

基于姿态角传感器与旋转测距仪的坐标测量

范宜艳^{1,2}, 赵斌¹

(1. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;
2. 湖北工业大学 机械工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 利用姿态角传感器、角度编码器结合激光测距传感器, 与全站仪构成非接触的组合测量系统, 实现大尺度空间中隐藏区域的空间坐标测量。建立了测量系统的数学模型, 设计标定靶并对系统进行了标定。针对测量系统, 提出一种根据控制点在空间的分布确定权值的加权最小二乘的标定方法。以全站仪直接测量和组合系统测量两种测量方式, 对同一空间点进行坐标测量, 通过测量对比来验证组合系统的测量精度。实验结果表明: 该测量系统可以使得组合测量的量程扩大并保持较高的空间坐标测量精度, 采用加权最小二乘算法进行标定的结果使测量误差更小。

关键词: 非接触坐标测量; 加权最小二乘法; 激光测距仪; 隐藏点; 标定算法

中图分类号: TH761 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0117001

Coordinate measurement based on attitude angle sensor and rotating rangefinder

Fan Yiyan^{1,2}, Zhao Bin¹

(1. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to realize the coordinate measurement of hidden parts in the large-scale space, a combined non-contact measurement system which combined attitude angle sensor, angle encoder, laser rangefinder and total station, was proposed. A mathematical model of the measurement system was established. The calibration target was designed and the measurement system was calibrated. For the measurement system, a calibration method based on the weighted least squares was proposed and the weight value was determined according to the spatial distribution of the control points. The precision of the combined system was verified by comparing the error of the same test point between the spatial coordinate measured directly by the total station and that of measured indirectly by the combined system. Experimental results show that the measurement system could expand the scale and achieve reliable precision during combined measurement and the measurement error of the weighted least squares method is smaller than that of the general least square method.

Key words: non-contact coordinate measurement; weighted least squares; laser rangefinder; hidden point; calibration algorithm

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-06-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB035405)

作者简介: 范宜艳(1975-), 女, 讲师, 博士生, 主要从事精密测量方面的研究。Email: fanyiyao00@163.com

导师简介: 赵斌(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精密测量方面的研究。Email: zhaobin@hust.edu.cn

0 引言

目前,基于全站仪、激光跟踪仪和摄影测量系统在大尺寸空间坐标测量领域已经成为主流的测量系统^[1-4]。然而在实际的测量中,常有被测量特征点位于凹陷处或被遮挡(即隐藏点)而无法被单个测量仪器直接测量。针对这种情况,通常采用如下的组合测量方法:一种是基于激光跟踪测距和摄影测量原理的测量系统,即探针与激光跟踪仪或全站仪所构成的组合测量系统^[5-7]。另一种是作者所在的课题组提出的基于无衍射光的探针技术^[8],其原理是通过全站仪瞄准探针的光学系统,测得探针的空间位置坐标,同时同时利用无衍射光技术得到其姿态角,于是得到被测点的空间坐标。虽然探针有出色的隐藏点测量能力,然而受探针测杆的长度局限,难以适应隐藏特征区中跨度大,以及对关键点动态跟踪的空间坐标测量。

文中在上述的第二种测量方法的基础上,用激光测距传感器取代接触式探针测杆,同时加上角度编码器,与全站仪构成非接触的组合测量系统。

1 空间坐标测量原理

空间坐标测量系统如图 1 所示,由全站仪、姿态角传感器、角度编码器、激光测距传感器和电脑组成。无衍射光姿态角传感器的结构与原理见参考文献[8]。激光测距传感器是采用相位法来进行物体距

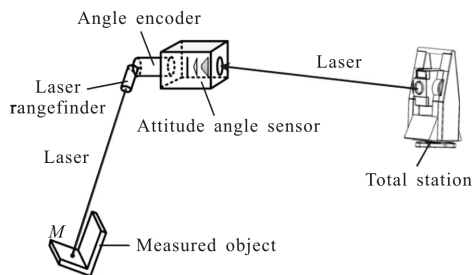


图 1 测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of measurement system

离测量。激光测距传感器与角度编码器安装在一起,通过驱动角度编码器来带动激光测距传感器旋转。在测量过程中,通过倾斜姿态角传感器、旋转角度编码器带动激光测距传感器使其发出的激光对准被测点 M ,测出被测点的距离 L ,同时得到角度编码器的

角度值 θ ,全站仪对准姿态角传感器的光学系统,获取姿态角传感器在全站仪坐标系下的空间坐标 (x_0, y_0, z_0) ,同时姿态角传感器测得其自身的空间姿态角 (η, β, γ) 。

根据坐标变换关系,被测点 M 的空间坐标 (x_m, y_m, z_m) 可表达为:

$$\begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} (q_{11}L+p_{11})\cos\theta+(q_{12}L+p_{12})\sin\theta+(q_{13}L+p_{13}) \\ (q_{21}L+p_{21})\cos\theta+(q_{22}L+p_{22})\sin\theta+(q_{23}L+p_{23}) \\ (q_{31}L+p_{31})\cos\theta+(q_{32}L+p_{32})\sin\theta+(q_{33}L+p_{33}) \\ 1 \end{pmatrix}^T \times M(\eta, \beta, \gamma) \times M(x_0, y_0, z_0) \quad (1)$$

其中:

$$M(\eta, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\eta & -\sin\eta & 0 \\ 0 & \sin\eta & \cos\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$M(x_0, y_0, z_0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_0 & y_0 & z_0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: η, β 和 γ 分别为姿态角传感器测得的滚动角、俯仰角和水平方位角;参数 $p_{ij}, q_{ij}(i, j=1, 2, 3)$ 是常数,事先通过标定得到。

在测量过程中,由全站仪、姿态角传感器、激光测距传感器和角度编码器的测量数据,利用公式(1)便可计算出被测点的空间坐标。

2 标定方法

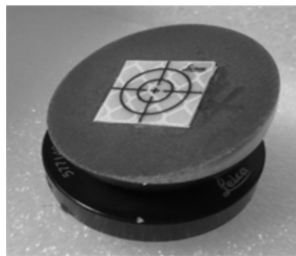
2.1 标定原理

由于全站仪测量用的角锥棱镜反光强烈,激光测距传感器无法对其进行测量,所以必须设计一个全站仪和激光测距传感器都能测量的标定靶。用直径为 38.1 mm 铸铁球加工一个高为 18.05 mm 的球冠,在半球面上的中心处贴上反射片(大小为 10 mm × 10 mm,厚度为 1 mm),反射片到球冠顶点的距离是 19.05 mm,与角锥棱镜的半径相同,反射片十字丝的

中心点与半球的球心重合。实物图见图 2, 标定半球 (图 2(a)) 放置在激光跟踪仪用于固定球形反射器 (直径为 38.1 mm) 的标准附件——磁性基座上 (图 2(b)), 磁性基座固定在三维调整台上。标定半球吸附在磁性基座上的圆槽里 (图 2(c)), 标定半球可以通过旋转来调整方向, 但其球心的位置始终保持不变。



(a) 标定半球 (b) 磁性基座
(a) Calibration hemisphere (b) Target holder



(c) 标定靶
(c) Calibration target
图 2 标定靶实物图

Fig.2 Calibration target

标定过程示意如图 3 所示, 具体过程如下:

(1) 首先将姿态角传感器以某种姿态固定不动, 把标定靶球放置在位置 P_1 , 再将全站仪瞄准姿态角传感器测量, 得到其在全站仪坐标系下的坐标 (x_{01}, y_{01}, z_{01}) 及姿态角 $(\eta_1, \beta_1, \gamma_1)$; 然后旋转角度编码器使激光测距传感器的测距激光大致对准标定靶球贴片十字丝, 再用三维调整台进行微调使靶球上十字丝中心与激光光斑中心重合, 于是测量得到距离 L_1 和编码器的角度 θ_1 ; 最后磁性基座保持不动, 旋转标定靶球的方向使半球面朝向全站仪, 全站仪瞄准标定靶球, 测量反射片十字丝中心点的坐标 (x_{m1}, y_{m1}, z_{m1}) , 这样激光测距传感器和全站仪测量的点都是标定靶球的球心;

(2) 标定靶球移动 N 个位置, 重复(1)测量过程, 得到对应的距离 L_1, L_2, \dots, L_n 和角度编码器的值 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 等参数。

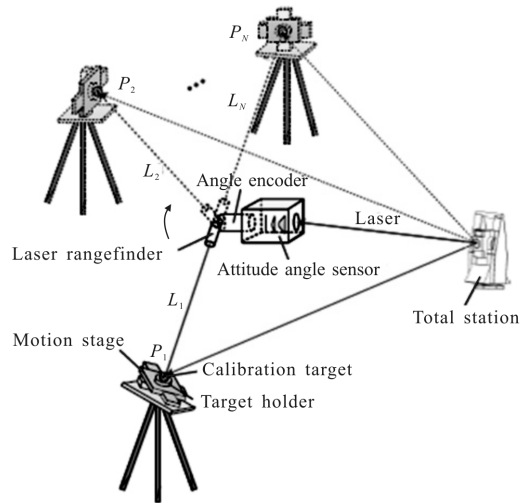


图 3 测量系统的标定示意图

Fig.3 Sketch map of measurement system calibration

由测量系统的数学模型公式(1)可得到 n 个矩阵方程:

$$\begin{pmatrix} (q_{11}L_i+p_{11})\cos\theta_i+(q_{12}L_i+p_{12})\sin\theta_i+(q_{13}L_i+p_{13}) \\ (q_{21}L_i+p_{21})\cos\theta_i+(q_{22}L_i+p_{22})\sin\theta_i+(q_{23}L_i+p_{23}) \\ (q_{31}L_i+p_{31})\cos\theta_i+(q_{32}L_i+p_{32})\sin\theta_i+(q_{33}L_i+p_{33}) \\ 1 \end{pmatrix}^T =$$

$$(x_{mi} \ y_{mi} \ z_{mi} \ 1) \times M^{-1}(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) \times M^{-1}(\eta_i, \beta_i, \gamma_i) \quad (4)$$

其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。

在标定过程中, 由于公式中右端的均是已知量, 于是令:

$$(a_{mi} \ b_{mi} \ c_{mi} \ 1) = (x_{mi} \ y_{mi} \ z_{mi} \ 1) \times M^{-1}(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) \times M^{-1}(\eta_i, \beta_i, \gamma_i) \quad (5)$$

结合公式(4)和(5), 将上述 n 个方程组合为:

$$\begin{pmatrix} L_1\cos\theta_1 & L_1\sin\theta_1 & L_1 & \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 1 \\ L_2\cos\theta_2 & L_2\sin\theta_2 & L_2 & \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_n\cos\theta_n & L_n\sin\theta_n & L_n & \cos\theta_n & \sin\theta_n & 1 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} q_{11} & q_{21} & q_{31} \\ q_{12} & q_{22} & q_{32} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} \\ p_{11} & p_{21} & p_{31} \\ p_{12} & p_{22} & p_{32} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{m1} & b_{m1} & c_{m1} \\ a_{m2} & b_{m2} & c_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{mn} & b_{mn} & c_{mn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

上式可简写成 $AQ=C$, 式中 Q 称为标定参数, 标定就是确定式中的参数 $p_{ij}, q_{ij}(i, j=1, 2, 3)$ 。

2.2 加权标定算法

由于测量系统是全空间方位的坐标测量, 所以

对测量系统的标定应该具有遍历性,但是在实际标定中,全站仪、姿态角测量系统以及标靶的相对位置和位姿都会改变,因此不可能做到等间隔测量,即角度编码器的角度值并不是等角度间隔分布的。由系统的标定模型可知,在求解过程中,不等间隔测量会导致最小二乘运算过程中,测量点比较密集的区域就会得到更多的照顾,从而有更小的误差,而在测量点比较稀疏的区域残余误差就会大一些。

为解决这一问题,采用增大稀疏区域测量点的权重,对标定的数据处理采用加权最小二乘的方法,

$$\begin{cases} \omega_1 = \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} + \frac{2\pi - \theta_n + \theta_1}{2} \right) / 2\pi = (\theta_2 + 2\pi - \theta_n) / 4\pi \\ \omega_i = \left(\frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{2} + \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{2} \right) / 2\pi = (\theta_{i+1} - \theta_{i-1}) / 4\pi & 0 < \theta_i < 2\pi, i = 2, \dots, n-1 \\ \omega_n = \left(\frac{2\pi - \theta_n + \theta_1}{2} + \frac{\theta_n - \theta_{n-1}}{2} \right) / 2\pi = (\theta_1 + 2\pi - \theta_{n-1}) / 4\pi \end{cases} \quad (7)$$

于是标定模型公式(6)化为:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \cos \theta_1 & L_1 \sin \theta_1 & L_1 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 1 \\ L_2 \cos \theta_2 & L_2 \sin \theta_2 & L_2 & \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_n \cos \theta_n & L_n \sin \theta_n & L_n & \cos \theta_n & \sin \theta_n & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q_{11} & q_{21} & q_{31} \\ q_{12} & q_{22} & q_{32} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} \\ p_{11} & p_{21} & p_{31} \\ p_{12} & p_{22} & p_{32} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{m1} & b_{m1} & c_{m1} \\ a_{m2} & b_{m2} & c_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{mm} & b_{mm} & c_{mm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

按上述标定过程得到的测量数据对此方程进行求解,即可得到标定参数 $p_{ij}, q_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ 。

3 实验及结果分析

针对图 1 所示测量系统,利用无衍射光姿态角传感器、角度编码器、激光测距传感器和全站仪构成的组合测量系统进行了标定实验和验证实验。全站仪的测角精度为 $2''$ 、测距精度为 $2 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ ($1 \text{ ppm} = 10^{-6}$);无衍射光姿态角传感器测角精度为 1 mrad ;角度编码器的范围是 $0 \sim 2\pi$,精度为 $\pm 10''$;激光测距传感器的测量范围是 $0.05 \sim 10 \text{ m}$,其测量精度为 1 mm 。

3.1 标定实验

根据 2.1 所述的标定过程,改变姿态角传感器的姿态,并移动标定靶球的位置,获得 20 组标定数据,

而对权值的选择,提出一种根据测量控制点在空间的整体分布情况来选择权值的方法——若某一个测量区域测量点比较密集,则赋小的权值,而另一测量区域测量点比较稀疏,则赋大的权值。由于无衍射光姿态角传感器的角度变化范围很小,所以控制点的分布主要取决于角度编码器的角度值的分布,角度值间隔小,则测量点分布密集,反之亦然。因此,对某一控制点的权值定义为此点角度值与左右相邻两点的角度间隔差的一半的和与角度编码器测量范围(即 2π)的比值,即 n 组数据对应的权值 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 为:

数据,每个点重复测量 10 次,取平均值作为测量结果,并分别采用普通最小二乘法和文中提出的加权最小二乘法进行标定。

加权最小二乘法标定的结果为:

$$Q_w = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{21} & q_{31} \\ q_{12} & q_{22} & q_{32} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} \\ p_{11} & p_{21} & p_{31} \\ p_{12} & p_{22} & p_{32} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.9570 & -0.0290 & -0.3014 \\ -0.3006 & 0.0009 & 0.9528 \\ 0.0022 & -0.0109 & 0.0003 \\ 0.0942 & 0.0012 & 0.0286 \\ 0.0296 & -0.0057 & -0.0843 \\ 0.1390 & 0.2253 & 0.0284 \end{bmatrix}$$

采用普通最小二乘法标定的结果为:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{21} & q_{31} \\ q_{12} & q_{22} & q_{32} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} \\ p_{11} & p_{21} & p_{31} \\ p_{12} & p_{22} & p_{32} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.9581 & -0.0294 & -0.3005 \\ -0.2985 & 0.0018 & 0.9511 \\ 0.0017 & -0.0111 & 0.0007 \\ 0.0954 & 0.0018 & 0.0276 \\ 0.0271 & -0.0068 & -0.0823 \\ 0.1395 & 0.2255 & 0.0280 \end{bmatrix}$$

3.2 验证实验

在对系统进行了标定后,选定 30 个目标点进行空间点位测量,用于检验标定精度,并与全站仪对同一空间点坐标的直接测量结果进行了比较,通过测量对比来验证标定的结果。

实验步骤如下:首先调节姿态角传感器、转动角度编码器使激光测距传感器发出的激光对准测试点,然后用全站仪对准姿态角传感器,于是通过标定

参数及其变换关系可得到被测点在全站仪坐标系下的空间坐标;然后,转动全站仪对准测试点,直接测量出被测点的空间坐标;通过比较同一个测试点的实际空间三维坐标与其由通过标定参数反求的坐标之间的误差来评定标定的效果。接着调整姿态角传感器的姿态和空间位置,测量另一个位置的测试点,重复上述步骤,获得多组测量数据。部分数据如表 1 所示。表中 (x_i, y_i, z_i) 是全站仪直接测量的被测点的空间坐标,

(x_m, y_m, z_m) 和 Δ_{xyz} 分别是通过加权最小二乘法标定出的参数反求被测点的空间坐标和其与全站仪直接测量的被测点的空间坐标的偏差, (x'_m, y'_m, z'_m) 和 Δ'_{xyz} 分别是普通最小二乘法标定出的参数反求被测点的空间坐标和其与全站仪直接测量的被测点的空间坐标的偏差。由以上实验结果可以看出,采用文中提出的加权最小二乘法比普通最小二乘法的标定参数使测量结果误差更小,因此这种标定算法是可行并且有效的。

表 1 加权最小二乘算法与未加权算法的空间坐标及误差(单位:米)

Tab.1 Spatial coordinate and deviations calculated by the weighted least square method and by the unweighted least square method (Units: m)

Measured by total station directly			Calculated by the weighted least square method			Calculated by the unweighted least square method			Deviation	
x_i	y_i	z_i	x_m	y_m	z_m	x'_m	y'_m	z'_m	Δ_{xyz}	Δ'_{xyz}
2.988 6	-1.149 2	1.234 6	2.988 4	-1.149 4	1.234 1	2.988 4	-1.149 7	1.234 0	0.000 6	0.000 8
3.424 6	1.539 2	1.404 3	3.425 5	1.538 1	1.405 9	3.423 0	1.537 8	1.404 1	0.001 5	0.002 4
5.609 1	-1.417 3	0.672 0	5.607 6	-1.418 5	0.672 8	5.607 8	-1.419 7	0.674 2	0.002 1	0.003 5
11.105 4	-2.847 4	-0.576 9	11.103 7	-2.846 1	-0.578 9	11.103 8	-2.845 1	-0.577 9	0.002 9	0.003 0
8.792 8	2.257 5	-0.321 1	8.794 2	2.258 6	-1.322 2	8.794 5	2.256 4	-1.323 0	0.002 1	0.002 8
7.466 6	-2.340 9	0.244 3	7.467 9	-2.343 3	0.244 2	7.465 0	-2.344 5	0.245 1	0.002 7	0.004 0
18.303 3	-1.804 7	-0.156 1	18.301 1	-1.805 9	-2.154 0	18.300 2	-1.806 5	-2.153 8	0.003 3	0.004 3
15.096 6	-0.945 0	-0.873 6	15.097 4	-0.943 0	-0.874 6	15.098 3	-0.943 0	-0.875 4	0.003 1	0.004 0
6.767 3	4.408 8	2.502 9	6.767 8	4.410 5	2.503 7	6.768 5	4.410 8	2.503 7	0.001 9	0.002 5
4.969 2	-3.140 7	2.943 2	4.967 3	-3.141 5	2.943 6	4.967 4	-3.139 8	2.941 3	0.002 1	0.002 8

The deviation: $\Delta_{\text{xyz}} = \sqrt{(x_m - x_i)^2 + (z_m - z_i)^2 + (z_m - z_i)^2}$, $\Delta'_{\text{xyz}} = \sqrt{(x'_m - x_i)^2 + (z'_m - z_i)^2 + (z'_m - z_i)^2}$

4 结 论

文中利用全站仪与姿态角传感器、角度编码器和激光测距传感器构成的组合式非接触坐标测量系统。建立系统的数学模型,设计标定靶并对系统进行了标定。由于实际测量中控制点分布不均匀,提出一种根据控制点在空间的分布确定权值的加权最小二乘的标定方法。权值根据角度编码器测量的角度的间隔进行选择,并进行了实验验证,实验结果表明,加权的最小二乘的标定方法比普通的最小二乘法使测量误差更小。

参 考 文 献:

[1] Zhang Guoxiong. Development orientations of coordinate measuring techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 1-5. (in Chinese)

[2] Ouyang Jianfei, Liu Wanli, Yan Yonggang, et al. Coordinate measuring accuracy of laser tracker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 15-18. (in Chinese)

[3] Chen Haiping, Zhao Bin. Space coordinate measurement

based on theodolites and rangefinders [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1): 77-81. (in Chinese)

[4] Cuypersa W, N Van Gestelb, Voeta A, et al. Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(3-4): 292-300.

[5] Xue Bin, Zhu Jigui, Ren Yongjie, et al. Study on reducing the precision loss of a portable probe in large-scale measurements [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53 (2): 024106-1-024106-10.

[6] Xiao Zhenzhong, Jin Liang, Yu Dehong, et al. A cross-target-based accurate calibration method of binocular stereo systems with large-scale field-of-view [J]. *Measurement*, 2010, 43(6): 747-754.

[7] Bian Xintian, Su Xianyu, Chen Wenjing. A novel tree-dimensional coordinates measurement method on inverse photogrammetry [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37 (7): 1832-1836. (in Chinese)

[8] Ma Guolu, Zhao Bin, Fan Yiyan. Non-diffracting beam based probe technology for measuring coordinates of hidden parts [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 51(5): 585-591.(in Chinese)