

OpenGL 成像机理及其与摄影测量 方位元素的相关分析

张祖勋¹ 苏国中¹ 郑顺义¹ 张剑清¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:从射影几何的角度深入分析了 OpenGL 成像机理,并且分析了 OpenGL 与摄影测量相关的内外方位元素的表达。推导出了两种成像过程的转换公式,并建立了一套用摄影测量方法构造 OpenGL 透视成像矩阵的公式。实验验证了摄影测量学中共线方程与 OpenGL 的透视成像机理的一致性。

关键词:透视投影;OpenGL;成像矩阵;方位元素;摄影测量

中图分类号:P236;P231.5

自 1992 年以来,OpenGL 得到了计算机图形学界的普遍关注和认可。OpenGL 实现了对三维物体的计算机模拟,具有强大的三维模型构造、三维场景渲染、物体表面纹理贴面等操作功能。OpenGL 最重要的功能之一是可在计算机屏幕上生成三维物体的二维图像;而摄影测量学以摄影像片为主要研究对象,通过影像来提取被摄物体的三维几何信息,OpenGL 的透视投影成像过程与摄影测量学的成像过程本质上是一致的。以数字摄影测量为主流的现代摄影测量与计算机图形学息息相关,摄影测量为自然景观、人工目标的建模提供了一套完整方法。但是,摄影测量的像片获取、野外控制点测量、相机检校等工作要花费大量的时间和经费,如果能将 OpenGL 的成像过程引入摄影测量学的方法,用 OpenGL 模拟出可量测的像片和模拟检校相机成像,则 OpenGL 技术能成为摄影测量学的一个重要技术手段。

OpenGL 成像过程中涉及到的参数和矩阵与摄影测量学中的内外方位元素很难联系起来,这就为 OpenGL 在摄影测量中的应用带来很大不便。摄影测量与计算机视觉以及计算机图形学等学科的研究内容在某些方面很相似,但由于发展背景不同,研究方法上存在很大差异,以致于很难沟通,本文对此进行了探索性研究。

1 OpenGL 成像过程分析

OpenGL 由三维模拟物体生成二维计算机屏幕影像的成像过程,主要是通过对三维物体的模型变换、透视变换和仿射变换等过程形成的。基本过程如图 1 所示。

1.1 模型空间和模型矩阵

在 OpenGL 中,模型空间坐标系一般可以定义计算机屏幕中心点为坐标系的原点,人正对屏幕向右为 x 轴正方向,向上为 y 轴正方向,垂直屏幕指向外面的方向为 z 轴正方向。在模型空间的三维物体可以通过 OpenGL 的模型函数进行一系列的平移、旋转和缩放,以确定其大小、位置和形状。如图 1 所示,在 OpenGL 中,三维物体的最终定位是通过基本实物模型与模型变换矩阵相乘产生的,即 $[x \ y \ 1]^T = V \cdot P \cdot M \cdot [X \ Y \ Z \ 1]^T$,而模型矩阵 M 是由一系列缩放矩阵、旋转矩阵和平移矩阵的乘积产生的。

1.2 投影空间和投影矩阵

1.2.1 投影空间和视锥体

在完成透视投影成像之前,需要定义视点、近平面、远平面等参数,通过这些参数就可以构造投影矩阵,完成透视投影成像(图 2)。为了叙述方便,定义视点位于坐标系的原点,定义近平面的左

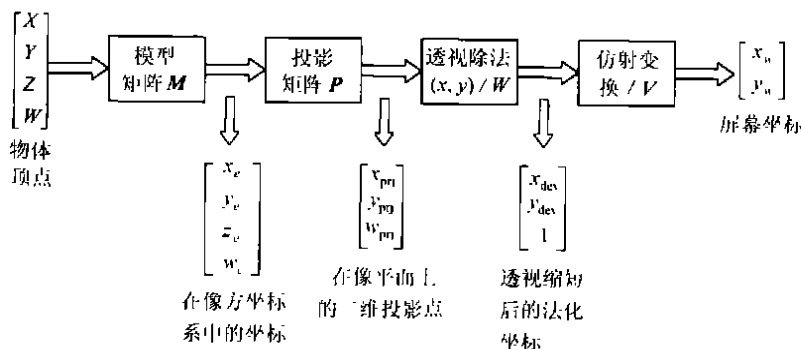


图 1 OpenGL 成像过程

Fig. 1 OpenGL Imaging Process

下角和右上角坐标分别为 (x_l, y_b) 和 (x_r, y_t) , 定义近远平面为 Z_n 和 Z_f 。这样, 就可以确定成像范围即视锥体, 如图 2(a) 所示。上述参数的定义可以通过调用 OpenGL 中的函数 $\text{glFrustum}(x_e, x_r, y_b, y_t, Z_n, Z_f)$ 来完成。

1.2.2 投影矩阵及其几何含义

在 OpenGL 中的投影矩阵, 根据有关视锥体

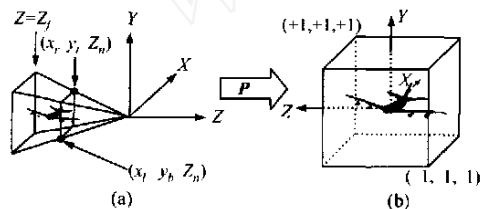


图 2 视锥体与投影矩阵的几何意义

Fig. 2 View Frustum and Geometry

Meaning of Projective Matrix

的参数, 由视锥体的错切、标准化缩小、透视变换以及视锥体整体平移旋转构成^[1]。这里只给出投影矩阵 P 的最后结果:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{2Z_n}{x_r - x_l} & 0 & \frac{x_r + x_l}{x_r - x_l} & 0 \\ 0 & \frac{2Z_n}{y_t - y_b} & \frac{y_t + y_b}{y_t - y_b} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Z_f + Z_n}{Z_f - Z_n} & -\frac{2Z_f Z_n}{Z_f - Z_n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

投影矩阵 P 的几何意义是将视锥体映射成一个正方体, 如图 2(b) 所示。

1.3 视口映射

在 OpenGL 中, 视口映射是将由透视变化产生的立方体按其深度仿射变换到计算机屏幕。假设计算机屏幕宽为 w , 高为 h , 经过归一化的物体坐标为 (x_{nd}, y_{nd}) , 计算机屏幕左下角坐标为 (x_0, y_0) , 物体映射到屏幕的坐标为 (x_w, y_w) , 则有下列变化关系:

2 OpenGL 成像机理与摄影测量内外方位元素相关分析

用于摄影测量的相机的内方位元素包括焦距 f 和像主点坐标 (x_0, y_0) , 有时还需要考虑畸变等参数; 外方位元素包括摄影中心的位置和姿态。从表面上看, OpenGL 成像过程体现不出摄影测量中所涉及到的内外方位元素, 但在对 OpenGL 的透视成像过程进行深入分析之后就体现出来了。下面结合 OpenGL 分析摄影测量成像过程, 以摄影测量的原理解释 OpenGL 的透视成像过程。

2.1 摄影测量成像过程

摄影测量成像原理体现在共线方程:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, (x, y) 为像方量测坐标; (x_0, y_0) 为像主点偏心坐标; f 为焦距; (X, Y, Z) 为物方坐标; (X_s, Y_s, Z_s) 为相机位置。

2.2 外方位元素在 OpenGL 成像过程中的体现

OpenGL 中的视点即对应摄影测量外方位线元素 (X_s, Y_s, Z_s) , 视线方向以及成像平面的方向可以由摄影测量外方位角元素 (ω, ϕ, κ) 确定。在 OpenGL 中用下列方法安置外方位元素。

根据摄影测量外方位元素计算旋转矩阵, 再构造能安置到 OpenGL 中的外方位元素矩阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & -a_1 X_s - b_1 Y_s - c_1 Z_s \\ a_2 & b_2 & c_2 & -a_2 X_s - b_2 Y_s - c_2 Z_s \\ a_3 & b_3 & c_3 & -a_3 X_s - b_3 Y_s - c_3 Z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

M 相当于 OpenGL 中的模型矩阵,其中第 4 列表示当前模型在全局坐标系中的平移和旋转,可以调用 OpenGL 的当前矩阵类型设置函数 `glMatrixMode (GL_PROJECTION)`,选择其投影矩阵为 OpenGL 的当前工作矩阵;再调用函数 `glMultMatrixd (* P0)` 安置其外方位元素到投影中。

2.3 内方位元素在 OpenGL 成像过程中的体现

从以上分析可知,摄影测量内方位元素主要反映在 OpenGL 的视锥体设置函数 `glFrustum (xl, xr, yb, yt, Zn, Zf)` 中。当摄影底片宽高 (*l_x*, *l_y*) 以及 *f* 和 (*x₀*, *y₀*) 确定之后,就可以按下式安置内方位元素到 OpenGL 中:

$$\begin{aligned} x_l &= -\frac{Z_n}{f} \left(\frac{1}{2} l_x + x_0 \right), x_r = \frac{Z_n}{f} \left(\frac{1}{2} l_x - x_0 \right) \\ y_b &= -\frac{Z_n}{f} \left(\frac{1}{2} l_y + y_0 \right), y_t = \frac{Z_n}{f} \left(\frac{1}{2} l_y - y_0 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

为了将透视投影影像映射到计算机屏幕上,还应根据视锥体的设置参数,设置相应的 OpenGL 视口矩阵:

$$V = \begin{bmatrix} \frac{l_x}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_y}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

调用 `glViewportcs` 函数将相应数值置入 OpenGL 中,即完成全部内方位元素的设置。

2.4 OpenGL 的透视成像与摄影测量成像机理一致性证明

OpenGL 成像模型如图 3 所示,其中视锥体近平面四个角点 (*x_l*, *y_b*)、(*x_r*, *y_t*) 的计算见式(4)。将

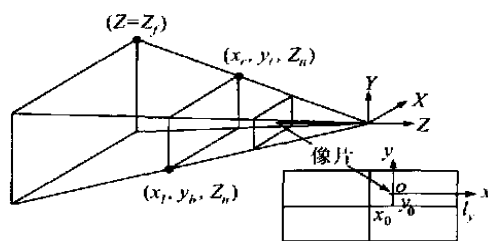


图 3 OpenGL 成像原理图

Fig. 3 OpenGL Imaging Theory

式(4)代入式(1)可得透视投影矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{2f}{l_x} & 0 & -\frac{2x_0}{l_x} & 0 \\ 0 & \frac{2f}{l_y} & -\frac{2y_0}{l_y} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Z_f + Z_n}{Z_f - Z_n} & -\frac{2Z_f Z_n}{Z_f - Z_n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{因 } \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix}^T = V \cdot P \cdot M \cdot \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix}^T,$$

则有:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_x}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_y}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2f}{l_x} & 0 & -\frac{2x_0}{l_x} & 0 \\ 0 & \frac{2f}{l_y} & -\frac{2y_0}{l_y} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Z_f + Z_n}{Z_f - Z_n} & -\frac{2Z_f Z_n}{Z_f - Z_n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & -a_1 X_s - b_1 Y_s - c_1 Z_s \\ a_2 & b_2 & c_2 & -a_2 X_s - b_2 Y_s - c_2 Z_s \\ a_3 & b_3 & c_3 & -a_3 X_s - b_3 Y_s - c_3 Z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

于是有:

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{a_1 (X - X_s) + b_1 (Y - Y_s) + c_1 (Z - Z_s)}{a_3 (X - X_s) + b_3 (Y - Y_s) + c_3 (Z - Z_s)} + x_0 \\ y &= -f \frac{a_2 (X - X_s) + b_2 (Y - Y_s) + c_2 (Z - Z_s)}{a_3 (X - X_s) + b_3 (Y - Y_s) + c_3 (Z - Z_s)} + y_0 \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知,OpenGL 的透视成像过程与摄影测量中的成像过程完全一样,在该证明过程中,可以清楚看出它们之间的对应关系。

3 实例

为了进一步证明 OpenGL 与摄影测量成像关系的一致性和相互操作性,笔者设计了一个实验。

对于一个标准的零件,从不同角度用 CCD 相机拍摄了两张照片,并检校出 CCD 相机的内外方位元素,然后将这些参数设置到 OpenGL 的各成像矩阵中获取一幅该机械零件的图像,发现和相机拍摄的照片基本一致,如图 4(a)为 OpenGL 模拟影像,图 4(b)为 CCD 相机拍摄的实际影像,图 4(c)和图 4(d)是另一个角度的模拟影像。可以看出,这两对影像在几何形状上只有极其微小的

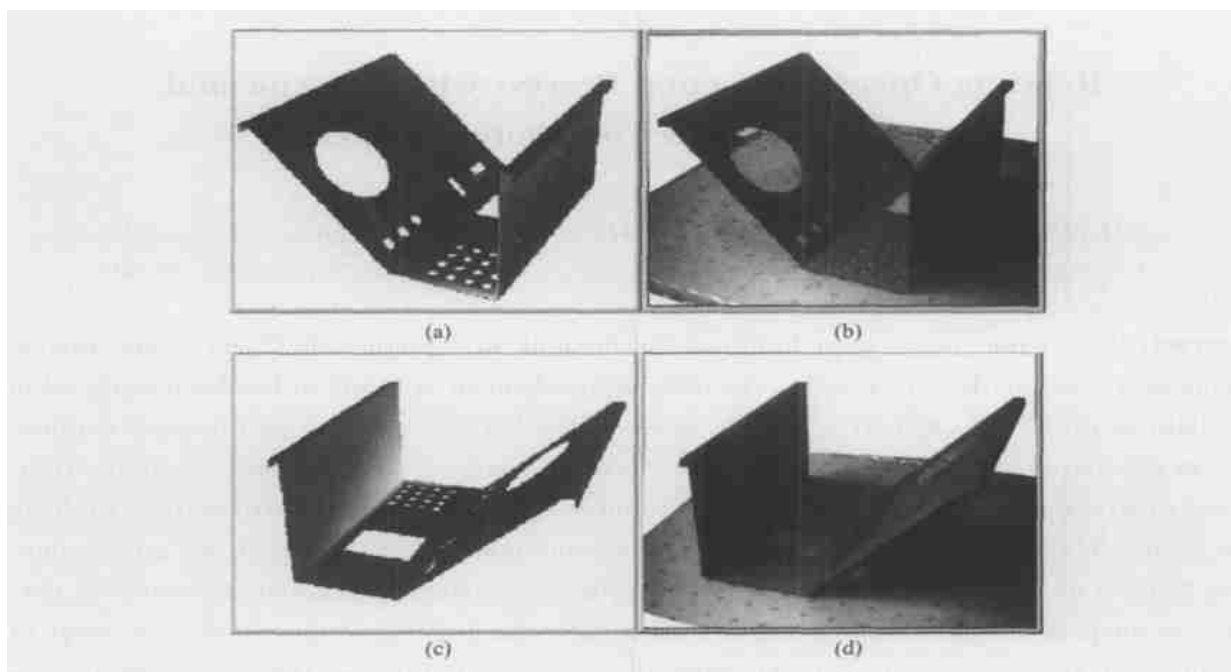


图 4 OpenGL 成像与实际相机成像结果比较

Fig. 4 Comparison Between Images Produced by OpenGL and Real Camera

差别,这是由于用 OpenGL 产生的图像没有考虑相机畸变差。

由以上实验可知,OpenGL 透视投影成像过程与摄影测量学中的物体成像过程是一致的,只是表达方式不同而已。另外,还可以看出,利用 OpenGL 可以在有真实物体和无真实物体的情况下,模拟实际相机的成像过程,构造任何三维物体的影像,这些影像可以直接用于摄影测量的教学实验。

4 结 语

OpenGL 的成像过程完全可以用摄影测量的方法进行定量控制,同时也可以利用 OpenGL 的空间模型和场景透视成像机理虚拟出摄影相机和场景影像。将 OpenGL 强大的虚拟现实能力和摄影测量精确的空间定位和测量能力结合起来,可以在单像片摄影测量、移动目标识别和姿态测量、量测相机参数设计、摄影测量教学及摄影测量软件质量评估等方面发挥作用。

参 考 文 献

- 1 Richard S W, Sweet J M. OpenGL 超级宝典. 潇湘工作室译. 北京:人民邮电出版社,2001
- 2 孙家广,杨长贵. 计算机图形学. 北京:清华大学出版社,1997
- 3 王之卓. 摄影测量原理. 北京:测绘出版社,1980
- 4 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,1996
- 5 Rogers D F. 计算机图形学的算法基础. 梁友栋,石教英,彭群生译. 北京:清华大学出版社,1986
- 6 乔林,费广正. OpenGL 程序设计. 北京:清华大学出版社,2000
- 7 李颖,薛海斌. OpenGL 函数与范例分析手册. 北京:国防工业出版社,2002
- 8 George W. Digital Image Warping. Monograph: IEEE Computer Society Press,1990

第一作者简介:张祖勋,教授,博士生导师,中国工程院院士。现从事摄影测量与遥感等领域的研究。代表成果:全数字化自动测图系统 VirtuoZo;专著《数字摄影测量学》等。

E-mail:zxzhang@supresoft.com.cn

Relating OpenGL Imaging Process with Exterior and Interior Parameters of Photogrammetry

ZHANG Zuxun¹ SU Guozhong¹ ZHENG Shunyi¹ ZHANG Jianqing¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: This paper focuses on bridging the imaging architecture of OpenGL and photogrammetry analytic theory. Firstly, the imaging mechanism of OpenGL has been analysed in the light of projective geometry, and the relationship between exterior and interior parameters in photogrammetry and image matrix in OpenGL has been summarized. Then, the transition equations of two imaging processes are inferred, and a set of equations that conform the perspective imaging matrix are built. By the experiment of simulation of real camera imaging process in OpenGL, the consistency of collinear equation in photogrammetry and perspective imaging mechanism in OpenGL is validated, which will pave the way for the usage of OpenGL. In this experiment, a CCD camera has been used. Firstly, several images of a industry part have been taken by this camera. Then the exterior and interior parameters of these images have been calibrated and these parameters have been input into our OpenGL program to produce corresponding imaging matrix. The experimental results show the reliability and correctness of derivation.

Key words: perspective project; OpenGL; imaging matrix; exterior and interior parameters; photogrammetry

About the first author: ZHANG Zuxun, professor, Ph. D supervisor, academican of the Chinese Academy of Engineering. His research fields include photogrammetry and remote sensing. His representative achievements are a fully digital mapping system——VirtuoZo and a literature “Digital Photogrammetry”.

E-mail: zxzhang@supresoft.com.cn

(责任编辑: 涓涓)

欢迎订阅《武汉大学学报·信息科学版》

《武汉大学学报·信息科学版》即原《武汉测绘科技大学学报》,是以测绘学为主的专业学术期刊。其办刊宗旨是:立足测绘科学前沿,面向国际测量界,通过发表具有创新性和重大研究价值的测绘理论成果,展示中国测绘研究的最高水平,引导测绘学术研究的方向。本刊为中国核心期刊,国家优秀科技期刊,并入选中国期刊方阵。

本刊主要栏目有院士论坛、学术论文、科技信息等,内容涉及摄影测量与遥感、大地测量与物理大地测量、工程测量、地图学、图形图像学、地球动力学、地理信息系统、全球定位系统等。收录本刊论文的著名国际检索系统包括 EI、SCI、P、CSA 等,其影响因子名列中国高校学报前列。

本刊国内外公开发行,读者对象为测绘及相关专业的高级研究人员。本刊为月刊,A4 开本,96 面,每月 5 日出版,每册定价 8.0 元。本刊邮发代号:38-317,欢迎广大读者到邮局订阅。漏订者可与本刊编辑部联系补订,邮购价加 25%。