

全球面无死角的全方位视觉传感器的设计^①

汤一平^② 柳圣军 郭世冬 朱艺华

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310032)

摘 要 为了获取整个球面全景图像,提出了全方位视觉传感器(omni-directional vision sensor, ODVS)的二次折反射的成像原理并设计了折反射镜面。利用 4 阶 Runge-Kutta 算法求得了镜面曲面的数值解,通过组合镜头的设计实现 ODVS 与广角镜头的集成以消除 ODVS 的固有死角,然后,将两台无死角的 ODVS 装置以背靠背的方式进行连接,并将所获取的全景视频图像进行展开及无缝拼接得到 $360^{\circ} \cdot 360^{\circ}$ 视频图像。实验结果表明,所设计的 ODVS 装置可以获取全球面的视场范围,在视频监控领域有重要的应用价值。

关键词 全方位视觉传感器(ODVS), 折反射成像原理, Runge-Kutta 算法, 组合镜, 球面全景视频图像

0 引 言

随着传感器技术和图像处理技术的迅猛发展,全景成像技术越来越受到学者的关注^[1-4]。全景成像技术可应用于军事、医学、安保等领域,全景成像技术研究已成为计算机视觉领域的重要研究课题之一。当前获取全景图像的方法主要有旋转成像、多摄像机成像、鱼镜头成像和折反射成像四种。本文探讨了现有的全景成像技术,并对原有的全方位视觉传感器(omni-directional vision sensor, ODVS)提出了改进的思路和方法,即采用平均角分辨率设计,采用二次折反射成像技术,通过对两个对称的 ODVS 采集的图像的融合实现 $360^{\circ} \cdot 360^{\circ}$ 全球面全景图像。实验证实,这种方法可获取全球面的视场范围,在视频监控领域有重要应用价值。

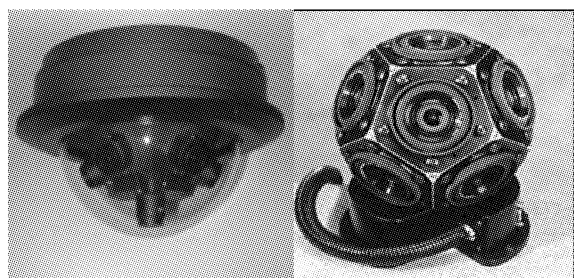
1 相关研究

Herman^[5]等学者利用旋转成像技术将摄像机绕与光轴垂直的固定轴旋转一周拍摄多幅图像,然后将这些图像进行拼接得到全景,该方法比较耗时,不满足实时性要求。多摄像机成像装置如图 1 所示,美国 IMC 公司开发的多像机成像装置^[6],是多个摄像机朝不同的方向拍摄图像,然后将这些图像拼接

融合得到全景图。图 1(a)是一种多摄像头所构成的半球面 ODVS,通过该装置可以获得半个球面内的视频图像;图 1(b)是一种多摄像头所构成的全球面 ODVS,通过该装置可以获得整个球面内的视频图像。这种多摄像头所构成的 ODVS,制造成本高,拼接算法处理比较耗时,实现视频数据融合需要很高的计算代价。另一种方式是通过鱼镜头来获取全景图像,但是这种方式需要非常短的焦距,可将成像系统的视野扩大到半个球或更大的场景^[7]。这种成像存在较大的图像畸变,且畸变模型不满足透视投影条件,无法从所获取的图像中影射出无畸形的透视投影图像。此外图像的分辨率不均匀及价格较昂贵。折反射 ODVS 是由一个 CCD 摄像机和正对着摄像头的一个反射镜组成。在水平方向能够获取 360° 视角范围,但在垂直方向还存在约 120° 左右的死角范围^[8]。Koyasu^[9]利用一对双曲面镜和投影镜头组成全景视觉系统,但系统仍存在着固有死角。我国沈阳自动化所的朱枫研究员在这方面也开展了开拓性的研究工作^[10],提出了采用一个普通相机实现全向立体视觉的设计方法,该装置具有实现成本低等优点,但是由于采用一个摄像机来拍摄两个不同景深折反射镜面的全景视频图像,必然会造成其中一个全景视频图像的模糊,另外仍难以得到无死角的、全球面的全景视频图像。

① 国家自然科学基金(60673177)和浙江省科技厅重大科技(2006C11202)资助项目。

② 男,1958 年生,博士,教授;研究方向:全方位视觉传感器应用,计算机视觉,普适计算技术;联系人, E-mail: typ@zjut.edu.cn (收稿日期:2008-07-11)



(a)半球面摄像装置 (b)全球面摄像装置

图1 多摄像机全景摄像装置

针对以上系统设计的不足,本文提出了一种获取整个球面视频图像方便和实时处理能力强的,新型的,制造成本低的全球面 ODVS 结构。要做的工作首先是设计一种具有平均角分辨率的 ODVS 以便于后面两个 ODVS 进行无缝拼接,接着分析原有 ODVS 垂直方向死角产生原因并在 ODVS 的结构上进行改进,然后通过展开算法进行 $360^\circ \cdot 360^\circ$ 视频图像的无缝拼接,实现一种 $360^\circ \cdot 360^\circ$ 全球面的 ODVS。

2 $360^\circ \cdot 360^\circ$ 全球面的 ODVS 设计

2.1 ODVS 的结构设计

首先,设计一种无死角的 ODVS(图2)。这种 ODVS 能实时感知半球面以上的所有的物点^[7],视角范围和图1(a)半球装置相同。全方位视觉装置如图2所示:将摄像机配置在双曲面镜的后面,摄像机的镜头安置在一次折反射镜面的视点处,一次折反射镜面的中间留有一个小孔,摄像机能通过小孔拍摄到一次折反射镜面的前面的视频信息;在一次折反射镜面的前面配置有一个二次折反射镜面,二次折反射镜面的中部留有一个小孔,在该小孔中嵌入一个广角镜头;全方位视频信息在一次折反射镜面折反射后经二次折反射镜面进行二次折反射,然后通过一次折反射镜面的小孔在摄像装置中成像;另外在一次折反射镜面前方的实物通过广角镜头在广角镜头与摄像装置镜头之间成像,称为第一成

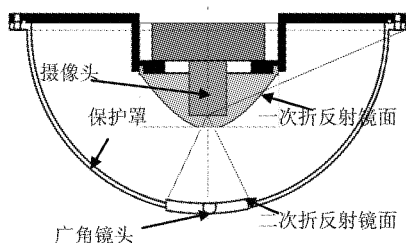


图2 无死角 ODVS 的结构

像点,该成像点通过一次折反射镜面的小孔在摄像部件镜头的焦点处成像。通过这样设计后的 ODVS 消除了二次折反射镜面后面的死角部分。

在图2所示的无死角 ODVS 的基础上要获取实时 $360^\circ \cdot 360^\circ$ 大范围全方位图像,至少要解决以下2个方面的关键问题:(1)在结构设计上能将两台无死角全方位视觉装置按照要求结合在一起,并能满足无遮挡的要求;(2)集成后的两台全方位视觉装置之间的过渡区域的成像是连续的,并能满足某种成像规律,以便进行视频信息的融合。

2.2 折反射镜面的设计

为了使得集成后的两台 ODVS 之间的过渡区域的成像是连续的,本文中对每台集成的 ODVS 以平均角分辨率进行设计,以便使成像平面上的点与入射角之间具有某种线性关系。下面说明平均角分辨率设计的方法。

要进行平均角分辨率设计,可以归结于折反射镜面曲线的设计^[11]。如图3所示,空间上的一个光源点 P 的入射光 V_1 在主反射镜面(t_1, F_1)点上进行反射,反射光 V_2 反射到次反射镜面(t_2, F_2)点上再进行反射,反射光 V_3 以角度 θ_1 进入摄像装置的镜头,在摄像单元(CCD 或者 CMOS)上成像。

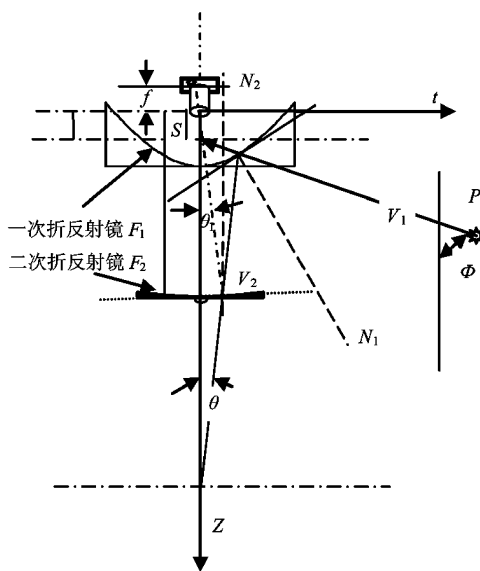


图3 平均角分辨率的二次折反射成像原理

根据成像原理,一次入射光线 V_1 与折反射主轴 Z 的夹角为 Φ ,一次反射光线 V_2 与折反射主轴 Z 的夹角为 θ_2 ,过 P_1 点(t_1, F_1)的切线与 t 轴的夹角为 σ ,法线与 Z 轴的夹角为 ϵ ;二次反射光线 V_3 与折反射主轴 Z 的夹角为 θ_1 ,过 P_2 点(t_2, F_2)的切线

与 t 轴的夹角为 σ , 法线与 Z 轴的夹角为 ε_1 , 基于上述关系可以得到公式

$$\begin{cases} \sigma = 180^\circ - \varepsilon \\ 2\varepsilon = \phi - \theta_2 \\ \sigma_1 = 180^\circ - \varepsilon_1 \\ 2\varepsilon_1 = \theta_1 - \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 ϕ, θ_2, θ_1 分别由 $\tan\phi = \frac{t_1}{F_1(t_1 - s)}, \tan\theta_2 = \frac{t_1 - t_2}{F_2 - F_1}, \tan\theta_1 = \frac{t_2}{F_2}$ 确定, 其中 F_1 是一次折反射镜面曲线, F_2 是二次折反射镜面曲线。

利用三角关系进行简化整理, 得到公式

$$F_1'^2 - 2\alpha F_1' - 1 = 0 \quad (2)$$

$$F_2'^2 - 2\beta F_2' - 1 = 0 \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{(F_1 - s)(F_2 - F_1) - t_1(t_1 - t_2)}{t_1(F_2 - F_1) - (t_1 - t_2)(F_1 - s)} \\ \beta &= \frac{t_2(t_1 - t_2) + F_2(F_2 - F_1)}{t_2(F_2 - F_1) - F_2(t_1 - t_2)} \end{aligned}$$

解公式(2)、(3)可以得到公式

$$F_1' = \alpha \pm \sqrt{\alpha^2 + 1} \quad (4)$$

$$F_2' = \beta \pm \sqrt{\beta^2 + 1} \quad (5)$$

式中: F_1' 为 F_1 曲线的微分, F_2' 为 F_2 曲线的微分。为了使得成像平面上的点与入射角之间具有某种线性关系, 就是要建立一种像素点 P 到 Z 轴距离与入射角 ϕ 之间的线性关系, 用公式

$$\phi = a_0 \cdot P + b_0 \quad (6)$$

来表示, 式中: a_0, b_0 是任意参数。

将摄像单元的焦距作为 f , P 为像素到 Z 轴的距离, 在二次反射镜面上的反射点为 (t_2, F_2) 。根据成像原理, P 可以由公式

$$P = f \cdot \frac{t_2}{F_2} \quad (7)$$

表示。将式(7)代入式(6), 可得公式

$$\phi = a_0 \cdot (f \cdot \frac{t_2}{F_2}) + b_0 \quad (8)$$

满足公式(8)的镜面曲线设计符合平均角分辨率要求。

根据折反射原理, 公式(8)可以用公式

$$\tan^{-1}(\frac{t_1}{F_1 - s}) = a_0 \cdot (f \cdot \frac{t_2}{F_2}) + b_0 \quad (9)$$

表示。然后对公式(2)、(3)、(9), 通过 4 阶 Runge-Kutta 算法求 F_1 和 F_2 的数字解, 这样计算得到的一次折反射镜面和二次折反射镜面曲线能实现平均角分辨率。图 4 是利用 4 阶 Runge-Kutta 算法求 F_1 和

F_2 的数字解的图。

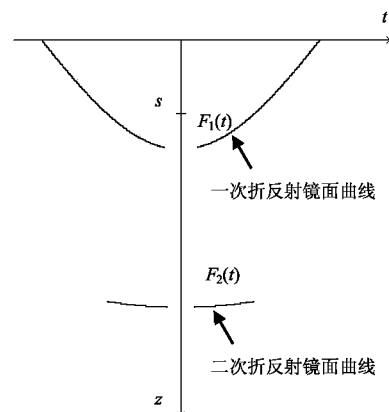


图 4 折反射镜面曲线的数字解

2.3 组合镜头的设计

上述的 ODVS 的设计, 从 ODVS 的视点来看, 由于被二次折反射镜面所遮挡二次折反射镜面后面的视频信息是不可见的, 为了获取二次折反射镜面后面的视频信息, 本文中在二次折反射镜面的中心部位开设了一个圆孔, 在该圆孔内嵌入了一个广角镜头, 该广角镜头与摄像装置镜头组合成一个组合镜头, 如图 2 所示。图 5 示出了摄像装置镜头与广角镜头的位置关系图。在图 5 中将广角镜头配置在一次折反射镜的前方和二次折反射镜面上, 摄像部件镜头、广角镜头、一次折反射镜和二次折反射镜的中心轴配置在同一轴心线上。通过一次折反射镜上的

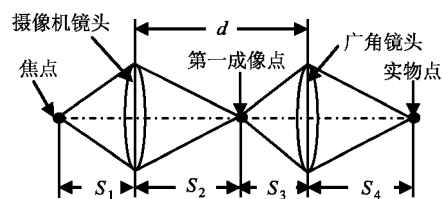


图 5 摄像装置镜头与广角镜头的位置关系

圆孔在广角镜头与摄像部件镜头之间成像(称为第一成像点), 该成像点通过摄像部件镜头在视点处成像。这里将摄像部件镜头的焦距距离作为 f_1 , 广角镜头的焦距距离作为 f_2 , 摄像部件镜头与摄像部件镜头的焦点的距离作为 S_1 , 从摄像部件镜头到第一成像点的焦点距离作为 S_2 , 从广角镜头到第一成像点的距离作为 S_3 , 从广角镜头到实物点的距离作为 S_4 , 根据镜头的成像公式可以得到以下关系式:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \quad (10)$$

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{S_3} + \frac{1}{S_4} \quad (11)$$

$$d = S_2 + S_3 \quad (12)$$

要使公式(12)成立的话,也就是将图4中的从第一折反射镜面后的摄像部件镜头距离为 d 的地方配置广角镜头,就可以得到图5中图像中部所显示的广角成像图。但是本发明中是将广角镜头配置在第二折反射镜面上,因此将摄像部件镜头与广角镜头的之间的距离 d 作为一个约束条件,只有通过设计广角镜头的焦点距离 f_2 来满足公式(12)的要求。对于图4中将摄像部件镜头与广角镜头作为一个组合镜头来考虑的话,其焦距 f_3 可以由式

$$\frac{1}{f_3} = \frac{(f_1 + f_2 - d)}{f_1 \cdot f_2} \quad (13)$$

来表示。另外,将合成镜头的直径作为 D ,其放大倍数可以由下式来表示:

$$n = \frac{D}{f_3} \quad (14)$$

为了将合成镜头的视场与 ODVS 的死角部分相吻合,在设计合成镜头时需要满足以下公式:

$$n = \frac{D}{f_3} = 2\theta_{1\max} \quad (15)$$

式中, $\theta_{1\max}$ 是二次反射光线 V_3 与折反射主轴 Z 的最大夹角。

2.4 360°·360°全球面 ODVS 视场获取

通过上述的设计,每个 ODVS 的视场范围可以达到 $240^\circ \cdot 360^\circ$,并且具有相同的平均角分辨率,因此只要将两个 ODVS 背靠背的方式用连接件进行固定,并保证两个 ODVS 的轴心线重叠,那么组合后的无死角的全球面 ODVS 的视场范围可以达到 $360^\circ \cdot 360^\circ$,存在着两个 ODVS 同时能获取图像的重叠视场范围,该重叠视场范围为约 60° ,如图6所示。

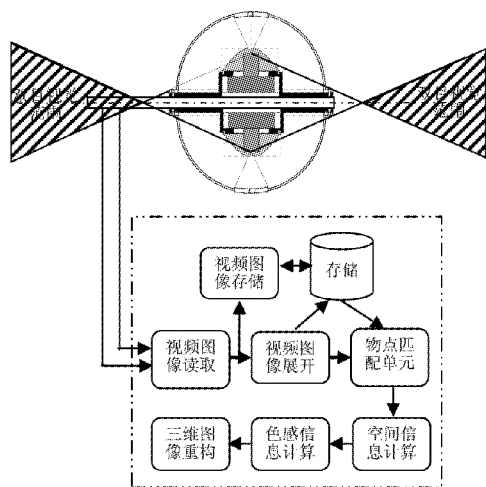
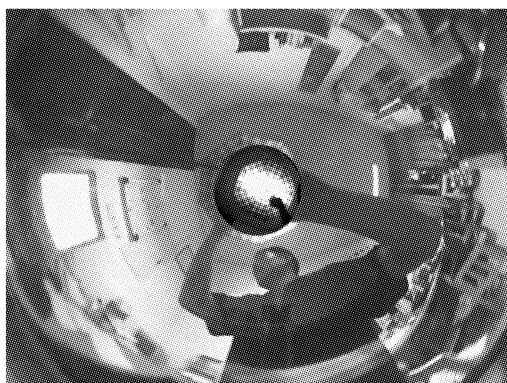
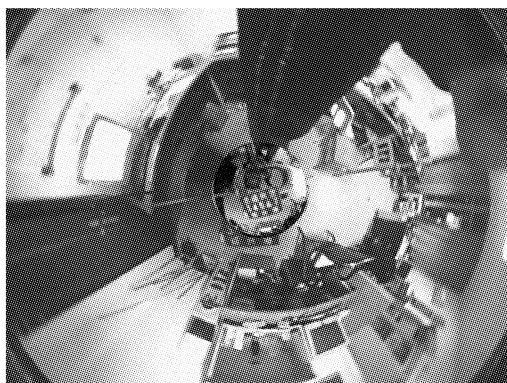


图6 全球面 ODVS 及其图像处理流程

由于每个 ODVS 通过摄像部件镜头与广角镜头的组合方式所拍摄到的图像位于拍摄图像的中间,如图7(a)、图7(b)所示,在展开全方位图像时需要将该中心部分的图像单独分离出来,然后对全方位图像进行展开,展开算法中水平方向的计算步长为 $\Delta\beta = 2\pi/l$;垂直方向的计算步长为 $\Delta m = \phi_{\max} - \phi_{\min}/m$ 。式中, $\phi_{\max}$ 为全景原图最大有效半径 $R_{\max}$ 对应的场景光线入射角, $\phi_{\min}$ 为全景原图最小有效半径 $R_{\min}$ 对应的场景光线入射角。关于展开的具体实现方式请参考文献[8]。



(a)上部 ODVS 拍摄的全景原图



(b)下部 ODVS 拍摄的全景原图

图7

具体实现时首先是将两台具有相同平均角分辨率的无死角 ODVS 用一连接件进行连接,摄像机的视频线与电源线通过连接件中的孔引出,如图8所示。每个 ODVS 的摄像机的视频线分别接入视频图像读取单元,由于每个 ODVS 的摄像机的视频获取信息能达到 $360^\circ \cdot 240^\circ$ 视场范围,并且在垂直(入射角)方向上具有平均角分辨率,因此能容易实现两个 ODVS 之间的图像信息融合。视频图像读取单元分别读取每个 ODVS 的摄像机的视频信息并暂时保存在每个 ODVS 相对应的存储空间内(ODVStmp1、ODVStmp2),两个 ODVS 所获得的全景图像如图7

(a)、图 7(b)所示。视频图像展开单元不断地读取存储空间(ODVStmp1、ODVStmp2)内的原始视频信息,分别将组合镜头所拍摄的圆形视频图像分割出来,如图 9 所示。然后通过展开算法对每个 ODVS 的摄像机所获取的视频信息进行展开运算,每个 ODVS 展开拼接后的图像如图 10 所示。在展开图中横坐标表示方位角,纵坐标表示入射角。拼接的原则是对齐上下两个 ODVS 的方位角,使得空间上的同一物点在拼接图中在一条垂直线上。本文中将拼接后的球面全景图没有包含两个 ODVS 的重叠部分,只是在展开时将每个 ODVS 在入射角为 90° 时进行拼接。如果要进行三维立体物点匹配计算、空间信息计算、三维图像重构,就需要将 ODVS 的重叠部分同时进行计算。由于篇幅限制,本文不展开讨论。

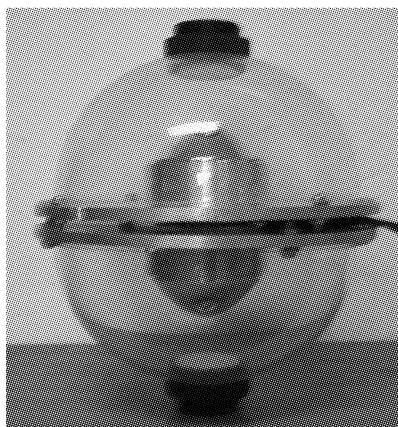


图 8 全球面 ODVS 实物图

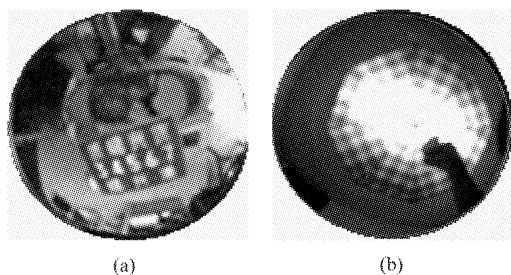


图 9 上下 ODVS 的组合镜头所得到的视频图



图 10 ODVS 视频图像的展开拼接图

3 实验结果

全球面 ODVS 实物图如图 8 所示,两个 ODVS 背靠背的方式用连接件进行固定。其视场范围与图 1(b)所示的全球面摄像装置相同。上、下部 ODVS 拍摄得到的全景原图分别如图 7(a)与图 7(b)所示。图像中间部分是广角镜头的成像部分,即上、下部 ODVS 二次折反射镜面后面的死角部分,如图 9(a)与 9(b)所示。在图 7(b)中船名牌受到下部 ODVS 的二次折反射镜面部分遮挡,但是通过组合镜头还能获得船名牌的视频图像,如图 9(b)所示;同理,格子的雨伞一部分被上部 ODVS 的二次折反射镜面部分遮挡,然而通过组合镜头还能获得格子的雨伞的视频图像,如图 9(a)所示。

通过对图 7(a)与 7(b)的全景图进行展开并拼接融合后的视频图像如图 10 所示。从实验图像处理结果可以看出,本文所采用的全球面 ODVS 能实现实时捕捉整个 $360^\circ \cdot 360^\circ$ 球面内的监控视频图像。今后进一步改进之处是,解决广角镜头成像与 ODVS 图像的融合,利用全球面 ODVS 的 $360^\circ \cdot 360^\circ$ 视场进行三维重建与测距。

4 讨论

为了实时获取 $360^\circ \cdot 360^\circ$ 的整个球面视场范围的视频,本文提出了一种二次折反射的 ODVS 成像原理和结构,并依此原理设计了折反射镜面,利用 4 阶 Runge-Kutta 算法求得了镜面曲面的数字解,通过组合镜头的设计方法将 ODVS 与广角镜头集成在一起消除原有 ODVS 的固有死角,接着将两台无死角的 ODVS 装置以背靠背的方式进行连接,最后通过展开算法进行 $360^\circ \cdot 360^\circ$ 视频图像的无缝拼接。实验结果表明,本文所设计的 ODVS 装置可以实时获取 $360^\circ \cdot 360^\circ$ 的视场范围视频图像;在赛扬 1.7 的 CPU 和 512M 内存的 WindowsXP 操作系统下,利用我们所开发的全球面 ODVS 展开软件进行了实验研究,当两个摄像头的分辨率均采用 $640 \cdot 480$ 时,系统每秒能处理 15 帧图像,基本上能满足实时视频数据采集的要求。

由于对组成全球面 ODVS 的每个 ODVS 采用了平均角分辨率设计,使得背靠背两个 ODVS 的参数完全一致且在成像平面上的点与入射角之间成线性关系,从而保证了集成后的两台 ODVS 之间的过渡

区域的成像是连续性。

在镜面设计方面,本文通过 Runge-Kutta 算法求得 ODVS 镜面的数字解,通过仿真和镜面实际折反射实验,这种设计方法可以指导 ODVS 镜面的设计,为 ODVS 折反射镜面设计提供了理论支持。

图 10 所示的展开拼接图中存在着拼接误差,其原因是上下两个 ODVS 的中心轴线在制造和装配过程中存在着误差,难以保证两个背靠背的 ODVS 在同一轴心线上,但是该问题可以在工艺装配时通过保证同轴度的方式得到解决。

5 结 论

本文所设计的 $360^{\circ} \cdot 360^{\circ}$ 全球面 ODVS 的有益效果主要表现在:(1)获取实时的 $360^{\circ} \cdot 360^{\circ}$ 全方位立体视频图像,并通过几何计算得到整个监控球面的全景图像,跟踪的监控物体不会出现丢失;(2)采用了平均角分辨率的 ODVS 设计,使得整个监控球面的图像无形变,解决了折反射 ODVS 的图像失真,为实现对大空间内的快速移动目标对象的实时跟踪提供了完整的理论体系和模型;(3)由于对组成全球面全方位视觉传感装置的每个 ODVS 采用了平均角分辨率设计,采集图像的两个摄像机的参数完全一致,具有极好的对称性,在球面坐标的情况下获取实时视频图像,能实现快速的点与点的匹配,为后续的立体图像处理提供了极大的方便;(4)由于 ODVS 的设计采用的是折反射技术,因而不存在固定的焦距的问题,在任何区域范围内图像的清晰度是一样的;

(5)采用了二次折反射成像技术,容易实现小型化、微型化。可广泛应用于军事侦察、航空航海、虚拟现实等领域。

参考文献

- [1] Peleg S, Ben-Ezra M, Pritch Y. Omnistereo: panoramic stereo imaging. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(23): 279-290
- [2] Brown M, Lowe D G. Automatic panoramic image stitching using invariant features. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 74 (1): 59-73
- [3] Shum H Y, Szeliski R. Systems and experiment paper: construction of panoramic image mosaics with global and local alignment. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 36(2): 101-130
- [4] Nalwa V S. Panoramic viewing system with a composite field of view. US patent: 6700711, 2004
- [5] Peleg S, Herman J. Panoramic mosaics by manifold projection. In: *Proceedings of the IEEE Conference on CVPR*, San Juan, Puerto Rico, 1997. 338-343
- [6] David M. Immersive imaging method and apparatus. US Patent: 6141034, 2000
- [7] 汤一平. 无死角的全方位视觉传感器. 中国专利, 200710066757. 2007-01-17
- [8] 汤一平, 叶永杰, 朱艺华等. 智能全方位视觉传感器及其应用研究. *传感技术学报*, 2007, 20(6): 1316-1320
- [9] Koyasu H, Miura J, Shirai Y. Recognizing moving obstacles for robot navigation using real-time omnidirectional stereo vision. *Journal of Robotics and mechatronics*, 2002, 14 (2): 147-156
- [10] 苏连成, 朱枫. 一种新的全向立体视觉系统的设计. *自动化学报*, 2006, 32(1): 69-74
- [11] Pajdla T, Svoboda T. Epipolar geometry for central catadioptric cameras. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 49(1): 23-37

Design of omni-directional vision sensors with full sphere view and without dead angle

Tang Yiping, Liu Shengjun, Guo Shidong, Zhu Yihua

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032)

Abstract

In order to obtain a panoramic image with a full sphere view, this paper presents the two-catadioptric imaging principle of omni-directional vision sensor (ODVS), by which catadioptric mirrors can be made. The reflectors curvilinear numeric solutions of the catadioptric mirrors are obtained by means of the fourth order Runge-Kutta algorithm. the problem of dead angle existing in current ODVSs is solved through designing the combination lens, in which ODVSs and wide-angle lens are put together. In addition, two ODVS devices without dead angle are fixed in a back-to-back way, and then, the captured images by the two ODVS devices are unwrapped and seamlessly composed so that an image with 360° by 360° is obtained. The experimental results show that the proposed ODVS devices are capable of capturing panoramic images with a full sphere view and can be used in intelligent video surveillance fields.

Key words: omni-directional vision sensor (ODVS), catadioptric imaging principle, Runge-Kutta arithmetic, combination lens, sphere panoramic image