

复杂光照条件下矿石三维视觉实时筛选方法

章秀华^{1,2,3}, 洪汉玉^{1,2*}, 徐洋洋^{1,2,3}, 张天序⁴

1. 光学信息与模式识别湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205;
2. 湖北省视频图像与高清投影工程技术研究中心, 湖北 武汉 430205;
3. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205;
4. 华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 矿石自动筛选是提高矿产资源加工效率的关键环节之一。针对矿石开采现场光照复杂多变, 传送带矿石难以实时自动检测等问题, 提出了一种基于红外线结构光的现场矿石 3D 视觉实时筛选方法。为了解决复杂光照条件下太阳辐射对矿石表面结构光成像干扰的问题, 提出采用 800 nm 附近红外线结构光作为成像主动光源, 在各种光照条件下获取稳定的矿石表面结构光图像; 提出邻域累积差分特征分析方法, 通过快速定位光条边界点来提取结构光光条中心, 实时获取矿石 3D 坐标数据。对复杂光照条件下的大量现场矿石表面结构光图像采用多线程进行处理, 实验结果表明, 与现有方法相比, 文中方法速度更快, 稳定性更强, 能适应线结构光形态和方向变化。对每幅矿石结构光图像筛选的时间为 13.2 ms, 满足现场矿石 3D 实时筛选需求。

关键词: 复杂光照条件; 矿石三维视觉实时筛选; 红外线结构光中心提取; 邻域累积差分; 多线程处理

中图分类号: TP391.4 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210125

Real time 3D vision screening method of ore under complex lighting conditions

Zhang Xiuhua^{1,2,3}, Hong Hanyu^{1,2*}, Xu Yangyang^{1,2,3}, Zhang Tianxu⁴

1. Hubei Key Laboratory of Optical Information and Pattern Recognition, Wuhan 430205, China;
2. Hubei Engineering Technology Research Center of Video Image and HD Projection, Wuhan 430205, China;
3. School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
4. Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Automatic ore screening is one of the key links to improve the efficiency of mineral resources processing. Aiming at the complex and changeable illumination in the ore mining site, it is difficult to detect the ore in the conveyor belt automatically in real time, and so on, a real-time 3D vision screening method based on infrared structure light was proposed. In order to solve the interference of solar radiation on the surface structure light imaging of ore under complex illumination, the infrared structure light near 800 nm was used as the active

收稿日期: 2021-03-02; 修订日期: 2021-05-05

基金项目: 国家自然科学基金 (61671337); 湖北省教育厅科学研究计划重点项目 (D20181508)

作者简介: 章秀华, 女, 副教授, 博士, 主要从事光电探测与信息处理、机器视觉、光学三维测量方面的研究工作。

通讯作者: 洪汉玉, 男, 教授, 博士, 主要从事导航与制导、现代图像处理、模式识别、智能控制系统、机器视觉以及三维非接触视觉检测的研究工作。

light source to obtain stable structural light images of ore surface under various illumination conditions. The method of neighborhood cumulative difference feature analysis was proposed. The center of structured light strip was extracted by locating the boundary point of strip quickly, and then 3D coordinate data of ore could be obtained in real time. The results show that the proposed method can better adapt to the changes of the shape and direction of the line structure light and the stability of the method. The time for screening of light images of each ore structure is 13.2 ms, which meets the 3D real-time screening requirements of the ore on site.

Key words: complex illumination condition; real time 3D vision screening of ore; infrared structured light center extraction; neighborhood cumulative difference; multithreading

0 引言

矿石的自动测量与筛选是提高矿产资源加工效率的重要工序,是提升矿产资源综合利用水平的关键环节之一^[1]。在利用生产加工设备对矿石进行破碎、磨粉及提炼之前,必须对矿石的高度、面积等进行测量与筛选,剔除尺寸大小异常的矿石,以保证进入粉碎加工设备的矿石的均匀性,避免造成粉碎设备的损坏而影响生产效率。我国在大部分矿石加工环节已实现了自动化生产,由于矿石自动测量与筛选存在较多技术上的难点和问题,目前仍采用人工方式进行筛选作业,这严重阻碍了矿石的加工和生产效率,同时存在着巨大的安全隐患,因此实现矿石的实时自动筛选是矿石生产行业需要迫切解决的问题。

近年来,国内外部分学者对基于 2D 图像的矿石粒度检测^[2-3]进行了研究,但现场运输过程中的矿石表现为粘连堆叠、纹理色彩杂乱、表面斑痕严重等特征,加上现场光照环境复杂多变,矿石的运动而导致图像模糊等因素(如图 1 所示),使得基于矿石颜色和纹理分析的 2D 图像处理技术面临较大的复杂性和不确定性。随着科技的发展,基于线结构光的 3D 视觉检测技术越来越广泛应用于汽车、轨道交通等多个领域^[4-8]。

从现有的研究成果来看,大多关于线结构光检测应用的场景都位于室内或无阳光直射的环境。目前线结构光中心线提取的常用方法主要有极值法、Gauss 拟合法、Steger 算法以及在此基础上的一些改进方法等^[9]。极值法主要适用于光条为理想高斯分布的线结构光中心提取,无法用于平顶分布的线结构光^[10]。Gauss 拟合法是根据激光条纹的法向灰度值近似服从高斯分布这一现象提出的,但由于不能自适应条纹粗细而引起部分中心像素提取出现偏差^[11-12]。

Steger 方法提取结构光条纹的精度较高^[13-14],但对光条形状要求较高。上述算法的处理精度都依赖较为理想的成像与结构光的分布特性。特别是后两种算法,计算量较大,无法满足实时检测的要求。这些方法对单幅质量较好的光条图像有较高提取精度,但是在处理多序列图像时难以保证提取的速度和稳定性。因此这些常用的方法并不适于应用于复杂光照条件下的矿石 3D 实时检测。

针对复杂光照条件下矿石表面结构光信息获取困难的问题,文中从理论上分析了在太阳辐射条件下,红外线结构光在矿石表面成像的特性,并通过实验验证了采用红外线结构光可以有效去除矿石粘连堆叠、纹理色彩杂乱、表面斑痕等特征带来的影响,能较好地避免太阳光照环境的干扰。针对矿石表面结构光中心提取的问题,提出了一种基于邻域累积差

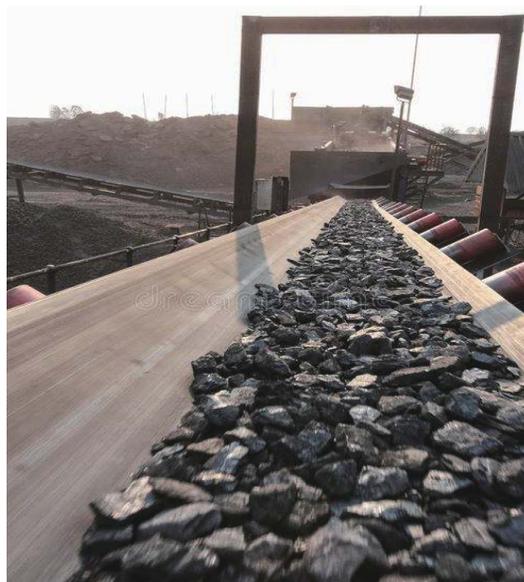


图 1 矿石运输现场图像

Fig.1 Ore transportation image on site

分算法的光条中心快速提取方法,通过快速、准确定位光条的边界来提取矿石表面的结构光条纹中心,并通过多线程方法提高处理速度,实现矿石自动 3D 实时测量与筛选。

1 复杂光照条件下红外线结构光矿石 3D 视觉系统

1.1 矿石表面太阳光照及辐射特性

利用线结构光和 CCD 相机进行矿石 3D 视觉筛选时,由于工作场景为外界自然环境,需要考虑外部环境光照条件下太阳辐射对结构光照明及探测的影响。图 2 所示为太阳辐射光谱强度曲线,最下面红色的实线为太阳辐射通过大气层被吸收、散射反射后到达地表的太阳辐射光谱。可以看出,太阳辐射的波长范围覆盖了从 X 射线到无线电波的整个电磁波谱,采用可见结构光难以从根本上消除太阳光辐射的 N 干扰。

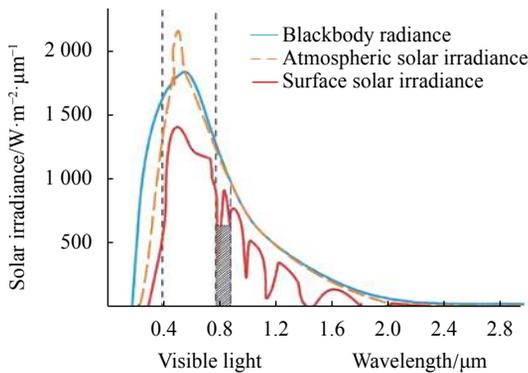


图 2 太阳辐射光谱强度曲线

Fig.2 Spectral intensity of solar radiation

通过对太阳辐射光谱强度曲线分析发现,由于受大气中水蒸气 (H₂O) 吸收作用的影响,800 nm 附近近红外波段,地表辐照强度突然减弱 (图 2 中红色光谱曲线下的阴影线部分)。一般 CCD/CMOS 探测器采用硅材料制作,其光谱响应区间为 400~1000 nm,若在约 800 nm 波段采用人工结构光照明,则受太阳辐射干扰最小,笔者所在团队认为该波段为结构光照明的最佳波段。因此,在文中研制的复杂光照条件下矿石表面结构光采集系统中,提出采用 800 nm 附近的近红外激光作为该系统的结构光照明光源,同时采用

带通滤光片对其他光谱范围的光线进行抑制。从根本上解决复杂场景条件下太阳辐射对矿石表面结构光成像干扰的难题。

1.2 红外线结构光矿石图像采集

基于红外线结构光的矿石 3D 筛选系统装置示意如图 3 所示,该系统硬件主要由红外激光器、带滤光片的 CCD 相机、传送带、计算机、矿石等构成。

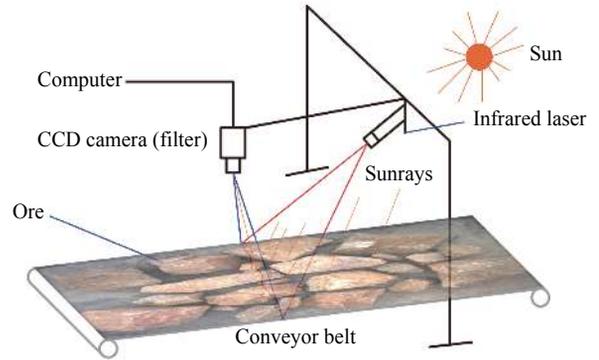


图 3 红外结构光矿石图像采集系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of infrared structured light ore image acquisition system

系统主要工作流程为:将红外激光以一定角度投射至传送带上单向运行的矿石表面上,根据处理算法的速度和传送带运动方向的测量精度要求,适当控制传送带运行的速率,进行矿石 3D 视觉实时筛选。

1.3 复杂光照条件下结构光矿石图像分析

太阳的光谱辐射通量在空间方向上的分布是均匀的^[15],经太阳照射的物体在经 CCD 探测器成像时,物体反射的太阳辐射在成像入瞳面上某点的照度为:

$$E_m = E_s \sigma' \tau^m \cos \gamma \cdot S' \quad (1)$$

式中: E_s 为高反射率物体处太阳的照度; σ' 为物体的反射率; τ 为可见光范围内与波长无关的垂直大气透过率; m 为大气质量数,表示光学厚度在倾斜方向与铅直方向之比; S' 为反射进入入瞳面上某点的反射物体面积。复杂光照条件下,CCD 探测系统会受到杂光和串音饱和的影响^[15]。若背景物体反射的太阳光入射至成像系统的入瞳面上,有一部分杂光会进入光学成像系统,使得目标的成像质量受到影响。当入射杂光累积到一定的能量值,CCD 探测器会产生记忆、

饱和、信号浑浊等一系列非线性光学效应。

图 4 为在无阳光直射和有太阳强光照射条件下分别采集的两种结构光(绿激光和红外激光)矿石图像。从图 4(a)、(b) 中可以看出,在无阳光直射条件下,投射在矿石表面的红外结构光与绿色可见光都能清晰成像,且目标像素与背景像素的强度值差异较大。图 4(c) 为强光照射条件下采集的绿色可见结构

光矿石图像,由于探测器的饱和和非线性光学效应,采集的绿色可见结构光图像中目标和背景像素大多处于饱和状态,结构光目标像素湮没在背景像素中。图 4(d) 为利用红外结构光采集的图像,图中线目标像素强度远大于周围背景像素的强度,背景中矿石区域像素强度表现相对较弱,CCD 能稳定地采集到红外线结构光在矿石表面的反射条纹。

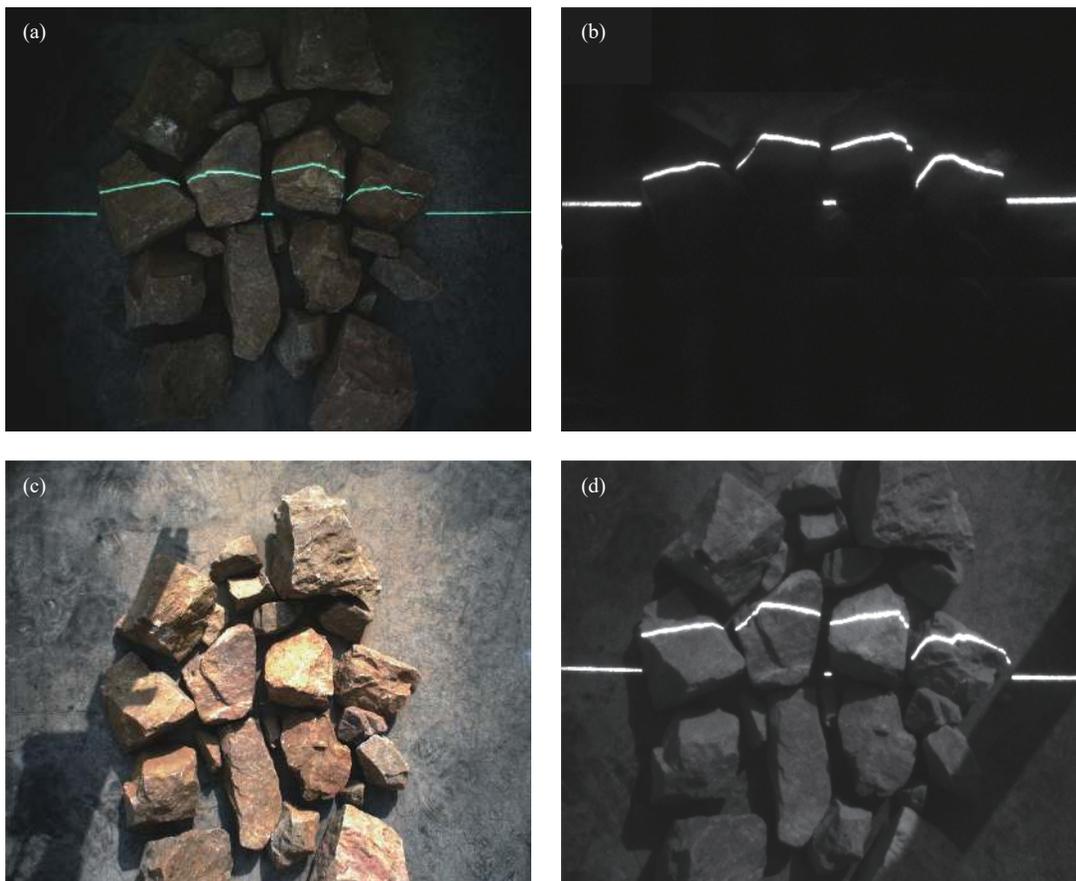


图 4 不同光照环境下可见光与红外结构光矿石图像。(a) 绿色线激光(无阳光直射);(b) 红外线激光(无阳光直射);(c) 绿色线激光(强光照射);(d) 红外线激光(强光照射)

Fig.4 Ore images of visible and infrared structured light under different illumination conditions. (a) Green line laser (no direct sunlight); (b) Infrared laser (no direct sunlight); (c) Green line laser (strong light); (d) Infrared laser (strong light)

由此可以看出,在复杂光照条件下利用可见结构光采集矿石图像时,矿石反射太阳光辐射对 CCD 探测系统的影响非常显著,当其强度达到一定值时,会造成 CCD 探测系统产生饱和现象。而利用红外线结构光采集矿石图像,则受阳光照射的影响很小。

1.4 系统参数标定

线结构光矿石 3D 筛选系统的参数标定主要包括

单目 CCD 相机标定和红外线结构光平面标定两个部分。单目相机标定方法已经相对成熟,文中利用张正友的单目相机标定方法^[6],先得到相机的内外参数。在此基础上,对红外线结构光平面进行标定,获取红外线结构光平面在相机坐标系下的平面方程。文中系统进行标定的主要步骤为:

- (1) 利用张正友提出的单目相机标定法得到单目

相机的内外参数;

(2) 投射结构光至不同方位的棋盘格平面上, 分别提取线结构光中心, 利用标定的相机参数将每次得到图像坐标系下的结构光直线方程转化为相机坐标系下的直线方程;

(3) 将相机坐标系下的多条线结构光直线方程拟合为平面, 得到相机坐标系下的线结构光平面方程。

2 复杂光照条件下红外线结构光中心提取方法

结构光条纹中心的快速、准确提取是实现矿石 3D 实时筛选的关键步骤之一。文中在分析红外结构光光强灰度分布的基础上, 提出一种基于邻域累积差分 (Neighborhood Cumulative Difference, NCD) 特征分析的线结构光中心快速提取方法, 并根据标定参数计算矿石的实际高度信息, 实现对矿石的 3D 实时筛选。

2.1 红外线结构光灰度分布

从光学意义上分析, 当激光投射到物体表面上形成一束结构光条纹时, 条纹横截面的理论输出强度值呈高斯分布, 在垂直于光束的截面上的光强分布公式为^[17]:

$$I(r) = I_0 \exp(-2 \cdot (r/w)^2) \quad (2)$$

式中: I_0 为光条中心光强度值; r 为光束横截面上的点离光轴 (光条中心) 的距离; w 为当光强为轴上 (光条中心) 幅值的 $1/e$ 时的半径, 称为光斑半径。图 5(a) 为理想高斯分布的结构光光束横截面灰度分布曲线。

从图像上来看, 在激光光束经探测器成像后, 光强的高斯分布表现为图像中灰度的高斯分布。当激光光线光强较大时, 由于探测器饱和效应, 在图像中表现为平顶高斯分布。

理想情况下, 线结构光光条横截面灰度分布呈高斯或高斯平顶光束形状, 高斯光束只有一个极大值点即光条横截面的中心点, 如图 5(a) 所示。高斯平顶光束呈对称分布, 对称轴位置即为高斯平顶光束横截面的中心点, 如图 5(b) 所示。将图中用圆圈标示的左右边界点之间的区域定义为激光线区域, 从左右两边界点到背景像素点之间的区域为过渡区域。

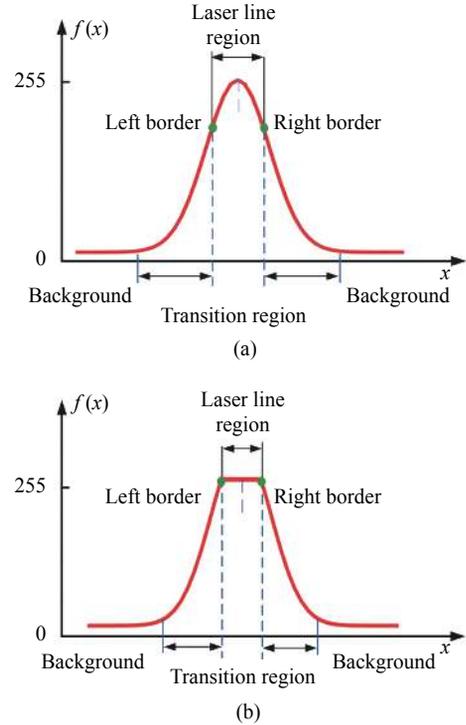


图 5 理想的线结构光横截面灰度分布。(a) 理想高斯分布; (b) 平顶高斯分布

Fig.5 Ideal gray distribution of line structured light cross section. (a) Ideal Gaussian distribution; (b) Flattened Gaussian distribution

在实际采集的可见结构光矿石图像中, 由于光照环境和矿石表面材质等因素的影响, 线结构光横截面灰度分布会受到噪声干扰, 光束横截面灰度分布曲线上会出现多个局部极值点, 平顶光束也不再表现为绝对的平顶形状, 如图 6(a) 中红色框内曲线。特别在有阳光直射的环境中, 光条截面灰度分布非常复杂、光条成像质量不高, 如图 6(c) 所示, 激光条纹像素全部湮没在背景像素中 (红色框中为激光条纹像素), 这种现象对实现结构光中心精确、稳定提取造成了很大的困难。

采集不同光照条件下的红外线结构光矿石图像的光条横截面灰度分布如图 6(b)、6(d) 所示, 在无阳光直射时, 采集的光条横截面灰度分布接近理想平顶高斯分布, 如图 6(b) 所示。在室外有强光照条件下, 采集的光条图像受外界光照环境影响很小, 光条横截面灰度分布均匀, 在各种光照环境下保持较强的稳健性和抗干扰能力。

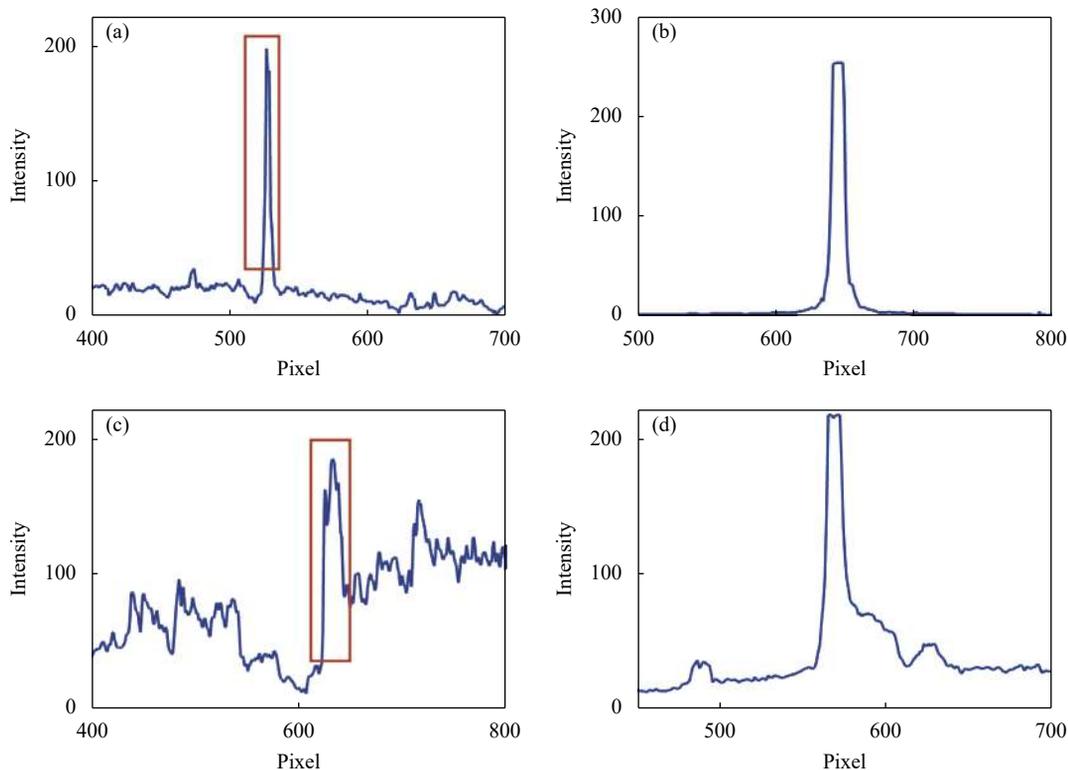


图 6 不同光照环境下可见光与红外结构横截面灰度分布。(a) 绿色线激光 (无阳光直射); (b) 红外线激光 (无阳光直射); (c) 绿色线激光 (强光照射); (d) 红外线激光 (强光照射)

Fig.6 Gray distribution of visible and infrared structure cross section under different light environment. (a) Green line laser (no direct sunlight); (b) Infrared laser (no direct sunlight); (c) Green line laser (strong light); (d) Infrared laser (strong light)

2.2 基于邻域累积差分 (NCD) 的结构光中心提取

文中投射在矿石表面的激光线条横向分布在图像中, 矿石的高低变化表现为光条的上下起伏。提取图像中线激光光条中心, 根据标定的相机参数和线激光投射角度, 则可以确定沿着光条的矿石高度值。

根据以上对结构光横截面灰度分布特性分析, 提取线结构光中心的关键在于确定结构光横截面区域的左右边界点。文中将结构光横截面两侧过渡区域的最大倾斜位置作为光条在列像素方向的两个边界, 通过在光条有效区域统计当前像素点的邻域累积差分的最值来确定两边边界的坐标, 由此计算光条的中心。具体方法如下:

(1) 设定长度为 m 的滑动条, 如图 7 所示。沿着线结构光图像的每一列从上至下滑动, 每次选取 m 个像素用于计算累积差分, 可以向后累积差分 (图 7(a)), 也可以向前累积差分 (图 7(b)), 图中 i 为行坐标, j 为列坐标。

向后邻域累积差分计算公式为:

$$s_{i,j}^d = [f(i, j) - f(i + 1, j)] + [f(i, j) - f(i + 2, j)] + \dots + [f(i, j) - f(i + m - 1, j)] = (m - 1) \times f(i, j) - \sum_{k=1}^{m-1} f(i + k, j) \quad (3)$$

向前邻域累积差分计算公式为:

$$s_{i,j}^f = [f(i, j) - f(i - 1, j)] + [f(i, j) - f(i - 2, j)] + \dots + [f(i, j) - f(i - m + 1, j)] = (m - 1) \times f(i, j) - \sum_{k=1}^{m-1} f(i - k, j) \quad (4)$$

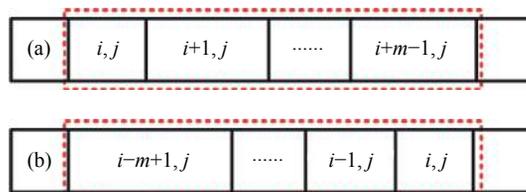


图 7 滑动差分模板示意图。(a) 向后; (b) 向前

Fig.7 Schematic diagram of sliding differential template. (a) Backward; (b) Forward

公式 (3) 和 (4) 中: $f(\cdot)$ 为各坐标像素点的灰度值; $S_{i,j}^d$ 为向后邻域累积差分; $S_{i,j}^f$ 为向前邻域累积差分。利用公式 (4) 计算得到的向前邻域累积差分曲线如图 8 中红色虚线所示。

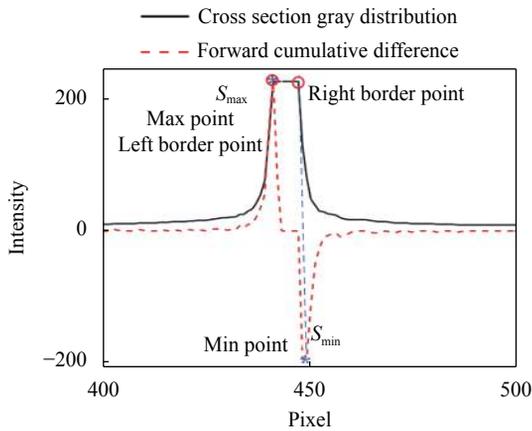


图 8 向前累积差分示意图

Fig.8 Forward cumulative difference

(2) 搜索本列中像素邻域累积差分值的全局最大值 S_{max} 和全局最小值 S_{min} , 图 8 中蓝色星号标注。

(3) 将该列像素邻域累积差分值的全局最大值 S_{max} 和全局最小值 S_{min} 对应的行坐标分别作为这一列中激光条纹的左右边界点 (图 8 中红色圆圈标注), 并对该两边界坐标点进行灰度加权运算, 得到结构光的中心点坐标:

$$C_i = (f(i_{s_{max}}, j) \cdot i_{s_{max}} + f(i_{s_{min}}, j) \cdot i_{s_{min}}) / (f(i_{s_{max}}, j) + f(i_{s_{min}}, j)) \quad (5)$$

(4) 重复上述 (1)~(3) 步骤, 计算所有列的结构光中心, 得到结构光光条中心线。

上述算法也适用于结构光分叉的情形, 对于分叉结构光, 其对应邻域累积差分曲线中会出现多对与最大值、最小值近似相等的极大值和极小值, 改变步骤 (2) 中极值搜索条件, 可提取多个极大和极小值点, 进而得到分叉结构光的中心。

通过理论分析与算法验证得到, 滑动条的长度 m 的选取范围一般在 3~7 之间, 文中取 $m=5$ 。此时算法既有较强的抗噪性, 又保证了时间的合理性; $m<3$ 则得到邻域累积差分对噪声较为敏感; $m>7$ 时计算量较大, 且处理效果相比 m 取 3~7 时无实质性提高。表 1 为 m 取不同值时, 对图 4(b) 中第 761 列处理得到的结构光中心点横坐标。

表 1 m 取不同值时的中心点横坐标 (单位: pixel)

Tab.1 Coordinates of the center point with different values of m (Unit: pixel)

Column 761	$m=3$	$m=5$	$m=7$	$m=11$
Center point coordinates	296.6066	296.6066	296.6308	296.6308

2.3 结构光中心提取结果与分析

在运行环境为 Windows 10 专业版 64 位操作系统, 处理器 Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20 GHz, 运行内存 8.00 GB, Visual Studio 2012 开发平台上, 对采集到的红外结构光矿石图像进行光条中心提取, 图像的分辨率为 1280×960。

2.3.1 算法准确性测试

为验证文中提出的线结构光中心提取算法的准确性, 利用上述已标定参数的实验装置, 对三个不同尺寸的标准矩形块高度进行了测量实验。具体步骤为:

(1) 投射单条红外线结构光至传送带及标准矩形块表面, 如图 9(a) 所示, 投射的线结构光平面在矩形

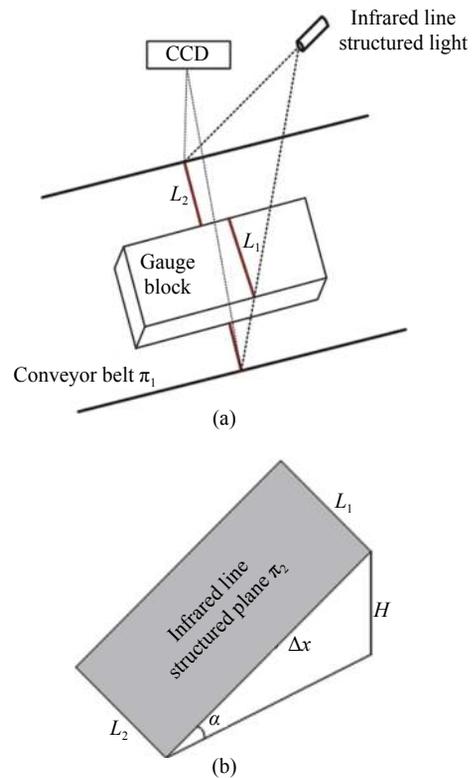


图 9 标准矩形块测量。(a) 标准矩形块投影线示意图; (b) 高度形成示意图

Fig.9 Measurement of gauge block. (a) Schematic diagram of gauge block projection line; (b) Schematic diagram of height formation

块表面和传送带上形成两条平行的直线 L_1 和 L_2 。

(2) 根据前面已标定的相机参数,可以得到两条平行线 L_1 和 L_2 在相机坐标系下的位置坐标 x_{L_1} 和 x_{L_2} ,如图 9(b) 所示。计算在线结构光平面 π_2 内,两条平行线之间的距离 Δx :

$$\Delta x = \text{abs}(x_{L_1} - x_{L_2}) \quad (6)$$

(3) 根据标准块的已知高度 H , 计算得到线结构光平面 π_2 与传送带平面 π_1 之间的夹角 α , 如下式:

$$\alpha = \arcsin \frac{H}{\Delta x} \quad (7)$$

根据上述得到的角度值 α , 用公式 (7) 来计算其它标准块的高度值。

表 2 为分别对三个标准块高度进行测量得到的结果,三个标准块的尺寸由三坐标测量仪测量得到。从表 2 可以看出,文中线结构光中心提取结果的最大偏差为 0.044 mm, 满足矿石 3D 筛选的要求,具有较高的精度和准确性。

表 2 文中方法对标准块高度的测量结果 (单位: mm)

Tab.2 Height measurement results of the gauge block with proposed method (Unit: mm)

Gauge block	Standard block size	Proposed method	Measurement errors
H_1	100.023	99.979	-0.044
H_2	70.031	69.997	-0.034
H_3	39.998	40.029	+0.031

2.3.2 算法效果比较与分析

在复杂光照条件下,采集矿石表面的一段红外线结构光图像进行测试,并将文中方法与 Gauss 拟合法、Steger 算法进行比较,从而验证文中方法的有效性,测试结果见图 10,图中红色线为提取的中心线。

从黄色方框部分可以看出, Gauss 拟合法和 Steger 方法在线结构光方向转折处提取的中心线会有较为严重的偏离现象。从图 10 各方框内截取的局部图像放大显示效果如图 11 所示,笔者方法处理结果较好。

从图 10(b) 中还可以看出,使用 Steger 方法进行结构光中心线提取时,在结构光的端点处容易出现中心线提取分叉现象,如图 12 中黄色方框内提取结果,

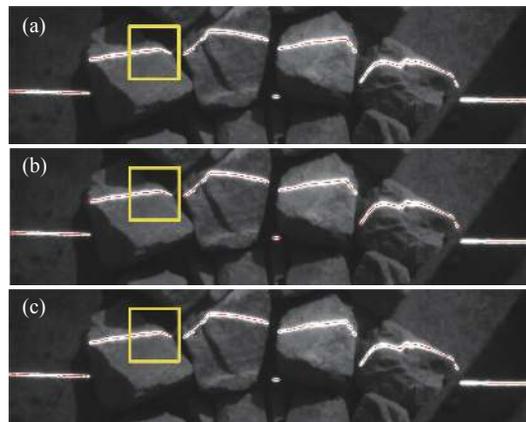


图 10 不同方法的处理结果。(a) Gauss 方法; (b) Steger 方法; (c) 文中方法

Fig.10 Extraction result of different method. (a) Gauss method; (b) Steger method; (c) Proposed method

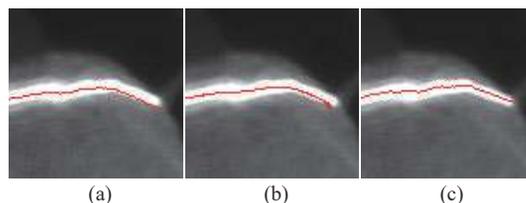


图 11 局部中心线偏离结果。(a) Gauss 方法; (b) Steger 方法; (c) 文中方法

Fig.11 Results of local center line deviation. (a) Gauss method; (b) Steger method; (c) Proposed method

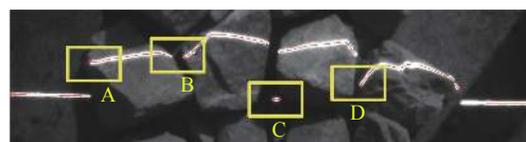


图 12 Steger 处理结果中端点处中心线分叉现象

Fig.12 Endpoint centerline bifurcation by Steger method

需要进行大量的线段分析处理。图 13 所示为截取的图 12 中四个黄色方框 A, B, C, D 的放大显示。

对上述两种方法处理结果中出现的现象,文中方法处理结果较好,未出现中心线偏离或分叉现象。

对三种方法提取的激光中心线利用二次曲线进行拟合,计算拟合的相关系数 R^2 。若相关系数越接近 1, 则说明拟合效果越好,线结构光中心线提取的稳定性越高^[10]。三种处理方法的拟合相关系数 R^2 见表 3,可以看出,文中方法的相关系数更接近 1,说明文中方法对线结构光形态及方向变化有较强适应性。

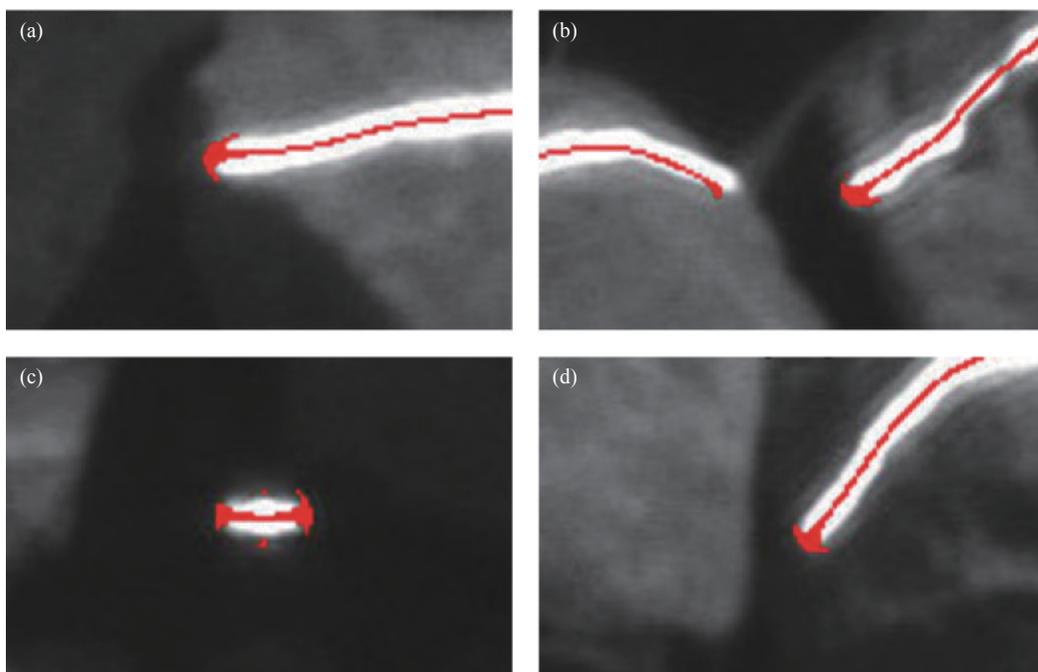


图 13 图 12 中黄色方框内的放大结果。(a) 方框 A; (b) 方框 B; (c) 方框 C; (d) 方框 D
 Fig.13 Enlarged result in the yellow box in Fig.12. (a) Box A; (b) Box B; (c) Box C; (d) Box D

表 3 离线结构光中心线提取结果比较

Tab.3 Comparison of off-line structured light centerline extraction results

Method/result	R^2	Off-line time/ms
Gauss fitting	0.9560	20.8
Steger	0.9526	28.6
Proposed	0.9658	4.9

2.3.3 算法运行时间比较与分析

在算法运行时间上,文中提出的结构光条纹中心提取方法中主要运算是加减法,数量级为 $O(n)$,运算速度很快,与 Gauss 拟合法和 Steger 算法主要采用乘除法运算(数量级为 $O(n^2)$ 或 $O(n^3)$)不同,因此文中提出的处理方法在速度上远远超过另两种方法。

对 10000 幅分辨率为 1280×960 的红外结构光矿石图像,运用文中提出的算法进行处理,平均每幅图像耗时为 4.9 ms;运用 Gauss 拟合法进行处理,平均每幅图像耗时为 20.8 ms;运用 Steger 方法进行处理的时间最长,需要 28.6 ms。具体时间数据见表 3。通过比较分析可知,文中提出算法耗时最少,在单位时间内处理的图像帧数更多,处理速度为现有方法的 5~7 倍,能够满足矿石实时 3D 筛选的需求。

3 矿石 3D 实时筛选实验结果与分析

文中实验所用的结构光图像采集系统包括 Nano Line Laser 一字线红外激光器,波长为 810 nm,输出功率 100 mW。CCD 相机型号为 TELEDYNE DALSA,技术参数为:单帧图像采集时间为 13.2 ms,图像分辨率为 1280×960 ,红外带通滤光片波长为 810 nm。传送带矿石表面的视场宽为 1.5 m。

该系统对每幅矿石结构光图像进行 3D 视觉测量及筛选处理时,采用多线程并行处理的方式。线程 1 采集图像,所用时间为 13.2 ms,线程 2 提取结构光中心线(4.9 ms)并计算矿石 3D 参数(0.9 ms),所用总处理时间为 5.8 ms。由于线程 1 时间大于线程 2 时间,因此两个线程的并行处理方式为:图像采集线程 1 任务完成后,发送消息线程 2 进行处理,同时线程 1 继续采集下一幅图像,线程 2 处理完后等待线程 1 的信号指令。最终筛选一幅图像的时间为 13.2 ms。

将红外激光器安装在传送带上方,以一定角度投射光线至传送带上的矿石表面,相机视场垂直向下,安装在矿石表面激光线区域的正上方。在传送带运行过程中,相机连续采集矿石表面红外结构光图像。根据标定的基线和获取的结构光中心线,累积计算矿

石高度和截面面积,实时获取矿石 3D 坐标数据并根据设定阈值进行筛选。

实际条件下传送带运行速度在 1~2 m/s,具体值可控制设置,需要筛选的矿石尺寸一般在 500 mm 以上。相机帧率为 76 帧/s,若传送带的运动速度为 1 m/s (1000 mm/s),则沿传送带运动方向上的筛选精度为 $1000/76=13.2$ mm,满足矿石筛选的精度要求。

当传送带的运行速度设定为最大值 2 m/s 时,可考虑更换分辨率不变、采集速度更快的 CCD 相机,若筛选时间达到 5.8 ms,则精度可达 11.6 mm。

图 14 所示为连续采集并实时处理的矿石结构光提取的 3D 数据显示,红色圈内为根据标定及设置限定阈值筛选的结果。

将文中提出的方法与人工视觉及基于图像的矿石筛选方法在多方面综合比较,结果如表 4 所示。可

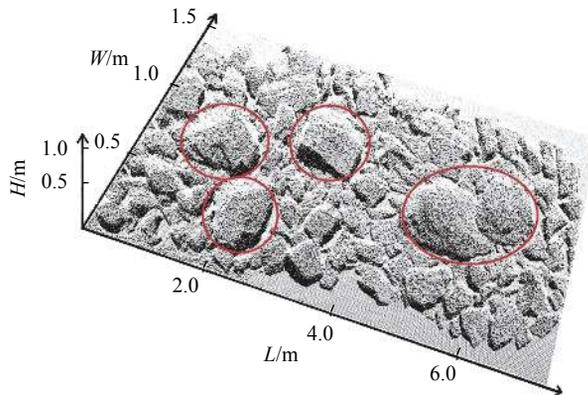


图 14 矿石 3D 点云显示与筛选结果

Fig.14 3D point cloud display and screening results of ore

以看出,与人工视觉和 2D 图像筛选法相比,文中方法具有更强的光照环境适应能力,处理速度更快,自动化程度更高,安全性更有保障。在应用上更能满足实际工业生产的需要。

表 4 矿石实时筛选方法综合对比

Tab.4 Comprehensive comparison of online ore screening methods

Screening method	Infrared structured light 3D vision	Artificial vision	2D image processing ^[2-3]
Light environment	Complex lighting	Distinguish and clearly	Moderate light
Screening efficiency	1-2 m/s	Inefficiency	About 0.4 m/s
Accuracy	High	Low	Instable
Automation degree	100%	Artificial	Semi-automatic
Security	Security	Unsafe	Security

4 结论

针对多种光照条件下的矿石实时 3D 筛选困难的问题,提出了一种基于红外线结构光的复杂光照条件下矿石实时 3D 视觉筛选方法,采集的红外结构光在各种光照条件下图像能保持清晰、稳定。在线结构光中心线提取方法上,提出了邻域累积差分的结构光中心快速提取方法。经过大量实验测试表明,文中方法在速度上远远超过传统的结构光中心提取方法,且不会出现其它方法结果中分叉、中心线偏移等现象,能满足多种光照条件下矿石实时 3D 筛选的需求。

参考文献:

[1] Chen Haijian. Application research on automatic detection and in mineral separation process [J]. *Colliery Mechanical & Electrical Technology*, 2018(6): 55-59. (in Chinese)

[2] Ma Lianming, Ji Jiangang, Du Bo, et al. Comparison and study on measurement of ore particle size based on machine vision [J]. *Mining & Processing Equipment*, 2017, 45(10): 53-59.

[3] Christie G, Kochersberger K, Abbott A L. Fast inspection for size-based analysis in aggregate processing [J]. *Machine Vision & Applications*, 2015, 26(1): 31-40.

[4] Liu Wei, Zhang Yang, Gao Peng, et al. Sub-pixel center extraction method of laser stripe center based on hierarchical processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1017010. (in Chinese)

[5] Wang Shenchun, Han Qiang, Wang Hao, et al. Laser stripe center extraction method of rail profile in train-running environment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0212004. (in Chinese)

[6] Cheng Xin, Ling He, Li Shuo. Light bar center extraction algorithm for automotive weld sealant strips [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(5): 823-828. (in Chinese)

- [7] Usamentiaga R, Molleda J, Garcia D F. Fast and robust laser stripe extraction for 3D reconstruction in industrial environments [J]. *Machine Vision and Applications*, 2012, 23(1): 179-196.
- [8] Thurley M J. Automated online measurement of limestone particle size distributions using 3D range data [J]. *Journal of Process Control*, 2011, 21(2): 254-262.
- [9] Song Xiaofeng, Li Jupeng, Chen Houjin, et al. Laser centerline extraction method for 3D measurement of structured light in multi-scenarios [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0113004. (in Chinese)
- [10] Gan Hong, Zhang Chao, Li Lin, et al. Sub-pixel extraction of laser stripe in complex background [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(2): 180457. (in Chinese)
- [11] Gao Shiyi, Yang Kaizhen. Research on central position of laser stripe based on varied-boundary Gaussian fitting [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(5): 1132-1137. (in Chinese)
- [12] Li Taotao, Yang Feng, Li Shigeng, et al. Extraction method of line structured light stripe center based on Gauss-Lorenz decomposition peak fitting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 071201. (in Chinese)
- [13] Li Weiming, Peng Guo, Gao Xingyu, et al. Fast extraction algorithm for line laser stripe center [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2020, 47(3): 0304002. (in Chinese)
- [14] Zeng Kai, Liu Hefei, He Xi, et al. Line structured light center extraction based on improved Steger algorithm [J]. *Journal of Hebei United University Natural Science Edition*, 2021, 43(1): 101-107. (in Chinese)
- [15] Wang Yufei, Li Qiang, Liao Sheng. Simulation of environment infrared radiation reflected by target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2085-2090. (in Chinese)
- [16] Yu Longlong, Li Yanwen, Luan Yingbao, et al. Line structured light calibrating based on two-dimensional planar target [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(6): 124-131. (in Chinese)
- [17] Ye Dahua. Analysis of characteristics of Gaussian beam and its application [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(1): 142-146. (in Chinese)