

文章编号:1000-582X(2010)12-103-06

采用动态协调的混杂分布式预测控制方法

魏善碧,胡友强,柴毅,丁宝苍

(重庆大学 自动化学院,重庆 400044)

摘要:针对多智能体复杂协调控制问题,提出基于动态协调规则的分布式预测控制。将避碰约束处理为基于方位的混杂规则,并在代价函数中引入布尔函数项。为适应复杂时变的工况,在每个采样时刻,根据各智能体的位置关系及其与目标的相对距离,设计动态协调规则以确定布尔函数项的权值。此方法增强了运动方向一致性和控制行为一致性,改进了分布式预测控制的稳定性和可行性。由于取较短的预测时域即可达到控制目标,此方法也提高了分布式预测控制方法的实时性和实用性。给出仿真例子验证了此方法的有效性。

关键词:分布式预测控制;多智能体协调;动态协调规则;布尔函数

中图分类号:TP273

文献标志码:A

Hybrid distributed model predictive control using dynamic cooperation

WEI Shan-bi, HU You-qiang, CHAI Yi, DING Bao-cang

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing, 400044, P. R. China)

Abstract: For complex cooperative control problem of multi-agent systems, a distributed model predictive control scheme based on the dynamic cooperative rules is proposed. The collision avoidance constraint is transformed into hybrid rules based on the positions, and the Boolean function term was introduced in the cost function. In order to accommodate the complex time-varying environment, at each sample moment, the dynamic cooperative rules are designed according to the relative positions among the agents and the relative distances between the agents and the destination, so as to determine the weights in the Boolean function. This scheme reinforces consistencies of motion direction and control action, and improves stability and feasibility of distributed predictive control. As the control target can be achieved via a small prediction horizon, this scheme also enhances the real-time ability and practicality of distributed model predictive control. Simulation examples are given to illustrate the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: distributed model predictive control; multi-agent cooperation; dynamic cooperative rule; Boolean function

近年来,多智能体协调控制问题引起了军事领域和民用领域广泛兴趣。例如无人机编队和自治交通系统。由于预测控制方法在处理物理约束条件方面最显其优势,所以受到了多智能体控制研究领域

青睐。预测控制方法使智能体能够在约束条件边界工作,从而获得比传统控制方法更好的控制效果^[1-2]。而分布式预测控制方法(DMPC)则将集中式预测控制的优化问题分解给各智能体,从而将大

收稿日期:2010-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60974090);教育部博士点基金资助项目(102063720090013);重庆大学“211工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-09108)。

作者简介:魏善碧(1981-),男,重庆大学博士研究生,主要从事分布式预测控制、智能优化等方向的研究,

(Tel)13032344066;(E-mail)wsbemi@yahoo.com.cn。

规模全局优化问题转化为多个小规模局部优化问题。相比于集中式控制方法,分布式控制方法不仅获得更快求解速度,还可以明显地减少智能体之间数据通信量,降低控制决策对各智能体的依赖。基于以上优点,分布式预测控制方法已成为当前多智能体控制领域研究热点。

目前,分布式预测控制方法面对的主要挑战之一是如何保证各智能体相互预测的控制行为的一致性、以及智能体之间的避碰。文献[3-11]对此进行了研究。为取得各智能体相互预测的控制行为的一致性,将相容约束思想引入分布式预测控制^[8],但相容约束压缩了滚动时域优化问题搜索空间,限制了优化自由度,并且^[6]未考虑耦合约束。通过对相容约束的改进,提高了优化自由度和一致性^[10-11]。则将基于相容约束思想的分布式控制算法扩展到耦合约束情况。在文献[4-7]中,每个智能体都考虑耦合约束、求解优化问题,得到它及其“邻居”的控制轨迹。然而耦合约束是针对每个智能体的独立预测值加入的,而智能体对自身控制轨迹的预测和其它智能体对其控制轨迹的预测之间不可避免的存在偏差,这就导致避碰约束并不能从理论上得到保证。设计了基于运动方向的混杂避碰方法^[9],取得了运动方向一致性,并在一定程度上提高了可行性和稳定性。但此方法只讨论了简单协调控制问题,而未对复杂协调控制问题开展研究。

针对复杂协调控制问题中,在文献[9]混杂避碰方法基础上,设计动态协调规则,并基此提出了相应的分布式预测控制方法。由于规则的介入,增强了各智能体控制行为一致性和滚动时域优化可行性。此方法可适应复杂时变工况,在较短预测时域条件下即可达到控制目标,从而提高了分布式预测控制方法的实时性和实用性。最后部分给出了三智能体协调控制和五智能体协调控制仿真实例以说明此方法的有效性和实用性。

符号: $x^i(t|k)$ 表示智能体 i 在 k 时刻对状态向量 x 未来时刻 $k+t, t \geq 0$ 的预测值。

1 问题描述

1.1 系统描述

设系统由 N_a 个智能体组成。智能体 i 满足离散时不变状态方程^[8]

$$\mathbf{x}^i(k+1) = \mathbf{f}^i(\mathbf{x}^i(k), \mathbf{u}^i(k)), \quad (1)$$

其中 $\mathbf{x}^i(k) \in R^{n^i}$, $\mathbf{u}^i(k) \in R^{m^i}$, $\mathbf{f}^i: R^{n^i} \times R^{m^i} \rightarrow R^{n^i}$ 分别是智能体 i 在 k 时刻状态向量、控制向量以及状态方程。 $X^i \subset R^{n^i}$ 和 $U^i \subset R^{m^i}$ 分别表示智能体 i 的可行状态集和控制输入集,即

$$\mathbf{x}^i(k) \in X^i, \mathbf{u}^i(k) \in U^i, k \geq 0, \quad (2)$$

$$\mathbf{x}^i(k) = [q^i(k)^T, v^i(k)^T]^T, \mathbf{q}^i(k) = [q_x^i(k), q_y^i(k)]^T, v^i(k) = [v_x^i(k), v_y^i(k)]^T.$$

$q_x^i(k)$ 和 $v_x^i(k)$ 分别表示水平(东西)方向位置分量和速度分量; $q_y^i(k)$ 和 $v_y^i(k)$ 则分别表示垂直(南北)方向位置分量和速度分量。整个系统在 k 时刻状态向量和控制向量分别为 $\tilde{\mathbf{x}}(k) \in R^{\tilde{n}}, \tilde{\mathbf{n}} = \sum_i n^i$, $\tilde{\mathbf{x}}(k) = [x^1(k)^T, \dots, x^{N_a}(k)^T]^T$ 和 $\tilde{\mathbf{u}}(k) \in R^{\tilde{m}}, \tilde{m} = \sum_i m^i, \tilde{\mathbf{u}}(k) = [u^1(k)^T, \dots, u^{N_a}(k)^T]^T$ 。记

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{f}(\tilde{\mathbf{x}}(k), \tilde{\mathbf{u}}(k)), \quad (3)$$

其中 $\mathbf{f}(\tilde{\mathbf{x}}(k), \tilde{\mathbf{u}}(k)) = [f^1(x^1(k), u^1(k)), \dots, f^{N_a}(x^{N_a}(k), u^{N_a}(k))]^T$, $\mathbf{f}: R^{\tilde{n}} \times R^{\tilde{m}} \rightarrow R^{\tilde{n}}$ 。 (x_e^i, u_e^i) 表示智能体 i 的平衡点, $(\tilde{x}_e, \tilde{u}_e)$ 表示整个系统平衡点。

设各智能体在同一平面运动,共享区域为 $W \subset R^2$ 。在此区域内,智能体 i 占有区域为正方形 $W_i = \left\{ q \in R^2 : \|q_x - q_x^i\| \leq \frac{d_i}{2}, \|q_y - q_y^i\| \leq \frac{d_i}{2} \right\}$, d_i 为此正方形边长。控制目标为通过协作方式将所有智能体渐近稳定到方程(3)的平衡点 (x_e, u_e) 且实现各时刻智能体之间的避碰。

假定智能体之间通信网络连通性可保证智能体获取其局部优化问题的变量信息。由于在网络环境下交互信息量受通信带宽限制,所以设定采样周期内信息只交互1次。系统中各智能体具有独立动态特性。其全局代价函数和避碰约束条件耦合了各智能体动态特性。针对多智能体协调控制问题,智能体 i 的邻居智能体定义为

$$N_i = \{j \mid \|q^i(k) - q^j(k)\|_2 \leq D_{\min}, D_{\min} > 0, j \in \{1, \dots, N_a\} \setminus \{i\}\}, \quad (4)$$

其中 $\|\cdot\|_2$ 为2-范数。

1.2 混杂避碰关系

由于智能体占有区域为正方形,智能体之间避碰关系为

$$\|q_x^i - q_x^j\| \geq \frac{d_i + d_j}{2} \text{ 或 } \|q_y^i - q_y^j\| \geq \frac{d_i + d_j}{2}. \quad (5)$$

以上避碰约束可描述为以下4种情形^[4],见图1。

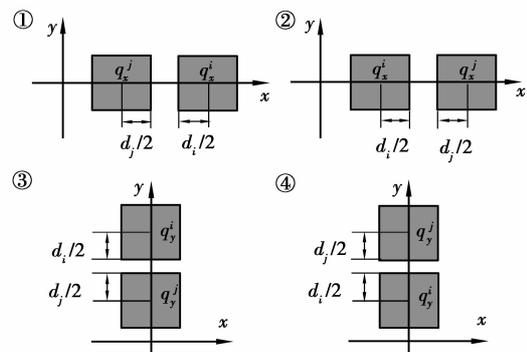


图1 智能体避碰关系

对这 4 种避碰关系,可以分别得到避碰条件

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad & q_x^i - q_x^j + \frac{d_i + d_j}{2} < M(1 - b_{i,j}^E); \\ \textcircled{2} \quad & q_x^i - q_x^j + \frac{d_i + d_j}{2} \leq M(1 - b_{i,j}^W); \\ \textcircled{3} \quad & q_y^i - q_y^j + \frac{d_i + d_j}{2} \leq M(1 - b_{i,j}^S); \\ \textcircled{4} \quad & q_y^i - q_y^j + \frac{d_i + d_j}{2} \leq M(1 - b_{i,j}^N); \end{aligned}$$

这些避碰条件通过布尔变量组合得到总的避碰条件为

$$\textcircled{1} - \textcircled{4}, 1 \leq b_{i,j}^E + b_{i,j}^W + b_{i,j}^N + b_{i,j}^S \leq 2. \quad (6)$$

表示为

$$g^{i,j}(q_x^i, q_y^i, q_x^j, q_y^j, b_{i,j}) \leq 0, j \in N_i; \quad (7)$$

$$\text{or} \quad g^{i,j}(q^i, q^j, b_{i,j}) \leq 0, j \in N_i; \quad (8)$$

$$\text{or} \quad g^{i,j}(x^i, x^j, b_{i,j}) \leq 0, j \in N_i; \quad (9)$$

其中 $b_{i,j} = [b_{i,j}^E, b_{i,j}^W, b_{i,j}^N, b_{i,j}^S]^T$, $b_{i,j}^E, b_{i,j}^W, b_{i,j}^N$ 和 $b_{i,j}^S$ 为布尔变量,上角标 E, W, N, S 分别表示东、西、北、南。 M 为正常数。

1.3 混杂分布式预测控制

由混杂避碰条件可知,只有合理的布尔变量组合才能使智能体之间实现运动方向一致和避碰。通过在代价函数中加入布尔函数项的方式,对相关布尔变量进行惩罚,促使具有发生相互碰撞趋势的智能体调整运动方向以实现避碰。

基于式(4), $x^{-i}(t|k) = \{x^j(t|k) \in R^m \mid j \in N_i\}$, $u^{-i}(t|k) = \{u^j(t|k) \in R^m \mid j \in N_i\}$ 。在 k 时刻智能体 i 的滚动时域优化问题描述为 P_i : 求解

$$\begin{aligned} & \tilde{J}_{N_i}^{*,hy}(x^i(k), x^{-i}(k)) \triangleq \\ & \min_{\{U^i(k)\}} \sum_{t=0}^{N-1} L^i(x^i(t|k), u^i(t|k), x^{-i}(t|k), u^{-i}(t|k)) + \\ & L_N^i(x^i(N|k), x^{-i}(N|k)) + \sum_{t=0}^{N-1} \sum_{j \in N_i} c_{i,j} b_{i,j}(k). \end{aligned} \quad (10)$$

满足如下约束

$$\begin{aligned} & x^i(t+1|k) = f^i(x^i(t|k), u^i(t|k)), x^j(t+1|k) \\ & = f^j(x^j(t|k), u^j(t|k)), \\ & x^i(t|k) \in X^i, u^i(t|k) \in U^i, x^j(t|k) \in X^j, u^j(t|k) \in \\ & U^j, g^{i,j}(x^i(t|k), x^j(t|k), b_{i,j}(t|k)) \leq 0, j \in N_i, \\ & g^{p,r}(x^p(t|k), x^r(t|k), b_{p,r}(t|k)) \leq 0, \\ & p \in N_i, r \in N_i, p \neq r, t=0, \dots, N-1, \\ & x^i(N|k) \in X_f^i, x^j(N|k) \in X_f^j, x^i(0|k) = x^i(k), x^j \\ & (0|k) = x^j(k), \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $U^i(k) \triangleq [u^i(0|k)^T, \dots, u^i(N-1|k)^T]^T \in R^s$, $s^i = m^i \times N$ 表示决策变量; $b_{i,j}(k) = [b_{i,j}^E, b_{i,j}^W, b_{i,j}^N, b_{i,j}^S]^T$, $c_{i,j} = [c_{i,j}^E, c_{i,j}^W, c_{i,j}^N, c_{i,j}^S]$, $j \in N_i$ 。上角标 E, W, N, S 分别表示东、西、北、南。 $c_{i,j}$ 的不同取值会对代价函数中不同布尔变量予以惩罚,从而得到不同的布尔变量组合。在复杂时变协调控制问题中,实现避碰的布尔变

量组合通常是时变的,所以 $c_{i,j}$ 的值也应是时变的以适应避碰布尔变量组合的变化。

记滚动时域优化问题 P_i 在 $k-1$ 时刻的优化解为 $U^{*i}(k) \triangleq [u^{*i}(0|k)^T, \dots, u^{*i}(N-1|k)^T]^T \in R^s$ 。在 $U^{*i}(k)$ 中,只有第一项 $u^{*i}(0|k)$ 是实际实施的,即实时控制作用表示为

$$u^i(k) = u^{*i}(0|k). \quad (12)$$

1.4 动态协调规则

为实现运动方向的一致,加入这样的约束:当各智能体在共享区域相遇时,各智能体以顺时针或者逆时针方式实现运行方向一致,并由此设计逆时针协调规则和顺时针协调规则。

为便于描述,引入如下 2 个函数

$$h(z(k)) = \begin{cases} 1, & z(k) \geq 0; \\ 0, & z(k) < 0. \end{cases}$$

$$g(z(k)) = \begin{cases} 1, & z(k-1) \cdot z(k) \geq 0, \\ 0, & z(k-1) \cdot z(k) < 0 \end{cases}, k \geq 1.$$

注 1: $z(k)$ 表示同一坐标系下 2 坐标点于水平(东西)方向或垂直(南北)方向的方位差值。 $h(z(k))$ 则表示 2 坐标点之间的方位关系。例如当 $z(k) = q_x^i(k) - q_x^{i,d} \geq 0, f(z(k)) = 1$ 则表示在采样时刻 k 智能体 i 所在的坐标点在其目标坐标点东边, $(q_x^{i,d}, q_y^{i,d})$ 表示智能体 i 目标坐标点。

注 2: $z(k-1) \cdot z(k)$ 表示在相邻时刻,2 智能体的坐标点于东西方向或南北方向方位差值的乘积。 $g(z(k))$ 则表示相邻时刻 2 智能体于东西方向或南北方向方位关系是否发生变化。例如当在 $k-1$ 时刻 $z(k-1) = q_y^i(k-1) - q_y^j(k-1) \geq 0$,而在 k 时刻 $z(k) = q_y^i(k) - q_y^j(k) < 0$,则 $g(z(k)) = 0$,表示从时刻 $k-1$ 到 k ,智能体 i 由智能体 j 的北面运动至其南面。对于初始时刻 $k=0$ 的情况,设定 $g(z(k)) = 1$ 。

动态协调规则描述为:设在时刻 k ,智能体 i 和邻居智能体 j ,根据其位置 $(q_x^i(k), q_y^i(k))$ 和 $(q_x^j(k), q_y^j(k))$ 以及目标位置 $(q_x^{i,d}, q_y^{i,d})$ 和 $(q_x^{j,d}, q_y^{j,d})$,可得逆时针协调规则为

$$c_{i,j}(k) = \check{c}_{i,j}(k) = [\check{c}_{i,j}^E(k), \check{c}_{i,j}^W(k), \check{c}_{i,j}^N(k), \check{c}_{i,j}^S(k)];$$

$$\begin{cases} \check{c}_{i,j}^E(k) = \overline{(T_1 T_2 T_3 + T_1 T_4 + T_1 T_2 T_4)} \cdot K; \\ \check{c}_{i,j}^W(k) = \overline{(T_1 T_2 T_3 + T_1 T_4 + T_1 T_2 T_4)} \cdot K; \\ \check{c}_{i,j}^N(k) = \overline{(S_1 S_2 S_3 + S_1 S_4 + S_1 S_2 S_4)} \cdot K; \\ \check{c}_{i,j}^S(k) = \overline{(S_1 S_2 S_3 + S_1 S_4 + S_1 S_2 S_4)} \cdot K. \end{cases} \quad (13)$$

顺时针协调规则为

$$c_{i,j}(k) = \hat{c}_{i,j}(k) = [\hat{c}_{i,j}^E(k), \hat{c}_{i,j}^W(k), \hat{c}_{i,j}^N(k), \hat{c}_{i,j}^S(k)];$$

$$\begin{cases} \hat{c}_{i,j}^E(k) = \overline{(T_1 T_2 T_3 + T_1 T_4 + T_1 T_2 T_4)} \cdot K; \\ \hat{c}_{i,j}^W(k) = \overline{(T_1 T_2 T_3 + T_1 T_4 + T_1 T_2 T_4)} \cdot K; \\ \hat{c}_{i,j}^N(k) = \overline{(S_1 S_2 S_3 + S_1 S_4 + S_1 S_2 S_4)} \cdot K; \\ \hat{c}_{i,j}^S(k) = \overline{(S_1 S_2 S_3 + S_1 S_4 + S_1 S_2 S_4)} \cdot K. \end{cases} \quad (14)$$

其中 $K < 0, T_1 + S_1 = 1$,

$$\begin{cases} T_1 = T_{1a} \cdot T_{1b}; \\ T_{1a} = h(q_x^i(k) - q_x^{i,d}(k)), T_{1b} = h(q_x^j(k) - q_x^{j,d}(k)), \\ T_2 = g(q_y^j(k) - q_y^i(k)), T_3 = h(q_x^i(k) - q_x^j(k)), \\ T_4 = h(q_x^{i,d}(k) - q_x^{j,d}(k)), \\ S_1 = S_{1a} \cdot S_{1b}, \\ S_{1a} = h(q_y^j(k) - q_y^{j,d}(k)), S_{1b} = h(q_y^i(k) - q_y^{i,d}(k)), \\ S_2 = g(q_x^j(k) - q_x^i(k)), S_3 = h(q_y^j(k) - q_y^i(k)), \\ S_4 = h(q_y^{j,d}(k) - q_y^{i,d}(k)), \end{cases}$$

注3:“·”为“同或”逻辑运算符,“T”表示对为T的逻辑“非”运算。

注4: T_{1a} 表示在k时刻智能体i坐标点与其目标坐标点于东西方向的方位关系; S_{1a} 则表示于南北方向的方位关系; T_{1b} 表示在k时刻邻居智能体j坐标点与目标坐标点于东西方向的方位关系; S_{1b} 则表示其于南北方向的方位关系;当智能体i和邻居智能体j往各自目标坐标点直线运动时, T_1 和 S_1 表示其运动方向的一致性。

注5: T_2 表示在k时刻智能体i与邻居智能体j于南北方向的方位关系是否发生变化; S_2 则表示于东西方向的方位关系是否发生变化;

注6: T_3 表示在k时刻智能体i与邻居智能体j于东西方向的方位关系; S_3 则表示于南北方向的方位关系;

注7: T_4 表示智能体i与邻居智能体j目标坐标点于东西方向的方位关系; S_4 则表示于南北方向的方位关系。

注8:逻辑运算符 $\check{c}_{i,j}(k) = T_1 T_2 T_3 + T_1 T_4 + T_1 T_2 T_4$ 表示:若 $T_1 = 0$,即在k时刻智能体i和邻居智能体j往各自目标点运动时,它们的東西运动方向是不一致的。

则 $\hat{c}_{i,j}^W(k) = T_4$,即智能体i根据其于邻居智能体j的目标坐标点于东西方向方位关系设定逆时针协调规则分量 $\hat{c}_{i,j}^W(k)$;若 $T_1 = 1$,在k时刻智能体i和邻居智能体j往各自目标点运动时,它们在东西运动方向是一致的,则 $\hat{c}_{i,j}^W(k) = T_2 T_3 + T_2 T_4$ 。若 $T_2 = 0$,即智能体i与邻居智能体j在k时刻于南北方向方位关系发生变化时,则 $\hat{c}_{i,j}^W(k) = T_4$;若 $T_2 = 1$,即未发生变化时,则 $\hat{c}_{i,j}^W(k) = T_3$,即在k时刻智能体i根据其于邻居智能体j于东西方向方位关系设定逆时针协调规则分量 $\hat{c}_{i,j}^W(k)$ 。其它逻辑运算符 $\hat{c}_{i,j}^E(k)$, $\hat{c}_{i,j}^N(k)$, $\hat{c}_{i,j}^S(k)$, $\hat{c}_{i,j}^E(k)$, $\hat{c}_{i,j}^W(k)$, $\hat{c}_{i,j}^N(k)$, $\hat{c}_{i,j}^S(k)$ 与此同理。

为便于理解,以图2所示为例,在时刻 $k-1$, $q_x^i(k-1) < q_x^j(k-1)$, $q_y^i(k-1) > q_y^j(k-1)$ 。在时刻k,由于 $q_x^i(k) < q_x^j(k)$, $q_y^i(k) > q_y^j(k)$, $q_x^{i,d} \geq q_x^{j,d}$, $q_y^{i,d} > q_y^{j,d}$,所以智能体i位于邻居智能体j东南面,故 $T_3 = 0$, $S_3 = 1$,且 $T_2 = 1, S_2 = 1$ 。它们为到达目标位置都应向南运动,故 $T_1 = 0, S_1 = 1$ 。根据逆时针协调规则,智能体i希望邻居智能体j运动到其北面。同时,由于 $q_x^{i,d} \geq q_x^{j,d}$, $T_4 = 1$,所以智能体i还希望邻居智能体j运动到其西面。于是 $\check{c}_{i,j}(k) = [0 \quad K \quad K \quad 0]$ 。通过对代价函数中布尔函数项进行了惩罚,运动一段时间

后,智能体i将运动至邻居智能体j的西面,这时 $q_x^i(k) - q_x^j(k)$ 的正负号发生变化,即 $S_2 = 0$,且 $q_y^{i,d} > q_y^{j,d}$, $S_4 = 1$,根据协调规则智能体i希望邻居智能体j在其南面。这样, $\check{c}_{i,j}(k) = [0 \quad K \quad 0 \quad K]$ 。

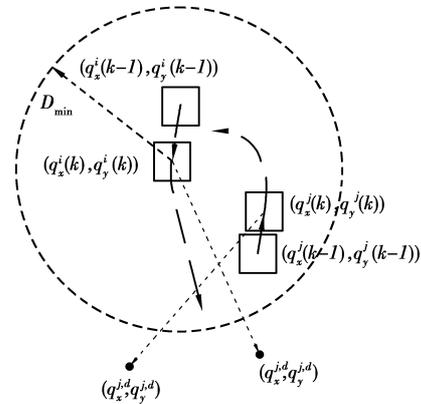


图2 基于逆时针逻辑规则的智能体协调控制

注9:当各智能体在共享区域相遇时,顺时针协调规则和逆时针协调规则都可以实现协调。所以其选择无优劣之分。但是各智能体采用的动态协调规则必须是一致的。

2 控制策略

为了便于实际应用,以上分布式预测控制方法可描述为以下算法

离线阶段:

- 1) 设置预测时域长度 N 和代价函数中权矩阵系数以及 D_{\min} 。
- 2) 确定各智能体的动态协调规则协调方式,即采用顺时针方式或者逆时针方式。

在线阶段:

- 1) 智能体i在采样时刻k获取自身状态 $x^i(k)$ 和目标状态 $x^{i,d}$,并获取邻居智能体j, $j \in \mathbf{N}_i$ 状态 $x^j(k)$ 和其目标状态 $x^{j,d}$;
- 2) 智能体i根据式(13)或(14)计算 $c_{i,j}(k) = \check{c}_{i,j}(k)$ 或 $c_{i,j}(k) = \check{c}_{i,j}(k)$,并求解问题 P_i ;
- 3) 智能体i执行 $\mathbf{U}^{*i}(k)$ 的第一项 $u^i(k) = u^{*i}(0|k)$;
- 4) 智能体i在采样时刻 $k+1$ 重复第1)到4)步。

3 数值实例

考虑智能体i的模型为^[19]

$$x^i(k+1) = \begin{bmatrix} I_2 & I_2 \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} x^i(k) + \begin{bmatrix} 0.25 I_2 \\ I_2 \end{bmatrix} u^i(k), \quad (15)$$

其采样周期为 0.25 s。智能体i的优化控制问题满足以下条件

- 1) 代价函数中

$$L^i(x^i(k), u^i(t|k), x^{-i}(k), u^{-i}(t|k)) = \|Q_u[u^i(t|k)]^T\|_\infty +$$

$$\max\{\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_5, \Theta_6, \Theta_7, \Theta_8\},$$

$$\Theta_1 = \|Q_{pos}(q^i(t|k) - q^{i,d})\|_\infty,$$

$$\Theta_2 = \|Q_{vel}(v^i(t|k) - v^{i,d})\|_\infty,$$

$$\Theta_3 = \max_{j \in N_i} \|\tilde{Q}_{pos}(q^j(t|k) - q^{j,d})\|_\infty,$$

$$\Theta_4 = \max_{j \in N_i} \|\tilde{Q}_{vel}(v^j(t|k) - v^{j,d})\|_\infty,$$

$$\Theta_5 = \max_{j \in N_i} \|\tilde{Q}_{rpos}((q^i(t|k) - q^j(t|k)) - (q^{i,d} - q^{j,d}))\|_\infty,$$

$$\Theta_6 = \max_{j \in N_i} \|\tilde{Q}_{rvel}((v^i(t|k) - v^j(t|k)) - (v^{i,d} - v^{j,d}))\|_\infty,$$

$$\Theta_7 = \max_{p \in N_i, r \in N_i, p \neq r} \|\tilde{Q}_{rpos}((q^p(t|k) - q^r(t|k)) - (q^{p,d} - q^{r,d}))\|_\infty,$$

$$\Theta_8 = \max_{p \in N_i, r \in N_i, p \neq r} \|\tilde{Q}_{rvel}((v^p(t|k) - v^r(t|k)) - (v^{p,d} - v^{r,d}))\|_\infty.$$

2) 其终端代价函数和终端约束集分别为

$$L_N^i(x^i(N|k), x^{-i}(N|k)) = 0, X_j^i \equiv R^4.$$

3) 输入约束和状态约束为

$$|u^i| \leq [2 \ 2]^T, |x^i| \leq [200 \ 200 \ 9 \ 9]^T.$$

4) 避碰约束为式(6), 智能体 i 占据正方形区域的边长为 $d_i = 2.4$. 智能体 i 的模型为式(15).

注 10: 以上的代价函数包括在 $k+t$ 时刻带权值的最大控制作用向量无穷范数。此向量由智能体 i 和邻居智能体的位置和速度与其目标值的相对差值和绝对差值组成。向量的无穷范数定义为 $\|v\|_\infty \triangleq \max_i |v_i|$, 其中 $v = [v_1^T, v_2^T, \dots, v_n^T]^T$ 。以上代价函数和避碰约束为可以转化为 MILP(混合整数线性规划)问题, 利用优化软件 CPLEX 10 的分支定界法进行求解。

3.1 三智能体协调控制

三智能体初始位置为

$$[q_x^{1,o}, q_y^{1,o}] = [9, 5], [q_x^{2,o}, q_y^{2,o}] = [18, -3],$$

$$[q_x^{3,o}, q_y^{3,o}] = [0, -3].$$

三智能体的目标位置为

$$[q_x^{1,d}, q_y^{1,d}] = [9, -8], [q_x^{2,d}, q_y^{2,d}] = [5, -4],$$

$$[q_x^{3,d}, q_y^{3,d}] = [13, -4].$$

当到达目标位置, 各智能体速度为 0。代价函数的权矩阵系数 $Q_u = 0.1I_2$, $Q_{pos} = Q_{vel} = \tilde{Q}_{pos} = \tilde{Q}_{vel} = \tilde{Q}_{rpos} = \tilde{Q}_{rvel} = 50I_2$, $K = 500$ 。如图 3 所示, 若只采用分布式预测控制, 则预测时域越长, 智能体运动轨迹越短, 分布式预测控制效果越好; 但是预测时域越长, 滚动时域优化控制问题规模增大, 从而求解时间增长, 限制其实用性。而基于(逆时针)动态协调规则分布式预测控制能在较短预测时域条件下, 获得与较长预测时域分布式预测控制相似的控制效果, 且求解时间明显缩短。

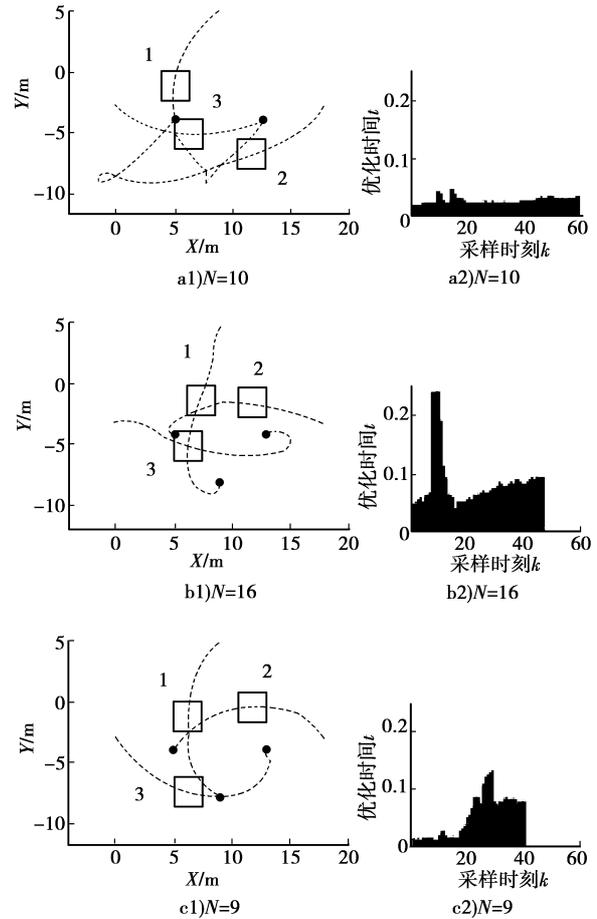


图 3 三智能体协调控制图

(a1), (a2), (b1), (b2) 为采用 DMPC 效果图和各智能体最长求解时间图, (c1), (c2) 为采用动态逻辑规则 DMPC 效果图和各智能体最长求解时间图)

3.2 五智能体协调控制

五智能体初始位置为

$$[q_x^{1,o}, q_y^{1,o}] = [-9, 0], [q_x^{2,o}, q_y^{2,o}] = [-1, -7],$$

$$[q_x^{3,o}, q_y^{3,o}] = [-1, 7], [q_x^{4,o}, q_y^{4,o}] = [14, 14],$$

$$[q_x^{5,o}, q_y^{5,o}] = [14, -14].$$

五智能体目标位置为

$$[q_x^{1,d}, q_y^{1,d}] = [20, 0], [q_x^{2,d}, q_y^{2,d}] = [-1, 7],$$

$$[q_x^{3,d}, q_y^{3,d}] = [-1, -7], [q_x^{4,d}, q_y^{4,d}] = [14, -14],$$

$$[q_x^{5,d}, q_y^{5,d}] = [14, 14].$$

当到达目标位置, 各智能体的速度为 0。各智能体代价函数中权矩阵系数 $Q_u = 0.1I_2$, $Q_{pos} = Q_{vel} = \tilde{Q}_{pos} = \tilde{Q}_{vel} = \tilde{Q}_{rpos} = \tilde{Q}_{rvel} = 200I_2$ 。各智能体将与其距离小于或等于 $D_{min} = 15$ 的智能体作为邻居。而当邻居智能体较多时, 只考虑最近的 2 个智能体。所以其滚动时域问题规模会小于或等于三智能体协调控制问题, 求解时间也明显缩短。如图 4 所示若只采用分布式预测控制, 各智能体在较长时域情形

才能达到目标点。(逆时针)动态协调规则分布式预测控制则在较短预测时域情形下,将各智能体稳定于其目标位置,且能获得较好控制效果。

从以上实例分析可得:动态协调规则进一步提高了分布式预测控制方法的可行性和实用性。仿真是基于 Matlab7.3 和 cplex10 完成的。硬件平台为 Intel E5200 CPU,1G Memory。

注 11:以上实例若采用的方法,不考虑动态协调,各智能体是很难控制到目标点,甚至会发生碰撞。因为其固定的权矩阵 $c_{i,j}$ 是不能适应工况变化的。

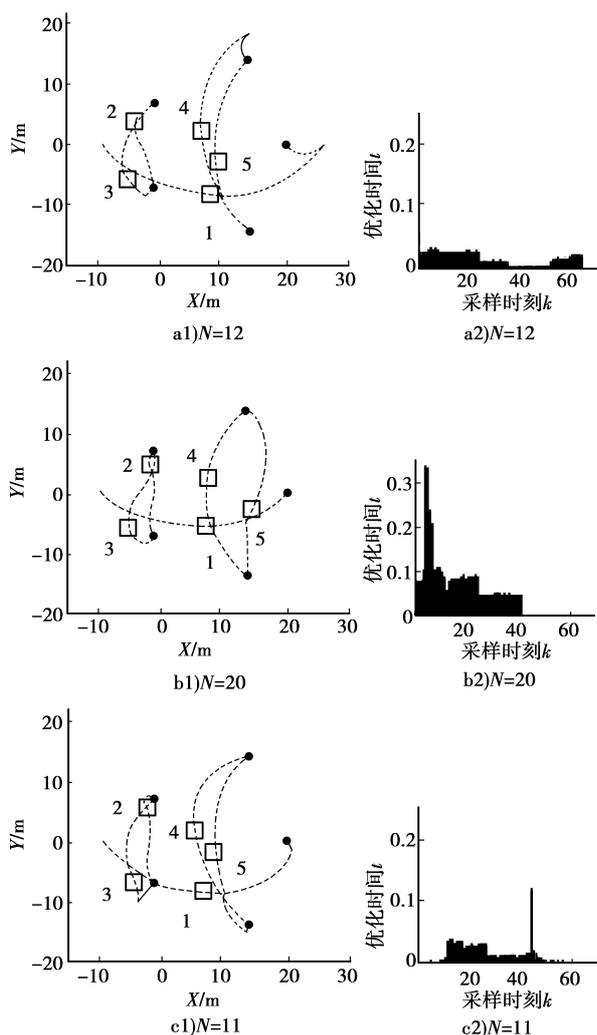


图 4 五智能体协调控制图

(a1), (a2), (b1), (b2) 为采用 DMP 效果图和各智能体最长求解时间图, (c1), (c2) 为采用动态逻辑规则 DMPC 效果图和各智能体最长求解时间图)

4 结 语

基于混杂控制思想对多智能体复杂协调控制问题进行了分布式预测控制研究。将基本方法进行了

扩展,并根据智能体之间实时位置关系和目标位置关系,设计了动态协调规则。此方法提高了分布式预测控制的可行性和实时性。仿真实例说明了方法在复杂协调控制问题中的有效性。

参考文献:

- [1] MACIEJOWSKI J M. Predictive control with constraints[M]. England: Prentice-Hall, 2002.
- [2] ROSSITER J A. Model-based predictive control: a practical approach[M]. Florida: CRC Press, 2003.
- [3] KUWATA Y, RICHARDS A, SCHOUWENAARS T, et al. Distributed robust receding horizon control for multivehicle guidance [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15 (4): 627-641.
- [4] KEVICZKY T, BORRELLI F, BALAS G J. Decentralized receding horizon control for large scale dynamically decoupled systems [J]. Automatica, 2006, 42(12):2105-2115.
- [5] FRANCO E, MAGNI L, PARISINI T, et al. Cooperative constrained control of distributed agents with nonlinear dynamics and delayed information exchange: a stabilizing receding-horizon approach [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(1):324-338.
- [6] KEVICZKY T, BORRELLI F, BALAS G J. Hierarchical design of decentralized receding horizon controllers for decoupled systems [C/OL]// 43rd IEEE Conference on Decision and Control, Atlantis, USA, December 14-17, 2004, 1592-1597 [2005-02-16]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1430271&tag=1.
- [7] KEVICZKY T, BORRELLI F, FREGENE K, et al. Decentralized receding horizon control and coordination of autonomous vehicle formations [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 16(1):19-33.
- [8] DUNBAR W B, MURRAY R M. Distributed receding horizon control for multi-vehicle formation stabilization [J]. Automatica, 2006, 42(4): 549-558.
- [9] BORRELLI F, KEVICZKY T, BALAS G J, et al. Hybrid decentralized control of large scale systems [J]. Hybrid Systems: Computation and Control, 2005, 3414:168-183.
- [10] WEI S B, CHAI Y, DING B C. Distributed model predictive control for multi-agent systems with improved consistency [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2010, 8(1):117-122.
- [11] WEI S B, CHAI Y, DING B C. Distributed model predictive control for multi-agent systems with coupling constraints [J]. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2010, 10(3/4):238-245.

(编辑 侯 湘)