

# 线结构光光条中心提取综述

李莹莹 张志毅 袁林

(西北农林科技大学信息工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要** 在基于三角法的线结构光三维测量系统中,如何快速精确地从光条图像中提取光条中心位置是实时精密测量的关键问题。本文在分析线结构光光源选择、环境噪声和被测物体表面反射属性等影响光条中心提取因素的基础上,对当前已有的线结构光光条中心提取方法进行综述,包括专门的光条图像去噪技术和阈值分割技术,以及传统的和改进的光条中心提取算法,分析其原理及关键技术。最后,针对目前线结构光测量中存在的问题给出建议,指出开发能处理高像素图像,并能在室外强光和复杂的自然环境中使用的单目激光系统是将来的发展趋势。

**关键词** 测量;线结构光测量;提取光条中心;图像去噪;图像分割

中图分类号 TP391.44

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.100002

## Survey on Linear Structured Light Stripe Center Extraction

Li Yingying Zhang Zhiyi Yuan Lin

(Department of Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract** In the linear structured light three-dimensional measurement system based on triangulation, how to quickly and accurately extract light strip center from an image is pivotal to real-time and precise measurement. Firstly, the factors influencing light strip center extraction are described, such as linear structured light sources, environmental noise and surface reflectance properties of the measured object. Then the existing methods, including specialized light image de-noising and threshold segmentation technologies, traditional and improved light strip center extraction algorithms, are summarized. The principle and key technology of these algorithms are analyzed. Finally, some advices aiming at problems appearing in the existing methods are given, and it is pointed out that the developing monocular laser systems which can handle with high pixels image and can be used in outdoor light and complicated natural environment are the development trend in the future.

**Key words** measurment; liner structured light measurement; light stripe center extraction; image de-noising; image segmentation

**OCIS codes** 120.6650; 1403640; 140.3295

## 1 引言

随着电荷耦合元件(CCD)的快速发展,基于三角法的线结构光三维测量以其非接触、主动受控、高精度以及实时性强等特点,在现代工业检测、医疗诊断、计算机视觉及逆向工程等领域中的应用日益广泛。在线结构光检测系统中,利用 CCD 像机摄取线结构平面激光束照射到物体表面所产生的光条中心偏移量信息,可计算出物体表面的三维坐标。因此,线结构光图像处理是整个测量任务的关键环节<sup>[1-2]</sup>,而稳健、快速、精确的图像光条中心提取算法是保证系统稳定性、实时性、精准性的关键。近年来,国内外学者对这一热点问题进行了大量的研究。本文通过对大量光条中心提取算法进行综合分析,提出需解决的问题并给出将来研究方向的发展趋势。

收稿日期: 2013-05-09; 收到修改稿日期: 2013-06-03; 网络出版日期: 2013-09-02

基金项目: 国家 863 计划(2013AA10230402)、国家自然科学基金(61202188)、陕西省科技计划(2012NKC01-02)、中央高校西北农林科技大学基本科研业务费(QN2013054)

作者简介: 李莹莹(1988—),女,硕士研究生,主要从事计算机图形学方面的研究。E-mail: 768589089@qq.com

导师简介: 张志毅(1974—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事计算机图形学、数字几何处理、机器视觉、精密仪器设计等方面的研究。E-mail: 815802490@qq.com(通信联系人)

## 2 影响光条中心提取的因素

线结构光三维测量系统由激光器、摄像机、计算机组成,如图 1 所示。激光器发出一条状光条,投射到待测物体表面,摄像机拍摄采集二维光条图像,对摄像机进行立体空间与二维图像转换矩阵的标定后,计算机通过二维图像上光条中心的位置确定物体表面相应的三维空间坐标,从而实现物体的三维测量。

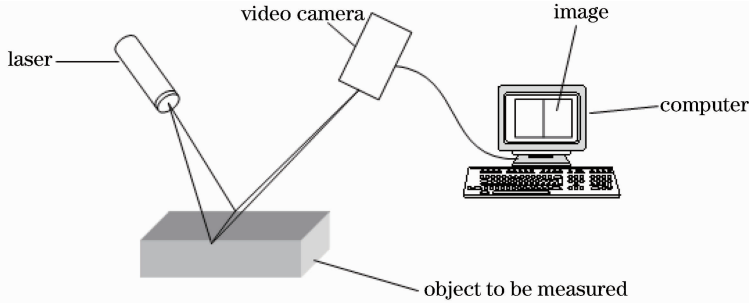


图 1 线结构光测量系统

Fig. 1 Linear structured light measurement system

在线结构光测量中使用单色激光器,它的出射光强在其截面上可认为服从高斯分布,然而在实际情况下因受各种因素影响,光条强度受到调制,不再严格符合高斯分布,使得光条中心提取困难<sup>[3]</sup>。这些因素主要包括三类:1) 光源问题。线激光平面自身“厚度”变化、光强分布不均、外界其他光源如太阳光与环境折/散射光干扰等;2) 环境噪声问题。外界环境噪声、图像采集卡和 CCD 像机内部产生的热噪声和电噪声,综合噪声有随机、复杂、不可重复性;3) 被测物体问题。被测物体表面的颜色、粗糙度、纹理、材质等差异造成漫反射性能不同,被测物体各处的光强反射率并不相同等因素,使得采集到的激光条纹包含了大量噪声,在被测物体表面不同位置,光条的亮度不同,特别是在被测物表面曲率变化较大时,光刀强度被调制且不再符合正态分布,经常会出现光刀断线和散光等情况。

## 3 光条中心提取技术研究现状

对结构光条纹中心的提取一般分为光条图像去噪、光条图像分割和光条中心坐标计算三个步骤。

### 3.1 光条图像去噪技术

邓春梅等<sup>[4]</sup>提出了基于阈值的激光中心快速滤波算法。为解决传统图像平滑算法采用二维滑动窗在滑动时存在像素重复参与运算的问题,该算法先用阈值对激光条进行位置搜索,然后在仅包含激光条的范围内,采用中值滤波去除噪声。搜索光条位置和光条图像去噪同时进行,大大减小了计算量。排除了虚反射光引起的毛刺现象,误差小于 0.05 mm,所以速度和精度能基本满足实用要求。

贺俊吉等<sup>[5]</sup>针对受严重噪声干扰的光条图像处理问题,给出了一种消除环境干扰的滤波模板。该算法在采用中值滤波去除椒盐噪声后,选择特定的滤波模板计算对应于模板中心元素的  $M$  值来滤除由其他杂光制造的“假”光条中心。该方法使得测量系统在  $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  的测量范围内,测量误差低于 0.083 mm,适用于强烈反光的光条图像。

隋连生等<sup>[6]</sup>提出了基于小波变换的激光光条图像去噪技术,以小波分析为依据,运用 Mallat 算法,对图像进行小波分解然后将高频系数进行阈值量化,最后计算图像的小波重构。将该方法应用到牙模图像,能将误差控制在 0.05 pixel 以下,重复提取的高度误差控制在 0.01 mm 以下。

Diversi 等<sup>[7]</sup>为解决噪声损坏的最佳估计问题,介绍了扩展卡尔曼滤波方法。他指出这个环境包括两个错误的变量过滤 subcases(对嘈杂的观测输入和输出的最优估计)和传统的卡尔曼滤波(状态和输出噪声的存在状态和输出的最佳估计)。蒙特卡罗仿真结果表明,该方法能对去噪后图像的光刀中心位置进行稳定计算,降低了误差。

解则晓等<sup>[8]</sup>提出了基于 B 样条迭代的激光光条噪声去除方法,以光条上的点作为控制顶点拟合 B 样条曲线,用 B 样条曲线上的点取代与之横坐标相同的噪声点,反复修改噪声点位置,使其逐渐逼近实际曲线,达到去噪目的。该方法使光条中心的提取精度提高了 0.008 mm,去噪效果较好。

石晶合等<sup>[9]</sup>提出了一种应用于结构光测量系统的强噪声干扰条纹图像处理过程。先将平滑滤波、差影法和阈值法相结合对光条图像进行二值化,然后对降噪和分割后的图像进行细化,提取特征数据。该过程能在不使用其他专业软件的情况下,快速而准确地从强干扰噪声的条纹图像中得到图像特征数据,但是该方法提取精度不高。

赵博华等<sup>[10]</sup>认为区分噪声与光条的主要特征在于图像的灰度离散程度,即颗粒状与连续条纹的区别,因此用 Sobel 梯度算子图像增强方法,增强噪声的颗粒感,然后通过连通区域面积计数对光条和噪声进行形态学分类,设定面积阈值,去除噪声。中心提取的平均误差约为 0.085 mm。

### 3.2 光条图像分割技术

最大类间方差法是常用的自适应阈值分割法,该算法对单峰的图像效果较好,对具有双峰或者多峰的灰度效果不好。张瑞璞等<sup>[11]</sup>对最大类间方差法进行改进,提出了一种基于感兴趣区域(ROI)的最大类间方差法。根据背景与光条图像灰度值相差较大,分别对线激光图像每一行求出灰度最大值,除去少数行严重受背景干扰,多数行中最大灰度值的像素点是落在 ROI 中的,以这些灰度最大值的横坐标均值作为中心,在此坐标基础上左右各取若干列作为 ROI 区域,然后在此区域内运用最大类间方差法进行阈值分割。该方法缩小阈值分割的范围,提高了图像处理的速度,采用该方法和灰度重心法提取激光线条中心,处理一帧 1280 pixel×1024 pixel 的激光图像平均用时 47 ms,并能将曲率变化不大的被测物体与背景自动分离开。

陶立<sup>[12]</sup>提出了一种阈值选取方法,步骤如下:1) 搜寻最大灰度分布列;2) 对第  $j$  行像素列坐标分布在  $[u_{\max} - 5, u_{\max} + 5]$  范围内的像素进行搜寻并依次计算相邻两像素的灰度值,分别提取出位于像素点  $(u_j^{\max}, j)$  左右灰度差最大的两像素点  $u_j^{(L)}, u_j^{(R)}$ ;3) 设图像行数为  $h$ ,将各行获取的边缘点的灰度值累加,并取其平均值

$$T = \sum_{j=0}^{j=h} \frac{\text{gray}(u_j^{(L)}, j) + \text{gray}(u_j^{(R)}, j)}{2 \cdot h}. \quad (1)$$

此阈值作为光条区域与背景区域相邻像素的灰度分界值的近似,能剔除较大的杂乱亮背景,确保结构光扫描测量的精度。

### 3.3 传统的光条中心提取方法

传统的光条中心提取方法主要有:极值法、阈值法、重心法、曲线拟合法、边缘法、几何中心法等。为了解决上述方法误差较大,精度较低的问题,国内外学者进行了大量研究,在其基础上提出了很多改进方法和新的光条中心提取方法。

#### 3.3.1 对极值法、阈值法和重心法的改进

为了克服极值法的缺点,杨雪娇等<sup>[13]</sup>提出了通过对在其基础上获得的中心点进行拟合,计算出光条各处的法线方向,并在法线截面上用遗传算法<sup>[14-16]</sup>进一步优化出灰度的极大值点的方法。在光条的切线截面用遗传算法的迭代方法进行优化获取灰度极大值,可以避免陷入局部极值点,适用于弯曲光条。通过该方法计算得到的中心值的 10 次重复测量的算数平均值的标准差均在 0.13 mm 以下。

崔希君等<sup>[17]</sup>提出的自适应重心迭代算法可使图像上每一行的重心都会最终趋于稳定且得到比较平滑的重心,该方法能将精度控制在 0.01 mm 左右。王文成等<sup>[18]</sup>也提出了一种改进的重心法,通过平方加权的方式增强光强大的点对所求光条中心的影响,使测量的精度得到提高。

为了克服阈值法和灰度重心法的缺点,杨佳等<sup>[19]</sup>提出了采用阈值法和重心法相结合确定光条中心的方法。由于浮雕图像的特殊性,上述方法不能准确提取光条中心。徐庆富等<sup>[20]</sup>对上述方法进一步改进,提出一种针对浮雕的亚像素细分和变阈值重心法相结合的提取光条中心的方法。首先利用一维样条插值函数对灰度图在纵向上进行细分,达到亚像素级别,然后在纵向上取各自阈值,利用重心法计算出光条中心位置。通过插值增大纵向采样点数,减小重心坐标的标准差,提高重心坐标的计算精度,但该方法还需在断线问题上改进。

吴剑波等<sup>[21]</sup>结合了极值法、阈值法和重心法提出了一种光刀中心自适应阈值提取法。该方法首先通过极值法找到每列光强最大的点,用最大值下浮几个灰度级作为阈值,用该阈值判断检测到的点是否为光刀图像上的点,将通过该方法找到的点用灰度重心法计算出光条中心。自适应阈值法充分利用了光强极值点附

近所有点的光强信息,减少光强分布变化对光条中心提取的影响。所提取的中心线较为平滑且无断线现象,速度比多帧平均法和用最小二乘曲线拟合方法明显加快。

吴家勇等<sup>[22]</sup>根据线结构光图像上光带中心两边的灰度梯度特性及光带灰度的非正态分布特点,提出了一种基于梯度重心法的线结构光光带中心快速亚像素提取算法。当光带灰度极大值位置与真实光带中心有较大偏离时,该方法求出的中心能获得偏离灰度极大值的真实光带中心,该方法测量点云数据到拟合球面的距离均方差约为 0.025 mm。

熊会元等<sup>[23-25]</sup>提出了应用灰度梯度计算光条法线方向,在法线方向上应用灰度重心法来精确提取光条中心的方法。该算法首先采用阈值法初步提取光条中心,计算光条带宽;用 Sobel 算子计算光条带的梯度,用方向法计算光条的法向斜率,最后在光条法向上用重心法求出条纹中心图像坐标。该方法有效地弥补了传统重心法不能处理光条法线方向和方向模板法只能获得光条近似法线方向的不足,提取精度较高。

### 3.3.2 对曲线拟合法、边缘法和几何中心法的改进

Lukas 等<sup>[26]</sup>提出了确定条纹中心的大致位置后取其位置附近的 5 pixel 进行高斯拟合来求取激光条纹中心的方法。该方法仅适用直线度好、粗细均匀的激光条纹。孙盼庆等<sup>[27]</sup>将上述方法进行改进,通过对高斯函数进行一系列变换后再用 Householder 方法求解方程得到激光条纹的中心。该方法使激光条纹粗细发生变化时其高斯拟合数据数量也发生自适应改变,提取精度较高,更适合光条中心线的准确提取。

高世一等<sup>[28]</sup>针对该问题提出了变边限高斯拟合法,该算法首先结合极值法和边缘取中法,获得光条的近似像素中心位置后对图像二值化,确定光条各列的宽度,然后根据每列元素宽度值和近似中心位置确定恰当拟合范围,最后采用高斯拟合曲线求得亚像素级的光条中心位置。由于每一列的拟合数据随着激光条纹宽度变化而变化,提取宽度不同的激光光条效果很好,具有亚像素级的精度和较高的鲁棒性。

由于被测物体的表面特性,光刀图像通常是不对称的,用多项式拟合提取光条中心会产生较大误差。隋连升等<sup>[29]</sup>提出 NURBS 曲线插值的光条中心提取方法。NURBS 曲线具有良好的局部控制性,根据光条像素的灰度值分布情况,改变有关的控制顶点的权因子,可以减少受噪声影响较大的光条像素对计算其中心的影响。该方法能够将重复提取的高度误差控制在 0.02 mm 以下,有效提高了测量精度。但拟合过程耗时过长,无法满足实时性需求。

魏振忠等<sup>[30]</sup>针对在结构光视觉检测中光条存在严重反射的问题,提出了一种基于腐蚀细化的最小中值二乘直线拟合方法。该方法 10 次重复测试得到的角度标准差和距离标准差分别为 0.001 mm 和 0.085 mm,其中单次耗时最长不超过 2 s,可满足线结构光标定和工业视觉检测在线测量的要求。刘枝梅等<sup>[31]</sup>对细化后仍有毛刺的问题,通过逐行扫描细化后的光条图像,确定相邻两行中的灰度为 1 pixel,可完全去除毛刺,但精度有所降低。

李中伟等<sup>[32]</sup>提出了通过梯度锐化后用阈值变换将激光条纹边缘准确提取出来,进一步得到近似光条中心线,在中心线两侧各取若干像素,利用重心法求取准确的光条中心线的方法。该算法有很强的抗噪声能力,且处理一幅图像的时间约为 20 ms,可以满足系统实时处理的要求。

Jeong-Hun Jang 等<sup>[33]</sup>用 Canny 算子检测图像的边缘,然后通过构建欧式距离映射图<sup>[34]</sup>到每一个像素离其最近边界的距离值,再将提取出的曲线细化成一个像素宽后去除多余的点<sup>[35]</sup>可得到光条中心。该方法具有很好的稳健性,能处理综合的和自然的图像,但是实时性不足。

## 3.4 特征性的光条中心提取方法

传统的光条中心提取方法多将焦点放在精确性、稳健性和实时性上。但是由于受到环境、设备自身和被测对象的复杂性等因素影响,这些光条中心提取方法很难同时满足较为普适的、实时的、精准的测量要求。为此,许多研究学者提出了一系列更具特征性的光条中心提取方法。

### 3.4.1 方向模板法和 Hessian 矩阵法

胡斌等<sup>[36]</sup>提出了一种利用可变方向模板检测结构光条纹中心的方法。在尺度较小的情况下,不妨认为结构光条纹的方向只有水平,垂直,左倾 45°,右倾 45°四种模式。对应这四种模式分别设计四种方向模板

$$\begin{aligned}
\mathbf{K}_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & k_{00} & k_{01} & k_{02} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{10} & k_{11} & k_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{20} & k_{21} & k_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{30} & k_{31} & k_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{40} & k_{41} & k_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} k_{00} & k_{01} & k_{02} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{10} & k_{11} & k_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{20} & k_{21} & k_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{30} & k_{31} & k_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{40} & k_{41} & k_{42} \end{bmatrix}, \\
\mathbf{K}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{02} & k_{12} & k_{22} & k_{32} & k_{42} & 0 \\ 0 & k_{01} & k_{11} & k_{21} & k_{31} & k_{41} & 0 \\ 0 & k_{00} & k_{10} & k_{20} & k_{30} & k_{40} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & k_{00} & k_{01} & k_{02} \\ 0 & 0 & 0 & k_{10} & k_{11} & k_{12} & 0 \\ 0 & 0 & k_{20} & k_{21} & k_{22} & 0 & 0 \\ 0 & k_{30} & k_{31} & k_{32} & 0 & 0 & 0 \\ k_{40} & k_{41} & k_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)
\end{aligned}$$

分别用上述模板对图像每一行上的点处理,例如第  $i$  行对模板  $\mathbf{K}_0$  有

$$H_j = \sum_{s=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{N-1} \mathbf{K}_0[s][t] C\left(i - \frac{N}{2} + t\right), j = \frac{N}{2}, \frac{N}{2} + 1, \dots, col - 1, \quad (3)$$

$$H_{p_0} = \max(H_j) = \max(H_{N/2}, H_{(N/2)+1}, \dots, H_{col-1}), \frac{N}{2} \leq j \leq col - 1. \quad (4)$$

对模板  $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3$  分别有  $H_{p_1}, H_{p_2}, H_{p_3}$ , 如果有  $H_p = \max\{H_{p_0}, H_{p_1}, H_{p_2}, H_{p_3}\}$ , 则第  $i$  行上激光条纹中心位置为点  $P$  处。该方法具有一定的抗白噪声能力和断线修补能力。雷海军等<sup>[37]</sup>将上述方法进行改进,将阈值法与可变方向模板法相结合,充分发挥两者的优点,提出了一种快速检测结构光条中心的方法。首先,计算线结构光光条的灰度阈值;其次,根据像素的灰度邻域属性实时确定激光条纹;最后,用可变方向模板法检测激光条纹中心。经过实验验证,这种方法计算简单、数据存储量小、实现速度快、稳定性好,并且消除了噪声干扰、具有一定的修补断线的的能力,而且利于硬件并行实现。

吴庆阳等<sup>[38]</sup>提出了一种将可变方向模板法和灰度重心法相结合的光条中心提取方法。通过二值化、细化、剪枝得到光条骨架,利用可变方向模板法求出骨架上每点的法线。以该点为中心,沿着法线方向两边对称地取  $n$  个点,利用灰度重心法求出光条中心,可处理形状复杂的光条。赵广杰等<sup>[39]</sup>将吴庆阳等的方法进行改进,用高斯函数建立模板,提出了高斯曲线拟合和基于光条骨架的方向模板法相结合的光条中心提取方法。该方法在光条曲率变化时,提取的光条中心更接近真实的中心。

Steger<sup>[40-41]</sup>利用 Hessian 矩阵得到图像中光条纹的法线方向,在光条图像中,Hessian 矩阵表示为

$$\mathbf{H}(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y^2} \end{bmatrix} \otimes z(x, y) = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

图像中点的法线方向由该点的 Hessian 矩阵最大特征值的绝对值对应的特征向量给出,通过在法线方向上求极值点得到光条纹中心的亚像素位置。该方法具有精度高,稳健性好等优点,其缺点是运算量大,难以实现光条纹中心的快速提取。 $g(x, y)$  是二维高斯卷积模板,作用是为了突出光条的灰度分布特征。 $z(x, y)$  是以图像点  $(x, y)$  为中心,大小与二维高斯卷积模板相等的图像矩阵。

胡坤等<sup>[42]</sup>以 Steger 算法为基础,将大模板高斯卷积的递归思想应用到激光条纹中心提取中,利用高斯卷积递归获得光条纹各点的 Hessian 矩阵,在一定程度上提高了计算速度。周富强等<sup>[43]</sup>为减少计算量,对上述方法进一步改进,提出了一种把运算只限制在 ROI 内的激光条纹中心提取方法,有效的提高了计算速度。

为进一步提高 Hessian 矩阵的运算速度,杨尉<sup>[44]</sup>将脊线跟踪法与 Hessian 矩阵法相结合,提出了一种新的光条中心提取方法。首先,选择一个可靠的初步跟踪点;然后,用 Hessian 矩阵求该点法线方向上的亚像素光条中心,对所求亚像素光条中心点的坐标取整,得到当前中心跟踪点,再用 Hessian 矩阵求得当前中心跟踪点的切线,将当前中心跟踪点在其切线方向上按一个像素的步长延伸并取整,得到下一个初步跟踪点,重复以上步骤,即可求得光条图像中所有光条中心点。该方法只对结构光光条脊线附近的点进行运算,大大减少了光条中心提取的冗余计算,计算速度比文献<sup>[42]</sup>提高了约 280 倍。

江洁等<sup>[45]</sup>在文献[42]的基础上采用大规模并行算法和串行流水技术,提出了一种串并结合的处理结构。因在 Steger 方法中需进行大量的大模板卷积运算,用软件实现按时钟顺序执行指令的方式无法满足系统的速度要求,因此采用了并行硬件的条纹中心提取算法,成为一种突破速度瓶颈的有效方法。

王伟华等<sup>[46]</sup>提出了一种新的序列图像中结构光条纹中心的快速提取算法。该方法解决了动态测量中结构光条纹中心提取的实时性问题,并有效减小了算法的运算量,实现了条纹中心线的快速精确提取,计算速度比文献[42]方法提高了约 4 倍。孙军华等<sup>[47]</sup>利用卡尔曼滤波实时预测动态测量中激光光条在图像中所处的区域,在此区域内使用灰度最大值法与 Hessian 矩阵法相结合的方法提取光条中心亚像素级的图像坐标。该方法与 Steger 法比较,方均根误差为 0.005mm,满足精度要求,计算速度比文献[42]方法提高了约 6 倍。程明明等<sup>[48-50]</sup>在 Steger 方法的基础上先对图像二阶导数的非最大值抑制求曲线上的点来去除不可靠的点。该算法产生的曲线数量平均值约为 Steger 算法的 20%,位置也较精确。

### 3.4.2 复杂干扰下的光条中心提取方法

为克服颜色突变对光条中心提取的影响,陈亮等<sup>[51]</sup>提出了一种基于视频的光条中心提取方法。该算法先将视频图像按时序提取对应像素得到时序提取图,然后将时序提取图顺时针旋转  $\theta$  角( $\theta$  是激光平面和 CCD 平面法线的夹角),用重心法求得旋转后图像的光条中心坐标后逆时针旋转  $\theta$ ,得到真实的的光条中心。在物体表面颜色变化的情况下,通过该方法能得到更高精度的物体三维轮廓。

向长波等<sup>[52]</sup>针对光切法受太阳光照、被测物体表面纹理信息、被测表面低反射特性等干扰因素的影响,提出了通过用视频图像中的奇偶场信号来控制激光光源的驱动电路,进而消除这些因素的方法。该方法适合生产现场工件表面粗糙度的自动化测量与形貌的三维重建。为了得到最佳光条亮度,解则晓等<sup>[53]</sup>设计了基于 D/A 转换的光条亮度自适应调节电路。该电路主要由一个并行接口芯片 8255 和 D/A 转换器 DAC0382 组成。该电路中与任一数字量对应的输出电压为  $V_{\text{lasee}} = 3 \times D/255(\text{V})$ 。随着电压升高,激光器的亮度逐渐提高。在测量一个具体表面时,使  $V_{\text{lasee}}$  从一个较小的值逐步增大,在每个  $V_{\text{lasee}}$  对应的光条亮度下提取中心并计算评价指标,最后找出与最优评价指标对应的  $V_{\text{lasee}}$  作为最佳光条亮度,从而实现了光条亮度的自适应调节。实验表明,对于除黑色以外的各种颜色,该方法能自动寻找出与最佳提取精度相对应的光条亮度,提高了线结构光测头对不同被测物体表面的适应性。

毛庆洲等<sup>[54]</sup>对复杂的自然环境光影响,用黑白相间的条纹作为测量场区的背景,对目标信号进行调制,然后采用差分算法检测纹理单元的完整性,并将此纹理单元的处理遍历整个测量区域,从而完成目标的提取及得到目标的位置。该方法可有效抑制自然光的干扰。

苏珂等<sup>[55]</sup>利用调制激光锁定照射所感兴趣的目标区域,通过在 CCD 前使用光学滤波和衰减器获取同步图像,可降低进入 CCD 的强背景光,避免了图像饱和。此后运用图像鉴相技术进行处理,有效解决了目标图像湮没在强背景光或复杂背景中的情况。但该技术是从多帧图像获得一帧图像,降低了获取有效数据的帧频,速度较慢。

## 4 存在问题及发展趋势

以上各种方法在提取速率、提取精度和稳健性方面的比较如表 1 所示。

表 1 各种方法的综合比较

Table 1 Comprehensive comparison of various methods

Extraction method	Extraction rate /(ms/frame)	Extraction error /mm	Robustness (suitability)
Traditional methods	<20	>0.250	Heavily dependent on the scan environment
Center of gravity method	20~30	<0.025	Can eliminatesome noise, can not be used outdoors
Curve fitting method	20~2000	<0.020	Can eliminatesome noise, can not be used outdoors
Hessian matrix methods	11~370	<0.008	Seriously affected by noise
Anti-interference methods	60~180	>0.085	Can effectively suppress interference of natural light

对光条中心提取方法的研究在精度上要求达到 0.01 mm 或更高;在实时性上要求处理一幅图像的时间

低于 33 ms;在稳定性上不仅要求能适应不同颜色、纹理、材质和复杂光照环境下的准确提取,而且需解决视点单一所造成的断线与数据残缺等问题。但是,由表 1 可以看出,迄今的算法大多只能在特定条件下获得较好结果,导致在实际应用中需根据具体条件选择适宜算法。也就是说尚缺乏能同时满足上述各苛刻条件的普适性方法。综合分析,存在目前困局的原因是对激光光条中心的提取存在以下问题:

1) 由于多使用 532 nm 或 632 nm 的线状激光发射器,较少考虑 CCD/CMOS 对激光条的敏感特性。其它波段的实验较少。室外太阳光在这两个波段上的能谱很强,使得满足国际电工委员会安全标准的激光器在室外强光下无法获得良好的光条图像<sup>[54-58]</sup>。因此,此类系统仅能在室内使用,无法在室外强光下有效使用。

2) 所用视觉系统为双/多目系统时<sup>[56-57]</sup>其标定和校准较为复杂,误差较大。有少数单目系统设计巧妙<sup>[58-60]</sup>。不论单目还是双/多目系统,基本上都只能对被测对象进行单面测量或扫描。若要获得全方位的测量或扫描数据,一种方式是制作被测物的旋转平台,另一种是移动测量或扫描装置<sup>[61-64]</sup>。此时对所获得数据的配准精度和速度要求极高。

针对上述情况,本文提出将来的发展趋势和需解决的关键技术问题。

1) 结合智能化自动滤波方法和自适应调节发射光强,开发近红外波段敏感的 CCD 成像系统,使用对人体无害的红外激光来构建测量或扫描系统,不仅可在室内使用,在室外强光和复杂的自然环境中也可使用,是将来的发展趋势。

2) 为提高测量精度,处理千万像素以上的图像势在必行。为保证实时性,采用高效的目标提前跟踪方法,快速准确地分割出感兴趣区域后提取微米级光条中心是一种较好的策略。

3) 使用单目激光系统在精度和速度上均优于双/多目系统。为实现全方位测量或扫描,当在移动中进行测量时,需引入快速高效的实时定位和姿态捕获单元。使用三轴线加速度和角加速度传感器,可实现主动定位和姿态捕获<sup>[65-66]</sup>。此时,定位数据和测量数据的同步以及测量数据的实时精确配准是需要解决的关键技术问题。

## 5 结束语

在线结构光三维测量过程中,光条中心位置的确定至关重要。本文分析了影响光条中心提取的因素,根据光条图像特点总结相应的各种光条中心提取算法,分析了其优缺点,并对目前结构光测量中存在问题及未来发展趋势进行了分析和预测,本文对线结构光测量技术的研究具有重要参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 Song Zhang, Peisen S Huang. High-resolution real-time three-dimensional shape measurement[J]. *Optical Engineering*, 2006, 12(45): 1-8.
- 2 Erik Næsset, Ross Nelson. Using airborne laser scanning to monitor tree migration in the boreal-alpine transition zone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(3): 357-369.
- 3 Ren Fuyuan, Xu Zhenpu, Yu Demin, *et al.*. Several factors that affect detecting laser strip center and methods accordingly in three-dimensional measurement using structured laser light[J]. *Microcomputer Information*, 2006, 22(11-2): 259-261.  
任福元, 许增朴, 于德敏, 等. 激光三维测量中影响光条中心提取的因素及对策[J]. *微计算机信息*, 2006, 22(11-2): 259-261.
- 4 Deng Chunmei, Wang Pingjiang, Chen Jihong, *et al.*. An accurate real time filtering algorithm for calculating laser center based on image processing[J]. *J Huazhong University of Science and Technology*, 1999, 27(8): 10-12.  
邓春梅, 王平江, 陈吉红, 等. 基于图像处理的激光中心实时滤波算法[J]. *华中理工大学学报*, 1999, 27(8): 10-12.
- 5 He Junji, Zhang Guangjun. Study on method for processing image of strip in structured-light 3D vision measuring technique [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(7): 593-597.  
贺俊吉, 张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理方法研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29(7): 593-597.
- 6 Sui Liansheng, Yang Jinghua, Jiang Zhuangde. De-noising technology for laser-knife image based on wavelet transform[J]. *Acta photonica Sinic*, 2003, 32(9): 1121-1128.  
隋连生, 杨景华, 蒋庄德. 基于小波变换的激光光刀图像去噪技术[J]. *光子学报*, 2003, 32(9): 1121-1128.
- 7 Diversi R, Guidorzi R, Soverini U. Kalman filtering in extended noise environments[J]. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2005, 50(9): 1396-1402.
- 8 Jie Zhexiao, Zhang Chenguo, Zhang Guoxiong. Research on removing the noise on the laser stripe based on the iterative

- fitting of B\_spline[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 430—433.
- 解则晓, 张成国, 张国雄. 基于 B 样条迭代法的激光光条噪声去除技术研究[J]. *光学技术*, 2005, 31(3): 430—433.
- 9 Shi Jinhe, Tan Guangyu, Li Guanghui, *et al.*. Process image of strip with serious noises in structure light measuring technique[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2005, 10(6): 106—108.
- 石晶合, 谭光宇, 李广慧, 等. 结构光测量中强噪声干扰条纹图像的处理[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2005, 10(6): 106—108.
- 10 Zhao Bohua, Wang Boxiong, Zhang Jin, *et al.*. Extraction of laser stripe center on rough metal surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2138—2144.
- 赵博华, 王伯雄, 张金, 等. 粗糙金属表面光条中心提取方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2138—2144.
- 11 Zhang Ruiying, Zhou Ping, Feng Xun, *et al.*. Rapid extraction of line-structured light stripe in large field of view[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 432—436.
- 张瑞瑛, 周萍, 冯煦, 等. 大视场下线结构光光条中心的快速提取[J]. *应用光学*, 2010, 31(3): 432—436.
- 12 Tao Li. Study on Key Techniques for Color 3D Laser Scanning System Measurement[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- 陶立. 彩色三维激光扫描测量系统关键技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- 13 Yang Xuijiao, Chi Haihong. An improved method of extracting structured light strip center[J]. *Applied Science and Technology*, 2009, 36(12): 41—44.
- 杨雪娇, 池海红. 一种改进的光条中心提取方法[J]. *应用科技*, 2009, 36(12): 41—44.
- 14 Jong K D. The analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems[D]. Ann Harbor: University of Michigan, 1975.
- 15 Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Reading[M]. MA: Addison Wesley, 1989.
- 16 Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial System[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- 17 Cui Xijun, Yang Chuan, Liu Baohua, *et al.*. Self-adaptive iterative method of extracting center of linear-structured light stripe[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(1): 73—76.
- 崔希君, 杨川, 刘保华, 等. 线性结构光心的自适应迭代提取法[J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(1): 73—76.
- 18 Wang Wencheng, Xu Jianqiang, Si Shuchun. A improved barycenter method used in light-trap center acquiring[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005, 16(10): 1239—1242.
- 王文成, 徐建强, 司书春. 一种改进的重心法在光带中心提取中的应用[J]. *电子·激光*, 2005, 16(10): 1239—1242.
- 19 Yang Jia, Jia Shuhai. A novel method of three dimensional profile measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 36(6): 972—975.
- 杨佳, 贾书海. 一种新的三维轮廓测量方法[J]. *光子学报*, 2006, 36(6): 972—975.
- 20 Xu Qinfu, Pei Renqing, He Lanlan, *et al.*. Acquisition of the light-knife center in measuring a relieve with laser[J]. *Optical Instruments*, 2009 31(5): 1—5.
- 徐庆富, 裴仁清, 何岚岚, 等. 面向浮雕的激光测量中光刀中心提取[J]. *光学仪器*, 2009, 31(5): 1—5.
- 21 Wu Jianbo, Cui Zhen, Zhao Hong, *et al.*. An adaptive threshold method for light-knife center acquisition [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, 22(1): 62—64.
- 吴剑波, 崔振, 赵宏, 等. 光刀中心自适应阈值提取法[J]. *半导体光电*, 2001, 22(1): 62—64.
- 22 Wu Jiayun, Wang Pingjian, Chen Jihong, *et al.*. Method of linear structured light sub-pixel center position extracting based on gradient barycenter[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(7): 1354—1360.
- 吴家勇, 王平江, 陈吉红, 等. 基于梯度重心法的线结构光中心亚像素提取方法[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(7): 1354—1360.
- 23 Xiong Huiyuan, Zong Zhijian, Chen Chenpeng. Accurately extracting full resolution centers of structured light stripe[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 1057—1062.
- 熊会元, 宗志坚, 陈承鹏. 线结构光条纹中心的全分辨率精确提取[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1057—1062.
- 24 Xiong Huiyuan, Zong Zhijian, Gao Qun, *et al.*. Precise method for extracting center of structured light stripe [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(10): 235—237.
- 熊会元, 宗志坚, 高群, 等. 精确提取线结构光条纹中心方法[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(10): 235—237.
- 25 Zhihua Lv, Zhiyi Zhang. Build 3D scanner system based on binocular stereo vision[J]. *Journal of Computers*, 2012, 7(2): 399—404.
- 26 Lukas J, Fridrich J, Goljan M. Detecting digital image forgeries using sensor pattern noise[C]. *SPIE*, 2006, 6072: 60720Y.
- 27 Sun Panqing, Yang Yongyue, He Liangliang. An improved gaussian fitting method used in light-trap center acquiring[J]. *Electronic Design Engineering*, 2012, 20(13): 179—185.
- 孙盼庆, 杨永跃, 何亮亮. 一种改进的高斯拟合法在光带中心提取中的应用[J]. *电子设计工程*, 2012, 20(13): 179—185.
- 28 Gao Shiyi, Yang Kaizheng. Research on central position extraction of laser strip based on varied-boundary Gaussian fitting



- [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1132-1137.  
高世一, 杨凯珍. 变边缘高斯拟合提取激光条纹中心线方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1132-1137.
- 29 Sui Liansheng, Li Bing, Jiang Zuangde. Research on method of laser-knife center position extracting based on NURBS interpolation[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(10): 933-937.  
隋连升, 李兵, 蒋庄德. 基于 NURBS 曲线插值的激光光刀图像中心提取方法的研究[J]. 中国激光, 2003, 30(10): 933-937.
- 30 Wei Zhenzhong, Zhang Guangjun. A robust automatic method for extracting the centric line of straight structured-light strip [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2004, 25(2): 244-247.  
魏振忠, 张广军. 结构光直光条中心线的鲁棒性自动提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(2): 244-247.
- 31 Liu Zhimei, Deng Wenyi, Lou Xiaoping. Extraction algorithm of light stripes center in the measurement system of structured light[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2009, 24(1): 42-45.  
刘枝梅, 邓文怡, 娄小平. 结构光测量系统中光条中心的提取算法[J]. 北京机械工业学院学报, 2009, 24(1): 42-45.
- 32 Li Zhongwei, Wang Chongjun, Shi Yusheng. An algorithm for detecting center of structured light stripe combining gradient sharpening with barycenter method[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(1): 64-68.  
李中伟, 王从军, 史玉升. 一种结合梯度锐化和重心法的光条中心提取算法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(1): 64-68.
- 33 Jeong-Hun Jang, Ki-Sang Hong. Detection of curvilinear structures and reconstruction of their regions in gray-scale images [J]. Pattern Recognition, 2002, 35(4): 807-824.
- 34 C Arcelli, G Sannitidi Baja. Ridge points in Euclidean distance maps[J]. Pattern Recognition Letters, 1992, 13(4): 237-243.
- 35 G Malandain, S Fernandez-Vidal. Euclidean skeletons[J]. Image Vision Comput, 1998, 16(5): 317-327.
- 36 Hu Bin, Li Dehua, Jing Gang, *et al.*. New method for obtaining the center of structured light stripe by direction template [J]. Computer Engineering and Application, 2002, 38(11): 42-45.  
胡斌, 李德华, 金刚, 等. 基于方向模板的结构光条纹中心检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(11): 42-45.
- 37 Lei Haijun, Li Dehua, Wang Jianyong, *et al.*. A method for fast detecting the center of structured light stripe[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science), 2003, 31(1): 74-76.  
雷海军, 李德华, 王建永, 等. 一种结构光条纹中心快速检测方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(1): 74-76.
- 38 Wu Qingyang, Su Xianyu, Li Jingzhen, *et al.*. A new method for extracting the centre-line of line structure light-stripe[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(4): 151-154.  
吴庆阳, 苏显渝, 李景镇, 等. 一种新的结构光光带中心提取算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(4): 151-154.
- 39 Zhao Guangji, Fu Li. Extraction algorithm of the structured light stripes [J]. Journal of ShenYang Institute of Aeronautical Engineering, 2010, 27(4): 67-70.  
赵广杰, 傅莉. 结构光光条中心的提取算法[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2010, 27(4): 67-70.
- 40 C Steger. Extracting curvilinear structures: A differential geometric approach[J]. Computer Vision-ECCV '96 Lecture Notes in Computer Science, 1996, 1064: 630-641.
- 41 C Steger. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- 42 Hu Kun, Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun. Fast extraction method for sub-pixel center of structured light stripe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(10): 1326-1329.  
胡坤, 周富强, 张广军. 一种快速结构光条纹中心亚像素精度提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10): 1326-1329.
- 43 Zhou Fuqiang, Chen Qiang, Zhang Guangjun. Composite image processing for center extraction of structured light stripe [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19(11): 1534-1537.  
周富强, 陈强, 张广军. 结构光光条提取的混合图像处理方法[J]. 光电子·激光, 2008, 19(11): 1534-1537.
- 44 Yang Wei. Research on Method for Extracting Center of Structured Light Stripe [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.  
杨尉. 结构光光条中心提取方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- 45 Jiang Jie, Deng Jueqiong, Zhang Guangjun, *et al.*. Real-time implementation of light stripe center extraction[J]. Optical Technique, 2008, 34(2): 170-174.  
江洁, 邓珏琼, 张广军, 等. 光条纹中心的实时快速提取[J]. 光学技术, 2008, 34(2): 170-174.
- 46 Wang Weihua, Sun Junhua, Liu Zhen, *et al.*. Stripe center extraction algorithm for structured-light in rail wear dynamic measure[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(1): 87-90.  
王伟华, 孙军华, 刘震, 等. 钢轨磨耗动态测量结构光条纹中心提取算法[J]. 激光与红外, 2010, 40(1): 87-90.
- 47 Sun Junhua, Wang Hen, Liu Zhen, *et al.*. Rapid extraction algorithm of laser stripe center in rail wear dynamic measure [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(3): 691-695.

- 孙军华, 王恒, 刘震, 等. 钢轨磨损动态测量中激光光条中心的快速提取[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 691-695.
- 48 Ming-Ming Cheng. Curve structure extraction for cartoon images[C]. Beijing: The 5th Jiont Conference on Harmonious Human Machine Environment, 2009. 1-8.
- 49 D Sykora, J Burianek, J Zara. Segmentation of black and white cartoons[C]. Proceeding SCCG '03 Proceedings of the 19th spring conference on Computer graphics, 2003. 223-230.
- 50 D Sykora, J Burianek, J Zara. Sketching cartoons by example[C]. Proceedings of the 2nd Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling, 2005, 27-34.
- 51 Chen Liang, Wang Yongqiang, Xu Zengpu, *et al.*. Video-based method for extracting the center of structured light stripe [J]. Journal of TianJin University of Science & Technology, 2009, 24(4): 62-65.  
陈亮, 王永强, 许增朴, 等. 基于视频的结构光光条中心提取方法[J]. 天津科技大学学报, 2009, 24(4): 62-65.
- 52 Xiang Changbo, Yin Chuanli, Song Jianzhong. An anti-disturbing method for extracting light-knife center[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(7): 1303-1308.  
向长波, 尹传历, 宋建中. 抗干扰的光刀中心提取方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7): 1303-1308.
- 53 Jie Zhexiao, Xin Yuexiang, Jing Ming, *et al.*. Influence on the accuracy of structured-light sensors by the brightness of laser stripe[J]. Optical Technique, 2008, 34(z1): 52-54.  
解则晓, 辛悦向, 金明, 等. 光条亮度对线结构光测量精度的影响[J]. 光学技术, 2008, 34(z1): 52-54.
- 54 Mao Qingzhou, He Saixian, Chen Changjun. Object extracting in nature-light image[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(1): 63-65.  
毛庆洲, 贺赛先, 陈长军. 自然光环境下目标的快速提取方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(1): 63-65.
- 55 Su Ke, Yu Xuechai, Zhu Liangxiao, *et al.*. Target image acquisition in strong background light using laser lock-in imaging [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(12): 1293-1297.  
苏柯, 余学才, 朱良销, 等. 激光锁定成像获取强背景光下的目标图像[J]. 激光与红外, 2010, 40(12): 1293-1297.
- 56 Wang Haitao, He Pingan, Liu Zhenya, *et al.*. Research of spectrum matching for 3D measuring system using laser light sectioning[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2003, 1(5): 39-42.  
王海涛, 何平安, 刘震亚, 等. 激光光刀法三维测量系统中的光谱匹配问题[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(5): 39-42.
- 57 Liu Jianwei, Liang Ji. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 126-134.  
刘建伟, 梁晋. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 126-134.
- 58 Park S Y, Subbarao M. A multiview 3D modeling system based on stereo vision techniques [J]. Machine Vision and Application, 2004, 16(3): 148-156.
- 59 Simon Winkelbach, Sven Molkenstruck, Friedrich M Wahl. Low-cost laser range scanner and fast surface registration approach [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 4174: 718-728.
- 60 Sven Molkenstruck, Simon Winkelbach, Friedrich M Wahl. 3D body scanning in a mirror cabinet [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5096: 284-293.
- 61 Zhiyi Zhang, Lin Yuan. Build a 3D scanner system based on monocular vision [J]. Applied Optics, 2012, 51(11): 1638-1644.
- 62 Rogers R M. Applied Mathematics in Integrated Navigation System [M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2007.
- 63 Cho S Y, Park C G A. Calibration technique for a redundant IMU containing low-grade inertial sensors [J]. ETRI Journal, 2005, 27(4): 418-426.
- 64 Xue Ting, Wu Bin, Zhang Ttao, *et al.*. Analysis on round-hole orientation error based on structured light stripe vision senso [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4): 624-629.  
薛婷, 吴斌, 张涛, 等. 基于线结构光视觉传感器的圆孔定位误差分析 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 624-629.
- 65 Andrea Censi, Luca Iocchi, Giorgio Grisetti. Scan matching in the hough domain [C]. Proc. of Intern. Conf. on Robotics and Automation, 2005. 2739-2744.
- 66 Shahar Barnea, Sagi Filin. Extraction of objects from terrestrial laser scans by integrating geometry image and intensity data with demonstration on trees [J]. Remote Sens, 2012, 4: 88-110