

文章编号:1001-9081(2014)03-0810-05

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2014.03.0810

## 内投式球幕投影系统的实现算法

陈珂\*, 吴建平

(苏州市职业大学 江苏省现代企业信息化应用支撑软件工程技术研发中心, 江苏 苏州 215104)

(\*通信作者电子邮箱: szchenke@126.com)

**摘要:**针对内投式球幕投影中涉及的计算机处理过程,提出了基于虚拟球面变换和虚拟鱼眼透镜投射的内投式球幕投影算法,并针对不规则鱼眼透镜导致的球幕映像扭曲,提出了基于等立体角投影函数的六阶函数校正算法,该六阶函数的系数可通过简单求解六元一次方程获得。实验结果表明,该方法能完全消除不规则鱼眼透镜导致的球幕投影扭曲。针对球幕投影导致的图像亮度分布变异提出了基于投射角余弦修正的球幕光强校正算法。实验结果表明,该算法成功地把与输入二维图像亮度分布差异明显的球幕投影图像校正至与原始图像亮度分布高度一致的状态。该方法对球幕投影系统的设计和软件开发具有重要的理论指导意义和实践应用价值。

**关键词:**球幕投影; 鱼眼透镜; 虚拟球面; 鱼眼投影函数; 鱼眼畸变校正

中图分类号: TP399 文献标志码:A

## Implementation algorithm of spherical screen projection system via internal projection

CHEN Ke\*, WU Jianping

(Jiangsu Province Support Software Engineering Research and Development Center for Modern Information Technology Application in Enterprise, Suzhou Vocational University, Suzhou Jiangsu 215104, China)

**Abstract:** Addressing the issue of computer processing in the internal spherical screen projection, an internal spherical screen projection algorithm was proposed based on virtual spherical transform and virtual fisheye lens mapping. Concerning the spherical screen output distortion caused by irregular fisheye projection, a sextic polynomial of distortion correction algorithm based on the equal-solid-angle mapping function was presented to approximate any fisheye mapping function to eliminate the distortion. The six coefficients of the polynomial could be obtained via solving a linear algebra equation. The experimental results show this method is able to completely eradicate the spherical screen projection distortion. Addressing the illumination distribution modification stemming from the spherical screen projection, an illumination correction algorithm based on the cosine of the projecting angles was also proposed to eliminate the illumination distribution change. The experimental results show the illumination distribution correction method successfully recovers the originally severely modified illumination distribution into the illumination distribution almost identical to the original picture. This algorithm has theoretical instructive importance and significant practical application values for design and software development of the spherical projection systems.

**Key words:** spherical screen projection; fisheye lens; virtual sphere; fisheye mapping function; fisheye distortion correction

### 0 引言

球幕投影技术是一种新兴的展示技术,它打破了以往投影目标只能是规则平面的局限。球幕投影利用特制的光学镜头,对普通的平面影像进行特殊的计算机处理和变换,投射至一个球形或半球形屏幕内,展示出高分辨率、大视角范围的精确演示效果,给观众带来超强临场真实感和空间感,目前已经广泛应用于娱乐(球幕电影<sup>[1-2]</sup>)、教育(数字星球<sup>[3-4]</sup>)、数字图书馆(虚拟现实<sup>[5]</sup>)、国防(飞行模拟<sup>[6]</sup>)、广告宣传、展览展示等多个领域。球幕投影首先通过一定的算法将数字图像变换至数字投影仪上,然后通过鱼眼透镜把画面投射至球幕上形成三维立体映像。球幕投影分为外投和内投两种模式,

根据数字投影仪投射的位置是球幕的外部还是内部来区分。外投球幕一般需要多个数字投影仪从多个方向投射来确保球幕的每个方向都能被投射,而内投球幕系统一般只需要一个投影仪即可获得整个球幕的投影效果,因此其结构上更为简单。但是它需要依赖于特殊的鱼眼透镜并借助于复杂的计算机处理来实现理想的投影效果,此外国外也有使用多个投影仪来提高内投球幕系统的亮度和分辨率的报道。

由于应用十分广泛,球幕投影的相关算法分析和研究很多,但是大多数文献只是就球幕投影系统的重要部件如鱼眼透镜进行研究,而系统化的实现方法报道还是空白。文献[7]简要介绍了球幕投影技术,但未给出算法过程等技术细节;文献[8]对半球形屏幕投影做了建模和仿真,但未开发实

收稿日期:2013-09-29;修回日期:2013-11-15。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41201338);苏州市科技计划项目(SGZ2012061, SGZ2013132, SZS201201);苏州市职业大学预研基金资助项目(2012SZDYY05, 2012SZDYY06);江苏省现代企业信息化应用支撑软件工程技术研发中心基金资助项目(SX201203)。

作者简介:陈珂(1974-),女,贵州贵阳人,副教授,硕士,CCF会员,主要研究方向:图像处理、人工智能;吴建平(1966-),男,江苏江阴人,副教授,博士,主要研究方向:计算机视觉、图像处理。

际产品。鱼眼透镜作为广角镜往往会有较大的畸变,一些文献提出了几种有效的校正畸变和恢复透视图像的算法。文献[9]设计了一个能用于球幕投影的通用变焦鱼眼透镜;文献[10]提出了一种基于双线性插值的鱼眼图像校正方法,以处理鱼眼投影导致的局部畸变;文献[11]提出一种基于球面透视投影旋转矩阵的鱼眼图像匹配算法来校正鱼眼图像,获得了比较满意的效果;文献[12]提出了非线性畸变分布椭圆鱼眼镜头成像建模和校正。这些算法无疑对了解球幕投影中的鱼眼透镜投射函数校正是有益的,但遗憾的是目前尚未有任何算法专门用于球幕投影中鱼眼透镜畸变校正。

国内外研发球幕投影产品的企业较多,但是出于对各自商业机密的保护而不愿公开发表详细的实现过程或方法,因此球幕投影算法的研究论文大多数过于概括而缺乏可操作性,有些则仅仅停留在建模阶段而难以判断其真实效果,其他则只是针对球幕投影中的鱼眼透镜设计等进行研究,缺乏系统性和可借鉴性。这给球幕投影系统的研发和改进造成了很大的障碍。

本文对基于内投球的球幕投影系统的整个算法进行了完整的分析和研究,提出了基于虚拟球面投影和虚拟鱼眼透镜映射函数的球幕投影映射算法,并提出了鱼眼透镜导致的边缘畸变的校正算法和光强校正算法,据此开发了实际的球幕投影硬件和软件系统。经对球幕投影系统的实验测试,表明本文所述投影算法能正确地把输入的二维图像投射至三维球幕,形成几乎无任何扭曲且与原始二维图像亮度分布高度一致的三维球幕映像。

## 1 内投式球幕三维投影算法

本文提出的内投式球幕投影系统的投影过程如图1所示,系统的实现主要包括以下4个步骤:

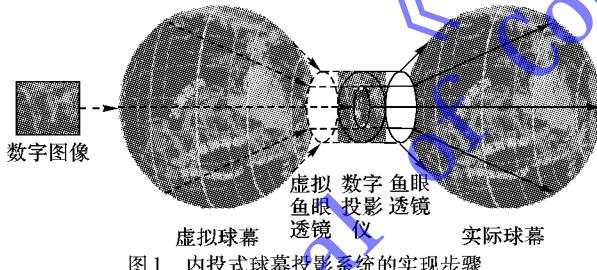


图1 内投式球幕投影系统的实现步骤

1)将二维数字图像转换为与实际球幕一样大小的虚拟球幕图像;

2)对虚拟球幕图像进行必要的旋转变换;

3)把虚拟球幕上的内容通过虚拟鱼眼透镜投影到数字投影仪上的一个圆形区域;

4)把数字投影仪圆形区域像素通过实际的鱼眼透镜(步骤3)的逆变换)投射至整个球幕上。

上述4个步骤中,前3个步骤由计算机处理,这3个步骤的共同点是都涉及虚拟设备,即系统中并不存在仅为方便理解计算机处理过程而虚设的装置,包括虚拟球幕和虚拟鱼眼透镜,第4步则由几何光学设备-鱼眼透镜自动完成。为确保经过第3)和第4)步后,实际球幕上的图像与虚拟球幕图像一致,这里的第3)步和第4)步互为逆运算,也即第3)步完成虚拟幕经过虚拟鱼眼透镜到数字投影仪的投影过程。为方便起见,所有的虚拟过程(即计算机处理的过程)都用虚线表示,而几何光学过程用直线表示。

### 1.1 二维数字图像到虚拟球幕的转换

假设描述球面景象的数字图像的宽度和高度分别为 $W$ 和 $H$ ,那么不同位置的像素映射到虚拟球幕时的经度角和纬度角可以按式(1)计算:

$$\begin{cases} \text{经度角} = 360(w - W/2)/W \\ \text{纬度角} = 180(h - H/2)/H \end{cases} \quad (1)$$

其中 $w, h$ 分别是像素在图像中的横向和纵向坐标(即横向和纵向像素位置)。由于 $0 \leq w \leq W$ ,经度角的取值范围介于 $[-180^\circ, 180^\circ]$ ,其中 $w$ 为负值对应于地球的西半球,0值对应于本初子午线,正值对应东半球。类似地,纬度角的取值范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$ ,负值对应于北半球,0对应于赤道,正值对应于南半球。

假设上述经度角和纬度角对应的虚拟球幕的坐标为 $(x, y, z)$ ,则 $x, y$ 和 $z$ 的值可按式(2)计算:

$$\begin{cases} x = R \sin(\text{纬度角}) \cos(\text{经度角}) \\ y = R \sin(\text{纬度角}) \sin(\text{经度角}) \\ z = R \cos(\text{纬度角}) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $R$ 是虚拟球幕的半径,跟实际的球幕半径相等。

### 1.2 虚拟球幕上球面的旋转变换

假设虚拟球幕上球面绕自转轴的转角(自转角)、球面自转轴和固定垂直轴之间的夹角(章动角)以及球面绕固定垂直轴的转角(进动角)分别为 $\alpha, \beta$ 和 $\gamma$ ,并假设在原始坐标系中球面垂直轴的连线在 $z$ 轴上,则球面上任意一点 $(x, y, z)$ 在旋转后的位置 $(x', y', z')$ 可用式(3)获得:

$$\begin{cases} x'^2 + y'^2 + z'^2 = R^2 \\ \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

### 1.3 从虚拟球幕到数字投影仪的映射

如图2所示,设虚拟球幕的原点在 $O'$ ,数字投影仪所在平面的原点为 $O''$ ,虚拟球幕的半径为 $R$ ,数字投影仪放置在虚拟球幕下方离开球心 $H$ 的地方,设虚拟球幕上任意点 $P$ 的坐标为 $(x', y', z')$ ,投影到数字投影仪后的坐标为 $P'$ 坐标 $(x'', y'')$ ,其距离投影仪中心 $O''$ 的距离为 $r = \sqrt{x''^2 + y''^2}$ ,并假设鱼眼透镜投影函数为 $r = D(\theta)$ (详见1.4节),可推得投影方程为:

$$\begin{cases} \theta = \frac{1}{2} \arcsin \left( 2 \sqrt{\frac{R^2 - z'^2}{(R + H)^2}} \right) \\ r = \sqrt{x''^2 + y''^2} = D(\theta) \\ x'' = x' r / \sqrt{x'^2 + y'^2} \\ y'' = y' r / \sqrt{x'^2 + y'^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $R$ 是虚拟球幕半径,其值等于球幕半径; $H$ 是虚拟球幕球心到虚拟鱼眼透镜出射口的距离, $H$ 的值应略小于 $R$ ; $\theta$ 是 $P$ 点的投影角度,即 $P$ 点对于数字投影仪投影平面坐标的原点 $O''$ 的张角。为了最大限度地使用数字投影仪的有效投影区域,应选择使用视角接近 $180^\circ$ 的鱼眼透镜( $\theta$ 接近 $90^\circ$ )。

由于从数字投影仪到球幕的投影是光学系统自动完成的,且跟上述虚拟球幕到数字投影仪的投影互逆,所以根据式(4)把虚拟球幕的像素投射至数字投影仪,原则上从数字

投影仪通过实际鱼眼透镜投射到球幕的映像将跟虚拟球面景象完全一致。

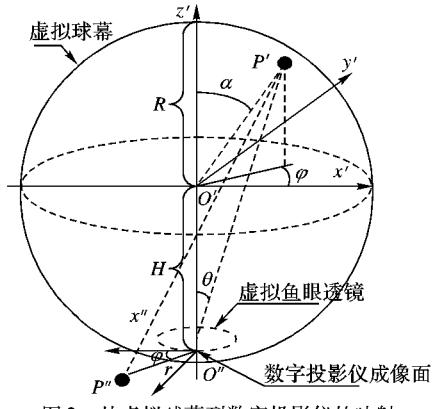


图2 从虚拟球幕到数字投影仪的映射

#### 1.4 鱼眼透镜引起的球幕畸变校正

与普通透镜不同,鱼眼透镜对通过光轴的入射光会有显著的折射。其折射函数主要有等立体角投影、正射投影、等距投影、极射赤面投影等。等立体角投影函数如式(5),它能对球面均匀投射,使每个像素都能映射到一个相同的立体角或单位球体的相同面积内:

$$r = 2f \sin(\theta/2) \quad (5)$$

其中: $r$ 为投影后物体成像高度, $\theta$ 为物体的视角或投射角, $f$ 为透镜的焦距。

等立体角投影以外,其他比较常见的投影函数包括正交投影:

$$r = f \sin \theta \quad (6)$$

等距投影:

$$r = f\theta \quad (7)$$

体视投影:

$$r = 2f \tan(\theta/2) \quad (8)$$

实际透镜的投影方式并不完全符合上述的任何函数,但仍然是投射角 $\theta$ 的函数,为方便起见,假设普通鱼眼透镜的投影函数满足式(9):

$$r = D(\theta) \quad (9)$$

鱼眼透镜的投射函数(式(9))是未知的,但可以假设介于正交投影、等立体角投影、体视投影和等距投影之间。为便于分析,图3画出了4种典型的鱼眼透镜投影函数的分布曲线。

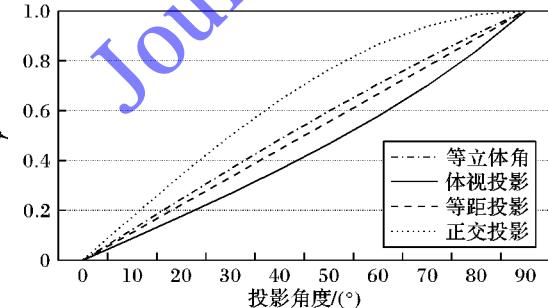


图3 4种典型的鱼眼透镜投影函数分布曲线

从图3可以看出,正交投影和体视投影函数之间差距最大,而等立体角投影和等距投影居中,其中尤以等立体角投影函数跟其他所有投影函数之间的总体差距最小。因此本文设置未知的鱼眼投影函数为等立体角投影函数乘上一个依赖于

$\theta$ 的校正函数 $g(\theta)$ ,也即

$$D(\theta) = g(\theta) \sin(\theta/2) \quad (10)$$

用于表示未知鱼眼透镜的投影函数。这里的 $g(\theta)$ 是一个在 $(0^\circ, 90^\circ)$ 区间接近于常数的函数,如对于等立体角投影, $g(\theta) = 2f$ ( $f$ 是鱼眼透镜焦距),是一个常量。对于等距投影, $g(\theta)$ 的值非常接近于常数,正交投影和体视投影时 $g(\theta)$ 离开均匀分布相对远些。实际校正过程中,使用一个 $\theta$ 的六阶函数来近似表示 $g(\theta)$ :

$$g(\theta) \cong 2f(1 + c_1\theta + c_2\theta^2 + c_3\theta^3 + c_4\theta^4 + c_5\theta^5 + c_6\theta^6) \quad (11)$$

其中 $f$ 是鱼眼透镜的焦距。如图4所示,由于 $H \cong R$ ,则 $\theta$ 和球面上纬度角 $\alpha$ 之间可建立方便的关系:

$$\theta \approx \alpha/2 \quad (12)$$

$r$ 可以使用式(13)的六阶函数近似表示为:

$$r = 2f \sin \frac{\theta}{2} (1 + c_1\theta + c_2\theta^2 + c_3\theta^3 + c_4\theta^4 + c_5\theta^5 + c_6\theta^6) \quad (13)$$

根据式(13),本文借助于球幕上 $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 对应的数字投影仪上 $r$ 的位置 $r_{30}, r_{60}, r_{90}, r_{120}, r_{150}, r_{180}$ 的值来进行校正(如图4所示)。

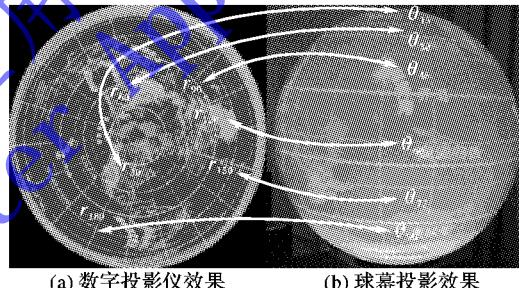


图4  $r_{30}, r_{60}, r_{90}, r_{120}, r_{150}, r_{180}$  及其对应的球幕上的位置

可以通过解六元一次方程组来求得 $c_1, c_2, \dots, c_6$ 的值。方法如下:

1) 先把 $c_1, c_2, \dots, c_6$ 全部设置为0。也即初始鱼眼投影函数为等立体角投影函数。根据式(13)求得 $r_{30}, r_{60}, r_{90}, r_{120}, r_{150}, r_{180}$ 的值。观察其在实际球幕上投影后相应位置 $\theta_{15}, \theta_{30}, \dots, \theta_{90}$ 偏离理想位置的情况。

2) 保持数字投影仪上 $r_{30}, r_{60}, r_{90}, r_{120}, r_{150}, r_{180}$ 中的其他 $r$ 值不变,改变图4(a)中 $r_{30}$ (即最靠近中心的同心圆,对应于球幕上 $\theta = 15^\circ$ )的值,使得其投影至球幕后接近于球幕上它的理想位置,通过式(14)的六元一次方程组求解 $c_1, c_2, \dots, c_6$ :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^6 c_i \theta_{15}^i = r_{30}/(2f \sin(\theta_{15}/2)) - 1 \\ \sum_{i=1}^6 c_i \theta_{30}^i = r_{60}/(2f \sin(\theta_{30}/2)) - 1 \\ \sum_{i=1}^6 c_i \theta_{45}^i = r_{90}/(2f \sin(\theta_{45}/2)) - 1 \\ \sum_{i=1}^6 c_i \theta_{60}^i = r_{120}/(2f \sin(\theta_{60}/2)) - 1 \\ \sum_{i=1}^6 c_i \theta_{75}^i = r_{150}/(2f \sin(\theta_{75}/2)) - 1 \\ \sum_{i=1}^6 c_i \theta_{90}^i = r_{180}/(2f \sin(\theta_{90}/2)) - 1 \end{cases} \quad (14)$$

这里的 $\theta_{15}, \theta_{30}, \dots, \theta_{90}$ 分别是用弧度表示的 $15^\circ, 30^\circ, \dots, 90^\circ$ 的值。然后根据式(14)更新数字投影仪的像素分布,球幕上的像素分布也会随之改变。

3) 按照第2)步的方式依次改变数字投影仪上 $r_{30}, r_{60}, r_{90}, r_{120}, r_{150}, r_{180}$ ,更新 $c_1, c_2, \dots, c_6$ 的值。

### 1.5 球幕投影亮度校准算法

根据几何光学原理,当光束从鱼眼镜头射向球面时,球面上任意点的亮度跟球面法线与光束入射方向之间的夹角的余弦成正比,同时也与球面点跟鱼眼透镜中心的距离平方成反比。如图5所示,设球面上一点到鱼眼镜头的连线与鱼眼的光轴夹角为 $\theta$ ,并设从鱼眼镜头到球面上投射点的距离为 $d$ ,则得到其球面上的光强分布为:

$$I_\theta = (C \cos \theta)/d^2 \quad (15)$$

其中: $C$ 是一个跟数字投影仪输出光强有关的常数, $d = 2R \cos \theta$ 。则式(15)可以简化为式(16):

$$I_\theta = C/(4R^2 \cos \theta) \quad (16)$$

其中光轴方向的光强为 $I_0 = C/(4R^2)$ ,则式(16)可简化为式(17):

$$I_\theta = I_0/\cos \theta \quad (17)$$

式(17)表明,球幕投影后球面上任意一点的亮度与其投射角的余弦成反比关系,即越靠近球底部的地方越亮。图6是未经球幕亮度校正的球幕映像,图6(a)和图6(b)是国内比较典型的两款地理教育用球幕投影系统的实体照片,可以发现它们的共同缺点,即亮度不均匀,接近球幕底部区域( $\theta$ 趋于0)的亮度显著高于其他部分,跟式(17)给出的结论相符。

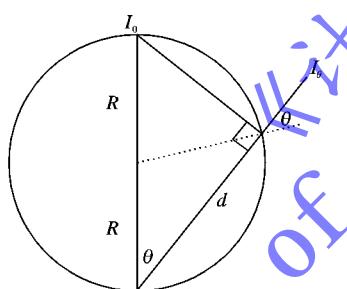
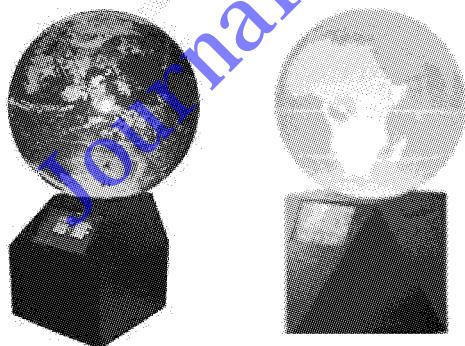


图5 鱼眼镜头投射至球面导致的球面光强分布变化



(a) 地理教育球幕投影系统1 (b) 地理教学球幕投影系统2

图6 未经过球面亮度校正的球幕系统

由于图6的球幕亮度不均匀,底部区域的亮度显著高于其他区域,需要对数字投影仪上的像素亮度做必要的校正以确保输出的球幕映像的亮度分布与二维图像一致。本文给出的亮度补偿方法是像素的红绿蓝各通道的值乘以该像素相对于鱼眼透镜光轴的投射角之余弦。其调整公式如式(18):

$$\begin{cases} r' = r \cos \theta \\ g' = g \cos \theta \\ b' = b \cos \theta \end{cases} \quad (18)$$

其中:( $r, g, b$ )是处于投射角 $\theta$ 位置的像素的红绿蓝分量值,而( $r', g', b'$ )是校正以后的值。

## 2 实验结果分析

为验证本文算法在球幕投影的效果,实验中使用的硬件设备包括:带有双屏显卡的主机1台(CPU 3 GHz, 1 GB内存),普通数字投影仪1台(分辨率达到 $1024 \times 768$ ),固定于数字投影仪出射口的鱼眼镜头( $180^\circ$ 视角投影,焦距16 mm)以及直径为660 mm的内投球幕一个。

### 2.1 二维数字图像到球幕投影图像的转换

实验中使用图7所示的二维数字图像,一个 $1024 \times 512$ 像素的世界地图。使用式(2)和(3)对该二维图像进行变换并旋转一定角度后,获得的三维虚拟球面图像如图8所示。图9(a)是图8中的三维虚拟球面使用式(4)后投影到数字投影仪上的二维数字图像,而图9(b)则是图9(a)经过鱼眼透镜后再球幕上形成的球幕效果。从图9(b)可以看出,球幕上本应在球面正中的赤道位置明显上移,说明最初的鱼眼透镜函数并不准确,需要校正。此外,由于球幕底部投射角 $\theta$ 非常接近于 $90^\circ$ ,球幕底部即紧靠鱼眼透镜出射口的区域的表观亮度显著高于其他区域的亮度,这与式(17)给出的光强随 $\theta$ 的变化趋势一致。

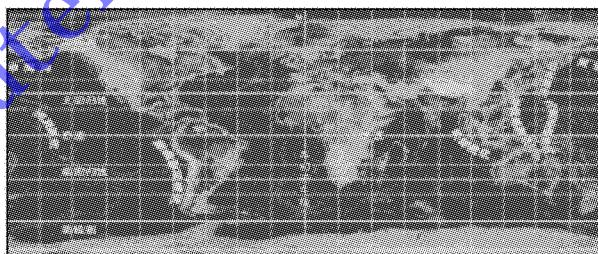


图7 用于投影的二维数字图像

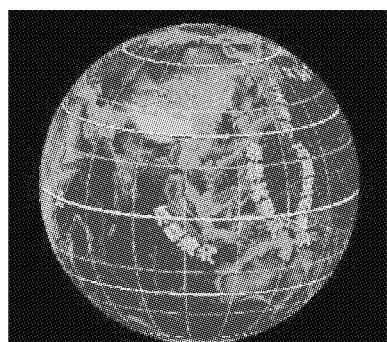


图8 三维虚拟球面图像

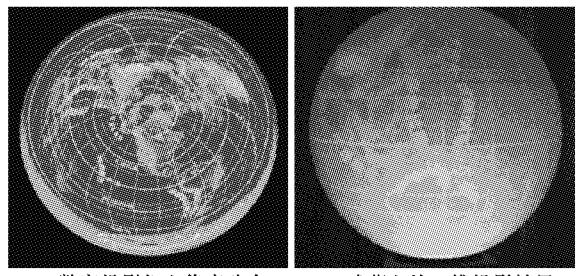


图9 鱼眼透镜投影函数校正前的数字投影仪和球幕投影效果  
(a) 数字投影仪上像素分布 (b) 球幕上的三维投影效果

## 2.2 鱼眼透镜畸变的校正

本文借助于手工调整，并通过 OpenCV 来求解式(14)，求得校正后的鱼眼投影函数为：

$$r = 2f \sin \frac{\theta}{2} (1 + 3.87632\theta - 13.80806\theta^2 + 23.56499\theta^3 - 21.42753\theta^4 + 9.82329\theta^5 - 1.78679\theta^6) \quad (19)$$

图 10 显示了鱼眼透镜畸变校正前后在数字投影仪上归一化后的函数分布，这里的  $r$  是投影角度为  $\theta$  处的像素在数字投影仪上离开投影仪中心的距离。

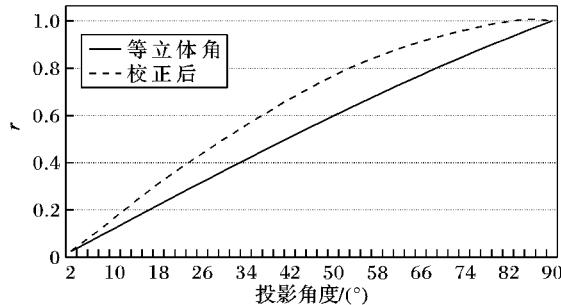


图 10 鱼眼透镜投影函数校正前后的变化

图 11 则显示了畸变校正前后的球幕上的像素分布。图 11(a)、(b)、(c) 是使用初始投影函数(即等立体角投影)获得的球幕投影效果。其中：图 11(a) 的球面极轴向上，可以看出赤道位置明显偏离球面的中央水平线；图 11(b) 是极轴变换为水平方向的情况，本应平行的南回归线和北回归线变成向上汇聚的趋势，球面畸变严重；图 11(c) 则是极轴沿前后方向放置时的情况，本应圆形的南极圈分界线变成了上窄下宽的畸形椭圆。图 11(d)、(e)、(f) 则是使用式(19)的后的校正效果。图 11(d) 球面极轴向上，可以看到赤道精确地定位在球幕的中心位置；图 11(e) 极轴变换为水平方向的情况，可以看出，南回归线和北回归线之间保持严格的平行；图 11(f) 是极轴沿前后方向放置时的情况，南极圈维持为理想的圆形。综上所述，使用这种基于等立体角投影的六阶校正函数的确能非常精确地校正本来是相当显著的鱼眼透镜畸变，获得非常理想的球幕投影效果。

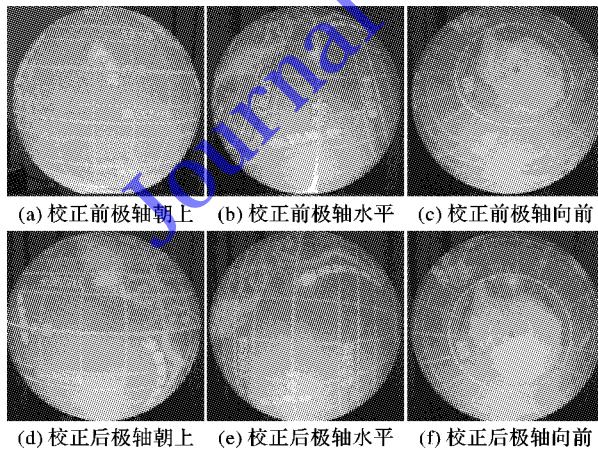


图 11 鱼眼透镜投影函数校正前后球幕投影效果的变化

## 2.3 球幕投影亮度均匀化校正效果

图 12 是式(18)做出的亮度校正前后的情况。图 12(a) 是未做亮度校正前数字投影仪像素分布；图 12(b) 是未做亮度校正前的球幕投影亮度分布效果，仅从表观上就可看出其

底部跟其他部分在亮度上存在十分显著的差别；图 12(c) 是依据式(18)对图 12(a)做出的数字投影仪上的光强校正。与图 12(a)相比，图 12(c)产生了一个显著的明暗分布，投影仪中心亮度跟图 12(a)并无差别，但是外围的亮度随着其离开中心的距离而衰减。图 12(d) 是图 12(c) 的投影仪像素分布导致的球幕投影效果，其分布均匀度比图 12(b) 的情况有了明显的改进。实验结果证明了式(17)有关球幕投影中亮度分布畸变的理论的准确性。

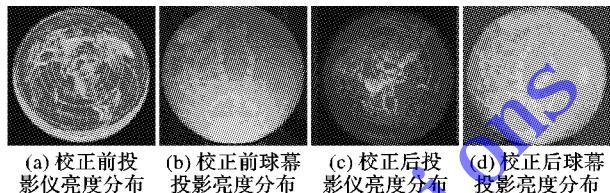


图 12 球幕投影光强校正前后的变化

## 3 结语

对内投式球幕投影过程中涉及的鱼眼透镜投影机制、球面旋转中涉及的矩阵变换和球幕投影中光强分布变异的方式进行了全面的分析和研究，提出了一种基于内投球的球幕三维投影系统框架，通过引入虚拟球面和虚拟鱼眼透镜来实现从普通的二维数字图像到球幕图像的映射。提出一种基于等立体角投影函数的六阶函数校正算法来消除不规则鱼眼透镜导致的球幕投影扭曲，实验表明这种方法能完全消除球幕投影的畸变；提出一种基于投射角余弦的光强分布补偿方法来消除球幕投影光强分布的变异，实验表明该方法能使得输出的球幕投影亮度分布与输入的二维图像高度一致。本文对基于内投球的球幕投影系统的投影和校正原理做出了全面、创新的研究，所提出的算法为球幕投影系统的进一步研究奠定了重要的理论和实践基础，为球幕投影系统的软件研发提供了重要的参考价值。

### 参考文献：

- [1] LIU Q. The future of the spherical screen movies in science museums [J]. Think Tank of Science and Technology, 2013, 19(7): 84–87. (刘茜. 科普场馆中球幕影片的发展前景[J]. 科技智囊, 2013, 19(7): 84–87.)
- [2] ZHANG L, WANG L. IMAX spherical screen cinema design [J]. Planning and Design, 2008, 7(9): 45–48. (张陆润, 王良道. 重庆市少年宫 IMAX 球幕影院设计[J]. 规划与设计, 2008, 7(9): 45–48.)
- [3] ZHANG Y, XU B. Geography instruction design based on digital globe system [J]. Chinese Geographical Instruction, 2013, 55(6): 59–62. (张越佼, 徐宝芳. 基于数字星球系统的地理教学设计[J]. 地理教学, 2013, 55(6): 59–62.)
- [4] LIU Q. Elementary investigation of the construction of the digital globe instructional system [J]. Chinese Geography Education, 2011, 32(10): 10–11. (刘强. 数字星球教学系统构建初探[J]. 地理教育, 2011, 32(10): 10–11.)
- [5] LU Y. Virtual reality technology and its application in digital library [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (陆颖隽. 虚拟现实技术在数字图书馆的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.)

(下转第 819 页)

是相同的。而对图像再次重采样( $\alpha = 0.8$ ),会使原来相同的频率产生不一致,此时就可以定位出篡改区域,如图8所示。

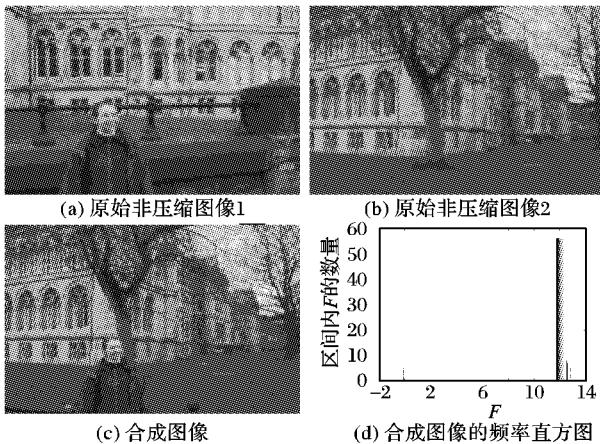


图7 实验4的篡改检测结果

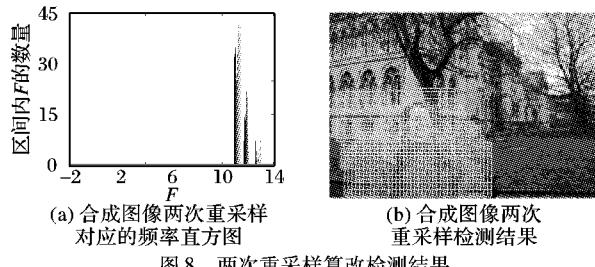


图8 两次重采样篡改检测结果

## 4 结语

本文针对重采样检测算法抗JPEG性能低的情况,提出了一种抗JPEG压缩的重采样检测算法。首先将JPEG压缩后的图像以缩放因子小于1进行二次重采样,利用重采样信号的二阶导数具有周期性,最终来进行重采样操作检测。实验结果表明,该算法对有损JPEG压缩具有较强的鲁棒性,并且可以估计出真实的缩放因子。

## 参考文献:

- [1] FARID H. Image forgery detection [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(2): 16 – 25.
  - [2] ZHOU L, HE D, YANG Y. Study of digital forensics based on image content [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007. (周琳娜, 何德全, 杨义先. 数字图像盲取证技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.)
  - [3] YAO H, WEI W, TANG Z. Survey of digital forensics technology for image resampling detection [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(30): 166 – 168. (姚恒, 魏为民, 唐振军. 重采样图像的盲检测技术[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(30): 166 – 168.)
  - [4] POPESCU A C, FARID H. Exposing digital forgeries by detecting traces of resampling [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(2): 758 – 767.
  - [5] KIRCHNER M. Fast and reliable resampling detection by spectral analysis of fixed linear predictor residue [C]// Proceedings of the 10th ACM Workshop on Multimedia and Security. New York: ACM Press, 2008: 11 – 20.
  - [6] GALLAGHER A C. Detection of linear and cubic interpolation in JPEG compressed images [C]// Proceedings of the 2nd Canadian Conference on Computer and Robot Vision. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005: 65 – 72.
  - [7] WEI W M, WANG S Z, TANG Z J. Estimation of rescaling factor and detection of image splicing [C]// Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Communication Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 676 – 679.
  - [8] MAHDIAN B, SAIC S. On periodic properties of interpolation and their application to image authentication [C]// Proceedings of the Third International Symposium on Information Assurance and Security. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 439 – 446.
  - [9] WEI W M, WANG S Z, ZHANG X P, et al. Estimation of image rotation angle using interpolation related spectral signatures with application to blind detection of image forgery [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(3): 507 – 517.
  - [10] ZUO J X, PAN S J, LIU B Y, et al. Tampering detection for composite images based on re-sampling and JPEG compression [C]// Proceedings of 2011 First Asian Conference on Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 169 – 173.
  - [11] KIRCHNER M, GLOE T. On resampling detection in re-compressed images [C]// Proceedings of the First IEEE International Workshop on Information Forensics and Security. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 21 – 25.
  - [12] WEI W. Passive image forensics based on Fourier spectrum analysis [D]. Shanghai: Shanghai University, 2010. (魏为民. 基于Fourier谱分析的数字图像被动取证研究[D]. 上海: 上海大学, 2010.)
- (上接第814页)
- [6] GUO Y. Dome-type visual display system research and realization for flight simulator [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(S1): 214 – 217. (郭云松. 飞行模拟器球幕视景显示系统的研究与实现[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(S1): 214 – 217.)
  - [7] ZHANG D, ZHOU D. Introduction to spherical screen projection technology [J]. Digital Technology and Application, 2011, 29(8): 200 – 202. (张汀, 周丹凤. 浅析球幕投影技术[J]. 数字技术与应用, 2011, 29(8): 200 – 202.)
  - [8] CAO S. The design and implementation of a spherical screen projection system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (曹少华. 一个球幕投影系统的设计和实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.)
  - [9] CHEN C, HU C-H. The design of the general focal-length-changeable fisheye lens in spherical screen projection [J]. Optical Precision Engineering, 2013, 21(2): 323 – 335. (陈琛, 胡春海. 球幕投影通用型变焦鱼眼镜头设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 323 – 335.)
  - [10] WU G, WU W, WANG C, et al. The correction of the fisheye images based on bilinear interpolation [J]. Computer Application and Software, 2012, 29(2): 122 – 124. (吴桂萍, 吴巍, 王成, 等. 基于双线性插值的鱼眼图像校正方法[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(2): 122 – 124.)
  - [11] ZHU H, XU X, ZHOU J. Fisheye image matching based on rotation matrix under spherical perspective projection [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 130 – 137. (祝海江, 徐晓波, 周靖林. 基于球面透视投影旋转矩阵的鱼眼图像匹配[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 130 – 137.)
  - [12] ZHENG L, XU G, LI L, et al. Image modeling and correction of nonlinear distortion distribution ellipse fish-eye lens [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 133 – 139. (郑利平, 徐刚强, 李琳, 等. 非线性畸变分布椭圆鱼眼镜头成像建模和校正[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 133 – 139.)