

文章编号: 0253-2239(2003)05-0636-05

水平场景无畸变的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: 基于透视成像模型, 建立了一套较完整的水平场景无畸变的折反射全景成像系统设计方法, 分析了该系统的近似透视成像性质; 设计制作了特殊面形反射镜, 建立了水平场景无畸变的折反射全景成像系统, 给出了实验图像, 并与双曲面折反射全景成像系统的实景图像和透视全景图像进行了比较。

关键词: 光学设计; 空间无畸变; 折反射系统; 全景成像

中图分类号: TN256 文献标识码: A

1 引 言

折反射全景成像系统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, 其组成主要有三部分(见图 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; 3) 凸面反射镜。系统设计时通常选用市面上的摄像头, 设计不同技术要求的反射镜。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, 出现了多种不同成像性质的系统, 已应用于许多大视场成像的场合, 如: 监视、视频会议、场景的模式获取、机器人导航等领域。

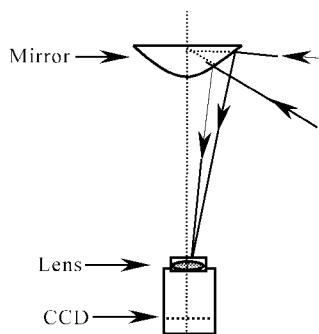


Fig. 1 Catadioptric omnidirectional imaging system

折反射全景成像系统根据是否满足单视点成像约束可以分为单视点成像系统和非单视点成像系统两类^[1,2]。单视点折反射全景成像系统能用针孔成像模型进行成像分析, 从而在监视和机器人导航中得到应用^[3], 但要获得透视全景图像必须对采集的

实景图像逆投影, 因而计算量大。为了满足应用对实时性的要求, 出现了直接获取近似透视全景图像的非单视点折反射全景成像方法^[4,5], 使场景中的物点坐标与成像平面内像点坐标成线性关系, 实现全景成像的空间无畸变。

本文基于透视成像模型, 建立了一套较完整的水平场景无畸变的折反射全景成像系统设计方法, 分析了该系统的近似透视成像性质; 设计制作了反射镜, 建立了水平场景无畸变的折反射全景成像系统, 给出了实验图像, 并与双曲面折反射全景成像系统的实景图像和透视全景图像进行了比较。

2 水平场景无畸变的折反射全景成像系统的设计

选用 CCD 器件和成像透镜构成摄像头, 在对摄像头内部参量标定的基础上初步估算系统外形尺寸, 然后根据高度方向的视场确定反射镜面形参量。

2.1 理论分析

如图 2 所示, 摄像头的投影中心 C 在水平场景上方距离水平场景 h 处, 反射镜的顶点在投影中心上方, 距离投影中心 z_0 处。以摄像头投影中心为坐标原点建立坐标系, 反射镜的面形用 $z(x)$ 函数表示。在像平面内距离像中心点 ρ 的像素 q 接受了来自水平场景 O 点(距离 z 轴 d)、在反射镜 M 点反射的光线。水平场景无畸变要求场景物点的水平坐标与相应像点的坐标成线性关系

$$d(\rho) = a\rho, \quad (1)$$

式中 a 为成像系统的放大率。

设反射镜在 M 点的法线与 z 轴的夹角为 γ , 入

* 国家自然科学基金(60177001)资助课题。

E-mail: zengjiyong7@163.com

收稿日期: 2002-05-03; 收到修改稿日期: 2002-06-14

射光线与 z 轴的夹角为 ϕ , 反射光线与 z 轴的夹角为 θ , 则

$$\tan \phi = \frac{d(x) - x}{z(x) - h}, \quad (2)$$

$$\tan \gamma = z'(x), \quad (3)$$

$$\tan 2\gamma = \frac{2z'(x)}{1 - z'^2(x)}, \quad (4)$$

$$\tan \theta = \frac{\rho}{f} = \frac{x}{z(x)}. \quad (5)$$

由反射定律

$$2\gamma = \phi - \theta,$$

$$\text{则 } \tan 2\gamma = \tan(\phi - \theta) = \frac{\tan \phi - \tan \theta}{1 + \tan \phi \tan \theta}. \quad (6)$$

由(2)式、(4)式~(6)式得到微分方程

$$z^2(x) + 2kz'(x) - 1 = 0, \quad (7)$$

其中

$$k = \frac{z(x)[z(x) - h] + x[d(x) - x]}{z(x)[d(x) - x] - x[z(x) - h]}. \quad (8)$$

由(7)式得到微分方程

$$z'(x) + k - \sqrt{k^2 + 1} = 0, \quad (9)$$

由(1)式、(5)式得

$$d(x) = \frac{afx}{z(x)}, \quad (10)$$

令 $u = af$, 则上式写为

$$d(x) = \frac{ux}{z(x)}. \quad (11)$$

由(8)式、(9)式、(11)式和初始条件, 解微分方程可以得到反射镜面形的数字解。

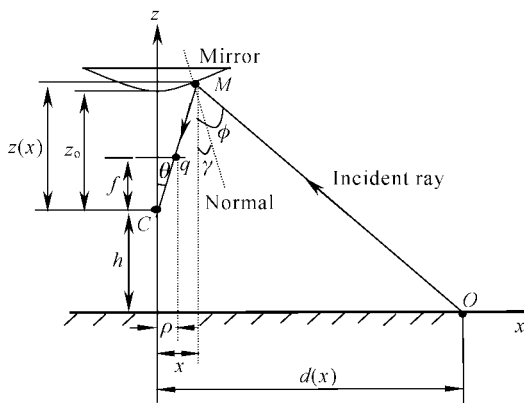


Fig. 2 Mirror design with undistorted image for horizontal scene

2.2 折反射全景成像系统外形尺寸的初始估算

系统外形尺寸主要指反射镜离摄像头的距离 H_0 和反射镜的口径 D_0 (见图 3)。系统以光轴旋转对称, 像素平面为长方形, 故取过摄像头透视中心和像素平面短边所在的剖面进行分析。 R_{\min} 为长方形

短边上有效像素端到图像中心点的最短距离, f 为透镜的焦距, 摄像头在该方向上的视场角为 α :

$$\tan \alpha = R_{\min}/f = D_0/2H_0. \quad (12)$$

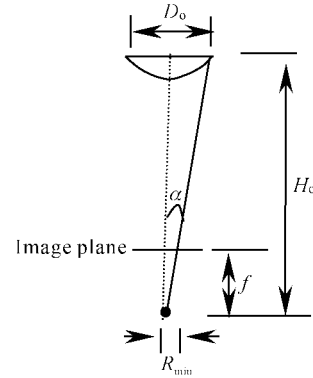


Fig. 3 Calculating size of catadioptric system

折反射全景系统设计时根据应用要求选择合适的摄像头, 标定出 R_{\min} 和透镜的焦距 f , 并确定反射镜离摄像头的距离 H_0 , 由(12)式可计算出反射镜的口径 D_0 。

2.3 系统参量 u 的确定

根据应用所要求的高度方向的视场确定系统参量 u 。

由(1)式、(2)式、(5)式有

$$\tan \phi = \frac{u(\rho/f) - \rho z(x)/f}{z(x) - h},$$

令 $\omega = \rho/f$, 上式写为

$$\tan \phi = \frac{[u - z(x)]\omega}{z(x) - h}.$$

一般地, $z(x) \approx z_0$, 所以

$$\tan \phi = \frac{(u - z_0)\omega}{z_0 - h}. \quad (13)$$

在像平面以像中心点为圆心的最大圆周处 ($\rho = R_{\min} \Rightarrow \omega_{\max} = R_{\min}/f$) 对应的视场为 ϕ_{\max} 。则由(13)式

$$u = \frac{(z_0 - h)\tan \phi_{\max}}{\omega_{\max}} + z_0. \quad (14)$$

2.4 反射镜面形的表达式和成像模拟

1) 反射镜面形的表达式

解微分方程(9)式只能得出反射镜面形的数字解, 由于系统成像分析的需要, 对数字解进行拟合, 建立反射镜的面形表达式十分必要。反射镜可以视为高次旋转对称非球面, 研究中采用抛物面作为母面, 加高次修正表示反射镜面形。若以旋转对称轴为 z 轴, 则反射镜面形表达式为

$$z = A_0 + A_1(x^2 + y^2) + \sum_{m=2,3,4,\dots} A_m(x^2 + y^2)^m, \quad (15)$$

其中 A_0 为拟合的面形顶点与数字解的面形顶点的位置改变, $A_1 = c/2, c$ 为抛物面顶点曲率,

$$\sum_{m=2,3,4,\dots} A_m(x^2 + y^2)^m \text{ 为高次修正.}$$

2) 成像模拟

成像模拟采用与实际光线相反的方向进行。设光源在摄像头投影中心,在像平面内等间距地选取像素点,通过这些像素点的光线,经反射镜反射后与水平面相交,若交点是等间距的,则说明反射镜具有水平场景无畸变的性质。成像模拟一方面可以评价反射镜的成像性质,另一方面可以准确地计算出反射镜的口径和厚度。

2.5 水平场景无畸变的折反射全景成像系统设计步骤

由以上分析,系统设计过程总结如下:

1) 标定摄像头参量。确定焦距 f ;

2) 确定系统外形的初始尺寸。在成像透镜调焦范围内,确定摄像头投影中心至反射镜顶点的距离 z_0 ,并将 z_0 当作摄像头投影中心至反射镜底部的距离 H ,用 2.2 节的方法计算反射镜口径的初始估计值 D_0 ;

3) 根据高度方向的视场,由(14)式确定系统参量 u ;

4) 由(8)式、(9)式、(11)式和初始条件 $x = 10^{17}, z = z_0$,求反射镜的数字解;

5) 对数字解进行拟合,用光线追迹的方法,计算通过像平面 $\rho = R_{\min}$ 处的光线与反射镜的交点坐标 (x_k, z_k) ,确定反射镜的口径 $D = 2x_k$ 和厚度 $\Delta z = z_k - z_0$ 。

3 水平场景无畸变的折反射全景成像系统的近似透视成像

图 4 为一般的透视成像模型, d 为物高, ρ 为像高, t 为物距, F 为像距(等效焦距)。有

$$d = \frac{t}{F}\rho. \tag{16}$$

在水平场景无畸变的折反射全景成像系统的

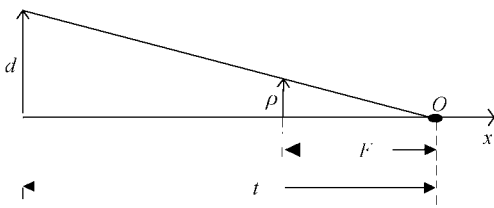


Fig. 4 Perspective imaging model

设计时,要求场景物点的水平坐标与相应像点的坐标成线性关系

$$d(\rho) = a\rho. \tag{17}$$

比较(16)式、(17)式,可以看出水平场景无畸变的折反射全景成像系统对水平场景的成像为透视成像。因此就水平场景成像而言,可以将水平场景无畸变的折反射全景成像系统视为透视相机, a 为成像系统的放大率。设该虚拟透视相机的投影中心为 C 点(见图 2),其等效焦距为 F 。比较(16)式、(17)式得

$$t/F = a,$$

又

$$a = u/f, \quad t = h,$$

由(14)式得

$$F = \frac{f h \omega_{\max}}{(z_0 - h) \tan \phi_{\max} + z_0 \omega_{\max}}, \tag{18}$$

可见等效焦距 F 随折反射系统的长度 z_0 、高度方向的视场 ϕ_{\max} 增大而减小。

4 实 验

用 Mintron1881EX CCD 和 12 mm 焦距的透镜组成摄像头设计反射镜,建立水平场景无畸变的折反射全景成像系统。

摄像头投影中心至反射镜顶点的距离 $z_0 = 120$ mm,视场角 $\phi_{\max} = 73^\circ$,令 $h = -3000$ mm,则 $u = 55318$,反射镜面形的数字解如图 5 所示。采用多项式 $z = A_0 + A_1x^2 + A_2x^4 + A_3x^6 + A_4x^8 + A_5x^{10} + A_6x^{12} + A_7x^{14} + A_8x^{16}$ 对反射镜面形的数值解进行多项式拟合,系数值见表 1。

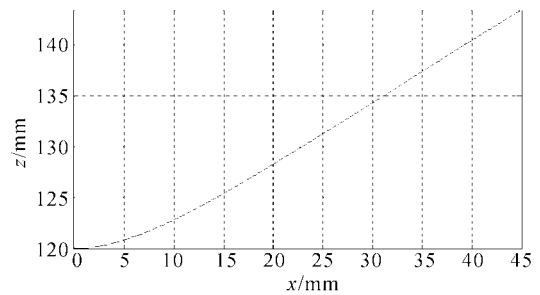


Fig. 5 The numeric solution of a mirror in a catadioptric omnidirectional imaging system with non-distorted image for horizontal scene

图 6 为系统成像模拟,由摄像头投影中心发出的经像素平面内等间距像素点的光线族反射后,在距离投影中心 3000 mm 的水平面内的交点基本上是等间距的,成像模拟结果表明该系统具有水平场

景无畸变的特征。图 7 为最后设计出的反射镜剖面图,反射镜口径为 50 mm,厚度为 11.25 mm。

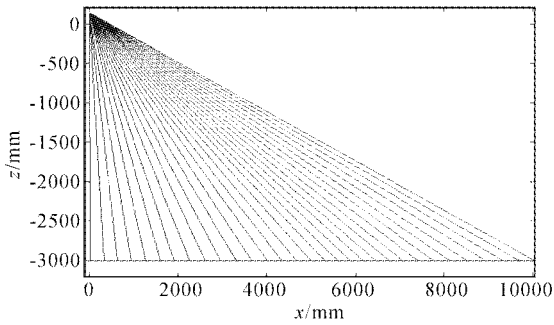


Fig. 6 Imaging simulation for a catadioptric omnidirectional system with non-distorted imaging for horizontal scene

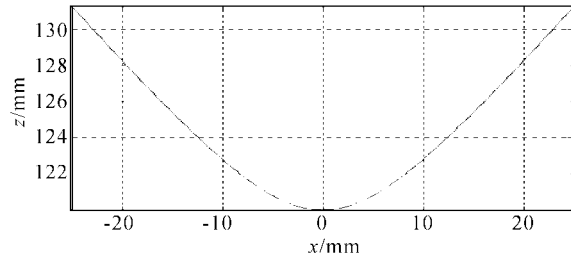


Fig. 7 The cross section of a mirror in the catadioptric omnidirectional system with non-distorted imaging for horizontal scene

Table 1 Shape coefficient of mirror

A_0	0.0175938	A_5	$1.2873517 \times 10^{-13}$
A_1	0.0326397	A_6	$-6.4616620 \times 10^{-17}$
A_2	$-5.8014580 \times 10^{-5}$	A_7	$1.7651777 \times 10^{-20}$
A_3	1.1402024×10^{-7}	A_8	$-2.01539650 \times 10^{-24}$
A_4	$-1.5310146 \times 10^{-10}$		

图 8 为水平场景无畸变的折反射全景成像系统拍摄的实验图像,室内场景中天花板具有等尺寸方格图案,系统光轴与天花板垂直。图 9 为双曲面折反射全景成像系统拍摄的实景图像,图 10 为图 9 经



Fig. 8 Omnidirectional image (taken by a catadioptric omnidirectional system with non-distorted imaging for horizontal scene)

过逆投影变换的透视全景图像。可以看出双曲面折反射全景成像系统的实景图像中天花板具有严重变形,而其透视全景图像和水平场景无畸变的折反射全景成像系统的实景图像中天花板均无变形。

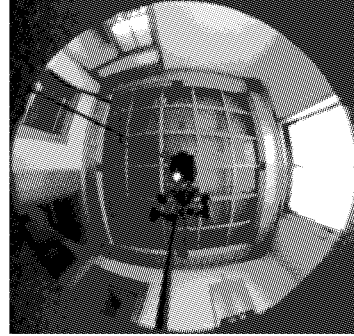


Fig. 9 Omnidirectional image with distorted imaging for horizontal scene (taken by a hyperboloidal catadioptric omnidirectional system)

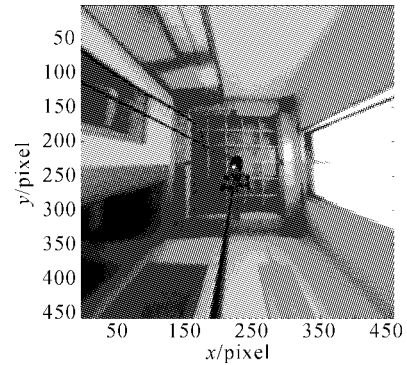


Fig. 10 Perspective omnidirectional image

结论 基于透视成像模型,建立了一套较完整的水平场景无畸变的折反射全景成像系统设计方法,推导了水平场景无畸变的成像系统中反射镜面形的微分方程和确定系统参量的公式,讨论了系统的近似透视成像性质;设计制作了反射镜,建立了水平场景无畸变的折反射全景成像系统,用该系统的实验图像与双曲面折反射全景成像系统的实景图像和透视全景图像进行了比较,说明系统设计方法是正确和有效的。本文为满足监视和计算机视觉中对实时性的要求,建立了直接获得近似透视全景图像的非单视点折反射全景成像方法和近似透视成像模型。

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 Kamazawa K, Yagi Y, Yachida M. Omnidirectional Imaging with Hyperboloidal Projection. *Proc. Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE Industrial Electronics Society, 1993. 1029~1034
- 4 Hicks R A, Bajcsy R. Reflective surfaces as computational sensors. *Image and Vision Computing*, 2001, **19**(11):773~777
- 5 Hicks R A, Bajcsy R. Catadioptric Sensors That Approximate Wide-angle Perspective Projections. *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Hilton Head Island, South Carolina, 2000. 545~551

Catadioptric Omnidirectional System with Undistorted Imaging for Horizontal Scene

Zeng Jiyong Su Xianyu

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064)

(Received 3 May 2002; revised 14 June 2002)

Abstract: A complete method based on perspective imaging model is established to design catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging for horizontal scene. The approximate perspective imaging characteristics about this imaging system is analyzed. A mirror has been designed, and a catadioptric omnidirectional system with undistorted imaging for horizontal scene has been developed. The image taken by this catadioptric omnidirectional system is compared with the real image taken by hyperboloidal omnidirectional system and its perspective omnidirectional image.

Key words: optical design; space undistorted; catadioptric system; omnidirectional image

致作者的重要告示

为了推进学术期刊的电子化、网络化,加快稿件处理速度,本刊鼓励广大作者采用电子版方式(通过电子信箱或寄软盘、光盘)投稿。凡以电子版方式投稿的,可以不必寄打印稿,只需同时寄来单位证明即可。

投稿、回复以及联系地址或方法变动时请及时告知有效 E-mail、电话、手机号、QQ 号,以便及时联系。

《光学学报》编辑部
2003 年 4 月 10 日