基于正交柱面成像相机空间后方交会的三维坐标测量方法

杨凌辉,王丽君,林嘉睿,孟 伟,徐秋宇

(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:针对多线阵 CCD 相机应用于航空、航天等大型装备测量过程中普遍存在的视场遮挡问题,提出一种基于正交柱面成像的单目坐标测量方法。该方法由一个正交柱面成像相机和一个光立体靶组成,应用空间后方交会原理,无需多相机交会即可完成测量。分析了正交柱面相机的测量原理和内参校准过程,设计了光立体靶的结构参数和标定方法。重点研究了正交柱面相机与光立体靶之间的配合测量过程,并推导了坐标解算的数学模型。最后在测量场距离相机 3 m 的 1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm 空间内,在水平与竖直方向的距离测量精度优于 0.4 mm,深度方向的距离测量精度优于 0.7 mm,三维坐标测量误差小于 0.5 mm。实验验证结果表明:该方法有效,可被灵活应用,具有良好的测量精度。

关键词:三维坐标测量; 正交柱面成像相机; 空间后方交会

中图分类号:TN247 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.0317001

3D coordinate measurement method based on space resection of the orthogonal cylindrical imaging camera

Yang Linghui, Wang Lijun, Lin Jiarui, Meng Wei, Xu Qiuyu

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To solve the line-of-sight problem when using multi-linear CCD cameras in large equipment (such as aerospace field) measuring process, a novel monocular 3D coordinate measurement method based on orthogonal cylindrical imaging was proposed. The system consisted of an orthogonal cylindrical imaging camera and an optical target. The measurement could be finished without multi-cameras intersection by using space resection. Measurement principle of orthogonal cylindrical imaging camera and intrinsic parameter calibration were analyzed. Structure parameter and calibration of optical target were designed. Measuring method with orthogonal cylindrical imaging camera and optical target was emphatically studied. Mathematical model of coordinate calculation was derived. In a 1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm measurement volume that was 3 m away from the camera, the distance measurement accuracy of the proposed method was respectively better than 0.4 mm and 0.7 mm in the horizontal, height and depth direction. For coordinate measurement, the accuracy was better than 0.5 mm. Experimental results showed that the method was feasible and valid with good accuracy.

Key words: 3D coordinate measurement; orthogonal cylindrical imaging camera; space resection

收稿日期:2017-10-05; **修订日期**:2017-11-03

基金项目:国家自然科学基金(51405338);天津市自然科学基金(16JCZDJC38100);中国科学技术协会“青年人才托举工程”(2016QNRC001)

作者简介:杨凌辉(1981-),男,讲师,博士,主要从事激光及光电测试、工业大尺寸测量方面的研究。Email:icelinker@tju.edu.cn

通讯作者:王丽君(1992-),女,硕士生,主要从事激光及光电测试、工业大尺寸测量方面的研究。Email:wlijun@tju.edu.cn

林嘉睿(1984-),男,讲师,博士,主要从事激光及光电测试、工业大尺寸测量等技术方面的研究。Email:linjr@tju.edu.cn

0 引 言

随着柔性装配、无型架装配等数字化制造技术的迅速发展，对工件及智能装备空间位置进行在线动态测量与控制已成为大型装备制造的核心技术之一。由于具有非接触、信息量大、方便灵活等优点，基于摄影测量的坐标精密测量方法在柔性装配、无型架装配、航天器交会对接、大型工件安装引导对接、工业机器人定位等领域[1-2]应用广泛，已成为工业重型装备三维定位及几何外形测量的关键方法。

当前，基于面阵相机摄影测量技术相对成熟，但面阵相机帧频低、图像传输及处理时间较慢，因此测量频率较低，且测量精度难以提高；测量对象以静态或准静态物体为主，更多地用于离线测量而非动态测量。和面阵图像传感器相比，线阵图像传感器空间分辨率高，响应速度快[3]，且线阵 CCD 成本低、结构简单，多个相机组网可通过硬件触发实现同步测量。因此，在要求实时性的动态测量系统中，基于多线阵图像传感器的交会测量方法得到了广泛应用，如 NDI 公司的 Optotrak 测量系统[4]，PhaseSpace 的 Impulse X2 系统[5]等。国内这方面的研究起步较晚，还处于研究阶段，尚无成熟的技术产品，清华大学吴剑等人[6]研制了一套三线阵测量系统，将柱面镜和线阵 CCD 构成一维成像相机，通过 3 个这样的相机非共轴放置，解算三维空间点的位置。哈尔滨工业大学艾莉莉等人[7]通过引入 3 个分光棱镜组合共 9 个线阵 CCD，构成 6 个线阵相机的测量系统，实时计算 3 个目标点的坐标信息。

然而，多线阵相机测量系统需要根据多角度前方交会原理，利用处理过的图像(特征提取和畸变修正)解算空间点的坐标。多角度前方交会测量要求选择合理的布局方式，固定多个相机的位置。在测量过程中，需要保证被测点到相机之间无光束遮挡。此外，还需考虑交会角度对测量精度的影响。但是，大型复杂的测量环境往往无法满足多线阵相机前方交会的测量条件，此外，针对被测目标局部特征复杂的情况，布局空间受限、光路遮挡等问题致使多线阵相机测量系统受到限制，导致测量难以正常进行。如何有效的解决目前多相机系统前方交会测量中遮挡干扰严重影响通视测量的问题，研究一种不受空间布局限制，具有良好现场适应性的单站式三维坐标测量定位方法，是多线阵相机测量系统急需解决的关键问题。

针对前方交会测量中的遮挡干扰问题，文中提出一种基于正交柱面成像相机后方交会的三维坐标测量方法。仅需要使用一个正交柱面成像相机和一个光立体靶，即可完成空间三维坐标的测量。其中，正交柱面成像相机内含柱面成像系统和两个正交放置的线阵 CCD 与基于面阵相机的坐标测量方法相比，该方法测量频率与分辨率更高；与多线阵测量系统相比，该方法无须交会，在保证精度的同时，大大提升了复杂测量环境下的测量效率。

1 测量原理

1.1 正交柱面相机角度测量模型

正交柱面成像相机通过内部设计的分光镜组将被测点发出的光投影在互相正交的两个线阵 CCD 上，其光学系统原理如图 1 所示。

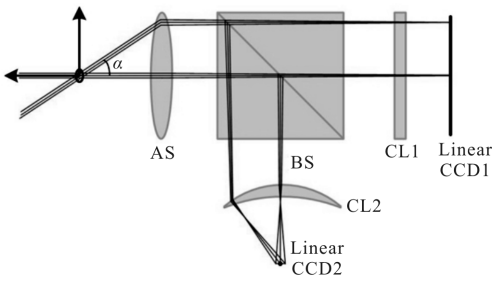

图 1 正交柱面成像相机光学系统示意图

Fig.1 Optical system diagram of the orthogonal cylindrical imaging camera

分光棱镜将入射光线分为两束光线，分别经过柱面镜组后投射到相应的线阵 CCD 上。垂直于线阵 CCD 的方向，柱面镜将光线汇聚成线状像落在线阵 CCD 的某一位置，完成测量；平行于线阵 CCD 方向，柱面镜组相当于平行平板，角度信息不会被测量。如图 1 中水平角 α 的变化信息体现在线阵 CCD1 的不同投影位置，同理，与水平角形成垂直关系的垂直角的变化信息，由与线阵 CCD1 正交放置的线阵 CCD2 测量得到。

由以上分析可知，正交柱面相机可以同时测量得到目标发光点的两个空间角度，也就确定了经过目标点的两个相交平面，其角度测量模型示意图如图 2 所示。

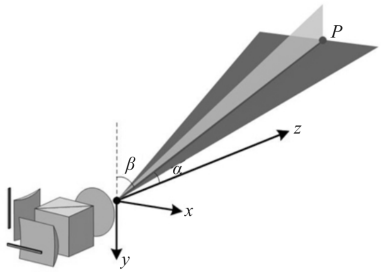

图 2 正交柱面相机角度测量模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the orthogonal cylindrical camera angle measurement model

在相机坐标系下，由目标点 P 的三维坐标与水平角 α、垂直角 β 可以得到两个平面方程，如公式(1)~(2)：

$$\tan\alpha=\frac{x}{z} \tag{1}$$

$$\tan\beta=\frac{y}{z} \tag{2}$$

式中：(x,y,z)为目标点 P 在相机坐标系 $o-xyz$ 下的三维坐标，α 和 β 由相机内部参数标定获得。

1.2 基于多平面约束后方交会的三维坐标测量

空间后方交会法[8]通过多个物方坐标已知的控制点的像方信息完成单目视觉测量的外部定向，即视觉像坐标系与物方目标坐标系间的旋转和平移关系。结合正交柱面相机的测量原理与空间后方交会法理论，设计一个光立体靶作为物方目标，与正交柱面相机相结合完成测量，如图 3 所示。光立体靶上安装固定若干发光点与一个接触式测头，发光点与测

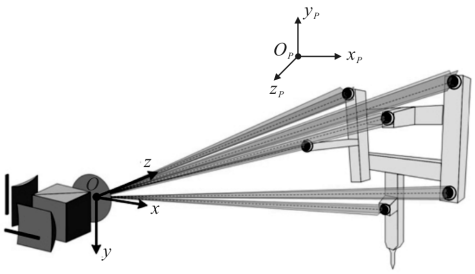

图 3 正交柱面成像相机空间后方交会的三维坐标测量定位原理图

Fig.3 Schematic diagram of 3D coordinate measurement based on space resection of the orthogonal cylindrical imaging camera

头在光立体靶坐标系下的空间坐标确定已知，这些发光点即坐标已知的物方控制点。在测量过程中，正交柱面相机固定于空间某处，将光立体靶的测头与待测点接触。由正交柱面相机测得各发光点的水平角与垂直角信息，利用空间后方交会法即可建立多平面约束方程，从而确定正交柱面相机坐标系与光立体靶坐标系之间的旋转和平移关系。由此得到被测点的空间坐标。

2 标 定

2.1 相机内部参数校准

相机校准的主要任务是从图像信息中提取测量信息(角度)。正交柱面相机的校准旨在确定目标点像面坐标(u,v)与其在相机坐标系下的水平角 α、垂直角 β 的对应关系。相机内参校准方法示意图如图4 所示。

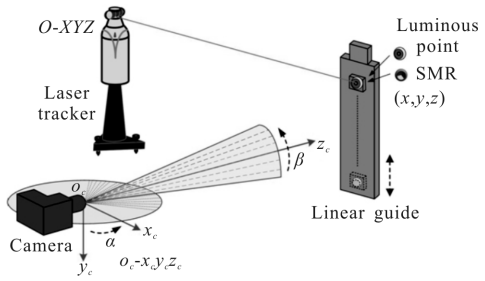

图 4 相机内部参数校准示意图

Fig.4 Schematic diagram of camera intrinsic parameter calibration

以正交柱面相机的孔径光阑 AS 为原点，以过原点且平行于相机机身端面法线和一维转台转轴的两条直线为 x_c 轴、y_c 轴建立相机坐标系 $o_c-x_cy_cz_c$，z_c 轴由右手定则确定。

在相机标定过程中，精密一维转台带动相机在水平方向旋转，高精度一维直线导轨带动发光点在竖直方向移动，由此相机可记录到视场范围内足够多个位置的像面坐标(u_i,v_i)。同时，每个位置发光点对应的(α_i,β_i)由一维转台与激光跟踪仪共同得到，由此完成相机标定。

2.2 光立体靶结构设计及参数标定

光立体靶作为相机测量的物方目标，其测量姿态及结构参数设计会影响坐标测量精度。因此，应设计合理的光立体靶发光点数量和空间分布，并使光立体靶正对相机完成测量。

具体地，在待测点坐标的解算过程中，当发光点数目在 3~5 个时，各发光点需要满足共线或共面的空间分布要求。而当发光点数目大于或等于 6 时，发

光点之间的位置选择更加灵活，光立体靶的整体体积能够适当缩小。因此，文中选用 6 个发光点构成空间点阵测头分布。为了提高定位精度，在设计光立体靶时应保证 6 个发光点不分布于同一平面内，且在考虑便携性和实际应用的情况下扩展发光点在各方向的分布，光立体靶结构示意如图 5 所示。

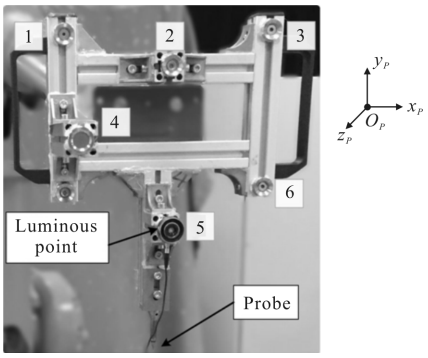

图 5 光立体靶结构图

Fig.5 Structure of the optical target

6 个发光点在空间中均匀分布，其整体尺寸约为 300 mm×200 mm×500 mm。其中点 P_2、P_5 与平面 $P_1P_3P_6$ 距离约为 8 cm，点 P_4 与平面 $P_1P_3P_6$ 距离约为 20 cm。以光立体靶上发光点 P_1 为原点，$\overline{P_1P_3}$ 为 x 轴，P_4 过 xoy 平面，建立光立体靶坐标系 $o_P-x_Py_Pz_P$。用激光跟踪仪标定每个发光点 $P_i(i=1,2,\cdots 6)$ 和测头在 $o_P-x_Py_Pz_P$ 下的三维坐标。

3 坐标解算

3.1 初值的获取

在实际测量过程中，光立体靶每移动到一个位置对被测点进行测量，求出光立体靶坐标系到正交柱面相机坐标系的变换矩阵，则可得到测头在不同位置时的被测点坐标。

被测点的水平角 α 和俯仰角 β 通过径向基函数插值的方法得到：

$$\alpha(u,v)=\sum_{i=1}^{N_{\text{sample}}} a_i\phi_i(u,v)+\sum_{j=1}^{3} b_jp_j(u,v) \tag{3}$$

$$\beta(u,v)=\sum_{i=1}^{N_{\text{sample}}} c_i\phi_i(u,v)+\sum_{j=1}^{3} d_jp_j(u,v) \tag{4}$$

$$\phi_i(u,v)=[(u-u_i)^2+(\beta-\beta_i)^2+\chi^2]^{1/2} \tag{5}$$

式中：$\phi_i(u,v)$ 为径向基函数的径向基；$p_j(u,v)$ 为径向基函数的多项式基，则 $[1,u,v,u^2,uv,v^2,\cdots]$；$N_{\text{sample}}$ 为采样点的数量；χ 为形状参数。基函数所对应的权值系数分别是 a_i、b_j、c_i、d_j，其值由插值和附加条件求得。

光立体靶坐标系 $o_P-x_Py_Pz_P$ 与相机坐标系 $o_c-x_cy_cz_c$ 的转换关系如下：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}=[R\quad T]\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \\ 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中：$(x_P,y_P,z_P,1)^{\mathrm{T}}$ 是发光点及测头在光立体靶坐标系 $o_P-x_Py_Pz_P$ 下的齐次坐标；$(x_c,y_c,z_c)^{\mathrm{T}}$ 是其在相机坐标系 $o_c-x_cy_cz_c$ 下相应的坐标。

$[R\quad T]=\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_3 \end{bmatrix}$ 是坐标系 $o_P-x_Py_Pz_P$ 到 $o_c-x_cy_cz_c$ 的旋转矩阵和平移向量。

由公式(6)可知，当已知测头在光立体靶坐标系中的位置坐标时，通过 $[R\quad T]$ 转换关系可以算出测头在相机坐标系下的坐标，即被测点位置信息。

假设安装固定在光立体靶上的 n 个发光点 $P_i(i=1,2,\cdots n)$ 在光立体靶坐标系 $o_P-x_Py_Pz_P$ 与相机坐标系 $o_c-x_cy_cz_c$ 中的坐标分别是 $(x_{Pi},y_{Pi},z_{Pi})^{\mathrm{T}}$ 与 $(x_{ci},y_{ci},z_{ci})^{\mathrm{T}}$，由公式(6)得：

$$\begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \end{bmatrix}=[R\quad T]\begin{bmatrix} x_{Pi} \\ y_{Pi} \\ z_{Pi} \\ 1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_{Pi} \\ y_{Pi} \\ z_{Pi} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

将公式(7)代入公式(1)、(2)可得：

$$\begin{cases} F_{1i}=x_{Pi}r_1+y_{Pi}r_2+z_{Pi}r_3+t_1-\tan\alpha\cdot(x_{Pi}r_7+y_{Pi}r_8+z_{Pi}r_9+t_3)=0 \\ F_{2i}=r_4x_{Pi}+r_5y_{Pi}+r_6z_{Pi}+t_2-\tan\beta\cdot(r_7x_{Pi}+r_8y_{Pi}+r_9z_{Pi}+t_3)=0 \end{cases} \tag{8}$$

式中：待确定的 $[R\quad T]$ 包括 12 个参数：$r_1,r_2,r_3,r_4,r_5,r_6,r_7,r_8,r_9,t_1,t_2,t_3$。由公式(8)可知，每个发光点提供两个约束方程，当发光点个数大于或等于 6 个时，通过求解线性约束方程组即可得到 $[R\quad T]$。

3.2 非线性最优化求解

在测量误差存在的情况下，以上线性求解得到的旋转矩阵 R 往往不满足正交条件。因此，需要进一步通过非线性最优化方法求解。

旋转矩阵 R 的正交约束关系如下所示：

$$\begin{cases} f_1=r_1^2+r_2^2+r_3^2-1=0 \\ f_2=r_4^2+r_5^2+r_6^2-1=0 \\ f_3=r_7^2+r_8^2+r_9^2-1=0 \\ f_4=r_1r_4+r_2r_5+r_3r_6=0 \\ f_5=r_1r_7+r_2r_8+r_3r_9=0 \\ f_6=r_4r_7+r_5r_8+r_6r_9=0 \end{cases} \tag{9}$$

由公式(7)和(9),当下式目标函数取最小值时对应的[R T]即为所求的目标值:

$$E=\sum_{i=1}^{n} F_i^2+M\cdot\sum_{j=1}^{6} f_j^2 \tag{10}$$

式中:M 为罚因子,根据正交性设置其数值。公式(10)所示方程的最小化是非线性最优化问题,通过 Levenberg-Marquardt (L-M)算法[9]求解。此处,初值为线性公式(8)所得结果,用非线性最优化方法最终确定[R T]。

4 实 验

4.1 相机内参标定与光立体靶坐标系标定实验

在实验室环境下搭建如图 6 所示的相机内参标定平台,标定过程中按照 2.1 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,完成相机的内参标定实验。实验中,一维转台选用多齿分度台,其全程运动精度为 0.6″。

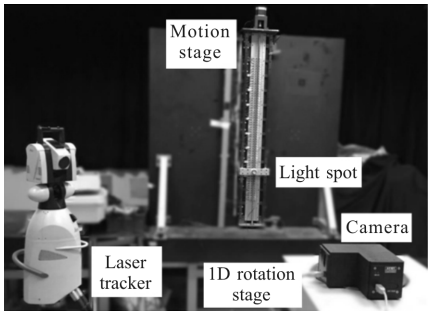

图 6 相机内参标定实验图

Fig.6 Experimental diagram for camera intrinsic parameter calibration

将光立体靶固定在机器人末端,依据图 5,用激光跟踪仪(Leica AT901,精度为 15 μm+6 μm/m)建立光立体靶坐标系,并标定其上各发光点与测头坐标。多次标定后,在无粗大误差数据情况下取平均值,确定光立体靶结构参数如表 1 所示。

表 1 光立体靶结构参数标定结果(单位:mm)

Tab.1 Parameter calibration results of the optical target structure (Unit:mm)

	x_P	y_P	z_P
Point1	0.000	0.000	0.000
Point2	137.906	67.902	10.729
Point3	289.818	0.000	0.000
Point4	-3.061	242.089	0.000
Point5	132.993	192.143	187.339
Point6	286.365	122.147	177.618
Probe	125.544	256.792	223.309

4.2 三维坐标测量实验

为了验证定位方法的可行性和测量精度,在实验室搭建了基于正交柱面成像相机后方交会定位的实验平台,主要包括一个正交柱面成像相机、光立体靶和用作测量比对基准的激光跟踪仪,实验验证平台如图 7 所示。

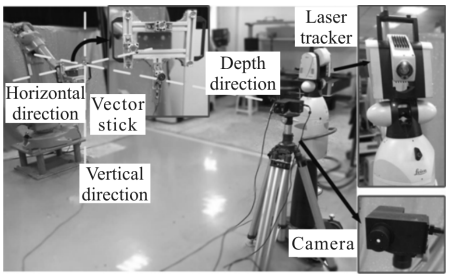

图 7 坐标测量验证实验

Fig.7 Verification experiment of coordinate measurement

以激光跟踪仪作为测量基准,固定在机器人末端上的光立体靶,其初始位置过相机的光轴且与相机光心的距离约为 3 m。正交柱面相机的视场角为 40°×40°,为保证被测点落在相机的视场范围内且有良好的成像质量,选取一个以光立体靶为中心的 1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm 的正方体的测量空间,在测量空间内选取若干位置验证方法的空间三维坐标测量精度。为了便于进行实验验证,在测量空间内部定义 3 个方向:由相机指向测量空间为深度方向,水平方向在水平面内且垂直于深度方向,竖直方向垂直于水平面。

实验验证过程中,将带动光立体靶的机器人末

端在不超出视场范围的情况下,分别沿着水平、竖直和深度方向移动。每次移动 40~120 mm,每移动至一个位置,都分别用激光跟踪仪与所提出的基于正交柱面成像的后方交会测量方法测量测头的三维坐标。然后,分别计算在每个方向上相邻两点的距离。在每个方向得出的距离测量比对结果分别如表 2~4 所示。

表 2 水平方向距离测量结果(单位:mm)

Tab.2 Distance measurement results in the horizontal direction(Unit:mm)

No.	By laser tracker	With the proposed method	Error
1	99.779	100.105	0.326
2	100.812	100.935	0.123
3	101.338	101.083	−0.255
4	70.144	69.912	−0.232
5	46.763	46.886	0.122
6	100.549	100.929	0.379

表 3 竖直方向距离测量结果(单位:mm)

Tab.3 Distance measurement results in the vertical direction (Unit:mm)

No.	By laser tracker	With the proposed method	Error
1	41.485	41.421	−0.064
2	52.699	52.549	−0.149
3	59.063	58.687	−0.376
4	69.445	69.676	0.232
5	122.341	121.962	−0.379
6	44.183	44.120	−0.064

由表 2~4 可知,水平、竖直、深度 3 个方向的距离测量比对结果可知,其最大误差分别为 0.379、−0.379、−0.669 mm。 基于角度测量的后方交会模型在深度方向的约束较弱,因此,深度方向的精度与水平与竖直方向相比稍差。

表 4 深度方向距离测量结果(单位:mm)

Tab.4 Distance measurement results in the depth direction (Unit:mm)

No.	By laser tracker	With the proposed method	Error
1	51.080	51.748	0.669
2	50.019	49.509	−0.511
3	45.030	44.674	−0.357
4	54.506	54.180	−0.326
5	49.789	50.148	0.360
6	47.272	46.675	−0.597

更直观地, 将正交柱面相机后方交会定位方法测量得到的测头坐标与跟踪仪测量得到的测头坐标经过坐标系的转换后可以完成系统坐标测量精度的验证。统一坐标系后的坐标数据及误差如表 5 所示。

表 5 中,$\Delta_{xyz}=\sqrt{(x_s-x_t)^2+(y_s-y_t)^2+(z_s-z_t)^2}$,由测量比较结果表明, 系统的坐标测量误差小于 0.5 mm。误差分析可知, 测量结果的好坏由多方面影响因素决定,如发光点的对心误差,相机内参标定误差,光立体靶参数标定误差, 坐标测量结果比对中的转站误差等。然而,实验结果仍然可以清楚地表明所提出的坐标测量方法可行,具有良好的精度表现,是多线阵 CCD 相机测量中遮挡干扰与难测点等情况下良

表 5 坐标测量误差结果(单位:mm)

Tab.5 Coordinate measurement error results (Unit:mm)

No.	By laser tracker			With the proposed method			Error			
	x_l	y_l	z_l	x_c	y_c	z_c	dx	dy	dz	Δ_{xyz}
1	−524.216	2 369.277	−109.135	−524.075	2 369.524	−108.926	0.141	0.247	0.209	0.353
2	−741.529	2 376.880	−106.983	−741.657	2 376.787	−107.009	−0.128	−0.093	−0.026	0.160
3	−522.900	2 414.279	−110.044	−522.868	2 414.336	−110.060	0.032	0.057	−0.016	0.067
4	−529.484	2 214.742	−109.301	−529.492	2 214.355	−109.270	−0.008	−0.387	0.031	0.388
5	−531.022	2 167.495	−109.133	−531.071	2 167.707	−109.190	−0.049	0.212	−0.057	0.225
6	−526.374	2 359.779	−290.631	−526.426	2 359.719	−290.137	−0.053	−0.059	0.494	0.500
7	−525.833	2 360.263	−237.938	−525.753	2 360.338	−237.596	0.080	0.075	0.342	0.359
8	−523.149	2 362.766	12.266	−523.118	2 362.841	11.879	0.031	0.075	−0.387	0.396

好的补充测量方法。

5 结 论

文中在分析现有基于多线阵相机测量的坐标精密测量方法的基础上，提出了一种基于正交柱面成像的后方交会三维坐标测量方法。建立了后方交会模型，通过引入一个光立体靶解决了前方交会测量中的遮挡干扰问题,在保持线阵相机高速、高分辨率的优势的基础上,仅使用一个相机和一个光立体靶,无须交汇即可完成空间坐标的测量。

所提出方法的可行性与精度在相机约 3 m 外 1 000 mm×1 000 mm×1 000 mm 的现场空间内进行实验验证,结果表明:坐标测量精度优于 0.5 mm,在水平与竖直方向的距离测量精度优于 0.4 mm,深度方向的距离测量精度优于 0.7 mm。易用性好,能满足受限条件下的测量需求。

实验所用相机的采集频率为 3 kHz,通过采用更高性能相机及优化相机光路，则可达到更高的测量精度,在航空航天、机器人校准等领域有良好的应用前景。

参考文献:

[1] Pepe M, Ackermann S, Fregonese L, et al. 3D point cloud model color adjustment by combining terrestrial laser scanner and close range photogrammetry datasets [J]. ***International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering***, 2016, 10(11): 1834-1840.

[2] Robson S, MacDonald L, Kyle S, et al. Close range calibration of long focal length lenses in a changing environment [J]. ***ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences***, 2016, XLI-B5: 115-121.

[3] Liu Haiqing, Yang Linghui, Guo Yin, 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): 323-344.

[4] Ruszkowski A, Schneider C, Mohareri O, et al. Bimanual teleoperation with heart motion compensation on the da Vinci® Research Kit: Implementation and preliminary experiments [C]//Robotics and Automation(ICRA), 2016: 4101-4108.

[5] Phasespace 2016. [EB/OL]. [2016 -03 -22].http://www.phasespace.com/.

[6] Wu Jian. Three-dimensional high precise optical positioning technique and its clinical application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004: 19-42. (in Chinese)
吴剑. 三维高精度光学定位技术及其临床应用 [D]. 北京: 清华大学, 2004: 19-42.

[7] Ai Lili, Yuan Feng, Ding Zhenliang. An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2008, 16(1): 161-165. (in Chinese)
艾莉莉, 袁峰, 丁振良. 应用线阵 CCD 的空间目标外姿态测量系统[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(1): 161-165.

[8] Luhmann T, Robson S, Kyle S, et al. Close-range Photogrammetry and 3D Imaging [M]. Berlin: Walter de Gruyter, 2014: 263-271.

[9] More J J. The Levenberg-marquardt algorithm: implementation and theory [C]//IEEE Conference on Numerical Analysis, 1977: 105-116.