

基于正交柱面成像的空间物体位姿精密测量

关瑞芬 杨凌辉* 王丽君 刘海庆 郝继贵

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 针对航空、航天等领域大型装备组装对接过程中的大尺度空间物体实时的位姿测量需求,对现有基于面阵成像器件摄影测量系统的二维测角功能进行分解与重构,提出一种基于正交柱面成像的位姿测量新方法。该方法充分发挥线阵 CCD 器件一维角度分辨率高、采集速度快、处理简便等优势,以正交柱面成像光路简化了相机结构,并采用非参数标定方法校正了柱面成像畸变。针对空间物体姿态测量的坐标同步问题,研究了基于扩展卡尔曼预测的实时识别跟踪方法,实现了多个目标并行测量,并通过基于 Rodrigues 参数的姿态解算模型实现了实时姿态测量。实验结果表明,该测量方法得到的空间点三维坐标测量精度优于 0.5 mm,空间物体姿态解算在偏航、横滚、俯仰三个方向的最大测量误差分别为 0.20°,0.12°,0.23°,具有较高的姿态测量精度。

关键词 测量; 位姿测量; 正交柱面成像; 扩展卡尔曼预测; 线阵 CCD; 多目标识别

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1112003

Position and Attitude Precision Measurement of Spatial Objects Based on Orthogonal Cylindrical Imaging

Guan Ruifen Yang Linghui Wang Lijun Liu Haiqing Zhu Jigui

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract According to the large scale spatial objects real-time attitude measurement demand in the process of large equipment assembly and docking in the field of aviation and aerospace, a new method for attitude measurement is put forward based on orthogonal cylindrical imaging, disassembling and reconstructing the function of two-dimensional angle measurement which is provided by the existing array image sensor using in photogrammetric measurement system. The method makes full use of the advantages such as high one-dimensional angular resolution, fast acquisition speed and simple treatment of linear array CCD, and simplifies the camera structure with cylindrical orthogonal imaging optical path. A non-parametric calibration method is used to correct the aberration of the imaging cylindrical. In order to solve the coordinate synchronization problem during space object attitude measurement, the real-time recognition tracking method is researched based on extended Kalman prediction to realize parallel measurement of multiple targets, and then realizes the real-time attitude determination through attitude calculation model based on Rodrigues parameters. Experimental results show that space three-dimensional coordinate measurement accuracy is better than 0.5 mm, and the maximum measurement errors of space object pose solution in yaw, roll and pitch directions are 0.20°, 0.12° and 0.23° respectively. The proposed method has high accuracy of attitude measurement.

Key words measurement; pose measurement; orthogonal cylindrical imaging; extended Kalman prediction; linear array CCD; multi-target recognition

OCIS codes 120.5050; 150.6910; 150.1135

1 引 言

随着工业精密测量技术的发展,大尺度空间物体位姿动态精密测量在航天器交会对接、工业机器人实时

收稿日期: 2016-05-18; 收到修改稿日期: 2016-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(51405338,51225505)、国家重大科学仪器设备开发专项子任务(2013YQ35074702)

作者简介: 关瑞芬(1992—),女,硕士研究生,主要从事大尺寸精密测量方面的研究。E-mail: ruifenguan2014@tju.edu.cn

导师简介: 郝继贵(1970—),男,博士,教授,主要从事大尺寸精密测量方面的研究。E-mail: jiguzhu@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: icelinker@tju.edu.cn

定位、大型工件安装引导对接、人体运动学分析等应用领域^[1-4]具有重要地位,日益受到研究人员的重视。空间物体的位姿测量主要指对其空间三维(3D)坐标和俯仰角、滚动角、偏航角三个姿态角参数的测量^[5]。现有的位姿精密测量方法,原理上一般以空间坐标为基础,通过基于刚体运动学的数据拟合(多坐标或单坐标多角度)实现位置姿态测量,如按照系统工作模式分类,可主要分为单站模式和多站模式两类。

单站模式仪器以激光跟踪仪^[6]为典型代表,目前在大尺度测量领域应用最为广泛,测量范围大。但受限于跟踪仪单站瞄准的测量模式,无法同时跟踪多个目标,且一旦目标丢失就需要重新测量。因此,采用激光跟踪仪进行姿态测量时需同时跟踪多点(至少三个点)进行姿态拟合或采用专用测量附件补充测量信息(如T-mac),前者需要同步使用多台激光跟踪仪,技术复杂、成本非常高、效率较低,而后者使用测量范围受限于测量附件,也无法解决遮挡断光的问题。

多站式测量如室内全球定位系统(GPS)^[7-8]和摄影测量^[9],可以通过测站冗余组网,从多个方向观测被测物体,具有强大的多任务并行能力和测量空间扩展功能,更适合工业大尺度空间物体实时的位置姿态测量需求,但受限于机械结构或处理方法,现有的多站式测量方法目前主要用于准静态测量,如:同步误差和测量频率的影响限制了室内GPS在动态测量场景中的应用;基于面阵相机的测量方法受面阵相机的帧频、图像传输时间、图像处理时间等因素的影响^[10-12],往往测量频率较低,更多地用于离线测量;而非动态测量,无法满足大尺度、实时的姿态测量要求。值得注意的是,基于线阵相机组合的测量方法因线阵传感器具有空间分辨率高、传输速度快等特性,在高精度、实时测量应用中显示出突出优势^[13];但是现有的基于线阵相机的测量方法一般采用三线阵相机组合测量单元^[14-15],依然存在多相机交会导致公共视场减小、无法同时对多个目标进行识别等问题。

为实现大尺度空间物体位姿动态精密测量,本文提出了一种基于正交柱面成像的空间物体位姿精密测量方法。该方法通过两个由正交柱面成像光学系统和两个正交放置的线阵 CCD 组成的正交柱面成像相机交会,实现空间多个目标点的三维坐标测量,通过建立基于 Rodrigues 参数姿态解算模型求解被测物体的姿态角。本文采用了一种非参数标定方法标定正交柱面成像相机的高镜头畸变,保证了相机的标定精度。针对线阵相机多目标动态识别跟踪的问题,研究了基于扩展卡尔曼预测的识别算法实现该系统对多个目标同时测量。正交柱面成像式的位姿测量方法,与激光跟踪仪相比,可以实现多目标测量,成本更低;与室内GPS相比,测量同步性显著提升,测量频率更高;与基于面阵相机的摄影测量方法相比,具有更高的测量频率和分辨率;而与传统三线阵相机测量方法相比,具有更大的测量视场,并增加了冗余约束提高测量精度,最终实现大视场、高精度、实时的位姿测量。

2 测量原理

为实现二维测角的功能,正交柱面成像相机投影映射关系如图 1 所示,被测发光点发出的光经过正交分光成像系统投影在两个正交放置的线阵 CCD 上。平行于线阵 CCD 的方向,柱面镜相当于平行平板(如图 1 中的 CL1),光束被会聚以保证良好的成像质量;垂直于线阵 CCD 的方向,柱面镜(如图 1 中的 CL2)将光束会聚成一个线状像与 CCD 相交。不同水平角的光束投影在 CCD1 的不同位置,以实现水平角 α 的测量;而不同垂直角的光束投影在 CCD2 上的不同位置来实现垂直角 β 的测量。

单个相机决定目标点的两个空间角度,双相机交会即可实现三维空间坐标测量,其原理示意图如图 2 所示。根据发光点在相机坐标系下的水平角 α 和垂直角 β ,左面相机所确定的两个平面方程为

$$\tan \alpha_1 = x_1/z_1, \quad (1)$$

$$\tan \beta_1 = y_1/z_1. \quad (2)$$

右面相机所确定的两个平面方程为

$$\tan \alpha_r = x_r/z_r, \quad (3)$$

$$\tan \beta_r = y_r/z_r, \quad (4)$$

式中 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_r, y_r, z_r) 分别是目标点 P 在左、右相机坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$ 、 $o_r-x_ry_rz_r$ 下的三维坐标。其中 α 和 β 由内参标定求得,经过外参标定后,4 个平面交会即可求解目标点三维坐标 (x, y, z) 。

正交柱面成像相机经标定得到目标点对应的空间三维坐标,再由这些空间坐标解算被测物体的姿态。

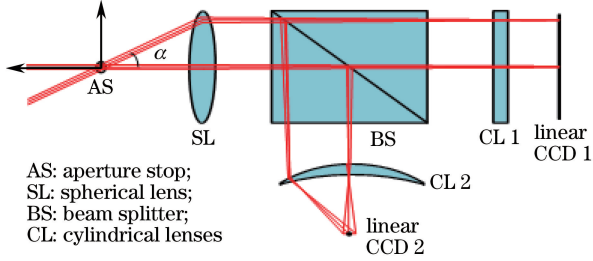


图 1 正交柱面成像相机的投影映射示意图

Fig. 1 Projection mapping diagram of the orthogonal cylindrical imaging camera

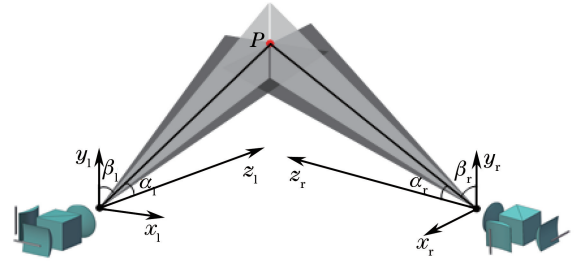


图 2 三维坐标测量示意图

Fig. 2 Schematic of the three-dimensional coordinate measurement

由刚体运动学原理可知,欲实现姿态测量,需在被测物体上至少安装三个不共线的合作目标点(a 、 b 、 c)。设在测量空间中的参考坐标系为 $o-xyz$,目标本体坐标系为 $o_s-x_s y_s z_s$,目标绕定点旋转后的坐标系为 $o_t-x_t y_t z_t$ 。由于被测物体上的目标点的布局直接影响被测物体姿态测量精度,当矢量 ab 与矢量 bc 成 90° 时,欧拉姿态角总的不确定度为最小^[16]。为克服目标点布局固定的局限性,安装更灵活,采用虚拟的目标点 c' 代替真实的目标点 c ,其中 c' 在平面 abc 内,且 $bc' \perp ab$,线段 bc 与线段 bc' 长度相等,如图 3 所示。利用 a 、 b 、 c 三点的三维坐标根据四元数法求解出虚拟点 c' 的三维坐标 (x'_c, y'_c, z'_c) 如下。

矢量 bc 以 b 为旋转中心、平面 abc 法线的单位向量 $\mathbf{N} = (\mathbf{ab} \times \mathbf{bc}) / |\mathbf{ab} \times \mathbf{bc}| = (x_N, y_N, z_N)$ 为旋转轴旋转 $\theta_1 = (\pi/2 - \theta_0)$ 角,其四元数表示为

$$(0, x'_c, y'_c, z'_c) = \mathbf{S} * \mathbf{P} * \mathbf{Q}, \quad (5)$$

式中 θ_1 为矢量 ab 与 bc 夹角的补角, $\mathbf{S} = [\cos(\theta_1/2), x_N \sin(\theta_1/2), y_N \sin(\theta_1/2), z_N \sin(\theta_1/2)]$, $\mathbf{P} = (0, x_c, y_c, z_c)$, $\mathbf{Q} = [\cos(\theta_1/2), -x_N \sin(\theta_1/2), -y_N \sin(\theta_1/2), -z_N \sin(\theta_1/2)]$, (x_c, y_c, z_c) 为点 c 的三维坐标, \mathbf{S} 是 \mathbf{Q} 的共轭四元数。向量 \mathbf{N} 和 θ_1 均可由点 a 、 b 的三维坐标求得,由(5)式可以计算得到 c' 的三维坐标 (x'_c, y'_c, z'_c) 。

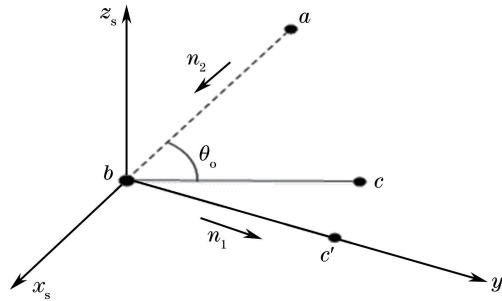


图 3 目标点矢量关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of target vector relationship

设线段 bc' 、 ab 的方向矢量为 \mathbf{n}_1 和 \mathbf{n}_2 在 $o_s-x_s y_s z_s$ 下对应的单位矢量为

$$\mathbf{n}_1^s = [0 \ 1 \ 0]^T, \mathbf{n}_2^s = [-1 \ 0 \ 0]^T, \quad (6)$$

空间目标做定点转动的旋转矩阵用 \mathbf{R}_{ob} 表示,则 \mathbf{n}_1 和 \mathbf{n}_2 在旋转后 $o_t-x_t y_t z_t$ 下的矢量为

$$\mathbf{n}_1^t = \begin{bmatrix} \frac{x'_c - x_b}{l_{bc'}} & \frac{y'_c - y_b}{l_{bc'}} & \frac{z'_c - z_b}{l_{bc'}} \end{bmatrix}^T = \mathbf{R}_{ob} \mathbf{n}_1^s, \mathbf{n}_2^t = \begin{bmatrix} \frac{x_b - x_a}{l_{ab}} & \frac{y_b - y_a}{l_{ab}} & \frac{z_b - z_a}{l_{ab}} \end{bmatrix}^T = \mathbf{R}_{ob} \mathbf{n}_2^s, \quad (7)$$

式中 $l_{bc'}$ 和 l_{ab} 分别表示线段 bc' 、 ab 的长度。用 Rodrigues 参数表示旋转矩阵 \mathbf{R}_{ob} , Rodrigues 参数与方向余弦的关系为

$$\mathbf{R}_{ob} = \frac{1}{1 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \begin{bmatrix} 1 + \sigma_1^2 - \sigma_2^2 - \sigma_3^2 & 2(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_3) & 2(\sigma_1\sigma_3 - \sigma_2) \\ 2(\sigma_1\sigma_2 - \sigma_3) & 1 - \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_3^2 & 2(\sigma_2\sigma_3 - \sigma_1) \\ 2(\sigma_1\sigma_3 + \sigma_2) & 2(\sigma_2\sigma_3 - \sigma_1) & 1 - \sigma_1^2 - \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 $\sigma_i = n_i \tan \frac{\theta}{2}, i=1,2,3, \mathbf{n} = [n_1, n_2, n_3]^T$ 为欧拉轴上的单位矢量, θ 为绕 \mathbf{n} 的旋转角。由欧拉角和方

向余弦的关系并结合(8)式,可得 θ_{yaw} 、 θ_{roll} 、 θ_{pitch} , 分别是被测目标相对于参考坐标系的偏航角、横滚角、俯仰角^[17]。

$$\theta_{\text{yaw}} = \arctan \frac{2(\sigma_3 - \sigma_1\sigma_2)}{1 - \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_3^2}, \quad (9)$$

$$\theta_{\text{roll}} = \arctan 2(\sigma_2\sigma_3 + \sigma_1), \quad (10)$$

$$\theta_{\text{pitch}} = \arctan \frac{2(\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3)}{1 - \sigma_1^2 - \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \quad (11)$$

3 关键技术

3.1 相机标定算法

相机标定是获取和重建物体三维信息的前提,其标定的精度将直接影响到系统测量结果的精度。相机标定包括相机内部参数标定和外部参数标定。

内参标定是为求取相机内部参数,依据相机内参和目标点的像面坐标 (u, v) 可以解算出被测点在相机坐标系下的水平角 α 和垂直角 β 。本文针对带有柱面成像光学系统镜头的高畸变问题,采用了一种非参数标定方法标定相机内参^[18]。如图 4 所示,内参标定过程主要包括以下几步:

1) 调整相机位置,使得光学中心 AS 位于一维转台的转轴 l 上且参考平面 1 的法线 n_1 平行于转轴 l ,以保证转台转动过程中光点垂直方向入射角度不变;

2) 建立相机坐标系 $o_c-x_c y_c z_c$,以 AS 作为坐标系原点 o_c , x_c 、 y_c 分别平行于参考平面 2 和 1 的法线 l_2 、 l_1 且过原点,最后根据右手法则确定 z_c 轴;

3) 记录相机坐标系 $o_c-x_c y_c z_c$ 下发光点在垂直方向不同高度位置时的三维坐标 (x_c, y_c, z_c) ,由于发光点的球体直径与激光跟踪仪反射球(SMR)的直径相同,且发光中心已通过工装调至球体的球心,以激光跟踪仪坐标系作为世界坐标系,发光点的实际三维坐标 (X, Y, Z) 即可直接由激光跟踪仪测得;

4) 在发光点垂直方向的每一个位置,以一定的角度间隔旋转一维转台,记录下每一个位置的像面坐标 (u, v) 。

通过以上步骤,可以得到相机视场内一系列对应点,表示为 $(\alpha_i, \beta_i) \leftrightarrow (u_i, v_i)$, i 表示第 i 个采样点。实际测量点的三维坐标时,利用径向基函数插值的方法可求得被测点在该相机坐标系下的水平角 α 和垂直角 β ,表达式为

$$\alpha(u, v) = \sum_{i=1}^N c_{1i} \psi_i(u, v) + \sum_{j=1}^3 c_{2j} p_j(u, v), \quad (12)$$

$$\beta(u, v) = \sum_{i=1}^N c_{3i} \psi_i(u, v) + \sum_{j=1}^3 c_{4j} p_j(u, v), \quad (13)$$

$$\psi_i(u, v) = [(u - u_i)^2 + (\beta - \beta_i)^2 + \chi^2]^{1/2}. \quad (14)$$

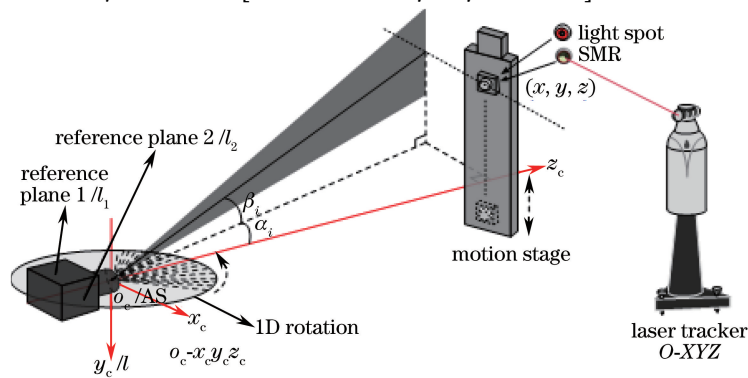


图 4 内参标定示意图

Fig. 4 Schematic of intrinsic calibration

式中 $\phi_i(u, v)$ 和 $p_j(u, v)$ 分别表示径向基函数的径向基和多项式基, 多项式基 $p_j(u, v)$ 为 $[1, u, v, u^2, uv, v^2, \dots]$, N 是采样点的数量, χ 是试探性获取的形状参数, $c_{1i}, c_{2j}, c_{3i}, c_{4j}$ 是对应基函数的权值系数, 权值系数的值可通过径向基函数的插值条件和附加条件^[19]求解。

外参标定是确定各个相机坐标系相对于世界坐标系的位置与方位, 通过控制点的方式可以实现外参标定, 由激光跟踪仪测得控制点的三维坐标。选取跟踪仪坐标系 $O-XYZ$ 作为世界坐标系, 以左侧相机为例, $o_1-x_1y_1z_1$ 到 $O-XYZ$ 的变换关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中 $(X, Y, Z)^T$ 是控制点在 $O-XYZ$ 下的坐标, $(x_1, y_1, z_1)^T$ 是控制点在 $o_1-x_1y_1z_1$ 下的坐标, $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ 是 $o_1-x_1y_1z_1$ 到 $O-XYZ$ 的旋转矩阵和平移向量。结合(15)、(1)、(2)式可得

$$Xr_1 + Yr_2 + Zr_3 + t_1 - \tan \alpha_1 \cdot (Xr_7 + Yr_8 + Zr_9 + t_3) = 0, \quad (16)$$

$$Xr_4 + Yr_5 + Zr_6 + t_2 - \tan \beta_1 \cdot (Xr_7 + Yr_8 + Zr_9 + t_3) = 0. \quad (17)$$

假设有 n 个控制点, 其在跟踪仪坐标系下的坐标为 $(X_i, Y_i, Z_i), i=1, 2, \dots, n$, 由(16)和(17)式有

$$\begin{aligned} F_i = & X_i r_1 + Y_i r_2 + Z_i r_3 + X_i r_4 + Y_i r_5 + Z_i r_6 - \\ & (\tan \alpha_{li} + \tan \beta_{li}) X_i r_7 - (\tan \alpha_{li} + \tan \beta_{li}) Y_i r_8 - \\ & (\tan \alpha_{li} + \tan \beta_{li}) Z_i r_9 + t_1 + t_2 - (\tan \alpha_{li} + \tan \beta_{li}) t_3 = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

式中未知的 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ 有 12 个参数 r_1, r_2, \dots, r_9 和 t_1, t_2, t_3 。由(18)式可知, 每个控制点提供一个约束, 12 个控制点所提供的约束线性求解即可求出未知的 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ 。但是测量难免存在误差, 直接线性求解的旋转矩阵通常不满足正交性。所以, 采用一个非线性优化的方法来求解 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ 。旋转矩阵应满足如下正交约束关系:

$$\begin{cases} f_1 = r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 - 1 = 0 \\ f_2 = r_4^2 + r_5^2 + r_6^2 - 1 = 0 \\ f_3 = r_7^2 + r_8^2 + r_9^2 - 1 = 0 \\ f_4 = r_1 r_4 + r_2 r_5 + r_3 r_6 = 0 \\ f_5 = r_1 r_7 + r_2 r_8 + r_3 r_9 = 0 \\ f_6 = r_4 r_7 + r_5 r_8 + r_6 r_9 = 0 \end{cases} \quad (19)$$

由(18)和(19)式, 可以得到最小化的目标函数为

$$E = \sum_{i=1}^n F_i^2 + M \cdot \sum_{j=1}^6 f_j^2, \quad (20)$$

式中 M 是罚因子, (20)式最小化是一个非线性最优化问题, 以线性求解的值作为非线性最优化的初值, 通过 Levenberg-Marquardt 算法^[20]实现, 求得外参 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ 。

3.2 多目标识别算法

为保证空间物体姿态测量的同步性, 要求对多个目标点同时测量。实现多目标实时测量的前提是对多个目标在不同相机上的像点进行识别, 即完成多目标的同名像点匹配。由于正交柱面成像相机的光斑信号符合标准的单波峰高斯分布, 没有明显的编码信息; 另外, 正交柱面镜头高的镜头畸变, 使得极线几何的约束力显著降低, 导致误匹配情况时有发生。本文假定被测物体做匀速直线运动。在实际应用中如大型工件对接, 其对接过程通常运动缓慢; 另一方面由于线阵相机帧频比较高, 将被测物体视作匀速直线运动是具有现实意义。因此, 本文着重研究了基于扩展卡尔曼预测的多目标的同名像点匹配方法。该匹配算法流程如下:

1) 初始时刻通过依序点亮目标点的方式实现图像光斑与目标点的一一对应。

2) 由于动态测量具有相关性, 对于第 i 个目标基于扩展卡尔曼滤波^[21]可以根据当前时刻 t_{k-1} 的三维坐标 $(x_{k-1}^i, y_{k-1}^i, z_{k-1}^i)$ 预测下一时刻 t_k 的三维坐标 $(x_{k,k-1}^i, y_{k,k-1}^i, z_{k,k-1}^i)$, 此坐标是目标点在世界坐标系下的三维坐标。

3) 反投影求像面坐标, 即当得到三维坐标的预测值后, 利用(16)和(17)式可以分别求出目标点在相机

坐标系下的水平角和垂直角在 t_k 时刻的预测值 $\alpha_{k,k-1}^i, \beta_{k,k-1}^i$, 进一步通过反投影, 即已知水平角和垂直角, 利用径向基函数插值可以求出对应的像面坐标 $(u_{k,k-1}^i, v_{k,k-1}^i)$ 。

4) 邻域搜索匹配, 当 t_k 时刻到来时, 根据相机采集的图像, 利用灰度阈值质心法获取的像面坐标 (u_k^i, v_k^i) 与利用扩展卡尔曼预测得到的像面坐标 $(u_{k,k-1}^i, v_{k,k-1}^i)$, 按照距离最近原则进行邻域搜索, 即可完成当前时刻同名像点的匹配。循环利用流程 2)~4), 即可实现整个测量过程中多目标的同名像点匹配。

5) 多个目标点在随着物体运动的过程中, 会出现在某一个或某几个线阵 CCD 上出现图像光斑交叉重叠的现象。针对这一异常情况, 本文采用多相机组网测量解决方案。当该测量网络中包含 $n (n \geq 2)$ 个相机时, 即可以列出 $2n$ 个平面方程。三个平面交会即可实现三维坐标测量, 剩下 $(2n-3)$ 个平面作为冗余约束以提高测量精度。当某一个 CCD 上的光斑出现交叉重叠时, 舍弃该部分的约束信息, 以剩余的约束信息实现三维坐标的求解。整个测量过程中, 对每个目标点来说保证至少有三个约束信息以求取该目标点的三维坐标, 此坐标作为测量值即可完成卡尔曼滤波的递推过程。连续不间断的扩展卡尔曼预测和更新过程, 保证了交叉的光斑发生分离时可以立即实现同名像点的匹配。

4 实验及分析

4.1 内参和外参标定实验

在实验室环境下搭建如图 5 所示的相机内参标定平台, 图中 1 为激光跟踪仪, 2 为一维转台, 3 为相机, 4 为导轨, 5 为发光点。标定过程中按照 3.1 节中描述的步骤利用一维转台和高精度一维直线导轨建立入射光线与成像点之间的一一映射关系 (u, v, α, β) , 完成相机的内参标定实验。实验中, 采用的是 Leica AT901 激光跟踪仪, 测量精度为 $\pm(15+6) \mu\text{m}/\text{m}$, 一维转台选用的是全程运动精度达 $0.6''$ 的多齿分度台。发光点的对心调整的过程借助于影像测量仪 TESA VISO-300 DCC 完成, 影像测量仪可精确测量发光点发光中心及球体球心的三维坐标, 在此基础上通过调对心机构反复微调直至二者重合, 最终发光中心与球体球心的偏心差控制在 0.02 mm 以内。

内参标定之后, 设置左右两相机主点连线距离为 2 m , 相机交会角度为 30° , 在距离两相机主点连线 3 m 处的 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 的空间内, 通过激光跟踪仪、两个正交柱面成像相机分别记下该空间内均匀分布的 30 个控制点对应的三维坐标和像面坐标, 根据(20)式求解出外参 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$, 完成相机的外参标定。

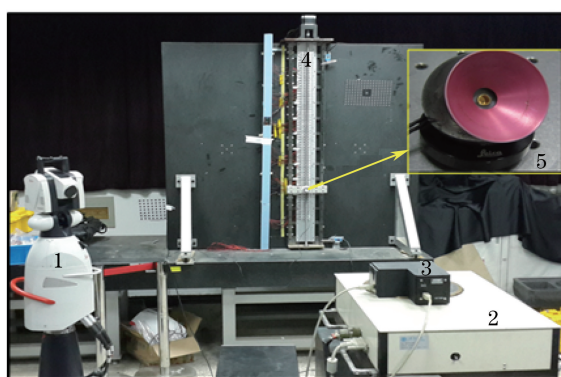


图 5 内参标定实验平台

Fig. 5 Experimental platform for intrinsic calibration

4.2 姿态测量实验

内外参标定完成后, 利用激光跟踪仪和三维转台搭建如图 6 所示的实验平台, 进行系统的姿态测量精度的验证, 图中 1 为激光跟踪仪, 2 为相机, 3 为发光点, 4 为三维转台。在三维转台上布置三个不共线的红外 LED 作为目标点, 三个目标点同时点亮。在实验前先通过依次点亮获取目标点与其成像位置的初始匹配关系, 之后利用识别算法实时识别多个目标点和匹配对应的成像位置。使用激光跟踪仪、两个正交柱面成像相机分别记下转台上三个点对应的空间三维坐标和像点坐标, 将转台转动一个小角度, 再记录一次三个目标点的三维坐标和像点坐标。将转台转动 7 次, 得到 8 组点的三维坐标和像点坐标对。通过标定好的相机内参



图 6 姿态解算模型验证实验图

Fig. 6 Verification experiment of attitude solving model

和外参可以解算出这些目标点的三维坐标,进而解算出姿态角的测量值。

4.3 实验结果及误差分析

以激光跟踪仪测得的三维坐标 (X, Y, Z) 验证本文方法的三维坐标 (x, y, z) 定位精度,如表 1 所示。由表 1 中数据可知,基于正交分光成像的线阵相机的三维定位精度比传统三线阵相机有了进一步的提高,测量误差优于 0.5 mm。同时,由于双相机交会测量时深度方向约束不足,导致交会方向即 y 方向上的测量误差大于 x, z 两个方向的误差。

表 1 正交柱面成像相机 3D 坐标定位精度

Table 1 3D coordinates positioning accuracy of orthogonal cylindrical imaging camera mm

No.	X	Y	Z	x	y	z	Δx	Δy	Δz	Δ_{xyz}
1	1149.62	3713.20	-226.45	1149.57	3713.11	-226.39	-0.05	-0.09	0.06	0.12
2	1456.99	3699.62	-5.40	1457.05	3699.51	-5.34	0.06	-0.11	0.06	0.14
3	1376.87	3599.28	-87.13	1376.78	3599.50	-87.20	-0.09	0.22	-0.07	0.25
4	1166.75	3780.24	48.98	1166.63	3780.51	48.90	-0.12	0.27	-0.08	0.31
5	1372.40	3602.85	-139.77	1372.48	3602.68	-139.88	0.08	-0.17	-0.11	0.22
6	1114.07	3731.43	-39.39	1114.20	3731.22	-39.46	0.13	-0.21	-0.07	0.26
7	1172.29	3673.84	-1.97	1172.12	3673.50	-1.81	-0.17	-0.34	0.16	0.41
8	1173.55	3707.41	28.15	1173.41	3707.71	28.28	-0.14	0.30	0.13	0.36

注: $\Delta_{xyz} = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}$

以激光跟踪仪测得的这 8 组目标点的实际三维坐标解算出的姿态角作为被测物体姿态角的实际值,将姿态角的测量值与实际值进行对比,如表 2 所示。由表 2 中数据可以看出,基于正交柱面成像相机的空间物体姿态测量在偏航、横滚、俯仰三个方向的最大测量误差分别为 0.20° 、 0.12° 、 0.23° ,且横滚角的测量误差相较于偏航角和俯仰角的测量误差更小。由于双相机的空间三维定位精度是非均匀的,交会方向的坐标定位误差大于其他两个方向的坐标定位误差,从而使得对交会深度方向的依赖性更弱的横滚角测量误差小于偏航角和俯仰角的测量误差。

表 2 Rodrigues 参数法解算的姿态角

Table 2 Attitude angle obtained by Rodrigues method ($^\circ$)

No.	True value			Measure value			error			Total error
	α	β	γ	α'	β'	γ'	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	Δ
1	-2.6460	87.6570	-45.1910	-2.4713	87.7806	-45.2560	0.1747	0.1236	-0.0650	0.2237
2	87.4626	77.8150	-87.2480	87.5401	77.7717	-87.4447	0.0775	-0.0433	-0.1967	0.2158
3	-22.0581	59.1990	6.0103	-21.8957	59.1441	5.8223	0.1624	-0.0549	-0.1880	0.2544
4	-25.2650	61.2085	7.3825	-25.4022	61.1810	7.6147	-0.1372	-0.0275	0.2322	0.2711
5	4.7596	87.9791	-37.5984	4.6469	87.9074	-37.4628	-0.1127	-0.0717	0.1356	0.1903
6	-34.3116	73.4285	2.0567	-34.5128	73.4489	2.1471	-0.2012	0.0204	0.0904	0.2215
7	19.3189	88.6700	-22.1653	19.5136	88.7173	-22.2768	0.1947	0.0473	-0.1115	0.2293
8	-10.5321	76.2800	7.4063	-10.4161	76.3401	7.1830	0.1160	0.0601	-0.2233	0.2587

注: $\Delta = \sqrt{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2 + \Delta\gamma^2}$

5 结 论

从大尺度空间物体实时的位姿测量需求出发,提出了一种基于正交柱面成像的空间物体位姿精密测量的方法,系统研究了基于正交柱面成像相机实现空间三维坐标测量和空间物体姿态解算的原理。

1) 通过引入分光棱镜,将两个柱面成像光学系统与两个正交放置的线阵 CCD 结合实现对传统面阵相机的二维测角功能的分解,不仅充分利用了线阵 CCD 速度快、范围广的优势,而且相比传统三线阵系统有效地扩大了测量视场范围,并增加了约束提高测量精度。

2) 研究了基于扩展卡尔曼的多目标识别算法,可以同时多个目标点进行三维坐标测量,提高了测量效率,并保证了姿态测量的同步性。

3) 采用了一种非参数标定方法校正柱面成像畸变,保证了系统的三维定位精度,进一步保证姿态测量的精度,使其具有良好的应用前景。

实验结果表明,基于正交柱面成像相机的空间三维坐标的测量精度可达 0.5 mm,满足了大尺度空间高精度测量的要求;通过 Rodrigues 参数解算空间物体的姿态在横滚、俯仰、偏航三个方向的最大测量误差分别为 0.20° 、 0.12° 、 0.23° ,精度较高,算法可行,具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- Chen Yang, Lin Jiarui, Gao Yang, *et al.* A hybrid of vision and inclination sensor method for estimating relative pose[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1212003.
陈 洋, 林嘉睿, 高 扬, 等. 视觉与倾角传感器组合相对位姿测量方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1212003.
- Wang Weiwen. Study of high-precision attitude measurement based on close-range photogrammetry[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electrics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 1-10.
王卫文. 基于近景摄影测量的高精度姿态测量研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2015: 1-10.
- Miao Xikui, Zhu Feng, Ding Qinghai, *et al.* Monocular vision pose measurement based on docking ring component[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412006.
苗锡奎, 朱 枫, 丁庆海, 等. 基于星箭对接环部件的飞行器单目视觉位姿测量方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412006.
- Liu Z, Zhu J, Yang L, *et al.* Real-time position and orientation measurement with occlusion handling for distributed optical large-scale metrology systems[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(11): 114101.
- Shang Yang. Researches on vision-based pose measurements for space targets[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 2-4, 79-80.
尚 洋. 基于视觉的空间目标位置姿态测量方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006: 2-4, 79-80.
- Hexagon Manufacturing Intelligence. Laser tracker systems [EB/OL]. (2013-01-01) [2016-04-18]. www.hexagonmetrology.com/Laser-Tracker-Systems_231.htm.
- Norman A R, Schönberg A, Grolach I A, *et al.* Validation of iGPS as an external measurement system for cooperative robot positioning[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64(1): 427-446.
- Yang Linghui. Research on large-scale space coordinate measurement location technology based on optical scanning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010: 1-10.
杨凌辉. 基于光电扫描的大尺度空间坐标测量定位技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010: 1-10.
- Long Changyu, Zhu Jigui, Guo Yin, *et al.* Study on close-range photogrammetry based on nonparametric measurement model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1215004.
隆昌宇, 郝继贵, 郭 寅, 等. 基于非参数测量模型的摄影测量方法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1215004.
- Wahab M N A, Sivadev N, Sundaraj K. Target distance estimation using monocular vision system for mobile robot[C]. *IEEE Conference on Open Systems (ICOS)*, 2011: 11-15.
- Zhang Xiaoling, Zhang Baofen, Lin Yuchi, *et al.* Study on dynamic object attitude based on a binocular stereo vision system with orthogonal optical axes[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, 21(11): 1693-1697.
张晓玲, 张宝峰, 林玉池, 等. 基于光轴垂直双目立体视觉系统的物体运行姿态研究[J]. *光电子·激光*, 2010(11): 1693-1697.
- Yuan Gaobin, Li Binqiao, Xu Jiangtao, *et al.* Research of MTF velocity mismatch model for time delay integration CMOS area image sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0104001.

- 袁高斌, 李斌桥, 徐江涛, 等. 时间延迟积分型面阵 CMOS 图像传感器 MTF 速度失配模型研究[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0104001.
- 13 Jiang Yuming, Huang Weigong, Yang Yi. Research on the accuracy improvement of liner array CCD measuring system [J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(6): 98-101.
江育民, 黄惟公, 杨 益. 基于提高线阵 CCD 测量系统测量精度的研究[J]. 电子测量技术, 2012, 33(6): 98-101.
- 14 Ai L L, Yuan F, Ding Z L. Measurement of spatial object's exterior attitude based on linear CCD[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(7): 505-509.
- 15 Li Jin, Yuan Feng, Hu Yinghui. Attitude measurement of space objects based on multi-linear CCD and multi-point cooperation target[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1635-1641.
李 晶, 袁 峰, 胡英辉. 基于多点合作目标的多线阵 CCD 空间物体姿态测量[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1635-1641.
- 16 Ai Lili. Study of the key technologies of the exterior attitude measurement for spatial object based on linear CCD[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 47-51.
艾莉莉. 基于线阵 CCD 的空间目标外姿态测量关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 47-51.
- 17 Li Jing, Yuan Feng, Ding Zhenliang. Attitude calculation of multi-linear CCD exterior attitude measurement system based on Rodrigues parameter[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(4): 858-863.
李 晶, 袁 峰, 丁振良. 基于 Rodrigues 参数的多线阵 CCD 外姿态测量系统的姿态解算[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(4): 858-863.
- 18 Liu H, Yang L, Guo Y, *et al.* Precise calibration of linear camera equipped with cylindrical lenses using a radial basis function-based mapping technique[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 3412-3426.
- 19 Buhmann M D. New developments in the theory of radial basis function interpolation[J]. Multivariate Approximation World Scientific (Singapore), 1993: 35-75.
- 20 Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory[J]. Lecture Notes in Mathematics, 1978, 630: 105-116.
- 21 Grewal M S, Andrews A P. Kalman filtering theory and practice using MATLAB[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2001.