

ブラジルナッツ効果を応用した楕円形群ロボットによる物体搬送システム

Object Transport System Using a Swarm of Elliptical Robots Based on the Brazil Nut Effect

○鈴木颯人, 菅原研

○Hayato Suzuki, Ken Sugawara

東北学院大学

Tohoku Gakuin University

キーワード: 群ロボット (swarm robot), 物体搬送 (object transportation), ブラジルナッツ効果 (brazil nut effect), 楕円形ロボット (elliptical robot)

連絡先: 〒984-8588 仙台市若林区清水小路3-1 東北学院大学 情報学部 データサイエンス学科, Tel.: (022)354-8607, E-mail: sugaken@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

1. はじめに

1.1 背景

ロボット技術の発展により, 我々の暮らしの利便性が年々高くなっている. 部屋を掃除するロボット掃除機や, レストランで注文品を運ぶ配膳ロボットのように, 単体で活躍するものもあれば, 倉庫で大きな荷物を協働して運んだり, 複数の荷物をある地点から別の地点へ運んだりするロボットのように, 複数で活躍する群ロボットも存在する.

群ロボットシステムが活躍できる具体的なタスクとしては, 分散センシング, 領域の監視, 探索, 物体運搬などが挙げられる¹⁾. また, 群ロボット工学の分野では, 群知能ロボットシステムに関する研究も積極的に進められている²⁾. 群知能ロボットとは, 個々のロボットがもつ知能や機能が限定的でありながら, 集団で動くことで高度な機能を発揮するロボット群のことである. 近年, 分子ロボットに関する研究が急速に発展しているが³⁾, ミクロスケールの環境で

は, 個々のロボットに高度な機能やコミュニケーションデバイスを組み入れることは必ずしも容易ではない. マクロスケールの群ロボットシステムとは異なる視点での群行動のメカニズムやアルゴリズムの探求が求められる.

我々は機能が限定された単純な群ロボットに焦点をあて, 物体を運搬する仕組みについて研究を進めている.

1.2 ブラジルナッツ効果と物体搬送

我々が着目してきたのはブラジルナッツ効果 (以下, BNE) である. BNEとは, 大きさの異なる粒子を容器に入れ, 振動させたとき, 大きな粒子が上に浮かび上がる現象である. BNEを群ロボット工学に取り入れる試みはいくつか報告されている^{4,5)}. 我々は大きな粒子を運搬対象, 小径粒子をロボットとすることで, この効果を模した運搬を実現している⁶⁾. BNEにおける「振動」に相当するものを「ロボット自身もつランダムな自己駆動力」, 「重力」に相当するものを「ゴールからの定常的仮想斥力」とし, これらの合力に基づいて各ロボットは逐一動きを決

める。多数のロボット同士が衝突を繰り返す中で、ロボットよりも大きな径をもつ運搬対象は目標位置に向かって移動し、やがて到達する (Fig.1).

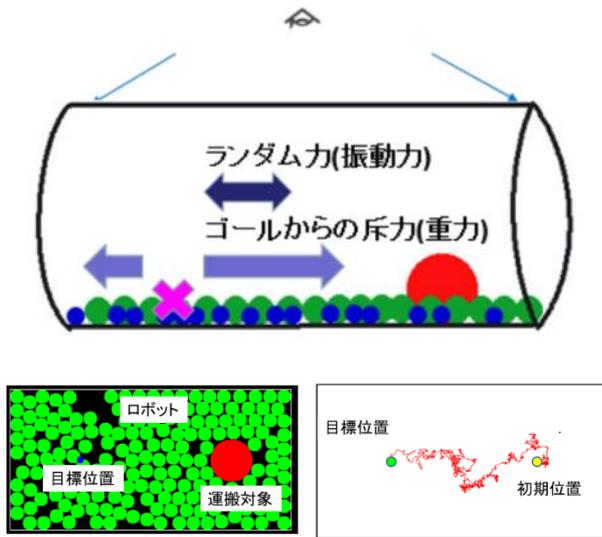


Fig. 1 (上) システム模式図 (下左) シミュレーションのスナップショット (下右) 運搬対象の移動軌跡の例

物性物理学の分野ではBNEにおける楕円形の効果に関する報告があり、BNEは充填密度が高い形状で起こりやすいこと、楕円形はアスペクト比によって球より充填密度が高くなることなどが明らかになっている⁷⁾。この知見に基づくと、ロボットの形状を楕円形にすることで物体搬送の性能向上につながる可能性がある。

2. 目的

本研究では、ロボットの形状を楕円形にすることで物体運搬にどのような影響があるかを評価することを目的とする。特にそのアスペクト比を変えて、形状と運搬速度の関係に焦点をあてるものとする。

3. 方法

3.1 ダイナミクス

ロボットがもつダイナミクスを式(1)に示す。

$$m \frac{d\vec{v}_i}{dt} = -\gamma \vec{v}_i + \alpha \vec{F}_1 + \beta \vec{F}_2 \quad (1)$$

右辺第1項は粘性抵抗を表す。 γ は粘性抵抗の大きさを表す定数である。第2項はランダム力であり、その大きさは α で決まる。 \vec{F}_1 の向きは一様ランダムであり、楕円形の異方性とは関係がないものとする。第3項は運搬目的地からの斥力を表す。 \vec{F}_2 は目的地点からロボットへの方向の単位ベクトルであり、その大きさを β としている。ただし、この力は仮想的なものであり、現実のロボットにおいては、何らかの形でゴールの方向を検知し、それと逆方向の力をロボット内部で算出して、自らの動きに反映させる、といった処理をおこなうことになる。なお、先行研究において、 α と β のバランスにより適切な運搬行動を示すことが可能になることが示されており、特に α/β が10~100の範囲において運搬性能が高くなることが明らかになっている⁶⁾。

3.2 シミュレータ

シミュレーション環境はJavaベースのProcessingおよび物理エンジンfisicaを用いて作成した (Fig.2).

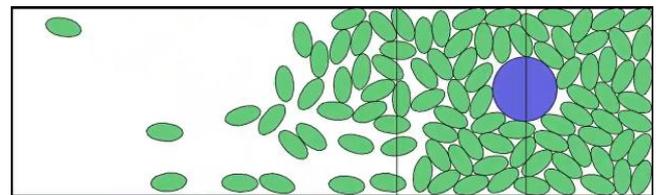


Fig. 2 シミュレーション実行画面

図中の緑色の楕円形がロボット、青色の円形が運搬対象である。本研究では図中の黒線間を移動するのに要する時間を計測し、そこから平均移動速度を算出して運搬特性を見ていく。

3.3 システムの特性評価

システムの特性評価を以下の4点に基づいて行う。

(1) ロボットの形状

楕円形とし、楕円の縦横比であるアスペクト比を1:1~1:8まで変化させる。面積は直径40の円形 (アスペクト比1:1) の1,256を基準とし、面積を変化させずに楕円形のアスペクト比のみを変化させる。

(2) 枠内充填率

枠内充填率とは、ロボットが運搬を実行するエリアの中をどの程度満たしているかを表した値である。

フィールド面積 S に対して、ロボットの面積 $a \times$ ロボット台数 n が占める割合を意味する。ここでは枠内充填率を30%~60%の範囲で評価する。

(3) 斥力

ロボットがもつ目標点からの斥力の大きさ $\beta=0.1, 0.05$ とする。

(4) 移動速度

運搬速度は運搬開始地点から運搬目的地までの距離200pixelを経過step数で割ることで求める。

4. 結果と考察

4.1 アスペクト比と充填率と運搬速度

アスペクト比と平均運搬速度の関係をFig. 3に示す。 $\beta=0.1$ としている。

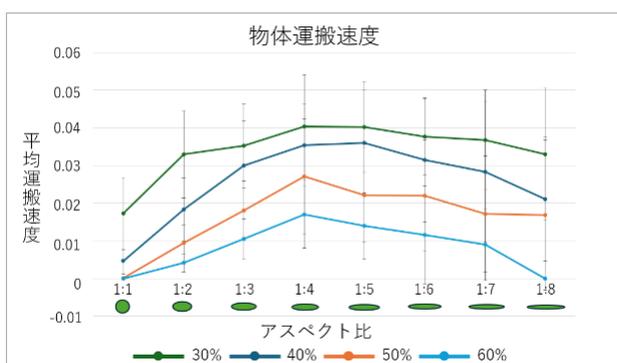


Fig. 3 アスペクト比と充填率と運搬速度

楕円形ロボットはアスペクト比1:1の円形ロボットと比較して平均運搬速度が速くなること、アスペクト比が一定以上大きくなると運搬速度が遅くなること、充填率が高くなると各アスペクト比の運搬速度は遅くなる事が分かる。

楕円形ロボットの運搬速度が速くなる理由として、円形より先端が尖っているため隙間に入り込みやすいためと考えられる。また、アスペクト比が一定以上大きくなると運搬速度が遅くなる理由として、楕円形の長辺が長くなると向きの自由度が失われることが関係していると考えられる。充填

率が高くなると各アスペクト比の運搬速度が遅くなる理由として、1台のロボットがもつ斥力は小さくても充填率が高くなり、多くのロボットが群れになることでシステム全体としての斥力が大きくなる事が影響していると考えられる。

4.2 斥力と運搬速度

$\beta=0.05$ のときのアスペクト比と平均運搬速度の関係をFig.4に示す。

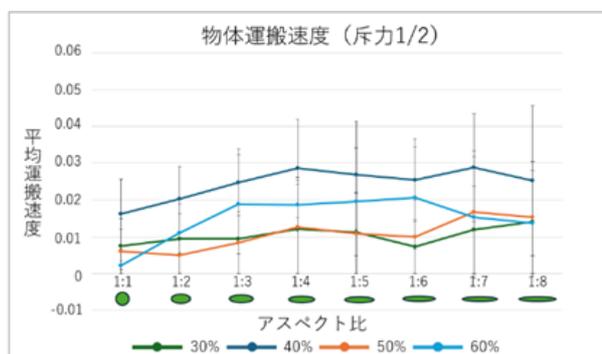


Fig. 4 $\beta=0.05$ の場合

$\beta=0.1$ に比べ、平均運搬速度は全体的に低下している。また、充填率30%~50%ではアスペクト比ごとの運搬速度に大きな変化は見られない。一方、充填率60%では楕円形ロボットは円形ロボットと比較して明らかに運搬速度が速くなっている。

充填率30%~50%ではアスペクト比ごとの運搬速度に大きな変化が見られない理由として、斥力が小さい場合にはロボットが枠内で詰まることがなく、形状による影響を受けにくいと考えられる。充填率60%で楕円形による形状効果が出る理由として、各ロボットに与える斥力は小さくても群れになることでシステム全体としての斥力は大きくなるためと考えている。

4.3 フィールド面積と運搬速度

フィールド面積を変更した結果をFig.5に示す。ここでは充填率を40%としている。4.1の

フィールドではアスペクト比1:5に平均運搬速度のピークが見られたが、フィールド面積を2倍にするとアスペクト比1:4、フィールド面積を3倍にするとアスペクト比1:3のところにピークが見られる。面積が大きくなるほど平均運搬速度のピークはアスペクト比が小さいほうにシフトしているように見える。

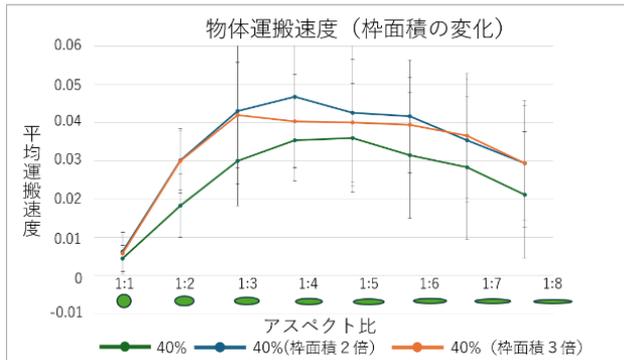


Fig. 5 枠面積と運搬速度

5. まとめ

本稿ではブラジルナッツ効果を応用した楕円形群ロボットによる物体搬送システムの運搬特性について検証し、楕円形ロボットは円形ロボットと比較して運搬速度が速くなること、アスペクト比が一定以上大きくなると運搬速度が遅くなること、楕円による形状効果は斥力が大きい場合に出やすいことを示した。

本稿では、斥力の影響についての検証が十分に行われていない。ランダム力 α と斥力 β のバランスのもと、運搬速度がどのような影響を受けるのか、その特性が円形ロボットの場合と同様なのか異なるのか、といった点を網羅的に探究する必要がある。また、本稿ではランダム力の向きと楕円形の異方性を無関係なものとしたが、そこに関係を付けた場合（例えば楕円形の長軸方向の力のほうが大きいなど）、それが運搬速度にどのような影響を与えるのか、についても探求する必要がある。

参考文献

- 1) B. Siciliano, O. Khatib (ed): Springer Handbook of Robotics, Springer (2016)
- 2) 松野文俊: 群行動の理解から群知能の創出をめざして, 計測と制御 59-2, 141/144(2020)
- 3) S. Murata (ed): Molecular Robotics: An Introduction, Springer (2022)
- 4) J. Chen et al: Segregation in swarms of e-puck robots based on the brazil nut effect, Proc. Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 163/170 (2012)
- 5) D.O. Joshi, M. Shimizu, K. Hosoda, Intra-swarm migration of size-variable robotic modules utilizing the Brazil nut effect, Advanced Robotics, 34 1122/1136 (2020)
- 6) K. Sugawara, N. Correll, D. Reishus: Object Transportation by Granular Convection Using Swarm Robots, DISTRIBUTED AUTONOMOUS ROBOTIC SYSTEMS, 104 135/147 (2014)
- 7) C.R.A. Abreu et al: Influence of particle shape on the packing and on the segregation of spherocylinders via Monte Carlo simulations, Powder Technology, Vol. 134, Issues 1-2, 167/180 (2003)