

昆虫の採餌アルゴリズムとグリッドサーチを 組み合わせたハイブリッドな探索経路生成手 法の提案と評価

小林, 祐貴 / Kobayashi, Yuki

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

63

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025332>

昆虫の採餌アルゴリズムとグリッドサーチを組み合わせたハイブリッドな探索経路生成手法の提案と評価

PROPOSAL AND EVALUATION OF A HYBRID SEARCH PATH GENERATION METHOD COMBINING INSECT FORAGING ALGORITHM AND GRID SEARCH

小林祐貴

Yuki Kobayashi

指導教員 伊藤一之

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程

The application of robots or drones to search for survivors in disaster sites has recently attracted considerable attention. In our previous studies, we focus on the behavior of insects and propose a simple and efficient path generation algorithm for search and rescue robots. In addition, we optimized parameters using a genetic algorithm. In this study, we analyze the generated paths, and propose the optimal search path using the analyzed data.

Key Words : Search and rescue, Global search, Local search, Grid search, Ladybird,

1. はじめに

近年、災害現場で活躍するレスキューロボットの研究、開発が注目されており、研究が進められている[1-7]。瓦礫下に取り残された人の生存率は、72時間で大きく低下することが報告されており、短時間に広範囲を効率的に探索することが求められている。

この問題に対して、我々は、昆虫の採餌行動と人命探査活動との類似性に着目して、効率的な探索経路を生成するためのアルゴリズムの開発を行ってきた[8-9]。

昆虫は餌を探索する際、非常に簡単な仕組みで採餌行動の効率を向上させていることが報告されている[10-11]。中でもテントウムシは、餌を捕食するまでは、広範囲を比較的直線的に動いて餌を探索し、一度、餌を捕食すると、捕食前よりも頻繁に方向転換することで、その近くを探索するという行動をとることがわかっている。これは、餌となるアブラムシが密集したクラスターとなって生息しているという性質に合わせて、テントウムシの探索行動が進化してきたためであると考えられ、テントウムシは、餌のクラスターを探すための広範囲の探索と、クラスター内の餌を探すための局所的な探索とを上手く切り替えることで、採餌行動の効率化を実現している。

一方、災害現場においても、要救助者は一様に分布しているのではなく、災害が発生する前の状況に応じて、複数の要救助者の集まったクラスターが、広範囲の中に点在するような分布になることが想定され、土砂崩れや津波などでは、そのクラスターのまま、土砂とともに移動して

いくことが想定される。したがって、テントウムシの採餌行動と同様に、クラスターを発見するための広域な探索と、クラスター内を集中的に探索する局所的な探索とを組み合わせ、それらを適切に替えることで、探索効率の大幅な向上が期待される。

我々の従来研究では、このテントウムシの戦略をアルゴリズム化し、そのパラメータを、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化する研究を行い、シミュレーションによりその有用性の実証を行ってきた[8-9]。

しかし、従来の方法では、最適なパラメータを取得するために必要な計算が多く、また経路の評価を行っていないという問題が残されている。本研究では、これらの結果に基づいて探索経路の効率を解析し、クラスターのサイズと密度の推定値を利用して、非常に低い計算コストで探索経路を生成するための最適なパラメータを見つける方法を提案する。

2. 昆虫の採餌行動と人命探査活動

(1) 昆虫の採餌行動

テントウムシが主食としているアブラムシは、主に植物の葉の上で小さなクラスターを形成し、そのクラスターはが範囲に点在している。テントウムシの探索行動は、最初の餌を捕獲するまでは広い範囲を比較的直線的に動いて探索し、一度餌を捕食すると、捕食前よりも頻繁に方向転換することで、餌を捕食した場所の近くを探索するという、広域型から局所型へ切り替える振る舞いを行う

ことが報告されている。また、局所型の探索を行っても餌を発見することができない場合、探索行動は一定時間後に再び広域探索に戻ることが報告されており[11]、広域探索と局所探索を上手く切り替えていると考えられる。そして、これにより餌の発見効率を高めていることが明らかになっている[12]。

(2) 人命探査活動

災害発生後、要救助者は一様に分布しているのではなく、家単位や部屋単位など、災害が発生する前の状況に応じて、複数の要救助者の集まったクラスターが、広範囲に点在するような分布となることが想定される。本研究では、この被災者の分布とアブラムシの分布との類似性に着目し、テントウムシの採餌アルゴリズムを基に、被災者の探索経路生成を行う。

3. 採餌アルゴリズム

我々の従来研究では、要救助者を探索するためのタスクとテントウムシの採餌行動との類似性に着目し、搜索救助ロボットの経路生成アルゴリズムを開発してきた。

具体的には、災害現場において、広範囲に点在するクラスターを探すための広域探索と、発見したクラスター内を集中的に探索する局所探索を状況によって切り替えることで、探索効率の向上を実現している。

従来研究では、災害現場を想定した簡単なクラスター分布を想定し、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた進化計算によって、この切り替えのためのパラメータの最適化について報告されている[8-9]。

4. 探索経路の評価

(1) ロボットと環境の設定

採餌アルゴリズムによって生成された局所探索における経路の解析的な評価を行う。

はじめに、ロボットが要救助者を探索できる確率を定式化するため、ロボットが探索を行う環境はグリッド状であると仮定し、単位時間あたりに1マス内を探索するものとする。また、本研究では簡略化のため、ランダム探索では、単位時間あたりに、決められた探索範囲内の1マスをランダムに選択するものとする。一方、比較対象となるグリッドサーチは、図1のように、探索範囲全域をもれなく探索する。計算に使用する環境のパラメータを、表1に示す。

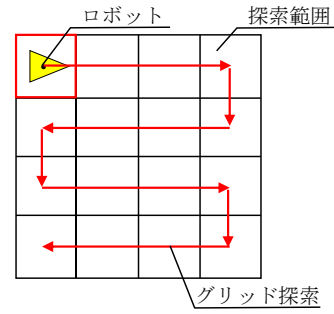


図1 グリッドサーチによる探索経路

表1 パラメータの定義

広域探索範囲の面積	s_g
局所探索範囲の面積	s_l
クラスターの数	n_c
クラスターの面積	s_c
クラスターの1辺の大きさ	w_c
重なる範囲の面積	s_u
ロボットの動いたマス数(局所)	m
ロボットの動いたマス数(広域)	m_g
局所探索範囲内で探索できる面積の期待値	$S_l(m)$
重なる範囲で探索できる面積の期待値	$S_u(m)$
広域探索で発見できるクラスターの数期待値	$N_c(m_g)$

広域探索では、広域探索範囲内をランダムに動くことによってクラスターを発見する。また、局所探索は、要救助者を一人見つけた後に、その周辺を詳細にランダムに探索するものである。この二つの探索方法を用いる採餌アルゴリズムで生成される探索経路の概要を図2に示す。

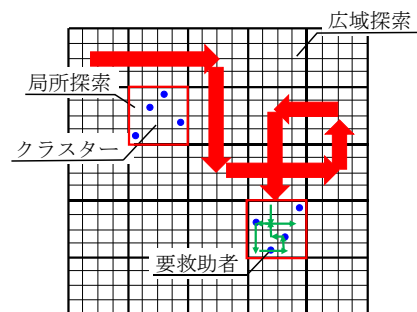


図2 採餌アルゴリズムによる探索経路

図3に、局所探索範囲と、探索対象となるクラスターとの重なりを示す。黒い正方形の内側が局所探索範囲を示しており、また赤い正方形がクラスターを示している。したがって、この二つの範囲が交わる部分(緑の斜線部)に位置する要救助者が発見されることになる。

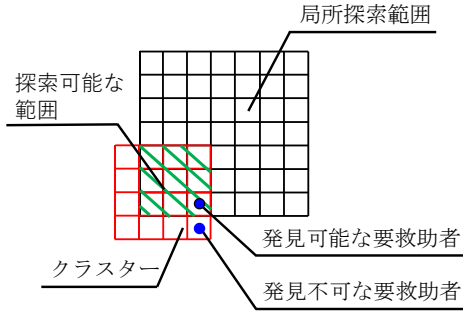


図3 局所探索範囲とクラスターとの重なり

(2) 生成された経路の評価

ロボットが探索のために移動した距離（移動したマス数の数に相当）を m 、局所探索範囲の面積を s_l で表すと、 m 歩の移動によって、局所探索範囲内で探索できた面積 $S_l(m)$ は、重複して同じ場所を探索した場合を除くと、式(1)および(2)で表すことができる。

$$S_l(m) = S_l(m-1) + \frac{s_l - S_l(m-1)}{s_l} \quad (\because m = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

$$S_l(m) = s_l \left(1 - \left(\frac{s_l - 1}{s_l} \right)^m \right) \quad (\because S_l(1) = 1) \quad (2)$$

この内、クラスターと局所探索範囲が交わる面積を s_u と表すと、 m 歩の探索によって探索されるクラスター内の面積 $S_u(m)$ は、式(3)のように表すことができる。

$$S_u(m) = s_u \left(1 - \left(\frac{s_l - 1}{s_l} \right)^m \right) \quad (3)$$

次に、広域探索経路について考える。クラスターの一边の大きさを w_c と置くと、広域探索では、一回の探索ごとに、 w_c だけ直線状に移動する。広域探索範囲の面積を s_g 、広域探索範囲にあるクラスターの数 n_c 、ロボットが w_c 単位で移動した回数を m_g と表すと、 m_g 回の試行によって見つけることのできるクラスターの数 $N_c(m_g)$ は、式(4)のように表すことができる。

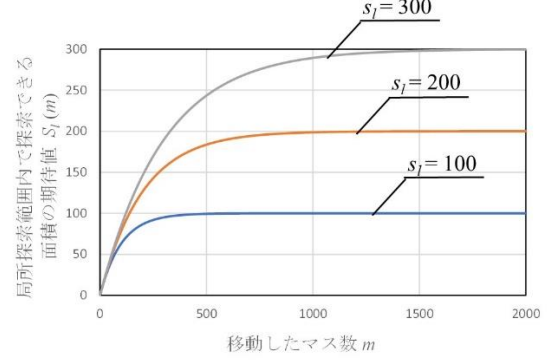
$$N_c(m_g) = n_c \left(1 - \left(\frac{s_g - 1}{s_c} \right)^{m_g} \right) \quad (4)$$

式(2)、(4)をグラフに表すと、図4のようになる。これらのグラフから、初期の探索においては、効率よく探索華夏のであるが、探索回数が増えるごとに探索効率が減少していくことがわかる。これは、ランダムな移動をもとにした経路であるため、探索回数の増加に伴い、すでに探索済みの場所を再探索するという現象が増えてしまうためである。これを確率的に表すと、 $m+1$ 回目の探索における探索場所が、既に探索済みである確率 $e(m+1)$ は、式

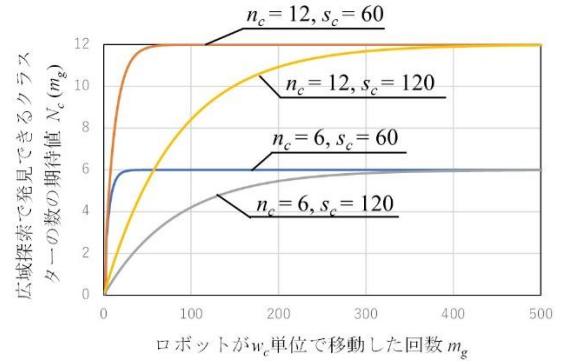
(5)のようになり、そのグラフは、図5のようになる。また、同様に、広域探索においては、式(6)のようになる。

$$e(m+1) = \left(\frac{m - S_l(m)}{m} \right) \quad (5)$$

$$e_g(m_g+1) = \left(\frac{m_g - N_c(m_g)}{m_g} \right) \quad (6)$$



(a) 局所探索範囲内で探索できる面積の期待値



(b) 広域探索で発見できるクラスターの数 $N_c(m_g)$ の期待値 ($s_g = 10000$)

図4 探索効率

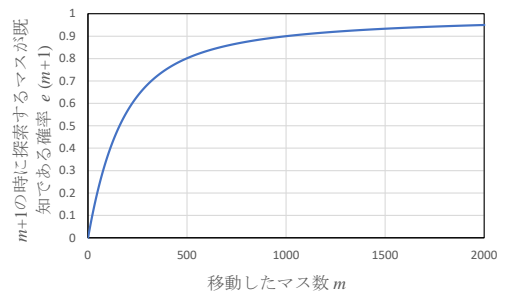


図5 式(5)をグラフ化したもの($s_l = 100$)

(3) 採餌アルゴリズムとグリッドサーチとの比較

得られた数式モデルを用いて、採餌アルゴリズムと、探索範囲全域を1マスずつ探索するグリッドサーチとの比較を行い、探索効率の優劣が入れ替わる状況について検討を行う。図6にこれらと比較した計算例の一例を示す。

横軸が、ロボットが移動した距離(マスの数 m)、縦軸が、発見される要救助者の人数の期待値 $H(m)$ である。ここで、パラメータとして表2に示す値を用いた。

表2 環境に用いるパラメータ

環境	1	2	3	4
広域探索範囲面積	14000	14000	14000	14000
クラスターの面積(s_{cl})	50	50	100	100
クラスターの数(n_{cl})	6	12	6	12
全要救助者人数	120	120	120	120
局所探索範囲面積	200	200	400	400

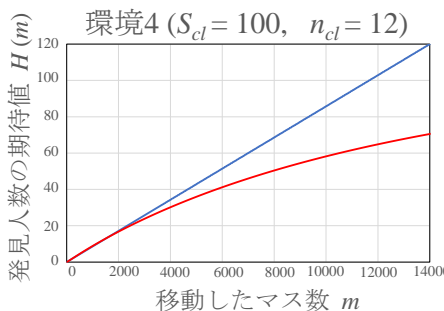
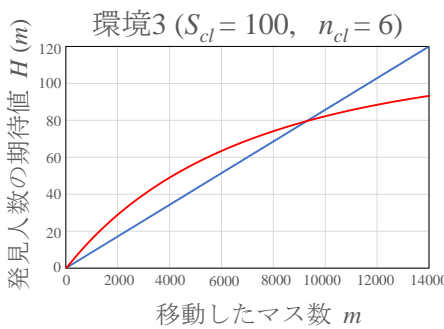
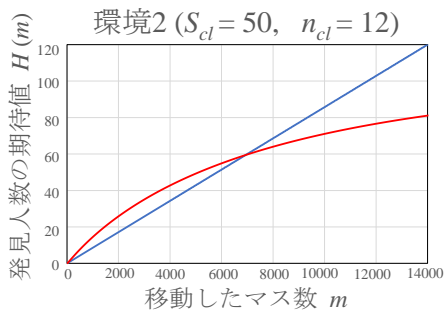
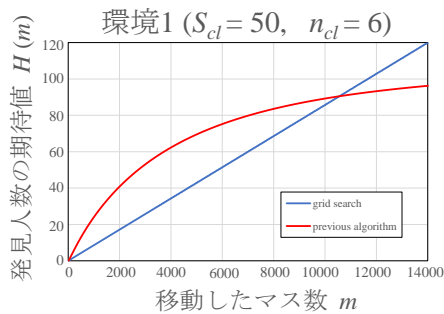


図6 採餌アルゴリズムとグリッドサーチの比較

図6から、初期の探索においては、採餌アルゴリズムの効率の方が高く、また発見された要救助者の割合が増加するにつれて、探索効率が落ちていくことが確認できる。したがって、採餌アルゴリズムは、短期間の間に全体の探索が困難な、大規模な災害時において有効であり、逆に、探索可能な時間に対して探索範囲が狭い場合には、グリッドサーチが有効であることが確認できる。また、これらの特性は、クラスターの数やサイズなどによっても変化し、クラスターの数やサイズが少なく、かつ、クラスターのサイズが小さいほど、採餌アルゴリズムの効果が高いことが分かる。これは、探索範囲の中で、一部に要救助者が密集するような、分布の偏った状況ほど、採餌アルゴリズムの特徴である、広域探索と局所探索の切り替える動きが優位に働くことを裏付けている。

一方で、採餌アルゴリズムの問題点は、ランダムな移動を基にしていることから、探索が進むにつれて、同じ場所を複数回探索してしまい、効率が悪化する点である。これらの結果をもとに、広域探索と局所探索を切り替えるという採餌アルゴリズムの長所と、探索範囲が重複しないというグリッドサーチの長所を合わせた手法について次章で述べる。

5. 採餌行動を基にしたグリッドサーチ

(1) 提案手法の概要

探索範囲の切り替えによる探索効率の向上と、探索範囲の重複の防止を両立するため、採餌アルゴリズムとグリッドサーチとを組み合わせた手法を提案する。ここで、クラスターの大きさの推定値は既知であるものとする。

はじめに、クラスターを探索するための広域探索について述べる。広域探索では、グリッドの大きさをクラスターの大きさに合わせて考え、図7(右)に示すように、大きな蛇行により広域探索を行う。

広域探索で要救助者を見つけ次第、グリッドを1マス単位に切り替え、局所探索に移行する。その後、局所探索範囲についてグリッドサーチによる探索を行う。

また、図8に、本研究で提案する、採餌行動を基にしたグリッドサーチのフローチャートを示す。

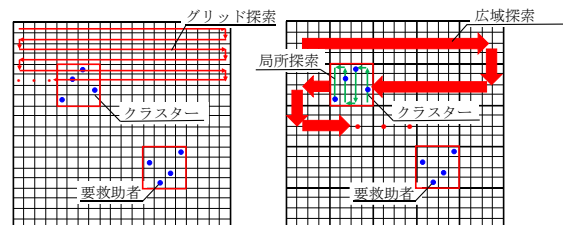


図7 グリッドサーチと提案手法との比較

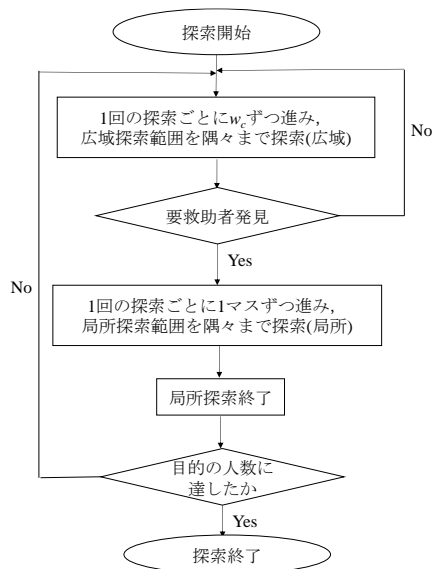


図8 提案手法のフローチャート

(2) 局所探索経路の生成

広域探索においてクラスターを発見した際、ロボットは、自分がその発見したクラスターのどの位置にいるかを判別することは困難である。そこで、最初にクラスターのどの部分を発見したとしても、クラスターの全域を探索できる局所探索経路が必要となる。クラスターの1辺の大きさは w_c であるし、局所探索範囲は、はじめに探索した要救助者がいた1マスを中心とした、1辺が $2w_c - 1$ とした正方形となすとする。これにより、図9のように、クラスターのどこを中心としても、クラスター全域を探索可能となる。

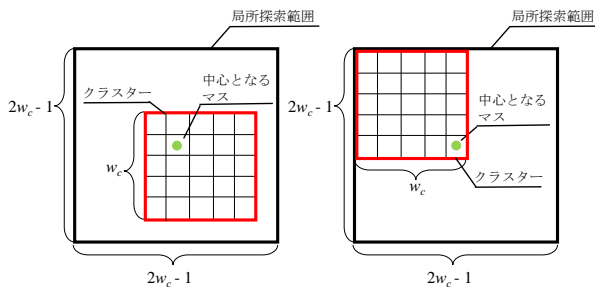


図9 局所探索の範囲

提案する手法では、この範囲内でグリッドサーチによる探索を行うことにより、クラスター全域を重複せず、誰一人もらさずに探索することが可能となる。

6. シミュレーション

(1) シミュレーションの設定

シミュレーションを用いて、従来研究の「採餌アルゴリズム」、「グリッドサーチ」、および本研究で提案した「採餌行動を基にしたグリッドサーチ」の比較を行う。従来手法におけるGAのパラメータは表3に示す値とした。

また、災害現場を想定し、環境を表5のように設定し

た。これを図に表すと、図10(上段:左)のようなマップとなる。

表3 GAのパラメータ

世代数	2000
個体数	200
交差確率	0.5
突然変異確率	0.01

表4 環境5のパラメータ

広域探索範囲面積	40000
クラスターの数	6
クラスター面積	60
全要救助者人数	120

表5 図10における対応表

● (緑)	発見済みの要救助者
● (青)	未発見の要救助者
— (黒)	広域探索経路
- - - (赤)	局所探索経路

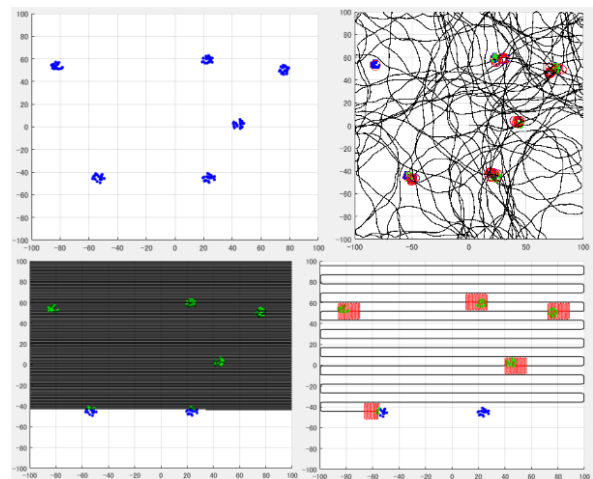


図10 環境5とシミュレーション結果

表6 シミュレーション結果の比較

手法	動いた歩数
採餌アルゴリズム	15,579
グリッド探索	28,445
採餌行動を基にしたグリッドサーチ	4,754

表6から、採餌アルゴリズムとグリッドサーチを組み合わせた手法による探索は、採餌アルゴリズムおよびグリッドサーチによる探索よりも少ない歩数で、全要救助者7割の探索を終えていることが確認できる。

7. 結論

本研究では、従来手法によって生成された探索経路について、解析的に評価を行い、その評価式を基に、低い計算コストで最適な経路を生成可能な方法の提案を行った。

解析の結果、従来手法で生成される経路では、広域探索および局所探索の双方において、一度探索した範囲を複数回も探索してしまうことによる効率の悪化が発生し、特に被災者に占める救助者の割合が高くなるにつれ、効率が悪化することが明らかとなった。また、採餌アルゴリズムによる探索とグリッドサーチによる探索とを比較し、その効率の変化の条件についても明らかとし、上記の問題を解決すべく、採餌アルゴリズムとグリッドサーチの長所を組み合わせたハイブリットな探索手法を提案した。また、提案手法のパラメータ設計についても検討し、最適なパラメータを導出するための方法を提案し、シミュレーションによりその有用性を検証した。

提案手法により得られた経路は、非常に単純な経路ではあるものの、冗長な探索を引き起こすことなく、かつ、広域探索と局所探索が適切に切り替わる経路であり、解析的にも最も効率的な探索経路であると考えられる。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、指導教官の伊藤一之教授から、熱心かつ丁寧なご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。また、ご協力頂いた伊藤一之研究室の同期、後輩の皆様は心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) F. Matsuno, S. Tadokoro.: Rescue Robots and Systems in Japan, Robotics and Biomimetics, 2004. ROBIO 2004. IEEE International Conference on, pp.12-20, 2004
- 2) S. Tadokoro.: Rescue robotics: DDT project on robots and systems for urban search and rescue, Springer Science & Business Media, 2009
- 3) K. Nagatani, S. Kiribayashi, Y. Okada, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi, Y. Hada.: Redesign of rescue mobile robot Quince -Toward emergency response to the nuclear accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011-, IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, pp.13-18, 2011
- 4) S. Agarwal, R. R. Murphy.: Characteristics of indoor disaster environments for small UASs, Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2014 IEEE International Symposium on, pp.1-6, 2014
- 5) H. Maruyama, K. Ito.: Semi-Autonomous Snake-Like Robot for Search and Rescue, Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2010 IEEE International Symposium on, pp.1-6, 2010
- 6) M. Masuda, K. Ito.: Semi-Autonomous Centipede-Like Robot with Flexible Legs, IEEE International Conference on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2014 IEEE International Symposium on, pp.1-6, 2014
- 7) Y. Sato, K. Ito.: Semi-autonomous modular robot for maintenance and inspection, The Twelfth Int. Conf. Autonomic and Autonomous Systems, pp.1-3, 2016
- 8) T. Takeda, K. Ito, F. Matsuno : Path Generation Algorithm for Search and Rescue Robots Based on Insect Behavior, Proc. First Int. Symp. Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics, pp. 1-6, 2015
- 9) T. Takeda, K. Ito, F. Matsuno : Path generation algorithm for search and rescue robots based on insect behavior - Parameter optimization for a real robot- , 2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), pp.270-271, 2016
- 10) P. Barthelemy, J. Bertolotti, D. S. Wiersma.: A Lévy flight for light, Nature 453, pp.495-498, 2008
- 11) I. Pavlyukevich.: Lévy flights, non-local search and simulated annealing, J. Computational Physics, Vol.226, pp.1830-1844, 2007
- 12) G. Ramos-Fernandez, J. L. Mateos, O. Miramontes, G. Cocho, H. Larralde, and B. Ayala-Orozco.: Levy Walk Patterns in the Foraging Movements of Spider Monkeys (*Atel Geoffroyi*), Behavioral Ecology and Sociobiology, Vol.55, pp.223-230, 2004
- 13) R. J. Marks.: Laboratory Studies of Plant Searching Behavior by *Coccinella septempunctata* L. larvae, Bulletin of Entomological Research, Vol.67, pp.235-241, 1977
- 14) Y. Murakami, Y. Tsubaki.: Searching Efficiency of the Lady Beetle *Coccinella septempunctata* Larvae in Uniform and Patchy Environments, Journal of Ethology, Vol.2, pp.1-6, 1984