

文章编号: 0253-2239(2010)08-2329-04

基于候选深度信息的水泥熟料三维重建方法

刘浩然¹ 徐刚¹ 张文明²

(¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004; ²燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 提出了一种用于水泥熟料的在线厚度检测的基于候选深度的三维重建方法。采用一字线激光器从正上方向水泥熟料层投射激光线,使用双目摄像机从斜上方获取图像并进行二值化处理。在世界坐标系范围中光条所在的垂直面上建立深度候选点,通过确定候选点在视差图像上对应点直线与光条相交的交点,实现被测物体表面的精确测量。实验证明本方法具有较高的测量精度和计算速度,能够满足运输中水泥熟料在线三维重建的要求。

关键词 机器视觉;三维测量;深度候选点;结构光

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2329

A Three-Dimensional Reconstruction Method of Cement Clinkers Based on Depth Candidates

Liu Haoran¹ Xu Gang¹ Zhang Wenming²

(¹Information Science and Engineering College, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)
(²Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract A three-dimensional (3D) reconstruction measurement method based on depth candidates is proposed for online measurement of cement clinkers thickness. A line laser is projected from the top and stereo cameras are used to acquire images of clinker surface. Establishing the depth candidates on vertical plane in which the laser stripes locate in the world coordinate system, the depth is recovered according to intersection of the corresponding line on parallax image of the candidates and the laser stripe in the images. The experiment proves the validity, accuracy of the method and computing speed, and it can be applied to online 3D reconstruction of cement clinkers during transport.

Key words machine vision; three-dimensional measurement; depth candidate; structured light

1 引言

水泥熟料的冷却是水泥生产过程中非常重要的一个环节,在篦冷机中通过篦板的翻动将熟料向前输送,冷却风由下向上将熟料进行冷却。篦冷机熟料厚度信息与冷却过程中空气压降有着密切的关系,是描述熟料冷却过程的重要参数之一。随着水泥单线规模的不断扩大,篦冷机内熟料离析现象引起的熟料厚度波动越来越明显,现有方法通过篦下风室压力与推动棒主轴电机电流来估计熟料厚度,获得的厚度信息误差随着熟料厚度波动而变大,已经不能适应现代篦冷机熟料控制模型建立的要求。因此,准确的熟料层三维重建方法成为亟待解决的

问题,它对于提高冷却效率、热回收效率以及节能减排都有着重要的意义^[1]。

鉴于篦冷机内恶劣的工作环境,光学测量技术以其非接触、结构简单、低成本和高精度等特征,适用于高温熟料测量的技术手段。本文在前期研究工作基础上,提出一种基于候选深度信息的主动视觉三维测量方法^[2,3]。向熟料层投射一条激光束,并在熟料所在的世界坐标系中建立代表候选深度信息的三维节点,将此候选点映射到两台摄像机的图像坐标系并提取出像点中激光束所在像素坐标,而其所对应的候选点三维坐标即为待测深度。该方法算法简单,能够在复杂的工作环境中快速准确地测得

收稿日期: 2009-10-16; 收到修改稿日期: 2009-11-10

基金项目: 河北省科技攻关项目(07212120D),河北省教育厅基金(2006327)资助课题。

作者简介: 刘浩然(1980—),男,博士,讲师,主要从事机器视觉,无线传感器网络等方面的研究。E-mail: xg@ysu.edu.cn

熟料表面轮廓。

2 三维测量的原理

双目立体视觉系统采用对称的相交光轴设计,两台摄像机相距一定距离,向斜下方获取同一位置的图像。一字线激光器从正上方垂直向下投射一条激光线,作为辅助三维测量的结构光。由于水泥熟料刚进入篦冷机时温度高达 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且呈红色,通常在结构光三维测量中常用的 650 nm 红激光在高温状态下的熟料表面不易分辨。为了确保激光线在料层表面清晰可见易于提取,选用波长 532 nm 的绿激光发射器,三维测量系统的结构如图 1 所示。

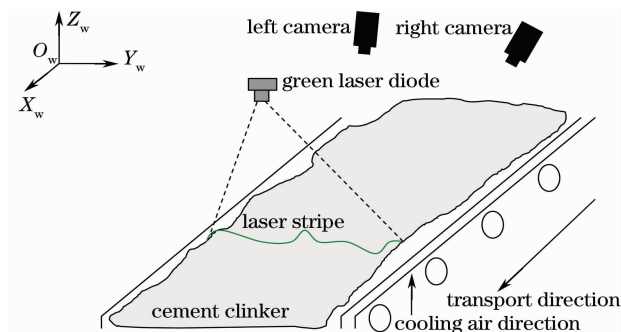


图 1 三维测量系统安装示意图

Fig. 1 Schematic of the 3D measurement system

由于经过篦冷机的熟料厚度范围已知,且激光条投射位置可控,在熟料所在的世界坐标系内建立代表深度信息的候选点。世界坐标系中与水平面垂直的方向为 Z_w 轴方向,水泥熟料输送方向为 X_w 轴方向。深度候选点建立在垂直于水平面且经过激光投影曲线的平面上,将 X_w, Y_w 轴方向确定、沿 Z_w 轴方向顺序变化的一组节点作为深度测量的候选点,每组候选深度测量是独立的过程。候选深度范围设定为可能传输熟料的最大厚度,候选点间距需要根据摄像机参数进行计算得到。每组候选点在 Y_w 轴方向的间距决定了三维重建的密度,相同测量宽度的前提下,测量点越多,重建后的三维模型越细致,但计算量也会相应增大^[4,5]。

如图 2 所示,由于摄像机相对于熟料运送的水

平面成 45° 安置,因此每一组深度候选点映射在图像坐标系中都是沿一条斜线分布。以其中一组候选点为例,设与熟料高度最接近的候选点为 $B(X_w, Y_w, Z_{w2})$,其近邻候选点分别为 $A(X_w, Y_w, Z_{w1})$ 和 $C(X_w, Y_w, Z_{w3})$ 。通过坐标变换将这三点从世界坐标系映射到图像坐标系,在左右图像中分别为 A'_l, B'_l, C'_l 和 A'_r, B'_r, C'_r 。从图像中提取出激光条,并选取激光所在曲线与对应像点连线的交点分别为和。由测量原理可知,如果左右图像中这两个交点均来自同一个深度候选点,那么就可以判定该候选点的 Z_w 轴方向坐标 Z_{w2} 即为本组待测深度。

将 Y_w 轴方向上所有候选深度计算完毕,就得到熟料在该切面上的表面厚度信息,随着熟料向前推进,每隔一段时间再取一组新的图像,并计算当前切面的熟料厚度。将得到的点云数据进行实时曲面拟合,即可完成水泥熟料轮廓的三维重建^[6]。

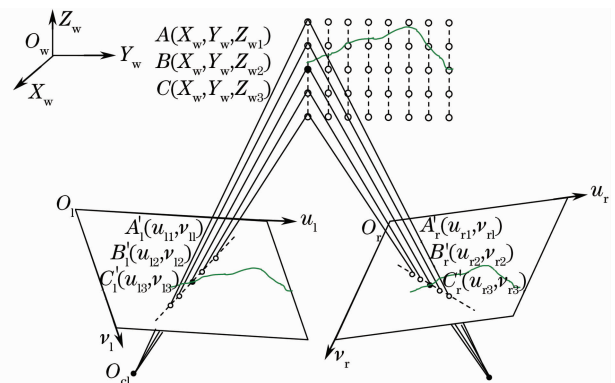


图 2 候选点映射在图像坐标系中的映射位置

Fig. 2 Correspondences projected from the depth candidates

3 光条中心提取和激光束位置校正

采用梯度锐化和重心法相结合的方法提取光条中心。所有基于梯度的边缘检测器之间的区别在于算子应用的方向,以及在这些方向上逼近图像一维导数的方式和将这些近似值合成为梯度幅值的方式。对于离散的数字图像,可以将图像的一阶差分直接替代图像的偏导数,梯度的幅值为

$$G[f(x, y)] = \sqrt{[f(x, y) - f(x + 1, y)]^2 + [f(x, y) - f(x, y + 1)]^2}. \quad (1)$$

梯度锐化采用梯度值 $G[f(x, y)]$ 来表示图像,即令 $g(x, y) = G[f(x, y)]$ 。在图像中光强变化缓慢的地方梯度值较小,对应的图像较暗,而在激光条纹的轮廓处,光强变化快,梯度值较大,对应图像较

亮。图像经过梯度锐化后,熟料形成的纹理由于灰度变化缓慢得到的图像很暗,而激光条纹边缘光强变化很快,形成很亮的边缘。然后利用阈值变换就可以将激光条纹的边缘准确提取出来,进而利用激

光条纹的边缘得到光条的近似中心线,利用重心法求取光条的准确中心线^[7,8]。

激光条纹提取之后,要想得到准确的深度测量信息,必须保证激光线在水平面的垂面与深度候选点组成的平面重合,因此激光束的投射位置校正是确保测量精度的重要步骤^[9,10]。由测量原理可知,如果世界坐标系中每一组候选点所在直线都与熟料表面的激光曲线相交,那么在左右摄像机图像中对应像点与激光条纹的交点也必然来自同一个深度候选点;反之,则来自于不同的深度候选点。

通过切面左右两端的两组候选点可以用来校正投影激光束的位置,从图像中提取激光条纹后,将其与经过候选像点直线的交点标记为校正像点。如果校正像点不是同一个候选点的对应点对,则将激光束沿 Y_w 轴向前或向后调整,直到连续 5 帧图像都不存在误差,则表明激光束位置校正完成。只要将两端的这两组候选点用于校正激光束,就能满足测量需求。

4 实验分析

在唐山某水泥生产线内应用本方法进行实验,对篦冷机内熟料表面进行三维重建。在熟料层上方安装一字线绿激光器向正下方投射波长为 532 nm 的激光线,并通过两台 CCD 摄像机从斜上方 45° 方向获取激光条纹所在位置的料层图像。在测量前需要对摄像机进行标定,并在熟料所在的世界坐标系中建立深度候选点。将篦板所在水平面设为 $Z_w = 0$, 根据现场经验将料层候选深度范围设定在 0~1500 mm 范围。候选点间距需要根据标定后的摄像机参数确定,

理论上每组候选点在图像坐标系中坐标位置两两相邻为最佳,本实验中设定为 5 mm。图 3 为篦冷机内的水泥熟料的照片。



图 3 篦冷机内的水泥熟料

Fig. 3 Cement clinker in the grate cooler

熟料在篦冷机内传送速度大约为 0.02 m/s,测量系统每隔 0.5 s 采样一次。由于熟料输送速度较慢,在传输过程中熟料通常不会发生形态的剧烈变化。每次计算切向深度候选点 50 组,随着熟料不断推进,将测量得到的点云进行曲面拟合,重建出熟料层的曲面。有些候选点在测量时由于摄像机角度不同而产生遮挡,会导致该组候选深度测量失败,但测量失败的比例小于 5%,因此不会对整体重建效果产生影响。在激光束位置校正后,测量算法主要的计算量在于光条中心的提取,由于熟料输送速度较慢,因此完全可以满足在线测量的速度要求。经过本方法测得一定长度水泥熟料的三维重建结果如图 4 所示,其厚度测量误差为 -5~8 mm,验证了算法的有效性并达到测量精度需求。分析可知,测量误差主要来自篦冷机内粉尘等带来的噪声,为了长期在恶劣环境中保证系统的可用性,需要在摄像机镜头处安装吹扫装置以避免镜头上附着粉尘。

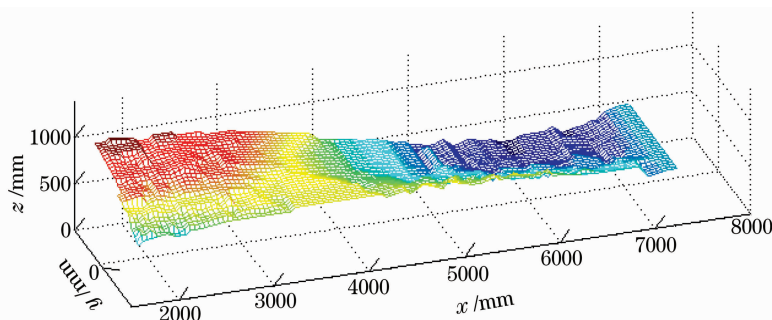


图 4 熟料表面三维重建图

Fig. 4 3D reconstruction of the cement clinker

5 结 论

在网格候选点三维测量方法的基础上,提出了一种基于候选深度信息的三维测量方法用于水泥熟

料的三维重建。使用线激光器向熟料层表面投射激光条纹,并通过两台摄像机从不同角度获取料层图像,经过光条提取后得到二值图像。在世界坐标系

建立深度候选点,在激光束位置校正后,通过候选点映射像点与光条交点确定待测熟料深度,并用重建出料层表面轮廓。本方法具有结构简单、计算代价小、测量精度高等优点,在水泥熟料厚度在线检测应用中取得了理想的效果。

参 考 文 献

- 1 Zhang Wenming, Liu Bin, Li Haibin. Study on three dimensional mesh generation algorithm of cement clinker[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2008, **27**(2): 360~364
张文明, 刘 彬, 李海滨. 水泥熟料的三维网格划分算法的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2008, **27**(2): 360~364
- 2 Xu Gang, Zhang Wenming, Lou Fengwei *et al.*. A new 3D reconstruction method based on gray similarity of the projecting grid points[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2175~2180
徐 刚, 张文明, 娄凤伟 等. 基于网格点投影灰度相似性的三维重建新方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2175~2180
- 3 Xu Gang, Zhang Wenming, Li Haibin *et al.*. A binocular stereo vision method based on wavelet multi-resolution mesh generation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1021~1024
徐 刚, 张文明, 李海滨 等. 基于小波多分辨率网格划分的双目立体视觉方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1021~1024
- 4 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 5 Ma Lili, Xu Tianmin, Lin Jiuxiang. Validation of a three-dimensional facial scanning system based on structured light techniques [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2009, **94**(3): 290~298
- 6 M. J. Tsai, C. C. Hung. Development of a high-precision surface metrology system using structured light projection[J]. *Measurement*, 2005, **38**(3): 236~247
- 7 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
- 8 Wu Haibin, Yu Xiaoyang, Guan Congrong. Structured light encoding stripe edge detection based on grey curve intersecting point[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1085~1090
吴海滨, 于晓洋, 关丛荣. 基于灰度曲线交点的结构光编码条纹边缘检测[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1085~1090
- 9 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
- 10 Wu Di, Lü Naiguang, Ouyang Jing. A structured light three-dimensional measurement method based on unconstrained system configuration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 482~486
吴 迪, 吕乃光, 欧阳京. 基于无约束系统的结构光三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 482~486