

卒業論文要旨

マルチエージェントシステムの考えを用いた東京国際空港到着機の制御

A study on arrival aircraft control at Tokyo International Airport based on multi-agent system concept

システム工学群

機械・航空システム研究室 1200145 保阪 和史

1. 緒言

利用量の多い空港周辺の混雑解消は現在の航空交通の大きな課題の一つである。今後、格安航空会社の就航などによる航空交通の需要はさらに高まると予測されている。航空交通管理においても、特に空域や空港の容量拡大、さらには安全性を保ちつつ、遅延を抑制するための工夫が行われている(1)。しかし、現在の管制方法は管制官が複数の到着機に対し音声交信により情報の授受を行っている。これに対して将来は ADS-B などの機器がより幅広く使われるようになると考えられている(2)。したがって、航空機到着機制御の分野においても活用が十分に見込まれる。

こうした流れから、将来、航空管制にマルチエージェントシステムを適応することが可能であると考えられる。マルチエージェントシステム (Multi Agent System, MAS) は複数の自律した制御可能な構成要素が他の構成要素との相互作用(または情報交換)を通じて、システム全体としての挙動が決定するシステムのことである(3)。MAS は情報や経済、工学など様々な分野において近年注目を集めている。航空宇宙分野における応用としては、航空機の効率的な到着制御が挙げられる。現在のように管制官が複数の到着機に対して到着機制御を行うのではなく、到着機群が自律的かつ協調的に着陸順の決定などを行うことが可能になる。これにより、遅延の抑制やコストの削減、さらには管制官の負担軽減が可能になると考えられる。

本研究では、東京国際空港への到着機に対して MAS の考え方を用いた新たな制御システムの提案を行う。具体的には複数の到着機を群としてとらえて設計した制御システムを、東京国際空港到着機の実データに適用することにより、混雑の解消が可能となるか数値計算によって検証する。

本稿では二次元平面上の構成要素に対して、基本的なダイナミクスを連続時間上で仮定し、状態量の初期値を用いて合意制御を行った。

2. マルチエージェントシステムについて

2.1 グラフ理論

MAS の制御において重要となるのが、構成要素同士のつながり(ネットワーク)を示すグラフである。本研究ではつながりを持つ構成要素同士が相互方向に作用する無向グラフを取り扱う。グラフはそのグラフを構成する n 個の頂点集合 $v = \{1, 2, \dots, n\}$ と頂点同士を結ぶ辺の集合 $\varepsilon \subseteq v \times v$ を用いることで、 $G = (v \times \varepsilon)$ と定義される。

このグラフにおいて隣り合う構成要素 i, j が辺によって結ばれているとき、隣接関係を表現する隣接行列 $A = [a_{ij}] \in R^{n \times n}$ は以下の式(1)のように定義される。

$$a_{ij} \equiv \begin{cases} 1, & (j, i) \in \varepsilon, \text{ and } i \neq j \\ 0 & \end{cases} \quad (1)$$

この隣接行列を用いて式(2)により定義される行列 L をグ

ラフラプラシアンという。

$$L = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^n a_{1j} & -a_{12} & & & \\ & \sum_{j=1}^n a_{2j} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \sum_{j=1}^n a_{nj} & \\ -a_{21} & & & & \end{pmatrix} \quad (2)$$

グラフラプラシアンは隣接行列の要素のみによって決定される。エージェントがほかのエージェントとどのようにつながっているか、すなわちグラフ G のネットワークの「つながり方」によってグラフラプラシアンが決定される。

2.2 合意制御

合意を達成するとは、グラフ G の形に応じて、そのシステム内に含まれるすべての構成要素の状態が、ある値 α (この値を合意値という) に対して漸近的に一致することである。すなわち、合意制御では以下の式(3)が成り立つ。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) - x_j(t) = 0 \quad (4)$$

合意の種類にはどのような合意値を得るかによって、合意の種類が定義される。本研究では式(4)によって合意値が決定されるような平均合意を扱う(ただし x_{0i} は各エージェントの初期状態)。この平均合意は各エージェントの初期状態の平均値を求める合意制御である。

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{0i} \quad (4)$$

次に合意達成が可能なグラフを図1に示し、そうでないグラフを図2に示す。

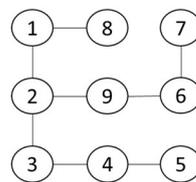


Fig.1 An example of consensusable network

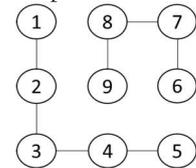


Fig.2 An example of unconsensusable network

合意達成が可能な図1のグラフについては、どのエージェントを始点としてもすべての構成要素にたどり着ける。すな

わち、合意値 α がすべてのエージェント間において共有される。それに対し図2においてはエージェントが二つのグループに分かれ、その間で情報を共有することが不可能であるため合意達成を達成するかは明らかではない。

3. ビークル群の制御

3.1 合意を達成するためのダイナミクス

本稿ではエージェントの数が $n = 9$ の場合について考える。図3に用いたグラフ $G1$ を示す。

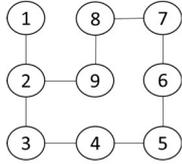


Fig.3 An undirected graph with 9 agents

この時、各エージェントのダイナミクスを以下の式(5)のように与える。

$$\begin{cases} \dot{x}_i = Ax_i + Bu_i \\ y_i = Cx_i \end{cases} \quad (5)$$

ただし式(5)において i 番目のエージェントの状態、入力、出力をそれぞれ $x_i \in R^n$, $u_i \in R^m$, $y_i \in R^p$ とした。

このダイナミクスに対してフィードバック制御を考える。入力は線形分散制御器によって与えられるため、式(6)によって記述される(ただし $N_i \subseteq v$ はグラフ $G1$ におけるエージェント i の隣接行列とする)。

$$u_i = - \sum_{j \in N_i} (x_i(t) - x_j(t)) \quad (6)$$

この線形制御器は隣接するエージェント i とエージェント j の状態量の偏差をフィードバックにより0に収束させるものであり、式(4)に示す合意が達成される。本研究においてはすべてのエージェントのダイナミクスが積分系で以下の式(7)により表現でき、任意のエージェント $i \in v$ に対して、

$$\dot{x}_i = u_i \quad (7)$$

であるとする。すなわち、式(5)において $A = 0$, $B = 1$, $C = 1$ とする。式(7)に式(6)を代入して、式(1)を用いるとすべてのエージェントの状態方程式は以下の式(8)により記述される。

$$\dot{x}_i(t) = - \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) \quad (8)$$

なお式(8)は式(2)を用いることで等価である式(9)に書き換えることができる。

$$\dot{x} = -Lx \quad (9)$$

ここでグラフ $G1$ のグラフラプラシアン L は

$$L = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

である。以下の表1にエージェントの番号と2次元座標 (x, y) の初期値を示す。

Table 1 Variables for positions of agents

| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----|---|----|----|---|----|----|----|----|----|
| x | 0 | 3 | 5 | 6 | 9 | 11 | 16 | 18 | 20 |
| y | 5 | 16 | 18 | 3 | 20 | 11 | 8 | 0 | 9 |

これらのエージェント式(4)より、それぞれの座標軸方向について x は9.78, y は10の位置に収束する。

3.2 合意制御

図5に $n = 9$ のマルチエージェントシステムに対する合意制御のシミュレーション結果を示す。時間が経つにつれすべてのエージェントが集まってきており、 $t=70[s]$ で合意値である $(x, y) = (9.78, 10)$ に収束していることが分かる。

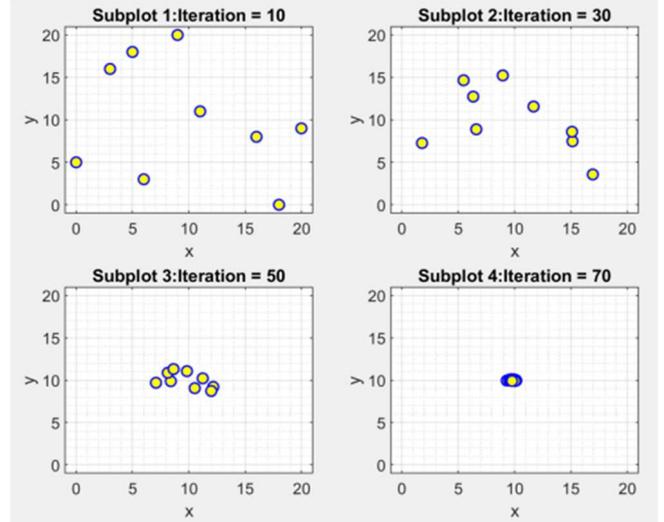


Fig.5 Consensus control on a two dimensional plane

図6に各エージェントの x および y の値の時間応答を示す。上述のように x は9.78に、 y は10にそれぞれ収束している。また、状態量が隣接するエージェントの状態量と大きく離れている場合は、状態量の変化が大きく振動している。

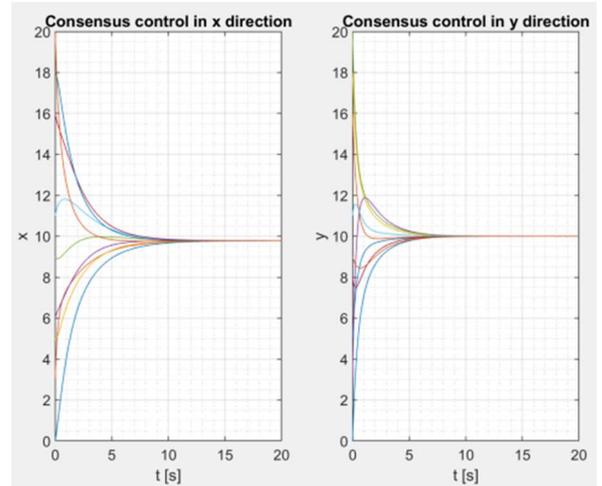


Fig.6 Time histories of x and y values

4. 結言

本研究では、東京国際空港への到着機に対してMASの考えを応用した新たな制御システムの確立を目的とした。本稿では、複数($n = 9$)のエージェントの合意達成を行い、MASの基本的な制御を行った。合意の種類はエージェントの状態量の平均値 $(x, y) = (9.78, 10)$ において合意が得られた。またいくつかのエージェントが合意達成の途中で、衝突してしまうことを確認できた。あるエージェントが隣接するエージェントの状態量との差が大きい場合に、エージェントの状態量が振動し、今回の結果に得られたような衝突する現象が見られたのだと考える。

今後の課題として、構成要素同士の衝突回避のために、ボイドモデルやエージェントのフォーメーション制御理論などを導入してゆく必要がある。

引用・文献

- (1) 長岡栄“航空交通管制(ATM)と最近の技術動向”(日

- 本航海学会航空宇宙研究会), (2007), [online]
https://j-nav.org/space/presentation/200705_ATM.pdf (参照
2020-1-15)
- (2) W.RichardsK.O'Brien,D.Miller “New Air Traffic Surveillance Technology” ”AERO” (2010) pp.7-pp.13 ,Boaing
 - (3) 東俊一, 永原正章, 石井英明, 林直樹, 桜間一徳, 畑中健志 “マルチエージェントシステムの制御” コロナ社 (2015)
 - (4) 林直樹, 永原正章 “マルチエージェントシステムの制御-II 代数グラフ理論” システム/制御/情報, Vol.57, No.7, pp.283-292, (2013)
 - (5) 桜間一徳 “マルチエージェントシステムの制御-III-合意制御(1)” システム/制御/情報, Vol.57, No.7, pp.386-396, (2013)
- (6) W, Ren, R. Beard and E. Atkins: A Survey of Consensus Problems in Multi-agent Coordination, American Control Conference, pp. 1859-1864 (2005)
 - (7) R.Olfati-Saber, J. A. Fax, and R.M. Murray: Consensus and cooperation in networked multi-agent systems, *Proceedings of the IEEE*,95-1, pp.215-233 (2007)
 - (8) 赤坂大介” マルチエージェントシステムの制御入門” (MathWorks Japan),(2016),[online]
<https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/images/events/matlabexpo/jp/2016/g2-intro-to-mascontrol.pdf>