

中图分类号：TP391.4

论文编号：10006SY1415110

北京航空航天大学
硕士学位论文

折射流场理论及应用

作者姓名 刘婧媛

学科专业 控制科学与工程

指导教师 薛斌党 副教授

培养院系 宇航学院

Refractive Flow Field
Theory and Applications

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: Liu Jingyuan

Supervisor: Associate Prof. Xue Bindang

School of Astronautics
Beihang University, Beijing, China

中图分类号: TP391.4

论文编号: 10006SY1415110

硕 士 学 位 论 文

折射流场理论及应用

作者姓名	刘婧媛	申请学位级别	工学硕士
指导教师姓名	薛斌党	职 称	副教授
学科专业	控制科学与工程	研究方向	模式识别与智能系统
学习时间自	2014年 9 月 1 日	起至	2017年 3 月 10 日止
论文提交日期	2017年 2 月 28 日	论文答辩日期	2017年 2 月 27 日
学位授予单位	北京航空航天大学	学位授予日期	年 月 日

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人或他人为获得北京航空航天大学或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：_____

日期： 年 月 日

学位论文使用授权书

本人完全同意北京航空航天大学有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：_____

日期： 年 月 日

指导教师签名：_____

日期： 年 月 日

摘 要

图像处理和视觉计算技术的快速发展使得光学定量测量技术广泛应用于流场测量领域。稠密光流法是光学定量测量技术中计算图像像素摆动量的主要方法之一。光流法在视觉计算问题中需要三个前提假设：相邻帧之间亮度恒定；相邻帧之间物体运动“微小”；场景中属性一致区域像素点具有相同的运动。而流场测量中像素摆动的物理机理是流场温度随机扰动导致其折射率随机变化，使得光线穿过流场成像时出现图像模糊和像素摆动。显然，流场退化效应造成的图像模糊和像素摆动不符合光流技术的假设。因此，用光流法计算流场退化图像序列中像素偏移量不符合流场退化特性。针对上述问题，本文基于流场中成像退化的物理机制，研究描述像素点动态偏移特性的折射光流模型，分析像素摆动特征，应用于流场关键参数测量。本文的主要工作为以下几个方面：

- (1) 研究了光线穿过流场成像时形成的折射光流模型。首先，研究了流体运动导致像素偏移量的模型，证明了流场微动时出现的摆动量守恒现象；然后，推导了摆动量和折射光流的计算方法；最后，设计实验验证了折射光流模型的有效性。实验结果表明，折射光流模型能够准确检测出空间中的折射流区域，可应用于折射流摆动量的统计特性分析和空间中温度异常区域检测。
- (2) 提出了一种大气湍流强度时空随机起伏条件下的成像仿真方法。首先，将单层湍流模型作为简化模型，分析湍流空间分布及运动对图像产生的影响；然后，将退化图像看作为不同湍流场退化效应的叠加。最后，通过设定空间中和成像路径上湍流的分布和属性，实现了大气湍流强度时空随机起伏条件下的成像仿真。
- (3) 提出了一种基于折射光流模型的大气湍流强度估计方法。首先，基于折射流场模型和超像素分割的方法检测空间中存在大气湍流的区域；然后，利用折射光流方法计算图像像素摆动量；最后，利用像素偏移量与到达角起伏方差和大气湍流强度之间的关系，估计大气湍流强度。不同大气湍流强度下仿真实验结果显示，折射光流法检测大气湍流区域精度高于光流法。在中强起伏大气湍流下折射光流估计的大气湍流强度接近于真值。

关键词： 折射光流，流场测量，大气湍流中成像仿真，大气湍流强度

Abstract

The rapid progress of image processing and visual computing techniques enable optical quantitative measurement techniques to be widely used in the measurements of fluid flow fields. One of the major methods for computing pixel displacements in optical quantitative measurement techniques is dense optical flow. In vision problems, optical flow requires three basic assumptions: pixel intensities should maintain constant between frames; the motion of objects between frames should be minor; pixels subjected to a region or an object should have the same motion pattern. However, the physical mechanism of pixel displacement in fluid measurement is that the fluctuation in temperature causes the random fluctuation of refractive index. When a light ray is passing through the fluid field, there appear image blur and pixel displacements in the image. Obviously, the basic assumptions may not be satisfied if we use optical flow to compute pixel displacements in turbulence degraded images. In this way, the pixel displacements in the images computed by optical flow are not correspondent to the fluid field degradation characteristics. To address this problem, this thesis studies the dynamic displacement characteristics using the refractive flow model, based on the physical mechanism of degradation when imaging through the fluid flow field. Then we study the properties of pixel displacement and apply them to the measurement of key parameters measurements. The main contributions of this thesis are as follows:

- (1) A model of imaging through a fluid flow field and causing refractive flow is studied. First, we study the model of pixel wiggles caused by the motion of fluid flows, and prove that the wiggle features are constant as the fluid flow are moving a very short distance. Then we give the derivation of the computation of wiggle features and refractive flows. Finally, we designed experiments to prove the effectiveness of refractive flow model. Experimental results show that refractive flow model can detect the refractive flow region in the space accurately. This model can be generalized to the analysis of statistical properties of refractive wiggles and to the detection of thermal anomaly regions in the space.
- (2) A method of atmospheric turbulence degraded image simulation method with spatial and

temporal strength fluctuations is studied. First, we analyze the effects of the distribution and motion of turbulence eddies on the images. Then, the degradation effects are treated as the combination of the degradation effects produced by different turbulence fields. Finally, by setting the spatial distributions and motion attributions of turbulence eddies along the imaging path, turbulence degraded images are simulated under the condition of spatial and temporal turbulence strength random fluctuations.

- (3) A method of estimating turbulence strength using refractive flow is proposed. First, we detect and segment atmospheric turbulence regions in the space based on refractive flow model and super-pixel segmentation algorithms. Then, pixel displacements are computed for each of the segmented regions based on the refractive flow model. Finally, turbulence strength of each region is estimated in terms of the relationship between pixel displacements and the variance of angle of arrival as well as turbulence strength. Experiment results of simulation data at different turbulence strength show that refractive model achieve a higher accuracy compared with optical flow. The turbulence strength results estimated by refractive flow under the condition of moderate to strong turbulence strength are more close to ground truth.

Key words: refractive flow, fluid field measurement, imaging in atmospheric turbulence simulation, turbulence strength

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 流场测量的研究现状	2
1.2.2 光流法的研究现状	3
1.3 本论文研究思路及研究内容	5
1.4 论文结构	6
第二章 折射光流场理论	7
2.1 折射流场模型	7
2.2 摆动不变量推导	8
2.3 折射流计算	9
2.3.1 摆动量特征计算	10
2.3.2 折射流计算	10
2.3.3 概率折射流	10
2.4 实验	11
2.4.1 定性验证	11
2.4.2 摆动量统计特性分析	13
2.4.3 温度异常检测	15
2.5 本章小结	17
第三章 大气湍流成像仿真	19
3.1 引言	19
3.2 大气光学湍流效应简介	20
3.3 仿真方法	21
3.3.1 空间强度起伏条件下的仿真方法	21
3.3.2 时空强度起伏条件下的仿真方法	22
3.4 仿真原理	24
3.4.1 湍流分布模拟原理	24
3.4.2 畸变仿真原理	25
3.4.3 模糊仿真原理	26
3.5 实验	27

3.5.1 空间强度起伏仿真结果	27
3.5.2 时空强度起伏仿真结果	29
3.6 本章小结	34
第四章 基于折射光流的湍流强度测量	35
4.1 引言	35
4.2 图像法测量流场强度原理	36
4.3 测量区域选取方法	37
4.3.1 方差矩阵的 SLIC 分割.....	37
4.3.2 区域聚类	38
4.4 实验	39
4.4.1 仿真数据测量结果	39
4.4.2 实际拍摄数据测量结果	44
4.5 本章小结	46
第五章 结论与展望	47
5.1 结论	47
5.2 展望	47
参考文献	49
攻读硕士学位期间取得的学术成果	53
致谢	54

图 目 录

图 1 流体运动产生折射流场示意图	7
图 2 实验场景设定示意图	12
图 3 (a)原图像; (b)Munsell 颜色编码; (c)摆动量矢量场; (d)摆动量彩色显示; (e)折射流矢量场;	12
图 4 (a)实际拍摄湍流退化图像; (b)采样点选择; (c)摆动量计算结果; (d)折射流计算结果	14
图 5 五个采样点处摆动量水平和垂直分量分布拟合	15
图 6 (a)光流法检测结果; (b)折射流温度异常检测结果	16
图 7 (a)光流法检测结果; (b)折射流温度异常检测结果	17
图 8 湍流介质对波阵面的作用	20
图 9 到达角起伏示意图	21
图 10 空间强度起伏条件下仿真流程	22
图 11 湍涡空间分布与虚拟成像面位置示意图	23
图 12 时空强度起伏条件下仿真流程	23
图 13 空间强度起伏仿真原图像	27
图 14 湍涡分布示意图	28
图 15 (a)平面内强度均匀分布的水平偏移量矩阵; (b)强度均匀分布的垂直偏移量矩阵; (c)强度不均匀分布条件下水平偏移量矩阵; (d) 强度不均匀分布条件下垂直偏移量矩阵	29
图 16 (a)弱起伏空间强度起伏下仿真结果; (b)中强起伏空间强度起伏下仿真结果	29
图 17 时空强度起伏仿真原图像	30
图 18 (a)沿光线传播路径湍涡分布; (b)湍涡空间位置; (c)按照距离折算后的湍涡对成像影响	31
图 19 水平和垂直偏移量与子区间的畸变仿真结果	32
图 20 时空湍流强度起伏下仿真结果	33
图 21 强度均匀畸变仿真结果	33
图 22 (a) 强度均匀仿真畸变区域; (b) 强度不均匀仿真畸变区域	34
图 23 湍流强度估计流程图	37
图 24 (a)水平偏移量方差; (b)垂直偏移量方差	40
图 25 (a)折射流方差分割结果; (b)光流方差分割结果	40
图 26 (a)折射流显著区域检测结果; (b)光流法显著区域检测结果	40
图 27 (a)采样点示意图; (b)采样点所在区域示意图	41
图 28 (a)弱湍流区域 1 测量结果; (b)弱湍流区域 2 测量结果; (c)弱湍流区域 3 测量结果; (d)中强湍流区域 1 测量结果; (e)中强湍流区域 2 测量结果; (f)中强湍流区域 3 测量结果	43
图 29 (a)折射流水平分量方差分布; (b)折射流垂直分量方差分布	44
图 30 区域分割结果	45
图 31 湍流区域聚类结果	45

表 目 录

表 1 五个采样点统计参数计算结果	15
表 2 大气湍流参数	27
表 3 成像设备参数	27
表 4 成像区间湍涡尺度设定（单位：像素）	30
表 5 三个采样点的参数	41
表 6 弱起伏湍流强度测量结果	42
表 7 中强起伏湍流强度测量结果	42
表 8 湍流采样区域强度测量结果	45

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

流体的探测在多个领域中被广泛研究，对航空航天工程、燃烧研究、大气物理等领域的重要研究具有重要意义。流体的运动可以分为规则运动形式的层流和不规则运动形式的湍流。人们对流体的研究方向侧重于对流体进行测量和显示。流体测量的参数主要包括空间密度分布、流速、压强等。流体显示是通过图像对空气或水等介质中的流动现象进行显示，并根据显示结果作流场物理特性的定量测量。流体探测和可视化是分析流体流动现象的主要方法，为流体力学的研究问题中的热点之一。

早期的研究中采用引入外来物质或光学显示的方法测量流场，这些方法中使用的物理探测设备非常昂贵，而且通常需要严格校准光路，因此多用于室内的实验而很难应用到实际的野外测量。近年来随着计算机视觉技术的发展，越来越多的研究侧重于从分析降质图像的角度降低对昂贵设备的依赖^[1-4]。由于流场中密度的不均匀分布，导致了各处折射率的不同，光在流场中传播时发生随机偏折，最终产生图像中的畸变和模糊等退化效应^[5]。这种通过退化图像的研究方法作为分布式、非接触的流场测量方法之一，得到了更广阔的发展。

在光学显示的方法中，背景纹影法(Background Oriented Schlieren, BOS)通过计算背景上斑点的偏移量来定量计算光线偏移量^[6]。借鉴这种思想，可以采用光流法代替背景纹影法复杂的光路设置，即通过光流法计算由流体运动引起的折射变化。前人对采用光流法检测流体已做出了大量的工作^[1-4]，并通过实际实验作出初步验证。同时，仍然存在一些不完善的问题，例如由于湍流成像时存在光强起伏，光流法亮度不变的基本假设不能完全满足，需结合湍流模型作出改进。此外，由于流体透明不可见，成像面上背景投影点的运动与流体的运动并非直接对应，需要建立流体运动产生的光流模型。

本文以文献[7]中折射光流的模型为基础，分析流体在图像中产生折射光流的模型，并以该模型为基础实现存在时空湍流强度起伏条件下的大气湍流成像中仿真和湍流场强度的测量。在仿真的时候，将折射流场整体看作多个流体单独作用产生的折射流场的叠加，对于大气湍流场成像即为空间不同位置湍涡产生湍流效应的叠加。在测量湍流场强度时，采用折射流场的模型计算图像中像素偏移量，然后利用到达角起伏方差与像素偏移量方差之间的关系和到达角起伏方差与湍流场强度之间的关系进行计算。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 流场测量的研究现状

现有的流场探测和显示技术可以根据是否引入外来物质分为两大类^[8]：在流场中引入示踪粒子或引入能量的显示方法，以及光学显示测量方法。前者的外来物质和能量包括颜料、烟雾和火花、电子束、辉光放电等，通过这些物质的运动来体现流体的运动，称为粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry)^[9]。光学显示测量方法通常包括声层析成像、多普勒雷达和纹影摄影等技术，它们主要检测流体对穿过光线的偏折，通过折射率的变化示踪。

流场测量的方法按照测量方式可以分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量仪器，如毕托管、热线风速仪^[10]等，直接将传感器探头置于流场中。例如探空气球法采用温度传感器^[11]，通过测量高空的温度变化来间接测量流体强度。传感器本身会对流场形成干扰，且流场对传感器探头的不断冲刷容易造成设备的磨损。为了避免接触式测量的弊端，人们引入非接触式测量方法。激光多普勒雷达^[12]为常用的非接触式测量方法，利用雷达传输和接受信号受到流场的影响程度与流场强度成正比，来实现流场强度的测量。激光多普勒使用条件限制较少，但设备较昂贵，且每一时刻只能单点测量而不能获取同一时刻流场的整体信息。

人们为了获得流场更全面的信息，逐渐注重研究整体测量的方法。粒子图像测速法^[9]是一种非接触式的全场流场测量方法，比较适用于非定常的复杂流场。测量时首先在流场中加入一定浓度的示踪粒子，然后用脉冲激光将示踪粒子投影在垂直于激光方向的 CCD 上，曝光两次得到粒子图像。然后提取两帧中相关度较大的粒子，采用互相关法计算粒子的运动速度，最终可以将流体强度通过瞬时和平均速度的方差表示。该方法虽然实现了多点测量，但需要在流场中注入外来的粒子。另一种非接触式的多点测量方法为闪烁法^[13]。该方法通过一个激光的发射和接受装置获取激光在流场中传输的强度闪烁指数，进一步计算流场强度。闪烁法和粒子图像测速法对测量设备的依赖导致它们很难应用到野外或长距离的测量中，因此很难在实际测量中使用。

在全球、非接触流体测量的研究中，背景纹影技术(BOS)是基于 PIV 技术和纹影技术的优点的一种新型流场测量技术^[14]。背景纹影技术利用气体折射率与密度之间的关系，当光线在密度不均匀的介质中传播时会向折射率增加的方向偏折。测量时需要分别获得一个不存在密度梯度时的背景参考图像，和一个存在密度梯度时背景变形的图像，借助

互相关算法计算出图像中的位移。通过选取一定切面内的位移量，可以进行滤波反投影重建来获取流场信息。背景纹影法由于具有设备简单、不易受光照变化影响等优点，被广泛应用于流场温度^[15]、密度^[16]等参数的测量。

近年来，人们越来越多的关注通过成像的方法，利用流场对图像产生的降质反演出流场的相关信息。在成像距离较短的条件下可以人工设定成像背景，在物体表面放置一个点光源或者纹理图案^[17, 18]，通过跟踪目标在图像中位置的变化体现流场的变化。在成像距离较长的条件下，利用自然背景中的纹理，在成像的图像序列中利用光流法等运动检测的方法提取畸变量^[1, 2]，进而估计空间中流场的变化。这类方法最大的优点为仅需要用成像设备对背景拍摄图像序列，然后借助图像处理的方法进行后续计算，很大程度上简化了实验条件。

1.2.2 光流法的研究现状

光流的概念是于 1950 年由 Gibson 提出的。光流是指三维空间中物体的运动在二维平面中投影产生像素运动的瞬时速度。假设在一个以相机为原点的坐标系中，一个 3D 物体表面上的点沿一个三维路径 $\tilde{X}(t)$ 运动，当投影到 2D 的成像平面上时，产生一个二维的路径 $\vec{x}(t) = (x(t), y(t))^T$ ，其瞬时速度为 $d\vec{x}(t)/dt$ 。平面上所有点在二维平面上的瞬时速度构成一个运动矢量场^[19]。光流计算的目的就是从随时间变化的图像亮度中估计出运动矢量场。根据是否对每一个像素计算运动矢量，可以将光流法分为稀疏光流法^[20, 21]和稠密光流法^[22-24]。按照实现方法可以分为基于梯度的方法^[21, 24]、基于能量的方法^[25, 26]和基于相位的方法^[27, 28]等。接下来分别对几种主要方法作简要介绍。

(1) 基于梯度的方法

基于梯度的光流法通过图像亮度的时空导数计算瞬时速度。一阶导数来源于“亮度不变假设”，即在图像变化的过程中，亮度保持不变而仅位置发生改变：

$$I(\vec{x}, t) = I(\vec{x} - \vec{v}t, 0) \quad (1.1)$$

其中 $\vec{v} = (u, v)^T$ 。对(1.1)进行泰勒展开，即为梯度约束方程：

$$\nabla I(\vec{x}, t) \cdot \vec{v} + I_t(\vec{x}, t) = 0 \quad (1.2)$$

其中 $\nabla I(\vec{x}, t) = (I_x(\vec{x}, t), I_y(\vec{x}, t))^T$ ， $I_t(\vec{x}, t)$ 代表 $I(\vec{x}, t)$ 关于时间的偏导数。梯度约束方程为关于速度矢量两个分量的线性方程，仍需引入其他的约束计算速度矢量。比如，引入

二阶梯度（ I 的 Hessian 矩阵）建立方程组^[23, 29]：

$$\begin{bmatrix} I_{xx}(\vec{x}, t) & I_{yx}(\vec{x}, t) \\ I_{xy}(\vec{x}, t) & I_{yy}(\vec{x}, t) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_{tx}(\vec{x}, t) \\ I_{ty}(\vec{x}, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

二阶梯度为零的条件需要假设物体运动没有伴随旋转或膨胀等，该假设条件较严格。

另一种约束方法通过假定光流场在局部具有较高的相关性。比如假设在一个点较小的邻域 Ω 内 $\vec{v}(\vec{x})$ 为常数，定义窗口内的权重函数 $W(\vec{x})$ 和目标方程：

$$\sum_{\vec{x} \in \Omega} W^2(\vec{x}) \left[\nabla I(\vec{x}, t) \cdot \vec{v} + I_t(\vec{x}, t) \right]^2 \quad (1.4)$$

然后利用最小二乘法使(1.4)最小化^[21, 30]。又比如 Horn-Schunck(HS)光流法中借助光流场在各处平滑变化的特性，引入全局平滑约束，在优化方程中引入正则项^[22-24]：

$$\int_D \left(\nabla I \cdot \vec{v} + I_t \right)^2 + \lambda^2 \left(\|\nabla u\|_2^2 + \|\nabla v\|_2^2 \right) d\vec{x} \quad (1.5)$$

HS 光流法作为经典的稠密光流法，后续的研究中经常以它为基础进行改进。例如，为了改进 HS 正则项中二次方的形式容易受到异常值影响的问题，鲁棒光流法通过采用 Lorentzian 方程作为正则项^[31]，使高于一定阈值的异常值影响趋于零。Brox 等人在目标方程的数据项满足亮度不变假设的基础上，同时引入了梯度不变来降低光照变化的影响，同时保留较大的位移^[32]。Sun 等人的对比研究表明对光流场进行中值滤波处理会大幅度提高精确度^[33]，因此在 HS 目标方程的基础上额外添加一个非局部的平滑项，可以达到中值滤波的效果。

(2) 基于能量的方法

基于能量的光流法也称为基于频率的光流法，因为它们涉及到频域内速度调节滤波器的输出能量^[25, 26, 34]。(1.1)的傅里叶变换为：

$$\hat{I}(\vec{k}, \omega) = \hat{I}_0(\vec{k}) \delta(\omega + \vec{v}^T \vec{k}) \quad (1.6)$$

其中 $\hat{I}_0(\vec{k})$ 为 $I(\vec{x}, 0)$ 的傅里叶变换， ω 代表时域频率， $\vec{k} = (k_x, k_y)$ 代表空域频率。局部能量通过 Gabor 能量滤波器提取^[35]。若将 Gabor 能量滤波器关于频率 (k_x, k_y, ω) 的期望相应记为 $R(u, v)$ ，则可以通过最小二乘法使期望能量与实际能量之间的差别最小化来求解 (u, v) 。

(3) 基于相位的方法

相位光流法中将速度分量定义为正交于带通速度谐波滤波器的输出的相位，采用相位的目的是当 3D 场景中存在较小且规律的运动干扰时，带通滤波器的相位输出相对于幅值输出更稳定。带通滤波器将输入信号分解为尺度、速度和方向^[27]：

$$R(\vec{x}, t) = \rho(\vec{x}, t) \exp\{i\phi(\vec{x}, t)\} \quad (1.7)$$

速度分量与相位正交可以通过 $\vec{v}_n = s\vec{n}$ 表示，其中速度大小和方向分别为：

$$s = \frac{-\phi_t(\vec{x}, t)}{\|\nabla\phi(\vec{x}, t)\|}, \quad \vec{n} = \frac{\nabla\phi(\vec{x}, t)}{\|\nabla\phi(\vec{x}, t)\|} \quad (1.8)$$

结合滤波器不同通道速度分量的输出，对每个局部区域拟合出一个线性速度模型。最后通过稳定性和 SNR 约束筛选速度的最优解。Gautama 和 Van Hulle 等人采用了类似的方法，但是计算相位的空间梯度来代替时空梯度^[36]，这样可以量化相位的非线性度，并以此定义计算结果的置信度。Wadhwa 等人将相位与运动之间的联系结合金字塔^[37]，直接从相位的变化中估计运动信息。

光流法经常被应用于目标识别和目标跟踪等任务中^[38]。在分析流场的工作中也经常采用光流法作为运动检测的手段，比如采用光流法分析 PIV 图像^[39, 40]。此外，光流法广泛应用于计算湍流对图像产生降质，例如湍流图像的复原^[3]、测量湍流强度^[1]、估计成像距离^[2, 4]等。

1.3 本论文研究思路及研究内容

当光在流场中传播时，由于流体的不规则运动和对光的折射作用，最终引起成像面中像素的摆动，这种像素的摆动提供了通过图像反演流体特性的基础。在图像法测量流场参数时，摆动的剧烈程度反映了流体运动的剧烈程度，因此可以通过计算像素摆动量的大小间接得到流体强度。在进行仿真时，也是根据设定流场的强度在图像中模拟出相应的畸变量。

综上所述，本文的研究思想是，首先简化模型，分析一个单层的流体微动引起光线偏折变化在图像中产生的折射光流，得到折射光流与流体深度和运动幅度之间的关系。在折射流场应用部分，通过对流场空间分布进行设定，将不同深度和运动幅度流体产生的图像降质进行叠加，实现平面内和沿光线传播路径都存在湍流强度起伏的湍流中成像仿真。此外，利用折射流场模型计算图像中的像素偏移量，结合到达角起伏方差的公式，

可以实现图像法测量流场强度参数。

本文主要针对以下几个内容进行研究：

(1) 折射流场成像模型的分析

分析当单层流体运动造成光路的变化时，背景上的点在成像平面上位置的变化。首先研究流体运动产生图像中摆动量的模型，证明不同时刻的摆动量守恒，然后定量推导摆动量和折射光流的计算方法。最后通过实验验证折射流场成像模型的有效性，并分析摆动量的统计特性。

(2) 存在时空强度起伏的大气湍流中成像仿真

针对现有的方法中采用沿路径平均的湍流强度实现仿真的问题，提出在空间中存在湍流强度起伏的仿真方法。在大气湍流中成像仿真时，可以将退化图像看作为不同深度和不同运动参数的单层流体对图像产生退化效应的叠加。通过设定成像路径上湍流的分布和属性，实现存在时空湍流强度起伏的成像仿真。

(3) 实现通过折射流场测量湍流强度的方法

折射流场模型提供了一种计算图像像素偏移量的方法。利用图像偏移量与到达角起伏方差之间的联系，以及到达角起伏方差与湍流强度之间的联系，间接通过折射光流估计流场强度信息。通过对不同强度下的仿真图像序列计算，验证基于折射光流估计湍流强度的结果。

1.4 论文结构

本文的各章节安排如下：

第一章，绪论。描述折射流场研究目的，分析国内外研究现状，介绍本文研究内容。

第二章，折射流场模型建立。首先分析简化的单层流体中光路模型，证明摆动量守恒，然后推导摆动量和折射流计算公式。最后通过实验验证模型有效性。

第三章，大气湍流成像仿真。首先介绍模拟空间流场分布形式的方法，分析湍流成像时畸变和模糊的退化效应以及分别的仿真方法，然后介绍按照流场分布将单个湍流产生的效应叠加的方法。最后展示不同起伏强度下的仿真实验结果。

第四章，基于折射光流测量流场强度。首先推导流场强度与图像偏移量之间的表达式，然后介绍通过分割和聚类确定测量区域的过程。最后通过仿真和实际拍摄的湍流图像序列验证折射光流测量流场强度的有效性，并与光流法的测量结果对比。

第五章，总结本文的工作，并提出对以后工作的展望。

第二章 折射光流场理论

本节中以文献^[7]中的折射流模型为基础，研究流体运动导致光线折射的变化，在成像平面中产生折射流的模型。首先分析光线在单层流体中传播的路径，以及当空气中的流体运动时该路径的变化，得到流体运动引起图像中摆动量的模型，根据几何关系证明同一视角不同时间的摆动量守恒。然后推导摆动量及概率折射流的计算公式。最后通过流场可视化实验定性验证该折射流计算方法的有效性，分析折射流模型中摆动量的统计特性，并将折射流模型应用到场景温度异常检测中。

2.1 折射流场模型

空气折射率的不均匀分布导致背景成像时变形，而折射率随时间的变化导致视频中出现微小运动。通常几种因素会导致空气中流场折射率的变化，例如空气可能静止但是局部温度发生改变。本文中假设折射率的变化仅来源于流体单元在短时间 $[t, t + \Delta t]$ 内的无规则运动，即假设在很短的时间间隔 Δt 内流体的形状、温度等参数都不发生改变，图像中的变化均由流体的运动引起^[7]。该假设在视频帧率足够高的条件下即可完全满足。另一个假设是相机始终为静止的，相机和背景之间存在一个厚度可忽略不计的单层折射流体。根据以上的假设可以建立图 1 中单层流体运动产生摆动量的模型。

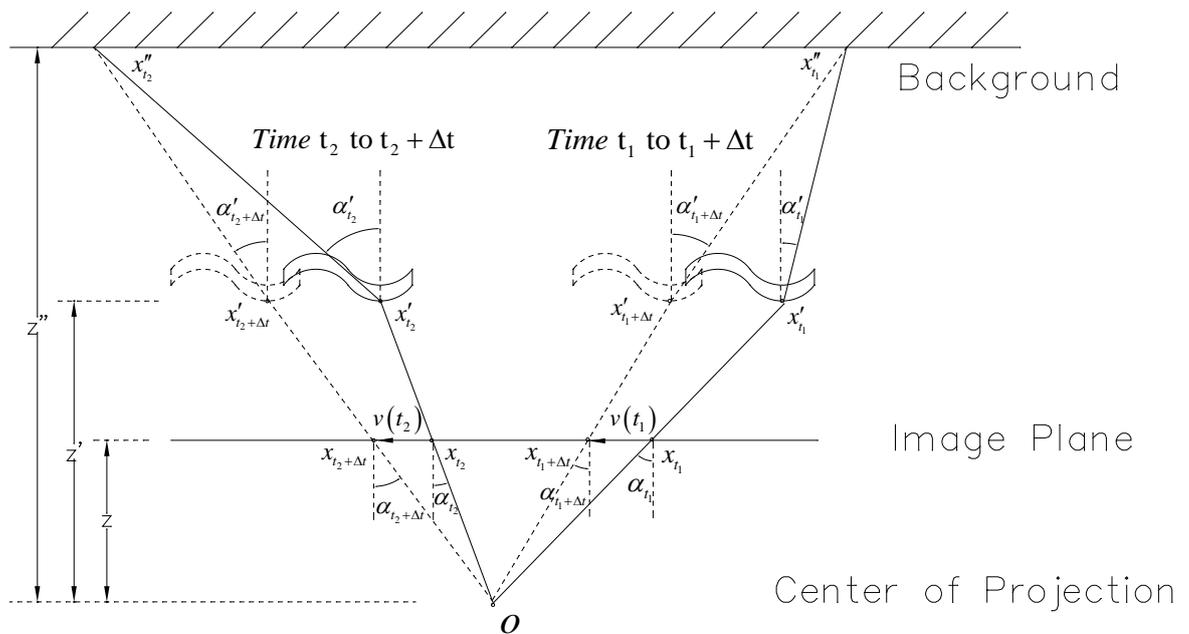


图 1 流体运动产生折射流场示意图

图 1 中，相机的中心记为 o ，用 x_{t_i} 表示 t_i 时刻成像平面上的点， x'_{t_i} 表示流体表面上的点， x''_{t_i} 表示背景上的点。成像面、流体表面和背景的深度分别为 z 、 z' 和 z'' 。记 α_{t_i} 和 α'_{t_i} 分别为成像面上的入射角和流体表面上的折射角。光路的设定为，在 t_i 时刻背景上的点 x''_{t_i} 经过流体表面 x'_{t_i} 点处折射，汇聚在相机中心，与成像平面的交点为 x_{t_i} 。经过 Δt 仍然是背景上的同一个点 x''_{t_i} 发出的光线，经过流体表面折射汇聚在相机中心，假设这条光线与流体表面的交点为 $x'_{t_i+\Delta t}$ ，与成像平面的交点为 $x_{t_i+\Delta t}$ 。需要说明的是，虽然假设很短的时间间隔内流体的形状不发生改变，但是 x'_{t_i} 与 $x'_{t_i+\Delta t}$ 不一定对应流体表面上同一个点。

随着流体从 t_i 时刻（实线位置）运动到 $t_i + \Delta t$ 时刻（虚线位置），背景上的某一个点在成像平面上从一个位置移动到了另一个位置，产生了可以观察到的摆动 $v(t_i)$ 。“摆动量守恒”的概念为，如果一个流体在很短的时空窗内以匀速移动，则在连续帧内对应的摆动特征也随流体移动。

该模型用于计算流体运动产生图像中像素的运动时，其相对于光流法的优点在于降低了对亮度不变的要求，从图 1 中可以看出，从 t_1 到 t_2 时刻，流体表面折射的是来自于背景上不同的两个点 x''_{t_1} 和 x''_{t_2} 发出的光线，对应平面上的 x_{t_1} 和 x_{t_2} 两个点很可能具有不同的亮度特征，此时若采用光流法会降低计算精确度。然而从 t_1 到 t_2 时刻这段较短的时间内，流体的运动特性可以认为没有发生改变，即摆动量 $v(t_1)$ 等于摆动量 $v(t_2)$ 。通过采用摆动量不变代替亮度不变，相当于从背景的亮度特征空间转化到了在流体的运动特征空间进行计算。通过匹配摆动量得到的折射流结果更符合流体的运动特性。

2.2 摆动不变量推导

本小节中，我们用图 1 中 t_1 和 t_2 时刻的摆动量证明摆动量守恒。当 α_{t_i} 很小的时候，其满足：

$$\tan \alpha_{t_i} \approx \alpha_{t_i} = (x_{t_i} - o_j) / z = (x'_{t_i} - o_j) / z' \quad (2.1)$$

根据 Snell 定律，可将折射角近似为一阶加项：

$$\alpha'_{t_i} = \alpha_{t_i} + \Delta \alpha_{t_i} \quad (2.2)$$

再利用折射角部分的几何关系，投影到背景上的点的位置为：

$$x_t'' = x_t' + (z'' - z') \cdot (\alpha_t + \Delta\alpha_t) \quad (2.3)$$

由于 $x_{t+\Delta t}' - x_t'$ 与成像面上的摆动量满足相似三角形的关系，通过证明 $x_{t+\Delta t}' - x_t'$ 为常数即可证明摆动量不变的假设。利用(2.3)的守恒：

$$x_{t+\Delta t}' + (z'' - z') \cdot (\alpha_{t+\Delta t} + \Delta\alpha_{t+\Delta t}) = x_t' + (z'' - z') \cdot (\alpha_t + \Delta\alpha_t) \quad (2.4)$$

经过移项：

$$x_{t+\Delta t}' - x_t' = -(z'' - z') \cdot (\alpha_{t+\Delta t} - \alpha_t) - (z'' - z') \cdot (\Delta\alpha_{t+\Delta t} - \Delta\alpha_t) \quad (2.5)$$

根据(2.1)：

$$\begin{cases} \alpha_{t+\Delta t} = \frac{x_{t+\Delta t}' - o}{z'} \\ \alpha_t = \frac{x_t' - o}{z'} \end{cases} \Rightarrow \alpha_{t+\Delta t} - \alpha_t = \frac{x_{t+\Delta t}' - x_t'}{z'} \quad (2.6)$$

将(2.6)代入(2.5)并移项，即可推出：

$$x_{t+\Delta t}' - x_t' = -\frac{z'(z'' - z')}{z''} \cdot (\Delta\alpha_{t+\Delta t} - \Delta\alpha_t) \quad (2.7)$$

由于假设加项仅与流体局部表面性质有关，与入射角或视场都无关，因此公式(2.7)说明 $x_{t+\Delta t}' - x_t'$ 为常数，即“摆动量不变”成立。

2.3 折射流计算

折射流计算的目的是从观察到的图像序列 $I(x, y, t)$ 中计算空间中流体运动在图像中投影的运动矢量 $u(x, y, t)$ 。如前文所述，与流体运动相对应的是摆动特征 $v(x, y, t)$ 而不是亮度特征 $I(x, y, t)$ 。因此，在计算流体运动产生的折射流时包含两个步骤：

- (1) 利用图像亮度特征 $I(x, y, t)$ 计算摆动特征 $v(x, y, t)$ ；
- (2) 利用摆动特征 $v(x, y, t)$ 估计折射流 $u(x, y, t)$ 。

接下来分别讨论这两个计算过程。

2.3.1 摆动量特征计算

我们采用光流法从图像序列中计算摆动特征 $v(x, y, t)$ 。根据光流法的“亮度不变假设”，图像中亮度的变化都是由空域中水平或竖直的位移 $\vec{v} = (v_x, v_y)$ 引起的，即：

$$I(x, y, t + dt) = I(x - v_x dt, y - v_y dt, t) \quad (2.8)$$

基于以上的亮度不变方程，计算运动矢量 \vec{v} 的常规方法就是最小化光流方程：

$$\tilde{v} = \arg \min \sum_x \alpha_1 \|I_x v_x + I_y v_y + I_t\|^2 + \alpha_2 \left(\left\| \frac{\partial v}{\partial x} \right\|^2 + \left\| \frac{\partial v}{\partial y} \right\|^2 \right) \quad (2.9)$$

2.3.2 折射流计算

令 u_x 和 u_y 分别为图像中观测出的折射流沿水平和竖直向的分量。根据 2.2 节中的证明，我们可以将摆动量不变方程定义为：

$$v(x, y, t + \Delta t) = v(x - u_x \Delta t, y - u_y \Delta t, t) \quad (2.10)$$

除了采用的是摆动量 \vec{v} 而不是亮度特征 I 以外，摆动量不变方程与亮度不变方程有完全相同的形式。这表明用摆动量按照光流的算法就可以计算出折射流 \vec{u} ，即通过优化如下的方程计算：

$$\tilde{u} = \arg \min \sum_x \beta_1 \left\| \frac{\partial v}{\partial x} u_x + \frac{\partial v}{\partial y} u_y + \frac{\partial v}{\partial t} \right\|^2 + \beta_2 \left(\left\| \frac{\partial u}{\partial x} \right\|^2 + \left\| \frac{\partial u}{\partial y} \right\|^2 \right) \quad (2.11)$$

公式(2.11)与 Horn-Schunck 光流方程^[24]非常相似，然而由于热空气等流体没有刚体那样明显的边缘，我们采用了 L2 范数来规范化，而不是光流计算中常用的 L1 范数等鲁棒惩罚方程。此外，我们还采用了光流计算中常用的多尺度迭代算法。

这种计算方法的缺点是对噪声比较敏感，由于光流的孔径问题，在图像中比较平滑的区域计算出的运动信息可靠性较低。针对这个问题，我们考虑采用概率模型求解。

2.3.3 概率折射流

我们希望能在计算折射流的同时估计不确定度。假设有一种背景，在水平方向上平滑而在竖直方向上有比较丰富的纹理，由于孔径问题，计算出来的折射流在水平方向上的分量主要为噪声，而竖直方向上的分量很少受到干扰。因此，若能估计出不确定度，就可以给不确定的折射流较低的权值，以此增加算法的鲁棒性。采用概率折射流的改进

算法分为以下计算摆动量均值与方差和对流体计算方程调整权值两个步骤。

第一个步骤为计算摆动量特征概率分布的均值和方差。首先将(2.9)改写为一个后验分布的形式：

$$P(v|I) = \exp\left(-\sum_x \alpha_1 \left\| \frac{\partial I}{\partial x} v_x + \frac{\partial I}{\partial y} v_y + \frac{\partial I}{\partial t} \right\|^2 + \alpha_2 \left\| \frac{\partial v}{\partial x} \right\|^2 + \alpha_3 \left\| \frac{\partial v}{\partial y} \right\|^2\right) \quad (2.12)$$

其中 $P(v|I)$ 是高斯分布，并且 $P(v|I)$ 的均值 \tilde{v} 就等于原始光流方程(2.9)的解 \bar{v} 。

接下来计算 $P(v|I)$ 的方差。实际计算时，若对每个像素计算协方差矩阵计算量很大，因为需要对每个光流矢量计算边缘概率分布。为了降低计算量，我们把所有的光流矢量抽成列向量，然后计算它的协方差。

假设 \tilde{v} 和 Σ_v 分别为由 2.3.2 节计算出摆动量的均值和方差，则可将折射流计算方程中引入方差权重：

$$\tilde{u} = \arg \min \sum_x \beta_1 \left\| \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} u_x + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y} u_y + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} \right\|_{\Sigma_v}^2 + \beta_2 \left(\left\| \frac{\partial u}{\partial x} \right\|^2 + \left\| \frac{\partial u}{\partial y} \right\|^2 \right) + \beta_3 \|u\|^2 \quad (2.13)$$

其中 $\|x\|_{\Sigma}^2 = x^T \Sigma^{-1} x$ 为马氏距离的平方。在这个公式中数据项被摆动量的方差重新分配了权重，在一些例如低对比度或者平滑区域或者仅有一维结构背景的区域中，比较不确定的摆动量特征在方程中的权值更小。为了进一步提高鲁棒性，还要限制矢量 \tilde{u} 的幅度来避免出现幅值过大的折射流矢量。此外，(2.13)中仍然存在二次型，这样我们可以把 \tilde{u} 的后验分布看作为高斯分布，然后计算折射流的方差。这个方差可以用于衡量折射流计算结果的可靠性。

2.4 实验

2.4.1 定性验证

在定性验证折射流计算的方法时我们采用电吹风模拟流体，因为电吹风产生的热风可近似为单层折射流体。成像背景采用棋盘格纹理。实验中的变量有三个：（1）流场强度，通过吹风机的个数（1个或2个）和档位调节；（2）流体深度，电吹风的位置从距离相机 0.5 米的位置以 0.5 米为步长递增；（3）流体运动方向，设定为相对于相机从右向左和竖直向上。实验时用摄像机（型号：BASLER acA1920-155um，帧率：150fps）采集得到 2048*2048 分辨率的.raw 格式图像序列。实验场景的设定示意图如图 2 中所示。

将图像序列使用 Matlab2014 转化成帧率为 25 的.avi 格式视频。

我们采用矢量箭头和 Munsell 颜色图^[38]将流场可视化。Munsell 颜色图对矢量进行编码，用饱和度表示矢量大小，颜色表示方向。矢量箭头需要对速度矢量进行采样后显示，而 Munsell 颜色图可以显示稠密的运动信息。

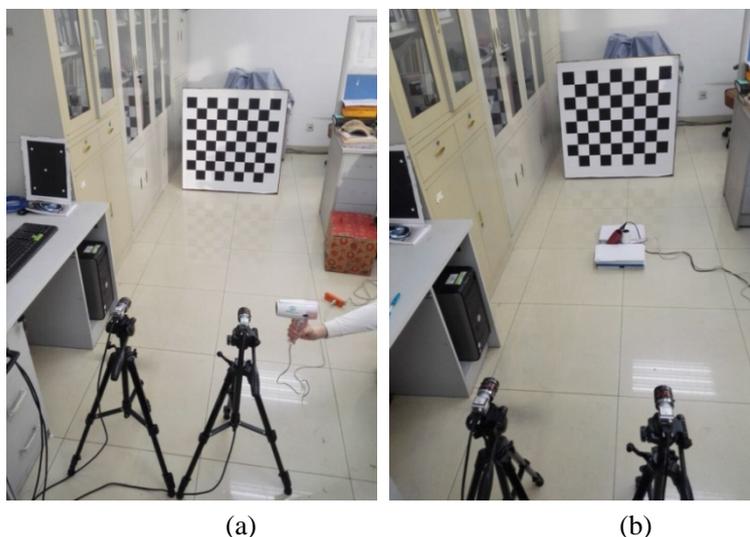


图 2 实验场景设定示意图

以两个吹风机竖直向上、距离相机 1.5m 时的计算结果为例，分别将摆动量（光流场）与折射流场用 Munsell 颜色图和矢量箭头表示，如图 3 所示。

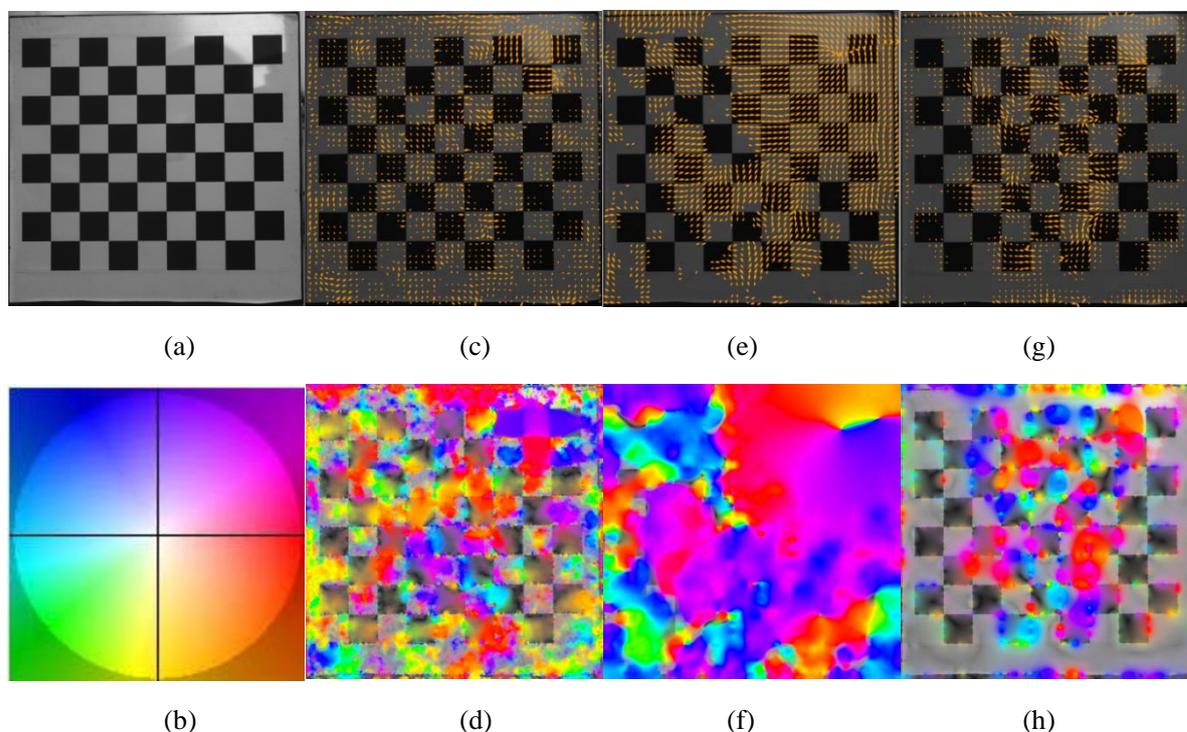


图 3 (a)原图像；(b)Munsell 颜色编码；(c)摆动量矢量场；(d)摆动量彩色显示；(e)折射流矢量场；(f)折射流彩色显示；(g)概率折射流矢量场；(h)概率折射流彩色显示

棋盘格的实验结果表明, 摆动量中矢量的方向非常随机, 而折射流的方法计算出的矢量具有更好的局部连续性。棋盘格图案的黑色格和白色格内部为平滑区域, 该区域容易受到噪声干扰, 计算出的矢量具有较低的置信度, 采用概率模型后滤除了平滑区的一些矢量, 仅保留边缘处更可靠的运动矢量。按照图 2(b)中的实验条件, 折射流场的矢量应集中分布在棋盘格中央位置而且总体方向趋势为竖直向上, 采用摆动量计算出的矢量分布更接近于实际流体的分布。

2.4.2 摆动量统计特性分析

在图像退化仿真^[41, 42]和去湍流效应^[43, 44]等研究中, 人们通常假定流场中成像导致图像退化的像素偏移量满足高斯分布。本小节中我们用折射光流模型计算出的像素偏移量验证分布特性。

在分析统计特性时, 我们对一个点处的偏移量随时间的变化, 采用非参数核密度估计的方法拟合分布曲线^[45], 该方法的优点在于无需事先对偏移量的分布作出假定, 而从拟合结果中可近似得到满足的分布形式。假设一个点处的摆动量矢量随时间的采样为 $U = \{u_i\}_{i=1,2,\dots,n}$, 则概率密度的估计为:

$$\hat{p}(u) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K(u - u_i) \quad (2.14)$$

其中 $K(x)$ 为每个采样点处的核函数, 本文中采用带宽 σ 为 0.8 的高斯核函数。

然后通过统计参数验证其满足高斯分布, 包括计算偏度(skewness)、峰度(kurtosis)并进行 Kolmogorov-Smirnov(KS)正态分布检验^[46]。公式(2.15)为偏度的计算方法, 定义为三阶矩与标准差立方的比值, 用于衡量数据分布的对称程度。如果数据的值主要集中在曲线右侧, 则称该分布为左偏, 其偏度为负值; 反之为右偏。正态分布的偏度为零。公式(2.16)为峰度的计算方法, 峰度定义为四阶矩与方差平方的比值, 用于衡量数据分布关于中心的集中程度。正态分布的峰度值为 3。

$$skewness = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (v_k - \bar{v})^3 / \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (v_k - \bar{v})^2} \right)^3 \quad (2.15)$$

$$kurtosis = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (v_k - \bar{v})^4 / \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (v_k - \bar{v})^2 \right)^2 \quad (2.16)$$

KS 检验借助数据累积分布与标准正态分布累积分布之间的差别作假设检验, 原假设为待检验数据来源于正态分布, 备择假设为不是来源于正态分布。令标准正态分布的累积

分布为 $F_0(x)$ ，像素偏移量的累积分布为 $F_n(x)$ ，二者的差异为 $D = \max|F_0(x) - F_n(x)|$ 。当 $D > D(n, \alpha)$ 时拒绝原假设，其中 $D(n, \alpha)$ 代表在显著性水平 α 和样本规模 n 下的临界值，可以通过查表获得。本文中采用显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

实验中对 8 个实际拍摄的湍流退化图像序列进行了计算和统计。以下以车牌序列为例，拍摄采用 BASLER acA1920-155um 相机，帧率为 150fps，序列包含 500 帧。序列中第 10 帧的原图像、摆动量及概率折射流的计算结果如图 4 所示。由于采用概率折射流计算时平滑区域的折射流计算结果置信度较低，因此在图像中纹理丰富的区域选取 5 个采样点，分别对水平和垂直偏移量拟合分布曲线，如图 5 中所示。对五个点处的摆动量计算统计量并作 KS 检验，结果如表 1 中所示。

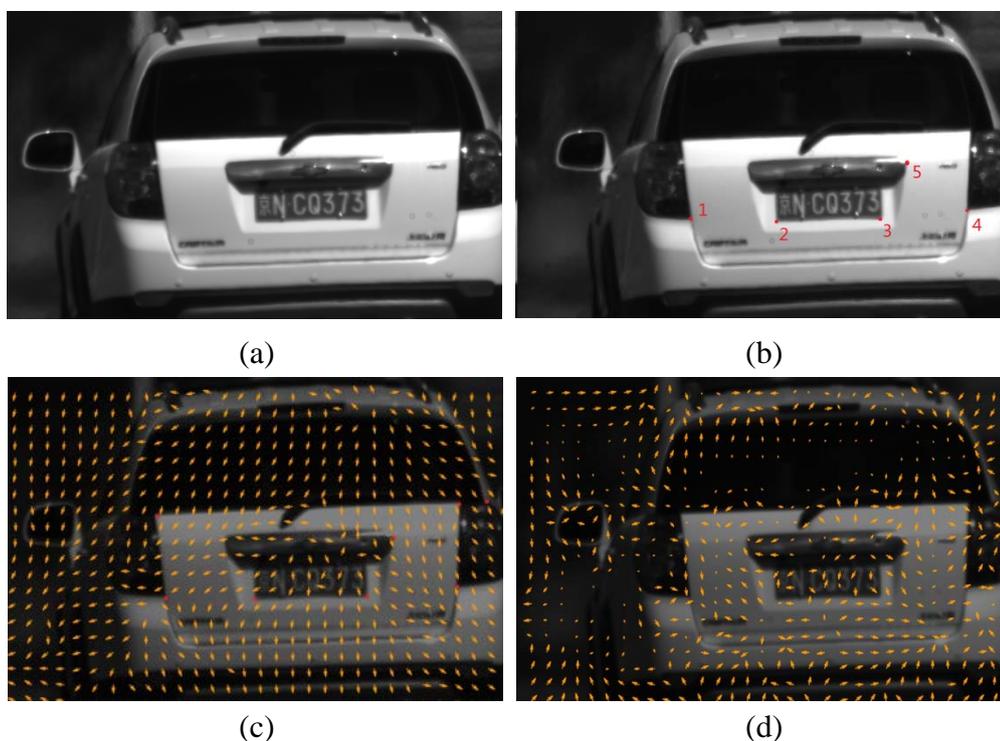
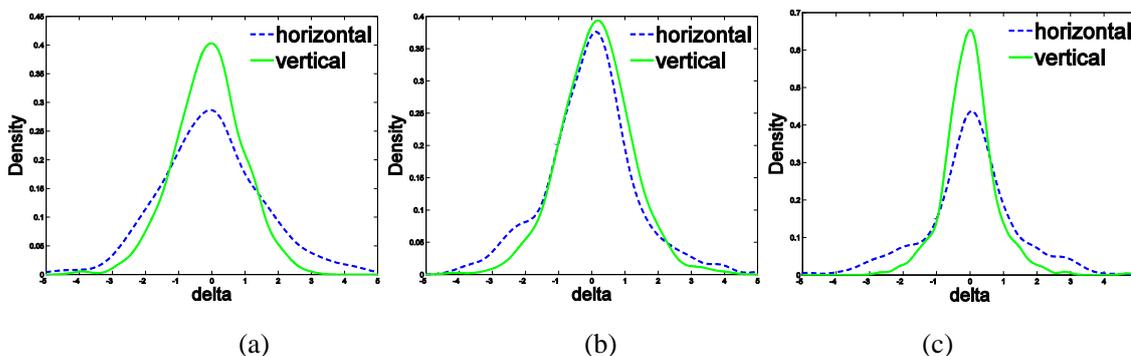


图 4 (a)实际拍摄湍流退化图像；(b)采样点选择；(c)摆动量计算结果；(d)折射流计算结果



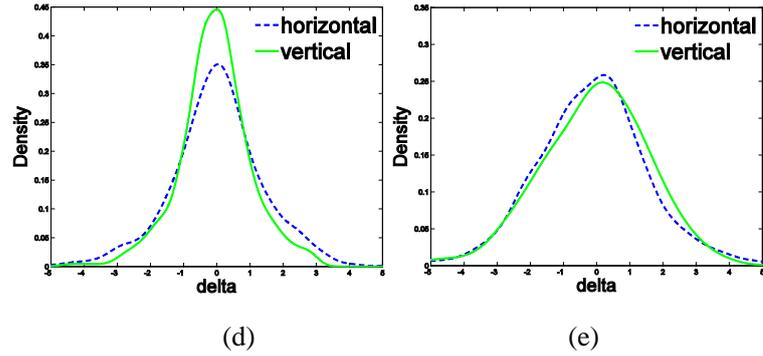


图 5 五个采样点处摆动量水平和垂直分量分布拟合

表 1 五个采样点统计参数计算结果

		1	2	3	4	5
偏度	水平	-0.0049	-0.1447	-0.6881	0.6943	-0.3284
	竖直	-0.1919	0.0064	0.5356	-0.2106	-0.2153
峰度	水平	4.0881	3.7236	4.2193	3.3828	3.6086
	竖直	3.4420	3.9356	4.5659	4.2699	3.9613
KS	水平	×	√	√	√	√
	竖直	√	√	×	√	√

图 5 中所示的图像序列中摆动量的分布拟合结果均满足正态分布的倒钟形，其他的图像序列同样选取采样点并拟合摆动量的分布，结果同样满足正态分布的倒钟形。所有参数计算结果满足偏度围绕着零值浮动，峰度围绕着 3 浮动，大部分的采样点可以通过 KS 检验，然而峰度过大时会导致 KS 检验不通过，例如表 1 中的点 3。峰度升高的可能原因是流场中存在能量传递^[47]。统计特性分析的实验结果与正态分布假设具有良好的 consistency，在后续的实验中可以认为摆动量的水平和垂直分量近似满足正态分布。

2.4.3 温度异常检测

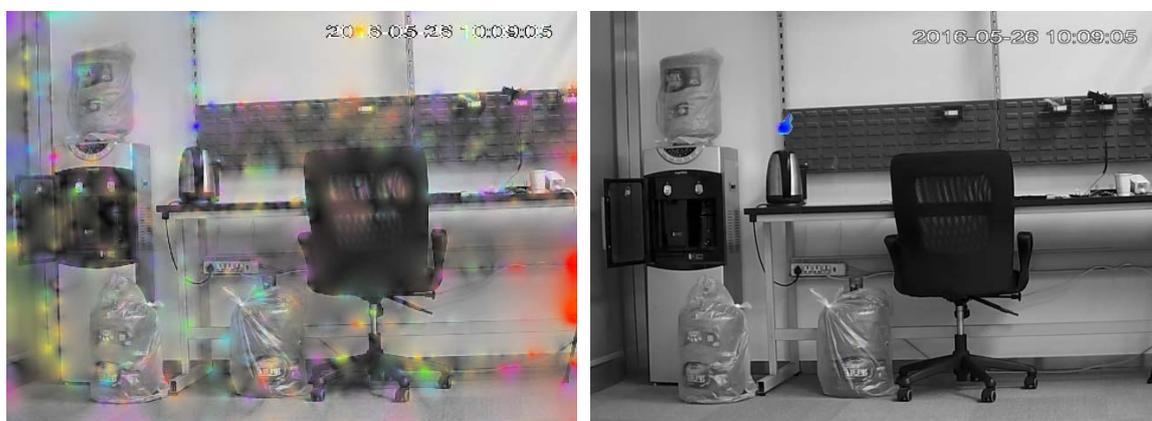
折射光流的计算方法可以用于检测热源温度异常产生的热气流，实现火灾的早期预防。目前常用的火灾检测方法为采用烟雾报警器等物理传感器，其需要在烟雾浓度达到一定程度时才能发出警报。在计算机视觉技术领域，人们借助视频监控设备，通过检测烟雾或火焰颜色等火灾特征发出警报^[48]，然而该方法仍需要产生明显的火焰特征。因此，通过检测场景中热源温度异常产生的折射流体，在火灾早期预防的工作中具有重要的应用价值。

当场景中存在热源温度异常时，温度升高会导致局部的折射率分布不均匀，相当于形成了一个局部流场，检测热源温度异常的本质即为检测图像中的折射光流。为了降低

传感器噪声引起的误判，计算出的折射流矢量需根据流体的特性进行筛选，若检测到符合光学湍流特性的折射流，则表明场景中存在热源引起的温度异常。由于折射流本身的参数未知，很难通过利用均值和方差拟合出的模型与高斯分布对比。对此，可以采用高斯分布的高阶矩特性，即高斯分布偏度为 0、峰度为 3 的统计特性，对每一个点处用相邻若干帧计算出的摆动量计算偏度和峰度的统计量并于高斯分布对比，提取有效的折射流区域。对于符合偏度约等于 0、峰度约等于 3 的点进一步对连通区域验证折射流矢量的空间分布，将连通区沿垂直方向平均分为三部分，分别计算每一部分折射流矢量大小的均值，若满足递减规律则可判定为温度异常区域。

实验中采用的成像设备是普通的 Xiaoyi2 家用监控摄像机。摄像机的图像传感器为 1/2.8 color 松下 MN4229 CMOS，有效像素为 1080(H)×720 (V)，帧率 25fps。镜头为 F2.0 大光圈，130° 广角。用电水壶和熄灭的蜡烛模拟温度异常产生图像中的折射流。在电水壶序列中我们在距离相机 5 米的桌面上放置一个电水壶，加热后静置了一段时间防止水蒸气的干扰。在蜡烛序列中，我们采集距离相机 3 米桌面上熄灭的蜡烛引起的温度异常，蜡烛熄灭后也静置一段时间防止烟雾的干扰。

采用光流法与折射光流并借助先验知识筛选的方法进行对比，电水壶和蜡烛序列的检测结果分别如图 6 和图 7 所示。由于监控相机存在较严重的传感器噪声，采用光流法检测图像中的运动时会检测到很多区域存在温度异常，很容易引起误判。采用折射流的模型并经过摆动量运动统计特性的筛选，则可有效提取出由热源引起的折射流区域。蜡烛与电水壶序列的折射流检测结果均显示为蓝色，根据图 3(b)的颜色编码，表明折射流矢量方向均为向上且较为统一，与实际情况下热空气向上运动的物理特性相符合。



(a) (b)
图 6 (a)光流法检测结果；(b)折射流温度异常检测结果



(a) (b)
图 7 (a)光流法检测结果；(b)折射流温度异常检测结果

2.5 本章小结

本章中分析了流体运动导致光线折射的变化在成像平面中产生折射光流的模型。按照模型证明同一视角不同时间的摆动量守恒，并以此推导摆动量及概率折射流的计算方法。定性验证实验表明折射光流相比于光流法能更有效的显示出流体在空间中的分布，可以提供更精确的流体运动信息。折射流的计算方法可以结合流体的先验知识有效的检测出由热源温度异常引起的折射流。摆动量统计特性分析的实验中对摆动量的水平和竖直分量分别拟合曲线，并利用统计参数作正态分布检验，实验结果表明摆动量的分布近似满足正态分布。第三章的仿真将基于折射光流产生模型中折射流大小与流体深度之间关系的结论。摆动量和折射流的计算方法将应用于第四章中湍流场强度测量的方法。

第三章 大气湍流成像仿真

3.1 引言

大气湍流中成像时，湍流会造成图像的模糊、畸变等退化效应。通过对大气湍流中成像时图像的降质进行仿真，可以为图像处理算法验证等提供测试数据。相比于实际湍流成像，大气湍流成像仿真具有参数真值已知、可重复性强等优势。

目前大气湍流中的成像仿真方法主要针对 K 湍流模型，按照仿真原理可分为三类：基于随机相位屏的成像仿真方法^[49, 50]，图像处理成像仿真方法^[43]，和图像处理与湍流物理模型结合的成像仿真方法^[41, 42]。采用随机相位屏的仿真方法以光线传播为基础，通过随机相位屏来计算光波的相位畸变量，结合角谱传播理论实现仿真。然而该方法需要在成像路径上设置多个相位屏，对每层单独操作，因此仿真时间较长。图像处理成像仿真方法利用人工设定的图像畸变量与模糊点扩散函数，采用图像反映射和双线性插值以及图像卷积等操作得到降质图像。该方法有效缩短了仿真时间，然而未能结合大气湍流参量的物理模型。图像处理与湍流物理模型结合的成像仿真方法利用 K 湍流理论定量计算得到湍流效应产生的图像畸变量和模糊量，再利用图像处理算法将湍流效应叠加到清晰图像中实现仿真。这种方法同时考虑了物理模型和计算效率，相对其他仿真方法具有明显优势。

基于以上分析，本文中的仿真方法采用图像处理与湍流物理模型结合的仿真方法。然而该方法在现有的研究中存在一些明显的缺陷。

首先，现有的方法假设湍流强度在整个图像中均匀分布，对图像中不同的区域产生相同程度的退化效应。而实际情况下湍流在有能量注入的情况下产生，仅存在于空间中的部分区域。根据 Richardson 湍流串级思想，大湍涡出现在持续能量注入的区域，且湍涡尺度随能量耗散逐级递减。针对这个问题，我们根据图像内容设计平面内湍流起伏强度分布的形式，使图像中不同区域具有不同程度的湍流效应。这种方法中我们将图像中每个区域的退化看作由单个湍涡引起，这样通过设计湍涡在平面内的分布，可以实现空间湍流强度起伏条件下的仿真。

此外，现有的方法中采用的湍流强度为路径平均的强度，仅考虑平均强度对最终成像的影响。而实际情况下湍流强度在光线传播的方向上也存在起伏，且对于具有同样湍流强度的湍涡，当与成像平面距离更近的情况下产生的湍流效应更明显。针对这个问题，

我们同样通过设计湍涡在空间中的分布来模拟空间中沿光线传播方向上湍流起伏强度分布的形式，使图像在光线传播的不同阶段产生不同程度的湍流效应，实现存在时空强度起伏的仿真。

3.2 大气光学湍流效应简介

大气折射率起伏导致了在其中传播的光线的光波阵面畸变，如图 8 所示，波阵面的变化又导致了光相干性的退化。光相干性退化会直接引起相位起伏和到达角起伏，以及光束截面上能量重新分布和一定面积上的光强起伏^[51]。通过对光的变化进行分析，可以进一步将光的变化与图像的退化建立联系。本节中对光强起伏、光束扩展和光束漂移、到达角起伏作简要介绍。

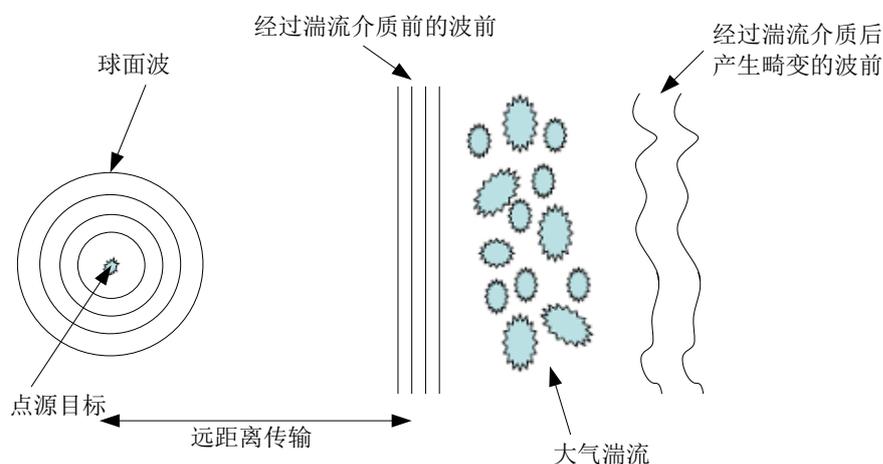


图 8 湍流介质对波阵面的作用

(1) 光强起伏

光强起伏也称为闪烁现象，其本质是光线在大气湍流中传播时受到小尺度湍涡的衍射作用而产生的光波振幅变化。因此光强起伏的主要影响因素是湍流内尺度。光强起伏通常采用光强起伏方差和时间功率谱密度函数描述。光强起伏方差描述的是光强起伏的空间物理特性，即湍流成像时到达成像面的光波与无湍流情况下光波差值的方差。光强起伏时间功率谱密度函数描述的是其时间统计特性的频域分布情况。光强起伏的空间和时间变化特性可以通过 Taylor 冻结假设构建联系^[52]。

(2) 光束扩展和光束漂移

光束扩展是指光波到达成像平面时截面面积增加的现象，光束漂移指光斑空间位置随时间的变化。通常光束扩展由较小尺度湍涡较弱的偏折而产生，光束漂移由较大尺度

湍流引起光束明显偏折而产生。在垂直于光束在大气中传播方向的平面内，光束中心位置随机改变，因此常用光斑质心坐标的变化描述光束漂移。

(3) 到达角起伏

大气湍流引起光的相位变化并产生波前畸变，使得接收孔径前端的波前倾斜角发生变化，这种变化称为到达角起伏。到达角使光的波阵面到达成像平面时偏离中心，引起图像中的畸变，如图 9 所示。到达角起伏效应由大尺度涡旋的折射效应引起，所以湍流外尺度为影响到达角起伏的主要参量。

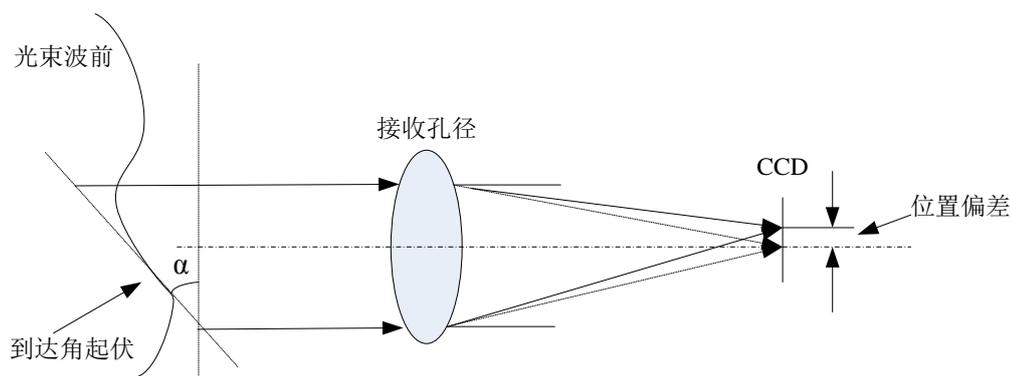


图 9 到达角起伏示意图

到达角起伏与大气湍流具有相同的时空变换特性，在量化到达角起伏时，通常采用到达角起伏方差和功率谱密度函数。到达角起伏方差属于空域的描述，为波阵面的角度相对于无湍流情况下差值的方差。功率谱密度函数则反映了到达角起伏的时间特性。到达角起伏的空间和时间变化特性也可以通过 Taylor 冻结假设构建联系。

3.3 仿真方法

3.3.1 空间强度起伏条件下的仿真方法

空间强度起伏湍流中成像仿真的目的，是根据图像的内容在不同的区域产生不同程度的湍流效应。例如在对一个包含热源的场景成像时，热源周围的区域相对于其他空气温度较低的区域应出现更明显的湍流效应。根据这个现象我们设计湍流强度在空间中的分布，由于在仿真时通常采用路径平均的湍流强度，我们将该路径平均强度看作由单个湍涡引起，即根据图像内容设计空间中不同强度的湍涡分布。在仿真时通常假定湍流的速度场满足高斯随机场^[41, 42]，因此我们按照高斯分布产生湍涡。

该方法的合理性在于：（1）仍然满足 Kolmogorov 湍流局地各向同性的特征，仅相当于图像中的不同区域中出现了不同强度的湍流场；（2）每个区域中心的湍流强度向四

周递减，代表湍涡的能量耗散；(3) 按照 K 湍流中成像像素偏移量与湍流强度的关系，湍流强度与像素偏移量的平方成正比，因此在仿真时通过调整各区域的权值系数可间接改变该区域的湍流强度。

空间湍流强度起伏条件下仿真的整个过程可由以下公式表示：

$$O(u, v) = R_m(F_m(I(x, y))) \quad (3.1)$$

其中 $I(x, y)$ 为原始输入图像， m 为关于空间位置和湍涡强度的系数函数。 $F_m(\cdot)$ 和 $R_m(\cdot)$ 分别为模糊效应和畸变效应算子， $O(u, v)$ 为湍流退化图像。通过调整 m 、 $F_m(\cdot)$ 和 $R_m(\cdot)$ 中的参数，可以模拟出不同湍流参数的退化图像。仿真时首先通过湍涡区域位置和湍涡的物理参数换算出系数矩阵 $m(x, y)$ 。然后计算强度均匀分布情况下的畸变量矩阵，与系数矩阵相乘得到存在空间强度起伏的畸变量矩阵。然后对图像进行分块，对每个子块根据平均系数计算点扩散函数 PSF。最后将湍流区域的图像偏移量与模糊量叠加得到空间强度起伏条件下的仿真图像。

空间强度起伏条件下仿真的流程如图 10 中所示：

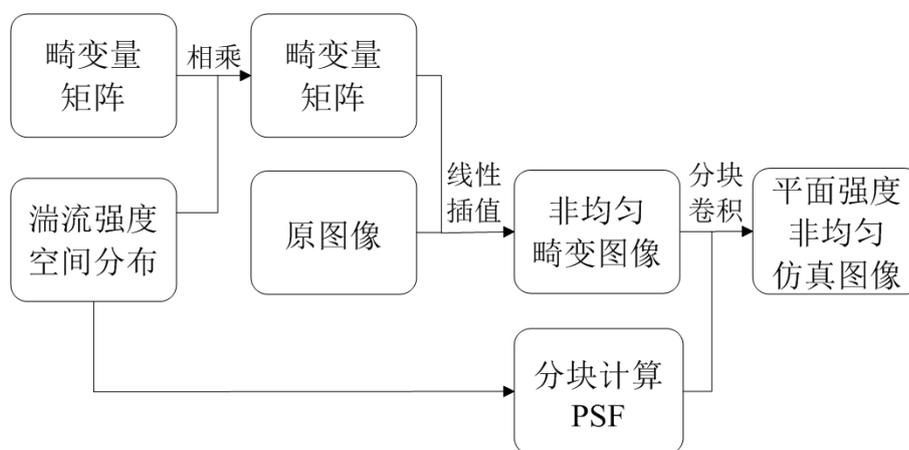


图 10 空间强度起伏条件下仿真流程

3.3.2 时空强度起伏条件下的仿真方法

为了模拟出实际情况不同物理特性的湍涡分别对图像产生的降质，我们将湍流场成像过程分解为一系列湍涡成像的子过程，来综合考虑湍涡对图像产生的不同程度影响。湍流场的分区间成像模型如图 11 中所示。仿真的总体思想为，沿光线传播的方向设置一系列非等间距的虚拟成像面，这些成像面将湍流场分割为若干区间，区间内的湍涡分布可由空间高斯随机场模拟，相邻两个成像面之间的距离等于对应区间内最大湍涡的直径。根据公式(2.7)，当流体深度与成像距离远大于相机焦距时，可以近似认为每个区间

湍涡在最终图像中产生的折射光流与该区间与成像面之间的距离成反比，因此按照畸变和模糊仿真的计算方法计算后按照距离权重折算，得到虚拟成像面上的降质图像。每一个区间的仿真结果作为下一个区间的仿真原始图像，这样最终成像面处仿真结果可看作空间湍涡产生湍流效应沿路径的叠加。

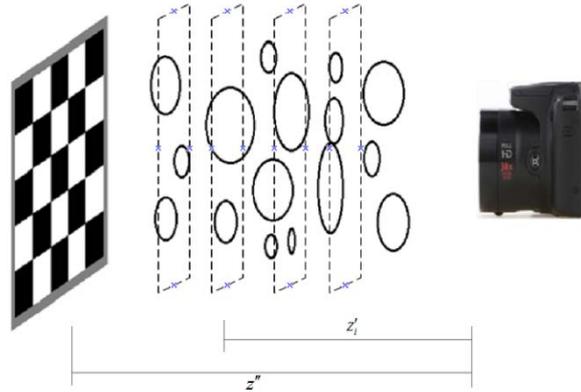


图 11 湍涡空间分布与虚拟成像面位置示意图

时空湍流强度起伏条件下仿真的整个过程可由以下公式表示：

$$O(u, v) = R_{m_n} \left(\bigcup_{i=1}^n F_{m_i} (I_{i-1}(x, y)) \right) \quad (3.2)$$

其中 n 为成像区间的个数，例如图 11 中对应 $n = 5$ 。 $I_{i-1}(x, y)$ 代表前一个成像区间的仿真结果， m_i 为第 i 个区间内关于空间位置和湍涡强度的系数函数。仿真时首先确定区间个数并通过湍涡区域位置和湍涡的物理参数换算出系数矩阵 $m_i(x, y)$ 。然后对每一个区间分别进行畸变仿真，第一个区间的针对原图像进行畸变仿真，从第二个区间至成像设备仿真的原图像为上一个区间的畸变仿真结果。最后对最终的畸变图像进行分块，对每个子块根据平均系数计算点扩散函数 PSF，进行模糊仿真，得到时空强度起伏条件下湍流场中成像畸变和模糊仿真图像。

时空强度起伏条件下的湍流场中成像仿真的流程如图 12 中所示：

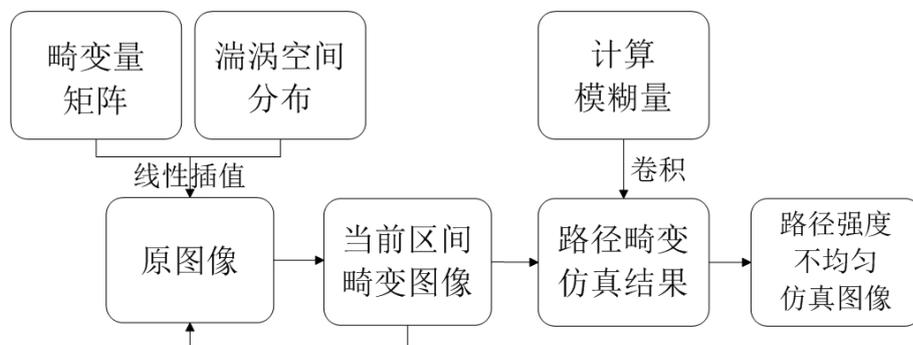


图 12 时空强度起伏条件下仿真流程

3.4 仿真原理

3.4.1 湍流分布模拟原理

由于湍流成像中湍流效应主要由湍涡引起，因此我们通过模拟湍涡的分布来体现图像中湍流效应的分布。在仿真时通常假设湍流场满足时间和空间上的高斯随机场，因此，我们采用空间高斯随机场模拟湍流分布。

仿真时需要的参数为区间最大湍涡的水平尺度 l_1 和竖直尺度 l_2 ，以及虚拟成像面的大小 $n \times m$ 。水平和竖直尺度通过人为设定，虚拟成像面的大小与仿真原始图像一致。我们按照文献^[53]中描述的循环嵌入的方法(Circulant Embedding)生成一个空间平稳高斯随机场。循环嵌入方法的基本思想是将协方差矩阵嵌入一个块循环矩阵，且每一个块内部也是循环的，然后用FFT对该循环矩阵计算平方根。最终这个高斯随机场的子块之间满足相关性结构 $\text{cov}(\tilde{X}_s, \tilde{X}_t) = \rho(s-t)$ 。按照如下的步骤，生成一个 $n \times m$ 大小的零均值二维高斯随机场 $G = \{(i\Delta_x, j\Delta_y), i=0, \dots, n-1, j=0, \dots, m-1\}$ ，其中 Δ_x 和 Δ_y 表示水平和竖直方向的采样间隔。

S1 建立协方差矩阵

将采样的格点重组为大小为 mn 的列向量，生成大小为 $mn \times mn$ 的协方差矩阵：

$$\Omega_{i,j} = \rho(s_i - s_j), i, j = 1, \dots, mn \quad (3.3)$$

其中

$$s_k = \left((k-1) \bmod m, \left\lfloor \frac{k}{m} \right\rfloor \right), k = 1, \dots, mn \quad (3.4)$$

$$\rho(h) = \left(1 - \frac{h_1^2}{l_1^2} - \frac{h_1 h_2}{l_1 \times l_2} - \frac{h_2^2}{l_2^2} \right) \exp \left(-\frac{h_1^2}{l_1^2} - \frac{h_2^2}{l_2^2} \right) \quad (3.5)$$

其中 h_1 和 h_2 分别为两个坐标之间的水平和竖直距离。由于具有循环对称的特性， Ω 矩阵可由第一行子块 (R_1, \dots, R_n) 完全确定。

S2 嵌入块循环矩阵

将子块 R_k 嵌入到 $(2m+1)$ 个循环矩阵 C_k 的左上角。令 Σ 代表最终大小为 $(2n-1)(2m-1) \times (2n-1)(2m-1)$ 的块循环矩阵，其第一行子块为 $(C_1, \dots, C_n, C_n^T, \dots, C_2^T)$ 。

S3 计算块循环矩阵的均方根

块循环矩阵可以被对角化为 $\Sigma = P * \text{diag}(\gamma) P$ ，其中 P 是 $(2n-1)(2m-1) \times (2n-1)(2m-1)$ 大小的傅里叶变换矩阵。特征根 γ 的长度为 $(2n-1)(2m-1)$ 。将所有特征根放入一个大小为 $(2m-1) \times (2n-1)$ 的矩阵 Γ ，使得矩阵 Γ 的第一列包含 γ 的前 $2m-1$ 项。如果 G 是 $(2m-1) \times (2n-1)$ 大小的矩阵且存放的是 Σ 第一行子块，则满足 Γ 是 G 的 FFT2。假设 $\gamma > 0$ ，我们可以得到均方根因子 $B = P * \text{diag}(\sqrt{\gamma})$ ，使得 $\Sigma = B * B$ 。

S4 提取子块

对 Γ 中的每个元素开方，并建立一个 $(2n-1)(2m-1)$ 大小的复高斯矩阵 $Z_{j,k} = U_{j,k} + iV_{j,k}$ ，对所有 j 和 k 满足 $U_{j,k}, V_{j,k} \sim N(0,1)$ ，对矩阵 $\sqrt{\Gamma} \odot Z$ 矩阵作 FFT2 变换。最终 $\text{FFT2}(\sqrt{\Gamma} \odot Z)$ 实部和虚部的前 $m \times n$ 个子块即为两个协方差为 Σ 的高斯随机场。

3.4.2 畸变仿真原理

畸变仿真利用光在大气湍流中传播时的到达角起伏变化，引起图像中各像素点的位置发生偏移，该偏移是由水平和竖直两个分量叠加得到的。大气湍流造成的图像畸变效应主要由到达角起伏方差估计。首先用一个复高斯随机矩阵对反映图像畸变的空谱密度函数进行滤波，得到一个能同时反映出图像畸变量空间相关性与随机性的频域内复随机场。然后对滤波结果进行傅里叶反变换并取模值，得到 K 湍流引起的图像畸变量。然后根据掩膜的位置提取相应湍流出现的位置的畸变量，并将畸变量与权值相乘，最终得到具有不同强度的局部湍流引起的图像畸变量矩阵。最后根据虚拟成像面与最终成像平面的距离系数，将畸变量矩阵折算为该位置的湍流产生的畸变量。

畸变仿真的具体步骤如下：

S1 生成一个复数随机矩阵 $R_w = A + iB$ ，其中 A 、 B 矩阵满足高斯分布，用于表现湍流的随机性；

S2 构造功率谱密度函数 $S_\beta(f) = f^{-b}$, $b = 3$ ，用于表示图像畸变量和图像位置之间的关系；

S3 利用功率谱密度函数对复随机矩阵进行滤波，对滤波的结果作傅里叶反变换并取绝

对值；

S4 将取绝对值后矩阵的方差设定为到达角起伏方差 σ_{AOA}^2 ，得到全局的水平向图像偏移量矩阵；

S5 将水平向偏移量矩阵中的元素与权值相乘，即得到不均匀的水平向图像偏移量矩阵；

S6 重复步骤 S1~S5，得到局部的垂直向图像偏移量矩阵；

S7 根据大气湍流参数和成像设备参数，将水平和垂直向的偏移量矩阵作单位转换，结果记为 δx 和 δy ；

S8 根据当前成像面的深度调整 δx 和 δy 的大小；

S9 通过双线性插值算法，将 δx 和 δy 叠加到原图像中，得到清晰的湍流退化畸变图像。

3.4.3 模糊仿真原理

大气湍流造成的图像模糊效应在时域内可以用点扩散函数 PSF 描述，在频域内可以用大气调制传递函数 MTF 描述。首先用一个复高斯随机矩阵对反映图像模糊的空间谱密度函数进行滤波，得到一个能同时反映出图像模糊量空间相关性与随机性的频域内复随机场。然后对滤波结果作傅里叶反变换并取绝对值，得到 K 湍流引起的图像模糊量。

在仿真时我们将图像分为 31×31 大小的子块，对每个子块计算权值的均值，并根据均值设定子块的湍流强度，根据该强度对每个子块生成 PSF 函数。在最终的仿真图像中，湍流存在的区域存在较明显的模糊，且模糊程度与湍流强度相关，在湍流不存在的区域将权值设定为常数，对应较弱程度的模糊。

模糊仿真的具体步骤如下：

S1 将图像分为长宽为 31×31 的子块；

S2 对每个子块计算权值的均值，将均值的平方与设定湍流强度的乘积作为子块对应区域的湍流强度，根据湍流参数和成像设备参数针对子块构造 MTF 函数；

S3 对 MTF 作反傅里叶变换并取绝对值，得到子块的 PSF 函数；

S4 利用 PSF 对清晰图像中相应的子块卷积，即得到局部湍流模糊退化图像。

若将 S4 改为利用每个区域的 PSF 对畸变仿真的结果中相应子块进行卷积，则结果为同时包含模糊和畸变的局部湍流退化图像。

3.5 实验

3.5.1 空间强度起伏仿真结果

仿真试验中在不同的湍流强度下生成湍流退化的图像序列，每个序列 100 帧。采用的大气参数和成像设备参数列为表 2 和表 3 中所示：

表 2 大气湍流参数

参数	数值大小	单位
外尺度 L_0	15	m
内尺度 l_0	10	mm
湍流谱指数 α	11/3	无

表 3 成像设备参数

参数	数值大小	单位
波长 λ	0.55	μm
接收器孔径 D	50	mm
相机焦距 f	55	mm
角分辨率 $\delta\theta$	0.2	urad

仿真时采用的原图像为 525*700 大小的灰度图，如图 13 所示。



图 13 空间强度起伏仿真原图像

根据图像内容，工厂区域由于温度较高，应具有更大的湍流强度。我们将产生的均值为 0 的高斯随机场幅值规范化到[0,1]区间内，如图 14 所示。图中红色部分为湍涡集

中分布的位置，蓝色部分为图像静止的部分。该方法可以模拟出湍涡平滑且不规则的边缘，并且使图像中不同区域的湍流具有不同的强度。进一步提取工厂区域附近的区域，作为最终的湍涡分布模板。

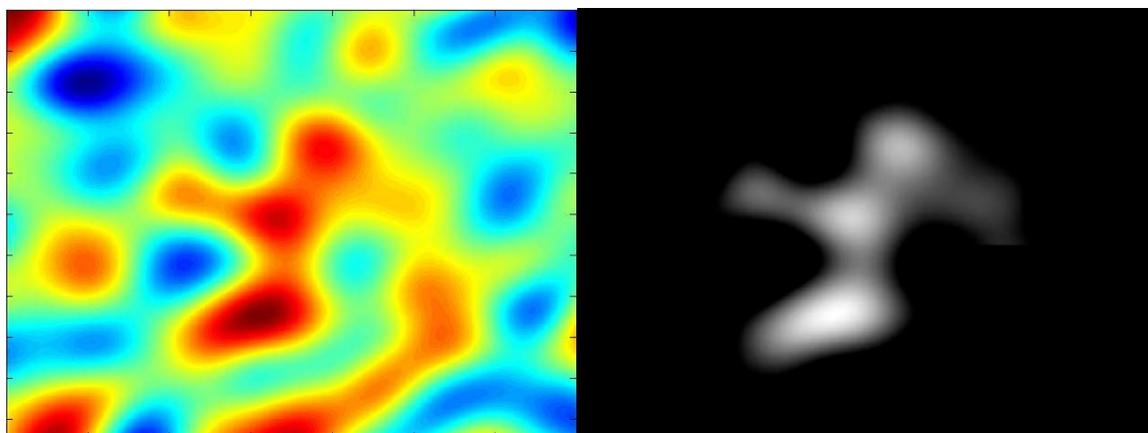
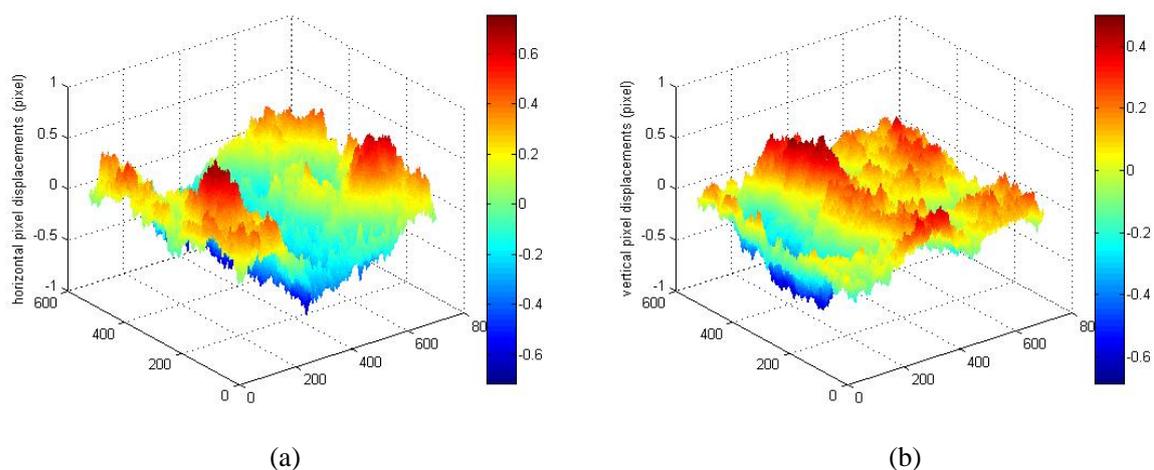


图 14 湍涡分布示意图

按照图像畸变仿真流程，计算得到强度均匀情况下湍流引起水平和垂直方向上的畸变量矩阵，如图 15 (a)和(b)所示。由于在仿真时采用了空间功率谱密度函数增加空间相关性，因此整幅图像的几何畸变量变化趋势比较连续。由于假设强度均匀条件下湍流对图像不同区域的退化效应相同，因此水平和垂直像素偏移量遍布整个图像。将强度均匀条件下的偏移量与湍涡强度系数 m 相乘后得到平面内强度不均匀分布条件下的水平和垂直偏移量矩阵，如图 15(c)和(d)中所示。在没有湍涡分布的区域中偏移量为 0，这些区域内图像没有畸变效应而仅存在成像设备等造成的模糊效应。而在湍涡分布的区域，偏移量在区域中心较大，随坐标偏离中心而偏移量递减。



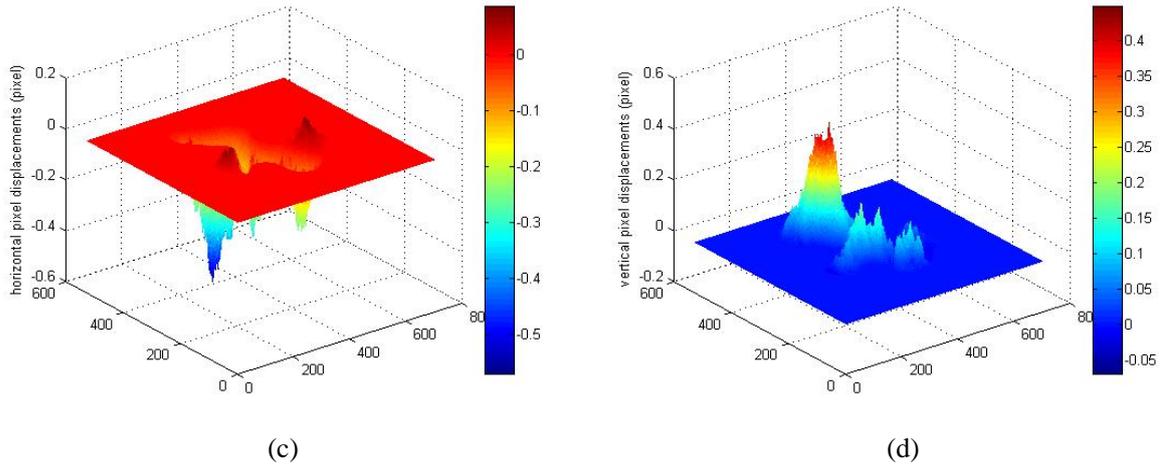


图 15 (a)平面内强度均匀分布的水平偏移量矩阵；(b)强度均匀分布的竖直偏移量矩阵；(c)强度不均匀分布条件下水平偏移量矩阵；(d) 强度不均匀分布条件下竖直偏移量矩阵

按照第 3.3.1 节中湍流局部退化仿真的方法对图 13 进行仿真。弱起伏采用成像距离 $L = 6000\text{m}$ ，在湍流强度为 $C_n^2 = 6 \times 10^{-17} \text{m}^{-2/3}$ 条件下的仿真结果如图 16 (a)中所示。弱起伏条件下偏移量较微弱，从仿真图像序列中观察图像趋于静止，且模糊效应微弱，背景具有较高的分辨率。中强起伏采用成像距离为 $L = 1000\text{m}$ ，在湍流强度为 $C_n^2 = 5.4 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ 条件下的仿真结果如图 16 (b)。中强起伏条件下偏移量较大，在仿真图像序列中可以观察到工厂附近具有明显的图像抖动。中强起伏条件下模糊效应也较明显，在烟囱的边界出现了明显的模糊，而且背景村庄的分辨率相对于原图像降低。



图 16 (a)弱起伏空间强度起伏下仿真结果；(b)中强起伏空间强度起伏下仿真结果

3.5.2 时空强度起伏仿真结果

时空强度起伏条件下仿真的大气参数与成像设备参数与表 2 和表 3 中的参数一致。

由于在时空强度起伏的仿真中假设光线在从背景到成像面的路径上均受到随机分布的湍流影响，因此仿真的原始图像中无需存在明显的热源，仅需假设湍流由太阳光的能量注入产生。因此仿真时采用的原始图像包含沙漠公路场景，为 446*600 大小的灰度图，如图 17 中所示。



图 17 时空强度起伏仿真原图像

本实验中从背景至成像设备之间设定 5 个成像区间，每个区间内最大的湍流水平和竖直的尺度如表 4 中所示：

表 4 成像区间湍流尺度设定（单位：像素）

	1	2	3	4	5
水平	80	60	86	72	92
竖直	64	45	72	60	80

按照 3.4.1 节中湍流的模拟方法，由最远处背景至成像平面的五个成像区间内湍流分布分别如图 18 中从左至右所示。其中图 18 (c)为按照距离的加权折算后每个成像区间中的湍流对最终成像的影响，这样距离成像平面最远的湍流（左侧）对成像的影响最微弱。通过以上湍流分布的设定，不仅在空间上湍流对图像的不同区域具有不同程度的影响，而且光线在传播的过程中也会在不同的子成像区间之间受到不同起伏强度的湍流影响，即实现了时空湍流强度起伏的设定。

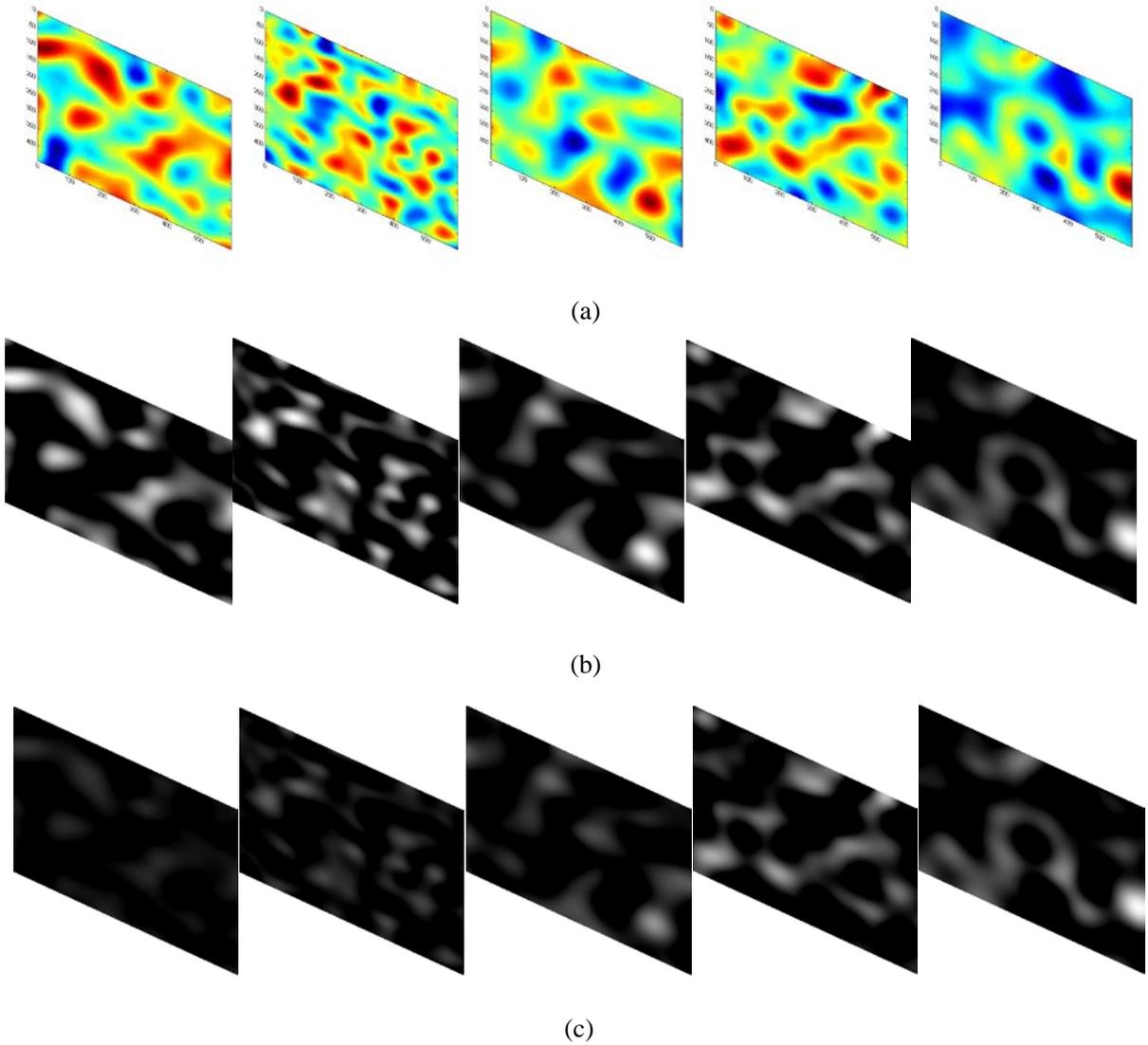


图 18 (a)沿光线传播路径湍流分布；(b)湍流空间位置；(c)按照距离折算后的湍流对成像影响

仿真时对每个成像区间的成像结果进行保存，可以可视化每个区间内湍流对图像产生的畸变。本节实验中采用了 5 个成像区间，对应得到 5 个成像平面上的畸变图像序列。以最大湍流强度为 $C_n^2 = 5.4 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ 的中强起伏实验条件为例，选取每个图像序列中第 10 帧的畸变量和畸变成像结果，如图 19 中所示。区间 1 和 2 由于距离成像平面较远，产生的畸变几乎不可见。从第 3 个成像区间的退化图像序列中开始出现肉眼可分辨的像素偏移量。

在最终的时空湍流强度起伏条件下的畸变图像中加入模糊，最终的仿真结果如图 20 所示。

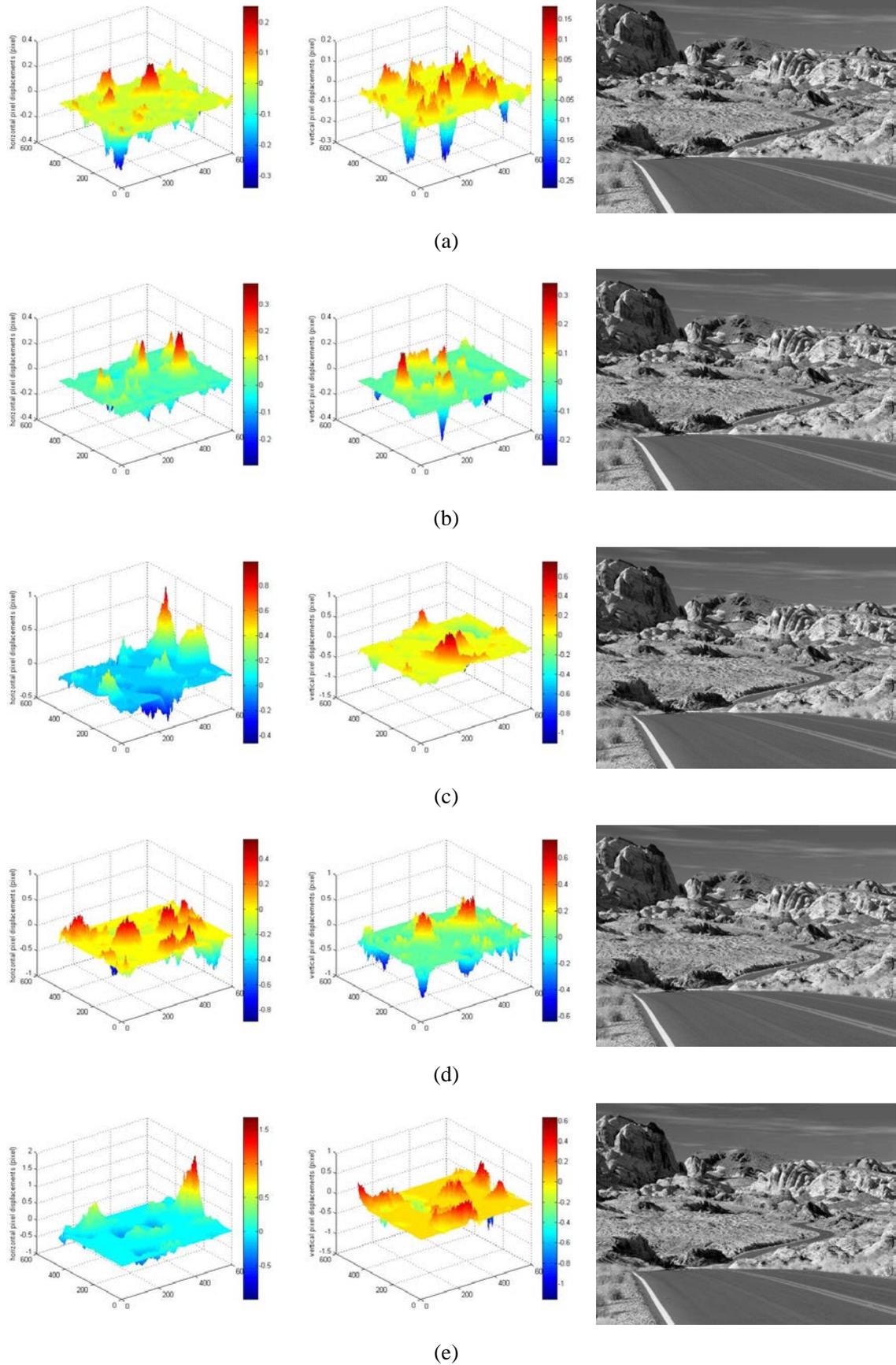


图 19 水平和竖直偏移量与子区间的畸变仿真结果

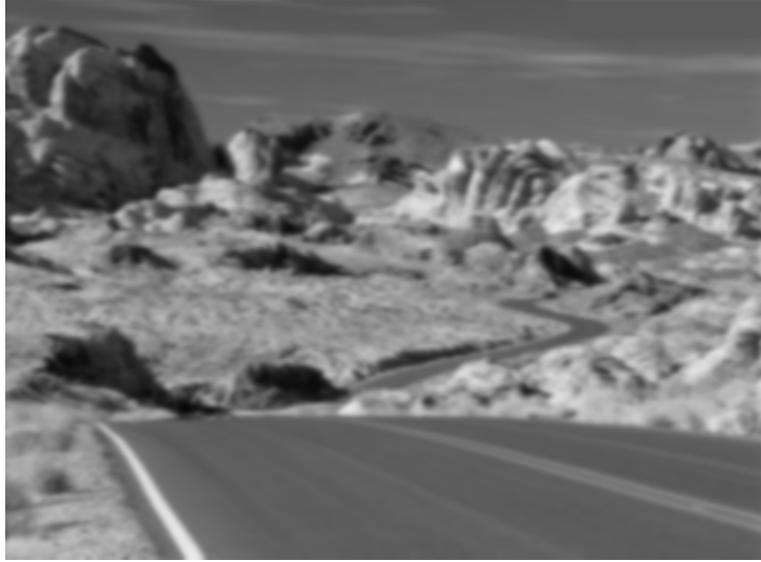


图 20 时空湍流强度起伏下仿真结果

强度均匀仿真图像序列中，像素偏移量遍布整个图像，而强度不均匀仿真图像序列中仅一部分区域存在明显的像素偏移量。为了直观地体现出时空强度起伏条件下仿真的效果，我们设计实验将相同湍流强度和成像距离下的时空强度起伏条件下仿真结果与强度均匀仿真结果进行定性对比。

实验中我们采用背景相减法评价每个区域畸变的程度，即用视频序列的每一帧与仿真原图像作差，差值矩阵取绝对值。由于畸变量具有很强的随机性，我们采用整个图像序列背景相减法差值矩阵的方差比较畸变量在图像中覆盖的区域。

首先获得在成像距离为 $L = 1000m$ ，起伏强度为 $C_n^2 = 5.4 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ 的强度均匀仿真图像序列，帧数为 100 帧。在仿真时仅考虑畸变而不考虑模糊，如图 21 所示。



图 21 强度均匀畸变仿真结果

然后对强度均匀和强度不均匀图像序列的每一帧作背景相减法，并对差值矩阵计算方差。强度均匀和时空强度起伏条件下的方差矩阵分别如图 22 (a)和(b)所示。从结果中可以看出在等晕仿真结果中偏移量在图像中近似于均匀分布，而时空强度起伏条件下仿真结果中一些区域的偏移量明显被抑制。

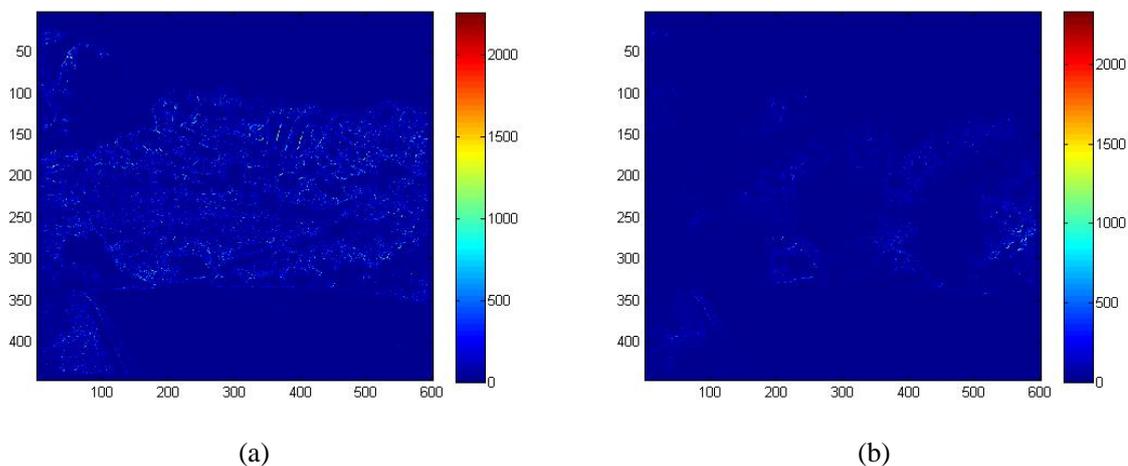


图 22 (a) 强度均匀仿真畸变区域；(b) 强度不均匀仿真畸变区域

3.6 本章小结

本章采用了湍流模型与图像处理结合的方法实现了大气湍流强度在平面内和沿光线传播路径不均匀分布情况下的仿真。在空间强度起伏条件下仿真中根据图像中热源等内容的位置设置空间湍流强度的分布形式；在时空强度起伏条件下仿真中模拟在光线传播的路径上湍流强度的分布形式来模拟光路上的强度起伏。强度不均匀的仿真的退化图像序列中像素偏移量具有集中分布的特点，相比于强度均匀仿真更接近于实际情况中的湍流退化图像。该仿真方法将应用与第四章实验中的数据获取。

第四章 基于折射光流的湍流强度测量

4.1 引言

湍流强度是衡量介质中局部变化的统计量。湍流强度的一种量化指标为折射率结构常数 C_n^2 ，平均折射率结构常数为湍流场局部不同点处温度、湿度和风速的差值的函数^[54]。Hill 将折射率结构常数表示为一种更常用的形式：

$$C_n^2 = \overline{[n(x) - n(x+r)]^2} \cdot r^{-2/3} \quad (4.1)$$

其中 n 为空气折射率， x 为空间位置， $|r|$ 为介于湍流内尺度与外尺度之间的湍涡尺度。在这种表示形式中折射率结构常数为一个很小的距离增量 $|r|$ 中的折射率方差的函数。实际应用中通常利用折射率结构函数 C_n^2 描述湍流强度。

折射率结构函数 C_n^2 为大气湍流研究中的重要参数。例如，在进行湍流降质图像复原的时候需要构造模糊调制传递函数(blurring modulation transfer function, MTF)，在构造传递函数的时候就需要用到路径平均的折射率结构函数 C_n^2 。为此人们采用多种仪器和方法进行 C_n^2 的测量，例如大气闪烁仪(scintillation detection and ranging, SCIDAR)^[13]，SLODAR (slope detection and ranging)^[55]，差分像运动(differential image motion, DIM)^[56]，经典闪烁计数器(classical scintillometer)^[57]等。这些技术方法的缺点在于需要借助大规模的测量设备，例如闪烁计数器包含一个发射和接收的装置，限制了这种方法在实际测量中的应用。另一种测量方法是在目标平面上放置一个点光源（例如激光），或者人工放置一个可追踪目标，例如点或者边缘，以此测量到达角起伏^[18, 58]。这些方法在实际的长距离条件测量中具有较差的实用性。模糊调制传递函数可以利用图像中已有的边缘进行估计^[59]，然而图像中可能不存在可以用于测量的边缘。本文中我们采用湍流退化图像，首先将图像划分为区域，然后针对区域测量湍流强度^[1]。

在之前的工作中，人们通常采用光流法等运动估计的方法计算像素偏移量^[4]。本文中我们根据折射流场理论模型，将折射流作为像素偏移量。用折射流的方差估计到达角起伏方差，进一步估计折射率结构函数。该方法的测量结果与光流法的测量结果对比。

利用像素偏移量的方差我们可以计算出每个点处湍流的强度。实际情况中大气湍流在空间中以湍涡的形式分布在不同位置，成像时对图像的影响为像素偏移量方差的幅度在图像中在各区域集中分布。按照这个思想我们采用对像素偏移量方差矩阵分割和聚类的方法对不同的区域进行湍流强度的测量。常用的图像分割算法包括 K-means 等，然而

K-means 对每一个中心点都计算所有数据与中心点的距离，这一步骤会引入较大的计算量。对此我们采用简单线性迭代聚类算法(Simple Linear Iterative Clustering, SLIC)^[60]，它对 K-Means 的改进之处在于对每个中心点仅计算一定邻域范围内数据与中心点的距离，较符合湍涡在空间中集中分布的特性。SLIC 算法常利用图像亮度特征作图像分割，我们将像素偏移量方差作为特征，通过 SLIC 对偏移量方差矩阵进行分割。

SLIC 算法将像素偏移量方差矩阵分割为特定数量的区域，该数量不一定与湍涡的数量一致。我们采用基于密度的大规模数据聚类算法 DBSCAN 将具有相似湍流强度的区域合并为一个整体^[61]，得到湍涡的大致分布位置，以减少在后续计算湍流强度时的区域样本数量。DBSCAN 算法的优点在于：(1)不要求具有关于样本的先验知识，自适应能力较强；(2)对聚类后每一个类别分布的形状不限定；(3)计算效率高。其中优点(2)对本应用具有重要意义，因为湍涡的形状不定，且聚类结果可以体现出强度的梯度变化。

经过以上分割和聚类步骤，我们利用每一个湍涡内像素偏移量的方差，进一步计算到达角起伏方差和区域湍流强度，实现针对湍流运动显著的区域测量湍流强度。

4.2 图像法测量流场强度原理

折射率的改变导致光波传播方向的变化，结果即产生到达角起伏。到达角起伏在图像中产生两种效应：时空上的抖动和长曝光下图像中的模糊。在研究湍流对图像的退化效应中，到达角起伏的两个重要参数为方差和时空相关性。

在平面波和球面波的条件下，到达角起伏方差可以分别表示为^[1]：

$$\sigma_{\alpha}^2 = 2.941D^{-1/3} * \begin{cases} \int_0^L C_n^2(z) dz, & l_0 \ll D \ll \sqrt{\lambda L} \\ \int_0^L C_n^2\left(\frac{z}{L}\right)^{5/3} dz, & \sqrt{\lambda L} \ll D \ll L_0 \end{cases} \quad (4.2)$$

为了简化计算，我们将 C_n^2 作为常数处理。在较短的成像距离下 C_n^2 本身就可以看作常数，当成像距离较长时， C_n^2 作为路径平均的参数。此时，到达角起伏方差简化为如下所示的公式：

$$\sigma_{\alpha}^2 = D^{-1/3} C_n^2 L * \begin{cases} 2.914, & l_0 \ll D \ll \sqrt{\lambda L} \\ 1.1, & \sqrt{\lambda L} \ll D \ll L_0 \end{cases} \quad (4.3)$$

与光轴夹角为 α 的到达角在图像中产生以像素为单位的 $\alpha \times PFOV^{-1}$ 的偏移量，由到达角起伏引起的图像偏移量方差为：

$$\sigma_{img}^2 = \sigma_{\alpha}^2 \times PFOV^{-2} \quad (4.4)$$

综上所述，采用图像法进行湍流强度估计大致可分为以下的三个主要步骤：

- (1) 计算像素偏移量的方差；
- (2) 利用像素偏移量的方差估计到达角起伏的方差；
- (3) 通过到达角起伏方差估计湍流强度 C_n^2 。

本文中我们采用的方法是首先计算每一个点处摆动量的方差，然后我们按照像素偏移量的方差分割并聚类为若干区域，对每一个区域偏移量方差的均值计算到达角起伏方差，再进一步换算为每一个小区域的湍流强度 C_n^2 。湍流强度估计的流程图如图 23 中所示：

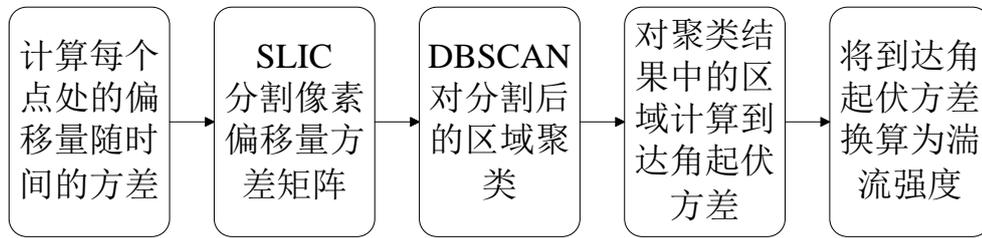


图 23 湍流强度估计流程图

4.3 测量区域选取方法

4.3.1 方差矩阵的SLIC分割

当湍涡在空间中分布形式未知的时候，分割算法按照区域位置将具有相似湍流强度的像素划分在同一个区域，减小统计样本规模。在空间聚类时采用的方法为 SLIC 超像素分割的方法^[60]，但是采用像素偏移量方差作为特征，替代原本在分割时使用的图像 RGB 特征。

SLIC 在默认条件下唯一的模型参数是 k ，即分割后图像中包含的区域的数量的数量。分割的对象为像素偏移量方差矩阵，矩阵中的每一个元素记为 $v = [v_x \ v_y]^T$ ，即两个分量为该点处的水平和垂直像素偏移量方差。在初始化时，对于本文中采用的像素偏移量方差矩阵，以间隔为 $S = \sqrt{N/k}$ 选取 k 个点。将这 k 个点在局部移动到 3×3 邻域内梯度最低的位置作为种子点，这样可以防止超像素的中心出现在边缘处，并且防止噪声干扰。

接下来的赋值步骤中，对每一个聚类中心设定一个搜索半径，使得几个相邻的聚类中心的搜索范围相互重叠。赋值步骤将每个像素 i 分配给搜索半径内距离它最近的聚类中心。该步骤为对 K-Means 改进的核心步骤，SLIC 仅在距离该像素有限的区域内，例

如 $2S \times 2S$ 大小的区域内搜索与之最接近的像素，相比于 **K-Means** 对所有的点进行计算很大程度提升了计算速度。这里需要确定一个距离测度 D 衡量点与聚类中心之间的相似度，确保将每个点分配到与它最近的聚类中心。对此我们可以将矩阵中的每个点看作一个由方差和坐标构成的四维特征向量 $V = [v_x, v_y, x, y]^T$ 。然而像素偏移量方差与坐标没有在一个数量级上，需要对两种特征分别归一化。假设在一个聚类超像素区域内的最大像素偏移量方差和最大坐标分别为 N_s 和 N_c ，则距离测度定义为：

$$d_s = \sqrt{(v_{xi} - v_{xj})^2 + (v_{yi} - v_{yj})^2} \quad (4.5)$$

$$d_c = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4.6)$$

$$D = \sqrt{\left(\frac{d_s}{N_s}\right)^2 + \left(\frac{d_c}{N_c}\right)^2} \quad (4.7)$$

当每个点被分配给与之距离最近的聚类中心以后，对每个聚类中心分别计算属于该中心点的所有四维特征向量的均值，并用新区域中的四维向量的均值更新聚类中心。采用 **L2** 范数计算新的中心点与之前的中心点之间的差值 E ，重复进行赋值和更新步骤直到误差收敛。

在后续的处理步骤中，将单独的没有被聚类的像素或者像素个数低于阈值的超像素合并到与之距离最近的超像素中。

4.3.2 区域聚类

在湍流空间区域分割的步骤中我们划分出了固定数量的区域，然后进一步采用 **DBSCAN** 对超像素聚类^[61]，将像素偏移量方差接近的区域合并在一起，最终得到的每一个区域都具有相似的湍流强度。

DBSCAN 的方法根据数据的密度实现空间聚类，因为在聚类区域内点的密度通常高于区域外点的密度，该算法定义“簇”的概念为密度相连的点的最大集合，将具有一定数据密度的区域划分为一个簇。该方法的基本思想是，对于聚类的每个点，其一定半径的邻域中必须包含高于阈值数量的点，即邻域内点的密度必须超过一定阈值。关于算法首先作以下的定义：

(1) 定义点 p 的 Eps 邻域为：

$$N_{Eps}(p) = \{q \in D \mid dist(p, q) \leq Eps\} \quad (4.8)$$

(2) 直接密度可达(directly density-reachable)

聚类的目的是最终对于聚类C中的每一个点p, 都在C中存在点q, 使得p在q的 Eps 邻域内, 并且 $N_{Eps}(q)$ 中至少包含 MinPts 个点, 将这种状态定义作直接密度可达。

(3) 密度可达(density-reachable)

假设存在一个对象链 p_1, p_2, \dots, p_n , 且满足 $p_1 = q$, $p_n = p$, 使得 p_{i+1} 从 p_i 直接密度可达, 则称点p与点q关于 Eps 和 MinPts 密度可达。

(4) 密度连通(density-connected)

假设存在一个点o, 使得点p与点q都关于 Eps 和 MinPts 从点o密度可达, 则称点p与点q都关于 Eps 和 MinPts 密度连通。DBSCAN 算法的目的是得到使密度连通对象最大的集合。

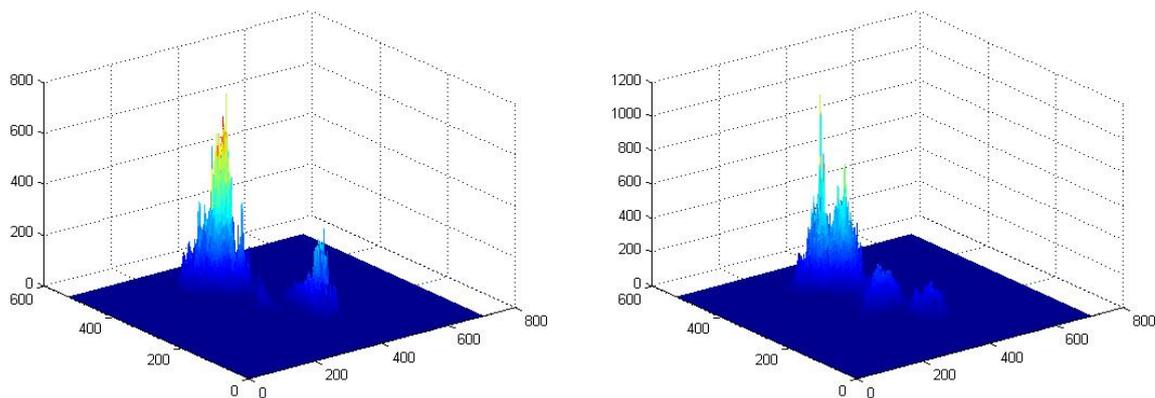
基于以上的定义, DBSCAN 聚类算法的过程可描述为, 首先扫描整个数据集, 找到任意一个核心点p, 寻找与该核心点所有密度相连的数据点, 用这些点对该核心点进行扩充。然后遍历核心点p所在 Eps 邻域内的所有核心点, 寻找与这些核心点构成密度相连的点, 直到没有可以继续扩充的数据点为止。最终聚类结果中簇边界上的节点都是非核心数据点。然后重新扫描簇中的任何数据点以外数据集, 找到未经过聚类的核心点, 再重复以上步骤, 直到数据集中不存在新的核心点。

4.4 实验

4.4.1 仿真数据测量结果

湍流强度测量的仿真数据通过第三章的空间强度起伏条件下仿真方法获取, 由于需要将测量值与湍流强度的真值对比, 本节中仅采用空间强度起伏条件下仿真的简化模型, 即采用路径平均的湍流强度。仿真时仍然采用工厂的场景作为原图像, 大气湍流参数与成像设备参数与 3.5.1 节保持一致, 在不同的湍流强度下进行仿真。弱湍流对应的折射率指数区间为 $C_n^2 < 6.4 \times 10^{-17} m^{-2/3}$, 仿真时采用的折射率指数范围为 $6.4 \times 10^{-18} m^{-2/3} \sim 6.4 \times 10^{-17} m^{-2/3}$, 在 10 组折射率指数条件下进行仿真; 中强湍流对应的折射率指数区间为 $C_n^2 = 6.4 \times 10^{-15} m^{-2/3} \sim 2.5 \times 10^{-13} m^{-2/3}$, 仿真时采用的折射率指数范围为 $7 \times 10^{-15} m^{-2/3} \sim 7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$, 在 10 组折射率指数条件下进行仿真。

对每一组仿真数据, 首先利用折射流场的方法计算像素偏移量, 然后对每一个点处的水平和垂直偏移量计算随时间变化的方差。在起伏强度为 $C_n^2 = 6 \times 10^{-17} m^{-2/3}$ 的条件下方差如图 24 中所示。



(a) (b)
图 24 (a)水平偏移量方差; (b)竖直偏移量方差

对折射流方差矩阵作 SLIC 分割, 结果如图 25 (a)所示。对比方法为光流法, 其方差矩阵的分割结果如图 25 (b)。再对分割结果作 DBSCAN 聚类, 结果如图 26 所示。



(a) (b)
图 25 (a)折射流方差分割结果; (b)光流方差分割结果



(a) (b)
图 26 (a)折射流显著区域检测结果; (b)光流法显著区域检测结果

在 SLIC 分割初始化时将所有超像素设置为包含相似数量的像素, 如图 25 中规则的六边形, 分割以后在仿真湍流模板区域超像素出现了明显的不规则形变。图 26 中所

有规则的六边形合并为一个整体区域，代表检测不存在像素偏移量方差的区域。最终划分出的像素偏移量方差显著的区域与模板的形状较一致，并且超像素的数量有限，在测量时可将每个区域作为一个统计样本。对折射流和光流法的矢量分割均可以得到与模板相似的形状，而折射流分割出的区域呈嵌套的结构，更符合湍流强度从中心向四周递减的特点。

弱起伏和中强起伏的条件下根据方差变化梯度划分出了不同数量和位置的区域，为了在不同强度下与真值对比，根据模板手动选择三个采样点，然后根据划分的区域计算采样点所在区域的平均湍流强度。根据模板，表 5 中为采样点的坐标和对应的湍流强度系数：

表 5 三个采样点的参数

	x	y	系数
1	390	170	0.7288
2	330	260	0.8123
3	320	370	0.9915



(a) (b)
图 27 (a)采样点示意图；(b)采样点所在区域示意图

弱湍流与中强湍流条件下，三个采样区域湍流强度的真值以及按照公式(4.3)估计出的湍流强度分别如表 6 和表 7 中所示。中强起伏的条件下由于湍流强度与像素偏移量方差之间为非线性的关系，采用弱起伏和强起伏的计算公式按照线性近似估计。在测量强度的时候公式(2.9)和公式(2.13)中的权值参数会影响计算结果，对此我们对弱起伏和中强起伏分别首先在一组强度下调整参数，然后采用同一组参数测量湍流强度。将三个采样区域在不同强度下的测量结果绘制曲线，由于光流法测量结果与真值数量级不同，为了方便对比我们采用取 C_n^2 测量结果对数作图^[1]。弱起伏条件下三个区域的测量结果如图 28(a)(b)(c)所示，中强起伏的测量结果如图 28(d)(e)(f)所示。

表 6 弱起伏湍流强度测量结果

	1			2			3		
	真值	折射流	光流	真值	折射流	光流	真值	折射流	光流
6.4×10^{-18}	3.3995 e-18	3.6513 e-18	9.1702 e-20	4.2233 e-18	6.0111 e-18	9.6072 e-20	6.2923 e-18	1.8156 e-17	8.3626 e-20
7.4×10^{-18}	3.9307 e-18	5.3214 e-18	1.0926 e-19	4.8832 e-18	5.9883 e-18	1.0483 e-19	7.2754 e-18	2.1817 e-17	1.2804 e-19
8.4×10^{-18}	4.4618 e-18	6.6951 e-18	1.3383 e-19	5.5431 e-18	1.2127 e-17	1.2150 e-19	8.2586 e-18	1.7955 e-17	2.7933 e-19
9.4×10^{-18}	4.9930 e-18	9.8541 e-18	1.7074 e-19	6.2030 e-18	1.2812 e-17	1.3019 e-19	9.2418 e-18	4.4796 e-17	1.4330 e-19
1.4×10^{-17}	7.4364 e-18	1.7711 e-17	2.8848 e-19	9.2386 e-18	2.0794 e-17	1.7703 e-19	1.3764 e-17	5.9765 e-17	1.8411 e-19
2.4×10^{-17}	1.2748 e-17	2.0371 e-17	5.4549 e-19	1.5838 e-17	3.7543 e-17	2.9054 e-19	2.3596 e-17	8.7920 e-17	2.9540 e-19
3.4×10^{-17}	1.8060 e-17	6.7123 e-17	7.7151 e-19	2.2436 e-17	1.3286 e-16	4.8178 e-19	3.3428 e-17	1.5308 e-16	5.2764 e-19
4.4×10^{-17}	2.3371 e-17	9.6907 e-17	1.1061 e-18	2.9035 e-17	2.9829 e-16	5.2884 e-19	4.3259 e-17	2.7002 e-16	4.6855 e-19
5.4×10^{-17}	2.8683 e-17	1.3004 e-16	1.3779 e-18	3.5634 e-17	2.7391 e-16	6.9990 e-19	5.3091 e-17	2.4247 e-16	7.6695 e-19
6.4×10^{-17}	3.3995 e-17	1.4313 e-16	1.7829 e-18	4.2233 e-17	2.6161 e-16	7.6448 e-19	6.2923 e-17	5.8338 e-16	7.8399 e-19

表 7 中强起伏湍流强度测量结果

	1			2			3		
	真值	折射流	光流	真值	折射流	光流	真值	折射流	光流
7×10^{-15}	3.7182 e-15	4.2962 e-15	1.7792 e-16	4.6193 e-15	7.6494 e-15	9.4924 e-17	6.8822 e-15	3.0893 e-15	1.1472 e-16
8×10^{-15}	4.2494 e-15	4.6216 e-15	1.8827 e-16	5.2792 e-15	6.1030 e-15	1.2439 e-16	7.8653 e-15	3.0607 e-15	1.2067 e-16
9×10^{-15}	4.7805 e-15	4.6900 e-15	2.2262 e-16	5.9391 e-15	4.8179 e-15	1.2515 e-16	8.8485 e-15	3.6013 e-15	1.9275 e-16
1×10^{-14}	5.3117 e-15	5.2248 e-15	2.6658 e-16	6.5990 e-15	5.0352 e-15	1.4128 e-16	9.8317 e-15	5.0800 e-15	1.9117 e-16
2×10^{-14}	1.0623 e-14	5.2448 e-15	4.8910 e-16	1.3198 e-14	1.4899 e-14	3.9025 e-16	1.9663 e-14	9.3551 e-15	3.8133 e-16
3×10^{-14}	1.5935 e-14	5.8851 e-15	7.4418 e-16	1.9797 e-14	1.6682 e-14	6.5192 e-16	2.9495 e-14	1.4081 e-14	4.8602 e-16
4×10^{-14}	2.1247 e-14	1.4991 e-14	5.7378 e-16	2.6396 e-14	1.8735 e-14	7.1733 e-16	3.9327 e-14	3.6289 e-14	7.5682 e-16
5×10^{-14}	2.6558 e-14	4.1786 e-14	1.0838 e-15	3.2995 e-14	2.7232 e-14	8.8719 e-16	4.9158 e-14	4.5660 e-14	7.9922 e-16
6×10^{-14}	3.1870 e-14	4.9428 e-14	1.1965 e-15	3.9594 e-14	4.8597 e-14	1.1395 e-15	5.8990 e-14	8.6509 e-14	1.0206 e-15
7×10^{-14}	3.7182 e-14	5.8097 e-14	1.4175 e-15	4.6193 e-14	6.7637 e-14	1.2559 e-15	6.8822 e-14	4.8125 e-14	1.1769 e-15

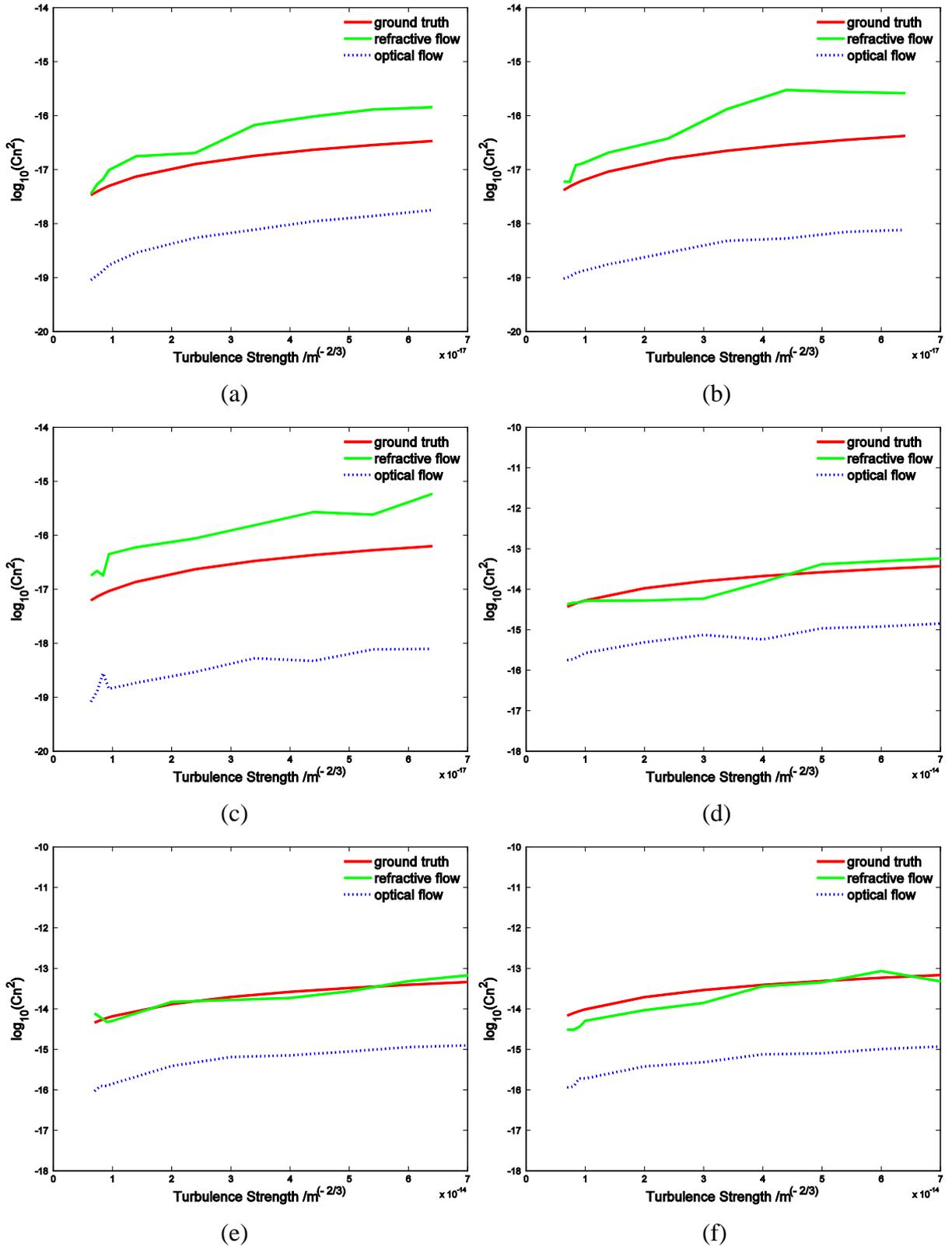


图 28 (a)弱湍流区域 1 测量结果; (b)弱湍流区域 2 测量结果; (c)弱湍流区域 3 测量结果; (d)中强湍流区域 1 测量结果; (e)中强湍流区域 2 测量结果; (f)中强湍流区域 3 测量结果

从图 28 中可以看出, 不论是在弱起伏还是在中强起伏的条件下, 三个区域的湍流

强度测量结果均呈随仿真强度增大而增大的总体趋势，与真值的变化趋势一致。弱起伏条件下采用折射流的强度测量结果均大于真值，而中强起伏条件下的测量结果与真值更接近，因此当强度测量结果位于中强起伏区间内时可认为结果较准确。在弱起伏和中强起伏条件下的强度测量结果均显示了采用折射流的计算结果比光流法更接近于真值。光流法与真值的结果相差可达到一个数量级，与一些实验中采用光流法的测量结果与闪烁计的测量结果对比结论一致^[1]。一种可能产生误差的来源是计算精度的限制，在弱起伏图像中的摆动非常微弱的情况下，光流的计算结果在 10^{-4} 至 10^{-2} 数量级之间，此时起伏强度较低的湍流几乎检测不到。另外一种可能的原因是计算统计参数时帧数的选择会影响精确度，实验中在测量时选取了 100 帧计算方差，若采用更大的样本会更加接近真值，但同时会引入更大的计算量，在用于实际测量时须在统计帧数与准确率之间达到平衡。

4.4.2 实际拍摄数据测量结果

本小节中将采用折射流从图像中测量湍流强度的方法推广至实际场景拍摄的图像序列，这些序列没有真值形成对比，然而可以验证区域分割以及强度测量方法的有效性。以下以工厂序列为例，视频序列中共 100 帧，每一帧为 600×1200 大小的 RGB 图像。首先采用折射流的计算方法对图像序列计算每一帧的折射流场，然后对每一个点处的折射流计算方差，分别得到水平和垂直方向的方差矩阵，如图 29 中所示。

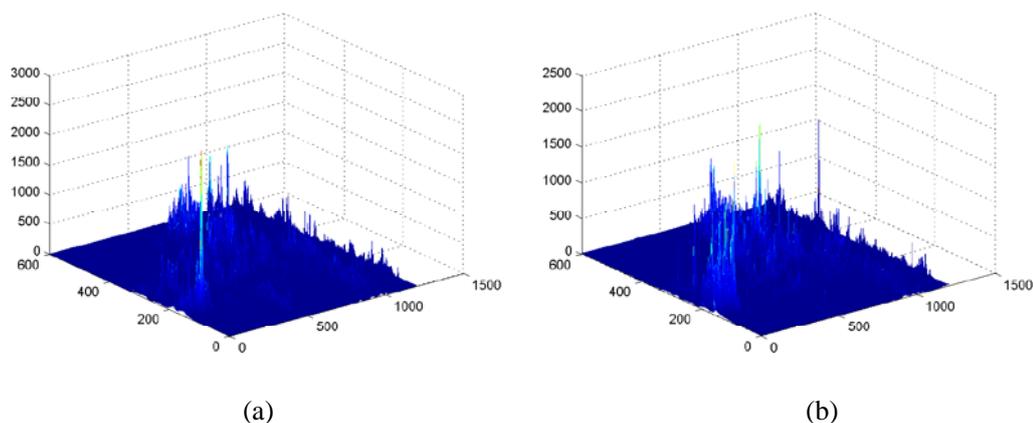


图 29 (a)折射流水平分量方差分布；(b)折射流垂直分量方差分布

接下来设定将偏移量方差的空间分布划分为 1000 个区域，即 SLIC 分割算法中取 $k=1000$ ，将水平和垂直偏移量方差以及像素坐标作为四维特征向量，根据 4.3.1 节中的方法分割出子区域，如图 30 中所示。然后设定相似度阈值为 5，将具有相似偏移量方差的子区域聚类合并，如图 31 所示。该步骤的结果可以显示出具有相似湍流强度的区域，表明湍流出现的大致位置。



图 30 区域分割结果



图 31 湍流区域聚类结果

经过分割和聚类一共提取出了 21 个湍流强度测量区域, 图 31 中标出了每个区域对应的标号, 标号 1 对应除了湍流区域以外的整个大区域, 因此测量时从标号 2 开始。用每一个区域中折射流方差的平均值通过公式(4.4)计算区域的平均湍流强度。由于大气参数和成像设备参数未知, 按照仿真时中强起伏采用的参数近似估计, 成像距离采用 $L = 1000\text{m}$ 。每个区域的强度测量结果如表 8 中所示。

表 8 湍流采样区域强度测量结果

区域编号	2	3	4	5	6
湍流强度/ $m^{-2/3}$	1.87×10^{-15}	2.23×10^{-15}	3.03×10^{-15}	4.94×10^{-15}	1.84×10^{-15}
区域编号	7	8	9	10	11
湍流强度/ $m^{-2/3}$	1.65×10^{-15}	4.48×10^{-15}	2.75×10^{-15}	2.40×10^{-15}	2.04×10^{-15}
区域编号	12	13	14	15	16
湍流强度/ $m^{-2/3}$	2.37×10^{-15}	6.31×10^{-15}	8.07×10^{-15}	1.10×10^{-15}	1.33×10^{-14}
区域编号	17	18	19	20	21
湍流强度/ $m^{-2/3}$	3.22×10^{-15}	4.32×10^{-15}	2.52×10^{-15}	1.98×10^{-15}	2.97×10^{-15}

实验结果表明区域分割和聚类方法有效地自动选取了湍流强度测量区域，在实际应用中可以通过调整初始化的区域数量以及聚类时相似度的参数调整测量样本的规模。本实验的测量结果均在中强起伏的范围内，根据仿真时的结论可以认为测量结果比较准确。虽然实际序列没有真值对比，但是可能的误差来源除了在仿真图像测量结果中分析的以外，本实验中针对所有的区域按照固定的成像距离估计强度，而实际图像序列中每个区域具有不同的深度，实际测量时可以按照划分后的区域参考 GPS 同时考虑距离信息。

4.5 本章小结

本章中我们采用折射光流作为图像偏移量，用折射光流的方差计算湍流强度。在计算之前首先按照折射流方差的大小对图像进行分割和聚类，以此确定测量范围。在仿真数据的实验中，我们在弱起伏和中强起伏的条件下分别得到 10 组存在空间强度起伏图像序列，测量结果表明分割和聚类可以有效地提取出湍流所在区域。与光流法测量结果的对比表明，采用折射流的方法得到的结果接近于真值，并且在中强起伏条件下的测量结果更准确。在实际拍摄数据的实验中，分割和聚类的方法也可以有效得到湍流区域，进一步可计算出每个区域的湍流强度。

第五章 结论与展望

5.1 结论

空间中流体的随机运动造成空气折射率的随机变化，光线在空间的流场中传播时被随机偏折，使得透过流场成像的图像中出现相应的随机摆动。图像中的随机摆动一定程度上反映了空气中流体的运动，因此为流场的探测提供了新途径。本文针对采用光流法的图像探测流体的方法，从折射光流的理论和应用方面展开研究。本文的主要工作为以下几个方面：

- (1) 研究流体运动产生图像中折射光流的模型。首先研究流体运动导致像素偏移量的模型，证明不同时刻的摆动量守恒，然后定量推导摆动量和折射流的计算方法。实验验证结果表明，该模型可以比光流法更有效的检测出图像中流体运动产生的折射流，且摆动量的统计特性满足高斯分布。该模型同时可以应用于视频检测热源温度异常产生的流体。
- (2) 提出了一种平面内和沿光线传播路径上存在湍流强度起伏的大气湍流中成像仿真方法。首先将单层流体的模型作为简化模型，分析流体的深度和运动幅度对图像产生的影响。在大气湍流成像仿真时，我们将退化图像看作为不同深度和不同运动参数的单层流体对图像产生退化效应的叠加。通过设定空间中和成像路径上湍流的分布和属性，实现了存在平面和路径湍流强度起伏的成像仿真。
- (3) 实现了利用折射光流测量大气湍流强度的方法。折射流场模型提供了一种计算图像像素偏移量的方法。利用图像偏移量与到达角起伏方差之间的联系，以及到达角起伏方差与湍流强度之间的联系，间接通过折射光流估计流场强度信息。同时，我们借助分割和聚类的方法确定测量区域。在不同强度下的对比结果表明折射流比光流法具有更高的准确度，并且在中强起伏的区间内折射流测量结果更接近于真值。该测量方法可以被推广至实际湍流退化图像序列的强度测量。

5.2 展望

本文中在测量湍流以及仿真时，采用了简化模型来简化问题。未来的工作可以围绕以下方面展开：

- (1) 在测量湍流强度时，由于需要与真值进行对比，本文中在仿真实验中仅采用了存

在空间强度起伏的湍流退化图像序列。而实际上存在时空湍流强度起伏的模型与真实情况中的湍流退化图像更接近，针对时空湍流强度起伏仿真图像测量湍流强度时可以结合层析的方法，采用图像法测量存在强度起伏时的湍流强度。

(2) 在时空湍流强度起伏仿真时，本文中默认湍涡静止，即在仿真的时间内湍涡的空间位置不发生改变。而实际情况下当存在切向风时湍涡的位置会发生平移，改进时可以根据 Taylor 冻结假设，使路径中的某一层或几层中的湍涡分布平移。或者再进一步在不同的时刻使每一层中湍涡的分布也发生改变的条件下仿真。

(3) 本文中在测量湍流强度时，将折射光流的方法与 HS 稠密光流法的测量结果进行对比。由于湍流退化图像序列中的像素偏移量主要由相位起伏引起，未来的工作中可以将该方法与更多像素偏移量的方法进行对比，例如相位光流法等。本文中的实验主要针对湍流仿真图像，未来的实验中可以更多地采用实际拍摄图像，并与闪烁计等方法的测量结果对比。

参考文献

- [1] Zamek S., Yitzhaky Y. Turbulence strength estimation from an arbitrary set of atmospherically degraded images [J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2006, 23(12): 3106-3113.
- [2] Alterman M., Schechner Y. Y., Vo M., et al. Passive tomography of turbulence strength[A]. *European Conference on Computer Vision[C]*. Springer: 47-60.
- [3] Çaliskan T., Arica N. Atmospheric Turbulence Mitigation Using Optical Flow[A]. *Pattern Recognition (ICPR), 2014 22nd International Conference on[C]*. IEEE: 883-888.
- [4] Tian Y., Narasimhan S. G., Vannevel A. J. Depth from optical turbulence[A]. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on[C]*. IEEE: 246-253.
- [5] McKechnie T. S. General theory of light propagation and imaging through the atmosphere [M]. Springer, 2016
- [6] Dalziel S. B., Hughes G. O., Sutherland B. R. Whole-field density measurements by 'synthetic schlieren' [J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 28(4): 322-335.
- [7] Xue T., Rubinstein M., Wadhwa N., et al. Refraction wiggles for measuring fluid depth and velocity from video[A]. *European Conference on Computer Vision[C]*. Springer: 767-782.
- [8] 束继祖, 李华煜. 流场显示技术在流体力学中的应用和展望 [J]. *力学进展*, 1979, 1): 28-39.
- [9] Prasad A. K. Particle image velocimetry [J]. *CURRENT SCIENCE-BANGALORE-*, 2000, 79(1): 51-60.
- [10] Jiang F., Tai Y. C., Ho C. M., et al. Theoretical and experimental studies of micromachined hot-wire anemometers[A]. *International Electron Devices Meeting[C]*. 139-142.
- [11] 吴晓庆, 方强, 饶瑞中. 近海边高空光学湍流的探空测量与模式比较 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(10): 1605-1609.
- [12] Smalikhov I., Köpp F., Rahm S. Measurement of Atmospheric Turbulence by 2- μm Doppler Lidar [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2005, 22(11): 1733-1747.
- [13] Johnston R. A., Wooder N. J., Reavell F. C., et al. Horizontal scintillation detection and ranging $C_n^2(z)$ estimation [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(18): 3451-3459.
- [14] 张俊, 张俊, 胥頔, et al. 背景纹影技术算法研究 [J]. 中国空气动力学会测控专业委员会六届四次空气动力测控技术交流会, 2013,
- [15] 周昊, 吕小亮, 李清毅, et al. 应用背景纹影技术的温度场测量 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(5): 63-67.
- [16] 张俊, 胥頔, 张龙. 背景纹影密度场测量研究[A]. 中国空气动力学会测控专业委员会第六届六次全国学术交流会[C].
- [17] Consortini A., Innocenti C., Ceccarelli S. Measuring the refractive index gradient of the atmosphere[A]. *Remote Sensing[C]*. 59810C-59810C-59819.
- [18] Vilcheck M. J., Moore C. I., Suite M. R. Multiple methods for measuring atmospheric turbulence [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2002, 300-309.
- [19] Fleet D., Weiss Y. Optical flow estimation [M]. *Handbook of mathematical models in*

computer vision. Springer, 2006: 237-257.

[20] Anandan P. A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1989, 2(3): 283-310.

[21] Lucas B. D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[A]. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*[C]. 285-289.

[22] Nagel H. H., Enkelmann W. An investigation of smoothness constraints for the estimation of displacement vector fields from image sequences [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1986, 8(5): 565-593.

[23] Nagel H. H. On the Estimation of Optical Flow: Relations between Different Approaches and Some New Results [J]. *Artificial Intelligence*, 1987, 33(3): 299-324.

[24] Horn B. K., Schunck B. G. Determining optical flow [J]. *Artificial Intelligence*, 1981, 17(1-3): 185-203.

[25] Adelson E. H., Bergen J. R. Spatiotemporal energy models for the perception of motion [J]. *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, 1985, 73(2): 284-299.

[26] Big, Josef N., Granlund G., et al. Multidimensional Orientation Estimation with Applications to Texture Analysis and Optical Flow [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1991, 13(8): 775-790.

[27] Fleet D. J., Jepson A. D. Computation of component image velocity from local phase information [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1990, 5(1): 77-104.

[28] Fleet D. J. *Measurement of Image Velocity* [M]. Kluwer Academic, 1992: 381.

[29] Tretiak O., Pastor L. Velocity estimation from image sequences with second order differential operators[A]. *Proc seventh international conference on pattern recognition*[C]. 16-19.

[30] Kearney J. K., Thompson W. B., Boley D. L. Optical Flow Estimation: An Error Analysis of Gradient-Based Methods with Local Optimization [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1987, 9(2): 229-244.

[31] Black M. J., Anandan P. The robust estimation of multiple motions: parametric and piecewise-smooth flow fields [J]. *Computer Vision & Image Understanding*, 1996, 63(1): 75-104.

[32] Brox T., Bregler C., Malik J. Large displacement optical flow[A]. *IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition*[C]. 41-48.

[33] Sun D., Roth S., Black M. J. A Quantitative Analysis of Current Practices in Optical Flow Estimation and the Principles Behind Them [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2014, 106(2): 115-137.

[34] Jahne B. Image sequence analysis of complex physical objects: nonlinear small scale water surface waves[A]. *Proc IEEE ICCV London*[C]. 191-200.

[35] Heeger D. J. Optical flow using spatiotemporal filters [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1988, 1(4): 279-302.

[36] Gautama T., Van Hulle M. A phase-based approach to the estimation of the optical flow field using spatial filtering [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2002, 13(5): 1127-1136.

[37] Wadhwa N., Rubinstein M., Durand F., et al. Phase-based video motion processing [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2013, 32(4): 80.

[38] Baker S., Roth S., Scharstein D., et al. A database and evaluation methodology for optical

- flow[A]. IEEE International Conference on Computer Vision[C]. 1-8.
- [39]Ruhnau P., Kohlberger T., Schnörr C., et al. Variational optical flow estimation for particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 38(1): 21-32.
- [40]Ruhnau P., Schnörr C. Optical Stokes flow estimation: an imaging-based control approach [J]. *Experiments in Fluids*, 2007, 6(1): 863–864.
- [41]Repasi E., Weiss R. Analysis of image distortions by atmospheric turbulence and computer simulation of turbulence effects [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2008, 6941(69410S-69410S-69413).
- [42]Repasi E., Weiss R. Computer simulation of image degradations by atmospheric turbulence for horizontal views[A]. *SPIE Defense, Security, and Sensing*[C]. 1-12.
- [43]Zhu X., Milanfar P. Removing Atmospheric Turbulence via Space-Invariant Deconvolution [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2013, 35(1): 157-170.
- [44]Gibson K. B., Nguyen T. Q. An Analysis and Method for Contrast Enhancement Turbulence Mitigation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2014, 23(7): 3179-3190.
- [45]Kafadar K. Applied Smoothing Techniques for Data Analysis: The Kernel Approach with S-PLUS Illustrations by Adrian W. Bowman; Adelchi Azzalini [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1997, 94(447): 982.
- [46]Lilliefors H. W. On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1967, 62(318): 399-402.
- [47]Bernard P. S., Wallace J. M. Turbulent flow: analysis, measurement, and prediction [M]. John Wiley & Sons, 2002: 467.
- [48]Kolesov I., Karasev P., Tannenbaum A., et al. Fire and smoke detection in video with optimal mass transport based optical flow and neural networks[A]. *IEEE International Conference on Image Processing*[C]. 761-764.
- [49]Zhang J., Zhang Q., He G. Multiframe blind image restoration based on a multiplicative iterative algorithm [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(2): 027004.
- [50]Zhang J., Zhang Q., He G. Blind image deconvolution by means of asymmetric multiplicative iterative algorithm [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(3): 710-717.
- [51]饶瑞中. 现代大气光学 [M]. 科学出版社, 2012
- [52]Hill R. J. Corrections to Taylor's frozen turbulence approximation [J]. *Atmospheric Research*, 1996, 40(s 2–4): 153-175.
- [53]Kroese D. P., Botev Z. I. Spatial Process Simulation [M]. Springer International Publishing, 2015: 369-404.
- [54]Tatarskii V. I. The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation [J]. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1971, 1971,
- [55]Wilson R. W. SLODAR: measuring optical turbulence altitude with a Shack–Hartmann wavefront sensor [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2002, 337(1): 103–108.
- [56]Gimmestad G. G., Roberts D. W. Laser remote sensing of atmospheric turbulence [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2003, 5087(167-172).

- [57]R. W.-WRANA K. Turbulence statistics applied to calculate expected turbulence-induced scintillation effects on electro-optical systems in different climate regions [J]. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 2005, 5891(58910D-58910D-58912).
- [58]Consortini A., Innocenti C., Ceccarelli S. Refractive Index Gradient in the Turbulent Atmosphere[A]. Photonic Metamaterials: From Random to Periodic[C]. Optical Society of America: ThC5.
- [59]Yamamoto Y., Noda M., Ohno M., et al. Restoration of atmospherically blurred images according to weather-predicted atmospheric modulation transfer function [J]. Optical Engineering, 1997, 36(11): 3064-3072.
- [60]Achanta R., Shaji A., Smith K., et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(11): 2274-2282.
- [61]Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[A]. Kdd[C]. 226-231.

攻读硕士学位期间取得的学术成果

- [1] Liu J.Y., Xue B.D., Cui L.Y. Analysis of Statistical Properties of Atmospheric Turbulence-Induced Image Dancing Based on Hilbert Transform and Dense Optical Flow[A]. Signal Processing (ICSP), 2016 IEEE 13th International Conference on[C]. IEEE, 2016:702-707.

致谢

毕业论文完成了，我的北航研究生生活即将结束。我将带着对母校师生的眷恋开始新的生活。

首先，由衷感谢我的导师薛斌党老师，他引领我走进了探索大气湍流的全新领域。师从薛老师的两年多以来，他为培养教育我花费了很多精力和心血。从专业理论的学习到培养良好的写作习惯，薛老师都对我严格要求耐心指导，为我今天顺利完成毕业论文夯实了基础。从毕业论文的选题到完稿，每一步薛老师都认真督导，及时指出我不足之处，并且敦促我遇到疑难问题及时联系参考文献的作者学习探讨，使我在完成毕业论文的过程中开阔了视野，养成了向业界牛人学习的习惯。另外，薛老师谦和与人相处，严谨治学的科学作风，对专业不断探索的精神深深地影响和教育了我，将会对我未来的工作和生活产生深远的影响。

感谢图像中心的白相志老师、曹晓光老师对我硕士期间学习和生活的关心与帮助。感谢周付根老师、史振威老师对我的激励，提高我对数学基础的重视。感谢图像中心的每一位老师，您们精彩纷呈的课堂让我受益匪浅。

感谢崔林艳师姐和曹雷师兄在平日的实验室生活中给予我的帮助。崔师姐以开朗的性格和人格魅力让我对女博士有了新的认识，成为了我努力学习的榜样。感谢刘易同学，始终以平和乐观的心态感染着我，使我更懂得沟通和合作。感谢我的室友们，两年多的融洽生活打造了一个可以无话不谈的轻松宿舍氛围。感谢我的男朋友罗林聪同学，在我取得了好成绩时为我欢呼雀跃，在我失落的时候鼓励我陪伴我走出困境。

最后，非常感谢我的父母，他们因为对我无私的爱克服了两代人之间观念的不同，无论我做出什么样的决定他们都义无反顾的支持我，做我坚实的后盾。这份爱将伴随我一生，让我在未来的路上不畏艰难，勇敢前行。