

⑦

357-362

基于三维图像快速分层滤波 的聚焦梯度模拟方法*

刘文予 朱光喜

(华中理工大学, 电子与信息工程系, 湖北, 武汉, 430074)

TN919.8

摘要 基于透镜成像模型推导出模糊函数 σ 与物距及透镜焦距的关系, 采用对深度三维图像自适应分层滤波方法, 引入差异度函数, 按差异度函数把深度图像分解成 K 个 z 方向上不相交的子图像, 通过对子图像的滤波合成, 降低算法的复杂度, 并使滤波后的误差控制在给定范围内, 引入 α 值, 按层合成等手段解决滤波后的遮挡及边界问题, 为计算机渲染(render)算法提供了一种新的后期处理途径。

关键词 聚焦梯度, 深度图像, 分层滤波, 渲染, 三维图像

图像

1 摄像机景深模型

计算机渲染是根据光照模型计算场景中各部分向画面每一像素辐射的光能大小和色彩组成。一般的渲染算法没有考虑景深的效果, 渲染产生的图像都是清晰的, 这与实际效果不符。实际上在景深外, 图像是逐渐向模糊过渡, 形成一个聚焦梯度, 景深的模拟在简单的局部光照模型中难以实现, 通常采用分布光线跟踪技术可以实现对景深的模拟^[1], 本文采用对 z 缓冲区排序的方法, 利用三维模板对原始图像进行 z 方向分层滤波, 从而实现景深的模拟。

图1中, 设 F 为透镜焦距, R 为透镜半径, U, V 分别为清晰成像的物距与像距, 当物体从清晰成像点 P 移到 P' , 相应的成像点变为 Q' , 如果像距保持不变, 则 Q' 成像是模糊的, 模糊量记为 σ 。对于薄透镜^[2], 有

$$U = \frac{FV}{V - F} \quad (1)$$

设 D 为物体距透镜距离, 则可得

$$\sigma = V_0 \frac{R}{F} - R - \frac{V_0 R}{D} \quad (2)$$

可见, 透镜半径越大, σ 越大, 即 R 与 σ 成正比, R 对 σ 的影响类似光圈的作用。

当 F, V_0 固定, D 为无穷时, σ 趋于 $RV_0/F - R$, 取 $D = FV_0/(V_0 - F)$ 时, $\sigma = 0$, 为清晰成像点, 记为 DF 。当 $D < DF$ 时, σ 为负, 说明成像模糊倒像, 实际上 D 在 DF 的一个邻域内 σ 都为0, 这个邻域即为景深, 通常与透镜有关, 记该邻域为 $[DF - \text{deep}, DF + \text{deep}]$, 则式(2)可修改为

* 国家自然科学基金(编号 69672014)资助项目
稿件收到日期 1997-12-22, 最后修改稿收到日期 1998-03-10

$$\sigma = \begin{cases} 0, & D \in [DF - \text{deep}, DF + \text{deep}] \\ V_0 \frac{R}{F} - R - \frac{V_0 R}{D - \text{deep}}, & D > DF + \text{deep} \\ V_0 \frac{R}{F} - R - \frac{V_0 R}{D + \text{deep}}, & D < DF - \text{deep} \end{cases} \quad (3)$$

σ 与 D 的关系见图 2. 像模糊程度通常用点扩展函数来描述, 点扩展函数与物体位置、像位置、光的波长和透镜有关. 设 (x, y) 为物体上某点, (x', y') 为此点的像, 光的波长为 λ , 透镜半径为 R , 物距为 u , 像距为 v , 则点扩展函数为^[3]

$$h(x, y, x', y') \propto \left[\frac{J_1(a)}{a} \right]^2, \quad a = \frac{2\pi R}{\lambda v} \sqrt{(x' - \frac{v}{u}x)^2 + (y' - \frac{v}{u}y)^2}.$$

这里 J_1 是一阶贝赛尔函数, $h(x, y, x', y')$ 表示 h 与 x, y, x', y' 有关. 点扩展函数本质上类似散射效应, 对于白光, 可以用二维高斯函数 $G(x, y, \sigma) = (1/2\pi\sigma)e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$ 近似, 为保证能量(总亮度)保持不变, 应有 $\int_{-\infty}^{\infty} G(x, y, \sigma) dx dy = 1$.

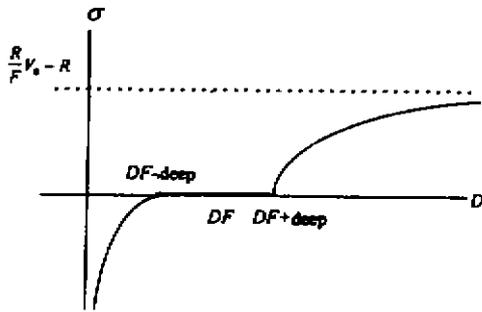


图 1 透镜成像与散焦
Fig. 1 Lens imaging and defocus

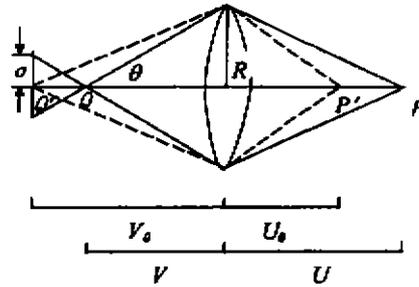


图 2 V_0 不变时 σ 与 D 的关系
Fig. 2 The relationship between σ and D for constant V_0

实际图像为 $I(x, y, z)$, 模糊后图像为 $I(x, y, z) * G(x, y, z)$, $*$ 表示卷积, $I(x, y, z)$ 表示三维图像灰度. 对离散情况, $G(x, y, z)$ 为 $M \times M \times T$ 的掩模, M 应足够大, 实际应用中, 当 M 掩模的边缘与中心的比值 $\rho = \frac{G(M, M, \sigma)}{G(0, 0, \sigma)} < k$ 时, 可确定掩模的 M , k 为设定的阈值, 有

$$\rho = \frac{G(M, M, \sigma)}{G(0, 0, \sigma)} = e^{-\frac{M^2}{\sigma^2}} < k, \quad M^2 > -\ln k \cdot \sigma^2.$$

取 $k=0.05$, 则 $M \geq 1.73|\sigma|$. (4)

可见 M 与物距 D 有关, 它是 D 的一个非线性函数. 当 $\sigma=0, M=0$, 即在景深范围内不需滤波. 实际模拟时, 可事先确定 DF 及 deep 点, 给定 F 后, 可由式(1)计算 V_0 , 是一个不变数, 可以改变 DF, deep 及 F 来实现模拟聚焦梯度^[4].

2 深度图像的自适应分层滤波原理与方法

设深度图像记为五元组 $I=(x, y, z, a, f)$, f 为图像灰度, a 为 alpha 值, 在图像合成及

抗混叠(anti-alias)中起重要作用. 对深度图像进行滤波要解决的主要问题是: (1) x, y 方向相邻的点在 z 方向不连续; (2) 滤波前没有遮挡关系的点滤波后可能有遮挡. 设图像的长、宽均为 N , 当每一个像素的 z 都不同时, 共有 $N \times N$ 个不同的 z 值. 令 $M' = 2M + 1, T' = 2T + 1$, 则对离散的深度图像三维滤波结果为

$$\left. \begin{aligned} f'(x', y', z') &= \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \sum_{k=-T}^T f(x' + i, y' + j, z' + k) g(i, j, k), \\ \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \sum_{k=-T}^T g(i, j, k) &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $f(x, y, z)$ 表示 (x, y, z) 点图像的灰度, $f'(x, y, z)$ 表示滤波后 (x, y, z) 点的灰度. 显然式(5)的计算量非常大, 算法复杂度为 $O(N^2 M' T')$, 因为图像中的每一点都必须更新 $g(i, j, k)$ 值, 由于不同 z 值的像素滤波后存在遮挡等问题, $f'(x, y, z)$ 不是滤波后 (x, y, z) 点的真实结果, 还需与其它距离点的灰度做合成, 设 $z \in [-T, T]$, $g(x, y, z)$ 单调.

定义 1 两个大小为 $M \times M$ 的矩阵 A 和 B 的差异度为 $S(A, B)$, 有

$$S(A, B) = \frac{\sum_{i, j \in [1, M]} |A(i, j) - B(i, j)|}{\sum_{i, j \in [1, M]} (|A(i, j)| + |B(i, j)|)}. \quad (6)$$

当两个矩阵完全相同, $S=0$; 当两个矩阵完全相反或有一个全为 0, $S=1$, $S \in [0, 1]$.

对三维掩模 $M' \times M' \times T'$, 当 z 固定, 则退化二维掩模, 由于 $g(x, y, z)$ 在 $z \in [-T, T]$ 中单调, 故 $g(x, y, z)$ 与 $g(x, y, z+T)$ 差异最大, 其差异值为

$$S(g(x, y, z-T), g(x, y, z+T)) = \frac{\sum_{i, j \in [-M, M]} |g(i, j, z-T) - g(i, j, z+T)|}{\sum_{i, j \in [-M, M]} |g(i, j, z-T) + g(i, j, z+T)|}$$

给定一常数 P , 当 $S(g(x, y, z-T), g(x, y, z+T)) < P$ 时, 假定 $g(x, y, z)$ 在 $z \in [-T, T]$ 内随 z 变化不大, 可以认为 $g(x, y, z)$ 与 z 无关, 这时 $g(x, y, z)$ 退化为二维掩模, 记 $g_z(x, y) = g(x, y, z)$, D 大小为 $(2M+1) \times (2M+1)$, g_z 表示 g 的值与 z 有关, 有

$$\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g_z(i, j) = 1.$$

这时, $S(g_{-T}(x, y), g_T(x, y)) = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i, j \in [-M, M]} |g_{-T}(i, j) - g_T(i, j)|}{\sum_{i, j \in [-M, M]} |g_{-T}(i, j) + g_T(i, j)|} < P$, 有

定义 2 给定深度图像 $I(x, y, z, a, f)$, 闭区间 $[z_1, z_2] \in z$, 给定常数 $p > 0, \forall t_1, t_2 \in [z_1, z_2], \max(S(g_{t_1}(x, y), g_{t_2}(x, y))) < p$, p 为一常数, 称所有 $z \in [z_1, z_2]$ 的像素构成一层, 层的厚度记为 $T = |z_1 - z_2|$.

定理: 给定一个常数 $p > 0$, 则可将深度图像 $I(x, y, z, a, f)$ 分成 k_N 个层, k_N 与 P 有关, $k_N < \infty$, 记第 i 层的深度图像为 $I_i(x, y, z, a, f)$, 有

$$\left. \begin{aligned} I_i(x, y, z, a, f) \cap I_j(x, y, z, a, f) &= \varnothing, i \neq j, i, j \in k_N, \\ \bigcup_{i=1}^{k_N} I_i(x, y, z, a, f) &= I(x, y, z, a, f). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

此定理(7)给出深度图像的分层滤波方法.

由以上分析, $[z_1, z_2]$ 构成一层, 厚度为 T . 在同一层中, 取 $z = (z_1 + z_2) / 2$ 为平均掩模, 是一个常量. 在同一层中, 由于是用一个固定掩模, 故可转化为常规的二维卷积运算. 在同一层图像中, z 方向相邻的像素间 z 的变化不大于 T , 故可认为同一层图像只有同一个深度, 可把它看成是一个平面图像. 但不同层之间, 由于存在像素之间的遮挡, 需进行合成. 这时 α 值也应参入运算. 滤波是逐层进行的, 首先进行第 k_N 层的滤波, 即离摄像机最远的一层, 然后再进行下一层的滤波, 即 k_{N-1} 层的滤波, k_{N-1} 层与 k_N 层的结果进行合成, 不断迭代, 直至最后合成为只有一层图像, 即为最终的结果.

设前层的象素灰度为 $f_{前}$, α 值为 $\alpha_{前}$, 后层象素灰度为 $f_{后}$, 则合成象素按下式迭代:

$$\left. \begin{aligned} f_{合} &= f_{前} + f_{后} * f_{前}, \\ \alpha_{合} &= \alpha_{前} * \alpha_{后}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

α 值作为加权系数, 可以把透明和边缘效应及遮挡体现出来.

分层的自适应三维滤波计算中设原始图像为 $I(x, y, z, \alpha, f)$, 滤波后图像为 $I_g(x, y, z, \alpha, f)$, 然后按以下步骤计算: (1) 设初始状态 $I_{gf}(x, y) = 0, I_{ga}(x, y), I_{gz}(x, y) = I_z(x, y)$, 式中 $I_{gf}(x, y), I_{ga}(x, y), I_{gz}(x, y)$ 分别表示 $I(x, y, z, \alpha, f)$ 的灰度、 α 值和 z 值; (2) 按 $I_z(x, y)$ 由大到小排序, 得一序列记为 I_{z_i} ; (3) 对给定的一个常数 P , 由 $S(z_1, z_2) < P, z_i$ 为 I_{z_i} 中的最大值, 计算出 z_i , 则可得一层为 $[z_1, z_2]$, 记此层的图像为 $I_i(x, y, z, \alpha, f)$; (4) 将 $z = z_1 + z_2 / 2$ 代入式(3)和(4), 计算出掩模大小 M 及 $g(M, M)$; (5) 对 $I_i(x, y, z, \alpha, f)$ 作卷积, 则为 $I_i(x, y, z, \alpha, f) * g(M, M)$; (6) 按式(8), I_i 与 I_{gf} 作合成, I_i 与 I_{ga} 作合成, 结果存入 I_{gf}, I_{ga} 中; (7) 令 $z_1 = z_i$, 如果 z_1 不是 I_{z_i} 中的最小值, 转(3).

3 算法复杂与误差分析

设图像大小为 $N \times N$ 的方阵, 则一层滤波的时间为 $K, N \times N \times M \times M, K_i$ 为常数, 但由于一层中只有少部分非 0 元, 则对 k_N 层滤波为

$$\sum_{i=1}^{k_N} K_i N \times N \times M \times M = N^2 M^2 \sum_{i=1}^{k_N} K_i.$$

由定理(7)可知 $\sum_{i=1}^{k_N} \cup I_i(x, y, z, \alpha, f) = I(x, y, z, \alpha, f)$, 其中 k_N 为图像的最大层数. 有 $\sum_{i=1}^{k_N} K_i = k, k$ 为常数, 即第(3)步的时间为 $KN \times N \times M \times M$, 故总时间复杂度为 $O(N^2 M^2)$. 与常规的二维滤波方法相同.

采用快速算法后, 滤波后的误差产生主要是由于对三维掩模内不随 z 变化, 即用一个二维掩模代替三维掩模, 我们考虑一层内的误差. 在同一层 $[z_1, z_2]$ 中, $I'(x, y, z)$ 为用 $g(x, y, z)$ 滤波的结果, $I''(x, y, z)$ 为用一个平均 $g(x, y, k)$ 滤波的结果, $k = (z_1 + z_2) / 2$, 则

$$\begin{aligned} |I'(x, y, z) - I''(x, y, z)| &= \sum_{z=z_1}^{z_2} |f(x, y, z) \cdot g(x, y, z) - f(x, y, z) \cdot g(x, y, k)| \\ &= \sum_{z=z_1}^{z_2} |f(x, y, z)| \cdot |g(x, y, z) - g(x, y, k)| \leq 2 \cdot p \cdot \sum_{z=z_1}^{z_2} |f(x, y, z)|. \end{aligned}$$

式中 $f(x, y, z)$ 表示 (x, y, z) 坐标点的灰度值, 由于一个 (x, y) 只对应一个 z 值, 故 $\sum_{z=z_1}^{z_2} |f(x,$

$y, z)$ 表示对 $[z_1, z_2]$ 层中所有像素的灰度求和。

设 $I'(x, y, z, a, f)$ 为按每一个像素滤波后的图像, $I_g(x, y, z, a, f)$ 为分层自适应滤波后的图像, 则有

$$S(I', I_g) = \frac{\sum \sum |I'(x, y, z, a, f) - I_g(x, y, z, a, f)|}{\sum \sum |I'(x, y, z, a, f) + I_g(x, y, z, a, f)|} \\ = \frac{|\sum_{z=1}^L \sum_{(x,y) \in k \text{ 层}} f(x, y, z) \cdot g(x, y, z) - \sum_{k=1}^L \sum_{(x,y) \in k \text{ 层}} f(x, y, z) \cdot g(x, y, k)|}{\sum \sum |I'(x, y, z, a, f) + I_g(x, y, z, a, f)|}$$

由滤波后能量不变和定理(7), 有

$$\sum \sum |I_g(x, y, z, a, f)| = \sum \sum |I'(x, y, z, a, f)| = \sum_{z=1}^L \sum_{(x,y) \in k \text{ 层}} g(x, y, z) \\ = \sum_{k=1}^L \sum_{(x,y) \in k \text{ 层}} f(x, y, z) = E,$$

故有

$$S(I', I_g) = |\sum_{k=1}^L \sum_{(x,y) \in k \text{ 层}} f(x, y, z) g(x, y, z) - \sum_{k=1}^L \sum_{(x,y) \in k \text{ 层}} f(x, y, z) g(x, y, k)| / 2E \\ \leq \sum_{k=1}^L \sum_{(x,y) \in k \text{ 层}} f(x, y, z) \cdot |g(x, y, z) - g(x, y, k)| / 2E \\ \leq \sum_{k=1}^L \sum_{(x,y) \in k \text{ 层}} f(x, y, z) \cdot S(g(x, y, z), g(x, y, k)) \times 2 / 2E \leq p.$$

即分层滤波结果与逐点滤波结果的差异度小于给定值 P , 并有当只把图像分成一层时, 掩模不随 z 变化, 则深度图像滤波化成常规的二维滤波方法, 也即传统的图像滤波是深度图像滤波的一个特例. 对于彩色图像, 可分成 R, G, B 3 个通道分别处理再组合. 由于分层只与 $g(x, y, z)$ 有关, 则 3 个通道的分层是一样的, 只需在算法(3)中分别对 3 个通道作卷积即可.

4 实验结果与结论

图 3(a) 为原始彩色图像, 圆锥体离摄像机最近, 其次为中间球体, 最远为圆环, HUST



图 3 景深的模拟结果

(a) 原始图像, (b) 聚焦为中间球体 $R=12, F=4$ 的模拟结果,

(c) 聚焦为圆锥体 $R=16, F=5$ 的模拟结果

Fig. 3 The depth of field simulating results

(a) original image, (b) focus on middle sphere, the simulating result of $R=12, F=4$,

(c) focus on the cone, the simulating result of $R=16, F=5$

为背景,背景的 D 为无穷, V_0 和 $deep$ 为常数; (b) 为聚焦为中间球体的聚焦梯度模拟结果; (c) 为聚焦为圆锥体的聚焦梯度模拟结果。

本文提出了摄像机的景深模型,在此模型的基础上,通过对深度图像的自适应分层滤波,引入 α 通道,解决滤波后的遮挡问题,提出差异度的概念,并对各子层图像分别进行滤波合成,提高了分层滤波算法的效率,并使分层滤波后的误差控制在给定范围内. 实验结果表明该方法是可行的。

REFERENCES

- 1 LAI S, FU C, CHANG S. *IEEE PAMI*, 1992 14(3): 405~411
- 2 Ens J, Lawrence P. *IEEE PAMI*, 1993, 15(2): 97~109
- 3 ZHAO K H, ZHONG X H. *Optics*, Beijing: Peking University Press (赵凯华, 钟锡华. 光学. 北京大学出版社), 1984: 130~133
- 4 LIU W Y, ZHU G X. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence* (刘文予, 朱光喜. 模式识别与人工智能), 1996, 9(4): 382~385

A NEW METHOD OF SIMULATING FOCUSING GRADIENT BASED ON FAST STRATIFIED FILTERING ON 3D IMAGE*

LIU Wen-Yu ZHU Guang-Xi

(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The relationship between fuzzy function σ and the distance from object to lens and focal length was provided by using the lens model. A new adaptive stratified filtering method for 3-D depth image was developed. The concept of the difference function was proposed and the depth image was resolved into several non-intersection sub-level images along z axis. The algorithm complexity was reduced and the postfiltration error was controlled within a given range by filtering and composing sub-level images. The problems of boundary and obstruction were solved by introducing α value and composing sub-images level by level. This method has been successfully used in computer graphics rendering algorithm and an example of simulating defocus of camera was given.

Key words focusing gradient, depth image, stratified filtering, rendering, 3-D mask.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China
Received 1997-12-22, revised 1998-03-10