

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 02 - 0156 - 05

基于卡尔曼滤波器的传像光纤束位置搜索

安博文^{1,2,3}, 潘胜达¹, 陈桂林²

(1. 上海海事大学 信息工程学院, 上海 200135; 2. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 上海广电 (集团) 有限公司 中央研究院, 上海 200233)

摘要: 为获取超高分辨率图像, 设计了一种入端为线阵排列、出端为面阵排列的传像光纤束。利用该光纤束的成像系统在合成目标图像时, 需要建立光纤束出端、入端位置坐标表。介绍了一种基于卡尔曼滤波器的算法, 对出端光纤位置逐一搜索; 搜索光纤位置时区分层内、层间设置不同初始步长, 按均方误差最小原则对搜索步长进行修正。算法采用了比对终止边界、标定已搜索光纤两种稳健性措施, 'Z' 字型搜索路径提高了算法效率。实验结果表明, 搜索算法得到的位置坐标表准确标定光纤位置, 提取光纤束耦合的信息还原了目标图像。

关键词: 传像光纤束; 位置搜索; 卡尔曼滤波器; 位置坐标表

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A

POSITION-SEARCHING OF IMAGE-CARRYING FIBER BUNDLE BASED ON KALMAN FILTER

AN Bo-Wen^{1,2,3}, PAN Sheng-Da¹, CHEN Gui-Lin²

(1. School of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. Shanghai SVA Group Co., Ltd, Central Research Academy, Shanghai 200233, China)

Abstract: To obtain ultra-high spatial resolution image, a kind of non-conventional fiber bundle, whose input was line array while output was plane array, was designed. The coordinate table of each fiber in input and output terminals must be ascertained when synthesizing object images by using the scanning-imaging system of the fiber bundle. However, limited by manufacture technology, the fiber bundle output structure was not strictly aligned. An algorithm based on Kalman Filter, aiming at the coordinate errors, was proposed in this paper. Different initial searching step was given to inner layer and intra layer respectively, by searching fiber center's position one by one in the output terminal, under the principle of minimum mean square error. The coordinate table of the output was established, and the position mapping relationship between output and input was built. Comparing the termination margin and marking the searched fiber were the two ways to improve the robustness of the algorithm. Z-shaped path improves the efficiency of the algorithm. The results show that the coordinates obtained by the proposed algorithm can demarcate the position of the fiber and the object image was restored by extracting the information of the scanning imaging system coupled by the bundle.

Key words: image-carrying fiber bundle; position-searching; Kalman filter; coordinate table

引言

红外扫描成像获取高分辨率图像时, 需要光敏元超过 4000 元的长线阵焦平面探测器。受工艺限制, 目前难以加工长线阵焦平面探测器, 小规模面阵有成熟应用。256 × 256 面阵共有 65536 个光敏元, 若能将 65536 个光敏元巧妙利用, 使其变成空间意义上的线阵排列, 则可实现超长线阵探测器的探测

效果。利用面阵探测器实现超长线阵焦平面的探测功能时^[1], 设计一种特殊结构的光纤束, 该光纤束入端呈线阵排列、出端为面阵排列。传像光纤束的入端置于扫描成像光学系统的焦平面上, 出端用小规模面阵器件接收信息。由于光纤束和 CCD 光敏元尺寸上的差异, 单根光纤对应面阵探测器的多个光敏元。利用该光纤束的扫描成像系统在合成原始目标图像时, 要解决两个基本问题: 一是要找出光纤束中

收稿日期: 2008 - 12 - 21, 修回日期: 2009 - 06 - 18

Received date: 2008 - 12 - 21, revised date: 2009 - 06 - 18

基金项目: 国家 863 专项课题 2007AA12Z152; 上海曙光计划 08SG49

作者简介: 安博文 (1969-), 男, 湖北黄冈人, 副教授, 博士, 主要从事数字图像处理研究。

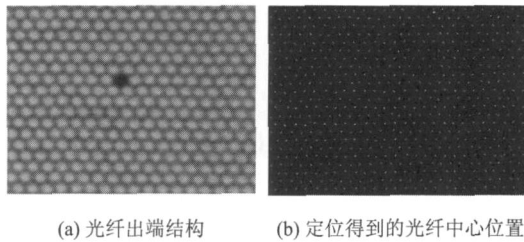


图1 (a)光纤出端结构 (b)定位得到的光纤中心位置
Fig.1 (a)The output structure of fiber (b) the position of fiber center

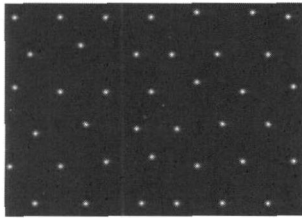


图2 光纤出端放大图
Fig.2 Enlarged output terminal of fiber

每根光纤中心位置对应的光敏元,用单个像素代表光纤的中心位置,如图1所示;二是建立光纤束出端光纤与入端光纤位置映射表,将出端的面信息还原为入端的线信息。

第一个问题在参考文献[1]中有详细讨论,这里不再叙述。建立出端、入端位置映射表时,首先搜索光纤出端的位置,然后依据加工光纤束的排列规律建立对应关系。由于加工工艺的原因,光纤之间难以整齐排列,另外定位光纤中心位置得到的像素点与实际位置之间存在误差。图2是图1(b)的放大图,从中可以看出,光纤之间的水平间隔和垂直间隔并不严格相等,这给信息提取带来难度,降低了系统处理速度。

快速有序地搜索每根光纤的位置,是合成目标图像的决定性因素,也是影响系统运算速度的关键因素。由于每根光纤尺寸难以严格相等,光纤之间的距离也不完全相同,从数学模型上看,该距离看成在固定值上叠加一随机变量,搜索光纤位置的工作就是对该值进行合理估计。基于这样的认识,本文引入卡尔曼滤波器算法模型,对光纤位置进行预测,之后根据搜索的结果对预测参数进行校正,再对下一位置进行预测。实验表明,这种预测—搜索—校正一再预测的方法有效地搜索出了光纤的位置。

1 标量卡尔曼滤波器

传输或测量信号 $s(n)$ 时,由于存在噪声,接收

或者测量得到的数据 $x(n)$ 和 $s(n)$ 不同。为了从 $x(n)$ 中提取或者恢复原始信号 $s(n)$,需要设计一种滤波器,对 $x(n)$ 进行滤波,使它的输出 $y(n)$ 尽可能逼近 $s(n)$,成为 $s(n)$ 的最佳估计^[2],即:

$$y(n) = \hat{s}(n) \quad (1)$$

设 $s(n)$ 含有加性噪声 $v(n)$,对应的信号模型和测量模型分别为:

$$s(n) = as(n-1) + w(n) \quad (2)$$

$$x(n) = cs(n) + v(n) \quad (3)$$

$w(n)$ 是信号模型中的白噪声激励, $v(n)$ 是信号传输或测量中引入的加性白噪声, a 和 c 都是不大于 1 的常数。

标量卡尔曼滤波器的递归方程为:

$$\hat{s}(n/n) = a\hat{s}(n-1/n-1) + G[x(n) - ac\hat{s}(n-1/n-1)] \quad (4)$$

其物理意义是:假设在 n 时刻数据 $x(n)$ 到来之前已经得到了估计值 $\hat{s}(n-1/n-1)$,就可以根据模型方程(2)对 $s(n)$ 进行预测,最佳预测值为:

$$\hat{s}(n/n-1) = a\hat{s}(n-1/n-1) \quad (5)$$

根据测量方程(3),由 $\hat{s}(n/n-1)$ 对测量值 $x(n)$ 进行预测,最佳预测值为:

$$\hat{x}(n/n-1) = c\hat{s}(n/n-1) = ac\hat{s}(n-1/n-1) \quad (6)$$

$x(n)$ 到来后,将预测值 $\hat{x}(n/n-1)$ 与 $x(n)$ 进行比较,得到预测误差:

$$\begin{aligned} (n) &= x(n) - \hat{x}(n/n-1) \\ &= x(n) - ac\hat{s}(n-1/n-1) \end{aligned} \quad (7)$$

(n) 代表 $x(n)$ 中所含的无法预测的信息,称之为新息。

选择适当的系数 G_n 对新息进行加权,对预测值 $\hat{s}(n/n-1)$ 进行修正,修正后得到信号的最佳估计:

$$\hat{s}(n/n) = \hat{s}(n/n-1) + G_n (n) \quad (8)$$

以上是标量卡尔曼滤波器的基本知识。

2 光纤束结构特点

搜索光纤位置时,假设已经找到第 i 根光纤位置 (X_i, Y_i) ,需要对第 $(i+1)$ 根光纤的位置 (X_{i+1}, Y_{i+1}) 进行搜索,在给出搜索算法之前,对光纤结构进行介绍^[3]:

(1) 相邻光纤之间距离是非突变: $|X_{i+1} - X_i| < 1, |Y_{i+1} - Y_i| < 2$;

(2) 是相邻光纤之间的位置间隔(横坐标和纵坐标),由光纤束的制作工艺和成像系统确定,其

值服从统计分布规律,不失一般性,设为正态分布;

(3) 扫描成像时光纤区域没有充满整个视场,背景区域和图像区域灰度值相差悬殊,搜索光纤位置局限于图像区域;

(4) 设图像光纤束区域宽度为 W 个像素,高度为 H 个像素,单层光纤根数为 N_h ,光纤的层数为 N_v ,则光纤之间水平、垂直平均距离 d_h 、 d_v 为:

$$\begin{aligned} |X_{i+1} - X_i| < d_h, |Y_{i+1} - Y_i| < d_v; \\ d_h = W/N_h, d_v = H/N_v. \end{aligned} \quad (9)$$

该值作为搜索算法跳跃步长的初始参考值.根据光纤束制作的设计参数,相邻光纤之间的位置坐标满足下列关系:

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + 1, \\ Y_{i+1} &= Y_i + 2. \end{aligned} \quad (10)$$

式中 X_i 、 Y_i 为第 i 根光纤的坐标, X_{i+1} 、 Y_{i+1} 为第 $(i+1)$ 根光纤的位置,为了计算及工程实现的方便,取值 1, 初始值由式 (9)确定,搜索过程中按照均方误差最小的原则进行修正.

3 搜索算法实现步骤

3.1 起止点的搜索——搜索初始值问题

由前述光纤结构特点不难看出:只有已知当前光纤的位置才能搜索下一根光纤的位置,因此,首先要找到第一根光纤的位置,从算法角度看,这是卡尔曼滤波的初始值问题.扫描成像获取的位置定标图像经过定位、二值化处理后,整幅图像由亮点和黑色背景组成,亮点代表光纤位置.为提高起止点搜索效率,采用‘Z’字型搜索路径^[4],如图 3所示.

设图像尺寸为 $W \times H$,光纤位置坐标为 (X, Y) ,像素灰度值为 Intensity,像素地址为 Address,初始位置 (X_0, Y_0) 搜索算法为:

for($K=0$; $K < W$ &&! FindStart; $K++$) /搜索循环次数及停止搜索标记

```
{ for( $i=0$ ;  $i < H$ ;  $i++$ ) /二重循环外层变量控制
  { for( $j=0$ ;  $j < W$ ;  $j++$ ) /二重循环内层变量控制
    { Address =  $W \times i + j$  /获取像素地址
      Intensity = * (Address); /获取像素灰度值
```

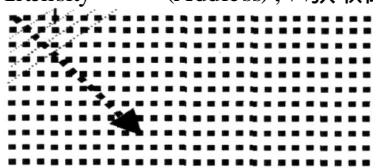


图 3 ‘Z’型搜索路径
Fig 3 Zigzag search route

```
if(( $K == i + j$ ) &&(255 == Intensity)) // 起始点判断条件
  {  $X_0 = j$   $Y_0 = i$  /获取起始像素地址
    FindStart = TRUE; /设置搜索标志
  }
} //结束内层循环
} //结束外层循环
} //结束搜索算法
```

为提高算法的鲁棒性,图像最左下、最右上、最右下三个关键点的光纤位置也需要提前获取.出于算法效率考虑,不同特征点从图像不同角度进行搜索,如最右下光纤位置搜索时从图像右下方开始,地址计算方法为: $Address = W \times (H - i) + W - j$ 其它位置点依此类推.

3.2 光纤位置搜索——层内步进、层间折返跳跃

获取搜索初始位置 (X_0, Y_0) 后,依光纤束的结构特点,采用步进的方式依次搜索、记录每根光纤位置^[5],与公式 (9)不同的是,搜索时要考虑光纤束断丝位置的处理,实际算法为:

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + k \times 1, k = 1, 2, 3 \\ Y_{i+1} &= Y_i + 2. \end{aligned} \quad (11)$$

式中 k 表示以当前点为基点向前跳跃的次数,一般情况下,跳跃一次就搜索到一根光纤;若未能搜出光纤,表明该处存在断丝,由于使用的光纤束不允许出现连续三根断丝,当 $k=3$ 还无法搜索到光纤时,表明进入图像右侧背景区域,需要折返到图像的左侧进行下一层的搜索.在层间折返跳跃时,为快速搜索下一层起点,需要保存当前层最左侧光纤的位置,跳跃时,以该位置为参考点向下跳跃,跳跃步长初始值由式 (10)给出.

3.3 搜索跳跃步长的确定

设当前光纤与前一光纤位置间隔为 d_{11} ,当前光纤与后一光纤(待搜索光纤)之间的距离设为 d_{10} ,前一光纤与之前的光纤位置间隔为 d_{10} ,根据光纤制作的设计参数,为:

$$d = d_{11} + d_{10}. \quad (12)$$

d_{11} 、 d_{10} 设定原则:跳跃步长的参考值 d 由式 (10)确定,搜索得到 (X_i, Y_i) 后,按照均方误差最小的原则对 d_{11} 、 d_{10} 进行调整,即:

$$e(n) = d - (d_{11} + d_{10}), \quad (13)$$

$$d(n) = E[e^2(n)] = \min. \quad (14)$$

由于处理对象是数字图像,调整 d_{11} 、 d_{10} 后通过式 (12)得到的 d 需要向下取整,即 $d = \lfloor d \rfloor$ 得到的代入式 (11)开始下一轮搜索.

3.4 搜索算法中的稳健性措施

按照上述算法搜索光纤位置时,可能会出现搜索进入死循环的状态,需要提高算法的稳健性.实际搜索时采取了两项措施增强稳健性:一是对于已经搜索过的位置进行易值处理,避免邻近层搜索时误串入,这一措施在图像发生倾斜,特别是光学畸变导致图像变形时具有非常意义;二是记录图像最左下光纤位置,层间跳跃时,比较跳跃后的位置是否超过最左下光纤位置,如果超出,表明搜索出现异常,强制系统停止搜索,重新设置相关参数,再次进行搜索.

4 算法正确性检验及实验结果

4.1 搜索算法正确性检验

检验搜索算法的正确性时,从图像相关系数和视觉效果两个层面进行.根据图像相关知识,对扫描成像实验获得的原始图像和经过搜索定位出的图像进行相关性计算^[6,7],当卷积遍历两幅图像计算的结果接近于1时,表明搜索算法正确.借用图像匹配的相关性概念,引入相关性测度 $R(i, j)$,其定义如下:

$$R(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^{i,j}(m, n) \times T(m, n)]}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^{i,j}(m, n)]^2}, \quad (15)$$

其中 T 为叠放在搜索图 S 上的模板, $S^{i,j}$ 为模板覆盖下的那块搜索子图, M, N 为图像尺寸,实际计算时采用归一化相关性测度,其定义为:

$$R(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^{i,j}(m, n) \times T(m, n)]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^{i,j}(m, n)]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [T(m, n)]^2}}. \quad (16)$$

项目后期成像实验时,由于改进了光学成像系统,图像质量得到提高.按式(16)计算得到的 $R(i, j)$ 大于 0.9,由此证明了算法的正确性.

视觉效果检验方法是将原始图像和经过搜索定位算法获得的图像进行对比^[8],从视觉上判断图像的基本特征是否相符.图4是成像实验获取的图像,图5是算法获取的图像.视觉效果表明,图像特征相吻合.需要说明的是,算法中用单个像素代表一根光纤传递的信息,存在能量丢失的问题,所以图5的亮度不够充分.

4.2 实验结果

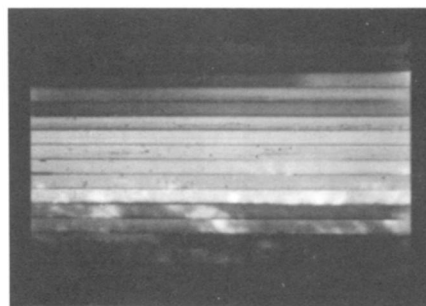


图4 原始图像
Fig.4 The origin image

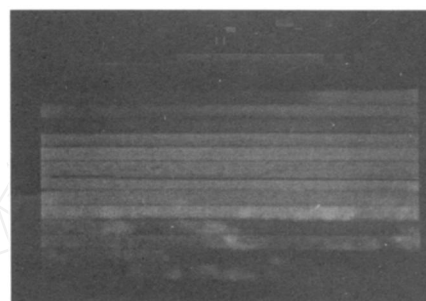


图5 算法抽取结果图
Fig.5 The image extracted by the algorithm

利用上述算法,对不同阶段获取图像进行处理,都得到了理想的结果.下面就其中一次成像结果进行算法指标分析.

利用文献[1]的方法对图(a)进行处理得到了图(b),利用本文介绍的方法,对系列扫描图像(c)(本次实验中共有126张)进行处理得到目标图像(d).本文中全部图像处理算法都是基于PC进行,计算机为配置为Pentium(R)4 CPU 2.8GHz 1GB内存,单幅图像尺寸为2448 × 3264(像素),完成算法的主要时间指标为:

读入单幅图像: 110ms;

搜索算法(由图6(a)得到图6(b)): 48922ms;

图像抽取(根据坐标表读数): 594ms/每幅;

总时间: $110 + 48922 + 594 \times 126 = 123876$ ms
2min

从上面数据看出,搜索算法的时间比较长,但扫描成像时,该算法只需要进行一次,然后根据生成的位置坐标表从扫描系列图像中读取数据,实际成像实验时,能满足准实时的要求.

5 结论

利用标量卡尔曼滤波器模型预测、搜索光纤束

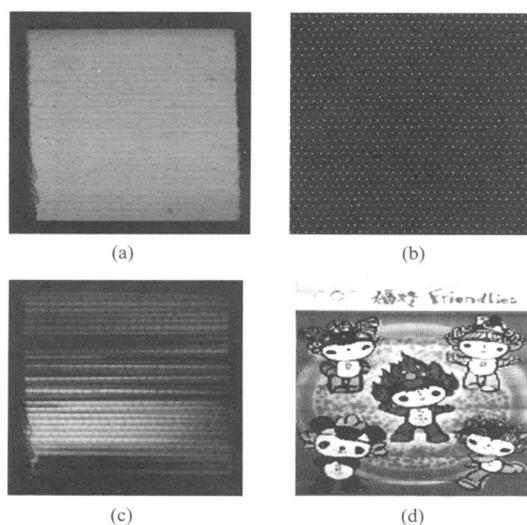


图 6 最终处理结果 (a)位置定标图 (b)算法获取的位置图 (c)描系列图像 (d)算法最终图像

Fig 6 Final result (a) the position-locating image (b) the image of the position obtain by the algorithm (c) the image used to scan (d) the final image obtain by the algorithm

出端光纤的位置时,首先确定搜索的起止点位置,然后利用光纤束制作的设计参数给出搜索跳跃步长的初始值,搜索得到的实际值对预测值进行校正;必要的稳健性措施克服了光学成像系统畸变带来的搜索干扰。^[9]从实验结果看,本算法建立的光纤束出端、入端位置坐标表完整地扫描系列图像中提取了原始目标图像信息。

REFERENCES

- [1] AN Bo-Wen. Spatial transform in non-conventional ultra-high resolution image-carrying fiber bundles[J]. *J. Opto-Electronic Engineering* (安博文. 超高分辨率异型传像光纤束中的空间变换. 光电工程), 2006, 33(11): 83—87.
- [2] YAO Tian-Ren, Sun Hong. *Advanced digital signal processing* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press(姚天任, 孙洪. 现代数字信号处理. 武汉: 华中理工大学出版社), 1999: 27—30.
- [3] BA IJun-Qi, CHEN Qian, QU HuiMing. Research on optical microscanning reconstruction for infrared staring imaging [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (白俊奇, 陈钱, 屈惠明. 红外凝视成像光学微扫描重建技术研究. 红外与毫米波学报), 2008, 27(4): 257—260.
- [4] YANG ZhiLing Wang Kai, et al. *Digital image acquiring, processing and practice application based on Visual C++* [M]. Beijing: Posts & Telecom Press(杨枝灵, 王开, 等. Visual C++数字图像获取、处理及实践应用. 北京: 人民邮电出版社), 2003: 457—459.
- [5] GUO Qiang, Chen GuiLin. A fast algorithm of earth edge detection for space remote sensing images under strong noise [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郭强, 陈桂林. 强噪声背景下在遥感云图中提取地球圆盘的快速算法. 红外与毫米波学报), 2003, 22(5): 369—372.
- [6] Gonzalez R C. *Digital image processing* [M]. 2nd ed [S 1]: Publishing House of Electronics Industry 2007: 457—459.
- [7] CAO Mao-Yong, Sun NongLiang, Yu Dao-Yin. Study on clarity-evaluation-function of out-of-focus blurred image [J]. *J. Chinese Journal of Scientific Instrument* (曹茂永, 孙农亮, 郁道银. 离焦模糊图像清晰度评价函数的研究. 仪器仪表学报), 2001, 22(4): 259—268.
- [8] Fuh C S, Cho S W, Essig K. Hierarchical color image region segmentation for content based image retrieval system [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(1): 156—162.
- [9] SHI Guang-Ming, WANG Xiao-Tian, ZHANG Li, et al. Removal of random stripe noises in remote sensing image by directional filter [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (石光明, 王晓甜, 张犁, 等. 基于方向滤波器消除遥感图像孤立条带噪声的方法. 红外与毫米波学报), 2008, 27(3): 214—318.