

一种测量颗粒对流速度的新方法

母应坤, 胡林, 孔维姝, 邓雄

贵州大学理学院物理系, 贵阳 550025

摘要 提出一种测量振动过程中颗粒对流速度的新方法——示踪子寻迹测速法。该方法可对粒子位置坐标进行精确识别, 同时, 利用其颜色属性、三角形最小形变度对未能直接识别的粒子加以辅助识别, 实现了对运动粒子不同时刻空间参量的跟踪描述。运用图像处理软件 ImageJ 获取粒子位置坐标, 具有处理速度快, 便于修正的特点, 与其他位置识别方法相比, ImageJ 具有独特的优越性。

关键词 粒子速度; 示踪子; ImageJ 软件; 算法

中图分类号 X701

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.26.009

A New Method for Measuring Convection Velocity of Granular Matter

MU Yingkun, HU Lin, KONG Weishu, DENG Xiong

Department of Physics, College of Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract A new method is introduced for measuring convection velocity of granule in the process of vibration, which is named seeking trails of tracer particles. The coordinates of particles can be accurately identified, and unmatched particles can be unidentified by use of color attribute assisted by minimum deformation degree of triangular, which realizes the tracking and description for moving particles in different moments and spaces. In terms of obtaining particle location coordinates, ImageJ has the characteristics of fast processing and easily amending. Moreover, it has the unique superiority compared with other identification methods.

Keywords particle velocity; tracer particle; ImageJ; arithmetic

0 引言

运动颗粒的速度可以采用各种方法测量, 目前主要采用高速摄影法^[1,2]和粒子图像测速法(即 PIV 技术)^[3-7]。高速摄影法可以动态记录目标区域内不同时刻颗粒的位置状态, 但当粒子数目很多、粒径较小或堆积密集时, 很难从大量图像中识别并获取粒子运动过程中的基本状态信息, 因此难以直观描述粒子运动的速度分布。PIV 是基于对流场图像的自相关或互相关分析而获取流速信息的一种现代光学测速手段, 它所测得的是某些粒子附近区域的平均速度, 对于单个粒子的速度测量, 若查问区(图像处理中将图像网格化分成的许多小区域)大小选取不合理, 将直接导致粒子不能识别或误差较大, 因此不宜用于研究单个示踪子的运动行为。在研究振动状态下颗粒物质的对流运动情况时, 往往需要知道粒子的速度分布情况。文献[8]中的粒子速度算法可以在相机帧率足够高的前提下, 识别位移小于半径、粒子速度不大条件下的粒子影像; 文献[9]利用粒子配对算法中的三角形最小形变度

配对粒子, 但随着粒子数增多、堆积密度增大、粒子运动速度加快, 配对方法的难度变大。在研究以上方法的基础上, 本文提出一种间接测量对流过程中颗粒运动速度的新方法, 即示踪子寻迹测速法。该方法采用 ImageJ^[10,11]获取粒子位置, 利用示踪子颜色缩小识别范围, 同时优化改进了算法程序, 与其他测速方法相比, 本方法识别度高, 处理便捷, 经济省时而且易掌握。

1 粒子图像分析与处理技术

记录粒子运动的原始图像往往含有许多杂色的背景(如光斑), 这对粒子的准确识别造成干扰, 需运用 ImageJ 图像处理软件对其进行基本处理后方可进行位置信息提取, 步骤如下。

(1) 打开图像处理软件 ImageJ 的主界面, 依次点击界面 File—Open—粒子样本图像 (C:/Documents and Settings/Administrator/桌面), 然后回到 ImageJ 主界面, 调整图像对比度, 使粒子颜色尽可能与背景形成较强反差。调整方法为:

收稿日期: 2013-05-13; 修回日期: 2013-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(11264006); 贵州省基金项目(黔科合 J 字[2011]2099 号); 贵州省省长基金项目(黔省专合字 2010-5 号)

作者简介: 母应坤, 助教, 研究方向为颗粒物质, 电子信箱: myk397998054@126.com; 胡林(通信作者), 教授, 研究方向为软凝聚态物理,

电子信箱: hulinh3@sina.com



Image—Adjust—Brightness/Contrast。图 1 是对样本粒子图像进行位置信息提取的过程,其中图 1(a)为粒子原始图像的样本照片。

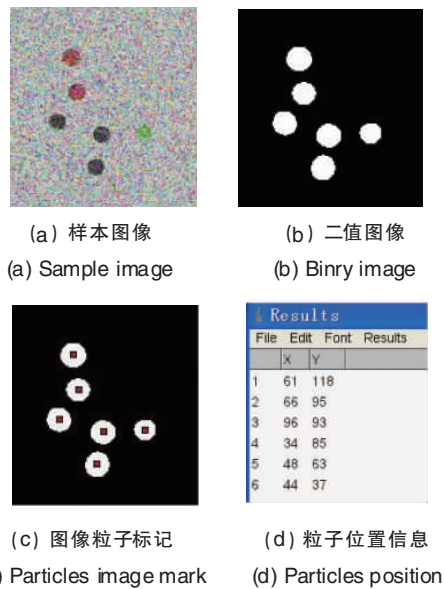


图 1 粒子位置信息的 ImageJ 提取过程

Fig. 1 Fetch process of particle location by ImageJ

(2) 经过步骤 1 处理后的图像,背景可能含有许多噪声(即杂色点),此时可利用 ImageJ 的去噪命令对图像进行降噪处理。调整方法为:Process—Noise—Remove Outliers,选择合适的参数和阈值后,图像得到改善。然后对图片模式进行转换,如果是彩色图像,则将其转换成 8 位灰度图像以便后续处理,调整方法为:Image—Type—8bit。最后将图像二值化,调整方法为:Image—Adjust—Threshold。

(3) 摄像机拍照捕捉时需要用到辅助光源以提高照射区域的亮度,这将会使颗粒团产生强烈的散射光,除导致本身曝光过度外,还会严重干扰邻近的粒子成像,在颗粒之间形成大量散斑,给图像处理造成极大的困难,尤其针对稀疏颗粒区,会形成所谓的伪颗粒。此时,需要对图像进行色阶调整,以获得较高质量的图像。调整方法为:Image—Adjust—Window/Level,选择合适的输入和输出色阶,即可实现图像色度调整的目的。

(4) 经过步骤 3 调整后,可能会有粒子相互连通、粒子间隙难以辨别的情况,此时,用 ImageJ 的缩小滤镜功能,使粒子间相互分开,独立可辨。调整方法是:Process—Filters—Minimum。图 1(b)即为粒子经处理后的二值化图像。

(5) 粒子中心坐标获取,需对步骤 2 处理后的二值图像进行标记。调整方法是:Process—FindMaxima—PointSelection,选择合适参数调整后的结果如图 1(c)所示。最后依次点击 Process—FindMaxima—List,即可得到如图 1(d)所示的粒子坐标位置信息。此外,还可将结果保存为 txt、excel 等格式的数据文件,以便其他程序处理时调用。

2 颗粒速度矢量的间接测量

运用 ImageJ 获得颗粒的位置坐标后,间接测量颗粒的速

度必须在相邻的图像中进行粒子配对。设配对粒子的位移矢量为 L ,连续相邻两帧图像的拍摄间隔时间为 Δt ,颗粒运动的速度矢量 V 可由式(1)确定

$$V=L/\Delta t \quad (1)$$

如图 2 所示,设粒子半径均为 R ;粒子 O 为第 1 帧图像中的某粒子;粒子 O_1 为它在第 2 帧图像中的位置,其位移为 r_1 ; O_n 为第 2 帧图像中除 O_1 粒子外的其他粒子,它到 O 粒子的距离为 r_n 。若 O 粒子的位移刚好为半径 R ,则其他粒子到 O 粒子的最小距离也为 R ,此时 O_n 与 O_1 相切,3 粒子的中心共线。由几何关系可得

$$r_1+r_n=2R \quad \text{若 } r_1 < R, \text{ 则 } r_n > R \quad (2)$$

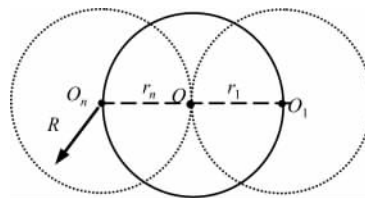


图 2 粒子识别示意图

Fig. 2 Schematic of particles identification

因此当粒子位移小于半径时,第二帧图像中只有粒子本身符合条件。据此,若记下第一帧图像中所有粒子的坐标,然后在第二帧图像中寻找与第一帧图像中各个粒子最邻近的粒子,那么它们便被认为是第一帧图像中的粒子在第二帧图像中(即下一时刻)的位置。

对于不满足位移小于半径的粒子,可利用其颜色属性缩小识别范围。因为某一颜色的粒子在第二帧图像中的位置只可能是那些与之具有同种颜色的颗粒。如果同种颜色的粒子具有多颗,那么还可以进一步利用三角形最小形变度进行匹配与识别。由于相邻粒子在流场中的位置很接近,运动状态也很相似,故由相近粒子构成的多边形在历经短暂的时间间隔后,其形变很小。因此,可利用选取空间位置相近的粒子构成三角形,根据三角形的形变程度判断粒子的匹配度。形变程度反映粒子的匹配度,形变程度越小,粒子匹配度越大,匹配方法如图 3 所示。

在图 3(a)中选择与粒子 P_3 和 P_4 相邻的已配对粒子 P_1^A 和 P_2^A 为基准粒子,与粒子 P_3 和 P_4 构成基准三角形 $\Delta P_1^A P_2^A P_3$ 和 $\Delta P_1^A P_2^A P_4$;在图 3(b)中用粒子 P_1^B 和 P_2^B 的配对粒子 P_1^B 和 P_2^B 为基准粒子,与候选粒子 P_3 和 P_4 构成形变三角形 $\Delta P_1^B P_2^B P_3$ 和 $\Delta P_1^B P_2^B P_4$ 。三角形 $\Delta P_1^B P_2^B P_3$ 与基准三角形 $\Delta P_1^A P_2^A P_3$ 之间的形变程度 T_F 为

$$T_F = \frac{\left| \frac{P_1^A P_2^A}{P_1^A P_2^A} - \frac{P_1^B P_2^B}{P_1^B P_2^B} \right|^2}{\left| \frac{P_1^A P_2^A}{P_1^A P_2^A} \right| \times \left| \frac{P_1^B P_2^B}{P_1^B P_2^B} \right|} + \frac{\left| \frac{P_2^A P_3}{P_2^A P_3} - \frac{P_2^B P_3}{P_2^B P_3} \right|^2}{\left| \frac{P_2^A P_3}{P_2^A P_3} \right| \times \left| \frac{P_2^B P_3}{P_2^B P_3} \right|} + \frac{\left| \frac{P_1^A P_3}{P_1^A P_3} - \frac{P_1^B P_3}{P_1^B P_3} \right|^2}{\left| \frac{P_1^A P_3}{P_1^A P_3} \right| \times \left| \frac{P_1^B P_3}{P_1^B P_3} \right|}$$

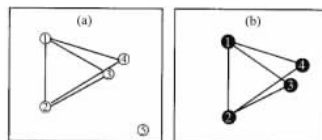


图 3 粒子三角形形变匹配

Fig. 3 Deformation match of triangle for particles

对所有尚未配对的粒子进行上述计算,然后选取形变程度最小的粒子作为配对粒子(即粒子在下一时刻的位置)。特别地,对于粒子空间浓度较大的区域(密相区),粒子运动空间狭窄,多数粒子可看成近邻粒子,满足三角形最小形变度的识别要求;而对于粒子空间浓度较小的区域(稀相区),由于粒子运动空间范围较大,多数粒子不满足近邻粒子的要求,利用三角形最小形变度不能得到准确的识别结果。根据以上分析方法,编制了粒子速度计算的 Matlab 程序,设计流程如图 4 所示。

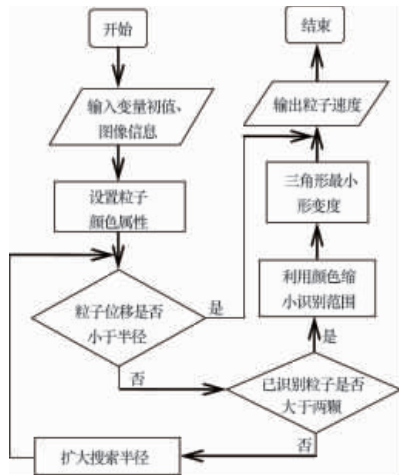


图 4 粒子速度计算程序

Fig. 4 Flow diagram for calculation of particle velocity

实验拍摄的颗粒图像经计算机自动辨读,运用 ImageJ 处理后得到颗粒在空间的位置坐标。采用上述间接测量颗粒速度的方法,得到示踪子颗粒的运动速度大小和方向。实验中,当约化加速度 $\Gamma=10$ ($\Gamma=A\omega^2/g$, 其中 A 为振台振幅, ω 为振动角频率, g 为重力加速度), $f=105\text{Hz}$ 时,竖直振动条件下,湿颗粒系统对流运动的速度场分布如图 5 所示。图 5(a) 为处理前对流运动的截图照片(对流方向已标出),由于容器是圆筒,平面照片略有变形,靠近图像左右边缘,颗粒间的图上距离小于它们的实际距离。采用 Photoshop 软件进行纠正变形处理,还原颗粒在壁面上的实际距离。图 5(b) 为处理后相应对

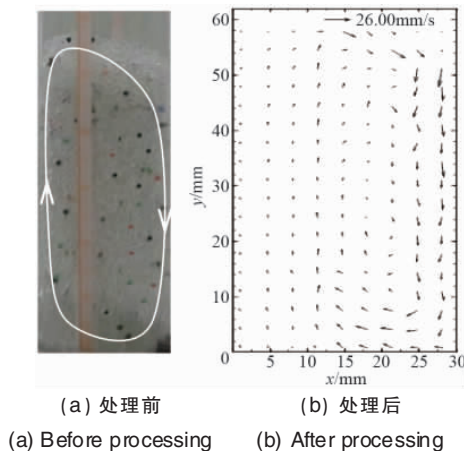


图 5 对流运动的速度场

Fig. 5 Velocity field of convective motion

流运动的速度场分布情况,其中箭头的长短与指向分别表示颗粒速度矢量的大小和方向。速度场分布直观描述出,竖直振动条件下湿颗粒整体做顺时针对流运动,对流向下时速度较大,但通道较窄;向上对流时速度较小,但通道较宽。比行为与流体的连续性原理相一致。

3 结论

综上所述,示踪子寻迹测速法较之前的测速方法有了很大的优化,不仅可以测出颗粒运动速度的平均分布,还可研究单个颗粒的运动行为。若高速相机帧率足够高,示踪子寻迹测速方法可以对颗粒位置坐标进行精确识别;对于未能识别的颗粒,利用其颜色属性、三角形最小形变度加以辅助识别,提高了间接测量颗粒速度的精度。另外,在获取粒子位置信息方面,ImageJ 具有图像处理速度快,且人性化的特点,与其他位置识别方法相比,本方法具有识别度高,处理便捷,经济省时和易掌握等优点。

参考文献(References)

- [1] Zou X Y, Zhu J J. The distribution function of vertical lift-off velocity in an aeolian saltating cloud[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 23: 2175-2177.
- [2] Zou X Y, Wang Z L, Hao Q Z, et al. The distribution of velocity and energy of saltating sand grains in a wind tunnel[J]. Geomorphology, 2001, 36(3-4): 155-165.
- [3] Stanislas M, Kompenhas J, Westerweel J. Particle image velocimetry: Progress towards industrial application[M]. New York: Springer, 2000.
- [4] Westerweel J, Dabiri D, Gharib M. The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings[J]. Experiments in Fluids, 1997, 23(1): 20-28.
- [5] Keane R D, Adrian R J. Theory of cross-correlation analysis of PIV image[J]. Applied Scientific Research, 1992, 49(3): 191-215.
- [6] Michael L J, William J H, Clive A G. Particle image velocimetry analysis using an optically addressed spatial light modulator: effects of nonlinear transfer function[J]. Applied Optics, 1995, 34(11): 1757-1768.
- [7] Grant X W. Directionally-unambiguous, digital particle image velocimetry studies using a image intensifier camera[J]. Experiments in Fluids, 1995, 18(5): 358-362.
- [8] 杨帆, 丁茫, 蔡慧, 等. 垂直激励下颗粒物质系统中的质量环流与密度波[J]. 南京大学学报, 2011, 47(2): 121-122. Yang Fan, Ding Mang, Cai Hui, et al. Journal of Nanjing University, 2011, 47(2): 121-122.
- [9] 浦兴国, 浦世亮, 袁镇福, 等. 激光干涉气液两相流颗粒速度矢量测量的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 238-240. Pu Xingguo, Pu Shiliang, Yuan Zhenfu, et al. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 238-240.
- [10] 白光红, 张义荣, 刘戈菊, 等. ImageJ 图像处理软件在测量玉米子粒大小中的应用[J]. 玉米科学, 2009, 17(1): 147-151. Bai Guanghong, Zhang Yirong, Liu Yiju, et al. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(1): 147-151.
- [11] 宋玉丹, 秦志钰, 荣幸福. 用 ImageJ 提取图像边缘的方法及展望[J]. 机械管理开发, 2008, 23(4): 180-181. Song Yudan, Qin Zhiyu, Rong Xingfu. Mechanical Management and Development, 2008, 23(4): 180-181.

(责任编辑 王媛媛)