボット数の時間変化

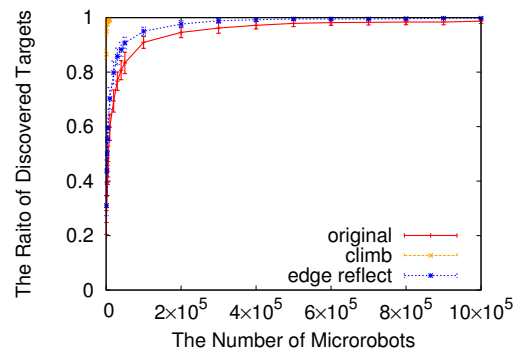


図5 マイクロロボットへの機能付与した場合のマイクロロボット投入台数に対する目標発見率の変化

する。図の“climb”は壁面を登る機能を付与した場合の結果である。壁を登る機能を備えたマイクロロボットが構造物の壁に当たると、必ず壁を登るものとする。また、“original”はこれらの機能を付与しない場合の結果である。機能を付与しないマイクロロボットで99%以上の目標発見率を達成するためには、100万台以上のマイクロロボットが必要である。これに対して、エッジ機能を付与したマイクロロボットを用いた場合は50万台、さらに、壁を登る機能を付与した場合は5千台のマイクロロボットで、同等の目標発見率を実現できることがわかる。この条件での、構造物のくぼみに落下したマイクロロボット数と経過時間の関係を図6に示す。図6より、エッジ機能の付与により、マイクロロボットが構造物のくぼみに落ちるまでの時間が長くなっていることがわかった。

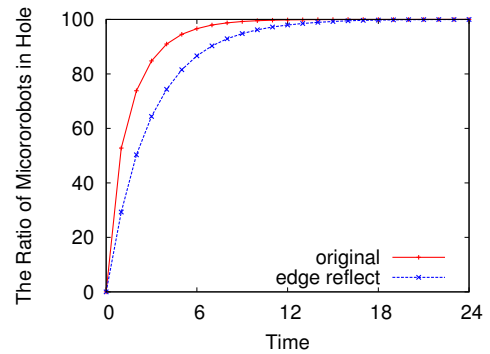


図6 マイクロロボットにエッジ機能を付与した場合の構造物のくぼみに落ちたマイクロロボット数の時間変化

次に、マイクロロボットによる目標発見の状況を調査するために、探索開始から24時間が経過するまでに発見した目標の累積数を図7に示す。本評価では、マイクロロボットの投入台数は1万台とする。横軸は構造物の最上層からの深さ、縦軸は累積目標発見数である。これまでの評価から壁を登る機能を付与した場合は、1万台のマイクロロボットでほぼ100%の目標を発見できることがわかっており、累積目標発見数が線形に増加することと矛盾しない。これに対して、機能を付与しない場合とエッジ機能を付与した場合は、累積目標発見数が上に凸になっている。これは、構造物の下層にある目標の発見数が少ないことを示している。機能を付与しない場合と比較して、エッジ機能を付与した場合は構造物の下層付近の目標の発見数が増加していることがわかる。これは、マイクロロボットが構造物のくぼみに落ちるまでの時間が長くなることで、目標の探索に寄与する時間が増え、構造物内で探索した領域が広がっているためである。すなわち、マイクロロボットによる被覆率が高くなっている。機能を付与しない場合と比較すると、エッジ機能の付与により被覆率が10.2%向上することがわかった。

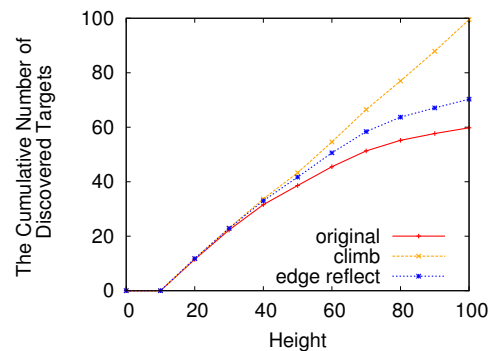


図7 探索開始から24時間後の構造物の各層に存在する発見した目標の累積数

最後に、構造物の構成の違いによるマイクロロボットの機能が目標発見に与える影響を調査する。瓦礫を構成する物体（例えば木材や鉄筋など）によって、瓦礫内にできる空間の大きさは異なる。これまでの評価では、平均空間占有率が65%としてきたが、この値を55%、45%、35%の3通りに変化させた場合のマイクロロボット投入台数と目標発見率の関係を図8に示す。平均空間占有率が小さくなるにつれて構造物のくぼみの数が少

なくなるため、平均空間占有率65%の場合に比べると、マイクロロボットの投入台数が少ない場合でも同等の目標発見率を実現できる。平均空間占有率が35%の場合は、これまでの評価結果と異なり、マイクロロボットの投入台数が少ない領域では、エッジ機能を付与した方が壁を登る機能を付与した場合よりも目標発見効率が良いことがわかる。これは、平均空間占有率が小さいと構造物の下層へ落下しやすくなるため、エッジ機能を用いた場合や機能を付与しない場合でも目標を発見しやすいためである。また、壁を登る機能を用いた場合は構造物の下層部分に到達するまでの時間がかかる。そのため、マイクロロボットの投入台数が少ない場合は、他の2つの結果と比べると壁を登る機能を用いた場合の探索効率が相対的に悪化している。

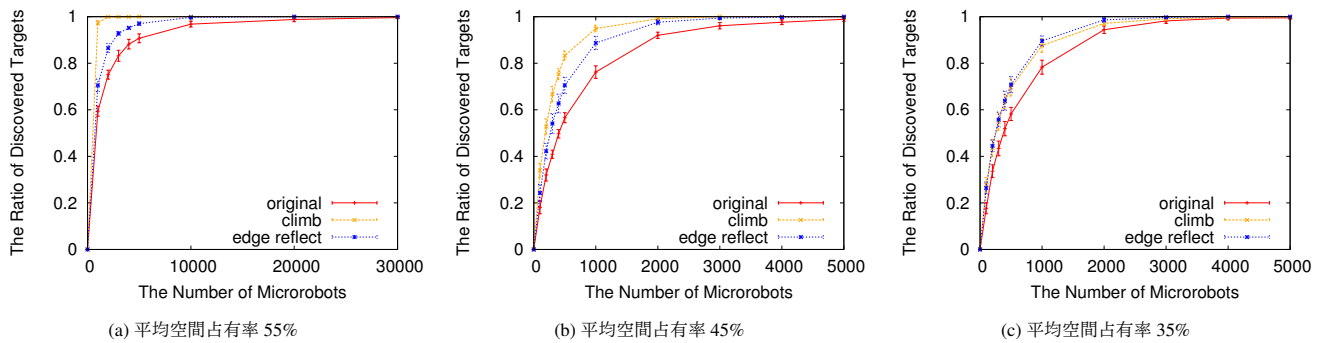


図8 平均空間占有率を変化させたときのマイクロロボットの投入台数に対する目標発見率の変化

5. おわりに

本稿では、マイクロロボットによる要救護者探索に焦点を当て、マイクロロボットの性能や機能が目標発見に与える影響を評価した。シミュレーションにより、移動速度や目標検知範囲の性能向上は、目標発見効率向上にほとんど寄与しないことを示した。マイクロロボットが構造物のくぼみに落下し、目標探索に寄与するマイクロロボット数が大幅に減少してしまうことが主な要因である。これに対して、マイクロロボットに構造物の端を検出し構造物の下層に落下するまでの時間を遅らせる機能を付与した場合は、機能を付与しない場合の50%程度のマイクロロボット数で99%以上の目標を発見でき、構造物の壁面を登る機能を付与することで、より少ないマイクロロボット数でも同程度の目標発見率を達成できることがわかった。

本稿では、マイクロロボットを用いた目標探索における最初の評価として、個々のマイクロロボットが独立して目標を探索する場合の評価を実施した。3章で述べた通り、マイクロロボット同士が協調することでさらに目標発見効率を向上できる可能性がある。そこで、目標発見のためのマイクロロボットの協調方法を検討することは、今後の一つの研究課題である。

文献

- [1] E. Edqvist, N. Snis, R. C. Mohr, O. Scholz, P. Corradi, J. Gao, A. Dieguez, N. Wyrsh, and S. Johansson, "Evaluation of building technology for mass producible millimetre-sized robots using flexible printed circuit boards," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, June 2009.
- [2] B. R. Donald, C. G. Levey, C. D. Mcgray, I. Paprotny, and D. Rus, "An untethered, electrostatic, globally controllable MEMS micro-robot," *Microelectromechanical Systems*, vol. 15, pp. 1–15, Feb. 2006.
- [3] S. M. Jeon, G. H. Jang, H. Choi, S. H. Park, and J. O. Park, "Utilization of magnetic gradients in a magnetic navigation system for the translational motion of a micro-robot in human blood vessels," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, pp. 2403–2406, Oct. 2011.
- [4] M. Takeda, "Applications of MEMS to industrial inspection," in *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 182–191, Jan. 2001.
- [5] J. H. Cho and M. G. Arnold, "Survivor search using a quasi-2D-parallax algorithm with massive microrobot swarms," in *Proceedings of the 14th WSEAS International Conference on Systems*, pp. 522–525, 2010.
- [6] P. Corradi, A. Menicciassi, and P. Dario, "Space applications of micro-robotics: A preliminary investigation of technological challenges and scenarios," in *Proceedings of the 5th Round Table on Micro/Nano Technologies for Space*, 2005.
- [7] D. K. Sutanty, S. Kernbach, P. Levi, and V. A. Nepomnyashchikh, "Multi-robot searching algorithm using lévy flight and artificial potential field," in *Proceedings of IEEE International Workshop on Safety Security and Rescue Robotics*, pp. 1–6, July 2010.
- [8] M. Kovac, M. Fuchs, A. Guignard, J.-C. Zufferey, and D. Floreano, "A miniature 7g jumping robot," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 373–378, May 2008.
- [9] S. Bergbreiter and K. S. J. Pister, "Design of an autonomous jumping microrobot," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 447–453, Apr. 2007.
- [10] N. O. Perez-Arancibia, K. Y. Ma, K. C. Galoway, J. D. Greenberg, and R. J. Wood, "First controlled vertical flight of a biologically inspired microrobot," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 6, no. 3, p. 036009, 2011.
- [11] T. Ebefors, J. U. Mattsson, E. Kalvesten, and G. Stemme, "A walking silicon micro-robot," in *Proceedings of the 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 1202–1205, June 1999.
- [12] S. Kornienko, O. Kornienko, and P. Levi, "Minimalistic approach towards communication and perception in microrobotic swarms," in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2228–2234, Aug. 2005.
- [13] B. J. Nelson, I. K. Kaliakatsos, and J. J. Abbott, "Microrobots for minimally invasive medicine," *Annual Review of Biomedical Engineering*, vol. 12, pp. 55–85, Apr. 2010.
- [14] P. Valdastrì, P. Corradi, A. Mencicassi, T. Schmickl, K. Crailsheim, J. Seyfried, and P. Dario, "Micromanipulation, communication and swarm intelligence issues in a swarm microrobotic platform," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, no. 10, pp. 789–804, 2006.
- [15] A. Jacoff, E. Messina, and J. Evans, "A standard test course for urban search and rescue robots," in *Proceedings of Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*, pp. 499–503, Aug. 2000.
- [16] G. M. Viswanathan, V. Afanasyev, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. G. E. D. Luz, E. P. Raposo, and H. E. Stanley, "Lévy flights in random searches," *Journal of Physics A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 282, no. 1, pp. 1–12, 2000.
- [17] G. M. Viswanathan, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. G. D. Luz, E. P. Raposo, and H. E. Stanley, "Optimizing the success of random searches," *Nature*, vol. 401, no. 6756, pp. 911–914, 1999.
- [18] C. Menon, M. Murphy, M. Sitti, and N. Lan, *Space exploration — towards Bio-Inspired Climbing Robots*, vol. 544, ch. 16, pp. 262–278. InTech, Sept. 2007.
- [19] M. Mamei, M. Vassirani, and F. Zambonelli, "Experiments of morphogenesis in swarms of simple mobile robots," *Applied Artificial Intelligence*, vol. 18, pp. 903–919, Aug. 2004.