多平台协同目标感知分散化最优控制方法

吴雯漫 周 锐

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191)

摘 要：由于平台之间信息和计算是高度分布的，平台的运动以及通信拓扑的变化，使得多平台集中式协调控制结构很难实现.以最小通信量为基础的分散协同控制具有可扩展性、异构性和动态可重构性等特点，可靠性和鲁棒性较好.提出了集中和分散相结合的多平台协同控制系统结构，集中控制主要实施任务分配、通信管理以及编队管理，而平台之间则可在有限通信基础上实施分散化最优协调控制.建立了被动多平台协同目标感知分散化信息融合算法，以信息熵作为效能指标，实现了存在控制、通信和防撞等不同约束条件下的多平台协同目标感知分散化最优控制及协同感知目标信息的极大化.仿真结果表明：有通信情况下的多平台协同目标跟踪性能明显优于无通信情况下的非协同目标跟踪性能.

关 键 词：协同；目标跟踪；信息融合；分散控制

中图分类号：TP 273^{+}.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)09-1057-04

Decentralized optimal control of coordination target awareness with multiple vehicles

Wu Wenman Zhou Rui

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The centralized coordination control of multiple vehicles was difficult to implement since the highly distributed information and computation, the vehicles motion, and the changing information networks topology. The decentralized coordination control was scalable, heterogeneous, reconfigurable, and robust. The structure of coordination control system for multiple vehicles with the characteristics of decentralized control and centralized control was proposed. The mission management system and the method of decentralized optimal coordination control based on minimal communications were investigated. As an example of coordinated target tracking with multiple passive sensor vehicles, the algorithms of decentralized information fusion were developed. The decentralized optimal control of coordination target awareness with multiple passive sensor vehicles was implemented to maximize the information utility gained by each sensor vehicle under the different constraints of control, communication and safety. The simulation results demonstrate that the performance of coordination target tracking with communication is obviously better than the one of non-coordination without communication.

Key words: coordination; target tracking; information fusion; decentralized control

在当前信息化环境下，“以平台为中心”的传统模式正在向“以网络为中心”的多平台协同模式转变.通过协同可完成单个平台所不能完成的一些复杂任务[1].多平台协同目标感知是多平台协同形式之一[2]，通过协同可以得到单平台所不能得到的一些信息.通过携带光电被动探测设备的

收稿日期：2007-09-03

基金项目：国家863资助项目(2006AA04Z260)；国家自然科学基金资助项目(60674103)；航空科学基金资助项目(2006ZC51026)

作者简介：吴雯漫(1983—)，女，江西抚州人，硕士生，mandyhang@126.com.

多平台协同可实现对目标的协同定位,进而实现静默攻击[3].

多平台协同目标感知的关键技术之一就是多平台多传感器数据融合技术,信息滤波算法可很容易表示成信息的简单代数叠加的形式[4],且具有较好的可扩展性、异构性和动态可重构性等特点.

在分散控制中每个平台的决策只能利用局部的信息,信息是高度分散,信息拓扑是动态变化.因此,需要融合代数图理论、控制理论及信息理论等对协调机制、策略、信息拓扑对系统性能影响以及信息拓扑的动态重构等问题进行研究[5-6].

本文研究多平台协同控制系统结构和原理以及多平台协同目标感知分散化最优控制方法.

1 多机协同控制系统结构和原理

多平台指挥控制与管理系统具有分层递阶、集中和分散相结合特点,系统结构如图1所示.集中式任务管理系统主要对目标分配、通信拓扑以及编队形状等进行任务管理.分散最优协调控制是平台在有限的数据通信基础上,通过分散局部优化和分散协调控制等手段,实现多平台的分散化控制.

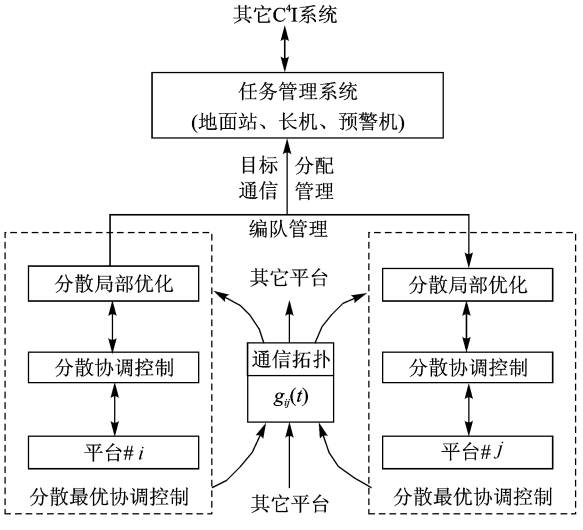


图1 多机协同控制系统结构

2 分散化最优协调控制

假设共 n 个平台,$N_i(N_i<n)$ 表示与第 i 个平台具有约束的邻域平台集合,x_i 表示第 i 个平台状态.与平台 i 有关联平台 j 的状态子集可表示为

$$\{x_j\}_i \subseteq \{x_j \mid j \in N_i\}$$

平台的分散化控制问题可以描述为[5-6]

$$\left.\begin{aligned}\dot{x}_i &= f_i(x_i,u_i)\\ y_i &= h_i(x_i)\end{aligned}\right\} \quad \forall i \in n$$

$$z_{ij} = \eta_i(x_i,\{x_j\}_i \mid g_{ij}=1, j \in N_j)$$

$$u_i = k_i(y_i,z_{ij})$$

其中,y_i 为平台 i 内部测量信息;z_{ij} 为平台 i 通过通信得到的邻域平台信息,由信息拓扑 g_{ij} 决定:

$$g_{ij}(t)=\begin{cases}1 & \text{若平台 } i \text{ 和平台 } j \text{ 之间有通信连接}\\ 0 & \text{若平台 } i \text{ 和平台 } j \text{ 之间无通信连接}\end{cases}$$

如果每个平台以极大化各自的局部代价函数为目标,则得到分散化最优协调控制策略 u_i:

$$u_i^{\text{opu}} = \arg\max_{u_i} J_i(u_i(y_i,z_{ij}))$$

并满足各种等式和不等式约束条件[7]:

$$p_i(x_i \mid \{x_j\}_i)\begin{cases}p_i^{\text{l}}(x_i) \leqslant 0\\ p_i^{\text{g}}(x_i \mid \{x_j\}_i) \leqslant 0\end{cases}$$

$$q_i(x_i \mid \{x_j\}_i)\begin{cases}q_i^{\text{l}}(x_i) = 0\\ q_i^{\text{g}}(x_i \mid \{x_j\}_i) = 0\end{cases}$$

其中,$p_i^{\text{l}}(\cdot)$ 和 $q_i^{\text{l}}(\cdot)$ 是平台 i 内部的约束;$p_i^{\text{g}}(\cdot)$ 和 $q_i^{\text{g}}(\cdot)$ 是平台 i 与其临域内关联平台之间的约束.

3 协同感知分散化最优控制

3.1 信息滤波与分散化信息融合

信息滤波[4,8]是在卡尔曼滤波的基础上发展起来的.考虑线性系统:

$$\boldsymbol{x}(k) = \boldsymbol{F}(k)\boldsymbol{x}(k-1) + \boldsymbol{G}(k)\boldsymbol{w}(k)$$

其中,$\boldsymbol{x}(k)$ 为 n 维状态向量;$\boldsymbol{F}(k)$ 为状态传递矩阵;$\boldsymbol{G}(k)$ 为噪声输入传递矩阵;系统噪声 $\boldsymbol{w}(k)$ 为零均值不相关的高斯白噪声;方差阵为 $\boldsymbol{Q}(k)$.

非线性观测模型为

$$\boldsymbol{z}(k) = \boldsymbol{h}(k,\boldsymbol{x}(k)) + \boldsymbol{v}(k)$$

其中,$\boldsymbol{h}(k,\boldsymbol{x}(k))$ 为观测模型;测量噪声 $\boldsymbol{v}(k)$ 为零均值高斯白噪声;方差阵为 $\boldsymbol{R}(k)$.线性化观测方程:

$$\boldsymbol{z}(k) = \boldsymbol{H}(k)\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{v}(k)$$

$$\boldsymbol{H}(k) = \nabla \boldsymbol{h}_x(k,\hat{\boldsymbol{x}}(k \mid k-1))$$

其中,$\nabla \boldsymbol{h}_x$ 为 $\boldsymbol{h}$ 关于 $\boldsymbol{x}$ 的 Jacobian 函数.

卡尔曼滤波得到目标状态估计 $\hat{\boldsymbol{x}}$ 及方差 $\boldsymbol{P}$,信息滤波得到信息状态 $\hat{\boldsymbol{y}}$ 及费歇信息 $\boldsymbol{Y}$.定义:

$$\hat{\boldsymbol{y}} \triangleq \boldsymbol{P}^{-1}\hat{\boldsymbol{x}}$$

$$\boldsymbol{Y} \triangleq \boldsymbol{P}^{-1}$$

$$\boldsymbol{I}(k) \triangleq \boldsymbol{H}^{\text{T}}(k)\boldsymbol{R}^{-1}(k)\boldsymbol{H}(k)$$

$$\boldsymbol{i}(k) \triangleq \boldsymbol{H}^{\text{T}}(k)\boldsymbol{R}^{-1}(k)(\boldsymbol{z}(k) - \boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}}(k \mid k-1))) + \boldsymbol{H}(k)\hat{\boldsymbol{x}}(k \mid k-1)$$

其中,$\boldsymbol{i}(k)$ 为观测向量 $\boldsymbol{z}(k)$ 的信息状态分布;$\boldsymbol{I}(k)$ 为信息矩阵.信息滤波可以分为以下两个过程:

1) 预测过程

$$\boldsymbol{Y}(k\mid k-1)=$$
$$[\boldsymbol{F}(k)\boldsymbol{Y}^{-1}(k-1\mid k-1)\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}(k)+\boldsymbol{Q}(k)]^{-1}$$
$$\hat{\boldsymbol{y}}(k\mid k-1)=\boldsymbol{Y}(k\mid k-1)\boldsymbol{F}(k)\cdot$$
$$\boldsymbol{Y}^{-1}(k-1\mid k-1)\hat{\boldsymbol{y}}(k-1\mid k-1)$$

2) 估计过程

$$\boldsymbol{Y}(k\mid k)=\boldsymbol{Y}(k\mid k-1)+\boldsymbol{I}(k)$$
$$\hat{\boldsymbol{y}}(k\mid k)=\hat{\boldsymbol{y}}(k\mid k-1)+\boldsymbol{i}(k)$$

状态估计结果由下式给出:

$$\hat{\boldsymbol{x}}(k\mid k)=\boldsymbol{Y}^{-1}(k\mid k)\hat{\boldsymbol{y}}(k\mid k)$$

设有 n 个平台,每个平台的的观测方程为

$$\boldsymbol{z}_j(k)=\boldsymbol{H}_j\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{v}_j(k)\qquad j=1,\cdots,n$$

分散化信息融合算法在对 $\hat{\boldsymbol{y}}(k|k)$及$\boldsymbol{Y}(k|k)$进行更新时,除了考虑平台自身 $\boldsymbol{I}(k)$和 $\boldsymbol{i}(k)$,还要考虑临近平台集合 N_i 内通信拓扑 $g_{ij}(k)$所确定的具有通信连接的其它平台的 $\boldsymbol{I}(k)$和 $\boldsymbol{i}(k)$:

$$\hat{\boldsymbol{y}}_i(k\mid k)=\hat{\boldsymbol{y}}_i(k\mid k-1)+$$
$$\boldsymbol{i}_i(k)+\sum_{j=1}^{N_i}g_{ij}(k)\boldsymbol{i}_j(k)$$
$$\boldsymbol{Y}_i(k\mid k)=\boldsymbol{Y}_i(k\mid k-1)+$$
$$\boldsymbol{I}_i(k)+\sum_{j=1}^{N_i}g_{ij}(k)\boldsymbol{I}_j(k)$$

分散化信息融合算法可以通过线性叠加来融合其它平台的信息,具有较好的可扩展性、异构性和动态可重构性[8].

3.2　协同感知分散化最优控制

考虑两个运动平台对一个静止目标的感知问题,如图 2 所示.

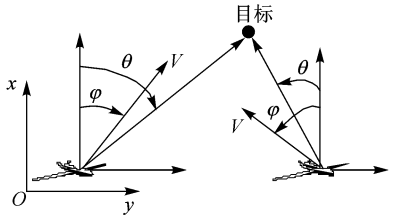


图 2　两平台协同目标感知原理

设平台以恒速 $V_{s,i}$,$i=1,2$ 运动,状态为位置和方位. 平台运动方程为

$$x_{s,i}(k+1)=x_{s,i}(k)+T\cdot V_{s,i}\cdot\cos(\varphi_{s,i}(k))$$
$$y_{s,i}(k+1)=y_{s,i}(k)+T\cdot V_{s,i}\cdot\sin(\varphi_{s,i}(k))$$
$$\varphi_{s,i}(k+1)=\varphi_{s,i}(k)+T\cdot u_{s,i}(k)$$

其中,T 为采样周期;$u_{s,i}$为控制量,即平台的偏航角速率. 平台携带被动光电探测器,观测模型为

$$\boldsymbol{z}_i(k)=\boldsymbol{h}_i(k)=\theta_i(k)-\varphi_i(k)+v_i(k)=$$
$$\arctan\left[\frac{y_f-y_{s,i}(k)}{x_f-x_{s,i}(k)}\right]-\varphi_i(k)+v_i(k)$$

其中,(x_f,y_f)为目标位置;$v_i(k)$为零均值高斯白噪声;方差 $\boldsymbol{R}_i=\sigma_i^2$. $\boldsymbol{h}_i(x_f,x_s)$的 Jacobian 阵为

$$\boldsymbol{H}(k)=\begin{bmatrix}\dfrac{-(\hat{y}_f-y_s(k))}{(\hat{x}_f-x_s(k))^2+(\hat{y}_f-y_s(k))^2}\\[2ex]\dfrac{\hat{x}_f-x_s(k))}{(\hat{x}_f-x_s(k))^2+(\hat{y}_f-y_s(k))^2}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

进而可得到信息状态及矩阵 $\boldsymbol{i}_i(k)$和 $\boldsymbol{I}_i(k)$.

两个平台通过数据链交换各自的信息 $\boldsymbol{i}_i(k)$和 $\boldsymbol{I}_i(k)$实现分散化信息融合,进而得到本地信息及目标状态的分散化估计:

$$\hat{\boldsymbol{y}}_i(k\mid k)=\hat{\boldsymbol{y}}_i(k\mid k-1)+\boldsymbol{i}_1(k)+\boldsymbol{i}_2(k)$$
$$\boldsymbol{Y}_i(k\mid k)=\boldsymbol{Y}_i(k\mid k-1)+\boldsymbol{I}_1(k)+\boldsymbol{I}_2(k)$$
$$\hat{\boldsymbol{x}}_i(k\mid k)=\boldsymbol{Y}_i^{-1}(k\mid k)\hat{\boldsymbol{y}}_i(k\mid k)$$

平台任务是获得目标状态最佳估计,平台以融合后的信息熵为效能指标[4],实现分散最优控制:

$$\boldsymbol{J}_i(u_i(k))=\frac{1}{2}\log[(2\pi e)^2\mid\boldsymbol{Y}_i(k)\mid]$$
$$u_i^{\mathrm{opt}}(k)=\arg\max_{u_i}\boldsymbol{J}(u_i(k))$$

平台内部约束主要考虑平台偏航角速度约束以及平台与目标之间的安全距离 d_1 约束:

$$u_{i,\min}\leqslant u_i(k)\leqslant u_{i,\max}$$
$$\sqrt{(x_i(k)-\hat{x}_{f,i}(k))^2+(y_i(k)-\hat{y}_{f,i}(k))^2}\geqslant d_1$$

平台之间约束主要考虑平台间的防撞距离约束 d_2 和平台间通信保障距离约束 d_3:

$$\sqrt{(x_i(k)-x_j(k))^2+(y_i(k)-y_j(k))^2}\geqslant d_2$$
$$\forall\, i,j\in n\qquad j\neq i$$
$$\sqrt{(x_i(k)-x_j(k))^2+(y_i(k)-y_j(k))^2}\leqslant d_3$$
$$\forall\, i\in n\qquad j\neq N_i$$

4　仿真结果与分析

考虑 2 个平台对 1 个目标的感知问题,分别对有通信情况下的协同感知和无通信情况下的非协同感知结果进行仿真. 约束条件主要包括偏航角速度约束、平台与目标之间安全距离约束等,仿真结果如图 3～图 6 所示. 可以看出,平台对目标协同感知的效能函数要明显大于无协同下目标感

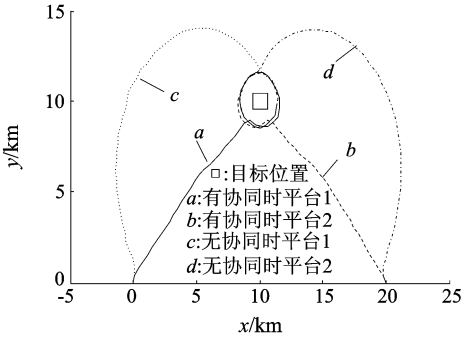


图 3　协同和非协同时平台运动轨迹

知的效能函数，协同目标感知的估计精确更高，估计误差的收敛速度也更快. 另外协同需要通信，所以平台之间的距离较小.

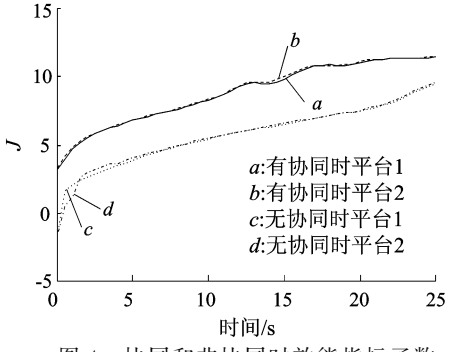


图 4 协同和非协同时效能指标函数

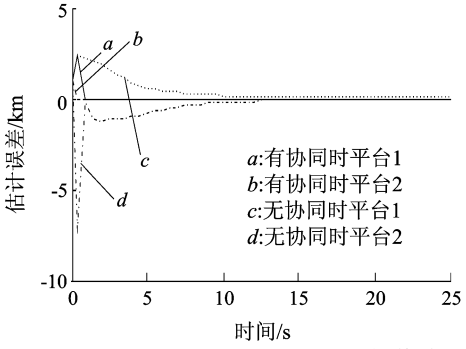


图 5 协同和非协同时 x 方向目标估计误差

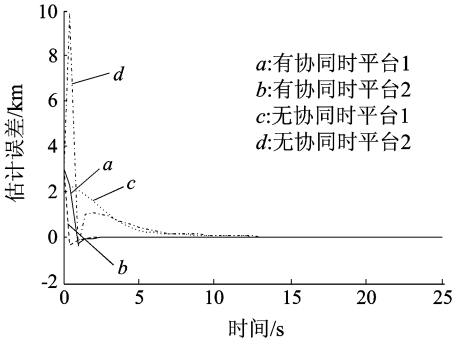


图 6 协同和非协同时 y 方向目标估计误差

5 结 论

由于平台之间信息的分布性以及通信拓扑的变化，以最小通信量为基础的分散协同控制具有可扩展性、异构性和动态可重构性等特点，采用集中管理和分散控制相结合多平台协同控制系统结构.

以信息熵作为量测的效能指标，即极小化多平台协同感知目标信息的不确定为控制目标，实现对多平台协同目标感知分散化最优控制是可行的. 控制器是分散解耦，平台之间通过通信实现协同，但平台只需与临近平台通信，无须全局通信. 协同性能优于非协同情况.

参考文献（References）

[1] Samad T, Bay J S, Godbole D. Network-centric systems for military operations in urban terrain: the role of UAVs[J]. Proceedings of the IEEE, 2007,95(1):92－107

[2] Beard R W, Mclain T W, Nelson D B. Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed wing miniature UAVs [J]. Proceedings of the IEEE, 2006,94(7):1306－1324

[3] 丁全心. 多机协同多目标攻击技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2007
Ding Quanxin. A study of multi-fighters cooperative multi-target attack technologies[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese)

[4] Grocholsky B. Information-theroretic control of multiple sensor platforms[D]. Sydney: University of Sydney, 2002

[5] Saber R O, Fax J R, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007,95(1):215－233

[6] Ren W, Beard R W, Atkins E M. Information consensus in multivehicle cooperative control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007,27(2):71－82

[7] Inalhan G. Decentralized optimization across independent decision makers with incomplete models[D]. California, Stanford: Stanford University, 2004

[8] Nettleton E, Ridley M, Sukkarieh S, et al. Implementation of a decentralized sensing network aboard multiple UAVs [J]. Telecommunication Systems, 2004,26(2):253－284

（责任编辑：赵海容）