

## 一致性 Multi-Agent 编队控制综述

梅 权, 姚佩阳

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

**摘要:** 多智能体系统一致性编队控制研究范围涵盖多无人机、机器人、水下无人航行器的编队运动问题,是系统控制领域的研究热点之一。从一致性编队生成和编队跟随两个方面回顾了近年来一致性编队控制的主要研究成果,总结了基于一致性编队控制研究的最新进展,最后简要叙述了该领域中一些有待解决的问题及可能的研究方向。

**关键词:** Multi-Agent; 编队生成; 编队跟随; Lyapunov 函数

**中图分类号:** TP242      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2017)01-0054-04

## An Overview of Consensus-Based Formation Control for Multi-Agent System

MEI Quan, YAO Pei-yang

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** This paper reviews some main results and progresses in consensus-based formation control of multi-agent system, focusing on the papers published in major control systems and robotics journals since 2007. Consensus-based formation control of multiple vehicles, including Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), robots, and unmanned underwater vehicles, has been a very active research subject of the system control area. The recent results in this area are categorized into two directions as consensus formation producing and consensus formation following. In the end, a short discussion section is included to summarize the recent researches and to propose several vital research directions along with some problems important for further investigations.

**Key words:** Multi-Agent; formation producing; formation tracking; Lyapunov function

### 0 引言

多智能体一致性编队控制涉及多无人机、机器人等编队控制问题。在十多年前,控制理论专家已经研究了存在多种约束的群组个体一致性问题<sup>[1]</sup>。随着对生物群体自组织行为模式研究的逐步深入,一致性理论,特别是基于个体动力学模型的一致性算法及一致性编队控制算法获得了长足发展<sup>[2-3]</sup>。基于个体动力学模型的构建、一致性算法和一致性编队控制算法的设计,研究者明确了局部自组织交互作为形成一致性涌现现象的前提,并揭示出个体间所遵循的局部交互规则才是一致性编队运动得以形成的关键。

一致性编队控制的主要目标是通过设计分布式协

议(即局部交互规则),在有或没有参考信息的情况下,使多个具有自治能力的个体能够以协同的方式工作,最终形成一个预先定义的几何结构。一致性编队控制对控制器性能没有严格的要求,对个体资源约束、燃料不充足、通信范围有限、带宽有限和大规模控制问题具有良好的控制性能和适应性,在编队飞行、协作运输、传感器协同、协同侦察监视等方面具有独特的研究价值。近年来,针对 Multi-Agent 一致性编队控制问题,研究者们进行了系列研究。文献[4]建立了欠驱动 Multi-Agent 系统、二阶 Multi-Agent 系统和不完全约束 Multi-Agent 系统的分布式编队控制统一框架,将编队控制问题转化为局部双体问题,设计了分布式编队控制器;文献[5]针对一般非线性动力系统,设计了混合稳定集,提出了一种基于能量控制的一阶混合控制器,该控制器不仅适用于非线性系统一致性编队控制,还适用于单积分动力系统和双积分动力系统的一致性编队控制。

收稿日期:2015-12-29

修回日期:2016-10-01

作者简介:梅 权(1985—),男,安徽亳州人,博士生,研究方向为航空兵作战与指挥控制。

根据控制律设计思想的不同, Multi-Agent 一致性编队控制律主要分为两种: 一是基于 Agent 之间的相对位移; 二是基于 Agent 之间的相对距离。根据设计的控制律是否存在参考信息, 可以将一致性编队控制研究分为两个方面: 一是编队生成, 即在没有参考信息的情况下, 设计的控制算法能够使系统所有成员形成预先设定的几何形状, 该几何形状也是系统控制的目标; 二是编队跟随, 即在有参考信息的情况下, 与编队生成进行类似的控制, 由于编队跟随存在参考信息, 其研究难度更大, 用于编队跟随的控制算法也往往适用于编队生成。本文从编队生成和编队跟随两个方面总结一致性编队控制的研究现状、研究进展和值得关注的研究方向。

## 1 经典一致性算法

对于含有  $n$  个 Agent 成员的 Multi-Agent 系统, 考虑由一阶微分方程确定的单积分动力系统信息状态, 即

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中,  $x_i(t) \in \mathbf{R}^n$  和  $u_i(t) \in \mathbf{R}^n$  分别为 Agent  $i$  的信息状态和信息控制输入。

一种典型的连续时间一致性算法可表示为

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) [x_j(t) - x_i(t)] \quad (2)$$

式中,  $a_{ij}(t)$  为  $t$  时刻邻接矩阵  $A_n(t)$  的第  $(i, j)$  项元素。式(2)的含义是使每个 Agent 的状态趋向自身与邻居 Agent 信息状态差值的加权平均。由于 Agent 个体不断运动, 系统通信拓扑不断变化, 因此, 式(2)中的  $a_{ij}(t)$  也是时变的。

## 2 一致性编队生成

Multi-Agent 系统编队生成问题与群体聚集问题类似, 主要研究方法包括矩阵理论方法和 Lyapunov 函数法。

### 2.1 矩阵理论方法

Multi-Agent 系统特性使得矩阵理论适用于 Multi-Agent 编队控制稳定性分析。注意到式(2)中每个 Agent 成员的一致性输入, 是它和邻居 Agent 状态差值的加权平均值。文献[6-7]扩展了经典一致性算法, 引入耦合矩阵补偿相应的控制输入。假设给定式(1), 将式(2)改进为

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) C [x_j(t) - x_i(t)] \quad (3)$$

式中,  $C$  为大小兼容的耦合矩阵, 如果  $x_i \in \mathbf{R}^3$ , 则  $C$  可以看作 3D 旋转矩阵。算法的改进之处在于将原来的控制输入旋转了一定的角度, 其稳定性由一个特定转移矩阵的特征值分布决定。文献[6-7]的主要工作

是分析了单积分动力系统和双积分动力系统的聚集运动, 以及网络拓扑、阻尼增益、矩阵  $C$  对聚集运动的影响; 与文献[6-7]的研究类似, 文献[8]的研究表明非完整移动机器人的聚集运动最终也趋于补偿态, 不同之处是, 文献[6-7]中的补偿态是预先设计的, 而文献[8]中的补偿态是非线性动力系统诱导的。

在线性闭环系统的编队生成研究中, 系统矩阵具有两个有意义的性质: 1) 至少存在一个特征值零; 2) 在设定的坐标轴上至少存在两个特征值。这两个性质对于研究固定网络拓扑条件下的编队生成问题非常重要。但是, 这两个性质并不能用于解决时变网络拓扑条件下的编队生成问题, 在时变网络拓扑条件下的编队生成问题仍然存在诸多困难。

### 2.2 Lyapunov 函数法

尽管矩阵理论用于分析编队生成的稳定性相对简便, 但也还有一些编队生成问题无法使用矩阵理论解决, 特别是非线性系统的一致性编队控制问题, Lyapunov 函数法恰好应运而生。

文献[9]运用 Lyapunov 函数法研究了几个典型编队生成场景的反一致性问题。反一致性问题是指将一组处于一致状态中的 Agent 在空间中解散。对于式(1)描述的单积分动力系统, 相应的控制输入可表示为

$$u_i(t) = \sum_{j=1}^n b_{ij}(\|x_i - x_j\|) [x_i(t) - x_j(t)] \quad b_{ij}(\cdot) \geq 0 \quad (4)$$

假设每个 Agent 成员在半径为  $R$  的通信距离内都可以同其他 Agent 相互通信, 则任何两个 Agent 能够以大于  $R$  的距离在空间中解散。

文献[10-11]分析了无领导者的群集问题及其稳定性。研究表明, Multi-Agent 系统内部交互可以用非负势函数  $V_{ij}(\|x_i - x_j\|)$  描述, 以此使得编队渐近形成预设的编队构型。势函数  $V_{ij}(\|x_i - x_j\|)$  的基本作用是使 Agent 之间的距离趋于理想值, 并且能够防止 Agent 互撞。该算法的局限是当非负势函数达到局部最小时, Multi-Agent 编队系统收敛于固定几何形状, 而 Agent 之间的距离不能全局收敛于理想值。未来保证 Agent 之间的距离全局收敛是一个重要的研究课题。

## 3 一致性编队跟随

尽管无需参考信息的编队生成研究具有一定的理论意义, 但参考信息往往是编队控制所要达到的目标, 因此需要参考信息的编队控制研究更具有实际价值。下面分别从矩阵理论方法和 Lyapunov 函数法两个方面分析总结编队跟随的研究进展。

### 3.1 矩阵理论方法

矩阵理论既适用于编队生成问题研究, 也适用于

编队跟随问题研究。文献[12]改进了单积分动力系统的一致性算法,给出了存在编队参考信息的编队控制算法,表明在离散时间系统中,Multi-Agent 系统成员循迹误差有界,在编队参考信息导数有界的条件下,Multi-Agent 编队参考信息可任意选定;文献[13]基于领导者-跟随者模式,将一致性编队控制算法和防相撞控制算法用于四旋翼无人飞行器编队控制,并且能够保证收敛;文献[14]考虑针对线性动力系统与另一个线性动力系统的同步问题,建立一般的系统同步模型,该同步问题与编队跟随问题具有相通之处。但针对带参考信息的一般线性动力系统编队跟随问题研究,还有许多困难。

另外,如果把编队跟随控制变量定义为 Agent 信息状态与编队参考信息之间的误差变量,则编队跟随问题可以转换为传统的稳定性问题。如果能够使该误差趋于零,则可解决编队跟随问题。但因编队生成问题没有参考信息,因此,该方法并不适用。由此可知,在切换网络拓扑情况下,编队跟随问题比编队生成问题易于控制。

### 3.2 Lyapunov 函数法

Lyapunov 函数在稳定性分析方面应用广泛,也是研究编队跟随问题的重要工具。文献[15-16]研究了 Multi-Agent 系统存在动态参考信息条件下的聚集问题,设计的控制算法使得系统成员可依照动态的参考信息协同运动。换言之,Multi-Agent 系统成员不仅要保持规定的编队队形,还要循着参考信息运动,而编队生成只要求前者,这两个约束使编队跟随问题变得复杂。文献[15]表明在已知编队参考信息足够的情况下,利用基于梯度的控制律,可以解决带有动态参考信息的编队跟随问题;文献[16]表明在已知参考信息不够的情况下,采用变结构控制律,可以解决编队跟随问题;文献[17]将每个 Agent 描述为积分链,即每个 Agent 由多个积分器构成,其中最后一个积分器带有有界的干扰,采用快速有限时间 Lyapunov 稳定性定理、终端滑模控制技术和积分器设计方法,探讨了多滑动面控制的一致性问题。

文献[18]和文献[19]分别研究了带有参考信息的线性动力系统和非线性动力系统的编队控制问题。其中,文献[19]把线性动力系统势函数  $V_{ij}(\|x_i - x_j\|)$  改进为  $\|x_i - x_j - d_{ij}\|^2$ ,  $d_{ij}$  表示 Agent  $i$  和 Agent  $j$  之间的理想距离。实际上,在非完整移动机器人、刚体、带有非线性特征的线性系统等一致性研究中,已经涉及编队控制问题。编队控制相比聚集运动,由于已知  $V_{ij}(\|x_i - x_j\|)$  使得问题变得相对简单。一般情况下,Agent 之间的距离可以逼近理想值,但防相撞问题和初始通信结构保持问题还需另外考虑。

## 4 结论

本文总结了国内外基于一致性的 Multi-Agent 编队控制研究成果。虽然目前编队生成、编队跟随的理论和实验研究已经解决了不少问题,但仍存在一些有价值且有挑战性的问题需要进一步研究。

当前,编队控制问题研究主要是针对固定编队,而编队成员之间的距离也是固定的。在实际运用中,系统编队为完成任务,编队成员之间的距离常常是时变的,这就要求编队成员之间的距离依任务进程而变化。另外,还需考虑全局避免相撞、全局保持通信结构、输入饱和、离散事件、动力限制等编队控制约束。同时,目标信息不确定、存在噪声和干扰情况下,编队控制的鲁棒性和智能性也应当引起关注。另外,目前关于一致性编队控制研究都是基于局部协作,而非竞争。但竞争在编队系统中存在,在集体协作中能够起到积极作用。传统 Multi-Agent 系统缺乏竞争机制,系统一致性编队算法的最终状态由系统初始状态决定,受限地分布于系统状态空间的某些区域。一个有意义的研究方向是,在一致性编队控制中引入竞争机制,通过使不同的 Agent 获取竞争后的收益,使得系统最终状态能够到达不同的理想区域,以此提高系统整体性能。

### 参 考 文 献

- [1] JADBABAIE A, LIN J, MORSE A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(6):988-1001.
- [2] REN W, BEARD R W, ATKINS E M. Information consensus in multi-vehicle cooperative control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(2):71-82.
- [3] ROMANCZUK P, SCHIMANSKY-GEIER L. Mean-field theory of collective motion due to velocity alignment[J]. Ecological Complexity, 2012, 10(6):83-92.
- [4] MAITHRIPALA D H S, BERG J M, MAITHRIPALA D H A, et al. A geometric virtual structure approach to decentralized formation control[C]//American Control Conference, 2014:5736-5741.
- [5] HADDAD W M, NERSESOV S G, GHASEMI M. Formation control protocols for nonlinear dynamical systems via hybrid stabilization of sets[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control, 2014, 136(5):562-576.
- [6] PAVONE M, FRAZZOLI E. Decentralized policies for geometric pattern formation and path coverage[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control, 2007, 129(5):633-643.

- [7] REN W. Collective motion from consensus with cartesian coordinate coupling[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(6):1330-1336.
- [8] SEPULCHRE R, PALEY D A, LEONARD N E. Stabilization of planar collective motion with limited communication[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(3):706-719.
- [9] DIMAROGONAS D V, KYRIAKOPOULOS K J. Inverse agreement protocols with application to distributed multi-agent dispersion[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(3):657-663.
- [10] TANNER H G, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Flocking in fixed and switching networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(5):863-868.
- [11] CUCKER F, DONG J G. A general collision-avoiding flocking framework[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(5):1124-1129.
- [12] CAO Y, REN W, LI Y. Distributed discrete-time coordinated tracking with a time-varying reference state and limited communication [J]. Automatica, 2009, 45(5):1299-1305.
- [13] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Consensus-based cooperative formation control with collision avoidance for a multi-UAV system[C]//American Control Conference, 2014;2077-2082.
- [14] XIANG J, WEI W, LI Y. Synchronized output regulation of linear networked systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(6):1336-1341.
- [15] YU W, CHEN G, CAO M. Distributed leader-follower flocking control for multi-agent dynamical systems with time-varying velocities[J]. Systems & Control Letters, 2010, 59(9):543-552.
- [16] CAO Y, REN W. Distributed coordinated tracking with reduced interaction via a variable structure approach [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(1):33-48.
- [17] KHOO S, XIE L, ZHAO S, et al. Multi-surface sliding control for fast finite-time leader-follower consensus with high order SISO uncertain nonlinear agents[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2014, 24(16):2388-2404.
- [18] HU J, FENG G. Distributed tracking control of leader-follower multi-agent systems under noisy measurement [J]. Automatica, 2010, 46(8):1382-1387.
- [19] REN W. Distributed cooperative attitude synchronization and tracking for multiple rigid bodies[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(2):383-392.

(上接第53页)

- gies for electronic support[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2011, 47(3):1770-1784.
- [2] WINSOR C, HUGHES E J. Optimisation and evaluation of receiver search [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2012, 6(4):233-240.
- [3] 向晓萍,李朝海,黄宇声,等. 相控阵卫星跟踪系统搜索/捕获仿真研究[J]. 雷达科学与技术,2015,13(5):535-542.
- [4] 周颖,王雪松,王国玉,等. 相控阵雷达最优搜索随机规划研究[J]. 现代雷达,2005,27(4):60-63.
- [5] 徐斌,杨晨阳,李少洪,等. 相控阵雷达的最优分区搜索算法[J]. 电子学报,2000,28(12):69-73.
- [6] 徐斌,杨晨阳,李少洪,等. 相控阵雷达中的自适应搜索研究[J]. 电子学报,2001,29(12):1719-1722.
- [7] 刁晓静. 电子侦察中的宽带 DBF 技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [8] 王红霞,潘成胜,宋建辉. 星载智能天线波束形成技术[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [9] WILEY R G. Electronic intelligence: the interception and analysis of radar signals[M]. Norwood: Artech House Publishers, 2006.
- [10] 邵涛,胡以华,石亮. 机载相控阵火控雷达信号的截获概率分析[J]. 雷达科学与技术,2009,7(3):184-188.
- [11] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 2版. 西安:西安电子科技大学出版社,2012.

欢迎订阅期刊 欢迎刊登广告