

全景视觉系统发展与应用

王 健¹, 张振海¹, 李科杰¹, 许 涛¹, 石志国², 张东红³, 邵海燕^{1,4}, 张 亮¹

(1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2. 北京科技大学 计算机与通信工程学院, 北京 100083;

3. 合肥市新星应用技术研究, 合肥 230031; 4. 济南大学 机械学院, 济南 250022)

摘要: 全景视觉系统具有视场范围大的特点, 并且系统结构种类繁多, 各有特色, 已广泛应用在机器人导航、空间探测、视频监控、虚拟现实、环境感知技术等民用或军用领域; 全景视觉系统由全景视觉光学成像系统、图像传感器、图像处理系统和输出图像显示等组成; 文章主要从全景视觉成像角度对全景视觉系统进行分类, 并详细介绍了每一类的全景成像原理、发展现状和应用情况, 最后对每种类型全景视觉系统的优缺点给予分析总结。

关键词: 全景视觉; 图像拼接; 鱼镜头; 反射镜式全景视觉; 折反射全景环形透镜

Development and Application of Panoramic Vision System

Wang Jian¹, Zhang Zhenhai¹, Li Kejie¹, Xu Tao¹, Shi Zhiguo², Zhang Donghong³,
Shao Haiyan^{1,4}, Zhang Liang¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Computer and Communication Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

3. Hefei XinXing Application Technology Research Institute, Hefei 230031, China;

4. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: Panoramic vision system has been widely used in robot navigation, space exploration, video surveillance, virtual reality, environmental sensing technology, and many other areas of civilian or military, for its characteristics of large angle of view and a wide range of system structure, its own special features. Panoramic vision system is composed by the panoramic vision optical imaging system, image sensor, the image processing system and the output image display, etc. Panoramic vision system are classified according to the view of panoramic vision imaging in this paper, also each type of imaging principle, the development status quo and newer applications are detailed. Finally, the advantages and disadvantages of each type of panoramic vision system are analyzed and summarized.

Key words: panoramic vision; image mosaic; fisheye lens; reflector based panoramic vision; panoramic annular

0 引言

“全景”的概念最早是在欧洲艺术领域提出, 随后工程师们渐渐发现“全景”优点和发展前景, 全景应用由艺术领域转向了工程。全景视觉, 也称为全向视觉, 20世纪60年代末至70年代初, 全景视觉系统逐步兴起, 受到学者们的重视。其中美国学者 Donald W. Rees 于 1970 年提出了全景视觉传感器 Omni-Directional Vision Sensor (ODVS)^[1], 并申请了专利。此后, 全景视觉系统的研究分别由 Yagi, Hong 和 Yamazawa 在 1990 年、1991 年和 1993 年进一步拓展^[2-4]。

全景视觉系统的成像技术自首次提出以来, 其相关理论和工程应用研究得到了世界各国学者们的广泛关注, 目前已经成为计算机视觉系统的研究热点之一。全景视觉系统具有大视

场、一体化成像、空间球面坐标定位、成像旋转对称、沉浸感强等优点, 并且已在许多领域得到了广泛应用。在军用领域, 全景视觉系统可以为指挥员提供更全面的决策信息; 在民用领域, 如十字路口、工厂车间、地铁站台、银行大厅等场合, 使用全景视觉系统可以对各个角度进行全方位视频监控, 而不必在同一地点架设多个监控摄像机; 在视频会议中, 全景视觉系统可以保证参与者坐在任意位置都能够进入视场; 在外太空探测领域, 如对火星、月球表面的探测, 一帧全景图像可以涵盖更全面的空间信息。全景视觉系统因其大视场、全方位的成像特点, 应用日趋广泛。

1 全景视觉系统

全景视觉系统由全景视觉光学成像系统、图像传感器、图像处理系统和输出图像显示等主要部分组成。依据全景视觉的构成形式的不同, 可分为 5 种形式: 第一种是云台相机旋转式结构, 称为旋转式全景视觉系统, 其实物如图 1 (a) 所示, 这种方式是相机通过云台的水平旋转获取水平方向 360°全向多幅图像, 采用图像拼接算法得到全景图像; 第二种是基于鱼镜头或超广角镜头的全景视觉系统, 鱼镜头的光学系统组成如图 1 (b) 所示, 这种方式可以获得大视场的全景图像; 第三种是多相机拼接组合方式, 在不同方位安装多台相机获取不同方位图像, 再采用图像拼接算法, 由多相机拼接成全景视觉图像, 如图 1 (c) 所示; 第四种是由一个曲面反射镜与一

收稿日期: 2014-02-07; 修回日期: 2014-03-29。

基金项目: 国防基础科研项目 (C××20110003, A××20110005 和 A××20132010); 国家自然科学基金面上项目 (61273346); 教育部博士点基金 (20121101120009); 北京市自然科学基金 (4122049); 北京理工大学“优青资助计划”项目 (2012YG0203); 北京理工大学基础研究基金项目 (2013CX04031, 2011CX02023 和 2014CX××××)。

作者简介: 王 健 (1984-), 男, 内蒙古兴河县人, 博士研究生, 主要从事感知与测控技术方向的研究。

李科杰 (1946-), 男, 山东龙口人, 教授, 主要从事传感与测控技术、机器人技术、微小型系统技术方向的研究。

台摄像机组成的反射式全景视觉系统, 实物如图 1 (d) 所示; 第五种是由折射反射透镜组与图像传感器组成的折反式全景视觉系统, 实物如图 1 (e) 所示。



图 1 全景图像系统

1.1 云台旋转式全景视觉系统

它的工作方式: 相机安装在云台上, 云台按要求绕某一垂直轴线旋转, 从而获取不同角度的多幅图像序列, 将得到的序列图像通过图像拼接算法进行无缝拼接, 形成全景图像^[5]。该系统要求云台有精确的转动机构。图 2 为旋转式图像拼接算法原理示意图, 相机通过围绕固定点旋转扫描得到全景视场。

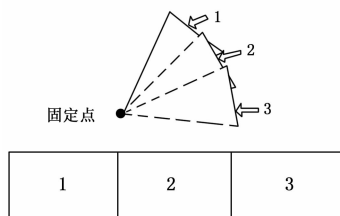


图 2 旋转式软件拼接原理示意图

旋转式全景相机问世较早, 1844 年德国人已经试验成功全景摇头转机。1920 年, J. E Stromberg 等人发明了旋转式 360°全景相机。1922 年, S. Richards 设计可以调整镜头和转轴的位置、底片放置方式的方案, 研制出高质量旋转式全景相机。旋转式全景相机在中国使用的历史也比较长, 主要是照相馆用其拍摄团体照, 我国的上海、天津等地的照相机厂都曾生产过, 至今仍有新的品种, 但以胶片相机为主。目前国外已有彩色线阵 CCD 旋转式数码相机, 在进口的同类相机中, 瑞士生产的“环摄”(Roundshot) 转机最为著名, 由瑞士 Seitz 公司生产的一款像素过亿的全景数码相机, 像素可达 4 亿以上。这款 360 度全景相机每次拍摄大概要花费 2 s 的时间, 采用 80 mm 的镜头时像素可达 4.7 亿。此相机拍摄相片的分辨率可达 7 500×21 250 像素^[6]。

2004 年 1 月美国“勇气”号火星探测器登陆火星, 上面安装有旋转式全景视觉系统。美国宇航局公布的“勇气”号火星探测器拍摄的火星三维全景黑白照及火星表面高分辨率全景彩照, 都是由旋转式全景视觉系统获得。

1.2 鱼镜头全景视觉系统

鱼镜头是一种短焦距 ($f=6\sim 16\text{ mm}$)、大视场 (视场角约为 180°有些鱼镜头甚至 270°) 成像镜头。它是一种极端的广角镜头, 为使镜头达到最大的视场角, 它前面的光学透镜似鼓起的鱼眼, 鱼镜头由此得名。鱼镜头的光学系统, 由于获得大视场角, 鱼镜头存在较大的桶形畸变, 除了图像中心的景物保持不变, 其它本应水平和垂直的景物沿各个方向从

中心向外辐射, 发生较大的畸变。

鱼镜头的发展经历了从水下鱼眼的简单模仿到目前 270°超大视场鱼镜头过程^[7]。1919 年, R. W. Wood 在一个装满水的容器上盖一块玻璃板, 构成鱼眼相机来实现超广角摄影, 这套装置是对水下鱼眼最简单的模仿。1922 年 W. N. Bood 改进了 R. W. Wood 的装置, 用半球玻璃透镜取代装满水的容器构成全景成像装置。1923 年, R. Hill 改进 W. N. Bood 的设计, 在半球透镜前面引入一个光焦度绝对值很大的负弯月形透镜, 改进后的镜头能够拍到较好的半球空域的云层照片, 所以这种结构也叫做希尔天空镜头 (Hill sky lens), 之后的鱼镜头设计都沿用这种设计思想。后来一些学者继续对鱼镜头做了改进, 提升了鱼镜头的成像质量。20 世纪 60 年代, 光学自动设计技术的应用, 使鱼镜头的发展更加迅速, 出现了很多像质更加优良的光学结构。1964 年, K. Miyamoto 设计的镜头, $2\omega=180^\circ$, $f=16\text{ mm}$, 不仅使系统像差得到了较好的校正, 并且像面照度的均匀性有了明显的改善。有些鱼镜头视场角能达到 220°, 有的甚至能达到 270°。鱼镜头在摄影、医疗和安全监测等领域都有一定的应用。

1.3 多相机拼接式全景视觉系统

多相机拼接式全景视觉系统的原理就是将多台相机安装在不同的位置来获得全方位视场。此系统也是基于图像拼接的全景成像方式, 每台相机分别采集不同方向同步拍摄的多幅图像, 然后将多幅同步图像进行拼接融合, 生成全景图像。为获取水平方向 360°和垂直方向一定角度的场景信息, 根据不同方位镜头视场的大小确定所需相机个数。如要求该成像设备满足单一视点要求, 则各台相机的光学中心必须重合。目前, 在全景图像应用领域比较常见的就是这种多相机拼接式全景视觉系统。

军用领域, 多相机拼接式全景视觉系统已应用于美国和以色列的最新坦克上。“梅卡瓦”采用了一种被称为“坦克观测系统”新型设备, 该系统由安装在车体不同位置的 4 部摄像机组成, 可以使驾驶员在坦克中获得坦克后方和两侧的视野。北京中泰通科技发展有限公司和上海交大联合研制的 Super-DII 型排爆机器人^[8], 采用了 4 个 CCD 相机视频监控系统形成多方位的全景视觉观察系统。

民用领域, 多相机拼接式全景视觉系统在国外已形成了系列产品。加拿大 Point Grey 公司于 2008 年推出的 Ladybug3 系列高性能 360°全景数字视觉系统, 采用 6 个 CCD 来达到 80% 的全方位球面成像, 5 台分布在侧面, 1 台在顶部。每个 CCD 的最大分辨率为 1 600×1 200, 最终形成 1 200 万像素的 360°全景球面图像。在全分辨率输出无压缩的情况下帧率为 6.5 帧/s, 通过 JPEG 压缩后帧率可以提高到 15 帧/s, 如图 3 所示为 Ladybug3 全景视觉系统及其在汽车导航上的应用。2012 年 12 月推出 Ladybug5 系列全景视觉系统采用了与 Ladybug3 同样的结构, 主要的升级体现在用 2 048×2 448 的 CCD 来替代原来的 1 600×1 200 的 CCD, 且全分辨率输出无压缩的情况下帧率提高到 10 帧。

美国 Immersive Media 公司的专利产品 Dodeca2360 相机系统^[6], 由 11 个不同角度镜头的相机组成, 同时从各个方向捕获高分辨率视频。此系统捕获图像分辨率达到 2 400×1 200, 帧率达到 30 帧/s。Google 地图推出的街景 (street view) 功



图 3 Ladybug3 及其在汽车导航的应用

能, 为美国旧金山海湾地区、纽约、拉斯维加斯、底特律和迈阿密地区提供 360°街景就是采用 Dodeca2360 相机系统。

1.4 反射式全景视觉系统

反射式全景视觉系统是由一台摄像机和一个反射曲面构成, 它是把反射曲面和传统的透射成像透镜组合在一起, 实现大视场成像的一种光学结构, 全景成像投影原理与鱼镜头全景成像的投影原理类似。摄像机垂直放置, 光轴垂直于水平面, 在摄像机上面放置一个曲面反射镜, 反射曲面将与光轴夹角很大的入射光线反射成为夹角较小的光线, 然后经摄像机成像, 从而增大视场。现有的应用于反射式全景视觉系统的反射面有抛物面、椭球面、双曲面等。根据反射面不同, 反射式全景视觉系统又可以分为抛物面反射式全景视觉系统、椭球面反射式全景视觉系统、双曲面反射式全景视觉系统等。

自从 1970 年美国宾夕法尼亚大学 Donald W. Rees 设计了一套双曲反射镜面全景成像系统并成功应用于塔楼士兵监测周围目标后^[1], 各国科研人员对反射式全景视觉系统进一步拓展。Yamazawa 等人利用双曲面反射镜与一个透镜相结合构成双曲面反射式全景成像系统。J. S. Chahl 等人在前人研究基础之上, 具体给出了双曲面反射镜的曲面公式。A. Gardel 等人开展反射式全景嵌入式系统的研究。美国 DARPA 将反射式全景视觉系统用于 Urbie 战术侦察机器人, 主要用于城市地形战术侦察^[8]。



(a) 原始图像 (b) 展开图像

图 4 双曲面反射式全景视觉系统采集图像

国内反射式全景视觉系统的研究工作起步于 20 世纪 90 年代中期, 四川大学曾吉勇博士和苏显渝教授对抛物面反射镜、双曲面反射镜等全景视觉系统的原理、结构、成像特点和展开效果做了比较系统的研究^[9]。哈尔滨工程大学朱齐丹教授开展了高分辨率嵌入式反射全景视频处理系统的研究, 全景图像的分辨率为 $2\ 048 \times 2\ 048$, 如图 4 所示。北京理工大学李科杰、张振海、王健等人正在开展高分辨率高灵敏度抛物面反射式全景视觉系统研究, 作用距离约 1.5 km, 有效全景图像的分辨率为 $2\ 750 \times 2\ 200$, 605 万像素, 帧率接近实时 25 帧, 最低照度可达 0.000 3lx。

1.5 折反射式全景视觉系统

折反射式全景视觉系统采用多次折射和多次反射, 将 360°柱面图像成像于全景环形视场。在折反射式全景视觉光学系统中, 应用比较好的是 PAL (Panoramic Annular Lens) 结构的全景环形透镜, 全景环形透镜是由两个反射面和两个折射面的折反射透镜构成, 它可以将围绕光轴的 360°的全向柱面视场图像成像于平面环形图像, PAL 形成的环形虚像, 由转像透镜

组转换成像于图像传感器上。

图 5 所示为折反射成像原理示意图, 它的几何结构包括两个折射面 (2, 4) 和两个反射面 (1, 3), 从物空间 AB 之间的区域发出的光线从折射面 2 入射, 经过反射面 3 反射后, 再经过反射面 1, 最后通过折射面 4, 成像在 CCD 上的 A_1 和 B_1 点之间。

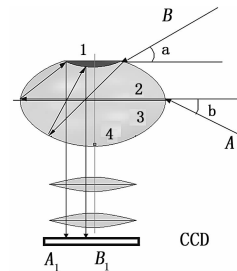


图 5 PAL 成像原理示意图

Greguss 教授首先提出 PAL 全景透镜的结构, 并进一步提出使用抛物面设计 PAL 的两个透射面和两个反射面, 得到更精准的成像结果, 并尝试设计全景环带透镜光学系统。进入 90 年代, Powell 对全景环带光学系统的结构开展深入研究, 首次提出全球面 PAL 结构, 与此同时, 美国阿拉巴马大学 Gilbert 教授、Fair 教授与马奎特大学 Matthys 教授等人对 PAL 光学系统结构开展仿真计算, 并对 PAL 光学系统的应用做了深入探讨, 并详细讨论了物面测绘定位和环带像面展开的方法^[10]。索尼公司研制 360°折反式全景相机分辨率约为 38 万像素, 通过 DSP 全景图像算法程序, 最终输出图像输出 7.5 帧 CCD 全景图像。这种新型的全景摄影装置主要用于监控领域^[6]。

国内开展折反式全景视觉系统研究的单位主要有浙江大学、北京理工大学等。浙江大学开展了较长焦距全景环带成像光学系统研究, 设计的小口径 PAL 结构的视场角为 50°全景成像光学镜头。北京理工大学李科杰、张振海首次研制折反式微光全景视觉系统, 成像视场大小为水平方向 360°, 垂直方向仰角 37°、俯角 18°, 最低照度可达 0.000 3lx, 可实时输出 PAL 标准制式微光全景图像, 通过研制 FPGA+DSP 嵌入式全景图像系统, 将全景环形图像展开、畸变校正为 8 个方向全景图像, 可用于地面侦察机器人微光条件下的全景图像信息获取^[11]。图 6 为全景环形原始图像、8 方向全景展开图像与原理示意图。



(a) 原始环形图像 (b) 八方向全景展开图像 (c) 原理示意图

图 6 北京理工大学折反式全景视觉系统

2 结束语

全景图像系统由于其视场范围大的优点, 广泛应用于机器人导航、视频监控和环境感知技术等民用、军用领域, 5 类全景视觉系统有如下特点:

(1) 旋转式全景视觉系统: 结构简单, 图像畸变小, 成本较低, 但是必须有精确的转动机构, 图像处理时原始数据量

(下转第 1679 页)

$$\text{检测精度} = (1 - \text{误检率}) \times (1 - \text{漏检率}) \quad (12)$$

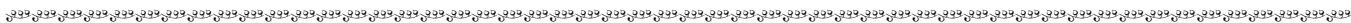
检测结果如表 3 所示。

表 3 疵点及正常图片测试数据实验数据 (%)

类型	检出率	误检率	漏检率	检测精度
纯色	96	4	0	96
横/竖纹	92	8	8	84.5
斜纹	92	16	8	77.25

4 结束语

本文提出了一种改进差分盒算法，并将其应用于织物疵点检测，通过比较织物不同纹理间分形维数的差异以达到检测出带有疵点织物的目的。改进差分盒算法较经典差分盒算法有 3 个特点：首先改进差分盒算法根据图像的纹理特征，减小盒子高度，提高盒子密度，使盒子数量误差百分比减少，以达到更精确地目的；其次，为避免灰度值大小对盒子数量的求取产生影响，应用灰度值的绝对差值来确定盒子数量；最后，盒子总数的统计顺序的改变，以达到减小算法时间和算法复杂度的目的。通过改进差分盒算法在拟合误差和运算时间两方面与经典差分盒算法的对比，并通过织物疵点检测实验证明了改进差分盒算法在织物疵点检测中的实用性和可行性优于经典差分盒算法。



(上接第 1666 页)

大，拼接算法复杂，无法在同一时刻获取全度 360° 图像，一般只能应用于非实时全景成像场合；

(2) 鱼眼镜头全景视觉系统：结构相对简单，但图像畸变大，成像镜头复杂，须经过校正运算，图像校正算法较复杂且系统昂贵，多被专业相机生产厂家采用；

(3) 多相机拼接式全景视觉系统：分辨率高，图像畸变小，但结构相对复杂，实时性差，帧率较低。

(4) 反射式全景视觉系统，结构简单，成本低廉，反射面易于设计和加工，缺点是不利于系统的小型化和集成化，要获得大视场，反射面设计的较大，系统难以集成；

(5) 折反射式全景视觉系统：集成度高，体积小，成本低，实时性相对较好，易于实现小型化和集成化，有较广泛的应用前景，缺点是图像畸变大，需要进行径向和周向全景展开与畸变校正，图像处理算法复杂。

由于机器视觉和图像处理技术的快速发展以及市场的巨大需求，在军民两用领域应用会更加广泛，有必要继续开展深入研究，建议如下：

(1) 开展低成本全景视觉图像处理系统研究，为机器人导航、视频监控和环境感知的大量推广应用奠定技术基础；

(2) 深入开展全景视觉非结构化环境下的障碍感知与信息融合理论、快速识别算法研究，为全景视觉系统的大量推广应用奠定理论基础；

(3) 开展高分辨率、高灵敏度、远距离、智能化的全景视觉系统研究，满足全天时、全气候的复杂恶劣环境条件下的大视场侦测与监控是最新的研究方向。

参考文献

[1] Mario F, et al. A real-time visual inspection system for railway maintenance: automatic Hexagonal-Headed Bolts detection [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2007, 37 (3): 418-428.

[2] 斯奈德. 机器视觉教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[3] 康智强, 石秀华, 李 颖, 等. 自适应网格在布匹疵点检测中的应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (9): 2078-2080.

[4] 李立轻, 黄秀宝, 图像处理用于织物疵点自动检测的研究进展 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2002, 28 (4): 118-122.

[5] Mandelbrot B. How long is the coast of Britain Statistical self-similarity and fractal dimension [J]. Science, 1967, 156: 636-638.

[6] Mandelbrot B. The fractal geometry of nature [M]. New York, W. H. Freeman, 1982.

[7] Chaudhuri B, Sarkar N. An Efficient Approach to Compute Fractal Dimension in Texture Image [A]. Proc. IEEE 11th IAPR, Conference A: Computer Vision & Applications [C]. 1992, 1: 358-361.

[8] Sarkar N, Chaudhuri B. An efficient differential box-counting approach to compute fractal dimension of image [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1994, 24 (1): 115-120.

[9] Kumar A. Computer-vision-based fabric defect detection: a survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 348-363.

参考文献:

[1] Rees D W. 1970. Panoramic television viewing system [P]. United States Patent, 1970: 465-505.

[2] Yagi Y, Kawato S, Tsuji S. Real-time omni-directional image sensor for vision-guided navigation [J]. IEEE Trans Robotics and Automation, 1994, 1 (1): 11-27.

[3] Hong J. Image Based Homing [A]. International Conference on Robotics and Automation [C]. 1991.

[4] Yamazawa K, Yagi Y, Yachida M. Obstacle avoidance with omni-directional image sensor HyperOmni Vision [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 1062-1067.

[5] Trivedi M M, Cheng S Y, Childers E MC, et al. Occupant posture analysis with stereo and thermal infrared video: Algorithms and experimental evaluation [J]. IEEE Trans. Veh. Technology, 2004, 53 (6): 1698-1712.

[6] 王 瑞. 全景数字相机硬件系统设计 [D]. 北京: 北京理工大学, 2008.

[7] 王永仲, 鱼眼镜头光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[8] 王 娟. 微小型机动平台机器视觉系统关键技术的研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2006.

[9] 曾吉勇, 苏显渝, 金国藩, 基于双曲面折反射相机的柱面全景立体成像 [J]. 光电子, 2006, 17 (6): 728-732.

[10] 牛 爽. 全景环带凝视成像光学系统的研究与应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

[11] 张 辉, 李科杰, 张振海, 基于CORDIC算法的全景图像畸变场校正算法 [J]. 测试技术学报, 2007, 21 (3): 241-245.