

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.01.009

基于 PSD 的显微镜硬件自动聚焦系统研究

杨 宇,赵 宇*,杨 明,孟传瑞

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对快速、大批量自动图像采集的问题,对一种硬件聚焦方法进行了研究。结合光学原理,通过光电位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)进行了位置检测,将测量位置量转换为电量。对 PSD 的转换电路进行了设计,根据聚焦提出的精度,对所用电子元器件进行了选型,达到了控制要求。然后由 MCU 对实验数据进行了线性化处理,从而得到了位移变化量和 PSD 转换电路的输出数据之间较好的对应关系,最终获得了精准的焦点位置。研究表明,该硬件自动聚焦系统在聚焦精度和聚焦速度方面都有明显的优势。

关键词:硬件自动聚焦;PSD 传感器;PSD 转换电路;线性化处理

中图分类号:TH742;TP391;TN2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)01-0047-05

Research on the hardware automatic focusing system in microscope based on PSD

YANG Yu, ZHAO Yu, YANG Ming, MENG Chuan-rui

(Mechanical and Electrical College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problem about fast, large quantities of automatic image acquisition, a method of hardware focusing was researched. The system detect the position through a PSD (Position Sensitive Detector) combined with principles of optics. The PSD conversion circuit was designed to convert from position to voltage. The electronic components used in this circuit were selected to meet the system requirement of and the accuracy. Correspondences between the change of position and the output data of PSD conversion circuit were obtained. The precise position of the focus was obtained through experimental data linearization. The results indicate that this hardware automatic focusing system have obvious advantages in precision and speed.

Key words: hardware automatic focusing; PSD sensor; PSD conversion circuit; linearization

0 引 言

近年来,随着病理切片远程诊断、信息共享的需求日益增加,病理切片数字化采集成为了研究热点。病理切片数字化采集,即利用自定义倍数显微镜搭载可控微动平台,结合自动化技术将传统病理切片进行全自动扫描,扫描后得到一组分散的高倍数字化图片,将其拼接后得到全视野高分辨率的数字图像。为了满足病理切片数字化的需求,本研究对其关键技术——快速和高精度的显微镜自动聚焦系统进行研究。

显微镜自动聚焦分为软件自动聚焦和硬件自动聚焦两种方法。软件聚焦是采用图像清晰度评价函数来

实现自动聚焦的一种方法。用 40X 物镜拍摄一张 15 mm × 15 mm 大小的病理切片需要拍摄 2 000 多张图片,软件聚焦存在以下不足:①若对每张图片都进行软件自动聚焦,会耗费大量的时间,检测速度降低。②由于软件聚焦采用评价函数来进行判别,其对图像成像质量比较敏感,即对图像亮度的一致性有要求。因此需要对成像环境的光强进行调节,经试验验证耗时严重。③无法完全克服因玻片厚度不均和载物台无法绝对水平运动等缺陷带来的聚焦平面误差。

为了提高聚焦速度和精度,有人提出采用线性 CCD 作为位置检测的硬件自动聚焦方案,但由于线性 CCD 像素点尺寸在 5 μm 左右,要做到 μm 级的分辨率

收稿日期:2015-09-21

作者简介:杨 宇(1991-),男,安徽芜湖人,主要从事计算机辅助测控方面的研究。E-mail:347960232@qq.com

通信联系人:赵 宇,女,副教授,硕士生导师。E-mail:meezyzhao@nuaa.edu.cn

很困难,大倍率物镜硬件自动聚焦很难实现。因此,本研究提出一种基于一维光电位置探测器(position sensitive detector, PSD)的硬件自动聚焦方案。

1 PSD 工作原理

PSD 是一种能测量光点在探测器表面上连续位置的光学探测器。PSD 由 P 衬底、PIN 光电二极管及表面电阻组成^[1-2]。与 CCD 探测器相比,PSD 有诸多优点,如位置分辨率高,响应速度快和处理电路简单,光敏面无需分割,消除了死区,可连续测量光斑位置等。一维 PSD 器件位置分辨率最高可以达到 0.1 μm,完全满足显微镜自动聚焦系统的需要。PSD 器件的等效电路如图 1 所示。

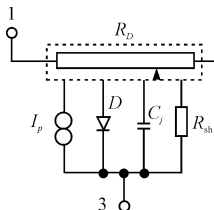


图 1 PSD 器件的等效电路

一维 PSD 器件的结构如图 2 所示。

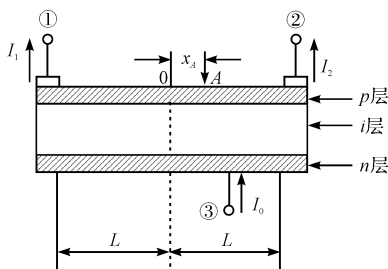


图 2 一维 PSD 器件的结构

①、②—信号电极;③—公共电极

当光束入射到 PSD 器件距中心点距离为 X_A 的光

敏层上时,在入射位置上产生与入射辐射成正比的信号电荷,该电荷形成的光电流通过电阻 P 层分别由电极①和②输出。设 P 层的电阻是均匀的,两电极间的距离为 $2L$,流过两电极的电流分别为 I_1 和 I_2 ,则流过 n 层上电极的电流 I_0 为 I_1 、 I_2 之和。 I_0 、 I_1 、 I_2 和 X_A 之间的数学关系如下式所示:

$$I_0 = I_1 + I_2 \tag{1}$$

$$I_2 = I_0 \frac{L + X_A}{2L} \tag{2}$$

$$I_1 = I_0 \frac{L - X_A}{2L} \tag{3}$$

由式(1~3)可推出式(4):

$$X_A = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} L \tag{4}$$

由公式(4)可知, X_A 只和 I_1 和 I_2 有关,而与 I_0 的大小无关,验证了位置信号对光的强度和聚焦无关,只与光的能量中心位置有关。这也为 PSD 的处理电路提供了理论依据和可行性^[3-4]。

PSD 器件分为一维 PSD 器件和二维 PSD 器件,一维 PSD 主要是用来测量光斑在一维方向上的位置或位置移动量的装置。该聚焦系统主要任务是检测并实时控制自动显微镜系统 Z 轴方向的位移,因此一维 PSD 完全可以满足实验要求。

2 基于 PSD 的硬件聚焦系统

2.1 硬件聚焦系统组成

基于 PSD 的硬件聚焦系统如图 3 所示。该系统主要组成部分包括:波长在 940 nm 的近红外半导体激光器、一维 PSD 器件、二向色镜、无限远光路系统、玻片、反光镜、电动载物台等^[5]。

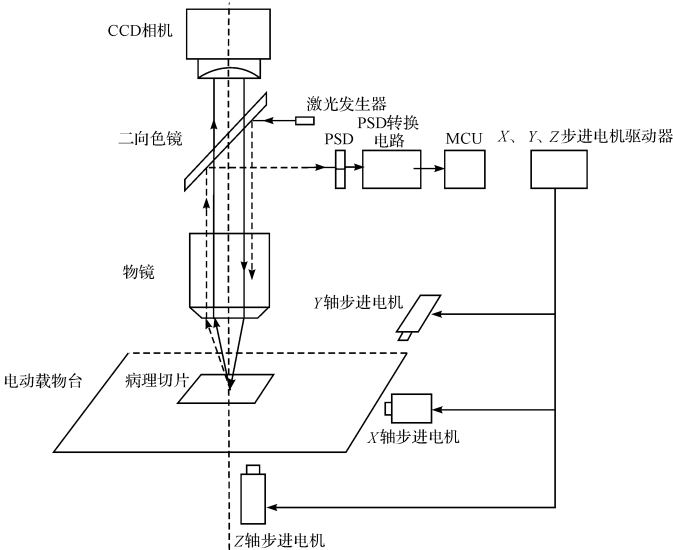


图 3 基于 PSD 的硬件聚焦采集系统

2.2 硬件聚焦系统选型以及工作原理

激光发生器选择波长为 940 nm(属于不可见光范围)的半导体激光器;PSD 选择为感光面为 1 mm × 3 mm 的一维 PSD 器件,二向色镜的选择为可见光全部通过,940 nm 全反射^[6]。

光学系统采用无限远光学系统:由于该系统需要在光路中插入附件,而有限远光学系统不是平行光路,不能随意在光路中插入附件,否则会影响成像,无限远光路没有这个限制,可以随意在光路中插入光学附件,并且不会产生不良影响。

硬件聚焦系统的工作原理是利用光路,通过 PSD 的位置定位来确定物镜焦点的位置。硬件聚焦系统检测光路为图 3 中虚线所示的部分,波长为 940 nm 的激光通过二向色镜的反射,到达物镜,经过物镜的折射,到达玻片上某一点,反射后经光路入射到 PSD 上,PSD 接收到信号后,通过转换电路,MCU 停止步进电机的运动,这样便获得了物镜焦点的位置。系统中 CCD 相机的功能是采集图像,加入的硬件聚焦模块不会对原 CCD 图像采集光路系统有影响。这是因为二向色镜只对波长为 940 nm 的光反射,其他波长的光一律通过,所以系统中 CCD 相机经显微镜采集病理切片图像这条光路(图 3 中实线所示)不会受到影响。

基于 PSD 的硬件聚焦系统流程图如图 4 所示。

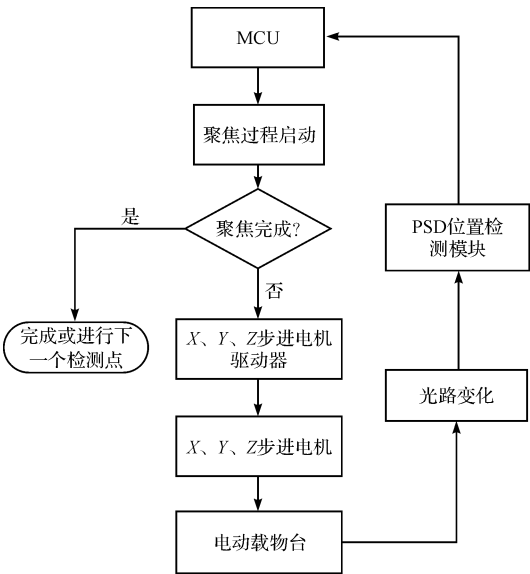


图 4 基于 PSD 的硬件聚焦流程图

3 系统电路设计

3.1 PSD 位置检测转换电路

PSD 位置检测转换电路原理图如图 5 所示。
一维 PSD 的输出信号 I_1 和 I_2 是以光电流的形式

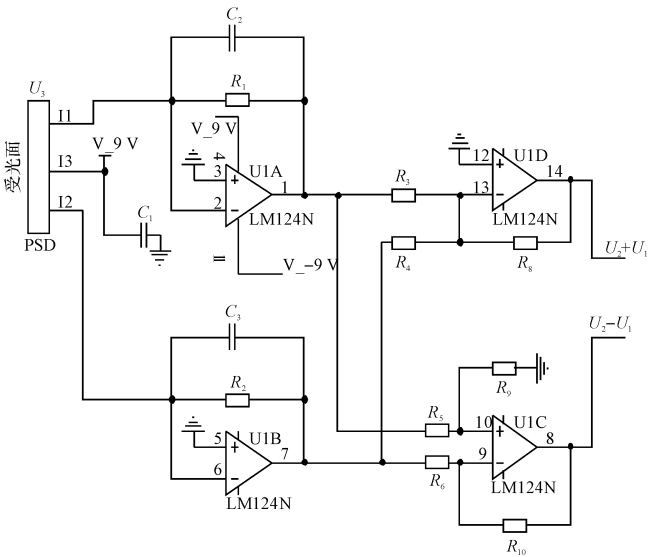


图 5 PSD 位置检测转换电路原理图

输出,激光经过光路的反射、折射后入射到 PSD 受光面的光能量较小,致使 PSD 输出的光电流十分微弱,因此设计 PSD 转换电路对于提取输出信号是必不可少的^[7-10]。

该系统选用 LM124 运算放大器,设计为四运放集成电路,具有电源电压范围宽,静态功耗小,可单电源使用,价格低廉等优点。四运放在转换电路中的作用如下所述:光电流 I_1 经反向放大器 U_1A 电流电压转换放大后分别送给放大器 U_1C 和 U_1D ,光电流 I_2 经反向放大器 U_1B 电流电压转换放大后也分别送给放大器 U_1C 与 U_1D ,放大器 U_1D 用作加法电路,完成光电流 I_1 与 I_2 相加运算;放大器 U_1C 用作减法电路,完成光电流 I_1 与 I_2 相减运算,最后将两路模拟量输入到单片机的 AD 口,进行模拟量的采集和除法操作,得到与光能大小无关的位置信号。

3.2 单片机最小系统及步进电机驱动器

本研究选用自带 10 位 ADC 转换的单片机芯片,并采用外置晶振的方式完成单片机最小系统的搭建;步进电机驱动器主芯片采用高细分、大功率的两项混合式步进电机驱动芯片 THB7128。

上述 PSD 转换电路中根据公式的要求应该有除法器完成 $(V_2 - V_1) / (V_2 + V_1)$ 数据处理,本研究的方法是通过单片机软件完成除法操作,这样电路不需使用硬件除法器,可以简化电路,降低成本。两路电压量分别输送到单片机的两个 AD 口,然后根据公式需要,进行除法操作。单片机自带 ADC 位数为 10 位,参考电压为 5 V,即分辨率为 $5 \times (1/2)^{10}$ V,即可以分辨 5 mV 的输入。40 倍显微系统的焦深为 5 μm 左右,电机每次可以移动的最小分辨率为 0.5 μm ,系统每移动

10 μm 时输出电压变化量为 20 mV, 因此单片机的 ADC 完全可以满足系统的需要。

4 PSD 输出线性化处理

为了满足系统需求, 需验证 PSD 的线性度情况, 所以本研究进行了一个 PSD 线性度实验, 根据要求采集的 3 组实验数据如图 6 所示。

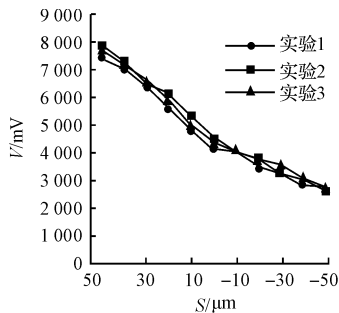


图 6 3 组实验数据折线图

横坐标表示显微镜相机系统 Z 轴到聚焦焦点的距离, 单位为 μm; 纵坐标表示 PSD 转换电路输出结果, 单位为 mV; 横坐标数值 0 处表示该聚焦系统的焦点位置, 每次移动 10 μm 采集相对应的电压值

由图 6 可知, 该硬件聚焦系统的输入-输出的线性度并不是很好。

由于该聚焦系统并非线性系统, 要想得到每一个点的电压 V 对应的系统位移量 S 就需对实验数据进行线性化处理。

在测控系统中常用的线性化处理方法主要有: 硬件补偿法和软件修正法。硬件补偿分为模拟电路和数字电路, 成本较高, 也使得电路更加复杂, 并且有些情况下使用硬件补偿是很难完成的, 因此该系统考虑采用查表式线性插值软件编程的方法实现非线性补偿。

所谓查表式线性插值方法, 主要是指首先采集一定量的输入 S —输出 V 的实验数据, 将实验数据的输

入作为横轴 S , 输出作为纵轴 V , 根据聚焦系统的聚焦精度要求将横轴 S 分成若干小段, 然后将分段的基点 V_i 、 S_i 值排列成表格。在图上标出分的段数越多, 精度就越高。这样就可以方便的求出各 V_i 值对应的 S_i 值。假设 V 位于 V_i 和 V_{i+1} 区间之内, 根据直线的点斜式方程, 线性插值公式可表示为:

$$V - V_i = \frac{V_{i+1} - V_i}{S_{i+1} - S_i}(S - S_i) \tag{5}$$

整理可得位移量 S 关于电压量 V 之间的关系式:

$$S = \left(V - \frac{S_{i+1}V_i - S_iV_{i+1}}{S_{i+1} - S_i} \right) \frac{S_{i+1} - S_i}{V_{i+1} - V_i} \tag{6}$$

斜率和截距都已知。

当 MCU 通过 ADC 采集到 PSD 经过电路转换之后输出电压 V , 然后求其对应的 PSD 位置传感器的输入量 S 值^[11-12]。

5 实验及结果分析

对于笔者所研究的显微镜硬件聚焦系统, 涉及到 20 倍和 40 倍两种镜头, 考虑到由于光在其中折射的角度不同, 导致本 PSD 接收到电信号位置的不同, 可能会产生误差, 不同倍率透镜光路情况如图 7 所示。故笔者进行 20 倍和 40 倍镜头的两组实验。该系统中两种镜头从原点到硬件聚焦点的距离如表 1 所示(单位是步进电机所发的脉冲数)。

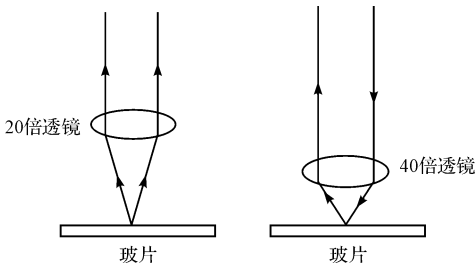


图 7 不同倍率透镜光路情况

表 1 两种镜头从原点到硬件聚焦点距离(单位: 脉冲数)

镜头种类	实验 1	实验 2	实验 3	实验 4	实验 5	最大误差
20 倍	8 465 821	8 465 890	8 465 894	8 465 776	8 465 759	135
40 倍	8 599 274	8 599 383	8 599 409	8 599 410	8 599 382	136

已知 20 倍透镜焦深为 5 μm ~ 6 μm (1 200 个脉冲), 而 40 倍透镜焦深为 2 μm ~ 3 μm (600 个脉冲), 根据表 1 分析, 无论是 20 倍或者 40 倍物镜的最大误差值均为 0.7 μm (140 个脉冲), 所以实验结论如下: 不同镜头的不同折射角度不会造成 PSD 系统的误差不同; 硬件聚焦的误差 (0.7 μm) 在允许范围之内 (2 μm ~ 3 μm)。

6 结束语

经过多次试验对比验证, 该硬件聚焦系统可以应用到数字病理切片全景扫描仪系统之中, 硬件聚焦无需加入上文提到的环境光强自动调节模块, 节约了光强调节环节的时间; 并且无需在整体扫描之前建立聚焦平面, 消除了因玻片厚度不均或者载物台无法绝对

水平运动等缺陷带来的系统误差。因此,在满足聚焦精度要求前提之下,研究者可以使用基于PSD的硬件聚焦方法代替通常所使用的软件自动聚焦的方法,为显微镜聚焦提供了一种有效的自动聚焦方法。

经过实验分析,与软件聚焦相比,采用基于PSD的硬件聚焦方法,其效率提高了50%。由此可见,本研究提出的方法具有很广阔的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 李博,高艺,曹国华,等.基于PSD的轴系对中测试系统非线性校正方法研究[J].机电工程,2013,30(3):300-302,310.
- [2] 刘斌,陆永华,杨超.基于PSD的激光跟踪测量控制系统研发[J].机电工程,2015,32(8):1033-1037,1055.
- [3] Lua Yuan H, Qian C, et al. Brief introduction of straightness curvature measurement system for straight tube using tangent method and error analysis[J]. Automatic Optical Inspection for Industry SPIE,1996(2899):180-185.
- [4] 曾为.基于PSD的微小位移测量系统研究[D].武汉:

华中科技大学光电科学与工程学院,2006.

- [5] 叶可人,姜志国,孟钢.一种基于线阵CCD成像的显微虚拟切片扫描系统[J].中国体视学与图像分析,2009,14(4):413-418.
- [6] 刘长城,柯熙政.空间光通信中PSD光斑的位置特性仿真研究[J].东光通信技术,2004(6):16-17.
- [7] 曾光宇,张志伟,张存林.光电检测技术[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [8] 朱国力,吴学兵,邹万军.基于PSD的角度测量系统[J].电测与仪表,2006,43(1):29-32.
- [9] 宋殿友,刘铁根,丁小昆,等.精密PSD微位移在线测量系统[J].天津大学学报,2013,46(2):168-173.
- [10] 李博,高艺,王红平,等.高精度PSD线性化方法与实验研究[J].长春理工大学学报:自然科学版,2013,36:1-2.
- [11] 方珉.单片机在非线性补偿中的应用[J].天津理工学院学报,1999(2):12-15.
- [12] 吴振锋,左洪福,邱根良.光学显微镜自动聚焦的技术研究[J].光学仪器,2000(4):9-12.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

杨宇,赵宇,杨明,等.基于PSD的显微镜硬件自动聚焦系统研究[J].机电工程,2016,33(1):47-51.

YANG Yu, ZHAO Yu, YANG Ming, et al. Research on the hardware automatic focusing system in microscope based on PSD[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(1):47-51.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第46页)

参考文献(References):

- [1] THOMAS POVEY, GUILLEMO PANIAGUA. Method to improve precision of rotating inertia and friction measurements in turbo machinery applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2012(30):323-329.
- [2] RENATO BRANCATI, RICCARDO RUSSO, SERGIO SAVINO. Method and equipment for inertia parameter identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010(24):29-40. MARTIN F, GERY C, MARTINO V, et al. A novel mechatronic body weight support system[J]. Neural system and rehabilitation engineering,2006,14(3):311-321.
- [3] 姚建松,曲振爱,何文华,等.拖拉机制动性检测方法及装置的设计研究[J].机电工程,2010(9):80-82.
- [4] VITALY G. MELNIKOV. A new method for inertia tensor and center of gravity identification[J]. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications,2005,63(5-7):1377-1382.

- [5] DOWLING J J, DURKIN J L, ANDREWS D M. The uncertainty of the pendulum method for the determination of the moment of inertia[J]. Medical Engineering & Physics, 2006,28(8):837-841.
- [6] 于治会.落体法测定转动惯量[J].测试技术,2004,37(3):57-61.
- [7] 郭长立,李三庆.落体法测刚体转动惯量的测量方法比较[J].力学与实践,2005,27(1):69-72.
- [8] 王海林,司嵘嵘,李相银.落体法测量刚体转动惯量实验中引起测量值偏离的因素分析[J].物理实验,2012,32(5):25-30.
- [9] 戴兴建,唐长亮,于世强.油浴润滑高速轴承摩擦系数变载荷测量方法[J].摩擦学学报,2011,31(1):7-11.
- [10] 沈百仁,沈飞飞,李柱国.机械设备液压侧板润滑设计及诊断[J].液压气动与密封,2014(9):77-79.
- [11] 邓四二,李兴林,汪久根,等.角接触球轴承摩擦力矩特性研究[J].机械工程学报,2011,47(5):114-120.

[编辑:李辉]