

基于最优采样模式的自适应光线投射法

国 栋 程乾生

(北京大学数学学院信息科学系, 北京 100871)

摘 要 三维直接体显示算法是显示三维数据体的一种重要显示方法,已广泛应用在医学图象生成和科学可视化领域之中。光线投射法又是三维直接体显示算法中最基本的一种方法。然而由于光线投射法需要大量的计算而受到限制。该文从减少光线投射数目的角度出发,提出了一种基于最优采样模式的频率投射算法。它的优点是不仅可以利用人的简单的视觉模型和强大的傅立叶分析工具,而且在采样模式上也更能符合人类视觉特点,减少了假模式,从而使更多的噪音变频到视觉不敏感处,加强了图象的生成质量,而且也加快了图象的生成速度。

关键词 简单视觉模型 自适应光线投射算法 最优采样模式 体显示 泊松分布

0 引 言

光线投射法是一种重要的体显示方法,尤其是对于医学图象生成和科学可视化具有广泛的用途。如图1所示。光线投射法^[1-4]主要是假定光栅设备为视平面,光线从视平面的每一个象素点沿着投射方向射向数据体,在光线的规则间隔点上,对三维数据体进行重新采样,分别对颜色和透明度进行积累。当透明度达到1时,就认为光线不再传播,则停止投射。积累的颜色值通常为象素的颜色。这种方法加上合适的阴影和分类函数,可以生成高质量的图形显示效果。但是高质量的图象一般需要几十秒。甚至十几分钟才能产生。因而,人们往往采用减少光线传播时间和光线投射数目的方法来进行优化光线投射法。

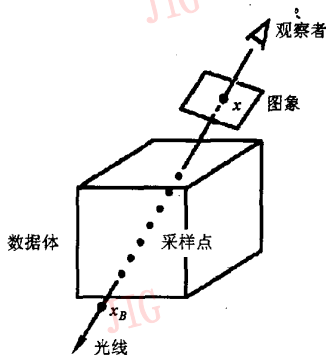


图1 三维立体的光线投射法示意图^[5]

Levoy^[6]在1990年提出了根据图象的质量和复杂度来减少光线投射数目,提高图象的生成效率的快速光线投射法。首先将图象平面分成长和宽为 W_{max} 的矩形区域。光线从区域的4个角进行投射。如果4个角的颜色值差异较小,例如小于某一给定的小常数 ϵ ,则对该区域停止投射新的光线。否则该区域分成4个小的子区域,而且投射更多的新的光线。Renben, Shu等^[7]采用了三角区域的划分方法进一步减少了光线投射数目。

这种自适应的图象合成方法不仅应用在三维体显示算法中,也常常应用在光线跟踪算法中。例如Lee^[3]提出了一种利用方差作为停止准则的光线跟踪算法。但是, Mitchell^[8]认为方差准则不是图象变换的一个合适的度量。这是因为人类的视觉系统对于强度的变化并不呈现线性响应,相反,他认为光照度是一个合适的度量。Mayer和Liu^[9]也是利用了视觉系统的非线性响应,光照度大的地方投射较多的光线。Bolin^[9]和Mayer^[10]发展了他们的想法,提出了将图象直接产生于频率域,这样可利用简单的视觉模型来确定光线在何处投射,并且可将噪音变频到视觉不敏感的频段处。在此基础上,我们提出了一种基于最优模式的自适应频率光线投射法,这种方法不仅可以利用简单的视觉模型,而且在采样模式上采用了服从泊松分布的最优采样模式,从而也更能符合人类视觉特点,与此同时,该算法也使更多的噪音变频到视觉不敏感处,加强了图象的生成质量,而且加快了图象的生成速度。

1 基于频率的自适应光线投射法

基于频率的自适应光线投射法将人类视觉模型和傅立叶分析结合在一起,自适应地确定光线投射的数目。人类的视觉模型比线型模型能够更好地适合图象的结构,而且,它与人类视觉的前期阶段非常相近。更重要的是它可以使我们利用强大的傅氏分析工具,来精确描述非彩色的光照对比度和对比度效果。它首先将 CIE 的 XYZ 或 RGB 颜色匹配函数转换成 AC1C2 空间,其中 A 表明空间非最优或黑白(BL-WH)细胞的响应,C1,C2 表明空间最优细胞中红、绿(R-G)和黄绿(Y-B)的响应。由于人类视觉系统对于黑白空间细节比彩色空间细节更加敏感,因而 A,C1,C2 可以用来选择图象生成的波长,这样就可对非彩色和彩色信道分别进行空间滤波。一般说来,非彩色信道的信道的门阈值为 34 周/度,而红绿和黄蓝信道分别为 11 周/度。这个模型与 NTSC 中彩色电视编码方案相似。但在 NTSC 系统使用与 AC1C2 相似的 YIQ 编码,并且,信道频率限制在 42MHz(Y),16MHz(I)和 16MHz(Q)。然后我们在 AC1C2 空间的基础上,采用了一个简单的两步停止准则。首先在较粗的分辨率上对图象进行采样,然后逐步选择不同的区域,按照特定的模式进行更高精度的采样。由于采样率根据区域的不同而变化,所以光线投射的数目可以自适应地增加和减少,总体上光线的数目减少了,从而提高了光线投射时间。下面将介绍光线投射停止准则。

我们将需要生成的图象按照 JPEG 方式分成 8×8 的像素块。对每一像素块先按照模式利用上面介绍的光线投射法生成为数不多的几个像素点。由于在光线的合成过程中,往往生成的是 CIE XYZ 或 RGB 颜色,因此为了利用人类的视觉模型,需将 CIE 的 XYZ 或 RGB 颜色匹配函数转换成 AC1C2 空间,然后将生成的像素点利用余弦频率加以表示。这是因为余弦变化不仅是图象处理中的一个关键部分,而且余弦变化类似于散傅立叶变换,将原图象分解成一系列调和余弦波。但是由于我们的像素点是自适应生成的,数据不再是规则排列,因而我们采用线性拟合的方法来求解数据的余弦表示。

已知

$$f(x, y) = \sum_i^{N-1} G(u_i, v_i) C_{x, u_i} C_{y, v_i}$$

其中 i 表示 Zig-Zag 顺序的第 i 个余弦分量, N

表示所用的余弦分量的总数,一般是随着数据点个数的增加而增加。

$$C_{x, u_i} = \cos\left(\frac{(2x+1)u_i\pi}{16}\right)$$

$$C_{y, v_i} = \cos\left(\frac{(2y+1)v_i\pi}{16}\right)$$

$$G(u_i, v_i) = \frac{1}{4} k(u_i) k(v_i) F(u_i, v_i)$$

其中

$$k(u_i), k(v_i) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & u, v = 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases}$$

而且, $F(u_i, v_i)$ 即为我们所需的第 i 个频率分量。对于第 m 个单频道采样,在余弦块内位置为 (x_m, y_m) ,其值为 $\alpha(x_m, y_m)$,表示 A,C1,C2 分量中的某一个。求取余弦波频率分量的最小二乘法即是使以下公式达到最小:

$$\min = \sum_{m=0}^M (f(x_m, y_m) - \alpha(x_m, y_m))^2$$

利用矩阵形式即可表示为:

$$(X) = (J)^{-1}(Y)$$

其中 X 和 Y 为 N 维列向量, J 为 $N \times N$ 的矩阵,而且:

$$J_{ij} = \sum_{m=0}^M C_{x_m, u_i} C_{y_m, v_i} C_{x_m, u_j} C_{y_m, v_j}$$

$$Y_i = \sum_{m=0}^M \alpha(x_m, y_m) C_{x_m, u_i} C_{y_m, v_i}$$

$$X_i = G(u_i, v_i)$$

矩阵 J 的求逆对于算法具有十分重要的作用,我们利用奇异值分解的方法求取矩阵 J ,这样可以避免求解的不稳定性,使算法具备鲁棒性等特点。而且从上式可看出矩阵 J 与采样点块内位置和采用的余弦分量数目有关,而与采样点的值无关,这样我们只要保持块与块之间采样的位置保持不变,就可以大大加快求解数据的余弦表示的方法。因而我们采用了根据停止准则,对需要更高精度采样的块一次添加一个或两个采样点,然后再根据停止准则分别判断下一次需采样的块。其次,由于计算余弦函数花费较多计算时间,我们采用查表的方法来节省计算时间。

下一步是如何来判断需要进一步采样的块。我们首先将求得的每一个 A,C1,C2 的频率表示,分别根据非彩色和彩色信道的阈值滤除高频分量。这一步的目的就是提高低频分量的视觉重要性,然后计算出当前采样点所引起的频率表示的差值均方差

化,作为当前采样点去除视觉有关假频的度量,从而指示该块是否需要更多的采样点。这是因为当一个块含有较多的视觉采样时,那么该块就需要更多的细节来提高质量,否则该块就不再需要细化。最后一步,我们采用了多阶段滤波的方法重建图象,这是因为多阶段滤波的方法可以消除不同的块采样点不同所带来的负面影响。

2 最优自适应采样模式

自适应采样模式一般采用四分树方法,例如 Levoy^[6],这是因为四分树方法简单方便,但它的缺点是产生易如一般的规则网格采样一样,容易产生易觉察到的假模式。当然,如果采样率越来越高,截止频率也就越来越高,假频则越来越少。但只要采样频率固定,这种假采样模式则必然存在。然而,由于采样而产生的错误的性质却可以控制,也就是将假模式转换至不易察觉的与特征无关的噪音之中。

Yellot^[3]和 Mullen^[11]等人在研究人眼的采样感知过程中,认为视网膜细胞服从泊松分布,这是因为这种采样模式遵循两个准则:(1)尽量让高频信

息转变成宽频带的噪音,而不是假模式。(2)采样模式的低频尽量不出现尖脉冲。然而由于这种系统模式耗时较多,因而人们常常采用较为简单的抖动采样模式。但为了尽量符合这两条准则,我们采用了一种称为 Dart Throwing 的算法。Dart Throwing 算法是 Mitchell^[8]提出的一种不规则采样模式。可以证明,这种采样模式非常逼近泊松分布。这种采样模式的生成方法为:

- (1) 在采样的区域内,对所有需采样的点赋值 0;
- (2) 产生一个服从二维的均匀分布的二维随机数;
- (3) 若该二维随机数对应的采样点值和周围已采样点的距离小于某一给定的值,则重新执行(2),否则,则对该点进行采样。

经过上述三步,所得模式即为我们最优的自适应添加的模式。它的频谱图和规则采样模式图分别如图 2 所示。规则采样模式生成了多个尖脉冲,从而容易产生假模式。而 Dart Throwing 模式基本上满足了 Yellot 的两个准则。

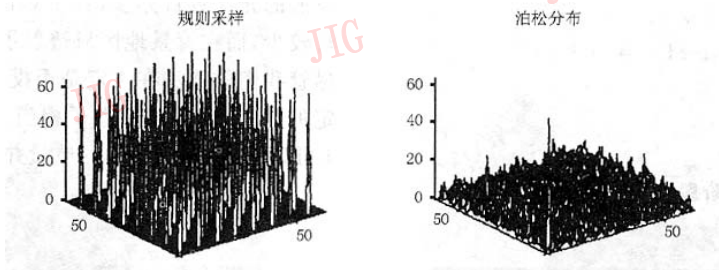


图 2 规则采样和泊松分布的二维频谱图,其中泊松分布的二维频谱图中的噪音扩大了 5 倍

在具体的实用中,我们经常使用周期性的模板,在本文中,我们利用的是 8×8 模板。

3 算法的实现和结论

我们利用基于频率的光线投射器和最优添加模式提供了一种自适应的频率的光线投射器的算法,其目的是节省光线投射数目,节省光线投射的开支。首先我们在 VOLVIS 的基础上,利用 C 语言编写了全部的基于频率的光线投射算法程序,基本的程序流程如下,主要的程序名为 progressive,其中变量 image 保存与算法有关的全部全局变量,包括视角,视平面,立体数据等因素,而 rc, gc, bc 为生成的图

象数据, pb 中存放的是采样的位置。

```
void progressive (C_Image image, float * rc, float *
gc, float * bc, byte * pb)
```

{
步骤 1: 将图象分成 8×8 的块,其中用变量 need 来保存需要投射的位置。

```
block_sum = image_width * image_height / block;
need = (unsigned char *) malloc(block_sum * sizeof
(char));
```

步骤 2: 利用光线投射算法计算最基本的光线数目 ps, row0, col0 表示当前需要采样的块,函数 raycast 的功能是在位置 rowj, colj 向立体数据投射一束射线,并经过光线合成得到该点的颜色值 cr,

```

cg,cb.
row0 = i / rblocknum * block_width; col0 = i
for( i = 1; i < ps; i++)
{
    rowj = row0 + pattern[j][0];
    colj = col0 + pattern[j][1];
    raycast(image, rowj, colj, &scr, &scg, &scb);
}

```

步骤 3: 利用基于频率的自适应光线投射算法确定下一步需要采样的块, 以及新的采样点, 其中 raycast 函数主要是将 RGB 颜色值转换成 AC1C2 颜色值, 以便利用人类的简单视觉模型。

```

while (block_need != 0)
{
    for( i = 0; i < blocksum; i++)
        if (need[i])
        {
            rowj = row0 + pattern[ps-1][0];
            colj = col0 + pattern[ps-1][1];
            raycast(image, rowj, colj, &scr, &scg, &scb);
            rgb2acc(cr, cg, cb, &a, &c1, &c2);
            if (check_need(vector, block, fs, ps, new);
            {
                need[i] = 0;
                block_need -= 1;
            }
        }
}

```

步骤 4: 采用多阶段滤波的方法重建图象。

在将 RGB 颜色空间转换成 AC1C2 颜色空间主要是根据 Faugeras^[12]提出的模型而设计的。首先由于视网膜的空间特性,

$$\begin{pmatrix} S \\ M \\ L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.5609 \\ -0.4227 & 1.1723 & 0.0911 \\ 0.1150 & 0.9364 & -0.020 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

其次是将视网膜锥信号分解成彩色和非彩色信道, 然后进行不同处理。许多研究表明, 非彩色响应(A)和彩色响应(C1)和(C2)可表示为:

$$\begin{pmatrix} A \\ C1 \\ C2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0001 & 0.2499 & 0.7647 \\ 0.0018 & 2.9468 & -2.5336 \\ 1.0111 & -0.3877 & -0.2670 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \log(s(x,y)) \\ \log(m(x,y)) \\ \log(l(x,y)) \end{pmatrix}$$

在光线合成和重采样过程中, 我们使用的是三元线性插值函数, 而对于阴影和分类, 我们分别采用了 PHONG 模型和值分类方法, 具体算法见文献[1, 2, 5, 6, 13]。

我们利用基于最优模式的频率投射算法对 256 × 256 × 256 的头部磁共振数据体进行了试算, 结果如图 3 和图 4 所示。其中采用的模板是 8 × 8, 投射的射线数目约为常规光线投射数目的 65%, 采样点的分布如图 3 所示。从图 3 可以看出, 细节突出的地方投射的光线数目亦多, 在平坦的地方投射的光线数目较少, 而在背景地区只透射了最基本的几条光线。尽管我们的算法在决定是否投射的过程中耗费了一定的时间, 但仍然节省了相当多的时间, 而且, 从图 4 可以看出, 图象生成的质量并没有下降很多。

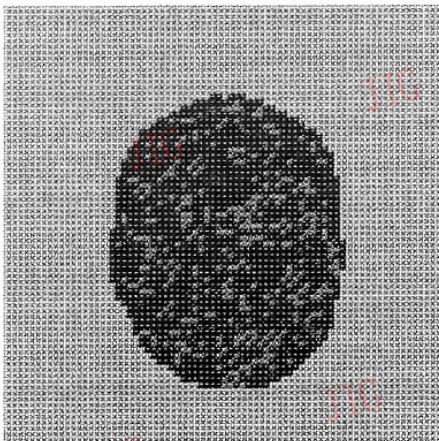


图 3 256 × 256 × 256 的头部磁共振数据体的采样图(65%)

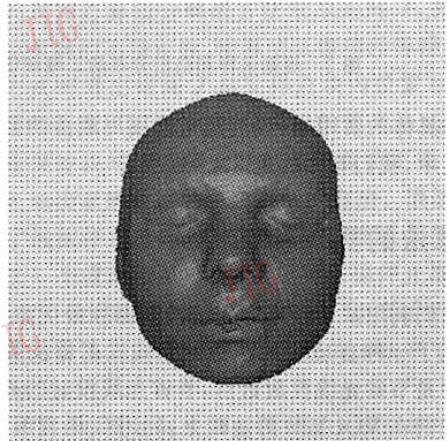


图 4 256 × 256 × 256 的头部磁共振数据体的直接体显示图(65%)

我们还对 $128 \times 128 \times 128$ 的三维龙虾数据体, 采用 8×8 的模板, 利用基于最优模式的频率投射算法进行了计算。图 6 和图 8 分别为龙虾的直接体显示图, 图 5 和图 7 分别为图象的采样图。图 5 和图 6 投射的光线数目大约为常规光线透射数目的 $2/3$ 。我们减少投射的光线数目, 大约为常规光线透射数目的一半, 生成的图象和光线的投射位置图分别如

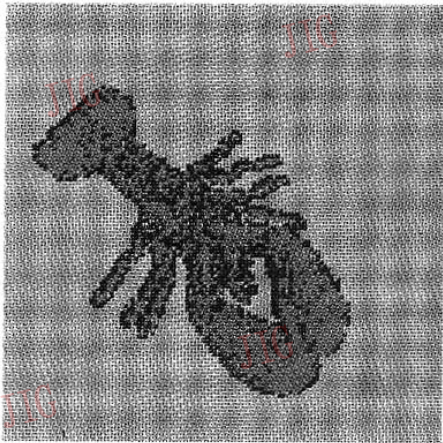


图 5 三维龙虾数据体的采样图(大约 70%)



图 6 三维龙虾数据体的直接体显示图(大约 70%)

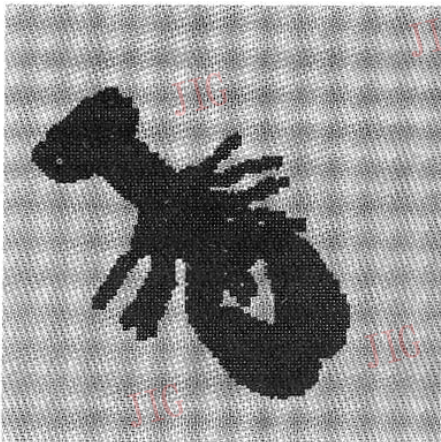


图 7 三维龙虾数据体的采样图(大约 50%)



图 8 三维龙虾数据体的直接体显示图(大约 50%)

致 谢 我们非常感谢纽约州立大学的 Arrie Kauffman 教授提供的 VOLVIS 软件, 大大加快了我们的研究进度。同时, 我们对 OREGON 大学的 M. R. Bolin 和 G. W. Mayer 先生的许多有益的建议和讨论以及对提供选题进行帮助的中科院软件所的王文成博士表示衷心的感谢。

最后, 我们对提供大力帮助和物质基础的数学学院信息科学系的老师表示诚挚的谢意。

图 7 和图 8 所示。从图 6 可知, 尽管减少了投射的光线数目, 但是图象的细节基本没有损失。因而, 我们提出的基于最优模式的频率投射法能够符合图象的特征和人类的简单的视觉模型, 而且自适应的采样模式也更能符合人类视觉的特点, 从而减少了假模式, 因而更多的噪音将变频到视觉不敏感处, 加强了图象的生成质量, 而且也加快了图象的生成速度。

参 考 文 献

- 1 Sabella P A. A rendering algorithm for visualization 3D scalar Fields. Computer Graphics 1988, 22(4).
- 2 Kaufman A. VolVis2.0 User manual. Department of Computer Science, SUNY, Stony Brook, 1994.
- 3 Yellot J, I Jr. Spectral consequences of photo receptor sampling in the rhesus retina. Science, 1983, 221: 382~385.
- 4 Marc Levoy. Display of surfaces from volume data. IEEE Computer Graphics & Applications, 1998, 22(5).

- 5 Philippe lacroute, Marc Levoy. Fast volume rendering using a shear-warp factoriation of the viewing transformation. *Computer Graphics, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*, 1996.
- 6 Levoy Marc, Volume rendering by adaptive refinement. *The Visual Computer*, 1990, 6(1): 2~7.
- 7 Renben, Shu, Alanliu. An improved adaptive ray casting algorithm. *The Visual Computing*, 1992.
- 8 Mitchell D P. Generating antialiased images at low sampling densities. *Computer Graphics, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*, 1987, pp. 65~72.
- 9 Mayer G W, Liu A. Colour spatial acuity control of a screen subdivision image synthesis algorithm. In: *Human Vision, Visual Processing and Digital Display, Proc SPIE*, 1992, 1666: 387~399.
- 10 Bolin M R, Mayer G W. A frequency based ray tracer. *Computer Graphics, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*, 1986, pp. 409~418.
- 11 Mullen R T. The contrast sensitivity of human color vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings. *J Physical*, 1985, 359: 381~400.
- 12 Faugeras O D. Digital color image processing within the framework of a human visual model. 1979, 27(4).
- 13 石教英, 蔡文立. 科学计算可视化算法与系统. 北京: 科学出版社, 1996.
- 14 James Painter, Kenneth Sloam. Antialiased ray tracing by adaptive progressive refinement. *Computer Graphics*, 1989, 23(3).

国栋 1971年生, 北京大学数学学院博士研究生。



程乾生 1963年毕业于北京大学数学系, 现为北京大学数学科学学院信息科学系教授, 博士生导师, 研究领域为信号与信息处理, 时间序列分析, 模式识别, 决策分析, 信息融合。

Adaptive Ray Casting Method Based on the Optional Sampling Pattern

Guo Dong, Cheng Qiansheng

(Information Sciences Department, Mathematical School of Peking University, Beijing 100871)

Abstract Direct Volume Rendering (DVR) algorithm is an important method to display the three dimensional data and it is widely used in medical image rendering and scientific visualization. Furthermore, ray casting method is a basic method of DVR algorithm. However, it is limited by plenty of computation. From the view of reducing the number of casted ray, this article provided an adaptive ray casting method based on the optional sampling pattern. The advantage of the algorithm is not only using the simple human vision model and powerful fourier analysis tools, but also making the advantage of the sampling pattern being more suitable to the human vision model and reducing the aliase pattern. As a result, more noise is changed to be more insensitive. So, this algorithm not only improves the image rendering quality, but also reduces the image rendering time.

Keywords Simple human vision model, Adaptive ray casting method, Optional sampling pattern, Volume rendering, Poisson distribution