

# 水下集矿作业车运动光学实时跟踪测量系统\*

周 剑<sup>1,2</sup>, 海钰琳<sup>3</sup>, 孙祥一<sup>1</sup>, 张小虎<sup>1</sup>  
(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073;  
2. 南京军区 73171 部队, 上海 201318;  
3. 西北大学 信息科学与技术学院, 陕西 西安 710118)

**摘要:**集矿作业车是大洋采矿系统的关键技术,在实验定型阶段,高精度的测量集矿作业车的运动学参数是检验集矿作业车的牵引、控制等模块性能必不可少的环节。针对集矿作业车在水中行进、活动范围较大的特点,提出了利用广角镜头进行双目交会测量的光学方法,实现了集矿作业车运动轨迹实时跟踪测量系统。该系统首先在实验室内利用网格板对广角镜头的畸变进行修正;其次,在现场,根据场景中的自然特征,在室内标定的基础上,修正镜头畸变,标定摄像机内外参数;最后,两台摄像机跟踪集矿作业车上的合作特征,实时交会测量获得集矿作业车的运动轨迹,包括位置、速度等。该系统的测量结果与全站仪测量结果的残差为5mm。系统已正式通过验收,并投入使用。

**关键词:**摄像测量;集矿作业车;广角镜头;畸变

中图分类号:TP391.4 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2012)06-0125-05

## Optics based real-time tracking and measuring system for the underwater mining-task-machine trajectory

ZHOU Jian<sup>1,2</sup>, HAI Yulin<sup>3</sup>, SUN Xiangyi<sup>1</sup>, ZHANG Xiaohu<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. 73171 Troops of Nanjing Military Region, Shanghai 201318, China;  
3. School of Information Technology and Computer Science, Northwest University, Xi'an 710118, China)

**Abstract:** Mining-Task-Machine is the key technology of the Ocean Mining System. To finalize the design, It is the key step to test the traction and control unit of the Mining-Task-Machine by measuring kinematic parameters with high precision. Mining-Task-Machine moves in a large area in water, a binocular measurement method with wide-angle lens is used to make real-time track and measurement of the trajectory of Mining-Task-Machine. Firstly, the lens distortion is calibrated by using gridding board in lab. Secondly, according to the natural feature, the parameters of the lens distortion is modified based on the result in lab and all the camera parameters are calibrated. Finally, the binocular system tracks a cooperative feature on Mining-Task-Machine and measures the motion trajectory including position and velocity, etc. of it on real time. The residual between the result of the system and the total station is about 5 mm. The system has passed the examination and evaluation, and has been put into use.

**Key words:** videometrics; mining-task-machine; wide-angle lens; distortion

随着工业化进程的加速,人类对矿产资源的需求也与日俱增,而陆地上的许多矿产资源正面临着枯竭的危险,且已很难满足人们的需求。人类为了自身的生存和发展,势必要把开发矿产资源的目光从陆地转向海洋。占地球表面积71%的蓝色海洋蕴藏着丰富的矿产资源,陆地上有的矿产在海洋里几乎都有。因此,把海洋作为人类探求新的矿产资源基地,已成为许多海洋国家的共识<sup>[1]</sup>。“八五”、“九五”期间,大洋采矿项目总体课题进行了大洋采矿系统整体方案的研究,确

定了针对大洋多金属结核采矿的“水力集矿机(采集)-软管输送系统(输送)-水面支持系统”的总体技术方案<sup>[2]</sup>。其中,集矿作业车集行走、采集、控制等多项功能于一体,是采矿系统的重要组成部分,对集矿作业车的行走、控制和模拟采集等各项关键技术进行实验验证,是实现深海采矿技术持续发展的重要任务。光学测量是利用摄像机或照相机等成像装置进行测量的方法。作为一种非接触式的测量方法,它能克服传统测量方法的缺点。首先,它并不改变被测物体的运动参数,

\* 收稿日期:2012-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11072263)

作者简介:周剑(1980—),男,江苏苏州人,博士研究生,E-mail:j\_zhou@live.cn;

张小虎(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:zhangxiaohu@vip.163.com

不会带来由于引入额外装置所带来的误差;其次不需要有线或无线传输装置,可靠性显著提高,只要拍摄到目标的图像,就能够得到目标的运动参数;此外,被测目标对光学测量系统也没有任何破坏作用,系统可重复使用。

## 1 系统原理

### 1.1 成像几何基础

三维空间中的物体到像平面的投影关系即为成像模型。理想的投影成像模型是光学中的中心投影,也称为针孔模型。针孔模型假设物体表面的反射光都经过一个“针孔”而投影在像平面上,即满足光的直线传播的条件。针孔模型主要由光心  $O$  (也称为摄像中心)、成像面和光轴组成<sup>[3]</sup>。图 1 是针孔模型成像原理示意图。其中  $f_p$  为焦距,  $u$  为物距,  $v$  为像距。针孔模型的焦距  $f_p$  等于光心到像面的距离  $v$ , 物距  $u$  等于光心到物面的距离。

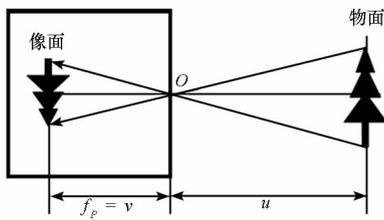


图 1 针孔成像模型

Fig. 1 Pinhole imaging model

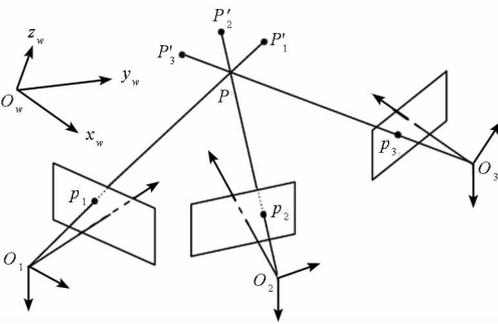


图 2 多摄像机三维交会

Fig. 2 Multi camera 3D intersection

在满足针孔模型假设的前提下,像点、光心和物点满足共线方程,即三点共线。对于单摄像机的情况,如果光心和像点已知,就可以确定像点和光心组成的唯一射线,而物点必然在此射线上。但是物点在此射线上的具体位置无法确定。而在使用两台或多台摄像机的条件下,利用各个摄像机的光心和像点组成的射线都应该通过空间物点,即各射线应在物点相交的原理就可以对空间物点进行交会定位,简称为线线交会。这就是近景摄影测量学的原理。图 2 为多台摄像机对空间物点  $P$  成像的示意图。可知物点  $P$  为摄像机光

心  $O_i$  和相应的像点  $P_i$  组成的射线的交点。

### 1.2 改进的像差标定方法

在摄像测量中,为了从图像中提取空间物体的几何信息,必须建立图像中像点位置和空间物体表面点位置的相互对应关系。这种相互对应关系由摄像系统成像模型来决定,本文以针孔模型为例。摄像系统成像模型中的参数即为摄像机参数。但是由于摄像机的光心和光轴并不是物理上的实体,因此这些参数需要通过实验与计算来确定。这种实验与计算的过程就称为摄像系统标定<sup>[3]</sup>。

摄像机系统参数标定方法有很多,如直接非线性求解法<sup>[4]</sup>,线性求解法<sup>[5-9]</sup>以及分步法等。但主要用于精密摄像测量学的摄像机标定和系统误差修正方法,目前国际上较多采用和推崇的是 Tsair 的方法<sup>[10]</sup>和 Weng 的方法<sup>[11]</sup>,而 Tsai 的方法应用最为广泛,它们不但能较方便地标定出摄像机系统参数,而且能较准确地进行镜头误差修正。

然而,对于目前的标定方法而言,无论是线性模型还是非线性模型,都会出现不同程度的误差。在畸变较大的广角镜头成像情况下,控制点分布又很不理想,此时误差会难以接受。目前一般只考虑对硬件进行改良,即通过提高镜头的加工质量来减小畸变,这类方法对广角镜头效果有限,而且成本昂贵。针对本文系统采用的视场角将近  $75^\circ$  的广角镜头,下面介绍一种以 Tsai 的方法为基础对像差修正进行优化的方法。

任何光学镜头都存在畸变,如图 3 所示。一般情况下,目前的畸变模型已经能够较好地修正镜头畸变,如 Weng 的标定模型分别考虑了三种误差情况:轴对称畸变,偏心畸变 (Decentering distortion) 和薄棱镜畸变 (Thin prism distortion)。但是,现阶段的畸变模型通常只考虑对整个像面进行修正,对于一些控制点分布情况不理想、镜头畸变较大的情况,结果很不理想,表现为控制点重投影误差大,非控制点测量精度差。式 (1) 是一种常见的,比较全面地考虑了径向像差和切向像差的像差模型。其中  $k_0 \sim k_4$  为像差系数,  $(x_d, y_d)$  为像点在水平和垂直方向偏离图像主点的距离与相应等效焦距之比。

$$\begin{cases} \delta_x = x - \tilde{x} = (k_0 x_d + k_1)(x_d^2 + y_d^2) + k_3 x_d^2 + k_4 x_d y_d \\ \delta_y = y - \tilde{y} = (k_0 y_d + k_2)(x_d^2 + y_d^2) + k_3 x_d y_d + k_4 y_d^2 \end{cases}$$

为此,本文提出了局部像差和分布像差修正的概念。所谓局部像差是指将整幅图像分成若干部分,每一部分作为独立的小图单独考虑像差。分布像差修正是指先修正对像差影响比较大的径

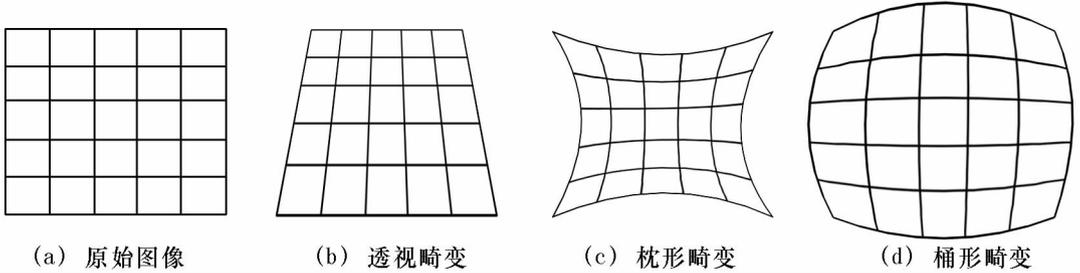


图 3 光学镜头畸变的形式

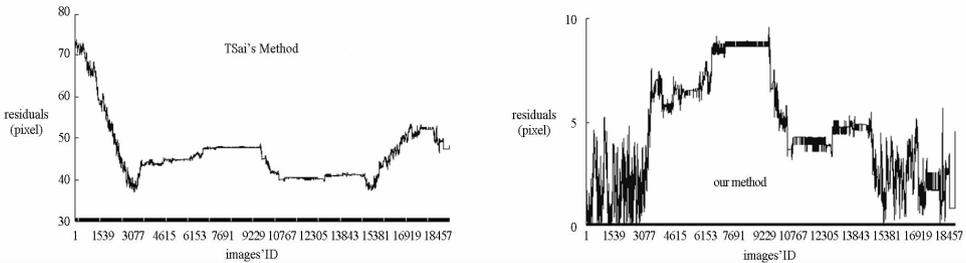
Fig. 3 The form of optical lens distortion



(a) 原图 (a) Original image (b) Tsai 的方法 (b) Tsai's method (c) 本文方法 (c) Our method

图 4 畸变修正结果

Fig. 4 The result after distortion correction



(a) Tsai 的方法 (a) Tsai's method (b) 本文方法 (b) Our method

图 5 畸变修正后残差

Fig. 5 The residual after distortion correction

向失真部分,然后修正其他形式的像差。

本文标定的具体过程如下:第一步,在实验室环境对精度控制较好的标定网格板成像,对镜头径向畸变进行校正<sup>[12]</sup>;第二步,在第一步的基础上,先忽略镜头畸变,利用中间变量将标定方程化为线性方程组求解出摄像系统的外部参数;第三步根据已求得的外部参数,再来求解系统的内部参数和各部分的畸变系数。如图 4 所示为实际场景拍摄的图像,图 5 为采集 19388 幅时刻图像畸变修正结果。Tsai 的方法标定摄像机和修正畸变后残差均值为 46.5 像素,标准差为 7.1 像素,而本文方法标定摄像机和修正畸变后残差均值仅为 4.5 像素,标准差仅为 2.5 像素。

## 2 系统设计

### 2.1 系统组成

集矿作业车光学测量系统由 CCD 摄像机、主

控计算机、千兆网卡等设备构成。在集矿作业车上安装有合作标志。工作时,主控计算机控制两台 CCD 摄像机对作业车上合作标志进行实时同步拍摄,并由主控计算机进行数据处理实时得到作业车的空间位置、速度等 6 维运动参数。处理后的结果以测量数据、运动曲线形式显示,并根据需要可以选择是否保存数据和目标运动轨迹,能方便地对历史数据进行回放和绘图,具备局域网数据传输功能。

作业环境和摄像机安装位置如图 6 所示,两台摄像机分别位于 60m × 50m 水池两边,高于水面,并基本保持水平拍摄,以避免太阳在水中反射引起图像过饱和。摄像机安装在靠近厂房的水池两端,并设置防雨盒,具体安装样式如图 7 所示。主控计算机位于厂房内,与千兆网摄像机通过网线相连接,便于监控及跟踪。

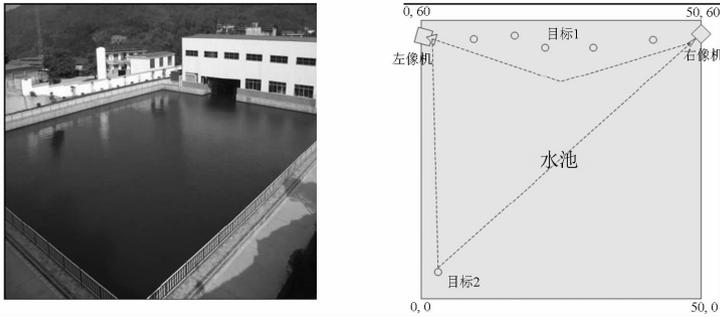


图 6 作业环境与摄像机位置

Fig. 6 Work environment and the camera position



(a) 防雨盒 (b) 拍摄孔 (c) 内部安装 (d) 内部构造  
 (a) Waterproof box (b) Shot hole (c) Internal installation (d) Internal structure

图 7 摄像机的安装与内部结构

Fig. 7 the installation and internal structure of camera

### 2.2 标定控制点与合作标志

摄像机的标定以及合作目标的跟踪是系统工作的两个核心问题。前文已经指出,为得到两台高速摄像机的测量参数,需要用空间位置已知的标志点对两台摄像机进行标定。由于测量环境限制,只能选择水池边上的栏杆和建筑物上门窗角点为标定控制点(图 8 中“×”所示),通过全站仪对其进行精确测量,得到各点的空间位置。受水面反射和倒影的影响,选择了高于水面的点光源作为目标(点光源为于集矿作业车前方,如图 9 “×”所示),便于跟踪测量。



图 8 标定控制点

Fig. 8 Calibration control points



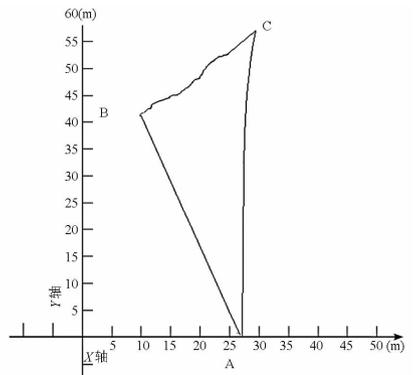
图 9 合作目标

Fig. 9 The cooperative target

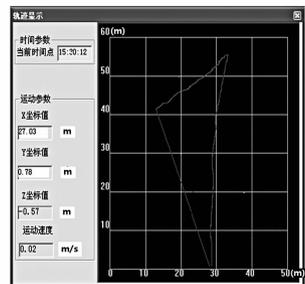
### 3 实验结果

#### 3.1 比照结果

如图 10 所示为集矿作业车操作系统给出的行走路线图和光学测量系统轨迹图,其中(a)图



(a) 集矿作业车操作系统行走路线图  
 (a) The trajectory measured by Mining-Task-Machine operating system



(b) 系统测量轨迹结果  
 (b) The trajectory measured by our system

图 10 测量轨迹比对

Fig. 10 The comparison of measurement trajectories

为集矿作业车操作系统给出的行走路线图,(b)图为本文系统测量的轨迹图。

本文实验用全站仪的测量值作为精度评价标准。全站仪全称为全站型电子速测仪,它是一种可以同时测量角度(水平角、竖直角)、距离

(斜距、平距、高差)测量和数据处理,由机械、光学、电子元件组合而成的测量仪器。本文实验用全站仪的测量精度为5mm,表1所示为系统验收时,随机挑选8个位置,比对本文系统测量值与全站仪实测值的结果。

表1 本文系统测量值与全站仪实测值对比结果

Tab. 1 The measurement result comparison with our system and total station

坐标	系统测量值(m)			全站仪测量值(m)			绝对误差(m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	3.67	20.01	0.97	3.64	20.07	1.07	0.03	0.06	0.10
2	3.50	30.23	0.96	3.46	30.15	1.00	0.04	0.08	0.04
3	3.68	40.30	0.81	3.62	40.24	0.88	0.06	0.06	0.07
4	3.92	46.20	0.75	3.88	46.16	0.77	0.04	0.04	-0.02
5	46.57	9.17	0.88	46.62	9.07	0.85	0.05	0.10	0.03
6	46.70	18.29	0.90	46.78	18.18	0.88	0.08	0.11	0.02
7	46.82	28.44	0.68	46.90	28.39	0.62	0.08	0.05	0.06
8	47.27	38.90	0.66	47.36	38.79	0.62	0.09	0.11	0.04
绝对误差均值(m)							0.05	0.06	0.04

### 3.2 结论

通过上述分析可知,光学测量系统与全站仪两者测量结果差别为5mm左右,考虑到全站仪本身的测量误差,可以认为光学测量系统的精度与全站仪精度相当。本文通过实际的工程应用为光学测量开辟了新的应用领域,在实验过程中,针对视场较大的情况,提出了局部像差和分步像差修正的方法标定和修正镜头畸变。结果证明,使用本文方法对广角镜头的畸变进行修正后,设计并实现的测量系统精度可靠,通过对大型集矿作业车的各项技术指标进行实验,验证完全可行,设备简单,使用方便,达到了精度要求。

本文创新性地提出了一种以局部像差代替整体像差修正镜头畸变的方法和步骤,对广角镜头的畸变修正效果优于整体像差模型的修正效果。同时,首次将摄像测量方法应用于水下作业车的行走轨迹测量,对其定型和故障分析提供了数据支持。

### 参考文献 (References)

[1] 崔木花,等.我国海洋矿产资源的现状浅析[J].海洋开发与管理,2005,22(5).  
CUI Muhua, et al. Analysis of the status quo of China's marine mineral resources [J]. Ocean Development and Management, 2005, 22(5). (in Chinese)

[2] 崔俊峰.基于图像的集矿作业车实时跟踪测量方法研究及实现[D].长沙:国防科技大学,2007.  
CUI Junfeng. Study on real-time tracking and measurement image-based method for Mining-Task-Machine trajectory [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2007. (in Chinese)

[3] 于起峰,陆宏伟,刘肖琳.基于图像的精密测量与运动测量[M].北京:科学出版社,2002.

YU Qifeng, LU Hongwei, LIU Xiaolin. Image-based precision measurement and motion measurement [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)

[4] Ganapathy S. Decomposition of transformation matrices for robot vision [J]. Proceedings of IEEE Int Conference Robotics Automat. 1984:130-139.

[5] Zhuang H Q, Shiu Y. A noise-insensitive algorithm for robotic hand/eye calibration with or without sensor orientation measurement[J]. IEEE Trans Sys Man Cybernet, 1993, 23 : 1168-1175.

[6] Zhuang H Q, Roth Z S, Wang K C. Robot calibration by mobile camera system[J]. Journal of Robotic Systems, 1994, 11(3) : 155-168.

[7] Zhuang H Q, Roth Z S, Wang K C. Error-model-based robot calibration using the modified CPC model [J]. Int Journal of Robot Comp Integrated Manufact, 1993, 10(4) : 287-299.

[8] Zhuang H Q, Wang K C, Roth Z S. Simultaneous calibration of a robot and a hand mounted camera[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1995, 11(5) : 649-660.

[9] Zhuang H Q, Roth Z S. A note on calibration of wrist-mounted robotic sensor by solving homogeneous transform equations of the form  $AX = XB$  [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1995, 7(3) : 877-878.

[10] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the shelf TV cameras and lenses [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, RA-3(4) : 323-344.

[11] Weng J Y, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. IEEE Trans on PAMI, 1992, 14(10) : 965-980.

[12] 邱志强,等.用射影不变性纠正鱼眼镜头畸变[J].应用光学,2003,24(5).  
QIU Zhiqiang, et al. A correction method of fish-eye lens distortion using projective invariability [J]. Journal of applied optics, 2003, 24(5). (in Chinese)

[13] West G A, Clark T A. A survey and examination of subpixel measurement techniques [J]. Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, 1990, SPIE 1395 : 456-462.