文章编号：1672-8785(2017)10-0001-06

空间操控全景成像技术综述

周小康 [1,2,3]　朱秋煜 [1]　饶　鹏 [2,3]　陈　忻 [2,3]

(1. 上海大学通信与信息工程学院，上海 200444；
2. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；
3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室，上海 200083)

摘　要：随着图像传感技术和数字处理技术在航天领域的广泛应用，空间成像技术得到了迅速发展。一方面，空间任务受到复杂空间环境的影响；另一方面，大视场、高分辨率空间成像的需求越来越迫切，然而传统的空间成像技术难以满足要求。因此，空间操控全景成像技术日趋成为该领域的研究热点。这项技术主要涉及空间全景成像系统和空间操控系统。首先介绍了国内外空间全景操控成像技术的发展概况；然后根据空间全景成像系统的组成原理对空间全景摄像机的成像模型进行了简要说明，并对空间全景成像的标定、拼接以及融合方法进行了分类和分析；最后对空间操控系统进行了阐述，并对该技术未来的发展趋势进行了展望。

关键词：空间全景；空间操控；全景成像

中图分类号：TP75　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2017.10.001

Overview of Space Manipulation Panoramic Imaging Technology

ZHOU Xiao-kang [1,2,3], ZHU Qiu-yu [1], RAO Peng [2,3], CHEN Xin [2,3]

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 2004444, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: With the wide application of image sensing and digital processing in the space field, space imaging is developing rapidly. On the one hand, space missions may be affected by complicated space environment. On the other hand, the demand for large field-of-view and high resolution space imaging is more and more urgent. However, traditional space imaging is difficult to meet the requirements. Therefore, space manipulation panoramic imaging is becoming the research focus in this field. The technology mainly involves the space panoramic imaging system and the space manipulation system. Firstly, the development of space manipulation panoramic imaging at home and abroad is presented. Then, the imaging model of a space panoramic camera is illustrated according to the composition principle of the space panoramic imaging system. The calibration, stitching and fusion methods of space panoramic imaging are classified and analyzed. Finally, the space manipulation system is described and its development trend in the future is forecasted.

Key words: space panorama; space manipulation; panoramic imaging

收稿日期：2017–05–08

作者简介：周小康 (1994-)，男，江苏南通人，硕士研究生，主要研究方向为红外信息处理技术和数字信号处理技术。E-mail: XiaoK_Zhou@163.com

0 引言

随着图像传感技术和数字处理技术在航天领域的不断发展，空间操控全景成像技术逐渐开始弥补空间摄像机在成像范围、分辨率以及视场等方面的不足。在采集非结构化未知环境数据的空间探测任务中，通常需要利用载有视觉系统的探测设备代替人类行动。受复杂空间环境的影响，当前机器的智能化水平还无法达到人性化空间操作的要求，所以大部分空间任务仍由操作人员通过远程操控完成。空间操控全景成像技术将虚拟现实技术应用到空间操控领域，旨在打造一个临场感强且具有三维动态操控功能的虚拟环境，以帮助操作人员快速、准确、有效地对探测设备周围的复杂空间环境进行感知，从而引导他们快速、安全地完成空间操控任务。在空间操控全景成像技术中，空间全景成像系统和空间操控系统是最为重要的两个部分。下面分别对它们进行详细介绍。

1 国内外研究概况及发展趋势

1.1 国外研究概况

早在 20 世纪 40 年代，美国最先开展了空间操控全景成像技术方面的工作，其研究水平也代表着国际发展水平。自 20 世纪 80 年代以来，美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 和美国国防部已经开展了多项空间操控全景成像技术研究，并取得了令人瞩目的进展。在 NASA 喷气推进实验室的 Telexploration 计划中，他们首次尝试对民用全景成像设备与“好奇”号火星探测车传回的立体全景图像数据库进行交互，进而开展沉浸式视觉体验研究。这项新技术有望用于火星车遥操作系统。欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 的欧洲空间技术中心和 TNO 实验室开发了一种基于 Provision 200/dVS 的单用户空间操控全景成像训练样机。另外，ESA 还给人们提供了一个虚拟遨游国际空间站的机会，即通过全景成像实现国际空间站内的全景漫游。

1.2 国内发展趋势

我国的空间操控全景成像技术研究最早始于 20 世纪 90 年代初。近年来，计算机图形学和计算机系统工程等技术的高速发展促进了空间操控全景成像技术的快速进步。科技部和国防科工委高度重视空间操控全景成像技术的未来发展。国内各大科研机构及高校均对全景成像技术和虚拟现实技术进行了研究，取得了一系列研究成果 (见图 1) 。

2 空间全景成像系统模型

根据成像原理的不同，空间全景成像系统主要分为以下四种：(1) 利用光学器件的折射和反射性质来获得大视场角；(2) 基于相机旋转获

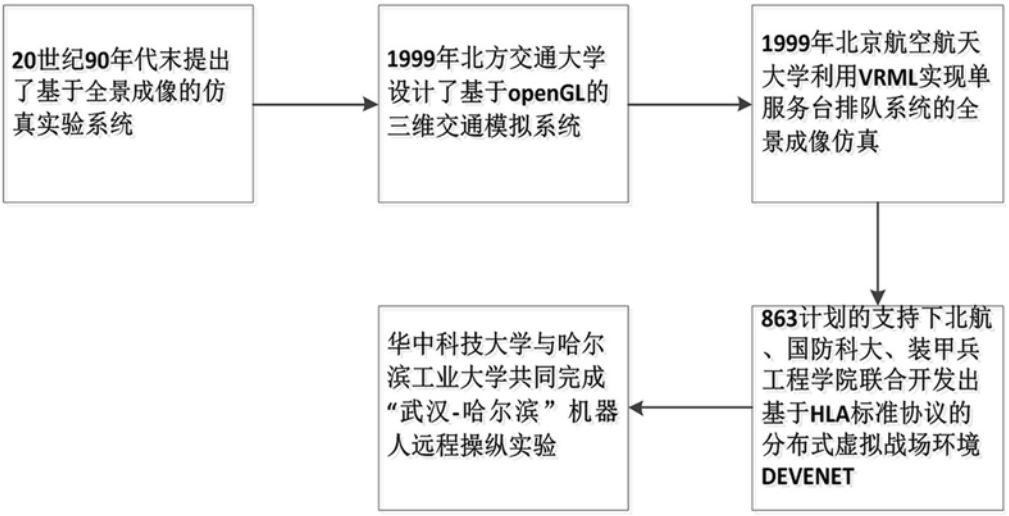


图 1 国内研究进展

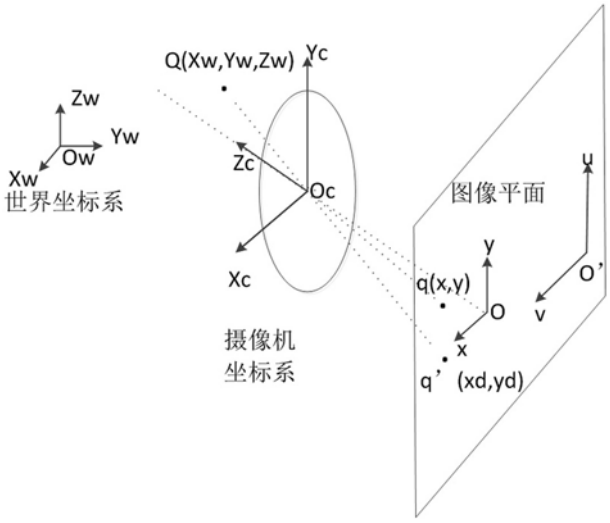


图 2　摄像机成像模型

得全景视角；(3) 利用鱼眼相机获得大视场图像；(4) 基于多相机的全景拼接技术。图 2 所示为摄像机成像模型。

2.1　光学器件折反射全景成像系统

光学器件折反射全景成像系统主要由光敏元件、成像透镜和凸面反射镜构成。其中，光敏元件大多为 CCD 器件；成像透镜有两种，分别为常规成像透镜和远心成像透镜 [1]；凸面反射镜的面形包括二次曲面和高次旋转对称非球面 [1]。根据是否满足单视点成像约束，光学器件折反射全景成像系统可以分为单视点成像系统和非单视点成像系统两种 [2]。

2.2　旋转相机全景成像系统

旋转相机全景成像系统有以下两种实现方法：(1) 常规的光学镜头围绕与光轴垂直的固定轴旋转 [3]；(2) 多个常规成像系统被安装在以垂直光轴为中心的周边多个固定点上，每个常规成像系统中的摄像机都可以独立地捕捉各自视角上的图像 [4]。每台独立相机所拍摄的图像之间或多或少都会存在重叠区域。此后通过图像标定、拼接、融合等步骤，最终可达到单相机拍摄全景图像的效果。

2.3　鱼眼相机全景成像系统

鱼眼相机全景成像系统与传统的透视镜成像系统的主要区别在于镜头结构 [2]。鱼眼镜头的视场可达到 120°，而超广角视场却会给鱼眼图像带来严重的边缘畸变。这不利于人们直接观察和获取信息，所以为了满足人类观察习惯以及图像处理要求，需要对其进行图像校正 [5]。

2.4　多相机全景成像系统

多相机全景成像系统通过用多台不同角度的相机覆盖整个场景来完成拍摄任务。其中每台相机从各自角度拍摄，所得图像经过拼接、融合 [4] 以及渲染技术 (如柱面和球面投影)，形成临场感强且具有沉浸式体验的全景视频图像。

3　空间全景相机的标定

空间全景相机在拍摄大视场图像时也会产生严重的光学畸变，进而给后续的图像处理和分析带来不可避免的误差。因此，为了保证后续全景图像的质量和精度，必须先对全景相机进行标定以及图像畸变校正。

目前全景图像畸变校正方法主要有以下两种：(1) 对相机进行标定，同时求解相机的内外参数和畸变系数 [6]；(2) 非量测畸变校正法，即利用空间投影的几何不变性求解畸变系数 [7]。

3.1　基于三维标定场的相机标定法

基于三维标定场的相机标定法主要用于对三维物体所拍摄的图像进行标定。该方法的应用前提是三维物体的几何结构必须能精确测定。这种标定法主要分为以下三类：(1) 基于摄影测量学的方法 [8]。该方法在建立约束方程时至少涉及 17 个参量，计算繁杂。(2) 直接线性变换法 [9]。该方法不适用于镜头的非线性畸变。(3) Tsai 两步法 [10]。该方法的应用前提是需要已知格网点的坐标信息。

3.2　基于二维标定场的相机标定法

基于二维标定场的相机标定法中较为典型的有张正友模型。该模型需要在相机前放置一个平面棋盘格网，然后通过提取不同方向棋盘格网的角点来对多幅图像的投影进行计算，最后对其进行闭式求解 [11]。所有参数的精确值都是利用莱文贝格 – 马夸特算法和线性最小二乘法获得的。

4　空间全景图像的拼接

由鱼眼镜头拍摄的图像存在畸变严重、质

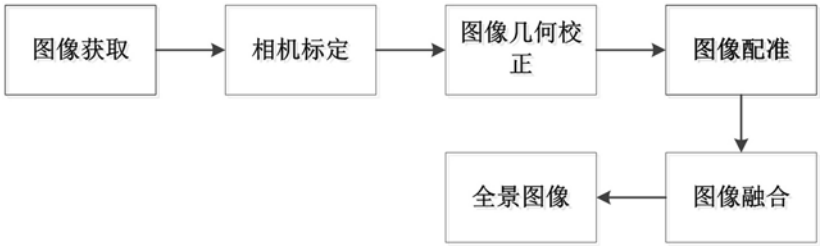


图 3 全景图像的拼接过程

量不高等问题,无法满足 360° 的全景图像要求,因此多幅图像全景拼接方法日趋成为研究热点。图 3 所示为全景图像的拼接过程。

4.1 帧到帧的拼接

帧到帧的拼接需要先求解出图像集合中相邻两帧之间的变换参量，然后通过映射关系求解出图像集合中任意图像帧之间的变换参量。该方法需要先确定基础参考帧，然后图像集合中的其余帧会与之匹配；接着求解各帧之间的变换参量，最后进行图像拼接。

4.2 帧到拼接图像的拼接

帧到拼接图像的拼接改进了帧到帧拼接中配准参量的组合误差。通过对待拼接图像与前一帧图像的配准参量进行初始化，可以减小因图像间位移而产生的拼接误差。图 4 为帧到拼接图像的拼接方式的示意图。其中，f1 为参考图像。在配准之前，当前图像与待拼接图像须处在同一坐标系下，然后才能进行图像配准 [12] 。配准时，坐标系作为参考，保持固定不变；图像数据集中的图像逐幅变换至当前拼接图像所在的坐标系。

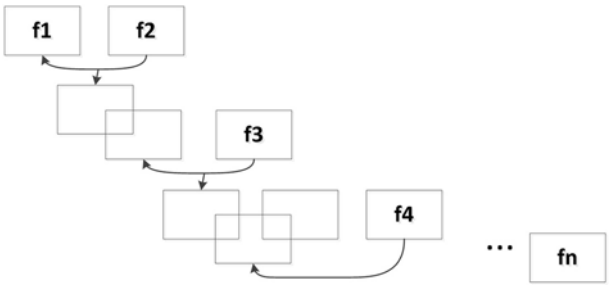


图 4 帧到拼接图像的拼接方式

4.3 拼接图像到帧的拼接

拼接图像到帧的拼接以当前帧的坐标系为参考，每个拼接阶段图像与参考帧之间的配准参数不变，这与帧到拼接图像的拼接方法有明显差异。图 5 为拼接图像到帧的拼接方式的示意图。

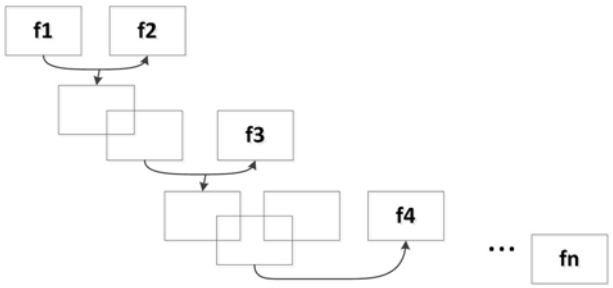


图 5 拼接图像到帧的拼接方式

4.4 树形拼接

树形拼接可以进一步减小图像拼接的累计误差。该方法将图像数据集分成子数据集，然后对子数据集图像进行分段拼接，最后将子拼接图像融合成完整图像。

5 空间全景图像的融合

在空间全景图像的拼接中，图像过渡区的融合是空间全景图像沉浸式表达的关键步骤。空间全景图像融合技术主要用于解决以下两个问题：(1) 图像过渡区域的亮度差和色度差问题；(2) 由图像的几何变换带来的重叠虚影现象。常用的图像融合方法包括平均法、中值滤波法和多分辨率分析法 [13] 。

5.1 平均法

平均法通过对图像进行低通滤波来达到融合效果。这种简易算法的运算速度快。当待拼接图像之间具有较大的亮度差和色差时，该方法会产生明显的带状拼接痕迹，从而影响视觉效果。

5.2 中值滤波法

中值滤波法能够有效抑制平滑噪声，同时

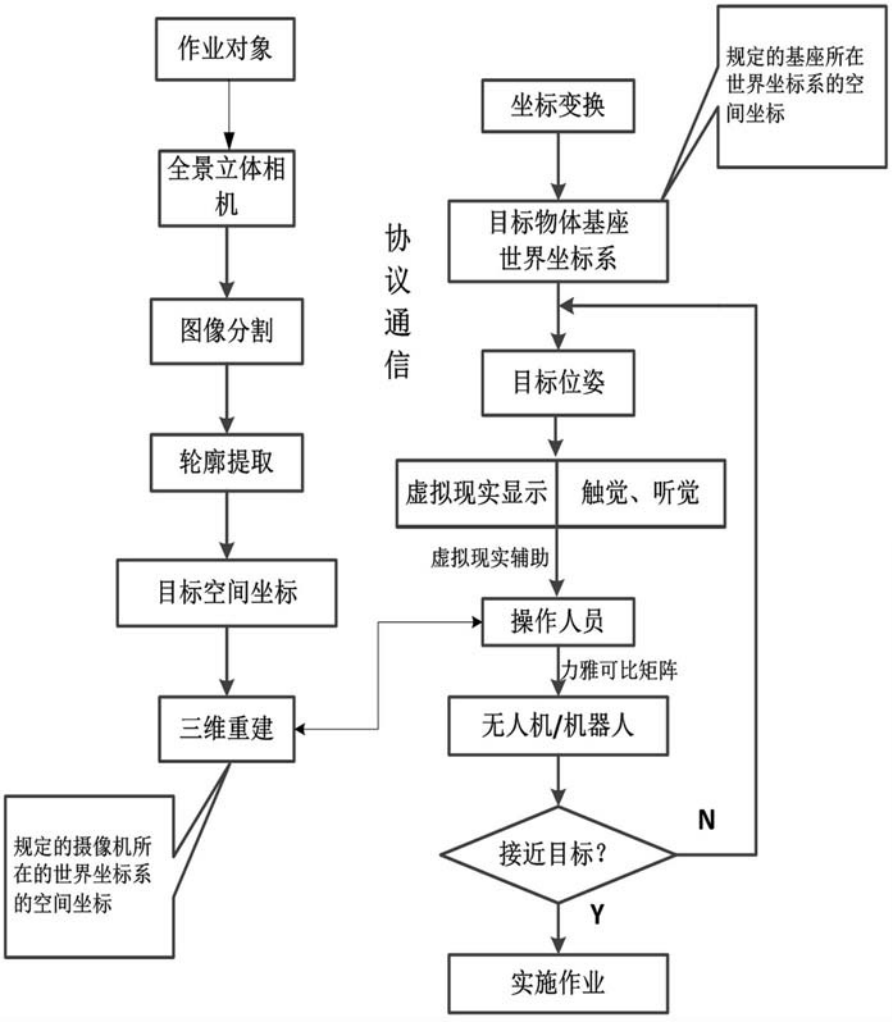


图 6　空间操控技术的流程图

还可以保护图像尖锐的边缘。但是该方法对拼接图像重叠区域的融合效果与平均法一样，也会产生明显的带状拼接痕迹，因此其拼接效果不是最佳。

5.3　多分辨率分析法

与平均法和中值滤波法相比，多分辨率分析法产生的融合效果更好。先利用缝合线搜索算法找出最佳缝合线，然后进行图像分解，其中每段子图像分别处在不同频带上。接着分别对不同频带上子图像的边缘过渡区进行平滑处理，最后将其融合成整张图像。

6　空间操控技术

空间操控全景成像技术能够将操控者与远程工作环境相融合，进而构造出一个实现虚拟现实 (Virtual Reality, VR) 的远程操作环境。空间操控系统借助空间 VR 全景相机实时采集空间工作现场的视频图像以及景深图像信息。在空间操控成像系统中，操控者对远程空间工作场景的感知是动态的。当空间摄像机的方位发生改变时，计算机生成的远程操作虚拟环境也会发生改变。因此，空间操控成像系统需要对空间摄像机的位置和方向角进行实时跟踪，以确保这些信息能被实时反馈到远程空间工作现场真实空间坐标系中的映射位置。通过将空间虚拟环境获取与建模技术、空间 VR 全景技术和人机交互技术相结合，空间操控技术能够对空间站在轨维护、空间远程机械臂以及空间无人车等设备进行精准操控。图 6 为空间操控技术的流程图。

空间操控全景成像技术开拓性地将 VR 全景成像技术和空间操控技术相结合，并成功应用于空间探测领域。该技术旨在打造一个临场感强且具有完善交互功能的虚拟环境，将人类感知延伸到系统的最前端；有利于实现远程空间高精度作业，提高空间任务的工作效率，同时有效规避高难度作业的风险。

随着我国载人航天以及探月计划的不断发展，人们对探测输出图像的质量及其包含的信息量也提出了更高、更多样化的需求。通过结合空间操控全景成像技术突出的“ 3I ”特征即“交互性 (Interactivity) ”、“沉浸感 (Immersion) ”和“构想性 (Imagination) ”，可以最大程度地还原周围环境的状况，使操作者的认知手段得以扩展。空间操控全景成像技术在诸多空间探索任务中拥有广阔的应用前景，比如高精度实时星球探测器地面导航、宇航舱外作业机器人以及航天器空间手控交会等等。

7 结束语

空间操控全景成像技术主要涉及空间全景成像技术和空间操控技术。根据空间全景成像系统的成像原理，本文简要地对空间全景成像技术进行了分类和分析，然后对空间操控系统进行了介绍，并简要阐述了空间操控技术。空间操控全景成像技术通过将人的高智能和空间作业设备的高效率有机结合起来，可拓展人类的感知能力和实时空间操控能力，以实现对复杂空间作业和未知空间的高效观测，从而大大提高人们的空间监测能力和操控效率。

参考文献

[1] 曾吉勇，苏显渝．折反射全景成像系统 [J]. **激光杂志**, 2004, **25**(6): 1138–1142.

[2] 严春燕．全景摄像机标定方法综述 [J]. **电脑知识与技术**, 2014, **34**(12): 8291–8292.

[3] 肖潇．高分辨率全景成像系统及其视觉应用研究 [D]. 杭州：浙江大学，2009.

[4] 宋康康，余协力，姜麟建，等．全景摄像机 [J]. **警察技术**, 2014, **2**(2): 61–67.

[5] 赵琦．基于鱼眼镜头的全景图像展开研究 [D]. 长春：长春理工大学，2013.

[6] 张凯．机器人轴孔装配系统中的视觉目标识别与定位 [D]. 西安：西安理工大学，2014.

[7] 黄应清，文军，谢志宏．摄像机畸变的非量测校正方法研究 [J]. **现代电子技术**, 2015, **24**(20): 59–62.

[8] Faig W. Calibration of Close-range Photogrammetry Systems: Mathematical Formulation [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1975, **41**(12): 1479–1486.

[9] Abdel-Aziz Y I, Karara H M, Hauck M. Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, **81**(2): 103–107.

[10] Tsai R Y. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision [C]. Miami: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986.

[11] 丁昊．基于线特征的相机标定与定向方法研究 [D]. 青岛：山东科技大学，2011.

[12] 王娟．图像拼接技术研究 [D]. 西安：陕西师范大学，2008.

[13] Bao P. Image Mosaics with Wavelet Domain Seamlines [C]. Kuala Lumpur: 2011 IEEE Symposium on Computers & Informatics, 2011.

新闻动态 News

美国 JPSS–1 气象卫星即将发射

据 www.nesdis.noaa.gov 网站报道，美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的联合极地卫星系统 (JPSS) 中的 JPSS–1 卫星计划于 2017 年 11 月 10 日发射。该卫星的有效载荷包括 Harris 公司研制的穿轨迹红外探测仪 (CrIS)、Raytheon 公司研制的可见光红外成像辐射计组合仪 (VIIRS)、Ball Aerospace 公司研制的臭氧绘图与剖面天底探测组件 (OMPS–N) 以及 Northrop Grumman 公司研制的云与地球辐射能量系统 (CERES) 和先进技术微波探测仪 (ATMS)。

在进入高度为 824 km 的极地轨道后，JPSS–1 卫星将被命名为“ NOAA–20 ”。作为首颗 NOAA 下一代极轨气象系列卫星 (JPSS–1/2/3/4)，该卫星将具有 7 年的设计寿命。

□ 岳桢干