

高分辨率光谱视频采集研究

马晨光¹, 曹 汛², 季向阳¹, 戴琼海¹

(1. 清华大学多维多尺度计算摄影学北京市重点实验室, 北京 100084; 2. 南京大学电子科学与工程学院, 江苏南京 210093)

摘 要: 相比于当前常用的红、绿、蓝三通道成像技术, 光谱采集能够提供更多的颜色通道, 从而更加精细地反映光源与场景的物理特性, 因此可以广泛应用于遥感、材料、医疗、环境等诸多领域. 光谱采集技术需要捕获光线在不同时刻和不同空间位置的光谱信息, 主要表现在光谱、时间、空间三个维度上的信息获取. 传统的光谱采集设备大多采用时序滤波或空间扫描机制记录光谱信息, 需要很长的成像时间, 因而不能用于光谱视频信息的采集. 近年来, 伴随着采样理论和电子元器件技术的迅速发展, 光谱的视频(动态)采集成为了可能. 本文着眼于近年来刚刚起步的光谱视频采集技术, 从采集技术的背景和基本原理出发, 对于近年来涌现的高分辨率光谱视频采集方法和系统进行介绍, 并对于基于直接采集和计算重构的各类技术手段展开讨论, 详细阐述这些方法的光学原理、采集理论以及实际系统构建中的问题. 此外, 本文对各种方法在光谱视频采集中的重要性指标和系统实际运行优缺点进行对比. 最后, 本文也对光谱视频采集的相关应用与发展前景进行了讨论.

关键词: 光谱; 视频采集; 分辨率

中图分类号: O433

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)04-0783-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.04.022

Research on High Resolution Hyperspectral Capture Technique

MA Chen-guang¹, CAO Xun², JI Xiang-yang¹, DAI Qiong-hai¹

(1. Beijing Key Laboratory of Multi-Dimension & Multi-Scale Computational Photography (MMCP), Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of ESE, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: Spectral capture technique collects information with more color channels than traditional trichromatic sensing. Therefore it provides more detailed properties of the light source and the scene. Possible applications span across lots of fields such as remote sensing, materials science, bio-photonics, environmental monitoring, computer vision and so on. Spectral capture technique needs to record massive data in spatial, temporal and spectral dimension, whereas traditional spectral capture systems suffer from temporal and spatial scanning which is not suitable for video capture. Nowadays, with rapid development in sampling theory and electronic techniques, spectral video acquisition is becoming feasible. This paper presents a review and comparisons on the capturing techniques of high resolution spectral video, especially on hyperspectral video capturing research. In the end, relative applications and future work of hyperspectral video capture are also discussed.

Key words: hyperspectral; video capture; resolution

1 引言

当前大多数成像摄影技术都是基于红、绿、蓝三色信息对于场景影像进行记录. 虽然三色传感成像技术符合人类视觉系统的基本成像需求, 然而从物理原理的角度出发, 现实场景并非只有三色信息这么简单. 从光源发出或经物体反射的光线具有丰富的波长, 其中可见光谱覆盖从 390nm 直至 780nm 的广泛区域, 包含了大量的光谱信息. 场景光线光谱正是指在这段波长范围内光线光

强的分布, 这种光谱信息能够反应出光源、物体以及场景的自然属性, 因此光谱采集技术已成为了进行科学研究与工程应用的有效工具.

如图 1 所示, 光线光谱经物体反射, 耦合场景信息后进入相机经传感器被采集, 传统彩色相机的三通道采集可以看作是光线光谱在三种颜色的积分曲线上进行积分量化的结果, 但正是这一积分的过程带来了光谱信息的大量丢失. 与此对应, 光谱测量则着眼于此过程中丢失的光谱信息. 从研究的发展历程来看, 针对光线光

谱测量这一问题的研究由来已久.与传统相机相对比,这种光谱采集研究的目标在于采集获取场景光线的真实光谱,早期的光谱仪实现了对于光线光谱信息的采集,但是只能对于单束光线进行捕捉,近些年来,高分辨率光谱采集技术的研究日益增多,从光谱分辨率的拓展,到空间分辨率的提升,已取得了长足的发展.但直到最近,光谱采集研究才进一步实现了在时间分辨率上的突破,完成了对于高分辨率高光谱视频的采集,能够捕获场景的空间维、时间维、光谱维三个维度上的大规模信息.

利用光谱采集技术得到的光谱信息为研究者与应用人员提供了场景更多的有效的特征,从遥感、材料等传统应用出发,现在光谱采集技术已经广泛地应用于军事安全、环境监测、生物科学、医疗诊断、科学观测等诸多领域^[1~6].特别是,随着光谱视频采集技术的突破和发展,在传统应用获得了全新发展契机的同时,很多计算机视觉、图形学领域的应用,如物体跟踪、图像分割、识别、场景渲染等等,也获得了不断的突破^[7,8].

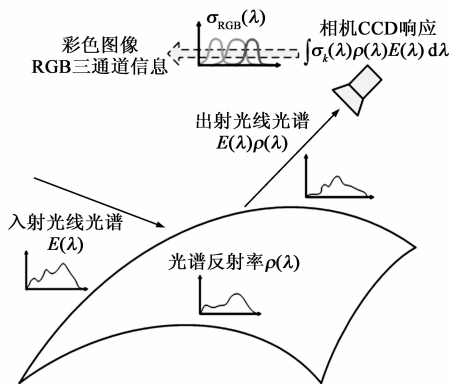


图1 场景光线光谱与彩色相机成像过程示意图

2 高光谱采集研究背景和发展

光谱采集技术和光学成像技术是两种历史悠久的又应用广泛的光学技术,长期以来,它们分别沿着各自的方向发展.光谱采集技术主要利用光线的散射(分光棱镜)^[4]、衍射(分光光栅)^[9]与滤光片^[10]的光谱域带通特性将单束光线在空间中变为单光谱光线进行采集,如图2所示.当光线在光谱维度上分开后,使用光传感器就能够对不同谱段的光线光强进行独立的测量,进而能够采集得到光线的光谱信息.20世纪80年代中后期,光学成像技术取得了长足的进步.伴随着传感器技术的飞速发展,以CCD(Charge-Coupled Device)电耦合器件为基础的成像设备逐渐成熟,其中CCD元件能够直接捕获光线,并将光学信号转换为模拟电流信号,进一步经过信号放大和模数转换后,便捷地实现了图像的获取.近些年来,研究者们将光谱采集技术与光学成像

技术相结合,优势互补,在空间维与光谱维同时对于场景进行复用采集,实现了更高分辨率、更高精度的光谱信息捕获,使得高光谱采集研究工作得到不断发展.

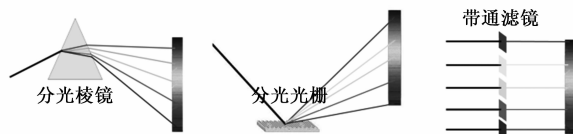


图2 光线散射、衍射与滤镜分光效果示意图

在高光谱采集,传统图像的每个像素红绿蓝三通道值被替换为其不同波长下光强信息的高维向量,因此高空间分辨率场景的高光谱成像结果是一个三维数据块,如图3所示.场景光谱数据在 x 、 y 两个空间维度的基础上,又增加了光谱维度 λ ,而其光谱通道的数量与连续程度决定了场景的光谱分辨率,相关的采集工作也据此可以分为多光谱采集与高光谱采集(一般来说,多光谱采集覆盖红外区域并且有少且窄的光谱通道,而高光谱采集则指对于可见光范围内的连续、多通道的采集).近些年来,随着技术的发展,场景单一时刻的高光谱成像采集已经不再能满足研究与应用的需求,高分辨率高光谱视频采集技术应运而生,研究者们旨在对于动态场景的多光谱数据进行实时的捕获与记录.所采集的数据从空间维到光谱维进一步又拓展至时间维,光谱数据在 x 、 y 、 λ 维度的基础上,又增加了时间维度 t .

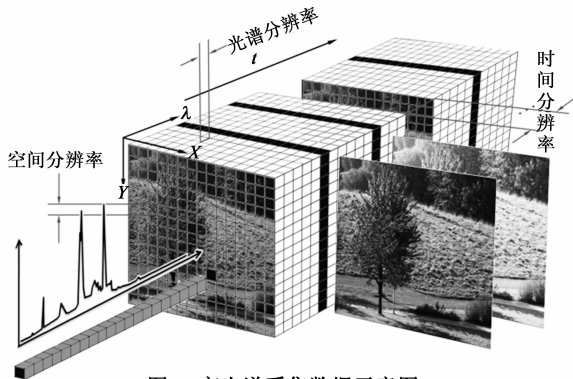


图3 高光谱采集数据示意图

高光谱数据在空间、光谱、时间维度上不断扩充丰富的过程正是光谱采集技术不断发展突破的过程^[11~17],采集技术的日新月异让我们对于物理世界的了解越来越详细、深刻^[18].下面,本文对于各种不同的光谱采集技术与方法进行详细的介绍.

3 基于扫描方法的高光谱采集技术

传统的光谱分析仪基于棱镜、光栅等分光元件可以对场景中单束光线进行光谱采集,具有很高的光谱分辨率;而普通成像设备虽能获得高空间分辨率,但光

谱分辨率却非常低.优势互补,传统成像光谱设备通常采用扫描的方法通过牺牲时间进行空间或光谱补偿.根据扫描维度的不同,扫描型光谱成像设备通常分为空间扫描型与光谱扫描型,而空间扫描型又根据扫描方式的不同分为掸扫式(whiskbroom)与推扫式(pushbroom)两种.

掸扫式的光谱成像设备使用单点扫描的方式,如图4所示,每次对于场景中一个像素点进行光谱采集,然后使采集点不断移动以覆盖整个场景,进而实现高空间分辨率的光谱成像,如W M Porter设计的AVIRIS系统^[19].而推扫式的光谱成像设备则使用狭缝扫描的方式,如图4所示,每次对于场景在空间上的一条狭缝进行光谱采集,设备不断推进以覆盖整个场景,因而也被称为推扫式,如R W Basedow设计的HYDICE系统^[20].

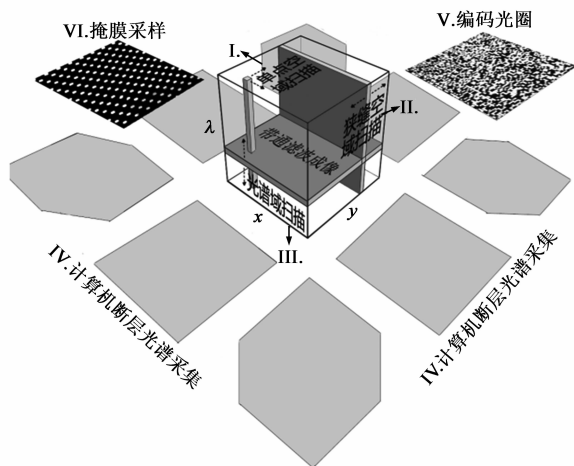


图4 各类光谱采集技术原理示意图

光谱扫描式光谱成像设备主要基于转轮式滤镜组或者可调式滤镜构建,这类设备将具有不同带通特性的滤镜片置于成像系统前,通过动态的更换或者调节滤镜片对于整个场景不同波段的信息分别进行成像记录,然后再进行融合以实现光谱成像.这类方法的代表性工作如:S Nayar 基于空间不一致滤镜的相机系统^[21,22],其在采集相机前放置一个具有空间不一致特性的滤镜片,利用相机的横向移动采集场景同一个点透过滤镜片不同位置的光线,等效实现了不同滤镜下的光谱信息的采集;N Gat 基于可调滤光器设计的光谱成像仪^[23]使用电控可调式滤光器作为核心器件,通过控制其带通特性即可实现对于不同波长段光谱信息的直接采集;M Yamaguchi 设计的基于转轮式滤镜组的采集设备^[10]将具有不同特性的滤光片组合构成转轮式滤镜组,通过不断的旋转更换滤光片实现对于不同波段光谱信息的采集与记录.

基于扫描方法的高光谱采集技术牺牲时间换取空

间与光谱分辨率,能够获得光谱数据在空间维度和光谱维度上的提升,但无法对动态场景进行实时采集.

4 瞬时拍摄式高光谱视频采集技术

由于扫描式光谱成像设备具有采集时间的瓶颈,在动态场景光谱采集需求的刺激下,瞬时拍摄式光谱视频采集技术应运而生.瞬时拍摄式光谱采集的目标在于只进行一次曝光,采集整个三维光谱数据块.然而从维度限制和数据规模的角度来讲,这种采集无法精确完整的进行,因此为实现单次拍摄采集,现有技术通常使用耦合采集加计算重构的方法进行.具体说来,首先通过成像设备的单次拍摄将待采集场景的三维光谱信息投影到二维相机平面进行耦合或者采样,然后对于采集数据进行后处理和计算重构,最终实现对于整个光谱数据块的获取.

4.1 基于计算机断层扫描的高光谱采集技术

计算机断层扫描光谱采集系统 CTIS (Computed Tomographic Imaging Spectrometry) 是从计算机断层扫描三维重建技术发展而来的一种瞬时拍摄式光谱采集技术.这一技术于 1995 年由 Descour 和 Dereniak 提出^[24],之后又做了许多原理性改进和理论分析^[25~27].其将待测量光谱数据看作一个待重建的三维数据块,使用特殊的光学元件从不同的角度将三维光谱信息向二维平面上进行投影,并进行成像采集,如图5所示.由此测量得到的图像相当于得到了多光谱数据块在不同方向上的投影积分值.进一步通过计算重构,系统能够恢复得到完整的三维光谱数据块,实现瞬时拍摄式的光谱采集.研究者们也将这种光谱采集技术应用于紫外与红外波段^[28,29],带来了更加广泛的应用.

基于计算机断层扫描的光谱成像技术实现了瞬时拍摄式的光谱采集,且不需要任何滤光设备,具有很高的光转换效率.然而,由于其只能将三维光谱数据在有限的若干个方向上进行投影采集,这导致其采集数据对应的傅立叶变换域存在一个圆锥形的采样丢失,这一圆锥丢失问题严重限制了其重构的准确性.另外,CTIS 系统在实际应用中具有校准困难,不稳定等问题,只适用于精密制造的测量仪器,实用性不强.

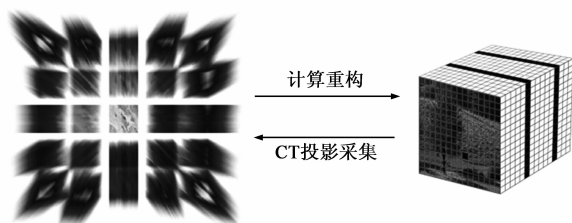


图5 CTIS技术示意图,左:光谱数据块投影;右:三维光谱数据块

4.2 干涉型高光谱采集技术

干涉型(也称傅立叶变换型)高光谱采集技术是一种基于光线干涉原理的成像光谱技术,其同时测量场景光谱中不同波长的谱线干涉强度,并在二维平面将场景的光线干涉结果成像记录得到场景干涉图像,之后经过傅里叶变换,计算重构恢复出场景的光谱数据,实现对于场景的光谱采集^[30~32].干涉型成像光谱技术按照调制方式的不同可分为两大类:基于迈克尔逊干涉仪的时间调制型、基于横向剪切干涉仪的空间调制型,其中空间调制型具有单次拍摄采集的能力。

基于迈克尔逊干涉仪的时间调制型高光谱采集技术的核心元件是可移动透镜及其高精度运动控制系统,这种设备通过透镜的不断移动采集得到场景光谱的一系列干涉图,进而可以通过计算重构的方法得到场景光谱数据.其优点在于光谱采集精度高,但是这种采集技术对于机械结构和运动控制的精度要求较高,因此成本高、鲁棒性差。

基于横向剪切干涉仪的空间调制型高光谱采集技术主要基于横向剪切干涉仪完成,其使用 Sagnac 棱镜或双折射晶体作为分光元件,通过对光谱干涉结果的捕捉以重建高光谱数据.空间调制型光谱采集系统中不包括任何运动部件,能够实现单次成像采集,稳定性强;但这种设备一般结构复杂,体积和重量都比较大,使其在实际应用中受到了一定的限制。

基于干涉原理的光谱采集技术能够恢复得到较高的光谱采集分辨率,同时与基于分光色散原理的技术相比,由于前者不存在色散,其光通量相对于后者有明显的优势,进而具有较高的采集信噪比。

4.3 基于编码光圈的高光谱采集技术

基于编码光圈的高光谱采集技术,是从耦合采集计算重构这个思路出发的另一种采集方法.从信号获取的角度来讲,相机光圈相当于对原始视觉信号在空域进行了特定形状的卷积,将光圈信息与场景信号耦合.因此,如果能够设计出特定的光圈和色散分光系统,使用不同形状的光圈将场景三维光谱信息进行耦合,再结合三维光谱数据的先验性信息,就能够实现完整三维光谱数据的计算重构,进而实现高光谱数据的采集。

根据上述原理,D Brady 和 M Gehm 在 06 年设计了基于编码光圈的光谱采集设备 CASSI(Coded Aperture Snapshot Imager)^[33,34],其通过设计一系列不同形状的光圈,对场景信息的进行耦合,进而采集三维光谱数据的若干个二维投影,最后基于光谱图像在小波域稀疏的先验条件,使用稀疏表示的方法对于场景信息进行计算重构,在压缩感知的理论框架下实现了对光谱数据

的采集.其团队后续的工作对 CASSI 系统进行了不断的改进^[35~38],通过不同光路结构的搭建与系统算法的优化,后续的 CASSI 系统^[39,40]具有了瞬时拍摄采集的能力,能够对于场景进行视频采集,其典型的系统结构如图 6 所示。

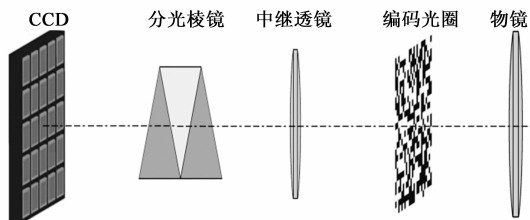


图6 CASSI系统结构示意图

编码光圈系统能够在提升光通量的同时完成对于光谱的测量,这一方面能够使系统具有较短的曝光时间,另一方面也提升了测量结果的信噪比,进而能够实现更精确的光谱数据采集.然而,编码光圈系统在光谱计算重构的过程中,由于压缩采样的限制,存在一定的重构误差,且重构算法时间复杂度大,无法实时进行,限制了其应用能力。

4.4 基于混合相机的高光谱采集技术

近些年,相机得到了快速的发展,其空间分辨率的提升更是突飞猛进,但是在现有显示设备分辨率与人类视觉感知能力的约束下,很多应用中,场景采集的光谱分辨率已成为了真正限制采集设备能力的短板.因此如果能够利用相机的高空间分辨率采集优势,取长补短,牺牲部分空间分辨率获得光谱分辨率的提升,则能够获得采集能力的突破.从这种朴素的想法出发,2009 年 Bodkin 的相机 Hyper-pixel Array™ Camera^[41],2010 年 Gao 的成像装置 Image Mapping Spectrometer^[42]以及 2011 年 Cao 的 PMVIS(Prism Mask Multispectral Video Imaging System)系统^[43]均使用了基于蒙版或微透镜阵列的空间采样方法,结合传统色散方式,使用高分辨率相机对散开的光谱进行采集,牺牲空间分辨率换取光谱分辨率,进而实现了光谱视频的采集^[44].由此类工作出

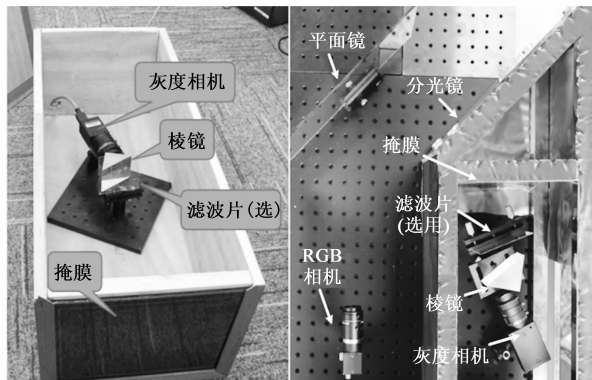
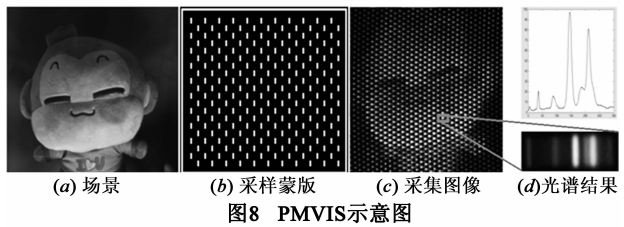


图7 PMVIS系统及其后续混合相机系统原型系统图

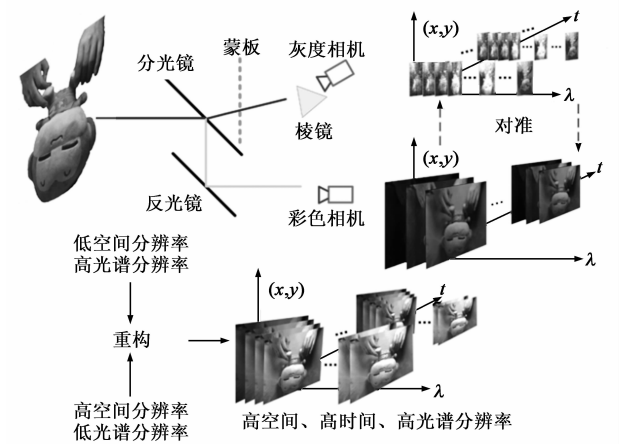
发,一些研究工作使用混合相机进行协同采集,也实现了对于三维高分辨率光谱数据的有效获取.下面我们 从 PMVIS 系统和由其发展得到的混合相机系统出发, 对于这类基于采样色散和混合相机的系统进行介绍.

PMVIS 系统的光谱采集过程如图 8 所示,场景光线 通过掩膜采样后进入三棱镜色散,最后在成像设备端 采集.通过掩膜设计使采样点的光线散开在空间中且 恰好相邻采样点光谱不发生混叠.将场景采样点的光 谱在空间维度散开,进而使采样点光谱信息在图像上 得到了记录.从这样的采集图像出发,通过进一步的光 谱标定、几何校正等后续处理,我们可以对于场景采样 点的光谱进行提取,如图 8 所示.



这种基于蒙版采样的光谱采集方法以牺牲空间分 辨率为代价,但对于实际应用来说,这种代价往往过 高,场景光谱信息在空间维度的展开严重降低了其采 集结果的空间分辨率,这样就使得此采集系统在很多 应用条件下无法作为光谱成像设备使用,为此研究者 们在此类型系统的基础上进行了改进研究,2011 年 PMVIS 的后续工作^[45]提出了一种基于混合相机的高光 谱采集系统,其使用双路采集的方法,进一步利用相机 的高空间分辨率采集特性,实现了对于高分辨率高光 谱视频的采集.基于混合相机的高光谱采集系统的基本 原理如图 9 所示,在 PMVIS 系统的基础上,使用分光 镜将场景光线分为两束分别采集:一束与 PMVIS 系统 的处理方法一样,基于蒙版采样分光,进行低空间分 辨率高光谱分辨率的光谱采集;另一束直接通过彩色 相机采集高空间分辨率的彩色图像,然后将双路数据 进行配准、融合,从低空间分辨率、高光谱分辨率和高 空间分辨率、低光谱分辨率的数据中重构高空间分辨率、

高光谱分辨率的完整光谱数据.在重构算法的选择上, 其使用基于双边滤波的计算重构的方法进行光谱信息 传播.



这种使用混合相机采集并结合计算重构的方法为 采集高维光谱数据提供了新的思路,同样在 2011 年的 另一个工作^[46]中,研究者也针对上述的这种双路采集 光谱信息重构问题提出了基于稀疏约束矩阵分解的不 同的解决方案.

4.5 光谱采集技术对比

从传统的基于扫描的光谱捕获技术发展至当前的 光谱视频采集技术,技术手段与方法层数不穷.在表 1 中,我们针对现有的多种光谱采集技术从光谱分辨率、 空间分辨率、视频采集能力等诸多方面进行了对比.从 对比结果中我们可以看到,各种不同的光谱采集技术 在系统性能指标与实际运行效果上有很大的差异,各 具优缺点,这为我们设计与权衡新的光谱采集系统提 供了有效的参考,同时也为光谱应用中的技术选择带 来了具体的指导.我们可以发现非扫描型光谱采集技 术也可以拥有光谱视频采集的能力,但都付出了或复 杂系统、或低分辨率、或低光通量的不同程度的牺牲. 由此也可以看到,目前仍不存在理想的光谱视频采集 装置,更加先进的光谱采集理论及其装置仍亟待我们 去探索与研究.

表 1 光谱采集技术典型参数对比

采集技术	光谱扫描型	空间扫描型	编码光圈型	断层扫描型	干涉型	混合相机型
技术类型	直接采集	直接采集	计算重构	计算重构	计算重构	直接采集计算重构
光谱分辨率	低 > 10nm	非常高 < 1nm	中等 ≈ 5nm	中高 1.5 - 15nm	中等 3 - 10nm	中等 2 - 6nm
光谱范围	400 - 1000nm	400 - 1000nm	500 - 620nm	470 - 770nm	380 - 780nm	400 - 1000nm
空间分辨率	高	中等	中等	低	较低	较高
视频采集能力	N/A	N/A	中等	较高	较低	中等
光通量	较低	较高	中等	高	中等	低
后处理	简单	简单	复杂	复杂	中等	简单
系统难度	较简单	较简单	复杂	复杂	中等	较简单

5 高光谱采集的压缩感知技术展望

压缩感知(Compressed Sensing)技术是近些年来备受关注的一项新兴课题,该理论认为如果待采集信号具有在预知的某组基上可以稀疏表示的先验信息,则可以利用随机投影的方法实现对于信号在远低于奈奎斯特采样频率下的直接采集.从图 1 中可以看到,高光谱采集中待采集数据是由光源光谱及物体材质共同决定的,而对于一般的自然场景,其大多只包含少数的光源和有限的物体材质,因此我们有理由认为对于真实场景采集得到的光谱数据具有很强的稀疏性,也就是说能够找到一组合适的光谱字典,使得场景的全部光谱数据能够在其上稀疏表示.2011 年 A Charles 的工作^[47]和 Ayan Chakrabarti 的工作^[48]都对于光谱数据的这种稀疏性进行了深入的探讨和验证,发现并提出了真实场景的光谱域的统计稀疏特性及其光谱字典学习方法.结合上面对于压缩感知技术的介绍,我们可以看到,光谱的稀疏性让我们有理由相信我们能够将压缩感知技术应用于光谱采集领域,进而获得采集技术的突破.

将压缩感知理论与光谱采集相结合,近几年,除了基于编码光圈的采集技术^[34,49]外,研究者们也基于微透镜阵列、编码光圈^[50]、主成分成像 Principal Component Imaging^[51]和特征敏感成像 Feature Specific Imaging^[52]等方式对光谱压缩采集进行了有效的探索.这些技术大多通过微镜阵列或其他方式人为地改变场景光线的传播路径,对每个场景点的光线进行重定位,将不同位置场景点的光线汇聚在一起,之后再通过传统的分光方式进行分光采集,这种方法能够实现对于三维光谱数据的耦合采集.进而通过设计不同的耦合方式,结合合理的光谱字典学习方法,并利用稀疏先验约束下的计算重构算法,就能够实现对于场景三维光谱数据的压缩感知.

从上述的分析和介绍中可以看到,压缩感知理论在光谱采集领域有很大的潜力,能够为采集装置带来新的设计思路.根据压缩感知理论,我们可以设计更新型的采集系统,实现更高效的高光谱采集.而这其中如何学习与产生光谱字典、如何设计与实现感知矩阵、如何搭建与完善采集系统,都将作为新的高光谱采集研究的课题.

6 高光谱采集技术的视觉应用实例

高光谱采集技术相对于传统成像摄影技术在光谱维度上取得了突破,不同波长段的光强信息为研究与应用提供了更多的场景属性信息,遥感、医疗、监测等诸多应用领域都借以获得了新的发展.例如在遥感领

域里地质矿物、植被生态、土壤海洋的研究中,更细致、更丰富的光谱信息能够提供更精确的种类识别和要素反演;在医疗诊断领域,从发病机理、临床诊断到病情检测和疗效评估,光谱采集都为相关研究提供了有效的新方法和新手段.从这些有效的应用实例中我们看到高光谱采集技术所带来的巨大潜力.下面从计算机视觉领域的几个具体应用中,我们也可以视微知著,了解光谱采集技术带给我们的巨大改变.

特征提取、物体识别与跟踪是计算机视觉领域的基本课题,传统方法从红绿蓝三色通道值出发对图像进行分析与处理,这种方法在处理颜色相近的不同物体时无法进行有效的识别,往往产生错误的结果,已经成为现有方法的瓶颈.但是在引入高光谱视频采集技术后,很多具有同色异谱性质的物体在光谱域增加了新的特征,由色彩不可分辨变为光谱可分辨,这使得应用效果得到了大幅的改善.

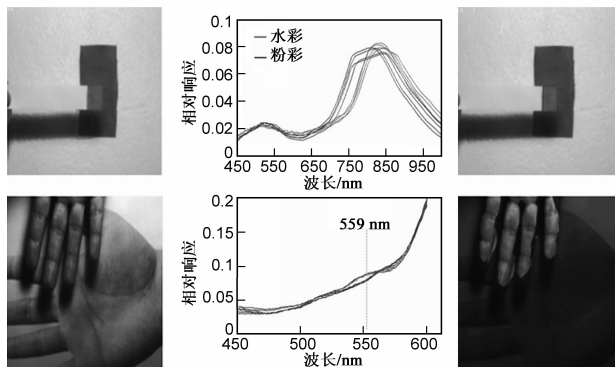


图10 光谱采集视觉应用实例示意图,上:物体跟踪;下:人体检测

如图 10 所示,在视频跟踪与人体识别的应用中,光谱的引入带来了质的变化.在上图物体跟踪的实验中,水彩和粉彩绘制的同样颜色的物体在彩色相机采集图像中完全不可分辨,但是通过光谱采集,水彩颜料和粉彩颜料在 680nm 波长附近的光强差异得以捕获,进而可以据此实现有效的物体跟踪,从左、右图的对比中也能清晰的看到这一效果.在下图人体识别的应用中,实验者将手放在了绘制了手掌图像的背景板前,右图是其彩色相机采集得到的彩色图像,不结合场景阴影与先验信息,我们无法通过颜色对手掌进行识别.然而,通过使用光谱采集的手段,我们发现前景的真手和背景的假手在 559nm 波长处有明显的光谱差异.这种差异为我们的识别工作提供了有效的判据,右图的结果也验证了光谱信息对于识别工作的提升作用.

7 结论与展望

本文主要针对高分辨率高光谱采集技术进行了简要的介绍,从基于散射衍射原理的传统光谱仪发展至

今,现有技术不但实现了高分辨率的光谱采集,并进一步拥有了实时视频采集的能力.目前,光谱捕获技术已经被广泛应用于遥感、医疗、诊断、冶金、视觉等领域中,为科技进步与创新带来了新的契机.展望未来,现有光谱视频采集方法仍普遍存在精确度与分辨率上的不足与矛盾,如何获取具有更高分辨率、更精确的光谱数据仍是亟待研究者解决的问题.压缩感知理论可以有效利用待采集数据的内在稀疏结构,进而通过低维空间的欠 Nyquist 采样实现高维信号的感知与采集,是未来解决光谱视频采集技术这一难题的前沿研究方向.

参考文献

- [1] V Backman, M Wallace, L Perelman, J Arendt, M Müller, Q Zhang, G Zonios, E Kline, T McGillican. Detection of preinvasive cancer cells[J]. *Nature*, 2000, 406(6791): 35 – 36.
- [2] W Debskia, P Walczykowska, A Klewsia, M Zyznowskib. Analysis of usage of multispectral video technique for distinguishing objects in real time[A]. 20th ISPRS Congress[C]. Istanbul: ISPRS, 2004. 201(323).
- [3] S Delalieux, A Auwerkerken, W Verstraeten, B Somers, R Valcke, S Lhermitte, J Keulemans, P Coppin. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging to detect scab induced stress in apple leaves[J]. *Remote Sensing*, 2009, 1(4): 858 – 874.
- [4] R Kester, N Bedard, L Gao, T Tkaczyk. Real-time snapshot hyperspectral imaging endoscope[J]. *J Biomed Opt*, 2011, 16(5): 056005.
- [5] M Kim, T Harvey, D Kittle, H Rushmeier, D Brady. 3D imaging spectroscopy for measuring hyperspectral patterns on solid objects[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2012, 31(4): 38.
- [6] G Wong. Snapshot hyperspectral imaging and practical applications[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2009, 178: 012048.
- [7] J Murguia, G Diaz, T Reeves, R Nelson, J Mooney, F Shepherd, G Griffith, D Franco. Applications of multi spectral video[A]. *Proceedings of SPIE NanoScience Engineering*[C]. San Diego: SPIE, 2010: 77800.
- [8] Z Pan, G Healey, M Prasad, B Tromberg. Face recognition in hyperspectral images[J]. *IEEE Trans PAMI*, 2003, 25(12): 1552 – 1560.
- [9] J Kim, M Escuti. Snapshot imaging spectro polarimeter utilizing polarization gratings[A]. *Proceedings of SPIE Optical Engineering and Applications*[C]. SPIE, 2008. 7086: 708603.
- [10] M Yamaguchi, H Haneishi, H Fukuda, J Kishimoto, H Kanazawa, M Tsuchida, R Iwama, N Ohyama. High fidelity video and still-image communication based on spectral information; natural vision system and Its applications[A]. *Proceedings of SPIE Electronic Imaging*[C]. SPIE, 2006. 6062: 129 – 140.
- [11] T Akgun, Y Altunbasak, R Mersereau. Super-resolution reconstruction of hyperspectral images[J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2005, 14(11): 1860 – 1875.
- [12] G Brelstaff, A Párraga, T Trosianko, D Carr. Hyperspectral camera system: acquisition and analysis[A]. *Proceedings of SPIE Satellite Remote Sensing*[C]. SPIE, 1995. 150 – 159.
- [13] P Burns, R Berns. Analysis of multispectral image capture[A]. *Proceedings of 4th IS&T/SID Color Imaging Conference*[C]. SPIE, 1996. 19.
- [14] M Golub, M Nathan, A Averbuch, E Lavi, V Zheludev, A Schlar. Spectral multiplexing method for digital snapshot spectral imaging[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(8): 1520.
- [15] A Harvey, J Beale, A Greenaway, T Hanlon, J Williams. Technology options for imaging spectrometry[A]. *Proceedings of SPIE Imaging Spectrometry VI*[C]. SPIE, 2000. 4132.
- [16] A Harvey, D Holmes. High-throughput snapshot spectral imaging in two dimensions[A]. *Proceedings of SPIE Conference Series*[C]. SPIE, 2003. 4959: 46 – 54.
- [17] A Harvey, D Holmes, A Gorman, K Altenbach, J Arlt, N Read. Spectral imaging in a snapshot[A]. *Proceedings of SPIE Biomedical Optics*[C]. SPIE, 2005. 5694: 110 – 119.
- [18] J Kerekes, J Baum. Hyperspectral imaging system modeling[J]. *Lincoln Laboratory Journal Special Issue on Spectral Imaging*, 2003, 14(1): 117 – 124.
- [19] W Porter, H Enmark. A system overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer[A]. *Proceedings of SPIE Imaging Spectroscopy II*[C]. SPIE, 1987. 1: 3 – 12.
- [20] R Basedow, D Carmer, M Anderson. Hydice system: implementation and performance[A]. *Proceedings of SPIE 1995 Symposium on OE*[C]. SPIE, 1995. 2480: 258.
- [21] Y Schechner, S Nayar. Generalized mosaicing[A]. *IEEE Proceedings of ICCV*[C]. IEEE, 2001. 17 – 24.
- [22] Y Schechner, S Nayar. Generalized mosaicing: wide field of view multispectral imaging[J]. *IEEE Trans PAMI*, 2002, 24(10): 1334 – 1348.
- [23] N Gat. Imaging spectroscopy using tunable filters: a review[A]. *Proceedings of SPIE AeroSense 2000*[C]. SPIE, 2000. 4056: 50 – 64.
- [24] M Descour, E Derenak. Computed tomography imaging spectrometer: experimental calibration and reconstruction results[J]. *Appl Opt*, 1995, 34(22): 4817 – 4826.
- [25] M Descour, C Volin, B Ford, E Dereniak, P Maker, D Wilson. Snapshot hyperspectral imaging[J]. *Journal of Integrated Computational Imaging Systems*, 2001.
- [26] N Hagen, E Dereniak. Analysis of computed tomographic imaging spectrometers I: spatial and spectral resolution[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(28): F85 – F95.

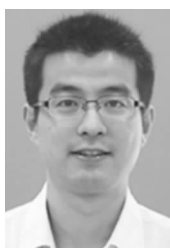
- [27] N Hagen, E Dereniak, D Sass. Maximizing the resolution of a CTIS instrument[A]. Proc SPIE Optics Photonics[C]. SPIE, 2006. 6302: 63020L.
- [28] W Johnson, D Wilson, G Bearman. All-reflective snapshot hyperspectral imager for ultraviolet and infrared applications[J]. Opt Lett, 2005, 30(12): 1464 – 1466.
- [29] W Johnson, D Wilson, G Bearman. Spatial and spectral modulating snapshot hyperspectral imager[J]. Appl Opt, 2006, 45(9): 1898 – 1908.
- [30] T Chao, H Zhou, X Xia, S Serati. Near Ir electro-optic imaging fourier transform spectrometer[A]. Proceedings of SPIE[C]. SPIE, 2005. 5816: 163.
- [31] M Kudenov, E Dereniak. Compact snapshot real-time imaging spectrometer[A]. Proceedings of SPIE Security Defence[C]. SPIE, 2011. 8186: 81860W.
- [32] A Villemare, S Fortin, J Giroux, T Smithson, R Oermann. Imaging fourier transform spectrometer[A]. Proceedings of SPIE[C]. SPIE, 1995. 2480: 387.
- [33] R Willett, M Gehm, D Brady. Multiscale reconstruction for computational spectral imaging[A]. Proceedings of SPIE Electronic Imaging[C]. SPIE, 2007. 64980.
- [34] D Brady, M Gehm. Compressive imaging spectrometers using coded apertures[A]. Proceedings of SPIE Defense and Security Symposium[C]. SPIE, 2006. 6246: 62460A.
- [35] M Gehm, R John, D Brady, R Willett, T Schulz. Single-shot compressive spectral imaging with a dual disperser architecture[J]. Opt Express, 2007, 15(21): 14013 – 14027.
- [36] A Wagadarikar, R John, R Willett, D Brady. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging[J]. Appl Opt, 2008, 47(10): B44 – B51.
- [37] A Wagadarikar, M Gehm, D Brady. Performance comparison of aperture codes for multimodal, multiplex spectroscopy[J]. Appl Opt, 2007, 46(22): 4932 – 4942.
- [38] A Wagadarikar, N Pitsianis, X Sun, D Brady. Spectral image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers[A]. Proceedings of SPIE Optical Engineering Applications[C]. SPIE, 2008. 7076: 707602.
- [39] D Kittle, D Marks, D Brady. Design and fabrication of an ultraviolet-visible coded-aperture snapshot spectral imager[J]. Optical Engineering, 2012, 51(7): 071403-1-071403-10.
- [40] A Wagadarikar, N Pitsianis, X Sun, D Brady. Video rate spectral imaging using a coded aperture snapshot spectral imager[J]. Opt Express, 2009, 17(8): 6368 – 6388.
- [41] A Bodkin, A Sheinis, A Norton, J Daly, S Beaven, J Weinheimer. Snapshot hyperspectral imaging: the hyperpixel array camera[A]. Proceedings of SPIE[C]. SPIE, 2009. 7334: 73340H.
- [42] L Gao, R Kester, N Hagen, T Tkaczyk. Snapshot image mapping spectrometer(IMS) with high sampling density for hyperspectral microscopy[J]. Opt Express, 2010, 18(14): 14330 – 14344.
- [43] X Cao, H Du, X Tong, Q Dai, S Lin. A prism-mask system for multispectral video acquisition[J]. IEEE Trans PAMI, 2011, 33(12): 2423.
- [44] R Habel, M Kudenov, M Wimmer. Practical spectral photography[A]. Proceedings of Computer Graphics Forum[C]. Blackwell Publishing Ltd, 2012, 31(2pt2): 449 – 458.
- [45] X Cao, X Tong, Q Dai, S Lin. High resolution multi spectral video capture with a hybrid camera system[A]. IEEE Proceedings of CVPR[C]. IEEE, 2011. 297 – 304.
- [46] R Kawakami, Y Matsushita, J Wright, M Ben-Ezra, Y Tai, K Ikeuchi. High-resolution hyperspectral imaging via matrix factorization[A]. IEEE Proceedings of CVPR[C]. IEEE, 2011. 2329 – 2336.
- [47] A Charles, B Olshausen, C Rozell. Learning sparse codes for hyperspectral imagery[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Process, 2011, (99): 1.
- [48] A Chakrabarti, T Zickler. Statistics of real world hyper spectral images[A]. IEEE Proceedings of CVPR[C]. IEEE, 2011. 193 – 200.
- [49] Y Wu, G Arce. Snapshot spectral imaging via compressive random convolution[A]. IEEE Proceedings of ICASSP[C]. IEEE, 2011. 1465 – 1468.
- [50] A Mrozack, D Marks, D Brady. Coded aperture spectroscopy with denoising through sparsity[J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2297 – 2309.
- [51] H Pal, M Neifeld. Multispectral principal component imaging[J]. Opt Express, 2003, 11(18): 2118 – 2125.
- [52] M Neifeld, P Shankar. Feature-specific imaging[J]. Appl Opt, 2003, 42(17): 3379 – 3389.

作者简介



马晨光 男, 1988 年 12 月出生, 河北承德人。2011 年本科毕业于清华大学自动化系, 其后进入清华大学自动化系攻读博士, 从事计算摄像学、计算机视觉相关研究。

E-mail: mcg07@mails.tsinghua.edu.cn



曹 汛 男, 1983 年 10 月出生, 江苏扬州人。清华大学工学博士, 现为南京大学电子科学与工程学院副教授, 近年来主要从事图像和视频处理、机器视觉以及计算摄像学方向的研究。