基于曲面拼接的球面全景生成算法

李晓辉 周荫清 王祖林

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 提出一种基于曲面拼接的球面全景自动生成算法. 该算法包括球面投影、图像空洞消除、全局光强校正、图像匹配与缝合等关键步骤,实现了以固定视点为中心的 4π 立体空间内全方位场景观察. 重点研究了水平和垂直方向的球面投影,完整保留了投影点空间信息,避免了因信息丢失造成的视图严重变形,甚至在两极无法展开的问题;采用"反算"插值的方法,解决了投影过程中因坐标离散化造成的图像走样及空洞现象;提出"分散全局累积误差"方法,对光照变化强烈的图像序列进行光强校正,克服了以往算法只对相邻而非全局图像进行光强调整的限制;利用基于特征的方法在曲面上对图像进行匹配和融合,生成视点空间内无缝平滑的球面全景图像. 整个算法自动完成,光照鲁棒性强,拼接效果好,具有较高的应用价值.

关 键 词: 拼接; 球面; 全景; 光强; 算法

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)06-0668-04

Spherical panorama creating algorithm based on curve surface mosaic

Li Xiaohui Zhou Yinqing Wang Zulin

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A novel spherical panorama creating algorithm based on curve surface mosaic was presented to achieve omni-directional scene observation at a fixed viewpoint. The work was concentrated on sphere projection, blank holes elimination, global illumination alignment and image stitching. The horizontal and vertical spherical projections were studied in detail, in which the 3-dimension spherical information was fully saved to avoid wrinkle unwrapping that occurred in traditional methods. Then a way of "inverse interpolation" was applied to eliminate image blank holes caused by discrete calculation. To reduce the great illumination differences between image sequences, a novel method of "dispersing cumulative error" was presented. The limits of traditional ways that were only for neighboring illumination alignment were released. The final mosaic on curve surface was accomplished by using a matching method based on image feature, and a smooth seamless spherical panorama was gained. The whole algorithm runs automatically, which has high performance in illumination alignment and spherical mosaic, and is valuable in practical application.

Key words: mosaic; sphere; panorama; illumination; algorithm

基于图像绘制技术(IBR, Image Based Rendering)的虚拟环境构造是近年来虚拟现实的研究热点. 与传统基于模型的绘制方法不同,IBR 对实际场景采样,通过特定的变换和组织方式生成不同视点的新视图,从而完成绘制工作[1-2].

对边缘重叠图像进行全景拼接是 IBR 的重要研究内容. 全景图像表示观察者在某一视点空间内,视点不动而观察方向不断改变的场景描述,它是全球范围内迅速发展并独具特色的视觉新技术. 根据表示模型不同,全景可分为柱面、球面、立方体等多种形式. 柱面全景的研究已十分成熟,但在垂直视域上受到极大限制. 立方体全景的研究

收稿日期: 2006-08-14

作者简介: 李晓辉(1980—),女,湖南郴州人,博士生,lxh330@163.com.

正在不断深入,但表现效果不如球面真实.球面全景是描述一个场景的最佳选择,但是模型复杂,图像序列获取困难,相关研究尚欠成熟[1-2].

目前多数球面全景的获得都是利用全景设备(如广角或鱼眼镜头)进行实景拍摄[3],然后根据已知镜头模型对图像进行变换而获得场景信息,这种方法成本昂贵,而且单幅图像视角过大,场景分辨率不高.所以人们又提出利用普通数码相机或摄像机采集图像序列,通过拼接的方法生成球面全景.但多数方法都是在柱面全景的基础上继续推导[4-5].由于柱面模型与球面模型存在很大差异,例如柱面全景可视为场景在水平方向的均匀采样,球面全景是非均匀采样;柱面是可展平面,球面则无法直接展开等,如果继续沿用原来柱面全景的处理思路,则球面展开时会发生破裂和褶皱,极易导致拼接失败.另一方面,传统算法对光照变化强烈的图像序列进行处理时,通常只考虑两幅图像之间的光强关系[1,6],随着用于拼接的图像数量增多,这类方法将造成很大的光强累积误差.

针对上述问题,本文提出一种基于曲面拼接的球面全景自动生成算法.重点研究水平和垂直方向的球面投影,建立了场景、图像及球面上各点之间的变换关系;采用"反算"插值解决了投影过程中产生的图像走样及空洞现象;提出"分散全局累积误差"的方法,对光照变化强烈的图像序列进行全局光强校正;利用基于特征的方法在曲面上对图像进行匹配和融合,获得一个无缝平滑的球面全景图像.

1　球面模型建立

首先,在小孔成像模型基础上建立球面模型.以相机拍摄时的固定视点 O 为坐标原点,建立观察坐标系 $OXYZ$,如图 1 所示.不断改变拍摄方向,所有图像中心到视点的距离都为焦距 f,因此它们分布在以 O 为球心、f 为半径的球切面上.

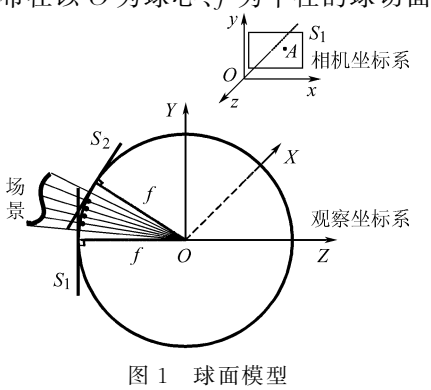


图 1　球面模型

若已知图像 S_1 中某点 A 在相机坐标系 $Oxyz$ 中的坐标(u, v, w),则它在观察坐标系中的位置由下式决定:

$$\begin{bmatrix} u_{xy} \\ v_{xy} \\ w_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta\sin\alpha & \sin\beta\cos\alpha \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中,(u_{xy}, v_{xy}, w_{xy})是该点在观察坐标系中的三维坐标;α 表示相机光轴绕 X 轴旋转的角度;β 表示相机光轴绕 Y 轴旋转的角度.由于相机成像在 $z=-f$ 处,因此 $w=-f$.f 是球面模型的重要参数,它既可以利用 Levenberg-Marquar 算法进行计算[2];也可以采用等距离匹配算法进行估算[7];另外,如果已知相机水平视角 θ_{fov},还可以根据式 $f=W/(2\tan(\theta_{fov}/2))$[8] 进行计算,其中 W 是图像宽度,θ_{fov} 由相机视角决定.

2　球面全景生成算法

建立球面模型后,生成全景的关键步骤就落在球面投影、图像空洞消除、全局光强校正、图像匹配与缝合上.算法中曲面拼接的含义在于:通过投影建立原始图像的球面映射,将投影点按经纬位置进行排列,获得曲面投影图像;通过"反算"插值消除投影空洞;根据球面上相邻曲面的光度差异,进行全局光强校正;对具有统一光强的曲面序列进行配准和缝合,最终生成球面全景.

2.1　球面投影

球面投影的目的是为了消除同一场景在不同图像中因拍摄方向不同造成的视差.由图 1 可知,相邻图像 S_1,S_2 中表示同一场景的像素点在球面上的位置将是固定的,因此以该球面作为投影曲面,可以消除视差.

一些传统拼接算法在进行球面投影后,沿用了柱面全景的处理思路,直接利用二维直角坐标(x_p, y_p)来描述球面展开平面[4-5].但是,球面本身并不是可展平面,尤其在两极极化严重,如果忽略场景的深度信息直接展开,必将发生破裂和褶皱.因此,本算法在球面投影后,采用完整的三维信息进行投影描述,避免了因信息丢失造成的视图严重变形、甚至在两极无法展开的问题.

设图像 I 上任意像素点 A 的观察坐标为(u, v, w),它在球面上的对应点为 $P(x_p, y_p, z_p)$,如图 2 所示.建立直线 OP 的参数方程,根据直角坐标与球面坐标的转化关系,求得 P 点的具体位置为

$$\left.\begin{aligned} r &= f \\ \theta &= \arctan\left(\frac{f}{i-W/2}\right) \\ \varphi &= \arctan\left(\frac{H/2-j}{\sqrt{(i-W/2)^2+f^2}}\right) \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

其中，(r, θ, φ)是 P 的球面坐标；j 和 i 是 A 在图像 I 中的行列数；W 是 I 的长度；H 是 I 的宽度. 此时，A 的观察坐标(u,v,w)已表示为

$$[u \quad v \quad w]^{\mathrm{T}} = [(i-W/2) \quad (H/2-j) \quad -f]^{\mathrm{T}} \quad (3)$$

公式(2)没有考虑相机光轴在观察空间的旋转，它与 Z 轴平行. 如果考虑相机在整个空间的视向变化，则式(2)将变成

$$\left.\begin{aligned} r &= f \\ \theta &= \arctan\left(\frac{k_1}{k_2}\right) \\ \varphi &= \arctan\left(\frac{(H/2-j)\cos\alpha + f\sin\alpha}{\sqrt{k_1^2+k_2^2}}\right) \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

其中

$$k_1 = (i-W/2)\sin\beta - (H/2-j)\sin\alpha\cos\beta + f\cos\alpha\cos\beta$$

$$k_2 = (i-W/2)\cos\beta + (H/2-j)\sin\alpha\sin\beta - f\cos\alpha\sin\beta$$

α 表示相机光轴绕观察坐标系 X 轴旋转的角度；β 表示相机光轴绕 Y 轴旋转的角度. 上式建立了任意视向上像素点与球面投影点的变换关系.

建立一个与 I 对应的三维矩阵，分别存储投影点的位置坐标. 所有投影点组合在一起便可获得 I 在球面上的投影图像. 这个信息完整的曲面投影图像将正确反映场景在球面上的变化情况.

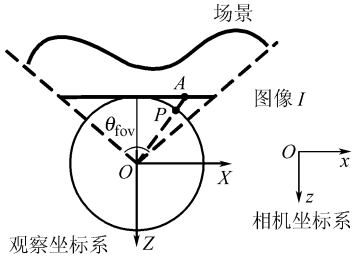


图 2 球面投影

2.2 图像空洞消除

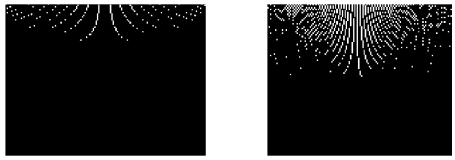
由于计算机在投影过程中进行的坐标离散化处理，导致投影后图像出现空洞，尤其越靠近球面两极，空洞点越多. 如图 3，显示的是相机绕 X 轴上仰 40°和 60°时出现的空洞示意图.

为消除空洞，采用“反算”插值的方法，即根据每个投影点在球面上的具体位置(r, θ, φ)来反查它们在原图中对应的像素点并获得像素值. 下式实现了这种反查功能：

$$\left.\begin{aligned} i &= W/2 - r\frac{\cos\varphi\cdot\cos(\beta-\theta)}{\cos\alpha\cos\varphi\sin(\beta-\theta) - \sin\alpha\sin\varphi} \\ j &= H/2 + r\frac{\cos\varphi\sin\alpha\sin(\beta-\theta) + \sin\varphi\cos\alpha}{\cos\varphi\cos\alpha\sin(\beta-\theta) - \sin\varphi\sin\alpha} \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

其中，(r, θ, φ)为投影点坐标；α, β 是相机光轴绕 X, Y 轴的旋转角度；j, i 为原图像素的行列数.

这种方法保证了球面上每个投影点都能被原始像素点覆盖，因此可以消除空洞. 图 4 表示的是相机上仰 40°时利用反算方法消除空洞后获得的投影图像.



a 相机上仰 40° b 相机上仰 60°

图 3 “全黑”图像投影空洞示意图



图 4 反算消除空洞

至此，已建立原始图像与球面上各点之间的映射关系. 投影过程中，不仅考虑了相机的任意视向变化，而且完整保留了投影点三维信息，能够对场景精确编码. 这种有效的信息组织方式，不仅适于计算机存储，而且数据查找方便，有助于“反算”插值消除图像空洞.

2.3 全局光强校正

通常进行全景拼接，都假定光照条件不变. 但由于相机视向改变、环境光照不同、物体表面对光线吸收和反射程度不同等原因，两幅图像对应像素点的亮度往往并不相同. 如果直接进行拼接，不仅影响配准精度，而且容易出现明显拼缝.

传统的校正方法通常只考虑两幅图像的光强关系[1,6]，随着用于拼接的图像数量增多，相邻图像的光强差异不断累积，将在拼接最后阶段产生较大的误差. 因此，本文提出将光强累积误差平均分配到光强校正的各次环节，利用相邻图像承担小部分误差、但又满足人眼视觉和拼接要求的方法，取得了良好的校正效果.

设 $E(i)$为像素均值，表征图像光度强弱. 在不考虑乘性因子的情况下，两幅重叠图像的光度差异可用一个简化的线性模型表示如下：

$$D(i) = E_r(i) - E_l(i+1) \quad (6)$$

其中，$E_r(i)$和 $E_l(i+1)$分别是图像 i 和$(i+1)$中

重叠部分的图像均值.

假设球面上共有 N 幅曲面需要进行光强校正,它们之间互有重叠.依次对所有曲面进行光强调整后,产生的累积误差为

$$E_c=(E_l(1)-E_r(N))-\sum_{i=1}^{N-1}(E_r(i)-E_l(i+1)) \tag{7}$$

其中 i 为曲面序号.将累积误差均匀分配,则全局校正后相邻曲面将存在误差:

$$\Delta E=\frac{1}{N}\left(E_l(1)-E_r(N)-\sum_{i=1}^{N-1}(E_r(i)-E_l(i+1))\right) \tag{8}$$

此时,虽然相邻曲面承担了校正误差 ΔE,但 $\Delta E\ll E_c$,人眼很难识别这种细微的光度差异,因此大大减小了全局累积误差.由式(8)可知,随着图像数量 N 值越大,这种方法的效果越明显.

2.4　图像匹配与缝合

经过球面投影和光强校正,可以获得光强一致的重叠曲面.此时,只要找到所有曲面之间的匹配位置,就能去除冗余,生成完整的球面全景.

为描述方便,根据相机光轴绕 X 轴旋转的角度不同,将球面分成若干层:同层曲面具有相同的相机俯仰角 α,不同层间的 α 不同.实际拼接时,需要考虑所有曲面的相邻关系,如能精确控制相机光轴方向(α,β),则同层图像左右拼接后,仍能较好地保持上下层间的景物一致性,可直接进行上下拼接.

拼接的关键在于配准.目前使用较多的有基于特征、基于面积等配准方法.本文利用一种基于特征线段的方法[8],选择两条经线,以它们的像素差值作为特征模板;然后在另一曲面中沿纬线方向进行特征搜索;找到匹配点后,去除冗余,将剩余像素点仍按经纬关系排列在球面上;为避免明显拼缝,采用渐入渐出[8]等方式进行平滑.上述方法适用于同层曲面的左右拼接,对于不同层间的上下拼接,特征模板将由不同纬线上的像素差值决定,搜索方向也变成沿经线方向进行.

3　仿真结果

利用数码相机拍摄一组 320 像素×240 像素大小的灰度图像.根据 2.4 节提出的分层原则逐层拍摄,直到将半个球面空间的场景拍摄完毕.所有图像保持约 10%的重叠度.

图 5 是相机仰角 $\alpha=30°$时拍摄的两张照片.图 6a 是直接拼接的结果,由于相同景物存在视差,直接拼接导致图像混叠,如墙柱处.图 6b 是用 2.1 节中的正投影算法拼接的结果,虽然消除了视差,但在图像顶部出现空洞.

图 7 是对相机仰角 $\alpha=0°$时拍摄的 8 张图片拼接的结果,采用的是传统的光强校正方法,因为误差累积导致首尾图像光度差异巨大.

图 8 是利用本文算法将 25 张照片拼合而成的半球面全景图,从图中可以看出,算法对光度差异较大的图像序列具有良好的"整体"处理效果,而且消除了图像空洞,拼接效果好.

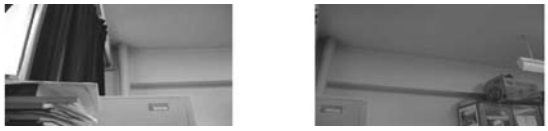
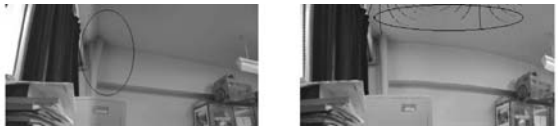


图 5　相机仰角 $\alpha=30°$时拍摄的原始图像



a　直接拼接　　b　正投影算法拼接

图 6　各种拼接效果比较



图 7　误差累积造成首尾图像光强差异显著



图 8　半个球面全景的效果图(由 25 张照片拼合而成)

4　结 束 语

本文提出了一种基于曲面拼接的球面全景自动生成算法,其特点表现在:①对相机在固定视点任意视向上拍摄的图像序列进行球面投影,生成的投影曲面消除了因平移、旋转造成的场景视差;②采用"反算"插值的方法,解决了投影过程中出现的图像走样及空洞现象;③对球面上光照变化强烈的图像序列进行光强调整,通过"分散累积误差",实现了全局光强校正.

(下转第 681 页)