

## 基于多准直光的六自由度测量方法

吕 勇<sup>1,2</sup>, 冯其波<sup>1</sup>, 刘立双<sup>2</sup>, 耿 蕊<sup>2</sup>, 吴思进<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 理学院, 北京 100044;  
2. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

**摘 要:** 提出了一种利用三个 CCD 探测三路准直光束位置以实现被测物六自由度测量的方法。测量系统包括两部分: 一个反射镜和通过连接杆连接的两个 CCD 为移动部分, 固接在被测物上; 固定部分的光源、光开关和三个光学准直器产生三路准直光束。其中两路分别投射到两个 CCD 上, 第三路经移动部分的反射镜反射回并由第三个 CCD 探测。被测物发生六自由度变化时, 移动部分同步变化, 三个 CCD 探测的光斑位置也随之变化, 通过特定算法可解算出被测物六自由度运动。构建了一个可以表征六自由度测量特性的四自由度测量系统。测量结果表明: 在相应测量范围内, 与双频激光干涉仪或光电自准直仪测量值相比, 系统偏摆角最大差值为 1.27", 滚转角最大偏差为 1.03", 两个平动位移最大偏差均小于 1  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 测量; 六自由度; 准直光

**中图分类号:** TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3597-06

## Six-degree-of-freedom measurement method based on multiple collimated beams

Lv Yong<sup>1,2</sup>, Feng Qibo<sup>1</sup>, Liu Lishuang<sup>2</sup>, Geng Rui<sup>2</sup>, Wu Sijin<sup>2</sup>

(1. School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering, Beijing Information & Science Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Using 3 CCDs to detect the position changes of 3 collimated beams, a six-degree-of-freedom measurement method was presented. The measurement system consisted of two parts. A mirror and two CCDs that were connected together by a link rod form the moving part. It was fixed to and moving along with the measured object. A light source, an optical switch and three optical collimators of the fixed part emitted 3 collimated beams. Two collimated beams projected on two CCDs respectively. The third one was reflected back by the mirror and captured by the third CCD. Six-degree-of-freedom motion of the measured object led to the synchronous change of the moving part, resulting in position changes of 3 light spots on CCDs. Then with a set of algorithms, the six-degree-of-freedom motion of the measured object can be calculated based on these position changes. A four-degree-of-freedom measurement system, which can manifest the characteristics of six-degree-of-freedom measurement, was built and experimental tests were carried out. Within the corresponding measurement range, compared with the results of the

收稿日期: 2014-03-10; 修订日期: 2014-04-15

基金项目: 北京市自然科学基金(3144028)

作者简介: 吕勇(1971-), 男, 教授, 主要从事精密光电检测技术方面的研究。Email: lv Yong@bistu.edu.cn

dual-frequency laser interferometer and photoelectric auto-collimator system, the maximum deviations of yaw and roll in this system are 1.27" and 1.03", and that of two translational movements are less than 1  $\mu\text{m}$ .

Key words: measurement; six-degree-of-freedom; collimated beam

## 0 引言

现代科学技术的发展,对航天、航空、机械、仪表等众多领域内的加工精度、安装精度和检测精度提出了更高的要求。被加工工件的定位、精密零件的安装、目标物体在空间的位置与运动监测等,都需要多至六个自由度的测量、调整和控制。传统的以激光干涉仪为代表的单参数测量方法难以满足以上要求。例如,三线阵 CCD 航天测绘相机在轨运行期间其三对镜头和线阵 CCD 的空间位置会发生微小变化,这将导致其内方位元素(相机焦距,像主点位置以及交会角)发生变化,从而造成卫星摄影测量误差。实时监测各部件空间位置变化可以直接有效解决以上问题。但理论上三对镜头和线阵 CCD 共 36 个自由度,其中某一个自由度的变化往往会连带引起其他参数的变动,单自由度测量方法无法胜任,必须采用特殊的多自由度同时测量方法<sup>[1-2]</sup>。

20 世纪 70 年代以来,多自由度同时测量技术发展很快,基于不同光学原理,涌现出了多种测量方法。如基于干涉技术的多自由度测量方法<sup>[3-4]</sup>、基于衍射技术的多自由度测量方法<sup>[5-6]</sup>、激光跟踪技术<sup>[7-8]</sup>、视觉测量技术<sup>[9-10]</sup>等,而基于准直光束的多自由度测量技术<sup>[11-14]</sup>因其相对灵活的组成,紧凑的结构和较高的测量精度,成为研究的热点。例如匡萃方等<sup>[11]</sup>以单一准直激光束作为测量基准,利用角锥棱镜和分光器实现了直线导轨四自由度同时测量,且测量移动头无电缆连接;Ni 等<sup>[12]</sup>所设计的三光束同时测量五自由度系统,在移动部分和固定部分距离 0.5 m 时,线位移分辨力为 2  $\mu\text{m}$ ,偏摆角和俯仰角的角位移分辨力很高,但滚转角分辨力较低;范光照<sup>[13]</sup>等提出的四光束基准六自由度测量方法,采用四套多普勒位移测量仪和两个光电探测器,配合 L 型反射镜和直角棱镜,成本较高,等等。多自由度测量的一个难点是滚转角测量,一直缺乏简单有效的高精度测量方法。且随着所测自由度的增加,需要引入更多光

学器件或测量仪器,系统结构和调整也变得非常复杂,限制了各系统的使用。

文中提出了一种基于三准直光束的六自由度同时测量系统,利用三个面阵 CCD 探测各准直光斑位置,从而解算出被测物全部六自由度变化。系统结构简单,光路调节方便,各自由度(包括滚转运动)测量精度高。

## 1 测量原理

### 1.1 测量系统

测量系统如图 1 所示,包括运动和固定两个部分:运动部分与被测物紧固连接并同步变化,包括反射镜、连接杆、CCD1 和 CCD2,两 CCD 通过连接杆

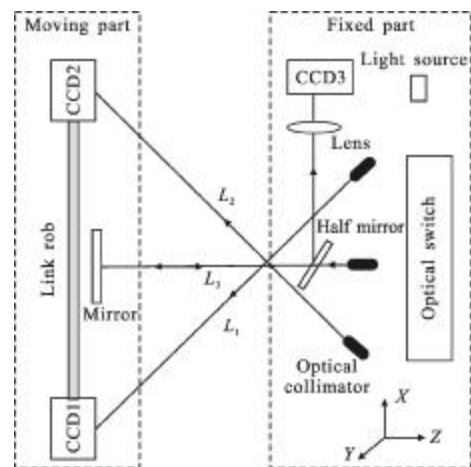


图 1 六自由度同时测量系统结构图

Fig.1 System configuration for synchronous six-degree-of-freedom measurement

连为一体;固定部分由光源、光开关、三个光学准直器、半透半反镜、透镜和 CCD3 组成。光源发出的光经光纤耦合入光开关,再经光学准直器产生三路准直光 ( $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ )。其中  $L_1$ 、 $L_2$  分别投射到 CCD1 和 CCD2 上, $L_3$  经反射镜、半透半反镜反射后由透镜汇聚到 CCD3 上。当被测物的空间位置和姿态发生变化时,三个 CCD 上的光斑位置会随之发生变化,其中包含了所有六自由度变化信息。建立测量系统的

数学模型,通过光斑位置变化,先测得偏摆和俯仰变化,然后求解出滚转变化,最后解算出三个平动自由度变化。

### 1.2 转动量的测量

#### 1.2.1 偏摆和俯仰的测量

偏摆角和俯仰角的测量是基于自准直原理,原理如图 2 所示。准直光  $L_3$  经半透半反镜投射到反射镜上,反射光经半透半反镜、透镜投射到 CCD3 像面上。反射镜与被测物固接,被测物俯仰或偏摆运动时,反射镜随之变化,反射到 CCD3 上的光斑位置也会随之改变。

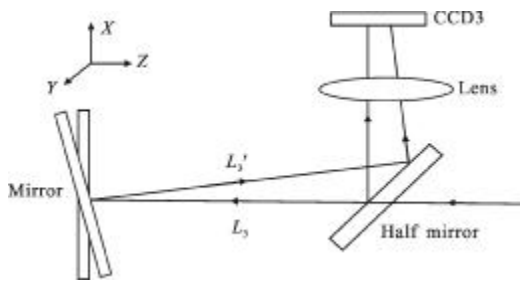


图 2 偏摆和俯仰的测量原理  
Fig.2 Measuring principle of yaw and pitch

光斑位置只对被测物俯仰和偏摆运动敏感,对滚转和三个平动变化不敏感,从而实现了自由度变化分离。

光斑  $x$  方向位置变化  $\Delta x$  和  $y$  方向位置变化  $\Delta y$  分别为:

$$\begin{cases} \Delta x = -2f\theta_y \\ \Delta y = -2f\theta_x \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f$  为透镜焦距; $\theta_y$  为俯仰角; $\theta_x$  为偏摆角。因此,根据所测光斑位置变化就可以求解出被测物俯仰和偏摆运动变化:

$$\begin{cases} \theta_y = -\Delta x/2f \\ \theta_x = -\Delta y/2f \end{cases} \quad (2)$$

#### 1.2.2 滚转的测量

滚转测量原理如图 3 所示,CCD1 和 CCD2 上的光斑分别由  $L_1$ 、 $L_2$  直接投射产生, $D$  为两个 CCD 的间距。光斑初始位置中心坐标分别为  $A_{10}(x_{10}, y_{10})$  和  $B_{10}(x_{20}, y_{20})$ ,被测物发生空间姿态变化后,两光斑位置也会随之发生变化,其中心坐标分别变为  $A_1(x_1, y_1)$  和  $B_1(x_2, y_2)$ 。两光斑中心的连线  $I_1$  和  $I_2$  的斜率  $k$  变化可表示为:

$$\Delta k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1 + D} - \frac{y_{20} - y_{10}}{x_{20} - x_{10} + D} \quad (3)$$

两连线间夹角  $\gamma_0$  为:

$$\gamma_0 = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1 + D}\right) - \arctan\left(\frac{y_{20} - y_{10}}{x_{20} - x_{10} + D}\right) \quad (4)$$

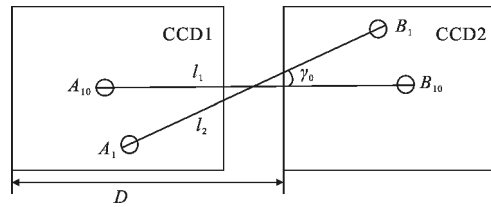


图 3 滚转的测量原理  
Fig.3 Measuring principle of roll

被测物平动变化不会引起直线斜率变化,该斜率变化是由滚转、偏摆、俯仰运动综合引起<sup>[15]</sup>。精确求解滚转角时需要将偏摆和俯仰的影响消除。

当被测物发生偏摆或者俯仰运动时,其运动的旋转矩阵  $R$  为:

$$R = R_y R_x = \begin{bmatrix} \cos\theta_x & \sin\theta_y \sin\theta_x & -\sin\theta_y \cos\theta_x \\ 0 & \cos\theta_x & \sin\theta_x \\ \sin\theta_y & -\cos\theta_y \sin\theta_x & \cos\theta_y \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过旋转矩阵  $R$  及光线的直线方程可以解算出当物体只发生偏摆和俯仰时两准直光束在 CCD 上的两光斑坐标  $A(x_{1Rxy}, y_{1Rxy})$  和  $B(x_{2Rxy}, y_{2Rxy})$ ,则由偏摆和俯仰运动引起的滚转角误差  $\gamma_{Rxy}$  为:

$$\gamma_{Rxy} = \arctan\left(\frac{y_{2Rxy} - y_{1Rxy}}{x_{2Rxy} - x_{1Rxy} + D}\right) - \arctan\left(\frac{y_{20} - y_{10}}{x_{20} - x_{10} + D}\right) \quad (6)$$

由此可得滚转角  $\gamma$  为:

$$\gamma = \gamma_0 - \gamma_{Rxy} \quad (7)$$

### 1.3 平动量的求解

如图 4 所示,设 CCD1 和 CCD2 初始成像面的

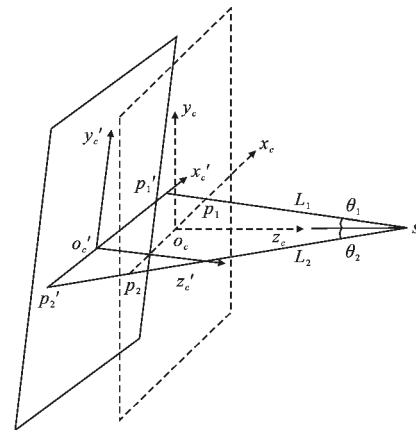


图 4 平动量的测量原理  
Fig.4 Measuring principle of translation

坐标系为  $o_c-x_c y_c z_c$ , 两准直光束  $L_1, L_2$  反向延长线交于  $s$  点, 与初始成像面法向 ( $Z$  轴方向) 的夹角分别为  $\theta_1, \theta_2$ , 与像面的交点分别为  $p_1, p_2$ 。两 CCD 随被测物运动变化后像面所在坐标系为  $o_c'-x_c' y_c' z_c'$ , 两准直光束  $L_1, L_2$  与运动后像面的交点分别为  $p_1', p_2'$ 。

$[x \ y \ z]^T, [x' \ y' \ z']^T$  分别为被测物运动变化前后

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_x \cos\theta_z & \cos\theta_x \sin\theta_z + \sin\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z & \sin\theta_x \sin\theta_z - \cos\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z \\ -\cos\theta_x \sin\theta_z & \cos\theta_x \cos\theta_z - \sin\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z & \sin\theta_x \cos\theta_z + \cos\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z \\ \sin\theta_y & -\sin\theta_x \cos\theta_y & \cos\theta_x \cos\theta_y \end{bmatrix}$$

空间中入射准直光沿直线传播, 可以用其上的任一点坐标以及该点的方向来表示, 则两入射光分别表示为:

$$\begin{cases} \text{line1}=[s \ s-p_1] \\ \text{line2}=[s \ s-p_2] \end{cases} \quad (8)$$

当被测物发生六自由度变化, 根据公式(7)可求出变化后新坐标系下  $s', p_1', p_2'$  的表达式, 带入公式(8)可得新的入射光表达式。该入射光线与像平面的交点就是新的光斑位置, 而新光斑位置  $(X_1, X_2)$  和  $(Y_1, Y_2)$  可由 CCD1 和 CCD2 直接测得。在已知三个转动自由度(俯仰、偏摆、滚转)的情况下, 联立后获得四个方程, 利用最小二乘法求解即可得三个未知的平动自由度变化量。

## 2 实验及数据分析

基于前述六自由度测量原理, 有两对自由度比较特殊, 分别为偏摆-俯仰和  $X$  方向平动- $Y$  方向平动。例如, 偏摆和俯仰变化分别与光斑在面阵 CCD 的  $X$  和  $Y$  方向位移变化相对应, 二者测量原理相同, 测量范围和精度相当, 由一个自由度测量特性即可推知另一个自由度测量情况。因此, 结合实验室条件, 合理简化系统, 从两对自由度中分别选择偏摆和  $X$  向平移, 再加上滚转- $Z$  向平移, 构建了一个四自由度测量实验系统, 其测量结果可以表征全部六自由度测量特性。系统结构如图 5 所示, 测量部分包括三路准直光束、三个面阵 CCD 相机(AVT Guppy F-146B)及半透半反镜、透镜、反射镜各一个。五维微动台模拟被测物  $X$  向、 $Z$  向平动、偏摆和滚转变化。标定仪器采用三套 HP5529 双频激光干涉仪和一套 Nikon6B 光电自准直仪。其中, 双频激光干涉仪 A、B、C 分别用于标定  $X$  向平动、 $Z$  向平动和滚转运动,

同一点在不同坐标系下的坐标。根据刚体运动坐标变换关系, 有:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_2 R_y R_z \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, 旋转矩阵:

光电自准直仪用来标定偏摆运动。

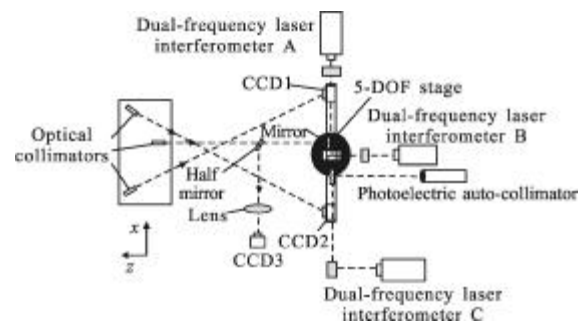


图 5 四自由度测量实验系统

Fig.5 Experiment setup for four-degree-of-freedom measurements

### 2.1 光斑稳定性

LED 光源发出的光经光纤耦合进光开关, 再经三个光学准直器获得三路准直光。在常温常压的实验环境下, 进行光斑稳定性实验。通过切换光开关, 对每一路光斑分别连续采集 60 min, 每 24 s 采集定位一次, 得到三路光斑中心位置  $X$  和  $Y$  坐标。测量结果表明, 三路光斑  $X$  坐标波动变化的标准偏差分别为  $0.12 \mu\text{m}$ 、 $0.10 \mu\text{m}$  和  $0.14 \mu\text{m}$ ;  $Y$  坐标波动变化的标准偏差分别为  $0.17 \mu\text{m}$ 、 $0.11 \mu\text{m}$  和  $0.22 \mu\text{m}$ 。三路光斑在 60 min 内具有很高的稳定性, 达到该系统精密测量的要求, 光斑漂移影响可忽略不计。

### 2.2 四自由度比较实验

#### 2.2.1 偏摆角测量

控制五维微动台偏摆运动, 步距约  $60''$ , 总行程约  $600''$ , 每转动一次, 采集 CCD3 相机光斑中心位置, 并记录相应 Nikon6B 光电自准直仪读数, 将测量值与光电自准直仪测量值进行对比, 测量结果如图 6 所示。

系统所测偏摆角与 Nikon6B 测量值的偏差主要在  $0 \sim 1''$  范围内变化, 最大差值为  $1.27''$ 。

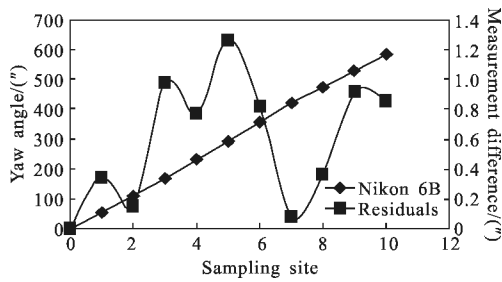


图 6 偏摆测量结果

Fig.6 Measurement results of yaw

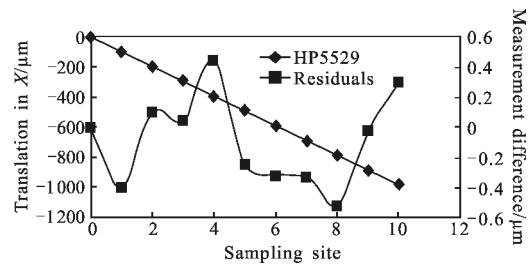
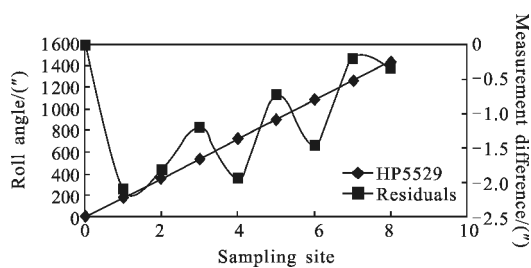


图 8 X 向平移测量结果

Fig.8 Measurement results of the translation in X direction

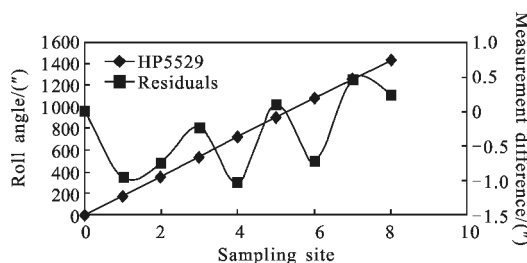
### 2.2.2 滚转角测量

控制微动台滚转运动,步距约 180",总行程约为 1500",测量结果如图 7 所示。



(a) 不考虑偏摆影响时滚转角测量结果

(a) Without compensation of yaw



(b) 考虑偏摆影响时滚转角测量结果

(b) With compensation of yaw

图 7 滚转角测量结果

Fig.7 Measurement results of roll

图 7(a)为不考虑偏摆运动对滚转角测量的影响,在 1 500"测量范围内,该系统与 HP5529 的测量值最大偏差达 2.10";图 7(b)为对偏摆的影响进行修正后的结果,最大偏差降为 1.03",进一步验证了前述滚转角测量原理的正确性。

### 2.2.3 X 向平移测量

控制微动台 X 方向平移,行程约 1 mm,步距约 100 μm,同时记录相应双频激光干涉仪读数,实验结果如图 8 所示。

实验结果表明:测量系统所测 X 方向位移与 HP5529 测量值的偏差主要在 ±0.50 μm 范围内变化,最大差值为 0.52 μm。

### 2.2.4 Z 向平移测量

同上,控制微动台 Z 方向平移,行程约 1 mm,步距约 100 μm,实验结果如图 9 所示。

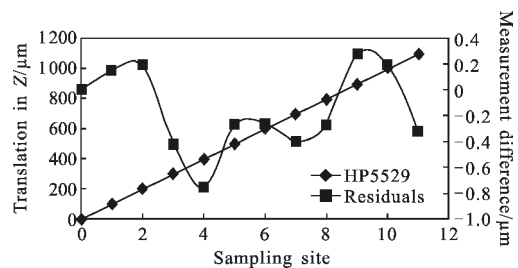


图 9 Z 向平移测量结果

Fig.9 Measurement results of the translation in Z direction

实验结果表明:测量系统所测 Z 方向位移与 HP5529 测量值的偏差主要在 1 μm 范围内变化,最大偏差 0.76 μm。

需要指出的是,实验中用于标定的双频激光干涉仪是单自由度测量仪器,其测量点与四自由度测量实验系统不完全一致,微动台多自由度混合运动会带来额外的阿贝误差,此时不适宜将二者测量结果直接比对。同时,微动台单自由度运动时二者直接比对的测量偏差值也不等同于测量误差,但考虑到微动台单自由度运动时关联的其他自由度变化很小,此偏差值基本能反映所设计测量系统的测量精度。

## 3 结论

文中提出一种基于三路准直光的六自由度测量方法,根据前述等效性原则,该测量系统俯仰-偏摆、X 方向平移-Y 方向平移测量精度相当,与 HP5529A

双频激光干涉仪或 Nikon6B 光电自准直仪的测量结果相比,在 0~600"测量范围内,偏摆和俯仰测量偏差不大于 1.27";0~1 mm 平动范围内,X、Y、Z 方向平动偏差均不超过 1  $\mu\text{m}$ ; 补偿修正后在 1 500"测量范围内,滚转测量偏差不大于 1.03",实现了六自由度高精度测量。系统结构简单,所用光学器件少,光路设置和调节灵活方便,可应用于航空航天,精密机械等领域的非接触高精度多自由度测量。

#### 参考文献:

- [1] Lv Yong, Feng Qibo, Sun Shijun, et al. Feasibility analysis of on-orbit intersection angle monitoring for three-line-array mapping camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 3390-3395. (in Chinese)  
吕勇, 冯其波, 孙世君, 等. 三线阵测绘相机交会角在轨监测可行性分析 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 3390-3395.
- [2] Zhang Lei, Yang Jianfeng, Xue Bin, et al. Super-resolution reconstruction of Chang'e -1 satellite CCD stereo camera images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 404-408. (in Chinese)  
张磊, 杨建峰, 薛彬, 等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机影像超分辨率重建算法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 404-408.
- [3] Zhang Jihua, Menq Chia-Hsiang. A linear/angular interferometer capable of measuring large angular motion[J]. *Meas Sci Technol*, 1999, 10(12): 1247-1253.
- [4] Menq Chia-Hsiang, Zhang Jihua, Shi Jian. Design and development of an interferometer with improved angular tolerance and its application to x-y theta measurement [J]. *Rev Sci Instrum*, 2000, 71(12): 4633-4638.
- [5] Jong-Ahn Kim. Design methods for six-degree-of-freedom displacement measurement systems using cooperative targets [J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(1): 99-104.
- [6] Miller J M, Barton R O. Multi-axis alignment apparatus: US, 4804270[P]. 1989-02-14.
- [7] Liu Yongdong, Wang Jia, Liang Jinwen. Dynamic target pose measurement by laser tracking [J]. *Laser & Infrared*, 1999, 29(6): 148-150. (in Chinese)  
刘永东, 王佳, 梁晋文. 动态目标全姿态激光跟踪测量[J]. *激光与红外*, 1999, 29(6): 148-150.
- [8] Kenta Umetsu, Ryosyu Furutnani, Sonko Osawa, et al. Geometric calibration of a coordinate measuring machine using a laser tracking system [J]. *Meas Sci Technol*, 2005, 16(12): 2466-2472.
- [9] Sharon S W, James I C, Kevin J S, et al. Optical position measurement for a large gap magnetic suspension system [C]//SPIE, 1991, 37: 163-182.
- [10] Ruan Xiaodong, Li Shilun, Zhuge Liang, et al. Study on the pose measurement of multi-degree-freedom mechanisms with stereovision [J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(5): 571-573. (in Chinese)  
阮晓东, 李世伦, 诸葛良, 等. 用立体视觉测量多自由度机械装置姿态的研究[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(5): 571-573.
- [11] Kuang Cuifang, Feng Qibo, Zhang Bin, et al. A four-degree-of-freedom laser measurement system (FDMS) using a single-mode fiber-coupled laser module [J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, 125(1): 100-108.
- [12] Ni J, Wu S M. An on-line measurement technique for machine volumetric error compensation [J]. *ASME Trans Journal of Engineering for Industry*, 1993, 115: 85-92.
- [13] Fan Kuangzhao, Chen Mujung. A 6-degree-of-freedom measurement system for the accuracy of X-Y stage [J]. *Precision Engineering*, 2000, 24(1): 15-23.
- [14] Vann Charles S. Six degrees of freedom sensor: US, 5883803 [P]. 1999-03-16.
- [15] Lv Yong, Sun Peng, Liu Lishuang, et al. A roll angle measurement method based on dual CCDs [J]. *Optical Technique*, 2013, 39(5): 478-479. (in Chinese)  
吕勇, 孙鹏, 刘力双, 等. 基于双 CCD 的滚转角测量方法研究[J]. *光学技术*, 2013, 39(5): 478-479.