

文章编号 1004-924X(2010)02-0491-05

# 篦冷机熟料的立体视觉在线测量

刘浩然<sup>1</sup>, 徐刚<sup>1</sup>, 张文明<sup>2</sup>

(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:** 实现篦冷机内部冷却风的合理分配, 需要实时获得水泥熟料的厚度信息。针对篦冷机内温度高, 难以实时测量的问题, 提出了基于网格候选点的立体视觉在线测量方法。用相交光轴的两台摄像机组成双目立体视觉系统获取料层图像, 在世界坐标系内建立代表深度信息的网格候选点用于深度测量。利用小波多分辨率算法快速筛选候选点, 满足传送中熟料在线测量的实时性需求。引入了可信系数的概念, 对容易出现歧义的少数候选点根据直方图分布判断该窗口内图像是否包含丰富的纹理信息, 选择较大或较小的匹配窗口用于二次匹配, 减少了匹配歧义带来的测量误差。实验结果表明, 测量系统的均方根误差为 4.29 mm, 能够满足实时厚度测量的精度要求。提出的方法测量精度高、计算速度快, 能够稳定用于篦冷机内熟料厚度的在线测量。

**关键词:** 机器视觉; 三维测量; 深度候选点; 水泥熟料

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A

## Stereo-vision-based online 3D measurement of cement clinker in grate cooler

LIU Hao-ran<sup>1</sup>, XU Gang<sup>1</sup>, ZHANG Wen-ming<sup>2</sup>

(1. *Information Science and Engineering College, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;*

2. *Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

**Abstract:** It is necessary to obtain the depth information of a cement clinker for distributing the cooling air in a grate cooler reasonably. Considering the high-temperature in the grate cooler, a mesh-candidate-based online 3D measurement method was proposed to reconstruct the the cement clinker. A binocular stereo system composed of two cameras with the optical axes intersected was used to capture the images of the cement clinker and a wavelet multi-resolution algorithm was adopted to improve the efficiency of the measurement system. If the confidence coefficient value is lower, a few candidates should be rematched using a larger or smaller windows according to the histogram, by which the measurement error caused by ambiguity could be reduced. Experiments indicate that the root-mean-square error of the system is 4.29 mm, which meets the requirement of the measurement precision. The measurement method shows its advantages in simplified implementation, high accuracy and low costs, and it can be stably applied to the production line of the grate cooler.

**Key words:** machine vision; 3D measurement; depth candidate; cement clinker

收稿日期: 2009-10-21; 修订日期: 2009-11-20.

基金项目: 河北省科技攻关项目 (No. 07212120D); 河北省教育厅基金资助项目 (No. 2006327)

## 1 引言

水泥熟料的冷却是水泥生产过程中一个非常重要的环节,料层厚度与熟料温度、篦下压力、风量和窑头负压有着密切的联系。作为控制系统的一个重要参数,当系统检测到熟料层厚度变化后,控制系统能够快速对此判断以调节篦床料层的厚度,保证熟料温度、篦下压力、风量以及窑头负压处于稳定工作状态。因此对熟料厚度测量技术的研究在提高控制系统性能的同时,还提高了水泥生产的质量。

由于篦冷机内工作环境恶劣,现在的水泥生产领域中尚无直接测量熟料层厚度的方法,而是通过间接测量风室的风压和推动棒主轴电机的电流来估计料层的厚度,并加以控制。由于料层的厚度和风室的风压以及主轴电机的电流没有明确的函数关系,因此采用这两个参量对料层厚度进行控制很难保证精度。随着水泥单线规模的不断扩大,准确的熟料层三维测量方法成为亟待解决的问题,这对于提高冷却效率、热回收效率以及节能减排都有着重要的意义<sup>[1]</sup>。

立体视觉测量技术是近年来光学三维测量技术的研究热点。它的基本原理是从两个(或多个)视点观察同一景物,以获取在不同视角下的感知图像,然后通过三角测量原理计算图像像素间的位置偏差(即视差)来获取景物的三维信息,这一过程与人类视觉的立体感知过程是类似的。由于其非接触、低成本、分辨率高和数据获取速度快等优点,已经广泛应用于工业检测、物体识别、工件定位等诸多领域<sup>[2-3]</sup>。本文提出一种基于网格候选点的立体视觉测量方法。该方法在世界坐标系中建立表征料层深度信息的网格节点,根据候选深度节点在图像中对应像点的匹配得到被测物体深度,避免了特征提取和三维坐标重建所带来的计算量。同时,针对重复纹理信息给立体匹配带来的歧义问题,采用可变窗函数的匹配算法减小测量误差。

## 2 测量原理

通过摄像装置的标定,确定世界坐标系到图像坐标系的映射关系<sup>[4-5]</sup>,并依此建立成像模型。

根据先验知识可以确定被测物体曲面所在的世界坐标系范围。通过限定有效的被测区域范围有助于减少计算量,提高计算效率。网格节点之间距离间隔的选取取决于摄像机的内部参数,如果该距离过大,则不能保证某一深度的网格节点与物面重合,导致计算错误;如果该距离太小,则会大大增加系统的计算量,同时过多的候选点也无助于重建精度的提高<sup>[6]</sup>。

三维重建目的是要恢复被测物体在三维空间中的深度信息,那么可以将世界坐标系中  $Z_w$  轴方向作为三维空间中垂直于水平面的深度。把  $X_w$  轴、 $Y_w$  轴坐标确定而  $Z_w$  轴坐标值顺序变化的网格节点作为一组候选点,通过投影在左右图像的灰度相似性测度判断哪一个节点代表了物体在空间中的深度信息。整个三维重建的过程可以看作是对  $X_w O_w Y_w$  平面上的  $m \times n$  个节点分别计算深度,确定在  $Z_w$  轴方向上  $l$  个网格候选点中哪一点与真正的物面重合。图 1 给出了空间中三维网格的其中一部分,将每一组网格节点分别映射到两台摄像机的图像坐标系用于对应点匹配。

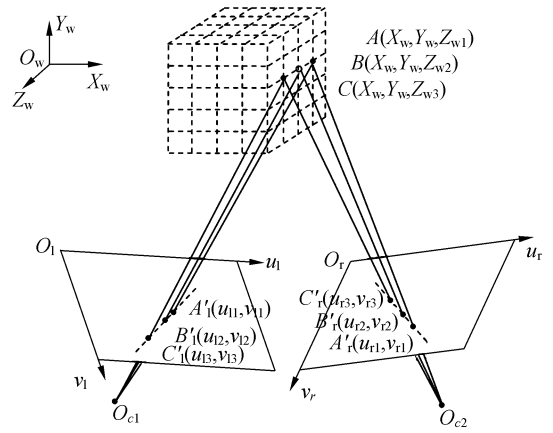


图 1 不同深度的网格节点在像面上的映射关系

Fig. 1 Projection of points with variable depth candidates in world coordinate system

## 3 小波多分辨率快速算法

小波变换是一种时间窗和频率窗都可改变的时频局域化分析方法,即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。正是因为这种多分辨率特性,使得小波变换能有效地从图像中提取出信息,实现对图像的自适应分析。

多分辨率分析对图像信号具有连续逼近的能

力,因此通过小波函数来构造多分辨率网格节点,可以由粗到精地实现候选点的逐级筛选。二维小波分解在每一个尺度上都将上一尺度的低频平滑图像分解为新的低频平滑图像和高频细节图像,而低频平滑图像集中了原始图像的大部分能量,反映了图像的绝大部分信息,因此可以利用这些不同尺度上的低频图像进行三维候选点的逐级筛选<sup>[7]</sup>。

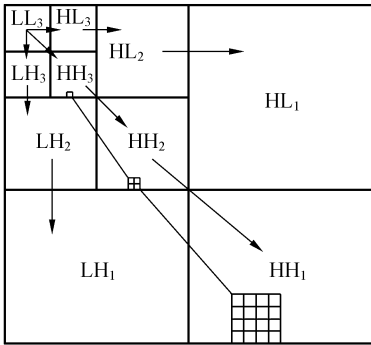


图 2 3 级小波分解结构图

Fig. 2 Diagram of 3-scale wavelet decomposition structure

小波函数把原始图像分解成分辨率由低到高的子图集,而随着图像的每一级小波分解,图像尺寸变为原图的四分之一,空间网格节点数量随之调整为原来的四分之一,同时节点间距也相应的调整为原来的 2 倍,这样就保证了网格节点与小波分解图像的逐级对应关系。小波分解结构示意图如图 2 所示。这种由粗到精的算法既提高了计算速度,同时也避免了过多候选点对测量准确性带来的干扰。根据相似性测度对候选点逐层筛选直至回到原始分辨率,最终实现深度信息的测量。

## 4 匹配窗口尺寸

相似性测度函数对于候选点匹配算法结果的影响很大,本文选用如下所示的改进标准互相关函数(Modified Normalized Cross Correlation)<sup>[8]</sup>用于对应点匹配:

$$\text{MNCC} = \frac{2 \left[ N \sum I_L I_R - \left( \sum I_L \right) \left( \sum I_R \right) \right]}{\left( N \sum I_L^2 - \left( \sum I_L \right)^2 \right) + \left( N \sum I_R^2 - \left( \sum I_R \right)^2 \right)}, \quad (1)$$

其中, $N$  为区域匹配选择的默认窗口大小。通过对匹配歧义产生的区域进行分析可知,匹配窗口的选择也很重要,窗口选择的好坏会严重影响匹配质量。对于低纹理区域应该采用较大的窗口,以保障其能够包含更多的灰度变化;对于纹理丰富区域应该采用小窗口,这样可以尽量避免投影畸变带来的影响,还能够产生更多的视差细节。

基于以上考虑,本文在默认窗口尺寸用于匹配的基础上,另外设计了较大和较小的窗口用于二次匹配消除匹配歧义。为了判断本组候选点测量中是否存在潜在的匹配歧义,这里引入可信系数  $\gamma$  (Confidence Coefficient) 的概念来描述此次匹配的可靠性<sup>[9]</sup>。

$$\gamma = \frac{|E_{\max 1} - E_{\max 2}|}{E_{\max 1}}, \quad (2)$$

公式(2)中, $E_{\max 1}$  和  $E_{\max 2}$  为相关值曲线中最高的两个峰值。如果相关值曲线表现为单峰, $\gamma$  值相对较大,则表明这组候选点的匹配不存在歧义;如果曲线表现为多峰且峰值相差不大,则值相对较小,那么需要对计算得到的相关值进行顺序排序,选取相关值较大的一部分候选点重新用于匹配运算。

灰度直方图在一定程度上可以描述图像纹理是否丰富,如果纹理较为丰富,通常直方图分布均匀;如果纹理单一,直方图上的值则收缩在某一段很窄的区域内<sup>[10]</sup>。通过直方图的分布判断对应点窗口内纹理是否丰富,选择较大或较小的窗口重新计算其相关值,有助于消除匹配歧义带来的测量误差。

## 5 实验分析

在唐山某水泥生产线内应用本文方法进行实验,对篦冷机内熟料表面进行三维重建。使用两台 CCD 摄像机组成相交光轴的双目立体视觉系统,获取料层表面的图像,如图 3 所示。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代表深度信息的网格候选点。根据现场经验将料层候选深度范围设定在 0~1 500 mm 范围。每组候选点的间距理论上应使其在图像坐标系中坐标位置两两相邻为最佳,通常我们根据

标定后的摄像机参数将间距设定为  $2/(s_x + s_y)$ , 其中,  $s_x$  和  $s_y$  代表图像平面上沿  $x$  轴、 $y$  轴方向单位距离上的像素点数,  $s = s_x/s_y$  称为尺度因子<sup>[6]</sup>。本实验中候选点间距设定为 5 mm。

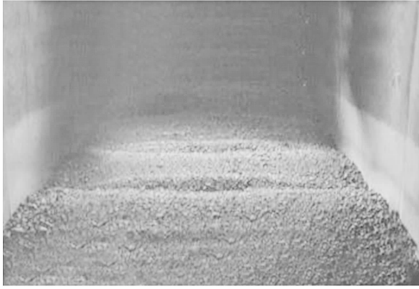


图 3 篅冷机内的水泥熟料

Fig. 3 Cement clinker in grate cooler

熟料在篅冷机内传送速度较慢,测量系统每隔 2 s 采样一次,完全可以满足在线测量的速度要求。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,如图 4 所示。将可信系数的阈值设定为 0.3,如果每组候选点可信系数  $< 0.3$ ,则取其中相关值较大的 10% 候选点用于二次匹配。默认匹配窗口大小为 20,用于二次匹配的窗口大小为 10 或 30。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,其厚度测量最大误差 18.7 mm, RMS 误差为 4.29 mm。由于篅冷机内部粉尘杂质较多,会对测量有一定干扰,但 10 mm 以内的测量误差已经能够满足系统需求,某些匹配歧义引起的较大测量误差作为孤立点可以忽略掉,并不会对后续工作中依据熟料厚度建立的冷却风控制模型产生影响。

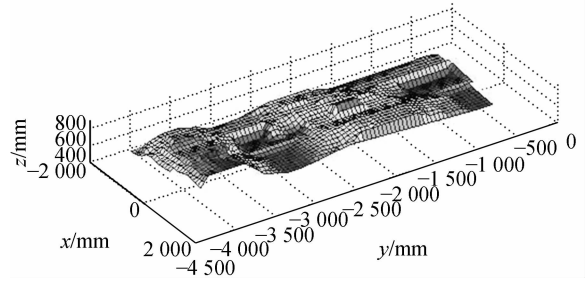


图 4 熟料表面重建图

Fig. 4 Three dimensional reconstruction of cement clinker

## 6 结 论

针对篅冷机内工作温度高,不易实现实时测量的问题,提出使用非接触光学测量技术代替传统的测量方法来实现水泥熟料的厚度测量。将基于网格候选点的三维测量方法用于水泥熟料厚度在线测量,并将实时测量结果进行曲面拟合实现熟料的三维重建。应用小波多分辨率快速算法实现候选点由粗到精地筛选,同时,将可信系数较低的少数候选点根据直方图分布选择较大或较小的匹配窗口用于二次匹配,从而有效减少了匹配歧义带来的测量误差。

本算法应用在篅冷机水泥熟料在线厚度检测中取得了理想的效果, RMS 误差控制在 5 mm 以内,满足了测量精度的需求。测量系统具有算法简单,计算代价小,测量精度高等优点。熟料层厚度信息的实时采集,保证了水泥生产过程中冷却风的合理分配,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。

## 参考文献:

- [1] 李海滨, 郝晓辰, 刘彬, 等. 基于模糊神经网络的篅式冷却机熟料流动建模[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8):171-173.  
LI H B, HAO X CH, LIU B, *et al.*. Modelling for clinker flow of the grate cooler based on fuzzy neural networks[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(8):171-173. (in Chinese)
- [2] 张春森. 三维运动分析中的运动-立体双匹配约束[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6):945-950.

- ZHANG CH S. Motion-stereo double matching restriction in 3D movement analysis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):945-950. (in Chinese)
- [3] 福赛思, 庞斯. 计算机视觉一种现代方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.  
FORSYTH D A, PONCE J. *Computer Vision: A Modern Approach* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese)
- [4] 朱效明, 高雅允. 双 CCD 立体视觉系统的理论研究[J]. 光学技术, 2003, 29(3):298-300.  
ZHU X M, GAO ZH Y. Theoretic research on

- double-CCD stereoscopic system[J]. *Optical Technique*, 2003,29(3):298-300. (in Chinese)
- [5] 陈刚, 陈华, 车仁生. 空间点的立体视觉传感器标定方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9): 1439-1444.  
CHEN G, CHEN H, CHE R SH. Calibration method for stereo vision sensor based on spatial points[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1439-1444. (in Chinese)
- [6] 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.  
XU G, ZHANG W M, LOU F W, *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. (in Chinese)
- [7] 张敬敏, 张志佳, 王东署. 基于小波分解的塔式快速图像匹配算法[J]. *微电子学与计算机*, 2007, 24(1):207-213.  
ZHANG J M, ZHANG ZH J, WANG D SH. A fast pyramid image matching algorithm based on wavelet decomposition [J]. *Microelectronics & Computer*, 2007,24(1):207-213. (in Chinese)
- [8] MULLIGAN J, DANILIDIS K. Trinocular stereo for non-parallel configurations[C]. *Proc. International Conference on Pattern Recognition, Barcelona*, 2000:567-570.
- [9] 唐丽, 吴成柯, 刘侍刚, 等. 基于区域增长的立体像对稠密匹配算法[J]. *计算机学报*, 2004, 27(7): 937-943.  
TANG L, WU CH K, LIU SH G, *et al.*. Image dense stereo matching by technique of region growing[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2004, 27(7):937-943. (in Chinese)
- [10] 杜建军, 高栋, 孔令豹, 等. 光学自由曲面误差评定中匹配方法的研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1):133-138.  
DU J J, GAO D, KONG L B, *et al.*. Study of matching methods for error evaluation of optical free-form surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):133-138. (in Chinese)

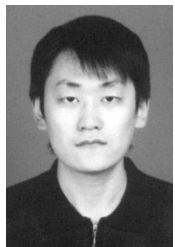
#### 作者简介:



刘浩然(1980—),男,河北秦皇岛人,讲师,工学博士,分别于2002年、2005年和2009年在燕山大学获得学士、硕士和博士学位,目前正在法国国立应用科学院攻读博士学位,主要从事光学测量、无线网络传感器、系统故障检测等方面的研究。E-mail: liuhaoran2005@hotmail.com



张文明(1979—),男,吉林榆树人,博士研究生,2001年在燕山大学获得学士学位,主要从事智能控制、图像处理等方面的研究。E-mail: ysuzwm@163.com



徐刚(1979—),男,黑龙江大庆人,博士研究生,分别于2002年、2005年在燕山大学获得学士和硕士学位,主要从事光学测量、机器视觉等方面的研究。E-mail: xg@ysu.edu.cn