



装备科技译著出版基金

现代光学工程精品译丛



Springer

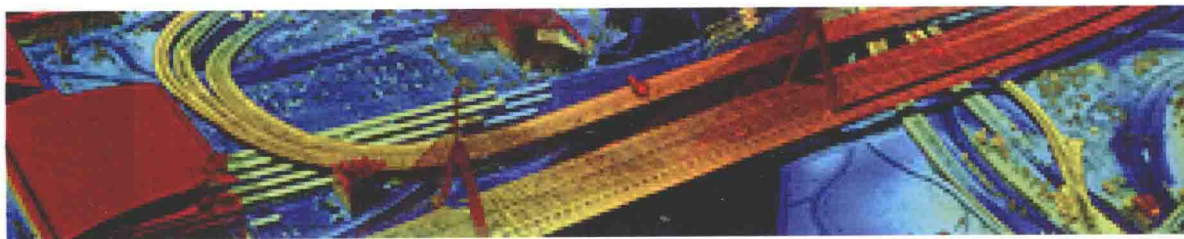
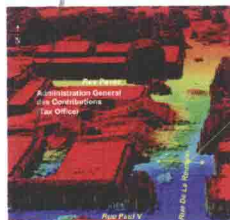
飞行时间测距 成像相机

TOF Range-Imaging Cameras

【意】 Fabio Remondino
David Stoppa

编著

孙志斌 邵秋峰 王 波 曹松 杨皓 译
蓝 鼎 李培刚 牛立斌 王迪 李楠 校



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

飞行时间测距成像相机

TOF Range-Imaging Cameras

【意】Fabio Remondino David Stoppa 编著

孙志斌 邵秋峰 王波 曹松 杨皓 译

蓝鼎 李培刚 牛立斌 王迪 李楠 校

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字：军-2016-045 号

图书在版编目 (CIP) 数据

飞行时间测距成像相机/ (意) 法比奥·雷蒙蒂诺, (意) 大卫·斯托帕编著; 孙志斌等译. —北京: 国防工业出版社, 2016.8

(现代光学工程精品译丛)

书名原文: TOF Range-Imaging Cameras

ISBN 978-7-118-10965-8

I. ①飞… II. ①法… ②大… ③孙… III. ①光电子技术—应用 IV. ①TN29

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 191346 号

Translation from English language edition:

TOF Range-Imaging Cameras by Fabio Remondino, David Stoppa

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Springer is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 14 字数 260 千字

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

译者序

近年来,三维成像信息技术迅速发展,建筑测量、室内定位和导航、立体影像和辅助生活环境应用对飞行时间成像提出了迫切需求。*TOF Range-Imaging Cameras*一书由意大利布鲁诺凯斯勒研究中心的三维光学测量研究领域的 Fabio Remondino 教授、David Stoppa 教授编著。

本书总结了飞行时间测距成像理论、技术和应用领域的最新研究成果,探讨了飞行时间测距成像探测器件、结构、性能、技术等问题,还探讨了飞行时间测距成像在建筑测量分析、室内定位导航、立体测距成像、辅助生活环境等方面的应用技术和方法,是一本不可多得的实用教材。本书对于提高我国单光子三维成像的技术水平具有重要的借鉴意义。

本书在翻译和校对过程中,得到了中国科学院国家空间科学中心和中国科学院大学材料科学与光电技术学院领导和许多同志的帮助,在此表示诚挚的感谢。在翻译过程中,邵秋峰、王波、曹松、杨皓、高上起、叶蔚然翻译了第1~5章,魏同波、胡爱稳、雷鸣、杨策、黄振翻译了第6~10章,孙志斌负责全书统稿工作,蓝鼎、李培刚、牛立斌、王迪、李楠、张寿山、陈明君、白云翔对全书进行了校对。

本书内容充实、层次分明、特色鲜明,书中飞行时间测距成像技术涉及量子光学、半导体物理、微电子学、电子学等方面的知识,且书中内容主要针对在天文学、高能物理学、空间科学、生命科学、激光雷达、保密通信、对地遥感成像等领域进行研究的研究人员和研究生。因此,本书适用于具有一定概率论、电子信息、微电子等方面知识的研究生和相关领域的科研技术人员。

由于译者水平有限,书中难免出现纰漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

译者

2016年6月

第1章 飞行时间 (TOF) 测距成像传感器的技术发展水平

1 引言	1
2 TOF 相机的工作原理	3
2.1 TOF 探测系统	3
2.2 TOF 测量技术	3
3 时间分辨成像传感技术	4
4 结论	5
参考文献	6

第2章 基于 SPAD 的传感器

1 引言	9
2 SPAD 的物理机制	10
3 CMOS SPAD 设计	12
4 基于 TCSPC 的 TOF 相机系统	14
5 单光子同步探测	23
6 相位域 $\Delta\Sigma$ TOF 成像	28
7 前景与展望	31
参考文献	32

第3章 基于电子学的 3D 传感器

1 脉冲 I-TOF 3D 成像方法	35
1.1 工作原理	36
1.2 信号和噪声分析	37
2 案例研究 1: 采用完全差分 3D 像素的 50×30 像素阵列	38
2.1 传感器设计	38
2.2 电路分析	40
2.3 测量和未来展望	41
3 案例研究 2: 160×120 双级像素阵列	43
3.1 传感器设计	43

3.2 电路分析	44
3.3 测试方案和测量结果	46
4 相关 I-TOF 的 3D 成像方法	49
4.1 传感器结构	50
4.2 信号和噪声分析	51
5 案例分析 3: 2×32 双线 TOF 传感器	52
5.1 传感器电路	52
5.2 测试方案和测量结果	54
6 案例分析 4: 16×16 像素阵列 TOF 传感器设计	56
6.1 传感器电路	56
6.2 测试设置和测量结果	58
7 讨论和比较	59
参考文献	60

第 4 章 基于像素光电混合器件的传感器

1 引言	61
2 基本工作原理	62
3 电荷域电光解调器	65
3.1 基于栅极结构的基本解调器	65
3.2 电流辅助解调器件	69
3.3 钉扎光电二极管解调器件	70
3.4 静态漂移电场解调器件	71
3.5 其他概念	73
4 像素结构	74
5 结论	76
参考文献	76

第 5 章 幅值调制连续波激光雷达中的混合像素和

多路径干扰的认识和改进

1 引言	80
1.1 飞行时间测量技术	81
1.2 混合像素和多路径干扰的形成	84
2 混合像素和多路径干扰的模型	86
2.1 距离测量理论	86
2.2 混合像素建模	87
2.3 由于多个回波信号所产生的扰动	88

3 点扫描系统和探测方法	90
3.1 法线角和边缘长度探测	91
3.2 Adam 的探测算法	91
3.3 基于分类的检测方法	92
3.4 空间非连续性误差的测量	92
4 全视场系统和恢复	93
4.1 使用场景纹理、结构光或正方形校准方法的散射恢复	94
4.2 采用空间域卷积方式的恢复方法	95
4.3 使用场景内部散射模型的恢复方法	97
4.4 通过表面参数模型的混合像素恢复方法	97
4.5 相关波形的反卷积/波形形状拟合方法	97
4.6 多频测量方法	99
5 结论	99
6 混合像素和多路径干扰的认识和理解	100
6.1 激光雷达调制技术	100
参考文献	100

第6章 3D 相机：误差、校准和定位

1 引言	103
2 几何模型	104
3 定位	106
3.1 基于标记物的定位	106
3.2 基于传感器的定位	107
3.3 数据驱动定位	107
4 误差来源	108
4.1 镜头畸变	109
4.2 与场景无关的距离测量误差物理模型	110
4.3 与焦平面位置相关的距离误差以及与振幅测量值相关的 距离误差	111
4.4 内部散射	111
4.5 固定模式噪声	113
4.6 与积分时间相关的测量误差	113
4.7 相机预热误差	114
4.8 模糊间隔	115
4.9 目标空间中的多路径效应	116

5 系统校准	116
5.1 校准的目的	116
5.2 校准方法	117
5.3 自校准方法	117
5.4 模型理论和解决方案	119
6 总结	119
参考文献	120

第7章 用于建筑测绘的飞行时间测距相机

1 引言	123
2 TOF 相机在建筑测绘中的分析应用	124
2.1 预校准和数据采集方法	126
2.2 入射角对距离测量的影响	126
2.3 目标物体反射率对距离测量的影响	128
2.4 文化遗产建筑测绘中的测试、数据处理、比较和结果	130
2.5 飞行时间测距相机在建筑装饰雕塑中的测绘和精度性能评估	131
2.6 两个窗户的数据采集和处理	133
2.7 用于断裂线提取的数字摄影测量多帧图像匹配方法	136
2.8 结果和讨论	139
3 结论	142
参考文献	143

第8章 飞行时间相机在环境辅助生活中的应用

1 引言	146
2 主动视觉在环境辅助生活情境中的优势	147
3 基于飞行时间相机的跌倒检测框架	150
3.1 硬件平台	150
3.2 相机安装设置	150
3.3 外部参数的自校准	152
3.4 背景建模, 人体图像分割及跟踪	158
3.5 跌倒检测策略	159
3.6 模拟设置	160
3.7 实验结果	160
4 基于飞行时间相机的姿势识别框架	165
4.1 实验设置	167
4.2 拓扑方法	168

4.3 体积测量法	171
4.4 实验结果	172
5 讨论和结论	174
参考文献	177

第9章 飞行时间相机在室内定位与导航中的应用

1 引言	179
2 基于 CityGML 模型的室内定位	181
2.1 通过对象探测的房间识别	183
2.2 采用距离测量的精确定位	183
3 地图测绘和自身运动估计	183
3.1 传感器数据处理	183
3.2 地图测绘和自身运动估计	185
4 3D 防撞	186
5 结论与展望	187
参考文献	188

第10章 飞行时间测距相机与立体视觉系统：比较与数据融合

1 立体视觉系统	191
1.1 立体视觉系统的基本几何原理	191
1.2 立体视觉算法	193
1.3 局部立体算法	194
1.4 全局立体视觉算法	195
1.5 半全局立体视觉算法	196
2 飞行时间相机与立体视觉系统的比较	197
2.1 基本测量参数	197
2.2 飞行时间相机和立体视觉系统的准确性、精确性和分辨率	198
2.3 实验比较	202
3 飞行时间相机和立体视觉系统的数据融合	204
3.1 采集系统的特性	205
3.2 局部融合算法	207
3.3 全局融合算法	209
3.4 半全局融合算法	209
4 结论	210
参考文献	211

第1章

飞行时间 (TOF) 测距成像传感器的 技术发展水平

Dario Piatti, Fabio Remondino, David Stoppa

1 引言

我们可以使用不同类型的传感器和测量技术来记录测量对象或场景的三维(3D)信息。适宜于测量目标距离的非接触测量可以采用微波、超声波或光波技术^[1,2]。然而,只有采用光波技术的小型化紧凑测量设备才能实现3D成像系统所要求较高的角分辨率性能^[3]。通常,在实际应用中,能够获得目标物体几何形状的方法有两种:①被动方法,使用多视角图像数据;②主动方法,采用光学距离测量技术。

众所周知,采用三角测量原理的多视角图像获取方法,在这个研究领域已经应用了数十年之久^[4]。与其他距离测量设备(比如激光雷达、声传感器或雷达传感器)相比,图像方法的优势之一是能够获得较高的分辨率,同时无须能量辐射或运动部件可以同步获取测量面积。主要不足之处是会带来相应的问题,处理时间以及自动匹配过程中对照明度和表面纹理的要求。

使用光波的主动光学测量技术可以进一步划分为三个主要类型,即干涉测量、三角测量和飞行时间测量^[5-7]。三角测量技术通常是使用已知的光学测量基线以及指向未知测量点的相关边角来确定三角内部的未知点。这个原理是采用基

D. Piatti

Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24 10129 都灵, 意大利

邮箱: dario.piatti@polito.it

F. Remondino · D. Stoppa

Fondazione Bruno Kessler, Via Sommarive 18 38123 特兰托, 意大利

邮箱: remondino@fbk.eu

D. Stoppa

邮箱: stoppa@fbk.eu

于结构光照明和被动数字相机的主动传感方式得到应用的。

连续波和脉冲 TOF 技术是通过测量调制后光学信号的飞行时间或相位移动实现的, 这些技术通常适用于非相关光学信号。TOF 的典型应用案例是总站的光学测距仪或典型的激光雷达仪器(地基或空基)^[8,9]。在后一种情况下, 借助快速扫描机制, 实际的激光扫描仪能够实现每秒钟将近 10^6 个扫描点。其测量范围在很大程度上是根据设备不同而有所变化的, 即从几分米到几千米的范围, 相应的精度是从不足 1mm 到数十厘米的范围。然而, LiDAR 仪器的主要不足是其高昂的成本和庞大的体积。

干涉测量方法也能利用飞行时间技术来测量深度。在这种情况下, 需要使用光学波长自身的相位。这要求对物体反射的波前信息与参考波前信息进行相干混频和强度关联。光学干涉原理已经发展出了许多变体, 例如多波长干涉、全息干涉、散斑干涉和白光干涉。干涉测量的高精确度主要取决于光源的相干长度: 干涉测量方法是由于采用基于对非常短光学波长测量的方式, 因此不适用于测量范围大于几厘米的情况。

最近几年, 发展出新一代主动传感器, 该传感器无须使用任何扫描机制, 在视频帧速率测量条件下仅从一个视角即可获取 3D 测量点云图。工作原理是采用指向待测量物体的设备测量发射信号的飞行时间。这种技术的优点是可以同步测量相机传感器每个像素的距离信息。文献中已使用许多术语来描述这类设备, 通常称为飞行时间相机、测距成像(RIM)相机、3D 测距成像仪和测距相机或者这些术语的组合。在后面的章节中, 将主要使用 TOF 相机术语, 因为该术语与这种技术的工作原理相关度更高。该技术的出现得益于半导体技术的微型化和能够独立用于每个像素的电荷耦合元件/互补金属氧化物半导体(CCD/CMOS)工艺的发展。这样就能在高帧速率和几厘米测量精度条件下获取每个像素的距离测量信息。然而, 基于相位移动测量的 TOF 相机的工作距离限制在 10 ~ 30m 范围, 而基于直接 TOF 测量的 TOF 相机的测量距离能够高达 1500m。而且 TOF 相机通常情况下具有以下几个特征: 分辨率低(不超过几万像素)、尺寸小、成本比相应的 LiDAR 仪器小一个数量级, 功耗比相应的传统激光扫描仪小得多。与多视角图像采集相比, 深度测量精度通常与表面纹理无关, 但是最好也需要限制在大约 1cm 以内。

最近, TOF 相机的最佳替代品已经问世: 采用基于实时结构光投影和三角测量技术相结合的系列传感器, 这些传感器技术能够以低成本、高帧速率条件下同时获取几何形状和表面材质, 测量距离最高可以达到 4 ~ 5m。这类产品中最有名的传感器是 Microsoft Kinect^[10,11]。由于这类设备并不采用基于 TOF 测量原理, 因此本书将不做介绍。

为了概要介绍 TOF 相机技术, 本章简要讲解 TOF 相机的工作原理, 并描述

主要组成模块。随后，将要讲解和对比分析当今能够用于实现 TOF 探测器的主要技术。最后，本章给出一些结论和未来展望。

2 TOF 相机的工作原理

2.1 TOF 探测系统

图 1 概要介绍了典型 TOF 测量设备和包含的几个组成模块：(a) 脉冲或调制光源，通常情况下是采用对人眼安全的红外波段的激光或发光二极管照明；(b) 将发射光扩展到场景的光学扩束器；(c) 实现目标后向反射光信号收集功能的聚光透镜，通过将带通滤波器调节到光源所在波长范围，可以提高背景噪声抑制能力；最后，测量系统的核心是由光电探测器（像素）阵列组成的固态测距传感器 (d)，这种传感器具有能够以直接或间接方式测量光脉冲从光源到目标再返回到传感器的飞行时间测量能力。这种系统还需要合适的传感器接口为传感器提供电源，需要偏置电压或电流信号、数字控制相位以及从传感器读出的数据流，这些数据通常情况下需要通过较少的处理后获得 3D 立体数据。最后，传感器接口还负责与外围电路（个人计算机或处理单元）的通信。

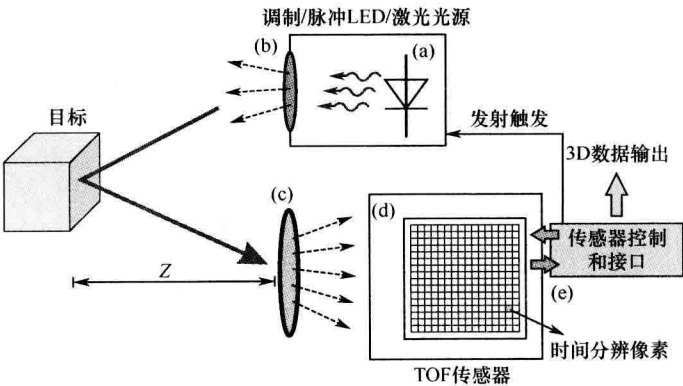


图 1 TOF 探测系统

2.2 TOF 测量技术

在经典的 TOF 测量技术中，即下面所指的直接 TOF（D-TOF），探测系统是由与发射光脉冲产生器同步的高精度计时器开始。探测到从目标返回的光信号后，计时器停止计时，然后直接记录往返所需要的时间 τ_{TOF} 。目标距离 Z 可以通过下述简单公式估算得出：

$$Z = \frac{c}{2} \cdot \tau_{\text{TOF}} \quad (1)$$

式中: $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为光在空气中的传播速度。

D-TOF 通常用于单点测距系统, 但是直到最近也用于非扫描的 TOF 系统, 这是因为亚纳秒电子计时器在像素水平上实现非常困难。这种技术特别适用于基于单光子雪崩二极管 (SPAD) 的 TOF 系统^[12-23], 第 2 章将详细介绍这种技术的具体实现。

替代 D-TOF 的可选择方案称为间接 TOF (I-TOF), 这种技术是利用光强度的时间门控测量方法间接计算出往返飞行时间。在这种情况下, 不需要精确的计时器, 但是需要时间门控光子计数器或电荷积分器, 通过这种技术便于在较小面积的硅材料上实现像素级集成。I-TOF 也自然是基于光电混合设备的 TOF 相机的解决方案。

图 2 给出的是采用脉冲和调制光源方式下的 D-TOF 的工作原理和四门控 I-TOF 的工作原理示意图, 然而 I-TOF 也可能用在其他许多方面。I-TOF 及电路实现将在下文中详细介绍。

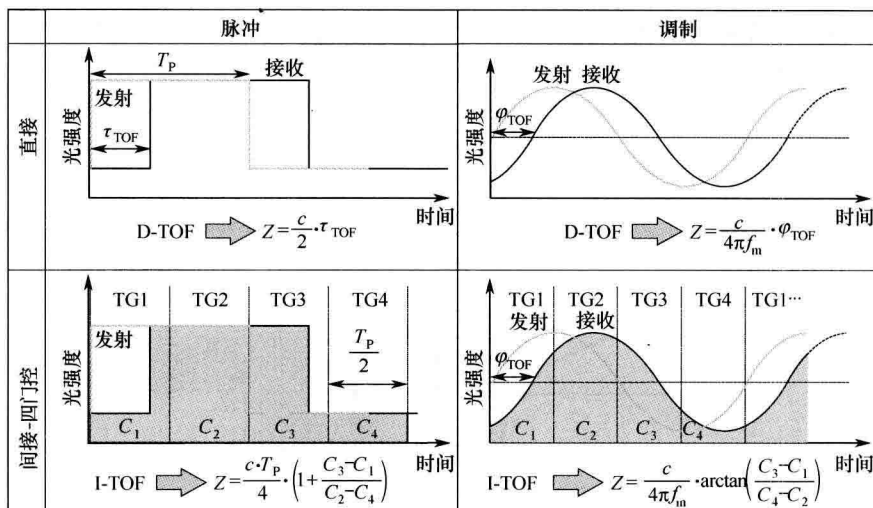


图 2 脉冲和调制的 D-TOF 及 I-TOF 测量技术的概述

3 时间分辨成像传感技术

尽管高级 3D 测量仪器市场已有许多基于激光扫描的 TOF 系统, 但是近 10 年来, 人们对非扫描、全固态 TOF 相机的兴趣与日俱增。于是, 用于这类系统的全定制探测器逐渐得到发展。主要划分为如下 3 类:

(1) 像素内置光混频器件。这种方法采用光解调器通过光激发产生电荷,

然后混频进入到两个或多个集电极, 这样可以获得固有的光混频效应。

(2) 耦合到专用处理电路的标准光电二极管。这种方法采用广泛使用的开关电容电子器件 (在像素内部或在外围电路实现), 从光电二极管的光激发电流获取距离信息。

(3) 耦合到合适处理电路的单光子雪崩光电二极管 (SPAD)。不同于 (2) 的是, 这种方法采用盖革工作模式的雪崩光电二极管获得单光子灵敏度, 使用这种器件收集反射光信号, 并耦合到读取和处理电路以便提取飞行时间信息。

最成熟的解决方案是属于 (1) 类方式的传感器, 而且目前市场上大部分 3D 相机实际上都采用基于这种概念的方式^[24-39]。这种方法的主要优势在于读取通道简单, 同时能够获得较小的像素尺寸; 最大的问题是对周围环境光比较敏感, 并且采用非标准技术成本较高 (如 CCD/CMOS、定制的 CMOS、高阻抗衬底等), 然而通常情况下这是必需的要求。

为了处理和积累光激发电荷, 需要在像素单元使用复杂的处理电路, 由此 (2) 类传感器的特点是像素间距大和功耗相对高^[40-48]。而且, 这种方法的精度通常低于 (1) 和 (2) 类方式, 原因是在信号路径中引入的大量晶体管所产生的噪声影响。另一方面, 点对点的处理结构能够在像素单元或在按列划分的单元上实现, 并且能够有效消除大部分共模信号, 这样就可以实现背景自恢复的传感器, 应用于像汽车和安保等户外工作方面。

最后, 自 20 世纪 80 年代以来, 基于 (3) 类传感器已经广泛用于高性能单点扫描系统中, 采用专用技术制造的雪崩光电二极管 (APD), 需要耦合到分立元件组成的读取和处理电路或测量仪器。然而直到最近, 采用 CMOS 技术实现高性能 APD/SPAD 成为可能后, 才为基于这种方式的测距成像传感器的实现铺平了道路^[12-23, 49-51]。

这种解决方案的最大优势是光电探测器具有极高的灵敏度, 能够探测到最小的单光子; 并且固有的低噪声性能能够使其工作在散粒噪声极限条件下。

第 2~4 章将分别详细介绍上述提到的几类传感器, 并且通过对每类传感器结构的电路和器件实现特殊方式的分析探讨各种方式的技术发展水平。

4 结 论

能够以亚纳秒时间分辨率探测入射光信号到达时间的图像传感器在许多应用中的重要性与日俱增。其中, TOF 3D 相机代表着具有拓展可能性最大的市场之一, 这是由于许多领域都需要采用这种技术。与标准 2D 成像仪相比, 3D 相机所提供的附加信息对于获取待测场景真实可信的模型至关重要, 这种技术开启了机器视觉领域的新型探测方式的先河。工业控制、下一代基于手势识别的用户界

面、先进汽车视觉系统等只是 3D 成像技术在重要领域应用的几个案例。

本章介绍了 TOF 相机的工作原理,回顾了到目前为止的主要 TOF 传感器结构。这些内容主要是第 2~4 章的引言部分,这几章将分别详细介绍基于 SPAD、电子快门和光混频器件的 TOF 传感器。

尽管最近几年在科学文献中提出了许多解决方案,然而在 TOF 3D 相机领域已出现了商业产品,但是仍存在许多有待改进提高的方面。对环境光的适应能力和动态范围增强是下一代 3D 相机的两个主要特征,然而传统相机需要持续提高分辨率和帧速率,同时需要减小功耗。在相同的传感器中增加彩色功能也是十分吸引人一个特征,而且人们已经首次尝试了实现这种功能。

TOF 技术发展也应该考虑更具有竞争性的技术,比如基于结构光和立体成像技术。这些系统成功地证明了日趋增长的消费市场能够显著降低系统成本。实际中,文献[11]提到的系统组成模块与 TOF 相机所需要的系统组成模块十分相同,即照明光源、定制图像传感器和光学部件。然而,这种系统的最终成本比 TOF 相机的成本要小一个数量级。

与 TOF 技术相比,基于结构光照明和立体成像系统的主要不足包括:

- ① 由于基线的要求,所以系统尺寸的减小空间有限;
- ② 为了获取深度信息所需要的运算量大,因而限制了传感器的帧速率和最小功耗;
- ③ 在一些测量条件下会产生人为误差。

接下来的 3~5 年,将会证明 TOF 技术所具有的潜力是否会出现 21 世纪初 CMOS 相机那样的惊人发展速度。

参 考 文 献

1. R. Schwarte, Principles of 3-D Imaging Technology, in *Handbook of Computer Vision and Applications*, ed. by B. Jähne, H. Haussecker, P. Geißler (Academic Press, 1999)
2. B. Jähne, H. Haussecker, P. Geißler, *Handbook of Computer Vision and Applications*, vol. 1 (Academic Press, San Diego, 1999) pp. 479–482
3. P. Besl, Active optical range imaging sensors. *Mach. Vis. Appl.* **1**, 127–152 (1988)
4. E.M. Mikhail, J.S. Betherl, J.C. McGlone, *Introduction to modern photogrammetry* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001)
5. M.-C. Amann, T.B.M. Lescure, R. Myllyla, M. Rioux, Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. *Opt. Eng.* **40**, 10–19 (2001)
6. F. Blais, Review of 20 years of range sensor development. *J. Elect. Imaging* **13**(1), 231–243 (2004)
7. B. Hosticka, P. Seitz, A. Simoni, Optical Time-Of-Fight sensors for solid-state 3D-vision. *Encycl. Sens.* **7**, 259–289 (2006)
8. Leica-geosystem website, www.leica-geosystems.com
9. Konicaminolta website, www.konicaminolta.com
10. F. Menna, F. Remondino, R. Battisti, E. Nocerino, Geometric investigation of a gaming active device. *Proc. SPIE Opt. Metrol.* **8085**(1), 80850G (2011)
11. K. Khoshelham, sO Elberink, Accuracy and resolution of kinetic depth data for indoor mapping applications. *Sensors* **12**, 1437–1454 (2012). doi:10.3390/s120201437

12. M.A. Albota et al. Three-dimensional imaging laser radars with geiger-mode avalanche photodiode arrays. *Lincoln Labs J.* **13**(2) 351–370 (2002)
13. C. Niclass, A. Rochas, P.A. Besse, E. Charbon, Design and characterization of a CMOS 3-D image sensor based on single photon avalanche diodes. *IEEE J. Solid-State Circuits* **40**(9), 1847–1854 (2005)
14. J. Richardson, R. Walker, L. Grant, D. Stoppa, F. Borghetti, E. Charbon, M. Gersbach, R. K. Henderson, A 32×32 50 ps resolution 10 bit time to digital converter array in 130 nm CMOS for time correlated imaging, in *IEEE Custom Integrated Circuits Conference* (2009) pp. 77–80
15. M. Gersbach, Y. Maruyama, E. Labonne, J. Richardson, R. Walker, L. Grant, R. K. Henderson, F. Borghetti, D. Stoppa, E. Charbon, “A Parallel 32×32 time-to-digital converter array fabricated in a 130 nm imaging CMOS technology”, in *IEEE European Solid-State Device Conference* (2009)
16. C. Veerappan, J. Richardson, R. Walker, D.U. Li, M.W. Fishburn, Y. Maruyama, D. Stoppa, F. Borghetti, M. Gersbach, R.K. Henderson, E. Charbon, A 160×128 single-photon image sensor with on-pixel, 55 ps 10b time-to-digital converter, in *IEEE International Solid-State Circuits Conference* (2011) pp. 312–314
17. D. Stoppa, F. Borghetti, J. Richardson, R. Walker, L. Grant, R.K. Henderson, M. Gersbach, E. Charbon, “A 32×32 -pixel array with in-pixel photon counting and arrival time measurement in the analog domain, in *IEEE European Solid-State Device Conference* (2009) pp. 204–207
18. R. J. Walker, J. R. Richardson, R. K. Henderson, A 128×96 pixel event-driven phase-domain $\Delta\Sigma$ -based fully digital 3D camera in $0.13\ \mu\text{m}$ CMOS imaging technology, *IEEE International Solid-State Circuits Conference* (2011) pp. 410–412
19. M. A. Itzler, M. Entwistle, M. Owens, K. Patel, X. Jiang, K. Slomkowski, S. Rangwala, Geiger-mode avalanche photodiode focal plane arrays for three-dimensional imaging LADAR. *SPIE Infrared Remote Sens. Instrum.* 7808 (2010)
20. B. Aull, J. Burns, C. Chenson, B. Felton, H. Hanson, C. Keast, J. Knecht, A. Loomis, M. Renzi, A. Soares, S. Vyshnavi, K. Warner, D. Wolfson, D. Yost, D. Young, Laser radar imager based on 3D integration of geiger-mode avalanche photodiodes with two SOI timing circuit layers. *IEEE Int. Solid-State Circuits Proc.* 304–305 (2006)
21. C. Niclass, C. Favi, T. Kluter, F. Monnier, E. Charbon, Single-photon synchronous detection. *IEEE J. Solid-State Circuits* **44**(7), 1977–1989 (2009)
22. C. Niclass, M. Soga, S. Kato, A $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS single-photon sensor for coaxial laser rangefinders, in *Asian Solid-State Circuits Conference* (2010)
23. L. Pancheri, N. Massari, F. Borghetti, D. Stoppa, A 32×32 SPAD pixel array with nanosecond gating and analog readout, *International Image Sensor Workshop (IISW)*, Hokkaido 8–11 June 2011
24. Mesa Imaging website, www.mesa-imaging.ch
25. PMD Technologies website, www.pmdtec.com
26. SoftKinetic website, www.softkinetic.com
27. T. Spirig, P. Seitz, O. Vietze, F. Heitger, The lock-in CCD two dimensional synchronous detection of light. *IEEE J. Quantum Electron.* **31**, 1705–1708 (1995)
28. R. Miyagawa, T. Kanade, CCD-based range-finding sensor. *IEEE Trans. Electron Dev.* **44**(10), 1648–1652 (1997)
29. S. Kawahito, I.A. Halin, T. Ushinaga, T. Sawada, M. Homma, Y. Maeda, A CMOS Time-Of-Flight range image sensor with gates-on-field-oxide structure. *IEEE Sens. J.* **7**(12), 1578–1586 (2007)
30. D. Van Nieuwenhove, W. Van Der Tempel, M. Kuijk, Novel standard CMOS detector using majority current for guiding photo-generated electrons towards detecting junctions, in *Proceedings of IEEE/LEOS Symposium, Benelux Chapter*, pp. 229–232 (2005)
31. W. van der Tempel, R. Grootjans, D. Van Nieuwenhove, M. Kuijk, A 1k-pixel 3-D CMOS sensor, in *Proceedings of IEEE Sensors Conference* (2008) pp. 1000–1003
32. G.-F. Dalla Betta, S. Donati, Q.D. Hossain, G. Martini, L. Pancheri, D. Saguatti, D. Stoppa, G. Verzellesi, Design and characterization of current-assisted photonic demodulators in $0.18\text{-}\mu\text{m}$ CMOS technology. *IEEE Trans. Electron Dev.* **58**(6), 1702–1709 (2011)

33. L. Pancheri, D. Stoppa, N. Massari, M. Malfatti, L. Gonzo, Q. D. Hossain, G.-F. Dalla Betta, A 120x160 pixel CMOS range image sensor based on current assisted photonic demodulators. in *Proceedings of SPIE*, vol. 7726 (SPIE Photonics Europe, Brussels, Belgium, 2010) pp. 772615
34. D. Stoppa, N. Massari, L. Pancheri, M. Malfatti, M. Perenzoni, L. Gonzo, A range image sensor based on 10- μm lock-in pixels in 0.18- μm CMOS imaging technology. *IEEE J. Solid-State Circuits* **46**(1), 248–258 (2011)
35. H.-J. Yoon, S. Itoh, S. Kawahito, A CMOS image sensor with in-pixel two-stage charge transfer for fluorescence lifetime imaging. *IEEE Trans. Electron Dev.* **56**(2), 214–221 (2009)
36. L.-E. Bonjour, T. Baechler, M. Kayal, High-speed general purpose demodulation pixels based on buried photodiodes, in *Proceedings of IISW 2011* (Hokkaido, June 8–11, 2011)
37. C. Tubert, L. Simony, F. Roy, A. Tournier, L. Pinzelli, P. Magnan, High speed dual port pinned-photodiode for Time-Of-Flight imaging, in *Proceedings of IISW 2009* (Bergen, Norway, June 26–28, 2009)
38. H. Takeshita, T. Sawada, T. Iida, K. Yasutomi, S. Kawahito, High-speed charge transfer pinned-photodiode for a CMOS Time-Of-Flight range image sensor. *Proc. SPIE* **7536**, 75360R (2010)
39. S.-J. Kim, J.D.K. Kim, S.-W. Han, B. Kang, K. Lee, C.-Y. Kim “A 640 $\times$ 480 image sensor with unified pixel architecture for 2D/3D imaging in 0.11 μm CMOS. *IEEE Symp VLSI Circuits*, 92–93 (2011)
40. R. Jeremias, W. Brockherde, G. Doemens, B. Hosticka, L. Listl, P. Mengel, A CMOS photosensor array for 3D imaging using pulsed laser. *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.* 252–253 (2001)
41. D. Stoppa, L. Viarani, A. Simoni, L. Gonzo, M. Malfatti and G. Pedretti, “A 50 $\times$ 30-pixel CMOS sensor for TOF-based Real Time 3D Imaging”, *Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors*, Karuizawa, Nagano, 2005
42. M. Perenzoni, N. Massari, D. Stoppa, L. Pancheri, M. Malfatti, L. Gonzo, A 160 $\times$ 120-pixels range camera with in-pixel correlated double sampling and fixed-pattern noise correction. *IEEE J. Solid-State Circuits* **46**(7), 1672–1681 (2011)
43. O. Sgrott, D. Mosconi, M. Perenzoni, G. Pedretti, L. Gonzo, D. Stoppa, A 134-pixel CMOS sensor for combined Time-Of-Flight and optical triangulation 3-D imaging. *IEEE J. Solid-State Circuits* **45**(7), 1354–1364 (2010)
44. K. Oberhauser, G. Zach, H. Zimmermann, Active bridge-correlator circuit with integrated PIN photodiode for optical distance measurement applications, in *Proceedings of the 5th IASTED International Conference Circuits, Signals and Systems* (July 2007) pp. 209–214
45. G. Zach, A. Nemecek, H. Zimmermann, Smart distance measurement line sensor with background light suppression and on-chip phase generation, in *Proceedings of SPIE, Conference on Infrared Systems and Photoelectronic Technology III*, vol. 7055 (Aug 2008) pp. 70550P1–70550P10
46. G. Zach, H. Zimmermann, A 2 $\times$ 32 range-finding sensor array wit pixel-inherent suppression of ambient light up to 120klx, in *IEEE International Solid-State Circuits Conference* (2009) pp. 352–353
47. G. Zach, M. Davidovic, H. Zimmermann, A 16 $\times$ 16 pixel distance sensor with in-pixel circuitry that tolerates 150 klx of ambient light. *IEEE J. Solid-State Circuits* **45**(7), 1345–1353 (2010)
48. C. Niclass, C. Favi, T. Kluter, M. Gersbach, E. Charbon, A 128 $\times$ 128 single-photon image sensor with column-level 10-bit time-to-digital converter array. *IEEE J. Solid-State Circuits* **43**(12), 2977–2989 (2008)
49. C. Niclass, M. Sergio, E. Charbon, A CMOS 64x48 single photon avalanche diode array with event-driven readout, in *IEEE European Solid-State Circuit Conference* (2006)
50. J.S. Massa, G.S. Buller, A.C. Walker, S. Cova, M. Umasuthan, A.M. Wallace, Time-pf-flight optical ranging system based on time-correlated single-photon counting. *App. Opt.* **37**(31), 7298–7304 (1998)
51. D. Stoppa, L. Pancheri, M. Scandiuozzo, L. Gonzo, G.-F. Della Betta, A. Simoni, A CMOS 3-D imager based on single photon avalanche diode. *IEEE Trans. Circuits Syst.* **54**(1), 4–12 (2007)