



南京理工大学

NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY

计算光学成像与 光信息处理技术前沿

(第5讲)

左超

南京理工大学电光学院光电技术系

Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligent Sense (SIIS)

Nanjing University of Science and Technology,

Nanjing, Jiangsu Province 210094, China



电子工程与光电技术学院

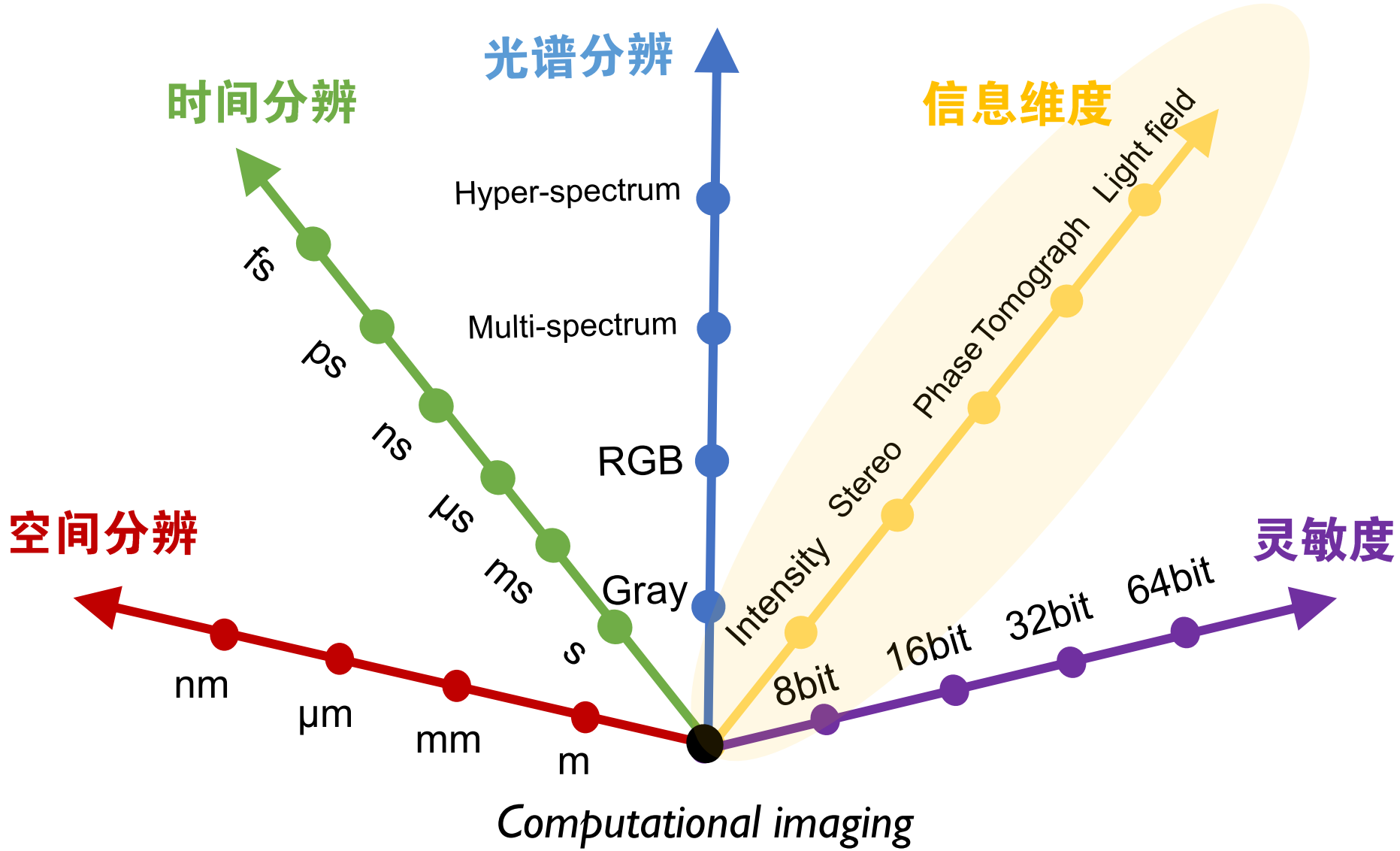
School of Electronic and Optical Engineering



江苏省光谱成像与智能感知重点实验室

Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligent Sense

What is *computational imaging*?



3D

真的来了吗？

—— 三维结构光传感器技术浅谈



3D

真的来了吗？

—— 三维结构光传感器技术浅谈













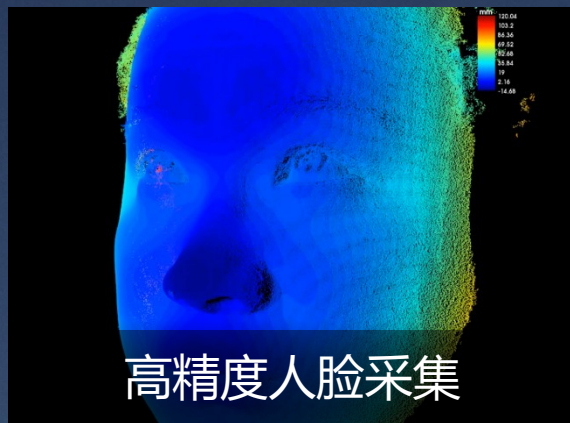




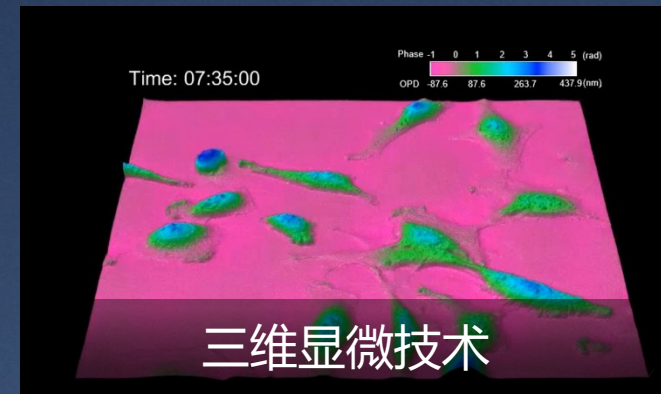
三维考古



三维远程课堂



高精度人脸采集



三维显微技术



三维智能制造



三维人脸支付



三维远程通话



三维人脸识别



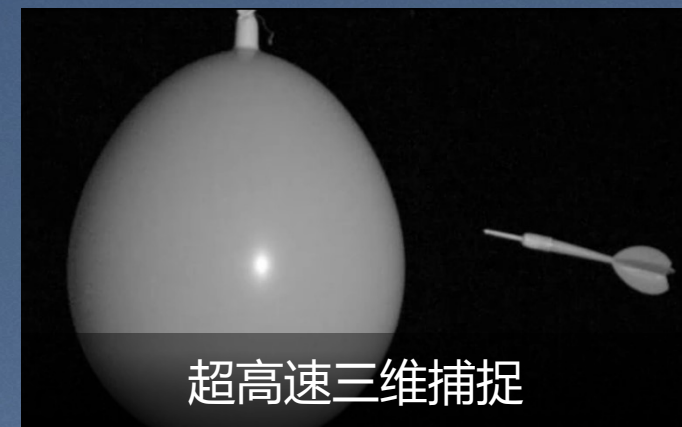
三维人脸门禁



三维文物修复



三维远程医疗



超高速三维捕捉

附件 3

智能制造工程实施指南（2016-2020）

为贯彻落实《中国制造 2025》，组织实施好智能制造工程（以下简称“工程”），特编制本指南。

一、背景

自国际金融危机发生以来，随着新一代信息通信技术的快速发展及与先进制造技术不断深度融合，全球兴起了以智能制造为代表的新一轮产业变革，数字化、网络化、智能化日益成为未来制造业发展的主要趋势。世界主要工业发达国家加紧谋篇布局，纷纷推出新的重振制造业国家战略，支持和推动智能制造发展，以重塑制造业竞争新优势。为加速我国制造业转型升级、提质增效，国务院发布实施《中国制造 2025》，并将智能制造作为主攻方向，加速培育我国新的经济增长动力，抢占新一轮产业竞争制高点。

当前，我国制造业尚处于机械化、电气化、自动化、信息化并存，不同地区、不同行业、不同企业发展不平衡的阶段。发展智能制造面临关键技术装备受制于人、智能制造标准/软件/网络/信息安全基础薄弱、智能制造新模式推广尚未起步、智能化集成应用缓慢等突出问题。相对工业发达国家，推动我国制造业智能转型，环境更为复杂，形势更为严峻，

为贯彻落实
程（以下简称“

一、背景

自国际金融
快速发展及与先
能制造为代表的
日益成为未来制
家加紧谋篇布局
和推动智能制造
国制造业转型升
2025》，并将智
经济增长动力，抢

当前，我国
息化并存，不同
段。发展智能制
准/软件/网络/信
起步、智能化集
推动我国制造业

节型、平面关节（SCARA）型搬运机器人；在线测量及质量监控机器人；洁净及防爆环境特种工业机器人；具备人机协调、自然交互、自主学习功能的新一代工业机器人。

增材制造装备。高功率光纤激光器、扫描振镜、动态聚焦镜及高品质电子枪、光束整形、高速扫描、阵列式高精度喷嘴、喷头；激光/电子束高效选区熔化、大型整体构件激光及电子束送粉/送丝熔化沉积等金属增材制造装备；光固化成形、熔融沉积成形、激光选区烧结成形、无模转型、喷射成形等非金属增材制造装备；生物及医疗个性化增材制造装备。

智能传感与控制装备。高性能光纤传感器、微机电系统（MEMS）传感器、多传感器元件芯片集成的MCO芯片、**视觉传感器及智能测量仪表**、电子标签、条码等采集系统装备；分散式控制系统（DCS）、可编程逻辑控制器（PLC）、数据采集系统（SCADA）、高性能高可靠嵌入式控制系统装备；高端调速装置、伺服系统、液压与气动系统等传动系统装备。

智能检测与装配装备。数字化非接触精密测量、在线无损检测系统装备；可视化柔性装配装备；激光跟踪测量、柔性可重构工装的对接与装配装备；智能化高效率强度及疲劳寿命测试与分析装备；设备全生命周期健康检测诊断装备；基于大数据的在线故障诊断与分析装备。

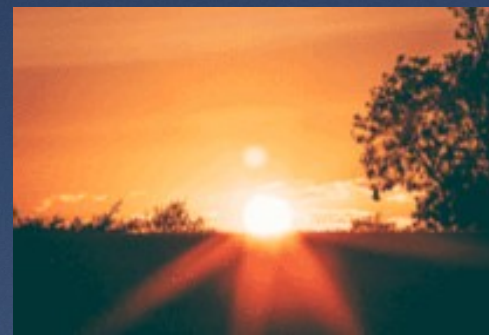
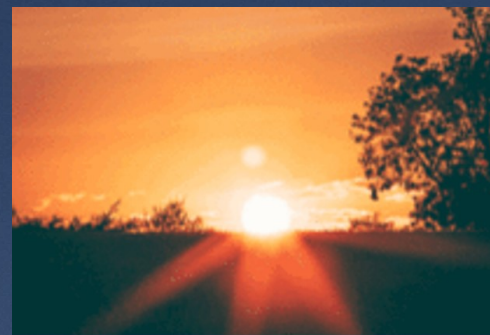
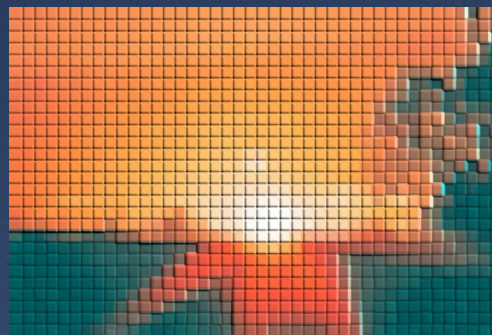
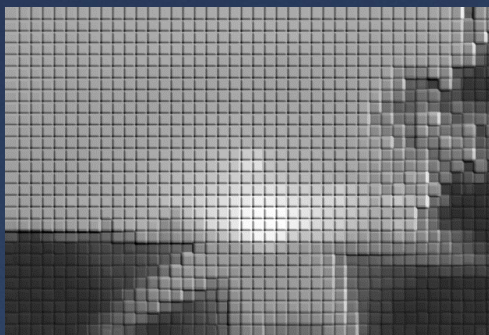
智能物流与仓储装备。轻型高速堆垛机；超高超重型堆垛机；高速智能分拣机；智能多层穿梭车；智能化高密度存储穿梭板；高速托盘输送机；高参数自动化立体仓库；高速大容量输送与分拣成套装备、车间物流智能化成套装备。

（二）夯实智能制造基础

重点围绕智能制造标准滞后、核心软件缺失、工业互联网基础和信息安全系统薄弱等瓶颈问题，构建基本完善的智能制造标准体系，开发智能制造核心支撑软件，建立高效可靠的工业互联网基础和信息安全系统，形成智能制造发展坚实的基础支撑。

1、构建国家智能制造标准体系。制定并发布《国家智能制造标准体系建设指南》，开展智能制造的基础共性、关键技术、重点行业标准与规范的研究，构建标准试验验证平台（系统），进行技术规范、标准全过程试验验证，在制造业各个领域进行全面推广，形成智能制造强有力的标准支撑。

三维传感作为智能制造中一项关键性信息输入环节，使机器“感知世界”，是一切制造的自动化、智能化、再创造化的新起点。



黑白 → 彩色

低分辨 → 高分辨

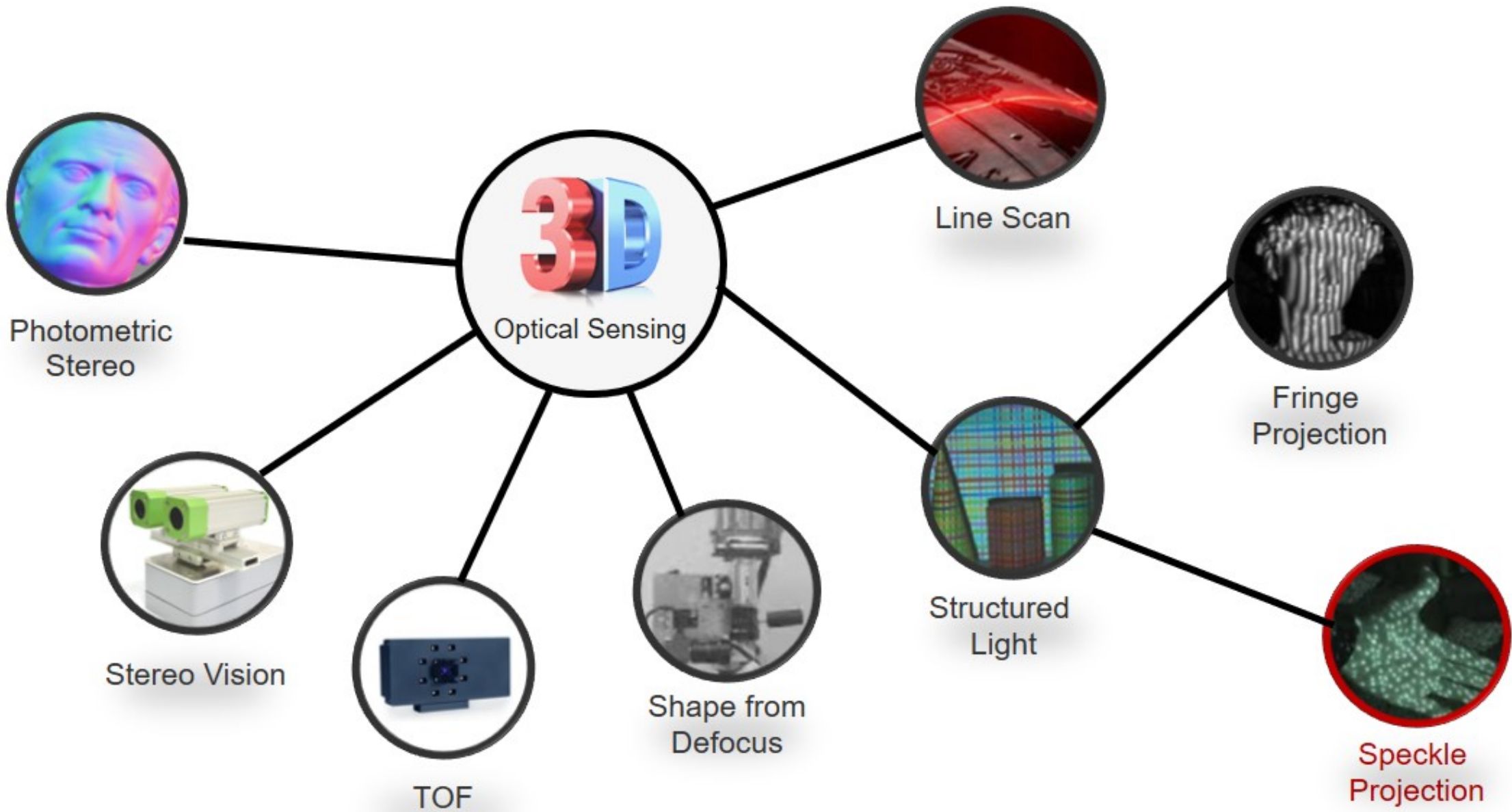
静态图像 → 动态视频



2D → 3D : 第四次影像革命

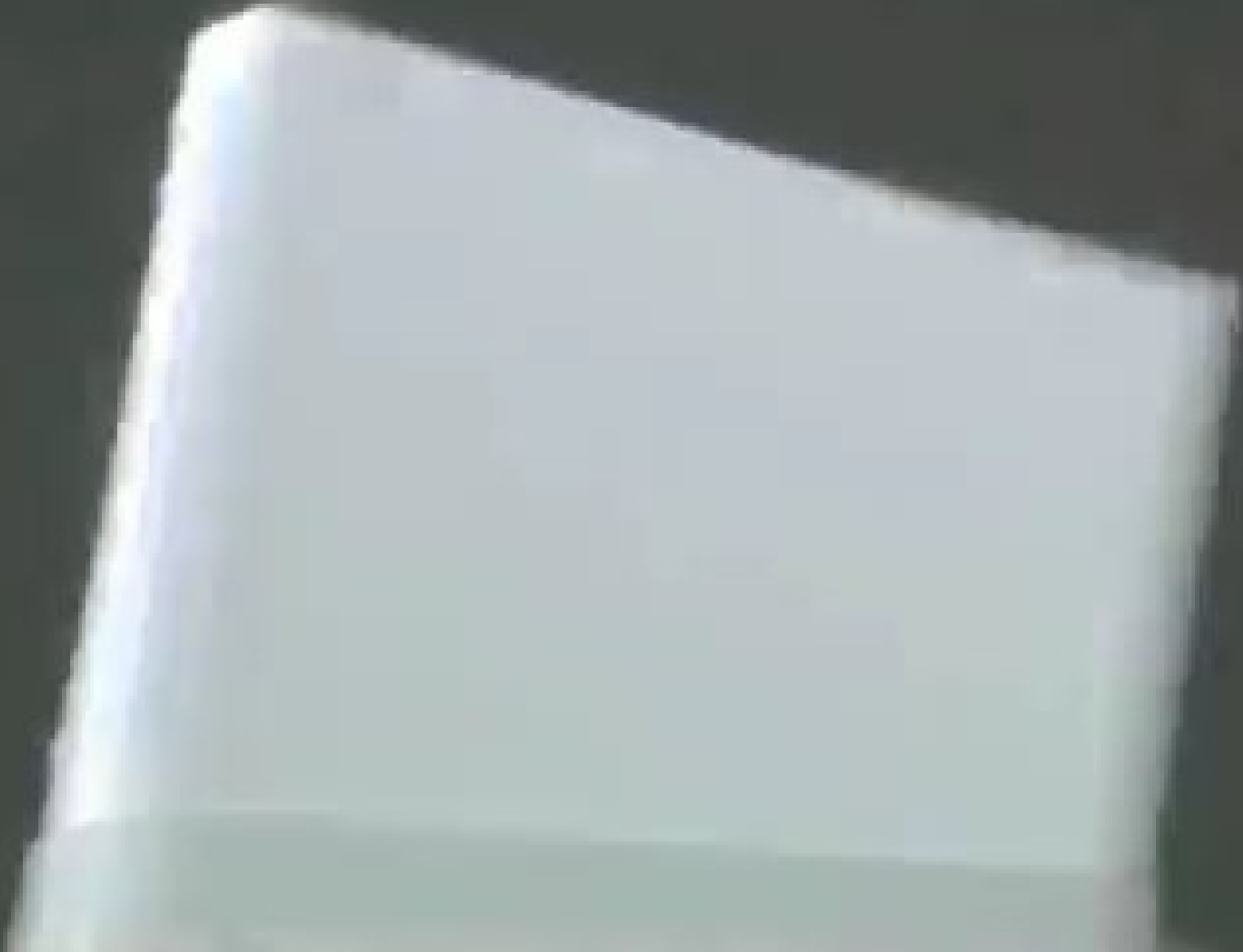
- ① 三维光学传感技术概述
- ② 三维光学传感器的前世今生
- ③ 散斑结构光三维传感技术浅析
- ④ 散斑结构光三维传感技术的典型应用
- ⑤ 散斑结构光三维传感技术现存问题
- ⑥ 结构光三维传感技术未来方向

- ① 三维光学传感技术概述
- ② 三维光学传感器的前世今生
- ③ 散斑结构光三维传感技术浅析
- ④ 散斑结构光三维传感技术的典型应用
- ⑤ 散斑结构光三维传感技术现存问题
- ⑥ 结构光三维传感技术未来方向



- ① 三维光学传感技术概述
- ② 三维光学传感器的前世今生
- ③ 散斑结构光三维传感技术浅析
- ④ 散斑结构光三维传感技术的典型应用
- ⑤ 散斑结构光三维传感技术现存问题
- ⑥ 结构光三维传感技术未来方向







XBOX 360™

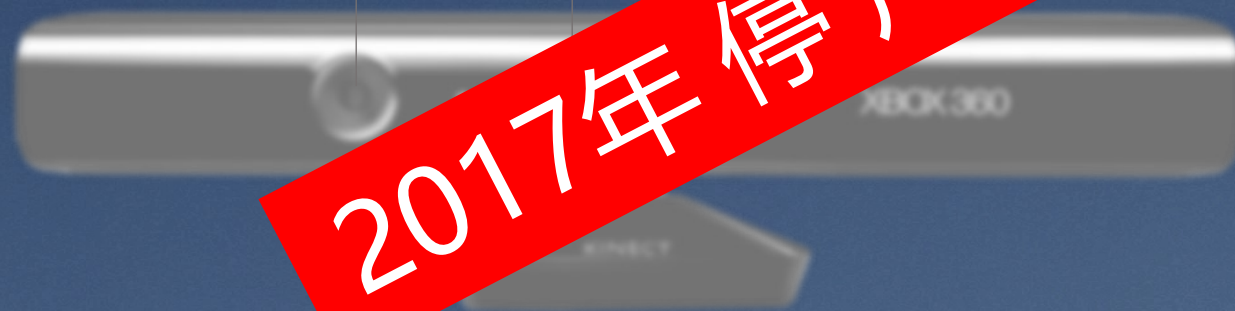




前置摄像头

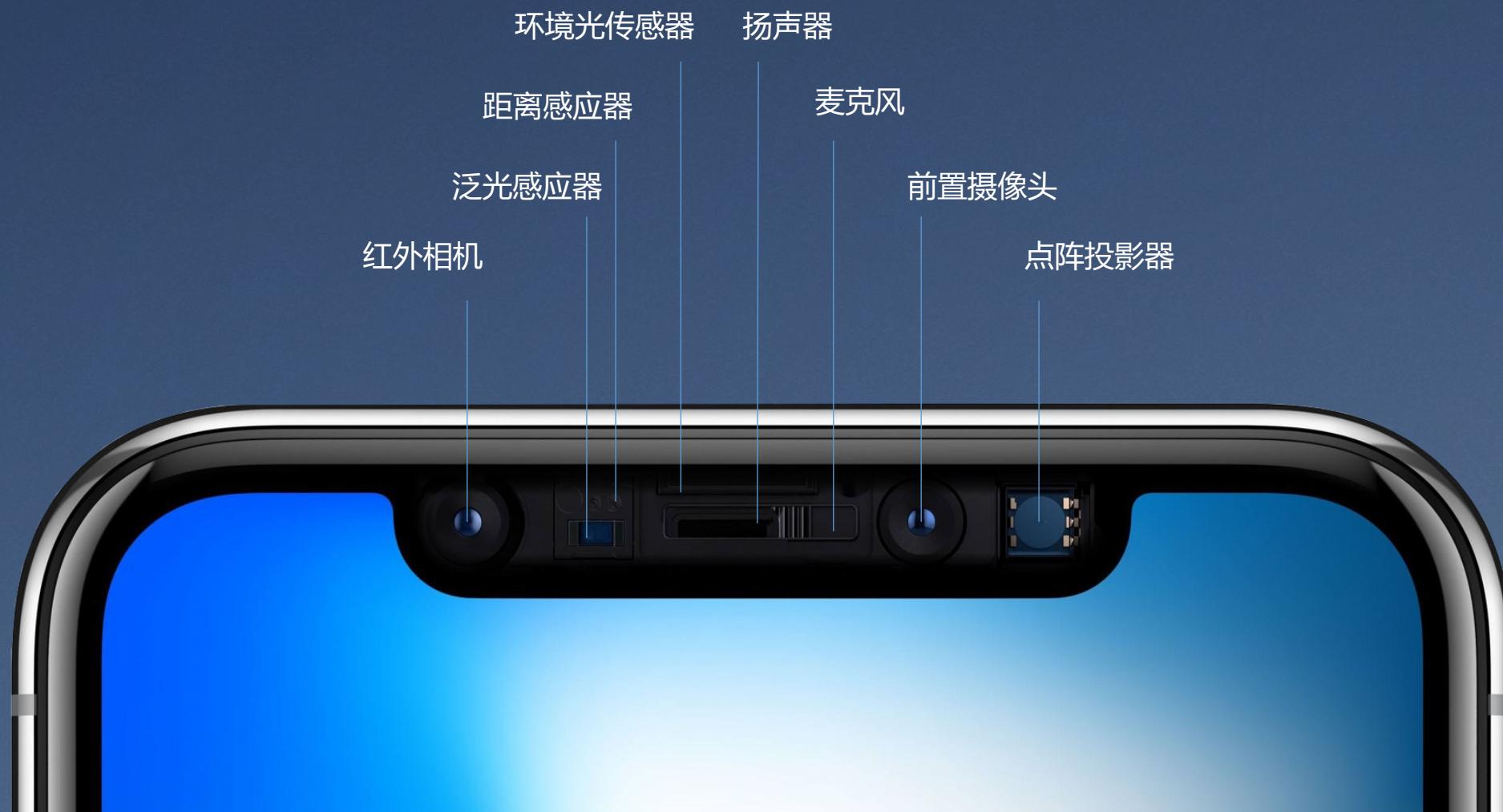
点阵投影器

红外相机



2017年停产





环境光传感器

扬声器

距离感应器

麦克风

泛光感应器

前置摄像头

红外相机

点阵投影器









三维传感技术将是未来基建的重要组成部分，它将带来更加智慧的人工智能，精确安全的人脸支付，身临其境的游戏体验，安全高效的社会运转，更加有温度的虚拟社交.....它还有望颠覆性地改变人与机器、人与人的交互形式，成为我们身边无处不在的一种生活方式。



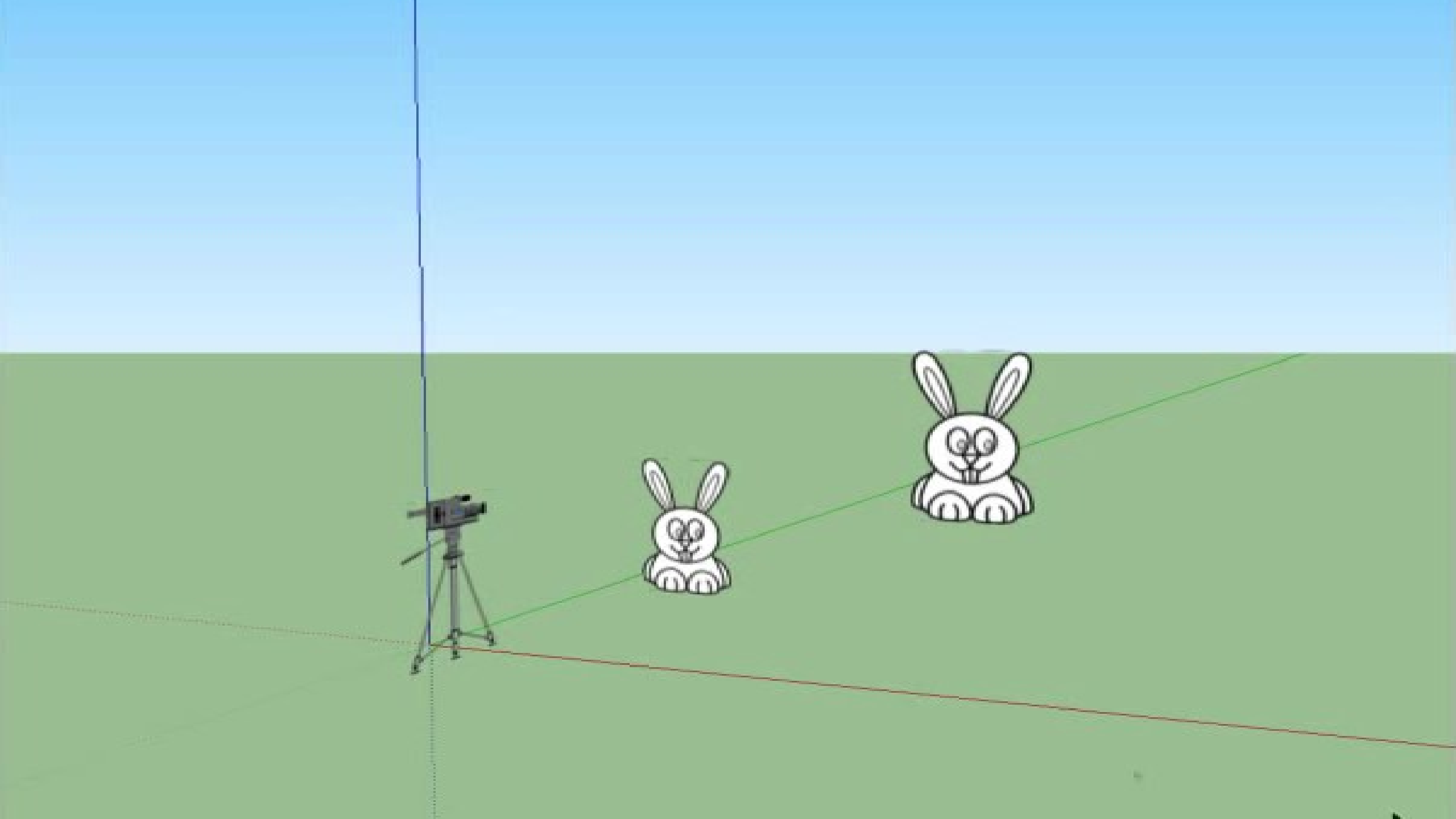
- ① 三维光学传感技术概述
- ② 三维光学传感器的前世今生
- ③ 散斑结构光三维传感技术浅析
- ④ 散斑结构光三维传感技术的典型应用
- ⑤ 散斑结构光三维传感技术现存问题
- ⑥ 结构光三维传感技术未来方向

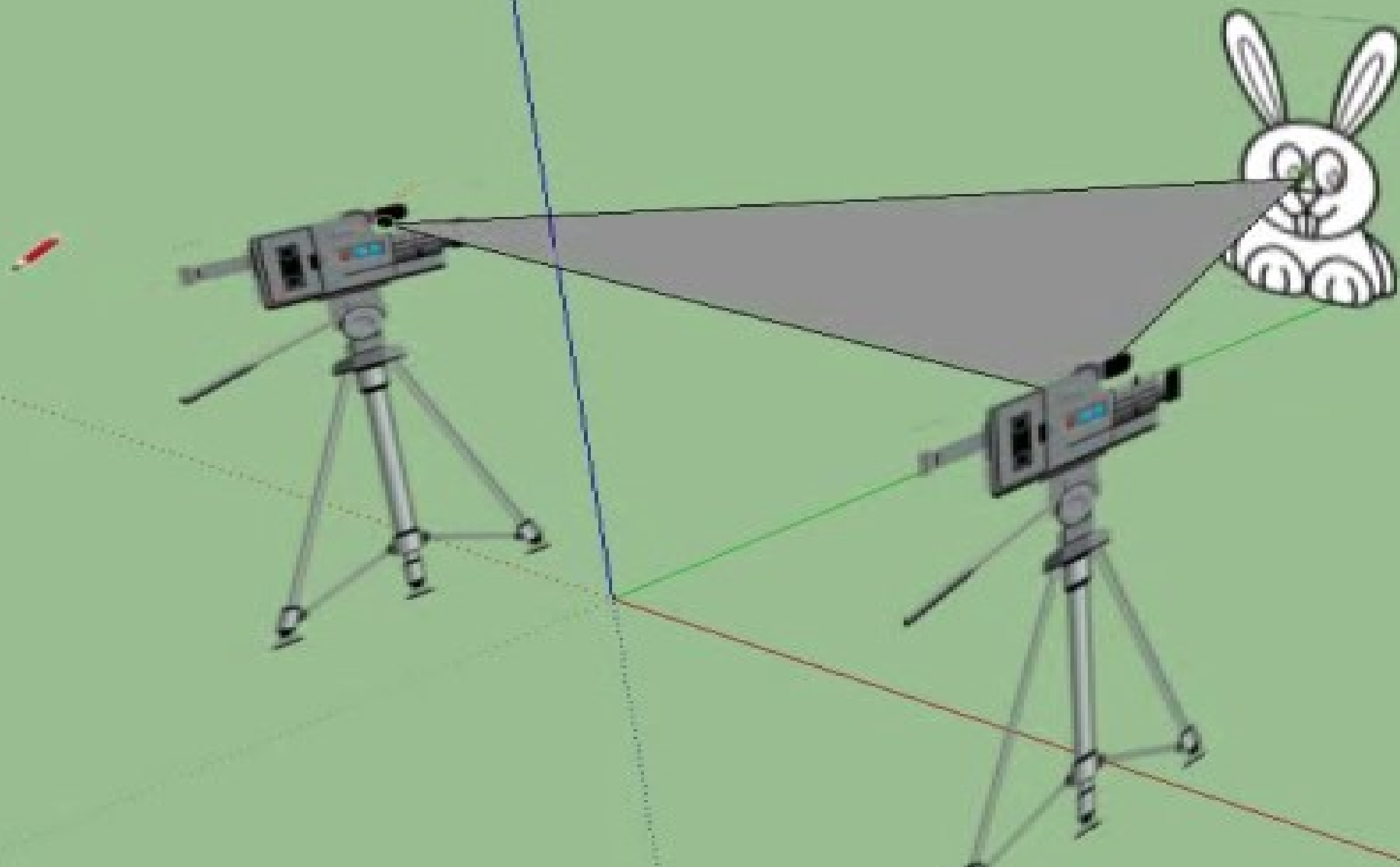
3.1

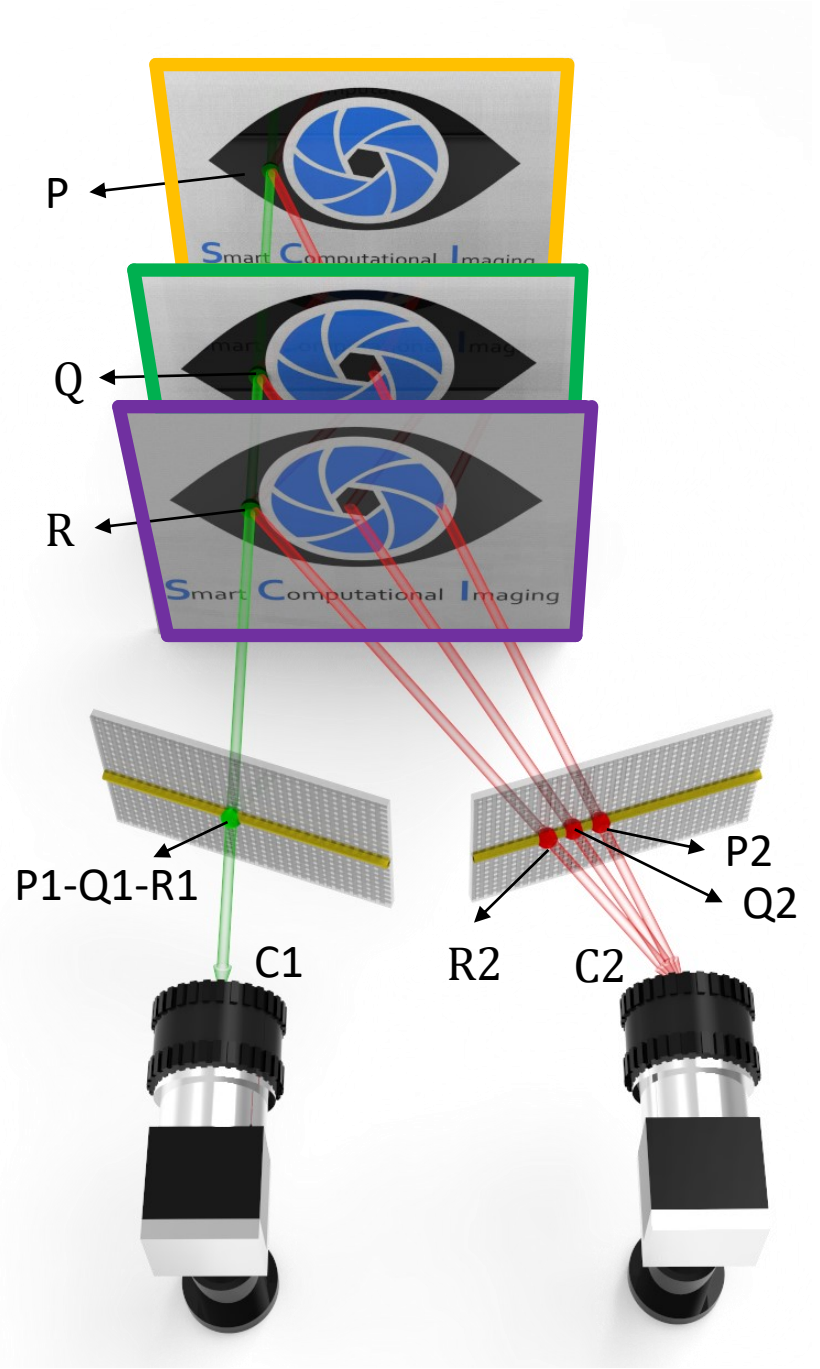
结构光传感器基本原理



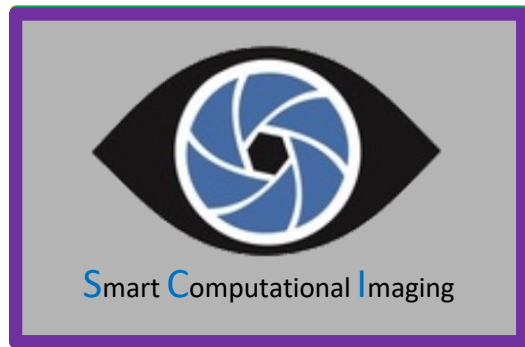






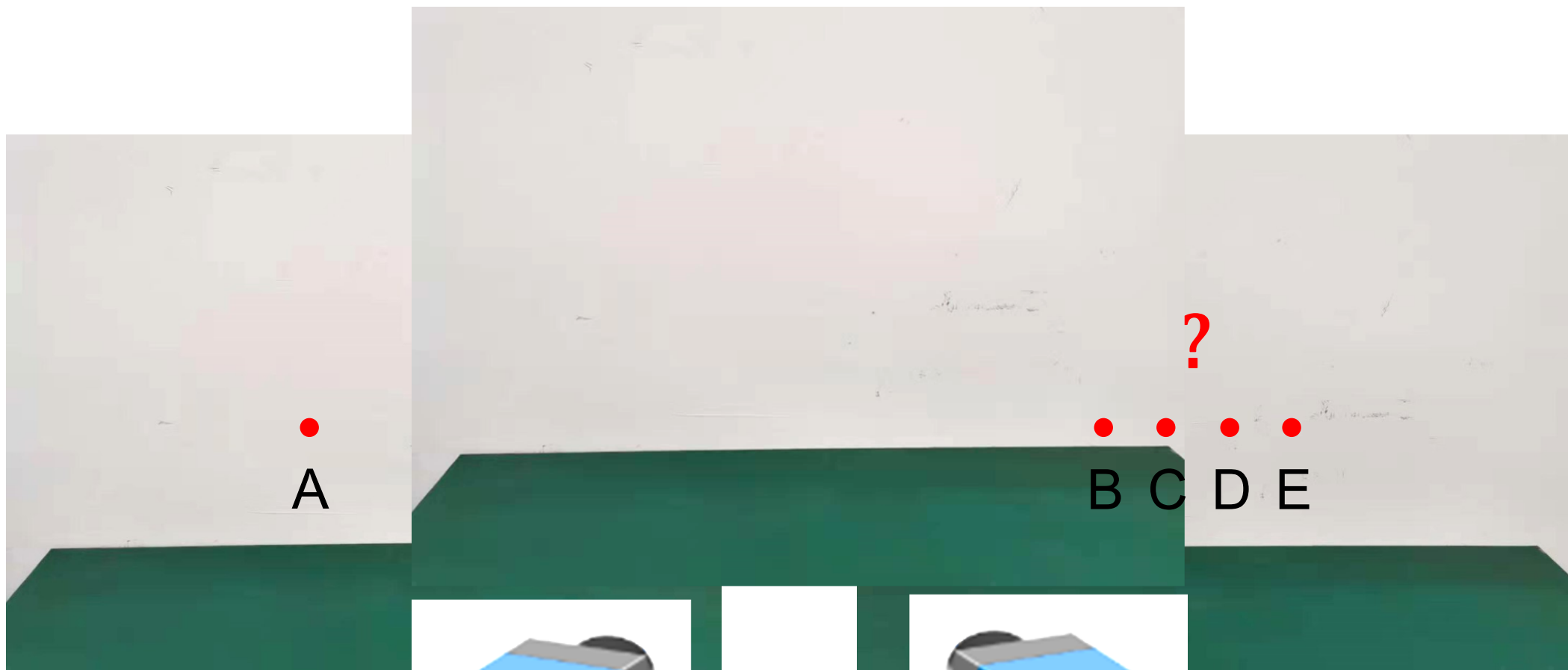


Left camera



Right camera





A



B



C



D



E

Left can

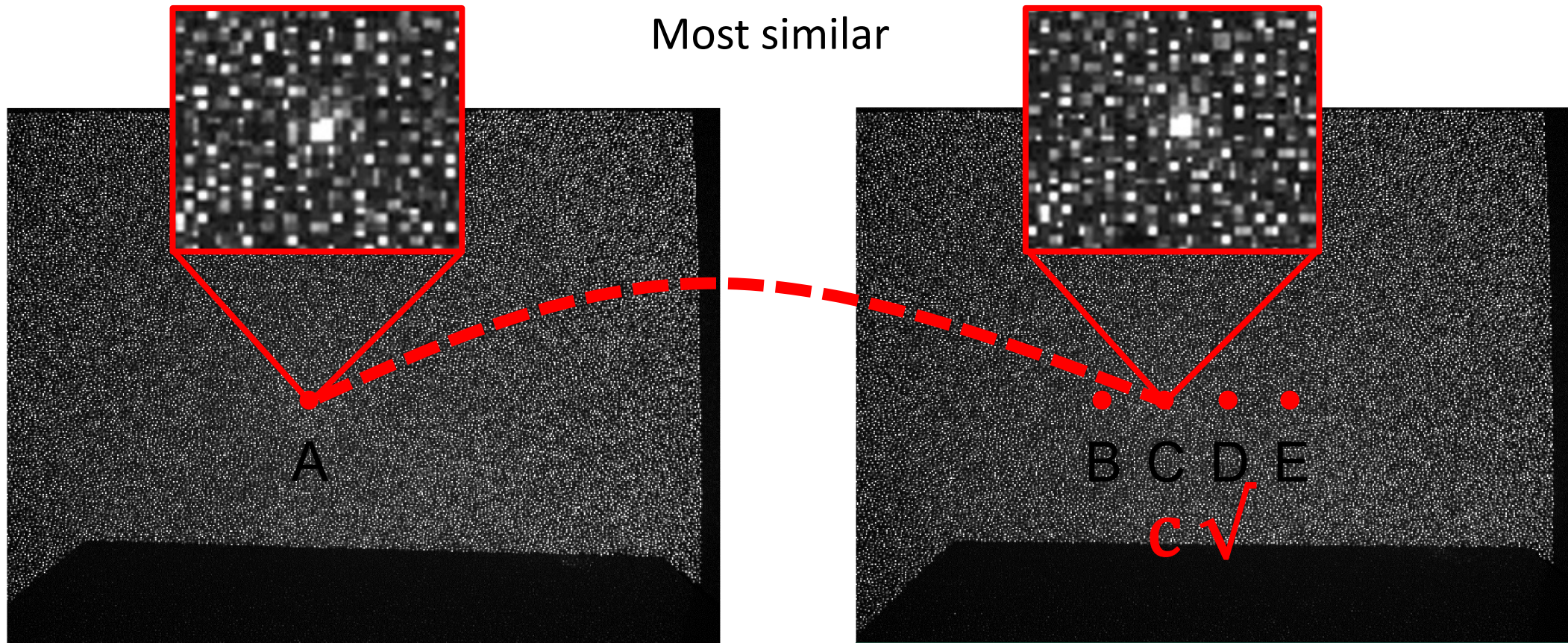


Left camera



camera

Right camera



Most similar

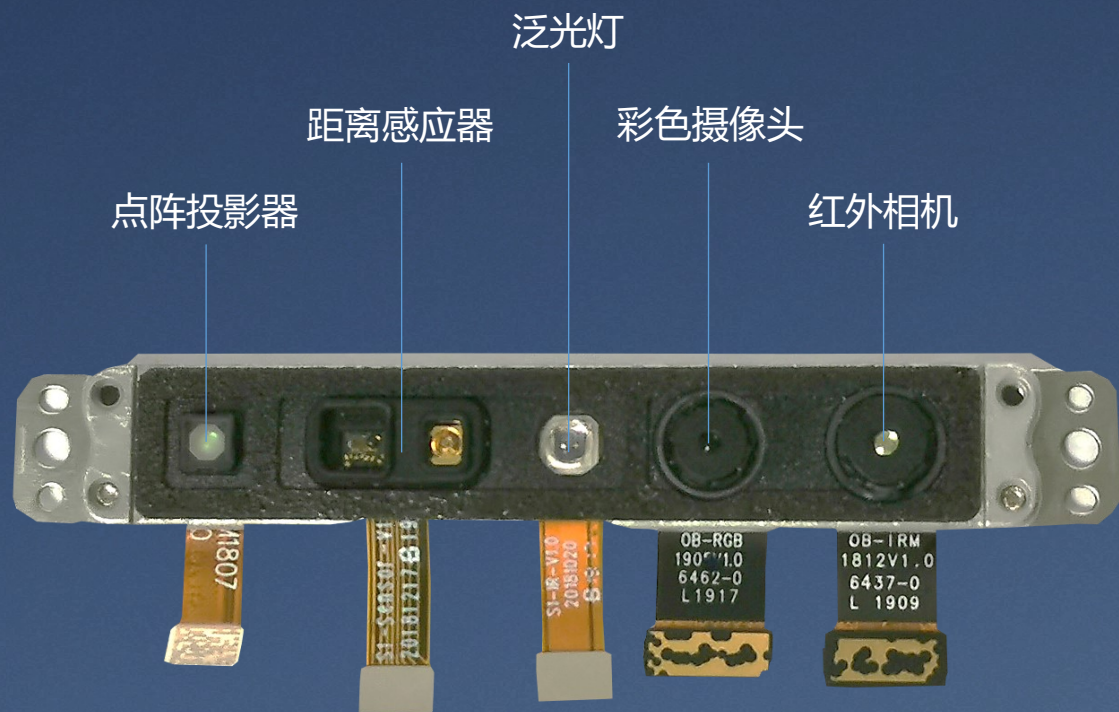
Left camera

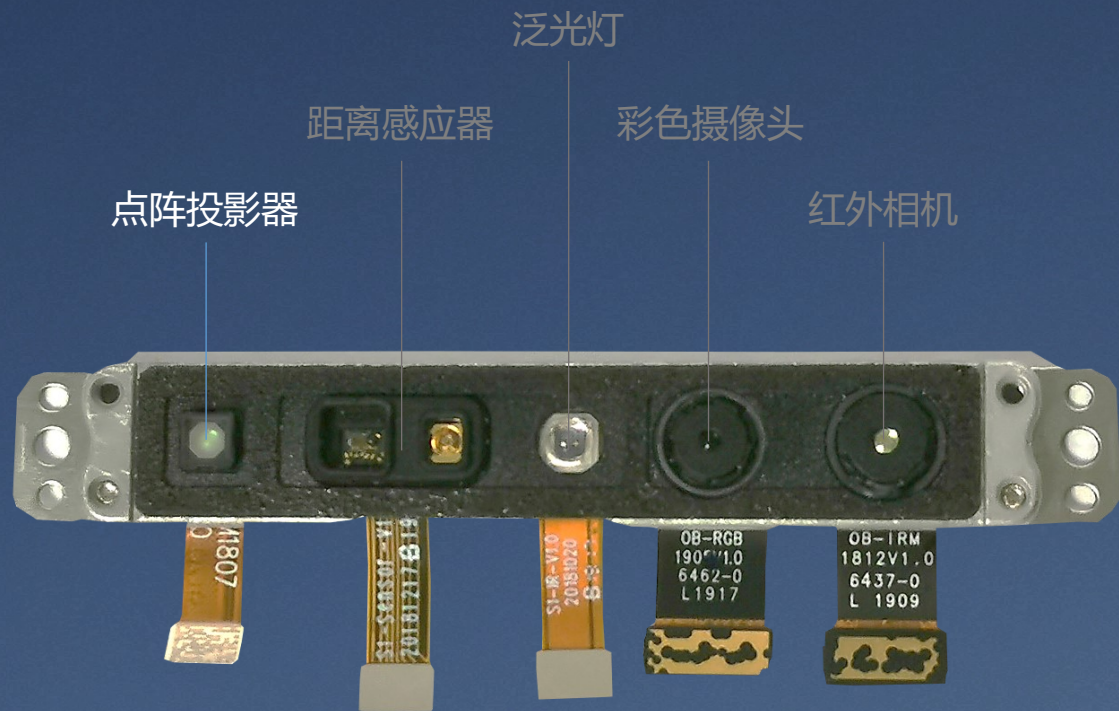
Right camera

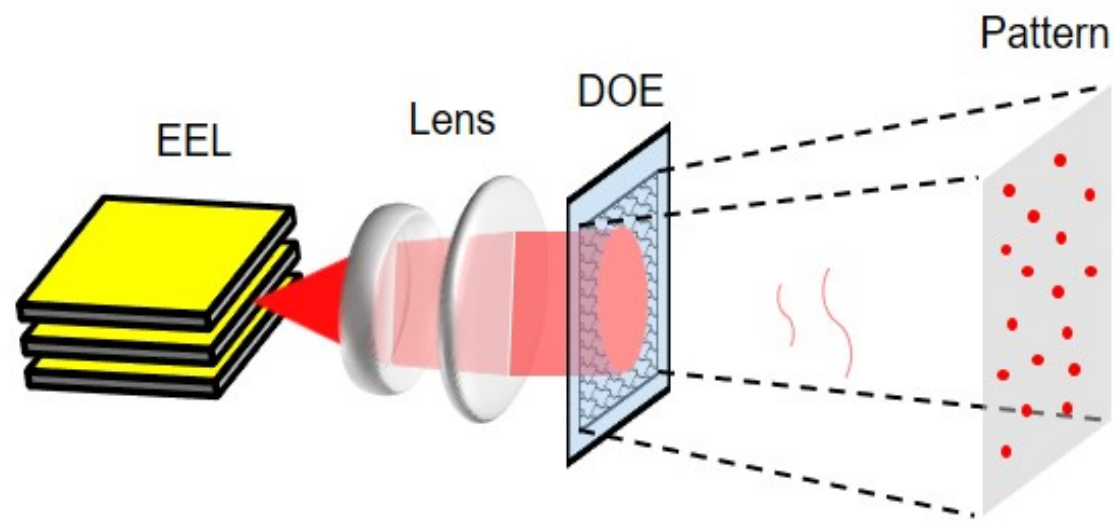
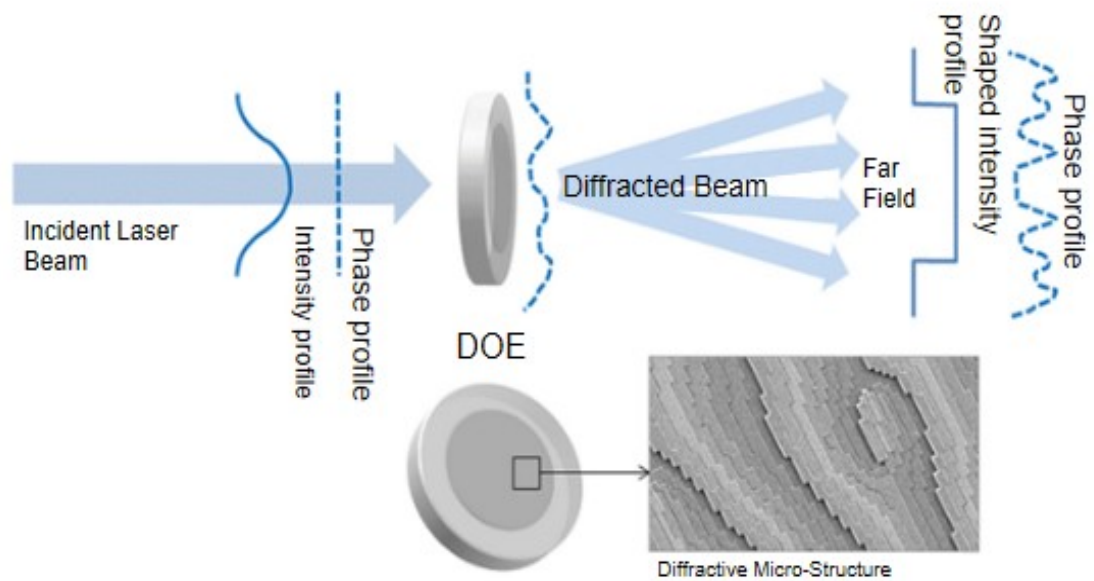


3.2

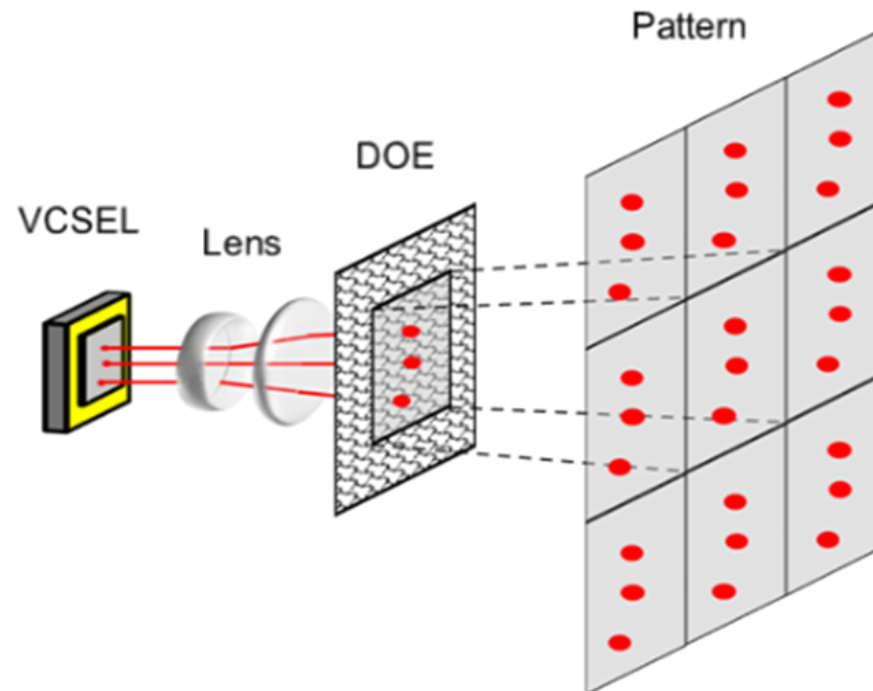
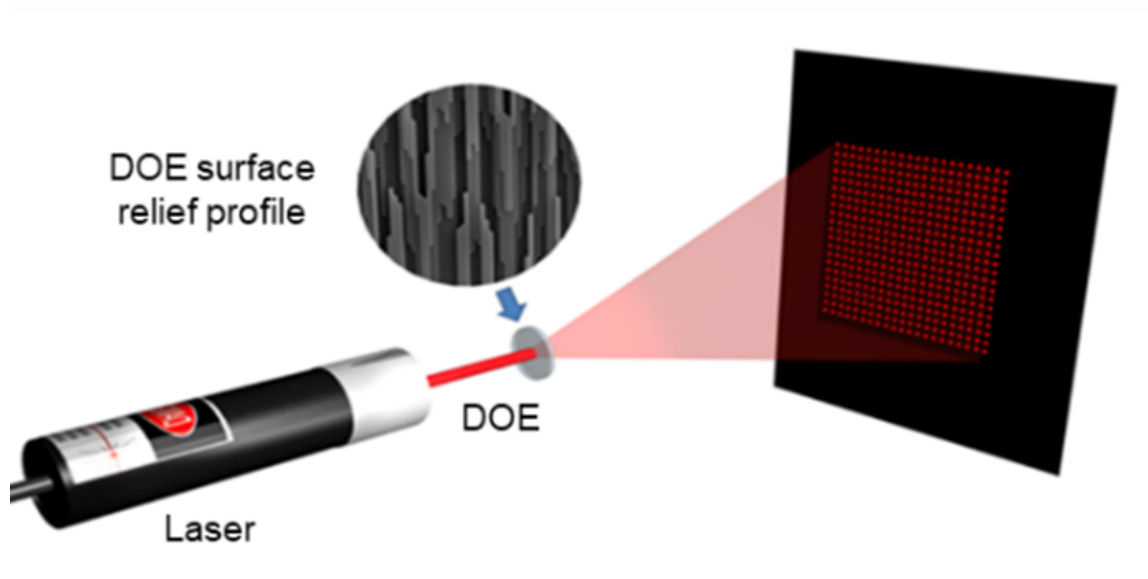
结构光传感器关键器件







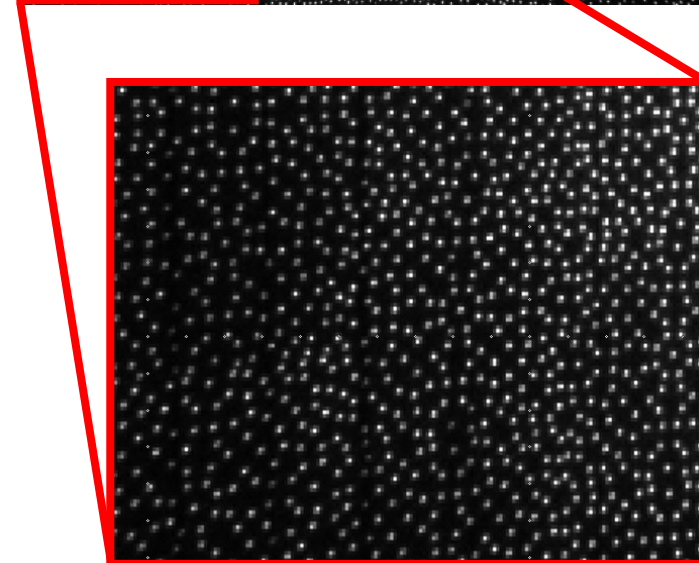
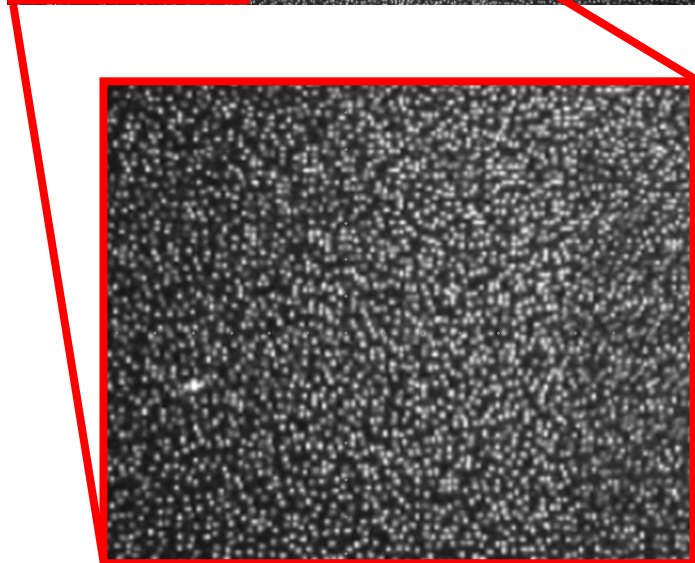
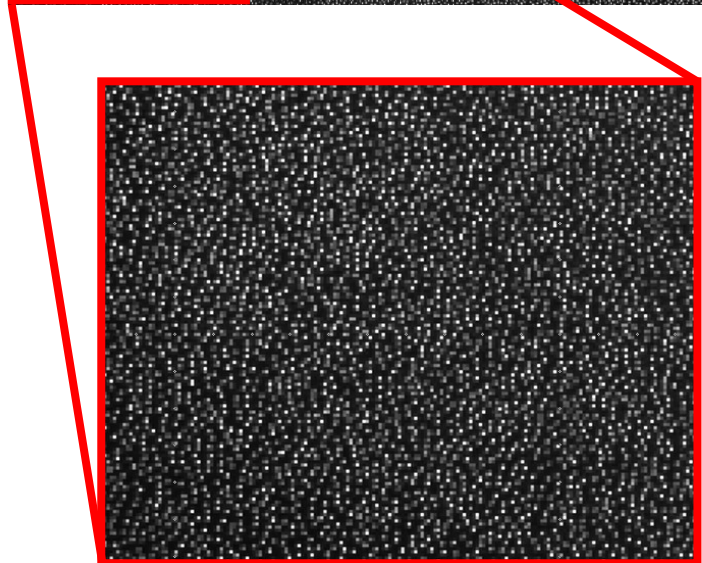
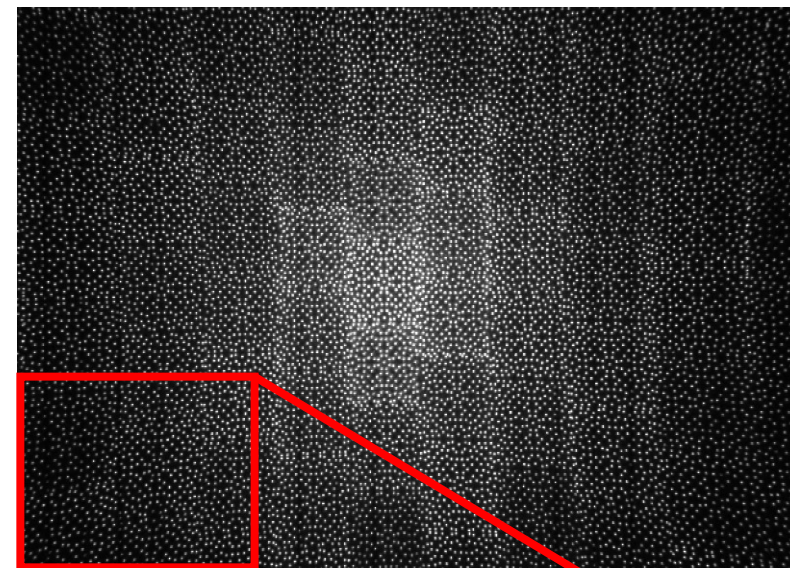
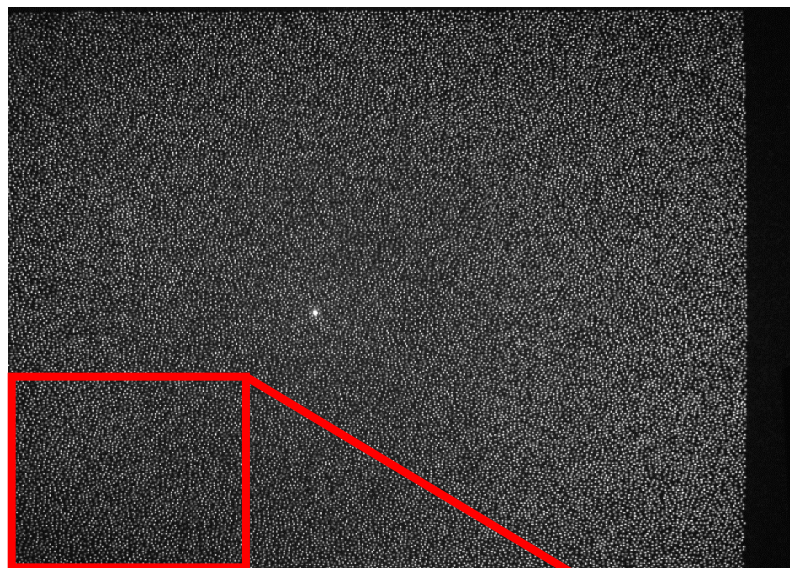
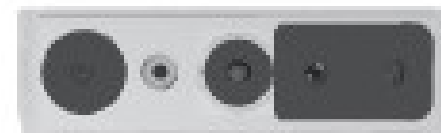
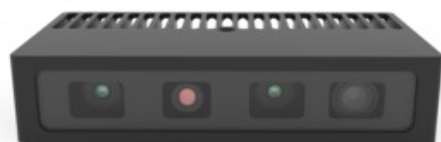
散斑生成



散斑复制

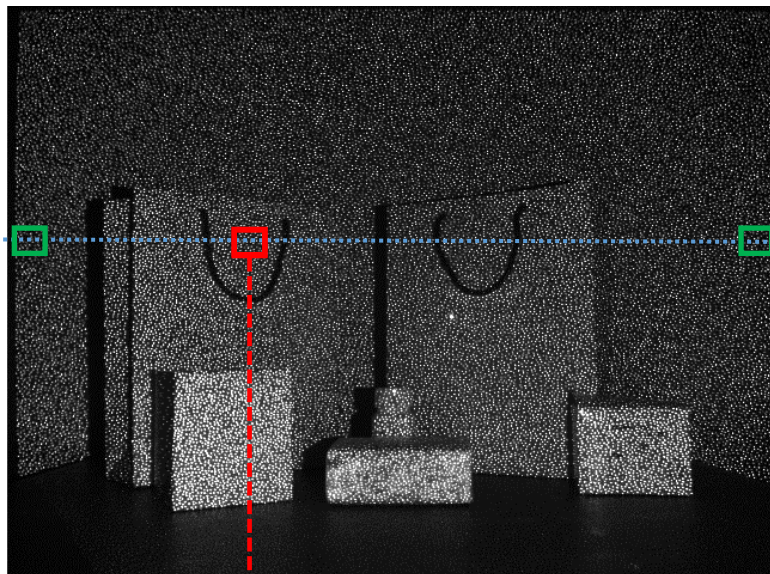
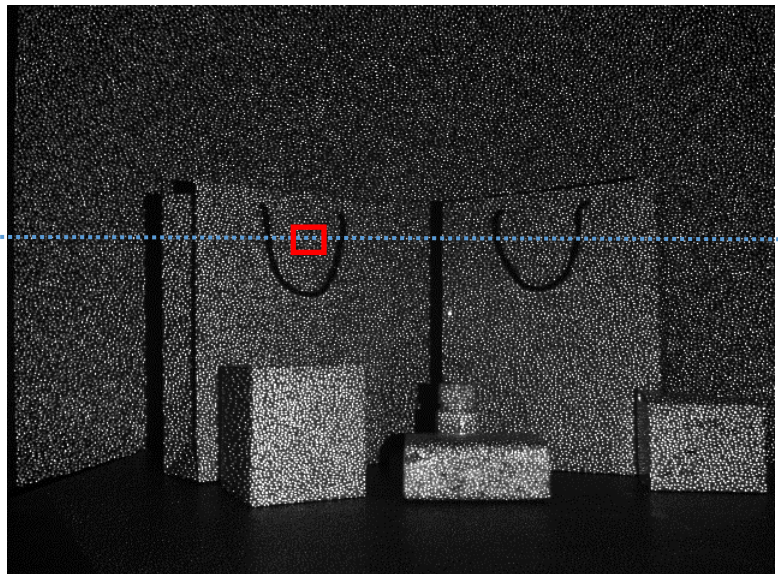
3.3

结构光传感器核心算法



Left Image

Right Image



Scanline

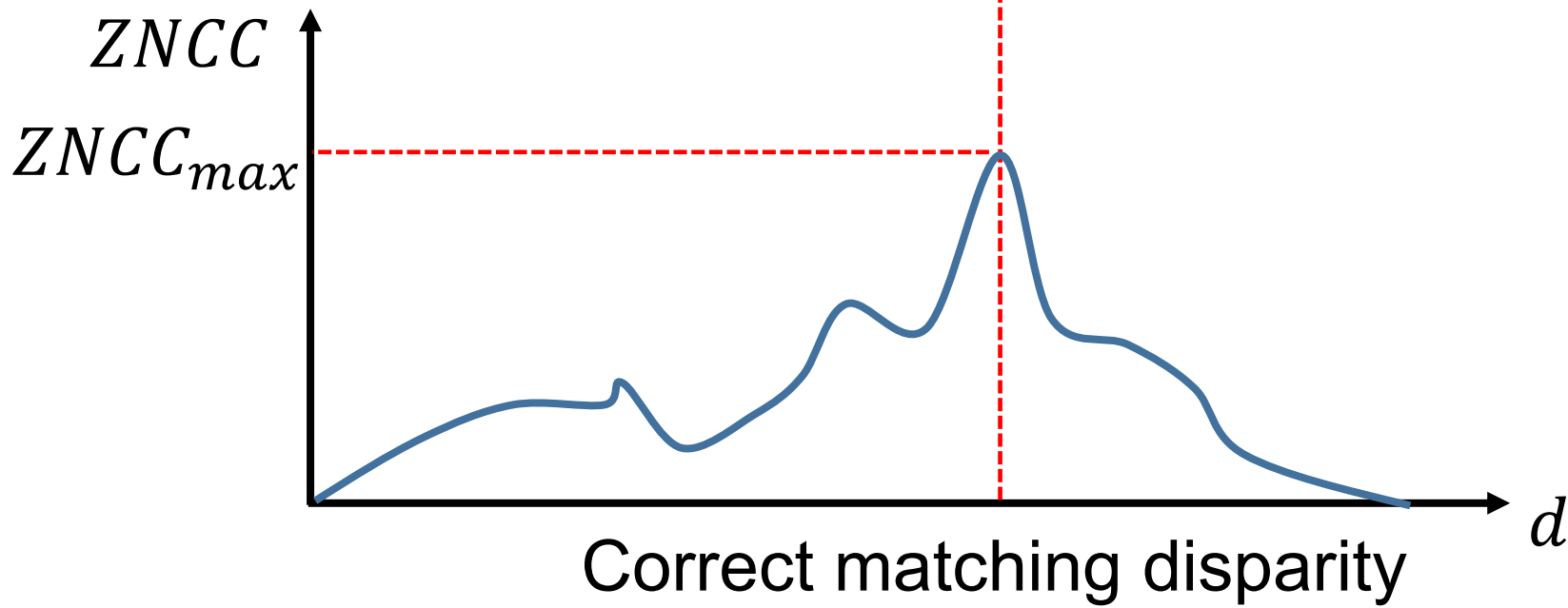


表 1 基于互相关准则的匹配函数

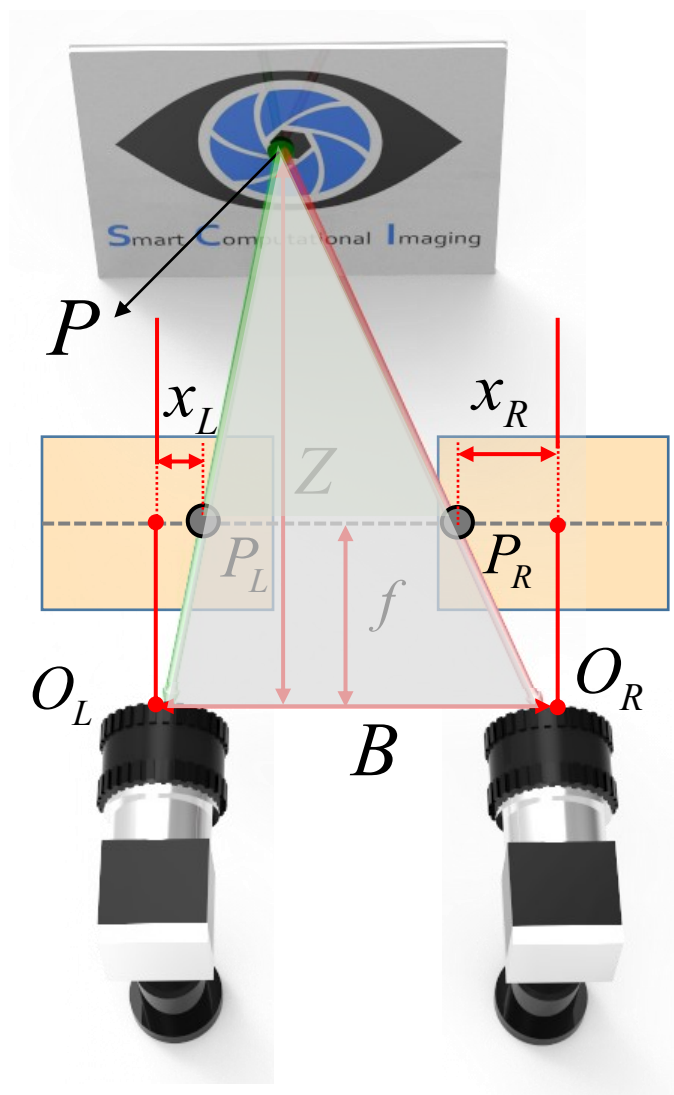
Tab.1 Matching function based on cross-correlation criteria

CC correlation criterion	Definition
Cross-correlation (CC)	$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_i)g(x'_i, y'_j)]$
Normalized cross-correlation (NCC)	$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_i)g(x'_i, y'_j)}{\bar{f}\bar{g}} \right]$
Zero-normalized cross-correlation (ZNCC)	$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_i) - f_m] \times [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\}$

表 2 基于 SSD 相关准则的匹配函数

Tab.2 Matching function based on SSD-correlation criteria

SSD correlation criterion	Definition
Sum of squared differences (SSD)	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_i) - g(x'_i, y'_j)]^2$
Normalized sum of squared differences (NSSD)	$C_{NSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_i)}{\bar{f}} - \frac{g(x'_i, y'_j)}{\bar{g}} \right]^2$
Zero-normalized sum of squared differences (ZNSSD)	$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_i) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2$



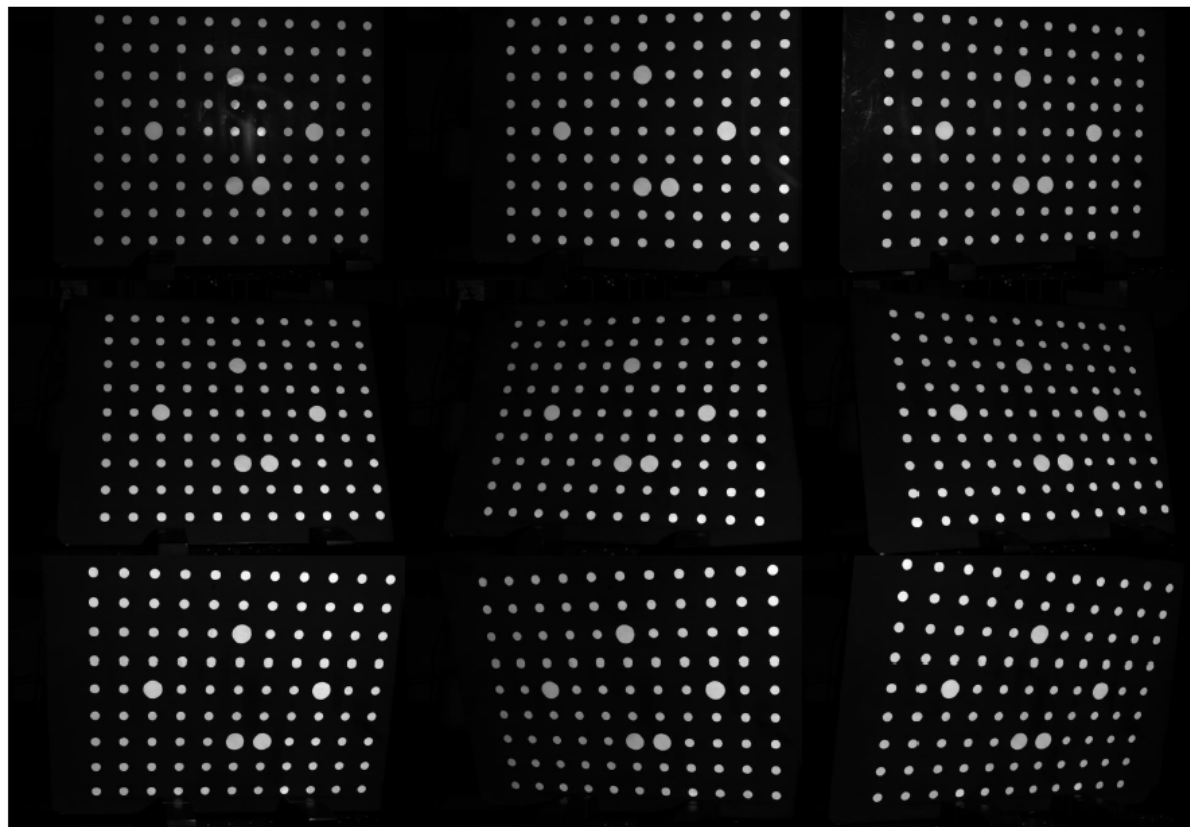
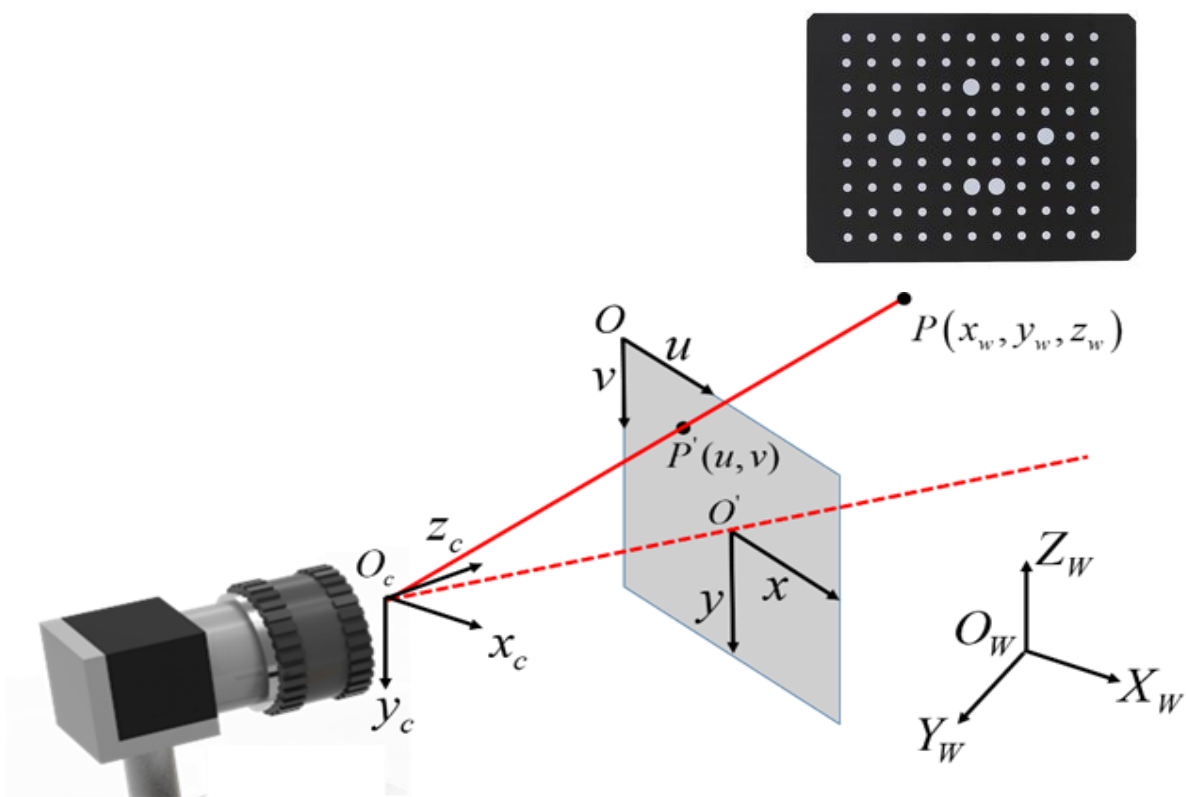
$$\therefore \Delta P P_L P_R \sim \Delta P O_L O_R$$

$$\therefore \frac{Z - f}{P_L P_R} = \frac{Z}{B}$$

$$\therefore P_L P_R = B - x_L - x_R$$

$$\therefore \frac{Z - f}{B - x_L - x_R} = \frac{Z}{B}$$

$$\therefore Z = \frac{Bf}{x_L + x_R} = \frac{Bf}{d}$$



图像像素坐标 \rightarrow 图像坐标 \rightarrow 相机坐标 \rightarrow 世界坐标
 (u, v) (x, y) (x_c, y_c, z_c) (x_w, y_w, z_w)

3.4

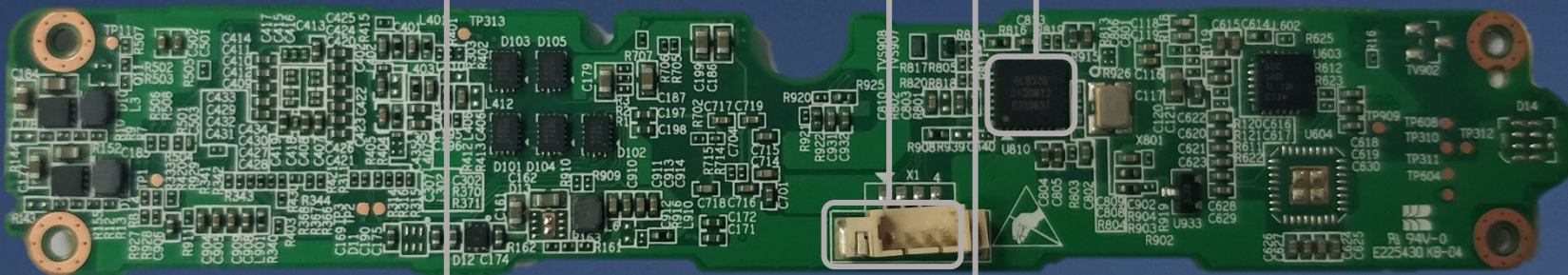
结构光传感器硬件平台

Projector
Interface

USB
Interface

RGB Camera
Interface

USB 2.0 Hub

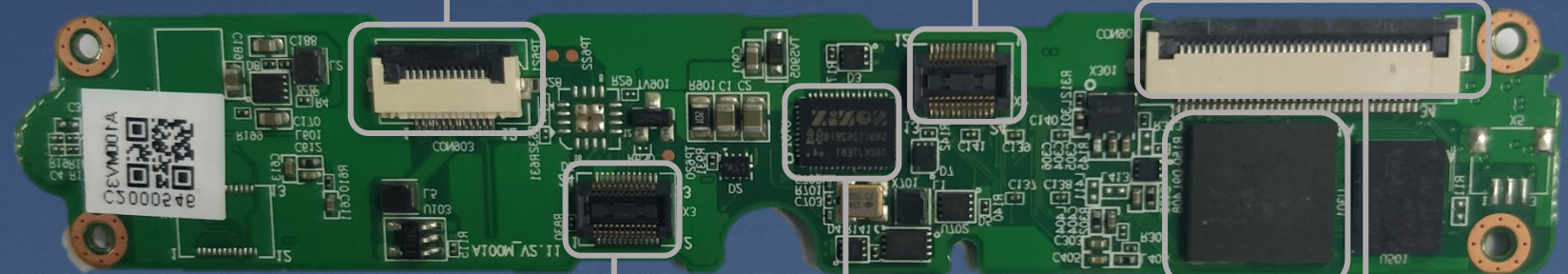


P-Sensor Flood
Interface

RGB Camera
Controller

Processor

IR Camera
Interface



- ① 三维光学传感技术概述
- ② 三维光学传感器的前世今生
- ③ 散斑结构光三维传感技术浅析
- ④ 散斑结构光三维传感技术的典型应用
- ⑤ 散斑结构光三维传感技术现存问题
- ⑥ 结构光三维传感技术未来方向



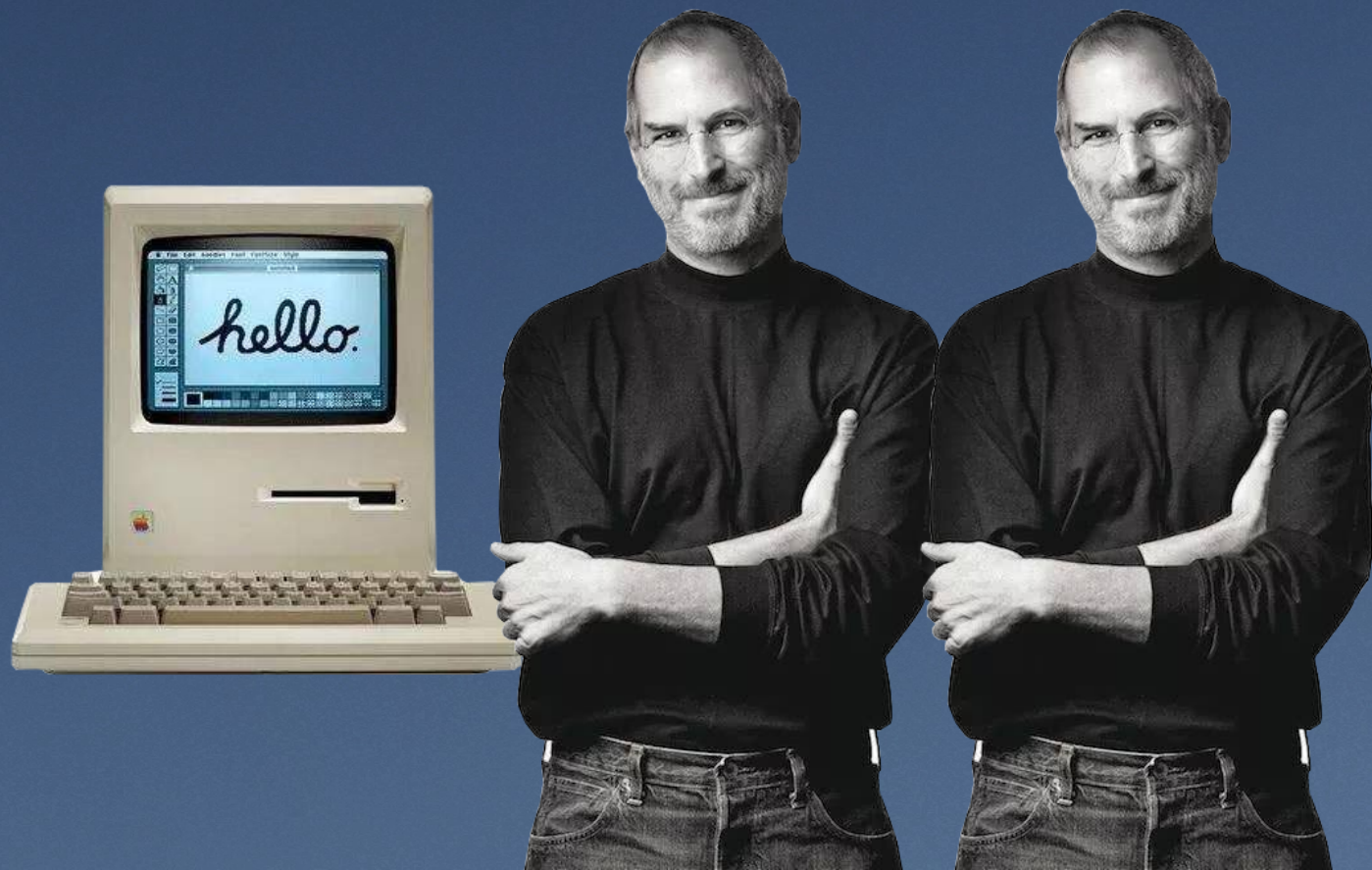


Zion Research 预计

2015 - 2021年 3D摄像头市场以复合年均增长率 **35%** 持续增长

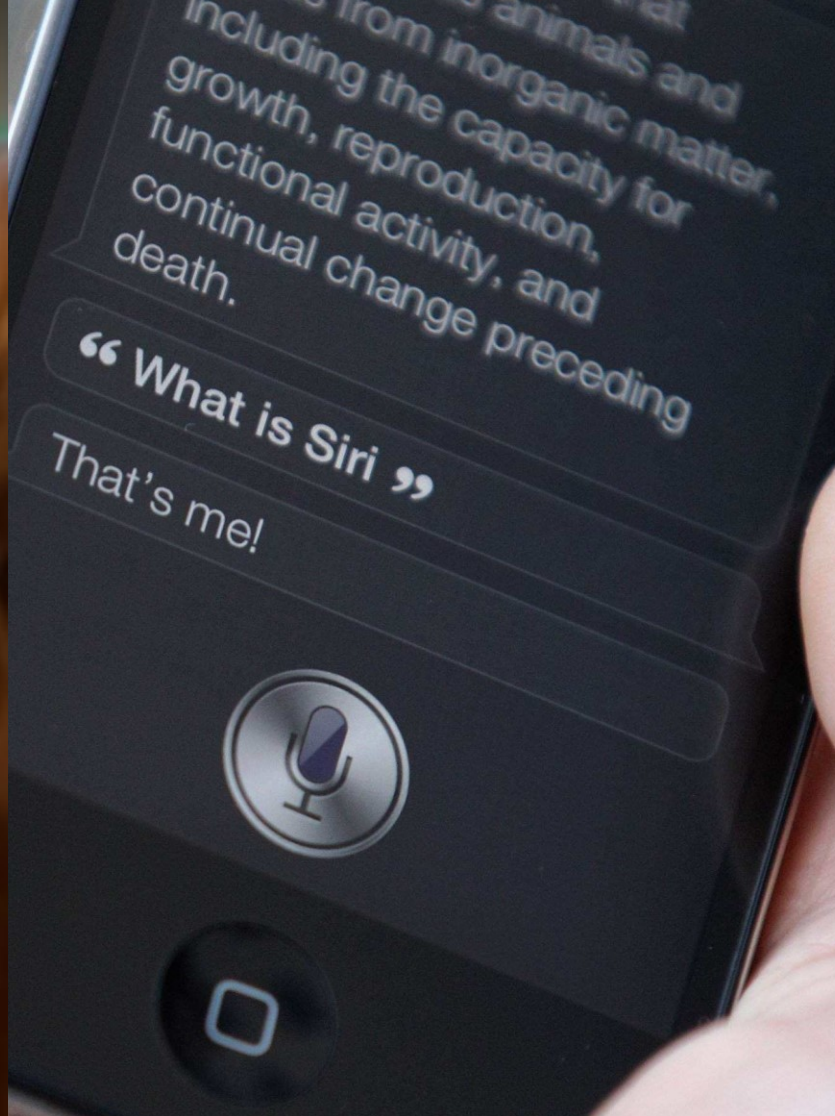
2015年3月15日，在德国汉诺威国际信息及通信技术博览会开幕式上，阿里巴巴集团董事局主席马云展示SmiletoPay扫脸技术。







触摸控制

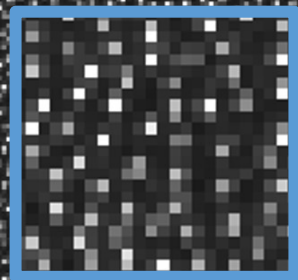
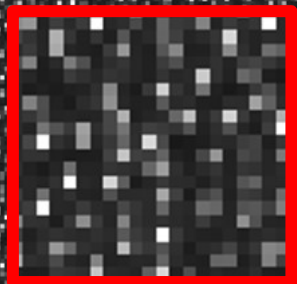


语音控制



体感控制

- ① 三维光学传感技术概述
- ② 三维光学传感器的前世今生
- ③ 散斑结构光三维传感技术浅析
- ④ 散斑结构光三维传感技术的典型应用
- ⑤ 散斑结构光三维传感技术现存问题
- ⑥ 结构光三维传感技术未来方向



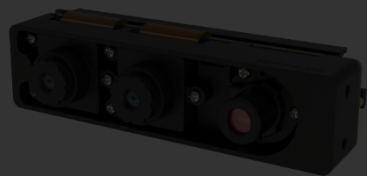




精度 VS 唯一

R=7

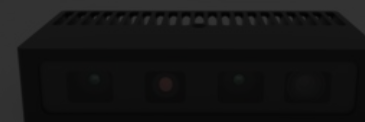
R=17



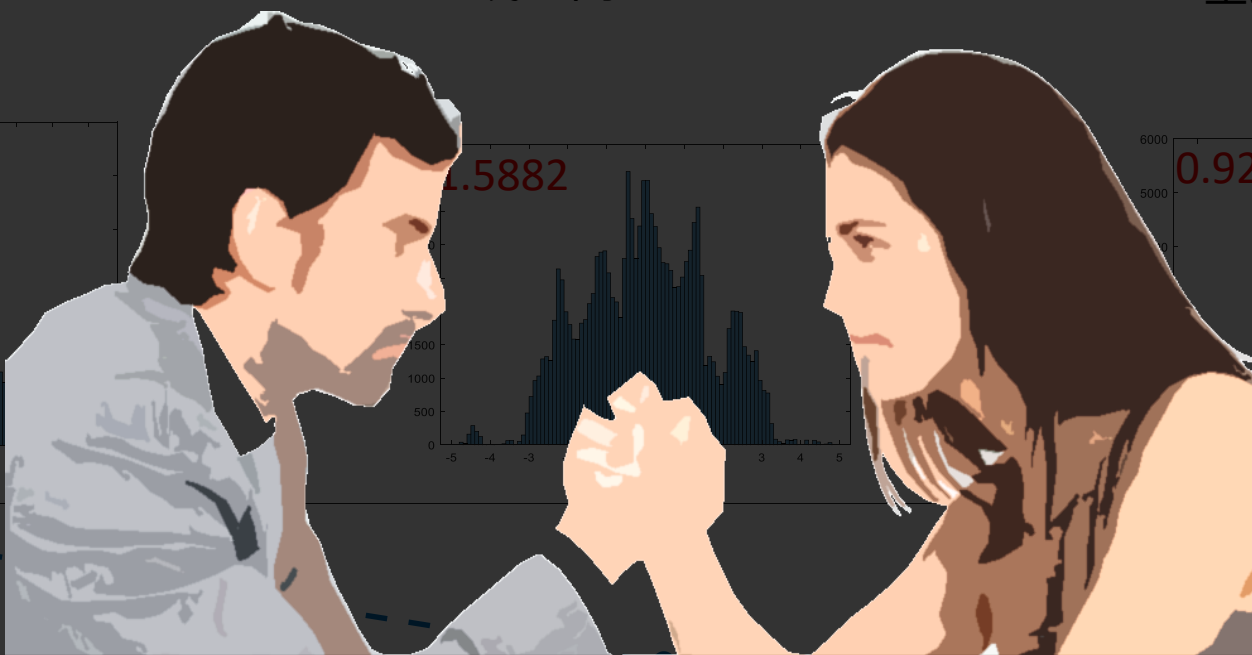
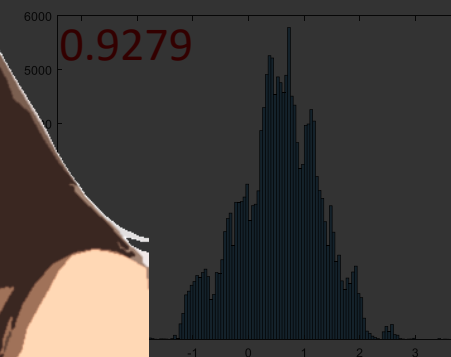
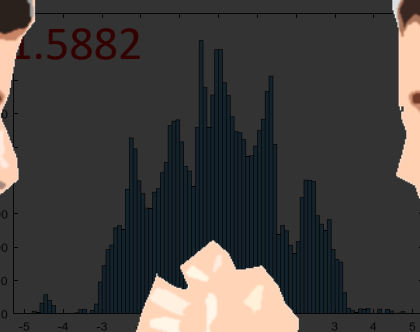
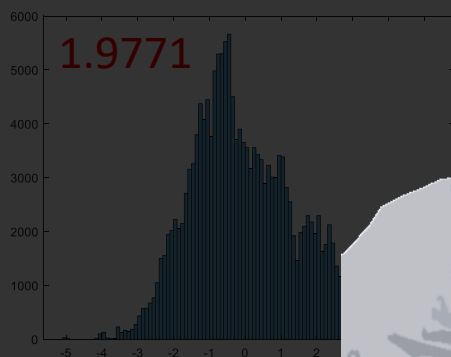
基线距离 = 25 mm



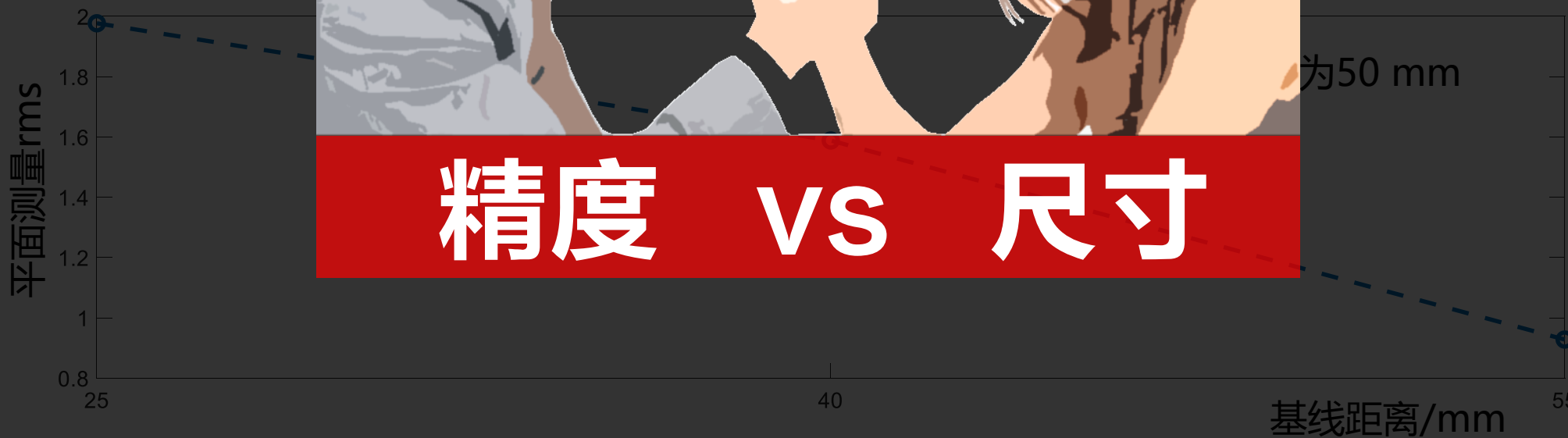
基线距离 = 40 mm



基线距离 = 55 mm



精度 vs 尺寸



三维人脸识别 = 二维图片 + 活体检测?

iPhone X



This is 3D!

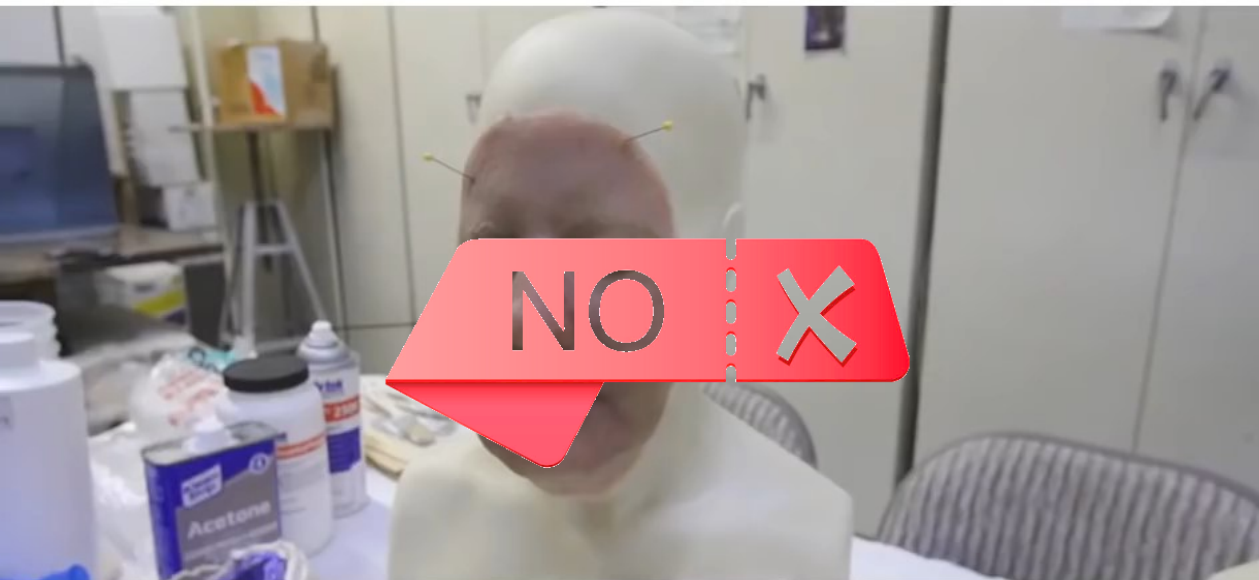




EVERYDAY USE



PHOTOS



MASK

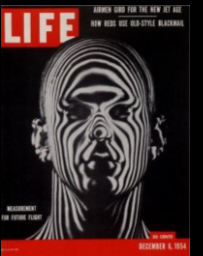


TWINS & TRIPLETS

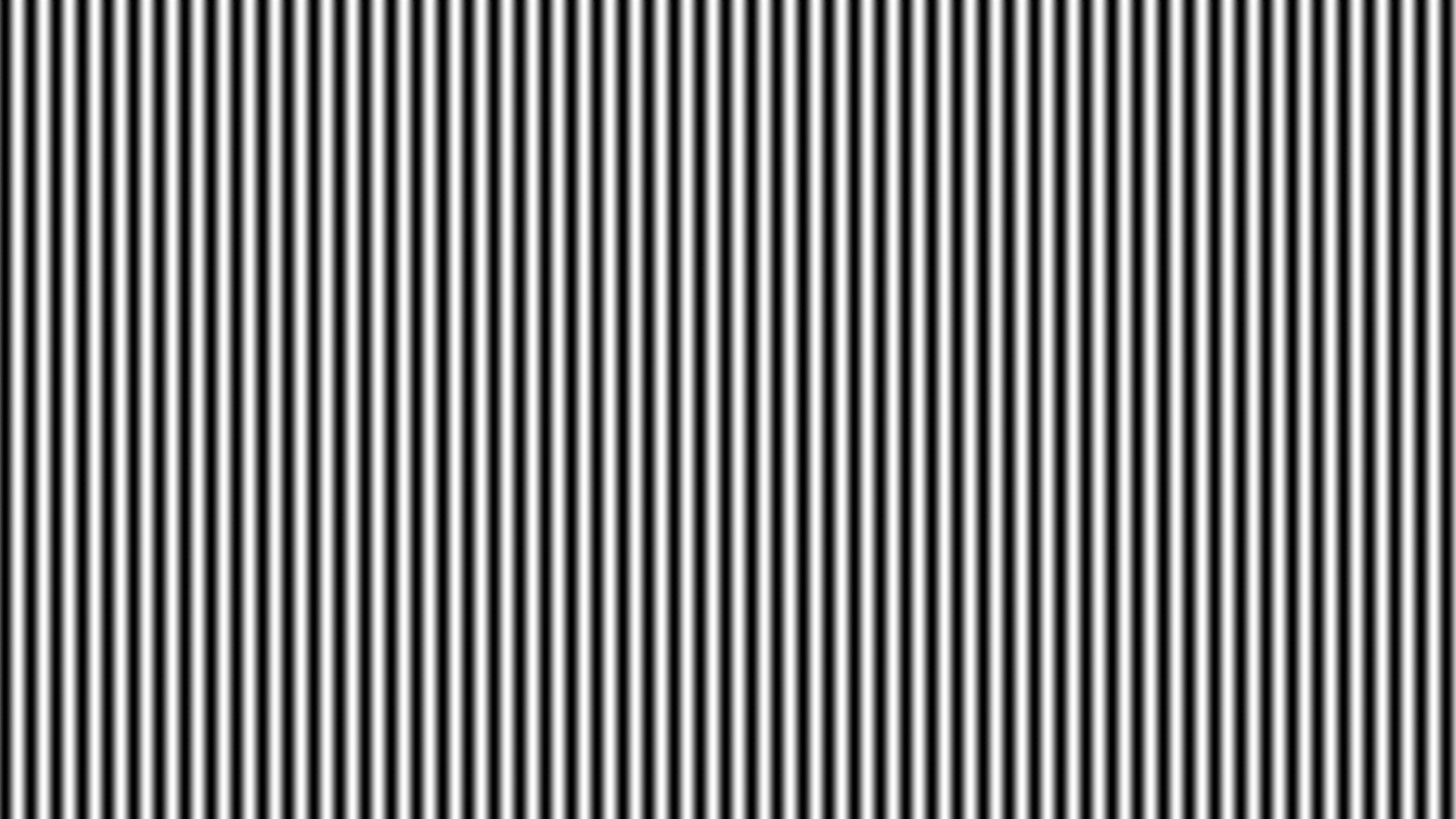
- ① 三维光学传感技术概述
- ② 三维光学传感器的前世今生
- ③ 散斑结构光三维传感技术浅析
- ④ 散斑结构光三维传感技术的典型应用
- ⑤ 散斑结构光三维传感技术现存问题
- ⑥ 结构光三维传感技术未来方向

6.1

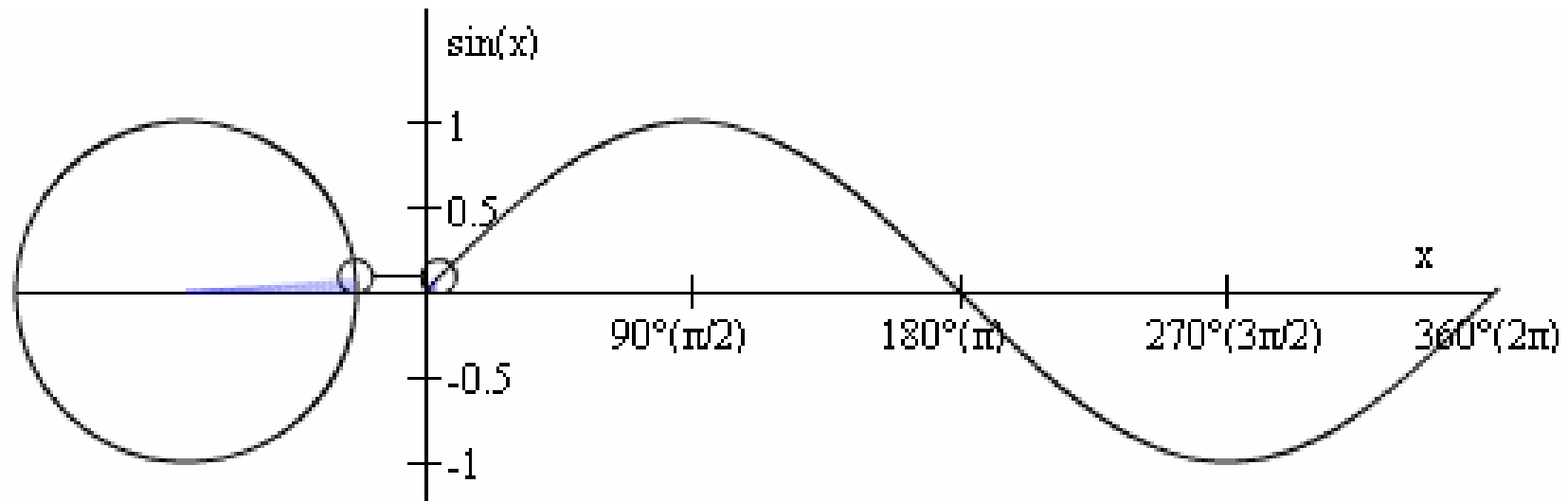
结构光未来方向之高精度



Ralph Morse:
'Jet Age Man' (1954)



Point-by-point measurement





Object



精度达到0.05毫米

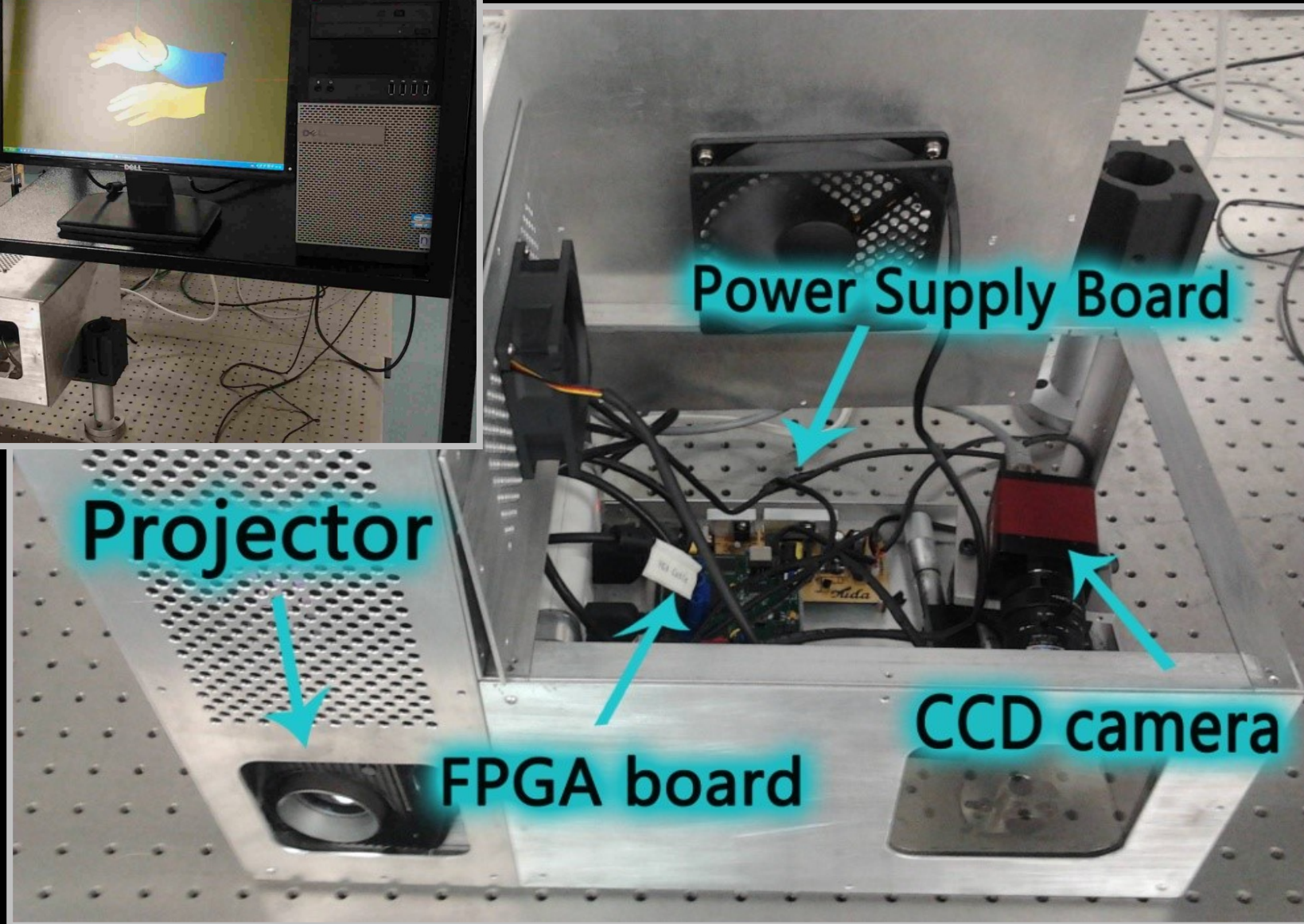
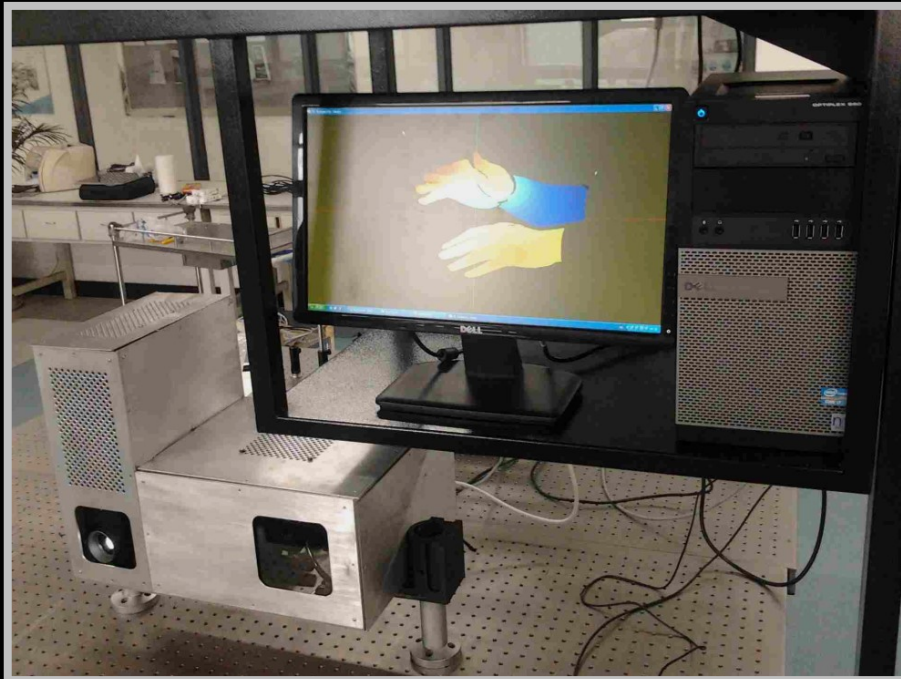
Precision 0.05mm



FaceScan可输出高精度，稠密的三维人脸点云数据

6.2

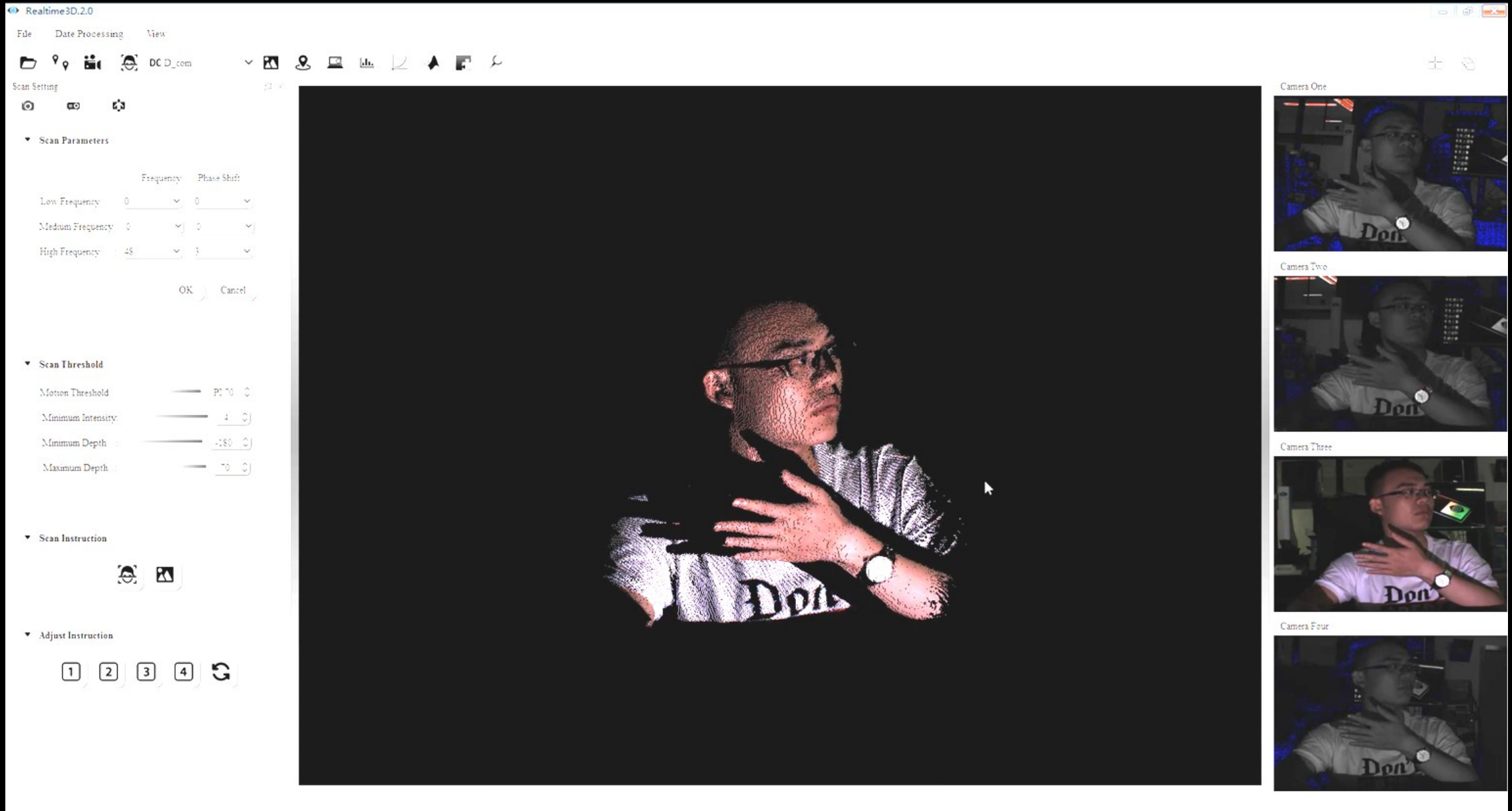
结构光未来方向之实时化





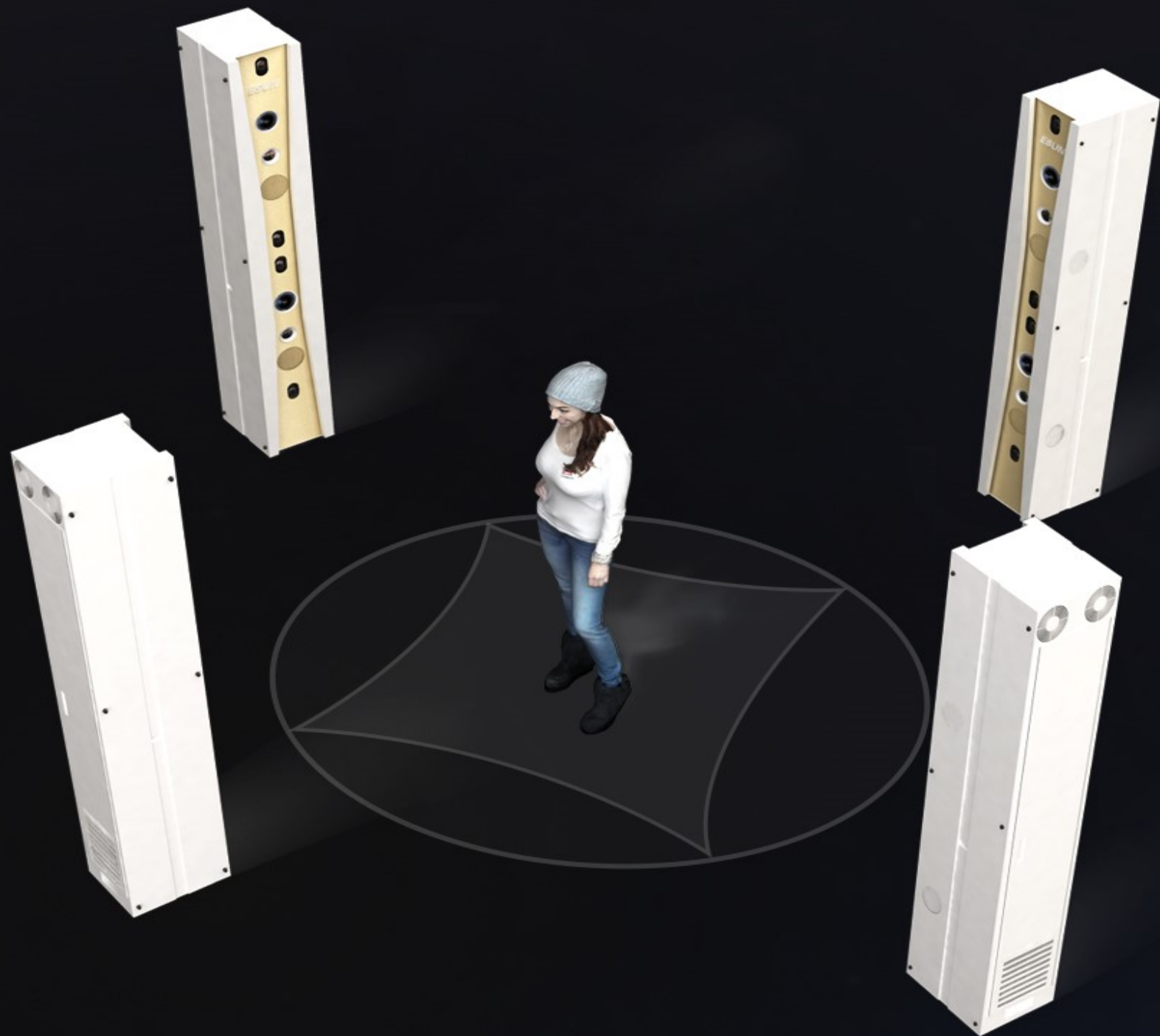
Real-time 3D measurement on a human body





6.3

结构光未来方向之全方位



Optics Letters

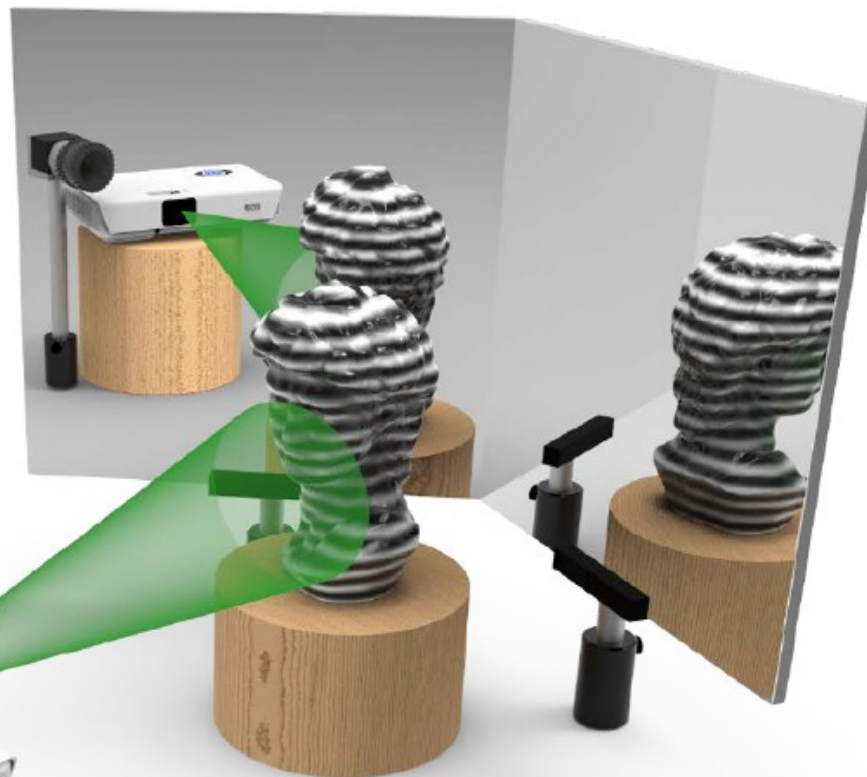
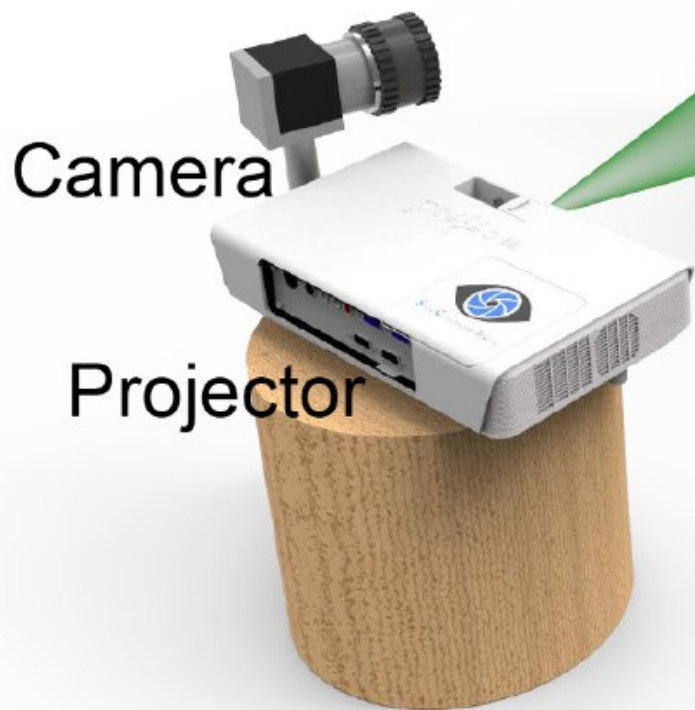
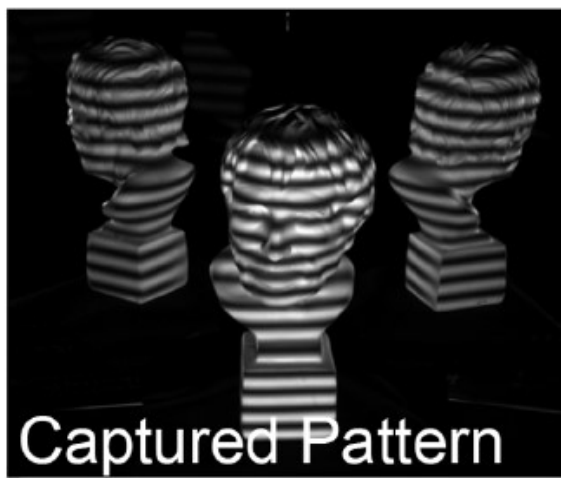
High-resolution real-time 360° 3D model reconstruction of a handheld object with fringe projection profilometry

JIAMING QIAN,^{1,2,3} SHUIE FENG,^{1,2,3} TIANYANG TAO,^{1,2,3} YAN HU,^{1,2,3} KAI LIU,^{1,2,3} SHUAIJIE WU,^{1,2,3} QIAN CHEN,^{1,2,4} AND CHAO ZUO^{1,2,3,*}



The triangulation result of the whole David model

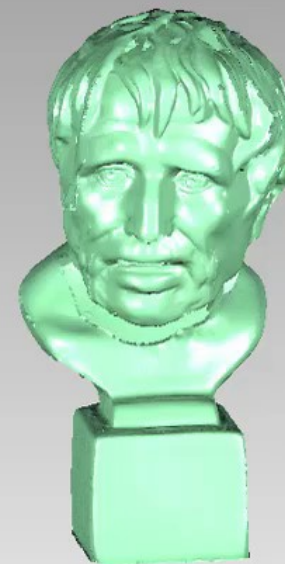




Calibration method for panoramic 3D shape measurement with plane mirrors

WEI YIN,^{1,2,3} SHIJIE FENG,^{1,2,3} TIANYANG TAO,^{1,2,3} LEI HUANG,⁴ SONG ZHANG,^{5,6} QIAN CHEN,^{1,2,7} AND CHAO ZUO^{1,2,3,8,9}

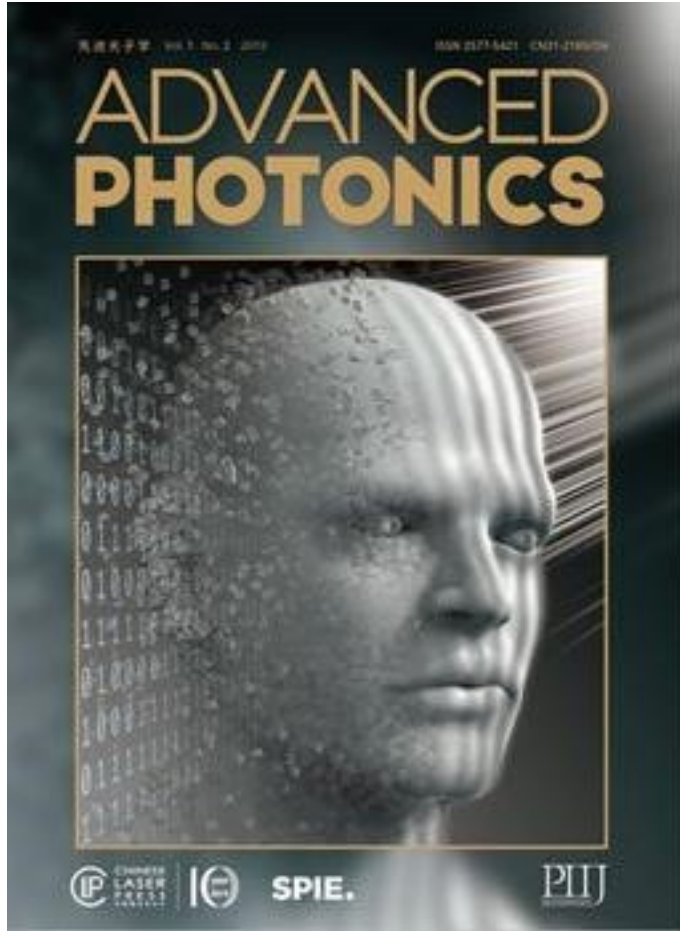
The 3D results of a Voltaire model



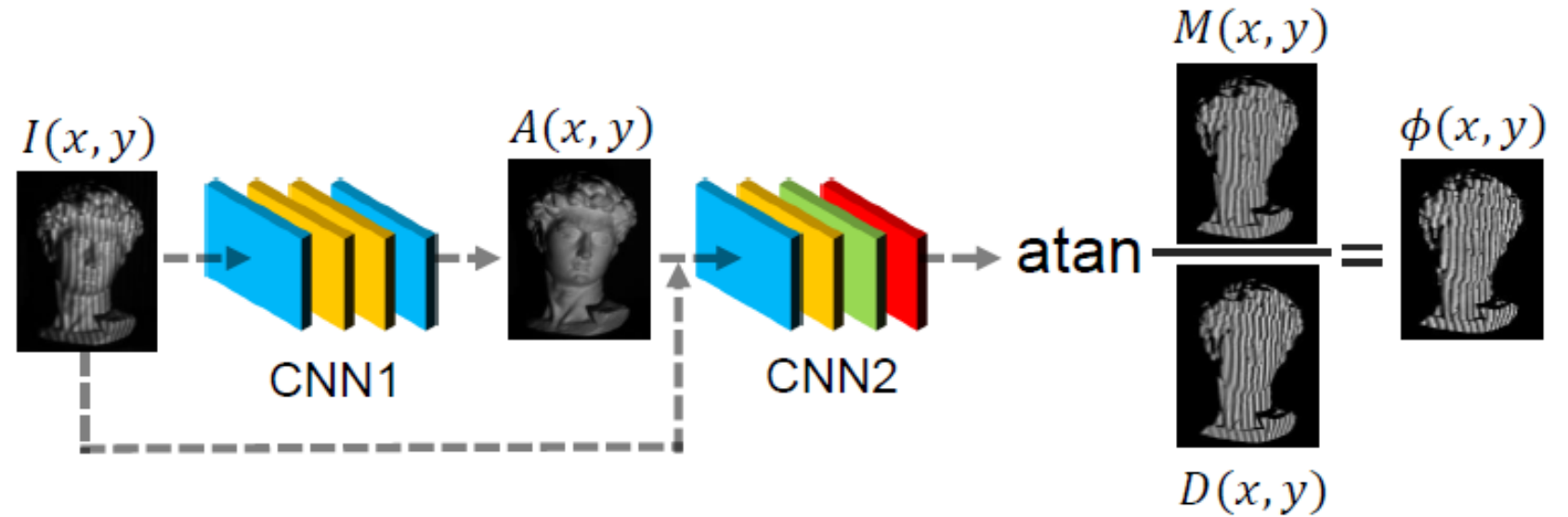
6.4

结构光未来方向之智能化

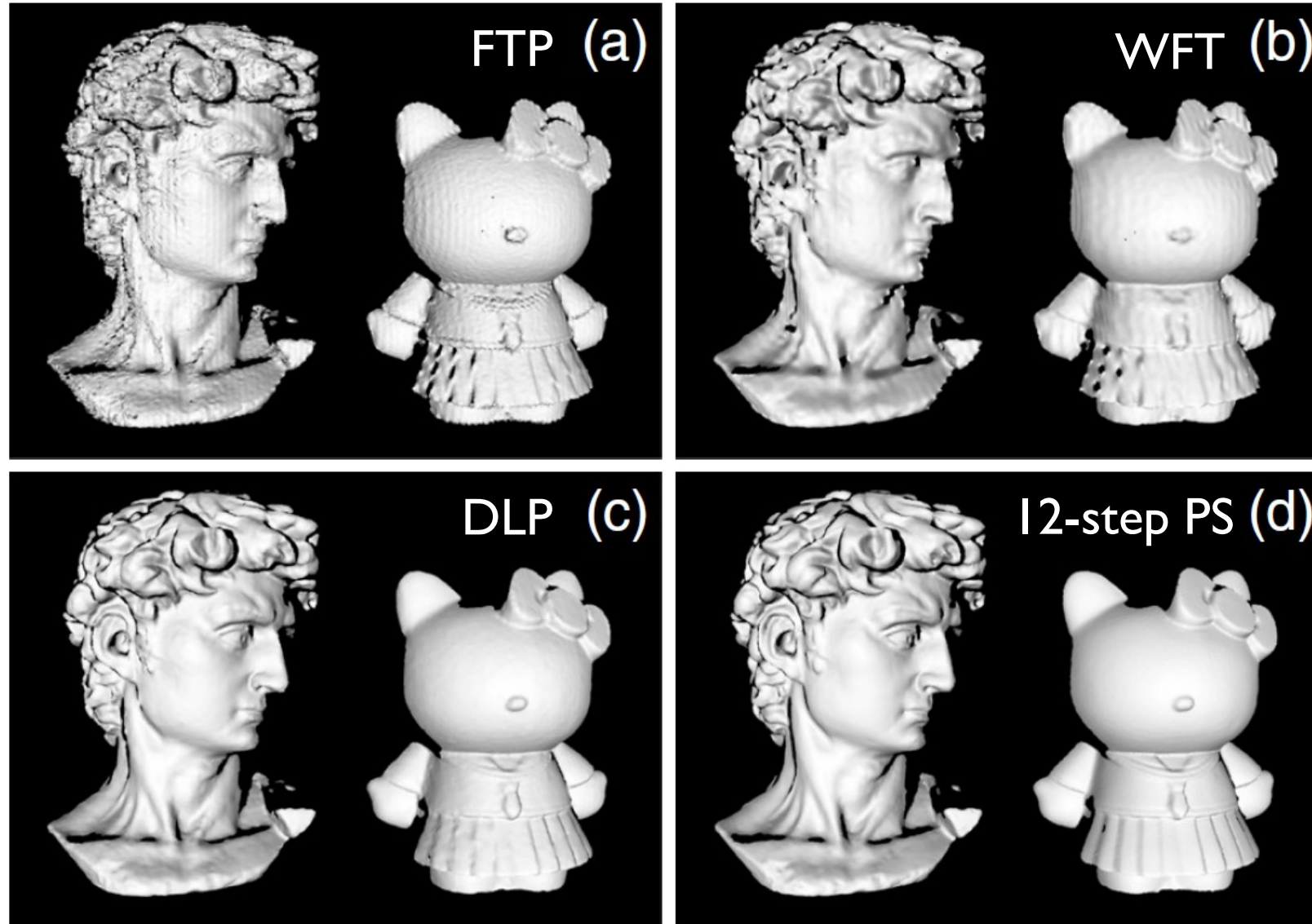
Deep Learning Profilometry (DLP)



$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y)]$$



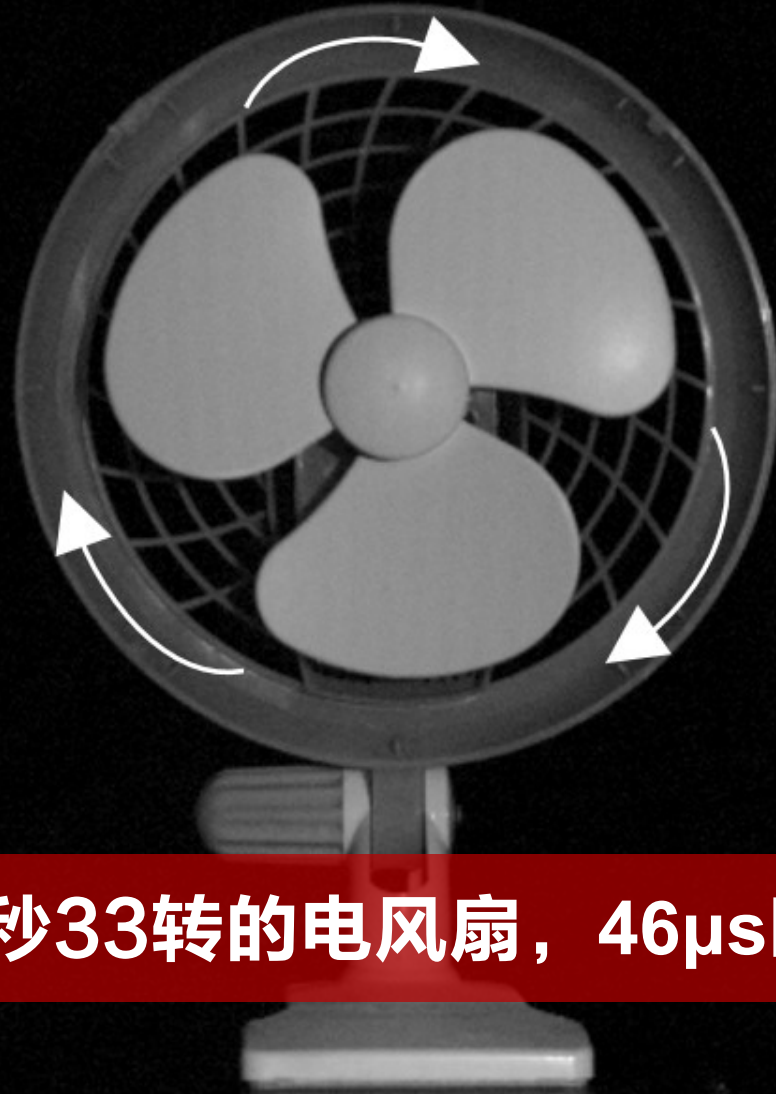
Deep Learning Profilometry (DLP)



6.5

结构光未来方向之超高速

Rotating fan blades (1980 rpm)



每秒33转的电风扇，46 μ s曝光

Exposure: 46 μ s

Rotating fan blades (1980 rpm)



1ms曝光

Exposure: 1ms

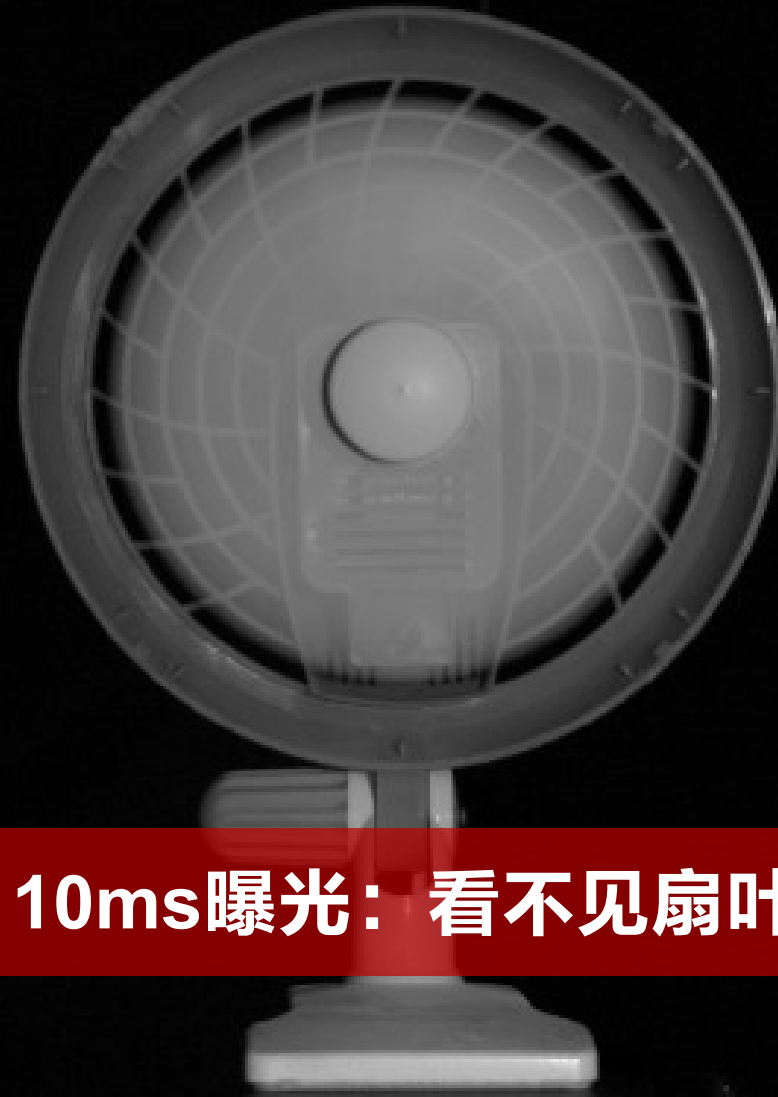
Rotating fan blades (1980 rpm)



2.5ms曝光

Exposure: 2.5ms

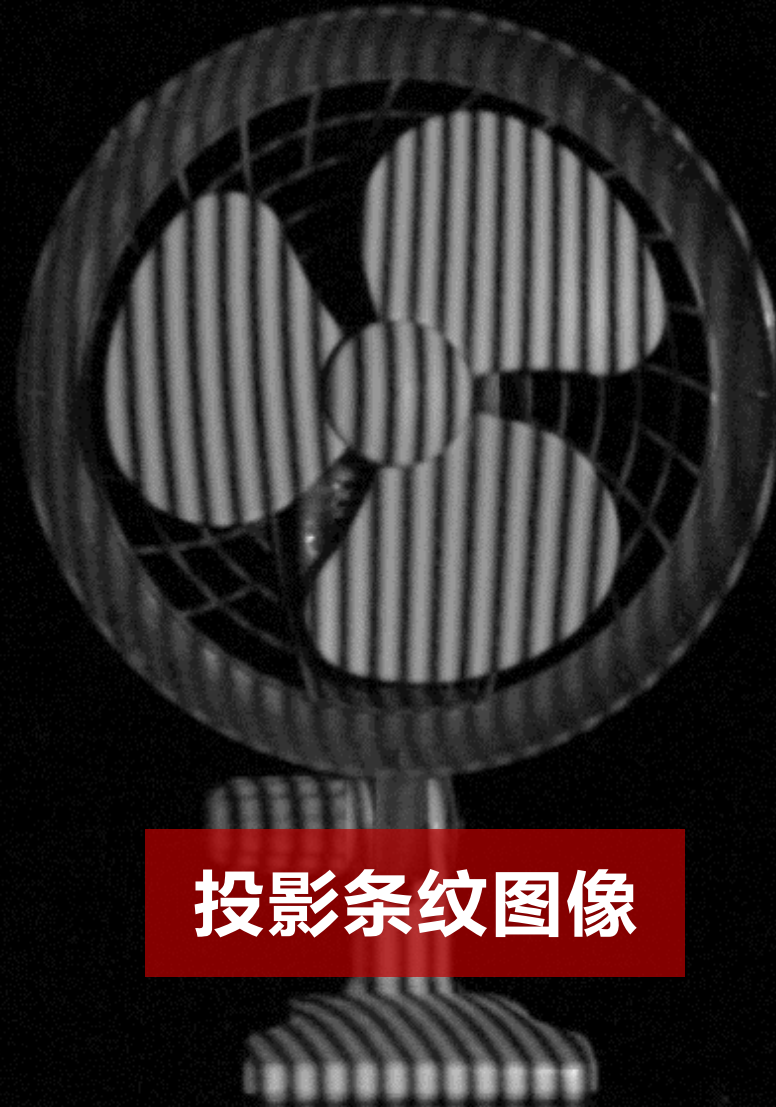
Rotating fan blades (1980 rpm)



10ms曝光：看不见扇叶

Exposure: 10ms

Rotating fan blades (1980 rpm)

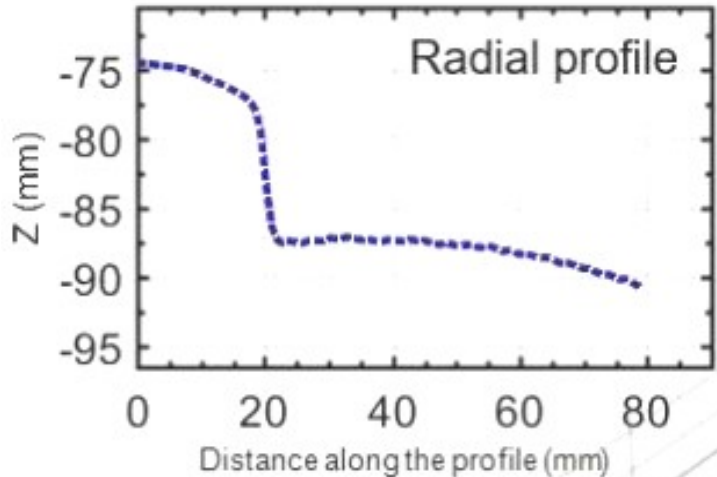


投影条纹图像

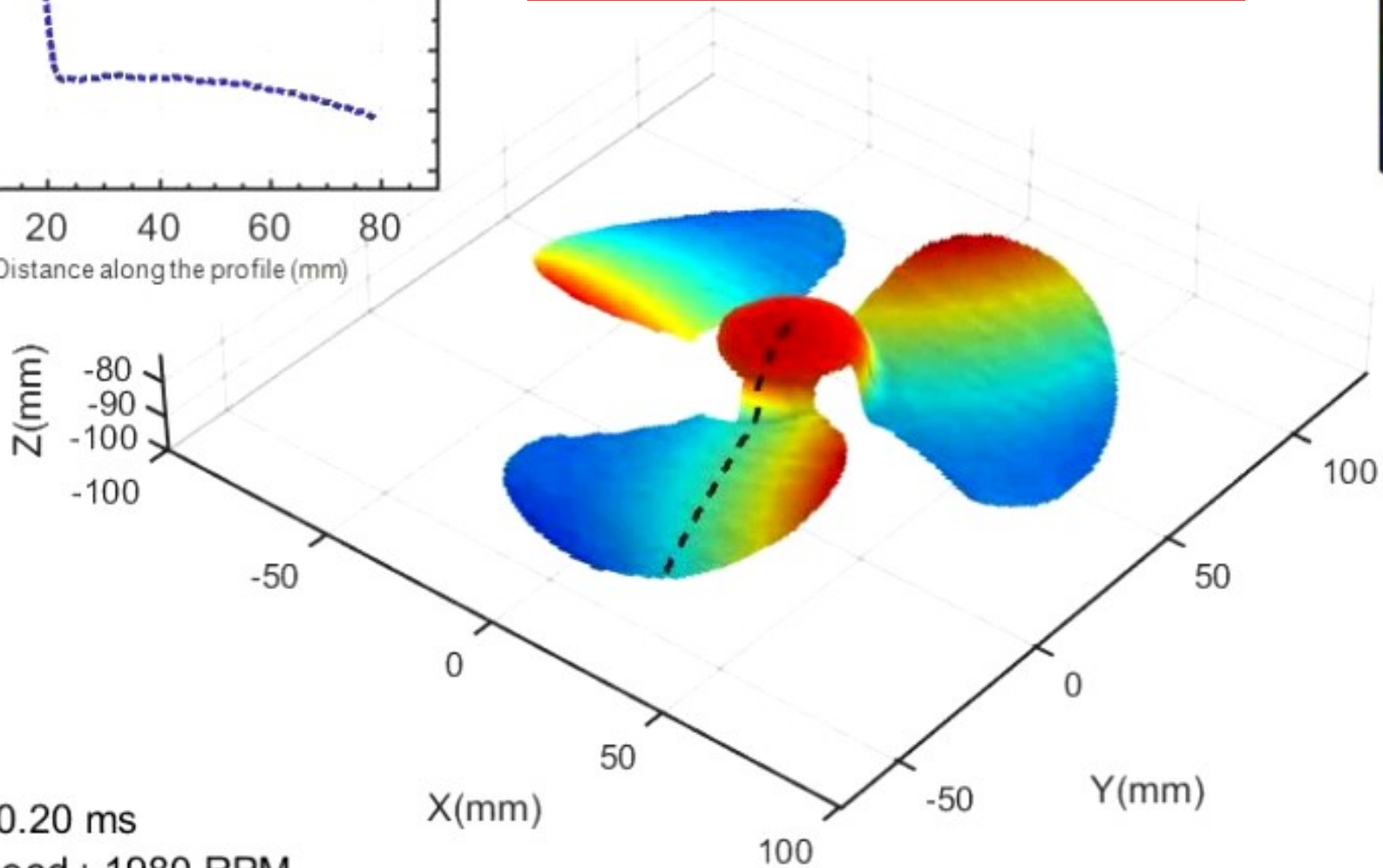
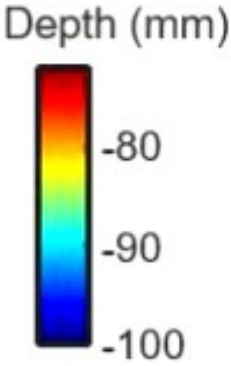
400x slow motion



Rotating fan blades (1980 rpm)

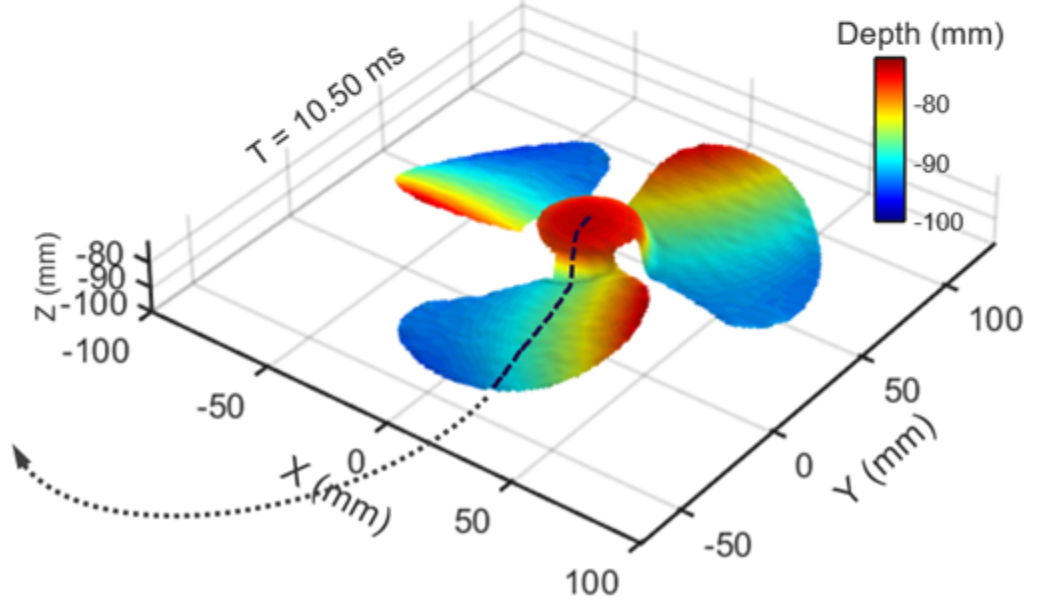
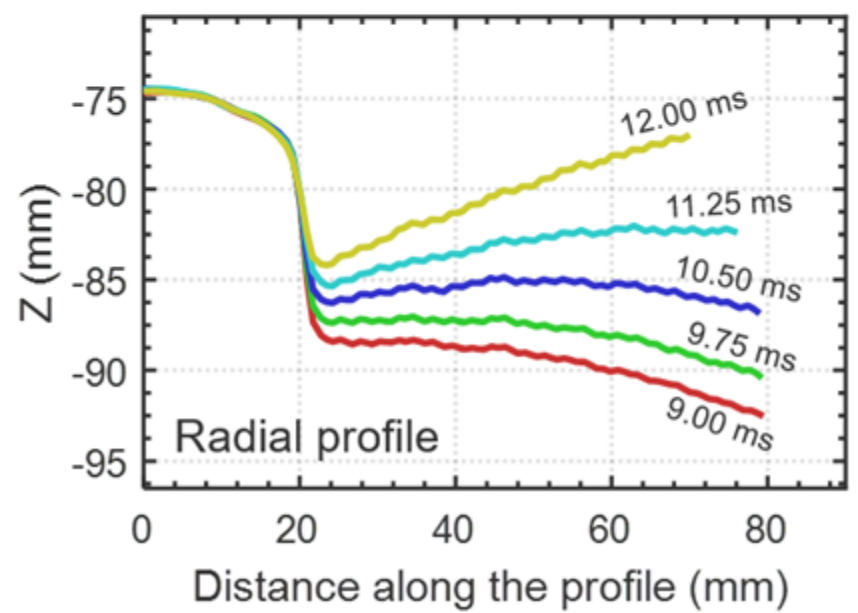
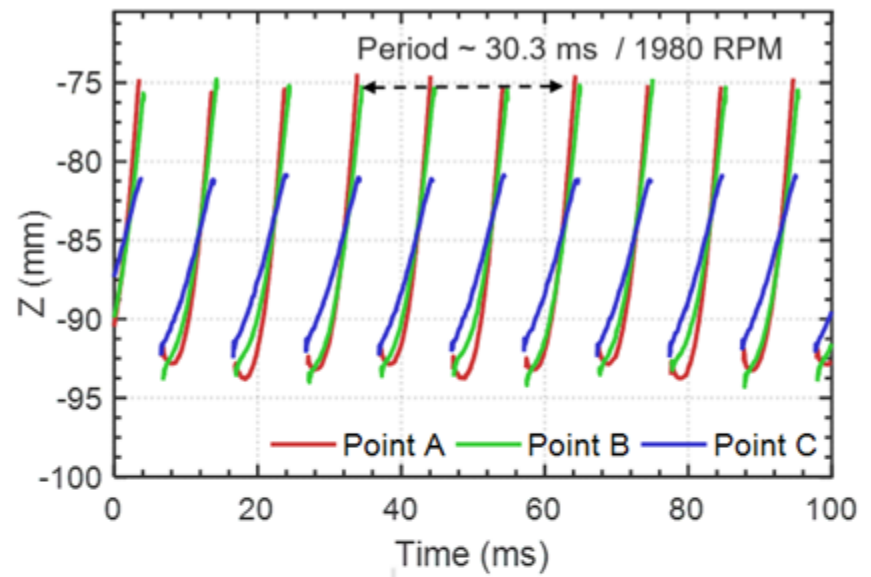
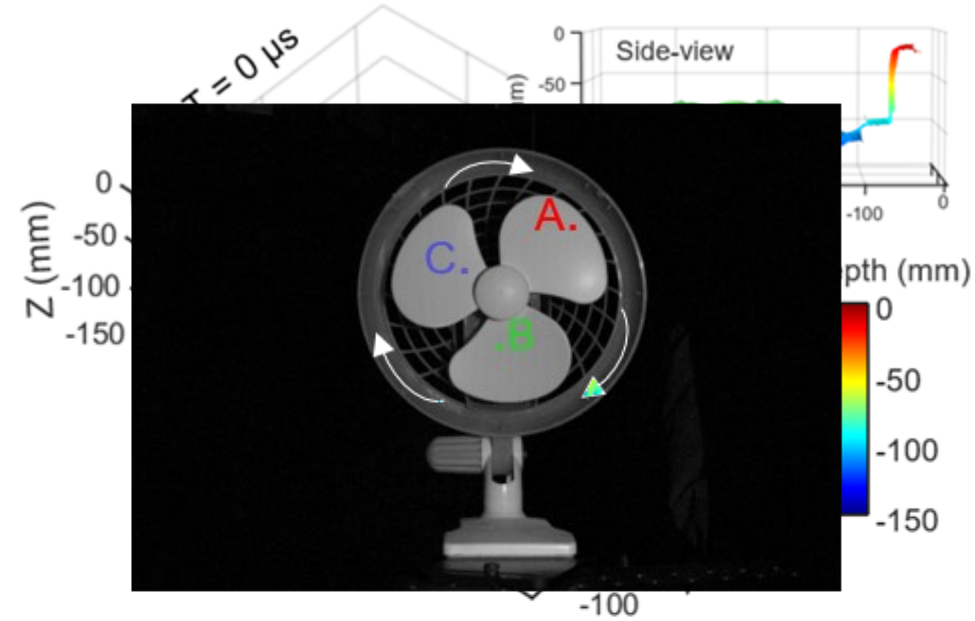


10,000 帧/秒 三维成像



Time : 0.20 ms
Fan Speed : 1980 RPM

Rotating fan blades (1980 rpm)



Flying Bullet

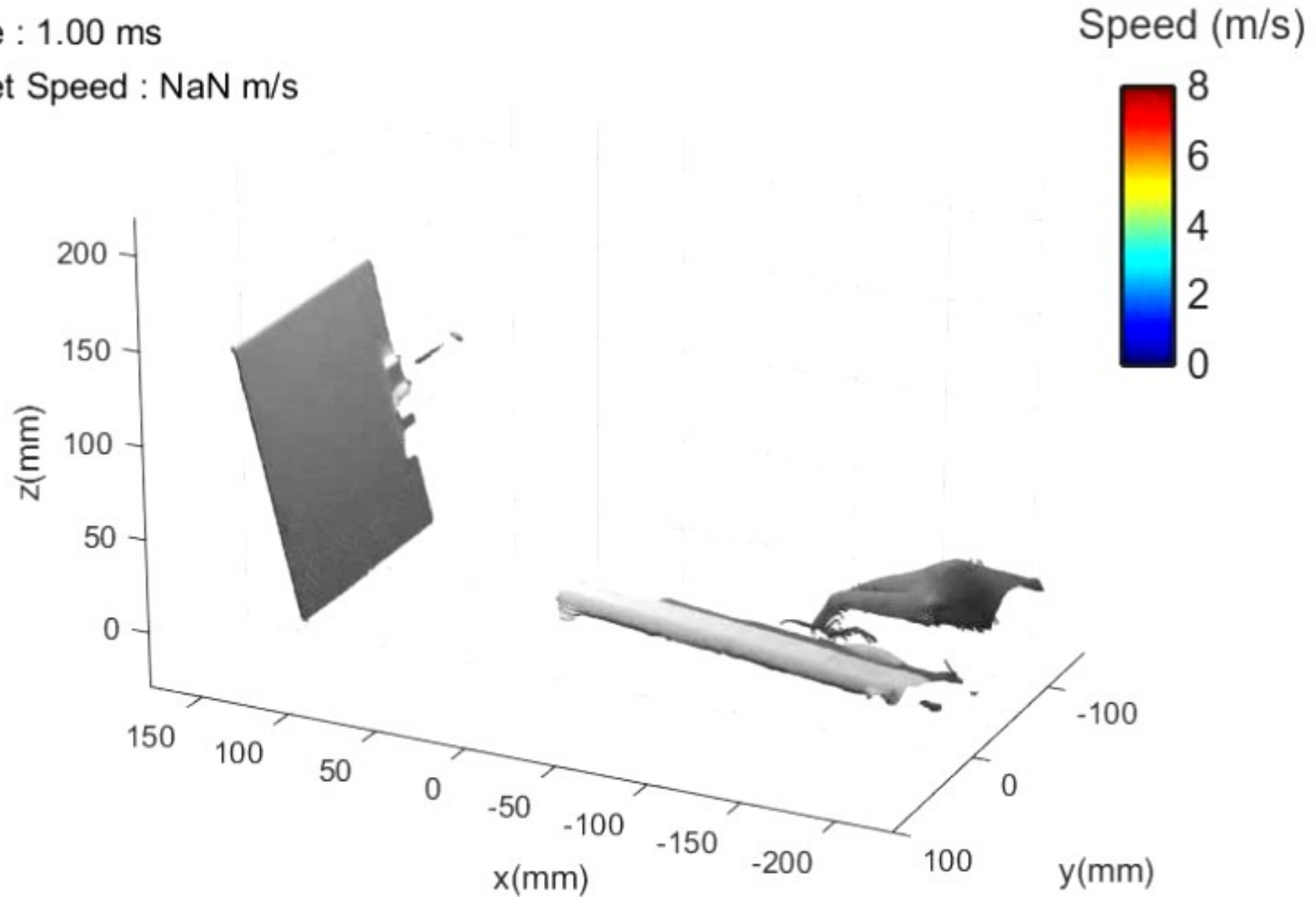


Time: 0.00000 seconds
3D Frame Number: 0

Flying Bullet

Time : 1.00 ms

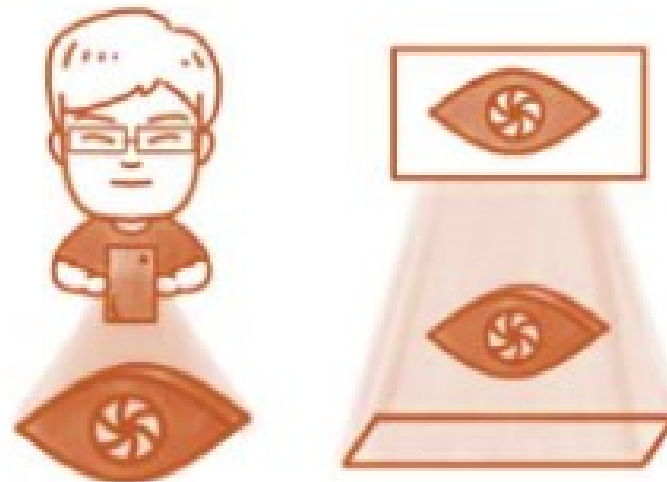
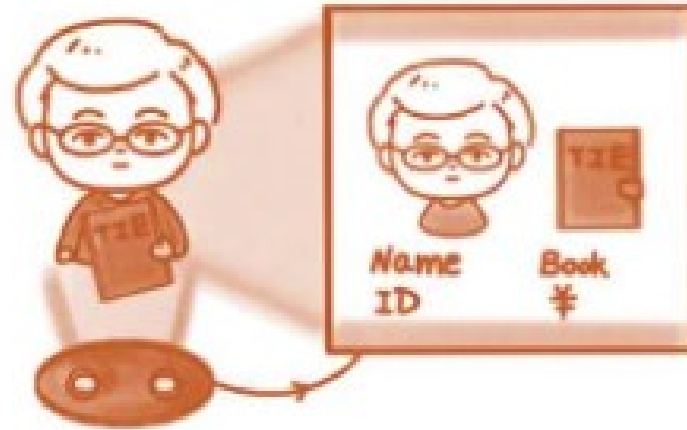
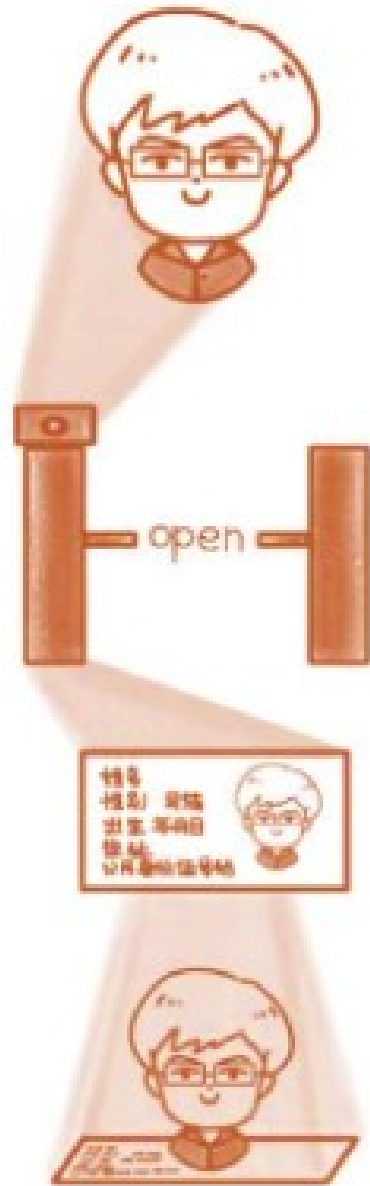
Bullet Speed : NaN m/s



总结

- ① 三维光学传感技术概述
- ② 三维光学传感器的前世今生
- ③ 散斑结构光三维传感技术浅析
- ④ 散斑结构光三维传感技术的典型应用
- ⑤ 散斑结构光三维传感技术现存问题
- ⑥ 结构光三维传感技术未来方向

The world of 3D





文章导航 > [红外与激光工程](#) > 2020 > 优先出版

引用本文: 左超, 张晓磊, 胡岩, 尹维, 沈德同, 钟锦鑫, 郑晶, 陈钱. 3D真的来了吗? ——三维结构光传感器漫谈[J]. 红外与激光工程. doi: 10.3788/IRLA202049.0303001

Citation: Zuo Chao, Zhang Xiaolei, Hu Yan, Yin Wei, Shen Detong, Zhong Jinxin, Zheng Jing, Chen Qian. Has 3D finally come of age? ——An introduction to 3D structured-light sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*. doi: 10.3788/IRLA202049.0303001

3D真的来了吗? ——三维结构光传感器漫谈

doi: 10.3788/IRLA202049.0303001

左超^{1,3}, 张晓磊², 胡岩^{1,2,3}, 尹维^{1,2,3}, 沈德同², 钟锦鑫^{1,2,3}, 郑晶², 陈钱³

1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院 智能计算成像实验室 (SCILab), 江苏 南京 210094

2. 南京锆石光电科技有限公司, 江苏 南京 210094

3. 南京理工大学 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室 [机构](#), 江苏 南京 210094

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0106403); 国家自然科学基金(61722506 [基金](#) [基金](#), 61705105 [基金](#) [基金](#)); 江苏省基础研究计划前沿引领技术(BK20192003); 总装“十三五”装备预研项目(30102070102); 总装“十三五”领域基金(61404150202); 国防科技项目基金(0106173); 江苏省杰出青年基金(BK20170034); 江苏省重点研发计划(BE2017162); 江苏省“333工程”科研项目资助计划(BRA2016407); 南京理工大学自主科研基金(30917011204); 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室开放基金(3091801410411)

[+ 详细信息](#)

Has 3D finally come of age? ——An introduction to 3D structured-light sensor

Zuo Chao^{1,3}, 张晓磊², Hu Yan^{1,2,3}, Yin Wei^{1,2,3}, Shen Detong², Zhong Jinxin^{1,2,3}, Zheng Jing², Chen Qian³

1. Smart Computational Imaging Laboratory (SCILab), School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

2. Nanjing Zircon optoelectronic technology co. LTD, Nanjing 210014, China

3. Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligent Sense, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

PDF下载 (5607 KB)



XML下载

导出引用

[点击查看大图](#)



Thank you