

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202112021



采用双相机多尺度方法的机制砂 级配测量及空隙率预测

林文华¹, 房怀英¹, 范璐璐², 杨建红¹

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;
2. 深圳市市政工程总公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 为了解决图像法难以准确测量粒径为 0.150 mm 以下的机制砂颗粒的问题,设计双相机多尺度测量装置,并提出一种使用形态参数预测空隙率的方法.使用基础相机和精密相机搭建测量装置,基于该装置测量机制砂的粒形参数和粒径参数,通过实验数据构建空隙率预测模型.结果表明:双相机多尺度方法的最大级配测量误差为-2.57%,构建的随机森林模型最大空隙率预测误差为 0.62%,测量精度满足工程要求.

关键词: 机制砂; 机器视觉; 多尺度; 粒形; 空隙率

中图分类号: TU 528.041; TP 391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)03-0285-06

Gradation Measurement and Void Content Prediction of Manufactured Sand Using Dual Camera Multi-Scale Method

LIN Wenhua¹, FANG Huaiying¹, FAN Lulu², YANG Jianhong¹

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Shenzhen City Municipal Engineering Controlling Corporation, Shenzhen 518000, China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to accurately measure manufactured sand particles with particle size less than 0.150 mm by image method, a dual camera multi-scale measuring device was designed, and a method of predicting void content using morphological parameters was proposed. The basic camera and precision camera were used to build the measuring device, the particle shape parameters and particle size parameters of manufactured sand were measured based on the device, and the void content prediction model was constructed through the experimental data. The results show that the maximum gradation measurement error of the dual camera multi-scale method is -2.57%, and the maximum void content prediction error of the constructed random forest model is 0.62%, the measurement accuracy of which meets the engineering requirements.

Keywords: manufactured sand; machine vision; multi-scale; particle shape; void content

目前,振动筛分法是测量机制砂级配的常用方法^[1],但该方法无法检测颗粒形状,而图像法不仅可以测量颗粒形状,而且具有高重复性.基于图像技术,学者们开发了多种机制砂测量设备,通过工业相机可以直接拍摄颗粒的轮廓形态^[2-3],通过多角度拍摄方法可以测量颗粒的三维参数^[4],通过 X 射线电子计算机断层(CT)扫描技术可以获得颗粒的二维信息,重建颗粒的三维形态,并在计算机中对三维形态的颗粒进行仿真测试^[5-6]. Cepuritis 等^[7]使用二维图像法测量机制砂,由于受到像素尺寸的限制,相

收稿日期: 2021-12-23

通信作者: 房怀英(1978-),女,教授,博士,主要从事高端机制砂装备的研究. E-mail:happen@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省高校产学研合作项目(2020H6012, 2021H6029);福建省科技重大专项专题(2020YZ01702);广东省深圳市科技攻关项目(JSGG20201103100601004);福建省泉州市科技计划项目(2021G05)

机难以测量粒径为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 以下的颗粒形状. 莱驰(Retsch)公司开发了 CX_2 型颗粒分析仪, 采用基本相机和变焦相机提升设备的尺寸测量范围^[8]. 准确测量机制砂形态可以预测空隙率, 空隙率是影响沥青混合料强度的核心指标, 合理的空隙率通常能生产出强度高、抗车辙能力强的沥青混合料^[9], 还能降低胶凝材料的成本. 空隙率主要受级配和粒形的影响^[10-14], 因此, 基于级配和粒形预测空隙率十分重要.

由前期实验可知, 单一相机测量机制砂的精度较低. 这是因为普通工业相机的像素精度不足, 难以准确测量粒径为 0.150 mm 以下的机制砂细颗粒. 精密相机虽然有助于测量细颗粒, 但其视野范围小, 颗粒难以在视野内完全分散, 从而影响测量精度. 基于此, 本文设计一种双相机多尺度测量装置, 并提出一种使用形态参数预测空隙率的方法.

1 双相机多尺度方法

1.1 双相机多尺度测量装置

双相机多尺度测量装置结构图, 如图 1 所示.

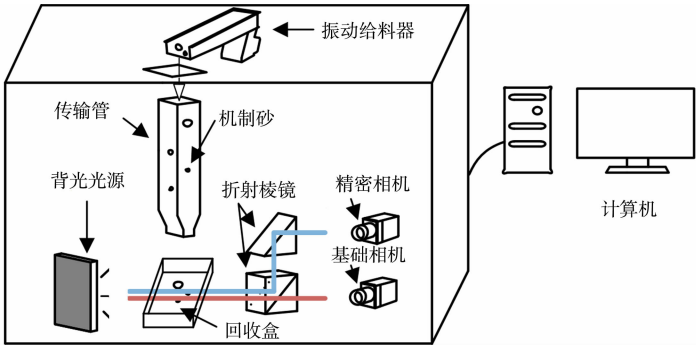


图 1 双相机多尺度测量装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of dual camera multi-scale measuring device

振动给料器通过均匀振动使机制砂匀速下落; 传输管将机制砂送入工业相机(基础相机、精密相机)的视野范围; 回收盒将机制砂回收; 背光光源从颗粒背面提供稳定的亮度; 基础相机拍摄机制砂下落区域; 折射棱镜将机制砂图像传送到精密相机, 使精密相机拍摄到基础相机视野的中心区域; 计算机处理图片并输出测量结果. 由机制砂落料范围和速度, 可得工业相机的工作参数, 如表 1 所示. 表 1 中: l 为工作距离; r 为相机帧率.

表 1 工业相机的工作参数

Tab. 1 Working parameters of industrial camera

工作参数	基础相机	精密相机
l/mm	210	270
视野范围/ $\text{mm}\times\text{mm}$	43.0×57.3	18.0×24.0
相机分辨率/ $\text{px}\times\text{px}$	$1\,536\times2\,048$	$3\,000\times4\,000$
像素分辨率/ $\text{mm}\cdot\text{px}^{-1}$	0.028	0.006
$r/\text{帧}\cdot\text{s}^{-1}$	25	13

1.2 双相机多尺度算法

双相机多尺度方法的原理为基础相机测量粒径为 0.300 mm 以上的大颗粒体积, 精密相机测量粒径为 0.300 mm 以下的小颗粒体积. 精密相机可以用局部的高精度视野补偿基础相机无法测量小颗粒的不足, 但精密相机的视野范围和帧率较小, 导致其漏拍部分颗粒. 为了整合两种相机的计算结果, 需将精密相机测量的小颗粒体积补偿给基础相机.

补偿后的小颗粒体积(V)的计算公式为

$$V=V_pC_fC_d. \tag{1}$$

式(1)中: V_p 为精密相机测得的小颗粒体积; C_f, C_d 分别为帧率补偿系数和动态补偿系数.

帧率补偿系数为两种相机的帧率差异倍数, 可通过相机参数计算得到. 动态补偿系数由两种相机的视野差异决定. 分析颗粒的下落过程可知, 颗粒在视野区域内分布不均匀, 因此, 动态补偿系数应根据实时状态下两种相机采集的颗粒数量决定. 动态补偿系数的计算过程有以下 3 个步骤: 1) 选取实时采集的基础相机图片, 计算整个视野区域的颗粒数量; 2) 选取同一时间采集的精密相机图片, 计算局部视野区域的颗粒数量; 3) 计算动态补偿系数, 其计算公式为

$$C_d=N/n. \tag{2}$$

式(2)中: N 为基础相机图片内的颗粒数量; n 为精密相机图片内的颗粒数量.

1.3 机制砂形态参数

机制砂形态参数包括粒形参数和粒径参数. 粒形参数描述颗粒宏观尺度的形状特征及微观尺度的轮廓纹理特征. 影响空隙率的 7 个关键粒形参数及其物理意义, 如表 2 所示. 表 2 中: 等效椭圆是与轮廓具有相同周长和面积的椭圆; 等效费雷特(Feret)椭圆是椭圆面积与轮廓面积相等, 椭圆长轴为轮廓最大 Feret 径的等效椭圆.

表 2 7 个关键粒形参数及其物理意义
Tab. 2 Seven key particle shape parameters and their physical significance

序号	粒形参数	物理意义
1	凸度	凸包周长/轮廓周长
2	内径比	轮廓最小外接圆圆心到轮廓的最大距离/最小距离
3	球形度	轮廓面积/最小外切圆面积
4	矩形度	轮廓面积/最小外接矩形面积
5	外接矩形长短轴比	轮廓的最小外切矩形的长/宽
6	等效椭圆长短轴比	等效椭圆的长轴/短轴
7	等效 Feret 椭圆周长比	轮廓的等效 Feret 椭圆周长/轮廓周长

粒径参数用于表征机制砂的粗细程度. 粒径参数包括细度模数、等效粒径小于 0.150 mm 的机制砂级配占比(粒径小于 0.150 mm 的颗粒体积占总颗粒体积的百分比).

细度模数(M_x)^[1]的计算公式为

$$M_x = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{1 - A_1}.$$

(3)

式(3)中: $A_1 \sim A_6$ 分别为等效粒径大于 4.750, 2.360, 1.180, 0.600, 0.300, 0.150 mm 的颗粒体积占总颗粒体积的百分比.

等效粒径(d)用于表征颗粒的尺寸, 计算公式为

$$d = 4S_A / \pi F_{\max}.$$

(4)

式(4)中: S_A 为颗粒轮廓面积; F_{\max} 为颗粒轮廓的最大 Feret 径.

在图像法中, 机制砂颗粒体积(V_s)的计算公式为

$$V_s = dS_A.$$

(5)

2 实验结果与分析

2.1 机制砂级配测量实验

细颗粒指粒径小于 0.300 mm 的机制砂颗粒. 配置粒径小于 0.300 mm 细颗粒质量占比(η)为 10%, 30%, 50%, 70%, 90% 的机制砂样品, 测试图像法测量细颗粒的性能. 5 种机制砂样品配比, 如表 3 所示. 表 3 中: ξ 为样品配比; 粒径区间 1~粒径区间 6 表示机制砂的粒径分别为 2.360~4.750, 1.180~2.360, 0.600~1.180, 0.300~0.600, 0.150~0.300, 0.075~0.150 mm; 每份样品的质量为 50 g.

表 3 5 种机制砂样品配比
Tab. 3 Proportion of five kinds of manufactured sand samples (%)

η	ξ					
	粒径区间 1	粒径区间 2	粒径区间 3	粒径区间 4	粒径区间 5	粒径区间 6
10	22.5	22.5	22.5	22.5	5.0	5.0
30	17.5	17.5	17.5	17.5	15.0	15.0
50	12.5	12.5	12.5	12.5	25.0	25.0
70	7.5	7.5	7.5	7.5	35.0	35.0
90	2.5	2.5	2.5	2.5	45.0	45.0

为了验证双相机多尺度方法可提升细颗粒的级配测量精度, 需设置单一相机方法的测量结果进行对比. 由于双相机中的基础相机具有完整的测量功能, 图像采集环境相同, 因此, 取基础相机的测量结果

作为单一相机方法的测量结果. 将配置好的样品放入测量平台, 采用单一相机、双相机多尺度两种方法进行测量, 可得相应的级配测量误差(5 种机制砂), 如表 4 所示. 表 4 中: E_g 为级配测量误差, $E_g = x_1 - x$, x_1 为图像法(单一相机方法、双相机多尺度方法)测量结果, x 为筛分法测量结果; η 为 0.300 mm 细颗粒质量占比.

表 4 两种方法的级配测量误差(5 种机制砂)

Tab. 4 Gradation measurement errors of two methods (five kinds of manufactured sand) (%)

方法	η	E_g					
		粒径区间 1	粒径区间 2	粒径区间 3	粒径区间 4	粒径区间 5	粒径区间 6
单一相机	10	-0.42	4.20	0.89	-0.19	-0.40	-4.08
	30	0.39	8.06	4.22	3.21	-4.12	-11.76
	50	2.36	9.63	6.64	5.69	-5.66	-18.66
	70	3.31	9.22	7.48	6.83	-3.04	-23.80
	90	1.96	4.31	3.65	7.16	9.30	-26.38
双相机多尺度	10	-1.90	2.42	-0.66	-1.67	1.25	0.57
	30	-3.00	3.22	0.10	-0.72	-1.00	1.41
	50	-2.35	2.60	0.56	-0.08	-2.83	2.10
	70	-1.55	1.70	0.74	0.39	-4.54	3.27
	90	-0.76	0.15	-0.11	1.26	-1.90	1.37

由表 4 可知: 单一相机、双相机多尺度方法细颗粒最大级配测量误差分别为 -26.38%, -4.54%, 单一相机方法的级配测量误差更大; 随着粒径为 0.300 mm 以下细颗粒占比的增加, 单一相机方法在粒径为 0.075~0.150 mm 的级配测量误差持续增大, 而双相机多尺度方法的级配测量误差变化较小, 这是因为单一相机像素精度不足, 漏拍了细小颗粒, 而双相机中的精密相机通过准确补偿机制砂中的细小颗粒, 可修正单一相机的不足, 有效降低级配测量误差.

为了进一步验证双相机多尺度方法的准确性, 配置细度模数为 2.4~3.4 的机制砂级配料, 每间隔 0.05 为一档, 共得到 21 组机制砂. 两种方法的最大级配测量误差(21 组机制砂), 如表 5 所示. 表 5 中: E_{\max} 为最大级配测量误差; 由表 5 可知: 在各粒径区间内, 单一相机方法的最大级配测量误差都大于双相机多尺度方法.

表 5 两种方法的最大级配测量误差(21 组机制砂)

Tab. 5 Maximum gradation measurement errors of two methods (twenty-one groups of manufactured sand) (%)

方法	E_{\max}					
	粒径区间 1	粒径区间 2	粒径区间 3	粒径区间 4	粒径区间 5	粒径区间 6
单一相机	3.27	5.14	4.19	3.39	-5.06	-7.32
双相机多尺度	-2.57	2.47	-2.01	-2.05	0.99	1.22

两种方法的细度模数测量误差, 如图 2 所示. 图 2 中: E_f 为细度模数测量误差; $M_{x,s}$ 为筛分细度模数. 由图 2 可知: 单一相机方法的细度模数测量误差较大, 再次说明单一相机方法的级配测量误差来源于漏拍的细小颗粒.

由此可知, 单一相机方法的最大级配测量误差为 -7.32%, 最大细度模数测量误差为 0.37; 双相机多尺度方法的最大级配测量误差为 -2.57%, 最大细度模数测量误差为 -0.06.

2.2 机制砂空隙率预测实验

建立机制砂空隙率预测模型需要收集训练数据. 首先, 分别取 42 组机制砂(细度模数为 2.4~3.4), 使用两种方法测量级配和粒形参数. 然后, 根据规范 GB/T 14684—2011《建设用砂》进行空隙率实验, 得到机制砂空隙率. 为了保证颗粒分散充分, 测量装置的进料速度较慢, 双相机多尺度测量平台的

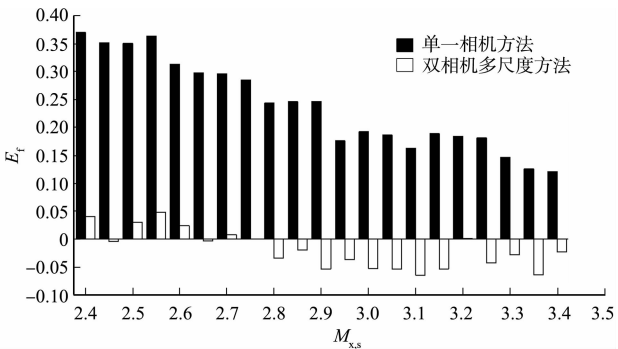


图 2 两种方法的细度模数测量误差

Fig. 2 Fineness modulus measurement errors of two methods

测量速度为每 25 min 测量 100 g 机制砂. 因此, 实验的机制砂取样量设置为 $100\text{ g} \cdot \text{组}^{-1}$. 采集数据后, 将实验数据分为 26 组训练数据(用于构建模型)、8 组验证数据(用于调整模型参数)、8 组测试数据(用于测试预测模型). 采用平均绝对误差(E_{MA})作为模型的评价标准, 计算公式为

$$E_{\text{MA}} = \frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k | \hat{y}_i - y_i | .$$

(7)

式(7)中: k 为数据组数; \hat{y}_i, y_i 分别为空隙率的预测值和真实值.

随机森林模型是一种灵活的机器学习模型^[15], 包括决策树个数、决策树的最大深度、最大特征数目、最小划分数量和子节点的最小样本数目 5 个参数. 采用随机森林模型进行预测, 并基于 Scikit 学习模块完成参数优化. 参数优化的方法为网格搜索法^[16], 网格搜索法是一种对参数值的穷举搜索方法, 将各参数可能的取值进行排列组合, 列出所有可能的组合结果, 再用各参数组合训练预测模型, 最终返回最佳参数组合. 为了降低随机性误差, 对每组参数进行 4 次交叉验证, 取评价指标的平均值代表这组参数的预测效果.

将训练数据和验证数据进行网格搜索后, 得到随机森林模型的最佳参数组合, 如表 6 所示.

表 6 随机森林模型的最佳参数组合

Tab. 6 Optimal parameters combination of random forest model

序号	参数	随机森林模型(单一相机)	随机森林模型(双相机多尺度)	取值范围
1	决策树个数	124	109	1~1 000
2	决策树的最大深度	150	190	10~200, None
3	最大特征数目	9	9	1~9
4	最小划分数量	4	3	2~10
5	子节点的最小样本数目	2	2	1~10

最佳参数组合下, 交叉验证数据中, 随机森林模型(单一相机)的平均绝对误差为 0.687 2%, 随机森林模型(双相机多尺度)的平均绝对误差为 0.350 2%, 随机森林模型(双相机多尺度)的预测误差较小.

确定最佳参数组合后, 使用 8 组测试数据测试预测模型, 两种模型的空隙率及预测误差, 如图 3 所示. 图 3 中: V_0 为空隙率; E_p 为空隙率预测误差.

由图 3 可知: 在大部分的实验结果中, 随机森林模型(双相机多尺度)的空隙率预测误差较小, 最大空隙率预测误差为 0.62%, 这符合工程中空隙率预测误差小于 1.00% 的精度要求.

3 结论

提出一种双相机多尺度方法, 解决图像法难以准确测量粒径为 0.150 mm 以下的机制砂颗粒的问题, 并构建机制砂空隙率的预测模型. 该方法可对生产线中的机制砂进行在线测量, 提升混凝土性能. 由此可得以下 3 个结论.

- 1) 在测量机制砂时, 单一相机受到像素尺寸限制, 难以同时满足视野和精度要求, 导致测量误差较大. 单一相机方法的最大级配测量误差为 -7.32% , 最大细度模数测量误差为 0.37.
- 2) 采用双相机多尺度方法可以提高细颗粒的级配测量精度, 双相机多尺度方法的最大级配测量误差为 -2.57% , 最大细度模数测量误差为 -0.06 .
- 3) 图像法能正确反映形态参数对空隙率的影响, 随机森林模型(双相机多尺度)可以对空隙率进行准确预测, 最大空隙率预测误差为 0.62%.

参考文献:

[1] 国家质量监督检验检疫总局. 建设用砂: GB/T 14684—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 1-28.

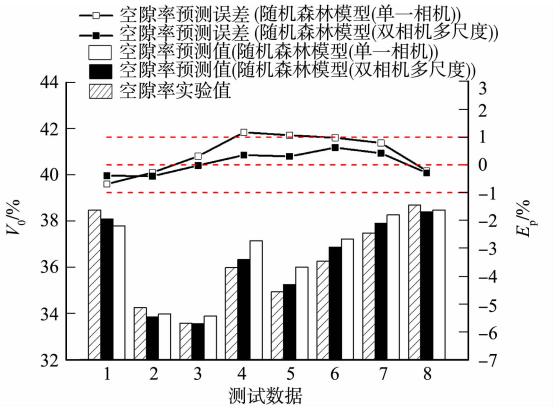


图 3 两种模型的空隙率及预测误差
Fig. 3 Void contents and prediction errors of two models

- [2] RAJAN B, SINGH D. Understanding influence of crushers on shape characteristics of fine aggregates based on digital image and conventional techniques[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 150: 833-843. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.058.
- [3] 李北星, 王威, 陈梦义, 等. 粗骨料的等轴率、圆度和球度及其相互关系[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(4): 531-536. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2015.04.001.
- [4] ZHAO Lianheng, ZHANG Shuaihao, HUANG Dongliang, *et al.* A digitalized 2D particle database for statistical shape analysis and discrete modeling of rock aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 117906. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117906.
- [5] NITKA M, TEJCHMAN J. A three-dimensional meso-scale approach to concrete fracture based on combined DEM with X-ray μ CT images[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 107: 11-29. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.006.
- [6] SU Dong, YAN Waiman. 3D characterization of general-shape sand particles using microfocus X-ray computed tomography and spherical harmonic functions, and particle regeneration using multivariate random vector[J]. *Powder Technology*, 2018, 323: 8-23. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.09.030.
- [7] CEPURITIS R, GARBOCZI E, JACOBSEN S, *et al.* Comparison of 2-D and 3-D shape analysis of concrete aggregate fines from VSI crushing[J]. *Powder Technology*, 2016, 309: 110-125. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.12.037.
- [8] MICROTRAC MRB. CAMSIZER[®] X2: Particle size and shape analyzer[EB/OL]. (2021-12-14)[2021-12-14]. <https://www.microtrac.com/products/particle-size-shape-analysis/dynamic-image-analysis/camsizer-x2/function-features>.
- [9] 石立万, 王端宜. 基于数字图像处理的沥青混合料主骨架评价标准[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(5): 52-58. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3897.2017.05.007.
- [10] HASSAN H, WU Kuanghuai, HUANG Wenke, *et al.* Study on the influence of aggregate strength and shape on the performance of asphalt mixture[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 294: 123599. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123599.
- [11] POURANIAN M, SHISHEHBOR M, HADDOCK J E. Impact of the coarse aggregate shape parameters on compaction characteristics of asphalt mixtures[J]. *Powder Technology*, 2020, 363: 369-386. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.01.014.
- [12] SWAMY A, MATOLIA V, RAMANA G V. Interrelationship between uncompacted void content of aggregates and asphalt concrete properties[J]. *Particulate Science and Technology*, 2018, 37(5): 1-9. DOI: 10.1080/02726351.2017.1414906.
- [13] XIE Xiaoguang, LU Guoyang, LIU Pengfei, *et al.* Evaluation of morphological characteristics of fine aggregate in asphalt pavement[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 139: 1-8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.044.
- [14] KOOHMISHI M, PALASSI M. Evaluation of morphological properties of railway ballast particles by image processing method[J]. *Transportation Geotechnics*, 2017, 12: 15-25. DOI: 10.1016/j.trgeo.2017.07.001.
- [15] MITCHELL T M. *Machine learning*[M]. New York: McGraw Hill, 1997.
- [16] FAYED H, ATIYA A. Speed up grid-search for parameter selection of support vector machines[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 80: 202-210. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.03.037.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 崔长彩)