

文章编号 1004-924X(2018)10-2345-10

快速旋转式偏振成像探测装置的设计

韩 勇¹, 赵开春^{1,2*}, 尤 政^{1,2}

(1. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084;

2. 清华大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了获取更快的偏振成像探测速率, 本文对现有的机械旋转式偏振成像装置进行了改进, 设计了连续旋转检偏器的成像方式, 并改进图像处理过程, 进一步提高了偏振成像速度。该装置克服了传统机械旋转式偏振成像装置体积大、成像速度慢、效率低的不足, 利用电机带动检偏器快速匀速旋转, 并与相机的曝光同步, 能够快速便捷地实现偏振图像的获取。同时为了实现更高的偏振图像采集速率, 对偏振图像采用了流水线式的处理方式, 利用每相邻的 3 幅强度图解算得到偏振图像, 使偏振图像与强度图像具有相同的成像速率。经过测试, 该装置能够很好地完成偏振图像的采集, 获取被测目标的偏振度和偏振角, 在稳定工作状态下平均获取一幅偏振信息耗时 0.033 s, 且具有较好的工作稳定性。本文所做工作提升了机械旋转式偏振成像仪的工作效率, 也为进一步提升机械式偏振成像仪的成像速度、实现对运动目标探测打下了基础。

关键词: 偏振成像; 偏振态; 快速偏振光探测; 图像处理

中图分类号: TP79; TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182610.2345

Development of rapid rotary polarization imaging detection devices

HAN Yong¹, ZHAO Kai-chun^{1,2*}, YOU Zheng^{1,2}

(1. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tsinghua University, Beijing 100084, China;)

* Corresponding author, E-mail: kaichunz@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: To obtain a faster rate of polarization imaging detection, this study has improved the existing mechanical rotary polarization imaging device and designed a continuously rotating polarizer imaging device. Image processing flow and polarization imaging speed were also improved. This device overcomes the shortcomings of traditional mechanical rotating polarization imaging with a large volume and slow imaging speed. The system uses a motor to control the polarizer to rotate quickly and smoothly, the camera to work synchronously for the quick acquisition of the polarized image. Simultaneously, the polarization image is pipelined to achieve a higher polarization image acquisition rate, and each three adjacent intensity diagrams are used to calculate the polarization image which resulted in the same imaging rate of polarization image and intensity image. Experiments show that the device has good working stability and can complete the acquisition of polarized images well. Moreover, it can ob-

收稿日期: 2018-03-30; 修订日期: 2018-04-25.

基金项目: 教育部联合基金资助项目 (No. 6141A02022606)

tain polarization information through the polarization and polarization angle with an average acquisition time of 0.033 s. This work improves the detection speed of the mechanical rotary polarization imager and enables the enhancement of the mechanical polarization imaging speed and achievement of the basis of detecting moving targets.

Key words: polarization imaging; polarization state; rapid polarized light detection; image processing

1 引 言

光的偏振态信息包含了目标的多种信息,它独立于光的强度信息和光谱信息,描述了光的振动方向和偏振强度。光的偏振探测是对光强度探测和光谱探测的有力补充。

偏振成像是目标场景中每一个点的偏振态进行探测的成像方式。这种成像方式区别于强度成像,一般通过三幅独立的强度图像可以解算得到偏振图像。目标光的偏振态具有丰富的信息,而这些信息往往是传统强度图像所不能提供的,因而偏振成像在目标探测等方面具有广泛的应用前景^[1]。

非偏振光的反射光和散射光是两种重要的偏振信息来源。研究发现,反射光的偏振特性主要和目标的反射率、表面粗糙度、电导率及观测方位有关。基于这一特性,偏振探测可应用于遥感领域,有利于更精确地识别地物;在医疗诊断领域,偏振探测对具有不同偏振特性的病灶能够进行有效地识别,Matthew H. Smith 等将偏振光应用在黑痣癌变的检测中,能够快速准确地检测出癌变的黑痣^[2];在军事领域,偏振成像可以用于人造目标的识别,例如隐藏和伪装目标的识别^[3]。非偏振光的散射也是一种重要的偏振光信息来源,经过大气散射的太阳光在不同方位呈现出不同的偏振态,从而天空背景光由于太阳所在方位的不同而呈现出不同的整体偏振态分布模式。沙漠蚂蚁利用天空光的这种特性进行自身的定位导航,仿照此原理可以研制偏振导航传感器^[6]。

偏振图像由多幅强度图像解算得到,因此现有的各种偏振成像传感器之间工作原理的主要区别就在于获取图像的方式不同。按照强度图像的获取方式,偏振成像传感器可以分为机械旋转光学偏振元件类、分振幅型偏振成像装置、液晶可调滤光片型偏振成像装置、分孔径型偏振成像装置

和分焦平面型偏振成像装置^[13]。其中,机械旋转光学偏振片型偏振成像装置采用时序式工作方式,旋转中的偏振片每到特定角度则采集一幅强度图像,具有体积中等、系统简单的优点,适用于静态或准静态成像应用。分振幅和分孔径式的成像装置均采用多光路结构,其中分振幅式成像装置采用多探测器结构,分孔径式成像装置采用单探测器结构^[13]。二者均可以实现实时成像,其缺点在于光路系统复杂,其中分振幅式成像装置往往体积较大。液晶可调滤光片型成像装置利用电压控制液晶分子偏转来取代机械旋转,实现偏振图像探测,其工作方式也为时序型,但体积和质量大大缩小。然而,液晶对光有较强的衰减作用导致探测距离有限,同时电控液晶分子对温度也较为敏感,使用环境要求较高,使得这种偏振成像方式的应用受限。分焦平面型偏振成像装置在探测器面阵前每个像元前加入微偏振片,也可实现较高的成像帧率,但该项技术存在微偏振阵列加工困难、偏振阵列与感光像元阵列对准困难等问题,总体上处于探索阶段。相对其他偏振成像探测仪,机械旋转式偏振成像探测仪具有结构简单、易于实现、成本较低的优点。但其固有的时序工作方式导致其成像速度较低,动态探测能力不足,因而本文针对机械旋转式偏振成像探测器的成像速度进行了改进。文献[5]实现的基于连续旋转检偏器的偏振成像仪改进了时序式的工作方式,可以获得 0.7 s/frame 的偏振成像速率^[6],但是依然不能满足运动目标的探测要求。因此本文对连续旋转检偏器的成像方式进行了改进,利用快速匀速旋转的检偏器加反馈曝光控制,结合改进的流水线式的偏振图像处理过程,极大提升了偏振模式探测的获取速度;同时在结构上对系统进行了机电一体化集成,进一步减小了系统的体积。经过测试,本装置可以稳定地工作在 0.033 s/frame 的偏振图像获取速率下。系统的尺寸为 87.5 mm×87.5 mm×40 mm,较卢皓等

提出的偏振探测装置(135 mm×135 mm×110 mm)尺寸有了明显的缩小。本文所提出的快速机械旋转式偏振成像装置,如果配合成像帧率更高的相机,可以进一步提升偏振图像的获取速率,实现对更高速运动目标的偏振探测。

2 偏振光成像原理

2.1 偏振光的描述

为了研究光的偏振态,需要对偏振光进行建模和数学描述。偏振光的刻画方法主要有三角函数法、琼斯(Jones) 矢量法、斯托克斯(Stokes) 矢量法和 Poincare 球图示法。其中,Stokes 矢量描述法是偏振成像领域应用最广泛的方法。1852 年,斯托克斯在对于部分偏振光的研究中引入了 Stokes 矢量描述方法。Stokes 矢量由 4 个变量组成,利用这 4 个变量可解算出光的偏振态参数——偏振度和偏振角。Stokes 矢量的 4 个分量均为强度值,可以很方便地被成像器件探测到,因此这也是 Stokes 矢量应用广泛的原因之一。Stokes 矢量可以表示为:

$$\mathbf{S} = (I, Q, U, V)^T, \quad (1)$$

其中: I 代表光场矢量的总强度, Q 代表水平(x 轴)偏振和垂直(y 轴)偏振间的强度差, U 代表着光线偏振部分方向在 45° (xOy 平面内与 x 轴成 45°) 和 -45° 之间的光强差, V 分量代表左右旋圆偏振光的强度差。

偏振度(Degree of Polarization, DoP)为度量光偏振程度的参数,表征为完全偏振光在全部光强中所占的比例,其表达式为:

$$\text{DoP} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}. \quad (2)$$

一般的应用场景下,圆偏振分量 V 可以忽略,因而本文中用到的偏振度公式为:

$$\text{DoP} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}. \quad (3)$$

与偏振度对应的偏振角定义为:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q}. \quad (4)$$

当一束偏振光经过检偏器,其偏振状态也会发生相应的变化。若偏振主轴与描述斯托克斯矢量所选定的 x 轴的夹角为 α ,那么当一束光通过

检偏器之后,其透射光的光强为:

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{2} (I_{\text{in}} + Q_{\text{in}} \cos 2\alpha + U_{\text{in}} \sin 2\alpha), \quad (5)$$

其中: I_{out} 为透过检偏器之后的总光强, $I_{\text{in}}, Q_{\text{in}}, U_{\text{in}}$ 为入射光的 Stokes 矢量分量。

2.2 快速旋转检偏器的工作原理

本文所构建的快速旋转检偏器式偏振成像探测装置,其基本原理是利用检偏器获取三幅强度图像,并由三幅独立强度图像解算得到偏振图像。

为了得到更快的成像速率,本文进行了两点优化设计:首先是采用连续旋转的机械结构,使 CMOS 在检偏器连续旋转过程中的特定角度进行曝光,通过较快的强度图像获取速率来提升偏振图像获取速率;其次是采用流水线的处理方式,利用每相邻的三幅强度图像解算,得到偏振图像,实现了偏振图像的解算,并与强度图像具有相同的速率。

对于连续旋转检偏器的偏振成像装置,当 CMOS 在检偏器旋转过程中曝光时,透射光的强度为时间的函数,而相机曝光的本质是对光电流进行积分,因此从 t_0 到 t_1 时刻,曝光得到光电传感器的电压为^[5]:

$$V_b^t = kq_b^t = \frac{1}{2} k \left[I t_b^t + \frac{1}{2\omega} Q \sin 2\omega t_b^t - \frac{1}{2\omega} U \cos 2\omega t_b^t \right], \quad (6)$$

其中: k 代表光电传感器的光电转换系数, ω 表示检偏器匀速旋转的角速度。如图 1 所示,设开始曝光时候的角度是 0° , $\alpha_1, \alpha_2, \angle AOB = \alpha_1, \angle AOC = \alpha_2$, 每次曝光转过的角度为 β , 匀速旋转的角速度为

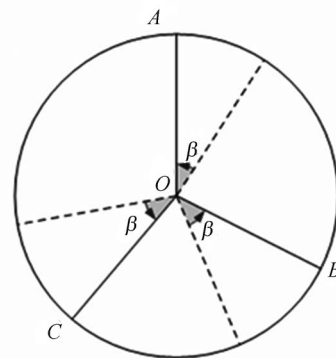


图 1 一般角度下相机曝光示意图

Fig. 1 Camera exposure in general angles

ω 。根据式(6),如果在旋转偏振片旋转至 $[0^\circ, \beta]$ 、 $[\alpha_1, \alpha_1 + \beta]$ 、 $[\alpha_2, \alpha_2 + \beta]$ 三个角度区间时进行曝光,那么只需将式(6)的积分区间 $[t_0, t_1]$ 分别取

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \frac{k}{2\omega} \begin{bmatrix} \beta & \sin \beta \cos \beta & \sin^2 \beta \\ \beta & \sin \beta \cos(2\alpha_1 + \beta) & \sin \beta \sin(2\alpha_1 + \beta) \\ \beta & \sin \beta \cos(2\alpha_2 + \beta) & \sin \beta \sin(2\alpha_2 + \beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix}. \quad (7)$$

公式(7)给出了一般情况下,曝光时间固定,机械旋转式检偏器的曝光角度任意的条件下,三幅强度图像与所求的偏振参量之间的关系。由式(7)可以看出,只要 α_1, α_2 互不相等,且都不为0,就有公式(7)等号右侧的矩阵非奇异,从而由强度图像解算偏振参量 I, Q, U 有唯一解。

公式(7)给出了偏振片连续旋转的情况下偏振强度图与曝光范围之间的关系,因而为了获取高精度偏振图像无需尽可能地缩短相机曝光时间。实际机械旋转偏振系统样机的构建需要考虑到系统的曝光控制、解算的难易程度、曝光时间与机械系统的配合等多种因素。如果曝光时间过短,则无法获得强度足够的强度图,而如果曝光时间过长,则曝光过程会占用后续图像传输的时间从而影响帧率。经过验证,本样机采用 30° 范围内的曝光时间既可以获得较清晰的强度图像,又能使得图像及时回传上位机。因此,本文所构建的系统采用均匀分布在检偏器圆周上 120° 的曝光角度,每次曝光令检偏器旋转过 30° ,曝光范围为 $0 \sim 30^\circ, 120 \sim 150^\circ, 240 \sim 270^\circ$,如图2所示。

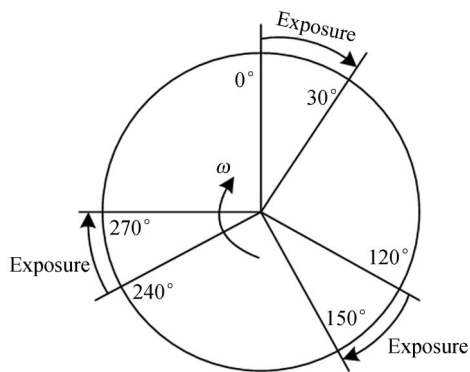


图2 相机曝光角度范围示意图

Fig. 2 Exposure angles of camera

为 $[0, \beta/\omega], [\alpha_1/\omega, (\alpha_1 + \beta)/\omega], [\alpha_2/\omega, (\alpha_2 + \beta)/\omega]$,即可得到的三幅强度图像与相对应的偏振参量 I, Q, U 之间的关系:

对于图2的曝光角度,令式(7)中的 $\alpha_1 = 120^\circ, \alpha_2 = 240^\circ, \beta = 30^\circ$,可以得到:

$$\begin{cases} I_0 = \frac{k}{4\omega} \left(\frac{\pi}{3} I + \frac{\sqrt{3}}{2} Q + \frac{1}{2} U \right) \\ I_{120} = \frac{k}{4\omega} \left(\frac{\pi}{3} I - U \right) \\ I_{240} = \frac{k}{4\omega} \left(\frac{\pi}{3} I - \frac{\sqrt{3}}{2} Q + \frac{1}{2} U \right) \end{cases}. \quad (8)$$

式(8)构成了一个线性方程组,其中左边是相机得到的强度图的强度值,方程组右边为被测目标光线的偏振态参量 I, Q, U ,求解方程组得到:

$$\begin{cases} I = \frac{\omega}{k} \left[\frac{4}{\pi} I_0 + \frac{4}{\pi} I_{120} + \frac{4}{\pi} I_{240} \right] \\ Q = \frac{\omega}{k} \left[\frac{4}{\sqrt{3}} I_0 - \frac{4}{\sqrt{3}} I_{240} \right] \\ U = \frac{\omega}{k} \left[\frac{4}{3} I_0 + \frac{4}{3} I_{240} - \frac{8}{3} I_{120} \right] \end{cases}. \quad (9)$$

得到偏振参量之后,利用式(3)和式(4)即可解算得到被测目标的偏振度与偏振角信息。

实际的偏振图像解算过程如图3所示,采用流水线解算方式。每次由 $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ 时刻的强度图像解算出一幅偏振信息图,由 $120^\circ, 240^\circ$ 和下一个 0° 时刻的图像解算出下一幅偏振信息图像,每一幅偏振图像都利用公式(8)进行解算,每次解算只需注意公式(9)中的变量顺序以保证解算角度均在同一个参考 0° 下。这样能够充分利用每一幅强度图像,如果配合较高的解算处理速度,则能大大提高偏振成像速率。对本文构建的快速偏振成像系统而言,获取强度图像的速率为 30 frame/s ,因而偏振成像速率也可以达到 30 frame/s ,这比文献[5]中的连续旋转检偏器的成像速率提升了21倍,可以满足对动态目标的偏振探测。

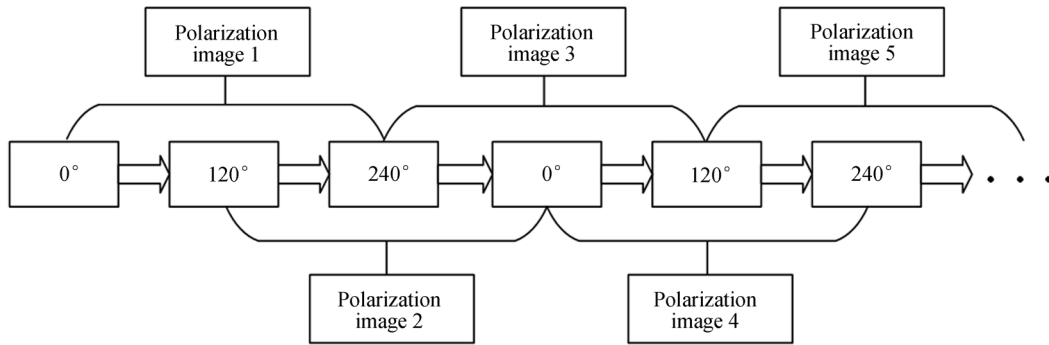


图 3 流水线式偏振图像解算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pipelined polarization image calculation

3 快速偏振成像系统设计

3.1 成像系统构成

偏振相机整体结构如图 4 所示。系统按照功能可划分为三大部分:PC 上位机与相机通信部分,电机控制部分和检偏器角度测量与单片机处理部分。这三部分的主要功能如下:

(1)PC 作为客户端,相机作为服务器端,利用 TCP/IP 协议通信,二者通过 100 Mb 以太网接口进行连接,可实现图像的实时传输;

(2)电机控制部分实现对无刷直流电机稳定匀速旋转的控制,通过单片机的脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)输出可以进行转速控制;

(3)检偏器角度测量部分,通过检测光电开关探测位于检偏器边缘的挡光标记是否遮光,从而获得检偏器的角度值。

上述三部分相互协调工作实现偏振图像采集。相机工作流程为:上位机程序启动作为客户端,相机端程序启动作为服务端。用户通过上位机给系统发出采集图像的信号后,控制指令通过 TCP/IP 协议发送至相机端 DSP 处理器,相机处理器接收信号并发送给单片机,单片机打开 PWM 输出,电机以 10 rad/s 的速度带动直径为 44 mm 的检偏器匀速转动。检偏器上设计有两组挡光标记,分别为每隔 120° 的 3 个分布均匀的遮光标记和一个零位遮光标记。当标记旋转到对射式光电开关的中间时,光电开关输出高电平。单片机由这些信号产生中断并触发相机拍照。在检偏器旋转的一个周期内会有三张强度图像回传

上位机。系统结束采集之后,程序将所得强度图像保存到上位机磁盘,进而利用 Matlab 离线处理得到被测目标的偏振度和偏振角信息。本装置为原理验证样机,100 Mb 以太网仅仅回传强度图,偏振度图和偏振角图由上位机离线解算得到。

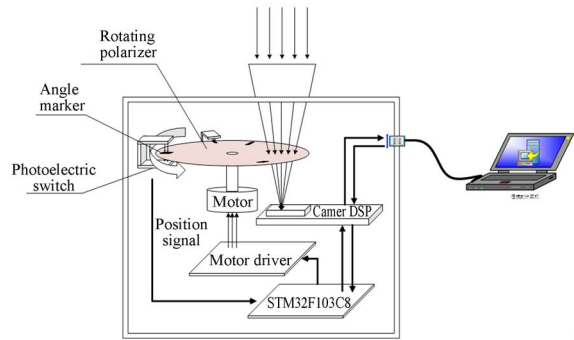


图 4 偏振成像系统整体结构图

Fig. 4 Framework of polarization imaging system

3.2 旋转检偏器的布置

旋转检偏器为偏振成像系统的关键部件,其任务是对镜头光路中的光进行检偏。由于所选用的电机为三相无刷直流电机,本身不带角度测量,为了获取检偏器的角度信息,我们在检偏器的特定位置上做出挡光标记,通过挡光标记的遮光获取角度信息。当检偏器匀速旋转的时候,光电开关的输出引脚会给出两路频率稳定的脉冲信号,其中角度感知光电开关相邻两个脉冲代表检偏器转过 120°。旋转检偏器与光电开关的相对位置关系如图 5 所示。

图 5 中,旋转检偏器的设计考虑了与其他部分的机械配合关系,保证了旋转检偏器旋转的过程中不会和电路板有干涉,且在检偏器遮光标记

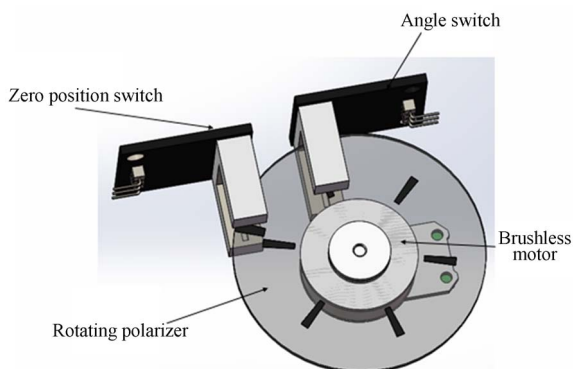


图 5 旋转检偏器与光电开关相对位置图

Fig. 5 Position of rotating polarizer and photoelectric switches

位于光电开开发射接收极之间时,不能有其他遮光标记位于相机 CMOS 感光部分上方。

3.3 偏振相机机械结构设计

这里对偏振相机进行了小型化集成,最终系统包括镜头在内的尺寸为 87.5 mm×87.5 mm×67.6 mm。为了实现系统小型化,选择微小型电机和电路板,同时设计了空间紧凑的机械结构。相机外壳设计为上下两部分,所有电路器件安装于底板上,系统设计如图 6 所示,实物照片如图 7 所示。

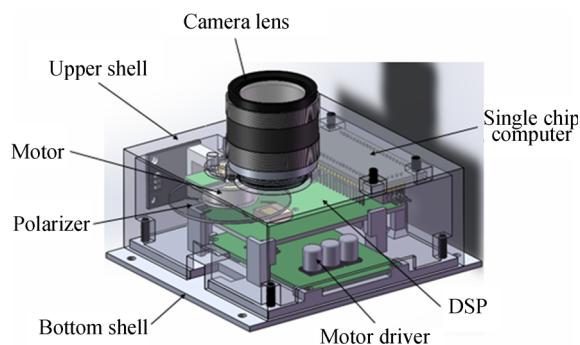


图 6 偏振相机结构设计图

Fig. 6 Structural design of polarization camera

3.4 系统软件设计

偏振相机软件分为相机端 DSP 程序、单片机程序和上位机程序三部分。

相机端 DSP 程序负责接收上位机传来的命令,同时控制相机采集图像并传回图像。相机充当服务器接收图像请求并发送图像,PC 机作为客户端发送请求。DSP 上运行 VCRT 实时操作系统,可用 C 语言开发用户程序,并利用 CCS IDE 编译生成 *.out 可执行文件并上传相机。



图 7 偏振相机实物照片

Fig. 7 Photo of polarization camera

单片机部分负责对两路光电开关的信号进行中断响应,并给出触发拍照的电平信号。

PC 上位机软件基于 Python 的 GUI 开发库 Tkinter 编写了图形用户界面,负责向相机发送指令、接收相机回传的图像数据并显示。

三部分程序之间相互协调完成检偏器旋转角度的探测和相机的曝光控制。系统程序流程如图 7 所示。系统上电,上位机发送图像请求之后,相机端接收请求并控制单片机的 PWM 输出打开,检偏器开始按设定速度匀速旋转。同时光电开关输出旋转检偏器的位置脉冲。单片机根据接收到的电平信号判断角度并给出触发相机拍照的脉冲

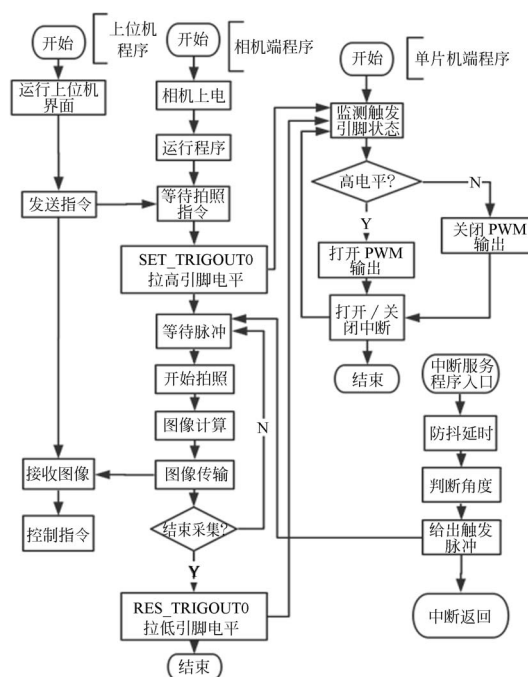


图 8 偏振成像系统程序流程图

Fig. 8 Program flow chart of polarization imaging system

信号。为了保证严格同步,图像请求事件由一个单线程产生,每隔 33 ms 上位机向 DSP 发送一次图像请求。这样采集到的图像序列就能够按照设定的角度顺序回传,并且没有错帧情况的出现。在图 8 的工作流程下,系统每秒采集 30 幅偏振强度图,这样通过解算每秒同样可以获得 30 幅偏振信息图。该系统相比于文献[5]中的机械旋转式偏振成像相机,速度提高了 21 倍。

4 性能实验

测试系统性能分为两部分,一部分为系统的线性度测量,另一部分为对实际物体和场景的偏振成像。测试系统性能时,采用的线偏振光光源由稳定的均匀光源通过线偏振器得到,如图 9 所示。精密转台由步进电机驱动,带动检偏器实现特定位移和恒定角速度的转动。通过改变检偏器的取向,可以获得特定角度的线偏振光,偏振光的相对偏振角可以通过电机的转动角度获得。

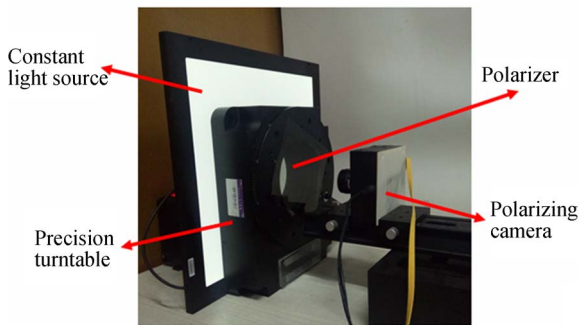


图 9 偏振成像探测系统测试实物图

Fig. 9 Test of polarization imaging detection system

对该装置进行重复测试,共采集 18 组数据,每组数据包含 90 张强度图像数据,即 90 幅偏振信息,相邻两组数据之间线偏振光的偏振角相差 5°。求解出每一组数据中特定点的偏振角数据,所解算的偏振信息为图像中心 3×3 个像素点偏振信息的平均值,绘出的图像如图 10 所示。根据线性度的定义,在图 10 的曲线中,测量点与拟合点之间的最大偏差为 2.11°,而偏振角的测量范围为 -45°~45°,因而相机对偏振角测量的线性度为 2.34%。由图 10 中的数据可以得出,相机对同一角度测量的平均可重复精度为 0.98°(3σ),大于文献[5]中的机械旋转偏振相机在 3σ 意义下的可重复精度 0.069°。由此可见,由于提升了相

机的测量速度,其测量的线性度和可重复精度均有所下降。

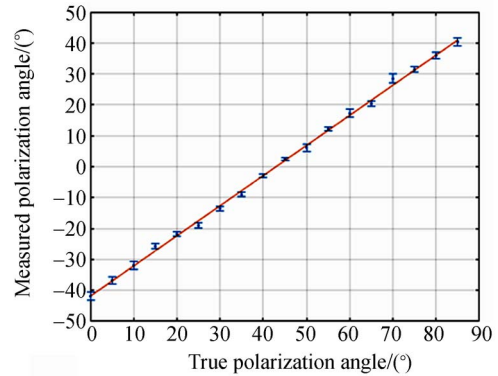


图 10 偏振角重复测量曲线

Fig. 10 Fitting curve of measured and true polarization angles

为了测试系统的动态性能,令转台以 25 (°)/s 的角速度匀速转动,利用偏振相机对转动中的转台进行偏振角采集,得到的结果如图 11 和图 12 所示。其中,每两个采样点的时间间隔为 0.033 s。

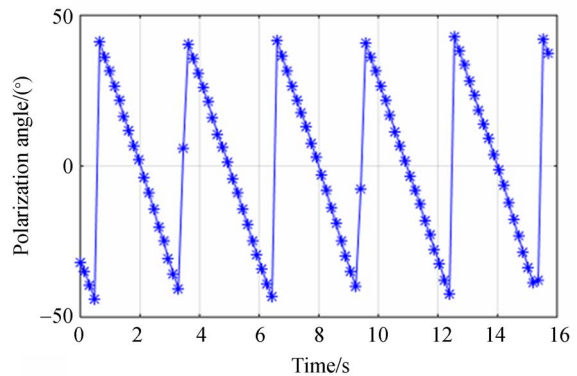


图 11 转台以 25 (°)/s 旋转时测得的偏振角

Fig. 11 Polarization angle measured at 25 (°)/s

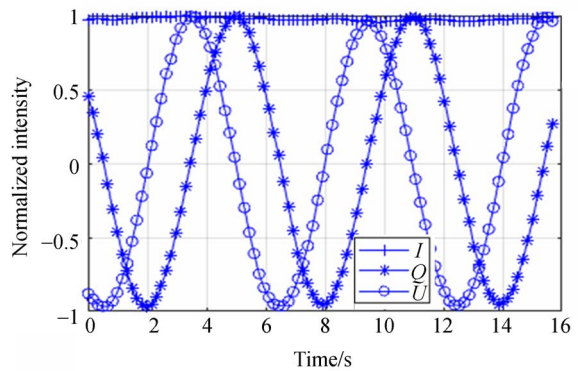


图 12 转台以 25 (°)/s 旋转时测得的 I, Q, U 参量

Fig. 12 I, Q, U measured at 25 (°)/s

当转台速度为 $25\text{ }(^{\circ})/\text{s}$ 时,被测偏振光的极化方向也以 $25\text{ }(^{\circ})/\text{s}$ 的速度变化,因而测得的偏振角在 $-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间连续变化,对应的偏振参量也会连续变化。图 11 和图 12 分别给出了被测得的偏振角及对应的 Stokes 参量 I, Q, U 随时间变化的关系(由于数据点较多,为了便于观察,每 5 个数据点之间的数据点并未画出)。从图 12 可以看出, I, Q, U 值随着偏振光偏振方向的转动而变化,其相对关系满足 Stokes 参数模型^[5]。

为了验证系统对实际物体的偏振成像效果,同时利用传统机械旋转偏振相机与本文快速成像偏振相机对清华大学中央主楼进行了拍摄。传统机械偏振相机由工业相机(德国 VC 公司相机,型号:VCSBC6211nano)与精密角度旋转机构(日本西格玛电动数控分度盘型号:100)组成,采用启停式的工作方式,成像速率为每 5 s 一帧偏振图像。图 13(a)~13(c)为快速成像偏振相机获取的偏振图像,其中图 13(a)为原始灰度图像,图 13(b)

为解算得到的偏振度图像,图 13(c)为偏振角图像信息。由偏振度图 13(b)可以看出,图像中亮度较高的区域为原始图像中建筑物玻璃窗的区域。这是由于玻璃的表面反射率高,因而对玻璃表面成像所得到的偏振度就会较高,图中玻璃表面的偏振度为 $0.2\sim 0.5$ 左右,属于视场中偏振度较高的部分,而建筑物的墙面偏振度则很低,不到 5%。被拍到的天空区域的偏振度多在 0.1 左右,这是由于太阳光被散射所造成的偏振度较高。从偏振角图 13(c)可以看出,对于图像中偏振度较高的部分如天空、玻璃窗等,其偏振角较均匀,而偏振度很低的墙面解算出来的偏振角也会杂乱无章。同时,观察传统机械旋转式偏振相机获取的图像 13(d)~13(f)也满足同样的规律,进一步说明了所测得的偏振信息的有效性。

本文实现了较高的成像帧率,并作为原理验证给出了样机,系统的偏振成像速率为 30 frame/s ,实现了动态偏振成像。

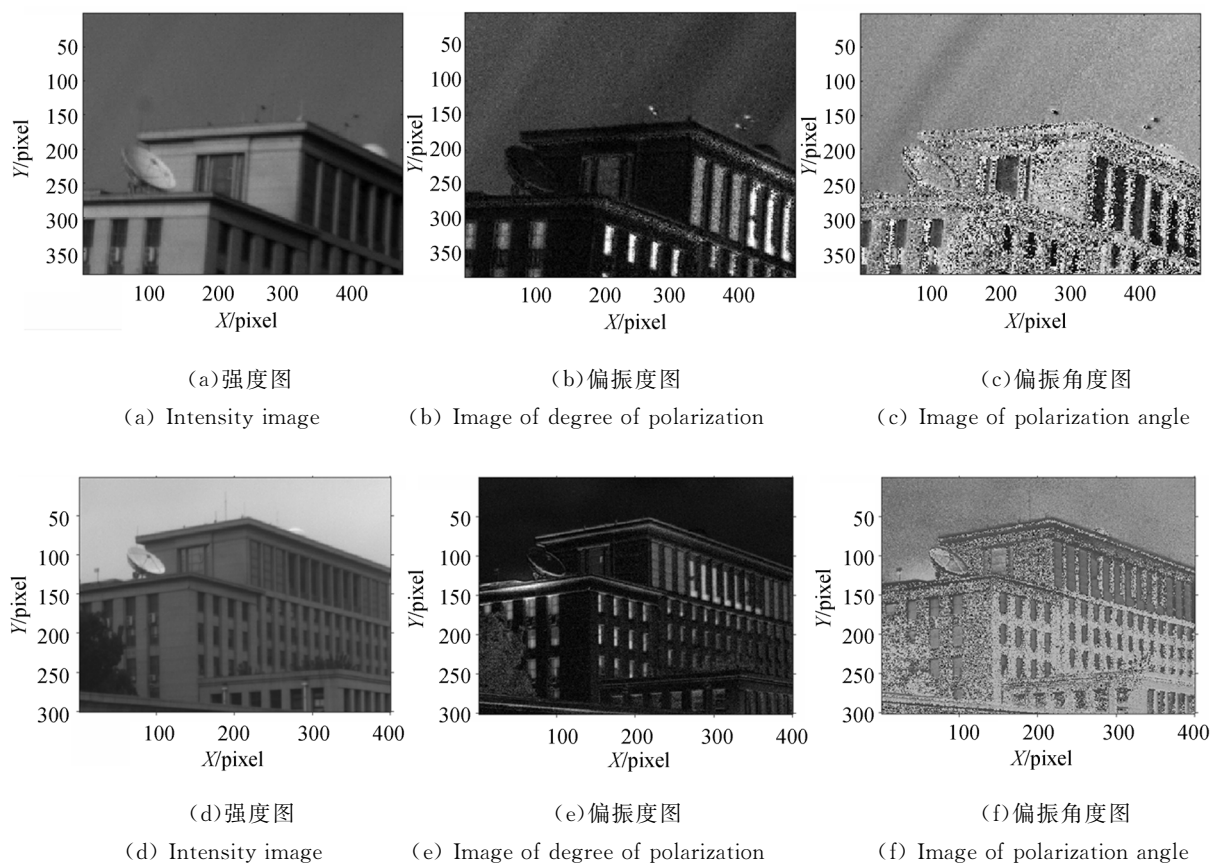


图 13 采集到的图像及其处理结果, (a)~(c):本工作, (d)~(f):传统机械偏振相机

Fig. 13 Processing results of acquired images, (a)~(c) captured by proposed polarization imaging system, (d)~(f) captured by traditional camera

5 结 论

本文设计了一种快速偏振成像探测仪器,采用快速连续旋转检偏器的工作方式,同时优化了偏振图像的解算过程,充分利用每一幅强度图像,使得偏振图像的获取速度和强度图像的获取速度一致。该装置能够以 30 frame/s 的速率稳定地

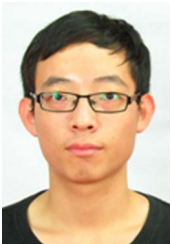
获取偏振图像,成像效率较传统机械旋转式探测仪器大为提高。本装置为进一步提高机械旋转装置的探测速率提供了新的思路,对本文所实现系统而言,影响其成像速率最大的因素是相机自身的成像帧率。如果将旋转检偏器与更高帧率的成像相机结合,则能进一步提升偏振成像速率,从而满足更高速运动目标的偏振探测需求。

参考文献:

- [1] WOLFF L B. Polarization vision: a new sensory approach to image understanding[J]. *Image and Vision Computing*, 1997, 15(2):81-93.
- [2] SMITH M H. Interpreting Mueller matrix images of tissues[J]. *SPIE*, 2001, 4257:82-89.
- [3] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, *et al.*. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(22):5453-5469.
- [4] SEKERA Z. Polarization of skylight[J]. *Geophysik II / Geophysics II*, 1957:288-328.
- [5] 卢皓,赵开春,马强,等.采用连续旋转检偏器的天空偏振光探测装置设计与实现[J].*宇航学报*, 2014, 35(9):1087-1094.
LU H, ZHAO K CH, MA Q, *et al.*. Design and implementation of detection system for skylight polarized pattern using continuously spinning polarization analyzer[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(9):1087-1094. (in Chinese)
- [6] 赵开春,卢皓,尤政.天空光偏振模式自动探测装置[J].*光学精密工程*, 2013, 21(2):239-245.
ZHAO K CH, LU H, YOU ZH. Automatic detection system for skylight polarized pattern[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):239-245. (in Chinese)
- [7] LABHART T, MEYER E P. Detectors for polarized skylight in insects: a survey of ommatidial specializations in the dorsal rim area of the compound eye[J]. *Microscopy Research & Technique*, 1999, 47(6):368-379.
- [8] WANG L, WANG Y L, WANG Z W, *et al.*. Bionic polarized light navigation sensor based on integrated photodetector[J]. *Transducer & Microsystem Technologies*, 2016, 35(1): 91-94.
- [9] FAN C, HU X, LIAN J, *et al.*. Design and calibration of a novel camera-based bio-inspired polarization navigation sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10):3640-3648.
- [10] MA H, XIONG J, GUO H, *et al.*. Autonomous integrated navigation model based on atmospheric polarization characteristics[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2):162-167.
- [11] 王玉杰,胡小平,练军想,等.仿生偏振视觉定位定向机理与实验[J].*光学精密工程*, 2016, 24(9):2109-2116.
WANG Y J, HU X P, LIAN J X, *et al.*. Mechanisms of bionic positioning and orientation based on polarization vision and corresponding experiments[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9):2109-2116. (in Chinese)
- [12] 范之国,陈曼丽,王波,等.基于大气偏振模式的三维姿态信息获取[J].*光学精密工程*, 2016, 24(6):1248-1256.
FAN ZH G, CHEN M L, WANG B, *et al.*. Three-dimensional attitude information obtained by the skylight polarization pattern[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6):1248-1256. (in Chinese)
- [13] 李淑军,姜会林,朱京平,等.偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J].*中国光学*, 2013, 6(6): 803-809.
LI SH J, JIANG H L, ZHU J P, *et al.*. Development status and key technologies of polarization imaging detection[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6):803-809. (in Chinese)
- [14] GIUDICOTTI L, BROMBIN M. Data analysis for a rotating quarter-wave, far-infrared Stokes polarimeter[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(14):2638-2648.
- [15] MATCHKO R M, GERHART G R. High-speed imaging chopper polarimetry[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(47):016001-016001-12.
- [16] SELLAR R G, BOREMAN G D. Limiting aspect

- ratios of Sagnac interferometers[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(11):3320-3325.
- [17] OHFUCHI T, SAKAKURA M, YAMADA Y, *et al.*. Polarization imaging camera with a waveplate array fabricated with a femtosecond laser inside silica glass [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20):23738-23754.
- [18] 王朋, 荣志斌, 何俊华, 等. 基于压缩感知的偏振光成像技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2):274-280.
- WANG P, RONG ZH B, HE J, *et al.*. Polarization imaging based on compressed sensing theory [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45(2):274-280. (in Chinese)
- [19] XU C, HE L, WANG X, *et al.*. Design of high speed processing module for infrared polarization imaging system[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2017, 46(2):204002.

作者简介:



韩 勇(1995—),男,山西长治人,博士研究生,2017年于清华大学精密仪器系获得学士学位,主要从事微机电系统技术的研究。E-mail: hanyong17@mails. tsinghua. edu. cn



尤 政(1963—),男,江苏扬州人,博士,教授,中国工程院院士,长江学者,研究方向为微米/纳米技术、微光机电系统集成及微纳卫星技术。E-mail: yz-dpi@mail. tsinghua. edu. cn

通讯作者:



赵开春(1973—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,清华大学精密仪器系教师,研究领域为微纳仿生光栅器件的设计、制备与测试,仿生导航传感器的设计、构建与环境试验,微小卫星的姿态测量与控制技术。E-mail: kaichunz@mail. tsinghua. edu. cn