

## 智能激光 3D 投影空间定位精度分析

郭丽丽, 李丽娟, 侯茂盛, 林雪竹

(长春理工大学 光电工程学院 光电测控技术研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为了解决激光 3D 投影定位无法兼顾高精度、实时性、智能补偿定位的问题, 搭建了一种基于激光跟踪定位技术的智能激光 3D 投影系统, 并进行空间精度分析。首先, 建立激光 3D 投影系统数学模型; 其次对激光 3D 投影系统进行光学中心标定, 再利用投影承接部件基准点对部件坐标系进行标定, 从而完成智能激光 3D 投影系统的标定及搭建; 最后, 建立智能激光 3D 投影定位精度模型。仿真结果显示, 激光 3D 投影仪投影区域中间部分精度最佳, 由激光跟踪测量精度引起的投影承接面投影点误差小于投影仪引起的投影承接面投影点误差。实验结果显示: 在 3~4 m 的投影距离上, 所研制的智能激光 3D 投影系统的投影形状及位置准确度可以优于 0.3 mm。与传统的激光投影系统相比, 该系统解决了大尺寸投影承接部件不能大量安装合作目标问题, 使工作中无需目标反射头及校准工装, 省略校准过程, 当投影系统或被测部件移动或漂移时, 智能化识别、解算、补偿相对位移量, 保证实时、精确投影至正确位置, 极大提高了投影定位系统的工作精度和定位效率。

**关键词:** 智能激光 3D 投影; 系统标定; 投影定位精度

**中图分类号:** TB92   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0806006

## Spatial positioning accuracy analysis of intelligent laser 3D projection

Guo Lili, Li Lijuan, Hou Maosheng, Lin Xuezhu

(Institute of Opto-Electronics Measurement & Control Technology, College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that laser 3D projection is unable to finish tasks with high precision, real-time and intelligent compensation positioning, a new method and accuracy analysis of intelligent laser 3D projection system based on laser tracking technology was proposed. Firstly, the mathematical model of the laser 3D projection system was established. Secondly, the laser 3D projection system was calibrated, and the coordinate system of the components was calibrated by using the datum points of the projection receiving component to complete the calibration of the intelligent 3D projection system. Finally, the model of intelligent laser 3D projection accuracy was established. Results of simulation showed that the middle part of projection area of laser 3D projector had the best accuracy. The projection point error of the projection surface caused by accuracy of the laser tracking measuring equipment was much smaller than the projection point error caused by the projector. The experiments

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-03

基金项目: 国家 863 重点项目(2015xx2377)

作者简介: 郭丽丽(1990-), 女, 博士生, 主要从事光电精密测量与数字化装配方面的研究。Email: custlily@163.com

导师简介: 李丽娟(1972-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事数字化装配、无损检测新技术方面的研究。Email: custjuan@126.com

results showed that the projection shape of the intelligent laser 3D projection system developed at the projection distance of 3 meters to 4 meters position accuracy could be better than 0.3 mm. Compared with the conventional laser projector, this system solved the problem that the large-size projection receiving part is unable to install the cooperation target in a large amount and the target reflex head and calibration tool were not needed in the follow-up work. The calibration process was omitted. When the projection system or the measured components moved or drifted, the intelligent recognition, solution, compensation for the relative displacement were completed to ensure accurate real-time projection to the correct location and greatly improved the integration, projection accuracy and positioning efficiency of the projection and positioning system.

**Key words:** laser 3D projection; intelligent laser 3D projection; system calibration; projection accuracy precision

## 0 引言

激光3D投影仪作为一种新型数字化测量指引系统正广泛地应用于飞机制造业中高精度激光辅助孔位定位、高精度复合材料铺贴定位<sup>[1]</sup>、舱内重要设备及线束数字化定位和各种装配现场的激光辅助定位。

激光 3D 投影技术, 可实现将已有的 CAD 三维数模图形以激光束轮廓线的形式按照 1:1 的比例, 精确的投影成像到曲面上, 完成高精度的数模还原工作<sup>[2]</sup>。常规的激光 3D 投影仪(以下简称投影仪)需要在被投影承接部件上布置多个合作目标, 即目标反射头, 来获得激光投影坐标系与被投影承接部件坐标系的相对位置关系<sup>[3]</sup>, 完成后续的投影工作。但是投影工作的前提是制作成本很高、体积庞大的投影工装, 而对于复合材料铺贴、零件装配现场, 有些部件庞大, 无法方便的进行对齐过程, 或者被投影承接部件不允许在投影工装上布设多个目标反射头, 使得投影仪无法进行工作。同时, 在装配现场, 由于人员、环境等因素的影响, 有时被投影部件和投影仪会发生相对位置变化, 使得投影精度出现偏差, 而工作人员无法感知, 从而导致投影工作误差加大。

根据以上问题, 文中提出了一种基于 iGPS 测量技术<sup>[4]</sup>的智能激光 3D 投影空间定位系统, 并进行定位精度分析。采用 iGPS 测量系统实时确定激光投影坐标系与部件坐标系的相对位置关系, 从而实现移动式激光 3D 投影系统位置的实时补偿, 使得被投影承接部件上不必使用目标反射头, 不必制作体积庞大的投影工装, 并实时监测投影精度, 使得激光 3D

投影仪在工作中实现精度的最大化。

## 1 智能激光 3D 投影定位系统

### 1.1 系统搭建

iGPS 测量系统是是一种新型数字化大尺寸空间测量设备, 相较于其他数字化测量设备, 它凭借其大尺寸测量精度高、测量实时性好、可同时多点测量、无光路遮挡失效问题、扩展方便等优势, 已在航空航天制造领域得以大量应用。为了实现高精度、实时性、多任务性、智能补偿定位, 定位系统由激光 3D 投影系统与 iGPS 测量系统组成。如图 1 所示, 智能激光 3D 投影系统的核心部件为激光 3D 投影仪、iGPS 发射器、iGPS 接收器和多参数投影架。

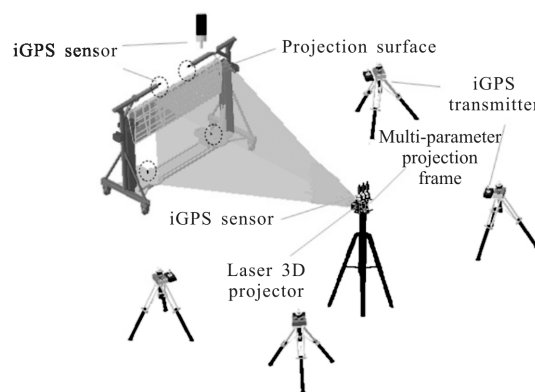


图 1 智能激光 3D 投影系统组成

Fig.1 Components of intelligent laser 3D projection system

系统搭建流程如图 2 所示, 首先, 标定激光 3D 投影系统与带有 iGPS 接收器的多参数投影架位置, 其关键是对激光 3D 投影系统进行中心标定; 其次,

标定被投影图形与 iGPS 接收器的位置；最后，对 iGPS 发射器组成的测量网络进行测量场组网和标定。当读取预编制完成的投影文件后，即可通过计算投影坐标系与投影承接面坐标系间转换关系来实现特定形状的激光 3D 投影。而系统软件会实时监测被投影部件(即投影承接面)位置的实时变动，并实时计算修正投影坐标系与投影承接面坐标系间的转换关系，投影仪通过改变内部二维振镜的摆角以保证所需投影的图形在投影承接面上的相对位置始终不变，这样就实现了基于 iGPS 测量网络的智能激光 3D 投影系统的搭建。

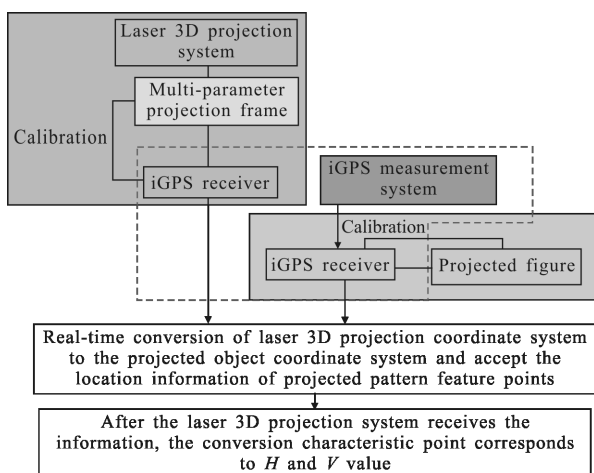


图 2 智能激光 3D 投影系统搭建流程

Fig.2 Construction process of intelligent laser 3D projection system

### 1.2 智能激光 3D 投影定位模型

对于激光 3D 投影仪，其核心功能单元为二维振镜扫描光学系统。利用相互垂直的装有反射镜的 X 轴检流计和 Y 轴检流计的旋转实现各个角度方向的变化。激光光束通过控制系统依次按照多个反射目标头理论数模顺序投射到反射目标头时，分析处理反射目标头圆心的空间位置，得到 X 轴检流计、Y 轴检流计的角度  $H$ 、 $V$ 。通过对  $H$ 、 $V$  角度以及多个反射目标头世界坐标系下的理论坐标值解算校准参数，即投影系统投影坐标系与目标反射头与投影目标共同的世界坐标系的坐标转换关系，利用该转换关系将投影目标的坐标值转到投影坐标系下，并解算对应 X 轴检流计、Y 轴检流计的角度  $H$ 、 $V$ ，进行高精度 1:1 投影。

图 3 是激光 3D 投影系统内部的几何关系图，是目标点  ${}^wP(x_{P_w}, y_{P_w}, z_{P_w})$  在世界坐标系  $\{W\}$  下的三

维坐标值(目标点  $P$  的坐标值为理论数据或者用更高精度设备,如摄影测量系统的测量数据),  ${}^pP(x_{P_p}, y_{P_p}, z_{P_p})$  是目标点  $P$  在投影系统坐标系  $\{P\}$  下的坐标值,该坐标值在投影系统内并不能直接观测到,只能得到二维扫描振镜偏转值,即水平角  $H$ 、俯仰角  $V$  的大小,由图 3 可知,点  ${}^pP(x_{P_p}, y_{P_p}, z_{P_p})$  与水平角  $H$ 、俯仰角  $V$  之间的关系如下:

$$\begin{cases} x_{P_p} = e \times \tan H + d_{P_p} \times \tan H / \cos V \\ y_{P_p} = d_{P_p} \times \tan V \\ z_{P_p} = d_{P_p} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $e$  为两反射镜之间距离,是激光 3D 投影仪出厂后的参数值。

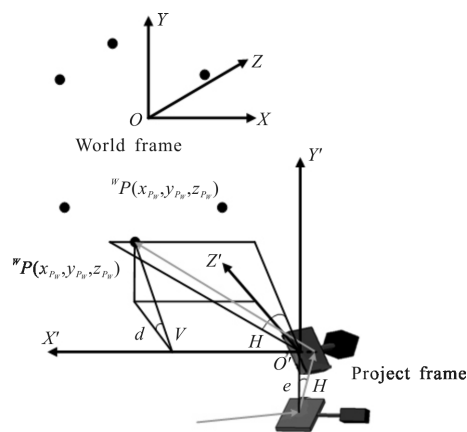


图 3 投影系统内部几何关系图

Fig.3 Internal geometry diagram of projection system

目标点  $P$  既在世界坐标系  $\{W\}$  下,又在投影坐标系  $\{P\}$  下,则其坐标值存在如下关系:

$$\begin{pmatrix} x_{P_p} \\ y_{P_p} \\ z_{P_p} \end{pmatrix} = {}^p_w R \begin{pmatrix} x_{P_w} \\ y_{P_w} \\ z_{P_w} \end{pmatrix} + {}^p_w T \quad (2)$$

常用的坐标转换模型及方法有布尔莎(Bursa)七参数、四元数法<sup>[5]</sup>、罗德里格矩阵(Roderick matrix)法、奇异值分解法(SVD)、经典最小二乘法(LS)等<sup>[6]</sup>。这些算法在坐标转换应用很成熟,而四元数法的突出特点是具有很好的实用性和较强的稳定性,计算过程简单快速<sup>[7]</sup>,可选择四元数法进行校准参数求解,则:

$${}^p_w R = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

且满足:

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \quad (4)$$

由公式(1)、(3)、(4)得时,当激光 3D 投影系统对  $n$  个目标点进行标定时,整个测量网内未知参数为  $t=4n+7$ ,方程的个数为  $m=6n+1$ ,要使整个测量网可解,则要求方程个数大于等于未知参数个数,即  $6n+1 \geq 4n+7$ ,即  $n \geq 3$ ,即当目标点大于等于 3 时,可实现激光 3D 投影仪校准参数矩阵  $R$ 、矩阵  $T$  的求解,利用校准参数,将与目标点同坐标系,即世界坐标系(投影承接面)下的投影文件点转换至投影坐标系下,利用公式(5)进行  $X$  振镜与  $Y$  振镜偏转角  $H$ 、 $V$  求解,实现对投影文件的投影。

$$\begin{cases} V = \arctan\left(\frac{y_{c_p}}{z_{c_p}}\right) \\ H = \arctan\left(\frac{x_{c_p}}{e + \sqrt{y_{c_p}^2 + z_{c_p}^2}}\right) \end{cases} \quad (5)$$

对于智能激光 3D 投影系统,世界坐标系  $\{W\}$  下目标点坐标为  ${}^W P(x_{p_w}, y_{p_w}, z_{p_w})$ ,多参数投影架标定点(iGPS 接收器顶点)坐标为  ${}^W V(x_{v_w}, y_{v_w}, z_{v_w})$ ,从激光 3D 投影系统数学模型可知,激光 3D 投影仪对 3 个以上目标点进行观测,由公式(1)、(2)能够解算世界坐标系  $\{W\}$  与投影坐标系  $\{P\}$  标定参数,即旋转矩阵  ${}^P R$  平移矩阵  ${}^P T$ ,然后利用公式(6),将投影架标定点  ${}^W V(x_{v_w}, y_{v_w}, z_{v_w})$  分别转换到投影坐标系  $\{P\}$  下,得到投影架标定点三维坐标  ${}^P V(x_{v_p}, y_{v_p}, z_{v_p})$ ,至此,投影坐标系  $\{P\}$  标定结束,即激光投影仪光学中心参数标定结束。

$$\begin{pmatrix} x_{v_p} \\ y_{v_p} \\ z_{v_p} \end{pmatrix} = {}^P R \begin{pmatrix} x_{v_w} \\ y_{v_w} \\ z_{v_w} \end{pmatrix} + {}^P T \quad (6)$$

测量坐标系  $\{T\}$  下,投影承接部件基准点与投影承接部件标定点坐标为  ${}^T B(x_{b_t}, y_{b_t}, z_{b_t})$  与  ${}^T H(x_{h_t}, y_{h_t}, z_{h_t})$ ,投影承接部件基准点在投影承接部件坐标系  $\{M\}$  下为  ${}^M B(x_{b_m}, y_{b_m}, z_{b_m})$ ,由公式(7)可求解出被投影定位坐标系到测量坐标系的坐标转换参数  ${}^M R$ 、 ${}^M T$ ,由公式(8)求解投影承接部件标定点在投影承接部件坐标系  $\{M\}$  下坐标  ${}^M H(x_{h_m}, y_{h_m}, z_{h_m})$ ,至此,投影承接部件坐标系  $\{M\}$  标定结束。

$$\begin{pmatrix} x_{b_m} \\ y_{b_m} \\ z_{b_m} \end{pmatrix} = {}^M R \begin{pmatrix} x_{b_t} \\ y_{b_t} \\ z_{b_t} \end{pmatrix} + {}^M T \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} x_{h_m} \\ y_{h_m} \\ z_{h_m} \end{pmatrix} = {}^M R \begin{pmatrix} x_{h_t} \\ y_{h_t} \\ z_{h_t} \end{pmatrix} + {}^M T \quad (8)$$

有时,投影承接部件的基准点即为投影承接部件标定点,这时,投影承接部件坐标系  $\{M\}$  无需标定。

iGPS 组网建立后,标定后的  ${}^P V(x_{v_p}, y_{v_p}, z_{v_p})$  与  ${}^M H(x_{h_m}, y_{h_m}, z_{h_m})$  在 iGPS 坐标系  $\{G\}$  下的坐标为  ${}^G V(x_{v_g}, y_{v_g}, z_{v_g})$  与  ${}^G H(x_{h_g}, y_{h_g}, z_{h_g})$ ,根据公式(9)、(10)可解得转换关系  ${}^G R$ 、 ${}^G T$ 、 ${}^M R$ 、 ${}^M T$ 。

$$\begin{pmatrix} x_{v_g} \\ y_{v_g} \\ z_{v_g} \end{pmatrix} = {}^G R \begin{pmatrix} x_{v_p} \\ y_{v_p} \\ z_{v_p} \end{pmatrix} + {}^G T \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} x_{h_g} \\ y_{h_g} \\ z_{h_g} \end{pmatrix} = {}^M R \begin{pmatrix} x_{h_m} \\ y_{h_m} \\ z_{h_m} \end{pmatrix} + {}^M T \quad (10)$$

$$\text{设 } {}^G U = \begin{bmatrix} {}^G R & {}^G T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^M U = \begin{bmatrix} {}^M R & {}^M T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{则转换参数 } {}^P R,$$

${}^M T$  如公式(11)所示:

$${}^P U = {}^G U^{-1} \cdot {}^M U = \begin{bmatrix} {}^P R & {}^P T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

投影图形点  $C$  在投影承接部件坐标系  $\{M\}$  下的坐标  ${}^M C(x_{c_m}, y_{c_m}, z_{c_m})$  已知,则

$$\begin{pmatrix} x_{c_m} \\ y_{c_m} \\ z_{c_m} \end{pmatrix} = {}^M R \begin{pmatrix} x_{c_p} \\ y_{c_p} \\ z_{c_p} \end{pmatrix} + {}^M T \quad (12)$$

根据公式(5)换算二维振镜  $X$  向振镜与  $Y$  向振镜偏转角  $H$ 、 $V$  求解,实现投影图形自动补偿,自动跟踪目标位置功能。

## 2 智能激光 3D 投影定位精度模型及仿真

### 2.1 精度模型

智能激光 3D 投影模型的精度来源为 iGPS 定位精度与投影仪投影定位精度。

针对投影仪,由公式(1)可知,部件投影点与目标点获取几何原理相同,其不确定度  $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$  为:

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial H}\right)^2 \cdot \Delta H^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial V}\right)^2 \cdot \Delta V^2$$

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial H}\right)^2 \cdot \Delta H^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial V}\right)^2 \cdot \Delta V^2$$

$$\sigma_z^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial H}\right)^2 \cdot \Delta H^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial V}\right)^2 \cdot \Delta V^2 \quad (13)$$

投影点的合成不确定度为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} = \sqrt{\frac{(d^2 + e^2 \cdot \cos^4 V + 2e \cdot d \cos^2 V) \cdot \Delta H^2}{\cos^4 H \cdot \cos^2 V} + \frac{(d^2 \cdot \tan^2 H \cdot \sin^2 V \cdot \cos^2 V + d^2) \cdot \Delta V^2}{\cos^4 V}} \quad (14)$$

由 iGPS 测量确定投影承接部件坐标系  $\{M\}$  与投影坐标系  $\{P\}$  转换关系,它是由投影承接部件基准点和多参数投影架标定点的解算得出,因而该精度模型是非线性显著的迭代程序,故采用蒙特卡罗法实施分布传播,实现智能激光 3D 投影模型中, iGPS 带来的被投影承接部件坐标点不确定度<sup>[4]</sup>求解。

被投影承接部件坐标点不确定度评定的流程图如图 4 所示,具体步骤如下。

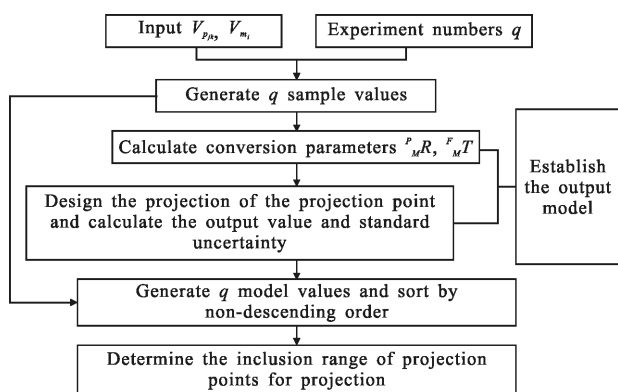


图 4 被投影坐标点不确定度评价流程图

Fig.4 Flow chart of uncertainty evaluation of projected points

Step 1: 设定实验样本容量为  $q$ ;

Step 2: 由基准点和标定点的 uncertainty 建立 PDF 函数并抽样,  $m$  个投影承接部件基准点与  $n$  个多参数投影架标定点的  $q$  组输入量分别为:

$$B_{m_i}(x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}) \quad i=1, 2, \dots, m, k=1, 2, \dots, q;$$

$$V_{p_k}(x_{jk}, y_{jk}, z_{jk}) \quad j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, q;$$

Step 3: 根据公式(9)~(12)的求解模型,计算转换参数  ${}^P_M R, {}^P_M T$ ;

Step 4: 计算投影承接部件投影点输出量的值;

Step 5: 计算输出量的估计值及标准 uncertainty, 分别为模型值的平均值和标准 uncertainty;

Step 6: 将  $q$  组输出量的值按非递减次序排序, 能提供输出量的离散分布  $G$ , 确定包含区间。

智能激光 3D 投影空间定位 uncertainty 因素 iGPS uncertainty 引起的投影承接面投影点 uncertainty 和激光 3D 投影系统定位 uncertainty, 根据 uncertainty 合成公式, 智能激光 3D 投影空间定位 uncertainty 结果如公式(15)所示:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{iGPS} + \sigma_{projector}} \quad (15)$$

## 2.2 精度仿真及分析

根据公式(7), 测量点的误差主要由三个因素决定, 包括水平角  $H$ 、俯仰角  $V$  以及投影距离  $d$ 。仿真中设投影仪水平角、俯仰角的角度误差为  $3.3''$ 。

投影仪的较佳工作范围为: 单站投影距离  $3 \sim 8$  m、水平角  $-30^\circ \sim 30^\circ$ 、俯仰角  $-30^\circ \sim 30^\circ$ 。

图 5 中分析投影的不同距离对投影 uncertainty 的影响, 分为以下四种情形: 条件一设定俯仰角  $V=0^\circ, H=0^\circ$ ; 条件二设定俯仰角  $V=0^\circ, H=30^\circ$ ; 条件三设定俯仰角  $V=30^\circ, H=0^\circ$ ; 条件四设定俯仰角  $V=30^\circ, H=30^\circ$ 。在四种条件下, 确定不同距离对 uncertainty 的影响的趋势。

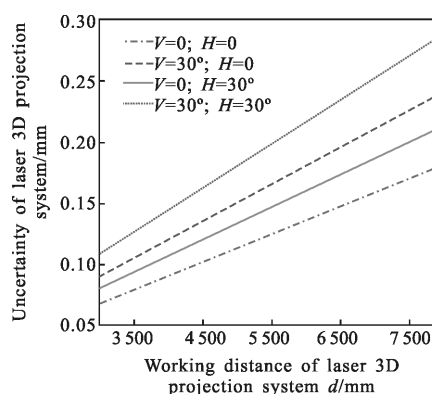


图 5 工作距离  $d$  与投影 uncertainty 关系

Fig.5 Relationship between working distance  $d$  and projection uncertainty

结果显示, 当水平角以及俯仰角一定时, 距离与 uncertainty 成正比,  $H$  与  $V$  的大小决定 uncertainty 直线的斜率; 通过典型水平角以及俯仰角的几种情况,

可以看出,当水平角  $H$  与俯仰角  $V$  均为  $0^\circ$  时,工作距离为 3 m 时, 不确定度最小, 最小不确定度为 0.068 00 mm; 当水平角  $H$  与俯仰角  $V$  均为  $30^\circ$  时, 工作距离为 8 m 时, 不确定度最大, 最大不确定度为 0.264 17 mm; 从条件二与条件三对比可以看出, 在影响因素俯仰角与水平角中, 俯仰角  $V$  的大小对不确定度影响较大。

图 6 中分析投影的不同水平角对投影精度的影响, 投影距离设置为 3 m, 俯仰角  $V$  设置为  $0^\circ$ , 水平角  $H$  的工作范围为  $H \in [-30^\circ, 30^\circ]$ 。

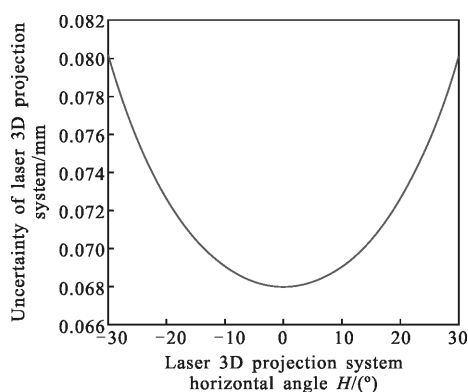


图 6 水平角  $H$  与投影不确定度关系

Fig.6 Relationship between horizontal angle  $H$  and projection uncertainty

结果显示,当水平角  $H=30^\circ$  或  $H=-30^\circ$  时, 不确定度最大, 最大值为 0.080 17 mm; 当水平角  $H=0^\circ$  时, 不确定度最小, 最小值 0.068 00 mm。

图 7 中分析投影的不同俯仰角对投影精度的影响, 投影距离设置为 3 m, 水平角  $H$  设置为  $0^\circ$ , 俯仰角  $V$  的工作范围为  $H \in [-30^\circ, 30^\circ]$ 。

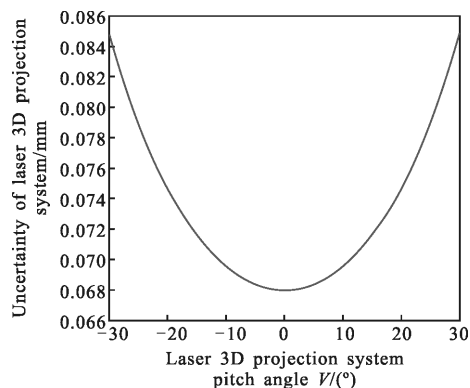


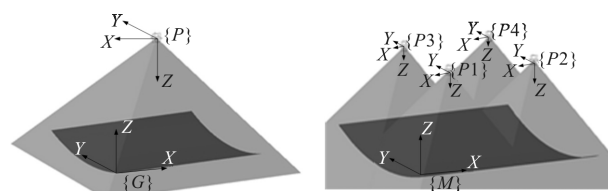
图 7 俯仰角  $V$  与投影不确定度关系

Fig.7 Relationship between the pitch angle  $V$  and the projection uncertainty

结果显示,当俯仰角  $H=30^\circ$  或  $H=-30^\circ$  时, 不确定度最大, 最大值为 0.084 77 mm; 当俯仰角  $H=0^\circ$  时, 不确定度最小, 最小值 0.068 00 mm。

由图 6 与图 7 曲线的最大值和最小值, 同样证明在水平角与俯仰角影响因素中, 俯仰角  $V$  的大小对不确定度影响较大。

在投影范围内设计投影承接部件为  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  曲面, 如图 8 所示, 阴影覆盖部分为投影仪投影范围, 为实现投影指引定位和装配, 投影曲面与投影仪投影区域需完全干涉, 分析研究投影仪器站位的合理布置, 并分别确定固定式投影仪及移动式投影仪站位, 其中移动式站位数设定为 4 个, 所以单站位投影仪距曲面距离约为 8 m, 4 站位投影仪距曲面约为 4 m。



(a) 固定式投影仪站位 (b) 移动投影仪站位(4 站位)

(a) Fixed projector position (b) Mobile projector station (four stations)

图 8 投影仪站位规划

Fig.8 Plan of projector location

曲面以采样间距 100 mm 选取拟投影点, 图 9 为固定式投影仪投影点的误差, 以全三维彩色偏差形式表示。图中, 投影点显示为彩色时, 该投影点位于投影区域内, 反之, 该投影点为空白, 不在投影区域内。由图可知, 全部投影点均位于投影仪投影区域内, 其中不确定度最大值 0.291 63 mm, 最小值 0.229 99 mm, 平均值 0.249 67 mm, 标准不确定度为 0.249 99 mm。

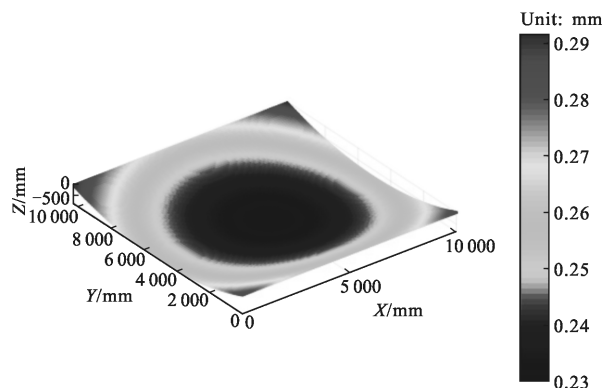


图 9 固定式投影仪曲面投影点不确定度分布

Fig.9 Uncertainty distribution of projection surface point of fixed projector

对 iGPS 测量系统进行组网, 建立 iGPS 坐标系 {G}, 同时对各基准点及标定点进行不确定度分析, 其不确定度在 0.1 mm 左右。

进行蒙特卡罗仿真后, 最后由 iGPS 不确定度引起的投影定位点的不确定分布如图 10 所示, 不确定度最大值为 0.117 87 mm, 最小值 0.033 34 mm, 平均值 0.070 23 mm, 标准不确定度为 0.071 78 mm。

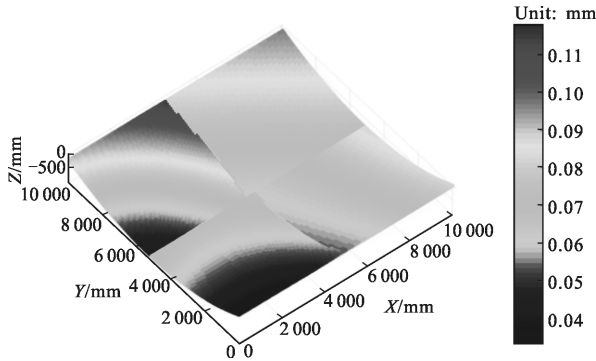


图 10 iGPS 不确定度引起的投影承接面

Fig.10 Uncertainty distribution of projection surface point caused by iGPS uncertainty

针对投影承接部件曲面, 智能激光 3D 投影空间定位不确定度分布如图 11 所示, 不确定度最大值为 0.186 17 mm, 最小值 0.132 10 mm, 平均值 0.152 27 mm, 标准不确定度为 0.152 55 mm。

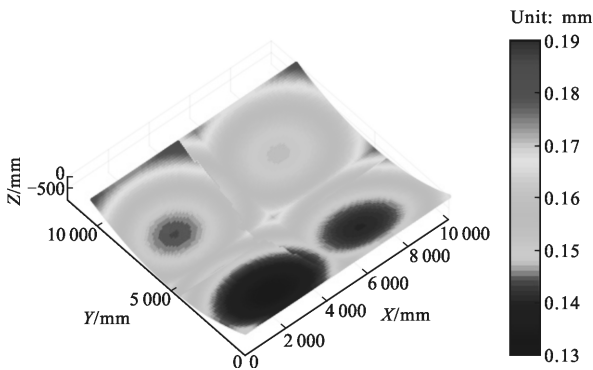


图 11 智能激光 3D 投影不确定度分布

Fig.11 Uncertainty distribution of intelligent laser 3D projection

综上所述, 单站式固定激光投影系统空间定位标准不确定度为 0.249 99 mm, 而基于四站智能激光 3D 投影系统空间定位标准不确定度为 0.152 55 mm, 其不确定度提高了 38.98%。由以上仿真实验证明, 由 iGPS 精度引起的投影承接面投影点误差远小于投影仪引起的投影承接面投影点误差, 而且投影仪投影区域中间部分精度最佳, 在投影工作中, 增加投

影站数量是提升投影仪投影区域精度的关键, 所以, 移动式智能激光 3D 投影系统可大大提升投影定位精度及工作效率。

### 3 实验验证及结果

为了验证该系统的有效性, 文中设计了相关实验, 实验分为两部分: 首先标定智能激光 3D 投影系统, 然后验证投影定位精度及自动补偿功能。

#### 3.1 智能激光 3D 投影系统标定

如图 12 所示, 智能激光 3D 投影系统标定系统由 iGPS 测量系统、激光 3D 投影系统以及激光跟踪仪组成, 其中 iGPS 测量系统由 4 个发射器、3 个矢量棒以及 4 个单接收器组成, 激光 3D 投影系统由激光投影仪和装有目标反射头的标定墙组成。由激光跟踪仪对以上系统进行标定, 其中激光跟踪仪的精度为 0.01 mm+5 ppm。

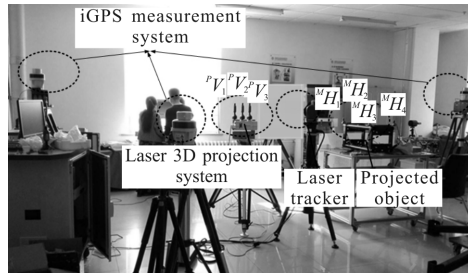


图 12 智能激光 3D 投影系统标定系统

Fig.12 Intelligent laser 3D projection system calibration system

将系统搭建后, 将激光跟踪仪布站, 测量 3 个矢量棒顶点坐标、被投影承接部件 4 个 iGPS 接收器顶点坐标, 标定墙上目标反射头坐标, 然后利用第 1 节所述内容, 得到标定后多参数投影架标定点  ${}^P V$  被投影承接部件基准点  ${}^M H$  标定值如表 1 所示。

表 1 多参数投影架和投影承接部件标定值

Tab.1 Calibration values for multi-parameter projection frame and projection-receiving parts

Calibration point	X/mm	Y/mm	Z/mm
${}^P V_1$	-260.443 32	312.638 45	12.642 91
${}^P V_2$	-114.535 51	309.136 34	-37.537 43
${}^P V_3$	-21.196 24	306.437 22	18.647 34
${}^M H_1$	1.357 91	503.589 33	56.463 62
${}^M H_2$	-204.974 47	501.242 37	507.837 54
${}^M H_3$	4.362 63	506.356 31	494.155 82
${}^M H_4$	-207.864 94	502.673 63	10.022 38

### 3.2 智能激光 3D 投影系统的精度实验

智能激光 3D 投影定位精度包括了投影形状和定位准确度。采用十字分划测微法对投影图形测量。

在所研究的十字分划测微法中, 选用最小分辨率为 0.05 mm 的十字分划板对激光 3D 投影系统的精度进行标定, 实验系统包括: 激光 3D 投影仪、被投影部件、带有标识点和标识线的投影承接面、激光跟踪仪、十字分划板、工业显微系统和测量软件等, 将十字分划板嵌于投影承接面的标识点和标识线上, 实验现场如图 13 所示。

为验证研制的智能激光 3D 投影系统的功能和精度, 文中开展了投影图形定位、形状准确度的实验。实验包括针对投影图形为 150 mm×150 mm 矩形和 1 000 mm×100 mm 矩形时不同距离及角度的定位、形状准确度的实验以及投影承接面偏转 15°后投

影图形补偿的位置准确度实验。

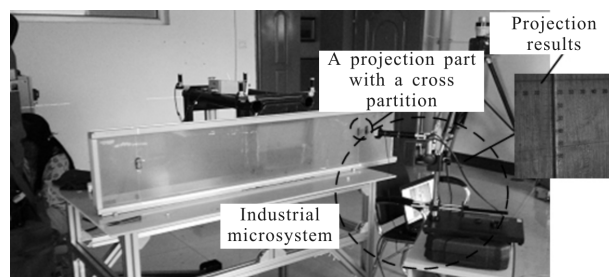


图 13 智能激光 3D 投影系统精度实验现场

Fig.13 Experimental site of intelligent laser 3D projection system accuracy

#### 3.2.1 系统投影准确度实验

针对准确度实验, 设计上述两种矩形, 将投影图形与投影仪 XOY 面成 0°, 将投影图形置于不同位置进行实验, 实验结果如表 2 所示。

表 2 不同投影距离投影形状定位准确度实验结果

Tab.2 Experimental results of shape positioning accuracy based on different projection distance

Projection distance/mm	1 000 mm×200 mm projection distance deviation/mm			150 mm×150 mm projection distance deviation/mm					
	Left vertex of 1 000 mm	Right vertex of 1 000 mm	Margin deviation of 1 000 mm	Left vertex	Right vertex	Up vertex	Down vertex	Lateral margin deviation	Longitudinal length deviation
3 000	0.2 (Left)	0.2 (Right)	0.4	0.2 (Left)	0	0.1 (Up)	0.1 (Up)	0.2	0.2
4 000	0	0.1 (Right)	0.1	0	0.1 (Right)	0	0.1 (Down)	0.1	0.1
5 000	0.2 (Left)	0.3 (Right)	0.5	0.1 (Left)	0	0.2 (Up)	0	0.1	0.1
6 000	0.3 (Left)	0.3 (Right)	0.6	0.1 (Left)	0.1 (Right)	0.2 (Up)	0	0.2	0.2

150 mm×150 mm 矩形的定位准确度实验中, 在 4 000 mm 时长度和宽度偏差值都较小, 仅为 0.1 mm, 投影距离在 3 000~4 000 mm 之间时, 精度较高。不同投影距离投影 1 000 mm×200 mm 矩形的定位准确度实验中, 依然可以得出投影最佳距离为 3 000~4 000 mm。

在不同投影角度投影上 150 mm×150 mm 矩形的形状定位准确度实验, 将投影部件于距离激光投影仪 4 m 处向左/右移动距离, 使投影图形所在位置与投影仪中心连线和投影仪 Z 轴成不同角度, 实验结果如表 3 所示。投影偏差随着投影角度增大而增大, 这是由投影仪能力所致, 可由第 2 节仿真得到。

表 3 不同投影角度上投影形状定位准确度实验结果

Tab.3 Experimental results of shape positioning accuracy based on different projection angles

Projection angle/(°)	Left vertex deviation/mm	Right vertex deviation/mm	Lateral margin deviation/mm
5	0	0	0
10	0.1 (Right)	0.2 (Right)	0.1
15	0.4 (Right)	0.3 (Right)	0.2

#### 3.2.2 位置补偿准确度实验

投影系统向投影承接面投影 150 mm×150 mm



矩形,向左/右移动距离,使投影图形所在位置与投影仪中心连线和投影仪 Z 轴成  $15^\circ$ ,观察不同距离智能激光 3D 投影系统投出图形的补偿情况,待图形位置稳定后利用十字分划测微法测量投出图形的形状准确度,表 4 为  $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  矩形横边实验结果。

表 4 投影图形补偿的位置准确度实验结果

Tab.4 Experimental results of positional accuracy of projection pattern compensation

Projection distance/mm	Left vertex deviation/mm	Right vertex deviation/mm	Lateral margin deviation/mm
3 000	0.4 (Right)	0.3 (Right)	0.1
4 000	0.4 (Right)	0.3 (Right)	0.1
5 000	0.4 (Right)	0.2 (Right)	0.2
6 000	0.4 (Right)	0.2 (Right)	0.2

结果表明,投影图形位置的最大偏差为  $0.4\text{ mm}$ ,但横向边长偏差在  $0.2\text{ mm}$  以内,表明该误差由 iGPS 测量网络引起,通过增加 iGPS 发射器并合理布置各站位位置,可提高测量场的稳定性和精度,因此,激光 3D 智能投影系统进行位置补偿后的图形定位准确度可以进一步提高。

综上实验可以看出,智能激光 3D 投影系统在  $30^\circ$  范围内  $3\sim 4\text{ m}$  的投影距离上,所研制的智能激光 3D 投影系统的投影形状及位置准确度可以优于  $0.3\text{ mm}$ 。

## 4 结 论

文中主要提出了一种智能激光 3D 投影空间定位方法以及精度模型,利用蒙特卡罗法和解析法对该系统进行精度仿真及分析。仿真结果表明,由 iGPS 精度引起的投影承接面投影点误差远小于投影仪引起的投影承接面投影点误差,而且投影仪投影区域中间部分精度最佳。实验结果表明:在  $3\ 000\sim 4\ 000\text{ mm}$  的投影距离上,所研制的智能激光 3D 投影系统的投影形状及位置准确度可以优于  $0.3\text{ mm}$ ,同时,激光 3D 智能投影系统进行位置跟随后的图形定位准确度由 iGPS 布局及标定可以进一步提高。与传统方法相比,文中方法具有兼具高精度、实时性、多任务性、智能补偿定位等优点。在精度分析的基础上实现投影仪使用精度的最大化;实时地监测投影

系统与被投影承接面间的相对位置变化,使投影仪的投影对齐过程完全自动,实现投影仪灵活的从一个位置转移到另一个位置或者部件进入投影区域后自动投影,无需进行对齐;实现多台投影仪同时不同区域的实时跟踪投影,并实时提供对齐精度;多参数投影架便捷轻便、且多参数投影架和被投影承接部件上不必使用目标反射头,不必制作体积庞大,成本很高的投影工装;当投影系统或被测部件移动或漂移时,智能化识别、解算、补偿相对位移量,保证实时、精确投影至正确位置,极大地提高了投影定位系统的工作精度和定位效率。

## 参考文献:

- [1] Chen Guoqiang, Li Hui, Yu Ning. Application of laser projection technology in assembly connection [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 495 (S2): 20-22. (in Chinese)
- [2] Bordignon R M, Rueb K, Wiecek J. Laser projector for projecting an image onto a curvilinear surface: US, US5381258[P]. 1995.
- [3] Qiang Hongjun. Reverse digitization in the laser projection and positioning system on the application of [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006: 13. (in Chinese)
- [4] Lin Xuezhu, Li Lijuan, Cao Guohuai, et al. Optimization design of iGPS high-precision pose measurement for large parts docking [J]. *Journal of Aeronautics*, 2015, 36 (4): 1299-1311. (in Chinese)
- [5] Zhang Ronghui, Jia Hongguang, Chen Tao, et al. Attitude calculation of strap down inertial navigation system based on Quaternion Method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(10): 1963-1970. (in Chinese)
- [6] Li Lijuan, Zhao Yanhui, Lin Xuezhu. Application of weighted least squares in laser tracker transfer station [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2570-2577. (in Chinese)
- [7] Zhang Haolin, Lin Jiarui, Zhu Jigui. Study on the precision of 3D coordinate transformation and its influencing factors [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2012, 38(10): 26-31. (in Chinese)
- [8] Zhou Na, An Zhiyong, Li Lijuan, et al. Design of airborne digital measurement network station [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1485-1491. (in Chinese)