

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.12.003

改进的 Sage-Husa 算法及其在工业在线检测中的应用

王 宪¹, 谭建平¹, 陈国强¹, 成小乐²

(1. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083; 2. 中国重型机械研究院有限公司, 西安 710032)

摘 要:针对工业在线检测环境复杂多变的特点,在现有方法的基础上,提出了一种改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法。该算法在获得新的观测值后,先通过滤波发散判据判断滤波器状态是否正常,若异常,进一步采用一种一步延时方法判别新的观测值是否为野值,依据判别结果分别采取不同的对策,从而提高 Sage-Husa 算法在工业检测中的性能。将新算法应用于模拟工业环境的激光束中心定位检测,结果表明:新算法能对系统状态做出准确判断,与传统方法相比,滤波精度较高、实用性好、鲁棒性强,能满足工业在线检测的要求。

关键词:计算机视觉;在线监测;噪声;自适应滤波;野值

中图分类号:TG375.9;TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2013)12-016-05

Improved Sage-Husa algorithm and its application in industrial online measurement

WANG Xian¹, TAN Jianping¹, CHENG Guoqiang¹, CHENG Xiaole²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

Abstract: An improved Sage-Husa adaptive filter algorithm is proposed based on the existing methodologies in light of the complex and changing environment of the industrial online measurement. This algorithm, after a new observed value is obtained, first judges whether the filter is in a normal state by the filtering divergence criterion, if not, it judges whether the new observed value is an outlier and takes countermeasures varying with the judgment so as to improve the performance of the Sage-Husa algorithm in industrial measurement. The result indicates that compared with traditional methodologies, this new algorithm is applicable to measure the location of the center point of laser beam in a simulated industrial environment, makes accurate judgment about the system status, features better precision, practicality and robustness and thus can satisfy the requirements of industrial online measurement.

Key words: computer vision; online monitoring; noise; adaptive filter; outlier

近年来,计算机视觉技术发展极为迅速,被大量的应用到工业测试领域。在大型挤压机活动部件五自由度实时监测系统^[1]中,稳定准确的求取激光束

中心是其中一个关键步骤^[2],寻求具有强鲁棒性和高滤波精度的滤波方法是实现这一目标的重要途径。

收稿日期:2013-06-13

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX04005-031);国家重点基础发展计划(2014CB049405)

作者简介:王宪(1982-),男,中南大学博士研究生,主要从事大型设备在线检测理论与技术研究;

谭建平(联系人),男,中南大学教授,博士生导师,(E-mail)jptan@163.com。

卡尔曼滤波算法是线性高斯系统的最优滤波器^[3-6],它具有完备的理论基础和简便的算法,在计算机视觉领域有着广泛的应用^[7]。标准的卡尔曼滤波鲁棒性差,滤波精度取决于能否建立系统精确的数学模型和获得噪声的准确统计特性^[8],在工业在线检测中,这些通常难以做到,需采用自适应滤波来代替常规卡尔曼滤波。目前常用的自适应滤波方法有强跟踪卡尔曼滤波、基于极大似然准则的自适应卡尔曼滤波、Sage-Husa 自适应卡尔曼滤波等^[9-11]。强跟踪滤波器采用多重渐消因子削弱以往数据对模型误差的影响,提高了算法准确跟踪状态突变的能力;基于极大似然准则的自适应滤波器从系统量测量出现概率最大的角度利用滤波过程中获取的残差对系统过程噪声和观测噪声进行实时的估计和调整,从而提高滤波算法的精确度和鲁棒性;Sage-Husa 自适应卡尔曼滤波也是一种在线估计过程噪声和观测噪声滤波算法,相对于基于极大似然准则的自适应滤波而言,改进在于引入了遗忘因子,进而增加了较新的观测值的权重,相应减小了较陈旧数据对参数估计的影响。这些算法中,Sage-Husa 自适应卡尔曼滤波实用性较强,在工程实际中最为常用,但因为计算量较大,用于工业在线检测时,无法保证系统的实时性。文献^[12]提到了一种简化的 Sage-Husa 算法,该算法假设过程噪声和观测噪声均是无偏的,且只对观测噪声进行在线估计,该算法在保证滤波精度的前提下减少了计算量,但仍需每次滤波都对噪声进行重新估计,也没有考虑野值的判定和处理,仍不能满足工业在线检测的要求。

针对上述问题,文中在国内外相关研究的基础上^[13-15],对简化的 Sage-Husa 算法进行了进一步改进,该方法先对检测环境是否发生变化和新的观测值是否为野值做出判断,并分别采取不同的对策,且不需要每次都对观测噪声进行估计,算法的精度、鲁棒性和实用性比简化的 Sage-Husa 波算法更高,能满足工业在线检测的要求。

1 Sage-Husa 算法及其简化

由卡尔曼滤波原理可知,线性离散系统的状态转移方程和观测方程分别为

$$\mathbf{X}(k) = \Phi(k, k-1)\mathbf{X}(k-1) + \Gamma(k, k-1)\mathbf{W}(k-1), \quad (1)$$

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k), \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}(k)$ 为系统状态向量; $\mathbf{Z}(k)$ 为观测向量; $\Phi(k, k-1)$ 为系统状态转移矩阵; $\Gamma(k, k-1)$ 为系统噪声

矩阵; $\mathbf{W}(k)$ 为过程噪声向量; $\mathbf{V}(k)$ 为观测噪声向量。线性高斯系统的过程噪声 $\mathbf{W}(k)$ 和观测噪声 $\mathbf{V}(k)$ 可处理成具有时变均值和时变协方差阵的不相关高斯随机过程,即

$$E(\mathbf{W}(k)) = \mathbf{q}(k), \quad (3)$$

$$E\{[\mathbf{W}(k) - \mathbf{q}(k)][\mathbf{W}(j) - \mathbf{q}(j)]^T\} = \mathbf{Q}(k)\delta_{kj}, \quad (4)$$

$$E(\mathbf{V}(k)) = \mathbf{r}(k), \quad (5)$$

$$E\{[\mathbf{V}(k) - \mathbf{r}(k)][\mathbf{V}(j) - \mathbf{r}(j)]^T\} = \mathbf{R}(k)\delta_{kj}, \quad (6)$$

式中 δ_{kj} 为克罗内克函数。Sage-Husa 自适应滤波算法是在噪声均值 $\mathbf{q}(k)$ 、 $\mathbf{r}(k)$ 协方差阵 $\mathbf{Q}(k)$ 、 $\mathbf{R}(k)$ 都未知的情况下,基于观测值来求取噪声统计特性的卡尔曼滤波器。标准的 Sage-Husa 算法由于计算较繁琐,实际应用过程中,观测噪声协方差 $\mathbf{R}(k)$ 滤波的影响更重要一些,通常可只认为 $\mathbf{R}(k)$ 为未知,且假设过程噪声和观测噪声均是无偏的,则 Sage-Husa 算法可简化为

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{X}(k | k-1) + \mathbf{K}(k)\mathbf{v}(k), \quad (7)$$

$$\mathbf{X}(k | k-1) = \Phi(k, k-1)\mathbf{X}(k-1), \quad (8)$$

$$\mathbf{v}(k) = \mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k | k-1), \quad (9)$$

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{p}(k | k-1)\mathbf{H}^T(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{p}(k | k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1}, \quad (10)$$

$$\mathbf{p}(k | k-1) = \Phi(k | k-1)\mathbf{p}(k-1)\Phi^T(k, k-1) + \Gamma(k, k-1)\mathbf{Q}(k-1)\Gamma^T(k, k-1) \quad (11)$$

$$\mathbf{p}(k) = [1 - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{p}(k | k-1)[1 - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}(k)]^T + \mathbf{K}(k)\mathbf{R}(k-1)\mathbf{K}^T(k), \quad (12)$$

$$\mathbf{R}(k) = (1 - d_k)\mathbf{R}(k-1) + d_k\{[1 - \mathbf{H}(k)\mathbf{K}(k-1)]\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(k)[1 - \mathbf{H}(k)\mathbf{K}(k-1)]^T + \mathbf{H}(k)\mathbf{p}(k-1)\mathbf{H}^T(k)\}. \quad (13)$$

式(13)即观测噪声估计方程,其中 $d_k = (1-b)/(1-b^{k+1})$, b 为遗忘因子,取值范围通常为 $[0.95, 0.99]$ 。

2 简化 Sage-Husa 算法的改进

简化的 Sage-Husa 自适应滤波算法能在系统数学模型和噪声的统计特性不够精确的情况下达到较好的滤波效果,但是将其应用于工业环境下激光束中心定位时仍然存在明显的不足:简化的算法仍然需要每次对观测噪声协方差进行计算,降低了算法的实用性;对于工业环境下的在线检测,原始检测数据通常存在一定比例的野值,在使用自适应滤波算法时,如果不进行甄别,并将野值排除于滤波记忆之外,则反而可能造成滤波结果不稳定以及精度下降。

针对这些问题,引入一种改进的 Sage-Husa 算法,该方法先通过滤波发散判据对检测环境是否发生变化和新的观测值是否为野值做出判断,并分别采取不同的对策,从而提高算法的实用性、鲁棒性和精度。

2.1 滤波异常判断

滤波状态可通过实际余项与理论余项是否相符来判断,滤波发散判据为^[16]

$$\mathbf{v}^T(k)\mathbf{v}(k) > \gamma \text{tr}[E(\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(k))], \quad (14)$$

式中: γ 为储备系数, $\gamma > 1$; tr 为矩阵的迹; $\mathbf{v}(k)$ 即 kalman 滤波器的新息向量。

由 kalman 滤波原理有

$$E(\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(k)) = \mathbf{H}(k)\mathbf{p}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k), \quad (15)$$

把式(15)带入式(14),滤波发散判据变为

$$\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(k) > \gamma \text{tr}[\mathbf{H}(k)\mathbf{p}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)], \quad (16)$$

其中, $\mathbf{v}(k)$ 在为获得一个新的观测向量后,按照式(9)计算。这样,滤波器工作是否正常可叙为以下假设检验问题

$$\mathbf{H}_0: \mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(k) < \gamma \text{tr}[\mathbf{H}(k)\mathbf{p}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)];$$

$$\mathbf{H}_1: \mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(k) \geq \gamma \text{tr}[\mathbf{H}(k)\mathbf{p}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)].$$

当 \mathbf{H}_0 成立时,则说明滤波器工作正常,可让滤波器继续工作,而当 \mathbf{H}_1 成立时则说明滤波器工作异常,需要进一步判断。

2.2 测量野值判断

前面已对滤波器工作是否正常做出了判断,而若滤波器工作异常,则还存在两种可能:新的观测值为野值;观测环境已经发生了变化,需对观测噪声 $\mathbf{R}(k)$ 进行重新估算。

由随机过程相关性理论可知,平稳自相关随机序列的每一步的取值虽然是随机的,但它的取值范围受限于自身序列的自相关性。基于这一原理,研究的方法在判定滤波器工作异常的情况下,通过一次延时判定来确定滤波异常的原因。

当 2.1 小节中 \mathbf{H}_1 成立时,先不做如何处理,直接跳过 k 时刻的状态,依据 $k-1$ 时刻的状态对 $k+1$ 时刻进行估计,有

$$\mathbf{X}(k+1|k-1) = \Phi(k+1, k-1)\mathbf{X}(k-1), \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}(k+1) &= \mathbf{Z}(k+1) - \mathbf{H}(k+1) \\ &\quad \mathbf{X}(k+1|k-1). \end{aligned} \quad (18)$$

此时,理论上

$$E(\mathbf{v}(k+1)\mathbf{v}^T(k+1)) = \mathbf{H}(k+1)\mathbf{p}(k+1|k-1)\mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{R}(k+1). \quad (19)$$

跳过 k 时刻状态后, $k-1$ 时刻与 $k+1$ 时刻直接联系时,滤波器是否工作正常可叙为以下假设检验问题:

$$\mathbf{H}'_0: \gamma \text{tr}[\mathbf{v}(k+1)\mathbf{v}^T(k+1)] < \mathbf{H}(k+1)\mathbf{p}(k+1|k-1)\mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{R}(k+1),$$

$$\mathbf{H}'_1: \gamma \text{tr}[\mathbf{v}(k+1)\mathbf{v}^T(k+1)] \geq \mathbf{H}(k+1)\mathbf{p}(k+1|k-1)\mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{R}(k+1).$$

当 \mathbf{H}'_0 成立时,则说明跳过 k 时刻状态后,滤波器工作正常, k 时刻状态判断为测量野值,直接用估计值代替 k 时刻状态,不将该观测数值引入滤波器,从而抑制野值对滤波精度的影响;而当 \mathbf{H}'_1 成立时则说明对于新的观测值 $\mathbf{Z}(k)$ 和 $\mathbf{Z}(k+1)$,滤波器均工作异常,观测环境已发生变化,需要在 k 时刻即对 $\mathbf{R}(k)$ 进行重新计算。

3 实验及分析

下面通过模拟一种工业环境下计算机视觉激光束中心检测的典型工况来验证研究算法的有效性。

3.1 实验系统

实验系统由发射装置^[17]、运动平台和接收装置组成,如图 1 所示。激光发射器为准直扩束激光器,波长 650 nm、功率 20 mw;接收装置中图像传感器分辨率为 320×240 像素,工业镜头为 8 mm 固定焦距镜头。图像处理及滤波算法是在 PC 机(主频 2.1 G 双核处理器、内存 2G)上通过 Visual C++ 6.0 编程实现的。

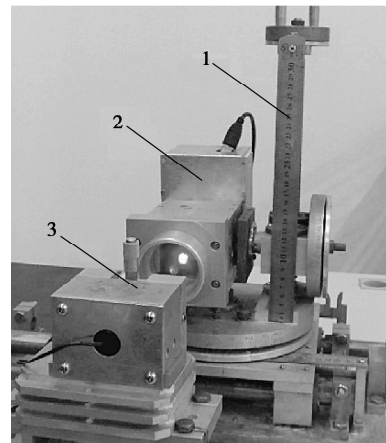


图 1 实验系统

注:1. 运动平台;2. 接收装置;3. 发射装置

3.2 实验过程

实验通过对光束相对位移检测结果滤波来验证算法的有效性。检测过程为:把装置第一次采集到的光斑中心位置设为基准参考点,通过运动平台把接收装置在水平和垂直方向各移动 1 mm 采集一次图像,通过中心定位算法对光斑相对位移进行测定,并对检测结果进行滤波。实验工况为:前 20 帧检测

图像为检测装置状态良好的情况下采集的,后 20 帧检测图像为激光接收装置存在严重漏光的情况下采集的,并引入密度为 0.01 的椒盐噪声,另外,第 7 帧、第 19 帧以及第 35 帧图像引入密度为 0.03 的椒盐噪声模拟产生野值的环境。实验中采用的检测图像如图 2 所示。

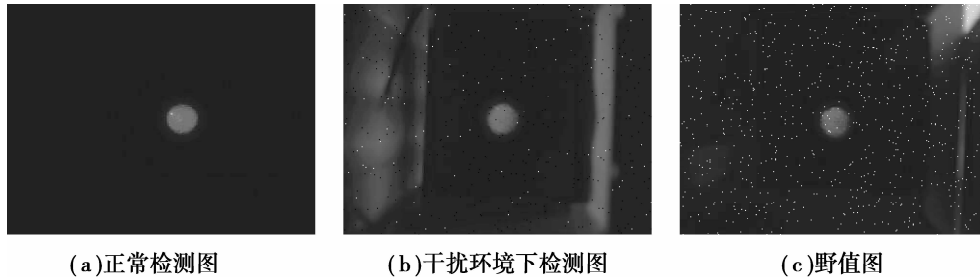


图 2 检测图像

实验过程中,通过物/像比例尺标定^[18]得到单像素尺寸为 0.343 1 mm×0.343 1 mm。正常的检测图像中心提取算法为曲线拟合法,干扰环境下检测图像和野值图像中心提取算法为 Hough 圆变换。经多次测定,在平面坐标系的 x 和 y 方向,正常检测图像的观测噪声幅值为 0.12 mm,协方差约为 0.006;干扰环境下检测图像观测噪声幅值为 0.45 mm,协方差约为 0.014;野值图像的测量偏差大于 0.7 mm。过程噪声幅值为 0.1 mm,协方差约为 0.01,储备系数 γ 取值 2.2。

滤波过程中,系统状态变量选为光斑的中心位置坐标 (x, y) 和速度 \dot{x}, \dot{y} 则系统的状态转移方程为

$$\begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \\ y(k) \\ \dot{y}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x(k-1) \\ \dot{x}(k-1) \\ y(k-1) \\ \dot{y}(k-1) \end{bmatrix} + \mathbf{Q}(k), \quad (20)$$

式中, T 为每两帧图像间时间差,这里,可统一把 T 归为 1 s。直接观测量为光斑的中心位置坐标 (x, y) ,则系统的观测方程为

$$\begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \\ y(k) \\ \dot{y}(k) \end{bmatrix} + \mathbf{R}(k). \quad (21)$$

3.3 实验结果及分析

研究的滤波方法工作过程中,按照式(14)计算得到的实际余项与理论余项比的变化曲线如图 3 所示,其中,第 7 帧、第 19 帧以及第 35 帧图像,由于野值的出现,实际余项与理论余项比有明显的增加,而按照(2.2)小节所述方法,直接跳过这些状态,联系之前与之后状态,则该异常情况消失,可据此判断这些观测值为野值。第 22 帧图像实际余项与理论余项比也有明显增加,这是因为第 21 帧图像开始的观测环境的变化这时在测量数据中得到了体现,此时,跳过这一状态,实际余项与理论余项仍然不符,需采用 Sage-Husa 算法对系统观测噪声进行重新估计。该组数据表明,文中方法采用的判据能准确的判断观测环境是否变化以及新观测值是否为野值。

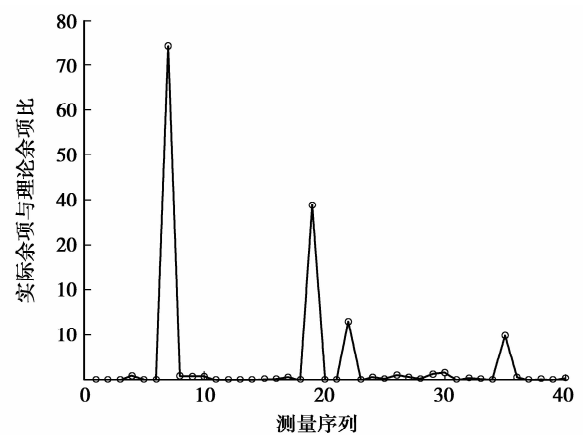


图 3 实际余项与理论余项比

激光中心定位测量误差、简化的 Sage-Husa 算法滤波后的定位误差以及文中方法滤波后的定位误

差如图 4 所示。

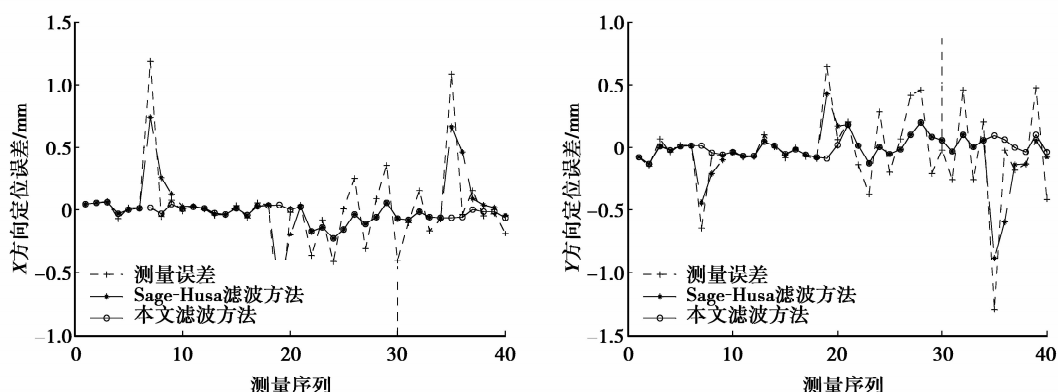


图 4 不同滤波方法结果对比曲线

由图可知,2种滤波算法均能减小中心定位误差,且都能适应观测环境的变换,2种方法均是有效的。正常情况下文中方法和 Sage-Husa 滤波算法滤波精度相当,而一旦出现测量野值,算法能对其进行辨别,并排除在滤波记忆之外,因此滤波精度更高;另外,由于文中方法不需要每次对观测噪声进行估计,算法的实用性比简化的 Sage-Husa 波算法更好。

4 结 论

1)针对工业在线检测的特点及要求,对简化的 Sage-Husa 自适应滤波算法进行了进一步改进,该方法先通过滤波发散判据判断滤波器工作状态是否异常,并进一步找出滤波异常的原因,分别采取不同的对策,从而提高滤波算法在工业检测中的性能。

2)提出了优化算法在模拟工业环境下激光束中心定位中的应用,实验表明,该方法能对观测环境的变化和观测野值做出准确判断,与传统方法相比,精度较高、实用性好、鲁棒性强,适用于工业在线检测的随机误差滤波。

参考文献:

[1] Wang X, Tan J P, Quan L Y, et al. Real-time monitoring method for five-degrees-of-freedom of the extruder's moving parts [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 105-107: 630-634.

[2] 王宪, 谭建平, 全凌云, 等. 复杂工业环境下激光束中心快速精确定位方法 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(12): 43-49.

WANG Xian, TAN Jianping, QUAN Lingyun, et al. Fast and precise location method of the laser beam center point in complex industrial environment [J].

Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(12): 43-49.

- [3] Cattivelli F S, Sayed A H. Diffusion strategies for distributed Kalman filtering and smoothing [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55 (9): 2069-2084.
- [4] Karasalo M, Hu X M. An optimization approach to adaptive Kalman filtering [J]. Automatica, 2011, 47(8): 1785-1793.
- [5] Bhhotto M Z, Antoniou A. Robust set-membership affine-projection adaptive- filtering algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(1): 73-81.
- [6] Mohiuddin S, Psiaki M L. Continuous- time Kalman filtering with implicit discrete measurement times [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2011, 34 (1): 148-163.
- [7] Morency L P, Whitehill J, Movellan J. Monocular head pose estimation using generalized adaptive view-based appearance model [J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(5): 754-761.
- [8] Zeng F, Avalew B. Estimation and coordinated control for distributed parameter processes with a moving radiant actuator [J]. Journal of Process Control, 2010, 20(6): 743-753.
- [9] Bian H W, Jin Z H, Tian W F. Study on GPS attitude determination system aided INS using adaptive Kalman filter [J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(10): 2071-2079.
- [10] Sage A P, Husa G W. Adaptive filtering with unknown prior statistics [C] // Proceedings of Joint Automatic Control Conference, Boulder Colorado, 1969: 760-769.

(下转第 27 页)

- element analysis [J]. Weighing Apparatus, 2009, 38(6):47-52.
- [7] 孟凡文. 提高应变式传感器性能的几种方法[J]. 中国仪器与仪表, 2003(4):34-37.
- MENG Fanwei. Some ways to improve the property of strain sensor [J]. China Instrumentation, 2003 (4): 34-37.
- [8] Wie F Y, Fang M N. Factors influencing output non-linearity error of a high-precision load sensor and the error calculation [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001, 37(4):341-347.
- [9] Mohammed A A S, Moussa W A, Lou E. Development and experimental Evaluation of a novel piezoresistive MEMS strain sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(10):2220-2232.
- [10] Wang J P, P X, Tao X M. Strain sensing behavior of electrically conductive fibers under large deformation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(6):2863-2869.
- [11] Cheung Y N, Yun Z, Cheng C H, et al. A novel fluidic strain sensor for large strain measurement [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(2):401-408.
- [12] Khairi N M, Shoh Rizam M S B, Naimah M I, et al. Diameter stem changes detection sensor evaluation using different size [J]. Procedia Engineering, 2012, 41: 1421-1425.
- [13] 单成祥, 牛彦文, 张春. 传感器原理与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [14] 施湧潮, 梁福平, 牛春晖. 传感器检测技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [15] 卢兴国. 微型多功能传感器的研制 [D]. 合肥: 合肥工业大学硕士学位论文, 2005.
- [16] 吴强, 俞志伟, 吉爱红, 等. 一种小型电阻应变式三维力传感器的仿真设计 [J]. 中国机械工程, 2011, 22(11): 1288-1293.
- WU Qiang, YU Zhiwen, JI Aihong, et al. Development of a miniature resistance strain three dimensional force sensor [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(11):1288-1293.

(编辑 詹燕平)

~~~~~

(上接第 20 页)

- [11] Dong W, Jeffs B D, Fisher J R. Radar interference blanking in radio astronomy using a Kalman tracker [J]. Radio Science, 2005, 40(5):1-13.
- [12] 梁松, 徐晓苏, 黄永亮. Sage-Husa 自适应滤波算法在捷联组合导航系统中的应用 [J]. 测试技术学报, 2011, 25(4):327-331.
- LIANG Song, XU Xiaosu, HUANG Yongliang. Application of Sage-Husa adaptive filter to integrated navigation system [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2011, 25(4):327-331.
- [13] 张兴华, 刘超. 基于一阶异相关法则的 kalman 滤波抗野值方法 [J]. 测试技术学报, 2010, 24(5):453-458.
- ZHANG Xinghua, LIU Chao. Study on restraining outliers of Kalman filter based on one-step singular correlation law [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2010, 24(5):453-458.
- [14] Xia J X, Chen M, Huang W. A multistep corridor travel-time prediction method using presence-type vehicle detector data [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 2011, 15(2):104-113.
- [15] 张帆, 卢峥. 自适应抗野值 Kalman 滤波 [J]. 电机与控制学报, 2007, 11(2):188-190.
- ZHANG Fan, LU Zheng. Robust Kalman filter for outliers suppression [J]. Electric Machines and Control, 2007, 11(2):188-190.
- [16] 石勇, 韩崇昭. 自适应 UKF 算法在目标跟踪中的应用 [J]. 自动化学报, 2011, 37(6):755-759.
- SHI Yong, HAN Chongzhao. Adaptive UKF method with applications to target tracking [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(6):755-759.
- [17] 谭建平, 王宪, 全凌云, 等. 激光光轴调节及保持装置: 中国, 2011200827266 [P]. 2011-11-23.
- [18] 李鹏辉, 赵文光, 朱宏平, 等. 基于数字图像处理技术的多点动态位移监测 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2):80-84.
- LI Penghui, ZHAO Wenguang, ZHU Hongping, et al. Monitoring multi- dynamic displacements by digital image processing technology [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(2):80-84.

(编辑 詹燕平)