

DOI: 10.7652/xjtuxb201308002

考虑可信度评价的多传感器一致性鲁棒测度方法

司刚全, 张寅松, 赵为犁
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对多传感器一致性测度的研究多集中于对某一时刻多传感器观测结果的判断, 并未考虑时间序列的影响, 导致某一时刻的一致性测度结果并不可信的问题, 在传统的一致性测度基础上, 采用一致性测度结果队列的中值作为测度结果的鲁棒估计, 采用一致性测度结果队列的方差描述测度结果的稳定性, 实现对一致性测度结果进行可信度评价, 从而获得对传感器观测结果可靠性更好、可信度更高的评估。仿真实验表明, 通过对多传感器观测数据的一致性测度结果进行可信度加权, 可以显著提高一致性测度的鲁棒性, 可以消除由于传感器性能不稳定带来的影响, 有效识别出性能不稳定的传感器并将其剔除, 为数据融合提供一致性传感器组。

关键词: 一致性测度; 可信度评价; 数据融合

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)08-0007-05

Confidence Evaluation Based Consistency Measure Method for Multi-Sensor

SI Gangquan, ZHANG Yinsong, ZHAO Weili

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The research on multi-sensor consistency measure usually focuses on the judgment from multi-sensor observations at a specified moment without considering the influence of time series, which leads to an incredible consistency measure result. Following the traditional consistency measure methods, a new method with higher reliability and better accuracy for sensor observations is proposed. The mid-value in the queue of consistency measure results is regarded as the robust estimate, and the variance in the queue is used to describe the stability of the consistency measure result to process confidence evaluation on consistency measure result. Simulations show that the proposed method is able to significantly improve the robustness of consistency measure results and eliminate the effects of unstable sensor performance by credibility weighting of the multi-sensor observation data, thus to provide the consistency sensor group for fusion estimation.

Keywords: consistency measure; confidence evaluation; data fusion

数据融合首先要对传感器的观测数据进行一致性检验, 剔除无效的观测数据, 从而得到精确度更高、可靠性更好的结果。为此, 国内外很多学者对一致性测度的方法进行了深入研究, 文献[1]通过置信概率距离衡量传感器测量数据之间的距离, 在此基

础上构造多传感器测量数据之间的距离矩阵和关系矩阵, 利用有向图获得一致传感器组。文献[2]运用指数衰减函数度量传感器间观测信息的一致性, 同时采用累计其他传感器支持度来代替固定阈值的方式, 获得一致关联阵, 文献[3]则进一步定义了信任

收稿日期: 2013-02-25。 作者简介: 司刚全(1980—), 男, 副教授。 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目; 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2010JM8016)。

网络出版时间: 2013-04-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130422.0925.002.html>

度函数用于度量一致性。此外,基于统计原理发展了多种用于一致性测度的新方法^[4-6],如文献[4]提出将统计距离最小的两个传感器作为一致性传感器,然后进行序贯融合直到搜索不到满足条件的传感器为止。文献[5]基于肖维涅统计判决思想建立一致测度算子,通过设定固定的阈值获得一致关联阵,采用有向图方法获得一致传感器组;文献[6]在Hampel粗差鉴别基础上,提出一种新的一致性测度算子,综合考虑传感器之间的互支持度和自支持度,综合后得到传感器观测结果的一致性测度信息。为了改善阈值点难以选取及存在模糊性的问题,文献[7]提出利用阈值区间判断传感器之间的支持程度,确立正确的关系矩阵。文献[8]将多传感器测量值视为模糊集合,利用模糊集合中的最大、最小贴近度来衡量各传感器观测结果的相近程度,然后基于信噪比获得一致性测度。文献[9]利用多传感器状态估计向量的标称化差定义相似度,用空间信息形成一致性测度,用时间信息形成可靠性测度,相比单一的一致性测度结果更加可信,从而为融合估计提供一致性传感器组。

目前,针对多传感器一致性测度的研究多集中于对某一时刻多传感器观测结果的判断,并未考虑时间序列的影响,也即传感器可能存在性能不稳定的现象,导致某一时刻的一致性测度结果并不可信。因此,还需要对一致性测度的可靠性和可信度进行评估。本文在前期工作^[6]的基础上,研究基于可信度评价的多传感器一致性鲁棒测度方法,为数据融合提供更加可信和可靠的一致性传感器组。

1 基于可信度评价的一致性鲁棒测度

在前期工作^[6]中,根据Hampel粗差鉴别思想,分别定义了传感器的自支持度和互支持度,综合后获得一致支持度算子 d_{ij} ,则传感器 i 的观测值与传感器组中其他 $(n-1)$ 个传感器观测值的一致性度量为

$$R_i(k) = \sum_{j=1, j \neq i}^N d_{ij}(k) / (n-1) \quad (1)$$

式中: $0 \leq R_i(k) \leq 1$ 。 $R_i(k)$ 值越高,表明传感器 i 的测量数据越接近其他传感器观测结果,即一致性越好。该一致性测度方法可有效避免多个传感器均严重偏离真实值时出现误判的情况发生^[6]。

在实际应用中,虽然在某个观测时刻 k 传感器 i 的测量结果一致性度量 $R_i(k)$ 的可信度较高,但由于是单次观测结果,因此其一致性度量结果的可信度仍不能确定。例如, $R_i(k)$ 值在某个时刻很大,但

下一个时刻又很小,说明传感器测量结果的可靠性差,所获得的一致性度量结果可信度也较低。因此,还需要衡量传感器一致性度量结果的可信度。一般可通过在过去一段时间内的一致性度量结果大小及稳定性综合判定。

设传感器 i 的一致性度量结果数据队列为 $\{R_i(k-L_R+1), R_i(k-L_R+2), \dots, R_i(k)\}$,队列为传感器 i 的 L_R 个最新一致性度量结果,每产生一个新的一致性度量结果,则从队尾删除一个结果,如此则保持队列中始终为最近时间内的度量结果。本文采用一致性度量结果队列的中值作为一致性度量结果的鲁棒估计,采用一致性度量结果队列的方差描述一致性度量结果的稳定性

$$\hat{R}_i(k) = \text{median}\{R_i(k-L_R+1), R_i(k-L_R+2), \dots, R_i(k)\} \quad (2)$$

$$v_i(k) = \frac{1}{L_R} \sum_{t=1}^{L_R} (R_i(t) - \hat{R}_i(k))^2 \quad (3)$$

定义1 传感器 i 一致性度量结果的可信度评价为

$$c_{e_i}(k) = \exp\left(-\frac{v_i(k)}{\hat{R}_i(k)^2}\right) \quad (4)$$

从该定义中可以看出 $0 < c_{e_i} < 1$,可信度评价结果 $c_{e_i}(k)$ 随 $\frac{v_i(k)}{\hat{R}_i(k)^2}$ 的增大呈指数规律衰减,即一致性度量结果越小、方差越大,则可信度评价结果也越低;反之,一致性度量结果越大、方差越小,则可信度评价结果也越高。可信度评价结果越高,表明传感器 i 的一致性度量结果 $R_i(k)$ 的可信度越高。

定义2 传感器 i 基于可信度评价的一致性鲁棒测度为

$$R_{c_i}(k) = c_{e_i}(k) R_i(k) \quad (5)$$

显然有 $0 \leq R_{c_i}(k) < 1$,经过可信度评价加权后,一致性度量 $R_{c_i}(k)$ 结果综合了最近一段时间内被其他传感器的支持情况,这样就能够有效避免发生不稳定传感器的观测值在融合结果中具有较大权值的情况。

设定一致性测度阈值 β ,选择 $R_c(k) \geq \beta$ 的传感器作为有效传感器,即可获得一致传感器组。最优融合估计算法对一致传感器组的观测值进行融合,从而获得最佳观测结果。

算法:基于可信度评价的传感器一致性鲁棒测度算法。

输入:一致性度量数据队列长度 L_R ;一致性测度阈值 β ;传感器组的观测值序列 $y_1, y_2, \dots, y_N$ 。

输出:一致性传感器组 SenGrou_Cons。

步骤 1:计算传感器 $i(i=1,2,\cdots,N)$ 的自支持度 $\pi_i(k)$ 。

步骤 2:计算传感器 i 与 $j(i,j=1,2,\cdots,N;i\neq j)$ 的互支持度 $\pi_{ij}(k)$ 。

步骤 3:计算传感器 i 与 $j(i,j=1,2,\cdots,N)$ 的一致支持度,获得一致支持度矩阵 $S_d(k)$ 。

步骤 4:计算传感器 $i(i=1,2,\cdots,N)$ 在 k 时刻的一致性度量结果 $R_i(k)$ 。

步骤 5:从最近的 L_R 个一致性度量结果序列中,获得一致性度量结果的鲁棒估计 $\hat{R}_i(k)$ 和方差 $v_i(k)$,根据式(4)计算 k 时刻一致性度量结果的可信度 $c_{e_i}(k)$ 。

步骤 6:根据式(5)获得传感器 $i(i=1,2,\cdots,N)$ 的基于可信度评价的一致性度量结果 $R_{c_i}(k)$ 。

步骤 7:选择 $R_{c_i}(k)\geq\beta,(i=1,2,\cdots,N)$ 的传感器作为有效传感器,组成一致传感器组 SenGrou_Cons。

2 融合估计仿真实证

为了评估本文提出的基于可信度评价的一致性鲁棒测度算法性能,假设有 8 个传感器对同一信号(由 sin 函数产生)进行测量,传感器的输出为真实信号与高斯白噪声的叠加,即

$$y = y_0 + 10\sin(t) + \epsilon \tag{6}$$

式中: ϵ 为高斯白噪声。前 7 个传感器的测量噪声均值为 0,标准差分别为 1.5、2、1、1、2.5、0.3 和 0.8;第 8 个传感器的测量噪声分为以下两种情况。

(1)噪声方差变化实例:噪声方差随观测时间发生变化,此时传感器的噪声标准差 $\sigma_s=y/6$,系统偏差 $y_0=0$,用于模拟实际工业中由于环境噪声变化导致传感器发生失效的情况。

(2)系统偏差变化实例:系统偏差随观测时间发生变化,此时传感器 8 的噪声标准差为 0.6,系统偏差 $y_0=y/5$,用于模拟实际工业中由于系统偏差导致传感器失效的情况。

在仿真过程中,每个传感器采样为 1 000 个。在每个采样时刻,首先对所有传感器的观测结果采用基于可信度评价的一致性度量确定一致性传感器组,然后采用线性无偏最小方差估计算法进行融合,获得最终测量结果。在传感器一致性度量过程中,统一采用 MAD 算子^[6],并选择可信度评价过程中的一致性度量队列长度 $L_R=50$ 。

图 1 给出了噪声方差变化实例的传感器 8 观测结果,从图中可以看出,传感器 8 的观测误差随采样

时间会发生变化,在 sin 函数的波峰和波谷处具有较大的观测误差,而在过零点具有较小的观测误差。各传感器观测结果一致性度量的可信度评价结果如图 2 所示。由于传感器 5 具有最大的噪声方差,因此其具有最低的一致性测度结果且扰动较大,所以其可信度评价结果一直较低;传感器 6 具有最小的噪声方差,因此其具有稳定的较高的一致性测度结果,所以其可信度评价结果维持在较高水平,见图 2b。对于传感器 8,由于其噪声方差的时变性,导致一致性测度结果不断发生变化,因此其可信度也随之改变。从图 2 中可以看出,当传感器 8 的噪声方差较小时,具有较高的可信度评价结果;当噪声方差变大时,可信度评价结果也随之变差。同时,由于传感器 8 噪声方差的变化,也会对其他传感器的一致

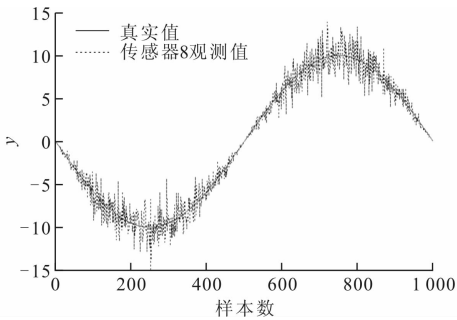
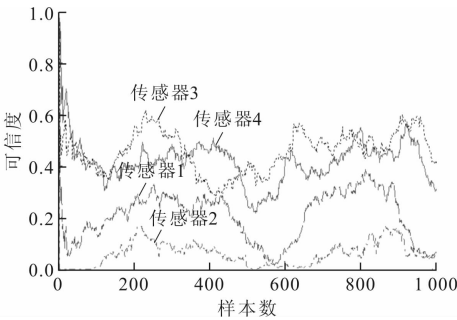
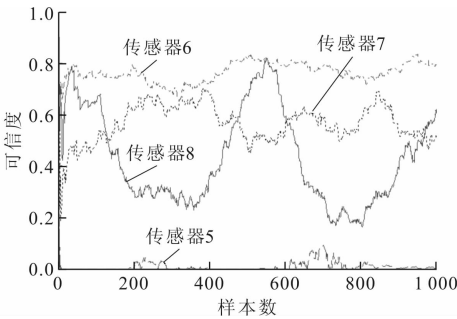


图 1 噪声方差变化时传感器 8 的观测结果



(a)传感器 1~传感器 4



(b)传感器 5~传感器 8

图 2 噪声方差变化时各传感器的一致性度量可信度评价结果

性度量结果及可信度评价结果产生影响。图 3 和图 4 给出了融合后的观测结果和误差,从中可以看出,经过基于可信度评价的一致性度量后,能够根据传感器性能的变化将无效传感器观测结果剔除,从而确保融合估计结果的准确性。

著提高。采用融合估计后传感器的观测结果及误差如图 7 和图 8 所示,最终融合结果较好地剔除了传感器 8 在系统误差较大时的影响,在整个观测过程都能具有较高的精度。

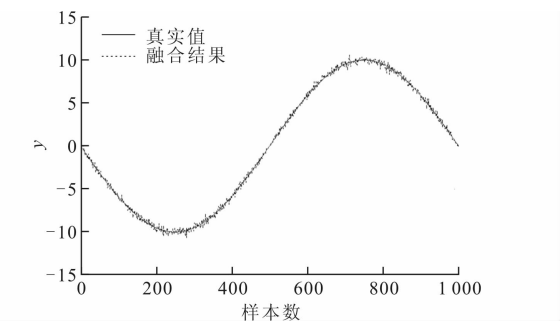
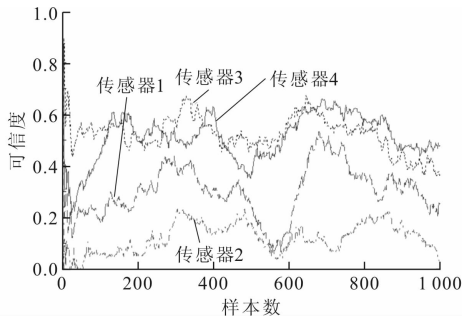


图 3 噪声方差变化时传感器的融合结果



(a)传感器 1~传感器 4

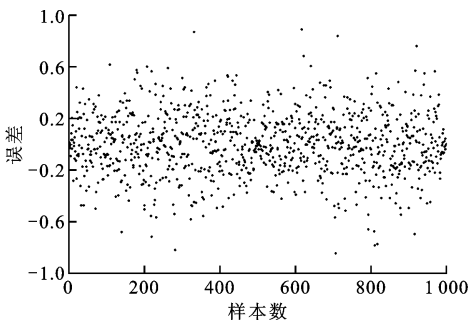
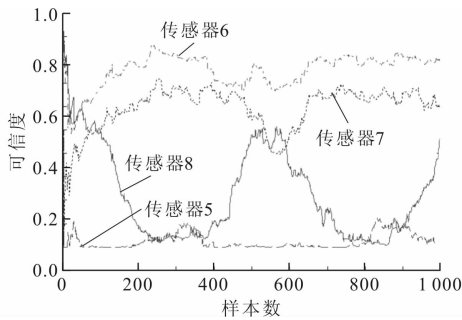


图 4 噪声方差变化时传感器的融合误差



(b)传感器 5~传感器 8

图 6 系统偏差变化时传感器的一致性度量可信度评价

同样,本文对系统偏差发生变化的实例进行了分析。图 5 给出了系统偏差变化实例的传感器 8 观测结果,在 $\sin$ 函数的波峰和波谷处具有较大的系统偏差,而在过零点处具有较小的系统偏差。图 6 是各传感器观测结果一致性度量的可信度评价结果,由于传感器观测结果中系统偏差的影响,导致在具有较大系统偏差时,传感器 8 的一致性测度结果和可信度评价结果都较低;在具有较小系统偏差时,传感器的一致性测度结果和可信度评价结果都有显

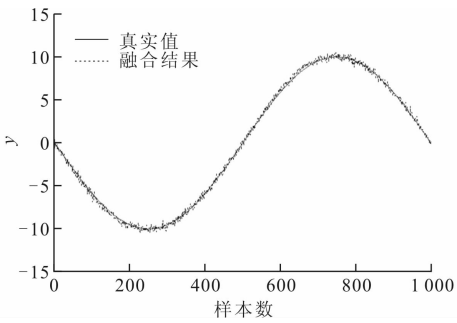


图 7 系统偏差变化时传感器的融合结果

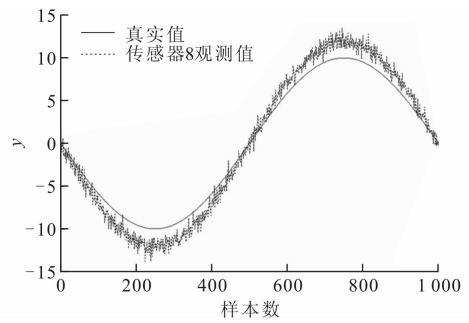


图 5 系统偏差变化时传感器 8 的观测结果

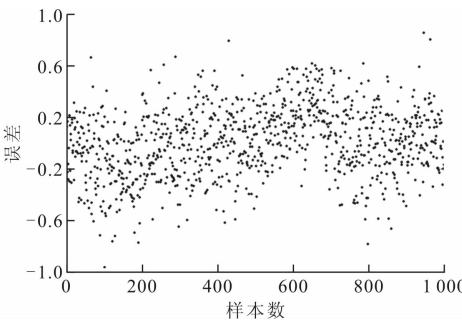


图 8 系统偏差变化时传感器的融合误差

3 结 论

传感器在实际应用中因为受到各种因素的影响,其性能可能产生较大变化,从而导致其观测结果具有不稳定性。对数据融合中的多传感器观测数据仅通过单次一致性测度,其结果未必可信,必须对一致性测度进行可信度评价,才能获得更加可信和可靠的一致性传感器组。本文通过对多传感器观测数据的一致性测度结果进行可信度加权,可以显著提高一致性测度的鲁棒性,消除由于传感器性能不稳定带来的影响。仿真实验表明,该方法能够改善一致性测度方法的不足,准确剔除失效传感器的观测结果,得到更加准确和可信的估计结果。

参考文献:

- [1] LUO R C, LIN M H. Dynamic multi-sensor data fusion system for intelligent robots [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988,4(4):386-396.
- [2] 孙勇,景博. 基于支持度的多传感器一致可靠性融合 [J]. 传感技术学报, 2005,18(3):537-539.
SUN Yong, JING Bo. Consistent and reliable fusion of multi-sensor based on support degree [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005,18(3):537-539.
- [3] 焦竹青,熊伟丽,张林,等. 基于信任度的多传感器数据融合及其应用 [J]. 东南大学学报:自然科学版, 2008,38(S1):253-257.
JIAO Zhuqing, XIONG Weili, ZHANG Lin, et al. Multi-sensor data fusion method based on belief degree and its applications [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008,38(S1):253-257.
- [4] 罗本成,原魁,陈晋龙,等. 一种基于不确定分析的多传感器信息动态融合方法 [J]. 自动化学报, 2004,30(3):407-415.
LUO Bencheng, YUAN Kui, CHEN Jinlong, et al. Uncertainty analysis based dynamic multi-sensor data fusion [J]. Automatica Sinica, 2004,30(3):407-415.
- [5] 段战胜,韩崇昭,陶唐飞. 基于最近统计距离的多传感器一致性数据融合 [J]. 仪器仪表学报, 2005,26(5):478-481.
DUAN Zhansheng, HAN Chongzhao, TAO Tangfei. Consistent multi-sensor data fusion based on nearest statistical distance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005,26(5):478-481.
- [6] 司刚全,张寅松,娄勇. 考虑自支持度和互支持度的多传感器一致性测度算子 [J]. 西安交通大学学报, 2012,46(10):20-23,35.

SI Gangquan, ZHANG Yinsong, LOU Yong. Measuring operator considering self-support and mutual-support for estimating consistency of multi-sensor observations [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012,46(10):20-23,35.

- [7] 王丽,杨全胜. 多传感器数据融合的一种方法 [J]. 计算机技术与发展, 2008,18(2):80-87.
WANG Li, YANG Quansheng. A method for data fusion of multi-sensor [J]. Computer Technology and Development, 2008,18(2):80-87.
- [8] 万树平. 基于信噪比的多传感器数据融合方法 [J]. 传感技术学报, 2008,21(1):178-181.
WAN Shuping. Method based on the ratio of signal to noise for multi-sensor data fusion [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008,21(1):178-181.
- [9] 刘敏华,萧德云. 基于相似度的多传感器数据融合 [J]. 控制与决策, 2004,19(5):534-537.
LIU Minhua, XIAO Deyun. Multi-sensor data fusion based on similitude degree [J]. Control and Decision, 2004,19(5):534-537.

[本刊相关文献链接]

- 伍宗伟,姚敏立,马红光,等. 移动卫星通信低成本多传感器融合姿态估计方法. 2012, 46(12):55-61. [doi:10.7652/xjtuxb201212010]
- 司刚全,张寅松,娄勇. 考虑自支持度和互支持度的多传感器一致性测度算子. 2012, 46(10):20-23. [doi:10.7652/xjtuxb201210004]
- 贺国,王豪,史日安. 一种船用超声液位传感器的优化设计模型. 2012, 46(5):44-49. [doi:10.7652/xjtuxb201205 008]
- 张平,张小栋,刘春翔. 双圈同轴式光纤位移传感器的输出特性. 2012, 46(3):27-30. [doi:10.7652/xjtuxb201203 005]
- 赵煦,孟永鹏,成永红,等. 变压器现场超高频局部放电信号的时域特征分析. 2011, 45(12):82-86. [doi:10.7652/xjtuxb201112015]
- 邢文奇,胡红利,董军. 采用互相关与自适应滤波算法测量流速的比较研究. 2011, 45(6):111-115. [doi:10.7652/xjtuxb201106020]
- 张维光,赵宏. 线结构光多传感器三维测量系统误差校正方法. 2011, 45(6):75-80. [doi:10.7652/xjtuxb201106014]
- 李彬,王文杰,殷勤业,等. 一种利用天线旋转的无线传感器网络定位算法. 2011, 45(4):60-66. [doi:10.7652/xjtuxb201104011]
- 李继胜,李军浩,罗勇芬,等. 用于电力变压器局部放电定位的超声波相控阵传感器的研制. 2011, 45(4):93-99. [doi:10.7652/xjtuxb201104017]

(编辑 杜秀杰)