

基于旋转散斑结构光投影的三维人脸采集

周佩^{1,2}, 朱江平^{1,2*}, 孔令寅^{1,2}, 熊伟^{1,2}¹四川大学计算机学院, 四川 成都 610065;²四川大学视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室, 四川 成都 610065

摘要 设计由两个红外相机和一个紧凑散斑结构光投射器构成的三维人脸采集系统, 可根据采集精度和运算效率的折衷配置采集散斑图像。散斑模板固定在垂直于投射器光轴的齿轮上, 使用齿轮机构驱动散斑模板作旋转运动, 使用波长为 735 nm 的 LED 照亮散斑, 在测量空间中形成时间和空间上互不相关的散斑编码结构光图案, 采用时空相关立体匹配算法实现人脸三维重建。通过理论分析和实验验证散斑模板的旋转角度对测量精度的影响, 进而确定最佳的旋转角度。采用德国 ATOS 高精度工业 3D 扫描仪获取人脸面具三维数据并将其作为真值, 同时测试真实人脸的三维采集效果。实验结果表明, 当投射散斑数量为 5 时, 三维重建的平均误差为 0.063 mm, 误差标准差为 0.111 mm。

关键词 机器视觉; 双目立体视觉; 散斑编码结构光; 时空相关; 三维人脸重建

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0415019

Three-Dimension Face Acquisition with Rotating Speckle Structured Light Projection

Zhou Pei^{1,2}, Zhu Jiangping^{1,2*}, Kong Lingyin^{1,2}, Xiong Wei^{1,2}¹ College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;² National Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract A three-dimensional face acquisition system consisting of two infrared cameras and a compact speckle structure light projector is designed. The speckle projection system can be configured to project speckles according to the acquisition accuracy and efficiency. The speckle template is fixed on a gear that is perpendicular to the optical axis of the projector, and a gear mechanism is used to drive the speckle template for rotation. The speckle is illuminated by an LED with a wavelength of 735 nm to form a temporally and spatially uncorrelated speckle-encoded structured light pattern in the measurement space, and a spatial-temporal correlation stereo matching algorithm is used to achieve three-dimensional face reconstruction. Through theoretical analysis and experiments, the influence of the rotation angle of the speckle template on the measurement accuracy is verified, and the best rotation angle is determined. The German ATOS high-precision industrial three-dimensional scanner is used to obtain the three-dimensional data of the face mask and use it as the true value, while testing the three-dimensional acquisition effect of the real face. The experimental results show that when the number of projected speckles is 5, the average error of three-dimensional reconstruction is 0.063 mm, and the standard deviation of error is 0.111 mm.

Key words machine vision; binocular stereo vision; speckle-encoded structured light; spatial-temporal correlation; three-dimension face reconstruction

OCIS codes 150.6910; 330.1400; 030.6140

收稿日期: 2020-06-17; 修回日期: 2020-07-16; 录用日期: 2020-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(61901287)、四川省重点研发专项(20ZDYF0306, 20ZDYF0112)、四川省重大科技专项(2019ZDZX0039, 2018GZDZX0029)

* E-mail: zjp16@scu.edu.cn

1 引言

近年来,基于结构光编码的三维测量技术在工业质量检查^[1-2]、医学诊断^[3-4]以及人脸重建和识别^[5-7]等场景中应用广泛。结构光模板的编码策略^[1]能够丰富或增加被测对象的表面纹理,可以避免匹配存在歧义。简化立体视觉中对应点的相关匹配过程,可以进一步提高三维重建结果的准确性和可靠性。对于散斑编码结构光的研究^[8-13],相较于基于正弦条纹相移投影的三维测量技术^[14],基于散斑图案的三维测量技术^[11]无需精确的相移要求且价格昂贵的投影设备,仅需成本低廉的散斑模板就可以获得优异的三维重建效果^[15]。

与商业数字投射器相比,基于衍射光学元件(DOE)的激光散斑投影装置具有结构紧凑、功耗小和集成度高的优点。在游戏娱乐和人机交互等应用中,多家公司推出了基于 DOE 和激光照明的三维传感器,包括 Orbbec^[5]、RealSense^[16]和 Kinect V1.0^[17],但三维传感器投影散斑的数量有限,这会导致三维重建数据的空间分辨率和测量精度较低。在三维人脸成像的应用中,由于皮肤的光谱吸收率和相机的响应效率小于其他非激光光源,所以相机采集激光照在人脸上的散斑图像的对比度非常低。虽然使用高功率激光可以解决这种情况,但会对人眼造成伤害。美国 3dMD 公司的三维扫描系统^[3]采用大功率红外 LED(Light Emitting Diode)照亮固定图案的散斑模板,但其成本高且体积大,对于需要平衡成本、精度和集成度的三维人脸识别的应用会受到限制。

不同于条纹相移投影技术,基于散斑图案编码技术的人脸目标可通过相似性函数,如零均值归一化互相关(ZNCC)^[18]来确定两个视图之间的视差,并且匹配点的确定不需要任何关于散斑图案的先验知识^[19],而且成本低廉的散斑投影装置具有较好的应用潜力,有望替代当前流行、昂贵和笨重的数字投射器。Schaffer 等^[20]使用了激光照射毛玻璃并设计了一个声光偏转器以调制散斑图案,这可以实现散斑连续扫描的物体三维测量。Zhong 等^[21]使用了红、绿和蓝(RGB)散斑编码结构光来测量物体的三维面形。此外,还有采用旋转结构光模板和图像相关算法来实现三维重建。Heist 等^[22]提出了一种基于 GOBO(GOes Before Optics)散焦投影的三维表面形貌测量方法,通过投影一个维度变化的非周期性正弦条纹,并使用几百瓦的辐射通量照射旋转

的金属模板来生成图案,可以在极短的时间内实现相机曝光,并使用了时间归一化互相关(T-NCC)对目标进行立体匹配。Hyun 等^[15]设计了一种机械投影装置,使用具有均等间隔的转轮结构来产生相移正弦条纹图案并将具有散斑图案的透明模板放在光路中,接着采用标准的立体匹配算法完成三维重建,但是该投影装置体积庞大且价格昂贵,不适合集成到三维人脸识别系统中。Zhou 等^[23]提出的三维测量系统由昂贵的工业相机和电机驱动的散斑投影装置组成,散斑图案中包含 1.22×10^6 个点,这可以确保三维人脸数据的完整性和准确性,所以该设备用于创建脸部数据库是可以接受的,但实际的三维人脸识别系统存在尺寸大和成本高的缺点。Shi 等^[24]提出的旋转散斑去相关方法可用于光学成像以及运动物体的跟踪。

针对三维人脸的采集,本文构造一个新型且结构紧凑的动态散斑图案同轴投射器。首先将散斑模板固定在垂直于光轴的齿轮上,使用齿轮机构驱动散斑模板的旋转运动,并使用波长为 735 nm 的 LED 照亮散斑模板。接着将该装置放在基于散斑编码结构光的三维人脸成像系统中,在实际的采集任务中可使用测量精度和运算效率的折衷配置采集图像。然后采用时空立体匹配相关算法^[9,13,23,25]对目标进行立体匹配,通过理论分析和仿真模拟对散斑模板的旋转角度与测量精度的关系进行量化分析以确定最佳的旋转角度,进一步确保连续帧之间的不相关性,从而保证三维重建精度。最后将工业 3D 扫描仪获取的人脸面具三维数据作为真值,研究系统的测量精度与投影散斑数量的关系,同时测试真实人脸三维采集的效果。提出的三维采集系统有望为机场、火车站和海关等公共场所的三维人脸识别提供良好的硬件支撑。

2 基本原理

2.1 散斑编码图案的设计

设计的散斑编码图案如图 1(a1)~1(a8)所示。首先将 3×3 矩阵的所有灰度值均设为 0,然后随机选择矩阵 9 个数值中的任意两个,并将其灰度值设为 255。图 1(b)为设计的随机二元散斑编码图案的局部放大图。将图 1(b)的散斑图案刻蚀在半径为 R 和厚度为 H 的圆形镀铬玻璃上,散斑的尺寸为 Δx ,其与相机的像元尺寸匹配。测量空间中,可以粗略估计黑白散斑的总数量 N_s ^[23],表达式为

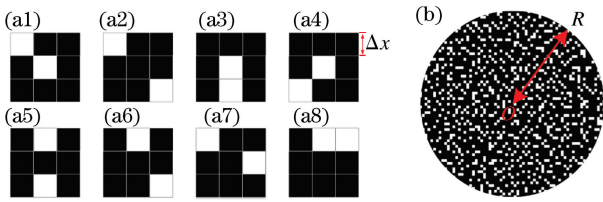


图 1 散斑图案。(a1)~(a8)不同类型的散斑图案;(b)散斑模板的局部放大图

Fig.1 Speckle patterns. (a1)-(a8) Different types of speckle patterns; (b) partial enlarged view of speckle template

$$N_s = \frac{\pi R^2}{(\Delta x)^2} \quad (1)$$

2.2 基于散斑结构光编码的三维人脸采集系统

为了满足三维人脸成像的要求,设计一种基于旋转散斑结构光编码的三维人脸采集系统,如图 2(a)所示,其中 L 为被测人脸和旋转散斑投射器之间的距离, B 为两摄像机投影中心之间的距离(也称为基线)。该系统主要包括两个红外相机(IR camera)、一个旋转散斑投射器和一个控制模块,两个红外相机负责采集两个视角下受人脸表面调制的变形散斑图像。

科勒照明光路系统如图 2(b)所示。将散斑模板固定在垂直于光轴的齿轮上,考虑到相机和人眼的响应率,使用波长为 735 nm 的 LED 光源照亮散斑模板,并使用齿轮比为 1 : 1 : l 的齿轮机构来控制电机以实现散斑图案的旋转切换,其中 l 为散斑模板驱动齿轮与电机驱动齿轮的齿数比(假设散斑模板的旋转角速度为 ω ,则电机将以 $l\omega$ 的角速度进行旋转)。散斑模板的旋转会产生时间上和空间上互不相关的散斑编码结构光图案,使用透镜将旋转变化的散斑编码图案投射到待测的人脸表面上。散斑模板在旋转投影的过程中,相同子窗口内的散斑图像编码特征(散斑位置与灰度分布)会发生变化,且变化量与散斑模板的旋转角度成正比。随着子窗口内像素与子窗口中心距离的增加,散斑图像编码特征的变化量也逐渐增加。特别是在相同旋转角度的情况下,子窗口内的中心像素相对于边缘像素而言,编码特征的变化量较小,为此可采用较大尺寸的窗口以确保有足够的信息来搜索最佳的匹配位置以及降低噪声的干扰。同时,为了保证整场的测量精度,需确定旋转前后相邻散斑子窗口图像之间的相关性以确定最佳的旋转角度,即相邻散斑子窗口图像的相关性越小,表明单次散斑投影的编码特征越丰富,立体匹配的准确率和视差的计算精度越高,从

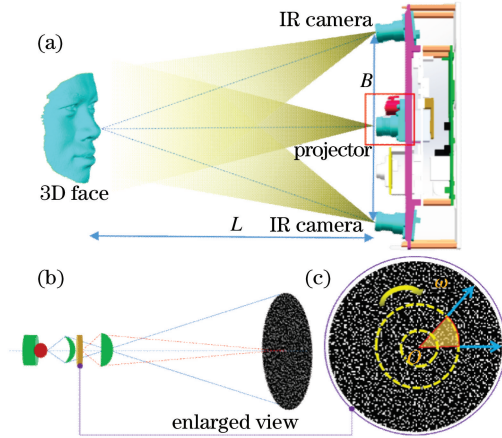


图 2 三维人脸采集系统。(a)三维系统示意图;(b)散斑图案投射器的光学结构;(c)散斑模板

Fig. 2 Three-dimensional face acquisition system.

(a) Schematic of three-dimensional system; (b) optical structure of speckle pattern projector; (c) speckle template

而保证三维重建的精度。

需要注意的是,在相机曝光的时间内,散斑模板应处于静态,否则会出现运动模糊的现象,进而降低三维重建的精度,因此控制散斑模板旋转的方波信号可以同时触发两个带有红外滤光片的相机,从而保证人脸散斑图像序列的同步采集。方波信号的周期 T_s 可表示为

$$T_s = \Delta t_{\text{exp}} + \Delta t_m + \Delta t_s, \quad (2)$$

式中: Δt_{exp} 、 Δt_m 和 Δt_s 分别为相机曝光、散斑模板移动和停止的时间间隔。

为了保证立体匹配图像之间的对应性并进一步确保三维重建的准确性,要求采集的人脸散斑图像序列之间的相关性尽可能小^[13,18,23],因此需将散斑模板的旋转角度限制在一个投影周期内,即

$$\Delta\theta \geq \Delta\theta_{\text{th}}, \quad (3)$$

式中: $\Delta\theta_{\text{th}}$ 为仿真模拟确定的最小旋转角度。

2.3 人脸三维重建流程

利用三维人脸采集系统构建的人脸三维重建流程如图 3 所示。首先使两个红外相机与旋转散斑投射器精确同步运行,然后从两个不同的视角来采集受人脸面形调制的旋转散斑图案序列 $I_L(\theta_t)$ 和 $I_R(\theta_t)$,最后采用基于零均值归一化交叉相关的时空相关立体匹配(ST-ZNCC)算法^[23]来计算视差以获得人脸的三维点云数据,其中 t 为第 t 个时刻。在三维人脸识别应用的过程中,采集端将采集的人脸三维数据与后端的三维人脸全脸数据库进行比对和校验。基于旋转散斑结构光编码的三维人脸重建过程如下。

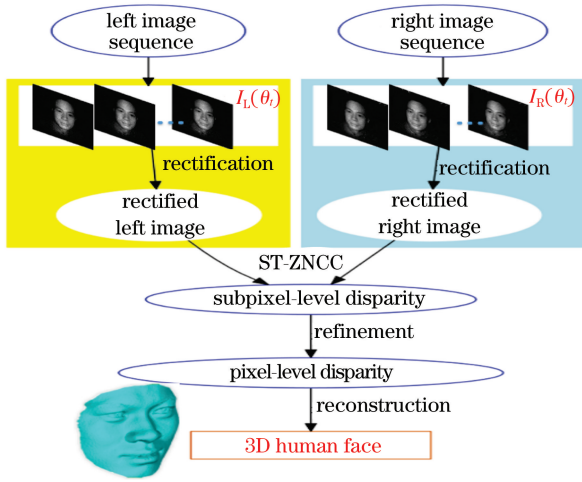


图 3 基于旋转散斑结构光编码的人脸三维重建流程图
Fig. 3 Flowchart of three-dimensional face reconstruction based on rotating speckle structured light coding

1) 采用由 Zhang^[26] 提出的平面标定法对测量系统进行标定, 标定深度范围为 500~800 mm, 使用两个相机同时捕获具有 18 个空间位姿的标靶图像以计算系统的内参和外参。使用系统参数对左、右相机采集的两组散斑图像序列进行极线校正, 使用极线几何将复杂的二维搜索问题约束和简化为简单的一维搜索, 进而提高对应点的搜索速度。

2) 采用 ST-ZNCC 算法生成高精度的视差图。将 $I_L(\theta_t)$ 序列在像素坐标 (u, v) 处的 $w_x \times w_y$ 矩形窗口 ($w_x \geq 3, w_y \geq 3$, 且 w_x 和 w_y 为奇数) 内, 以及与 $I_R(\theta_t)$ 序列在同一行方向上视差值为 d ($d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$) 处窗口内的像素进行相关性计算, ST-ZNCC 相关系数可以表示为

$$C_{\text{ST-ZNCC}}(\theta_t, u, v, d) = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{(u,v) \in \Omega} [I_{L(u,v)}(\theta_n) - \bar{I}_L] [I_{R(u,v+d)}(\theta_n) - \bar{I}_R]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{(u,v) \in \Omega} [I_{L(u,v)}(\theta_n) - \bar{I}_L]^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{(u,v) \in \Omega} [I_{R(u,v+d)}(\theta_n) - \bar{I}_R]^2}}, \quad (4)$$

式中: Ω 为 $w_x \times w_y$ 窗口的邻域窗口像素集合; n 为 t 时刻的图像; θ 为旋转角度; \bar{I}_L 和 \bar{I}_R 分别为 $w_x \times w_y$ 窗口内左、右图像的平均强度, 表达式为

$$\bar{I}_L = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{(u,v) \in \Omega} I_{L(u,v)}(\theta_n)}{Nw_x w_y}, \quad (5)$$

$$\bar{I}_R = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{(u,v) \in \Omega} I_{R(u,v+d)}(\theta_n)}{Nw_x w_y}. \quad (6)$$

通过对搜索范围内的所有相关值求最大值, 可以获得最大相关值对应的整数像素位置 (u, v_{int}) , 其中 $v_{\text{int}} = v + d$, 采用五点曲线拟合法可以进一步获得亚像素位置 (u, v_{sub}) 。为了加速 ST-ZNCC 立体匹配的计算过程, 采用两级搜索策略。第一级视差搜索策略是使用一个固定的步长 (如 20 pixel) 来确定整数级像素的位置; 第二级视差搜索策略只需在已确定的整数级像素位置周围来搜索和拟合亚像素位置, 这两级搜索策略可以在不损失匹配精度的情况下明显降低计算量。

3) 视差图的细化。对于具有噪声、孔洞和异常值的点云, 可以采用一些简单的后处理操作, 如 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 的均值平滑滤波、半径小于 5 pixel 的孔洞填充和 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 中值滤波的异常值

去除。

4) 获得亚像素视差图后, 结合系统标定的参数并根据三角测量的原理可以计算三维人脸点云数据, 得到的人脸三维模型如图 3 所示。

3 仿真分析

使用电机齿轮机构来驱动散斑模板的旋转, 可以在测量空间中产生空间上和时间上互不相关的散斑编码图案。当 LED 在相同的旋转角度处照亮散斑模板时, 相机开始曝光并将采集的散斑图像序列发送至三维重建模块。通过仿真模拟来确定最佳的旋转角度并使其满足 (3) 式, 从而确保立体匹配的准确性和三维重建数据的精度。这里需注意到两点问题: 1) 当散斑模板连续旋转时, 可能会出现运动模糊的现象; 2) 随着散斑模板半径的增加, 旋转幅度越大, 给定窗口内图像序列之间的空间相关性越小, 则采用 ST-ZNCC 算法搜索的对应点越准确, 因此需确定散斑模板的最优旋转角度, 以保证立体匹配的精度。

采用 2.1 节的散斑编码图案设计方法可以生成分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的散斑图案, 旋转前后给定窗口内散斑相关系数并采用空间 ZNCC 算

法进行计算,表达式为

$$C_{ZNCC}(\theta_t, \theta_{t-1}) = \frac{\sum_{(u,v) \in \Omega} [I_{(u,v)}(\theta_t) - \bar{I}(\theta_t)] [I_{(u,v)}(\theta_{t-1}) - \bar{I}(\theta_{t-1})]}{\sqrt{\sum_{(u,v) \in \Omega} [I_{(u,v)}(\theta_t) - \bar{I}(\theta_t)]^2} \sqrt{\sum_{(u,v) \in \Omega} [I_{(u,v)}(\theta_{t-1}) - \bar{I}(\theta_{t-1})]^2}}, \quad (7)$$

式中: \bar{I} 为时空窗口内的像素灰度平均值。通过改变 $w_x \times w_y$ 子窗口图像相对于旋转中心 $O(0,0)$ 的偏移角度和相对于水平轴的偏移方向,从而计算旋转散斑子窗口图像之间的相关系数。窗口大小 $w_x \times w_y$ 设置为 $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$,窗口中心偏移量沿着半径方向从中心 $O(0,0)$ 开始变化,偏移方向的集合为 $\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ\}$,旋转角度的集合为 $\{3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 18^\circ\}$ 。

图 4~6 为仿真模拟的结果,偏移量 $\sqrt{x^2 + y^2}$ 的变化范围为 $0 \sim 20 \text{ pixel}$,偏移方向分别为 $0^\circ, 45^\circ$ 和

90° 。从图 4(a)、图 5(a)和图 6(a)可以看到,在旋转中心 $O(0,0)$ 处,随着旋转角度(位置)的增加,相邻两幅图像之间的相关性越小,表明单幅图像的散斑投影编码特征越丰富,则采用时空相关进行立体匹配搜索得到的对应点越准确,最终三维面形的测量精度越高。从图 4~6 可以看到,当 $\Delta\theta = 6^\circ$,即窗口中心远离图像的旋转中心时,相关系数随着偏移量的增加逐渐减小。为了获得相关性小(小于 0.2)以及减少图像获取的时间,则最优的 $\Delta\theta$ 值为 12° 。

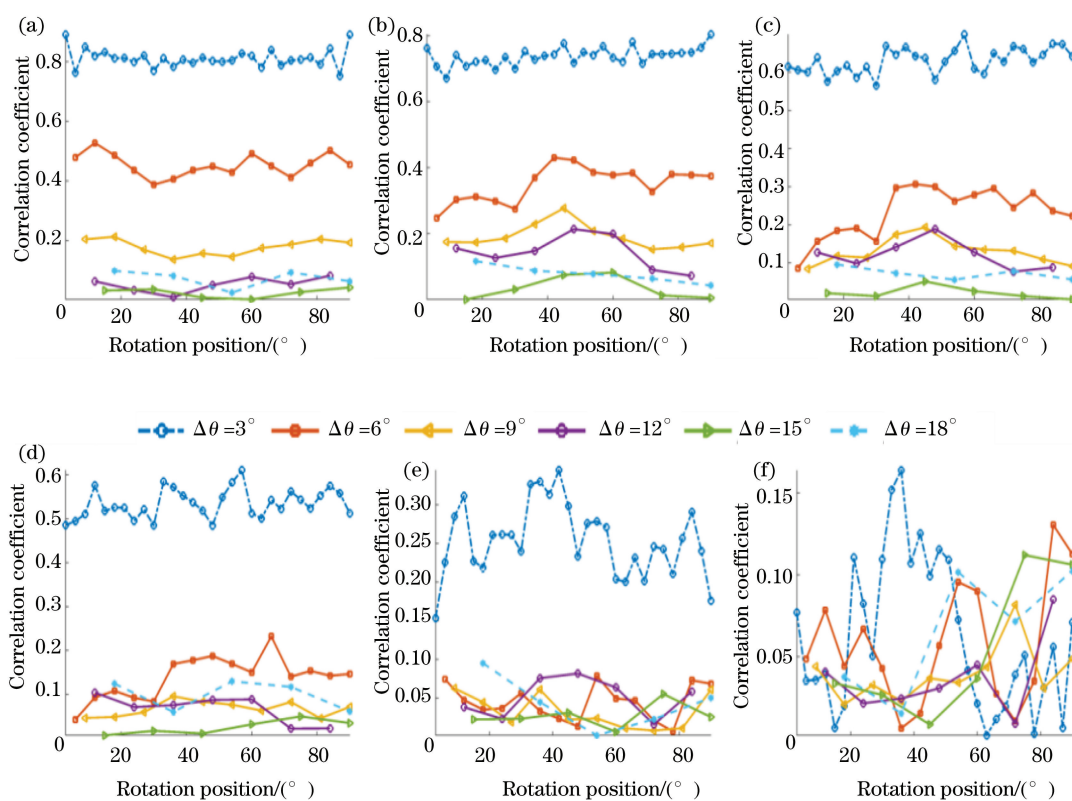


图 4 0° 偏振方向下 x 轴偏移 $0 \sim 20 \text{ pixel}$ 的散斑图案序列之间的相关性。(a) $x=0, y=0$; (b) $x=5, y=0$; (c) $x=8, y=0$; (d) $x=10, y=0$; (e) $x=15, y=0$; (f) $x=20, y=0$

Fig. 4 Correlation between speckle pattern sequences offset 0-20 pixel on x axis in direction of 0° polarization.

(a) $x=0, y=0$; (b) $x=5, y=0$; (c) $x=8, y=0$; (d) $x=10, y=0$; (e) $x=15, y=0$; (f) $x=20, y=0$

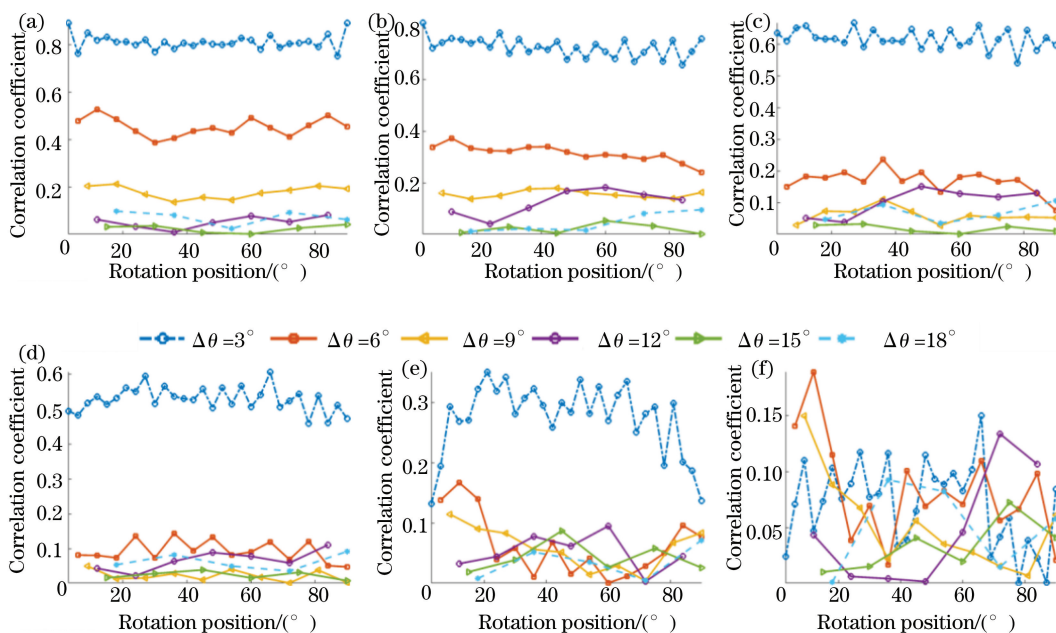


图 5 90°偏振方向下 y 轴偏移 0~20 pixel 的散斑图案序列之间的相关性。(a) $x=0, y=0$; (b) $x=0, y=5$; (c) $x=0, y=8$; (d) $x=0, y=10$; (e) $x=0, y=15$; (f) $x=0, y=20$

Fig. 5 Correlation between speckle pattern sequences offset 0-20 pixel on y axis in direction of 90° polarization. (a) $x=0, y=0$; (b) $x=0, y=5$; (c) $x=0, y=8$; (d) $x=0, y=10$; (e) $x=0, y=15$; (f) $x=0, y=20$

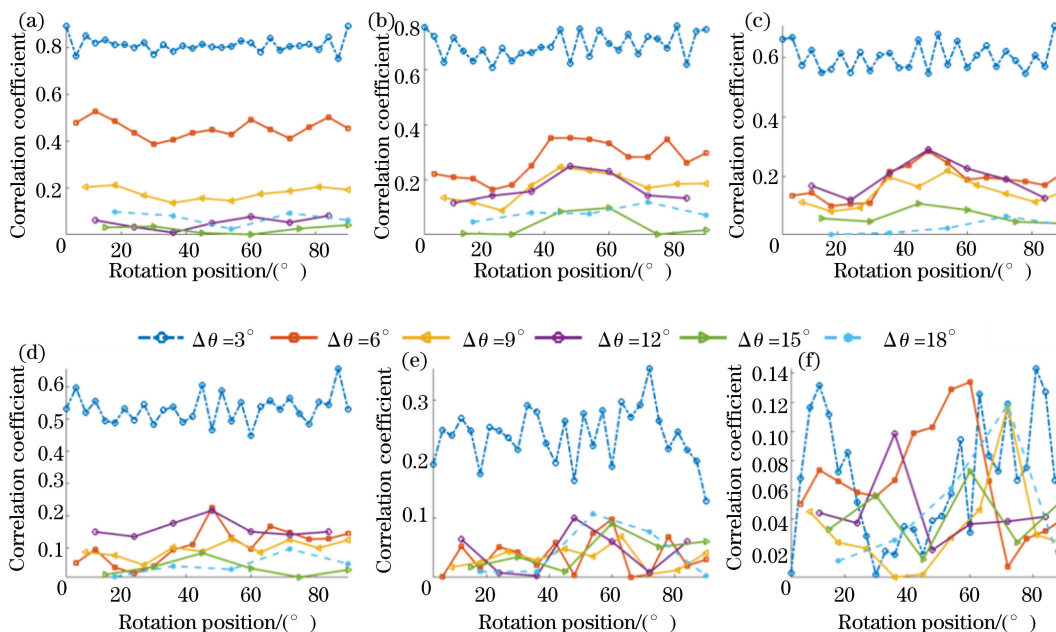


图 6 45°偏振方向下 x 轴和 y 轴偏移 0~20 pixel 的散斑图案序列之间的相关性。(a) $x=0, y=0$; (b) $x=4, y=4$; (c) $x=6, y=6$; (d) $x=7, y=7$; (e) $x=11, y=11$; (f) $x=14, y=14$

Fig. 6 Correlation between speckle pattern sequences with x axis and y axis offset 0-20 pixel in direction of 45° polarization. (a) $x=0, y=0$; (b) $x=4, y=4$; (c) $x=6, y=6$; (d) $x=7, y=7$; (e) $x=11, y=11$; (f) $x=14, y=14$

4 实验结果

三维人脸采集系统由两个水平方向的红外相机(焦距 f 为 8 mm, 分辨率为 1280 pixel \times 1024 pixel, 像元尺寸为 4.8 μm , 基线约为 100 mm) 和一个投射器(焦距 f 为 8 mm) 组成。镀铬玻璃的厚度 $H = 1$ mm, 半径 $R = 6$ mm, 特征尺寸 $\Delta x = 15$ μm , Δx 约为相机尺寸的 3 倍。采用功率为 30 W 和波长为 735 nm 的 LED 照亮散斑模板, 使用齿轮机构(齿轮比 1 : 1 : 4.88) 来驱动散斑模板的转动, 通过控制步进电动机的旋转圈数可以切换不同的旋转角度。旋转散斑投射器可以在测量视场中产生时间上和空间上不相关的散斑图案, 散斑图案中约有 5×10^5 个黑白点。散斑立体图像对 N 可以在 3 ~ 12 的范围内进行选择。三维重建算法运行在 i5-6500 CPU 和 8 GB RAM 的工业计算机上, 下面通过实验验证旋转散斑图案的相关性和三维采集系统的精度。

4.1 旋转散斑图案的相关性

实验中, 将 A4 白纸放在距离投射器 600 mm 的位置(垂直于投射器的光轴)。设置不同的旋转角

度(3° 、 6° 、 9° 、 12° 和 18°) 并使投射器投射不同的旋转散斑图案, 使用两个相机同步采集图像序列。对包括 Δt_{exp} 、 Δt_{m} 和 Δt_{s} 在内的所有参数进行优化, 以确保获得最佳的图像质量, 旋转的角度范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。与仿真模拟的计算和分析方法类似, 采用(6)式计算相关系数。需要强调的是, 散斑的特征尺寸是像素尺寸的 3 倍, 则窗口尺寸为 45 pixel \times 45 pixel。

图 7~9 为 $\sqrt{x^2 + y^2}$ 的变化范围为 0 ~ 60 pixel 且偏移方向分别为 0° 、 45° 和 90° 的实验结果。从图 7(a)、图 8(a) 和图 9(a) 可以看到, 随着旋转角度的增大, 相关系数不断减小, 表明散斑模板旋转后, 相同空间位置处于窗口内的信息相关性越小, 单次空间域信息包含更丰富的散斑投影编码特征, 这可以进一步提高 ST-ZNCC 算法的准确率和视差的计算精度, 从而最终获得高精度的三维面形数据。相关系数与偏移量的变化关系如图 7~9 所示。从图 7~9 可以看到, 实验结果与图 4~6 的模拟结果呈现基本相似的趋势, 说明实验结果与仿真模拟结果吻合的较好, 证实三维人脸采集系统设计的可行性。

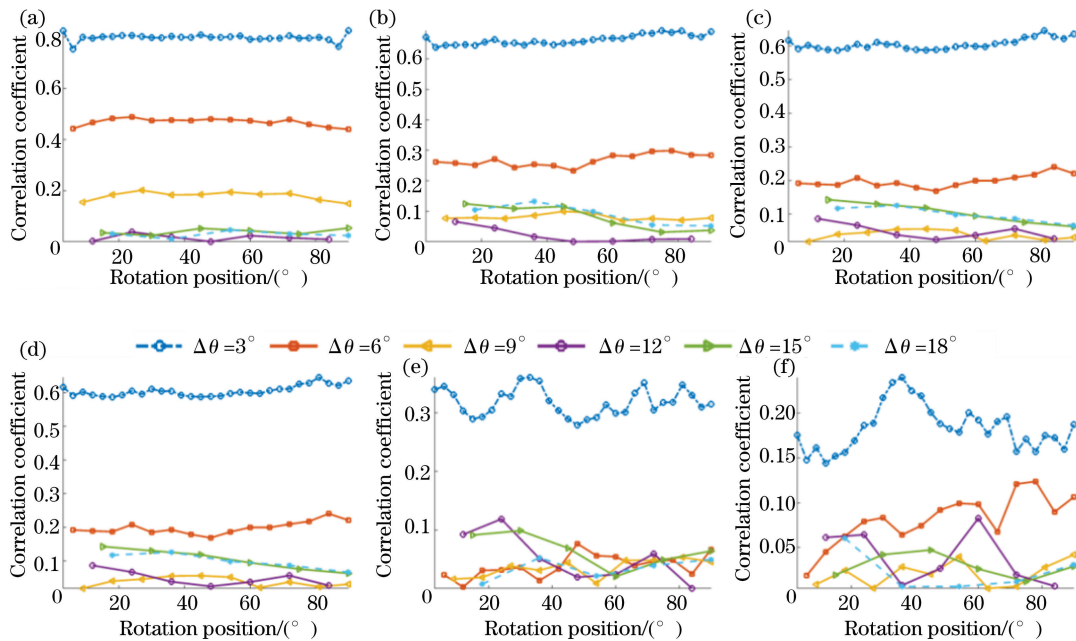


图 7 0° 偏振方向下 x 轴偏移 0~60 pixel 的散斑图案序列之间的相关性。(a) $x=0$, $y=0$; (b) $x=15$, $y=0$; (c) $x=24$, $y=0$; (d) $x=30$, $y=0$; (e) $x=51$, $y=0$; (f) $x=60$, $y=0$

Fig. 7 Correlation between speckle pattern sequences offset 0-60 pixel on x axis in direction of 0° polarization. (a) $x=0$, $y=0$; (b) $x=15$, $y=0$; (c) $x=24$, $y=0$; (d) $x=30$, $y=0$; (e) $x=51$, $y=0$; (f) $x=60$, $y=0$

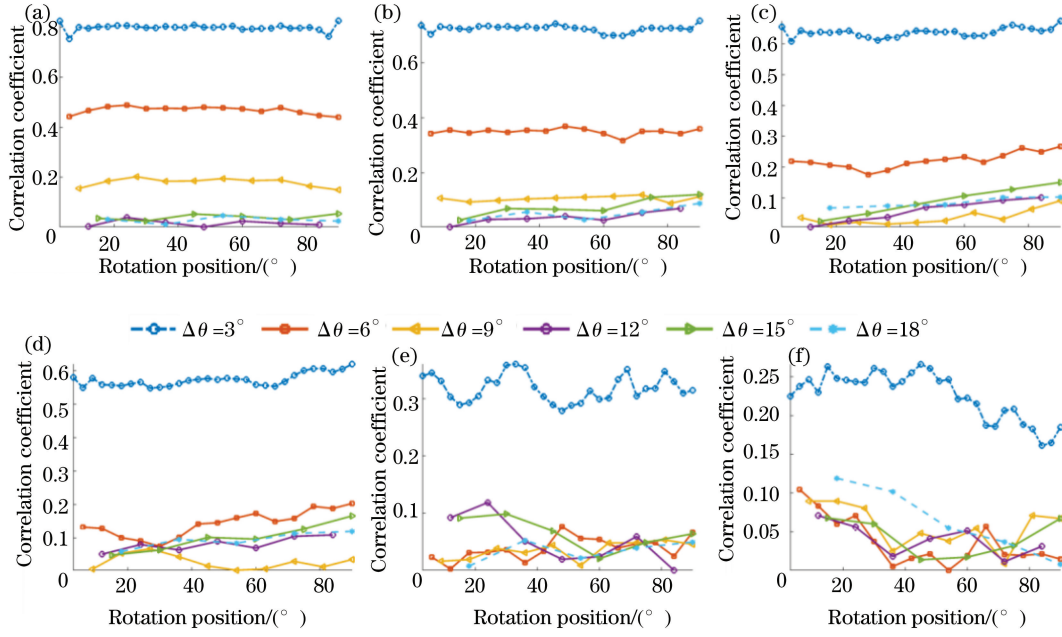


图 8 90°偏振方向下 y 轴偏移 0~60 pixel 的散斑图案序列之间的相关性。(a) $x=0, y=0$; (b) $x=0, y=15$; (c) $x=0, y=24$; (d) $x=0, y=30$; (e) $x=0, y=51$; (f) $x=0, y=60$

Fig. 8 Correlation between speckle pattern sequences offset 0-60 pixel on y axis in direction of 90° polarization. (a) $x=0, y=0$; (b) $x=0, y=15$; (c) $x=0, y=24$; (d) $x=0, y=30$; (e) $x=0, y=51$; (f) $x=0, y=60$

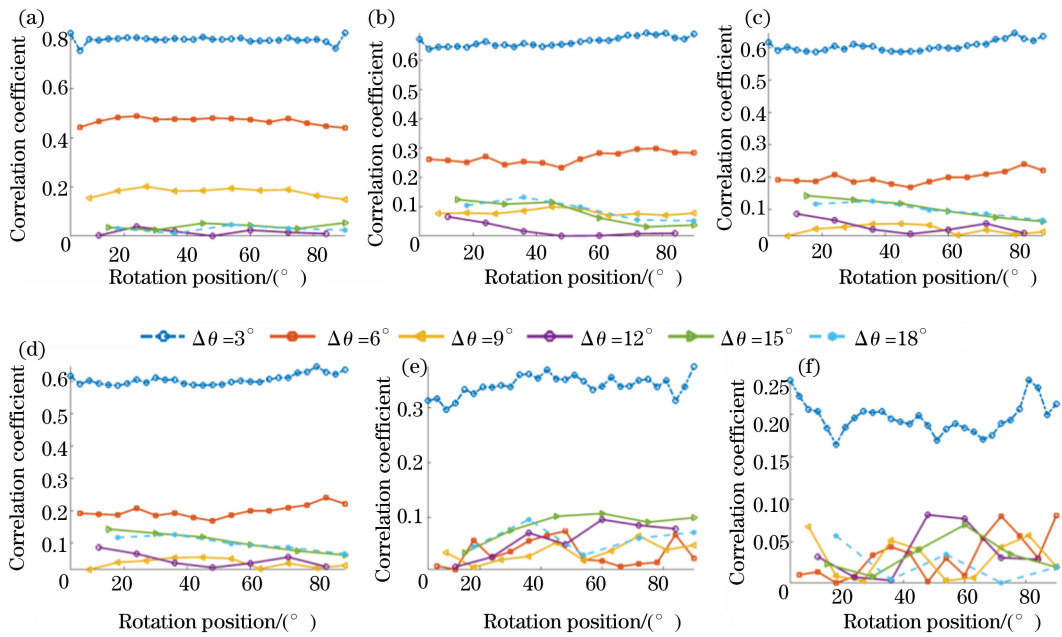


图 9 45°偏振方向下 x 轴和 y 轴偏移 0~60 pixel 的散斑图案序列之间的相关性。(a) $x=0, y=0$; (b) $x=11, y=11$; (c) $x=17, y=27$; (d) $x=21, y=21$; (e) $x=35, y=35$; (f) $x=42, y=42$

Fig. 9 Correlation between speckle pattern sequences with x axis and y axis offset 0-60 pixel in direction of 45° polarization. (a) $x=0, y=0$; (b) $x=11, y=11$; (c) $x=17, y=17$; (d) $x=21, y=21$; (e) $x=35, y=35$; (f) $x=42, y=42$

4.2 精度评价

为了验证三维人脸成像系统的精度,采用德国 ATOS Core 300 扫描仪(精度为 ± 0.02 mm,满足德国标准 VDI VDE 2634 Part2^[27]和 VDI VDE 2634 Part3^[28]的要求)来获取图 10(a)的三

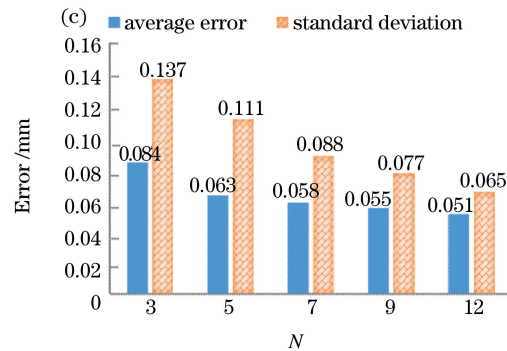
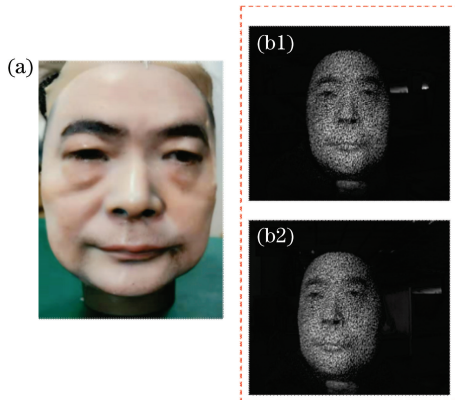


图 10 人脸面具实验结果。(a)真实人脸面具;(b1)~(b2)散斑图像对;(c)统计误差与 N 值的关系
Fig.10 Experimental results of face mask: (a) Real face mask; (b1)-(b2) speckle image pairs;
(c) relationship between statistical error and N value

将散斑模板的旋转角度 $\Delta\theta$ 设为 12° ,令 $\Delta t_{\text{exp}}=2$ ms, $\Delta t_{\text{m}}=7$ ms, $\Delta t_{\text{s}}=2$ ms。图 10(b1)和图 10(b2)为相机采集的散斑立体图像对,在不同帧数的情况下配置不同的 ω_x 和 ω_y 等重建参数,可以确保获得最佳的重建精度。图 10(c)为不同 N 值下的误差统计直方图。从图 10(c)可以看到,当投射散斑数量为 5 时,三维重建的平均误差约为 0.063 mm,误差标准差为 0.111 mm;随着 N 值的增大,平均误差和标准误差均越来越小;当 $N>3$ 时,平均误差平稳下降,当 $N>5$ 时,标准误差下降趋缓。通过实验分析可以确定参数与重建精度和速度的关联性并且可以获得最优的参数组合。在实际的三维人脸识别应用场景中,推测 $N=5$ 或者 $N=6$ 是平衡采集时间和重建精度的较好选择。

为了进一步验证基于散斑编码结构光的三维人脸成像系统在三维人脸识别中的应用前景,对真实人脸(本文通讯作者)进行实验测试。相机采集 12 对立体图像序列,图 11(a1)和图 11(a2)为其中一对受到人脸面形调制的变形散斑图像,当 N 值分别为 3、5、7、9 和 12 时的真实人脸三维重建结果,如图 11(b1)~11(b5)所示。从图 11 可以看到,随着 N 值的增大,人脸重建区域越来越平滑,但 $N>5$ 的重建结果与 $N=5$ 的差异并不显著,这与图 10(c)的变化趋势相吻合。

维数据并将其作为真值。通过改变 N 值并采用 ST-ZNCC 算法对数据进行三维重建,使用 Geomagic 2012 软件将面具的重建三维数据与真值数据进行比对,分析平均误差和标准误差,结果如图 10 所示。

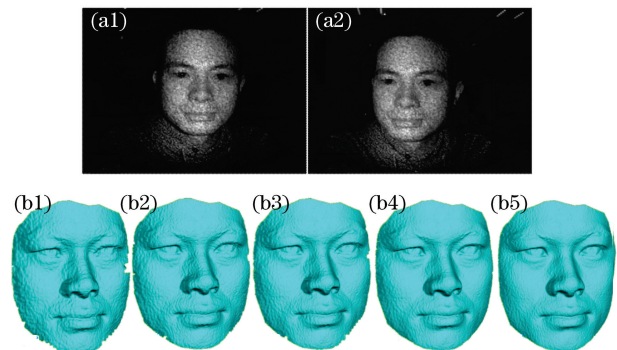


图 11 真实人脸的三维重建结果。(a1)~(a2)人脸面形调制后的散斑立体图像对;(b1) $N=3$, (b2) $N=5$, (b3) $N=7$, (b4) $N=9$, (b5) $N=12$ 时的真实人脸三维数据

Fig. 11 Three-dimensional reconstruction results of real faces. (a1)-(a2) Speckle stereo image pair after human face shape modulation; real three-dimensional face data when (b1) $N=3$, (b2) $N=5$, (b3) $N=7$, (b4) $N=9$, (b5) $N=12$

5 结 论

针对三维人脸识别应用的需求,设计并实现一套基于时空散斑编码结构光的三维人脸采集系统,通过散斑模板的旋转可以在测量空间中生成时空互不相关的散斑图案,采用时空相关立体匹配算法可以实现人脸高精度的三维重建,在实际

的三维人脸识别应用中,可根据测量精度和计算效率折衷选择来采集图像。通过理论分析和仿真模拟验证对散斑模板的旋转角度和测量精度的关系进行量化分析并确定最佳的旋转角度。使用高精度工业 3D 扫描仪获取的标准化人脸面具数据来评估三维人脸采集系统的精度, $N=5$ 或者 $N=6$ 是平衡测量采集时间和重建精度的折衷选择。目前,三维人脸采集系统还需根据实际应用进行改进和完善,如散斑图像序列的获取时间相对较长(134 ms),下一步将通过升级控制策略和机械结构来解决散斑模板切换耗时的问题,对三维重建算法的 GPU 并行加速以实现快速三维计算进行进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 128-160.
- [2] Wang T, Li Z, Wang S, et al. Blades model reconstruction based on speckle vision measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011501.
王涛, 李战, 王盛, 等. 基于散斑视觉测量的叶片模型重构 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011501.
- [3] 3dMD. 3dMD home page [EB/OL]. [2020-06-16]. <http://www.3dmd.com/>.
- [4] Khan D, Shirazi M A, Kim M Y. Single shot laser speckle based 3D acquisition system for medical applications [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 105: 43-53.
- [5] ORBBEC. 3D sensing -3D face recognition [EB/OL]. [2020-06-16]. <http://www.orbbec.com.cn/>.
- [6] Apple. iPhone X [EB/OL]. [2020-06-16]. <https://www.apple.com/cn/iphone-x/>.
- [7] Lü S W, Da F P, Deng X. 3D face recognition method based on regional enhanced local binary pattern [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2015, 45(4): 678-682.
吕士文, 达飞鹏, 邓星. 基于区域改进 LBP 的三维人脸识别 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(4): 678-682.
- [8] Sjö Dahl M, Synnergren P. Measurement of shape by using projected random patterns and temporal digital speckle photography [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(10): 1990-1997.
- [9] Wiegmann A, Wagner H, Kowarschik R. Human face measurement by projecting bandlimited random patterns [J]. *Optics Express*, 2006, 14(17): 7692-7698.
- [10] Tang H C, Li D H, Li L, et al. Planar object surface shape speckle pattern deflectometry based on digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0212006.
汤海潮, 李大海, 李磊, 等. 基于数字图像相关的平面物体面形散斑图偏折术 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0212006.
- [11] Da J, Qu H M, Tao T Y, et al. Real-time three-dimensional measurement composite of epipolar constraint and speckle correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1012003.
笄健, 屈惠明, 陶天阳, 等. 结合极线约束和散斑相关的实时三维测量方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1012003.
- [12] Guo J P, Peng X, Li A, et al. Automatic and rapid whole-body 3D shape measurement based on multinode 3D sensing and speckle projection [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31): 8759-8768.
- [13] Zhou P, Zhu J P, Jing H L. Optical 3-D surface reconstruction with color binary speckle pattern encoding [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3452-3465.
- [14] Lu R S, Shi Y Q, Hu H B. Review of three-dimensional imaging techniques for robotic vision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(4): 040001.
卢荣胜, 史艳琼, 胡海兵. 机器人视觉三维成像技术综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(4): 040001.
- [15] Hyun J S, Chiu G T, Zhang S. High-speed and high-accuracy 3D surface measurement using a mechanical projector [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1474-1487.
- [16] Microsoft. Realsense [EB/OL]. [2020-06-16]. <https://www.intelrealsense.com/>.
- [17] Intel. Kinect for windows [EB/OL]. [2020-06-16]. <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect>.
- [18] Sutton M A, Orteu J J, Schreier H W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements. Basic concepts, theory and applications [M]. Boston: Springer, 2009.
- [19] Heist S, Dietrich P, Landmann M, et al. GOBO projection for 3D measurements at highest frame rates: a performance analysis [J]. *Light: Science &*

- Applications, 2018, 7: 71.
- [20] Schaffer M, Grosse M, Harendt B, et al. High-speed three-dimensional shape measurements of objects with laser speckles and acousto-optical deflection [J]. Optics Letters, 2011, 36 (16): 3097-3099.
- [21] Zhong F Q, Kumar R, Quan C G. RGB laser speckles based 3D profilometry[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(20): 201104.
- [22] Heist S, Lutzke P, Schmidt I, et al. High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 87: 90-96.
- [23] Zhou P, Zhu J P, You Z S. 3-D face registration solution with speckle encoding based spatial-temporal logical correlation algorithm [J]. Optics Express, 2019, 27(15): 21004-21019.
- [24] Shi Y Y, Liu Y W, Sheng W, et al. Speckle rotation decorrelation based single-shot video through scattering media[J]. Optics Express, 2019, 27(10): 14567-14576.
- [25] Xu R C, Zhou F Y, Zhang Q C. 3D shape measurement based on binocular vision and digital speckle spatio-temporal correlation [J]. Laser Journal, 2018, 39(3): 32-36.
许仁超, 周方艳, 张启灿. 基于双目视觉的数字散斑时空相关三维面形测量[J]. 激光杂志, 2018, 39(3): 32-36.
- [26] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330-1334.
- [27] Optical 3-D measuring systems - optical systems based on area scanning: VDI/VDE 2634 Blatt 2-2012 [S]. Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [28] Optical 3D-measuring systems - multiple view systems based on area: VDI VDI/VDE 2634 Blatt 3-2008[S]. Berlin: Beuth Verlag, 2008.