

分布式多传感器检测系统时间序列数据融合算法研究

聂伟 王祁 孙圣和

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系·哈尔滨, 150001)

摘要: 本文在 Chair 和 Varshney 提出的数据融合算法基础上, 提出一种分布式多传感器检测系统按时间序列取多组局部决策数据的数据融合算法及决策规则, 并给出系统性能的仿真计算结果.

关键词: 多传感器数据融合; 假设检验; 分布式决策

Research on Time Sequence Data Fusion Method with Distributed Multisensor Detection System

Nie Wei, Wang Qi and Sun Shenghe

(Department of Automatic Test and Control, Harbin Institute of Technology · Harbin, 150001, P.R. China)

Abstract: In the base of the data fusion algorithm presented by Chair and Varshney, this paper presented a fusion method and decision rule of using multigroup local decision data for each time sequence with distributed multisensor detection system, and gave the results of simulation of system performance.

Key words: multisensor data fusion; hypotheses testing; distributed decision

1 引言(Introduction)

在基本的并联分布式多传感器数据融合方法中, 每个局部检测器在检测周期作出一个关于二元假设 $H \in \{H_0, H_1\}$ 的决策 u_i , 数据融合中心综合各局部检测器的决策得到一个整体决策. Tenney 和 Sandell 最早提出分布网络形式的多传感器检测问题, 将经典 Bayes 检测理论应用到分布式多传感器系统^[1]. 以后 Chair 和 Varshney 提出组合多传感器局部决策的错误概率最小的数据融合算法, 获得了似然比(LR)检验的优化融合规则^[2]. Thomopoulos 采用了 Neyman-Pearson 准则(N-P 检验)来优化分布式多传感器检测系统的数据融合结构^[3]. Sadjadi 和 Polychronopoulos 分别论述了多元假设检验问题, 考虑了用 n 个传感器对 m 个假设的数据融合问题^[4,5]. Baek 等提出 m -ary 数据融合算法^[6].

本文提出一种在时间序列上取多组局部决策数据的数据融合算法, 将不同时间序列上的检测与同一时刻不同传感器的检测结合起来, 充分利用多传感器检测系统的时空数据进一步提高系统的检测性能. 本文给出系统数据融合算法和决策规则, 并对系统性能进行了仿真计算, 结果表明系统的性能优于只采用一组局部决策数据的情况.

2 数据融合原理(Data fusion principle)

系统结构见图 1. 对于 n 个局部传感器考虑二元假设检验问题. 分别用 H_1 和 H_0 表示信源出现检测信号和未出现检测信号的假设, 其先验概率分别为 $P(H_1) = P_1$ 和 $P(H_0) = P_0$. 各局部检测器的工作性能用概率来表示如下:

- 1) 检出概率 $P_{D_{ij}} = P(u_{ij} = +1/H_1)$;
- 2) 虚警概率 $P_{M_{ij}} = P(u_{ij} = +1/H_0)$;
- 3) 漏检概率 $P_{F_{ij}} = P(u_{ij} = -1/H_1)$.

其中 $i, j (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, k)$ 分别表示传感器和每个局部检测器取的决策组.

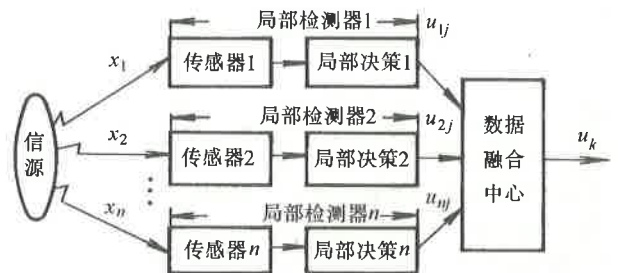


图 1 数据融合系统结构

Fig. 1 The system structure of data fusion

在 Chair 和 Varshney 提出的融合算法中, 在时间序列上对待测信号只取了一组决策数据 ($j = 1$).

为了改善检测性能,应充分利用检测周期内的观测信号.假设每个检测周期各局部检测器传送 k 组局部决策 ($u_i \in \{-1, +1\}_k$) 到融合中心.融合中心根据 n 个检测器的 $n \times k$ 组决策数据,采用最小错误概率准则得出最后的整体决策.因此,决策规则应为在整个局部决策条件下的联合概率密度函数的对数似然比 $\log \Lambda(u_k)$, 即融合中心的决策规则为

$$\log \Lambda(u_k) = \log \frac{P(H_1/u_k)}{P(H_0/u_k)} \Rightarrow \begin{cases} > 0 \Rightarrow H_1, \\ < 0 \Rightarrow H_0. \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$u_k = \{u_{11}, \dots, u_{1k}, u_{21}, \dots, u_{2k}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk}\}.$$

为了实现这个数据融合规则,有如下定理成立:

定理 给定 n 个局部检测器和相应的工作特性,如果各检测器的检测是统计独立的,且两种假设的先验概率分别为 $P(H_1)$ 和 $P(H_0)$, 则有

$$\log \Lambda(u_k) = \log \frac{P(H_1/u_k)}{P(H_0/u_k)} = \log \frac{P_1}{P_0} + \sum_{s+} \log \frac{P_{D_{ij}}}{P_{F_{ij}}} + \sum_{s-} \log \frac{1 - P_{D_{ij}}}{1 - P_{F_{ij}}}. \quad (2)$$

其中, $S+$ 是所有 $u_{ij} = +1$ 的局部决策的集合; $S-$ 是所有 $u_{ij} = -1$ 的局部决策的集合.

证 根据 Bayes 公式

$$P(H_1/u_k) = \frac{P(H_1, u_k)}{P(u_k)} = \frac{P(H_1) \cdot P(u_k/H_1)}{P(u_k)} = \frac{P_1}{P(u_k)} \cdot \prod_{s+} P(u_{ij} = +1/H_1) \prod_{s-} P(u_{ij} = -1/H_1) = \frac{P_1}{P(u_k)} \cdot \prod_{s+} P_{D_{ij}} \cdot \prod_{s-} (1 - P_{D_{ij}}); \quad (3)$$

同理可得

$$P(H_0/u_k) = \frac{P_0}{P(u_k)} \cdot \prod_{s+} P_{F_{ij}} \cdot \prod_{s-} (1 - P_{F_{ij}}); \quad (4)$$

其对数似然比为

$$\log \Lambda(u_k) = \log \frac{P_1}{P_0} + \sum_{s+} \log \frac{P_{D_{ij}}}{P_{F_{ij}}} + \sum_{s-} \log \frac{1 - P_{D_{ij}}}{1 - P_{F_{ij}}}.$$

证毕.

因此数据融合规则可以表达为

$$u_k = F(u_{11}, u_{12}, \dots, u_{nk}) =$$

$$\begin{cases} +1, & \text{if } w_0 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n w_{ij} u_{ij} > 0, \\ -1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} w_0 = \log(P_1/P_0); \\ w_{ij} = \log(P_{D_{ij}}/P_{F_{ij}}), & \text{if } u_{ij} = +1; \\ w_{ij} = \log[(1 - P_{F_{ij}})/(1 - P_{D_{ij}})], & \text{if } u_{ij} = -1. \end{cases} \quad (6)$$

3 系统性能(System performance)

根据虚警概率和检出概率的定义,系统的检出概率和虚警概率可以写成如下形式:

$$P_D^f = P(u_k = +1/H_1) = \sum_{u_{11}} \dots \sum_{u_{nk}} P(u_k = +1/u_{11}, \dots, u_{1k}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk}) \cdot \prod_{j=1}^k \prod_{i=1}^n P(u_{ij}/H_1) = \sum_{u_{11}} \dots \sum_{u_{nk}} F(u_{11}, \dots, u_{1k}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk}) \cdot \prod_{s+} P_{D_{ij}} \cdot \prod_{s-} (1 - P_{D_{ij}}), \quad (7)$$

$$P_F^f = P(u_k = +1/H_0) = \sum_{u_{11}} \dots \sum_{u_{nk}} F(u_{11}, \dots, u_{1k}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk}) \cdot \prod_{s+} P_{F_{ij}} \cdot \prod_{s-} (1 - P_{F_{ij}}). \quad (8)$$

式中 $u_k = \{u_{11}, \dots, u_{1k}, \dots, u_{n1}, \dots, u_{nk}\}$ 表示各种 u_{ij} 的组合.

下面给出系统性能的仿真计算结果(为简化起见,计算中取 $k = 1$ 到 3).

设各局部检测器的特性不同,但各组数据决策都有相同的检出概率和虚警概率,且各种假设的先验概率相等,即

$$P_{F_{ij}} = P_{F_{it}} = P_{F_i}, \quad P_{D_{ij}} = P_{D_{it}} = P_{D_i}, \\ P_1 = P_0, \quad j \neq t.$$

计算出 $n = 3$ 到 $n = 8$ 六种情况下系统总的虚警概率和检出概率如表 1 和表 2.

表 1 各局部检测器的虚警概率和检出概率

Table 1 The probability of false alarm and detection for each sensor

n	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{F_{ij}}$	0.2	0.18	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06
$P_{D_{ij}}$	0.7	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85

表 2 系统总的虚警概率和检出概率(off 表示关闭的检测器)

Table 2 The probability of false alarm and detection for system

n	3(4,5,6,7,8 off)	4(5,6,7,8 off)	5(6,7,8 off)	6(7,8 off)	7(8 off)	8
$P_f^l(k=1)$	0.085280	0.136195	0.051298	0.042643	0.021607	0.012309
$P_f^l(k=2)$	0.075650	0.032487	0.014263	0.006742	0.002683	0.000863
$P_f^l(k=3)$	0.049656	0.010696	0.004711	0.001389	0.000538	0.000146
$P_D^l(k=1)$	0.817000	0.959567	0.918407	0.963750	0.971834	0.986236
$P_D^l(k=2)$	0.948944	0.966774	0.981587	0.992104	0.997035	0.999060
$P_D^l(k=3)$	0.974705	0.983882	0.995444	0.998528	0.999182	0.999737

从表 2 的计算数据可以看出,系统的性能优于只采用一组局部决策数据的情况,其代价是计算量增加.但由于数据融合中心处理的是二值决策数据,所以计算量和计算速度一般能满足实时性要求,实际应用时可根据具体情况综合考虑选取 n 和 k 的值.

4 结束语(Conclusion)

本文导出了由 n 个局部检测器组成的检测系统在检测周期中取多组局部决策的数据融合算法.它将 Chair 和 Varsheny 提出的数据融合算法进行了扩展,充分利用了信号的能量,与传统的检测方法结合起来,在不增加传感器数量的情况下进一步提高了系统的工作性能.

参考文献(References)

- 1 Tenny R R and Sandell N R. Detection with distributed sensors. IEEE Trans. Aerospace, Electronic System, 1981, 17(4): 501 - 509
- 2 Chair I and Varsheny P K. Optimal data fusion in multiple sensor detection systems. IEEE Trans. Aerospace, Electronic System, 1986, 22(1): 98

- 101

- 3 Thomopoulos S C A, Viswanathan R and Bougoulas D C. Optimal decision fusion in multiple sensor systems. IEEE Trans. Aerospace, Electronic System, 1987, 23(5): 644 - 653
- 4 Sadjadi F A. Hypotheses testing in a distributed environment. IEEE Trans. Aerospace, Electronic System, 1986, 22(2): 134 - 137
- 5 Polychronopoulos G and Tsitsiklis N. Explicit solutions for some simple decentralized detection problems. IEEE Trans. Aerospace, Electronic System, 1991, 26(2): 282 - 292
- 6 Baek W and Bommareddy S. Optimal m-ary data fusion with distributed sensors. IEEE Trans. Aerospace, Electronic System, 1995, 31(3): 1150 - 1152

本文作者简介

聂伟 1960 年生. 1984 年毕业于长春邮电学院无线电工程系, 获学士学位. 1995 年于太原工业大学计算机应用专业获硕士学位. 现在哈尔滨工业大学自动化测试与控制系攻读博士学位. 主要从事智能测试理论与技术, 传感器信息处理的研究工作.

王祁 1944 年生. 教授. 研究领域为智能测试理论与技术, 传感器信息处理.

孙圣和 1937 年生. 教授, 博士生导师. 研究领域为电子测量与仪器, 信号处理与系统辨识.