

多智能体一致性算法

自然界中鸟群迁徙、蚂蚁觅食、鱼群游动等现象中，个体与个体之间的配合、协调分工、合作的能力引起了一些人的注意。这些简单的个体在没有集中控制的情况下，通过相互之间分工合作完成了复杂的群体性任务。这些群体性行为具有良好的灵活性（对环境的适应性）、鲁棒性（不受系统内部状态或外界环境干扰的能力）、分散性（它的动力学行为十一个体主题行为为基础）、自组织（群体系统经过资助的烟花变现出显著的整体性质）的特性给科学家以无限遐想。通过对这种能力的模仿，有学者提出了多智能体系统的概念。目前该技术已经可以在计算机网络，机器人，制造业，电力系统，交通控制等方面得到了应用。



图 1 鸟群的一致性

智能体系统是指大量分布配置的自治或者半自治的子系统通过网络互联所构成的复杂的大规模系统。因为其自主性和分布式的特点，单个智能体只需具有相对简单的设计、不完全通讯、简

单设计和处理信息的能力而整个系统却可呈现出复杂的配合和智能行为，可实现高复杂度、高标准、高要求的任务。智能体的分布式协调合作能力是多智能体的系统的基础，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。多智能体的协调控制基本问题包括一致性控制、会合控制、聚结控制和编队控制。对智能体达到一致是实现协调控制的首要条件。

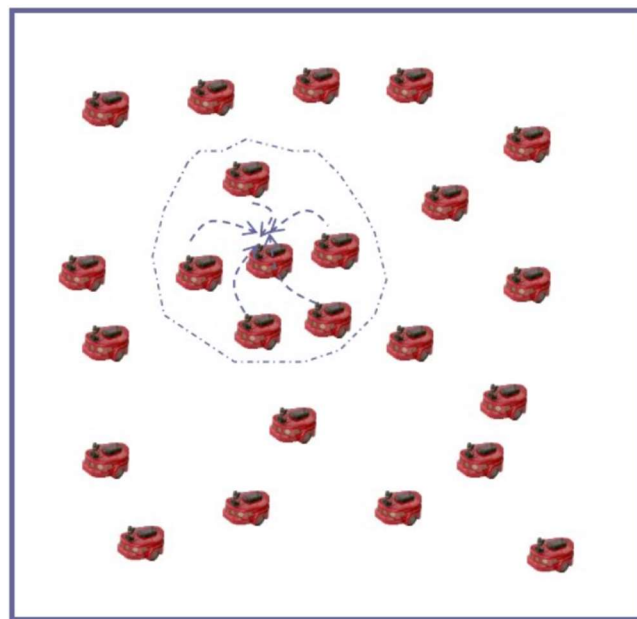


图 2 智能体系统

所谓的一致性是指随时间的演化，一个多智能体系统中所有的智能体的某一状态趋于一致。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其他相邻的智能体的信息交换过程。多个智能体之间协调合作控制的一个首要条件就是多个智能体达到一致。

一致性协议分析

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。

假设多智能体系统中有 n 个智能体组成，其中网络拓扑图为 $G=(V, E)$ 。其中： $V=\{1, 2, 3\cdots n\}$ ，表示网络拓扑图的顶点集； E 是网络拓扑图的边集。顶点集与边集通常决定了网络拓扑图的序和尺寸。节点与边的关系采用 $A=[a_{ij}]$ 表示。

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

对于每一个智能体，采用分布式控制策略，能够同智能体 i 交流的范围有限，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。通过 N 来表示智能体 i 的邻域集。

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

多智能体系统一致性控制目标描述为：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_j(t) - x_i(t)\| = 0, \quad \forall i, j \in \Gamma$$

其中 Γ 为系统中个体的集合， x_i 为系统中第 I 个个体的状态。

1、 基于连续时间的一致性协议：

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

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区域一致。该协议也可通过矩阵的方式表示：

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

其中 L 为多智能体系统网络的拉普拉斯矩阵。

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

2、 基于离线时间的一致性协议：

基于离散时间的一致性协议如下：

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

也可用矩阵的方式表示：

$$Z(k+1) = D(k)Z(k)$$

其中： $\varepsilon > 0$ 为调整因子， $D(k) = I - \varepsilon L(k)$ ， $D(k)$ 为非负矩阵。

3、 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 $G(s(t))$ 表示，其中 $s(t)$ 为切换信号，则切换拓扑的一致性协议可表示为：

$$\dot{Z} = -L(G(s(t)))Z$$

4、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：

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

B、不对称时滞一致性协议：

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

C、时变时滞一致性协议：

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

二阶和高阶多智能体系统

随着研究的深入，逐渐发现一阶系统只是描述平面子的一致性行为，而更多的蜂拥、群聚、编队飞行等现象需要二阶系统来刻画，因此二阶系统的一致性近年来也得到了广泛的关注。

假设系统有 n 个智能体，智能体 i 的第 1 阶动态方程为：

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

其中 $\dot{x}_i^{(1)} \in \mathbb{R}$ 是 x_i 的第 1 阶导数， $\mu_i \in \mathbb{R}$ 是控制输入。 μ_i 即输入形式可表示为：

$$u_i = -\sum_{j=1}^n g_{ij} h_{ij} \left[\sum_{k=0}^{l-1} \gamma_k (x_i^k - x_j^k) \right]$$

1、二阶多智能体系统

系统中 $\dot{x}(t) = v(t)$; $\dot{v}(t) = \mu(t)$ ，其中， $x(t)$ 表示位移 $v(t)$ 表示速度， $\mu(t)$ 表示控制输入。此时系统实现一致性是指当 t 趋近于无穷大时有：

$$|x_i(t) - x_j(t)| \rightarrow 0, \quad |v_i(t) - v_j(t)| \rightarrow 0, \quad \forall i \neq j.$$

Ren 设计了如下算法：

$$u_i = -\sum_{j \in N_i} a_{ij}(t) [(x_i(t) - x_j(t)) + \gamma(v_i(t) - v_j(t))]$$

其中 γ 表示调节参数。可以得到：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & I_n \\ -L & -\gamma L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \end{bmatrix}$$

2、 高阶多智能体系统

作为二阶系统的推广，积分链系统的一致性也引起了许多学者的关注。

$$\begin{aligned}\dot{x}_i^{(1)}(t) &= x_i^{(2)}(t), \\ &\vdots \\ \dot{x}_i^{(m-1)}(t) &= x_i^{(m)}(t) \\ \dot{x}_i^{(m)}(t) &= u_i(t), i = 1, 2, \dots, n\end{aligned}, \quad i \in \mathcal{J}_n$$

积分链系统作为二阶系统的一个推广，许多结论与二阶系统的一致性类似。但是一般线性系统的一致性研究也得到了丰硕的成果：

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) &= Ax_i(t) + Bu_i(t) \\ y_i(t) &= Cx_i(t)\end{aligned}, \quad i \in \mathcal{J}_n$$

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的具体应用中的性质，取得了一定的成果。

1、 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。

国外许多学者对群集问题展开了卓有成效的研究工作：

Gazi 等人设计了一种在 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。

Moreau 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。

Ren 等人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。

2、 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 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。

Olfatih 和 Saber 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，还给出群的稳定性分析并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能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。

3、 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问题，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。

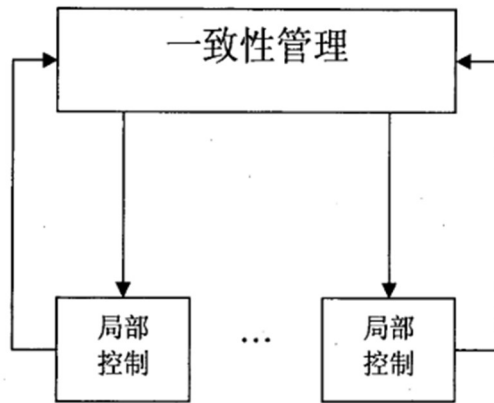


图 3 多智能体系统聚集的协调框架

图 3 给出了多智能体系统聚集的协调框架。这里一致性控制单元使用分布式一致性算法来保证系统中所有个体一致到达聚集目标。基于一致性控制单元的输出，每个个体使用自身的控制算法来完成聚集。

Ando 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

Fang 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。

Conte 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。

4、 同步

同步问题是与一致性问题密切相关的一类问题, 可以看成是一致性问题的非线性扩展。生物学家 Winfree 最先通过假设系统中的每个个体只与它周围有限个个体之间存在着相互作用, 从而将同步问题简化为相位变化问题。

Vicsek 也从统计力学的角度引入了一个同步模型, 假设系统中每个个体在平面中以恒定的速率运行, 角度更新依照邻域范围内所有个体角度的矢量平均进行, 此外还受到一个均值为零的噪声影响。通过仿真给出当个体密度比较大且噪声比较小时, 整个系统会出现行为上的同步。

总结

多智能体系统协调控制中的一致性问题的研究以一致性算法为研究对象，要求一致性算法满足实时性、鲁棒性的同时又能使系统体现出智能性。

多智能体一致性的相关研究由低阶拓展到高阶，由理想情况拓展到实际，逐渐引入实际情况中的考量因素，使得多智能体一致性算法在变得复杂的同时算法也提升了解决实际问题的能力。但是将多智能体系统一致性算法更好的应用到生活中的各个方面还学要不断地深入研究，对具体的情况进行分析。