

# 基于激光测距的激光扫描投影系统标定技术研究

侯茂盛<sup>1\*</sup>, 刘继强<sup>1</sup>, 刘大礼<sup>2</sup>, 陈雨情<sup>1</sup>, 张旭<sup>1</sup>, 范成博<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>北京空间机电研究所, 北京 100094

**摘要** 为解决现有激光扫描投影系统至少需要 4 个合作目标点才能实现坐标转换关系标定, 并且经常因迭代算法不收敛而需要多次、长时间才能完成坐标转换参数解算等问题, 提出并研究了融合激光测距的激光扫描投影系统标定技术。研究了加入和未加激光测距模块的激光扫描投影系统数学模型, 并运用粒子群优化算法仿真分析其标定精度。针对测距误差对系统标定精度有较大影响的问题, 提出粒子群导数标定算法改进标定算法, 最终实现了仅需 3 个合作目标点的快速标定, 且标定精度可提升至  $10^{-7}$  mm。

**关键词** 测量; 激光测距; 激光扫描投影系统; 标定模型; 粒子群算法; 粒子群导数标定算法

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1004002

## Research on Calibration Technology of Laser Scanning Projection System Based on Laser Ranging

Hou Maosheng<sup>1\*</sup>, Liu Jiqiang<sup>1</sup>, Liu Dali<sup>2</sup>, Chen Yuqing<sup>1</sup>, Zhang Xu<sup>1</sup>, Fan Chengbo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

**Abstract** In order to solve the problem that the existing laser scanning projection system needs at least 4 cooperation target points to realize the coordinate transformation relationship calibration, and it often takes multiple times and much time to complete the coordinate transformation parameter solution for the non-convergent iterative algorithm, we proposes and studies the laser scanning projection system calibration technique that combines laser ranging. The mathematical models of laser scanning projection system with and without laser ranging module are studied. The particle swarm optimization algorithm is used to simulate the calibration accuracy. Aiming at the problem that the ranging error has a great influence on the calibration accuracy of the system, a particle swarm derivative calibration algorithm is proposed to improve the calibration algorithm. Finally, a rapid calibration of only three cooperative target points is realized and the accuracy is increased to  $10^{-7}$  mm.

**Key words** measurement; laser ranging; laser scanning projection system; calibration model; particle swarm optimization algorithm; particle swarm derivative calibration algorithm

**OCIS codes** 120.4640; 140.7300; 280.3400

## 1 引 言

激光扫描投影仪器能够将激光光束快速偏转, 而在三维空间待投影表面的准确位置上精确地扫描投射出由 CAD 数模定义的零部件的外形轮廓<sup>[1]</sup>。该仪器扫描投影零部件外形轮廓前需导入 CAD 数模数

据, 并由该数据驱动一个或几个激光扫描投影仪器进行扫描投影, 从而待装配部件的准确外形轮廓和位置就会在三维空间投影表面上由快速扫描而过的明亮激光线显示出来。鉴于这种能够辅助操作人员完成待装配部件精准定位的特性, 该仪器现已广泛应用在航空航天制造等领域, 如飞机零部件装配、复合材料

收稿日期: 2019-03-22; 修回日期: 2019-05-21; 录用日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(61805022)、吉林省科技发展计划重点科技攻关项目(20160204052GX)

\* E-mail: houmsh@cust.edu.cn

铺层、图案喷涂、铆接孔定位<sup>[2-3]</sup>等。

在激光扫描投影仪器的实际应用中,为获得激光扫描投影仪器坐标系( $O'-X'Y'Z'$ )与被投影目标坐标系( $O-XYZ$ )间的精确转换关系,在实现轮廓线框的扫描投影前必须进行坐标转换标定操作,该技术是激光扫描投影系统将 CAD 数模数据处理为投影数据的核心技术。Kaufman 等<sup>[4]</sup>、Rueb<sup>[5]</sup>、Wigg 等<sup>[6]</sup>学者及本课题组<sup>[7]</sup>都曾基于布尔沙-七参数法建立激光扫描投影系统来标定模型,并通过对 6 个合作目标点的扫描定位建立  $O-XYZ$  与  $O'-X'Y'Z'$  间的转换关系。由于布尔沙-七参数法中存在三角函数,在多次迭代求解的过程中极易出现奇异值,这将导致转换矩阵位置参数解不收敛,从而使坐标转换标定操作频繁失败。

为解决上述问题,本文建立了基于激光测距的激光扫描投影系统标定技术的数学模型,以期实现仅通过对 3 个合作目标点的扫描定位即可解算出  $O-XYZ$  与  $O'-X'Y'Z'$  间的精准坐标转换关系,并有效解决标定操作失败的问题。

## 2 激光扫描投影系统投影模型

激光扫描投影系统进行扫描投影时,该系统内部的双轴扫描振镜模块会根据 CAD 数模高精度地偏转,造成激光器发射的激光束快速偏折,从而使其在投影面扫描出 CAD 数模轮廓线。激光扫描投影系统的投影模型如图 1 所示。

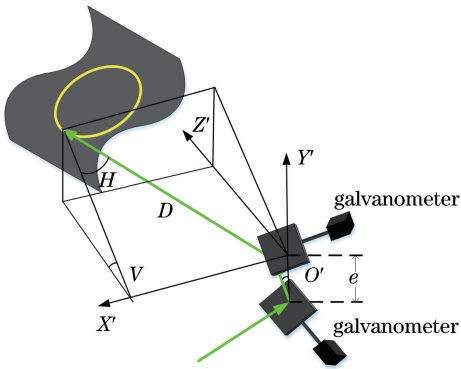


图 1 激光扫描投影系统投影模型

Fig. 1 Laser scanning projection system projection model

图 1 中的  $H$  为由水平轴振镜偏转造成的激光

束的偏转角(水平角),  $V$  为由垂直轴振镜偏转造成的激光束的偏转角(俯仰角),  $D$  为合作目标定位点与水平轴振镜之间激光束走过的路程,  $e$  为双轴振镜的间距。上述参数与投影目标点在  $O'-X'Y'Z'$  下的坐标  $(x_p, y_p, z_p)$  之间的关系为

$$\begin{cases} z_p = (D \cdot \cos H - e) \cdot \cos V \\ y_p = (D \cdot \cos H - e) \cdot \sin V \\ x_p = D \sin H \end{cases} \quad (1)$$

## 3 激光扫描投影系统标定模型

为了将 CAD 数模高精度地投影到投影面上,在激光扫描投影系统进行扫描投影之前,需要将  $O-XYZ$  下的 CAD 数模转换到  $O'-X'Y'Z'$  下,通过  $O'-X'Y'Z'$  下的 CAD 数模控制双轴扫描振镜模块高精度地偏转,以保证投影的精确性。激光扫描投影系统的标定技术通过该系统对投影面上的多个合作目标点扫描定位,从而解算出  $O-XYZ$  与  $O'-X'Y'Z'$  的转换关系。

### 3.1 未加激光测距模块的标定模型

激光扫描投影系统标定如图 2 所示,通过对投影面上既在  $O-XYZ$  下又在  $O'-X'Y'Z'$  下的 4 个及以上的目标定位点(已知其在  $O-XYZ$  下的坐标值)进行投影,得到激光扫描投影系统中与之对应的水平角与俯仰角。

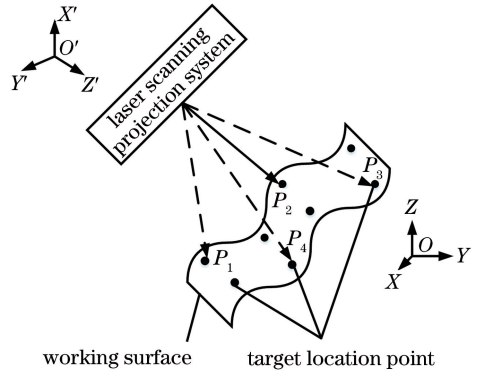


图 2 激光扫描投影系统标定示意图

Fig. 2 Calibration diagram of laser scanning projection system

目标定位点  $P_i (i=1, 2, 3, 4)$  在  $O-XYZ$  下的坐标值  $(x_i^O, y_i^O, z_i^O)$  与激光扫描投影系统中的  $H_i$ 、 $V_i (i=1, 2, 3, 4)$  的关系为

$$\begin{cases} \tan(V_i) = \frac{m_{21} \cdot (x_i^O - P_X^O) + m_{22} \cdot (y_i^O - P_Y^O) + m_{23} \cdot (z_i^O - P_Z^O)}{m_{31} \cdot (x_i^O - P_X^O) + m_{32} \cdot (y_i^O - P_Y^O) + m_{33} \cdot (z_i^O - P_Z^O)} \\ \tan(H_i) = \frac{m_{11} \cdot (x_i^O - P_X^O) + m_{12} \cdot (y_i^O - P_Y^O) + m_{13} \cdot (z_i^O - P_Z^O)}{e \cdot \cos(V_i) - [m_{31} \cdot (x_i^O - P_X^O) + m_{32} \cdot (y_i^O - P_Y^O) + m_{33} \cdot (z_i^O - P_Z^O)]} \end{cases}, \quad (2)$$

式中： $P_X^O, P_Y^O, P_Z^O$  分别为沿  $X, Y, Z$  坐标轴平移的距离。 $m_{11}, m_{12}$  等的表达式如下

$$\begin{cases} m_{11} = \cos \beta \cdot \cos \gamma \\ m_{12} = \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \gamma \\ m_{13} = -\cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \sin \alpha \cdot \sin \gamma \\ m_{21} = -\cos \beta \cdot \sin \gamma \\ m_{22} = -\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \cos \alpha \cdot \cos \gamma \\ m_{23} = \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \sin \alpha \cdot \cos \gamma \\ m_{31} = \sin \beta \\ m_{32} = -\sin \alpha \cdot \cos \beta \\ m_{33} = \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为绕  $X, Y, Z$  坐标轴旋转的角度。通过(2)式及(3)式可以解算出坐标系转换所需的6个未知参数  $\alpha, \beta, \gamma, P_X^O, P_Y^O, P_Z^O$ 。

### 3.2 加入激光测距模块的标定模型

3.1 节的标定模型主要基于布尔沙-七参数法通过对6个合作目标点的定位建立  $O-XYZ$  与  $O'-X'Y'Z'$  间的转换关系。该模型在多次迭代求解的过程中极易出现奇异值, 导致转换矩阵位置参数解不收敛, 从而使坐标转换标定操作频繁失败。为解

决该问题, 在激光扫描投影系统中加入激光测距模块, 研究并提出融合激光测距模块的激光扫描投影系统标定技术。图3为加入激光测距模块的标定模型, 通过激光测距模块测量出合作目标定位点与  $Y$  轴振镜之间激光束走过的路程  $D$ , 只需要3个目标定位点即可完成系统的标定。

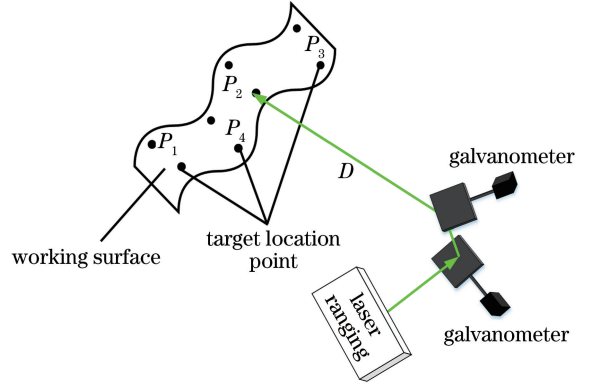


图3 加入激光测距的标定模型图

Fig. 3 Calibration model with laser ranging

加入激光测距模块后目标定位点在  $O-XYZ$  下的坐标值与激光扫描投影系统中的  $H_i, V_i, D_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 的关系为

$$\begin{cases} \sin(H_i) = \frac{m_{11} \cdot (x_i^O - P_X^O) + m_{12} \cdot (y_i^O - P_Y^O) + m_{13} \cdot (z_i^O - P_Z^O)}{D} \\ \sin(V_i) = \frac{m_{21} \cdot (x_i^O - P_X^O) + m_{22} \cdot (y_i^O - P_Y^O) + m_{23} \cdot (z_i^O - P_Z^O)}{D \cdot \cos(H_i) - e} \\ \cos(V_i) = \frac{m_{31} \cdot (x_i^O - P_X^O) + m_{32} \cdot (y_i^O - P_Y^O) + m_{33} \cdot (z_i^O - P_Z^O)}{D \cdot \cos(H_i) - e} \end{cases}, \quad (4)$$

通过(4)式所示的方程可列出9组方程式, 即可解算出坐标系转换所需的6个未知参数  $\alpha, \beta, \gamma, P_X^O, P_Y^O, P_Z^O$ 。

## 4 仿真分析

为了验证加入激光测距模块的激光扫描投影系统在标定时的可行性, 需要分别对(2)式和(4)式进行解算分析, 由于(2)式和(4)式是关于6个未知参数  $\alpha, \beta, \gamma, P_X^O, P_Y^O, P_Z^O$  的非线性超定方程, 通过粒子群算法分别对(2)式和(4)式进行解算分析。

### 4.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法源自对鸟群捕食行为的研究, 最初由 Kennedy 和 Eberhart 提出, 是一种通用的启发式搜索技术<sup>[8-10]</sup>。该算法的基本流程如下:

1) 初始化粒子群, 计算每个粒子的适应度函

数值;

2) 根据公式(5), 更新速度  $v$ 、位置  $p$ ;

$$\begin{cases} v = \omega \cdot v + c_1 r_1 (p_{id} - p) + c_2 r_2 (p_{gd} - p) \\ p = p + v \end{cases}, \quad (5)$$

式中,  $\omega$  为惯性权重,  $c_1, c_2$  为学习因子,  $r_1, r_2$  为  $0 \sim 1$  的随机数,  $p_{id}$  为粒子初始位置,  $p_{gd}$  为粒子历史最优位置;

3) 如果满足终止条件, 结束迭代, 输出结果; 否则, 返回步骤2)。

运用粒子群优化算法进行解算时, 针对不同的方程需要选取最优的参数, 其中选取  $c_1, c_2$  与  $\omega$  尤为重要<sup>[11-12]</sup>。通常情况下,  $c_1, c_2$  与  $\omega$  的取值原则为  $c_1, c_2$  相等, 并且其取值范围为  $0 \sim 4$ ,  $\omega$  的取值范围为  $0 \sim 1$ <sup>[13]</sup>。

4.2 未加激光测距的激光扫描投影系统标定精度分析

表 1 为 6 个被测合作目标定位点的空间位置信

表 1 合作目标点空间位置信息

Table 1 Cooperation target point space location information

Target points	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
$H / (^\circ)$	14	16	4	-13	-12	-2
$V / (^\circ)$	10	-10	-12	-15	9	14
$m / \text{mm}$	-1080.1748	-1197.9003	-517.17885	444.404719	371.154856	-184.2575777
$n / \text{mm}$	-379.83915	678.122737	786.81148	952.989372	-326.01153	-598.8422135
$q / \text{mm}$	0	0	0	0	0	0
$h / \text{mm}$	784.455668	902.181225	221.459737	-740.12384	-666.87397	-111.4615399
$j / \text{mm}$	528.980942	-528.98094	-637.66969	-803.84758	475.153321	747.9840085
$k / \text{mm}$	3000	3000	3000	3000	3000	3000

表 1 中的 6 个被测合作目标定位点的空间位置信息均是通过 SA (SpatialAnalyzer) 软件仿真获得的, 能够有效地模拟实际激光扫描投影标定过程。将表 1 中 6 个被测合作目标定位点的  $H$ 、 $V$ 、 $m$ 、 $n$ 、 $q$  代入(2)式中, 可得到 12 个方程的超定方程组,  $c_1$ 、 $c_2$  ( $c_1=c_2$ ) 与  $w$  取值不同时, 运用粒子群优化算法对该方程组进行解算并选取最优的参数, 得到不同的  $c_1$ 、 $c_2$  与  $w$  对应的适应度值  $f$ 。图 4 为  $f$  较小时对应的  $c_1$ 、 $c_2$  与  $w$ 。图 4 中  $f$  的最小值达到  $10^{-7}$ , 由于(2)式解算不收敛的概率较大, 选取图 4 中的  $c_1$ 、 $c_2$  与  $w$  均有可能使  $f$  的值达到  $10^{-7}$ , 但是运用

息, 其中  $m$ 、 $n$ 、 $q$  为目标定位点在  $O$ - $XYZ$  下的三维坐标值,  $H$ 、 $V$  为激光扫描投影系统反馈的理想数据,  $h$ 、 $j$ 、 $k$  为目标点在  $O'$ - $X'Y'Z'$  下的理论三维坐标。

不同的  $c_1$ 、 $c_2$  与  $w$  解算(2)式组成的超定方程组收敛的概率不同。

图 5 为选取图 4 中几组不同的  $c_1$ 、 $c_2$  与  $w$  运算得到的  $f$ , 由图 5 可知:  $c_1=c_2=1.1$ 、 $w=0.8$  时, 算法收敛的概率为 2%;  $c_1=c_2=1.5$ 、 $w=0.8$  时, 算法收敛的概率为 14%;  $c_1=c_2=2.1$ 、 $w=0.5$  时, 算法收敛的概率为 26%;  $c_1=c_2=2.3$ 、 $w=0.7$  时, 算法收敛的概率为 16%。

将表 1 中 6 个点的  $H$ 、 $V$ 、 $m$ 、 $n$ 、 $q$  代入(2)式中 得到方程组, 选取  $c_1=c_2=2.1$ 、 $w=0.5$ , 运用粒子群算法对方程组进行解算, 根据多次解算后的最优结果计算出两坐标系之间的坐标转换关系, 得到如表 2 所示 6 个点在投影坐标系下的三维坐标值。表 2 中  $h$ 、 $j$ 、 $k$  为合作目标定位点在  $O'$ - $X'Y'Z'$  下计算所得的坐标值,  $dh$ 、 $dj$ 、 $dk$  分别为合作目标定位点的计算值与理论值的偏差,  $\Delta l$  为合作目标定位点的计算值与理论值之间的空间距离, 即

$$\Delta l = \sqrt{dh^2 + dj^2 + dk^2} \quad (6)$$

由表 2 可得出, 在不考虑  $H$ 、 $V$  误差的前提下, 计算所得合作目标定位点的三维坐标值应与理论坐标值近似相等,  $\Delta l$  的平均值为  $1.17 \times 10^{-6}$  mm, 达到了激光扫描投影系统标定的精度要求。

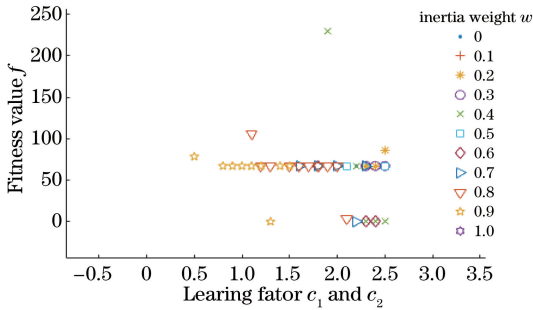


图 4 未加激光测距模块下  $f$  较小时对应的  $c_1$ 、 $c_2$  与  $w$

Fig. 4  $c_1$ ,  $c_2$  and  $w$  when  $f$  is small without laser ranging module

表 2 合作目标点在投影坐标系下的三维坐标及其定位误差

Table 2 Three-dimensional coordinates of the cooperative target point in the projected coordinate system and its positioning error

Target points	$h / \text{mm}$	$j / \text{mm}$	$k / \text{mm}$	$dh / \text{mm}$	$dj / \text{mm}$	$dk / \text{mm}$	$\Delta l / \text{mm}$
$P_1$	784.4556679	528.9809417	3000	$5.13 \times 10^{-8}$	$-3.93 \times 10^{-7}$	$9.99 \times 10^{-7}$	$1.08 \times 10^{-6}$
$P_2$	902.1812254	-528.980943	3000	$2.38 \times 10^{-7}$	$-5.39 \times 10^{-7}$	$1.72 \times 10^{-6}$	$1.82 \times 10^{-6}$
$P_3$	221.4597368	-637.669685	3000	$-4.68 \times 10^{-9}$	$-2.73 \times 10^{-7}$	$5.77 \times 10^{-7}$	$6.39 \times 10^{-7}$
$P_4$	-740.123836	-803.847577	3000	$3.04 \times 10^{-8}$	$2.03 \times 10^{-7}$	$-1.03 \times 10^{-6}$	$1.05 \times 10^{-6}$
$P_5$	-666.873974	475.1533211	3000	$4.30 \times 10^{-7}$	$7.39 \times 10^{-8}$	$-1.52 \times 10^{-6}$	$1.58 \times 10^{-6}$
$P_6$	-111.461539	747.9840085	3000	$5.37 \times 10^{-7}$	$-4.31 \times 10^{-8}$	$-6.80 \times 10^{-7}$	$8.68 \times 10^{-7}$
Average							$1.17 \times 10^{-6}$

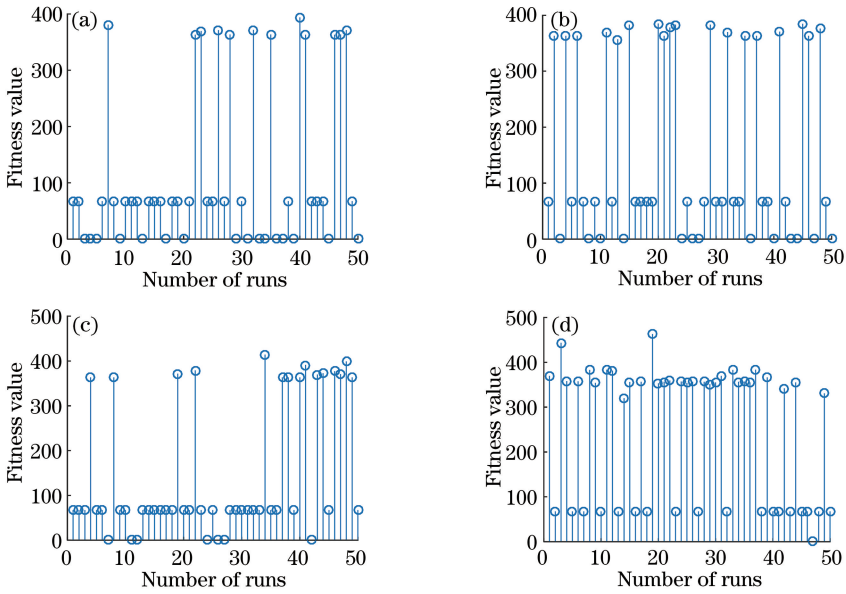


图 5  $c_1, c_2$  与  $w$  对算法收敛概率的影响。(a)  $c_1=c_2=2.3, w=0.7$ ;

(b)  $c_1=c_2=2.1, w=0.5$ ; (c)  $c_1=c_2=1.5, w=0.8$ ; (d)  $c_1=c_2=1.1, w=0.8$

Fig. 5 Effect of  $c_1, c_2$  and  $w$  on the convergence probability of the algorithm. (a)  $c_1=c_2=2.3, w=0.7$ ;

(b)  $c_1=c_2=2.1, w=0.5$ ; (c)  $c_1=c_2=1.5, w=0.8$ ; (d)  $c_1=c_2=1.1, w=0.8$

### 4.3 加入激光测距的激光扫描投影系统标定精度分析

表 3 为表 1 中 6 个合作目标点的测距信息。将合作目标点  $P_1, P_2, P_3$  的  $H, V, m, n, q, D$  代入(4)

式中,得到 9 个方程的超定方程组,  $c_1, c_2$  ( $c_1=c_2$ ) 与  $w$  取值不同时,通过粒子群算法对方程组进行解算,可以得到不同的  $c_1, c_2$  与  $w$  对应的适应度值  $f$ 。

表 3 合作目标点空间位置信息

Table 3 Cooperation target point space location information

Target points	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
$D / \text{mm}$	3242.59888	3273.07314	3174.75533	3290.155	3207.48666	3193.786456

图 6 为  $f$  取最小值时对应的  $c_1, c_2$  与  $w$ , 选取图 6 中的一组  $c_1, c_2$  与  $w$  对上述通过  $P_1, P_2, P_3$  的  $H, V, m, n, q, D$  代入(5)式中得到的超定方程组进行解算,可得到 6 个未知参数的值。上述 6 个未知参数可建立理论 CAD 数模坐标系与  $O'-X'Y'Z'$  的转换关系,进而求出 CAD 数模坐标系下的各个点

在  $O'-X'Y'Z'$  下的三维坐标。

表 4 为激光扫描投影系统加入激光测距模块后通过三点解算出来的 6 个目标点在投影坐标系下的三维坐标及其定位误差。由表 4 可知,在不考虑  $H, V, D$  误差的前提下,  $\Delta l$  的平均值为  $1.50 \times 10^{-7} \text{ mm}$ , 达到了激光扫描投影系统标定的精度要求。

表 4 加入激光测距模块后,合作目标点在投影坐标系下的三维坐标及其定位误差

Table 4 Three-dimensional coordinates of the cooperative target point in the projected coordinate system and its positioning error after adding laser ranging module

Target points	$h / \text{mm}$	$j / \text{mm}$	$k / \text{mm}$	$dh / \text{mm}$	$dj / \text{mm}$	$dk / \text{mm}$	$\Delta l / \text{mm}$
$P_1$	784.4556674	528.9809421	3000	$-4.50 \times 10^{-7}$	$3.98 \times 10^{-8}$	$2.77 \times 10^{-9}$	$4.51 \times 10^{-7}$
$P_2$	902.1812254	-528.980942	3000	$1.52 \times 10^{-7}$	$-5.99 \times 10^{-8}$	$2.88 \times 10^{-9}$	$1.64 \times 10^{-7}$
$P_3$	221.4597368	-637.669685	3000	$-4.75 \times 10^{-8}$	$-6.12 \times 10^{-8}$	$5.93 \times 10^{-9}$	$7.77 \times 10^{-8}$
$P_4$	-740.123836	-803.847577	3000	$5.29 \times 10^{-8}$	$3.70 \times 10^{-8}$	$1.02 \times 10^{-8}$	$6.53 \times 10^{-8}$
$P_5$	-666.873974	475.1533209	3000	$-4.96 \times 10^{-8}$	$-6.29 \times 10^{-8}$	$9.16 \times 10^{-9}$	$8.06 \times 10^{-8}$
$P_6$	-111.46154	747.9840085	3000	$-5.01 \times 10^{-8}$	$3.81 \times 10^{-8}$	$6.57 \times 10^{-9}$	$6.33 \times 10^{-8}$
Average							$1.50 \times 10^{-7}$



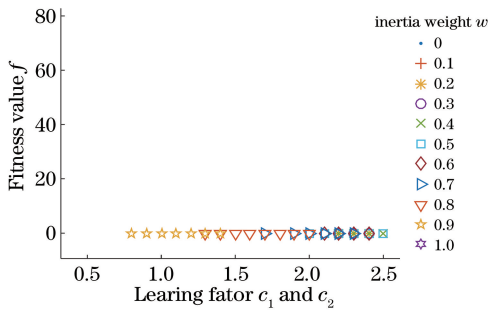


图 6 加入激光测距模块后,  $f$  取最小值时对应的  $c_1$ 、 $c_2$  与  $w$

Fig. 6  $c_1$ ,  $c_2$  and  $w$  when  $f$  is small with laser ranging module

在原激光扫描投影系统中加入激光测距模块

时,需要考虑测距误差对标定精度的影响。表 5、表 6、表 7 分别为测距误差  $\Delta D$  为  $\pm 1$ ,  $\pm 0.1$ ,  $\pm 0.01$  mm 时合作目标定位点的定位误差。

由表 5~表 7 可知,在不考虑  $H$ 、 $V$  误差的前提下,测距误差  $\Delta D$  为  $\pm 1$ ,  $\pm 0.1$ ,  $\pm 0.01$  mm 时,  $\Delta l$  的平均值分别约为 1.88, 0.265, 0.0265 mm, 不能满足激光扫描投影系统亚 mm 级的定位精度要求。如果将测距误差提升到  $\mu\text{m}$  级,可满足激光扫描投影系统的定位精度要求,但  $\mu\text{m}$  级的测距仪器价格昂贵,不适合应用,所以提出了一种将粒子群算法与导数计算法相结合的优化方法(记为粒子群导数标定算法)来解决这个问题,通过三个点来完成激光扫描投影系统的高精度标定。

表 5 测距误差为  $\pm 1$  mm 时的定位误差

Table 5 Positioning error at ranging errors of  $\pm 1$  mm

Target points	$dx$ /mm	$dy$ /mm	$dz$ /mm	$\Delta l$ /mm
$P_1$	0.302532329	0.038719773	0.955555972	1.00
$P_2$	0.082859281	0.014298441	0.946261332	$9.50 \times 10^{-1}$
$P_3$	0.062968435	0.155955736	-0.975369379	$9.90 \times 10^{-1}$
$P_4$	0.032251015	0.356061090	-3.693866585	3.71
$P_5$	0.296987721	0.340726794	-3.085006079	3.12
$P_6$	0.351374220	0.225133035	-1.458688731	1.52
Average				1.88

表 6 测距误差为  $\pm 0.1$  mm 时的定位误差

Table 6 Positioning error at ranging errors of  $\pm 0.1$  mm

Target points	$dx$ /mm	$dy$ /mm	$dz$ /mm	$\Delta l$ /mm
$P_1$	-0.00669991	-0.00317092	-0.095557476	$9.58 \times 10^{-2}$
$P_2$	0.001115951	-0.00228424	0.094663798	$9.47 \times 10^{-2}$
$P_3$	0.001951032	-0.00734551	-0.097572449	$9.79 \times 10^{-2}$
$P_4$	0.003224518	-0.01449479	-0.367280938	$3.68 \times 10^{-1}$
$P_5$	-0.00623375	-0.01396377	-0.531349478	$5.32 \times 10^{-1}$
$P_6$	-0.00827656	-0.00983606	-0.401346895	$4.02 \times 10^{-1}$
Average				$2.65 \times 10^{-1}$

表 7 测距误差为  $\pm 0.01$  mm 时的定位误差

Table 7 Positioning error at ranging errors of  $\pm 0.01$  mm

Target points	$dx$ /mm	$dy$ /mm	$dz$ /mm	$\Delta l$ /mm
$P_1$	-0.00067234	-0.00031625	-0.009555564	$9.58 \times 10^{-3}$
$P_2$	0.000115166	-0.00022861	0.009466565	$9.47 \times 10^{-3}$
$P_3$	0.000196132	-0.00073525	-0.009757588	$9.79 \times 10^{-3}$
$P_4$	0.000320292	-0.00145083	-0.036729185	$3.68 \times 10^{-2}$
$P_5$	-0.00063122	-0.00139655	-0.053135878	$5.32 \times 10^{-2}$
$P_6$	-0.00083442	-0.00098309	-0.040135172	$4.02 \times 10^{-2}$
Average				$2.65 \times 10^{-2}$

#### 4.4 粒子群导数标定算法及其优化结果

图 7 所示为粒子群导数标定算法的流程图,首

先将 3 个合作目标点的  $H$ 、 $V$ 、 $D$ 、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  输入到粒子群优化算法中,将通过粒子群优化算法求得的误

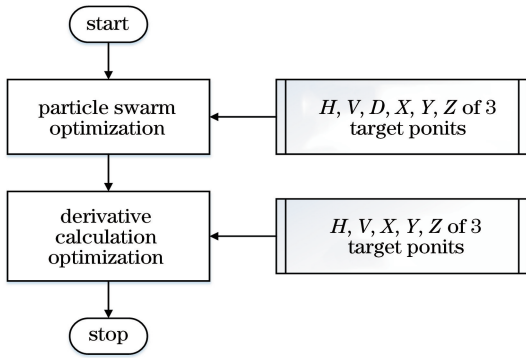


图 7 粒子群导数标定算法流程图

Fig. 7 Flow chart of particle swarm derivative calibration algorithm

差较大的 6 个未知数  $\alpha, \beta, \gamma, P_X^0, P_Y^0, P_Z^0$  作为导数计算法的初始近似值,然后将 3 个合作目标点的  $H, V, X, Y, Z$  输入到导数计算法中,通过导数计算法对该初始值进行优化,得到 6 个未知参数的精确值。由于导数计算法优化时距离  $D$  未参与其中,所以避免了测距误差带来的影响。

表 8、表 9、表 10 为通过粒子群导数标定算法优化得出的测距误差  $\Delta D$  为  $\pm 1, \pm 0.1, \pm 0.01$  mm 时合作目标定位点的定位误差。由表 8~10 可知,在不考虑  $H, V$  误差的前提下,测距误差  $\Delta D$  为  $\pm 1, \pm 0.1, \pm 0.01$  mm 时,激光扫描投影系统的定位精度均达到  $10^{-7}$  mm,未受测距误差的影响。

表 8 粒子群导数标定算法在测距误差为  $\pm 1$  mm 时的定位误差

Table 8 Positioning error with  $\pm 1$  mm ranging errors in particle swarm derivative calibration algorithm

Target points	$dh$ /mm	$dj$ /mm	$dk$ /mm	$\Delta l$ /mm
$P_1$	$-8.89 \times 10^{-8}$	$2.93 \times 10^{-7}$	$2.60 \times 10^{-7}$	$4.02 \times 10^{-7}$
$P_2$	$4.59 \times 10^{-7}$	$1.88 \times 10^{-7}$	$-1.63 \times 10^{-8}$	$4.96 \times 10^{-7}$
$P_3$	$2.54 \times 10^{-7}$	$2.21 \times 10^{-7}$	$-1.06 \times 10^{-7}$	$3.53 \times 10^{-7}$
$P_4$	$3.46 \times 10^{-7}$	$3.68 \times 10^{-7}$	$-2.37 \times 10^{-7}$	$5.58 \times 10^{-7}$
$P_5$	$3.08 \times 10^{-7}$	$2.65 \times 10^{-7}$	$1.16 \times 10^{-7}$	$4.23 \times 10^{-7}$
$P_6$	$3.22 \times 10^{-7}$	$3.37 \times 10^{-7}$	$2.39 \times 10^{-7}$	$5.24 \times 10^{-7}$
Average				$4.59 \times 10^{-7}$

表 9 粒子群导数标定算法在测距误差为  $\pm 0.1$  mm 时的定位误差

Table 9 Positioning error with  $\pm 0.1$  mm ranging errors in particle swarm derivative calibration algorithm

Target points	$dh$ /mm	$dj$ /mm	$dk$ /mm	$\Delta l$ /mm
$P_1$	$-1.01 \times 10^{-7}$	$3.29 \times 10^{-7}$	$3.64 \times 10^{-7}$	$5.01 \times 10^{-7}$
$P_2$	$4.81 \times 10^{-7}$	$2.27 \times 10^{-7}$	$3.80 \times 10^{-7}$	$6.54 \times 10^{-7}$
$P_3$	$2.79 \times 10^{-7}$	$2.38 \times 10^{-7}$	$1.91 \times 10^{-7}$	$4.14 \times 10^{-7}$
$P_4$	$3.77 \times 10^{-7}$	$3.54 \times 10^{-7}$	$-7.61 \times 10^{-8}$	$5.22 \times 10^{-7}$
$P_5$	$2.98 \times 10^{-7}$	$2.53 \times 10^{-7}$	$-3.62 \times 10^{-8}$	$3.92 \times 10^{-7}$
$P_6$	$3.02 \times 10^{-7}$	$3.43 \times 10^{-7}$	$1.21 \times 10^{-7}$	$4.73 \times 10^{-7}$
Average				$4.93 \times 10^{-7}$

表 10 粒子群导数标定算法在测距误差为  $\pm 0.01$  mm 时的定位误差

Table 10 Positioning error with  $\pm 0.01$  mm ranging errors in particle swarm derivative calibration algorithm

Target points	$dh$ /mm	$dj$ /mm	$dk$ /mm	$\Delta l$ /mm
$P_1$	$-1.11 \times 10^{-7}$	$3.55 \times 10^{-7}$	$1.75 \times 10^{-7}$	$4.11 \times 10^{-7}$
$P_2$	$4.98 \times 10^{-7}$	$2.56 \times 10^{-7}$	$2.79 \times 10^{-7}$	$6.26 \times 10^{-7}$
$P_3$	$2.99 \times 10^{-7}$	$2.51 \times 10^{-7}$	$1.96 \times 10^{-7}$	$4.36 \times 10^{-7}$
$P_4$	$4.00 \times 10^{-7}$	$3.43 \times 10^{-7}$	$7.97 \times 10^{-8}$	$5.33 \times 10^{-7}$
$P_5$	$2.90 \times 10^{-7}$	$2.44 \times 10^{-7}$	$-1.63 \times 10^{-8}$	$3.79 \times 10^{-7}$
$P_6$	$2.88 \times 10^{-7}$	$3.48 \times 10^{-7}$	$3.62 \times 10^{-8}$	$4.53 \times 10^{-7}$
Average				$4.73 \times 10^{-7}$

表 11 为 10 个目标点的空间位置信息,其中  $m, n, q$  为目标点在  $O-XYZ$  下的三维坐标值,  $h, j, k$  为目标点在  $O'-X'Y'Z'$  下的理论三维坐标。表 11 中的 10 个目标点与上述 6 个目标点在同一坐标系

下,为了进一步验证粒子群导数标定算法的可行性,运用上述得到的两坐标系之间的转换关系对表 11 中的 10 个目标点进行坐标转换。图 8 为针对表 11 中 10 个目标点在未加激光测距模块运用粒子群

优化算法和加入激光测距模块(测距误差为±1 mm)运用粒子群导数标定算法得到的空间距离偏差值  $\Delta l$ 。由图 8 可知,加入激光测距模块运用粒子群导数标定算法得到的空间距离偏差值比未加激光测距模块运用粒子群优化算法得到的空

间距离偏差值小,可见,加入激光测距模块可以有效解决现有激光扫描投影系统至少需要 4 个合作目标点才能实现坐标转换关系标定,并且经常因迭代算法不收敛而需要多次、长时间才能完成坐标转换参数解算等问题。

表 11 合作目标点空间位置信息

Table 11 Cooperation target point space location information

Target points	$m / \text{mm}$	$n / \text{mm}$	$q / \text{mm}$	$h / \text{mm}$	$j / \text{mm}$	$k / \text{mm}$
$P_7$	1008.79384	317.767798	0	-1304.513	-168.626003	3000
$P_8$	603.821058	1255.47986	0	-899.54018	-1106.33807	3000
$P_9$	-255.13374	1675.98398	0	-40.585376	-1526.84218	3000
$P_{10}$	-1348.3362	1447.99194	0	1052.61713	-1298.85014	3000
$P_{11}$	-1649.3914	300.591543	0	1353.67225	-151.449748	3000
$P_{12}$	-1374.2905	-796.40082	0	1078.57141	945.5426163	3000
$P_{13}$	-979.06597	-1234.1214	0	683.346848	1383.263169	3000
$P_{14}$	-525.82694	-1220.4179	0	230.107819	1369.559659	3000
$P_{15}$	-102.64258	-1198.9637	0	-193.07653	1348.105445	3000
$P_{16}$	485.144189	-1064.4965	0	-780.86331	1213.638277	3000

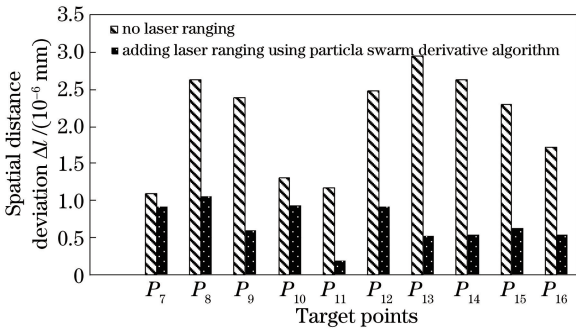


图 8 加入激光测距模块标定前后的定位误差

Fig. 8 Positioning error after calibration with and without laser ranging

## 5 结 论

介绍了激光扫描投影系统的投影模型、标定模型和粒子群优化算法,并通过分析粒子群优化算法参数的分析选取最优的学习因子  $c_1$ 、 $c_2$  和惯性权重  $\omega$ 。运用粒子群优化算法分别对未加和加入激光测距的激光扫描投影系统标定模型进行仿真分析,在不考虑  $H$ 、 $V$ 、 $D$  误差的前提下,未加和加入激光测距模块的激光扫描投影系统,针对 6 个合作目标定位点的计算坐标值与理论坐标值的空间距离  $\Delta l$  的平均值分别为  $1.17 \times 10^{-6}$  mm 和  $1.50 \times 10^{-7}$  mm。运用粒子群优化算法对其进行仿真分析,在不考虑  $H$ 、 $V$  误差的前提下,测距误差  $\Delta D$  为  $\pm 1$ ,  $\pm 0.1$ ,  $\pm 0.01$  mm 时,  $\Delta l$  的平均值分别约为 1.88, 0.265, 0.0265 mm。表明测距误差的存在使激光扫描投影系统的坐标转换标定操作无法满足精度要求。针对

这一问题,运用粒子群导数标定算法进行仿真分析,在不考虑  $H$ 、 $V$  误差的前提下,测距误差  $\Delta D$  分别为  $\pm 1$ ,  $\pm 0.1$ ,  $\pm 0.01$  mm 时,标定精度均达到  $10^{-7}$  mm。结果表明粒子群导数标定算法有效减小测距误差对标定精度的影响,能够实现 3 个合作目标的高精度、快速坐标转换标定。

## 参 考 文 献

- [1] Ahonen S. Laser projection system for truss manufacturing: US5430662 [P/OL]. 1995-07-04 [2019-03-10]. <https://patents.google.com/patent/US5430662A/en>.
- [2] Kaufman S P, Savikovsky A, Mohazzab M. Virtual laser projection system and method: US9879983 [P/OL]. 2018-01-30 [2019-03-10]. <https://patents.google.com/patent/US20170038195>.
- [3] Nakano H, Seya N, Igarashi D, *et al.* Method and apparatus for laser projection, and machining method: US10094652 [P/OL]. 2018-10-09 [2019-03-10]. <https://patents.google.com/patent/US10094652B2/en>.
- [4] Kaufman S P, Savikovsky A. Apparatus and method for projecting a 3D image: US6547397 [P/OL]. 2003-4-15 [2019-03-11]. <https://patents.google.com/patent/US6547397B1/en>.
- [5] Rueb K. Method of calibrating laser positions relative to workpieces: US5663795 [P/OL]. 1997-09-02 [2019-03-11]. <https://patents.google.com/patent/US5663795A>.
- [6] Wigg D, Rueb K. Method of calibrating laser



- projector using moving reflector: US5671053 [P]. 1997-09-23 [2019-03-11]. <https://patents.google.com/patent/US5671053>.
- [7] Guo L L, Li L J, Hou M S, *et al.* Spatial positioning accuracy analysis of intelligent laser 3D projection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 131-139.  
郭丽丽, 李丽娟, 侯茂盛, 等. 智能激光 3D 投影空间定位精度分析 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 131-139.
- [8] Du K L, Swamy M N S. Particle swarm optimization [M] // *Search and optimization by metaheuristics*. Cham: Springer, 2016: 153-173.
- [9] Marini F, Walczak B. Particle swarm optimization (PSO). A tutorial [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2015, 149: 153-165.
- [10] Feng P, Li Y. Semiconductor laser parameter inverse design and method based on artificial neural network and particle swarm optimization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0701001.  
冯佩, 李侯. 基于人工神经网络和粒子群优化的半导体激光器参数反向设计方法 [J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0701001.
- [11] Zhang Y Z, Liu Y, Hou H Y, *et al.* Intrinsic tissue fluorescence spectrum recovery based on particle swarm optimization algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0504001.  
张元志, 刘勇, 侯华毅, 等. 基于粒子群优化算法的生物组织固有荧光光谱复原方法 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0504001.
- [12] Zhang M, Zhang W, Zhang P, *et al.* Parameter optimization in particle swarm algorithm for spectral shape multiplexing demodulation of fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0606002.  
张梅, 张伟, 章鹏, 等. 光纤光栅谱形复用解调中粒子群算法的参数优化 [J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0606002.
- [13] Gong C, Wang Z L. Proficient in MATLAB optimization calculation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 270-275.  
龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 270-275.