近距离高准确度光电测距技术的研究*

肖相国^{1,2},王忠厚¹,白加光¹

(1中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)(2中国科学院研究生院,北京 100049)

摘 要:研究了近距离光电测距系统的工作特点,设计了近距离光电测距相机光学系统.基于几何 相似法原理,提出几何相似法光电测量系统的测量过程是一个不等准确度测量过程.重点研究了不 等准确度测量过程中的测量数据处理技术,给出了测量系统测量数据修正的方法.同时对比了修正 前和修正后测量结果的差异,明确指出,采用不等准确度最小二乘法处理测量数据可以提高极近距 离处的测量准确度.

关键词:近距离;光电测距;数据处理;最小二乘法 中图分类号:V557.4 文献标识码:A

0 引言

光电测距系统以结构简单、灵活机动、使用可 靠、准确度高、作业迅速等诸多优点被广泛应用于现 代计算机视觉领域中,在空间站搭建、卫星故障修 复、空间舱内科学实验、深空探测等空间作业领域及 核工业等危险作业方面具有极大的推广价值^[1].同 时近距离光电测距系统也是获取航天器间相对状态 (相对位置与相对姿态)信息的重要手段,是完成空 间航天器交会对接与机动逼近等多种空间任务的关 键技术.

高准确度单站近距离测距技术在卫星对接和捕获测量中具有重要的应用价值.各国家相继开展了高准确度单站测量技术的研究.日本宇宙事业开发团(NASDA)发射了工程试验卫星 ETS-VII,该卫星的空间机器人在轨服务系统(RBT)种安装了手眼相机系统.该手眼相机系统通过提取黑白图像中圆形光标的尺寸和中心测出摄像机和光标的相对位置和姿态^[2].德国研制的 ROTEX 机器人系统装备了光电测量相机系统,并且在该相机的标定方面整合了一种光标测量新算法^[1].我国也开展了相关技术的研究^[3],但是对于高准确度单站光电测量相机系统设计问题和相机测量标定算法等问题未见系统研究.

本文开展了基于几何相似法的光电测量技术的 研究.为了提高几何相似法的光电测量相机近距离 测量准确度,系统研究了高准确度测量相机系统设 计中应注意的问题,同时深入研究了相机测量数据 **文章编号:**1004-4213(2009)04-923-5

的修正算法.

1 单站光学测量原理

单站光学测量系统采用几何相似测量法,几何 相似法原理如下:当被测物面与摄像系统光轴垂直, 与像平面平行时,根据透视投影模型,物面形状与它 所成的像满足相似关系,从物面所成的像上提取代 表物面图形大小的特征参量,乘上实际放大倍数,就 得到物体的实际几何参量.

单站几何相似测量法测量方法为:光学系统焦距为 f['],高度为 h,物体通过相机光学镜头成像在 CCD 焦平面上,像高为 h['].

如图1,根据几何相似形原理,存在如下关系



$$h/l = h'/l' \tag{1}$$

式中,*l*为要测量的物距,*l*′为所成的像的像距,*h*为物高,*h*′为像高.经变换,得到物体距离计算公式

$$l = (h \times f'/h' \tag{2}$$

式(2)中,令l'=f',f'为光学系统焦距.

2 近距离单站光电测距系统指标

近距离测量相机系统要求在 500~2 000 mm 范围内测量目标的位置信息.相机系统指标参量为, 光学系统焦距:14.5 mm;视场角:19.30×2;测量准 确度:<0.5%.测距过程中像面无调焦.

^{*}国家高技术研究发展计划(863)资助 Tel:029-88887638 Email:xiao981216@opt.ac.cn 收稿日期:2008-03-07

3 光学系统方案的设计

考虑到测距过程中像面无调焦和系统高准确度 测量的要求,测量相机系统方案设计和系统参量确 定从如下几个方面着手.

1)要求相机光学系统的景深必须与系统测量范 围匹配,以保证在工作范围内,相机不进行调焦仍保 持良好像质.相机光学系统景深为 0.5~2.0 m,即 相机系统在物空间范围 0.5~2.0 m 成像良好.经 过计算,系统焦距 14.5 mm,图像可以接受的弥散 圆为两个象素即 0.028 mm,在不同光圈时景深计 算如表 1.

表1 景深与光圈的关系

光圈数	景深近点/m	景深远点/m	景深范围/m
4	0.56	1.38	0.82
5.6	0.503	1.96	1.46
6	0.49	2.1	1.6
8	0.44	4.9	4.56

取系统的光圈数 $F^{*} = 6$,此时系统的工作景 深:0.49~2.1 m,满足测量系统使用要求.

2)为了消除视差对测量准确度的影响,成像系统要求为像方远心系统.像方远心光路主光线平行于光轴出射,消除了边缘视场理想像点移动时所产生的测量误差^[5].

3)测量相机光学系统全视场畸变要小,且图像 对比度要好,即光学传递函数 MTF 高.

根据如上要求研究,相机成像系统设计结果见图 2.

光学参量为:

系统焦距是 14.51 mm;视场角是 19.3°×2;F 数是 6;系统传递函数是 0.78(36 lp/mm);全视场 最大畸变是 0.04%.





图 2 相机成像系统设计结果 Fig. 2 Result of designment of the system

4 数据处理算法的研究

测量系统不可避免地存在误差,为了提高测量 准确度,必须尽可能消除或减少测量误差.因此有必 要对各种误差的性质、出现规律、产生原因及消除或 减少它们的方法作仔细分析研究^[4].单站测量系统 的误差有以下几种:视轴晃动误差(包括光学、机械 部件加工、安装以及随温度变化引起的误差)、视轴 校准误差、CCD量化误差、畸变校正残差和点线位 置的检出误差.这几类误差是随机出现的服从统计 分布规律,通过对多次测量数据进行最小二乘法处 理来减小随机误差对测量的影响,提高测量准确度.

4.1 测距系统研究

用几何相似法进行距离测量时,物距越大相机 系统像面上所成的像就越小;反之相机系统像面上 所成的像就越大.对于近距离光电测量相机,像传感 器 CCD 的点线位置的检出误差是一定的,像越大, 像大小几何尺寸的检出相对误差就越小;像越小,像 大小几何尺寸的检出相对误差就越大.所以不同距 离处相机系统的相对测量误差值是不一样的,也就 是说整个测量过程测量准确度是不一样的,测量值 的可靠程度也就不一样.

4.1.1 权的确定

在不等准确度测量中,各个测量的可靠程度是 不一样的,因此不能简单地取各测量结果的算术平 均值作为最后测量结果,应让可靠程度大的测量结 果在最后结果中占的比例大一些,可靠程度小的测 量结果在最后结果中占的比例小一些.各测量结果 的可靠程度用一个测量结果的权来表示,记为 P^[4].

权的大小说明了测量结果的可靠程度,根据这 一原则确定权的大小. 假定距离测量有 m 组不等准 确度的测量结果,这 m 组测量标准差方差分析计算 如下:设 Δl 为距离测量误差,Δh'为 CCD 点线位置 的检出误差,将 $\Delta h'$ 带入式(2),经过进一步推导得 到相机系统在不同距离处的测测量误差

$$\Delta l = \frac{l^2}{h \times f'} \times \Delta h' \tag{3}$$

设,δ是相机系统整个测量过程中的测量标准差, δ_l 是相机系统对距离为l处目标的测量误差,令 $\delta_l = \Delta l$.那么,距离为l处的目标测量值的权计算方法 为

$$\delta^2 = p_l imes \delta_l^2 = p_l imes \Delta l^2 = p_l imes (rac{l^2}{h imes f'} imes \Delta h')^2$$
 (4)

式(4)中, p_l 为在 l 处测量的权值. 将式(4)经过变换,得到 $p_l \times l^4 = \delta^2 (h \times f' / \Delta h')^2$,整个测量过程中 $\delta^2 (h \times f' / \Delta h')^2$ 为一个定值. 所以式(4)又可以表示 为

$$p_{l_1}: p_2: p_3 \cdots p_m = \frac{1}{l_1^4}: \frac{1}{l_2^4}: \frac{1}{l_3^4} \cdots \frac{1}{l_m^4}$$
(5)

由此得到,在几何相似法测距中每次测量结果的权重与其测量距离值的四次方成反比.

4.1.2 数据处理方法的研究

建立相机测量值修正模型: y = ax + b, 式中 y 为米尺测量值, x 为相机判读值. 在整个近距离工作 范围进行多次测量, 通过最小二乘法拟和测量值修 正模型中参量 a 和 b 的值,降低测量误差, 提高系统 的测量准确度.

测量结果的最可信赖值在测量误差平方和(在 不等准确度的情形中应为加权测量误差平方和)为 最小时求出,这就是上最小二乘法原理^[4].在此指 出,最小二乘法原理是在测量误差无偏、正态分布和 相互独立的条件下推导出来的,但是在不严格服从 正态分布的情形下也常被使用.最小二乘法数据处 理方法为:

线性参量的测量方程向量一般形式为

$$V = L - AX \tag{6}$$

式中,V 为测量误差,L 为米尺测量距离值,A 为相 机测量的距离值,X 为对测量数据进行修正时的系 数矩阵.不等准确度测量时,测量误差平方和最小这

$$V^{T}PV = \min \tag{7}$$

依据这一条件,得到正规方程解的表达式

$$\hat{X} = (A^{\mathrm{T}} P A)^{-1} A^{\mathrm{T}} P L \tag{8}$$

因为这个解是在 V 满足条件 V^T PV=min 时的

解,不是式(8)的严格解,所以用符号 \hat{X} 表示.

4.2 静态误差分析

静态误差是指测量仪器在其全量程内任一点输 出值与其理论值的偏离程度,也叫测量标准差.它是 一项综合性指标,包含了测距系统的系统误差和偶 然误差.静态误差∂的求取方法为

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n} p_i \Delta l_i^2}{(m \cdot 1) \sum\limits_{i=1}^{n} p_i}}$$
(9)

式中, Δl_i 为各测试点的测量误差;i为测试点数;m为 2.

光电测量系统自动化程度较高,测量环境比较 稳定,不受人为因素影响,因此可以认为绝对误差大 于 3δ 的误差是不可能出现的,这个误差对应的概率 P=99.37%.所以将 3δ 定为系统测量值的极限误 差.那么测量的静态相对极大误差 γ 求解公式为

 $\gamma = \pm (3\delta/y_{FS}) \times 100\%$ (10) 式中, y_{FS} 是测量系统的最大量程,在近距离测距系 统中, $y_{FS} = 2\ 000$ mm.

5 数据处理结果的分析

对相机系统作距离测量试验,在实验平台上建 立坐标表系,将测量相机放置在某一参考点上,并使 得相机光轴与坐标系中的某一坐标轴平行,并让实 验目标模型在实验台上移动.准备一卷尺,测量目标 移动过程中的作用距离值,同时记录相应位置相机 测量值.并对相机测量值和卷尺测量值进行列表记 录,如表 2.

米尺测量值	相机测量值	米尺测量值	相机测量值	米尺测量值	相机测量值	米尺测量值	相机测量值
/mm							
483	438	959	901	1376	1307	1771	1702
534	488	1008	948	1425	1356	1820	1742
584	536	1058	997	1474	1405	1841	1763
632	584	1107	1046	1524	1456	1891	1817
780	731	1158	1095	1573	1499	1940	1864
829	779	1208	1143	1623	1544	1992	1914
860	804	1257	1191	1672	1603	2089	2007
910	854	1306	1240	1722	1650		

表 2 距离测量试验数据

由表2可以看到米尺测量值和相机测量值之间 存在差异,这种差异是由两个方面原因引起的,其一 是米尺测量的起始位置参考点和相机测量的起始位 置参考点不重合;其二是相机测量系统存在着测量 误差(假定米尺测量没有误差).用以下两种方法对 相机测量数据进行修正处理:

1)不等准确度最小二乘法拟和处理算法

建立相机测量值修正模型: y = ax + b, 其中 y 为米尺测量值, x 为相机判读值, a 和 b 为测量修正 系数. 对整个近距离工作范围进行多次测量, 根据式 (8)通过多次测量值残余误差加权平方和最小的条 件, 计算模型中测量修正系数 a 和 b 的值. 并用该模 型进行相机测量数据修正处理.

2)测量参考位置修正法

建立相机测量值修正模型:y=x+b,其中 y 为 米尺测量值,x 为相机判读值,b 为测量参考位置修 正值.对整个近距离工作范围进行多次测量,通过式 (11)计算修正系数 b 值

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - x_i)}{n}$$
(11)

式中, y_i和 x_i一次测量值, n为试验测量次数.并用 该模型进行相机测量数据修正处理.

分别用这两种方法对表 2 中的测量数据进行了 修正处理.并对修正处理后的数据进行误差分析,计 算了这两种方法的修正后测量系统的测量绝对误 差,如图 3,图中 "Method of least square"表示测量 数据 经 过 不 等 准 确 度 最 小 二 乘 法 修 正 处 理; "Method of date correction"表示测量数据由测量参 考位置修正法处理,未用最小二乘法处理.



图 3 不同距离单次测量误差曲线

Fig. 3 Error of absolute measurement at different range

由图 3 可以看出由不等准确度最小二乘法处理 过的数据测量准确度高于测量参考位置修正后的数 据测量准确度,并且通过不等准确度最小二乘法处 理过后测量相机系统在近距离处测量准确度较高, 满足航天交汇对接和捕获测量的使用需要. 综合分析,对相机测量数据进行修正处理,计算 得到测量系统的测量误差和静态测量相对极大误 差.计算修正后相机系统每次测量的误差值 $\Delta l_i = l_i$ $-\hat{l}_i, \vec{r} + \hat{r}_i$ 表示经过数据修正后相机的测量值,并 将该值带入式(9)求出系统测量的标准差 $\delta = 1.741$ 3 mm,整个量程 0.4~2.0 m 范围内静态测量相对 误差根据式(10)计算为

 $\gamma = \pm (3 \times 1.7413/2000) \times 100\% \le 0.3\%$

采用最小二乘法拟和数据,消除了测量系统误差,并且极大的降低了测量随机误差.在整个数据处 理过程中引入不等准确度测量的概念,有效的提高 的小距离测量可信度,从而使得整个测量过程实现 了高准确度测量,静态测量相对误差小于 0.3%.

6 结论

本文结合近距离工作光电测量系统的研究论述 了近距离工作系统光学成像系统的要点及设计方 法,并完成了相关设计.对几何相似法测距系统的数 据处理方法进行了深入的研究,对光电测距系统中 不等准确度测量的问题进行了分析,提出了在单站 光电测距系统中不等准确度测量的权重与测量值的 四次方成反比的观点.依据该结论用最小二乘法对 测量数据进行误差修正处理,消除了测量仪器的系 统误差,降低了系统偶然误差,提高了光电测距系统 的测量准确度.

参考文献

- [1] MA Guo-song. Simulation of position and attitude estimating arithmetic based on monocular came [D]. Shengzhen: Harbin Institute of Thenology, 2005:1-7.
 马国松.基于单目视觉的位姿测量方法及仿真系统研究[D].
 深圳:哈尔滨工业大学, 2005:1-7.
- [2] ODA M, KIBE K, YAMAGATA F. ETS-VII, space robot inorbit experiment satellite[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996, 1(1):739-744.
- [3] LIU Pei-xiang. Machine arm of space robot is born in Harbin Institute of Thenology, and is used in repair of satellite[N]. Harbin Daily,2006-06-26(7).
 刘培香.飞行机器人空间机械手在哈诞生可用于卫星故障修复 [N].哈尔滨日报,2006-06-26(7).
- [4] FEI Ye-tai. The error theory and data processing method [M].
 Beijing: China Machine Press, 2000.
 费业泰.误差理论与数据处理[M].北京:机械工业出版社, 2000.
- [5] CHANG Ling-ying, YANG Jian-feng, ZHAO Bao-chang, et al. A new plane array CCD space three-dimensional photographic system[J]. Acta Photonica Sinica,,2005,34(8):1165-1168.
 常凌颖,杨建峰,赵葆常,等.一种新型面阵 CCD 航天立体摄影 测量光学系统[J].光子学报,2005,34(8):1165-1168.

A High Accuracy Electro-optical Range Measurement System at Approaching Distance

XIAO Xiang-guo^{1,2}, WANG Zhong-huo¹, BAI Jia-guang¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Shanxi Xi'an 710119, China) (2 Graduate university of the CAS. Beijing 130049, China) Received date: 2008-03-07

Abstract: Characteristic of the electro-optical short-range measurement camera was studied. An optical lens of this camera was designed. The data processing method based on geomagnetic similar principle was researched, and the conclusion that the range measurement is a unequal precision measurement was achieved. In order to reduce the measurement error, a series of formulas to correct the range measurement data were deduced. The date processing method can improve the precision of range measurement by contrast with the common correct method.

Key words: Approaching distance; Electro-Optical range measurement; Data processing; Least square method



XIAO Xiang-guo was born in 1979. He received his B. S. degree from the Instrument Engineering Department of Xi'an Institute of Technology in 2002. Now he is studying for his PH. D. degree in Xi'an Institute of the Optics and Precision Mechanics. His research interests focus on space optics and optical design.