

多智能体系统协调控制一致性问题研究综述^{*}

谢光强^{a, b}, 章 云^a

(广东工业大学^a自动化学院; ^b计算机学院, 广州 510006)

摘 要: 综述了多智能体系统协调控制一致性问题的发展情况, 介绍了解决一致性问题的主要原理和适用范围, 对一致性协议进行了总结, 对一致性问题研究的主要领域进行了深入阐述, 对群集、蜂涌、聚集、传感器网络估计等问题进行分析和阐述。最后讨论了以上领域尚未解决的问题和未来的研究方向。
关键词: 分布式人工智能; 多智能体系统; 协调控制; 一致性问题
中图分类号: TP301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2011)06-2035-05
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.06.008

Survey of consensus problem in cooperative control of multi-agent systems

XIE Guang-qiang^{a, b}, ZHANG Yun^a

(^a Faculty of Automation; ^b Faculty of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This paper summarized the development of consensus problems in cooperative control of multi-agent systems and some consensus protocols, providing the native mechanisms and coverage to solve consensus problems introduced with emphasis on the main areas of research of consensus problems. Investigated and analyzed different problems include swarming, flocking, rendezvous, decentralized estimation of sensor network. Finally discussed the unresolved topics and pointed some future research directions.
Key words: distributed artificial intelligence; multi-agent system; cooperative control; consensus problem

引言

多智能体系统在 20 世纪 80 年代后期成为分布式人工智能研究中的主要研究对象。研究多智能体系统的主要目的就是期望功能相对简单的智能体之间进行分布式合作协调控制, 最终完成复杂任务。多智能体系统由于其健壮、可靠、高效、可扩展等特性, 在科学计算、计算机网络、机器人、制造业、电力系统、交通控制、社会仿真、虚拟现实、计算机游戏、军事等方面广泛应用^[1-3]。智能体的分布式协调合作能力是多智能体系统的基础, 是发挥多智能体系统优势的关键, 也是整个系统智能性的体现。

在多智能体分布式协调合作控制问题中, 一致性问题作为智能体之间合作协调控制的基础, 具有重要的现实意义和理论价值。所谓一致性是指随着时间的演化, 一个多智能体系统中所有智能体的某一个状态趋于一致。一致性协议是智能体之间相互作用、传递信息的规则, 它描述了每个智能体和与其相邻的智能体的信息交换过程。当一组智能体要合作共同去完成一项任务, 合作控制策略的有效性表现在多智能体必须能够应对各种不可预知的形势和突然变化的环境, 必须对任务达成一致意见, 这就要求智能体随着环境的改变能够达到一致。因此, 智能体之间协调合作控制的一个首要条件是多智能体达到一致。

近年来, 一致性问题的研究发展迅速, 包括生物科学、物理科学、系统与控制科学、计算机科学等各个领域都对一致性问

题从不同层面进行了深入分析, 研究进展主要集中在群集^[4-10]、蜂涌^[11-16]、聚集^[17-27]、传感器网络估计^[28-29]等问题。

多智能体系统协调控制中一致性问题阐述

图论和矩阵论是一致性问题研究分析中非常重要的工具, 通常采用图来表示多智能体相互间传递信息的关系, 采用矩阵描述智能体节点与边之间的关系。

图论基础

考虑由 n 个多智能体组成的系统, 其网络拓扑图为 $G=(V, E)$ 。其中: $V=\{1, 2, 3, \dots, n\}$, 表示网络拓扑图的顶点集; $E\subseteq\{(i, j), i, j\in V, i\neq j\}$, 表示网络拓扑图的边集, 若是无向图, 节点是无序的, 则 $(i, j)\in E\Rightarrow(j, i)\in E$ 。顶点集 V 和边集 E 通常决定了网络拓扑图的序与尺寸。在动态网络系统中, 边集 E 统称为系统的通信复杂度。

矩阵论基础

为了表示节点与边的关系, 通常采用邻接矩阵 $A=[a_{ij}]$ 来表示。具体定义如下:

$$a_{ij}=\begin{cases} 1 & , i\in E \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{1}$$

对于无向图 G 其邻接矩阵是对称的。

对于每一个智能体, 采用的是分布式控制策略, 能够通信的范围是有限的, 主要通过自身的状态和能够进行通信的邻居状态来进行状态的变化。通常用邻域集 N 来表示智能体的邻

域集。第 i 个智能体的邻域集定义如下:

$$N_i = \{j \in V \mid a_{ij} \neq 0\} = \{j \in V \mid (i, j) \in E\} \tag{2}$$

如果智能体 i 是 j 的邻居, 且 $a_{ij} \neq 0$ 则表示智能体 i 可以接收 j 的信息。如果网络拓扑结构时变, 为切换拓扑网络结构, 则 $G = (V, E)$ 为动态图, 记为 $G(t) = (V, E(t))$ 。其中边集 $E(t)$ 、邻接矩阵 $A(t)$ 及每个智能体的领域集 $N_i(t)$ 均时变。在许多应用中, 网络拓扑结构经常为切换拓扑, 如移动机器人通信网络。

一致性问题的数学描述

对于多智能体系统中的单个智能体 i 的状态可以表示为 $z_i(t) = u_i$ 。若所有智能体的状态最终趋于相等, 则表示为

$$\|z_i(t) - z_j(t)\| \rightarrow 0 \quad \forall i, j \text{ 且 } t \rightarrow \infty \tag{3}$$

多智能体系统协调控制一致性问题理论分析

一致性问题理论研究重点

在一致性问题的分析研究中, 一致性协议是研究的重点。一致性协议是智能体之间相互作用的局部规则, 它描述了每个主体与它相邻智能体间的信息交换过程。研究重点主要集中在对一致性协议模型的设计分析, 一致性协议的收敛、平衡状态、应用分析。目前主要采用矩阵方法、Lyapunov方法进行一致性协议的收敛分析, 使用图论来进行平衡状态分析^[30~32]。

一致性协议分析

用 $z_i(t)$ 表示第 i 个智能体的状态信息。状态信息是用来表示智能体进行协调控制所需要的信息, 可以是速度、位置、角度、决策量等信息。

基于连续时间的一致性协议

Olfati-Saber等人^[133]提出了一种基于连续时间的分布式一致性协议, 协议如下:

$$\dot{z}_i(t) = \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(z_j(t) - z_i(t)) \tag{4}$$

该协议只需通过智能体的邻域信息传递就可达到整个系统趋于一致。该协议也可用矩阵的方式表示:

$$\dot{Z} = -LZ \tag{5}$$

其中: L 为多智能体系统网络图的拉普拉斯矩阵。

若系统拓扑结构为无向图, 则系统逐渐收敛到所有智能体初始值的平均值, 即 $a = (1/n) \sum z_i(0) = 0$ 。这种协议称为平均一致性协议, 该协议在传感器网络信息融合等领域有广泛的应用。

基于离散时间的一致性协议

基于离散时间的一致性协议如下所示:

$$z_i(k+1) = z_i(k) + \epsilon \sum_{j \in N_i(k)} a_{ij}(z_j(k) - z_i(k)) \tag{6}$$

也可用矩阵的方式表示:

$$Z(k+1) = D(k)Z(k) \tag{7}$$

其中: $\epsilon > 0$ 为调整因子, 一般取 $(0, 1]$, $0 \leq \alpha < 1$; $D(k) = I - \epsilon L(k)$ 为单位矩阵, $D(k)$ 为非负矩阵。

基于切换拓扑结构的一致性协议

在实际应用当中, 多智能体系统的网络拓扑结构时常发生变化, 通常将这种时变的拓扑结构称为切换拓扑结构。造成网络拓扑动态变化的原因有很多, 比如在车辆编队控制过程中, 车辆位置发生了变化; 在移动机器人进行通讯过程中, 由于网络的故障造成信息传递丢失。通常来说, 基于切换拓扑结构的

一致性协议能够很好地应对拓扑结构动态变化的要求, 最后使智能体的状态趋于一致。

网络切换拓扑结构可以用动态图 $G(\sigma(t))$ 表示, 其中 $\sigma(t)$ 为切换信号, 则切换拓扑的一致性协议可表示为

$$\dot{Z} = -L(G(\sigma(t)))Z \tag{8}$$

带时滞一致性协议

智能体之间进行信息传递交换的过程当中, 经常会存在信息传递延时所带来的时滞问题。目前, 带时滞的一致性协议主要分为三类: a) 对称时滞一致性协议, 智能体本身接收和发送信息都有固定时滞; b) 非对称时滞一致性协议, 智能体本身接收信息有固定时滞, 发送信息没有时滞; c) 时变时滞一致性协议, 时滞是随时间动态变化, 不是固定的常数。

a) 对称时滞一致性协议为

$$\dot{z}_i(t) = \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(z_j(t-\tau) - z_i(t-\tau)) \tag{9}$$

b) 不对称时滞一致性协议为

$$\dot{z}_i(t) = \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(z_j(t-\tau) - z_i(t)) \tag{10}$$

c) 时变时滞一致性协议为

$$\dot{z}_i(t) = \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(z_j(t-\tau_{ij}(t)) - z_i(t-\tau_{ij}(t))) \tag{11}$$

其中: $\tau_{ij}(t)$ 为时变时滞, 且 $\tau_{ij}(t) = \tau_{ji}(t)$ 。

一致性滤波

系统在实际运行过程中, 通常存在时滞和噪声干扰, 一般通过分布式估计来进行噪声估计处理。以前的工作主要是基于卡尔曼滤波来处理噪声估计, 该方法要求网络拓扑为全连通图, 当网络节点较多时, 需要处理的信息过多, 效率较低。因此需要考虑在每个传感器仅与部分传感器进行信息交换, 并能够进行有效的分布式估计。研究表明, 一致性滤波能简化大规模网络的通信复杂程度, 降低能量消耗。

一致性问题的研究应用进展

目前, 一致性问题的研究发展迅速, 国内外学者研究了一致性问题在具体应用中的性质, 取得了一定的成果。

群集问题

群集是由大量自治个体组成的集合。在无集中式控制和全局模型的情况下, 通过个体的局部感知作用和相应的反应行为, 使整体呈现出一致的行为。自然界中存在着大量的群集, 如蚁群、鱼群、蜂群等, 在运动中达到整体上的动态稳定。这些形式各异的群体运动, 在广义上都是一种群集。

由于不同种群间的差异, 它们所显示出来的群集行为也不尽相同。关于群集的概念, 至今没有一个明确的定义, 目前普遍接受的群集的运动基本特点描述如下: a) 智能体与智能体之间、智能体与障碍物之间不会发生碰撞; b) 群集以某种队形或者蜂涌运动; c) 可能会有其他的优化要求。群集的运动过程中要求群集中的智能体之间进行局部协作, 整体上在某些方面达成一致, 以求最终能完成任务^[4]。

国外许多学者对群集问题展开了卓有成效的研究工作:

Gaz等人^[159]设计了一种在 N 维空间情况下用于群集的连续时间模型, 研究了模型的稳定性能。研究表明, 具有自治能力的智能体或生物等个体能够在有限的时间内形成一个具有内聚性的群, 并且群尺寸的界是由群模型的参数决定的。作者进一步研究了另外一种群模型, 该模型具有固定拓扑或动态

拓扑, 在考虑了信息流中异步操作和时延的情况下, 证明了智能体的状态将收敛为一个常值。文中所研究的这种模型, 还可以用于同步和分布式决策。

Tanne^[7]利用势场函数和力学方法, 分析了具有固定和动态拓扑的无向网络多智能体集群运动, 并利用代数图论、控制论和非光滑理论等工具对多智能体网络系统进行了稳定性分析。

Moreau^[8]提出了一种多智能体网络模型, 每个智能体根据邻域内智能体的信息进行当前状态的更新。作者给出了智能体状态最终收敛为一个常值的充分必要条件, 并应用图论和系统论, 对一致性问题的收敛性进行了理论分析, 给出了在时滞不对称情况下收敛的一致性协议。分析表明, 当网络为固定拓扑结构时, 只要网络保持连通, 智能体状态最终会趋于一致。当网络为切换拓扑结构时, 如果在有限的时间内网络保持连通, 智能体状态最终会趋于一致。作者还观察到一种现象, 越多的通信联系并不能导致快速收敛, 反而可能会导致收敛性能的损失。

Olfati-Saber等人^[9-33]讨论了在固定和切换网络拓扑结构下动态智能体网络的一致性。文中分析了三种情况: a) 固定拓扑结构的有向网络; b) 切换拓扑结构的有向网络; c) 有通信时滞和固定拓扑结构的无向网络。作者设计了带时滞和不带时滞的两种一致性协议, 并提供三种情况下的一致性协议的收敛性分析, 建立了网络的代数连通性(Fiedler特征值)与一个线性一致性协议性能之间的联系。研究还发现, 系统网络若是无向的同时时滞 $0 \leq \tau < \pi/2\lambda_1$, 则带时滞对称一致性协议渐近收敛到平均一致。在原有的基础上, 进一步对以下几个方面进行了研究: a) 有向信息流的作用; b) 因连接或者节点错误造成的网络拓扑结构改变的情况下一致性协议的鲁棒性; c) 性能保证。给出了算法的收敛证明以及性能分析, 讨论了多智能体系统的一致性问题与不同应用的关联, 建立了多智能体系统的结构特性与一致性协议信息融合速度的联系。

Ren等人^[10]研究了基于有限制的和不可靠信息交换下动态交互的切换拓扑结构, 提出了该结构的离散和连续时间一致性协议。研究表明, 当系统演变时, 若有向的交互图含有一棵生成树, 则能获得渐进的一致性。

蜂涌问题

在一个多智能体系统中, 所有的智能体最终能够达到速度矢量相等, 相互间的距离稳定, 称为蜂涌问题。蜂涌行为可以认为是群集的一种特殊情况。Reynolds^[4]于 1987 年提出了关于蜂涌运动的基本模型——Boid模型。该模型包含了三条启发式规则, 用于描述单智能体如何依赖群中其他智能体的速度和距离而运动: a) 分离性, 各成员之间避免碰撞; b) 内聚性, 各成员朝着一个平均的位置进行聚合; c) 排列性, 各成员沿着一个平均的方向共同运动, 尽量与邻居范围内的群体成员保持速度匹配。

Vicsek等人^[11]于 1995 年从统计力学的角度提出了 Vicsek模型, 该模型中智能体的方向是其邻域内智能体方向值的平均值。Jadbabaie等人^[30]将 Vicsek模型进行了理论证明分析, 证明了最近邻法则能够让所有的智能体最终向相同的方向移动并趋于一致。

Olfati-Saber^[12]给出了设计和分析分布式蜂涌协议的理论框架, 证明群体的迁移行为可用对等的智能体网络来表示, 还给出群的 Lyapunov稳定性分析。作者研究了在自由空间和多

障碍的情况下蜂涌的两种例子, 给出了三种蜂涌协议, 协议通过带导航反馈设计使一群智能体跟随虚拟领航者运动: 其中两种是用于自由蜂涌, 一种是用于约束蜂涌。第一种协议包含了 Reynolds的三个规则, 这种算法通常导致群运动时会分割成若干个连通片, 第二个和第三个协议都会产生蜂涌现象。作者提供了蜂涌成本函数, 给出了成本函数的设计方法和一种用于成本函数构造的多类别框架, 该框架包含了群成员、 α 智能体。与 α 智能体相关的虚拟智能体称为 β 智能体和 γ 智能体。

Olfati-Saber的蜂涌协议有两个关键的假设: a) 所有智能体能与虚拟领航者通信; b) 虚拟领航者在相同速度下进行运动。Su等人^[13]重新研究了在缺少以上两个关键假设情况下多智能体蜂涌的问题。首先假设有小部分的智能体能与虚拟领航者通信, 新的蜂涌协议仍能够让所有的智能体以相同的速度进行移动。作者对 Olfati-Saber的算法进行了改进, 实现了对虚拟领航者的渐近跟踪, 给出了收敛的速度, 所有智能体的中心位置和速度将指数收敛到虚拟领航者的中心位置和速度。

Heiber设计了一种新的蜂涌协议, 引入不连续性, 为适应智能体交互网络的拓扑的任意切换, 采用了非光滑分析^[11]。作者使用分散式、最近邻交互法则在网络中交换信息, 智能体可调整它们的速度向量, 稳定相互间的距离。无论网络是否为切换结构, 只要网络在任何时候保持连接, 就能保证收敛到一个普通的速度向量, 保持智能体间的距离稳定。文中还分析了这种蜂涌协议的稳定性情况。

聚集问题

一群移动的智能体最后能够在某一点聚集, 称为聚集问题。聚集问题的发展源于机器人应用的发展, 如一群机器人要合作完成一个任务, 到达一个共同的地点, 在一片未知的地方进行搜救工作, 或者一群无人驾驶飞机要达到一个共同地点等。聚集是一类特殊的一致性, 聚集表示位置一致, 聚集问题属于无约束一致性问题, 是为了设计一种局部控制策略, 使得所有的智能体最终聚集在同一个未知点。在智能体移动过程中, 网络拓扑结构由于取决于智能体每刻的状态, 也为切换拓扑结构。

Ando^[1]提出了一种用于向单点运动、有限视力的自治移动机器人的聚集的分布式协议。算法重复以下三步: a) 观察在可视范围内的机器人的相对位置; b) 根据给定的算法得到的观察值计算自己的新位置; c) 移动到新的位置。机器人的视力是有限的, 因此机器人下一步的位置完全是由当前时刻它所能看到的机器人的位置所决定的。Ando的算法要求所有机器人相互之间能全局通信, 这种要求过高, 机器人的通信负担也很重。

Lin等人^[18-19]设计了针对移动智能体群体聚集行为的一种局部控制协议, 每个智能体连续追踪在它感应范围内的智能体的位置, 在存在局部通信情况下, 使得群体里的所有智能体能够最终聚集在一个区域。作者还探讨了在智能体之间传感信息同步/异步的前提下这类问题的解决方案。

郑军等人^[20]针对多智能体聚集问题, 提出了一种基于最近邻法则的分布式离散形式算法, 对其全局稳定性进行了分析。在给出了多智能体最终收敛到全局中心的等价条件基础上, 证明了确保动态切换系统稳定的充分条件, 给出了算法中调整因子的取值范围, 以及公共 Lyapunov函数。

Corr^[21]提出了一种在存在切换和通信故障情况的较差

网络环境下,用于移动自治智能体的协调控制协议。协议的目标是通过协商在网络中的智能体的位置,让智能体最终能够聚集在一起。协议的正确性依赖于邻接图的属性及 LaSalle 不变式原理。

Lir 等人^[22]研究了自治的移动智能体编队时聚集在一点的一致性问题的,提出了三种编队协议以及聚集的必要条件,通过分布式控制,使得一群自治的移动智能体获取特定的编队,并聚集到一点。作者还研究了编队过程中碰撞发生、队形进化的问题。

Fang^[23]设计了一种新分布式移动协议,使得所有的智能体在局部通信的情况下,在给定的感应范围内聚集。作者提出了一种称为停留点的特定 d 维实数空间点集,停留点保存了智能体的局部参考信息,并用图论进行了特征化。每个智能体最初被定位在相同的一些停留点,在传感范围内能够确定它到停留点的距离。

Conat^[24]提出了一种用于保证聚集的分布式协议新的充分条件,提出的条件要比之前相关的文献都宽松些,尤其是提出了用于代替连续情况的不连续点的协议所需较为宽松的条件。

传感器网络估计问题

分布式卡尔曼滤波

网络级的估计问题一直受到不少学者的关注,近几年分布式传感器网络迅速发展,研究重点主要集中在分布式卡尔曼滤波,每个传感器仅与部分传感器进行信息交换。

Rao 等人^[25]实现了具有多个传感器的分散卡尔曼滤波器。这种滤波器不需要集中式的通信手段。每一个传感器节点执行自己的局部卡尔曼滤波器用来达成部分决定,决定能够传播到其他的节点。每一个节点吸收信息来达到自身系统状态的局部估计。由于没有一个统一的中央处理节点,即使失去一个或多个传感器节点,系统仍然非常具有弹性。

Spanos 等人^[34]提出了一种分布式卡尔曼滤波,分析在不同网络的连接密度、不同拓扑、不同带宽的情况下系统的性能。作者采用基于频域特征的方法对分布式估计的稳定性进行分析,并使用拉普拉斯矩阵表示通信网络中近邻之间的信息交换程度。

Olfati-Saber 等人^[35-38]设计了一种分布式滤波器,并进行了收敛性分析。这种滤波器是一种基于分布式平均一致性滤波器,能够让传感器网络的节点追踪 n 个传感器测量值的平均值,并能够快速跟踪信号。同时作者发现传感器网络的跟踪和融合能力与网络的尺寸是相关的。针对这种情况,研究并解决了关于多大尺寸的传感器网络能进行有效的传感器融合这个根本性的问题,提出了通过权值测量和逆协方差矩阵将分布式卡尔曼滤波问题分成两个独立动态一致性问题。进一步通过使用低通和带通一致性滤波这样的一种分布式方法来解决数据融合的问题,并将一个中央卡尔曼滤波器分解成 n 个带有由两种类型的一致性滤波提供的输入的微卡尔曼滤波器,估计的效果可收敛于中心式卡尔曼滤波器的估计效果。

Ren 等人^[39]提出了一种基于离散和连续时间的一致性滤波,该滤波能明确每一个智能体状态信息的相关置信度/可靠性,并给出了较为宽松的充分条件,使得在交互切换拓扑环境下使用该滤波能够达到一致性要求。

Yu^[40]设计了一种新的分布式滤波器,在这种新型的滤波器中,每一个传感器都能与邻近的传感器通信,采用分布式的方法进行滤波,滤波器仅仅需要小部分的传感器测量目标信息

就可以控制整个网络。

网络丢包估计问题

丢包情况认为是由一个有限状态的马尔科夫过程下有界发生和驱动。Xiao 等人^[41]研究了在有可能丢包的网络环境下给滤波器传送测量输出值时,时变卡尔曼滤波峰值协方差的稳定性问题。作者的研究发现在无附加条件下,卡尔曼滤波是峰值协方差稳定的,并根据系统动力学和马尔可夫链的概率转换矩阵,给出峰值协方差稳定性的一个充分条件。

Ren 研究了一类在基于包的的网络环境中线性时不变系统稳定的经典问题^[42]。在假设控制器与设备之间保证良好通信链路的情况下,给出了一套充分条件集,保证系统能够在一个给定的数据传输率 C 下保持稳定。为了保证系统稳定,这些充分条件依赖于 C 最小值的上界。作者提出了一种递归的编码—解码策略和一种相关的控制规则用于获取 C 上界的稳定性。还探讨了一类最优的比特分配问题,这类问题主要是指在一个 LTI 系统能够获得数据率的最小上界的情况下, LTI 子系统的一个包如何分配比特。Ren 将这类最优的比特分配问题描述为一种线性不等式最优化问题,这类问题能够在使用标准的半定编程算法的情况下得到很好的解决。

Gupta 等人^[29]研究了在传感器与控制器之间通信存在丢包链接系统的最优线性二次高斯控制问题,给出了使用标准 LQR 状态反馈设计方法来解决这类问题所需的分离原理的证明,以及用于在不可靠的链接中传播和使用时的最优算法。该算法是在链接的传感器端设置了一个卡尔曼滤波器,在控制端设置了一个切换线性滤波器。作者提出的解决方案是对现有的 LQG 控制设计的一种改进。

结束语

多智能体系统协调合作控制中的一致性问题研究需要以图论、矩阵论、控制论、人工智能为理论依据,以一致性协议为主要的研究对象,要求一致性协议在满足实时性、鲁棒性的同时又能使系统体现智能性。未来研究的内容可集中在以下几个方面:

a)在不对称时变时滞环境下保持收敛和稳定的一致性协议,并能应用到智能群体成员之间共同作用、协调运作的群集运动控制问题中。

b)在切换拓扑环境下一致性协议的设计和应用。如在聚集应用中,研究确保智能体系统时时连通的初始网络拓扑结构和对应的一致性协议的设计;以及存在通信异步、通信噪声、障碍物情况下,对应的一致性协议的设计;不对称时变时滞一致性协议的研究;网络存在坏点情况下的一致性协议设计。

c)在切换拓扑环境下传感器网络分布式估计问题。如切换拓扑结构下的一致性估计滤波的设计研究;改进现有的一致性滤波,尽量减少无线器网络中能量损耗,提高收敛的效果;设计带预测策略的一致性协议,参考智能体以往的状态来进行预测估计,改善无线传感器网络丢包现象。

参考文献:

- [1] SYCARA K P. Multiagent systems [J]. AI Magazine, 1998, 19(2): 79-92.
- [2] JENNINGS N R, SYCARA K, WOOLDRIDGE M. A roadmap of agent research and development [J]. Autonomous Agents and Multi Agent Systems, 1998, 1(1): 7-38.

- [3] WOOLDRIDGE M. An introduction to multi-agent systems[M]. 2nd ed[S]: Wiley, 2009.
- [4] REYNOLDS C. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 25-34.
- [5] GAZIV, PASSINO K M. Stability analysis of swarms[J]. Automatic Control, 2003, 48(3): 692-697.
- [6] GAZIV. Stability of an asynchronous swarm with time-dependent communication links[J]. Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2008, 38(1): 267-274.
- [7] TANNER H G. Flocking in fixed and switching networks[J]. Automatic Control, 2007, 52(5): 863-868.
- [8] MOREAU L. Stability of multi-agent systems with time-dependent communication links[J]. Automatic Control, 2005, 50(2): 169-182.
- [9] OLFATI-SABER R. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proc of IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [10] REN W ei, BEARD R W. Consensus seeking in multi-agent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. Automatic Control, 2005, 50(5): 655-661.
- [11] VICSEK T, CZIROK A, BEN-JACOB E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(6): 1226-1229.
- [12] OLFATI-SABER R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory[J]. Automatic Control, 2006, 51(3): 401-420.
- [13] SU Hou-sheng, WANG Xiao-fan, LIN Zong-li. Flocking of multi-agents with a virtual leader[J]. Automatic Control, 2009, 54(2): 293-307.
- [14] SHI Hong, WANG Long, CHU Tian-guang. Virtual leader approach to coordinated control of multiple mobile agents with asymmetric interactions[J]. Physical D: Nonlinear Phenomena, 2006, 213(1): 51-65.
- [15] BLONDEL V D, HENDRICKX J M, OLSHEVSKY A, et al. Convergence in multi-agent coordination: consensus and flocking[C] //Proc of the 44th IEEE European Control Conference on Decision and Control, 2005.
- [16] GAZIV, PASSINO K M. Stability analysis of social foraging swarms[J]. Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2004, 34(1): 535-557.
- [17] ANDO H. Distributed memoryless point convergence algorithm for mobile robots with limited visibility[J]. Automation, 1999, 15(5): 818-828.
- [18] LIN Ji, MORSE A S, ANDERSON B D O. The multi-agent rendezvous problem: Part 1-the synchronous case[C] //Proc of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004, 1926-1931.
- [19] LIN Ji, MORSE A S, ANDERSON B D O. The multi-agent rendezvous problem: Part 2-the asynchronous case[C] //Proc of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004, 2120-2147.
- [20] 郑军, 颜文俊. 多主体汇聚问题离散算法的稳定性[J]. 浙江大学学报, 2006, 41(10): 1684-1687.
- [21] CORTÉS J. Robust rendezvous for mobile autonomous agents via proximity graphs in arbitrary dimensions[J]. Automatic Control, 2006, 51(8): 1289-1298.
- [22] LIN Zhi-yun, BROUCKE M. Local control strategies for groups of mobile autonomous agents[J]. Automatic Control, 2004, 49(4): 622-629.
- [23] FANG J, MORSE A S, CAOM. Multi-agent rendezvous with a finite set of candidate rendezvous points[C] //Proc of American Control Conference, 2008, 765-770.
- [24] CONTE G. The rendezvous problem with discontinuous control policies[J]. 1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
- [25] DIMAROGONAS D V, KYRIAKOPOULOS K J. On the rendezvous problem for multiple nonholonomic agents[J]. Automatic Control, 2007, 52(5): 916-922.
- [26] CHALOPIN J, DAS S, SANTIAGO N. Rendezvous of mobile agents in unknown graphs with faulty links[C] //Proc of the 21st International Conference on Distributed Computing, 2007, 108-122.
- [27] GUSTAVIT, DIMAROGONAS D V, EGGERSTEDT M, et al. Sufficient conditions for connectivity maintenance and rendezvous in leader-follower networks[J]. Automatica, 2010, 46(1): 133-139.
- [28] RAO B S, DURRANT-WHYTE H F. Fully decentralized algorithm for multi-sensor Kalman filtering[J]. IEEE Proceedings-D: Control Theory and Applications, 1991, 138(5): 413-420.
- [29] GUPTA V, SPANOS D P, HASSIBI B, et al. On LQG control across a stochastic packet-dropping link[C] //Proc of American Control Conference, 2005.
- [30] JADBABAIE A, LIN Ji, MORSE A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. Automatic Control, 2003, 48(6): 988-1001.
- [31] SPANOS D P, OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Dynamic consensus on mobile networks[C] //Proc of IFAC World Congress, 2005.
- [32] TIAN Yu-ping, LU Cheng-lin. Consensus of multi-agent systems with diverse input and communication delay[J]. Automatic Control, 2008, 53(9): 2122-2128.
- [33] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time delays[J]. Automatic Control, 2004, 49(2): 1520-1532.
- [34] SPANOS D P, OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Approximate distributed Kalman filtering in sensor networks with quantifiable performance[C] //Proc of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005.
- [35] OLFATI-SABER R, JEFF S. Consensus filters for sensor networks and distributed sensor fusion: Shannon[C] //Proc of IEEE Conference on Decision and Control, 2005.
- [36] OLFATI-SABER R. Distributed Kalman filter with embedded consensus filters[C] //Proc of IEEE Conference on Decision and Control, 2005.
- [37] OLFATI-SABER R. Distributed tracking for mobile sensor networks with information-driven mobility[C] //Proc of American Control Conference, 2007.
- [38] OLFATI-SABER R. Distributed Kalman filtering for sensor networks[C] //Proc of IEEE Conference on Decision and Control, 2007.
- [39] REN W ei, BEARD R W, KINGSTON D B. Multi-agent Kalman consensus with relative uncertainty[C] //Proc of American Control Conference, 2005.
- [40] YU Wen-wu. Distributed consensus filtering in sensor networks[J]. Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2009, 39(6): 1568-1577.
- [41] XIAO Nan, XIE Li-hua, FU Min-yue. Kalman filtering over unreliable communication networks with bounded Markovian packet dropouts[J]. Robust and Nonlinear Control, 2009, 19(1): 1770-1786.
- [42] SHI Lin, MURRAY R M. Towards a packet-based control theory: Part I stabilization over a packet-based network[C] //Proc of American Control Conference, 2005.
- [43] YANG Wen, WANG Xiao-fan. Consensus filters on small world networks[C] //Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006.