

〈综述与评论〉

偏振成像技术的进展

赵劲松

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 介绍了截至 2013 年偏振成像技术的研究进展。总结了偏振成像技术的主要研究内容。分别介绍了偏振成像技术方案分类, 红外偏振成像仪和偏振焦平面探测器, 偏振成像试验, 以及偏振光线追迹的最新研究进展。

关键词: 偏振成像技术; 偏振成像仪; 偏振焦平面; 偏振光线追迹

中图分类号: TN223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)12-0743-08

Developments of Polarization Imaging Technology

ZHAO Jin-song

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: In this paper developments of polarization imaging technology are presented. Questions to be answered for polarization and polarimetry are summarized. The mainly achievements of research works for polarization measurement methods and types, infrared imaging polarimeters, polarimetric FPAs, trials of polarization imaging and polarization ray-tracing are presented respectively.

Key words: polarization imaging technology, polarimeter, polarimetric FPA, polarization ray-tracing

0 引言

光波是电磁波的一个波段, 光波的信息非常丰富, 包括: 振幅(光强)、频率(波长)、位相、偏振态(光波电磁场的振动方向)4种独立的信息。一般的成像技术只探测一定光波段的强度。能够探测景物光波偏振态的成像技术, 就是偏振成像。

偏振成像技术的主要研究内容包括: 什么是偏振光? 自然光是非偏振光, 还是偏振光? 用什么参数描述偏振光? 光的传播方式(自发辐射、反射、散射、透射和衍射)如何影响光的偏振特性, 如何定量描述? Fresnel 公式、Jones 矩阵、Mueller 矩阵在光波偏振现象中有何应用? Rayleigh 散射和 Mie 散射对光波的起偏作用及其异同点是什么? 人造(目标)物体与自然(背景)物体的偏振特性有何差异? 偏振成像的工作原理是什么? 有哪些技术方案可以实现偏振成像? 在设计偏振成像系统时, 空间和时间分辨率如何权衡? 偏振信息如何进行图像融合处理, 以及可视化显示? 误偏振信息的来源是什

么, 如何校正之? 偏振成像有什么用途? 不同波段的偏振成像有何差别? 如何研制偏振光学元器件? 如何研制偏振探测器? 偏振光学元件和偏振成像整机性能如何描述和检测? 偏振成像如何建模和仿真? 在设计光学系统时, 偏振光线如何追迹? 如何建立偏振点扩散函数(Polarization PSF), 偏振传递函数(Polarization MTF)和噪声等效线偏振度(Noise Equivalent Degree of Linear Polarization)数学模型, 如何测量之? 总之偏振成像是一种新的成像技术, 需要建立一套完整的理论体系, 及专业配套的技术体系。

国外对偏振成像技术的研究已开展了 30 多年^[1]。进入 20 世纪 90 年代以后在红外偏振成像技术领域得到了迅猛发展, 在最近的十年多里涌现出许多偏振红外成像样机和商品, 并研制出了偏振红外焦平面探测器。仅 SPIE 专集自 1997 年至 2013 年已出版 16 部^[2-17]。国外对偏振成像技术的研究已经取得了丰硕的成果, 目前还没有普及, 国内在该领域尚处于起步探索阶段。

收稿日期: 2013-11-20; 修订日期: 2013-12-10.

作者简介: 赵劲松, 男, (1972-), 光学工程专业博士, 教授级高级工程师。主要研究红外光学、热像仪总体技术、红外光学及热像仪测试技术。E-mail: zhaojinsong@tsinghua.org.cn.

本文将介绍偏振成像技术方案、偏振成像样机、偏振成像试验和偏振光线追迹的最新研究进展。

1 偏振成像技术方案研究进展

目前报道的偏振成像技术方案已有几十种,而且新的方案还在不断被发现。偏振成像技术方案与偏振成像分类密切相关。最典型的偏振成像技术方案分类如下:

1) 按照光源照明方式划分,有被动式偏振成像和主动式偏振成像。

2) 按照偏振成像完备程度划分,有偏振差(Polarization Difference)成像、不完备(Incomplete)偏振成像、全斯托克斯/完备(Full-Stokes/Complete)偏振成像。

3) 按照同一像素偏振分量获取方式划分,有分孔径(Aperture Division)偏振成像、分振幅(Amplitude Division)偏振成像、分时(Time Sequential/Division of time)偏振成像和分焦面(Division of focal plane)偏振成像。

4) 按照工作波段选择划分,有紫外偏振成像、可见光偏振成像、短波红外偏振成像、中波红外偏振成像、长波红外偏振成像、太赫兹偏振成像、毫米波偏振成像等。

5) 按照与光谱信息的复合方式,有双色偏振成像、多波段偏振成像、多光谱偏振成像、高光谱偏振成像。

6) 按照偏振光学元件划分,有采用金属丝栅偏振片和波片(Polarizer and Retarder)的偏振成像、有基于棱镜(Prism-based)偏振分光的偏振成像、有采用玻璃堆(Pile-of-plates)偏振分光的偏振成像、有采用液晶(Liquid Crystal)空间光调制器(Spatial Light Modulator)的偏振成像等。

7) 按照偏振光学元件的伺服控制方式划分,有步进扫描偏振成像、连续旋转(Continuously Spinning Polarizer)偏振成像、快照(Snapshot)偏振成像等。

8) 按照图像融合方式划分,有灰度融合偏振成像、RGB三原色融合偏振成像、HSV彩色空间(HSV Color-space)融合偏振成像、叠印(Superimposition)偏振成像、时序融合(Temporal fusion)偏振成像。

此外,还有计算层析成像通道光谱偏振仪(Computed Tomography Imaging Channeled Spectropolarimeter),基于傅里叶变换红外光谱仪的宽波段红外偏振仪(Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometer-based Broadband Infrared Polarimeter),相移/相位步进成像偏振仪(Phase Shifting/Stepping Imaging Polarimeter),三维/立体成像偏振仪(Three-dimensional/Stereo Imaging Polarimeter)等复杂偏振成像技术。

2 偏振成像仪和偏振探测器的主要进展

国外相继报道的红外偏振成像仪和红外偏振焦平面探测器比较多,下面重点介绍短波、中波、长波和多光谱红外偏振成像研究进展情况。

2.1 短波红外偏振成像仪

Lockheed Martin公司研制的短波红外偏振成像仪,采用四通道偏振分光组件方案,见图1^[18]。近红外和短波红外偏振成像技术目前国外在星载遥感和天文观测中比较普及。

2.2 中波红外偏振成像仪

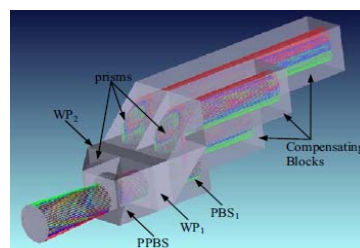
Polaris公司是专门开发偏振成像仪的传感器技术公司,目前已经推出了可见光、短波红外、中波红外和长波红外系列偏振成像仪商品。其向市场推出的中波红外偏振成像仪采用微透镜阵列和偏振片阵列集成分孔径技术方案,见图2^[19-20]。

2.3 长波红外偏振成像仪

DBE公司研制的长波红外偏振成像样机及其偏振度图像见图3^[21]。Polaris公司开发的长波红外偏振成像仪有3个型号^[22-23],分别是Corvus LWIR Polarimeter、Vela LWIR Polarimeter、LWIR Ursa Polarimeter。



(a) 样机照片



(b) 四通道偏振分光组件

(a) Prototype (b) The Beam Splitter Assembly (BSA) splits the light up in to four polarimetric channels

图1 短波红外偏振成像仪

Fig.1 SWIR imaging polarimeter

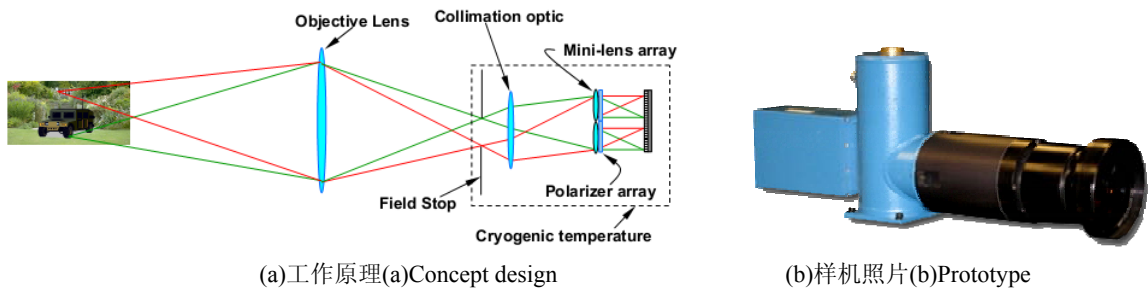


图 2 分孔径中波红外偏振成像仪 Fig.2 Division of aperture imaging polarimeter

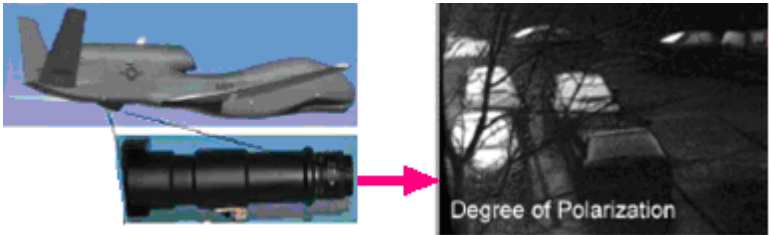


图 3 BDE 公司研制的长波红外偏振成像仪及其偏振度图像 Fig.3 LWIR Polarimetric Sensor for Airborne Platforms developed by BDE and DoP image

2.4 多光谱红外偏振成像仪

2011 年美国圣地亚国立实验室和亚利桑那大学联合研制了多光谱红外偏振成像仪，样机设计图和照片见图 4，其工作波段覆盖短波红外和中波红外并细分 1.51 μm 、2.32 μm 、3.51 μm 和 4.17 μm 四个光谱，属于 Stokes 偏振成像仪^[24-26]。2008 年 U.S. Army Research Laboratory 报道了光谱偏振成像仪^[27-28]，采用声光调谐滤波器方案，工作波长有 0.43~0.93 μm 和 1.8~4.5 μm 。早在 1999 年阿拉巴马大学就报道了多光谱红外 Stokes 成像偏振仪研制情况，其工作波段覆盖中波和长波红外^[29]。

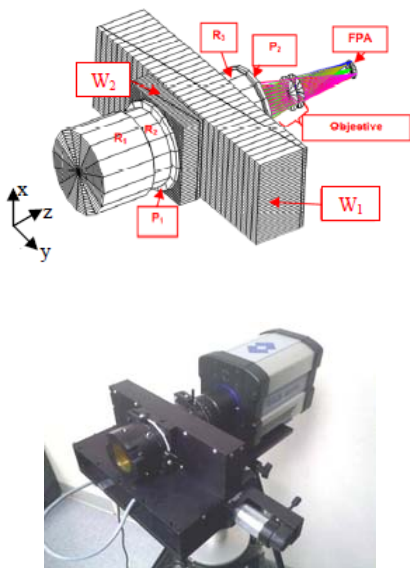


图 4 多光谱红外偏振成像仪三维设计图和样机照片 Fig.4 The concept design and photograph of prototype

2.5 偏振焦平面探测器

最先进的红外偏振成像技术方案是采用红外偏振焦平面探测器。

2000 年和 2001 年美国陆军研究实验室报道了量子阱 (QWIP) 长波红外偏振热成像仪^[30-31]。2007 和 2008 年法国 Thales 公司相继报道了 QWIP 长波红外偏振焦平面探测器及其偏振成像仪^[32-34]，2009 和 2010 年报道了 QWIP 长波红外多光谱/偏振成像仪及其进展，三种响应波长分别为 8.2 μm ，9.1 μm ，10.4 μm （在后期报道中被修改为 11 μm ），见图 5^[35-36]。

2007 年乔治亚州立大学的 A. G. U. Perera 等人报道了隧道效应量子点 (T-QDIP) 双波段红外偏振焦平面探测器^[37]。DRS 公司报道了 HDVIP LWIR HgCdTe FPA 偏振成像传感器^[38]。

2011 年 Raytheon 公司报道研制出中波红外、长波红外、中/长双色凝视型 FPA 和长波扫描型 FPA 等各种红外偏振焦平面探测器，都达到了极高的性能，阵列规模不断在增大^[39]。

3 试验研究进展

通过偏振成像试验可以研究其特点和用途。国外报道的部分典型试验见下文。

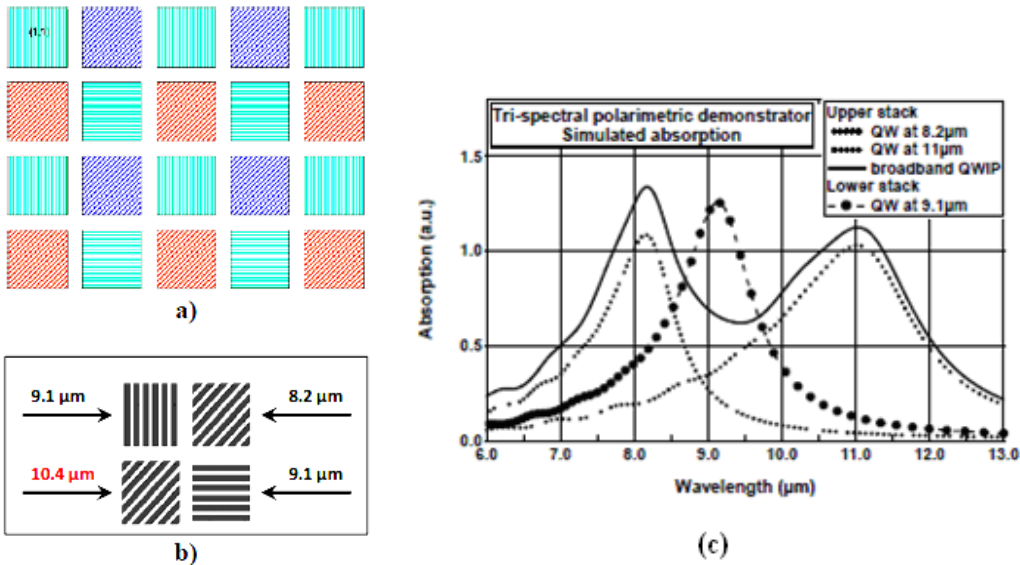
3.1 球体自发辐射试验

2009 年 Michael W Kudenov 等人在文献[22]中给出对 125 mm 直径黑曜石玻璃球自发辐射的长波红外偏振成像结果，见图 6，(a)为试验装置照片，(b)为 Stokes 4 偏振分量灰度图，(c)为偏振彩色融合图。这说明黑曜石玻璃球体自发辐射长波红外是部分偏振光，偏振信息大小与发射角度有关。

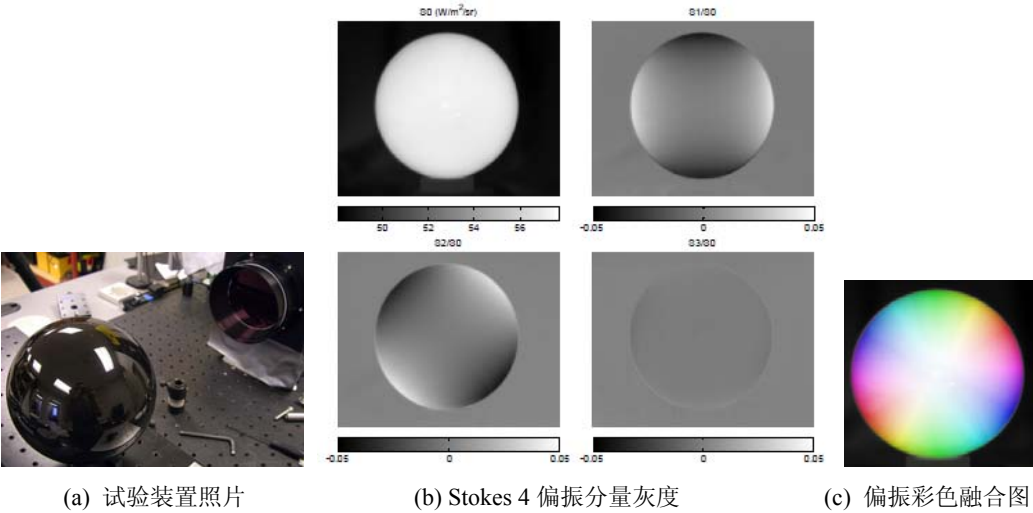
3.2 对阴影区目标成像试验

2006年 J. Scott Tyo 等人在文献[19]中给出的试验结果见图 7, (a)为可见光图像, (b)为长波红外图

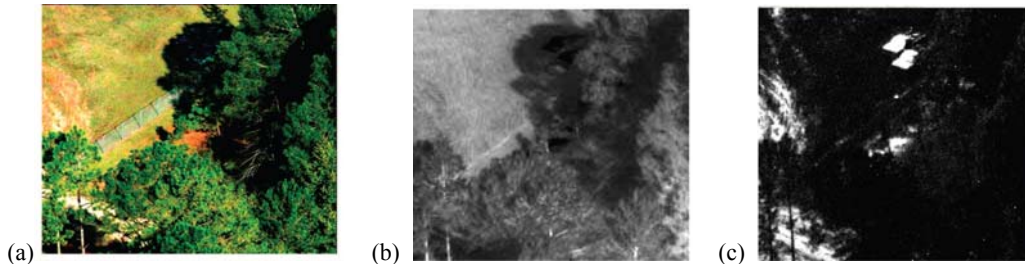
像, (c)为长波红外偏振图像。很明显长波红外偏振成像可以提高阴影区目标和背景对比度。



(a)多光谱/偏振焦平面探测器的设计版图; (b)2×2 基本单元; (c)计算的吸收光谱曲线
(a) Multispectral/polarimetric FPA layout; (b) Initial 2×2 unit cell; (c) Calculated absorption spectrum
图 5 多光谱/偏振焦平面探测器 Fig.5 Multispectral/polarimetric FPA



(a) 试验装置照片 (b) Stokes 4 偏振分量灰度 (c) 偏振彩色融合图
(a) Obsidian glass sphere experimental setup with shroud removed in front of the polarimeter; (b) Stokes parameter images; (c) Color-fusion image of the obsidian glass sphere
图 6 黑曜石玻璃球的长波红外偏振成像试验 Fig.6 LWIR polarization imaging for the obsidian glass sphere



(a)Visible picture of two pickup trucks in the shadow; (b)LWIR intensity image; (c)LWIR polarization image
图 7 对阴影区目标的长波红外偏振成像试验 Fig.7 LWIR polarization imaging for man-made objects in the shadow

3.3 对海面小目标成像试验

2005 年 John Harchanko 等人进行了海面游泳者长波红外偏振成像探测试验, 见图 8, 结果显示线偏振度 DOLP 和线偏振分量 S_1 图像的目标与背景对比度远高于 S_0 分量 (光强) 图像^[40]。2008 年 John S. Harchanko 等人进行了海面小目标 (游泳者) 的红外偏振成像试验, 试验结果显示长波和中波的线偏振分量 S_1 的目标与背景对比度分别提高了 2 个数量级和 1 个数量级^[41]。

3.4 探测地雷红外偏振成像试验

2008 年 Barry Connor 等人报道了利用长波红外偏振成像探测散布在自然背景中的地雷, 见图 9, 左图为长波红外图像, 右图为长波红外偏振 Q 分量图像, 当地雷与背景温度很相近时, 普通长波红外热图像难以识别地雷, 而长波红外偏振图像很容易识别^[42]。

3.5 对车辆和建筑物成像试验

Polaris 公司发布的对车辆和建筑物的长波红外偏振成像彩色融合图, 见图 10, 车窗和屋顶的偏振信息很强^[23]。这是红外偏振成像完美的图像处理结果。

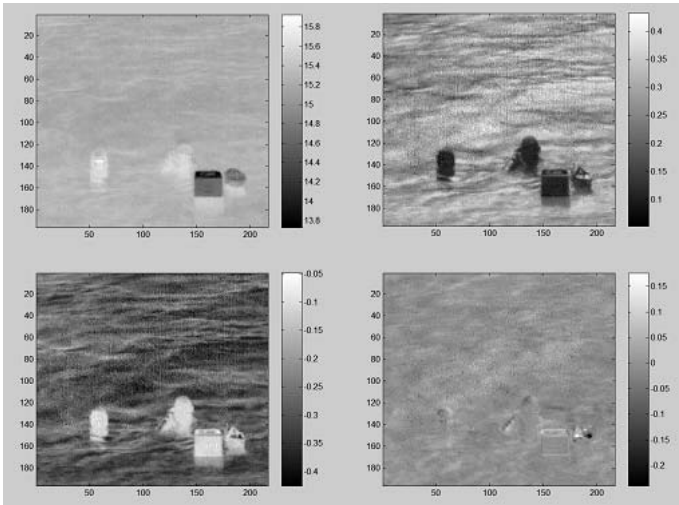


图 8 对海面游泳者进行长波红外偏振成像探测: (左上) S_0 , (右上) DOLP, (左下) S_1 , (右下) S_2

Fig.8 The radiance (S_0) image calibrated to apparent temperature in degrees Celsius (UL), the DOLP image (UR), S_1 image (LL), and the S_2 image (LR)

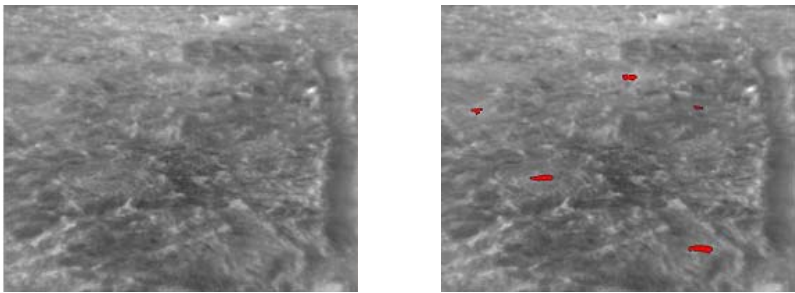


图 9 散布在背景中五个人造物体的热图像和偏振探测图像叠印于金属物体热图像的融合结果

Fig.9 Thermal image of 5 man-made objects flush with the background and Polarimetric-based detections superimposed on a thermal image of metal objects

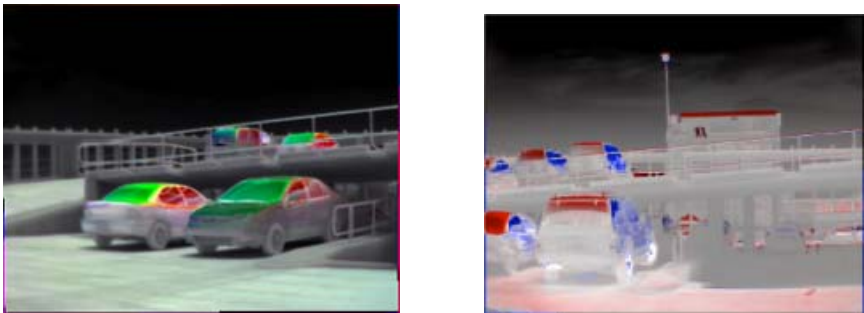


图 10 对车辆和建筑物成像试验结果

Fig.10 Color-fusion images of cars and buildings

3.6 多光谱红外偏振成像试验

前文图 4 提到的多光谱红外偏振成像仪的偏振成像试验结果见图 11，其中：(a)对应波长 1.51 μm ，(b)对应波长 2.32 μm ，(c)对应波长 3.51 μm ，(d)对应波长 4.17 μm 。该试验揭示了偏振信息与光谱信息的强弱是有关联的。

3.7 纯净天空可见光偏振成像试验

2007 年，Nathan J. Pust 和 Joseph A. Shaw 报道了全天可见光偏振成像研究结果^[43]。2009 年再次报道了全天可见光偏振成像测试结果，见图 12，左图为光强图像，中图为线偏振度 DoLP 图像，右图为偏振角 AoP 图像，全天 DoLP 图像上方区域是高线

偏振度带^[44]。

4 偏振光线追迹理论研究进展

由于偏振成像是近十多年来一种新兴的成像技术，在传统的光学系统设计理论和软件中没有相关的内容。以 Russell A. Chipman 为首的科学家专门成立了亚利桑那大学偏振实验室（University of Arizona Polarization Laboratory），进行偏振成像技术研究和偏振光线追迹理论研究，并开发了专门的软件 Polaris。该偏振实验室在 2011 年公布的研究成果及 Polaris 光线追迹演示结果见图 13~图 16^[45]。

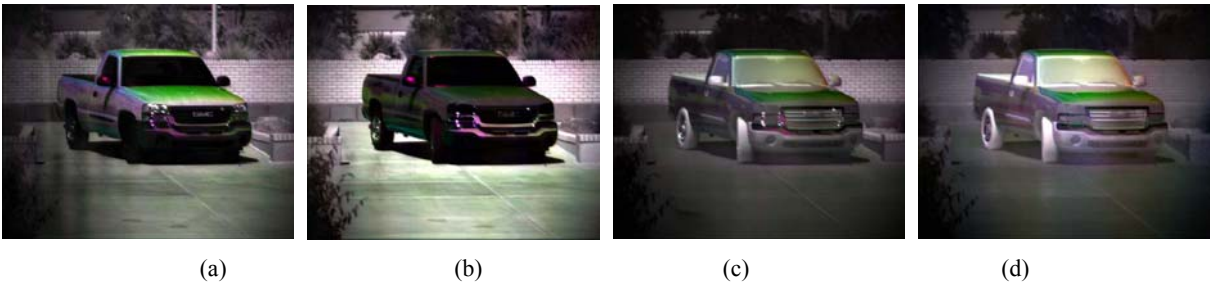


图 11 线偏振度彩色融合图，波长为(a) $\lambda=1.51\ \mu\text{m}$ ，(b) $\lambda=2.32\ \mu\text{m}$ ，(c) $\lambda=3.51\ \mu\text{m}$ ，(d) $\lambda=4.17\ \mu\text{m}$ 。

Fig.11 Color-fusion DoLP data recovered in the SWIR: (a) $\lambda=1.51\ \mu\text{m}$; and (b) $\lambda=2.32\ \mu\text{m}$; recovered in the MWIR: (c) $\lambda=3.51\ \mu\text{m}$; and (d) $\lambda=4.17\ \mu\text{m}$

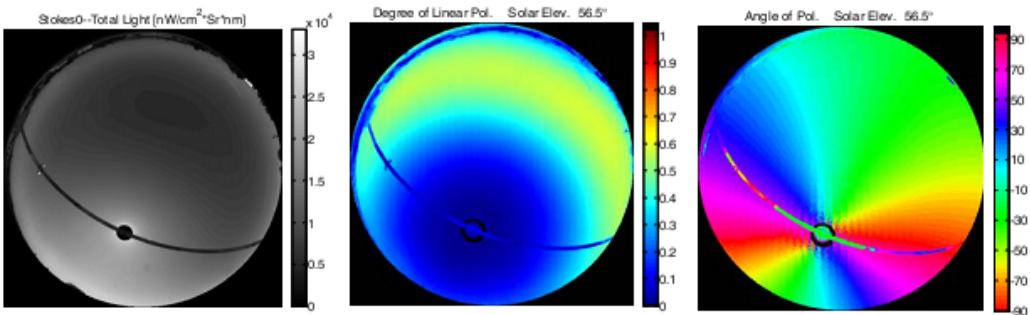


图 12 2009 年 7 月 23 日上午 11:45 时全天 450 nm 可见光偏振成像测试结果：（左）光强图像，（中）线偏振度 DoLP 图像，（右）偏振角 AoP 图像

Fig.12 Example images of sky polarization taken with the 450-nm channel of the polarimeter at 11:45 am local time (MDT) on 23 July 2009: (left) intensity image; (center) degree of linear polarization (DoLP); (right) angle of polarization (AoP) image

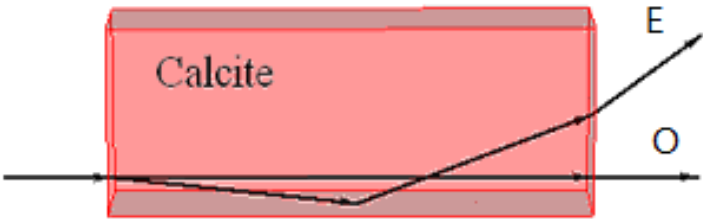


图 13 在方解石块中光线被分光。寻常 (O) 光沿直线传播，异常 (E) 光被折射、被底面全反射、然后折射出方解石块

Fig.13 Ray-splitting in a block of calcite. Ordinary ray travels straight while extraordinary ray refracts and undergoes total internal reflection at the bottom surface before refracting out of the calcite block

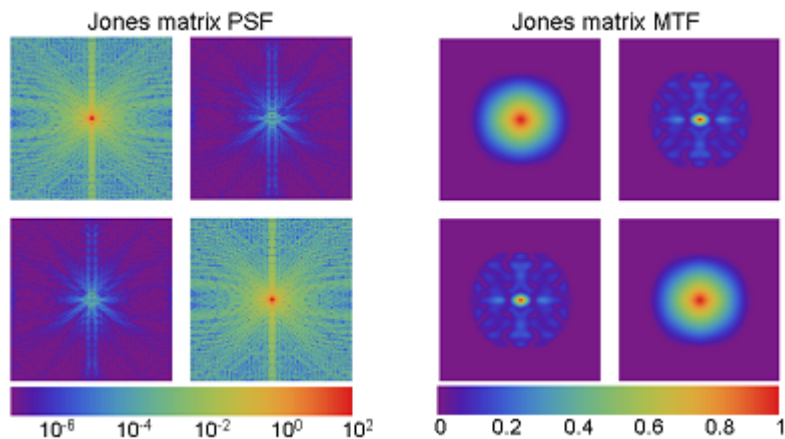


图 14 由注塑成型导致应力双折射，塑料单透镜的偏振特性用琼斯矩阵的点扩散函数和调制传递函数表示

Fig.14 Polarization performance of a single plastic lens with stress birefringence from injection molding is described in terms of Jones matrix elements

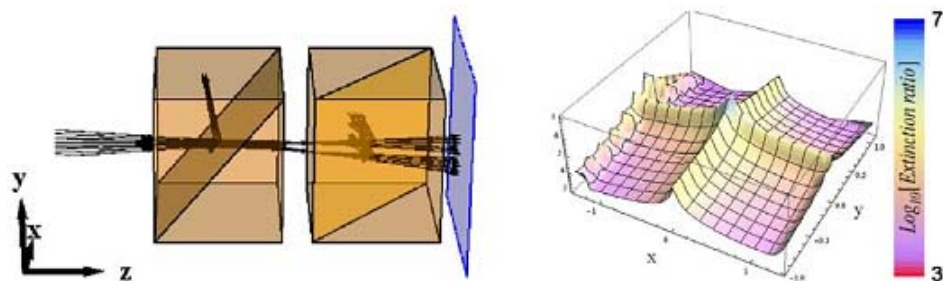


图 15 圆偏振光线追迹通过 2 块 Glan-Taylor 偏振片，在 $\pm 3^\circ$ 视场内消光比变化值得考虑

Fig.15 Circularly polarized rays traced through two Glan-Taylor polarizers with crossed axes, extinction ratio varies considerably across a $\pm 3^\circ$ field of view

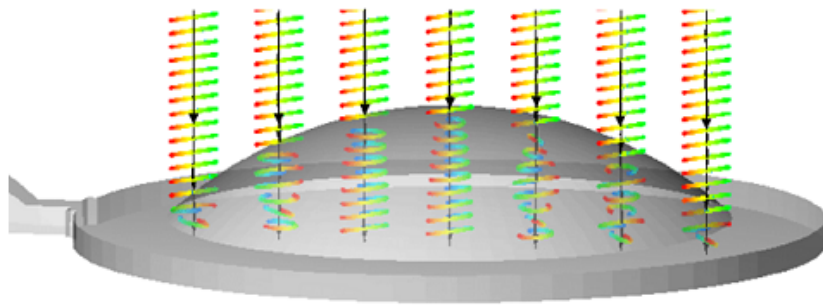


图 16 光线传播通过注塑成型透镜的应力双折射有限元模型，在传播中偏振态变化依赖于局部应力张量

Fig.16 A line of rays propagating through a finite-element model of stress-birefringence in an injection molded lens, polarization changes on propagation depend on local stress tensor

5 总结与展望

偏振是光波的一种独立信息，偏振成像技术研究内容非常广泛。国外在偏振成像技术方案、偏振成像仪、偏振焦平面探测器、偏振成像试验和偏振光线追迹理论研究方面取得了丰硕成果。偏振成像为传统的光强成像增加偏振附加信息，可以有效抑制嘈杂背景信号，是一种实现立体成像和彩色成像的技术路线，能有效提高探测识别人造目标物体的能力，具有广阔的军事和民用应用前景。

为了建立一套完备的偏振光学理论体系以及配套专业齐全的偏振成像技术体系，对该领域还需要不断地探索和研究。

参考文献:

[1] Walraven R. Polarization Imagery[J]. *Opt. Eng.*, 1981, **20**(1): 14-18.

[2] Dennis H Goldstein, Russell A Chipman. Polarization Analysis, Measurement, and Remote Sensing I [C]. *SPIE*, 1997, **3121**:1-490 .

[3] Dennis H Goldstein, David B Chenault. Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing II [C]. *SPIE*, 1999, **3754**: 1-426.

- [4] David B Chenault, Michael J Duggin, Walter G Egan, et al. Polarization Analysis, Measurement, and Remote Sensing III[C]. *SPIE*, 2000, **4133**: 1-302.
- [5] Dennis H Goldstein, David B Chenault, Walter G Egan, et al. Polarization Analysis, Measurement, and Remote Sensing IV[C]. *SPIE*, 2001, **4481**: 1-324.
- [6] Dennis H Goldstein, David B Chenault. Polarization Measurement, Analysis, and Applications V[C]. *SPIE*, 2002, **4819**: 1-206.
- [7] Joseph A Shaw, Scott J Tyo. Polarization Science and Remote Sensing I [C]. *SPIE*, 2003, **5158**: 1-259.
- [8] Dennis H Goldstein, David B Chenault. Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VI[C]. *SPIE*, 2004, **5432**: 1-186.
- [9] Joseph A Shaw, Scott J Tyo. Polarization Science and Remote Sensing II [C]//*SPIE*, 2005, **5888**: 588801-1-58881F-8.
- [10] Dennis H. Goldstein, David B. Chenault. Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VII [C].*SPIE*, 2006, **6240**: 624001-1-62400O-11.
- [11] Joseph A. Shaw, J. Scott Tyo. Polarization Science and Remote Sensing III[C]. *SPIE*, 2007, **6682**: 66820A-1-668219-9.
- [12] David B. Chenault, Dennis H. Goldstein. Polarization Analysis, Measurement, and Remote Sensing VIII [C]. *SPIE*, 2008, **6972**: 697201-1-69720Z-11.
- [13] Joseph A. Shaw, J. Scott Tyo. Polarization Science and Remote Sensing IV[C]. *SPIE*, 2009, **7461**: 74610A-1-746115-15.
- [14] David B. Chenault, Dennis H. Goldstein. Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing IX [C]. *SPIE*, 2010, **7672**: 767201-1-76720T-12.
- [15] Joseph A Shaw, Scott J Tyo. Polarization Science and Remote Sensing V[C]. *SPIE*, 2011, **8160**: 816001-1-816015-7.
- [16] David B Chenault, Dennis H Goldstein. Polarization Analysis, Measurement, and Remote Sensing X [C]. *SPIE*, 2012, **8364**: 836401-1-83640U-8.
- [17] Joseph A Shaw, Daniel A LeMaster. Polarization Science and Remote Sensing VI[C]//*SPIE*, 2013, **8873**.
- [18] Jason Mudge, Miguel Virgen. Near-infrared simultaneous Stokes imaging polarimeter: integration, field acquisitions, and instrument error estimation[C]. *SPIE*, 2011, **8160**: 81600B-1-81600B-14.
- [19] J Scott Tyo, Dennis L Goldstein, David B Chenault, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(22): 5453-5469.
- [20] J Larry Pezzaniti, David B Chenault. A division of aperture MWIR imaging polarimeter[C]//*SPIE*, 2005, **5888**: 58880V-1-58880V-12.
- [21] Bodkin Design & Engineering, LLC. Polarimetric Sensor for Airborne Platforms[EB/OL]. [2012]. <http://www.bodkindesign.com/>.
- [22] Michael W Kudenov, J Larry Pezzaniti, Eustace L Dereniak, et al. Infrared Stokes imaging polarimeter using microbolometers[C]//*SPIE* 2009, **7419**: 741908-1-741908-12.
- [23] Polaris Sensor Technologies. LWIR DoA polarimeter[EB/OL]. [2008]. <http://www.polarissensor.com>.
- [24] Julia Craven Jones. Infrared *Hyperspectral Imaging Stokes Polarimeter*[M]. Ph. D. dissertation, The University of Arizona, 2011.
- [25] Julia Craven-Jones, Michael W Kudenov, Maryn G Stapelbroek, et al. Preliminary Results from an infrared hyperspectral imaging polarimeter[C]. *SPIE*, 2011, **8160**: 81600T-1-81600T-12.
- [26] Julia Craven-Jones, Michael W Kudenov, Eustace L Dereniak. Tunable interference contrast using a variable Wollaston prism[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(1): 013022-1-013022-7.
- [27] Neelam Gupta. Acousto-optic tunable filter based spectropolarimetric imagers[C]//*SPIE*, 2008, **6972**: 69720C-1-69720C-11.
- [28] Neelam Gupta. Hyperspectral imager development at Army Research Laboratory. [C]//*SPIE*, 2008, **6940**: 69401P-1-69401P-10.
- [29] Smith M H, Howe J D, Woodruff J B, et al. Multispectral infrared Stokes imaging polarimeter[C]//*SPIE*, 1999, **3754**: 137-143.
- [30] Daniel W Beekman, James Van Anda. Polarization Sensitive QWIP thermal imager[C]//*SPIE*, 2000, **4028**: 102-112.
- [31] Daniel W Beekman, James Van Anda. Polarization sensitive QWIP thermal imager[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, **42**: 323-328.
- [32] Alexandru Nedelcu, Hugues Facoetti, Eric Costard, et al. Small pitch, large format long-wave infrared QWIP focal plane arrays for polarimetric imagery[C]//*SPIE*, 2007, **6542**: 65420U-1-65420U-9.
- [33] Nicolas Perrin, Eric Belhaire, Patrice Marquet, et al. QWIP Development status at Thales[C]//*SPIE*, 2008, **6940**: 694008-1-696008-10.
- [34] Thomas Antoni, Alexandru Nedelcu, Xavier Marcadet, et al. High contrast polarization sensitive quantum well infrared photodetectors [J]. *Applied Phsics Letters*, 2007, **90**: 201107-1-201107-3.
- [35] John Parsons, Alan Christie, Robert Craig. A LWIR multispectral/polarimetric imager[C]//*6th EMRS DTC Technical Conference*, Edinburgh: 2009: B2.
- [36] Alexandru Nedelcu, Vincent Guériaux, Arnaud Berurier, et al. LWIR multispectral/polarimetric imager developments. *7th EMRS DTC Technical Conference*, Edinburgh: 2010: B7.
- [37] A G U Perera, G Ariyawansa, V M Apalkov, et al. Wavelength and polari-zation selective multi-band tunneling quantum dot detectors[J]. *OPTO-ELECTR*, 2007, **15**(4): 223-228.
- [38] A I D'Souza, M G Stapelbroek, E Atkins, et al. HgCdTe and silicon detectors and FPAs for remote sensing applications[C]//*SPIE*, 2004, **5234**.doi:10.1117/12.510548.
- [39] Neil R Malone, Adam Kennedy, Roger Graham, et al. Staring MWIR, LWIR and 2-Color and scanning LWIR polarimetry technology [C]//*SPIE*, 2011, **8154**: 81540T-1-81540T-11.

(下转第 772 页)

分别为 763, 976。因此, 采用自适应阈值方法时, SIFT 特征点的数量更加接近于预设值。

4 结论

本文针对基于 SIFT 特征点的配准算法需要人工设置阈值参数的缺陷, 提出了一种视频图像的自适应 SIFT 特征点提取算法。该方法采用视频帧之间参数反馈的方法, 比较预设的特征点数量的期望值和前一帧视频的特征点数量的大小, 根据比较结果, 选用不同的非线性函数, 自动计算当前帧的阈值参数, 使得从当前帧提取的特征点数量趋近于期望值。

实际视频图像的实验表明: 在自动配准过程中, 该方法能够适应不同图像大小和图像内容的视频, 能够根据预设的特征点数量的期望值自动设置特征点的阈值参数, 使得特征点数量在图像大小和图像内容变化时, 保持相对的稳定性; 这样, 在保证图像配准精度的前提下, 大大地减小了后续的特征点匹配及优选、变换矩阵的计算及优化等数据处理计算量。该算法可以应用于自动图像配准, 对于自动图像拼接具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key-points[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**: 91-110.
- [2] Lowe D G. Local feature view clustering for 3D object recognition[C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 2001, Kauai, Hawaii: 682-688.
- [3] Krzysztof Slot, Hyongsuk Kim. Keypoints derivation for object class detection with SIFT algorithm[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, **4029**: 850-859.
- [4] Jo Yong-Gun, Lee Ja-Yong, Kang Hoon. Segmentation tracking and recognition based on foreground-background absolute features simplified SIFT and particle filters[C]//*IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2006, 1279-1284.
- [5] Yoon-Sik Tak, Eenjun Hwang. Combining shape and sift features for 3-D object detection and pose estimation[C]//*Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2010, **59**: 429-435.
- [6] Rattani A, Kisku D R, Lagorio A, et al. Facial template synthesis based on SIFT features[C]//*Proceedings of IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies*, 2007, 69-73.
- [7] Koenderink J J. The structure of images[J]. *Biological Cybernetics*, 1984, **50**: 363-396.
- [8] Lindeberg T. Scale-space theory: A basic tool for analysing structures at different scales[J]. *Journal of Applied Statistics*, 1994, **21**: 224-270.
- [9] Brown M, Lowe D G. Invariant features from interest point groups[C]//*British Machine Vision Conference*, 2002, Cardiff, Wales: 656-665.
- [10] K. Mikolajczyk, C. Schmid. An affine invariant interest point detector[C]//*European Conference on Computer Vision(ECCV)*, 2002, Copenhagen, Denmark: 128-142.
- [40] John Harchanko, David Chenault, Craig Farlow, et al. Detecting a surface swimmer using long wave infrared imaging polarimetry [C]//*SPIE*, 2005, **5780**: 138-144.
- [41] John S Harchanko, Larry Pezzaniti, David Chenault, et al. Comparing a MWIR and LWIR polarimetric imager for surface swimmer detection[C]//*SPIE*, 2008, **6972**: 697211-1-697211-11.
- [42] Barry Connor, Iain Carrie, Robert Craig, et al. Discriminative imaging using a LWIR polarimeter[C]//*SPIE*, 2008, **7113**: 71130K-1 - 71130K-11.
- [43] Nathan J Pust, Joseph A Shaw. All-sky polarization imaging[C]//*SPIE*, 2007, **6682**: 668204 -1-668204-6.
- [44] Nathan J Pust, Joseph A Shaw. How good is a single-scattering model of visible-NIR atmospheric skylight polarization?[C]//*SPIE* 2009, **7461**: 74610B-1-74610B-6.
- [45] University of Arizona Polarization Lab. Polarization RayTracing with Polaris[EB/OL]. 2011. <http://www.optics.arizona.edu/chipman/>.

(上接第 750 页)