

橋を造るアリのシミュレーション

1 背景

コロニーを形成し集団で生活するアリの仕事の一つは、餌を見つけ巣に持ち帰ることである。しかしほとんど盲目であることが知られているアリがどのように餌を発見し、巣に持ち帰っているのだろうか。それにはフェロモンという、アリが生成する化学物質が重要な役割を果たしている。

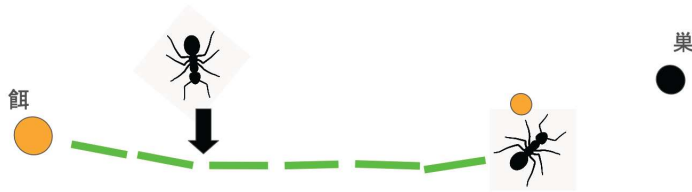


図 1: フェロモンを通じたアリのコミュニケーション

図 1 を用いて説明する。左のオレンジ色の丸が餌、右の黒丸が巣である。右側にいるアリをみてみよう。このアリはすでに餌を発見し、それを巣に持ち帰る途中である。この時、この餌を発見したアリはフェロモン（黄緑色の線）を放出している。左側のまだ餌を発見していないアリはフェロモンを検知すると、フェロモンのあるへと進行方向を決定する。こうして、餌を発見したアリが放出したフェロモンを辿ることで、他のアリも餌にありつけるのである。

このようにして餌を見つけるアリだが、この生き物はもう一つ、興味深い行動をとることで知られている。それはアリが仲間同士で体を繋ぎ合わせ、他の仲間が通れるように橋を作るという行動である（図 2 参照）。



図 2: アリが橋を作る様子

このように、自己を犠牲にして他個体の利益になるような行動を、「利他行動」と呼ぶ。しかし、アリがどのようなアルゴリズムで橋を作るのかは解明されていない。以下の二つの仮説が有力だとされている。

ant_num : 周囲にある一定数以上のアリがいる場合、橋状態になる。

pheromone_num : 周囲にある帰巣、餌フェロモンの合計が一定値以上の場合、橋状態になる。

いずれの場合も、ただ闇雲に橋を作るより効率が良さそうである。今回の実験では Unity を用いたシミュレーションを通じて、アリの利他行動についての理解を深める。

2 課題内容

アリの利他行動についての理解を深めるため、今回は教科書 [1] の演習問題 6.4 を行う。この演習問題の内容は以下の通りである。

1. 図 3(a) のようなフィールドを作り、アリが利他行動を行うシミュレーションを実現して、利他行動がどのように創発するのかを観察する。必要ならば、より現実のアリに近づくように拡張を行う。橋の角度がどのような時に橋を作るかを観察する。
2. 実際のアリによる研究結果 [2] と比べる。

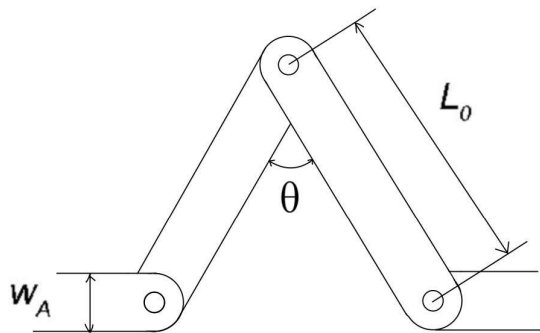
3 方法

伊庭研究室のホームページから、“antBridge” という名前のプログラムをダウンロードし、それを一部修正した上でシミュレーションを行う。以下、今回のシミュレーションの設定と方法を述べる。

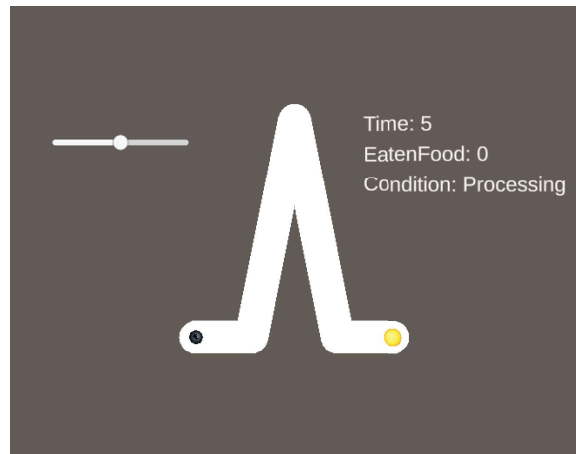
3.1 シミュレーションの設定

3.1.1 フィールドの設定

まずは、今回使用するシミュレーションで、アリが活動するフィールドについて説明する。



(a) フィールドのモデル



(b) フィールドの Unity 上での様子

図 3: フィールド

今回のプログラムでは、図 3(a) のようなフィールドを設定する。これは長さ L_0 、幅 w_A の橋を 4 個繋ぎ合わせ、中央の二つの橋を、角度が θ [°] になるように移動させたものである。今回のシミュレーションでは $L_0 = 80$ 、 $w_A = 24$ である。アリはこの橋の上しか移動できない設定にしてある。これを Unity 上で再現した画像が図 3(b) である。この図において、白い部分が橋である。この橋の左端には巣（黒丸）と餌（オレンジ色の丸）があらかじめ設置されている。新たなアリが一定時間（後述の `antMakespan` で指定される）ごとに巣から生成され、ランダムにフィールドを探索する。餌を見つけると巣に帰る。アリの細かい挙動は次のセクションで解説する。

3.1.2 アリの挙動の設定

次にアリの挙動の設定について説明する。アリは次の 4 つの状態を遷移する。それぞれの状態のときのアリの挙動を説明する。

ランダム探索状態：ランダムにフィールド内を探索する。またこの時、青色の帰巣フェロモンを放出する。アリが巣から生成された直後はこの状態である。

フェロモン探索状態：ランダムではなく、近くにある餌フェロモンの数と方向を元に進行方向を決定する。ランダム探索状態にあるアリが餌フェロモン（後述）を見つけた時、この状態に遷移する。

帰巣状態：帰巣フェロモンが近くに存在すればその数と方向を元に、存在しなければランダムに進行方向を決定する。餌を見つけるとこの状態に遷移し、餌を巣に持ち帰ろうとする。

橋状態：移動を停止し、橋の一部になる。橋状態のアリの上を、他のアリは移動できるようになる。ランダム探索状態またはフェロモン探索状態の時に、一定の条件（後述）を満たすとこの状態に遷移する。

アリが橋状態になる条件については、次の 3 つの仮説を用意する。

no_altruistic : 橋状態にならない。

ant_num : 周囲に一定数 (N_{TH}) 以上のアリがいる場合、橋状態になる。

pheromone_num : 周囲にある帰巢、餌フェロモンの合計が一定値 (P_{TH}) 以上の時、橋状態になる。

シミュレーションを上記 3 つの仮説でそれぞれ行い、比較する。次に、そのほかのパラメータについて説明する。

内部活性 E : 一定時間ごとに減少する。 E がある閾値 (E_{TH}) を下回ると、そのアリは死ぬ。

Threshold E_{TH} : 上述した内部活性 E の閾値。 E がこの値を下回ると、そのアリは死ぬ。

pheromoneThreshold P_{TH} : 仮説が pheromone_num の時、周囲のフェロモンの数がこの値を超えると橋状態になる。本実験では $P_{TH} = 8$ に変更してある。

antThreshold A_{TH} : 仮説が ant_num の時、周囲に存在するアリの数がこの数を超えると橋状態になる。本実験では $A_{TH} = 1$ に変更してある。

timeThreshold T_{TH} : 橋状態になってからの経過時間がこの値を越えると、橋状態を終了しランダム探索状態に移行する。本実験では $T_{TH} = 70$ に変更してある。

antMakespan M : アリを生成する間隔。本実験では $M = 1.5$ に変更してある。

3.2 シミュレーションの方法

今回のシミュレーションでは、フィールドの角度 $\theta = 16, 18, 20, 21.15, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35, 40, 50, 60, 70$ の 14 通りに対して、3 つの仮説 (no_altruistic, ant_num, pheromone_num) をそれぞれ適用させ、合計 42 通りのシチュエーションに対してシミュレーションを行う。それぞれのシチュエーションに対して経過時間 $time = 2000$ の時点で餌を巣に持って帰ったアリの数 (以降これを score と呼ぶ) を記録する。同じシチュエーションに対してシミュレーションを 5 回実行し、score の平均値を求める。また、どのような θ の時にアリが橋を作るのかを観察する。

4 結果と考察

4.1 θ と score

シミュレーションを行った結果、全ての角度 θ においてアリは橋を作った。演習問題 6.4 の課題の一つ目に対する回答はこれで終わってしまうのだが、アリの利他行動についてより深く理解するため、それぞれの条件下での score について考察しよう。それぞれの角度 $\theta = 16 \sim 70$ に対する score は、3 つの仮説について図 4 のようになった。

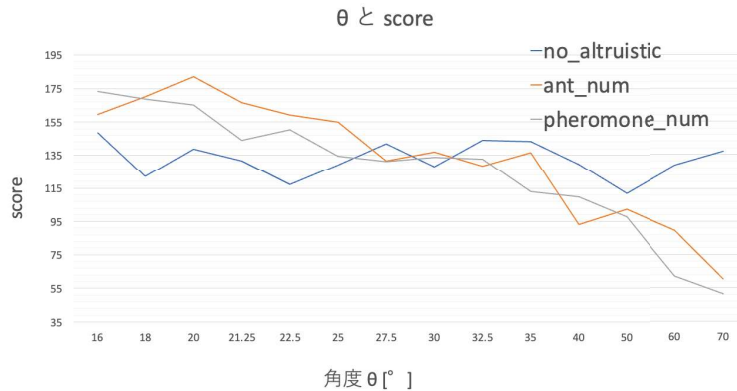


図 4

図 4 は、横軸を角度 θ , 縦軸を score の平均値としてプロットしたグラフである。ant_num は θ によって score はほとんど変わらず、他の 2 つの仮説では、score は θ の増加とともに減少した。実際、score を θ で線型近似した時の傾き a はそれぞれ

$$a_{no_altruistic} = -0.1$$

$$a_{ant_num} = -2.1$$

$$a_{pheromone_num} = -2.2$$

であった。 $\theta < 27.5$ の時、ant_num, pheromone_num の方が no.altruistic よりも score が高く、 θ が 27.5 ~ 32.5 の時、3 つの仮説の間に差は無く、 $\theta > 32.5$ の時は no.altruistic の方が score が高かった。ではなぜこのような結果になってしまったのだろうか。これは、 θ が増加すると、アリが作った橋による移動量の節約効果が減少するからであると考えられる。

4.2 θ と移動量の節約

図 5 は、 $\theta = 20$ と $\theta = 50$ の時のシミュレーションの画像である。

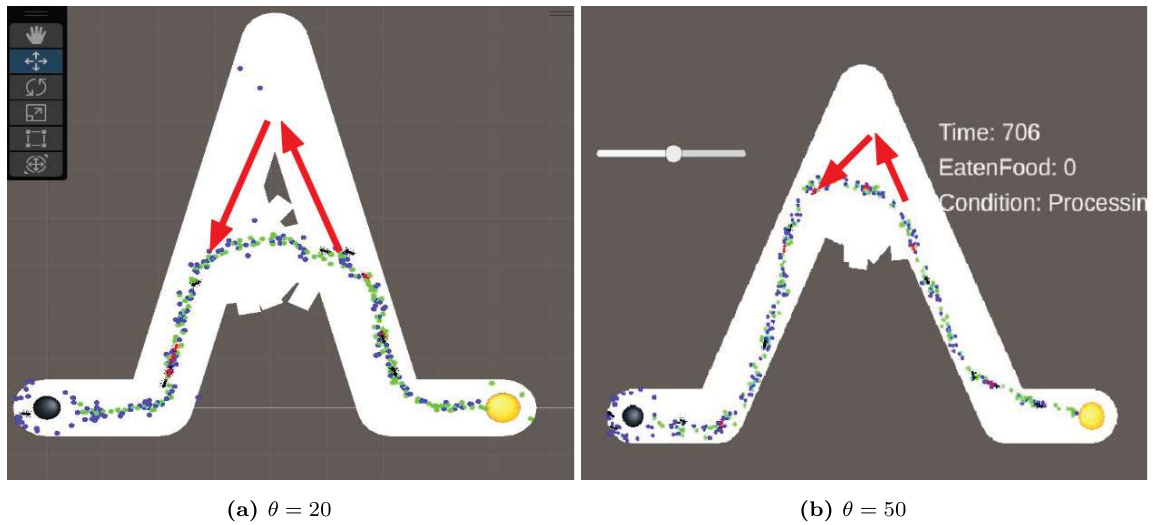


図 5

青色と緑色の小さい点はそれぞれ帰巣フェロモン、餌フェロモンであり、それらが繋がっている道がアリの通っている道であると考えて良い。またこの画像の赤い矢印は、アリが橋を作らなかった場合に巣に辿り着くための最短経路を示している。図 5(a), (b) から分かるように、 $\theta = 20$ の時の方が、アリが作った橋による移動量の節約効果が高いことが分かる。では θ によって具体的にどのくらい移動量が節約されたのだろうか。それを図 6 に示す。

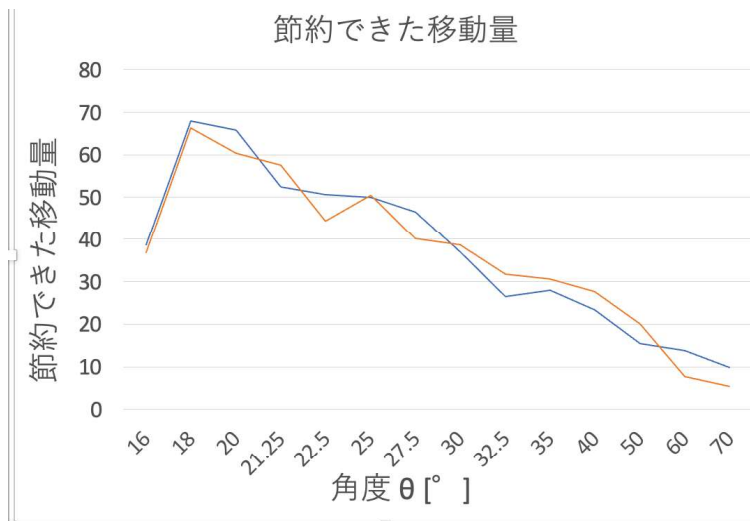


図 6

この画像によると、 θ が 18~20 で節約できた移動量が最大になり、その後 θ が増加すると節約できた移動量は減少する。

アリが橋を作るにはコストがかかる。橋になっている間、そのアリは動けないからである。つまり、図6から分かることは、 $\theta > 32.5$ の時、移動量が節約されるというメリットが橋を作る際のコストを上回ることができず、橋を作るという利他行動が逆効果になってしまったということである。これが図4のような結果になってしまった原因である。

4.3 実際の研究との比較

図3と同じ条件下で、実際のアリを用いて実験を行った論文が存在する ([2])。この論文の図4Bが、シミュレーション結果との良い比較になると考えられる。

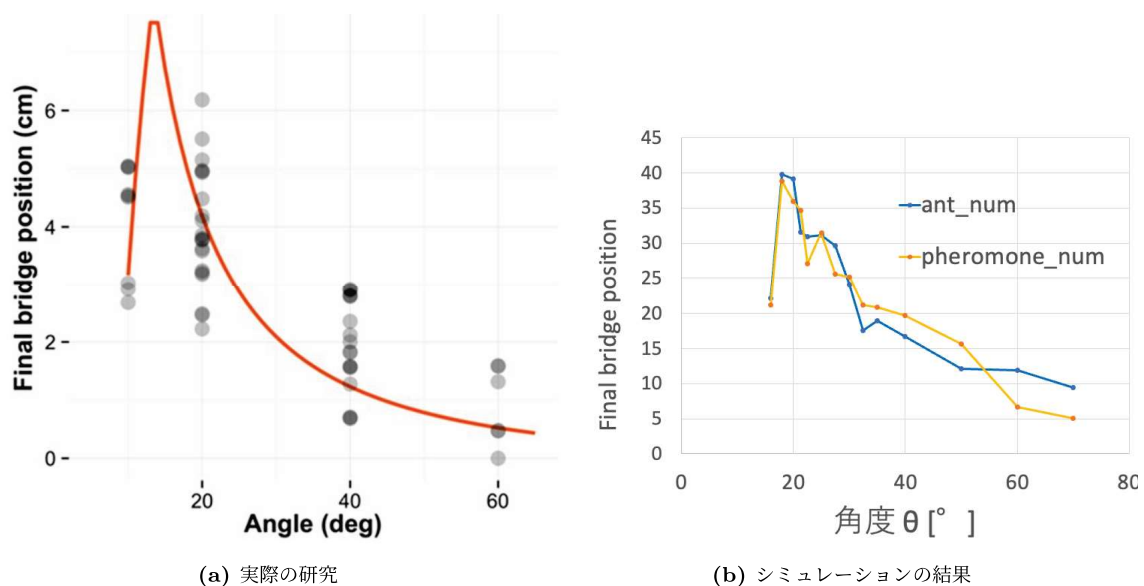


図7

このグラフは横軸 θ 、縦軸が Final bridge position という値である。Final bridge position とは、図8のように、フィールドの頂点と、アリが作った橋の距離である。

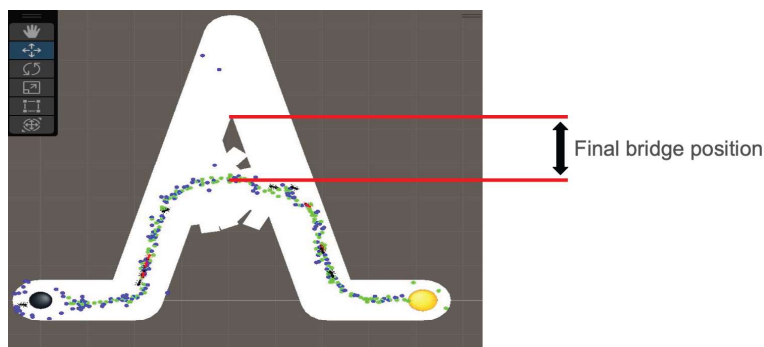


図8: Final bridge position

図7に戻ろう。図7(a)と図7(b)では、どちらも Final bridge position は θ が 20 手前まで急激に増加し、その後 θ の増加とともに急激に減少する。シミュレーションの結果は研究結果と定性的に一致している。

4.4 結論

アリが橋を作ることにより得られるメリットは、角度 θ により異なり、おおよそ $\theta > 32.5$ の時にメリットよりもデメリットが大きくなる。またこのシミュレーションの信頼性は、実際の研究結果との比較により、ある程度担保される。

5 より発展させるために

より利他行動への理解を深めるために、次のことを推奨する。

5.1 現実のアリの橋を作る過程の再現

現実のアリは、図9のような過程を経て橋を作ることが確認されている。



図9

橋を作る初期の段階でスタート地点に大量のアリが固まることで、徐々に橋を形成している。つまり、橋を作る初期段階では、より多くのアリが必要となる。シミュレーションにこのような拡張を施すと、精度が向上すると考えられる。

また実際の研究論文 [2] では、アリが図10のような過程を経て橋を作ったことが報告されている。



図 10

最初はフィールドの頂点付近から、少数のアリで橋を作り、それを徐々に拡大させている。しかし今回のシミュレーションではこのような現象は確認できなかった。より現実に近い拡張をシミュレーションに施せば、このような現象も確認できるかもしれない。

5.2 メリットとデメリットの定量化

今回の実験結果では、アリが橋を作るメリット (= 移動量の節約) とデメリット (= コスト) が、角度 θ によって変化するということがわかった。しかし、橋を作るコストを明確に定義しなかった。アリが橋を作る際のコストとは、橋になったアリの数なのか、アリが橋状態であった平均時間なのか、それをきちんと定義した上でコストとメリットの関係を定量的に明らかにすることは重要である。

参考文献

- [1] Unity シミュレーションで学ぶ人工知能と人工生命 伊庭斉志 + MIT / Mind Render 開発グループ
2022年9月
- [2] Army ants dynamically adjust living bridges in response to a cost-benefit trade-off.
<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1512241112> ,(2023/12/10)