

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0368-04

粉末流场数字图像处理技术的一种新算法

杨楠, 杨洗陈

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

摘要 在基于激光同轴送粉的激光制造中,金属粉末流场的分布与特性对制造质量具有重要影响。针对激光同轴送粉金属粉末流速度场提出一种新的分级式搜索算法。通过 CCD 相机直接记录粒子图像的运动序列,应用新算法编制的粉末流场照片图像处理程序对数字化阵列进行快速分析处理,用分级搜索的方法找到粒子图像上相关度最大的两个小区域,用它们之间的位移除以两次拍照的时间间隔,得到该小区域的速度矢量,就可得到粉末流的速度场。本算法比传统算法减少了运算时间,提高了分析效率。

关键词 激光技术; 数字粒子图像测速; 粉末流; 速度场; 数字图像处理

中图分类号 TN249 文献标识码 A

A New Algorithm on Digital Image Processing Technology of Powder Flow Field

YANG Nan, YANG Xi-chen

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract Manufacturing quality was greatly affected by the distribution and characteristic of metal powder flow in laser manufacture processes based laser beam coaxial powder feeding. Based on the metal power flow field, A new image processing algorithm called different-level searching algorithm was developed. The movement of powder flow was recorded by CCD camera, and the digitized array was rapidly analysed by the new digital image processing technology of powder flow field. This algorithm was used to find the two small regions which are most related, and their displacement was divided by the time duration, then the velocity rector of this region was obtained. Processing the whole picture, the velocity rector field of powder flow was obtained. The new algorithms compared with the old algorithm, can save more computing time and can improve analytical efficiency.

Key words laser technique; digital particle image velocimetry; powder flow; velocity field; digital image processing

1 引言

在基于激光同步送粉的激光制造中,金属粉末流场中存在能量、动量、质量传输的物理过程,电场的分布与特性对制造质量具有重要影响^[1]。因此,需要得知粉末流的实时运动信息,据此来对熔覆过程的某些参数进行监控和修正,从而更好地指导生产。基于这种要求,开发一种激光熔覆粉末流在线检测系统具有重要价值。但粉末的数量极多、尺寸极小、气固两相流的运动也极为复杂,因此处理起来非常困难。

在过去的粒子测速实验研究中,一般采用热线风速计(HWA)和激光多普勒测速(LDV),但这些

方法的共同缺点是只能获得空间单点、多点信息,不能提供整个流场的瞬时信息^[2~5]。为了获得图像中任何一个位置的粒子运动信息,本文采用数字粒子图像测速(DPIV)^[6~8]技术对整个粒子流场进行图像处理,并提出分级搜索的新算法,此算法比传统算法更能节省运算时间。

2 原理及方法

2.1 实验装置

图 1 为 DPIV 测试实验装置示意图,CCD 相机、同步系统、双路 YAG 脉冲激光器、光传输和片光源光学元件顺次相连。CCD 相机用于拍摄粒子流图片;计

基金项目: 国家自然科学基金(60478004)资助项目。

作者简介: 杨楠(1979-),男,天津人,博士研究生,主要从事粉末流场数字图像处理研究。E-mail: grace1030@gmail.com

导师简介: 杨洗陈(1941-),男,吉林长春人,教授,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用和激光加工理论及应用方面的研究。E-mail: yangxich@126.com

算机与同步系统相连,用于控制各部件同步^[9,10]。

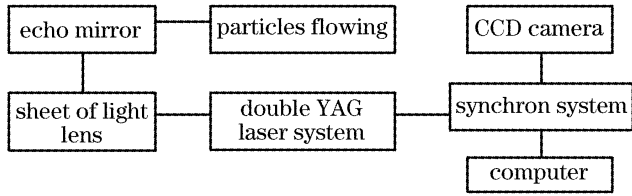


图1 数字粒子图像测速测试实验装置示意图

Fig.1 Scheme of DPIV measurement experimental installation

2.2 粉末流速度场的图像处理方法

1) 用 CCD 相机获取相隔 Δt (接近 $1 \mu\text{s}$) 的两幅流场二维图像,由于 Δt 足够小,所以在两幅照片中的对应目标粒子群的灰度矩阵基本不变。

2) 由 Mathematica5.0 软件将两幅图片转化为灰度矩阵

$$\mathbf{F} = \{f_{ij}\} \quad \text{and} \quad \mathbf{G} = \{g_{ij}\}, \quad (1)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; m = n = 128; f_{ij}, g_{ij} \in [0, 255]$ 为在各自矩阵中第 i 行,第 j 列的灰度值。

3) 将前一个灰度矩阵均匀划分为 $c \times d$ 个子矩阵,每个子矩阵为 $p \times q$ 阶矩阵。

其中 $p = m/c, q = n/d, c = d = 8$ 。

4) 针对前一幅图片中的某一个子矩阵,在后一幅图的所有阶数为 $p \times q$ 的子矩阵中寻找一个和它具有最大相关系数的子矩阵。相关系数定义为

$$C = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q f_{ij} g_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q f_{ij}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q g_{ij}^2}}, \quad (2)$$

可知 $C \in [0, 1]$ 。

5) 将这两个子矩阵的首元素所分别对应的在母矩阵中位置向量的差视为同一目标粒子(群)的位移矢量

$$\Delta \mathbf{s} = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j}, \quad (3)$$

其中 $\Delta x, \Delta y$ 分别为两个子矩阵所分别对应的在母矩阵上的水平和垂直方向的坐标之差。

6) 位移矢量除以两次拍照的时间间隔,获得这一区域速度矢量的近似值

$$\mathbf{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \mathbf{j}, \quad (4)$$

如果时间间隔极短,并且所取区域尺度极小,则这个近似值就趋近于该点在该时刻速度的准确值。再对所有小区域都进行上述处理,即可得到整个粉末流的速度场。

3 分级式搜索算法

为了在图像处理中实现高速搜索,提出一种分级搜索的方法。令 A 为 t 时刻的流场图像, B 为 $t + \Delta t$ 时刻的流场图像,在 $m \times n$ 的两幅图片 A 和 B 中,传统的同阶搜索算法是将 A, B 图像分成若干 $p \times q$ 阶的小网格(其中 p 为 m 的约数, q 为 n 的约数,每个网格指的就是灰度矩阵)。 A 中的某个 $p \times q$ 阶小网格称为判读区域,令其在 B 中的众多同阶的小网格中搜索,其中必存在一个小网格与判读区域有着最大的相关系数。这时,称所找到的区域与判读区域为最佳匹配。另外,虽然找到了一个与判读区域相关程度最大的区域,但这个相关系数的值很小,不足以被认为和判读区域相似,那就视为搜索失败,原因可能是该判读区域相对原来扭曲程度过大,也可能是在 t 时刻的一些粒子群尚未进入 A 图像的范围之中,就此情况应该做出标记,待以后处理。以乘法为例,按照此种方案,整个搜索过程要进行乘法的最大次数为

$$N = mn(n - q + 1)(m - p + 1), \quad (5)$$

由(5)式可以看出, p, q 取值越大,运算次数越少,但增大 p, q 的值会使搜索的精度降低。为了保证搜索精度,同时又能减少运算次数以提高程序运行速度,故提出一种分级搜索的方法进行该过程。此方法的主要步骤为:

- 1) 取 A, B 两幅 $2^p \times 2^p$ 阶的图片;
- 2) 将 A, B 图片分为 2^{2p-2q} 个 $2^q \times 2^q$ 网格;
- 3) 阶数赋为 2^{2p-2q} , 按同阶搜索算法搜索,得到 A, B 中相匹配的多个子网格对;
- 4) 在每个已得的匹配子网格对中取出一对 (A', B') , 类似方法 1)~3) 将其分为 2^{2q-2r} 个 $2^r \times 2^r$ 阶子网格; 阶数赋为 2^{2q-2r} , 按同阶搜索算法搜索得到新的相匹配的多个子网格对;
- 5) 得到的所有子网格对的位置经(3)式, (4)式计算, 得到速度场。

该算法的流程如图 2 所示。

为比较分级算法和同阶算法的区别,令 N_{old} 为传统算法所做乘法次数, N_{new} 新算法所做乘法次数, 将 $m \times n$ 的图像直接分成若干 $p_2 \times q_2$ 个小网格。令

$$\begin{aligned} m &= n = 2^\epsilon, \\ p_1 &= q_1 = 2^{\epsilon - \epsilon_1}, \\ p_2 &= q_2 = 2^{\epsilon - \epsilon_1 - \epsilon_2}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_2$ 均为自然数,且有 $\epsilon > \epsilon_1 + \epsilon_2$ 。则有

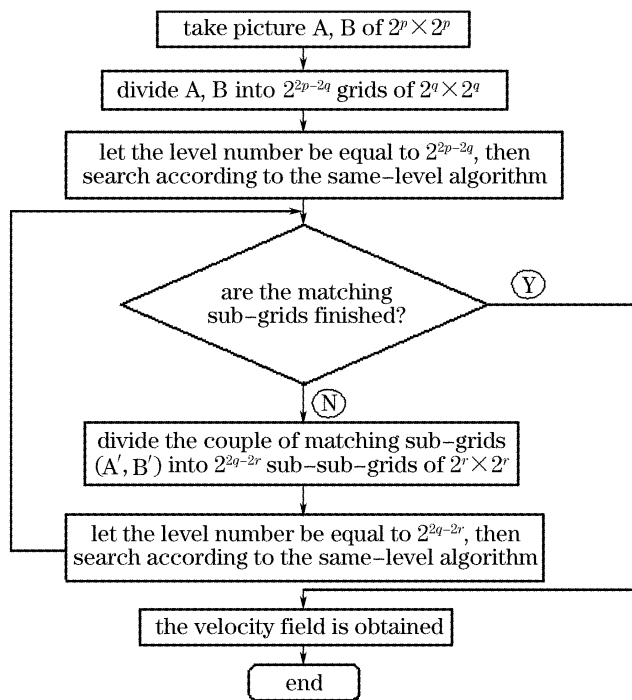


图 2 分级搜索的流程

Fig. 2 Different-level searching flow

$$N_{\text{old}} = mn(n - q_2 + 1)(m - p_2 + 1) = 2^{2\epsilon} (2^\epsilon - 2^{\epsilon - \epsilon_1 - \epsilon_2} + 1)^2, \quad (7)$$

$$N_{\text{new}} = 2^{2\epsilon} [(2^\epsilon - 2^{\epsilon - \epsilon_1} + 1)^2 + (2^{\epsilon - \epsilon_1} - 2^{\epsilon - \epsilon_1 - \epsilon_2} + 1)^2], \quad (8)$$

由(7)式和(8)式可得

$$N_{\text{new}} - N_{\text{old}} = 2^{2\epsilon} [1 - (2^{\epsilon_1} - 1)(2^{\epsilon_2} - 1)2^{2m - 2\epsilon_1 - \epsilon_2 + 1}], \quad (9)$$

由于在实践中所取得 2^{ϵ_1} , 2^{ϵ_2} , $2^{2m - 2\epsilon_1 - \epsilon_2 + 1}$ 的值都要比 1 大很多, 由(9)式可得

$$N_{\text{new}} \ll N_{\text{old}}, \quad (10)$$

因此, 采用分级搜索的方法比传统的同阶搜索方法, 大大减少了运算量, 提高了计算速度。若所分级数适当增加, 则此算法的优点便会更加明显。

4 实验及分析

图 3 是双曝光 CCD 相机所拍摄的两幅相邻时

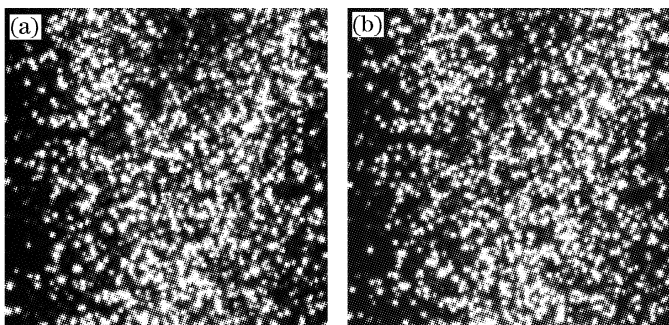


图 3 CCD 拍摄的粉末流场图像

Fig. 3 Picture of powder flow by CCD. (a) t ; (b) $t + \Delta t$

刻的流场照片, 图 4 为通过新算法计算得到的粉末流速度场的图像。

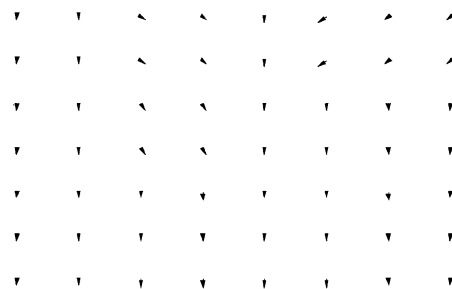


图 4 新算法计算得到的粉末流速度场图像

Fig. 4 Velocity field of powder flow calculated by the new arithmetic

观察图 3 的两张粉末流场图片, 可以发现它们在某些局部区域极为相似, 但是在另一些区域却不尽相同。原因是 CCD 相机的曝光时间间隔很小, 其中运动速度小的粒子(群)形状还未改变得很显著, 而一些运动速度大的粒子(群)形状已发生改变。从图 4 看出, 采用新算法得到的结果还是较为清晰的, 从第三列到第八列的某些粒子(群)是一方面向下运动, 另一方面向中间靠拢的, 这恰好是粉嘴附近的粉末粒子是相对射出的缘故。即左半部分的粒子向右下方出射, 右半部分的粒子向左下方出射, 两股相对的粒子流在中间交汇, 互相碰撞的结果使一部分粒子基本抵消了相向的速度分量, 而变为竖直向下的运动状态。周边的粒子由于出射角度不大而基本上随重力和初速度竖直向下运动。这说明所得结果符合实验, 较为客观地反映了流场内部的运动信息。

5 结 论

提出了改进后的分级式互相关算法, 并应用此算法对由 CCD 相机获取的相邻两瞬间的流场照片进行图像处理, 处理结果较为清晰、真实地反映了粉末流场的运动信息, 同时此算法具有加快运算速度, 提高分析效率的优点。

参 考 文 献

- Li Huishan. Theoretical and Experimental Study on the Interaction of Laser and Metal Powder Flow in the Laser Remanufacturing [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2004. 1~6, 59~71
- 李会山. 激光再制造的光与粉末流相互作用机理及试验研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2004. 1~6, 59~71
- Feng Xiacong, Zheng Shiqin. The development of particle image velocimetry [J]. *Equipment and User*, 2003, **10**(6): 1~3
- 冯晓聪, 郑士琴. 粒子图像测速(PIV)技术的发展 [J]. *仪器仪表用户*, 2003, **10**(6): 1~3
- Wang Yanting, Zhang Yongming, Liao Guangxuan *et al.*. The principle and realization of digital particle image velocimetry [J].

- J. China University of Science and Technology*, 2000, **30**(3): 302~306
王延颢,张永明,廖光焯等. 数字粒子图像速度测量原理与实现方法 [J]. 中国科学技术大学学报, 2000, **30**(3): 302~306
- 4 Wu Longhua, Yan Zhongmin, Tang Hongwu. Determination of the correlation window sizes in correlation analysis of DPIV [J]. *Advances in Water Science*, 2002, **13**(5): 594~598
吴龙华,严忠民,唐洪武. DPIV 相关分析中相关窗口大小的确定 [J]. 水科学进展, 2002, **13**(5): 594~598
- 5 Sun Hequan, Kang Haigui. Processing of DPIV data [J]. *J. Dalian University of Technology*, 2000, **40**(3): 364~367
孙鹤泉,康海贵. DPIV 流场测试技术中的数据处理 [J]. 大连理工大学学报, 2000, **40**(3): 364~367
- 6 Gao Dianrong, Wang Yiqun, Shen Gongxin. DPIV technique and its application in flow field measurement [J]. *Hyd. Pneum and Seals.*, 2001, **89**(5): 30~33
高殿荣,王益群,申功妍. DPIV 技术及其在流场测量技术中的应用 [J]. 液压气动与密封, 2001, **89**(5): 30~33
- 7 Wu Longhua. Optimization of correlation analysis algorithm for DPIV [J]. *J. Hydrodynamics*, 2004, **19**(5): 623~628
吴龙华. 对 DPIV 相关分析算法的优化 [J]. 水动力学研究与进展, 2004, **19**(5): 623~628
- 8 Tian Wendong, Wei Xiaolin, Sheng Hongzhi. Application of DPIV measurement system in physical model tests [J]. *J. Hydrodynamics*, 2001, **16**(2): 211~213
田文栋,魏小林,盛宏至. DPIV 系统在河工模型试验中的应用研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2001, **16**(2): 211~213
- 9 Wei Runjie. Digital Holography Particle Image Velocimetry Research and Application [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautic, 2001. 14~19
魏润杰. 数字全息粒子图像测试技术 (DHPIV) 研究及其应用 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2001. 14~19
- 10 Wei Runjie, Shen Gongxin. The research of DPIV system and its application [J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2003, **17**(2): 88~91
魏润杰,申功妍. DPIV 系统研制及其应用 [J]. 流体力学试验与测量, 2003, **17**(2): 88~91

征 稿 简 则

《中国激光》是由中国光学学会和中国科学院上海光学精密机械研究所联合主办,科学出版社出版的学报类期刊,国内外公开发行。

1. 刊登内容 本刊主要发表我国科技人员在激光理论与技术领域的最新进展,栏目包括:实验技术与元件、激光物理与化学、全息技术、光束传输、光通信及其元器件、测量技术、光纤元件、材料、薄膜技术、激光应用、激光生物学与医学,等等。来稿须是未经发表的学术论著,本刊反对一稿两投。请作者在来稿中注明所投栏目,并注明所属中图分类号。

2. 投稿方式 可直接在中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)注册,或用投稿信箱:submit@siom.ac.cn。投稿勿寄个人,以免延误受理时间。作者投稿 3 个月内未收到本刊处理意见,可另投他刊。请同时提供 6~8 位国内外同行专家的详细通讯方式和研究领域,供送审时参考。

3. 文字要求 全文要求在 5000 字以内。来稿应含中英文题目、摘要、关键词、第一作者简介和导师简介,论文软件可采用 Word,如用其它排版软件请拷贝文本文件(*.TXT)。

4. 参考文献 应引用公开出版物,并仔细核对;欢迎作者充分引用本刊上同行的文献。

5. 基金资助 论文如获省、部级以上的基金资助,须在首页的脚注位置注明基金资助单位全称及批准号。

6. 版面费 遵照中国科协和中国科学院有关文件精神,向录用稿件作者收取适量版面费以聊补本刊的高额亏损。

7. 版权 录用稿件一经刊出,论文版权(含各种介质)均归编辑部所有。本刊向作者酌付稿酬及赠送该期期刊 1 册,抽印本 10 份。

详细的论文排版格式请参见近期的《中国激光》或浏览中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)。

声明:本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》和中国光学期刊网,著作权使用费在奉寄作者稿酬中一次性支付。如有不同意将文章编入上述数据库者,请事先声明,本刊将作适当处理。

承蒙国内外作者的热心支持,本刊得以不断发展,于此谨致谢忱。

《中国激光》编辑部