

文章编号: 1001-0920(2006)06-0714-03

基于相关性函数和最小二乘的多传感器数据融合

刘建书, 李人厚, 常宏

(西安交通大学 系统工程研究所, 西安 710049)

摘要: 针对目前传感器数据融合过程中, 各传感器的可靠度估计困难和测量数据融合结果精度较低的问题, 利用模糊理论中的相关性函数, 提出了多传感器的相互支持程度计算的新方法, 并基于最小二乘原理, 对支持程度高的传感器数据进行融合。该方法计算简单, 能客观地反映各传感器的可靠程度, 不需要知道数据的先验信息。仿真结果表明, 相比同类融合方法, 该方法获得的结果具有更高的精度。

关键词: 多传感器; 相关性函数; 最小二乘原理; 数据融合

中图分类号: TP274.2 **文献标识码:** A

Multi-sensor Data Fusion Based on Correlation Function and Least Square

L I U J ian-shu, L I R en-hou, C H A N G H ong

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

Abstract: For the difficulty of determining the reliability degree of each sensor and low precision of the fusion result of measurement data, a new method of calculating the mutual support degree of multi-sensors is proposed. The correlation function in fuzzy theory is adopted in the method to fuse data of sensors with high support degree based on the principle of least square. The method needs less calculation and can objectively reflect the reliability degree of each sensor. The prior information about measurement data can be unknown. Simulation shows that the fusion results have higher precision compared with other methods.

Key words: Multi-sensor; Correlation function; Principle of least squares; Data fusion

1 引言

多传感器数据融合, 是将来自多个传感器的数据进行综合处理。与只利用单一传感器进行测量获得的结果相比, 它可以更精确地估计出被测参数的值^[1]。在自动化系统中或在科学实验中, 需用多个传感器在不同的方位对同一参数进行测定。自动化系统的处理能力和实验结论的可靠程度都与数据的测定情况密切相关。但由于传感器所处的方位不同和传感器自身质量的差异, 以及一些无法控制的随机因素的作用, 在实际中各传感器所测定的参数值必存有偏差。这样就存在如何确定各传感器的可靠程度, 并在对所有测量数据进行全面分析研究之后, 如

何确定对测量数据进行融合的问题。文献[2~4]以置信距离测度作为数据融合的融合度, 通过设定阈值获得关系矩阵以对传感器的有效性进行判断, 在获得最佳融合传感器集合后, 对融合集合中的传感器数据进行融合。通过对该方法的研究, 发现阈值的选取过于绝对化和经验化, 不利于对实际情况作出客观的判别, 进而使融合的结果受主观因素的影响过大。

基于最小二乘原理的数据融合方法, 在处理数据过程中不需要知道数据的先验信息^[5,6]。因而本文利用模糊理论中的相关性函数对多传感器的相互支持程度进行计算, 应用基于最小二乘原理的数据融合方法, 对支持程度高的传感器数据进行融合。该方

收稿日期: 2005-04-07; 修回日期: 2005-08-28

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。

法计算简单, 客观地反映了各传感器的可靠程度, 对测量数据进行融合时不需要其先验信息, 所得融合结果精度高

2 相关性函数

设多个传感器测量同一参数, 第 i 个传感器和第 j 个传感器测得的数据分别为 X_i 和 X_j , X_i 和 X_j 都服从 Gauss 分布, 以它们的 pdf 曲线作为传感器的特性函数, 记成 $p_i(x)$, $p_j(x)$. x_i, x_j 分别为 X_i, X_j 的一次观测值

为反映 x_i 和 x_j 之间的偏差大小, 引进置信距离测度^[2], 设

$$d_{ij} = 2 \int_{x_i}^{x_j} p_i(x | x_i) dx, \quad (1)$$

$$d_{ji} = 2 \int_{x_j}^{x_i} p_j(x | x_j) dx, \quad (2)$$

式中

$$p_i(x | x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_i}{\sigma_i}\right)^2\right\}, \quad (3)$$

$$p_j(x | x_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_j}{\sigma_j}\right)^2\right\}. \quad (4)$$

d_{ij} 的值称为第 i 个传感器与第 j 个传感器读数的置信距离测度, 可以借助误差函数 $\text{erf}(\theta)$ 直接求得^[7,8], 即

$$d_{ij} = \text{erf}\left\{\frac{x_i - x_j}{\sqrt{2}\sigma_i}\right\}, \quad (5)$$

$$d_{ji} = \text{erf}\left\{\frac{x_i - x_j}{\sqrt{2}\sigma_j}\right\}. \quad (6)$$

如果有 n 个传感器测量同一参数, 置信距离测度 d_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 构成多传感器数据的置信距离矩阵

$$D_n = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

一般的融合方法是给出一个融合上限 β_{ij} , 对于 d_{ij} 令

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq \beta_{ij}; \\ 0, & d_{ij} > \beta_{ij}. \end{cases} \quad (8)$$

若 $r_{ij} = 0$, 则认为第 i 个传感器与第 j 个传感器相融性差, 或称它们相互不支持. 若 $r_{ij} = 1$, 则认为第 i 个传感器与第 j 个传感器相融性好, 称第 i 个传感器支持第 j 个传感器. 若 $r_{ij} = r_{ji} = 1$, 称第 i 个传感器与第 j 个传感器相互支持. 如果一个传感器被一组传感器所支持, 这个传感器的读数是有效的. 若一个传感器不被其他传感器所支持, 或只被少数传感器所支持, 则这个传感器的读数是无效的, 在进行数据融

合时应把这样的读数删掉. 这样做的问题是: β_{ij} 的选取过于绝对化和经验化^[2,4], 不利于对实际情况作出客观的判别, 进而使融合的结果受主观因素的影响过大.

针对此问题, 本文采用以下方法:

由 d_{ij} 的运算可知 $0 \leq d_{ij} \leq 1$, 且由其运算公式的统计意义可见, d_{ij} 越小说明第 i 个传感器被第 j 个传感器支持的程度越高. 因此, 由模糊理论中的相关性函数定义^[9] 可令

$$f(i|j) = 1 - d_{ij}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

相关性函数 $f(i|j)$ 的大小表示传感器 i 被传感器 j 支持的程度, 相关性函数定义为

$$f(i|j) = f(i|j) / \max\{f(i|j), f(j|i)\} \quad (10)$$

构造 $f(i|j)$ 的矩阵, 此矩阵为方阵且秩为 n , 记为 C , 这里 $i, j = 1, 2, \dots, n$.

为了确定各个传感器被其他传感器支持的程度, 令

$$C_i = \min\{f(i|A)\}, \quad A = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

C_i 为第 i 个传感器被其他传感器支持的程度.

3 基于最小二乘原理的融合方法^[5,6]

设 n 个传感器对某性能参数的观测方程为

$$Y = Hx + e \quad (12)$$

式中: x 为估计参数, Y 为 n 维测量向量, e 为 n 维测量噪声向量, H 为已知的 n 维常向量, $H = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$. 最小二乘法估计的准则是使误差平方和

$$J_w(x) = (Y - Hx)^T W (Y - Hx)$$

取极小值. 其中 W 是一个正定对角加权阵, $W = \text{diag}(w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n)$. 对 $J_w(x)$ 求偏导, 令

$$\partial_w(x) / \partial x = -H^T(W + W^T)(Y - Hx) = 0,$$

便得到参数 x 的估计量 \hat{x} 的最小二乘估计

$$\hat{x} = (H^T W H)^{-1} H^T W Y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (13)$$

由于测量噪声是传感器内部噪声和环境干扰等多种相互独立因素引起的, 各个传感器的测量噪声为相互独立的白噪声. 利用概率知识可以证明: 多个相互独立的随机变量相加的和接近正态分布^[10], 因此测量噪声的分布也是正态的. 所以有

$$E[e_i] = 0,$$

$$E[e_i^2] = E[(x - y_i)^2] = \sigma_i^2,$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

其中 σ_i^2 为第 i 个传感器的测量方差. 设 \tilde{x} 为估计误差, 则 \tilde{x} 可表示为

$$\tilde{x} = x - \hat{x}. \quad (14)$$

由式(13)和(14)可得估计方差为

$$E[(x - \hat{x})^2] = E\left[\left|x - \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right|^2\right] = E\left[\sum_{i=1}^n \left|\frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right|^2 (x - y_i)^2\right] + E\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \left|\frac{w_i w_j}{\sum_{i=1}^n w_i}\right|^2 (x - y_i)(x - y_j)\right] \quad (15)$$

由于 $e_i, e_j (i \neq j)$ 相互独立, 所以有

$$E[(x - y_i)(x - y_j)] = E(x - y_i) \cdot E(x - y_j) = 0, \quad i \neq j \quad (16)$$

由式(15)和(16)得

$$E[(x - \hat{x})^2] = E\left[\sum_{i=1}^n \left|\frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right|^2 (x - y_i)^2\right] = \sum_{i=1}^n \left|\frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}\right|^2 \sigma_i^2 \quad (17)$$

对式(17)求极小值, 取 w_i 的偏导数, 并令其等于零得

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

式(13)与(18)即为基于最小二乘原理的数据融合方法的计算公式

4 实验结果

在实验中采用文献[2]中的数据, 设用 $n = 10$ 个同类传感器测某特性参数, 测得结果如表1所示.

表1 10个测量数据与方差

传感器序号	1	2	3	4	5
观测值 x_i	1.000	0.990	0.980	0.970	0.500
方差 σ_i^2	0.05	0.07	0.10	0.20	0.30
传感器序号	6	7	8	9	10
观测值 x_i	0.650	1.010	1.020	0.030	1.500
方差 σ_i^2	0.25	0.10	0.10	0.20	0.30

由式(5)~(7)计算得到10个传感器测量数据的置信距离矩阵 D , 由式(9)~(11)计算得到每个传感器被其他传感器支持的程度为

$$C_{10} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.994 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.978 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.943 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.943 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.970 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.943 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.943 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.970 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.970 \end{bmatrix}$$

由 C_{10} 可知, 传感器的支持程度大小依次为 $x_1, x_2, x_7, x_3(x_8), x_4(x_9), x_6, x_5(x_{10})$. 传感器 5, 6, 10 被其他传感器支持的程度分别为 0.070 2, 0.242 9 和 0.070 2, 因此可认为这 3 个传感器的可靠程度不高, 融合时删除其读数, 取其余 7 个传感器的测量数据进行融合, 融合数据集为 $\{x_1^{(1)}, x_2^{(2)}, x_3^{(3)}, x_4^{(4)}, x_7^{(5)}, x_8^{(6)}, x_9^{(7)}\}$.

运用基于最小二乘原理的融合方法对融合数据集中的传感器数据进行融合, 由式(13)和(18)获得参数的最优融合数据为 0.999 4

对于上述 10 个传感器测量值, 单独运用基于最小二乘原理的融合方法, 获得融合数据 0.990 7; 应用文献[11]方法得到融合数据 0.978 5; 应用极大似然法^[2]获得融合数据 0.999 2. 通过比较发现, 应用本文提出的融合方法获得的数据精度明显提高

5 结 语

多传感器对某一参数进行测量时, 因受传感器自身因素和环境的影响, 会有不同的测量结果. 在对测量数据融合时, 确定各传感器的可靠程度及数据融合方法是至关重要的. 本文提出了一种基于相关性函数和最小二乘原理的多传感器数据融合方法. 该方法计算简单, 在融合过程中不需要知道测量数据的先验信息, 融合结果精度高.

参考文献 (References)

- [1] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 1-20.
(Yang W H. *Multisensor Data Fusion with Applications* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 1-20.)
- [2] 陈增福. 多传感器数据融合的数学方法[J]. 数学的实践与认识, 1995, 25(2): 13-16.
(Chen Z F. A Mathematical Method of the Multisensor Data Fusion [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 1995, 25(2): 13-16.)
- [3] 吴小俊, 曹奇英, 陈保香, 等. 基于Bayes估计的多传感器数据融合方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(7): 45-48.
(Wu X J, Cao Q Y, Chen B X, et al. Study on Multisensor Data Fusion Methods Based on Bayes Estimation [J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2000, 20(7): 45-48.)
- [4] 王威, 周军红, 王润生. 多传感器数据融合的一种方法[J]. 传感器技术, 2003, 22(9): 39-41.
(Wang W, Zhou J H, Wang R S. A Method of the Multisensor Data Fusion [J]. *J of Transducer Technology*, 2003, 22(9): 39-41.)

(下转第720页)

- (Liu H P, Sun F C, Li C W, et al. H-two Sub-optimal Control for Fuzzy Time-delay Singularly Perturbed Systems[J]. *Control Theory and Applications*, 2005, 22(1): 86-91.)
- [5] 王宪杰, 高存臣. 线性不确定奇异摄动系统的稳定控制鲁棒界[J]. *控制与决策*, 2003, 18(4): 487-493.
(Wang X J, Gao C C. Robust Bounds of Stable Controllers for Linear Uncertain Singular Perturbation System [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 487-493.)
- [6] 许可康. *控制系统中的奇异摄动*[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
(Xu K K. *Singular Perturbation in Control Systems* [M]. Beijing: Science Press, 1986.)
- [7] Daniel Cobb. On the Solution of Linear Differential Equations with Singular Coefficients [J]. *J of Differential Equations*, 1982, 46(2): 310-323
- [8] Bruce A Francis. Convergence in the Boundary Layer for Singularly Perturbed Equations [J]. *Automatica*, 1982, 18(2): 57-62
- [9] 邹云, 杨成梧. 奇异摄动系统的极限解[J]. *自动化学报*, 1993, 19(3), 356-360.
(Zou Y, Yang C W. On the Interpretations for the Solutions of Differential Equations with Singular Coefficients[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993, 19(3): 356-360.)
- [10] Alexander V igodner. Limits of Singularly Perturbed Control Problems with Statistical Dynamics of Fast Motions[J]. *SIAM J of Control Optimization*, 1997, 35(1): 1-28
- [11] Gelfand J M, Shilov G E. *Generalized Functions* [M]. New York: Academic Press, 1964
- [12] 黄琳. *系统与控制理论中的线性代数*[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
(Huang L. *The Linear Algebra in System and Control Theory* [M]. Beijing: Science Press, 1984.)

(上接第716页)

- [5] 仲崇权, 张立勇, 杨素英, 等. 基于最小二乘原理的多传感器加权融合算法[J]. *仪器仪表学报*, 2003, 24(4): 427-430.
(Zhong C Q, Zhang L Y, Yang S Y, et al. A Weighted Fusion Algorithm of Multisensor Based on the Principle of Least Squares [J]. *Chinese J of Scientific Instrument*, 2003, 24(4): 427-430.)
- [6] 凌林本, 李滋刚, 陈超英, 等. 多传感器数据融合时权的最优分配准则[J]. *中国惯性技术学报*, 2000, 8(2): 36-39.
(Ling L B, Li Z G, Chen C Y, et al. Optimal Weight Distribution Principle Used in the Fusion of Multisensor Data[J]. *J of Chinese Inertial Technology*, 2000, 8(2): 36-39.)
- [7] Fukunaga K, Flick T E. A Test of the Gaussian-ness of a Data Set Using Clustering [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(2): 240-247.
- [8] John M Richardson, Kenneth A March. Fusion of Multisensor Data[J]. *The Int J of Robotics Research*, 1988, 7(6): 78-96
- [9] 钱同惠, 沈其聪, 葛晓滨. *模糊逻辑及其工程应用*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 255-287.
(Qian T H, Shen Q C, Ge X B. *Fuzzy Logic with Engineering Applications* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001: 255-287.)
- [10] 施雨, 李耀武. *概率论与数理统计应用*[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998: 35-50.
(Shi Y, Li Y W. *Probability and Statistics* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998: 35-50.)
- [11] 涂国平. 多传感器数据融合的稳健处理方法[J]. *数据采集与处理*, 1998, 13(1): 85-87.
(Tu G P. A Robust Method for the Data Fusion[J]. *J of Data Acquisition and Processing*, 1998, 13(1): 85-87.)