

网络化多智能体主从式预测编队控制

张天勇, 刘国平[†]

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为解决通讯延时对编队控制造成的不利影响, 研究网络化多智能体在通讯延时情形下的主从式预测编队控制问题, 提出一种主从式预测编队控制架构. 在该架构中, 所有智能体都基于延时状态预测自身当前时刻状态, 用于主动补偿反馈通道延时. 主智能体将自身未来预测状态发送给各从智能体, 从而主动补偿主从智能体间的通讯延时. 仿真结果验证了所提出主从式预测编队控制架构的可行性和灵活性.

关键词: 网络化多智能体; 主从式; 预测控制; 编队控制; 通讯时滞

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Master-slave predictive formation control of networked multi-agents

ZHANG Tian-yong, LIU Guo-ping[†]

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To solve the negative effects caused by time-delay, the master-slave formation control problem of networked multi-agents with communication delay is considered, and a master-slave predictive formation control architecture is proposed. Each individual agent estimates its current state based on delayed states with the proposed architecture to compensate time-delay in the feedback channel actively. Master agent estimates its future state and transmits it to each slave agent to compensate the time-delay between master and slave agents actively. Simulations results show the feasibility and flexibility of the proposed architecture.

Keywords: networked multi-agents; master-slave; predictive control; formation control; communication delay

0 引 言

近年来,随着互联网与计算机技术的不断深入发展,越来越多的学者开始关注网络化多智能体编队控制相关的理论与应用研究^[1-2],多智能体的编队控制方法也发展出许多分支.多智能体编队控制的基本方法主要包含:跟随领航者法^[3-5]、基于行为法^[6-7]、虚拟结构法^[8-9]和一致性法^[10-11],这些方法无论是在理论研究还是在工程实践中都得到了较好的发展与验证.

除上述几种基本编队控制方法外,一些学者将这些方法进行了有效组合及拓展,并得到了许多新的编队控制方法. Sun 等^[12]从虚拟结构法出发,利用滚动时域控制策略设计了跟随者智能体在耦合输入约束情形下的编队控制律. Meng 等^[13-17]将迭代学习算法引入到多智能体编队控制问题中,提出了切换网络拓扑情形下多智能体的编队控制律.类似地,文献[18]将一类非线性多智能体的一致性方法与跟随领航者

法相结合,考虑了时变通讯拓扑情形下的编队控制问题.

前面所介绍的编队控制方法中,一般都假设多智能体自身和/或智能体之间的通讯网络是理想的,即不存在网络诱导延时.然而,在工程实践中通讯时滞是广泛存在而又无法避免的,上面所介绍的编队控制方法没有考虑通讯时滞对整个编队所造成的不利影响,也无法对其进行有效补偿.

针对这一问题,一些学者研究了带有通讯时滞情形下的多智能体编队控制问题^[19-22].文献[19]考虑了智能体间存在时变通讯延时情形下的编队控制问题.然而,当通信时滞增大时,所有智能体必须降低运行速度才能保持编队队形,并对参考轨迹实现跟踪. Millán 等^[20]基于虚拟领航者法研究了水下自主机器人的编队控制问题,设计了 H_2/H_∞ 反馈控制器及前馈控制器,将其组合用于实现对智能体间通讯延时与数据丢包的补偿.对于控制信号带有输

收稿日期: 2016-09-10; 修回日期: 2016-11-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61333003).

作者简介: 张天勇(1988—),男,博士生,从事多智能体系统预测控制的研究;刘国平(1962—),男,教授,博士生导师,从事网络化预测控制等研究.

[†]通讯作者. E-mail: gp Liu@hit.edu.cn

入时滞的一组差分驱动移动机器人同步策略的问题, Velasco-Villa 等^[21]将连续时间时滞系统增广为多维离散时间无时滞系统, 以此抵消时滞对于系统的影响, 并通过实验结果验证了其控制效果. 文献[22]基于反馈线性化方法和线性一致性协议, 考虑了一组具有有向固定通讯拓扑结构非完整约束移动机器人的编队控制问题, 并通过特征根聚类处理(CTCR)的方法保证编队系统在通讯延时情形下的稳定性.

上述编队控制律都能够较好地解决网络通讯时滞对于多智能体编队控制所造成的不利影响, 然而, 这些补偿通讯时滞的方法很难归纳成为统一的设计思想. 基于上述分析, 本文提出了一种主从式预测编队控制架构. 主智能体通过预测的方式补偿自身反馈通道时延, 同时将预测的自身未来时刻状态发送给各从智能体, 用于补偿主从智能体间的通讯时滞. 从智能体同样通过预测的方式补偿自身反馈通道时延, 那么所有智能体均能主动补偿通讯时滞. 如果系统模型是足够精确的, 则迭代预测后得到的系统描述与理想通讯网络情形下的系统描述保持一致. 因此, 多智能体编队控制中的通讯延时问题均可以利用本文所提出的主从式预测编队控制架构来处理. 由于各智能体间的通讯信息只有状态, 异构多智能体间的编队控制也可以使用该架构来实现. 仿真实验结果验证了所提出的主从式预测编队控制架构的可行性和灵活性.

1 主从式预测编队控制架构设计

考虑一类网络化多智能体, 其系统形式由以下非线性离散时间一般形式描述:

$$q_i(k+1) = f_i(q_i(k), u_i(k)). \quad (1)$$

每个智能体 i 的控制律形式为

$$u_i(k) = g_i(q_i(k), q_i^r(k)). \quad (2)$$

其中: $q_i(k)$ 、 $u_i(k)$ 、 $q_i^r(k)$ 为第 i 个智能体的状态、控制输入和参考状态; $f_i(\cdot)$ 和 $g_i(\cdot)$ 为系统描述函数, $i \in (1, 2, \dots, n)$. 不失一般性, 定义智能体 1 作为主智能体, 定义智能体 $j(j \in (2, \dots, n))$ 为从智能体. 在所有智能体中, 只有主智能体能够接收到参考状态, 所有的从智能体之间没有通讯.

理想的通讯网络情形下, 智能体 i 能够在每个采样周期内接收到实时的自身状态. 同时, 主智能体将自身的状态信息发送给从智能体 j , 智能体 j 可以将主智能体的状态信息转化为自身参考状态, 这样所有智能体都得到了自身参考状态, 再结合当前时刻的自身状态, 则式(2)中的控制律对于每个智能体均可解,

即每个智能体都跟踪自身的参考状态. 因此, 多智能体的编队控制问题转化成了 N 个独立智能体的状态跟踪问题, 每个智能体的控制律(2)可以根据实际需求进行设计.

当每个智能体的反馈通道(传感器至控制器)以及主智能体与从智能体之间的通讯通道均存在时滞时, 所有智能体都无法同时获取当前时刻的自身状态与参考状态, 因此式(2)中的控制律对于每个智能体均不可解, 编队控制亦无法实现.

为了解决这一问题, 本文提出了一种主从式预测编队控制架构. 在该架构下, 所有智能体都可以通过预测的方式估计自身当前时刻状态, 而主智能体将预测得到的自身未来时刻状态发送给从智能体, 从而主动补偿主智能体与从智能体之间的通讯时滞, 如图 1 所示.

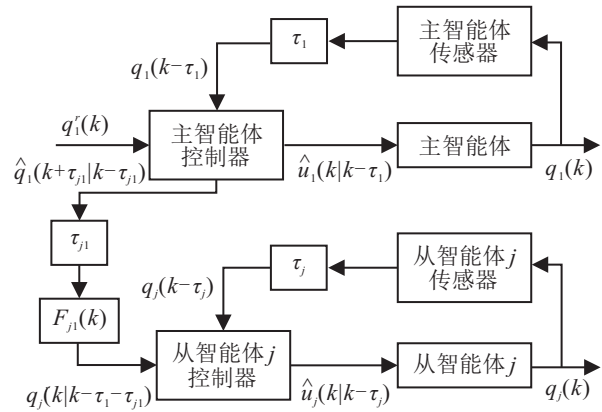


图 1 主从式预测编队控制架构

图 1 中: $q_1(k)$ 、 $q_j(k)$ 分别表示主智能体和从智能体的状态, τ 为通讯时滞. 每个智能体的反馈通道均存在不同定常通讯延时 τ_i . 同时, 主智能体与从智能体 j 之间的通信通道存在不同定常延时 τ_{j1} . 其中: $\tau_i, \tau_{j1} \in (0, \tau_{\max})$, τ_{\max} 为所有通讯通道中延时的上界. 下面具体介绍主从式预测编队控制架构的工作原理.

1) 主智能体. 在采样时刻 k , 主智能体接收到自身的延时状态 $q_1(k - \tau_1)$, 同时获取当前时刻的参考状态 $q_1^r(k)$. 利用延时状态 $q_1(k - \tau_1)$ 、历史参考状态 $q_1^r(k - \tau_1)$ 和控制律(2)可以得到

$$u_1(k - \tau_1) = g_1(q_1(k - \tau_1), q_1^r(k - \tau_1)). \quad (3)$$

将式(3)代入系统表达式(1), 则主智能体向前一步的预测状态可以表示为

$$\hat{q}_1(k - \tau_1 + 1|k - \tau_1) = f_1(q_1(k - \tau_1), u_1(k - \tau_1)). \quad (4)$$

利用估计状态 $\hat{q}_1(k - \tau_1 + 1)$ 和历史参考状态 $q_1^r(k - \tau_1 + 1)$ 即可得到 $\hat{u}_1(k - \tau_1 + 1)$ 与 $\hat{q}_1(k - \tau_1 + 2)$. 依

此类推,经过 τ_1 次迭代后,可以得到主智能体在 k 时刻的控制律和估计状态,其中

$$u_1(k) = \hat{u}_1(k|k - \tau_1). \quad (5)$$

考虑到主智能体与从智能体之间的通讯通道存在时滞 τ_{j1} ,主智能体应当向从智能体 j 发送未来估计状态 $\hat{q}_1(k + \tau_{j1}|k - \tau_1)$,从而补偿时滞 τ_{j1} .需要强调的是,通过迭代的方式计算主智能体未来估计状态 $\hat{q}_1(k + \tau_{j1}|k - \tau_1)$ 时,要用到主智能体的未来参考状态 $q_1^r(k + m)$, $m \in (1, \tau_{j1} - 1)$.未来参考状态可估计需要满足的条件主要有以下两种:

- i) 参考状态的数学表达式已知;
- ii) 参考状态的运动轨迹满足系统模型(1).

当主智能体的参考状态满足上面任意一种条件时,主智能体的未来任意时刻参考状态可估计.使用主智能体在 k 时刻的控制律 $\hat{u}_1(k|k - \tau_1)$ 和估计状态 $\hat{q}_1(k|k - \tau_1)$,结合式(3)和(4),经过 τ_{j1} 次迭代后,即可得到主智能体的未来估计状态 $\hat{q}_1(k + \tau_{j1}|k - \tau_1)$,并最终将相应的估计状态发送给从智能体 j .

2) 从智能体.从智能体的估计状态迭代过程与主智能体的估计状态迭代过程基本一致.在采样时刻 k ,从智能体 j 同时收到自身延时状态 $q_j(k - \tau_j)$ 和主智能体状态 $\hat{q}_1(k|k - \tau_1 - \tau_{j1})$.基于队形描述参量 $F_{j1}(k)$ 即可通过主智能体状态推导出从智能体 j 的参考状态.利用从智能体 j 的延时状态 $q_j(k - \tau_j)$ 和历史参考状态 $q_j^r(k - \tau_j)$ 可得

$$u_j(k - \tau_j) = g_j(q_j(k - \tau_j), q_j^r(k - \tau_j)). \quad (6)$$

将式(6)代入系统模型(1),可得

$$\hat{q}_j(k - \tau_j + 1|k - \tau_j) = f_j(q_j(k - \tau_j), u_j(k - \tau_j)). \quad (7)$$

经过 τ_j 次迭代即可得到从智能体 j 在时刻 k 的控制律为

$$u_j(k) = \hat{u}_j(k|k - \tau_j), \quad j \in (2, 3, \dots, n). \quad (8)$$

至此,所有智能体的控制律均可由式(5)和(8)给出.各智能体的反馈通道和主从智能体间通讯通道中的不同定常时滞都被主动补偿.假设各智能体的系统模型中均不包含未建模动态和不确定性扰动,那么存在以下定理.

定理1 考虑一组由式(1)描述的网络化多智能体,如果采用图1给出的主从式预测编队控制架构,同时分别使用式(5)和(8)作为主从智能体的控制律,则在各智能体反馈通道和主从智能体间均存在不同定常时滞的情形下($\tau_i, \tau_{j1} \in (0, \tau_{\max})$),主从式编队控制问题可解,同时闭环预测控制系统与原系统等

价.

证明 由于各智能体的系统模型中均不包含未建模动态和不确定性扰动,可以认为系统模型(1)是精确的.对于主智能体,根据前向一步预测的结果(3)和(4),可得 $k - \tau_1 + s$ 时刻的估计控制律为

$$\begin{aligned} & \hat{u}_1(k - \tau_1 + s|k - \tau_1) = \\ & g_1(\hat{q}_1(k - \tau_1 + s|k - \tau_1), q_1^r(k - \tau_1 + s)) = \\ & g_1(q_1(k - \tau_1 + s), q_1^r(k - \tau_1 + s)) = \\ & u_1(k - \tau_1 + s), \end{aligned} \quad (9)$$

估计状态为

$$\begin{aligned} & \hat{q}_1(k - \tau_1 + s + 1|k - \tau_1) = \\ & f_1(\hat{q}_1(k - \tau_1 + s|k - \tau_1), \hat{u}_1(k - \tau_1 + s|k - \tau_1)) = \\ & f_1(q_1(k - \tau_1 + s), u_1(k - \tau_1 + s)) = \\ & q_1(k - \tau_1 + s + 1), \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $s \in (1, 2, \dots, \tau_1 + \tau_{j1} - 1)$.对于从智能体 j ,根据前向一步预测的结果(6)和(7),可得 $k - \tau_j + p$ 时刻的估计控制律为

$$\begin{aligned} & \hat{u}_j(k - \tau_j + p|k - \tau_j) = \\ & g_j(\hat{q}_j(k - \tau_j + p|k - \tau_j), q_j^r(k - \tau_j + p)) = \\ & g_j(q_j(k - \tau_j + p), q_j^r(k - \tau_j + p)) = \\ & u_j(k - \tau_j + p), \end{aligned} \quad (11)$$

估计状态为

$$\begin{aligned} & \hat{q}_j(k - \tau_j + p + 1|k - \tau_j) = \\ & f_j(\hat{q}_j(k - \tau_j + p|k - \tau_j), \hat{u}_j(k - \tau_j + p|k - \tau_j)) = \\ & f_j(q_j(k - \tau_j + p), u_j(k - \tau_j + p)) = \\ & q_j(k - \tau_j + p + 1), \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $p \in (1, 2, \dots, \tau_j)$.分别使用 $k + \tau_1 - s$ 和 $k + \tau_j - p$ 代替式(9)~(12)中的 k ,可以得到

$$\hat{q}_i(k + 1|k - \tau_i) = f_i(q_i(k), u_i(k)) = q_i(k + 1), \quad (13)$$

$$\hat{u}_i(k|k - \tau_i) = g_i(q_i(k), q_i^r(k)) = u_i(k), \quad (14)$$

其中 $i \in (1, 2, \dots, n)$.可以看出,式(13)、(14)与多智能体的系统描述(1)、(2)是等价的.□

注1 定理1表明,只要保证多智能体在理想通信网络情形下能够实现稳定的编队控制,则在各智能体反馈通道以及主从智能体间均存在不同定常时滞的情形下,利用本文所提出的主从式预测编队控制架构,依然可以保证闭环预测控制系统是稳定的.

注2 在主从式预测编队控制架构中,由于主智能体只是将自身状态传递给从智能体,而每个从智能

体则根据主智能体的状态信息推导出自身的参考状态,这种信息传递方式使得多个异构智能体间的编队控制成为可能.

注 3 当网络化多智能体间的通讯延时为时变时,可以为每个通讯通道中的时变延时选取一个上界 τ_{\max} ,从而将时变时滞转化为定常时滞.利用这种方式,仍然可以使用本文所提出的主从式预测编队控制架构来主动补偿网络化多智能体间的通讯时滞.

本文所提出的主从式预测编队控制架构需要的一个必要条件是从智能体能够获取主智能体的状态信息,即主从智能体之间是可以进行网络通信的.然而,当从智能体无法与主智能体进行通信时,本节给出了一种特殊形式的预测编队控制架构,如图 2 所示.

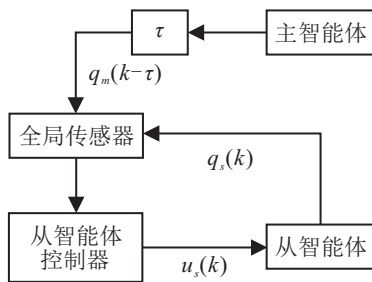


图 2 特殊形式的预测编队控制架构

图 2 中: $q_m(k)$ 、 $q_s(k)$ 分别为主智能体与从智能体的状态, $u_s(k)$ 为从智能体的控制量, τ 为时滞. 从智能体无法利用任何技术手段与主智能体进行通信,但是可以通过一个全局传感器获取到主智能体带有时滞的状态信息. 在 k 时刻,从智能体接收到主智能体的状态信息 $q_m(k - \tau)$,通过迭代预测的方式估计主智能体当前时刻状态 $\hat{q}_m(k|k - \tau)$. 然后,根据队形描述参量 $\mathbf{F}(k)$ 计算自身参考状态 $q_s^r(k|k - \tau)$,得出控制量,并最终实现 $q_s(k) \rightarrow q_s^r(k|k - \tau)$.

对主智能体当前时刻状态进行估计所需要的条件有以下两种:

- 1) 主智能体的系统模型已知,通过系统模型和主智能体的历史状态信息即可对未来状态进行预测;
- 2) 主智能体的系统模型未知,但全部历史状态已知,可以通过数据拟合的方式拟合出主智能体的系统模型,从而对未来状态进行预测.

只要能够满足以上任意一种条件,那么从智能体便可以预测出主智能体的当前时刻状态,并最终实现状态跟踪,从而实现编队控制.

2 研究实例

本节以轮式移动机器人为例,验证主从式预测编队控制架构的可行性.考虑一组轮式移动机器人,其

离散时间运动学模型描述如下:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(k) + Tv_i(k) \cos \theta_i(k), \\ y_i(k+1) = y_i(k) + Tv_i(k) \sin \theta_i(k), \\ \theta_i(k+1) = \theta_i(k) + T\omega_i(k). \end{cases} \quad (15)$$

其中: $i \in (1, 2, \dots, n)$; $q_i(k) \triangleq [x_i(k), y_i(k), \theta_i(k)]^T$ 为第 i 个轮式机器人的状态; $[x_i(k), y_i(k)]^T$ 为轮式机器人在全局坐标系下的位置信息, $\theta_i(k)$ 为其姿态角度,由轮式机器人前进方向与全局坐标系下 X 轴正方向的夹角得到; $u_i(k) = [v_i(k), \omega_i(k)]^T$ 为控制输入; $0 < T < 1$ s 为系统采样时间.

与上一节类似,定义轮式机器人 1 作为主智能体,轮式机器人 $j(j \in (2, \dots, n))$ 为从智能体.只有轮式机器人 1 能够接收到整个编队的参考运动轨迹,所有轮式机器人 j 跟踪由轮式机器人 1 的状态推导得出的参考运动状态.为了描述各轮式机器人在编队队形中的几何位置关系,定义如下矩阵形式的队形描述参量:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & \psi_{1,2} & \cdots & \psi_{1,q} & \cdots & \psi_{1,N} \\ l_{2,1} & 0 & \cdots & \psi_{2,q} & \cdots & \psi_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{p,1} & l_{p,2} & \cdots & 0 & \cdots & \psi_{p,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{N,1} & l_{N,2} & \cdots & l_{N,q} & \cdots & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

在矩阵 \mathbf{F} 中, $p, q \in (2, 3, \dots, N)$ 表示轮式机器人序号,且 $p \neq q$. $\psi_{p,q} \in [-\pi, 0]$ 表示轮式机器人 p 与 q 的质心连接线与轮式机器人 p 体坐标系下 X^p 轴正方向的夹角. $l_{p,q} > 0$ 表示轮式机器人 p 与 q 的质心距离.下面给出两个例子来表明队形描述参量 \mathbf{F} 的灵活性,如图 3 所示.

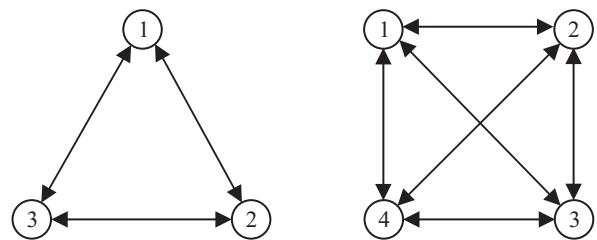


图 3 两种基本编队队形

与图 3 中编队队形相对应的队形描述参量分别表示如下:

$$\mathbf{F}_{\text{triangle}} = \begin{bmatrix} 0 & -\pi/3 & -2\pi/3 \\ 20 & 0 & -\pi \\ 20 & 20 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_{\text{square}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\pi/4 & -\pi/2 \\ 20 & 0 & -\pi/2 & -3\pi/4 \\ 20\sqrt{2} & 20 & 0 & -\pi \\ 20 & 20\sqrt{2} & 20 & 0 \end{bmatrix}.$$

注4 上面给出的矩阵形式队形描述参量 \mathbf{F} 是存在约束条件的,即智能体状态向量 $q_i(k)$ 中不能超过3个元素.当元素数量大于3时,需要对每个智能体设计更加复杂的队形描述参量 $\mathbf{F}_{ji}(k)$,本文 $i = 1$.图3给出的编队队形为有向图,但队形描述参量 \mathbf{F} 也可用于描述无向图.

显然,当设计出一组轮式机器人的编队队形后,所对应的队形描述参量 \mathbf{F} 也可以同时得到.更多地,对于任意给定的一种编队队形,轮式机器人之间的通信拓扑结构可以设计为多种不同的形式.本文中,由于考虑的是主从式编队控制问题,通信拓扑结构为轮式机器人1~轮式机器人 j ,而轮式机器人 j 之间没有通讯.为了缩短公式描述,并使文章更加紧凑,后文使用符号 $\nabla_{*,k}$ 代替 $\nabla_*(k)$.

考虑队形描述参量 \mathbf{F} 和轮式机器人1的当前时刻状态 $q_{1,k}$,那么轮式机器人 j 在 k 时刻的参考位置可以描述为

$$\begin{cases} x_{j,k}^r = x_{1,k} + l_{j,1} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{1,k} - \psi_{1,j}\right), \\ y_{j,k}^r = y_{1,k} - l_{j,1} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{1,k} - \psi_{1,j}\right), \end{cases} \quad (17)$$

其中 $j \in (2, 3, \dots, n)$,每个轮式机器人 j 可以得到其在全局坐标系下的参考位置.同时将轮式机器人1的实际运动方向作为轮式机器人 j 的参考运动方向,那么轮式机器人 j 便得到了其在 k 时刻的全部参考状态.

假设每个轮式机器人的参考运动状态符合轮式机器人自身的运动学特性,即满足运动学模型(15),则轮式机器人与其参考运动状态之间的相对状态偏差可以表示为

$$\begin{aligned} e_{i,k}^x &= x_{i,k}^r \cos \theta_{i,k} - x_{i,k} \cos \theta_{i,k} + \\ & \quad y_{i,k}^r \sin \theta_{i,k} - y_{i,k} \sin \theta_{i,k}, \\ e_{i,k}^y &= -x_{i,k}^r \sin \theta_{i,k} + x_{i,k} \sin \theta_{i,k} + \\ & \quad y_{i,k}^r \cos \theta_{i,k} - y_{i,k} \cos \theta_{i,k}, \\ e_{i,k}^\theta &= \theta_{i,k}^r - \theta_{i,k}. \end{aligned} \quad (18)$$

其中: $q_{i,k}^r \triangleq [x_{i,k}^r, y_{i,k}^r, \theta_{i,k}^r]^T$ 为轮式机器人 i 的参考运动状态, $i \in (1, 2, \dots, n)$.根据状态偏差(18)与系统模型(15),轮式机器人的状态误差为

$$e_{i,k+1}^x = e_{i,k}^x + T\omega_{i,k}e_{i,k}^y + Tv_{i,k}^r \cos e_{i,k}^\theta - Tv_{i,k},$$

$$\begin{aligned} e_{i,k+1}^y &= e_{i,k}^y - T\omega_{i,k}e_{i,k}^x + Tv_{i,k}^r \sin e_{i,k}^\theta, \\ e_{i,k+1}^\theta &= e_{i,k}^\theta + T(\omega_{i,k}^r - \omega_{i,k}), \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $v_{i,k}^r$ 和 $\omega_{i,k}^r$ 为轮式机器人 i 的给定参考速度,具体计算形式参见文献[23].受启发于文献[23]中的控制律形式(11),当使用以下形式的编队控制律时,轮式机器人编队控制问题可解:

$$u_{i,k} = \begin{bmatrix} v_{i,k} \\ \omega_{i,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{i,k}^r + k_x e_{i,k}^x - k_y \omega_{i,k}^r e_{i,k}^y \\ \omega_{i,k}^r + k_\theta e_{i,k}^\theta \end{bmatrix}, \quad (20)$$

其中 k_x 、 k_y 和 k_θ 是待定参数.然而,当网络诱导延时引入到轮式机器人的通讯网络中,即当不同定常延时 τ_i 存在于每个轮式机器人的反馈通道中同时不同定常延时 τ_{j1} 分别存在于轮式机器人1与轮式机器人 j 的通讯通道中时,由于轮式机器人 j 的控制目标变成了 $q_{j,k-\tau_j} \rightarrow q_{j,k-\tau_1-\tau_{j1}}$,导致编队控制问题不可解.

为了解决这一问题,可以考虑使用本文所提出的主从式预测编队控制架构.可以看出,轮式机器人的系统模型(15)与控制律(20)分别满足上节给出的系统描述形式(1)和(2).通过迭代预测,给出网络化预测编队控制律如下:

$$u_{i,k} = \begin{bmatrix} v_{i,k}^r + k_x \hat{e}_{i,k|k-\tau_i}^x - k_y \omega_{i,k}^r \hat{e}_{i,k|k-\tau_i}^y \\ \omega_{i,k}^r + k_\theta \hat{e}_{i,k|k-\tau_i}^\theta \end{bmatrix}. \quad (21)$$

其中状态误差的估计值 $\hat{e}_{i,k|k-\tau_i}^\Lambda$ ($\Lambda \in (x, y, \theta)$) 可以通过式(18)迭代给出.使用式(21)的网络化预测编队控制律,结合本文提出的主从式预测编队控制架构,通讯网络中带有有时滞情形下的轮式移动机器人编队控制问题可解.

3 仿真与实验

本节首先介绍开展编队控制实验所设计的实验系统,然后给出轮式移动机器人主从式预测编队控制的一些仿真与实验结果.编队控制实验系统主要由3个部分组成:Vicon视觉定位系统、网络化控制器和轮式移动机器人.

Vicon视觉定位系统是一种光学运动捕获系统,其位置识别精度能够达到1mm.它可以通过安装于屋顶的多台红外摄像机捕获放置于智能体表面的标志球,利用这些标志球的实时坐标可换算得到智能体的实时位姿信息.网络化控制器是基于32位微处理器STM32F207和嵌入式操作系统eCos所设计并开发的一款控制器,它能够实现Simulink仿真研究与工程实践之间的无缝连接.可用资源包括:ADC、DAC、DI、DO、PWM、NetSend、NetReceive等功能,这些功

能相关的源代码均由 Simulink 中的 S 函数实现,并固化在 Simulink 的模块库中. 轮式移动机器人由两个步进电机驱动,在车体的后面安装有一个万向轮用于保持平衡. 步进电机的步进信号由网络化控制器的 PWM 模块提供,方向信号由 DO 模块提供.

在实验中,网络化控制器安装在轮式移动机器人内部,多个标志球分别以不同的形状组合放置于轮式移动机器人的外壳上,以便于 Vicon 系统的区分识别. 由于实验室局域网中的通讯延时一般很小(通常小于 10 ms),在仿真/实验框图中加入 Simulink 模块库中的 Delay 模块来模拟通讯通道中的定常延时. 3 个移动机器人组成一个倒三角形的编队队形,轮式机器人 1 将自身的未来估计状态分别发送给轮式机器人 2 和 3. 各通讯通道中的延时设置为 $\tau_1 = 5, \tau_2 = 10, \tau_3 = 15, \tau_{2,1} = 12, \tau_{3,1} = 16$. 系统采样时间设置为 0.1 s,即 $\tau_1 = 5 = 0.5$ s.

假设轮式机器人 1 的参考运行轨迹为圆形,该圆形轨迹满足轮式移动机器人的运动学模型(15),并具有如下数学描述形式:

$$\begin{cases} x(k) = x_{rc} + r \sin \theta(k), \\ y(k) = y_{rc} - r \cos \theta(k). \end{cases} \quad (22)$$

其中: $(x_{rc}, y_{rc}) = (0, 0)$ (cm) 为参考圆轨迹的圆心坐标, $r = 50$ cm 为参考圆轨迹的半径, $k_x = 0.12, k_y = 0.45, k_\theta = 0.15$ 为各轮式机器人控制律中的待定参数. 轮式移动机器人主从式预测编队控制的仿真与实验结果见图 4 和图 5.

图 4 中前 2 个分图分别描述的是 3 个轮式机器人在三角形编队控制的仿真与实验中得到的 x 、 y 状态,可以看到,仿真结果与实验结果基本一致. 后 2 个分图展示了 3 个轮式机器人的跟踪误差状态 e_x 与 e_y ,其中仿真结果中的跟踪误差基本收敛到 0,而实验结果中跟踪误差收敛到 $(-5$ cm, 3 cm). 通过仿真与实验结果的对比,可以看出,实验结果中的误差状态能够收敛到 0 附近的一个邻域内,但始终无法像仿真结果一样收敛到 0.

造成这种现象的原因是在仿真过程中,轮式移动机器人的运动学模型是理想的,而在实际测试中,运动学模型(15)无法完全描述其动力学特性,因此仿真结果要优于实验结果. 为了解决这一问题,可以通过系统辨识的方式得出轮式移动机器人动力学模型,使其接近于轮式机器人的真实动力学特性,并依此设计编队控制律,再将上述编队控制律推广到本文所提出的预测编队控制律,从而使得轮式移动机器人的仿真结果与实验结果完全一致.

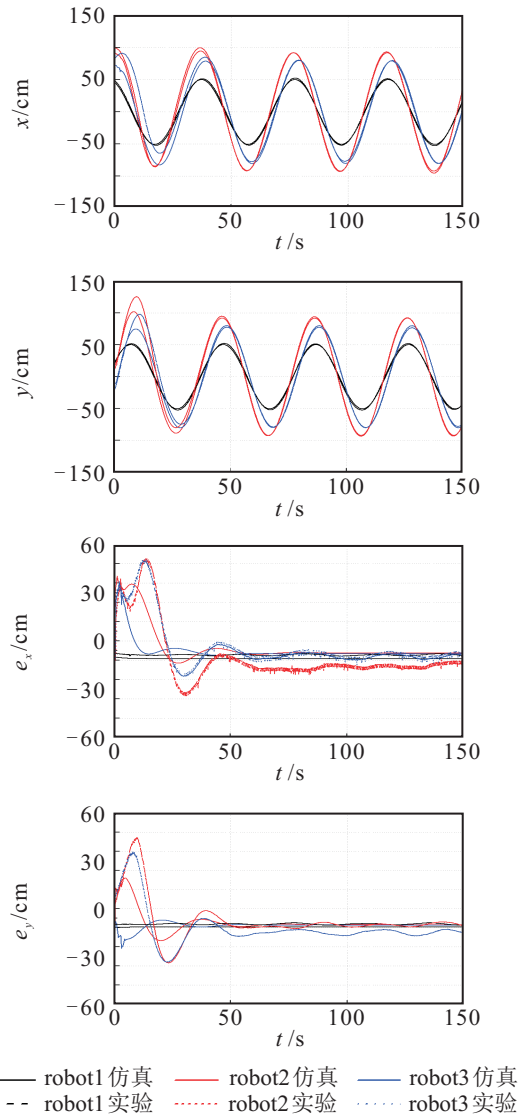


图 4 轮式机器人的仿真与实验结果

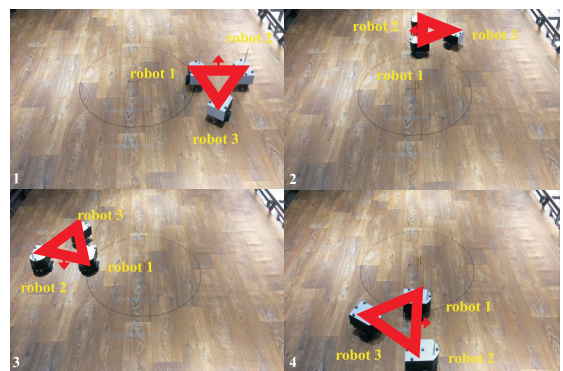


图 5 轮式机器人编队控制实验

4 结 论

本文研究了一类网络化多智能体的主从式预测编队控制问题,针对每个智能体的反馈通道和主从智能体间通讯通道均存在不同定常时滞的情形,提出了一种主从式预测编队控制架构. 在该预测编队架构的作用下,闭环预测编队控制系统的稳定性与原闭环系统一致. 由于主从智能体之间的通讯信息只是主

智能体的状态,使得异构智能体之间的主从式编队控制成为可能.通过3个轮式移动机器人组成三角形编队的例子验证了所提出主从式预测编队控制架构的可行性,对于满足系统描述(1)、(2)的任意智能体间的主从式编队控制问题,只要将各智能体的本地控制律推广至预测编队控制律,即可主动补偿各通讯通道中的定常时滞.

未来的工作将考虑运动协调预测编队控制问题,使所有智能体都可以进行数据交互.同时,通过预测的方式实现每个智能体的障碍规避,以增加多智能体编队的抗扰动能力.

参考文献(References)

- [1] Oh K K, Park M C, Ahn H S. A survey of multi-agent formation control[J]. *Automatica*, 2015, 53: 424-440.
- [2] 王祥科,李迅,郑志强.多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J].*控制与决策*, 2013, 28(11): 1601-1613. (Wang X K, Li X, Zheng Z Q. Survey of developments on multi-agent formation control related problems[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(11): 1601-1613.)
- [3] Roldao V, Cunha R, Cabecinhas D, et al. A leader-following trajectory generator with application to quadrotor formation flight[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62(10): 1597-1609.
- [4] Das A K, Fierro R, Kumar V, et al. A vision-based formation control framework[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2002, 18(5): 813-825.
- [5] Shao J, Xie G, Wang L. Leader-following formation control of multiple mobile vehicles[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2007, 1(2): 545-552.
- [6] Balch T, Arkin R C. Behavior-based formation control for multirobot teams[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 926-939.
- [7] Zhu S, Xie L, Chen C, et al. Collective behavior of mobile agents with state-dependent interactions[J]. *Automatica*, 2015, 51: 394-401.
- [8] Lewis M A, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. *Autonomous Robots*, 1997, 4(4): 387-403.
- [9] Sadowska A, den Broek T, Huijberts H, et al. A virtual structure approach to formation control of unicycle mobile robots using mutual coupling[J]. *Int J of Control*, 2011, 84(11): 1886-1902.
- [10] Ren W, Sorensen N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(4): 324-333.
- [11] Wang W, Huang J, Wen C, et al. Distributed adaptive control for consensus tracking with application to formation control of nonholonomic mobile robots[J]. *Automatica*, 2014, 50(4): 1254-1263.
- [12] Sun Z, Xia Y. Receding horizon tracking control of unicycle-type robots based on virtual structure[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26(17): 3900-3918.
- [13] Meng D, Jia Y. Formation control for multi-agent systems through an iterative learning design approach[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2014, 24(2): 340-361.
- [14] Meng D, Jia Y, Du J, et al. On iterative learning algorithms for the formation control of nonlinear multi-agent systems[J]. *Automatica*, 2014, 50(1): 291-295.
- [15] Meng D, Jia Y, Du J, et al. High-precision formation control of nonlinear multi-agent systems with switching topologies: A learning approach[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2015, 25(13): 1993-2018.
- [16] Meng D, Moore K L. Learning to cooperate: Networks of formation agents with switching topologies[J]. *Automatica*, 2016, 64: 278-293.
- [17] Meng D, Jia Y, Du J. Robust consensus tracking control for multiagent systems with initial state shifts, disturbances, and switching topologies[J]. *IEEE Trans on Neural Networks and Learning Systems*, 2015, 26(4): 809-824.
- [18] Xu W, Cao J, Yu W, et al. Leader-following consensus of non-linear multi-agent systems with jointly connected topology[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2014, 8(6): 432-440.
- [19] Li Q, Jiang Z P. Pattern preserving path following of unicycle teams with communication delays[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(9): 1149-1164.
- [20] Millán P, Orihuela L, Jurado I, et al. Formation control of autonomous underwater vehicles subject to communication delays[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2014, 22(2): 770-777.
- [21] Velasco-Villa M, Castro-Linares R, Rosales-Hernández F, et al. Discrete-time synchronization strategy for input time-delay mobile robots[J]. *J of the Franklin Institute*, 2013, 350(10): 2911-2935.
- [22] Cepeda-Gomez R, Perico L F. Formation control of nonholonomic vehicles under time delayed communications[J]. *IEEE Trans on Automation Science and Engineering*, 2015, 12(3): 819-826.
- [23] Alvarez-Aguirre A, van de Wouw N, Oguchi T, et al. Predictor-based remote tracking control of a mobile robot[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2014, 22(6): 2087-2102.

(责任编辑:郑晓蕾)