

文章编号: 1001-0920(2008)11-1211-05

多假设最大联合概率决策融合准则的自适应算法

田森源¹, 陈 勇¹, HUSTON Dryver R², 孙炳楠¹

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310027; 2. 佛蒙特大学 机械工程系, 佛蒙特州 VT05405-0156)

摘 要: 为获得多假设最大联合概率决策融合准则的多假设自适应算法, 通过对原算法中各权重系数求偏微分, 结合简单计数方法, 给出了自适应决策融合中的各个系数增量表达式, 并进行了收敛性证明. 该算法在系统参数未知及参数发生改变的情况下, 均能进行决策融合. 针对两假设自适应决策融合问题, 将该算法与 Mansouri 的算法进行了比较. 最后在多假设情况下对该算法进行了应用, 并给出了提高收敛速度的方法.

关键词: 自适应决策融合; 多假设; 最大联合概率融合准则; 收敛速度

中图分类号: N945.25 **文献标识码:** A

Adaptive decision fusion for multiple hypotheses maximum joint probability decision rule

TIAN Sen-yuan¹, CHEN Yong¹, HUSTON Dryver R², SUN Bing-nan¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Department of Mechanical Engineering, The University of Vermont, VT05405-0156, USA. Correspondent: CHEN Yong, E-mail: cecheny@zju.edu.cn)

Abstract: To obtain the corresponding adaptive decision fusion methodology for multiple hypotheses based on the maximum joint probability (MJP) fusion rule, by using partial differentiation involving with simple counting technology, the increment expression of each coefficient in the rule is given, and its convergence is proved. The algorithm derived can deal with the decision fusion system under the condition that the parameter is unknown or changed varied with time. Comparing with classical algorithm, the adaptive algorithm shows its superiority, under the condition of dealing with an two hypothesis adaptive decision fusion case. In the multiple hypothesis case study, the effectiveness of proposed algorithm is indicated, and the fast convergence strategy is also developed and applied to the adaptive decision fusion.

Key words: Adaptive decision fusion; Multiple hypothesis; Maximum joint probability fusion rule; Convergence speed

1 引 言

决策融合问题的应用非常广泛, 在军事上有战场敌我态势判断、对策选择, 在经济学、损伤或故障检测、数据处理分析中也有应用^[1-4]. 例如: 开发一个复杂重要的系统时, 其故障检测往往具有多个检测系统, 而各个检测系统的预警结果往往不一定正确甚至相互矛盾, 因此需要一个决策融合系统对其进行综合判断. 采用通常的决策融合算法需知道各假设(故障种类)的分布概率及局部决策的正确概率(各个检测系统的系统性能), 然而, 实际情况常会碰到先验概率未知或不能准确知道的情形. 上例中各个检测系统的正确概率无法通过有限次数的测试获

得, 各个故障种类出现概率也无法完全已知. 另外, 决策环境也会发生变化, 即单个检测系统的系统性能、各种故障的出现概率等决策融合参数不但未知, 在决策融合过程中还会产生变化. 自适应决策融合算法正是针对应用普通决策融合策略时出现的问题而提出来的, 现已成为数据融合领域的研究热点.

Naim 及 Kam^[5]提出的算法采用矫正策略, 导致算法复杂且实用性降低. 后来, Ansari 和 Mansouri^[6-8]提出的算法均以 Chair 的决策融合准则^[9]为基础进行参数调整, 分别提出了采用无监督参数调整方式的自适应决策融合算法, 取得了良好的决策融合效果. Thomopoulos 和 Mirjalaky^[10,11]也

收稿日期: 2007-08-27; 修回日期: 2008-01-27.

基金项目: 美国交通部基金项目(DTOS59-06-G-00048).

作者简介: 田森源(1978—), 男, 山西长治人, 博士, 从事结构损伤识别、信息融合的研究; 孙炳楠(1940—), 男, 杭州人, 教授, 博士生导师, 从事损伤检测、信息融合等研究.

各自提出了自适应决策融合算法. 然而这些自适应决策融合算法仅适用于两假设决策融合问题, 在实际应用中还是具有很大的局限性.

田森源、陈勇等^[12]提出的最大联合概率决策融合准则(MJP)可适用于多假设的决策融合. 本文在此基础上, 提出了适用于多假设最优决策融合的自适应算法, 使决策融合系统对于多假设决策融合问题, 在各假设分布概率和各子决策先验概率未知或改变的情况下, 在自适应的决策融合过程当中仍能得到错误概率尽可能小的最终决策. 最后, 通过数值模拟说明了多假设最优决策融合的自适应算法的有效性和实用性, 并给出了加快收敛速度的方法.

2 最大联合概率准则

对于具有 m 个假设和 n 个子决策的决策融合系统, $H = \{H_1, H_2, \dots, H_m\}$ 为描述系统处于哪个假设状态的变量, 向量 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 代表了局部决策结果的联合分布状态. $u_i = h_j$ 表示第 i 个局部决策确定系统假设状态为 H_j , 相应的局部决策条件概率为 $P(u_i = h_j | H_k)$. 所有局部决策的条件概率可采用局部决策先验概率矩阵 $[h^i]$ 描述, 其中

$$h_{jk}^i = P(u_i = h_j | H_k), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

融合中心的最终决策值为 $u = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$, $u = h_j$ 表示融合中心估计系统处于 H_j 假设状态. 由 Bayes 原理得到的最大联合概率决策融合准则(MJP)^[12]为: 若最终决策为 $u = h_B$, 则必然满足

$$\frac{P(H_B) \prod_{i=1}^n P(u_i | H_B)}{P(H_l) \prod_{i=1}^n P(u_i | H_l)} > 1, \quad l = (1, 2, \dots, m), \quad l \neq B. \quad (2)$$

将上式写成似然比形式为

$$\ln \frac{P(H_B)}{P(H_l)} + \sum_{i=1}^n \ln \frac{P(u_i | H_B)}{P(u_i | H_l)} > 0, \quad l = (1, 2, \dots, m), \quad l \neq B. \quad (3)$$

若局部决策形式 $u_i = h_s, s \in \{1, 2, \dots, m\}$, 则融合中心可将此输入改为向量 v^i , 且

$$v_j^i = \begin{cases} 1, & j = s; \\ 0, & \text{其他}; \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

同时定义权重系数 $w_{k,l}$, $w_{i,j,k,l}$ 和比较指标 $y_{k,l}$ 为

$$w_{k,l} = \ln \frac{P(H_k)}{P(H_l)}, \quad w_{i,j,k,l} = \ln \frac{P(u_i = h_j | H_k)}{P(u_i = h_j | H_l)}, \quad (4)$$

$$y_{k,l} = w_{k,l} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_j^i w_{i,j,k,l}. \quad (5)$$

由式(3)及变量定义, 可将 MJP 准则表述为

$$\sum_{l=1, l \neq B}^m \text{sign}(y_{B,l}) = m - 1 \quad (6)$$

成立, 则最终决策为 $u = h_B$, 其中

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (7)$$

3 自适应算法

决策融合系统中的权重 $w_{k,l}$ 和 $w_{i,j,k,l}$ 反映了局部决策的条件概率分布情况. 若在决策融合系统每次决策融合后能获得被测系统的真实状态 H 并将其作为参考, 则可用此参考信号调整决策系统权重. 令权重 $w_{k,l}$ 和 $w_{i,j,k,l}$ 趋近于式(4)定义的值, 以降低决策系统的错误概率. 但在实际工程中, 真实状态 H 很难得到, 且权重可能随时间变化, 因此可将最终决策 u 所指的系统状态作为参考状态, 记为 H . 在这种情况下, 将式(8)所表示的以 H 为参考的权重 $\hat{w}_{k,l}$ 和 $\hat{w}_{i,j,k,l}$ 作为真实权重 $w_{k,l}$ 和 $w_{i,j,k,l}$ 的近似值, 即

$$\begin{aligned} \hat{w}_{k,l} &= \ln \frac{P(H_k)}{P(H_l)}, \\ \hat{w}_{i,j,k,l} &= \ln \frac{P(u_i = h_j | H_k)}{P(u_i = h_j | H_l)} = \\ &= \ln \frac{P(u_i = h_j, H_k)}{P(u_i = h_j, H_l)} - \ln \frac{P(H_k)}{P(H_l)}. \end{aligned} \quad (8)$$

式中的各概率比值可由相应事件的相对发生频率得到^[11]. 若 $H = H_k$ 发生的次数为 a_k , $H = H_l$ 且 $u_i = h_j$ 发生的次数为 $a_{i,j,k}$, 则由决策过程中的简单计数可近似得到概率比值为

$$\begin{aligned} P(H_k) / P(H_l) &= a_k / a_l, \\ P(u_i = h_j | H_k) / P(u_i = h_j | H_l) &= a_{i,j,k} / a_{i,j,l}. \end{aligned} \quad (9)$$

由式(8)和(9)可得

$$\begin{aligned} \hat{w}_{k,l} &= a_k / \exp(\hat{w}_{k,l}), \\ \hat{w}_{i,j,k,l} &= a_{i,j,k} / \exp(\hat{w}_{i,j,k,l} + \hat{w}_{k,l}). \end{aligned} \quad (10)$$

而权重 $\hat{w}_{k,l}$ 和 $\hat{w}_{i,j,k,l}$ 相对于 a_k , a_l , $a_{i,j,k}$ 和 $a_{i,j,l}$ 的偏导数为

$$\begin{aligned} \partial \hat{w}_{k,l} / \partial a_k &= 1 / a_k, \\ \partial \hat{w}_{k,l} / \partial a_l &= -1 / a_l = -\exp(\hat{w}_{k,l}) / a_k, \\ \partial \hat{w}_{i,j,k,l} / \partial a_k &= -1 / a_k, \\ \partial \hat{w}_{i,j,k,l} / \partial a_l &= 1 / a_l = \exp(\hat{w}_{k,l}) / a_k, \\ \partial \hat{w}_{i,j,k,l} / \partial a_{i,j,k} &= 1 / a_{i,j,k}, \\ \partial \hat{w}_{i,j,k,l} / \partial a_{i,j,l} &= -1 / a_{i,j,l} = \\ &= -\exp(\hat{w}_{i,j,k,l} + \hat{w}_{k,l}) / a_{i,j,k}. \end{aligned} \quad (11)$$

则可将自适应决策系统每次决策后的权重更新规则

定为

$$\begin{aligned} \hat{w}_{k,l}^+ &= \hat{w}_{k,l}^- + \hat{w}_{k,l}, \\ \hat{w}_{i,j,k,l}^+ &= \hat{w}_{i,j,k,l}^- + \hat{w}_{i,j,k,l}. \end{aligned} \quad (12)$$

其中： $\hat{w}_{k,l}^+$ 和 $\hat{w}_{i,j,k,l}^+$ 表示更新后的权重， $\hat{w}_{k,l}^-$ 和 $\hat{w}_{i,j,k,l}^-$ 表示更新前的权重， $\hat{w}_{k,l}$ 和 $\hat{w}_{i,j,k,l}$ 表示权重更新增量，有

$$\hat{w}_{k,l} = \begin{cases} 1/a_k, & \mathbf{H} = \mathbf{H}_k; \\ -\exp(\hat{w}_{k,l}^-)/a_k, & \mathbf{H} = \mathbf{H}_l; \\ 0, & \mathbf{H} = \mathbf{H}_k, \mathbf{H} = \mathbf{H}_l; \end{cases} \quad (13)$$

$$\hat{w}_{i,j,k,l} = \begin{cases} -1/a_k + 1/a_{i,j,k}, & \mathbf{H} = \mathbf{H}_k, u_i = h_j; \\ -1/a_k, & \mathbf{H} = \mathbf{H}_k, u_i = h_j; \\ \exp(\hat{w}_{k,l}^-)/a_k - \exp(\hat{w}_{i,j,k,l}^- + \hat{w}_{k,l}^-)/a_{i,j,k}, & \mathbf{H} = \mathbf{H}_l, u_i = h_j; \\ \exp(\hat{w}_{k,l}^-)/a_k, & \mathbf{H} = \mathbf{H}_l, u_i = h_j; \\ 0, & \mathbf{H} = \mathbf{H}_k, \mathbf{H} = \mathbf{H}_l. \end{cases} \quad (14)$$

引理 1 若决策融合中心采用式(12) 所表示的规则进行权重更新， $\hat{w}_{k,l}$ 和 $\hat{w}_{i,j,k,l}$ 将分别收敛于真实权重的近似值 $w_{k,l}$ 和 $w_{i,j,k,l}$ 。

证明 每次更新前权重 $\hat{w}_{k,l}^-$, $\hat{w}_{i,j,k,l}^-$, $\hat{w}_{k,l}$ 和 $\hat{w}_{i,j,k,l}$ 可能存在差值，分别记为

$$\begin{aligned} \hat{w}_{k,l}^* &= \hat{w}_{k,l}^- - \hat{w}_{k,l}, \\ \hat{w}_{i,j,k,l}^* &= \hat{w}_{i,j,k,l}^- - \hat{w}_{i,j,k,l}. \end{aligned} \quad (15)$$

由权重更新规则可得

$$\begin{aligned} E(\hat{w}_{k,l}^+ - \hat{w}_{k,l}) &= E(\hat{w}_{k,l}^*) = \\ P(\mathbf{H}_k)/a_k - \exp(\hat{w}_{k,l}^-) P(\mathbf{H}_l)/a_k &= \\ P(\mathbf{H}_k)/a_k - \exp(\hat{w}_{k,l}^- + \hat{w}_{k,l}^*) P(\mathbf{H}_l)/a_k &= \\ P(\mathbf{H}_k) [1 - \exp(\hat{w}_{k,l}^*)]/a_k. \end{aligned} \quad (16)$$

收敛过程处于稳定状态，则 $\hat{w}_{k,l}^* = 0$ ，因此 $\hat{w}_{k,l}$ 收敛于 $w_{k,l}$ 。若处于非稳定则可得

$$\begin{cases} E(\hat{w}_{k,l}^*) < 0, & \hat{w}_{k,l}^* > 0; \\ E(\hat{w}_{k,l}^*) > 0, & \hat{w}_{k,l}^* < 0. \end{cases} \quad (17)$$

上式表明若 $\hat{w}_{k,l}^- < \hat{w}_{k,l}$ ，则更新步骤使 $\hat{w}_{k,l}$ 增加；而若 $\hat{w}_{k,l}^- > \hat{w}_{k,l}$ ，则更新步骤使 $\hat{w}_{k,l}$ 减小。由式(15)可知，当 a_k 增加及 $\hat{w}_{k,l}^*$ 减小到一定程度后， $|E(\hat{w}_{k,l}^*)| < |\hat{w}_{k,l}^*|$ ，表明 $\hat{w}_{k,l}$ 单调增加且有上限或单调减小且有下限，因此 $\hat{w}_{k,l}$ 收敛。 $E(\hat{w}_{k,l}^*)$ 趋近于零，即 $\hat{w}_{k,l}^*$ 趋近于零，说明 $\hat{w}_{k,l}$ 将收敛于 $w_{k,l}$ 。

对于 $\hat{w}_{i,j,k,l}$ ，同样由权重更新规则得

$$\begin{aligned} E(\hat{w}_{i,j,k,l}^+ - \hat{w}_{i,j,k,l}) &= E(\hat{w}_{i,j,k,l}^*) = \\ (-1/a_k + 1/a_{i,j,k}) P(u_i = h_j, \mathbf{H}_k) - & \\ P(u_i = h_j, \mathbf{H}_k)/a_k + [\exp(\hat{w}_{k,l}^-)/a_k - & \\ \exp(\hat{w}_{i,j,k,l}^- + \hat{w}_{k,l}^-)] P(u_i = h_j, \mathbf{H}_l)/a_{i,j,k} + & \\ \exp(\hat{w}_{k,l}^-) P(u_i = h_j, \mathbf{H}_l)/a_k = & \\ P(u_i = h_j, \mathbf{H}_k) [1 - \exp(\hat{w}_{i,j,k,l}^* + & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{w}_{k,l}^*)]/a_{i,j,k} - & \\ P(\mathbf{H}_k) [1 - \exp(\hat{w}_{k,l}^*)]/a_k. \end{aligned} \quad (18)$$

上文已证明 $\hat{w}_{k,l}^*$ 将最终趋近于零，则上式可变为

$$E(\hat{w}_{i,j,k,l}) = P(u_i = h_j, \mathbf{H}_k) [1 - \exp(\hat{w}_{i,j,k,l}^*)]/a_{i,j,k}. \quad (19)$$

对于稳定状态， $E(\hat{w}_{i,j,k,l}^*)$ 趋近于零，因此 $\hat{w}_{i,j,k,l}^*$ 趋近于零，说明 $\hat{w}_{i,j,k,l}$ 收敛于 $w_{i,j,k,l}$ 。非稳定状态与分析 $\hat{w}_{k,l}$ 收敛类似，可得此情况下 $\hat{w}_{i,j,k,l}$ 也收敛。因此 $E(\hat{w}_{i,j,k,l}^*)$ 也趋近于零，即

$$\frac{1}{a_{i,j,k}} P(u_i = h_j, \mathbf{H}_k) [1 - \exp(\hat{w}_{i,j,k,l}^*)] = 0, \quad (20)$$

$\hat{w}_{i,j,k,l}^*$ 将趋近于零，说明若 $\hat{w}_{i,j,k,l}$ 收敛则收敛于 $w_{i,j,k,l}$ 。

综上所述， $\hat{w}_{k,l}$ 和 $\hat{w}_{i,j,k,l}$ 收敛且分别收敛于权重的近似值 $w_{k,l}$ 和 $w_{i,j,k,l}$ 。

权重更新的收敛性从理论上证明了自适应 MJ P 决策融合算法的有效性。当大部分局部决策具有较好的决策性能时，即使各局部决策的先验正确概率为未知，或部分局部决策的正确概率发生了改变，采用自适应 MJ P 决策融合算法，仍能在决策融合过程中，通过自适应权重调整得出错误概率尽可能小的最终决策。

4 应用与比较

这里根据事先设定的参数进行了两种情况下的事件随机模拟。在其中一种情况下，将本文算法与 Mansouri 的两假设自适应决策融合算法结果进行了比较，研究了多假设的自适应决策融合算例，并给出了加快收敛速度的方法及相应的计算结果。

4.1 两假设自适应融合及比较

为了便于与 Mansouri 两假设自适应决策融合算法进行比较，这里采用随机变量模拟了一个包含两假设 $\{H_0, H_1\}$ 和 6 个局部决策的决策融合问题，随机生成了 4000 个事件，并且在事件发生次数满 2000 次时，某个局部决策的正确概率发生了变化。在该模拟过程中，采用的参数包括 $P(H_1) = 0.8$ ， $P(H_0) = 0.2$ 。在前 2000 次事件中，各个局部决策的正确概率为

$$\begin{aligned} P(u_i = h_1 | H_1) &= P(u_i = h_0 | H_0) = 0.85, \\ P(u_i = h_1 | H_0) &= P(u_i = h_0 | H_1) = 0.15, \end{aligned}$$

即各局部决策正确概率相同；然后第 1 个局部决策先验概率变为

$$\begin{aligned} P(u_1 = h_1 | H_1) &= P(u_1 = h_0 | H_0) = 0.75, \\ P(u_1 = h_1 | H_0) &= P(u_1 = h_0 | H_1) = 0.15, \end{aligned}$$

其他子决策系统的正确概率保持不变。



在这个自适应算例中,假设事件发生概率及局部决策正确概率未知,分别采用 MJP 决策融合自适应算法和 Mansouri 两假设自适应决策融合算法进行决策融合,可得到如图 1 所示的权重更新曲线.其中自适应 MJP 决策融合算法中的 $w_{1,0,0,1}$ 相当于 Mansouri 算法中的 w_1 .可以看出,自适应 MJP 决策融合算法也可处理两假设决策融合问题,且与 Mansouri 自适应算法相比,权重更新表达形式更简单,更新运算量小,收敛速度也略有提高.

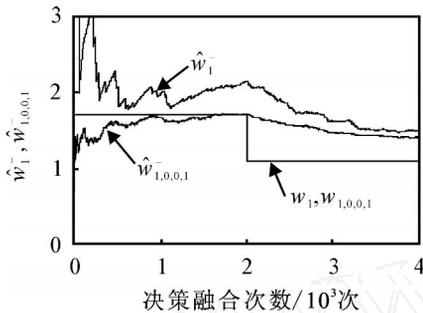


图 1 权重 $w_{i,0,0,1}$ 更新曲线

4.2 多假设自适应融合

采用随机变量模拟了一个 3 假设、4 局部决策问题,共模拟了 10000 个事件.各假设分别为 H_0, H_1 和 H_2 ,模拟时采用的分布概率相应为 40%,20% 和 40%.随机变量模拟时采用的 4 个子决策的决策概率为

$$h^1 = \begin{bmatrix} 0.90 & 0.04 & 0.06 \\ 0.05 & 0.90 & 0.04 \\ 0.05 & 0.06 & 0.90 \end{bmatrix},$$

$$h^2 = \begin{bmatrix} 0.82 & 0.07 & 0.08 \\ 0.09 & 0.85 & 0.09 \\ 0.09 & 0.08 & 0.83 \end{bmatrix},$$

$$h^3 = \begin{bmatrix} 0.91 & 0.04 & 0.05 \\ 0.05 & 0.91 & 0.05 \\ 0.04 & 0.05 & 0.90 \end{bmatrix},$$

$$h^4 = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.07 & 0.08 \\ 0.08 & 0.86 & 0.08 \\ 0.07 & 0.07 & 0.84 \end{bmatrix}.$$

当采用 MJP 决策融合自适应算法时,若事件分布概率及局部决策先验概率未知,可将初始权重设为

$$w_{k,l} = 0,$$

$$w_{i,j,k,l} = \begin{cases} 2, & j = k; \\ -2, & j = l; \\ 0, & j \neq k, j \neq l. \end{cases}$$

则可得 $w_{i,0,0,1}$ 的自动更新情况,即趋于模拟时所选用的参数,如图 2 所示.

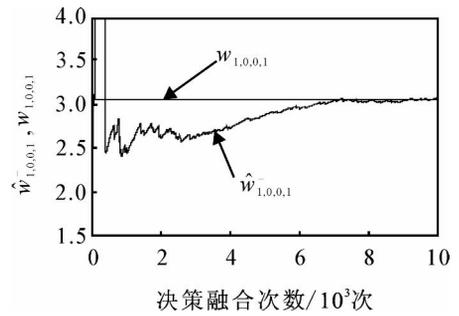


图 2 $w_{i,0,0,1}$ 自动更新曲线

考虑系统变化的情况,在所模拟的 10000 个事件中,若前 8000 个事件采用的参数与前面相同,则后 2000 个事件采用新的参数: H_0, H_1 和 H_2 的相应分布概率变为 30%,30% 和 40%,各局部决策的决策概率变为

$$h^1 = \begin{bmatrix} 0.82 & 0.07 & 0.08 \\ 0.09 & 0.85 & 0.09 \\ 0.09 & 0.08 & 0.83 \end{bmatrix},$$

$$h^2 = \begin{bmatrix} 0.91 & 0.04 & 0.05 \\ 0.05 & 0.91 & 0.05 \\ 0.04 & 0.05 & 0.90 \end{bmatrix},$$

$$h^3 = \begin{bmatrix} 0.90 & 0.04 & 0.05 \\ 0.06 & 0.91 & 0.05 \\ 0.04 & 0.05 & 0.90 \end{bmatrix},$$

$$h^4 = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.07 & 0.08 \\ 0.08 & 0.86 & 0.08 \\ 0.07 & 0.07 & 0.84 \end{bmatrix}.$$

此时 $w_{i,0,0,1}$ 的自动更新情况如图 3 所示.

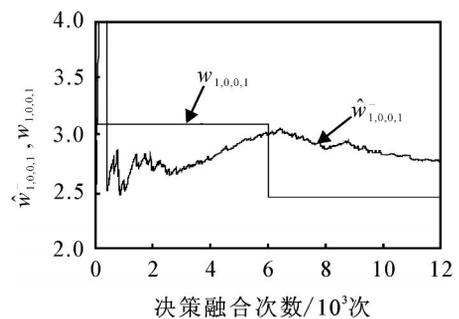


图 3 $w_{i,0,0,1}$ 自动更新曲线

由图 3 可以看出,权重早期收敛速度较快,随着融合次数的增加收敛速度逐渐变慢.若局部决策的正确概率或各假设分布概率在检测过程中发生变化,则权重的收敛速度将大大下降,因此十分有必要采用合适的方法提高收敛速度.

4.3 收敛速度加快策略

将每次进行自适应决策时已发生的决策总次数记为 a .考虑到决策计数变量 a_k 和 $a_{i,j,k}$ 与 a 之间具有相对稳定的比例关系,将更新量中的 a_k 设置为

$Ta_k/a, a_{i,j,k}$ 设置为 $Ta_{i,j,k}/a$, 其中 T 为调节比例变量. 则更新量变为

$$\hat{w}_{k,l} = \begin{cases} \frac{a}{Ta_k}, & H = H_k; \\ -\frac{a \exp(\hat{w}_{k,l})}{Ta_k}, & H = H_l; \\ 0, & H = H_k, H = H_l; \end{cases} \quad (21)$$

$$\hat{w}_{i,j,k,l} = \begin{cases} -\frac{a}{Ta_k} + \frac{a}{Ta_{i,j,k}}, & H = H_k, u_i = h_j; \\ -\frac{a}{Ta_k}, & H = H_k, u_i \neq h_j; \\ \frac{a \exp(\hat{w}_{k,l})}{Ta_k} - \frac{a \exp(\hat{w}_{i,j,k,l} + \hat{w}_{k,l})}{Ta_{i,j,k}}, & H = H_l, u_i = h_j; \\ \frac{a \exp(\hat{w}_{k,l})}{Ta_k}, & H = H_l, u_i \neq h_j; \\ 0, & H = H_k, H = H_l. \end{cases} \quad (22)$$

调节比例变量 T 控制更新量的大小. T 越大, 更新量的绝对值越小, 则权重收敛的速度越慢. 为加快权重收敛速度可将 T 变小, 但 T 值过小则会破坏权重的稳定性, 加大权重处在“稳定”状态时的摆动幅度, 甚至会导致出现连续几次错误决策使权重不收敛的情况.

将式 (21), (22) 应用于前面 3 假设、4 局部决策的决策融合问题, 可大大加快算法的收敛速度. 图 4 给出了采用不同的 T 所得到的权重 $\hat{w}_{1,0,0,1}$ 的收敛曲线. 可以发现 T 值越小, 更新权重在实际局部决策

概率数据发生变化时趋近理论值的速度越快, 但摆动幅度增大, 即收敛的稳定性变差. 本算例中 T 的取值范围设在 $[500, 1000]$ 较为合理, T 的取值与系统的假设个数相关, 假设个数越大, 则 T 越大. 与收敛速度加快前比较可以看出, 加快收敛速度后, 权重趋近实际值的速度有较大幅度的提高, 但在理论值附近有一定幅度的摆动.

5 结 论

针对多假设决策融合问题, 本文提出了基于最大联合概率准则的自适应融合算法, 并给出了收敛性证明. 通过事先给定参数, 采用随机变量模拟了多个算例, 相应的自适应融合结果验证了其有效性及收敛性. 通过与 Mansouri 算法的比较, 本文算法具有表达简单、运算量小、收敛速度快的特点. 在多假设算例中, 提出了加快收敛速度的方法, 采用调节比例变量控制收敛速度, 并研究了其取值范围.

参考文献(References)

- [1] 康耀红. 数据融合理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997.
(Kang Y H. Data fusion theory and applications[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1997.)
- [2] Demirbas K, Maximum a posteriori approach to object recognition with distributed sensors[J]. IEEE Trans on AES, 1988, 24(3): 309-313.
- [3] 姜绍飞, 王留生, 殷晓志, 等. 结构健康监测中的数据融合技术[J]. 沈阳建筑大学学报, 2005, 21(1): 18-22.
(Jiang S F, Wang L S, Yin X Z, et al. Data fusion technique in structural health monitoring [J]. J of Shenyang Jianzhu University, 2005, 21(1): 18-22.)
- [4] Hall D L. Mathematical techniques in multi-sensor data fusion[M]. Boston: Artech House, 1992.
- [5] Naim A, Kam M. On-line estimation of probabilities for bayesian detection[J]. Automatica, 1994, 30(4): 633-642.
- [6] Ansari N, Hou E, Zhu B, et al. An adaptive fusion model for distributed detection systems[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 1996, 32(2): 524-531.
- [7] Ansari N, Chen J G, Zhang Y Z. Adaptive detection fusion for unequiprobable sources [C]. IEE Proc on Radar, Sonar and Navigation. Stevenage: IEE Press. 1997, 144(3): 105-111.
- [8] Mansouri N, Fathi M. Simple counting rule for optimal data fusion [C]. Proc of 2003 IEEE Conf on Control Applications. Istanbul: IEEE Press, 2003, 2: 1186-1191.

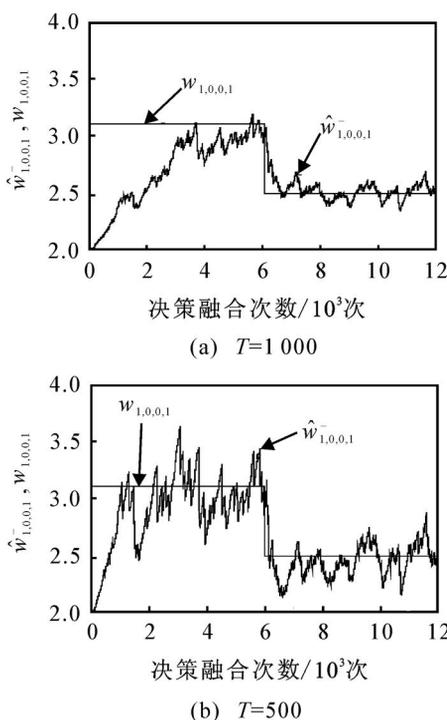


图 4 加快收敛速度后 $\hat{w}_{1,0,0,1}$ 自动更新曲线图

(下转第 1220 页)

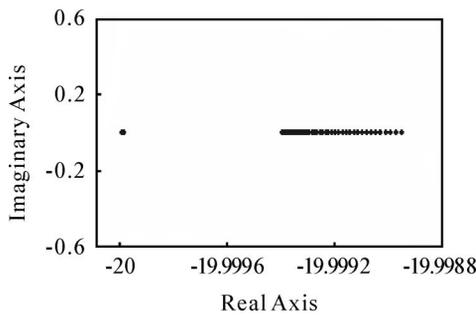


图3 矩阵 $\bar{C}_2^T X \bar{C}_2^T - U$ 的特征值分布

并求得对称矩阵 $\bar{C}_2^T X \bar{C}_2^T - U$ 的特征值均为负数,分布如图3所示.由此表明,闭环系统稳态输出协方差矩阵

$$\lim_k E[z(k) z^T(k)] = \bar{C}_2^T X \bar{C}_2^T < U.$$

5 结论

本文研究了Delta算子不确定系统基于动态输出反馈的D-稳定鲁棒协方差控制问题.采用消元法思想,给出满足性能指标要求的动态输出反馈控制器存在条件的LMI刻画,并由此提出相应控制器的设计算法.该算法克服了须事先设定参数值方可求解的问题,避免了人为选取参数的盲目性和主观性.通过数值算例计算表明了该算法的可行性和有效性.

参考文献(References)

- [1] Middleton R H, Goodwin G C. Improved finite word length characteristics in digital control using delta operator[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1986, 31(11): 1015-1021.
- [2] Neuman C P. Properties of the delta operator model of dynamic physical systems[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1993, 23(1): 296-301.
- [3] 李惠光,武波,李国友,等. Delta算子控制及其鲁棒控制理论基础[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

- (Li H G, Wu B, Li G Y, et al. The basic theory of delta operator control and its robust control [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.)
- [4] 张端金,吴捷,杨成梧. Delta算子系统圆形区域极点配置的鲁棒性[J]. 控制与决策, 2001, 16(3): 337-340. (Zhang D J, Wu J, Yang C W. Robustness of pole assignment in a circular region for delta operator systems [J]. Control and Decision, 2001, 16(3): 337-340.)
- [5] 张端金,王忠勇,吴捷. Delta算子不确定系统的多目标鲁棒H控制[J]. 控制与决策, 2003, 18(2): 164-168. (Zhang D J, Wang Z Y, Wu J. Multi-objective robust H control for delta operator formulated uncertain systems[J]. Control and Decision, 2003, 18(2): 164-168.)
- [6] 刘满,井元伟,张嗣瀛. Delta算子系统D稳定鲁棒容错控制[J]. 东北大学学报, 2004, 25(8): 715-718. (Liu M, Jing Y W, Zhang S Y. D-stable robust fault-tolerant control for delta operator systems [J]. J of Northeastern University, 2004, 25(8): 715-718.)
- [7] Furuta K, Kim S B. Pole assignment in a specified disk [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1987, 32(5): 423-427.
- [8] Garcia G, Bernussou J. Pole assignment for uncertain systems in a disk by state feedback [J]. IEEE Trans Automatic Control, 1995, 40(1): 184-190.
- [9] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京:清华大学出版社,2002. (Yu L. Robust control —LMI methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)
- [10] Wang Z, Burnham K J. LMI approach to output feedback control for linear uncertain systems with D-stability constraints[J]. J of Optimization Theory and Applications, 2002, 113(2): 357-372.
- [11] Cahinet P, Apkarian P. A linear matrix inequality approach to H control[J]. Int J Robust and Nonlinear Control, 1994, 4(4): 421-448.

(上接第1215页)

- [9] Chair Z, Varshney P K. Optimal data fusion in multiple sensor detection systems [J]. IEEE Trans on AES, 1986, AES-22(1): 98-101.
- [10] Thomopoulos S C A, Viswanathan R, Bougoulas D C. Optimal decision fusion in multiple sensor systems[J]. IEEE Trans on AES, 1987, 23(5): 644-653.
- [11] Mirjalily G, Luo Z Q, Davidson T N, et al. Blind adaptive decision fusion for distributed detection [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 34-52.
- [12] 田森源,陈勇,孙炳楠. 多分辨率损伤检测结果的最大联合概率融合算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(1): 126-133. (Tian S Y, Chen Y, Sun B N. Maximum joint probability fusion rule for multi-resolution decision of structure damage detection [J]. J of Zhejiang University(Engineering Science), 2007, 41(1): 126-133.)