基于面阵CCD的大视场在线检测系统研究

金 熠, 翟 超, 邢晓正, 滕 勇, 胡红专
(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 设计了一套非接触在线检测系统,该系统基于近景摄影测量原理,与传统测量方法相比,它可以对大视场内多目标同时进行检测。对CCD像机进行精密标定,利用光线束平差原理求解空间坐标,采用亚像素技术处理图像以及同名像点匹配等技术的运用,大大提高了检测精度。系统单幅拍摄线视场为141 mm,最终可以检测500 mm × 500 mm范围内的目标,空间坐标检测精度优于0.03 mm。该系统可应用于工业现场检测等众多相关领域。

关键词: 计量学; 近景摄影测量; 面阵CCD; 标定; 光线束平差; 亚像素技术
中图分类号: TB92 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-1158(2007)04-0306-05

Modeling and Simulation of LAMOST Focal Plane Observation Planning

JIN Yi, ZHAI Chao, XING Xiao-zheng, TENG Yong, HU Hong-zhuan
(University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract: A set of non-contact on-line detection system based on close-range photogrammetry is designed, which can detect multi-objects simultaneously in the wide field of view compared to the traditional measuring methods. The detection precision is increased through some key technologies such as precise calibration of CCD camera, light rays adjustment method, subpixel image processing technology and corresponding image points matching. The single frame photo-field is about 141 mm and 500 mm × 500 mm area is finally covered, the precision of space coordinates detection is less than 0.03 mm. This system has the potential in precision measurement, industry measurement and other application areas.

Key words: Metrology; Close-range photogrammetry; Area CCD; Calibration; Light rays adjustment method; Subpixel technology

1 引 言

精密三维测量技术在制造业和建筑学等众多领域有着广泛的应用,传统的测量方法有基于测距测角的工程测量、大型三维坐标测量机、基于磁力场的三维坐标测量设备等。如基于测角的电子经纬仪和全站仪、基于测角测距的激光跟踪仪、三坐标测量机,它们的测量范围可达几米至几十米,测角精度0.5″,位置精度几微米至几十微米。但都存在同样的缺点:只能进行逐点测量,存在测量盲区,不适用于大尺寸的测量。

近景摄影测量是从大地测量和航测测量发展起来的,现代计算机图像处理和模式识别技术的快速进步和高分辨率、高信噪比的数字成像CCD器件的出现大大加快了它的发展,使之成为目前精密测量研究和应用的一个热点[1-3]。近景摄影测量具有相当大的灵活性,它可以对不同量程,多目标的物体进行在线自动检测,同时根据处理方法、技术手段及硬件投入的不同可以达到10^{-3} ~ 10^{-6}的相对精度。

本文基于高精度的科学级面阵CCD,利用近景摄影测量方法搭建起一套测量系统,可以对大视场内的多个离散光点进行在线检测。

2 检测系统结构及原理

搭建了检测系统样机,系统结构组成如图1所示。CCD像机安装在云台上以一定方式做圆周运动,同时云台可以进行二维移动,拍摄对象为离散的发光光纤端面。云台、拍摄板均为自行设计,光纤的

收稿日期: 2006-07-04; 修回日期: 2006-11-14
基金项目: 国家"九五"重大科学工程资助项目(05BJG001)
作者简介: 金熠(1980 -),男,河南扶沟人,中国科学技术大学博士研究生,研究方向为光电检测技术、图像处理技术。

万方数据

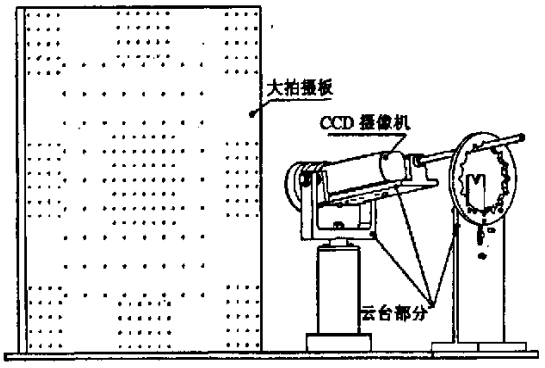


图 1 检测系统结构示意图

照明采用 10 W 的积分球,CCD 像机采用科学级的 Pulnix TM1040,像元尺寸 9 μm × 9 μm,镜头 Nikon 28 ~ 80 mm, *f*/2.8。

单幅像片线视场大约为 141 mm,要检测 500 mm × 500 mm 的视场必须进行多幅拍摄,我们采用了分区检测的思想,即将整个大视场分成 9 个小区域。如图 2 所示,大视场被多个小区域完全覆盖,而每个小区域又由 9 次 CCD 像机的拍摄所覆盖。由于像片间存在重合区,一个光点可能被重复拍摄,以它们的均值作为最终测量真值,从而消除各种误差,提高测量精度。

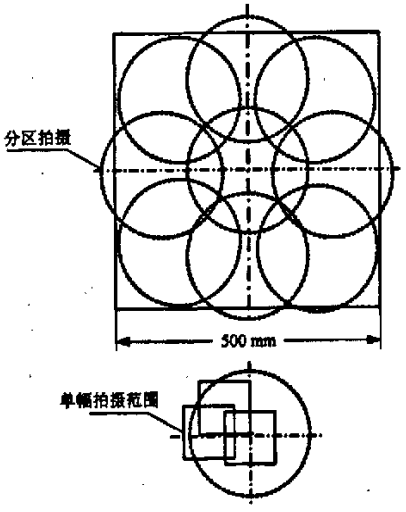


图 2 视场覆盖示意图

3 检测系统中的关键技术

3.1 CCD 标定

CCD 像机是检测系统的关键部件,它的成像模型对测量精度具有重要意义。成像模型是指用解析方式描述 CCD 像机实现的空间三维到二维像平面之间的映射关系,为确保成像模型的精度,应当将 CCD 像机成像物理过程中的主要误差因素考虑在内,这里我们采用最有效最通用的针孔模型,其成像几何关系如图 3。

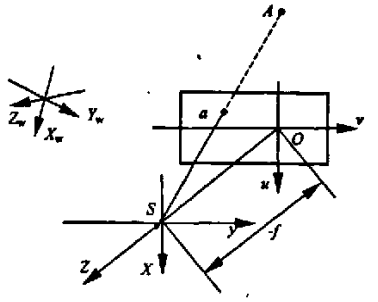


图 3 CCD 像机成像模型

物点 *A* 和投影中心 *S* 在世界坐标系 $X_W Y_W Z_W$ 中的坐标分别为 *XYZ* 和 $X_S Y_S Z_S$,等效焦距为 *f*,即点 *S* 到像面距离。摄影坐标系和世界坐标系间的旋转矩阵为

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}$$

图像物理坐标系和图像像素坐标系间的转换关系式为

$$r = r_0 + N_r u, \quad c = c_0 + N_c v$$

其中,N_r、N_c 分别为行列方向单位长度上的像元数,r_0、c_0 为像面中心。

考虑到像差 Δr、Δc,图像像素坐标系中坐标 (r, c) 与物点 *A* 世界坐标系中的坐标 (X, Y, Z) 之间的关系如式(1)所示:

$$\begin{cases} r = r_0 - fN_r \dfrac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} + \Delta r \\ c = c_0 - fN_c \dfrac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} + \Delta c \end{cases} \tag{1}$$

像差一般由径向畸变、薄棱镜畸变和离心畸变组成,表达式如下:

$$\begin{cases} \Delta r = kr(r^2 + c^2) + p_1(3r^2 + c^2) + 2p_2 rc + s_1(r^2 + c^2) \\ \Delta c = kc(r^2 + c^2) + p_2(r^2 + 3c^2) + 2p_1 rc + s_2(r^2 + c^2) \end{cases} \tag{2}$$

矩阵 $\boldsymbol{R}$ 与参数 X_S、Y_S、Z_S 表示像机空间姿态,也称之为外方位元素,它们在测量过程中不断发生变化。参数 *f*、r_0、c_0 及像场畸变系数 *k*、p_1、p_2、s_1、

万方数据

s_2 是 CCD 像机与镜头的固有属性，称之为内方位元素，在测试过程中不会发生变化，标定的目的即在于求解这几个参数。

标定过程中使用精密标定靶，该标定靶上面的光点阵列是由刻蚀工艺加工而成，如图 4 所示。相邻光点之间的距离为(5 ± 0.2%)mm，且横竖两个方向正交。标定靶放置在阿贝比长仪上(精度 < 1 μm)，校正靶面与阿贝比长仪移动方向的垂直精度，并将阿贝比长仪读数置零。接通 CCD 电源，预热 120 min，达到热平衡后，接通标定靶电源，重复拍摄 50 幅图像。连续移动阿贝比长仪 4 次，每次移动 10 mm，由此即可得到空间三维分布的控制点。控制点物方坐标与像方坐标均已知，即公式(1)中的 X、Y、Z、r、c 已知，利用 RAC 方法[4,5] 求解此非线性方程组可得像机内方位元素 。

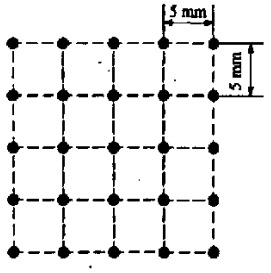


图 4 标定靶结构示意图

标定出参数后，利用式(1)求光点像面坐标的计算值，这样就可以得到计算解和实际坐标之间的残差，定义位置残差为 $\sqrt{\Delta r^2 + \Delta c^2}$，则光点位置残差统计直方图如图 5 所示。

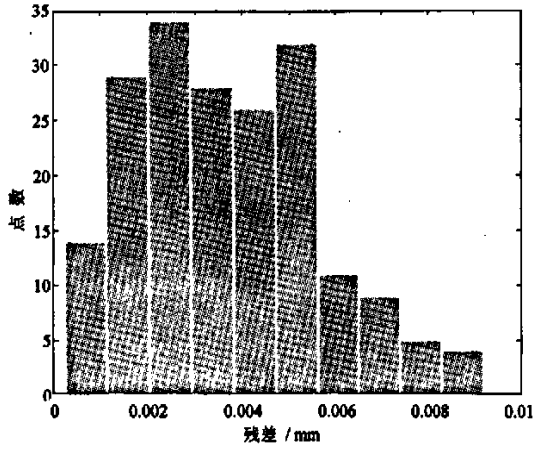


图 5 标定残差分布图

3.2 空间三维坐标求解

摄影测量方法就是把 CCD 像机的二维平面映射到三维空间中，只有对同一物点进行多幅相片覆盖才能唯一确定其空间三维坐标，如图 6 所示。在测量过程中 CCD 像机的空间姿态不断发生变化，首先需要对 CCD 像机进行精密空间定向，即确定像机的空间姿态。单张像片内只要有至少三个控制点，根据其像点坐标和对应的空间坐标就可以计算出外方位元素，然后根据公式(1)得物点空间坐标。

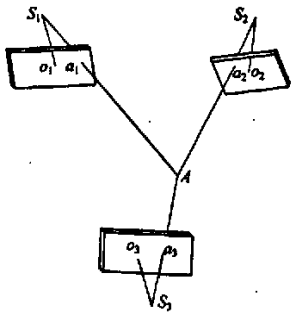


图 6 物点多幅覆盖示意图

这里我们采用光线束平差法将像机空间定向与物点三维坐标的解算同时进行，利用平差原理使各未知数的改正数最小，以得到高精度的空间三维坐标。这是一种将像点坐标、控制点坐标、外方位元素等均作为观测值的严格的摄影测量数据处理方法。在确定外方位元素的过程中，即确定光束在空间的位置与朝向中，所有上述的观测值，包括大量待定点的像点坐标观测值都起明显作用。换言之，所有这些观测值的质量直接影响所建模型的质量，影响所建模型的强度，影响待定点空间坐标的确定精度[6]。

将式(1)按泰勒级数展开取一次项，可得到如下误差方程：

$$\begin{cases} V_r = a_{11}\mathrm{d}X_S + a_{12}\mathrm{d}Y_S + a_{13}\mathrm{d}Z_S + a_{14}\mathrm{d}\alpha + a_{15}\mathrm{d}\beta + \\ \qquad a_{16}\mathrm{d}\gamma + a_{17}\mathrm{d}X + a_{18}\mathrm{d}Y + a_{19}\mathrm{d}Z - l_r \\ V_c = a_{21}\mathrm{d}X_S + a_{22}\mathrm{d}Y_S + a_{23}\mathrm{d}Z_S + a_{24}\mathrm{d}\alpha + a_{25}\mathrm{d}\beta + \\ \qquad a_{26}\mathrm{d}\gamma + a_{27}\mathrm{d}X + a_{28}\mathrm{d}Y + a_{29}\mathrm{d}Z - l_c \end{cases} \tag{3}$$

其中，$\mathrm{d}X_S$、$\mathrm{d}Y_S$、$\mathrm{d}Z_S$、$\mathrm{d}\alpha$、$\mathrm{d}\beta$、$\mathrm{d}\gamma$ 为外方位元素改正数，$\mathrm{d}X$、$\mathrm{d}Y$、$\mathrm{d}Z$ 为待测点空间坐标改正数，l_r、l_c 为像坐标观测值与近似计算值之差。

令 $V = [V_x \quad V_y]^T$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix}$$

$$t = [\Delta X_S \quad \Delta Y_S \quad \Delta Z_S \quad \Delta\alpha \quad \Delta\beta \quad \Delta\gamma]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} a_{17} & a_{18} & a_{19} \\ a_{27} & a_{28} & a_{29} \end{bmatrix}$$

$$X = [\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T$$

万方数据

$$L = [l_r \quad l_c]^T$$

则式(3)可写做

$$V = At + BX - L \tag{4}$$

因为存在控制点和待测点,故误差方程有下面两类:

$$\begin{cases} V_1 = A_c t - L_1 \\ V_2 = A_u t + B_u X_u - L_2 \end{cases}$$

其法方程为

$$\begin{bmatrix} A^TA & A^TB \\ B^TA & B^TB \end{bmatrix}\begin{bmatrix} t \\ X \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A^TL \\ B^TL \end{bmatrix} = 0 \tag{5}$$

其中,$A = [A_c \quad A_u]^T$,$B = B_u$,$L = [L_1 \quad L_2]^T$。

求解方程(5)可同时得到外方位元素与物点空间坐标的改正数,计算改正后的外方位元素和物点空间坐标,列出此时的误差方程,重复上述步骤直至改正数小于预先设定的限差,计算流程如图 7 所示。

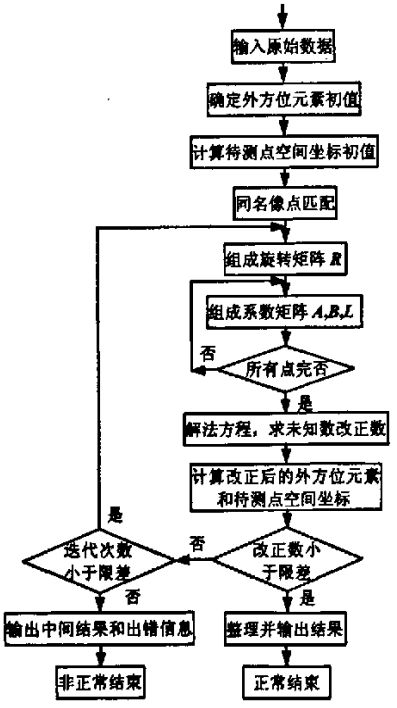


图 7　空间坐标求解流程图

3.3　同名像点匹配

因为光点可能被几幅图片所覆盖,故存在同名像点的匹配问题。在一般的三维重建中这是最难于解决的问题,因为一般图像较复杂特征提取困难,往往需要用到复杂的数学变换。而我们的测量对象为离散的光点,这给问题的解决提供了极大的便利。

对于每幅图片,像机姿态由云台旋转得到,因此外方位元素近似值很容易从机械间相互关系求得。即旋转矩阵 R 及 X_S、Y_S、Z_S 已知,考虑到测量点的近似共面约束,解方程(6)得每个光点的空间坐标初值。知道每个光点坐标初值后,只要在每幅图像中进行遍历即可求得同名像点。

$$\begin{cases} \dfrac{X - X_S}{Z - Z_S} = \dfrac{a_1 u + a_2 v - a_3 f}{c_1 u + c_2 v - c_3 f} = \dfrac{a_1(r - r_0)/N_r + a_2(c - c_0)/N_c - a_3 f}{c_1(r - r_0)/N_r + c_2(c - c_0)/N_c - c_3 f} \\ \dfrac{Y - Y_S}{Z - Z_S} = \dfrac{b_1 u + b_2 v - b_3 f}{c_1 u + c_2 v - c_3 f} = \dfrac{b_1(r - r_0)/N_r + b_2(c - c_0)/N_c - b_3 f}{c_1(r - r_0)/N_r + c_2(c - c_0)/N_c - c_3 f} \\ Z = \text{const} \end{cases} \tag{6}$$

3.4　亚像素图像处理技术

CCD 像机拍摄图像的处理质量对测量精度具有重要影响,采用亚像素图像处理技术可以将光点处理精度提高到亚像素级甚至更高,从而极大地提高系统的检测精度。质心法、基于灰度相关匹配法和基于边缘拟合法是 3 种有效的亚像素图像处理算法。质心法采用图像特征有效区域的质心作为特征点的精确位置,这种方法直观、计算简单、处理精度高,但对图像特征区域的划分敏感;基于灰度相关匹配法的特征点提取建立在图像相关运算的基础上,有优良的抗干扰性能和处理精度,其前提是待处理图像特征点的模式应当是先验已知的;基于边缘拟合法是一种解析处理方法,建立在图像边缘提取和跟踪的基础上,它对图像质量有严格要求。

我们的测量对象是离散的光点,它的区域特征明显,因此采用国际上比较通用的质心法来确定光斑位置,即利用光斑灰度加权中心的行列坐标来表征光斑的物理位置。其计算公式如下:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} j \cdot g[i,j]}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} g[i,j]}, \qquad Y = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} i \cdot g[i,j]}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} g[i,j]}$$

其中 $g[i,j]$ 表示像元$[i,j]$的灰度值。

对 7 个光点进行连续拍摄,利用光重心法计算光斑坐标,表 1 说明这种方法具有良好的稳定性,像素细分精度小于 0.04 像元[7]。

4　实验结果分析

测试方法:对每个小区域利用云台转动 CCD 像机拍摄 9 次,每次重复拍摄 30 次取其均值作为测量值。移动云台拍摄下每一个小区域,直至覆盖整个

万方数据

视场，检测区域内共有 95 个光点，取其中的 24 个点作为控制点并尽可能让控制点遍布在整个拍摄视场内，计算光点空间三维坐标。重复上述过程。

表 1 光点检测稳定性数据 像元

光点序号	行极差	行标准差	列极差	列标准差
1	0.0320	0.0075	0.0190	0.0046
2	0.0290	0.0108	0.0300	0.0136
3	0.0350	0.0104	0.0300	0.0067
4	0.0360	0.0106	0.0350	0.0066
5	0.0390	0.0112	0.0330	0.0079
6	0.0370	0.0145	0.0400	0.0092
7	0.0340	0.0163	0.0260	0.0072

为了衡量检测系统的精度，我们定义了空间坐标残差和系统重复测量精度，前者反映系统的三维检测精度，后者体现系统的稳定性。利用大型三坐标测量机检测所有光点的空间坐标，由于三坐标机的空间检测精度为 5 μm，因此将此实测值认作真值。

令$(\bar{X},\bar{Y},\bar{Z})$作为其坐标真值，$(X_i,Y_i,Z_i)$为测量值，$\Delta X = X_i - \bar{X}$，$\Delta Y = Y_i - \bar{Y}$，$\Delta Z = Z_i - \bar{Z}$，空间坐标残差定义为 $\Delta = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$。记第一次测量空间坐标残差为 Δ_1，第二次为 Δ_2，则定义系统重复测量精度为 $\Delta_1 - \Delta_2$。如图 8 所示。重复测量精度在 ±0.003 mm 之间，即这套检测系统具有很高的稳定性，实验数据具有可重复性。

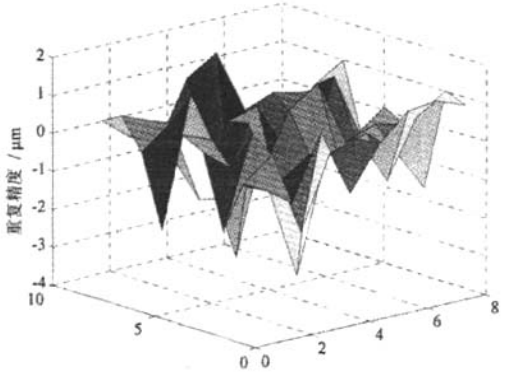


图 8 重复测量精度

一次测量的残差分布如图 9 所示，均值 0.0152 mm，方差 0.0058 mm，最大不超过 0.03 mm，残差在 0.025 mm 与 0.03 mm 间的点数略显偏多，其余呈近似的正态分布，这说明实验的测量误差中基本不存在系统误差，主要是 CCD 标定、成像质量等随机误差的总和。

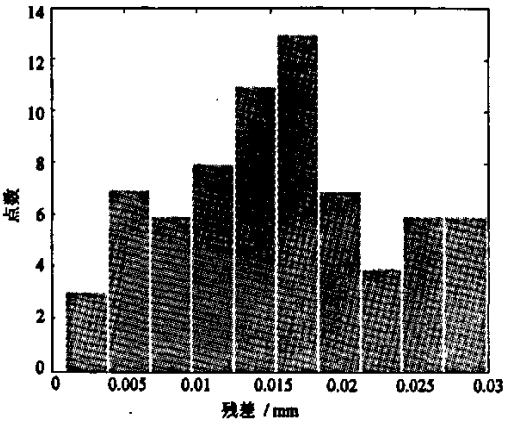


图 9 位置残差分布图

5 结 论

摄影测量方法在精密三维测量方面具有广泛的应用，具有传统检测方法所不具有的大视场多目标检测等优点。本文对基于面阵 CCD 的大视场检测系统进行了研究设计，阐述了其中的关键技术。这套系统具有如下优点：(1) 可以对大视场目标进行检测；(2) 非接触的自动化测量；(3) 可以同时对多个目标进行检测；(4) 检测的精度高。

本文搭建了基于面阵 CCD 的大视场检测系统的样机，通过实验验证其可行性，空间检测精度可达 0.03 mm。这套系统具有众多优点，可以应用到精密测量、工业检测和其它检测领域。

[参 考 文 献]

[1] Fraser C S. Innovation in Automation for Vision Metrology System [J]. *Photogramm Record*, 1997, 15(90): 901 ~ 911.

[2] Beyer H A. Digital Photogrammetry in Industrial Application [J]. *IAPRS*, 1995, 30(5): 373 ~ 378.

[3] 邾继贵，叶声华. 基于近景数字摄影的坐标精密测量关键技术研究[J]. 计量学报，2005, 26(3): 207 ~ 211.

[4] 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 ~ 341.

[5] 周富强，邾继贵，等. CCD 摄像机快速标定技术[J]. 光学精密工程，2000, 8(1): 96 ~ 100.

[6] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉：武汉大学出版社，2002.

[7] Weimin Li, Xiaozheng Xing, Yi Jin, *et al*. The Measurement System for Fiber Positioning Unit of LAMOST[A]. Ground - based Instrumentation for Astronomy[C]. Bellingham, 2004.

万方数据