

2026 年 9 月 4 日

兵庫県立大学

立ち往生したロボットを道しるべに変える群ロボットナビゲーション
—数の力で未知環境を進むシンプルなアルゴリズム “BYCOMS” を提案—

● 研究の概要

兵庫県立大学，大阪大学，東京大学，北海道科学大学，大阪工業大学の共同研究グループは，カメラや LiDAR などのセンサではロボットが通行できるかどうかを事前に判断できない未知環境を対象として，群ロボットの数の力を活用する新しいナビゲーション手法を提案しました．

一般的なロボットナビゲーションでは，周辺環境をカメラや LiDAR によって観測し，地図を作成したうえで，障害物を避ける経路を生成します．しかし，表面は乾いて見えるものの実際には車輪が沈み込む泥濘地，月面を覆うレゴリス，落ち葉によって隠された窪地などでは，外観や距離情報だけからロボットが通行可能かどうかを判断することは困難です．

本研究では，未知環境においてロボットが立ち往生することを避けられない事象として受け入れ，立ち往生したロボットを後続ロボットのナビゲーションに活用するという，新しい発想を導入しました．提案手法を，**BYCOMS (BYpassing COmpanions Method for Swarm robot navigation) **と呼びます．

BYCOMS では，各ロボットは目的地の方向へ進みながら，周囲にいる他のロボットを避けます．先に出発したロボットが通行不能領域の境界で立ち往生すると，後続のロボットはそのロボットを迂回します．同じ過程を多数のロボットが繰り返すことで，立ち往生したロボットが通行不能領域の境界を示す道しるべとなり，後続のロボットが通行可能な経路を見つけます．

本研究では，BYCOMS による目的地への到達可能性を数学的に示すとともに，数値シミュレーションおよび音場を利用した実機実験によって，提案手法の有効性と実現可能性を検証しました．論文中の概念図では，通行不能領域に停止したロボットを後続ロボットが順次迂回し，最終的に目的地へ到達する過程が示されています．

● 研究の背景

災害現場，山林，砂地，軟弱地盤，月面などの未知環境では，人間の代わりに探索や物資輸送を行う移動ロボットの活用が期待されています．このような環境でロボットを目的地まで移動させるためには，周囲を観測し，通行困難な場所を特定し，安全な経路を生成する能力が必要です．

従来は，カメラやLiDARを用いたSLAMによって環境地図を作成する方法，障害物の壁面に沿って移動するBugアルゴリズム，人工ポテンシャル法，強化学習など，さまざまなナビゲーション手法が研究されてきました．また，複数のロボットが協力して地図を作成したり，通信ネットワークを維持したりする群ロボットシステムも提案されています．

しかし，従来研究の多くは，壁や岩など，カメラや距離センサで形状を観測できる障害物を対象としています．実際の自然環境には，見た目からは通行できそうでも，ロボットが進入して初めて通行不能であることが分かる領域が存在します．そのため，環境を事前に完全に観測し，立ち往生を完全に防ぐことには限界があります．

また，群ロボットシステムでは，ロボットの台数が増えるほど，通信量の増加，制御の同期，衝突回避，役割分担などが複雑になるという課題があります．そこで本研究では，個々のロボットに高度な環境認識や複雑な協調制御を持たせるのではなく，単純な機能を持つ多数のロボットによって，群全体として未知環境を突破することを目指しました．論文では，この問題を，カメラやLiDARなどでは通行可能性を判定できない閉領域が存在する二次元平面上のナビゲーション問題として定式化しています．

● 研究の内容

1. 立ち往生したロボットを活用する BYCOMS

BYCOMS では，複数のロボットをスタート地点から順次移動させます．各ロボットが持つ基本的な機能は，次の二つです．

1. 目的地の方向を知り，目的地へ向かって移動する機能
2. 周囲のロボットの相対位置を検知し，そのロボットを迂回する機能

図(A)に示すように，ロボットはスタートからゴールに向かっていきます．システムの目的は，有限時間内に少なくとも1台のロボットがゴールへ到達することです．その道中にロボット(ロボットの設計者)が認識できないロボットの進行不可能領域(青色領域)が存在し，その境界にロボットが進入すると，ロボットは立ち往生して停止してしまいます．図(B)に示すように，最初のロボットは目的地へ向かって進みますが，センサでは認識できない通行不能領域に進入すると，その境界で立ち往生します．次のロボットは，立ち往生したロボットを避けながら目的地へ向かいます．そのロボットも立ち往生する可能性があります．ロボットが順次配置されることで，停止したロボットが通行不能領域の位置や境界を既知化していき後続ロボットに間接的に伝えます．

この仕組みでは，各ロボットは通行不能領域そのものを観測する必要がありません．さらに，自身や他のロボットが立ち往生しているかどうかを明示的に判定する必要もなく，複雑な情報通信も不要です．単純に「目的地へ向かう」「周囲のロボットを避ける」という

行動を継続することで、群全体として経路が形成されます。

2. 目的地への到達可能性を数学的に証明

本研究では、スタート地点から目的地まで少なくとも一つの通行可能な経路が存在し、通行不能領域の境界の長さが有限であるなどの条件の下で、BYCOMS を用いる群ロボットのうち少なくとも 1 台が有限時間内に目的地へ到達できることを数学的に示しました。立ち往生した各ロボットは、後続ロボットが避ける小さな領域を形成します。ロボットが順次立ち往生すると、これらの回避領域が通行不能領域の境界を徐々に覆います。境界の長さは有限であるため、有限台のロボットによって境界が覆われた後は、後続ロボットが通行不能領域に入らない経路を選び、目的地へ到達できるという考え方です。

3. 仮想ポテンシャル場を用いた数値シミュレーション

BYCOMS を具体的に実装するため、周囲のロボットが作る仮想ポテンシャル場を利用しました。ロボットは通常時には目的地へ直進し、周囲のロボットが形成するポテンシャル場を検知すると、その等高線に沿うように移動して相手を迂回します。相手を十分に回避した後は、再び目的地へ向かいます。

図(C)に示すように、ランダムに生成した多数の未知環境を用いてシミュレーションを行い、ロボットが他のロボットを避ける距離と、通行可能な経路の幅との関係を調べました。その結果、回避距離が通路幅より小さい場合に目的地へ到達しやすいことが確認されました。一方、回避距離を小さくすると成功率は高くなるものの、目的地への到達に必要なロボット数と時間が増えるというトレードオフも明らかになりました。また、ロボットが計測するポテンシャル場の強さと勾配方向にノイズを加えたシミュレーションでも、多くの条件で成功率が大きく低下しませんでした。これにより、BYCOMS が局所的なセンサノイズに対して頑健であることを示しました。

4. 音場を利用した群ロボットによる実機実験

提案する BYCOMS の実世界実現性を示すために、ロボット群を用いた実機開発を行いました。開発した移動ロボットを図(D)に示します。仮想ポテンシャル場を実世界で表現するため、本研究では音を利用しました。開発した移動ロボットには、スピーカーと円形に配置した 6 個のマイクロフォンが搭載されています。各ロボットはスピーカーから音を発生し、別のロボットは複数のマイクロフォンで測定した音の強さの差から、音場の勾配方向を推定します。移動中のロボットは、周囲のロボットが発する音が弱い場合には目的地へ向かい、音が一定以上強くなると音場の勾配に対して横方向へ移動することで、周囲のロボットを迂回します。また、各ロボットが異なる周波数の音を発し、高速フーリエ変換を用いて他のロボットが発した音を抽出することで、自分自身の音や機体振動の影響を抑えています。実機を用いたナビゲーション実験では、先行するロボットが停止した後、後続のロボットがそのロボットの作る音場を検知して迂回する動作を確認しました。これにより、BYCOMS の基本原理が実際のロボットシステムでも実現可能であることを示しました。

● 本研究の特徴

本研究の主な特徴は、次の3点です。

1. ロボットの立ち往生を失敗ではなく、環境情報として利用した点。

事前に通行可能性を判断できない未知環境では、立ち往生を完全に避けるのではなく、立ち往生したロボットの位置を後続ロボットが利用します。

2. 各ロボットに高度な知能や複雑な通信を必要としない点。

各ロボットは、目的地の方向と周囲のロボットの位置だけを利用します。環境地図の作成、通行不能領域の認識、立ち往生判定、複雑なロボット間通信を必要としません。

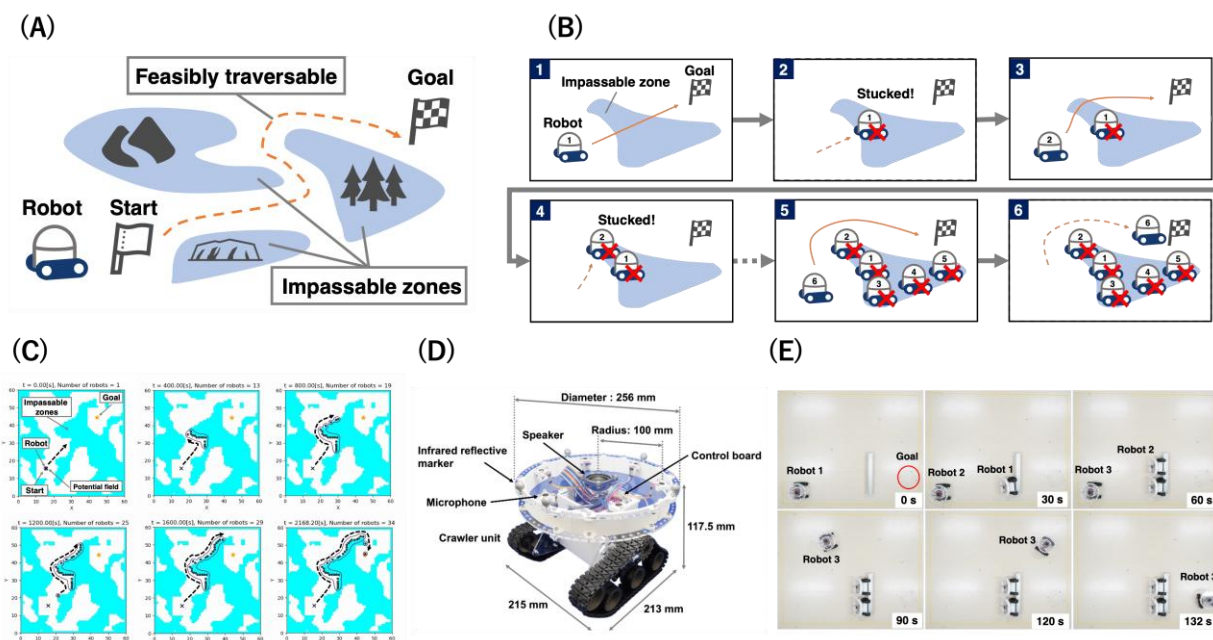
3. 数の増加をシステムの複雑化ではなく、問題解決能力の向上に直接結び付けた点。

通常の群ロボットシステムでは台数の増加によって通信や協調制御が複雑になりますが、BYCOMS ではロボットが増えるほど、通行不能領域に関する情報が環境中に蓄積され、目的地へ到達できる可能性が高まります。

● 研究の展望

今後は、より少ない台数のロボットで効率的に目的地へ到達するため、個々のロボットの移動性能と、群全体として必要となるロボット数との関係を明らかにします。また、車輪の回転量を計測するエンコーダや、機体の傾きを計測する慣性センサを搭載し、各ロボットが自身の立ち往生状態を判断できる仕組みを導入する予定です。立ち往生していないロボットは周囲から避けられる場を、立ち往生したロボットは後続ロボットを導く場を形成するなど、ロボットの状態に応じて異なる情報を発信することで、必要なロボット数の削減を目指します。さらに、多数の小型・簡易ロボットを開発し、U字形の領域や多数の障害物によってデッドロックが生じる環境、通行不能領域の形状が時間とともに変化する環境への拡張を進めます。GPS などを用いてロボットの相対位置と目的地方向を取得し、実際の屋外未知環境において自律分散型 BYCOMS の検証を行う予定です。

将来的には、災害現場における探索、軟弱地盤や山林での環境調査、月面・惑星表面で



の探査など，人間が環境を事前に十分把握できず，高価なロボット 1 台を投入することが難しい場面への応用が期待されます．

● 用語説明

※1 群ロボットシステム

多数の比較的単純なロボットが，局所的な情報や相互作用に基づいて協調し，群全体として一つの目的を達成するシステムです．

※2 未知環境

ロボットや操作者が，地形，障害物，通行可能な領域などを事前に十分把握できない環境です．本研究では，特にカメラや LiDAR などから得られる外観・距離情報だけでは通行可能性を判断できない環境を対象とします．

※3 LiDAR

レーザー光を周囲に照射し，反射光から物体までの距離や周辺形状を計測するセンサです．

※4 立ち往生

ロボットが泥濘地や窪地などの通行不能領域に入り，それ以上移動できなくなる状態です．

※5 ポテンシャル場

ロボットの移動方向を決めるために，目的地や障害物の周囲に仮想的な場を設定する方法です．本研究では，周囲のロボットが作る場に沿って移動することで，ロボット同士の回避を実現します．

※6 音場

空間内に形成される音の強さの分布です．複数のマイクロフォンで音の強さを測定することで，音が強くなる方向，すなわち音場の勾配方向を推定できます．

● 関連動画

Summary movie of the paper by Yusuke Tsunoda et al. in Robotics and Autonomous Systems (2026)

<https://youtu.be/MvyDxpypA7s>

● 謝辞

This research was supported in part by grants-in-aid for Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) KAKENHI Grant Number JP22K14277, JP24H01439, JP25K17629, and JST Moonshot Research and Development Program JPMJMS2032 (Innovation in Construction of Infrastructure with Cooperative AI and Multi Robots Adapting to Various Environments).

● 論文情報

本研究成果は，Elsevier 社が発行する国際学術雑誌「Robotics and Autonomous Systems」にオンライン掲載されました．

雑誌名 : Robotics and Autonomous Systems,

巻 : 198,

論文番号 : 105329,

オンライン公開日 : 2026 年 1 月 8 日,

DOI : 10.1016/j.robot.2026.105329,

タイトル : Power in numbers: Primitive algorithm for swarm robot navigation in
unknown environments

著者 : Yusuke Tsunoda*, Shoken Otsuka, Kazuki Ito, Runze Xiao, Keisuke Naniwa,
Yuichiro Sueoka and Koichi Osuka

*: Corresponding Author

【研究に関するお問い合わせ】

兵庫県立大学 大学院工学研究科 工学専攻 機械工学分野

角田 祐輔 助教

E-mail: tsunoda@eng.u-hyogo.ac.jp

【広報に関するお問い合わせ】

兵庫県立大学姫路工学キャンパス・総務課

南葉忠彦 (ナンバ タダヒコ)

TEL: 079-267-4805

E-mail: tadahiko_namba@ofc.u-hyogo.ac.jp