

文章编号: 1001- 2486(2010) 04- 0105- 05

基于双向映射的非网格型全向图展开插值方法*

陈立栋¹, 王 炜¹, 贺 琳², 陈 旺¹

(1. 国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民解放军 96616 部队, 北京 100085)

摘要:原始的全向图存在严重的同心圆环状变形, 通常需展开为更适合人眼观察的柱面全景图像。结合折反射全向成像特点, 提出一种基于双向映射的全向图展开为柱面全景图像的插值方法, 通过光路跟踪得到图像间的坐标映射关系, 将所要生成的柱面全景图中每一点正向映射到原始的全向图中, 确定插值邻域点; 将这些邻域点逆向投影到柱面全景图中, 针对邻域点在柱面全景图中呈非网格型分布的特点, 采用非均匀二维插值算法进行图像插值运算。该方法既准确地定位插值邻域点, 又避免了全向图的非线性畸变对邻域点权重计算的不利影响。实验证明该方法能有效提高插值精度和展开后图像的质量。

关键词:全向成像; 柱面全景展开; 双向映射; 非线性畸变; 非网格型插值

中图分类号: TP391; TN911. 73 文献标识码: A

Panoramic Unwrapping Interpolation Method of Omnidirectional Images Based on Bidirectional Mapping

CHEN Li-dong¹, WANG Wei¹, HE Lin², CHEN Wang¹

(1. College of Information System and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Unit 96616 of PLA, Beijing 100085, China)

Abstract: Original omnidirectional images usually need to be unwrapped to cylindrical panoramic images according to human visual habits because of concentric annular distortion. According to the characteristics of catadioptric omnidirectional imaging, an interpolation method for panoramic unwrapping based on bidirectional mapping was proposed. The coordinate mapping relationships were obtained by tracking optical path. Firstly, each pixel in the target cylindrical panoramic image was projected backward onto the original omnidirectional image, and the neighboring pixels for interpolation were located. Then, all the neighboring pixels were projected forward onto the cylindrical panoramic image, and the color value of the target pixel was interpolated by using inverse distance weighted method or 3D-plane interpolation method due to the scattered distribution of the neighboring pixels in cylindrical panoramic images. The proposed method avoids the adverse effect on computing the interpolation weight of neighboring pixels caused by the nonlinear distortion, and the neighboring pixels for interpolation are also accurately located. The experimental results indicate that the proposed method is effective for enhancing the precision of interpolation and the image quality of unwrapped panoramic images.

Key words: omnidirectional imaging; cylindrical panoramic unwrapping; bidirectional mapping; nonlinear distortion; scattered data interpolation

全景图像/视频凭借 360°全方位视角、能覆盖大范围场景的优势^[1], 在全景视频监控^[2]、机器人视觉导航^[3-4]、虚拟实景空间构建^[5]等领域得到了越来越广泛的研究和应用。折反射全向成像是全景图像获取的重要途径, 但由于原始采集的折反射全向图存在严重的同心圆环状变形, 通常需将其展开为适合于人眼观察的柱面全景图像。

传统的全向图展开基本思想是根据全向图和展开图之间的投影变换关系^[6], 将展开后的柱面全景图中每一点正向投影到原始的全向图中, 从而获取该像素点的颜色值。由于坐标映射关系算得的是浮点坐标值, 势必涉及图像插值运算, 常用的插值算法有最邻近插值、双线性插值^[7]、立方卷积插值等。文献[8]提出了基于 Bezier 曲面的全景图像插值算法, 改善了全景展开的图像分辨率, 但运算量较大。

* 收稿日期: 2009- 12- 25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60872150, 60705013); 国家 863 计划资助项目(2009AA01Z328)

作者简介: 陈立栋(1985—), 男, 博士生。

然而,传统插值算法并没有考虑全向成像的特点,展开时无论采用以上哪种插值算法,图像插值均是在严重畸变的全向图中进行的,即插值邻域点的空间位置及其与当前插值点的距离都是在全向图空间中衡量的,而全向图中非线性畸变后的像点距离显然影响了插值的精度。要改善展开后柱面全景图像的质量,就必须寻找能够适应全向图畸变成像特点的展开插值方法。

Jeng^[9-10]在无法准确获得全向成像正向投影公式的情况下,提出了一种基于逆向投影的、在展开后图像空间进行邻域插值的方法。其基本思想是先将全向图中的所有像素点逆向映射到展开图空间中,然后对展开图像中的“黑点”(即未填充像素),在较大邻域范围内进行八向加权插值。该方法避免了非线性畸变对图像插值的影响,但运算量很大,且相对于正向投影算法展开图质量不高。

1 折反射全向成像及柱面全景展开原理

折反射全向成像系统的基本原理是:利用曲面反射镜(如抛物面、双曲面、圆锥面等),将来自成像系统周围 360° 范围的入射光线经反射作用后,进入传统的光学成像系统(成像透镜+CCD/CMOS图像传感器),生成包含空间 360° 全方位场景信息的环状全向图。

1.1 全向成像的正向投影过程

全向成像的正向投影算法就是将三维空间中的任意一点映射到全向成像的像平面上一点,图1(a)以圆锥面折反射全向成像系统为例,说明全向成像的正向投影过程。

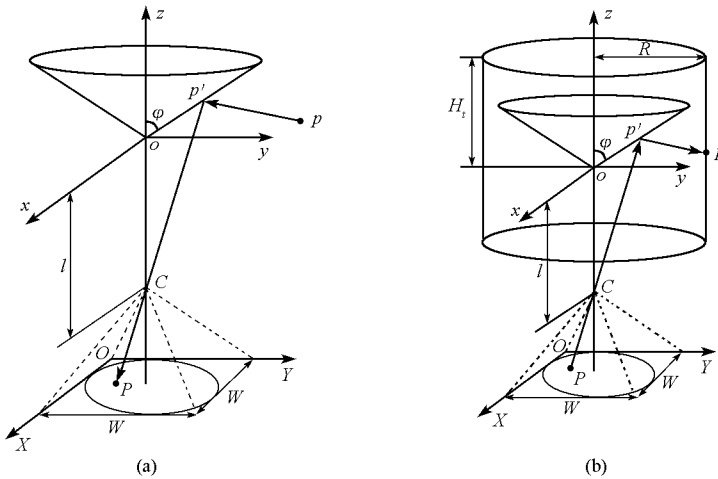


图1 (a)全向成像正投影;(b)柱面全景展开的逆向投影

Fig.1 (a) Backward projection of omnidirectional imaging; (b) Forward projection of panoramic unwrapping

三维空间任一点 $p(x, y, z)$ 发出的一条入射光线 pp' 经圆锥面上一点 p' 反射后,经小孔中心 C 与成像平面 XOY 交于点 $P(X, Y)$,点 P 即为空间点 p 在全向图中的投影点。根据光学反射原理,经空间几何推导,得出 (x, y, z) 和 (X, Y) 之间的对应关系如下:

$$\begin{cases} X = \frac{W}{2} + f \cdot \frac{2 \tan \Phi \cdot z - (1 - \tan^2 \Phi) \sqrt{x^2 + y^2}}{(1 - \tan^2 \Phi) \cdot z + (1 + \tan^2 \Phi) l + 2 \tan \Phi \sqrt{x^2 + y^2}} \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ Y = \frac{W}{2} - f \cdot \frac{2 \tan \Phi \cdot z - (1 - \tan^2 \Phi) \sqrt{x^2 + y^2}}{(1 - \tan^2 \Phi) \cdot z + (1 + \tan^2 \Phi) l + 2 \tan \Phi \sqrt{x^2 + y^2}} \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, f 为相机焦距,圆锥体张角为 2Φ ,全向图大小为 $W \times W$ 。

1.2 全向图到柱面全景图像的逆向投影算法

将全向图展开为柱面全景图的过程,即是以三维空间中某一特定的圆柱面为虚拟观察面,将全向图中的像点逐一逆向投影到圆柱投影面上,如图1(b)所示,圆柱面中心轴为 α ,即成像系统光轴,底面半径为 R 。用如下公式把圆柱面上投影点的三维坐标 (x, y, z) 转化为柱面全景图像的二维图像坐标:

$$\begin{cases} X' = R \cdot \theta \\ Y' = H_i - z \end{cases} \quad (2)$$

其中, θ 为点 (x, y) 在二维极坐标系中的极角值, H_t 为圆柱上底面的 z 值。经几何推导, 可得全向图上一点 $P(X, Y)$ 到柱面全景图像上一点 $p(X', Y')$ 的坐标映射关系为

$$\begin{cases} X' = R \cdot \theta' \\ Y' = H_t - \frac{(1 - \tan^2 \varphi) \cdot f R + [(1 + \tan^2 \varphi) \cdot l + 2 \tan \varphi \cdot R] \cdot r}{2 \tan \varphi \cdot f - (1 - \tan^2 \varphi) \cdot r} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $r = \sqrt{(X - \frac{W}{2})^2 + (Y - \frac{W}{2})^2}$, θ' 为点 $(X - \frac{W}{2}, Y - \frac{W}{2})$ 在二维极坐标系中的极角值, 易知 $\theta' = \theta$ 。式 (3) 即为全向图到柱面全景图的逆向投影公式。

2 双向映射的全向图展开插值算法

2.1 传统的全向图展开算法

将全向图展开为柱面全景图时, 如果直接使用全向图到柱面全景图的逆向投影算法, 即根据式 (3) 将全向图中的每一点 $P(X, Y)$ 映射到柱面全景图上一点 $p(X', Y')$, 生成的全景图像中会存在“黑洞”现象。因此通常采用“反算”思想, 即由全向成像的正向投影公式将柱面全景图像的每一点 $p(X', Y')$ 映射到全向图上一点 $P(X, Y)$, 将 P 的颜色值回赋给点 p , 遍历柱面全景图上的所有像素点, 从而生成一幅完整的柱面全景图像。

将式 (1) 中的点 $p(x, y, z)$ 限定在一个底面半径为 R 、中心轴为 oz 的圆柱面上, 并根据式 (2) 进行空间三维坐标与二维图像坐标的转换, 可得

$$\begin{cases} X = \frac{W}{2} + f \cdot \frac{2 \tan \varphi \cdot (H_t - Y') - (1 - \tan^2 \varphi) \cdot R}{(1 - \tan^2 \varphi) \cdot (H_t - Y') + (1 + \tan^2 \varphi) l + 2 \tan \varphi \cdot R} \cdot \cos(X'/R) \\ Y = \frac{W}{2} - f \cdot \frac{2 \tan \varphi \cdot (H_t - Y') - (1 - \tan^2 \varphi) \cdot R}{(1 - \tan^2 \varphi) \cdot (H_t - Y') + (1 + \tan^2 \varphi) l + 2 \tan \varphi \cdot R} \cdot \sin(X'/R) \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 即为柱面全景图到全向图的正向投影公式, 实际上即为式 (3) 的逆函数形式。

由式 (4) 求得的是浮点型坐标值, 这就需要进行图像插值运算。传统的方法有最邻近插值、双线性插值、立方卷积插值等。无论采用哪种插值算法, 关于邻域点影响力的权重衡量都取决于全向图中该邻域点与当前插值点的距离。但是全向图本身存在严重的同心圆环状变形, 在全向图中插值点与其邻域像素点之间的距离隐含了剧烈的非线性畸变, 将这种畸变后的距离引入到插值算法中, 显然影响了插值的精度和图像的质量。

以最常用的双线性插值为例, 假定根据式 (4) 算得当前插值点浮点坐标为 $(i + u, j + v)$, $0 < u < 1$ 且 $0 < v < 1$, 则当前插值点的颜色值由其最相邻的 4 个像素点 (i, j) 、 $(i, j + 1)$ 、 $(i + 1, j)$ 、 $(i + 1, j + 1)$ 的值进行插值算得

$$\begin{aligned} f(i + u, j + v) &= (1 - u)(1 - v) \cdot f(i, j) + (1 - u)v \cdot f(i, j + 1) \\ &\quad + u(1 - v) \cdot f(i + 1, j) + uv \cdot f(i + 1, j + 1) \end{aligned} \quad (5)$$

为便于直观地说明问题, 假定 $u = v = 0.5$, 若在畸变的全向图中进行插值, 易知这 4 个邻域点的权重都等于 $1/4$, 然而若将这 4 个邻域点逆向投影到更适合于人眼观察的柱面全景图中时, 如图 2 所示, 显

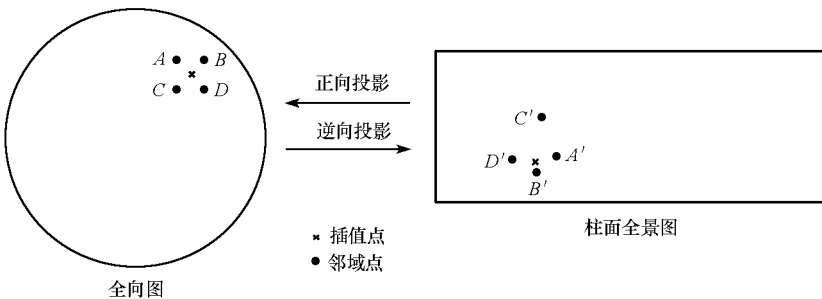


图 2 双线性插值应用于全向图展开时存在的问题

Fig. 2 Illustration of the problem of bilinear interpolation applied in panoramic unwrapping

然 B' 点的权重值应明显大于 A' 、 C' 、 D' 三个点的权重值。

2.2 双向映射的非网格型插值算法

为克服全向图展开插值算法中非线性成像畸变对插值效果的不利影响,本文提出一种基于双向映射的全向图展开插值方法,算法实现的基本思想和步骤是:

(1) 对于柱面全景图中每一点 $p(X', Y')$, 根据柱面全景图到全向图的正向投影公式, 即式(4), 算得点 p 映射在全向图中对应点 P 的浮点坐标值, 确定与点 P 最邻近的 4 个邻域点 A 、 B 、 C 、 D ;

(2) 利用式(3), 即全向图到柱面全景图的逆向投影公式, 将 A 、 B 、 C 、 D 四个点反向映射回柱面全景图中, 得到 4 个相应的非整数坐标点 A' 、 B' 、 C' 、 D' , 将全向图中 A 、 B 、 C 、 D 四个点的颜色值分别赋给柱面全景图中的点 A' 、 B' 、 C' 、 D' ;

(3) 针对非网格型分布的 A' 、 B' 、 C' 、 D' 四个点, 在柱面全景图中根据这四个点与当前插值点 P 之间的相对距离来衡量各点与插值点 P 的接近程度, 并采用适合于非网格型邻域点分布的插值算法计算点 P 的颜色值;

(4) 重复步骤(1)~(3), 直至遍历完柱面全景图中的所有像素点。

这样, 通过先将目标像素点正向映射到原始的全向图中, 准确地定位插值邻域点, 再将邻域点全部逆向映射回所要生成的柱面全景图中, 在目标图像空间中衡量各个邻域点的插值权重, 从而消除了全向成像的环状畸变对全向图展开插值运算的不利影响, 使得展开后的柱面全景图像更加真实自然。

由于在全向图中规则分布的邻域点经逆向映射后, 在柱面全景图中呈非网格型散乱分布, 传统的双线性插值、立方卷积插值等算法已不再适用。同时考虑到算法的运算量, 本文实验中插值邻域仅选取最邻近的 4 个采样像素点, 并相应地采用两种较为简单成熟的非网格型插值算法, 以验证双向映射的插值思想是科学有效的:

(1) 反距离加权平均法: 各邻域点的插值权重由该邻域点到当前插值点的欧式距离决定, 距离越近, 权重越大。定义当前插值点的颜色值 $f(x, y)$:

$$\begin{cases} r_k = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \\ w_k = (1/r_k^2) / \sum (1/r_k^2), \quad k = 1, 2, 3, 4 \\ f(x, y) = w_1 \cdot f(x_1, y_1) + w_2 \cdot f(x_2, y_2) + w_3 \cdot f(x_3, y_3) + w_4 \cdot f(x_4, y_4) \end{cases} \quad (6)$$

(2) 最邻近三点平面法: 选用空间三维平面作为二元线性插值的曲面形式, 即定义插值函数:

$$f(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + c \quad (7)$$

其中, a 、 b 、 c 为待定参数, x 、 y 为当前点的坐标值。由于 4 个点确定一个空间平面是一个过约束问题, 因此从 4 个邻域点中舍弃到插值点欧式距离最远的那个点, 选择距离最近的 3 个邻域点来确定式(7)中平面方程的参数, 然后将当前插值点的坐标值 (x, y) 代入式(7)算得其颜色值。

3 实验设计及结果分析

为验证算法的有效性, 设计全向图展开实验对基于双向映射的插值算法与传统的双线性插值法进行比较。

在 3ds Max 9 仿真环境中, 设计了一个基于圆锥面的折反射全向成像系统, 如图 3 所示, 其中圆锥顶角为 120° , 锥高 5cm, 相机焦距为 20.785mm, 小孔中心距圆锥顶点 5cm。经几何计算, 可知该折反射全向成像系统的最大仰视角为 10.89° 。

在成像系统外设置一个以相机光轴为中心轴的圆柱面, 在圆柱面的内壁上用一幅原始清晰的柱面全景图做贴图, 对相机视图进行渲染后即可得到一幅相应的全向图。实验选用了三幅不同类型的柱面全景图像进行贴图, 如图 4 所示, 分别来自多幅图像拼接、折反射全向图展开和 Internet 网络下载, 右图为各自相应的全向图。

实验采用不同的插值算法将全向图展开为柱面全景图,

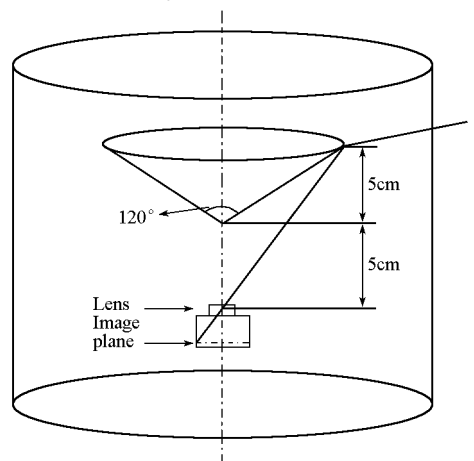


图 3 基于圆锥面的折反射成像系统设计
Fig. 3 Design of a cone-based catadioptric omnidirectional imaging

并与原始贴图的全景图像进行差异性比较。为比较算法的优劣, 本文使用插值生成的全景图与原始全景图之间的均方误差(MSE)作为客观评价指标, 对不同的插值算法进行失真度评估, 实验结果见表 1。

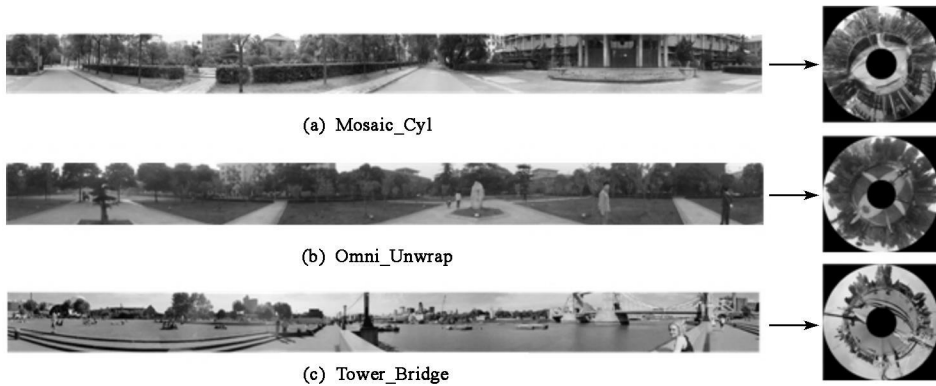


图 4 原始的柱面全景图和相应的全向图: (a) 多幅图拼接 (b) 全向图展开 (c) Internet 下载

Fig. 4 Original cylindrical panoramas and the corresponding omnidirectional images:

(a) Mosaic; (b) Unwrap from omni-image; (c) Download from Internet

表 1 各种全向图展开插值算法的 MSE 比较

Tab. 1 MSE comparison of different interpolation methods in panoramic unwrapping

实验图像	插值算法		
	传统的双线性插值	双向映射的非网格型插值	
		反距离法	三点平面法
Mosaic_Cyl	195.952	187.887	184.599
Omni_Unwrap	16.7329	16.0870	15.5628
Tower_Bridge	74.9965	72.8820	70.3236

从表 1 可见, 基于双向映射的全向图展开, 无论是采用非网格型反距离法还是三点平面法插值, 相比于传统的双线性插值, MSE 均有明显降低, 反距离法的改进约为 3% ~ 5%, 而三点平面法约改进 4% ~ 8%。因此, 本文提出的方法能有效地提高全向图展开的图像质量。

4 总结

提出了一种基于双向映射的非网格型全向图展开插值算法, 通过正向投影和逆向投影公式在全向图和柱面全景图之间进行两次映射, 既准确地定位插值邻域点, 又避免了非线性畸变对图像插值时邻域点权重选取的不利影响。实验所得图像与原图之间的均方误差统计表明, 本文算法生成的柱面全景图更接近原图, 具有更高的插值精度。

参考文献:

- [1] Nayar S K. Catadioptric Omnidirectional Camera [C]// Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR' 97), 1997: 482- 488.
- [2] Boulton T E, Gao X, Michaels R, et al. Omnidirectional Visual Surveillance [J]. IEEE Transactions on Image and Vision Computing, 2004, 22 (7): 515- 534.
- [3] 许俊勇, 王景川, 陈卫东. 基于全景视觉的机器人同步定位与地图创建研究[J]. 机器人, 2008, 30(4): 289- 297.
- [4] Su L C, Zhu F. Design of a Novel Stereo Vision Navigation System for Mobile Robots [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2005: 611- 614.
- [5] Ikeuchi K, Sakauchi M, Kawasaki H, et al. Constructing Virtual Cities by Using Panoramic Images [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 58(3): 237- 247.
- [6] Peri V N, Nayar S K. Generation of Perspective and Panoramic Video from Omnidirectional Video [C]// Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop, New Orleans, US, 1997.
- [7] 冯永明, 杨东勇, 卢瑾. 全方位图像展开的双线性内插值法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(15): 54- 56.
- [8] 肖潇, 杨国光, 白剑. 基于 Bezier 曲面的快速插值算法改善全景图像的分辨率[J]. 光电工程, 2008, 35(1): 105- 109.
- [9] Jeng S W, Cai W H. Improving Quality of Unwarped Omni-images with Irregularly-distributed Unfilled Pixels by a New Edge-preserving Interpolation Technique [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28: 1926- 1936.
- [10] Jeng S W, Cai W H. Using Pano-mapping Tables for Unwrapping of Omni-images Into Panoramic and Perspective-view Images [J]. IET Image Processing, 2007, 1(2): 149- 155.
- [11] 张茂军. 虚拟现实系统[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 114- 156.