**文章编号**: 1002-1582(2010)03-0344-06

# 六自由度机构位姿的单相机照相测量研究

**李徽**<sup>1,3</sup>,杨德华<sup>1,2</sup>,翟超<sup>4</sup> (1. 中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所,南京 210042) (2. 中国科学院天文光学技术重点实验室,南京 210042) (3. 中国科学院研究生院,北京 100049) (4. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系,合肥 230026)

摘 要:用单相机对新型的六自由度机构样机的六个自由度位移进行了非接触式照相测量。简要回顾了照相法的 研究概况及该测量研究的工作背景;介绍了相机标定原理及具体标定方法。建立了被测样机的 CAD 模型,进行了自由 度位移仿真,将仿真结果作为理想数据与实测数据进行比较,从而获得测量误差,并对测量误差进行了初步分析。探讨 了单相机照相测量法的应用前景。

关 键 词:照相测量法;单相机测量;相机标定;建模仿真;六自由度机构;位移 中图分类号:TG806 **文献标识码**:A

## Research on the pose measurement of a 6-DOF platform using a single camera

LI Hui<sup>1,3</sup>, YANG De-hua<sup>1,2</sup>, ZHAI Chao<sup>4</sup>

(1. National Astronomical Observatories/ Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

(2. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical

Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

(3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4. Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science

and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract :** Photogrammetry with a single camera is preferably chosen as contactless method for the pose measurement of a novel 6-Degree-of-Freedom (DOF) platform prototype. Application research on photogrammetry technique and back-ground of the measurement are briefly reviewed. Camera calibration theory and specific calibration method implemented during the measurement are described. A CAD model of the prototype is built to simulate ideal displacements of its 6 DOFs, which are then compared with the measured data to figure out measurement error. The error sources are preliminarily investigated. The prospects of the application of photogrammetry with a single camera are commented.

Key words: photogrammetry; single camera photogrammetry; calibration, modeling and simulation; 6-DOF platform; displacement

\* 收稿日期: 2009-09-07; 收到修改稿日期: 2009-12-30 基金项目:国家自然科学基金 (10973025)支持 E-mail : lihui138 @mail.ustc.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金 (10973025)支持 作者简介:李徽(1986-),男,南京天文光学技术研究所硕士研究生,从事精密机械及测试研究。

## 0 引 言

以基于计算机视觉和图像处理的照相测量技术 用于非接触测量已成为一种优秀的测量方法。随着 视觉理论的发展,对 CCD 相机的理论模型、标定技 术和非线性的研究日趋完善<sup>[1→6]</sup>,并出现了如 PhotoModeler 等商业软件和 EasyCalib 等自由软件。 照相测量法的核心器件 CCD 相机商业化成本低,组 成照相测量系统后自动化程度高,具有其它测量手 段所不能比拟的优越性,已广泛地应用于工业检测、 反向工程及机器人视觉等工业和科研领域。如, Ravi Subrahmanyan 等对 22m 的 Cassegrain 天线 进行了重力变形测量,空间测量精度达到了 30—50 µm(RMS)<sup>[2]</sup>;张淑平等人利用双目法对六自由度大 载荷实验平台进行了测量,其最大线位移测量误差 约 3 mm,最大角位移测量误差约 0.4<sup> §1]</sup>。

在实际照相机法测量的工作中,已越来越多地 采用单相机照相测量法。多米宁射电天体物理观测 站的 Brent Carlson 等利用单 CCD 相机对主动光学 的面板/子镜进行多自由测量,其在 2-12m 的范围 上测量精度可以达到 200 µm<sup>[4]</sup>。金熠在大天区多 目标光纤光谱望远镜 LAMOST 的光纤定位中采用 单相机对光纤定位进行测量达到要求的 40 µm 定 位误差[7]。单相机相对于多相机而言,其相机位置 易于设置,测量系统较为简单,操作空间小,而多相 机照相测量系统中相机之间相对位置要求严格,相 应测量精度虽较单相机高,但其测量系统复杂,成本 较高。因此利用单相机法测量六自由度平台有着充 分的理论基础和较多可挖掘的精度空间。在本文工 作成文期间中.我们检索到 Thomas Luhmann 最新 发表的关于单相机测量六自由度机构位姿的详细仿 真的论文<sup>[8]</sup>,归纳总结了单相机在此类工作中的六 自由度测量精度与测量中标志点分布.机构相对位 置以及相机本身的关系。

六自由度机构/并联机器人具有原理简洁,结构 简单,型式(拓扑)多样,功能灵活,以及可实现大载 荷、高精度的特点,使之得到广泛研究和应用<sup>[9]</sup>。根 据工程应用要求,我们提出了一种新型摆臂式六自 由度运动机构<sup>[10]</sup>,设计了原型样机,并采用单相机 照相测量法进行了初步运动测量。下文主要介绍以 单个普通业余摄影相机为测量工具,并利用相机标 定自由软件 calib-for-matlab 对相机进行标定,从而 对上述新型的六自由度机构的位姿(六个自由度位 移)进行测量的系统和方法。由于无其它精密测量 手段进行比对,为考察和分析测量误差,我们采用软 件仿真的方法,即,采用 Solidworks 建立了被测样 机的 CAD 模型进行自由度位移仿真,将仿真结果 作为理想位移与实测位移进行比较,从而获得测量 误差并对误差源进行了初步分析。文末还对单相机 照相测量法在多自由度机构中的应用进行了述评和 展望。

#### 1 相机标定原理

相机标定就是根据一组已知空间位置的点与其 图像对应点求解相机参数的过程。有了相机的参 数,在图像重构的过程中,像素点和实际空间点的一 一对应关系才能建立。相机参数包括相机内部参数 和外部参数。内部参数是指相机的光学参数,包括 焦距、缩放系数、摄像机光轴和像平面的交点的像素 坐标值及各种原因引起的图像畸变等参数;外部参 数主要是指摄像机坐标系与世界坐标系的转换矩 阵。

记世界坐标系为 [X<sub>w</sub> Y<sub>w</sub> Z<sub>w</sub>],照相机坐标系为 [x y z],图像坐标系为[u v]。它们之间通过相机的 内外参数相关并构成相机的理想线性模型<sup>[11,12]</sup>:

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{vmatrix} = C_o \cdot \begin{vmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{vmatrix}$$
(1)
$$\begin{bmatrix} u \\ 1 \end{bmatrix}$$

 $z\begin{bmatrix} v\\ 1\end{bmatrix} = C_i \cdot \begin{bmatrix} z\\ z\\ 1\end{bmatrix}$ (2)

式中  $C_o = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  为外参数矩阵;  $C_i = \begin{bmatrix} f_u & -f_u \cot & u_0 & 0 \\ 0 & f_v / \sin & v_0 & 0 \end{bmatrix}$ 为内参数矩阵; dx, dy为

 $\begin{bmatrix} 0 & f_v / \sin v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$  为内参数矩阵; dx, dy 为

像素在轴上的物理尺寸; $f_u = \frac{f}{dx}$ , $f_v = \frac{f}{dy}$ ,其中 f为相机焦距; $(u_0, v_0)$ 为光心正交于 CCD 靶面的中 心的像素坐标;为 x, y两个方向像元的夹角; R 为 旋转矩阵; t为平移向量,即 x, y, z 三个方向的位移。

事实上,由于径向畸变、离心畸变、棱镜畸变等 因素的影响,在远离图像中心处会有较大的图形畸 变,这需要非线性数学模型来描述<sup>[13 →7]</sup>。记理想的 图像像素坐标为(*u*<sub>a</sub>,*v*<sub>a</sub>),记畸变后的坐标为(*u*, *v*),记 *r* 为理想图像像素坐标与畸变后的像素坐标 之间的距离,即

$$r^{2} = (u_{a} - u)^{2} + (v_{a} - v)^{2}$$
(3)

345

$$u_{a} = u + u(u, v), \quad v_{a} = v + v(u, v) \quad (4)$$

$$\begin{cases} u(u, v) = u(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6) + \\ 2k_3 uv + k_4 (r^2 + 2u^2) \\ v(u, v) = v(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6) + \\ k_3 (r^2 + 2u^2) + 2k_4 uv \end{cases}$$
(5)

从上面的数学模型可以看出,对相机的标定其 实就是对相机内参数求解的过程,且考虑了线性模 型参数和非线性模型参数。

本文工作主要采用了自由软件 calib-for-matlab 对相机标定。

#### 2 六自由度机构单相机测量系统

#### 2.1 测量系统

测量系统如图 1 所示,图中覆有黑白栅格图案的机构即为新型六自由度机构样机,其六个原运动由六个均为直线位移运动构成;运动平台为正六边形玻璃镜,边长为 450mm;栅格大小通过实际的标定,根据相应的精度来选定,实验采用了名义尺寸为40 mm x40 mm 的栅格;相机距镜面约 1 m。



#### 图1 测量系统的总体图

测量实验采用了业余摄影相机 NIKON D80 相机,有效像素为1020万像素,CCD 传感器芯片大 小为23.6mm ×15.8mm,图像分辨率有3872 ×2592 像素、2896 ×1944 像素、1936 ×1296 像素三种可以 选择,针对图片大小及处理速度考虑,测量实验中选 择了中等分辨率2896 ×1944 像素。在测量的过程 中相机的位置是可以较为任意地放置,以满足栅格 纸可较好地成像即可。另外,我们采用计算机控制 相机快门,并监测环境温度,以确保测量系统和测量 过程稳定。

#### 2.2 相机标定

考虑了两种标定方法:其一,相机固定不动,六 自由度机构样机在其行程范围中变换数个位姿,同 时拍摄数组栅格的图像。其二,样机保持静止,相机 在自由度位移测量可能需要的范围内的变换数个位 姿,同时拍摄数组栅格的图像。

采用同样的设置,在近可能短的时间中,采用了 上述两种标定的方式。第一种标定方法得到:

 $[f_u, f_v] = [2190.8257, 2218.6499] \pm [37.8054, 42.1318] \text{ mm}$ 

$$[u_0, v_0] = [1446.5658, 1084.4731] \pm$$

[1.4171, 14.1310] mm

第二种标定方法得到:

 $[f_u, f_v] = [2217.0012, 2206.3555] \pm$ 

[4.4268, 4.6114]mm

 $[u_0, v_0] = [1437.7689, 953.3811] \pm$ 

[2.1196, 3.7427] mm

可见第二种方法标定精度比第一种高,但第二 种方法需要变换相机位姿,较为繁琐耗时,容易对测 量现场引起振动,对温度分布产生影响。第一种标 定方法的优点在于,以六自由度机构本身的位姿变 化范围内的数个位姿来拍摄和标定相机,而相机始 终保持静止,这种标定过程与六自由度的实测过程 的情形一致,测量速度快,干涉少;且与第二种标定 方法不同,其标定所用位姿范围和实测位移范围基 本重叠,这更符合实测情形。综上,在实测中我们采 用第一种标定方法。

## 2.3 重复测量精度

为研究单相机测量的重复测量精度,测量实验 中给定样机的六个直线原运动位移范围的中间位 置,并保持相机位置固定,在较短时间内连续拍摄图 像。然后计算两两相邻的图像的相对差异,从而评 测重复测量误差。我们测得六个自由度[x y z

[x, y, z, ,  $\phi$ , ]

= [0.0007 mm, -0.0010 mm, -0.0007 mm]

0.0075, 0.0117, -0.0037]

可见,系统中存在着一定的不确定误差,但数值 很小,从后续自由度测量结果来看,此重复测量误差 可忽略,即可认为系统具有稳定性。

## 3 实测与 CAD 仿真

因无其它测量仪器进行比对,为了对本文工作 的测量结果和精度进行评估,如图 2 所示,我们采用 软件仿真的方法,即,我们用 Solidworks 建立了上 述机构的理想尺寸的 CAD 仿真模型,并将样机的

346

0

六个原运动位置及位移输入仿真模型,从而获得样 机动平台上指定点的坐标变化,进而,运用文献[18] 的方法计算出动平台的位姿变化,即,作为理想的六 个自由度位移值。



图 2 Solidworks 中位移仿真

按上述测量流程,测量了样机动平台的 14 个位 姿(含初始位姿),并通过 CAD 仿真得到了对应的 理想位姿,然后分别给出了相邻位姿之间的六个自 由度位移变化的实测值  $[x_m, y_m, z_m, m, 4_m, m]$ 和 仿真值  $[x_s, y_s, z_s, s, 4, s]$ ,共 13 组,仿真值如表 1 所列,实测值如表 2 所列;图 3 给出了仿真与实测的 平动位移对比曲线,图 4 则给出了对应转动位移对 比曲线,可以看出实测位移与理想仿真位移有很好 的一致性;图 5 和图 6 分别给出了平动位移和转动 位移的测量误差  $[x_s, y_s, z_s, \phi_s]$ 曲线,表 3 给出了对应误差统计:平动位移误差均方根值 (RMS)误差为 0.1604 mm,极限误差为 0.2807 mm;转动位移 RMS 误差为 0.1032°,即约 6,极限 误差为 0.2350°,即约 14 。

| 表 1 | 仿真的六自由 | 3度位移 |
|-----|--------|------|
|     |        |      |

| 位姿 | x <sub>s</sub> / mm | y <sub>s</sub> / mm | zs/ mm   | s/ ( 9   | $\phi_{ m s}$ /(9) | s/ ( 9   |
|----|---------------------|---------------------|----------|----------|--------------------|----------|
| 1  | - 0.0028            | 0.0414              | - 0.0005 | 0.0012   | 0.0146             | - 1.3472 |
| 2  | 0.0037              | - 0.0413            | 0.0005   | - 0.0015 | - 0.0146           | 1.3472   |
| 3  | 0.0032              | - 0.0404            | 0.0004   | - 0.0015 | - 0.0145           | 1.3376   |
| 4  | 0.0027              | - 0.0407            | 0.0004   | - 0.0015 | - 0.0144           | 1.3283   |
| 5  | - 0.0018            | 0.0407              | - 0.0004 | 0.0011   | 0.0144             | - 1.3283 |
| 6  | 0.4001              | 0.5825              | 5.5394   | - 1.0242 | - 0.7686           | 0.0009   |
| 7  | 0.2494              | 0.3178              | 3.9096   | - 0.7303 | - 0.5290           | - 0.0060 |
| 8  | - 0.2826            | - 0.5065            | - 6.6746 | 1.3234   | 0.7641             | 0.0242   |
| 9  | 0.2791              | 0.3605              | 4.3822   | - 0.8572 | - 0.5925           | 2.6434   |
| 10 | - 8.1242            | 2.0866              | - 1.1529 | - 0.3939 | 1.1373             | - 0.4206 |
| 11 | 5.6956              | - 0.2250            | 0.8876   | 0.2550   | - 0.8572           | 0.5956   |
| 12 | 1.2009              | - 6.9998            | - 0.0710 | 0.0071   | - 0.0056           | - 0.4371 |
| 13 | - 1.2543            | 6.9905              | 0.0700   | - 0.0071 | 0.0057             | 0.4371   |

#### 表 2 实测的六自由度位移

| 位姿 | $x_{\rm m}/~{ m mm}$ | ym/ mm   | <sub>zm</sub> / mm | m/ ( 9   | Ф <sub>т</sub> / ( 9 | m/ ( 9   |
|----|----------------------|----------|--------------------|----------|----------------------|----------|
| 1  | 0.1244               | 0.0773   | 0.0145             | - 0.0008 | 0.0103               | - 1.2320 |
| 2  | 0.0085               | - 0.0494 | - 0.0175           | - 0.0032 | 0.0022               | 1.2358   |
| 3  | 0.0150               | - 0.0345 | 0.0038             | - 0.0007 | 0.0034               | 1.2130   |
| 4  | 0.0214               | - 0.0278 | 0.0143             | 0.0015   | 0.0050               | 1.2195   |
| 5  | - 0.0386             | 0.0189   | - 0.0152           | - 0.0016 | - 0.0069             | - 1.2050 |
| 6  | 0.5131               | 0.5879   | 5.3866             | - 0.8196 | - 0.7441             | - 0.0269 |
| 7  | 0.3775               | 0.3991   | 3.8739             | - 0.5856 | - 0.4962             | - 0.0258 |
| 8  | - 0.4088             | - 0.6676 | - 6.6526           | 1.0908   | 0.7257               | 0.0226   |
| 9  | 0.4023               | 0.4164   | 4.3886             | - 0.7113 | - 0.5323             | 2.4082   |
| 10 | - 8.3583             | 1.8484   | - 1.0748           | - 0.3784 | 0.9571               | - 0.3824 |
| 11 | 5.8371               | - 0.0088 | 0.9026             | 0.2562   | - 0.7141             | 0.5486   |
| 12 | 1.5211               | - 6.9237 | - 0.0814           | 0.0091   | - 0.0147             | - 0.3960 |
| 13 | - 1.5350             | 6.9041   | 0.0863             | - 0.0091 | 0.0134               | 0.3955   |

表 3 位移测量误差统计

| 位姿   | x/ mm  | y/ mm  | z/ mm  | /(9    | \$ ( ) | /(9    |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RMS  | 0.1604 | 0.1090 | 0.0502 | 0.1032 | 0.0687 | 0.1007 |
| 极限误差 | 0.2807 | 0.2382 | 0.1528 | 0.2326 | 0.1802 | 0.2350 |







图 5 平动位移误差

## 4 误差分析

上述测量结果数据与理想仿真值之间存在一定 的误差,误差产生的原因初步分析如下:

测量工具误差:栅格纸是采用喷墨打印机打印而成,其黑色栅格由于被墨汁浸润而突起,使纸面 平整度不好;且栅格并非严格的正方形,各栅格大小 也存在差异,经测量,栅格平均大小为 40.071 mm 348



#### 图 6 转动位移误差

×40 231 粉祚。测量计算中使用的是名义尺寸。由 于测量的是相对位姿六自由度位移,故需要在上部 动平台上建立坐标系,但是由于摆放中的原因,栅格 纸的坐标系会与上部动平台的坐标系有一个小的位 移和角度的误差,这个误差在后面的照相测量中被 带入到上部动平台的六自由度位移的误差。在测量 中采用的是彩色业余摄影相机而非专业测量相机, 相对于测量相机存在着更大的测量不确定性。在测 量标定中,可以从 2.2 的数据看到,相机的理想光心 像素坐标存在较大不确定度。

2) 实物样机与其仿真模型差异:首先样机零件 设计存在公差,样机尺寸必然存在误差,而在 Solidworks 中,均采用了零件的名义理想尺寸进行样机 CAD 建模,这使得实物样机自由度位移测量值和其 仿真理想值之间必然存在误差。再次样机各原运动 在行程范围内各处的误差及精度是不同的,无位置 检测和反馈系统,实测中发现电机存在丢步现象。 在原运动位移测量中我们采用了游标卡尺和高度 尺,最小分度为 0.02 mm。

 3)环境影响:在实验测量中,由于测量时间内 环境温度、光线乃至振动的变化,对相机的标定及测 量精度产生较大的影响。

从以上误差原因分析可以看到,对该六自由度 机构样机采用单相机测量存在着很大的精度潜力。

#### 5 结论和展望

本文采用单相机对六自由度机构的位姿进行了 照相测量的研究,实现了单相机照相测量法对多自 由度机构的自由度位移的测量应用。总体上看,在 目前条件下获得了较满意的测量结果和精度,误差 分析表明,测量精度还有进一步提高的空间。文中 采用将测量结果与机构的 CAD 模型仿真结果进行 比较,从而了解测量误差的方法可为其它测量工程 所借鉴。本文采用的单相机照相测量法作为一种非 接触式测量法,其测量过程以程序控制,实现了测量 的自动化、实时化,相对于传统的多相机测量法减少 了设备成本,降低了测量设备的空间位置及系统控 制的要求。单相机照相测量方法在类似本文的多自 由度机构、工业机器人、反向工程等工业测量和控制 中有着良好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 张淑平,等.基于立体视觉六自由度大载荷实验平台的位姿检测
   [J].计算机应用研究,2008,25(6):1744-1746.
- [2] Subrahmanyan R. Photogrammetric measurement of the gravity deformation in a cassegrain antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53 (8):2590-2596.
- [3] Kim J A, et al. Design methods for six-degree-of-freedom displacement measurement systems using cooperative targets [J].
   Precision Engineering, 2002, 26 (1) :99-104.
- [4] Carlson B. Geometry study and simulation of a laser-free surface measurement technique for the large adaptive reflector [Z]. 1998.
- [5] Bae E W, Kim J A, Kim S H. Multi-degree-of-freedom displacement measurement system for milli - structures[J]. Meas. Sci. Technol, 2001, 12 (9):1495–1502.
- [6] Orozco B V, Garduno V G. Structured laser light and coordinate measuring systems integrationfor 3d metrology[J]. SPIE,2005, 5776:618-6290

- [7] 金熠.LAMOST 光纤位置检测与观测规划中相关问题的研究 [D].中国科学技术大学,2007.
- [8] Luhmann T. Precision potential of photogrammetric 6 DOF pose estimation with a single camera [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing ,2009 ,64 :275 –284.
- [9]Stewart D. A platform with six degrees of freedom[J]. Proc. Instn Mech Engrs, 180(15): 1965-66.
- [10] 杨德华,等. 摆臂式六自由机构[P]. 中国专利: 200810123869X,2008-11-28.
- [11] Forsyth D A, Ponce J. Computer vision: A modern approach[M]. Prentice Hall, 2002, 138-140.
- [12] 马颂德,张正友. 计算机视觉 计算理论与算法基础[M]. 北 京:科学出版社,1998.
- [13] Conrady A. Decentering lens systems [J]. Monthly notices of the Royal Astronomical Society, 1919, 79:384-390.
- [14] Brown D C. Decentering distortion of lenses, photometric engineering[J]. 1966, 32(3): 444-462.
- [15] Fryer J G, Brown D C. Lens distortion for close-range photogrammetry[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1986, 52(1):51-58.
- [16] Heikkila<sup>T</sup>J, Silv é O. A four step camera calibration procedure with implicit image correction[C]. Proceedings of the 1997 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan PR USA, 1997.
- [17] Bouguet J Y. Camera calibration toolbox for Matlab[EB/OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\_doc/, 2008.
- [18] Horn B K P, Hilden H M, Negahdaripour S. Closed form solution of absolute orientation using orthonormal matrices[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998,5:1127.