

# 乗法的重み付き重心ボロノイ分割を用いた異機種マルチエージェントの探索領域分割手法

## Partitioning Method of Searching Region for Heterogeneous Multi-agent System using Multiplicatively Weighted Centroidal Voronoi Tessellation

横浜国立大学大学院 ○市原紀生, 上野誠也

\*Kisho ICHIHARA, Seiya UENO

**Abstract**—This paper describes a partitioning method of searching region for heterogeneous swarm of unmanned vehicles using multiplicatively weighted centroidal Voronoi tessellation. Although recent researches have verified the effectiveness of swarm of unmanned vehicles at the time of natural disaster etc. and many researches related to them have been made, most of them are heterogeneous swarm. On the other hand, there are few researches related to heterogeneous swarm because of their complexity and difficulty of generalizing and formulating models. This paper proposes the method of generalizing heterogeneous swarm model and partitioning method of searching region which is one of the most possible missions for them. In this paper, Voronoi tessellation in computational geometry has been applied which is one of the representative partitioning methods in general.

**Key Words:** Heterogeneous swarm, Multi-agent, Multiplicatively weighted Voronoi tessellation

### 1 はじめに

現代における無人航空機 (UAV : Unmanned Aerial Vehicle) , 無人車両 (UGV : Unmanned Ground Vehicle) 等に代表される無人機の技術的発展には目を見張るものがあり, かつては軍事分野における研究開発が主流であったが, 今日では東日本大震災を契機とした災害現場で活躍可能な無人機の研究開発<sup>[1,2]</sup>を皮切りに, 民生分野における普及も急速に進んでいる. また, 現状多くの無人機が単機毎の遠隔操縦が主流であるのに対して, 無人機群の協調による特定の作業に対する優位性は以前から報告されており<sup>[3]</sup>, 将来的な実用化に向けて多くの研究が行われている. ここで, 無人機群の種類には同機種 (Homogeneous) および異機種 (Heterogeneous)が存在するが, Homogeneous の研究としては, 実機を使用した大規模なものでは例えば米国防省による2016年の実験が有名である<sup>[4]</sup>. また, 計算機シミュレーションによる研究は数多くあり, 代表的なものとして UAV 群による被覆制御<sup>[5]</sup>, 経路探索<sup>[6]</sup>等があり, 継続的な領域監視は文献[7,8]に詳しい. これに対して, Heterogeneous の研究事例は実機を使用した実験については文献[9,10]に詳しいが, 計算機シミュレーションによる研究事例は Homogeneous に比べて少ない. 代表的な事例として, 性能の異なるセンサを搭載した UAV 群による被覆制御<sup>[11,12]</sup>, UAV および UGV の編隊制御

<sup>[13,14]</sup>等があるが, 特定の条件下における一事例という色彩が強く, より一般化した汎用性のある理論構築には至っていないという問題点がある.

本研究の目的は, UAV および UGV 等の複数の異機種無人機が混在した無人機群において, 特定の任務を遂行する際の時間等と異機種性との関係性について, 従来の研究ではあまり考慮されていなかった問題の定式化, 一般化による汎用性の高い理論を提案し, 計算機シミュレーションによりその有効性を確認するものである. なお, 無人機群の計算機シミュレーションによる研究においては, Homogeneous または Heterogeneous を問わず問題をマルチエージェントシステムと仮定して検討することが多い. ここで, マルチエージェントシステムとは, 複数のエージェントが相互作用しながら大域的な目的を達成するシステムのことであり<sup>[15]</sup>, 本研究が対象とする無人機群をはじめ, コンピュータネットワーク, センサネットワーク, スマートグリッド, 都市交通, 物流ネットワーク等の様々な実システムへの応用が研究されている. なお, エージェントとは, 当該システム的环境下に存在し, 個々に目的を有し, それらを達成するために必要な判断を実行する構成要素を指し, 当該システムに応じてソフトウェアであったりハードウェアであったりと様々な形態を有する<sup>[16]</sup>. したがって, Heterogeneous な無人機群をマルチエージェントシステムの一部とみなした場合, エージェントはハードウェアである個々の無人機となる.

## 2 問題設定

ここでは、本研究における問題設定を記載する。なお、これ以降は本問題をマルチエージェントシステムと仮定する。

### 2.1 異機種無人機群の定義

本研究では、特に軍事分野において単独の無人機では既に実用化されつつある、特定領域の探索を任務とする異機種無人機群を想定する。異機種無人機群は、その目的とする任務によって UAV や UGV といったプラットフォームからその機数、個々の性能値等は千差万別であり、一般的な定義は困難である。ここでは簡単のため、数ある無人機を構成する性能値から最も分かりやすい要素の1つである速度に着目し、それらを同一ではなく個々に異なる定量値を与えることで Heterogeneous な無人機群とする。すなわち、本問題をエージェント数  $N$  ( $N$ は2以上の整数)、エージェント  $i$  ( $i=1\dots N$ ) の速度を  $v_i$  とする Heterogeneous なマルチエージェントシステムと定義する。

### 2.2 任務の定義

本問題におけるエージェント群の任務は、2.1項のとおり特定領域の探索である。ただし、エージェントによる特定領域の探索問題は多くの研究がなされており、本研究において探索に係る新たな手法、アルゴリズム等を提案するものではない。ここでは、個々のエージェントが何らかの手法によって“探索”を始める前の段階として、個々の“担当領域”を決定して所定の配置につく必要があることから、この“担当領域”の決定について検討する。なお、一般的な概念として“探索”については、各エージェントが担当領域の全域を隅々まで探索するものとし、事前情報に乏しい初期の災害現場等において、現場状況の確認、負傷者の搜索等を実施する際の手法とする。(Fig.1)

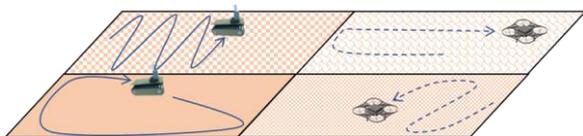


Fig. 1: Brief image of surface search

### 2.3 基準領域の決定

ここでは、各エージェントの担当領域について検討する。なお、“担当領域”は本研究における重要な評価指標の1つとなるため、以降は“基準領域”と呼ぶこととする。また、各エージェントが探索を完了するのに要する時間は、エージェントの性能差に関わらず同

じであると仮定する。さらに、探索は任意の点を通過することによって完了するものと仮定する。まず、探索すべき全領域の面積を  $A$ 、各エージェント  $i$  の基準領域の面積を  $A_i$  とする。さらに、エージェント数を  $N$ 、各エージェント  $i$  の速度を  $v_i$ 、探索に使用するセンサは全て同一と仮定し、その探知覆域を半径  $r$  の円とする。これらの前提のもと、2.2項で定義した探索手法について検討する。

各エージェントの単位時間  $\Delta t$  あたりの探索完了領域の面積は、 $2rv_i\Delta t$  となる。したがって、 $A_i$  は(1)式のとおり各エージェントの速度  $v_i$  に比例したものとなる。

$$A_i = A \frac{v_i}{\sum_{i=1}^N v_i} \quad (1)$$

### 2.4 探索時間

ここでは、各エージェントの基準領域の探索完了時間について検討する。2.3項における各エージェント間で探索完了時間に差が生じないという前提に基づき、2.2項で定義した探索手法について検討する。

2.2項の定義より、各エージェントが基準領域全域を探索するのに必要な時間  $t_i$  は、2.3項から基準領域の面積  $A_i$  を  $2rv_i$  で除した(2)式となる。

$$t_i = \frac{A_i}{2rv_i} = \frac{A}{2r \sum_{i=1}^N v_i} \quad (2)$$

ここで、単純な事例を基に、(2)式の計算例を以下に示す。各エージェントを“速い”エージェントと“遅い”エージェントの2種類とする。すなわち、“遅い”エージェントを  $i=1\sim M$  ( $M$ は1以上  $N$ 未満の整数) で速度  $v_1$ 、“速い”エージェントを  $i=M+1\sim N$  で速度  $v_2$  とする。ここで  $v_1$  及び  $v_2$  の比を1:2と仮定すると、速度  $v_i$  の総和は(7)式となる。したがって、(3)式を(2)式に代入すると探索時間  $t_i$  は(4)式となる。

$$\sum_{i=1}^N v_i = Mv_1 + (N-M)v_2 = 2N - M \quad (3)$$

$$t_i = \frac{A}{2r \sum_{i=1}^N v_i} = \frac{A}{2r(2N - M)} \quad (4)$$

(4)式の絶対値は、探索すべき全領域の面積  $A$  およびセンサ探知覆域の半径  $r$  に依存するが、エージェント数  $N$  の増加にともなって減少することを考慮することで、 $N=2$  における最大値を基準とした正規化が可能である。 $N=2$  における最大探索時間を基準値1として、 $N \geq 3$  の探索時間を比率で表したものが Fig. 2 である。なお、エージェント数  $N$  の増加 ( $N \geq 3$ ) にともない、“速い”

エージェントと“遅い”エージェントの機数の組み合わせ数も増加する。したがって、本計算においては個別のエージェントの区別をしない前提により、エージェント数  $N$  に対して  $N-2+1C_1$  通りの組み合わせがあるものとした。

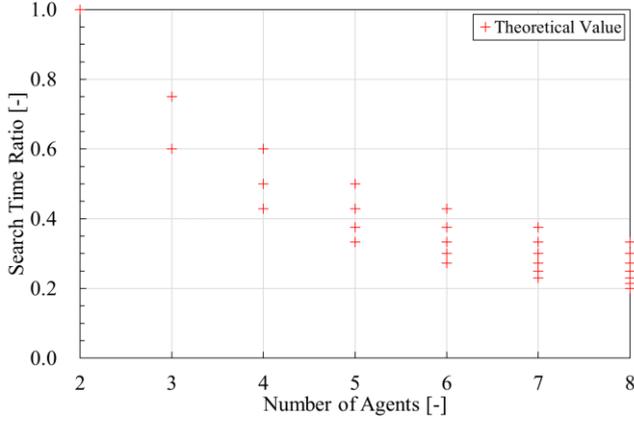


Fig. 2: Relation between search time ratio and number of agents in case of surface search

### 3 提案手法

ここでは、本研究における提案手法について、前提となる幾何学における定理を含めて記載する。

#### 3.1 ボロノイ図と重心ボロノイ分割

2次元平面  $R^2$  における2点  $p, q$  に対して、そのユークリッド距離を(5)式で定義する。この時、平面上に  $n$  個の点の集合  $S = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  が与えられた時、(6)式を母点  $p_i$  のボロノイ領域と呼び、それらの集合をボロノイ図と呼ぶ<sup>[17]</sup>。ボロノイ図は空間分割手法の代表的な手法の1つであり、幾何学の分野だけでなく自然科学、工学等の幅広い分野で応用されている。

$$d(p, q) = \sqrt{(p_x - q_x)^2 - (p_y - q_y)^2} \quad (5)$$

$$R(S; p_i) = \{p \in R^2 \mid d(p, p_i) < d(p, p_j), j \neq i\} \quad (6)$$

ここで、 $p_i$  が各ボロノイ領域の重心と一致するような場合、このボロノイ図を重心ボロノイ図または重心ボロノイ分割と呼ぶ。重心ボロノイ分割は、各ボロノイ領域の重心に母点  $p_i$  を移動させ、移動後に再度各ボロノイ領域を作成し直し、 $S = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  がその重心に一致するまで繰り返す反復法 (Lloyd method) により生成することができる。なお、重心ボロノイ分割において生成された各ボロノイ領域の面積は、ほぼ等しくなる性質がある。

#### 3.2 乗法的重み付きボロノイ図

3.1 項で定義されるボロノイ図は、ユークリッド距離に基づいた領域分割手法であるが、この“距離”を一般化することによって様々なボロノイ図を形成することが可能となる。代表的な一般化距離として(7)式の重み付き距離がある。ここで、 $u_i$  を乗法重み、 $w_i$  を加法重みと呼び、 $w_i=0$  の時の重み付き距離を適用した場合のボロノイ図を乗法的重み付きボロノイ図、 $u_i=0$  の時のものを加法的重み付きボロノイ図と呼ぶ。重み付きボロノイ図は、母点の影響に差がある場合の勢力圏を表す<sup>[18]</sup>。

$$d(p, p_i) = \frac{1}{u_i} \sqrt{(p_x - p_{ix})^2 - (p_y - p_{iy})^2} - w_i \quad (7)$$

ここで、特に乗法的重み付きボロノイ図の特徴として、各ボロノイ領域の境界がアポロニウスの円と呼ばれる円弧となることがあげられる<sup>[17]</sup>。この円弧の半径は乗法重み  $u_i$  の比と等しくなるため、母点の数が増加し重心ボロノイ分割により各ボロノイ領域の形状が円に近づくにつれて、その面積比は  $u_i^2$  に近似できるものと考えられる。これは、 $w_i=0$  の(7)式の定義において、乗法重み  $u_i$  を母点の速度と仮定することで、乗法的重み付きボロノイ図は、各母点が最短時間で到着可能な領域の分割<sup>[19]</sup>手法であるということからも妥当性がある。

#### 3.3 提案手法

3.1 および 3.2 項で定義される重心ボロノイ分割および乗法的重み付きボロノイ図について、2.3 項で定義した各エージェントの基準領域導出への適用を検討する。

2.3 項より、面探索における各エージェントの基準領域の面積  $A_i$  は、各エージェントの速度  $v_i$  に比例するように分割することが必要である。一方、3.2 項より、乗法的重み付きボロノイ図における重心ボロノイ分割において、各ボロノイ領域の面積は乗法重み  $u_i$  の二乗に比例したものとなる。したがって、一般化距離として(8)式を用いたボロノイ図を重心ボロノイ分割することで、各ボロノイ領域は速度  $v_i$  に比例するように分割されると考えられる。

$$d(p, p_i) = \frac{1}{\sqrt{v_i}} \sqrt{(p_x - p_{ix})^2 - (p_y - p_{iy})^2} \quad (8)$$

## 4 シミュレーション

ここでは、3.3項で検討した提案手法について、その有効性を計算機シミュレーションにより検証する。

### 4.1 シミュレーション条件

シミュレーションの計算条件を Table 1 に示す。エージェント数  $N$  に応じ、Case 1 から Case 7 の 7 段階とし、2.4 項の計算例と同じく“速い”エージェントと“遅い”エージェントの 2 種類のみが存在すると仮定した。エージェント速度は速度比が 1 : 2 となるように、各エージェントに対して毎ステップ 0.2 または 0.4 を与えた。また、計算領域は現実に災害現場等で探索する必要がある領域が、必ずしも理想的な幾何学的形状ではないことを考慮し、四角形（縦 100, 横 100）、円（半径 50）および三角形（底辺 100, 高さ 100）の 3 種類とした。さらに、重心ボロノイ分割が定常状態に達するのに十分な計算時間を事前に検証し、計算時間として 800 ステップを採用した。なお、2.4 項と同様に、エージェント数  $N$  の増加 ( $N \geq 3$ ) の増加にともない、Case 毎に  $N-2+1C_1$  通りの組み合わせを検証した。

Table 1: Simulation condition

	Case 1	Case 2	Case 3
Number of Agents ( $N$ )	2	3	4
Agent Velocity ( $v_i$ )	0.2, 0.4		
Calculation Region	Square (100×100) Circle (Diameter: 100) Triangle (Base: 100, Height: 100)		
Calculation Time	800		

Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
5	6	7	8
0.2, 0.4			
Square (100×100) Circle (Radius: 50) Triangle (Base: 50, Height: 50)			
800			

### 4.2 シミュレーション結果

3.3 項の定義を適用し、4.1 項の計算条件に基づきシミュレーションを実施した。結果の一例として、Case 5 における重心ボロノイ分割過程の、各エージェントの配置と各ボロノイ領域の形状を Fig. 3 に示す。なお、赤丸のシンボルがエージェント  $i$  ( $i=1 \sim 6$ ) を表し、各ボロノイ領域を個別に着色している。また、黒十字のシンボルがエージェント  $i$  のボロノイ領域の重心を表す。4.2 項と同様に、重心ボロノイ分割の計算の過程において、当初異なっていたエージェントの座標とボロノイ領域の重心が、最終的に一致している状況が確認できる。

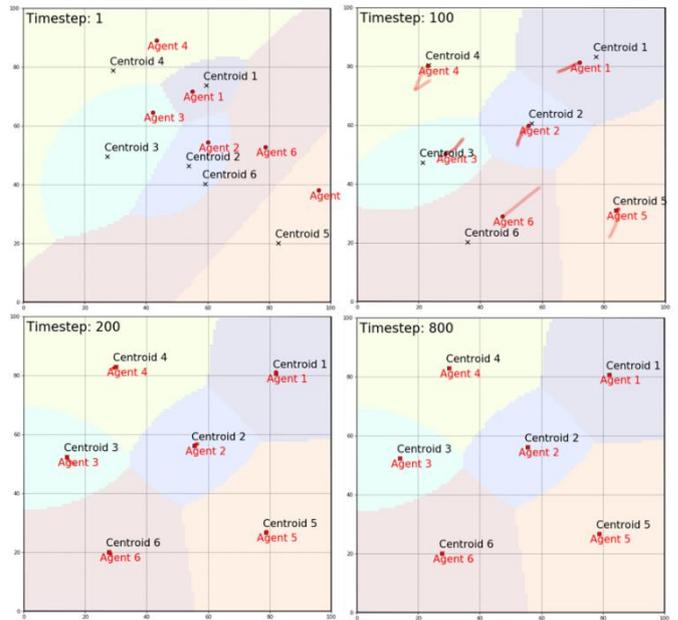


Fig. 3: Agents deployment and each Voronoi regions in case of surface search (Case 5)

次に、重心ボロノイ分割によって収束した各エージェントの基準領域（ボロノイ領域）の面積に関して、速度  $v_i$  の小さい ( $v_i=0.2$ ) エージェントの各面積の平均値を基準値 1 とした場合における、速度  $v_i$  の大きい ( $v_i=0.4$ ) エージェントの各面積の平均値を正規化した結果を Fig. 4 に示す。本計算条件において、速度  $v_i$  の比は 1 : 2 であることから、各エージェントの基準領域の面積比は 3.3 項より 1 : 2 に分割されることが想定される。Fig. 4 より、エージェント数が少ない Case 1 ( $N=2$ ) において理論値 2 からの乖離が認められるが、エージェント数の増加にともない計算領域の形状に依存することなく、理論値に近い領域の分割が確認できる。

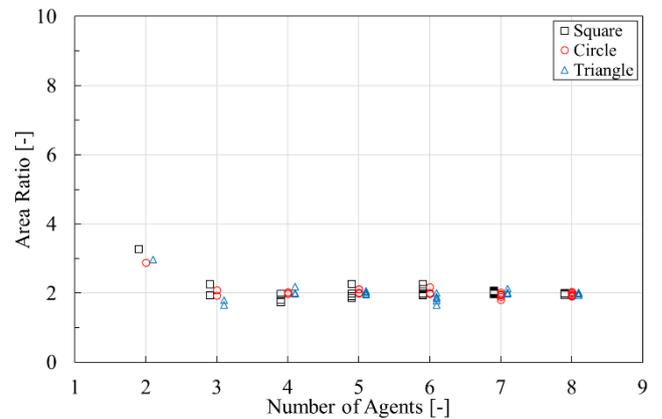


Fig. 4: Relation between area ratio and number of agents in case of surface search

さらに、各 Case の探索時間に関して、Fig. 2 の理論値を基準とし、シミュレーション結果の最大値および最小値を正規化したものを Fig. 5 に示す。エージェント数の少ない Case 1 ( $N=2$ ) を除き、理論値との定性的な傾向の一致が確認できる。また、各 Case のシミュレーション結果の平均値に対する理論値との誤差 (%) を Fig. 6 に示す。全体的な傾向として計算領域の形状に依存することなく、概ね  $\pm 10\%$  以内の誤差に収束していることが確認できる。

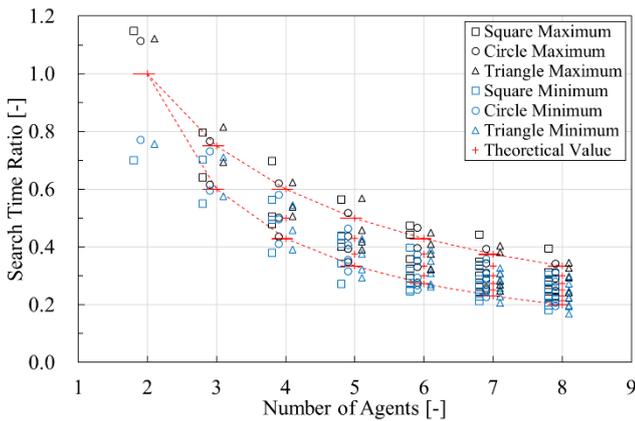


Fig. 5: Relation between search time ratio and number of agents in case of surface search

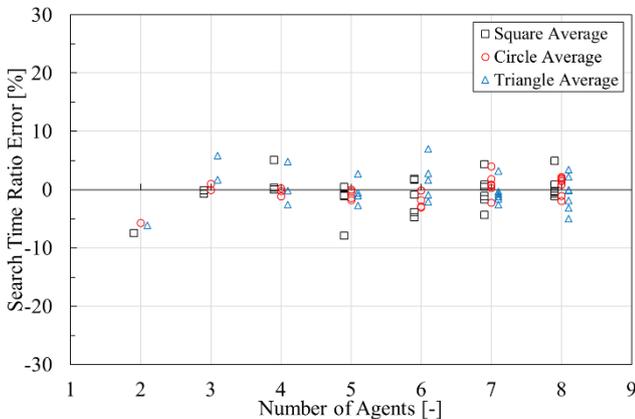


Fig. 6: Relation between search time ratio error and number of agents in case of surface search

## 5 まとめ

本研究では、異機種無人機群の領域探索問題に関して、問題をマルチエージェントシステムとして扱うことで異機種性および探索手法の定義を行い、乗法的重み付き重心ボロノイ分割を活用した、エージェントの性能差を考慮した個々のエージェントの基準領域の分割手法を提案した。また、計算機シミュレーションにより、提案手法の有効性を検証しその有効性を確認し

た。探索時間に関して各 Case において理論値からの一定の誤差が認められるものの、定量的に安定した値を示しており、それらを事前に考慮した上でシステムを構築することは十分可能であると考えられる。今後の課題としては、異機種エージェント数と探索時間との関係性の定式化等があげられる。

## 6 参考文献

- [1] 浅間一：災害時に活用可能なロボット技術の研究開発と運用システムの構築，日本ロボット学会誌，Vol. 32, No. 1, pp. 37-41, (2014)
- [2] 田所諭：防災ロボットについて我が国が取り組むべき中長期的課題，日本ロボット学会誌，Vol. 32, No. 2, pp. 154-161, (2014)
- [3] R. M. Murray: Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 129, No. 5, pp. 571-583, (2007)
- [4] <https://www.defense.gov/News/News-Releases/News-Release-View/Article/1044811/department-of-defense-announces-successful-micro-drone-demonstration/>
- [5] S. Huang, R. S. H. Teo and W. K. Leong: Review of coverage control of multi unmanned aerial vehicles, 2017 11th Asian Control Conference, Gold Coast, Australia, (2017)
- [6] X. Cheng, D. Cao and C. Li: Survey of Cooperative Path Planning for Multiple Unmanned Aerial Vehicles, Applied Mechanics and Materials, Vol. 668-669, pp. 388-393, (2014)
- [7] N. Nigham: The Multiple Unmanned Air Vehicle Persistent Surveillance Problem: A Review, Machines 2014, pp. 13-72, (2014)
- [8] N. Nigam, S. Bieniawski, I. Kroo and J. Vian: Control of Multiple UAVs for Persistent Surveillance: Algorithm and Flight Test Results, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 20, No. 5, pp. 1236-1251, (2012)
- [9] H. DUAN and S. LIU: SCIENCE CHINA Technological Sciences, Unmanned air/ground vehicles heterogeneous cooperative techniques: Current status and prospects, Vol. 53, No. 5, pp. 1349-1355, (2010)
- [10] S. L. Waslander: Unmanned Aerial and Ground Vehicle Teams: Recent Work and Open Problems, Autonomous Control Systems and Vehicles, Springer, pp. 21-36, (2013)

- [11] L. C. A. Pimenta, V. Kumar, R. C. Mesquita and G. A. S. Pereira: Sensing and coverage for a network of heterogeneous robots, 2008 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico, (2008)
- [12] Y. Kantaros, M. Thanou and A. Tzes: Distributed coverage control for concave areas by a heterogeneous Robot-Swarm with visibility sensing constraints, *Automatica*, Vol. 53, pp. 195-207, (2015)
- [13] M. Saska, T. Krajník, V. Vonasek, P. Vanek and L. Preucil: Navigation, localization and stabilization of formations of unmanned aerial and ground vehicles, 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Atlanta, USA, (2013)
- [14] M. Saska, V. Vonasek, T. Krajník and L. Preucil: Coordination and navigation of heterogeneous MAV-UGV formations localized by a 'hawk-eye'-like approach under a model predictive control scheme, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 33, No. 10, pp. 1393-1412, (2014)
- [15] 東俊一, 永原正章: マルチエージェントシステムの制御, システム/制御/情報, Vol. 57- 5, pp. 207-210 (2013)
- [16] A. Dori, S. S. Kanhere and R. Jurdak: Multi-Agent Systems: A survey, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 28573-28593, (2018)
- [17] 杉原厚吉: 計算幾何学, pp. 53-56, 100-101, 朝倉書店 (2013)
- [18] 杉原厚吉: なわばりの数理解析モデル, pp. 98-101, 共立出版 (2009)
- [19] K. Kobayashi and K. Sugihara: Crystal Voronoi Diagram and Its Applications, 数理解析研究所講究録, Vol. 1185, pp. 109-119, (2001)