

文章编号: 1001-0920(2007)03-0326-03

交互式多模型算法的模型集设计

刘建书, 李人厚, 张贞耀, 刘云龙
(西安交通大学 系统工程研究所, 西安 710049)

摘要: 针对交互式多模型(IMM)算法中模型集的设计问题,提出一种模型集设计方法.在已知真实模式概率分布函数的情况下,根据要求的模型数目,等概率划分模式空间,在每个等概率模式空间上,利用方差的含义获得最大范围地覆盖模式空间的模型集,并给出一个例子说明模型集的设计方法.应用 Monte-Carlo 仿真,将所设计的模型集用于 IMM 算法进行目标跟踪.仿真结果显示跟踪精度高,表明了该模型集设计方法的有效性.

关键词: 交互式多模型算法; 模型集设计; 目标跟踪

中图分类号: TP273.2 **文献标识码:** A

Model set design for interacting multiple model algorithm

LIU Jian-shu, LI Ren-hou, ZHANG Zhen-yao, LIU Yun-long

(Institute of System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China. Correspondent: LIU Jian-shu, E-mail: jsliu@stu.xjtu.edu.cn)

Abstract: Focusing on the design of the model set for the interacting multiple model (IMM) algorithm, a model set design method is proposed. On the basis that the cumulative distribution function of the true mode is given, the mode space is partitioned into equally probable regions according to the required number of models. In each equally probable region, a model set that covers the maximum mode space is produced by using the variance implication. In addition, an illustration is provided for the design method of the model set. Through Monte-Carlo simulation, the model set designed is used in the IMM algorithm to track the target. Simulation results show that the track accuracy is higher and the proposed model set design method is valid.

Key words: Interacting multiple model algorithm; Model set design; Target tracking

1 引言

在现代跟踪系统中,对匀速目标的跟踪很容易实现,但对于机动性较强的目标进行跟踪则比较困难,原因在于难以建立精确的机动目标模型.在机动目标跟踪的研究中,提出了许多机动目标模型.但应用这些模型进行跟踪时,每个模型都有其自身的局限性,因此,单独采用一个模型进行滤波获得的跟踪精度并不高. Blom 等^[1]在广义伪贝叶斯算法的基础上,提出了一种具有马尔可夫切换系数的交互式多模型(IMM)算法.其主要思想是设计一系列的模型来代表可能的系统行为方式或结构(称为系统模式),基于每个模型的滤波器并行工作,模型间以概率矩阵转移,各模型滤波器通过估计状态的组合实现交互,对基于各模型的滤波器估计进行加权组合,进而获得最后的滤波状态估计.该算法不需要机动

检测,达到了全面自适应能力,可以说 IMM 算法是目前机动目标跟踪中较为有效的混合次优多模型算法,是一种具有较高费效比的可用于结构和(或)参数都变化的多种估计问题的算法^[1,2].

IMM 算法应用于目标跟踪时,为了获得最佳的跟踪效果,必须使用一个尽可能覆盖目标运动模式范围的模型集.然而,增加模型集中的模型数量不仅会增加计算复杂度,而且不一定能改善跟踪性能.这是因为过于细化的模式空间可能会破坏贝叶斯推理的完备性和模型间的独立性,来自过多模型的不必要竞争,反而会造成算法性能下降.因此,模型集的设计将直接影响 IMM 算法输出的跟踪精度^[2],成为 IMM 算法应用的关键问题之一.文献[3-5]在已知目标运动的先验知识时,可以获得目标跟踪的有效模型集;文献[6,7]根据目标不同运行状态,提出了可以改变模型参数的自适应模型集设计方法.

收稿日期: 2005-11-08; 修回日期: 2006-05-24.

基金项目: 国家“211”行动计划项目.

作者简介: 刘建书(1976—),男,甘肃通渭人,博士生,从事数据融合的研究;李人厚(1965—),男,浙江宁波人,教授,博士生导师,从事智能控制理论与方法、CSCW 理论与应用等研究.

目前,由于理论的限制,可应用的模型集设计方法比较少.本文提出了基于方差含义的模型集设计方法,并应用于仿真实验,实验结果表明了该设计方法的有效性.为精确起见,在本文中使用的模式和模型是有区别的.模式指系统的一个现实世界行为方式或结构,模型指在某个精确水平上系统的数学表示或描述^[3].估计是基于模型而不是模式,在考虑模型和模式之间的相互匹配时,模式和模型之间的这种区别是有必要的.

2 问题提出

设目标运动模型为

$$X(n) = A_j X(n-1) + B_j W_j(n-1), \quad \forall j \in M. \quad (1)$$

其中: M 为模型集, j 为模型编号, A_j 为第 j 个模型的状态转移矩阵, B_j 为干扰转移矩阵, $X(n)$ 为目标状态矢量, $W_j(n)$ 为服从 $N(0, Q_j)$ 的高斯白噪声, Q_j 为协方差矩阵.

考虑协同转弯模型,即将目标的运动建模为二阶圆周运动模型.目标状态 $X(n)$ 由目标的位置和速度组成,即

$$X(n) = [x(n) \quad \dot{x}(n) \quad y(n) \quad \dot{y}(n)]^T. \quad (2)$$

其中: $(x(n), y(n))$ 为目标位置, $(\dot{x}(n), \dot{y}(n))$ 为对应的速度.

对于协同转弯模型,式(1)表示的目标运动模型中的转移矩阵分别为

$$A_j = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin(jT)}{j} & 0 & \frac{1 - \cos(jT)}{j} \\ 0 & \cos(jT) & 0 & -\sin(jT) \\ 0 & \frac{1 - \cos(jT)}{j} & 1 & \frac{\sin(jT)}{j} \\ 0 & \sin(jT) & 0 & \cos(jT) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$B_j = \begin{bmatrix} 0.5 T^2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & 0.5 T^2 \\ 0 & T \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中: T 为采样时间; j 为目标运动角速度,表示模型 j 描述的目标机动情况的参数.

将目标的机动刻画为从模型 i 到模型 j 之间的转移,由有限状态的马尔可夫链来描述,其转移概率矩阵为 $[P_{ij}]$,则观测模型为

$$Z(n) = HX(n) + V(n). \quad (5)$$

其中: $Z(n)$ 为观测值, $V(n)$ 为服从 $N(0, R)$ 的观测噪声, R 为协方差矩阵, $W_j(n)$ 和 $V(n)$ 相互独立, H

为观测矩阵且 $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$.

IMM 算法的每一个循环包括 4 个步骤^[1]: 1) 交互作用; 2) 各个滤波器进行各自的滤波计算; 3) 模型概率更新; 4) 组合估计. 在 IMM 算法中,如果采用的模型集中有一些模型与当前模型不匹配,则会由于不必要的模型参与组合使得算法输出精度降低,并且导致计算量增加.下面通过式(1)表示的目标运动模型来说明在 IMM 算法中,模型集的设计问题.

3 模型集设计

一般情况下,模型距离目标的真实运动模式越接近,跟踪精度越高.因此,模型应尽可能选择在目标真实运动模式附近.实际应用 IMM 算法时,由于模型数目有限,所设计的模型集中的模型应能最大范围地覆盖目标的运动模式.

3.1 基于方差的模型集设计

假定真实模式 s 的概率分布函数(cdf) $F_s(x)$ 已知,在进行模型设计时,考虑到模型与模式之间的相互匹配,离散随机变量即模型 m 的概率分布函数 $F_m(x)$ 应尽可能与 $F_s(x)$ 接近,使得 $F_m(x)$ 与 $F_s(x)$ 之间的距离尽可能小,即存在一阈值,满足 $|F_s(x) - F_m(x)|$.

假定模型集中的模型数目为 M ,对模式空间按模型数目等概率进行划分.因此,需要设计的模型集中有几个模型,模式空间就被划分为几个子空间.根据设计要求可知,应使在每个子空间上,所设计的模型尽可能地覆盖模式子空间.由概率统计理论中的方差概念可知,在每个子空间 $[m_i, m_{i+1}]$ 上,所设计模型 $m_l (l = 1, \dots, M, m_i \leq m_l \leq m_{i+1})$ 的方差应该最小,即满足如下代价函数:

$$\min F = \int_{m_i}^{m_{i+1}} f(s) (s - m_l)^2 ds. \quad (6)$$

求得

$$m_l = \frac{\int_{m_i}^{m_{i+1}} f(s) s ds}{\int_{m_i}^{m_{i+1}} f(s) ds}, \quad l = 1, \dots, M, \quad (7)$$

式中 $f(s)$ 为真实模式 s 的概率密度函数.

本质上,上述设计方法所表示的含义是根据所要求的模型数目等概率划分模式空间,在每个等概率的子空间上,利用方差的概念将模型尽可能置于模式集中的空间.在每个模式子空间中,可根据式(6)求得满足最小方差的模型.即在等概率的每个子空间中,所设计的每个模型可以最大程度地覆盖每个模式子空间,满足模型设计的要求.

3.2 模型设计示例

利用式(1)表示的模型来说明该设计方法.在 IMM 算法中,模型集中的模型数目是确定的,本例

假定使用 3 个模型. 对于式 (1) 表示的模型而言, 模型设计即是设计 3 个能尽可能覆盖目标运动范围的目标运动角速度. 目标真实角速度的概率密度函数 (pdf) $f(s)$ 已知, 假定满足混合高斯模型, 即

$$f(s) = c_0 N_0(s) + c_1 N_1(s) + c_2 N_2(s) + c_3 N_3(s). \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} \omega &= c_1 = \frac{3}{8}, c_2 = c_3 = \frac{1}{8}, \\ \omega + c_1 + c_2 + c_3 &= 1, \\ N_0(s) &= \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{s^2}{2}}, N_1(s) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{(s-1)^2}{2}}, \\ N_2(s) &= \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{(s+3)^2}{2}}, N_3(s) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{(s-4)^2}{2}}. \end{aligned}$$

首先由已知目标真实角速度的 pdf 得到相应的 cdf, 如图 1 所示. 根据要求的模型数目, 等概率划分模式空间, 在每个模式子空间上, 由式 (7) 获得每个子空间上的模型, 进而得到整个模型集.

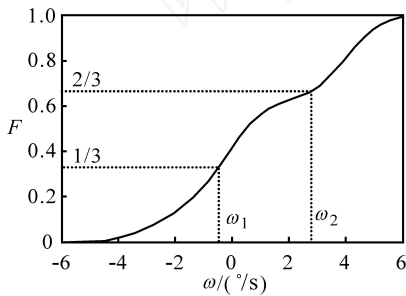


图 1 由目标真实角速度的 cdf 进行模型设计

本例要求设计 3 个模型, 即在图 1 中, 对目标真实角速度的 cdf 三等分, 将整个目标机动角速度的范围 $[-6 \sim 6 \text{ s}]$ 分为 3 个子区间, 分别为 $[-6 \sim -1.9 \text{ s}]$, $[-1.9 \sim 0.7 \text{ s}]$, $[0.7 \sim 6 \text{ s}]$. 在 $[-6 \sim -1.9 \text{ s}]$ 区间上, 由式 (4) 获得模型为 -1.9213 s . 在 $[-1.9 \sim 0.7 \text{ s}]$ 区间上, 模型为 0.7066 s . 在 $[0.7 \sim 6 \text{ s}]$ 区间上, 模型为 4.1570 s . 最后得到整个模型集为 $M = \{-1.9213 \text{ s}, 0.7066 \text{ s}, 4.1570 \text{ s}\}$, 模型集中的模型相应初始概率分别为 $\{\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\}$.

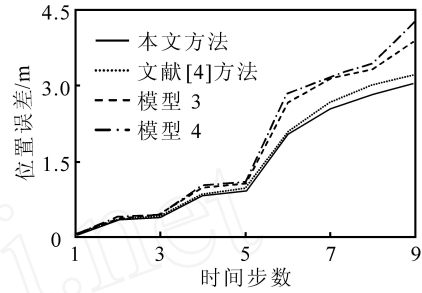
4 仿真实验

实验采用 4 个模型集: 由本文方法设计的模型集 $M_1 = \{-1.9213 \text{ s}, 0.7066 \text{ s}, 4.1570 \text{ s}\}$; 应用文献 [4] 的方法设计模型集 $M_2 = \{-1.627 \text{ s}, 0.49325 \text{ s}, 4.14 \text{ s}\}$; 模型集 $M_3 = \{-4.9 \text{ s}, 0.9 \text{ s}, 4.9 \text{ s}\}$ 和模型集 $M_4 = \{-3.9 \text{ s}, 1.9 \text{ s}, 4.5 \text{ s}\}$.

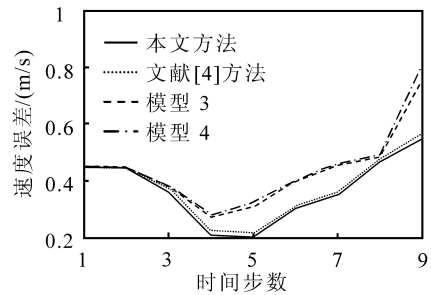
对每组模型集中的模型而言, 其初始概率都分别为 $\{\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\}$. 对 4 组模型集分别应用 Monte-Carlo 仿真实验, 实验结果采用 100 次 Monte-Carlo

仿真结果. 对实验结果进行评估时, 采取状态估计质量的指标之一位置和速度的 rms 误差, k 时刻 rms 误差为 $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_k - \hat{s}_k/k^2}$, s_k 是 k 时刻的模式, \hat{s}_k 为估计, N 为仿真次数.

仿真结果如图 2 所示. 由图 2 可以看出, 利用本文方法设计得到的模型集, 在应用于 IMM 算法进行目标跟踪时, 跟踪精度有了一定的提高.



(a) rms 位置误差



(b) rms 速度误差

图 2 4 组模型的 rms 位置和速度误差

5 结 语

在应用交互式多模型算法时, 模型集的设计是其中一个关键且有难度的问题, 模型集的设计是否有效将直接影响算法最后的输出结果. 在进行模型集设计时, 要求模型集应尽可能地覆盖目标的机动范围. 模型集中的模型与目标的真实运动模式越接近, 算法的输出精度越高.

本文利用方差的含义, 在已知真实模式概率分布函数的情况下, 按照所要求的模型数目, 提出了一种基于方差的模型集设计方法. 仿真实验证明了该设计方法的实用性和有效性. 但是对于模型集设计而言, 由于缺少统一的设计方法和设计标准, 对此问题需要更进一步的研究.

参考文献 (References)

[1] Blom H A P, Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1988, 33(8): 780-783.

(下转第 332 页)

制器更多地考虑了非脆弱性,因此牺牲了一定的超调以及收敛速度性能。

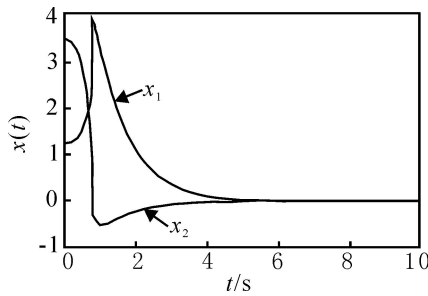


图1 使用非脆弱控制器的状态响应曲线

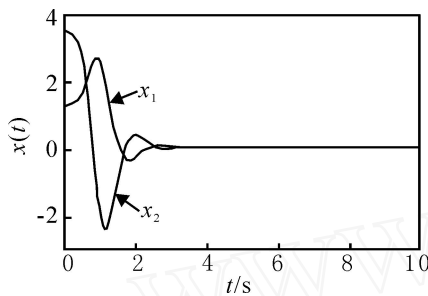


图2 不使用非脆弱控制器的状态响应曲线

5 结论

本文研究一类不确定模糊非线性系统结合非脆弱特性的 DPDC 控制器设计问题. 在给出不确定模糊系统及 DPDC 控制器模型的基础上,把不确定模糊非线性系统和基于非脆弱特性的 DPDC 控制结合起来考虑,给出了不确定模糊系统渐近稳定的充分条件. 仿真结果表明了该设计方法的可行性和有效性.

参考文献(References)

- [1] Takagi T, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45(2) : 135-196.
- [2] Liu X D, Zhang Q L. New approach to H controller designs based on observers for T-S fuzzy systems via LMI[J]. Automatica, 2003, 39(9) : 1571-1582.
- [3] Tanaka K, Wang H O. A multiple Lyapunov function approach to stabilization of fuzzy control systems [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2003, 11(4) : 582-589.
- [4] Cao S G, Rees N W, Feng G. Lyapunov-like stability theorems for discrete-time fuzzy control systems [J]. Int J of Systems Science, 1997, 28(3) : 229-241.
- [5] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1985, 15(1) : 116-132.
- [6] Yang G H, Wang J L, Lin C. H control for linear systems with additive controller gain variations [J]. Int J Control, 2000, 73(16) : 1500-1506.
- [7] Yang G H, Wang J L. Non-fragile H control for linear systems with multiplicative controller gain variations [J]. Automatica, 2001, 37(4) : 727-737.
- [8] 林瑞全, 杨富文. 基于 H 控制理论的非脆弱控制的研究 [J]. 控制与决策, 2004, 19(5) : 598-600. (Lin R Q, Yang F W. On non-fragile control based on H control theory [J]. Control and Decision, 2004, 19(5) : 598-600.)
- [9] Li J, Wang H O, Niemann David, et al. Dynamic parallel distributed compensation for Takagi-Sugeno fuzzy systems: AN LMI approach [J]. Information Science, 2000, 123(2) : 201-221.
- [10] Mahmoud M S, Mohamed Z. Stabilizing controllers using observers for uncertain systems with delays [J]. Int J of Systems Science, 2001, 32(6) : 767-773.
- [11] Cannon R H. Dynamics of Physical Systems [M]. New York: McGraw-Hill, 1967.
- [2] Mazar E, Averbuch A, Bar-Shalom Y, et al. Interacting multiple model methods in target tracking: A survey [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1) : 103-123.
- [3] Li X R. Model-set design for multiple-model method: Part I [C]. Proc of Int Conf on Information Fusion. Annapolis, 2002: 26-33.
- [4] Li X R, Zhao Z L, Zhang P, et al. Model-set design for multiple-model method: Part [C]. Proc of Int Conf on Information Fusion. Annapolis, 2002: 1347-1354.
- [5] Li X R, Zhao Z L, Li X B. General model-set design methods for multiple-model approach [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(9) : 1260-1276.
- [6] 徐建豪, 高彦杰, 杨国庆. 交互式多模型算法中模型集选择的分析研究 [J]. 航空学报, 2004, 25(4) : 352-356. (Xu J H, Gao Y J, Yang G Q. Analysis and study of model set selection in interacting multiple model algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(4) : 352-356.)
- [7] 何衍, 郭智疆, 蒋静坪. 自适应交互多模型跟踪算法的模型集设计 [J]. 电光与控制, 2002, 9(2) : 26-29. (He Y, Guo Z J, Jiang J P. Model set design of the adaptive interacting multiple model tracking algorithm [J]. Electronics Optics and Control, 2002, 9(2) : 26-29.)
- [8] Li X R, Zhang Y M, Zhi X R. Multiple-model estimation with variable structure—Part IV: Design and model-group switching algorithm [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1) : 242-254.

(上接第 328 页)