

燃油喷雾内部构造可视化的激光 CT 技术(1)

——喷雾图象重建方法的研究

王德忠 黄震 陈来高* 张连方 童澄教 庄天戈*

(上海交通大学动力机械工程系,* 仪器工程系, 上海, 200030)

摘要: 为应用激光 CT (Computed Tomography) 技术实现燃油喷雾内部构造可视化, 本文针对燃油喷雾的特点, 对卷积反投影法 (Convolution back projection 简称 CBP)、代数重建技术 (Algebraic reconstruction technique 简称 ART) 和同时迭代重建技术 (Simultaneous iterative reconstruction technique 简称 SIRT) 三种算法应用于喷雾图象的重建进行了研究。在 P540 图象处理系统上对标准喷雾模型进行重建, 结果表明在投影数据存在噪声时, SIRT 法重建图象质量最佳, 但所需时间最长, CBP 法重建图象质量最差, 但运算时间最少, 而 ART 法介于两者之间。

关键词: 图象重建 激光 CT 燃油喷雾 数字图象处理系统

Visualization of internal structure of fuel spray using laser computed tomography technique(1)

——A study of image reconstruction algorithms for fuel spray

Wang Dezhong, Huang Zhen, Chen Laigao

Zhang Lianfang, Tong Chengjiao, Zhuang Tiange

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030)

Abstract: According to the characteristics of fuel spray, CBP (Convolution back projection), ART (Algebraic reconstruction technique) and SIRT (Simultaneous iterative reconstruction technique) were studied on the image reconstruction of fuel spray. The reconstruction results of the phantom using P540 digital image processing system showed that when there is noise in the projection data, the best image

参 考 文 献

- 1 Catts Y A. L F World, 1989; 25: 73
- 2 Moulton P F. J O S A, 1986; B3: 125
- 3 吴路生, 陈一宏, 赵梅荣 *et al.* 中国激光, 1989; 16(1): 4
- 4 谢建平. 量子电子学, 1992; 9: 338
- 5 高国昌, 夏宇兴, 李予尧 *et al.* 量子电子学, 1990; 7: 366
- 6 吴路生, 韦 丽, 周东方 *et al.* 中国激光, 1995; 22(3): 168

作者简介: 吴路生, 男, 1949 年出生。副研究员, 研究室副主任。从事可调谐固体激光器、非线性光学、单晶光纤生长以及激光应用等研究工作。1987~ 1990 年赴瑞士联邦苏黎世高级理工大学工作。

was reconstructed by SIRT whose calculation time was longest, the worst image was reconstructed by CBP whose calculation time was shortest, and ART is between them.

Key words: image reconstruction laser computed tomography fuel spray digital image processing system

一、引 言

由于投影重建图象在许多领域得到应用,如医学诊断,工业无损检测,地震预测预报等^[1]。近年来,国外有些学者用激光作光源,用计算机层析技术研究喷雾特性,在研究中取得了一些有价值的成果,但在重建喷雾图象时,没有具体考虑喷雾本身特性,只采用医学中 X 射线 CT 常用的卷积反投影法^[2,3]。通常情况下,燃油喷雾的激光 CT 测试技术和医学中 X 射线 CT 在采集投影数据时有所不同,医学中 X 射线 CT 每个方向采集一维投影数据,而激光 CT 则在每个方向采集二维投影数据,并且燃油喷雾是一个高速瞬变过程,采集投影数据时难免存在一些噪声^[4]。所以,根据柴油机喷雾的特点和具体实验条件,研究适合柴油机喷雾的算法是十分重要的。

二、图象重建算法

重建图象时要根据研究对象确定算法,本文的研究对象为燃油喷雾,在此仅讨论 CBP, ART, SIRT 三种算法。

1. CBP 重建算法 CBP 是目前医用 CT 中用得最多的重建算法。其基本原理是通过不同视角下的投影数据用解析的方法求取物体内部的线性吸收系数。在图 1 中,对于任意一个空间物体,设在各方向(φ)上测出的投影值为 $P_{\varphi}(x)$, 根据 $P_{\varphi}(x)$ 可利用下式来求取物体内部各点的线性吸收系数 $\mu(x, y)$ ^[1] (写成极坐标形式为 $\mu(r, \theta)$)

$$\mu(r, \theta) = \int_0^{\pi} h(x_r) * P(x_r, \varphi) d\varphi \quad (1)$$

式中, $x_r = r \cos(\theta - \varphi)$ 。其物理意义是:经过给定点 (r, θ) 的所有卷积滤波后的投影在 $\varphi = 0 \sim \pi$ 范围内累加,得出 (r, θ) 的象素值。

用这种方法重建图象的特点是重建质量高,速度快,重建算法可借助硬件完成。但它并非适用于所有重建投影图象的场合,理论上要求积分路径为直线,投影数据在空间连续采集,测得的投影数据非常精确,必须完全且分布均匀。这是因为方程的导出是连续形式,到实现时才予以离散化。

2. 迭代重建算法 实际应用中,有时无法测到大量的投影;有时投影不是均匀地分布在 180° 或 360° 范围内;有时射线不是沿直线传播,存在衍射和折射现象,此时,最好采用迭代算法重建图象,而不采用上述的 CBP 算法。迭代重建法在某些方面有着解析法所不及的优点,特别是在 CBP 法无能为力的场合,可用迭代重建法或借用迭代法结合其它算法解决。

ART——代数重建技术是迭代重建法的一种形式,它与前述 CBP 法的最大区别在于前者一开始就将连续的图象离散化。把整个区域划分为 $J = n \times n$ 有限个象素,如图 2 所示。象素 j 对射线 i 的投影贡献为

$$P_{ij} = L_{ij} \mu_j \quad (2)$$

第 i 条射线还经过其它象素,其总的射线投影为

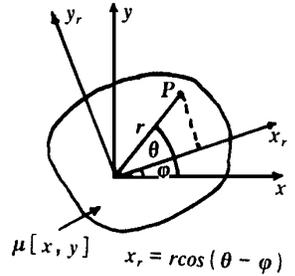


Fig. 1 Two coplanar coordinates

时间较长的缺点将降为次要矛盾。而它的所需投影数较少、较灵活等优点在重建喷雾图象中会显得更加突出。

三、对标准喷雾模型的重建

考虑到探测器的空间分辨率, 计算机的内存和计算时间, 选择一种适用于燃油喷雾计算的最佳方案非常重要。为此, 我们用计算机模拟产生了如图 3 所示的标准喷雾模型, 模型中不同灰度大小表示不同的衰减系数 $\mu(r, \theta)$, 即不同的喷雾浓度。同时还可以用计算机模拟产生投影数据和投影角度误差, 以便考察各种算法的性能。考察的办法是, 将标准喷雾模型视为原始图象, 然后对重建后的图象和原始图象之间的差异进行客观评价。

评价的判据有^[1]: 归一化均方判据, 误差用 d 表示, 归一化平均绝对距离判据, 误差用 r 表示, 最坏情况判据, 误差用 e 表示。这三个判据对不同图象的误差敏感不同。 d 较敏感地反映少数点较大误差的情况, 而 r 则较敏感地反映多数点小误差的情况, e 反映重建后图象与原始图象中最大平均误差。

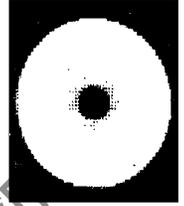


Fig. 3 The phantom used in this paper

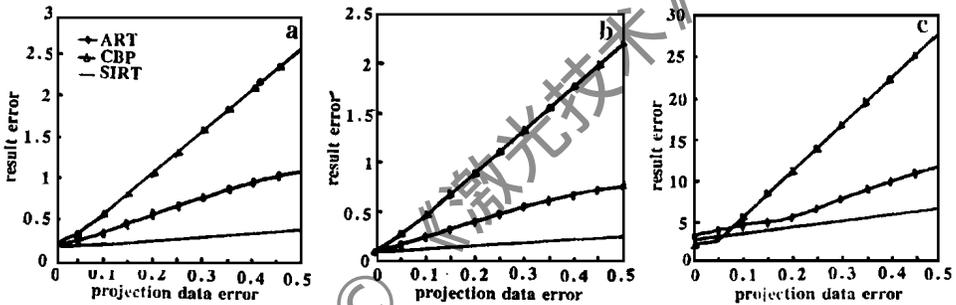


Fig. 4 The effects of projection data error on reconstruction results

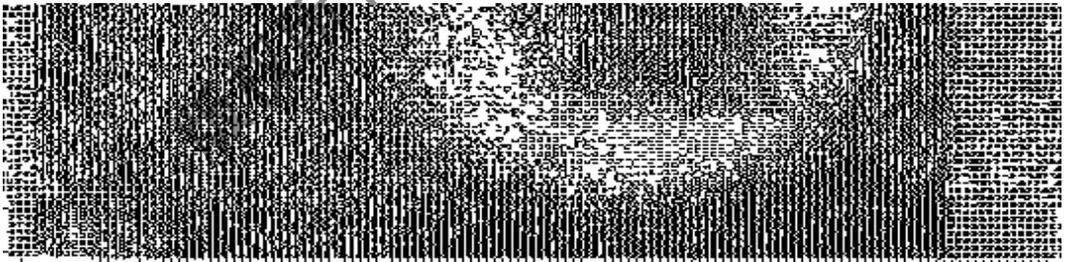


Fig. 5 The comparison of three reconstruction algorithms

为分析投影数据误差大小对重建结果的影响, 结合下面的讨论, 在采样点数 $M = 127$, 采样角度数为 $N = 60$, 投影数据误差为 $ERR = 0 \sim 50\%$ 的条件下, 用 ART, SIRT 和 CBP 对图 3 进行重建, 并用上述三种判据对计算结果进行分析, 图 4a, b, c 分别表示判据 d , r , e 的计算结果。图中横坐标表示投影数据误差的大小, 纵坐标表示重建结果的误差值。由图 4 可以看出, 在投影数据没有误差的情况下, 三种方法重建图象的质量相差无几, 但随着投影数据误差的增大, CBP 算法重建图象的质量比两种迭代法要差, 而且投影误差越大, 这种差距越明显。SIRT

与 ART 相比,对噪声的抑制能力更强。在图 4c 中,投影数据误差小于 7.5% 时, CBP 的计算误差比迭代法计算误差小,这是因为在投影数据误差较小时, CBP 计算出的最大误差比迭代法要小,但由于 CBP 计算结果是对所有投影数据误差的累加,所以, CBP 法比迭代法计算结果的误差值要大,如图 4b, c 所示。

图 5 表示投影误差分别为 0, 0.1, 0.2, 0.3 时用 CBP, ART, SIRT 三种方法重建出的标准喷雾模型图象的结果。在计算过程中, CBP 采用 $S-L$ 滤波函数, 投影数据的内插函数为线性内插, ART 的松弛系数 λ 取 0.2, 共迭代 6 次, SIRT 的松弛系数 λ 取 0.0001, 共迭代 20 次。

四、重建方法的选择

在重建速度方面, ART, SIRT 均较 CBP 算法慢。在存储器容量方面, ART 与 CBP 算法均只需存放约一幅图象的容量。SIRT 算法由于每一象素的校正值受到其他象素的影响, 存储量至少比 ART 多一倍。对于重建图象质量, 在数据完全时, CBP 的重建质量是令人满意的, ART 的重建质量至少与 CBP 算法相当。

对高速瞬变燃油喷雾而言, 投影数据通过多次采样的平均值求得, 采集喷雾图象时难免会使投影数据带有一定误差, 因此, 对投影误差较敏感的 CBP 方法对之不适用。两种迭代方法中, SIRT 重建燃油喷雾的质量较好, 但计算时间比 ART 长得多, 综合考虑计算效率和重建图象质量, 重建燃油喷雾图象宜选择 ART。

值得指出的是, 随着计算机技术的发展和计算速度的提高, SIRT 会进一步得到应用。

五、结 论

1. 研究表明, 当投影数据完全且没有误差时用 CBP 法重建的图象质量较高, 而当投影数据存在一定误差时迭代法比 CBP 法重建的结果误差小。
2. 两种迭代法重建燃油喷雾图象时, SIRT 优于 ART, 但 SIRT 所需重建时间比 ART 长得多。
3. 本文开发的用 CBP 法和迭代法 (ART 和 SIRT) 重建三维喷雾图象和计算机软件, 不仅适用于喷雾图象重建, 而且也适用于工业测量的其它领域。
4. 根据燃油喷雾的特点, 提出的用迭代法重建燃油喷雾图象观点对激光 CT 技术应用于燃油喷雾测量具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 庄天戈. CT 原理与算法. 上海: 上海交通大学出版社, 1992
- 2 Yule A J. 18th Symposium on Combustion. 1981: 1501~ 1510
- 3 Kawamura K, Saito A, Tanasawa Y. Trans of JSME, 1987; (36): 33~ 38
- 4 王德忠. 上海交通大学博士学位论文. 1994

作者简介: 王德忠, 男, 1962 年 10 月出生。工学博士。现从事流场的激光和计算机图象处理测试技术研究。

收稿日期: 1995-10-09

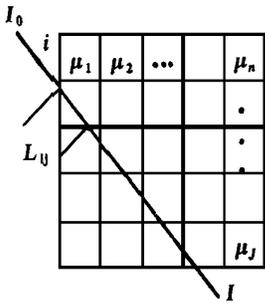


Fig. 2 Attenuated beam I and the primary beam I_0

$$P_i = \sum_j P_{ij} = \sum_j L_{ij} \mu_j \tag{3}$$

在迭代重建中, P_i 称为第 i 条射线的射线和。综合所有射线投影方程, (3) 式可写成矩阵形式 $P = L\mu$ (4)

式中, P 为测得的投影矢量, μ 为图象矢量, L 为投影矩阵, 我们的目的就是根据测得的 P 和已知的 L 求解图象矢量 μ 。但在重建图象时, 很多情况下投影数据的个数 I 小于未知象素个数 J , 从而使方程(4) 无解。而且在实际情况下, 测量噪声影响不可忽视, 这时必须计及误差, 并估计一组解, 为此应对(4) 式作如下修正 $P = L\mu + e$ (5)

式中, e 为误差矢量。在此, 由投影重建图象问题归结为根据

测量矢量 P , 用(5) 式估计图象矢量 μ 。

3. ART 本文选用 ART 算法满足的方程不是(5) 式, 而是线性不等式

$$L\mu \leq P \tag{6}$$

(6) 式可用松弛法求解^[1]

$$\mu^{(0)} \text{ 任意}$$

$$\mu^{(k+1)} = \begin{cases} \mu^{(k)} & L_{ik}^T \mu^{(k)} \leq P_{ik} \\ \mu^{(k)} + \lambda^{(k)} [P_{ik} - L_{ik}^T \mu^{(k)}] L_{ik} / \|L_{ik}\|^2 & \text{其他} \end{cases} \tag{7}$$

式中, k 代表迭代次数。 $ik = k(\text{mod } I) + 1$, 其计算过程是先设一初始图象 $\mu^{(0)}$, 然后根据 $\mu^{(0)}$ 求一次近似图象 $\mu^{(1)}$, 再根据 $\mu^{(1)}$ 求二次近似图象 $\mu^{(2)}$ 直至满足预定条件, 在根据 $\mu^{(k)}$ 求 $\mu^{(k+1)}$ 时需加一校正值 $\Delta\mu$, 每次校正依次考虑一条射线的射线和并校正该射线所经过的象素, 随后自动转到下一条射线依次进行下去。ART 还有其它形式迭代公式, 可参阅文献 [1]。

4. SIRT SIRT 是与 ART 并行的又一种迭代重建算法, 由于 ART 算法每次迭代只用到一条射线的射线和, 如果这一射线投影包含误差, 则所得的解跟着也引入误差, 为了使重建图象对测量误差不敏感, 则采用 SIRT。SIRT 求解时, 要求得到满足

$$L^T P = L^T L \mu \tag{8}$$

方程的 μ 。式中, $L^T P$ 为 P 的反投影, $L\mu$ 表示射线和, 故 $L^T L\mu$ 表示射线和的反投影。(8) 式表明, 估计图象所得射线和的反投影等于实测投影的反投影值。若 L 为非奇异阵, 则有

$$\mu = L^T (LL^T)^{-1} P \tag{9}$$

可按下式对(9) 式求解 $\mu^{(0)} = L^T P$

$$\mu^{(k+1)} = \mu^{(k)} + \lambda^{(k)} \sum_{i=1}^I (P_i - L_i^T \mu^{(k)}) L_i \tag{10}$$

由此可看出, 在求 $(k+1)$ 次估计 $\mu^{(k+1)}$, 利用 k 次估计 $\mu^{(k)}$ 加上校正图象。因而 SIRT 在计算过程中对每个象素的校正值实际是通过该象素的所有射线的误差值之累加, 而不是只与一条射线有关, 所以, SIRT 的校正过程实际上是逐点校正, 这是与 ART 算法的根本区别, 也是 SIRT 能有效地抑制测量数据中噪声的根本原因。由于每一象素的校正值是所有过该象素射线的共同贡献, 一些随机误差被平均掉了。

但迭代法的最大缺点是重建图象的速度较慢。随着计算机速度的提高, 迭代法所需重建