

半球幕几何校正与标定方法的研究

郭成玉, 袁政鹏, 吴家麒, 丰 杰

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:为解决半球幕投影图像画面图形畸变的问题, 提出一种半球幕几何校正和相机标定的方法。该方法通过 3D 半球幕空间与 2D 投影机空间的对应关系, 建立投影空间数学模型。将半球幕上标定的理想球形网格反投影到投影机空间获取预变形网格。通过奇异值分解法进行预变形网格与平面透视网格间的几何关系变换, 通过控制点拟合法进行相机标定, 实现基于半球幕的多点触控系统。实验结果表明该方法达到预期目标。

关键词:球形幕; 几何校正; 相机标定; 奇异值分解; 控制点拟合

Research on Semispheric Screen Geometry Correction and Calibration Method

GUO Cheng-yu, YUAN Zheng-peng, WU Jia-qi, FENG Jie

(School of Electrical Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

【Abstract】To solve the problem of the picture distorted that is caused when the picture is projected to semispheric screen, this paper presents a method about semispheric screen geometry correction and camera calibration. The method finds out the corresponding relations and computational method between 3D semispheric space and 2D projector space, builds the mathematical model of semispheric screen projective space. It obtains the predeformation grid by back projecting the ideal grid demarcated on the semispheric screen to projector space, makes the geometry transformation between predeformation grid and prespective grid by Singular Value Decomposition(SVD), calibrates the camera by control points fitting. A multi-touch system platform based on semispheric screen is implemented, experimental result shows that the method achieves expected object.

【Key words】spheric screen; geometry correction; camera calibration; Singular Value Decomposition(SVD); control points fitting

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.02.099

1 概述

随着虚拟现实技术的不断发展, 单纯的平面投影显示屏幕, 已经不能满足人们对多媒体互动投影沉浸感、交互感的要求, 球形或半球形投影显示系统的出现, 成为解决这一问题的方法之一。球幕交互系统需要解决 2 个关键问题: (1) 需要对投影机输入图像进行预变形以校正畸变图形, 即几何校正^[1], 以达到投射图像的真实反应。(2) 球幕系统中摄像机标定, 以达到实际触控点与投射图像交互内容的一一对应。

近年来很多人做了多方面的理论研究^[2], Okatani 等人对基于相机-投影机模型的校正方法做了深入研究, 提出并证明平面投影幕到相机和平面投影幕到投影机之间对应的透视变换关系。黄永峰等人对 2D 与 3D 空间变换的几何关系进行了推导。本文分析和对比以往的几何校正和标定方法, 提出了一种基于多点触控的半球幕几何校正和相机标定方法。

2 图像几何校正

当投影显示屏幕是曲形(如柱形、球形等)时, 在没有做相应几何校正前的投影机输出图像必将发生几何扭曲, 原图投影显示出现失真现象。几何校正的目的就是对输入投影机的原始图像, 根据所建数学模型, 做图像预变形, 以抵消投影幕不规则所造成的失真, 达到真实显示原图效果。

2.1 几何校正数学模型

几何校正模型分为虚拟相机模型和投影仪模型。如图 1 所示, 虚拟相机模型产生, 由目标投影图像(3D 图像)通过透视变换后而成的平面透视图, 即具有透视效果的平面图如

Google Earth、CommunityEarth 等。投影仪模型, 将预变形图像投影到半球形投影幕上, 以呈现真实目标图像。因为虚拟相机模型和投影仪模型的透视参数: 投影角度, 焦距 f 及投影点到成像平面间的距离 D 都不同, 且投影仪光轴不一定垂直于半球面, 以导致平面透视图与预变形图间的几何关系复杂化。因此, 几何校正模型中关键点: 预变形方法, 平面透视图与预变形图像间的平面几何变换关系。

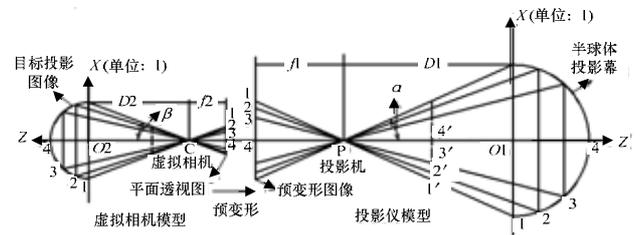


图 1 几何校正数学模型

2.2 图像预变形

如图 1 所示, 预变形原理如下: 首先, 借助 OpenGL 纹理映射和 C++ 建立投影机向半球形幕投影的数学模型; 其次,

基金项目:国家重点学科基金资助项目; 上海市重点学科基金资助项目

作者简介:郭成玉(1984 -), 男, 硕士研究生, 主研方向: 机器视觉, 虚拟现实技术, 增强现实技术, 多点触控技术; 袁政鹏, 博士研究生; 吴家麒, 教授、硕士; 丰 杰, 硕士研究生

收稿日期: 2010-05-20 **E-mail:** gcy208@163.com

根据投影机的透视投影模型,连接球形幕上的点(如 1, 2, 3 等点)与投影点 P 间的直线;最后,在 P 点与半球面间的投影机投影平面上,通过将球形幕上点(如 1, 2, 3 等)反投影到此平面,得到相应的点(如 $1'$, $2'$, $3'$ 等),这些点组成预变形图像网格。具体实现步骤如下:

(1)设定坐标系:如图 1 所示,设半球球心 O_1 为坐标系原点(0, 0, 0),投影光心空间坐标为 (X_p, Y_p, Z_p) ,取投影平面的法向量为(0, 0, 1),投影机焦距设为 f_0 。光心 (X_p, Y_p, Z_p) 与半球面上一点 i 连线的方向向量为 $(X_i - X_p, Y_i - Y_p, Z_i - Z_p)$,联立球面方程有:

$$\begin{cases} \frac{x-x_p}{x_i-x_p} = \frac{y-y_p}{y_i-y_p} = \frac{z-z_p}{z_i-z_p} \\ x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \end{cases} \quad (1)$$

(2)等分圆弧:在球面上找一段垂直于 y 轴的水平圆弧,并将其沿 x 轴方向 n 等分,标出 n 等分点,则第 j 个点的空间坐标为:

$$\begin{cases} x_j = x_i + j \cdot dx \quad (0 \leq j \leq n) \\ dx = \frac{1}{n}(x_n - x_i) \\ y_j = y_i \\ z_j = \sqrt{R^2 - y_j^2 - x_j^2} \end{cases} \quad (2)$$

(3)预变形网格节点坐标:有了球幕上的一点坐标 (X_j, Y_j, Z_j) 与光心 (X_p, Y_p, Z_p) 可以列出 2 点式直线方程,这样就可以求出最终的在投影机投影平面上对应的网格节点坐标:

$$\begin{cases} x_j' = x_p + \frac{x_j - x_p}{z_j - z_p} \cdot f \\ y_j' = y_p + \frac{y_j - y_p}{z_j - z_p} \cdot f \\ z_j' = z_p + f \end{cases} \quad (3)$$

数学模型实现如图 2 所示。

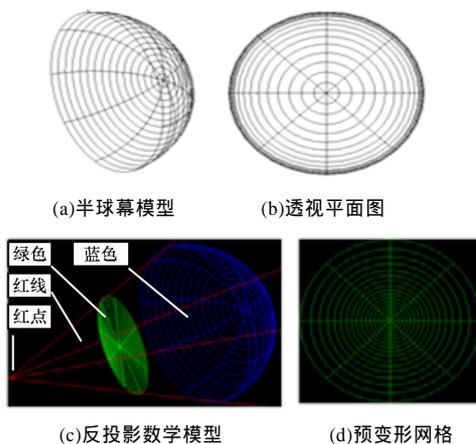


图 2 预变形数学模型

如图 2 所示,图 2(a)是理想化半球幕立体模型。图 2(b)是理想化半球幕垂直透视平面图,将其直接投影到半球幕必将造成图像失真。图 2(c)是基于以上公式所建立的反投影数学模型:红点表示投影光心,红线代表投影机透视光线,蓝色代表半球幕网格,绿色表示由半球幕网格反投影形成的预变形网格。图 2(d)是预变形网格平面图,将此网格投影到半球幕便可以校正失真图像。

实验结果如图 3 所示,将透视平面图直接投影到半球幕,

就会产生如图 3(a) 所示的失真图,白色圆圈之间的间隔从圆顶部向底部依次减小,底部圆几乎重合在一起,若白色圆圈表示经纬线的话,会引起明显失真效果;通过将透视平面图进行预变形后,再投影到半球幕,得到如图 3(b)几何校正图,白色圆圈之间间隔从圆顶部向底部依次接近等间距(误差 3 mm 之内),就像地球仪上等间距的经纬线,达到真实反映 3D 透视图的效果。



图 3 预变形实验结果

2.3 平面几何关系变换

由于目标投影图的透视参数是一定的,图像预变形网格获取后,可直接将目标投影图进行纹理映射网格化,再对此网格根据预变形图像网格进行变形,以让显示出来的网格图像有正常效果。因此,要对目标投影网格与预变形网格进行平面几何关系变换。由几何校正数学模型可知,虚拟相机参数与投影机模型参数的不同,导致网格节点坐标并不符合普通的二维关系变换。本文利用奇异值分解法^[3](Singular Value Decomposition, SVD)求得网格节点坐标间的变换矩阵。

首先,网格节点间坐标变换关系可用下式表示,其中, H 为 3×3 的变换矩阵:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

因为向量相同时其叉积为 0,即 $(x_1)X(H \times x_2)T=0$ 。

其次,通过最小二乘法计算,建立一个矩阵 A 。假设有 4 组点 $p1(x_i, y_i), p2(X_i, Y_i)$ 相互对应(i 从 1~4),则有:

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1 X_1 & -y_1 X_1 & -X_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_1 Y_1 & -y_1 Y_1 & -Y_1 \\ -x_1 Y_1 & -y_1 Y_1 & -Y_1 & x_1 X_1 & y_1 X_1 & X_1 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2 X_2 & -y_2 X_2 & -X_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -x_2 Y_2 & -y_2 Y_2 & -Y_2 \\ -x_2 Y_2 & -y_2 Y_2 & -Y_2 & x_2 X_2 & y_2 X_2 & X_2 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

构建出 12×9 的矩阵 A , 然后通过 SVD 来求得 H 。具体步骤如下:

(1) $A=USV^T$ 有矩阵 $A(12 \times 9)$, 则存在 $U(12 \times 12)$ 、 $V(9 \times 9)$ 、 $S(12 \times 9)$ 3 个矩阵满足 $A=USV^T$ 。 U 和 V 分别是 A 的奇异向量,而 S 是 A 的奇异值。 AA' 的正交单位特征向量组成 U , 特征值组成 $S'S$, $A'A$ 的正交单位特征向量组成 V , 特征值(与 AA' 相同)组成 SS' 。

(2) V 特征向量的最后一列就是解。

(3) 限制 $|H|=1$, 求得变换矩阵 H 。

3 摄像机标定——控制点拟合法

投影仪-红外摄像头的几何标定,主要目的在于得到投影仪绘制平面和摄像机成像平面之间的映射关系^[4]。但大多标定方法^[5]如张正友标定法是针对平面投影幕,目前已经比较成熟,能取得良好的效果,对于投影面是半球形的标定方法,较少有人涉足。本文用一种控制点拟合法^[6]来近似拟合球形幕,具体步骤如下:

标定过程即确定仿射变换矩阵中 6 个未知参数的值。采用控制点拟合方法进行标定, 控制点通过场景中标定物得到。

标定过程: 保持摄像头视场与焦距不变, 如图 4 所示, 投影仪投影标定十字(标定物)到半球幕, 然后通过获取 X、Y 方向组成矩形的 4 个标定十字的标定点坐标, 代入线性变换矩阵, 拟合各区域仿射变换矩阵。一般标定十字越多, 与半球体网格拟合度就越高, 标定精度也越准确, 但是会加大计算量。



(a) 投影标定点 (b) 标定效果

图 4 控制点拟合标定

实验过程: 将投影画面分割为多个区域, 相当于投影球体网格, 可以合理假设, 在单个小区域范围内, 平面近似拟合球体的弧形面, 且投影仪变换是线性的。假设区域的个数为 n , 那么几何校正的过程就转化为求这 n 个区域各自的线性变换矩阵。

如图 4 所示, 图 4(a)是投影标定点(标定点数量会影响计算速度), 相邻 4 个标定点组成的平面近似拟合球面, 标定点越多拟合程序越高, 但会增大程序计算量; 图 4(b)是标定效果, 三手指点旁边的 3 个矩形框代表手指点位置, 手指点移动, 相应矩形跟着移动, 反映出手指点跟踪效果(矩形大小代表手指触点面积), 跟踪精度在 5 mm 之内。

4 系统实现

4.1 系统平台

本文将半球幕用于基于投影仪——红外摄像头的多点触控系统^[6], 实现将 Google Earth 等地球仪视频图像, 投影到半球显示幕上, 整个屏幕看起来就像真的地球仪一样。然后, 基于多点触控功能, 实现用多手指点进行地球仪的旋转操作、两点缩放、双击缩放以及点击地球某个城市相关图片或者视频等功能, 达到人机交互虚拟现实的目的。

4.2 多点交互效果

如图 5 所示(限于篇幅, 选取部分数据罗列), 半球幕经过几何校正反映出比较真实的地球 3D 效果, 可用手虚拟旋转地球仪, 图 5 为用两点(手指点)进行地图缩放操作, 利用两指点距离的变化来控制地球模型的缩放, 缩放操作自然方便。实验结果表明, 半球幕显示屏不仅形象地呈现出 3D 地球模型, 而且多点的旋转、缩放等交互操作增强虚拟现实感。

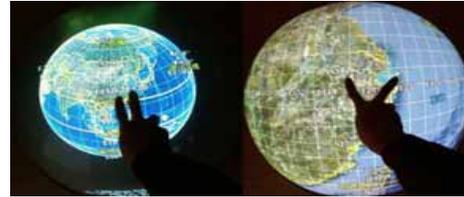


图 5 多点触控交互

5 结束语

本文通过建立半球幕投影空间的数学模型, 来求得半球显示幕的几何校正以及控制点拟合方法进行相机标定, 构建基于半球幕的多点触控系统平台, 实现了半球形特殊投影幕图像畸变校正。随着 3D 虚拟现实技术和图像处理技术的不断发展, 实现 3D 投影与虚拟现实的人机交互模式已逐渐成为未来多媒体互动的发展方向, 而特殊投影面的畸变图形几何校正及相机标定仍是其关键技术。

参考文献

- [1] Castleman K R. Digital Image Processing[M]. 朱志刚, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [2] 王胜正, 杨杰. 自动多投影机非线性几何校正与图像边缘融合方法[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(4): 574-578, 583.
- [3] 聂守平, 魏晓燕. 数字图像的奇异值分解[J]. 南京师范大学学报: 自然科学版, 2001, 24(1): 59-61.
- [4] 刘胜, 傅荟璇, 王宇超. 基于分割区间 LS-SVM 的摄像机标定[J]. 计算机工程, 2009, 35(24): 179-181.
- [5] 吴文琪, 孙增圻. 机器视觉中的摄像机标定方法综述[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(2): 4-6.
- [6] 陈成钱. 基于投影仪-红外摄像机的多点触控系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

编辑 索书志

(上接第 280 页)

4 结束语

本文提出了一个统一、可扩充的视频摘要模型——局部-空间模型。该模型从视频底层特征提取开始, 经过对视频空间信息分析, 准确、高效地提取关键帧, 然后通过线性插值算法得到动态视频摘要, 最后运用 DES 视频非线性编辑, 得到一个整体化的视频摘要, 可以适用于 3G 网络传输播放。但是现有的函数采取了简单的特征分析和提取关键帧的方法, 下一步打算进一步优化算法函数、分析关键帧的重要度以及视频语义信息, 并应用于其他类型的视频摘要中。

参考文献

- [1] 欧阳建权, 李锦涛, 张勇东. 视频摘要技术综述[J]. 计算机工程, 2005, 31(10): 7-9.
- [2] 栾悉道, 谢毓湘, 应龙, 等. 基于 EDU 模型的新闻视频摘要

技术研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3770-3774.

- [3] 陆伟艳, 夏定远, 刘毅. 基于内容的视频检索的关键帧提取[J]. 微计算机信息, 2007, 23(33): 298-300.
- [4] 于俊清, 彭丹霖. 基于关键帧的视频摘要研究[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(10): 2598-2601.
- [5] Ekin A, Tekalp A M, Mehrotra R. Automatic Soccer Video Analysis and Summarization[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2003, 12(7): 796-807.
- [6] 王煜, 周立柱, 邢春晓. 视频语义模型及评价准则[J]. 计算机学报, 2007, 30(3): 337-351.
- [7] Ma Yufei, Zhang Hongjiang. A Model of Motion Attention for Video Skimming[C]//Proc. of International Conference on Image Process. [S. l.]: IEEE Press, 2002: 129-132.

编辑 顾逸斐