

双曲面折反射全景成像系统*

曾吉勇 苏显渝

(四川大学光电系, 成都 610064)

摘要: 给出了双曲面折反射全景成像系统的设计方法, 推导了系统的逆投影计算公式, 建立了虚拟像面内透视全景图像与实际像平面内全景图像的坐标映射关系, 为全景视频图像的处理提供了必要的模型和计算方法。提出了全景成像系统设计方法, 研制出双曲面反射镜, 建立了双曲面折反射全景成像系统。

关键词: 应用光学; 全景成像系统; 双曲面反射镜; 折反射系统

中图分类号: O435.1 文献标识码: A

1 引 言

常规光学成像系统视场较小, 在前面放置凸面反射镜能有效地扩大视场。折反射全景成像系统就是这样一种利用折射光学元件和反射光学元件, 实现大到半球视场的成像光学系统^[1~3]。主要由三部分组成(图 1): 1) 光敏元件, 如 CCD 器件。2) 成像透镜, 如常规成像透镜或远心透镜^[4]。3) 凸面反射镜。其面形为二次曲面, 如球面^[5]、圆锥面^[6]、双曲面^[7]和抛物面^[4]或高次旋转对称非球面。系统设计时通常选用市场上的摄像头, 设计不同技术要求的反射镜。由于折反射全景成像系统具有实时大视场成像, 价格较低的优点, 近年来发展较快, 已应用于许多需要大视场的场合, 如: 监视^[8]、视频会议^[9]、场景的模式获取^[10]、机器人导航^[6,11]。

折反射全景成像系统根据透镜成像模型可以分为基于透视投影成像模型的成像系统[见图 1(a)]和基于平行投影成像模型的成像系统[见图 1(b)]两类。在监视和场景的三维重建应用中, 要获得透视图像, 在设计折反射系统时应满足单视点约束, 保证系统成像符合针孔模型^[1]。Nayar^[4]采用远心透镜和抛物面反射镜首次设计出基于平行投影成像模型, 符合单视点约束的较理想的折反射全景成像系统, 这种系统称为抛物面折反射全景成像系统。经过抛物面焦点的反射光线平行于抛物面的对称轴, 所以系统较为紧凑, 而且成像质量较好。这种系统的主要缺点在于远心透镜价格较贵。实现单视点全景成像的另一种方

法基于透视投影成像模型, 即采用常规的透视成像透镜和双曲面反射镜, 这种系统称为双曲面折反射全景成像系统^[7,12]。由于透视成像透镜较远心透镜容易选购, 价格低, 因此双曲面折反射全景成像系统较抛物面折反射全景成像系统更实用。

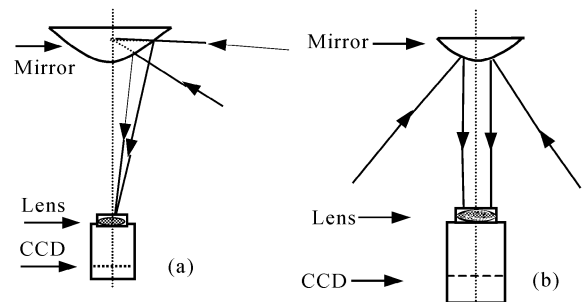


Fig. 1 Catadioptric omnidirectional imaging system.
(a) Model of perspective projection; (b) Model of orthographic projection

目前的文献对双曲面折反射全景成像系统的设计缺乏系统论述, 对系统的逆投影分析也不够深入。本文给出了双曲面折反射全景成像系统的设计方法, 推导了系统的逆投影计算公式, 建立了虚拟像面内透视全景图像与实际像平面内全景图像的坐标映射关系, 为全景视频图像的处理提供了必要的模型和计算方法。根据本文提出的设计方法, 研制了双曲面折反射全景成像系统, 并获得室内场景的全景图像、以及经逆投影变换的透视全景图像和柱面全景图像。

2 双曲面折反射全景成像系统设计

选用 CCD 器件和透视成像透镜构成摄像头, 在成像系统的设计中将摄像头采用前像平面针孔相机模型, 在对摄像头内部参量标定的基础上, 确定系统

* 国家自然科学基金(60177001)资助课题。

E-mail: zengjiyong7@163.com

收稿日期: 2002-04-22; 收到修改稿日期: 2002-10-15

尺寸和双曲面面形参量。

2.1 折反射全景成像系统尺寸的确定

系统尺寸主要指反射镜离摄像头透视中心 O 的距离 H 和反射镜口径 D (图 2 所示)。系统以光轴旋转对称,像素平面为长方形,取过摄像头透视中心 O 和像素平面短边所在的剖面进行分析。设 R_{\min} 为长方形短边上有效像素端到图像中心点 C 的最短距离, f 为透镜焦距,摄像头在该方向的视场角为 α 。则

$$\tan \alpha = R_{\min} / f = D / 2H. \quad (1)$$

全景系统设计时根据应用要求选择合适的摄像头,标出 R_{\min} 和透镜焦距 f 。确定反射镜离摄像头的距离 H ,由式(1)计算反射镜的口径 D 。

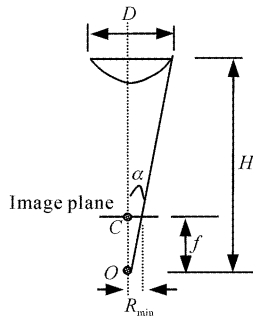


Fig. 2 Calculating size of catadioptric system

2.2 双曲面反射镜面形参量的确定

图 3 所示,摄像头透视中心 O 置于双曲面反射镜的焦点 F ,则会聚于另一焦点 F' 的光线经双曲面反射后必会聚于摄像头透视中心 O 。所以双曲面折反射全景成像系统满足单视点成像条件,焦点 F' 称为全景系统的透视中心。

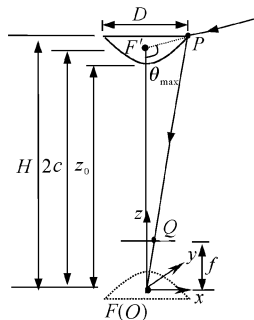


Fig. 3 Design of hyperboloidal catadioptric system

以摄像头透视中心 O 为坐标原点。由于双曲面为旋转对称结构,只须在 xOz 平面内进行分析。设双曲线方程为

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

其中 a, b 为双曲线参量, $c = \sqrt{a^2 + b^2}$, 双曲线两焦点之间的距离为 $2c$ 。

成像系统尺寸 D, H 已在 2.1 节确定,反射镜底

部 P 点的坐标为 $(D/2, H)$,由(2)式得到方程

$$(H - \sqrt{a^2 + b^2})^2 / a^2 - D^2 / (4b^2) = 1. \quad (3)$$

经过焦点 F' 和反射镜底部 P 点的光线与 z 轴的夹角为系统在竖直方向的视场角 θ_{\max} 。由图 3 得

$$\tan\left(\theta_{\max} - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{H - 2c}{D/2},$$

所以
$$a^2 + b^2 = \frac{1}{4} \left(H + \frac{D}{2} \cot \theta_{\max} \right)^2. \quad (4)$$

令 $A = a^2, B = b^2$,由(3)式、(4)式得

$$A = \frac{1}{16} (4H^2 + 2D^2 + D^2 \cot^2 \theta_{\max}) - \frac{D}{8 \sin \theta_{\max}} \sqrt{4H^2 + D^2}, \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{8} D (2H \cot \theta_{\max} - D) + \frac{D}{8 \sin \theta_{\max}} \sqrt{4H^2 + D^2}. \quad (6)$$

根据已确定的系统尺寸 D, H 和应用所要求的视场角 θ_{\max} ,由(5)式、(6)式可以确定双曲线参量 a, b 。

2.3 反射镜厚度与摄像头透视中心至反射镜底部距离和视场角的关系

双曲线顶点的纵坐标为 $c + a$,底部的纵坐标为 H ,厚度

$$h = H - (c + a). \quad (7)$$

2.3.1 反射镜厚度与摄像头透视中心至反射镜底部距离 H 的关系

由(1)式, D 与 H 成正比;由(5)式、(6)式, a, b 与 H 成正比;由(7)式, h 与 H, a, b 成正比。从而 h 与 H 成正比关系。

图 4 为摄像头焦距 $f = 1298$ pixels、 $R_{\min} = 240$ pixels 的情况下,半球成像时,反射镜厚度 h 与摄像头透视中心至反射镜底部距离 H 的关系图。反射镜厚度 h 随摄像头透视中心至反射镜底部距离 H 线性增加。因此,在成像透镜的调焦范围内,摄像

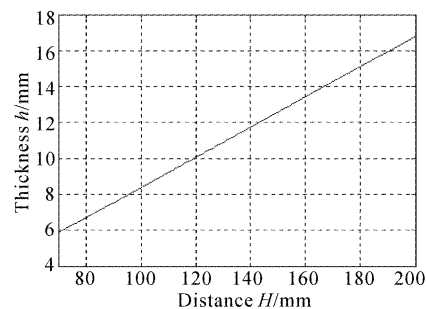
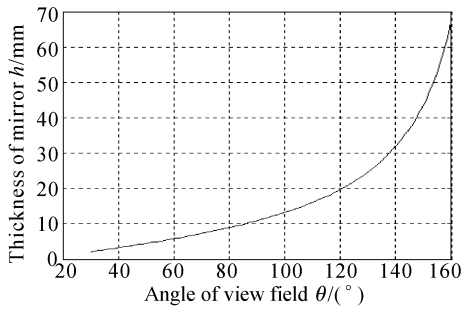


Fig. 4 Relation between thickness of mirror and distance from the projective center of camera and the bottom of mirror

头透视中心至反射镜底部距离 H 应尽可能小, 这样全景系统紧凑, 重量轻, 又有较好的成像质量。

2.3.2 反射镜厚度与视场角的关系

反射镜厚度与视场角的关系比较复杂。图 5 为摄像头焦距 $f=1298$ pixels, $R_{\min}=240$ pixels 的情况下, 反射镜厚度与视场角的关系图 ($H=130$ mm)。反射镜厚度随最大视场角增大, 视场角在 $[0, 120^\circ]$ 区间, 曲线较平; 视场角在 $[120^\circ, 160^\circ]$ 区间, 曲线较陡, 反射镜较厚。用此摄像头, 设计视场角大于 120° 的全景成像系统, 很难保证成像质量。



5. Relation between thickness of mirror and angle of view field

3 双曲面折反射全景成像系统的逆投影

摄像头实际像平面内的全景图是来自场景的光线经反射镜反射后以摄像头透视中心投影成像的, 并非双曲面折反射全景成像系统的透视像。以双曲面焦点 F' 为投影中心建立虚拟相机, 将实际全景图投影到虚拟像面上的过程称为系统成像的逆投影。当虚拟像面为与成像系统对称轴垂直的平面时可以得到透视图像。而当虚拟像面为圆柱面, 且圆柱面的对称轴为成像系统的对称轴时, 可以得到柱面全景图像。透视图像和柱面全景图像都是折反射成像系统实际全景图的几何变形, 其关键在于建立实际成像平面与虚拟像面之间的坐标映射关系。

3.1 双曲面折反射全景成像系统的逆投影公式

如图 6, 在二维空间以虚拟相机投影中心 F' 为原点建立直角坐标系, 双曲面反射镜的面形公式为 $(z-c)^2/a^2 - t^2/b^2 = 1$, 在极坐标系中,

$$z = \rho \cos \theta, \quad (8a)$$

$$t = \rho \sin \theta, \quad (8b)$$

双曲面面形公式为

$$\rho = \frac{c \cos \theta - a}{\cos^2 \theta - (a/b)^2 \sin^2 \theta}, \quad (9)$$

空间物点 O 的直角坐标为 (t_o, z_o) , 入射光线 \overline{OP} 与竖直方向的夹角为 $\theta = \arctan(t_o/z_o)$, 由式(9)得到

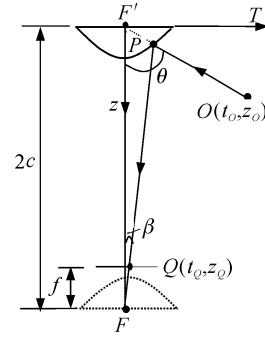


Fig. 6 Re-projection of hyperboloidal catadioptric system
该光线与双曲面的交点 P 坐标 ρ 。代入(8)式得到 P 点的直角坐标 (t_p, z_p) , 又摄像头投影中心 F 坐标为 $(0, 2c)$, 设反射光线 \overline{PQ} 与竖直方向夹角为 β , 其正切为

$$\tan \beta = \frac{t_p}{2c - z_p} = \frac{\rho \sin \theta}{2c - \rho \cos \theta},$$

将(11)式代入并整理得到

$$\tan \beta = \frac{b^2 \sin \theta (c \cos \theta - a)}{cb^2 \cos^2 \theta - 2ca^2 \sin^2 \theta + ab^2 \cos \theta}. \quad (10)$$

在实际像平面内, 光线的落点为 Q , 其横坐标为

$$t_q = f \tan \beta, \quad (11)$$

在三维空间, 入射光线和反射光线具有相等的方位角。将入射、反射光线投影到成像平面内(见图 7), 物点的投影点 O' 坐标为 (x_o, y_o) , 像点 Q 坐标为 (x_q, y_q) :

$$\gamma = \arctan(y_o/x_o), \quad (12)$$

$$x_q = t_q \sin \gamma, \quad (13)$$

$$y_q = t_q \cos \gamma, \quad (14)$$

所以已知物点 O 的坐标 (x_o, y_o, z_o) , 由(10)式 ~ (14)式可以确定像点 Q 的坐标。

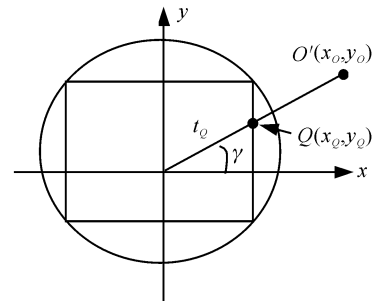


Fig. 7 Ray projection in image plane

3.2 透视全景图像、柱面全景图像的产生

当虚拟像面为与成像系统对称轴垂直的平面时, 可以得到透视全景图像。如图 8 所示, 虚拟相机的投影中心为双曲面的焦点 F' , 虚拟像面为与成像系统对称轴垂直的平面, 焦距为 F 。设虚拟像点 O 的坐标为

(x_o, y_o, F) , 由 3.1 成像系统的逆投影公式可以计算出对应的实际像平面内像点 Q 的坐标 (x_Q, y_Q) , 从而建立了虚拟像平面内透视全景图像与实际像平面内全景图像的坐标映射, 得到透视全景图像。

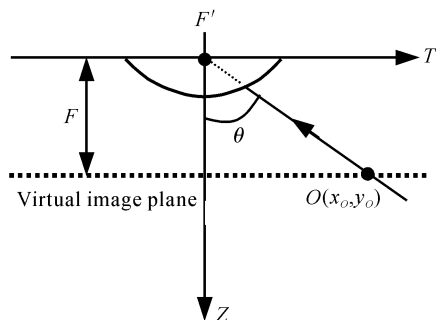


Fig. 8 Generating perspective omnidirectional image

当虚拟像面为圆柱面(如图 9 所示), 且圆柱面的对称轴为成像系统的对称轴时, 可以得到柱面全景图像。

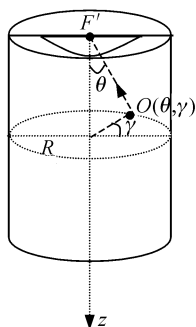


Fig. 9 Generating perspective omnidirectional image

4 实 验

用 Mintron1881EX CCD 和 12 mm 焦距的成像透镜组成摄像头, 标定出摄像头焦距 $f=1298$ pixels、 $R_{\min}=240$ pixels。系统设计时摄像头透视中心至反射镜底部的距离 H 为 130 mm, 由(1)式计算出反射镜口径 D 为 48.07 mm。对半球空间视场成像, 视场角 θ_{\max} 为 90° , 由(5)式、(6)式计算出双曲面反射镜面形参量 $a=54.0845, b=36.0540$; 反射镜面形公式为

$$a^2/54.0845^2 - x^2/36.0540^2 = 1,$$

面形结构见图 10, 反射镜厚度为 10.92 mm。

用黄铜作为基材, 数控车床车出反射镜面形后, 经抛光、镀膜制作出反射镜, 建立双曲面折反射全景成像系统, 图 11、图 12 为用该成像系统拍摄的室内实验图像, 图 13 为由图 11 产生的透视全景图, 图 14 为由图 12 产生的柱面全景图。透视成像中与成像面平行的场景不变形, 而且场景中的平行线仍然平行。在

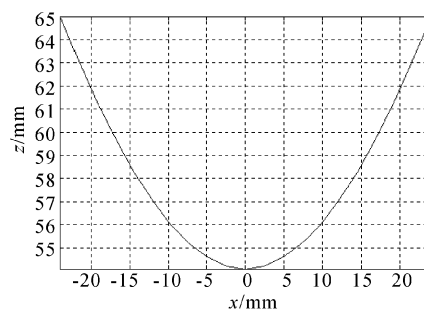


Fig. 10 Configuration of hyperbolic mirror

逆投影变换中, 图 13 的虚拟像平面与天花板平行, 可以看到天花板图像只有轻微变形; 图 14 的虚拟像面与墙面平行, 可以看到墙面图像变形较小。

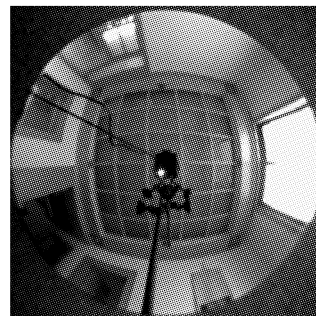


Fig. 11 Omnidirectional image



Fig. 12 Omnidirectional image

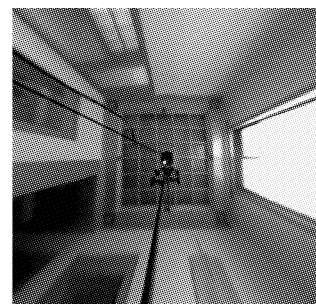


Fig. 13 Perspective omnidirectional image

结论 本文给出了双曲面折反射全景成像系统的设计方法,推导了系统的逆投影计算公式,建立了虚拟像面内透视全景图像与实际像平面内全景图像的坐标映射关系,为全景视频图像的处理提供了必要的模型和计算方法。根据本文提出的双曲面折反射全

景成像系统的设计方法,研制出双曲面反射镜,建立了双曲面折反射全景成像系统。利用该系统得到室内场景的全景图像,并根据全景视频图像映射模型和计算方法得到透视全景图像和柱面全景图像。



Fig. 14 Cylinder panoramic image

参 考 文 献

- 1 Baker S, Nayar S K. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation. *International J. Computer Vision*, 1999, **35**(2):175~196
- 2 Chahl J S, Srinivasan M V. Reflection surfaces for panoramic imaging. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(31):8276~8285
- 3 Ishiguro H. Development of low-cost compact omnidirectional vision sensors and their application. *Proc. Int. Conf. Information Systems, Analysis and Synthesis*, 1998. 433~439
- 4 Nayar S K. Catadioptric omnidirectional camera. *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997. 482~488
- 5 Derrien S, Konolige K. Approximating a single viewpoint in panoramic imaging devices. *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2000. 3931~3938
- 6 Pegard C, Mouaddib E M. A mobile robot using a panoramic view. *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1996. 89~94
- 7 Kamazawa K, Yagi Y, Yachida M. Omnidirectional imaging with hyperboloidal projection. *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1993. 1029~1034
- 8 Peri V N, Nayar S K. Generation of perspective and panoramic video from omnidirectional video. *Proc. of DARPA Image Understanding Workshop*, 1997
- 9 Nayar S K, Peri V N. Folded catadioptric cameras. *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1999. 217~223
- 10 Nayar S K, Karmarkar A. 360×360 mosaics. *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2000. 482~488
- 11 Tan J H X, Weiss B P R, Riseman E M. Image-based homing. *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1991. 620~625
- 12 Svoboda T, Pajdla T, Hlavac V. Central panoramic cameras: geometry and design. *Research Report, Center for Machine Perception, Czech Technical University*, December, 1997

Hyperboloidal Catadioptric Omnidirectional Imaging System

Zeng Jiyong Su Xianyu

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064)

(Received 22 April 2002; revised 15 October 2002)

Abstract: A method is put forward for designing hyperboloidal catadioptric omnidirectional imaging system. The re-projection formulae about this kind of system are derived, thereby the coordinate mapping between virtual image plane and real image plane is established, which offer a essential model and a calculational method to deal with video image. According to this omnidirectional imaging system design method, a hyperboloidal mirror is developed, and a hyperboloidal catadioptric omnidirectional imaging system is established.

Key words: applied optics; omnidirectional image system; hyperboloid mirror; catadioptric system