

## サイボーグインセクトによる迅速な被災者発見のための移動制御手法 Proposal of a movement control method for rapid victim detection by cyborg insects

北浦 直†  
Sunao Kitaura

若宮 直紀†  
Naoki Wakamiya

### 1. はじめに

倒壊した構造物に閉じ込められた被災者の救助においては、火災、漏電や化学物質などのリスクや構造物による通路の遮蔽などにより救助者の立ち入りが困難な場合が多い。そこで、災害救助犬やスコープカメラ、レスキューロボットなどよりも安価で大量導入が可能であり、高い移動性と必要十分な制御性を有する新たな被災者探索手段としてサイボーグインセクトが注目されている。サイボーグインセクトは、昆虫に運動制御と被災者発見ならびに無線通信のためのデバイスと、デバイスに電力供給するためのバッテリーを付与したものである。狭隘な隙間に入り込むなどの生来的な動きに加えて救助者が適切な運動制御を実施することにより、効率的かつ迅速な被災者の発見が期待できるが、具体的な移動制御アルゴリズムについては十分な研究が行われていない。そこで本稿では、必要十分な移動制御によってサイボーグインセクトの群れ全体としての効果的な空間探索を実現するため、生物の自己組織的な群れ行動モデルである flocking を応用した移動制御手法を提案し、その有効性を示す。

### 2. サイボーグインセクトのモデル

サイボーグインセクトとは、付与されたデバイスから筋肉や神経に電気刺激を与えることなどによってその動きを外部から制御可能にした昆虫である [1,2]。本稿では倒壊した建物内での被災者探索を目的とするためゴキブリをベースとしたサイボーグインセクトを想定する。その生来的な挙動は、障害物の周辺部では障害物に沿って動き、周りに障害物がない場合は障害物を検知するまでまっすぐ進み続けるモデルを想定する。なお、移動速度は毎秒 60 cm とする [3]。また、文献[2]にしたがい、サイボーグインセクトの移動方向を制御可能であるものとする。

被災者探索のため、サイボーグインセクトはセンサによって半径 2 m 以内の範囲に位置する被災者や障害物について、その距離を 10 cm 単位で、また、進行方向の体の中心線から 10度単位で角度が分かるものとする。また、無線通信は無指向性であり、通信距離を 5 m とする。さらに、被災者の位置に関する情報は極めて重要であることから、サイボーグインセクトは自身の位置を誤差 1m<sup>3</sup>で推定可能であるものとする [4]。

### 3. 迅速な被災者発見のための移動制御手法

#### 3.1 制御の概要

倒壊した建物の外周部からサイボーグインセクトの群れが放たれる場合、人数や所在が不明な被災者を効率よく迅速に発見するためには、サイボーグインセクトが建物内に広く素早く分散し、様々な場所を同時にくまなく探索することが効果的であると考えられる。しかしながら、救助者が、全てのサイボーグインセクトの位置を把握し、それぞ

れに対して詳細な移動制御を行うことは、状況把握や制御指示のための通信オーバーヘッドや遅延、電力消費の観点から不可能である。そこで、集中制御を行わずに群れ全体として効果的な空間探索を達成するため、自己組織的な群れ行動モデルである flocking を応用する。提案手法では、それぞれのサイボーグインセクトが自らの制御周期、タイミングに応じて周辺のサイボーグインセクトや障害物との位置関係に応じて移動方向を調整し、移動することによって建物内に分散する。また、制御タイミングの間では生来的な振る舞いによって局所的な空間探索を行う。

#### 3.2 flocking による移動方向の決定

渡り鳥の群れが集団となって飛行するなどの自己組織的な群れ行動の数理モデルである flocking では、整列、結合、分離の三つのルールを用いてその原理を説明している [5]。本稿ではそのうち分離、すなわち斥力による個体間隔の確保の仕組みを応用する。なお、それぞれのサイボーグインセクトは制御タイミングごとに移動方向を決定した後、自身の位置情報をブロードキャスト通信によって発信するものとする。

具体的には、まず、制御タイミングにおいて、サイボーグインセクトは周囲のサイボーグインセクトからの斥力  $\vec{F}_c$  を次式で求める。

$$\vec{F}_c = \sum_{i \in N} \vec{x}_i / d_i$$

ここで  $N$  は通信範囲に存在するサイボーグインセクトの集合、 $\vec{x}_i$  はサイボーグインセクト  $i$  から自身への空間ベクトル、 $d_i$  はサイボーグインセクトとの距離を通信可能距離で正規化したものである。

次に、周囲の障害物からの斥力  $\vec{F}_o$  を次式で求める。

$$\vec{F}_o = \sum_{i \in O} \vec{y}_i / d_i$$

ここで  $O$  は検知範囲に存在する障害物の集合、 $\vec{y}_i$  は障害物  $i$  から自身への空間ベクトル、 $d_i$  は障害物との距離を通信可能距離で正規化したものである。障害物は自分を中心に 10度毎にある離散的な検知ポイント毎に有無を決定する。

最後に、斥力  $\vec{F}_c$  の  $\vec{F}_o$  に重み付け和を求める。本稿では重みを  $\vec{F}_c$  に対しては 0.6、 $\vec{F}_o$  に対しては 0.4 とする。合力からサイボーグインセクトの接地面に垂直な成分を除いたものをあらたな進行方向とする。

#### 4. シミュレーション評価

探索を行う空間は 40 m × 50 m × 4 m の 3次元空間とし、10 cm 四方の立方体 (ボクセルと呼ぶ) 単位で障害物を設定した。障害物は 0.1 m × 0.1 m × 1.6 m の柱状、0.1 m × 0.8

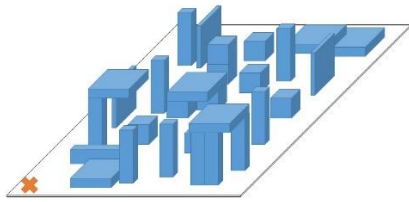


図1 探索空間の状態

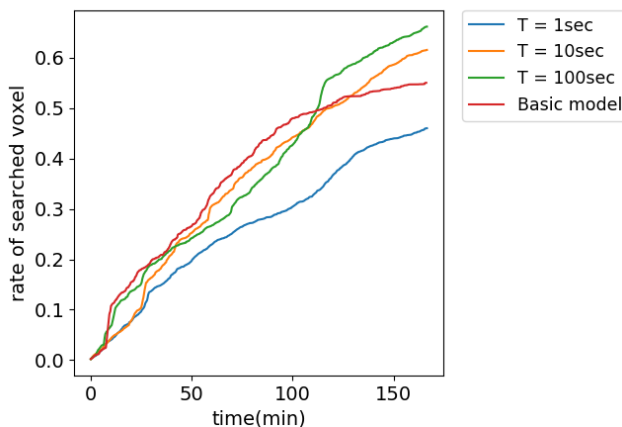


図2 空間探索率の推移

$m \times 0.8 m$  の板状,  $0.4 m \times 0.4 m \times 0.4 m$  の箱状の3種類あり, 探索空間の60%が障害物で占められるよう, ランダムに積み上げる.

また, サイボーグインセクトは半径5cmの球と考え, 障害物との接触判定を行った. サイボーグインセクトは図1にバツ印で示す探索空間の下辺角から移動を開始した.

シミュレーションの単位時間を0.1秒とし, ステップごとの空間探索率の推移を評価する. 空間探索率とは, 空間全体の障害物でない全ボクセルに対する探索済みのボクセルの割合であり, サイボーグインセクトの検知距離内に存在する障害物でないボクセルを探索済みと定義する.

サイボーグインセクトの数  $N$  を50匹として, 制御周期  $T$  を1秒, 10秒, 100秒と変化させたものと, 基本モデルについて空間探索率の時間変化を図2に示す. 横軸は探索開始からの経過時間を表し, 縦軸は空間探索率を表している. ここで10000秒経過時の空間探索率は基本モデル50.2%, 制御周期1秒で44%, 10秒で61.1%, 100秒で66.1%となった.

図2より, 基本モデルと比べ, 提案手法の制御周期が10秒, 100秒の場合に提案手法による空間探索率の上昇がみられた. また, 制御周期1秒の場合は基本モデルよりも, 探索率が低下した.

これは, 制御周期1秒の場合には斥力による移動制御が強く働き, サイボーグインセクトが空間内に十分に広がれないことによる. 図3に10000秒時点でのサイボーグインセクト間の距離の分布を示す. ここで横軸はそれぞれのサイボーグインセクトについて最も近くにいるサイボーグイ

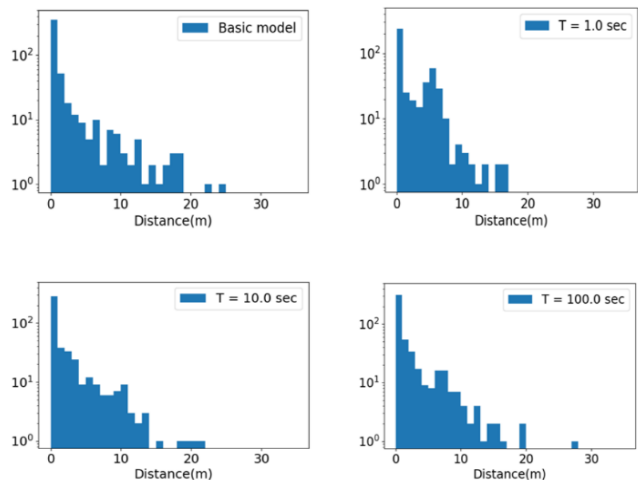


図3 最も近いサイボーグインセクト間の距離の分布

ンセクトとの距離, 縦軸は10回のシミュレーションにおける度数である. 図より, 基本モデル(左上)と比較して提案手法で制御周期が1秒の場合(右上)では他のサイボーグインセクトから10m以上離れたものが少なく, また互いに20m以上離れたサイボーグインセクトが存在しないことが分かる. 他のサイボーグインセクトから通信距離である5m以上離れたサイボーグインセクトは周囲の障害物からだけ斥力を受けるようになる. 制御周期が長ければ制御の間に生来的な挙動に従って障害物を回避するなどの行動が達成されるが, 制御周期が1秒と短い場合には, 障害物との位置関係によって動きが制限, 決定され, 自由な空間探索が行われにくくなる. したがって, 制御周期は空間内での拡散と局所的な探索とのバランスを考慮して決定する必要がある.

## 5. おわりに

本稿では, サイボーグインセクトによる迅速な被災者探索のため生物の自己組織的な群れ行動モデルであるフロッピングを応用した移動制御手法を提案し, シミュレーションによりその有効性を示した. 今後は, 空間構造の影響や, 適切なサイボーグインセクトの数, また, 制御周期や制御パラメータの設定などについて検討を行う.

## 参考文献

- [1] A. Bozkurt, R. F. Gilmour, Jr., A. Sinha, D. Stern, and A. Lal. "Insect-machine interface based neurocybernetics". IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.56, No.6 (2009).
- [2] E. Whitmire, T. Latif, and A. Bozkurt. "Kinect-based system for automated control of terres-trial insect biobots." In Proceedings of International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), (2013).
- [3] J.M. Camhi and E.N. Johnson. "High-frequency steering maneuvers mediated by tactile cues: antennal wall-following in the cockroach." Journal of Experimental Biology, Vol.202, No. 5,(1999).
- [4] Alper Bozkurt, Edgar Lobaton, and Mihail Sichiitu. "A biobotic distributed sensor network for under-rubble search and rescue." Computer, Vol49, No.5, (2016).
- [5] Craig W Reynolds. "Steering behaviors for autonomous characters." In Proceedings of Game developers conference, volume 1999, (1999).

† 大阪大学大学院情報科学研究科 Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Japan