

·测试、试验与仿真·

## 利用光场探测技术重建温度场

温国庆

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051)

**摘要:**探讨了用光场探测技术重建温度场分布及其变化的可行性,运用光场探头和CCD相机获取多组穿过目标区域一一对应的入射光线和出射光线,再运用费马原理来建立光程函数重建该区域温度场。用matlab软件进行了仿真,在算法的选用上,将选用PCG迭代算法来解决这种非完全投影数据的重建问题。重建结果表明,该方法是一种有效的方法,可以用于重建整个温度场分布,相比传统的测温方法有很大的优点。

**关键词:**温度场;光场探测器;PCG算法

中图分类号:TN911.74

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-05-0059-04

## Reconstructing Temperature Field Using Light-field Probe Technology

WEN Guo-qing

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The feasibility of temperature field distribution reconstructing and its changes reconstructed by light-field probe technology is discussed. The light-field probe and CCD camera are used to obtain multiple groups of incident and outgoing light which is correspondence to each other through the target area. Fermat principle is used to establish optical path function to reconstruct the temperature field of the area. Matlab software is used for simulation. PCG iterative algorithm is chosen to solve the reconstruction problem of incomplete projection data. Reconstruction results show that the method is effective that can be used to reconstruct entire temperature field distribution. And it has some advantages comparing with traditional temperature measurement methods.

**Key words:** temperature field; light field probe; PCG algorithm

温度场的测量在许多研究领域具有十分重要的意义。然而,温度场的测量十分复杂,一般来说,温度的测量方法分接触式和非接触式两类。在接触式测温法中,主要用热电偶传感器测温,由于接触式的热电偶测得的只是某一点的温度,测不到整个场的温度分布,而且容易干扰流场;在非接触式测温法中主要有红外测温法、多光谱辐射测温法等,这些方法主要测得的是表面的温度分布,最后得到的温度分布不够精确。基于这些传统的测量方法,将光场探测技术引用于测量温度场,利用CCD高速相机通过待重建区域观察光场探头,获得

光场信息,然后重建其光路,得到折射率场分布,通过gladstone-dale(G-D)公式<sup>[6]</sup>建立与温度场分布的关系。该方法可以实现实时重建目标区域的折射率场,进而得到有效的温度分布<sup>[1]</sup>。

### 1 理论方案

重建目标区域折射率场,光线经过该非均匀介质区域时会发生折射,当强光穿过非均匀分布的空气场时,会发生折射,利用光场探测器捕获折射光线的四维光场信息,建立入射线-出射线的对应关系,根据费马原理,建立各光路与介质折射率的偏

微分方程组,然后利用PCG算法重建出该区域的介质折射率。从物理上得到介质密度与折射率之间的关系,就可以重建出整个爆炸场的密度分布。

### 1.1 光场探测

光场探测器就是一个倒置的光场相机,把相机的传感器换成一个颜色编码模式,其原型是由光盒、透明胶片、透镜阵列组成,如图1。相机拍摄得到的图像是一些带有颜色的像素点,每个像素点对应着一条射线  $V_{in}$ 。透镜阵列相当于针孔相机阵列,每个透镜对应着一条射线  $V_{out}$ ,透镜的个数决定了空间分辨率,实验忽略了由折射引起的波长损失<sup>[2]</sup>。

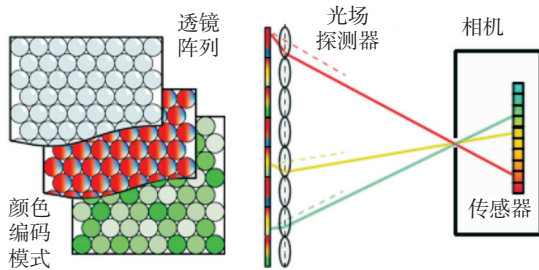


图1 光场探测器原理图

由实验获取每一对射线的对应关系,  $V_{in}$ 是预先校准好的,  $V_{out}$ 通过光场探测器颜色编码模式得到,观察相机拍摄的图像像素点的颜色可以得到  $V_{out}$ 向量的位置和方向信息。

### 1.2 对应射线获取原理

每个透镜都对应着一条光线,通过色彩匹配判断射线-射线对应关系。因此,首先校准印刷出来的光场探头图案和所观察到的图像之间的颜色。一个棋盘图案被放置到探头旁边,用于测量探头相对于相机的方向。一旦确定了相机收集来的  $\beta$  方向的射线,摄像头的轴线和探头之间的角度  $\alpha$ ,就可以计算该射线的方向,  $\gamma = \alpha + \beta$ ,如图2所示。

在探头内的每个小透镜都能取得每个RGB通道和方向之间的曲线。从特定的小透镜取一个样本曲线,如图3。红色/蓝色通道为每个微透镜的配色,可以将每一个观察到的像素和一条入射射线的方向相匹配。使用一个在绿色通道上的随机噪声图案,确定入射光线的位置,这样就可以获得一一对应的射线。

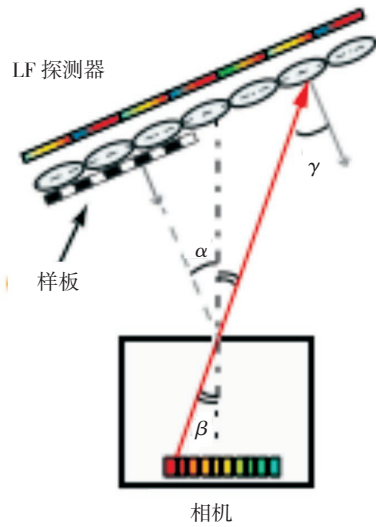


图2 射线获取

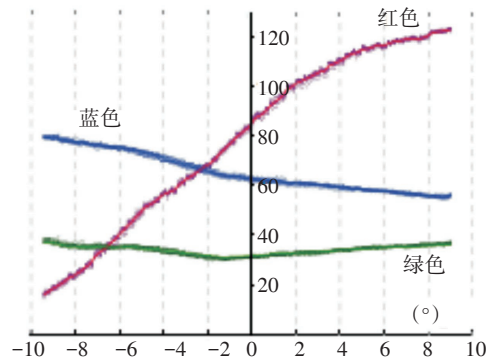


图3 一个特定透镜内样本曲线

## 2 重建原理

通过光场探测器得到了多条射线的对应关系以及偏折角信息,为了重建待测区域的折射率场,传统的方法是通过光程函数对光路进行分析,而文中采用费马原理来重建光路。

费马原理又叫做最短光程原理。一条实际光线在任意两点  $P_1P_2$  间的光学长度  $\int_{P_1}^{P_2} n ds$  最短,比任何其他曲线的光学长度都短,这些比较曲线应该在属于这条光线的某正则领域内。所谓正则邻域,是指可以被光线这样覆盖的一个邻域,其中每一点有一条(也只有一条)光线通过<sup>[3]</sup>。例如,在点源  $P_1$  周围,在没有光线因折射或反射,或弯曲而相互交叉的区域,就形成这种覆盖。

假设任意光路  $c$ ,  $s$  是  $c$  的光程长度,  $n$  是经过光路  $c$  上每一点  $p(x, y, z)$  的折射率,则有

$$s = \int_c n(p) ds \quad (1)$$

用  $(x(t), y(t), z(t))$  表示光线到达点  $(x, y, z)$  时的时间函数, 有

$$s = \int_c L dt, L = n(p) \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \quad (2)$$

式中,  $x_i = \frac{\partial x}{\partial t}, y_i = \frac{\partial y}{\partial t}, z_i = \frac{\partial z}{\partial t}, n(p)$  是在点  $p$  处的折射率;  $L$  通常被称为光学拉格朗日算符。由费马定理, 每个光路  $C$  对应最短光程长度<sup>[4-5]</sup>, 则在变分法中上述公式又可以写成

$$\delta S = 0 \text{ 或者 } \delta \int_c L dt = 0 \quad (3)$$

如果有光路就能估算折射率场, 由式(3),  $L$  应该满足欧拉-拉格朗日方程<sup>[6]</sup>

$$\left( \frac{\partial L}{\partial x}, \frac{\partial L}{\partial y}, \frac{\partial L}{\partial z} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial x_i}, \frac{\partial L}{\partial y_i}, \frac{\partial L}{\partial z_i} \right) \quad (4)$$

只考虑  $x$  时, 将式(2)中的  $L$  代入式(4)中, 得

$$\frac{\partial n(p)}{\partial x} \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} = \frac{d}{dt} \left( n(p) \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \right) \quad (5)$$

假设光线到达气流时  $t=t_0$ , 离开时  $t=t_1$ , 则有

$$\int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial n(p)}{\partial x} \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} dt = \left( n(p) \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \right) \Big|_{t_0}^{t_1} \quad (6)$$

将  $(p^{in}, p^{out}, \vec{d}_x^{in}, \vec{d}_x^{out})$  代入式(6)得

$$\int_{p^{in}}^{p^{out}} \frac{\partial n(p)}{\partial x} ds = n(p^{out}) \vec{d}_x^{out} - n(p^{in}) \vec{d}_x^{in} \quad (7)$$

$Y$  和  $Z$  与  $X$  相同, 为了重建折射率场, 使空间划分为体元, 估算每个体元的折射率<sup>[2]</sup>为

$$\sum_c l(p) \begin{pmatrix} n(p_{x+1,y,z}) - n(p_{x,y,z}) \\ n(p_{x,y+1,z}) - n(p_{x,y,z}) \\ n(p_{x,y,z+1}) - n(p_{x,y,z}) \end{pmatrix} = n_{air} \begin{pmatrix} \vec{d}_x^{out} - \vec{d}_x^{in} \\ \vec{d}_y^{out} - \vec{d}_y^{in} \\ \vec{d}_z^{out} - \vec{d}_z^{in} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中,  $l(p)$  是体元  $P$  内一条射线的距离, 将上式写成矩阵形式为

$$AX = G \quad (9)$$

其中,  $G = (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3 \cdots \Delta\theta_m)$  为各条射线入射和折射角度差的  $M$  维向量即投影向量;  $X = (X_1, X_2 \cdots X_N)$  为待求离散单元的折射率值, 为  $N$  维的未知列向量;  $A$  为  $M \times N$  阶稀疏矩阵, 其元素为  $A_{ij}$ 。矩阵方程组中, 因为射线只通过了网格单元的很少一部分, 所以矩阵  $D$  是一个大型稀疏矩阵, 非零元素占很少比例; 不完全投影决定了问题的欠定性, 方程采用 PCG 算法求解。

### 3 PCG 重建算法

共轭梯度法是介于最速下降法与 Newton 法之间的迭代方法, 是解大型非线性最优化最有效的算法之一。为了进一步加速收敛的速度, 提出对方程组系数矩阵进行预处理, 引入预处理矩阵, 可以减少迭代次数, 从而提高了迭代收敛速度。这种方法就是预处理共轭梯度法即 PCG 法<sup>[7]</sup>。

预处理是对系数矩阵  $A$  构造一个相似矩阵  $W$ , 对方程作预处理, 具体做法如下。

温度场的测量在许多研究领域具有十分重要的意义。然而, 温度场的测量十分复杂。

构造一个对称正定矩阵  $W = L^T L$  作为  $A$  的近似矩阵, 使方程组  $AX = G$  转化为:  $\hat{A}\hat{X} = \hat{G}$

共轭梯度法的迭代形式如下。

$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$ 。其中,  $d_k$  为搜索方向

$$d_k = \begin{cases} -g_k & k=0 \\ -g_k + \beta_k d_{k-1} & k \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\beta_k$  是参数, 其不同的选取对应不同的共轭梯度法;  $\alpha_k$  为步长, 由某种线搜索确定。常用的非精确线搜索有

$$\begin{aligned} f(x_k + \alpha_k d_k) - f(x_k) &\leq \sigma_1 \alpha_k g_k^T d_k \\ \nabla f(x_k + \alpha_k d_k)^T d_k &\geq \sigma_2 g_k^T d_k \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $0 < \sigma_1 \leq \sigma_2 < 1$ 。

### 4 模拟场景重建及结果分析

#### 4.1 模拟场景重建

测试一个静态气流温度分布, 它的温度场服从高斯分布, 把这个静态气流划分成  $23 \times 23 \times 23$  个体元, 用三个光场探测器, 每个探测器有  $60 \times 60$  个透镜阵列。如前面所述, 此方程组总共有  $36 \times 36 \times 36 \times 3 = 32\ 400$  个方程;  $23 \times 23 \times 23 = 12\ 167$  个未知数。假设实验没有噪声影响, 所以直接用红/蓝通道提取方向, 绿色通道提取光线原点, 得到对应关系, 利用 PCG 算法迭代光路, 直到与前一次相比变化不大为止。

假设在目标区域边界处的体元的折射率  $n = n_{air} = 1.000\ 293$ , 这是偏微分方程的边界条件。运用所有的光线得到偏微分方程组。对于任意  $P, n(p) > 1$ , 基于这些约束条件, 使迭代次数减少, 加快

收敛速度。

## 4.2 matlab 仿真及结果分析

切面温度场仿真结果如图4所示。图4a是光场探测器中随机的图像模板,图4b和图4c分别为绿色通道的光流方向以及射线的变化方向。图4d为假设的遵循高斯分布的温度场,图4e为PCG算法迭代一次后目标区域的温度分布,图4f为迭代三次后的温度分布图。由图可以看到,经过PCG算法迭代三次后已经可以大致重建出目标区域的温度场。本试验迭代三次,重建平均误差百分比为1.13%,最大误差百分比为1.58%。

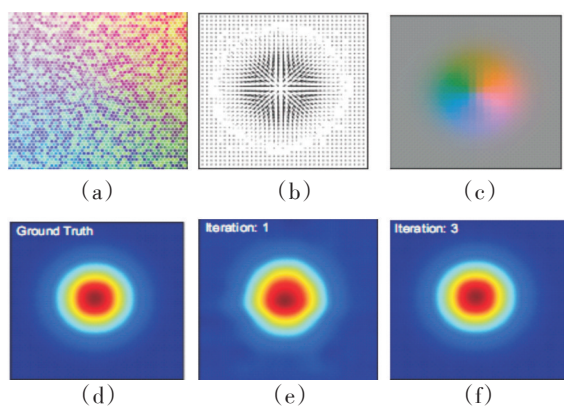


图4 切面温度场分布

## 5 结论

提出了一种新的用于重建温度场的计算成像方案,即用一组光场探测器和CCD相机确立射线的对应关系,然后使用这些对应关系迭代估算光路及折射率场,进而重建温度场。模拟实验显示,这种方法能够提供一种便携的可靠的方案,这种方法在对高温物体周围温度场分布的测量以及复杂流场分析等都有很好的应用前景。

## 参考文献

- [1] 复杂流场光偏折层析的理论与实验研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.
- [2] Atcheson, Ihrke I, Heidrich W, et al. Time-resolved 3D capture of non-stationary gas flows[J]. ACM SIGGRAPH, Asia, 2008.
- [3] Aleksandrov L, Maheshwari A, Sack J-R. Approximation algorithms for geometric shortest path problems[J]. In ACM symposium on Theory of Computing, 2000.
- [4] Blake A. Specular stereo[C]//In Proc. of international joint conference on artificial intelligence, 1985: 973-976.
- [5] Bonfort T, Sturm P. Voxel carving for specular surfaces[J]. In ICCV, 2003.
- [6] 高益庆. 用全息干涉 C-T 技术重建三维折射率场[J]. 激光杂志, 1997, 18(6).
- [7] 张斌, 宋肠, 贺安之. 光偏折层析的 Tikhonov 正则化重建技术[J]. 光学学报, 2007, 27(5).
- [8] 白苗苗, 郭亚丽, 王黎明. 水中爆炸冲击波超压场重建算法与比较[J]. 弹箭与制导学报, 2014(6).
- [9] 邓诗涛. 变折射率介质中的光传输及像质评价[D]. 浙江:浙江大学,2008.
- [10] 孙楠. 三维光学体层析重建技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
- [11] 姚红兵. 复杂流场光学 CT 理论与实验研究[D]. 南京:南京理工大学,2004,11.
- [12] 刘东红. 用于温度场研究的光折变全息干涉计量术[J]. 光电工程, 2001(4).
- [13] 李铮, 李长军, 邵新慧. 在最优准则下的共轭梯度重建算法[J]. 东北大学学报, 2003(12).
- [14] 黄战华, 程红飞. 变折射率介质中光线追迹通用算法的研究[J]. 光学学报, 2005(5).
- [15] 张晋. 求解大型稀疏线性方程组若干迭代算法的研究与应用[D]. 宁夏:北方民族大学, 2014(4).
- [16] 陈恒, 韩建, 谷俊达, 等. 径向偏向光的研究及检测方法[J]. 光电技术应用, 30(3): 58-61.