

doi:10.3788/gzxb20144311.1112004

线结构光自同步扫描三维形貌测量系统

熊胜军, 赵飞, 赵恒, 敖磊

(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

摘 要:针对空间目标操控任务中非合作目标近距离三维形貌测量的需求, 设计了基于激光三角法原理的线结构光自同步扫描三维形貌测量系统. 分析了经典的点扫描测量系统模型, 扩展建立了线结构光扫描系统模型. 构建了测量系统桌面样机, 利用二维平面棋盘靶标构建虚拟立体靶标完成了系统参量的标定. 分别对已知结构的工件及天宫一号缩比模型进行了测量实验, 结果表明: 测量距离为 1 m 时, 系统三坐标测量误差均优于 1 mm, Z 向距离误差为 0.18 mm, 测量点到拟合平面的距离误差均值为 0.31 mm. 该系统简化了扫描系统结构, 能降低空间载荷的重量和功耗, 满足空间任务中快速三维形貌测量的需求.

关键词:线结构光; 激光三角法; 自同步扫描; 三维形貌测量

中图分类号: TB92; TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)11-1112004-6

Three-dimensional Shape Measurement System based on Auto-synchronous Scanners with Line Structured-light

XIONG Sheng-jun, ZHAO Fei, ZHAO Heng, AO Lei

(Academy of Opto-Electronics, China Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to measure the three-dimensional shape of a non-cooperative target in a close distance in the missions for space targets operations, a line structured-light three-dimensional shape measurement system based on laser triangulation with auto-synchronous scanners was designed. The principle and the configuration of the system were presented and the line structured-light scanners system model was derived. The prototype system was set up and calibrated with a chessboard. The groove board and Tiangong-1 scale model were measured. The measurement results show that the precision of the spatial coordinates measurement is better than 1 mm, the precision of Z coordinates measurement is 0.18 mm, and the average errors of the distance between the measuring points and the fitted plane are 0.31 mm at the distance of 1 m. The system can simplify the scanner and reduce the weight and power consumption, and can be used for the rapid three-dimensional shape measurement in the space missions.

Key words: Line structured-light; Laser triangulation; Auto-synchronous scanners; Three-dimensional shape measurement

OCIS Codes: 120.6650; 150.0155; 150.0150; 150.6910; 150.1488

0 引言

空间交会对接、在轨操控任务中近距离段平台与目标间的相对导航, 通常采用光学测量技术来获取目标的三维信息. 对于合作目标, 可采用激光雷达结合引导相机二维图像的视觉测量方法, 目标上需设置特定形状的标志点, 但易受环境光照条件的影响. 神舟与天

宫的交会对接采用的是该方法^[1].

对于非合作目标, 可采用被动多目立体视觉方法和主动激光三角法或飞行时间法. 立体视觉法测量准确度高, 但对多幅图像上同名点的搜索及匹配困难, 且容易受环境光照条件的影响^[2-3]; 主动测量法通过测量系统主动投射激光而不依靠环境光, 具有较高的空间光环境适应性; 其中, 飞行时间法通过测量激光往返时

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61308101)和中国科学院光电研究院创新基金(No. YCX-2011-ZF)资助

第一作者: 熊胜军(1986-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光学系统设计. Email: xiongshengjun@aoe.ac.cn

收稿日期: 2014-05-09; 录用日期: 2014-07-01

<http://www.photon.ac.cn>

间来确定目标距离,用于近距离三维测量的激光雷达工作距离可以覆盖数米至数百米,测量准确度恒定不随着距离变化^[4];激光三角法通过采集被物体表面调制后的激光光点或光条的图像,通过物像空间的几何关系求解出目标的形状及位置,工作距离通常在数米以内,测量准确度随测量距离变大而迅速下降,故更适合近距离三维形貌的测量.自同步扫描能够实现激光投射方向与相机光轴方向的同步扫描,具有瞬时视场远小于传统激光三角法、抗环境光能力强的特点,从而被广泛应用于复杂的空间光环境下的测量^[5-8].加拿大国家研究委员会(National Research Council, NRC)的 Marc. Rioux 首先提出了自同步扫描系统的方案^[5],之后为了满足不同空间应用需求,加拿大 Neptec 设计团队分别设计了基于激光三角法的激光三维相机系统(Laser Camera System, LCS)^[6]和结合飞行时间法与激光三角法的自主交会对接(Triangulation and LIDAR Automated Rendezvous and Docking, TriDAR)系统^[7],前者为美国航空航天局(National Aeronautics and Space, NASA)航天飞机与国际空间站对接飞行任务(Space Transportation System, STS) STS-105、STS-114 提供航天飞机及空间站的外形监测三维数据^[7-8],后者在 STS-128、STS-131、通用轨道修正航天器/近期能验证的机器人技术(Spacecraft for the Universal Modification of Orbits / Front-end Robotics Enabling Near-term Demonstration, SUMO/FREND)计划和凤凰计划^[7,9]等空间交会对接及空间目标操控任务中提供相对位姿测量数据以实现平台与目标间的相对导航以及实现对操控机构的高准确度控制.

自同步点扫描系统为了实现对二维视场的高速扫描,需要 X、Y 双轴扫描的反射振镜.由于系统存在一定的基线长度,Y 轴振镜结构尺寸较大,为了在满足强度、变形的前提下降低振镜的质量以达到高基频低功耗的要求,使用了比刚度极高的金属铍材料^[7],增加了系统的加工难度及成本.

本文设计并实现了线结构光自同步扫描三维形貌测量系统.该系统继承了自同步扫描系统抗环境光能力强的特点,同时免除了成本昂贵的 Y 轴扫描镜,可降低系统重量、体积和功耗,易于实现高速扫描采集,稳定可靠的获取目标的三维形貌信息,满足空间任务需求.

1 系统的组成及其测量原理

1.1 硬件组成

线结构光自同步扫描三维测量系统采用激光三角法原理实现物体表面形貌的非接触测量.系统由一字线激光器、双面反射扫描振镜、左右定镜、成像镜头及

面阵探测器组成,总体构架如图 1.

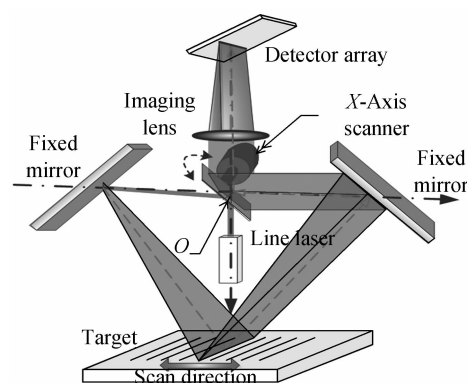


图 1 测量系统总体构架

Fig. 1 The structure of the measuring system

利用双面反射的 X 振镜实现了激光投射方向与相机光轴方向的同步扫描.光路结构左右对称,激光器发出的线状光先后经过 X 振镜正面和左定镜的反射后入射到待测物体的表面发生漫反射,反射光线经右定镜和 X 振镜反面反射,经成像透镜聚焦在面阵探测器上形成光条图像,通过图像处理获得光条中心的位置,结合 X 振镜的偏转角即可通过激光三角法测得目标的空间位置信息.

1.2 测量原理

1.2.1 点扫描系统测量模型

系统光路经过多次平面镜反射后,镜像展开建立测量坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$.如图 2,激光从 M 点出射,轴线与 X 振镜、左定镜、右定镜、成像透镜的交点分别为 O、I、J、H、 O_1 、 O_2 分别是 O 点在左、右定镜上的镜像.以激光器入射 X 方向扫描镜所在直线为 Z_c 轴,向下为正; O_1 、 O_2 所在的直线为 X_c 轴,向右为正; X_c 轴与 Z_c 轴的交点为坐标原点 O_c , Y_c 轴过 O_c 点垂直纸面向外;坐标系建立满足右手准则. O 点到左、右定镜的距离 OI 与 OJ 相等;激光光线与处于初始状态的 X 振镜夹角为 45° ;左、右定镜与直线 IJ 夹角相同; O_1 、 O_2 到 Z_c 轴距离相等,记为 T , $2T$ 即为基线长度.

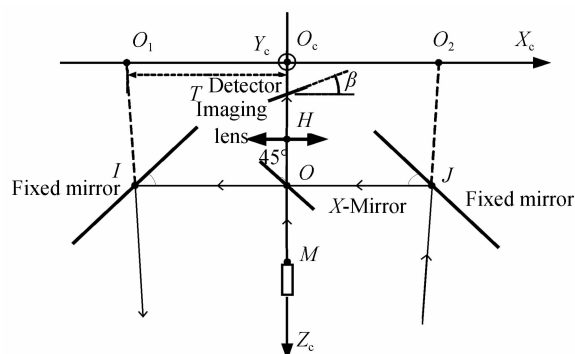


图 2 测量坐标系

Fig. 2 Coordinate of the measuring system

去掉系统中的激光器、左、右定镜和 X 振镜后的光路几何关系如图 3^[10].虚线部分表示 X 振镜初始状

态时的光路;实线表示 X 振镜偏转 θ 角度后(逆时针为正)的光路,出射激光光线相对初始位置反方向偏转了 2θ 角度。

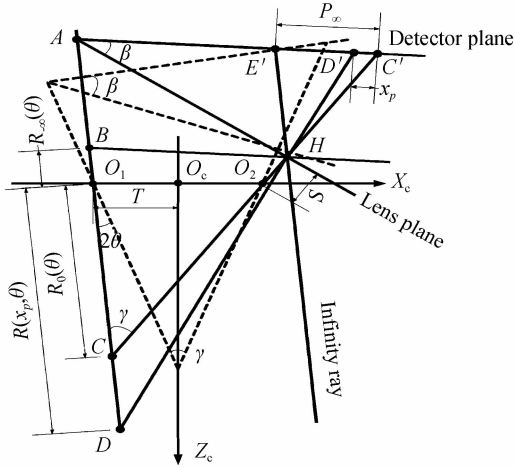


图3 水平面内光路展开几何关系

Fig. 3 Un-folded geometry at the horizon

利用小孔成像模型对系统进行分析,假设待测物点处于激光光线上某一特定位置时,其对应的成像主光线与透镜平面垂直,将该位置称为基准点位置.基准点位置随着 X 振镜的偏转而发生变化,但每一个 X 振镜偏转角下都只存在一个基准点位置,不同的基准点对应的像点在面阵探测器上的位置相同.振镜偏转 θ 角后,在出射激光 O_1D 上有两个物点 C 和 D ,它们在探测器上所成像点分别为 C' 和 D' .设 C 点为该偏转角度下的基准点位置, D 点位置任意, O_1D 上无限远点在探测器上的像点为 E' .在探测器平面上的直线 AC' ,以 C' 点为原点,向左为正,称为探测器的远端,向右为负,称为探测器的近端, D' 、 E' 点到 C' 点距离分别为 x_p 和 P_∞ ;过透镜主点 H 作与 AC' 平行的直线交激光光线 O_1D 于点 B ,在激光光线上,以 O_1 为原点,向下为正, C 、 D 、 B 点到 O_1 点距离分别为 $R_0(\theta)$ 、 $R_p(\theta)$ 和 $R_\infty(\theta)$,设 C 点坐标为 $(X_0(\theta), Z_0(\theta))$, D 点坐标为 $(x(x_p, \theta), z(x_p, \theta))$, B 点坐标为 $(X_\infty(\theta), Z_\infty(\theta))$;激光光线和垂直于透镜平面的主光线同步旋转,其夹角 γ 保持不变;激光光平面、探测器平面与透镜平面满足 Scheimpflug 条件^[11-12],即三平面相交于同一直线,且探测器平面与透镜平面之间的夹角 β 满足

$$\tan \beta = M / \tan \gamma \quad (1)$$

式中, M 为光学系统对基准点位置处的垂轴放大率;透镜主点 H 到 O_2 点的距离为 S ;透镜主点 H 到 C' 点距离为 f_0 ;由两组相似三角形 $\triangle BHC \sim \triangle E'C'H$ 和 $\triangle BHD \sim \triangle E'D'H$ 以及三角关系和平面向量知识可得

$$R(x_p, \theta) = \frac{P_\infty}{P_\infty - x_p} (R_0(\theta) - R_\infty(\theta)) + R_\infty(\theta) \quad (2)$$

$$x(x_p, \theta) = \frac{P_\infty}{P_\infty - x_p} (X_0(\theta) - X_\infty(\theta)) + X_\infty(\theta) \quad (3)$$

$$z(x_p, \theta) = \frac{P_\infty}{P_\infty - x_p} (Z_0(\theta) - Z_\infty(\theta)) + Z_\infty(\theta) \quad (4)$$

式中, θ, x_p 的值可以通过对振镜电机及探测器的测量得到,通过三角关系和平面向量知识求得其他参量与系统参量之间的关系为

$$P_\infty = f_0 \frac{\sin \gamma}{\cos(\beta - \gamma)} \quad (5)$$

$$X_0(\theta) = -T \frac{\sin(4\theta)}{\sin \gamma} \quad (6)$$

$$Z_0(\theta) = T \frac{\cos(4\theta) + \cos \gamma}{\sin \gamma} \quad (7)$$

$$X_\infty(\theta) = -[T \cos(\beta - 4\theta) + S \cos(\beta) \cdot \sin(\gamma/2 - 2\theta)] / [\cos(\beta - \gamma)] \quad (8)$$

$$Z_\infty(\theta) = [T(\sin(\beta - 4\theta) + \sin(\beta - \gamma)) - S \cos(\beta) \cos(\gamma/2 - 2\theta)] / [\cos(\beta - \gamma)] \quad (9)$$

1.2.2 线扫描系统测量模型

点扫描模型确立了物空间的扫描激光线 O_1D 与像平面上的一条直线 $E'C'$ 之间的一一映射关系.利用理想光学系统的物像关系可以将该模型扩展成线扫描模型,即确立物空间的线激光平面与像平面之间的映射关系,如图4.

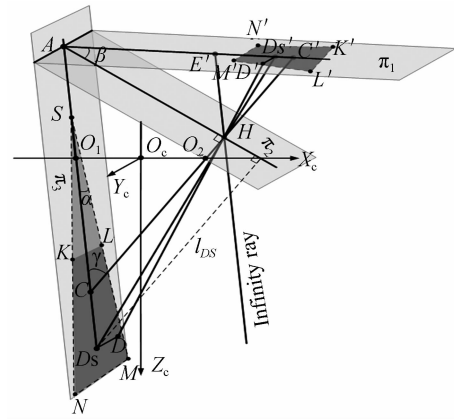


图4 线扫描测量模型光路展开几何关系

Fig. 4 Un-folded geometry of the line structured-light system

记探测器平面、透镜平面、激光光平面分别为 π_1 、 π_2 、 π_3 ,三平面均平行于 Y_c 轴,且相交于过点 A 的一条直线,在 $X_cO_cZ_c$ 平面内的各点的几何关系均满足点扫描系统的数学模型.在 π_1 平面内,以基准点的像点位置 C' 为原点, $C'A$ 为 X_p 轴,向左为正,与 X_p 轴垂直方向为 Y_p 轴,向上为正,建立像面坐标系.

设线激光的线发散角为 2α ,反向会聚点为 S , S 在直线 AC 上,对激光光平面上任意一点 D ,其像点为 D' ,设 D' 在像面坐标系下的坐标为 (x_p, y_p) , D 在 $O_cX_cY_cZ_c$ 坐标系下的坐标为 $(x(x_p, \theta), y(x_p, y_p, \theta))$,

$z(x_p, \theta)$), 其在 $X_c O_c Z_c$ 平面内的投影点为 D_s , 引入以下两个辅助参量.

l_{D_s} : 投影点 D_s 的物距, 即 D_s 与透镜主平面之间的距离;

M_D : 光学系统对投影点 D 处的垂轴放大率;

由物像关系及几何知识可得

$$M_D = -\frac{f}{l_{D_s} - f} \quad (10)$$

$$l_{D_s} = \left| z(x_p, \theta) + S \cdot \cos\left(2\theta + \frac{r}{2}\right) - \tan\left(2\theta + \frac{r}{2}\right) \left(x(x_p, \theta) - T - S \cdot \sin\left(2\theta + \frac{r}{2}\right) \right) \right| \cdot \left[1 + \tan^2\left(2\theta + \frac{r}{2}\right) \right]^{-1/2} \quad (11)$$

$$y(x_p, y_p, \theta) = \frac{y_p}{M_D} = \left[1 - B(\theta) - A(\theta) \frac{P_\infty}{P_\infty - x_p} \right] \cdot y_p \quad (12)$$

$$A(\theta) = \frac{|\cos(2\theta + \gamma/2)|}{f} \{ Z_0(\theta) - Z_{-\infty}(\theta) + ([X_{-\infty}(\theta) - X_0(\theta)] \cdot \tan(2\theta + \gamma/2)) \} \quad (13)$$

$$B(\theta) = \frac{|\cos(2\theta + \gamma/2)|}{f} \{ Z_{-\infty}(\theta) + S \cdot \cos(2\theta + \gamma/2) + [T + S \cdot \sin(2\theta + \gamma/2) - X_{-\infty}(\theta)] \cdot \tan(2\theta + \gamma/2) \} \quad (14)$$

激光光平面 π_s 内的 $KLMN$ 区域对应像平面 π_i 内的 $K'L'M'N'$ 区域, 且为一一映射, 则可以通过测量激光的图像位置来确定物点三维坐标.

2 系统的标定

由测量系统模型可知, 自同步扫描测量系统的系统参量较多, 且相互之间呈复杂的非线性关系, 难以通过分离变量的方式得到每一个量的解析表达式, 实现每个参量的独立标定. 据式(4)、(5)和(12), 决定最终目标的三维坐标的中间参量有 P_∞ 、 $X_0(\theta)$ 、 $X_{-\infty}(\theta)$ 、 $Z_0(\theta)$ 、 $Z_{-\infty}(\theta)$ 、 $A(\theta)$ 和 $B(\theta)$, 采用基于模型拟合的标定方法, 通过平面棋盘靶标构建虚拟立体靶标进行标定, 标定步骤为:

1) 将棋盘靶标安装于电控旋转台、位移台上, 置于测量系统前方, 调节靶标姿态, 使靶面垂直于测量坐标系的 Z 轴, 且棋盘轴线 UV 在 XOZ 平面内, 测量系统投影的光条垂直于 UV , 如图 5 所示. 调节位移台, 使靶标位于一已知距离的初始位置, 记此时靶标平面上点的 Z 坐标为 z_1 ;

2) 测量系统先后扫描采集一组暗场光条图像和一组亮场棋盘靶标图像, 采用变阈值灰度质心法^[13]进行亚像素光条中心的提取, 结合棋盘靶标上角点在传感器上的图像坐标和已知的空间坐标关系, 确定光条中心与测量点空间坐标之间的映射关系, 对每一个扫描

角 θ 都有一组 (θ, x_p, y_p) 与 (x, y, z) ;

3) 调节位移台, 使靶标沿着 Z 轴方向以一定的步长移动至 $z_i (i=2, 3, \dots, N)$, 重复步骤 2), 共得到 N 组映射坐标;

4) 对式(4)、(5)和(12)采用非线性最小二乘拟合的方法分别拟合不同 θ 下的中间参量 P_∞ 、 $X_0(\theta)$ 、 $X_{-\infty}(\theta)$ 、 $Z_0(\theta)$ 、 $Z_{-\infty}(\theta)$ 、 $A(\theta)$ 和 $B(\theta)$. 系统设计了 101 个扫描角, 标定的中间参量较多, 一组典型的标定值如表 1.

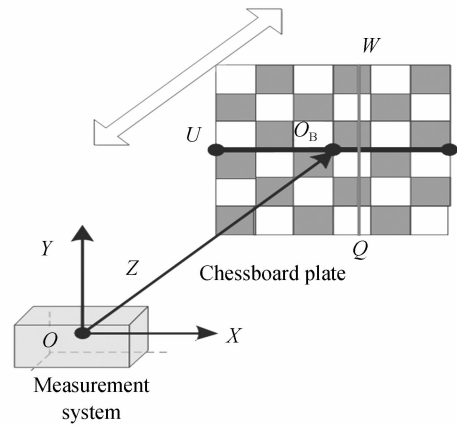


图 5 系统标定示意图

Fig. 5 Sketch of calibration

表 1 $\theta=0.5^\circ$ 时中间参量的标定结果

Table 1 Result of calibration ($\theta=0.5^\circ$)

$P_\infty /$	$X_0(\theta) /$	$X_{-\infty}(\theta) /$	$Z_0(\theta) /$	$Z_{-\infty}(\theta) /$	$A(\theta)$	$B(\theta)$
mm	mm	mm	mm	mm		
14.577	9.776	-87.788	1826.667	52.850	14.695	0.787 6

3 测试实验与准确度分析

测量系统桌面样机如图 6, 其中成像镜头焦距 $f=$

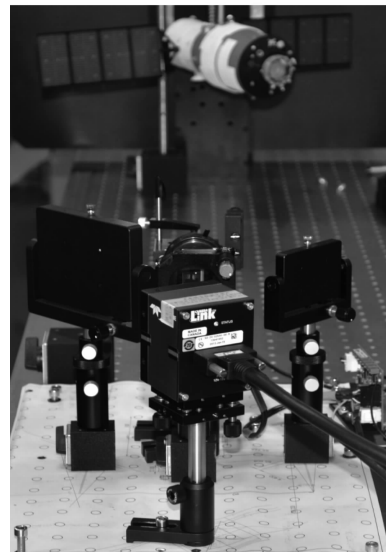


图 6 测量系统样机

Fig. 6 System prototype

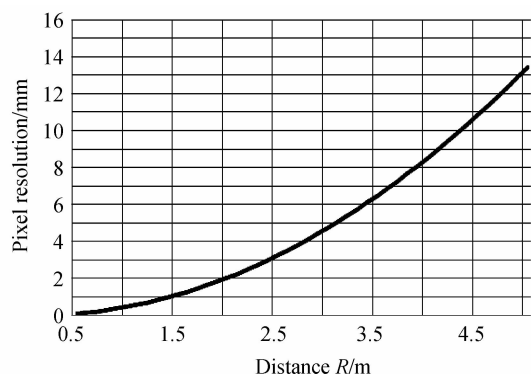


图7 像元分辨率与测量距离的关系曲线

Fig. 7 Relationship of pixel resolution and distance

120 mm,探测器像元尺寸为 $14 \mu\text{m}$,由式(3)理论计算的像元分辨率与测量距离的关系如图7.由图7可知,像元分辨率随测量距离的增大而降低,1 m处系统的像元分辨率约为 0.467 mm/pixel .实际系统的测量误差还受系统光路误差、光条定位误差、振镜偏转角的重复性误差和标定误差的影响.其中X轴扫描振镜为运动部件,其重复准确度优于 $8 \mu\text{rad}$,为分析不同扫描角下不同测量距离处由振镜定位误差引起的测量误差,对式(2)求 θ 的偏导

$$\Delta R(x_p, \theta) = \frac{\partial R(x_p, \theta)}{\partial \theta} \cdot \Delta \theta \quad (15)$$

图8、图9为绝对误差及相对误差的分布图,绝对误差随测量距离的增大而变大,该规律同像元分辨率变化规律一致,2m范围内绝对误差小于 0.035 mm ,相对误差小于 0.00166% ,故由振镜定位误差引起的测

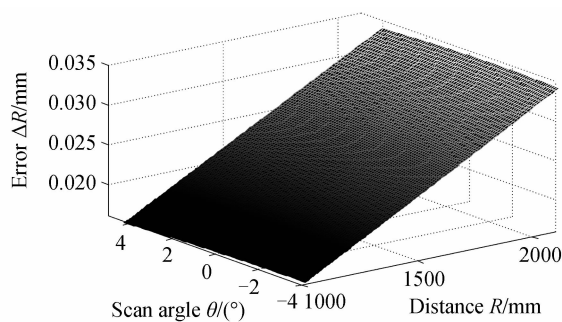


图8 振镜定位误差引入的测量绝对误差

Fig. 8 Absolute error caused by X-mirror

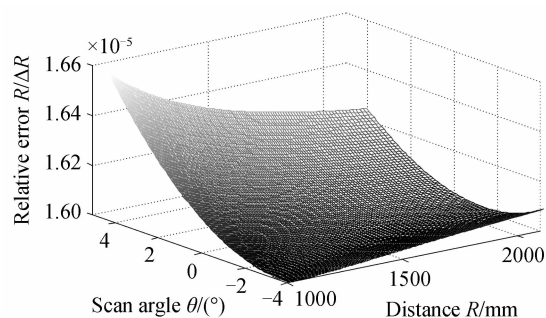


图9 振镜定位误差引入的测量相对误差

Fig. 9 Relative error caused by X-mirror

量误差相对较小.

对已知尺寸的凹槽面进行测量,凹槽的实物照片和测量得到的原始点云见图10、图11.测量范围 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,深度范围 $1250 \sim 1350 \text{ mm}$,测量点云主要分布在前后两个平面上.对点云进行区域分割并最小二乘平面拟合,测量点到拟合平面的距离误差均值为 0.31 mm ,以两拟合平面之间的距离来表征凹槽的Z向深度,凹槽的X、Y向尺寸则以各边界线处点云拟合直线之间的距离来表征,由此获得的结构尺寸数据与实际数据的对比见表2.

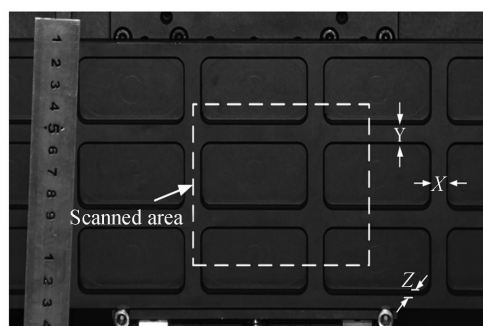


图10 凹槽面照片

Fig. 10 Photograph of the groove surface

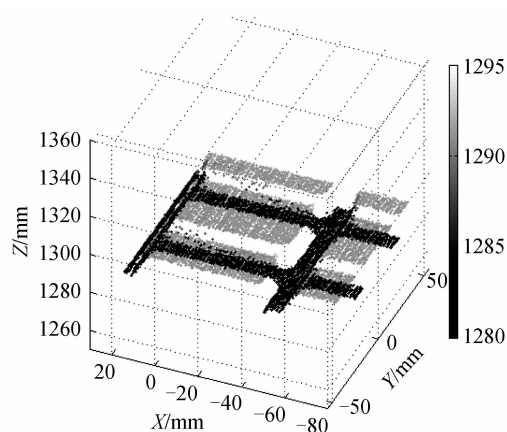


图11 凹槽面原始点云

Fig. 11 Raw point cloud of the groove surface

表2 凹槽面测量结果(mm)

Table 2 Result of groove surface measurement (mm)

	Actual size	Measurement	Error
X size of groove	60	59.43	0.57
X size of ridge	10	9.06	0.94
Y size of groove	30.4	31.2	0.8
Y size of ridge	9.5	8.58	0.92
Z	12	11.82	0.18

由表2可知,系统的三坐标测量准确度均优于 1 mm .Z坐标测量准确度明显优于X、Y坐标,这是由于定标过程中控制点的Z坐标靠精密导轨保证,而X、Y向则需通过像点的反演间接测量;扫描的空间采样间隔及视线遮挡等影响边缘提取及结构尺寸的测量准确度.

对图6中所示的表面包含多种材质和多种颜色的喷漆的不规则面型的天宫缩比模型进行了测量,三维点云如图12,测量范围 $240\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,深度范围 $1\ 000\sim 1\ 220\text{ mm}$.

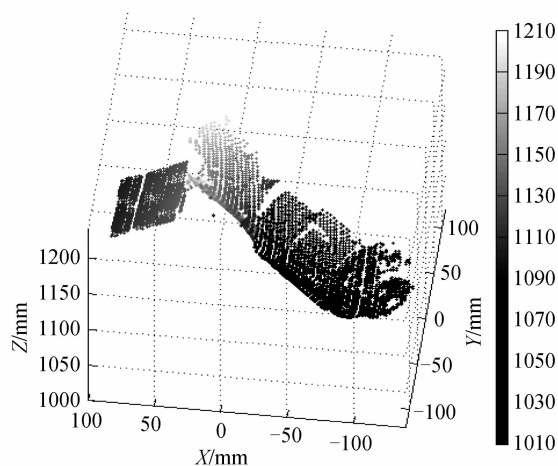


图12 天宫缩比模型原始点云

Fig. 12 Raw point cloud of the TianGong scale model

基于单相机的测量系统只能对相机可见区域进行三维测量,故图12模型中电池片的右翼由于主体的遮挡盲区导致无测量数据,可通过改变测量角度测量拼接的方法克服.

4 结论

根据空间目标在轨操控任务对近距离三维测量系统高精度、高速率、低功耗和强抗环境光能力的要求,基于自同步扫描激光三角法原理设计并实现了适用于空间光环境下的目标形貌测量的线结构光自同步扫描三维形貌测量系统.利用该系统分别对已知尺寸凹槽面及天宫缩比模型进行测量,实验结果表明,测量距离约为 1 m 时,系统三坐标测量误差均优于 1 mm ,其中 Z 向距离误差为 0.18 mm ,测量点到拟合平面的距离误差均值为 0.31 mm .该系统简化了传统点结构光自同步扫描系统的结构,降低了系统的重量和功耗,提高了系统三维数据输出帧率,更能满足空间任务的需求.

参考文献

[1] XIE Yong-chun, ZHANG Hao, HU Jun, *et al.* Automatic control system design of Shenzhou spacecraft for rendezvous and docking[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, **44**(1): 12-19.

- 解永春,张昊,胡军,等. 神舟飞船交会对接自动控制系统设计[J]. *中国科学:技术科学*, 2014, **44**(1):12-19.
- [2] XU Wen-fu, LIU Yu, LIANG Bing, *et al.* Measurement of relative poses between two non-cooperative spacecrafts[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(7): 1570-1581. 徐文福,刘宇,梁斌,等. 非合作目标航天器的相对位姿测量[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(7):1570-1581.
- [3] LIU Hao-ran, ZHANG Wen-ming, LIU Bin. Three dimensional measurement based on the binocular vision[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1830-1834. 刘浩然,张文明,刘彬. 基于双目立体视觉实现物体三维测量的研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 1830-1834.
- [4] ROBSON S, BERARDIN J A, BROWN HILL A, *et al.* Artefacts for optical surface measurement[C]. SPIE, 2011, **V8085**: 80850C.
- [5] RIOUX M. Laser range finder based on synchronized scanners[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(21): 3837-3844.
- [6] BERARDIN J A, BLAIS F, RIOUX M, *et al.* Eye-safe digital 3-D sensing for space applications[J]. *Optical Engineering*, 2000, **39**(1):196-211.
- [7] ZHU X, SMITH I C, BABIN F. A hybrid 3D sensor (NEPTEC TriDAR) for object tracking and inspection[A]. Gary W. K. Laser Radar Technology and Applications XI[C]. Proceedings of SPIE, 2006, **6214**: 1-8.
- [8] SAMSON C, ENGLISH C, DESLAURIERS A. *et al.* Imaging and tracking elements of the International Space Station using a 3D auto-synchronized scanner[C]. SPIE, 2002, **4714**: 87-96.
- [9] DU Xiao-ping, ZHAO Shi-yue, SONG Yi-shuo. Comparative studies on the relative-pose measurements in foreign space operations for targets [J]. *Journal of Academy of Equipment*, 2013, **24**(5): 58-62. 杜小平,赵诗玥,宋一铄. 国外空间目标操控相对位姿测量技术比较研究[J]. *装备学院学报*, 2013, **24**(5):58-62.
- [10] BERARDIN J A, JEAN-ANGELO, EL-HAKIM, *et al.* Practical range camera calibration[J]. SPIE, 1993, **2067**: 21-31.
- [11] WANG Xiao-jia, GAO Jun, WANG Lei, *et al.* Survey on the laser triangulation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, **25**(4): 601-608. 王晓嘉,高隽,王磊. 激光三角法综述[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **25**(4):601-608.
- [12] RUAN Chi, SUN Chuan-dong, BAI Yong-lin *et al.* Off-axis revise of PIV watertunnel flow display and analysis system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 169-173. 阮驰,孙传东,白永林,等. 水洞流场PIV显示与分析系统离轴测试校正[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1):169-173.
- [13] YANG Jia, JIA Shu-hai. A novel method of three dimensional profile measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 972-975. 杨佳,贾书海. 一种新的三维轮廓测量方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6):972-975.