

文章编号: 0253-2239(2010)12-3487-08

双反射面互补结构的折反射全向成像系统设计

陈立栋 王 炜 张茂军 陈 旺

(国防科学技术大学信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 为解决折反射全向成像空间分辨率低、分辨率分布不均匀的问题,提出一种双反射面互补结构的折反射全向成像系统。通过使空间点在全向图的内外环互补二次成像,有效改善全向成像的分辨率分布不均匀问题,并通过限制成像系统的垂直视域以得到较高的空间采样分辨率。详细阐述了两个反射镜面的面型参数和系统尺寸的计算方法,并通过光线追踪推导出全向图与柱面全景图之间的坐标映射关系。实验结果表明,该全向成像系统的分辨率分布明显更为均匀,全向图内外环之间存在很强的互补性。此外,互补二次成像的亚像素采样偏移为下一步的超分辨率柱面全景空间重建奠定了重要基础。

关键词 光学设计;折反射全向成像;分辨率分布;双反射面;互补二次成像;柱面全景空间

中图分类号 TN256;TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3487

Design Analysis of a Complementary Double-Mirror Catadioptric Omnidirectional Imaging System

Chen Lidong Wang Wei Zhang Maojun Chen Wang

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract To solve the problems of low and non-uniform resolution in catadioptric omnidirectional imaging, a novel omnidirectional sensor of complementary imaging structure is designed, by using two reflecting mirrors. Each spatial object has two imaging positions, respectively in the inner and the outer ring of captured omnidirectional images. The uniformity of resolution distribution is obviously improved due to complementary double imaging, and higher spatial resolution is achieved by limiting the vertical field of vision in a narrow range for some specific applications, such as military remote surveillance. Computational methods of the shape parameters and sizes of two mirrors are described in detail, and the mapping relations between omnidirectional image plane and cylindrical panoramic space are accurately derived based on ray tracing. Experimental results show that remarkable complementarities exist between the inner and outer ring of omnidirectional images, and detailed analysis of resolution distribution is presented. Moreover, sub-pixel sampling displacement between two image positions provides essential preconditions and foundations for further research on super-resolution reconstruction of cylindrical panoramic space.

Key words optical design; catadioptric omnidirectional imaging; distribution of resolution; two reflecting mirrors; complementary double imaging; cylindrical panoramic space

1 引 言

全景成像技术凭借 360°全方位视野、能覆盖大范围宽广场景的优势^[1,2],近年来已在视频监控^[3]、

机器人导航^[4]、虚拟空间构建^[5]等领域得到越来越广泛的研究和应用,主要包括拼接成像^[6,7]、鱼眼成像^[8]和折反射成像^[9,10]等几种方式。其中,将曲面

收稿日期: 2009-11-23; 收到修改稿日期: 2010-06-02

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z328)和国家自然科学基金(60872150,60773023,60705013)资助课题。

作者简介: 陈立栋(1985—),男,博士研究生,主要从事全向视觉、数字图像处理等方面的研究。

E-mail: nudtdong11@163.com

导师简介: 张茂军(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事虚拟现实技术、信息系统工程等方面的研究。

E-mail: maojun.z@gmail.com

反射镜和常规成像透镜相结合的折反射成像技术,由于其一次性无缝全景成像、系统设计灵活的特点,是一种非常重要的、也是近年来研究较集中的方式。但随着研究的不断深入,折反射全向成像固有的空间分辨率低、分辨率分布不均匀的缺陷已成为严重限制其广泛应用的瓶颈。

针对不同的目标需求和应用领域,各种特定结构的折反射全向成像系统陆续出现。为了使成像符合小孔透视模型,由环状全向图能够生成无畸变的柱面全景图像或局部透视图,要求成像系统满足单视点约束。Baker^[11]对折反射全向成像的单视点约束问题进行了详细的理论分析,对反射镜面型方程给出数学推导,得出非退化的单视点单镜面折反射全向成像系统仅有“双曲面+透视相机”和“抛物面+远心相机”两种设计方案。曾吉勇等^[12,13]对这两种方案分别进行了几何分析,计算反射镜面型和系统结构的参数,研制设计出单视点折反射全向成像实物系统,并给出实验结果图。此外,在一些特定的应用场合,如机器人导航与定位、全景地面测量和全向视频运动检测等,要求将全向图投影到某一特定三维空间时图像缩放比率恒定,即在特定方向上满足成像无畸变,Gaspar^[14], Hicks^[15]及曾吉勇等^[16,17]详细研究了折反射全向成像径向的分辨率分布特性,分别设计实现了在径向上水平、垂直分辨率和角分辨率都均匀的全向成像系统。Nagahara等^[18]为了使成像系统同时满足单视点约束和径向分辨率均匀,不再局限于单镜面的系统结构设计思路,提出了一种基于单相机双反射面的折反射全向成像系统。

然而,以上研究只是在全向成像径向上讨论和改善了分辨率分布特性,并未解决全向图内外环切向分辨率相差悬殊、内环欠采样而外环相对浪费的问题,而后者才是全向成像分辨率分布不均匀的主要原因。Stefan^[19]提出了基于非均匀 CCD 采样点的 SVAVISCA 方式来解决分辨率难题,设计的 CCD 感光阵列越靠近成像中心的感光区域像素点密度越高。此方案本身简单直观,但 CCD 加工难度高,应用面狭窄,难以普及。

另一方面,部分学者从全向图或全向视频的后处理角度,尝试对全向成像的分辨率问题进行改善和研究。彭启民等^[20]提出一种基于小波变换的全向图像分辨率增强方法,对全向图像丢失的高频成分进行补偿。Nagahara等^[21,22]利用多帧全向图或全向视频序列间的时空互补信息,为全向视频给出针对性的超分

辨率建模方法。然而,由于全向图原始的低分辨率和内环的严重欠采样,单纯依靠后期的图像处理对全向成像的分辨率进行增强,改善效果必然是非常有限的。因此,不改变传统的折反射成像系统结构就无法从根本上解决全向成像的分辨率问题。

本文提出一种双反射面互补结构的折反射全向成像系统设计思想,基于上、下两个镜面的反射作用,使得同一空间点分别在全向图的内、外环互补二次成像,明显地改善了全向成像的分辨率分布不均匀问题,并通过限制成像系统的垂直视域以得到较高的空间采样分辨率。

2 原 理

2.1 传统单反射面成像的分辨率问题

传统的单镜面折反射全向成像系统基本原理是:利用曲面反射镜(如抛物面,双曲面,圆锥面和球面等),将来自成像系统周围 360° 范围的人射光线经反射作用后,进入常规的光学成像系统(成像透镜+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。

由于全向图的内环像素数明显少于外环,在同样的径向跨度中像素分辨率由内向外逐渐增大,即全向图内外环的切向分辨率相差悬殊,导致全向成像的分辨率分布严重不均匀。若通过在全向图径向上的拉伸来弥补内环切向分辨率的不足,从而达到成像的面积分辨率分布均匀^[23],即要求空间某一深度同样大小的目标不论其在全向图内环还是外环成像,对应的成像面积相等,如图 1 所示,这样将导致空间目标在全向图不同极半径(成像点到全向图中心的距离)处成像存在很大的纵横比变化,产生严重的成像畸变,即使达到空间目标成像的面积分辨率均匀,也无法构建出清晰的柱面全景空间。

因此,如果不改变现有的折反射成像系统结构,

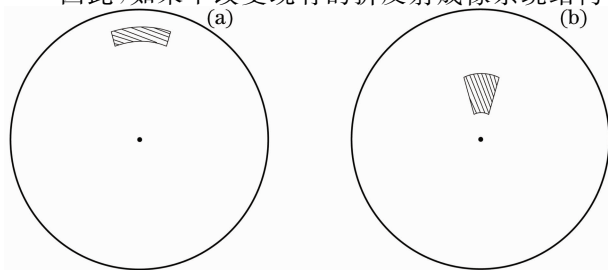


图 1 面积分辨率均匀的全向成像畸变示意图。

(a) 外环成像; (b) 内环成像

Fig. 1 Omnidirectional imaging distortion of invariant area resolution. (a) image at the outer; (b) image at the inner

无论如何设计单个反射镜面的面型方程,且不管感光器件物理像素分辨率有多高,当全向图投影展开生成柱面全景图像时,外环像素点采样密度相对偏高,而柱面全景图像下部分对应的内环却严重欠采样,外环浪费而内环相对不够用的成像分辨率分布问题仍然存在。

2.2 双反射面互补结构的折反射全向成像

本文提出一种双反射面互补结构的折反射全向成像系统设计思想,通过上、下两个镜面的反射作用,使得同一空间点分别经两个不同的光路,在全向图的内外环互补二次成像,以改善全向成像在切线方向上分辨率分布严重不均匀的问题。

如图 2 所示,成像系统的上、下两个反射镜面与相机同轴放置,下镜面中心区域镂空,相机镜头向上置于其中,上镜面底部横向截断为一个光滑的平面反射镜。视域范围内空间任一点 p 发出的入射光线 I_1 经上镜面反射后通过相机小孔中心在感光区域的外环成像,同时点 p 发出的另一条入射光线 I_2 经下镜面反射后,再经上镜面底部的平面镜二次反射后进入小孔,在感光区域的内环成像。

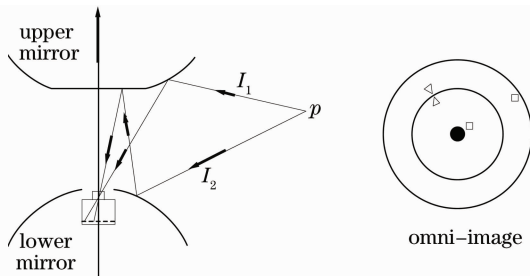


图 2 双反射面互补结构的折反射全向成像模型

Fig. 2 Complementary-structure catadioptric omnidirectional imaging using two mirrors

经分析可知,在外环中越靠内圈成像的目标在内环中成像位置则越靠外圈,而在外环中越靠外圈成像的目标在内环中成像位置则越靠内圈,从而形成一种内外环互补的全向成像方式。由于同一空间点的内外环两次成像来自不同光路,存在采样的亚像素偏移,从而为全向图的内外环展开到同一个空间投影面、进行超分辨率全景空间重建提供了前提条件。

3 系统设计与成像光学分析

3.1 设计目标与约束分析

针对图 2 所示的双反射面互补结构的折反射全向成像系统,为确定上、下镜面的面型方程和系统尺寸参数,结合具体的军事应用背景及后续的超分辨

率增强处理需求,在系统设计过程中应符合以下三条约束:

1) 上下镜面的垂直视野重叠且视域角较小

为了充分利用空间目标在全向图内外环的二次成像特性,为后续的图像融合及分辨率增强处理提供尽可能多的互补信息,上、下镜面对应的折反射成像在垂直方向上的视野重叠是系统设计最基本、也是最直观自然的要求。

此外,由于本文面向军事远景侦察应用背景,如地面装甲车辆或水面舰艇的战场环境感知,所关心的空间目标基本上只是在地平线上下很小的视角范围内,因此只需将折反射全向成像的垂直视域限制在一个很小的区间,从而相对地提高成像的空间分辨率。在实际设计中,垂直视角限制在 $\pm 10^\circ$ 左右。

2) 全向图内环与外环的成像面积相等

从图 2 可知,全向图内环的外圈对应于外环的内圈,而内环的内圈对应于外环的外圈。为了在后续的图像融合及分辨率增强处理时,使得全向图的内环和外环处于等价的地位,即对最终生成高分辨率全景图像所做的贡献基本相当,要求内环与外环的成像面积相等。

由于外环的切向分辨率整体上高于内环,内外环成像面积相等就意味着内环在径向上的分辨率必定高于外环,从而使得内环与外环在径向上和切向上的分辨率形成互补。

3) 反射面方程简单,可精确得到光学成像的坐标映射关系

原始采集的全向图存在严重的同心圆环状变形,通常需将其展开为更适合人眼观察的柱面全景图像或局部透视图。一般地,将全向图展开为柱面全景图像是一个正向投影的过程,即根据光学反射定律和几何推导,得出柱面全景空间上任一点 $p(x, y, z)$ 投影在全向图上一一点 $P(X, Y)$ 的坐标映射关系 $P = g(p)$ 。通常,对于给定的反射镜面方程,由全向图上一一点 $P(X, Y)$ 到投影圆柱面上一点 $p(x, y, z)$ 的逆向映射关系 $P = g^{-1}(P)$ 较易获得,而其逆映射即全向成像的正向映射关系 $P = g(p)$,则取决于具体的反射镜面型方程和系统结构参数,往往难以精确得到。以“抛物面+常规透视相机”的折反射全向成像系统为例,在求解正向映射关系 $P = g(p)$ 时需要求解一个一元五次方程,无法得到一个显式的表达式。

满足单视点约束的折反射全向成像系统,无论是其逆向映射关系 g^{-1} 还是正向映射关系 g ,都易

准确求得,并且单视点折反射成像系统的一个突出优点是可直接投影生成空间无畸变的柱面全景图像或局部透视图。而对于常规透视相机,满足单视点约束的反射面型只有双曲面^[11]。此外,基于圆锥面的折反射全向成像系统虽然不满足单视点约束,但由于圆锥面特殊的简单结构,其光学成像的正向映射关系 g 亦可准确获得。

系统采集的全向图也需要展开到柱面全景空间,最终以一幅高分辨率柱面全景图像的形式表示,而精确的全向图与柱面全景图之间的坐标映射关系

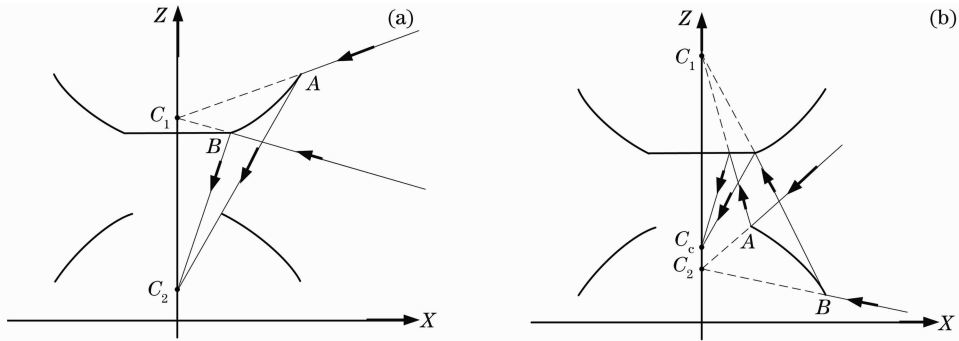


图3 基于双曲面的折反射成像示意图。(a)上镜面为双曲面,(b)下镜面为双曲面

Fig. 3 Geometric model of hyperboloid-based catadioptric omnidirectional imaging.

(a) Upper mirror is a hyperboloid, (b) lower mirror is a hyperboloid

由于整个成像系统呈旋转轴对称结构,只需在纵截面即 xoz 平面内进行分析。假定成像系统上、下镜面的垂直视野范围均为 $\pm\theta$,全向图外环最外缘、内外环分界处、内环最内缘对应的成像入射角(即射入小孔的光线与相机光轴的夹角)分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ($\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$),则外环和内环的成像面积分别为(不失一般性,设成像焦距 $f=1$)

$$S_{\text{out}} = \tan^2 \alpha_1 - \tan^2 \alpha_2$$

$$S_{\text{in}} = \tan^2 \alpha_2 - \tan^2 \alpha_3. \quad (1)$$

约束条件2)要求外环与内环的成像面积相等,即要求

$$\tan^2 \alpha_1 - \tan^2 \alpha_2 = \tan^2 \alpha_2 - \tan^2 \alpha_3. \quad (2)$$

根据圆锥面反射特性,即入射角的偏差等于反射角的偏差,易知当上镜面为圆锥面时,满足

$$\alpha_1 = \alpha_2 + 2\theta. \quad (3)$$

同理,当下镜面为圆锥面时,则

$$\alpha_2 = \alpha_3 + 2\theta. \quad (4)$$

当上镜面为满足单视点约束的双曲面时,如图3(a)所示,上镜面的纵截面为一条双曲线,假设该双曲线方程为

$$(z-L)^2/a^2 - x^2/b^2 = 1, \quad (5)$$

式中 L 为双曲线中心距原点的距离。 C_1, C_2 为该双

也是下一步进行高精度图像配准和超分辨率重建的重要前提条件。

3.2 设计方案分析与选择

根据上述对约束条件3)的分析,有可能满足系统设计要求的方案有4种:圆锥面+圆锥面、双曲面+双曲面、圆锥面+双曲面、双曲面+圆锥面。以圆锥面+双曲面为例,即指图3所示的互补结构折反射全向成像系统中,上镜面为一个圆锥面,下镜面为一个满足单视点约束的双曲面。下面对这4种设计方案分别进行分析并筛选。

曲线的两个焦点。根据单视点约束,要求相机的小孔中心恰好位于 C_2 处。 A, B 分别为双曲线的最上沿和最下沿,则 C_1A, C_1B 对应的俯仰角分别为 $+\theta$ 和 $-\theta$ 。

在 $\triangle AC_1C_2$ 中,根据正弦定理及双曲面定义,可得

$$\frac{AC_2 - AC_1}{C_1C_2} = \frac{2a}{2c} = \frac{\sin(\pi/2 + \theta) - \sin \alpha_1}{\sin[\pi - (\pi/2 + \theta) - \alpha_1]}$$

$$= \frac{\cos \theta - \sin \alpha_1}{\cos(\theta + \alpha_1)}. \quad (6)$$

类似地,在 $\triangle BC_1C_2$ 中可推得

$$\frac{BC_2 - BC_1}{C_1C_2} = \frac{2a}{2c} = \frac{\sin(\pi/2 - \theta) - \sin \alpha_2}{\sin[\pi - (\pi/2 - \theta) - \alpha_2]}$$

$$= \frac{\cos \theta - \sin \alpha_2}{\cos(\theta - \alpha_2)}. \quad (7)$$

联立(6)式和(7)式,可得

$$\frac{\cos \theta - \sin \alpha_1}{\cos(\theta + \alpha_1)} = \frac{\cos \theta - \sin \alpha_2}{\cos(\theta - \alpha_2)}. \quad (8)$$

而当下镜面为满足单视点约束的双曲面时,如图3(b)所示, C_1, C_2 为该双曲面的两个焦点。根据单视点约束,要求相机的小孔中心 C_c 在上镜面底部平面镜中所成的像恰好位于 C_1 处。在 $\triangle AC_1C_2$ 和 $\triangle BC_1C_2$ 中,根据正弦定理及双曲面定义,同理可

推得

$$\frac{\cos \theta - \sin \alpha_2}{\cos(\theta + \alpha_2)} = \frac{\cos \theta - \sin \alpha_3}{\cos(\theta - \alpha_3)}. \quad (9)$$

因此,对于以下 4 种设计方案,综合 3 条设计约束条件,各自对应的约束方程组分别为

a) 圆锥面+圆锥面:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_2 + 2\theta, \\ \alpha_2 = \alpha_3 + 2\theta, \\ \tan^2 \alpha_1 - \tan^2 \alpha_2 = \tan^2 \alpha_2 - \tan^2 \alpha_3 \end{cases}. \quad (10)$$

b) 双曲面+双曲面:

$$\begin{cases} \frac{\cos \theta - \sin \alpha_1}{\cos(\theta + \alpha_1)} = \frac{\cos \theta - \sin \alpha_2}{\cos(\theta - \alpha_2)}, \\ \frac{\cos \theta - \sin \alpha_2}{\cos(\theta + \alpha_2)} = \frac{\cos \theta - \sin \alpha_3}{\cos(\theta - \alpha_3)}, \\ \tan^2 \alpha_1 - \tan^2 \alpha_2 = \tan^2 \alpha_2 - \tan^2 \alpha_3 \end{cases}. \quad (11)$$

c) 圆锥面+双曲面:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_2 + 2\theta, \\ \frac{\cos \theta - \sin \alpha_2}{\cos(\theta + \alpha_2)} = \frac{\cos \theta - \sin \alpha_3}{\cos(\theta - \alpha_3)}, \\ \tan^2 \alpha_1 - \tan^2 \alpha_2 = \tan^2 \alpha_2 - \tan^2 \alpha_3 \end{cases}. \quad (12)$$

d) 双曲面+圆锥面:

$$\begin{cases} \frac{\cos \theta - \sin \alpha_1}{\cos(\theta + \alpha_1)} = \frac{\cos \theta - \sin \alpha_2}{\cos(\theta - \alpha_2)}, \\ \alpha_2 = \alpha_3 + 2\theta, \\ \tan^2 \alpha_1 - \tan^2 \alpha_2 = \tan^2 \alpha_2 - \tan^2 \alpha_3 \end{cases}. \quad (13)$$

经数学推导分析,只有 d) 方案对应的约束方程组(13)存在合理的可行解,即上镜面为一个满足单视点约束的双曲面,下镜面为一个与之相配套的圆锥面,如图 4 所示。

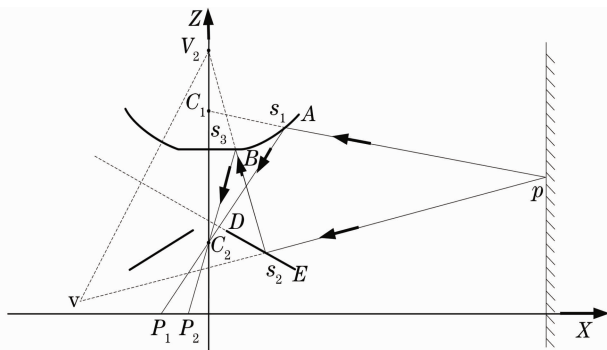


图 4 双曲面+圆锥面的互补结构折反射成像示意图

Fig. 4 Complementary omnidirectional catadioptric imaging based on scheme of hyperboloid + cone

3.3 成像光学几何分析

基于图 4 所示的双曲面+圆锥面互补结构折反射成像,为了将原始采集的全向图展开为更适合观察的柱面全景图像,实现虚拟的三维柱面全景空间

构建,根据小孔透视成像模型和光学反射定律,对穿过小孔并与成像平面相交的每一条光线进行轨迹追踪,几何推导得出空间点与其在像平面上的像素点之间的映射关系,以实现全向图到柱面全景图像的变换。

如图 4 所示,假设投影圆柱面的半径为 R_c ,圆柱面上一点 $p(R_c, h)$ 在全向图的外环和内环的成像点分别为 $P_1(-r_1, 0), P_2(-r_2, 0)$ 。

对于上方的双曲面折反射成像,点 p 发出的一条入射光线 ps_1 经双曲面上一点 s_1 反射后,穿过小孔中心 C_2 并与像平面交于点 P_1 。根据单视点约束及双曲面特性,所有的入射光线都射向双曲面的内焦点,即虚拟单视点 C_1 。因此,点 C_1 必定在入射光线 ps_1 的延长线上,从而可根据如下方程组求得点 s_1 的坐标 (x_1, z_1) :

$$\begin{cases} (z_1 - L)^2/a^2 - x_1^2/b^2 = 1, \\ z_1 = \frac{h - (L + c)}{R_c} x_1 + (L + c). \end{cases} \quad (14)$$

进而可求得 P_1 点的坐标如下式,即为柱面全景图像上一点成像到全向图外环的正向映射关系 $P_1 = g_1(p)$:

$$r_1 = \frac{(L - c)x_1}{z_1 - (L - c)}. \quad (15)$$

对于下方的圆锥面折反射成像,点 p 发出的另一条入射光线 ps_2 经圆锥面上一点 s_2 反射后,在上镜面底部的平面反射镜上一点 s_3 二次反射,再进入小孔中心 C_2 并与像平面交于点 P_2 。如图 4 所示,点 V_2 为相机小孔中心 C_2 在上镜面底部的平面镜中所成的像,相当于在点 V_2 处放置一个虚拟相机,点 V 为虚拟相机 V_2 在下方的圆锥面反射镜中所成的像。根据圆锥面和平面镜反射特性,可知反射光线 s_2s_3 的延长线必经过点 V_2 ,而所有的入射光线 ps_2 的延长线必经过点 V ,即点 V 相当于下方的圆锥面折反射成像的一个虚拟视点。对于整个全向图内环成像来说,虚拟视点的轨迹即为点 V 绕 z 轴旋转一周所得的圆。

假设图 4 中圆锥面的右纵截面所在直线方程为 $z = kx + m$ 。

点 s_3 的纵坐标即上镜面底部的平面镜所在位置为 y_3 ,已知实际相机位置即双曲面外焦点的坐标为 $(0, L - c)$,则虚拟相机 V_2 的坐标为 $(0, 2z_3 - L + c)$ 。根据(16)式的直线方程,可求出 V_2 的像点即虚拟视点 V 的坐标 (x_v, z_v) 。由于点 s_2 即为直线 pV 与圆锥面的交点,可根据如下方程组求得点 $s_2(x_2, z_2)$

的坐标:

$$\begin{cases} z_2 = kx_2 + m, \\ \frac{z_2 - h}{x_2 - R_c} = \frac{z_V - h}{x_V - R_c}. \end{cases} \quad (17)$$

点 $s_3(x_3, z_3)$ 即为直线 s_2V_2 与平面镜所在直线 $z = z_3$ 的交点, 进而可求得 P_2 点的坐标如(18)式:

$$r_2 = \frac{(L - c)x_3}{z_3 - (L - c)}. \quad (18)$$

即为柱面全景图像上一点成像到全向图内环的正向映射关系 $P_2 = g_2(p)$ 。

类似地, 从全向图上一点投影到柱面全景空间的逆向映射关系 $p = g_1^{-1}(P_1)$ 及 $p = g_2^{-1}(P_2)$, 推导过程更为简单, 且由于 $p_1 = g_1(p)$ 及 $p_2 = g_2(p)$ 的简单性, 亦可直接求逆得到。

4 实验与结果分析

4.1 系统设计参数的确定

系统的设计参数主要包括: 双曲面和圆锥面的面型参数, 即(5)式中的 a, b 值(令 $L = 0$)及(16)式中 k, m 值; 系统尺寸参数, 即双曲面和圆锥面的上下边缘点的坐标值; 相机的安装位置 C_2 及系统的成像焦距 f 。

根据双曲面+圆锥面的系统设计方案, 最大成像角 α_1 、内外环分界处成像角 α_2 、最小成像角 α_3 与垂直视域角 θ 需满足约束方程组(13)式中的三个等式。本文设计中令 $\theta = 8.8^\circ$, 相应地, $\alpha_1 = 28.6^\circ$, $\alpha_2 = 21.2^\circ$, $\alpha_3 = 3.6^\circ$ 。进而, 可根据(6)式算得双曲面的离心率 $c/a = 1.559$ 。

然后确定双曲面上端的口径 $d = 2x_A$, 联立下述方程组:

$$\begin{cases} z_A^2/a^2 - x_A^2/b^2 = 1, \\ x_A/(z_A + c) = \tan \alpha_1. \end{cases} \quad (19)$$

由于离心率 c/a 值已知, 则 a, b 均可用 c 表示, 而 x_A, α_1 为已知量, 从而可解得 z_A 及 a, b, c 的值, 则相机的安装位置即双曲面的外焦点 C_2 坐标也就确定。再将上述方程组(19)中 A 点换为 B 点, 相应地将成像入射角 α_1 换为 α_2 , 即可解得 B 点坐标 (x_B, z_B) 从而确定双曲面下缘尺寸及其底部平面镜位置。

对于下方的圆锥面, 首先根据 D 点或 E 点对应的入射角 $\pm\theta$ 及成像角 α_2, α_3 , 基于光学反射定律求得 DE 所在直线斜率, 也就是(16)式中的 k 值。而

直线方程中的截距值 m 并不唯一, 设计为避免垂直视域之外的光线对全向成像的影响, 并使得系统结构尽量紧凑, 令最大成像角对应的入射光线 AC_2 恰好过 E 点, 进而算得 m 值及 D 点、 E 点坐标, 确定圆锥面参数和尺寸。

由于系统的最大成像角 α_1 已定, 成像焦距 f 则取决于图像传感器的像面尺寸, 以 $(2/3)$ inch (1 inch = 2.54 cm) 的 CCD 传感器 (6.6 mm \times 8.8 mm) 为例, f 应不大于 3.3 mm / $\tan 28.6^\circ \approx 6$ mm。

4.2 实物成像系统的像差分析

由于曲面反射镜的加工以及相机和镜面的装配都不可避免地存在一定的误差, 因此在实物成像系统中, 空间点在成像平面上对应的像素点坐标必然与 3.3 节基于光线跟踪进行理想几何分析所得的成像位置存在一定的偏差。

对于相机和镜面的装配误差引起的成像偏差, 将通过后期的图像分析和处理, 包括摄像机标定、曲面镜姿态估计等技术^[24,25]进行高精度成像校准。

系统设计中, 曲面反射镜通过超精密金刚石车床的单车削技术进行加工, 微观光洁度 $5 \sim 10$ nm, 面型精度 $0.1 \sim 1$ μ m, 因此相对于装配误差, 镜面的加工误差可忽略不计。实际上, 以双曲面折反射成像为例, 对空间一点 $p(R_c, h)$, 联立(14)式、(15)式, 可得到其投影在成像平面上的像素点位置 $r_1 = F(a, b)$, 求偏导数 $\partial F / \partial a, \partial F / \partial b$, 由于面型精度 $0.1 \sim 1$ μ m, 经数学分析易知镜面加工误差引起的像差远小于 0.1 pixel。

因此, 对系统面向的超分辨率全景空间重建而言, 镜面加工误差可忽略不计。

4.3 实验结果图及互补性分析

在 3 ds Max 9 仿真环境中, 按照 4.1 节确定的系统尺寸参数, 建立双反射面互补的折反射全向成像原型系统, 并对三维虚拟环境中的圆柱面贴图场景进行成像, 如图 5 所示, 得到内外环互补结构的全向图

从图 5(b) 可以看出, 全向图内外环的视野完全重叠, 内环的最内圈恰好对应于外环的最外圈, 而内环的最外圈又恰好对应于外环的最内圈, 且内环与外环的成像面积相等。

给出全向成像的切向分辨率 (tangential resolution)、径向分辨率 (radial resolution) 及面积分辨率 (area resolution) 的定义如下:

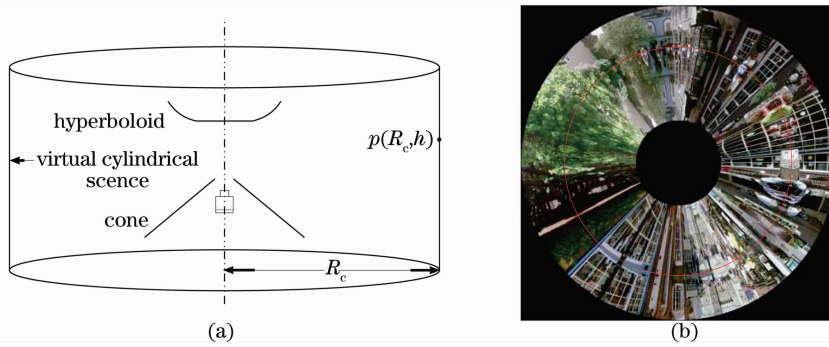


图 5 (a) 双反射面折反射全向成像原型系统及仿真场景；(b) 内外环互补的全向图

Fig. 5 (a) Prototype sensor and its experimental environment; (b) Captured complementary-structure omni directional image in inner and outery ring

$$\begin{cases} R_{\tan}(h) = 2\pi r(h)/2\pi R_c = r(h)/R_c, \\ R_{\text{rad}}(h) = dr/dh, \\ R_{\text{area}}(h) = R_{\tan}(h) \cdot R_{\text{rad}}(h) = \\ [r(h)/R_c] \cdot (dr/dh) \end{cases}, \quad (20)$$

式中 r 为圆柱面场景上一点 $p(R_c, h)$ 在全向图外环或内环的对应成像点的极半径值。

当圆柱面贴图场景原始分辨率为 2000×100 ，生成的全向图分辨率为 1024×1024 时，相应的切向、径向及面积分辨率分布曲线如图 6 所示。

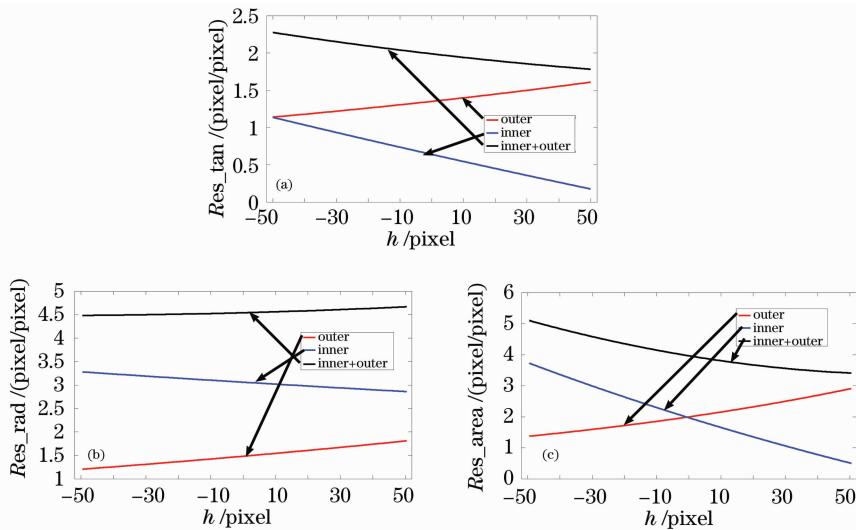


图 6 全向图内外环分辨率分布曲线。(a) 切向；(b) 径向；(c) 面积

Fig. 6 Resolution distribution curves. (a) tangential resolution; (b) radial resolution; (c) area resolution

切向分辨率分布上，外环整体上全部高于内环，且内外环切向分辨率分布曲线的变化趋势相反，即圆柱面场景中越靠上方的点，在外环成像的切向分辨率越高，而在内环成像的切向分辨率则越低。

径向分辨率分布上，内环整体上全部高于外环，且内外环径向分辨率分布曲线的变化趋势相反，即圆柱面场景中越靠上方的点，在内环成像的径向分辨率越低，而在外环成像的径向分辨率则越高。

因此，全向图的内环成像和外环成像在切向分辨率和径向分辨率两个方面存在很强的互补性。虽然内外环二次成像的分辨率之和并未达到绝对的均匀分布，如图 6 所示，但相比于传统的单镜面折反射

全向成像系统，无论是切向分辨率、径向分辨率还是面积分辨率，分布都明显更为均匀。而若追求绝对意义上的分辨率均匀分布，在确定反射镜面方程时必将遇到微分方程的求解，如 3.1 节中所述，这将对推导全向图与柱面全景图之间的投影映射关系带来很大困难，且不利于下一步的高精度图像配准和超分辨率重建研究。

5 结 论

针对折反射全向成像空间分辨率低、分辨率分布不均匀的问题，设计了一种双反射面互补结构的折反射全向成像系统，利用上、下两个镜面的反射使

得空间点在全向图的内外环互补二次成像,并结合特定应用背景,通过限制全向成像的垂直视域以得到较高的采样分辨率。仿真实验结果表明,相比于传统的单镜面折反射全向成像系统,该全向成像系统分辨率分布更加均匀,内环与外环之间存在很强的互补性。

参 考 文 献

- Gledhill D., Tian G. Y., Taylor D. *et al.*. Panoramic imaging-a review[J]. *Computers & Graphics*, 2003, **27**: 435~445
- Xiao Xiao, Yang Guoguang, Bai Jian. Panoramic-annular-lens distortion correction based on spherical perspective projection constraint[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 675~682
肖 潇, 杨国光, 白 剑. 基于球面透视投影约束的全景环形透镜畸变校正[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 675~682
- Boult T. E., Gao X., Micheals R. *et al.*. Omni-directional visual surveillance[J]. *Image Vision Comput.*, 2004, **22**(7): 515~534
- Fiala M., Basu A.. Robot navigation using panoramic tracking [J]. *Pattern Recogn.*, 2004, **37**: 2195~2215
- Ikeuchi K., Sakauchi M., Kawasaki H. *et al.*. Constructing virtual cities by using panoramic images[J]. *Int. J. Comput. Vision*, 2004, **58**(3): 237~247
- Wu Xianxiang, Guo Baolong, Wang Juan. Cylindrical panoramic image automatic mosaic algorithm based on phase correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1824~1829
吴宪祥, 郭宝龙, 王 娟. 基于相位相关的柱面全景图像自动拼接算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1824~1829
- Wang Huifeng, Liu Shangqian, Wang Dabao *et al.*. Panoramic image mosaic method for rotary scanning serial image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1211~1217
王会峰, 刘上乾, 汪大宝 等. 旋转扫描序列图像的全景图拼接方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1211~1217
- Hu Shaoxing, Feng Yuyong. Calibration of panorama based on linear CCD and fisheye lens[C]. Proceedings of the 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing, 2009, (1~9): 786~790
- Nayar S. K. Catadioptric omnidirectional camera [C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, 1997: 482~488
- Wang Liping, Zhang Lichao, He Fengyun *et al.*. Design of aspheric mirror for panoramic imaging system using multi-population genetic algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 1020~1026
王丽萍, 张立超, 何锋贇 等. 采用多种群遗传算法的全景成像系统非球面设计[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(5): 1020~1026
- Baker S., Nayar S. K.. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation[J]. *Int. J. Comput. Vision*, 1999, **35**(2): 175~196
- Zeng Jiyong, Su Xianyu. Hyperboloidal catadioptric omnidirectional imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1138~1142
曾吉勇, 苏显渝. 双曲面折反射全景成像系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1138~1142
- Zeng Jiyong, Su Xianyu. Paraboloidal catadioptric omnidirectional imaging system[J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2003, **14**(5): 485~488
曾吉勇, 苏显渝. 抛物面折反射全景成像系统[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(5): 485~488
- Gaspar J., Decco C., Okamoto J. *et al.*. Constant resolution omnidirectional cameras[C]. Proceedings of the 2nd Workshop on Omnidirectional Vision, Copenhagen, Denmark, 2002: 27~34
- Hicks R. A., Bajcsy R.. Catadioptric sensors that approximate wide-angle perspective projections [C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000: 545~551
- Zeng Jiyong, Su Xianyu. Catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging for horizontal scene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 636~640
曾吉勇, 苏显渝. 水平场景无畸变的折反射全景成像系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 636~640
- Zeng Jiyong, Su Xianyu. A distortionless catadioptric panoramic imaging system for cylindrical scene [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(1): 42~45
曾吉勇, 苏显渝. 柱面场景无畸变的折反射全景成像系统[J]. *光电工程*, 2003, **30**(1): 42~45
- Nagahara H., Yoshida K., Yachida M.. An omnidirectional vision sensor with single view and constant resolution [C]. Proceedings of International Conference on Computer Vision, Brazil, Oct, 2007: 1~8
- Stefan G.. Mirror design for an omnidirectional camera with a uniform cylindrical projection when using the SVAVISCA sensor [R]. Research Reports of CMP, Czech Technical University in Prague, 2001
- Peng Qimin, Jia Yunde. Wavelet-based resolution enhancement of omnidirectional images[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **31**(11): 1875~1879
彭启民, 贾云得. 基于小波变换的全向图像分辨率增强方法[J]. *电子学报*, 2004, **32**(11): 1875~1897
- Nagahara H., Yagi Y., Yachida M.. Super-resolution modeling [C]. Proceedings of IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2003: 215~221
- Nagahara H., Yagi Y., Yachida M.. Superresolution modeling using an omnidirectional image sensor [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 2003, **33**(4): 607~615
- Conroy L., Moore J. B.. Resolution invariant surfaces for panoramic vision systems[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Corfu, Greece, 1999: 392~397
- Chen Qian, Wu Haiyuan, Wada T.. Camera calibration with two arbitrary coplanar circles [C]. Proceedings of European Conference on Computer Vision, 2004: 521~532
- Mashita T., Iwai Y., Yachida M.. Calibration method for misaligned catadioptric camera [J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2006, **E89**-D(7): 1984~1993