

## 基于周向约束定位原理的周向接收器标定方法

王小冷, 杨凌辉, 林嘉睿, 任永杰, 尹彤

(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:** 针对工作空间测量定位系统(wMPS)存在交会误差,且在复杂测量现场中存在空间遮挡问题,文中在研究周向接收器测量原理的基础上设计了一种全新的周向接收器。该接收器在一个平面内固定了6个光电接收单元,通过标定6个单元的位置关系使其成为一个整体,进而实现测量功能。以两台发射站为基础,详细阐述了该周向接收器标定方法,并依托天津大学研发的wMPS实验平台对该方法进行了实验验证。实验结果显示:周向接收器的测量重复性在0.2mm以内,测量精度在0.3mm以内,该方法在解决系统在复杂测量现场中的空间遮挡问题的同时,从原理上消除了交会误差对测量结果的影响。

**关键词:** 工作空间测量定位系统; 空间遮挡; 周向接收器; 标定

**中图分类号:** TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0717004

## Calibration method of circumference receiver based on circumference constraint location method

Wang Xiaoleng, Yang Linghui, Lin Jiarui, Ren Yongjie, Yin Tong

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

**Abstract:** In allusion to the intersection error of workspace Measurement and Positioning System (wMPS) and the occlusion problem in the complicated measurement spot, a new circumference receiver was designed based on multi-angle circumference constraint location method and the calibration method was presented. With scanning laser plane measurement principle and feature, the receiver consisted of six photoelectric receiving elements was fixed on a cylinder. The structure and the calibration method of the circumference receiver were elaborated in detail based on two laser transmitters in this paper. The calibration method was verified with wMPS experimental platform designed by Tianjin University. The experiment results show that the measurement repeatability of the calibration is within 0.2 mm and the accuracy is within 0.3 mm. This method solves the complicate measurement system space scene occlusion and eliminates the impact of intersection error on the measurement result in principle.

**Key words:** wMPS; space shelter; circumference receiver; calibration

收稿日期: 2015-11-05; 修订日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(51475329, 51405338, 51305297); 国家科技重大专项子课题(2014ZX04001-081-06)

作者简介: 王小冷(1991-), 男, 硕士生, 主要从事大尺寸空间坐标测量方面的研究。Email: wangsc\_hp@sina.com

导师简介: 叶声华(1934-), 男, 院士, 教授, 博士生导师, 主要从事大尺寸空间坐标测量方面的研究。

## 0 引言

近年来, 基于角度交汇测量原理的旋转激光扫描测量技术得到迅速发展, 并已成功应用在工业的大尺寸测量方面。在该技术的基础上, 人们设计出多种仪器<sup>[1]</sup>。日本的尼康公司生产的 iGPS 测量系统精度达到了 0.2 mm<sup>[2]</sup>; 西安交通大学的刘志刚教授对该技术进行了更深入的研究<sup>[3]</sup>; 天津大学的郝继贵教授团队开发了一种全新的工作空间坐标测量定位系统即 wMPS (workspace Measurement and Positioning System), 并对其标定方法、空间布局及优化算法进行了一系列的研究与实验<sup>[4]</sup>。

由于测量现场环境恶劣, 测量目标结构复杂, wMPS 系统面临严重的空间遮挡问题<sup>[5]</sup>, 即由于接收器与发射站之间存在阻碍, 导致接收器无法接收到足够多的发射站信号, 使得交汇条件无法满足<sup>[6]</sup>。因此, 在综合考虑测量成本和效率的前提下, 文中提出了一种基于光电扫描多站分布式全局测量网络的多角度周向约束定位方法并设计了基于该方法的周向接收器, 该方法减小了复杂现场的测量条件限制, 拓展了 wMPS 系统的应用领域。

文中以 wMPS 系统为研究平台, 提出了周向接收器标定方法, 并进行了实验验证。该标定方法通过固定周向接收器上的两点, 使其成为接收器的旋转轴。在接收器绕轴旋转的过程中进行控制点的坐标系转换, 从而完成标定。该方法标定流程简单, 标定效率较高。

## 1 周向接收器测量原理

### 1.1 扫描角测量原理

单发射站系统以扫描角度测量为基础, 其结构如图 1 所示。

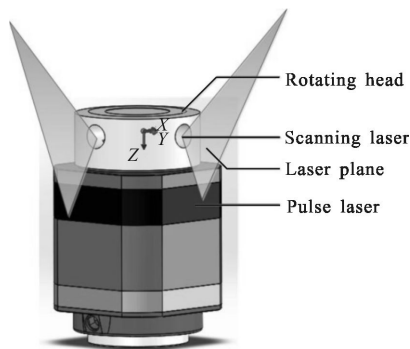


图 1 发射站结构模型

Fig.1 Structure of transmitter

发射站顶部是一个可以高速旋转的转子, 转子上安装有两个具有不同倾斜角度的线性激光发射器。实际应用时, 两个激光器的光轴相互垂直, 激光平面与转子平台旋转轴的夹角分别约为  $\pm 45^\circ$ , 用以形成两束对测量空间高速扫描的扇形测量激光平面<sup>[7]</sup>; 发射站的固定基座上还安装有一圈同步脉冲激光器, 按照环形等间距分布于发射站基座同一高度的一个平面上, 以在转子转过某一特定位置时发出脉冲激光, 形成一个计时基准<sup>[8]</sup>。

光电接收器是一个球形器件, 其直径为 38.1 mm, 可以接收上述 3 个光信号, 并通过光电传感器将其转换为电信号。信号处理器通过对信号进行二值化处理使其转换为逻辑信号, 从而对同步脉冲信号和扫描光平面信号进行区分, 并记录光平面的时间信息<sup>[9]</sup>。在实际应用中, 周围环境产生的反射会形成干扰信号从而对接收器产生影响。然而, 大部分反射光的强度很微弱, 以至于干扰信号的幅度低于 3 个光信号的幅度<sup>[10]</sup>。为了消除反射的影响, 可以设定逻辑电路的阈值电压, 从而滤除干扰信号。

发射站的扫描角测量模型如图 2 所示。

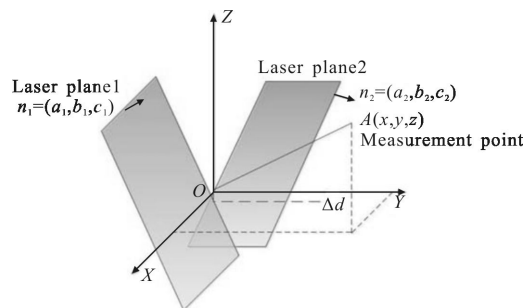


图 2 扫描角测量数学模型

Fig.2 Mathematic model of measuring scanning angle

起始时刻被定义为发射站转子旋转至预先设定的位置时的时刻, 此时脉冲激光器发出同步光信号, 接收器捕捉同步光信号并记录下该时刻  $t_0$ 。随着转子的旋转, 两光平面扫描空间, 进而构建测量场<sup>[11]</sup>。当光平面  $i$  扫过接收器时, 该时刻被记录为  $t_i$ 。假设转子旋转周期为  $T$ , 那么光平面  $i$  从起始时刻至扫过接收器的时刻扫描的角度可表示为:

$$\varphi_i = \frac{t_i - t_0}{T} \times 2\pi, i=1, 2 \quad (1)$$

发射站坐标系  $O-XYZ$  定义如下: 转子的转轴为  $z$  轴; 光平面 1 与  $z$  轴的交点为原点  $O$ ;  $x$  轴位于起始

时刻的光平面 1 上且与  $z$  轴垂直的;  $y$  轴由右手定则确定。

在初始时刻,  $O-XYZ$  坐标系下两个光平面的方程可以被 3 个参数表示:  $n_1=(a_1, b_1, c_1), n_2=(a_2, b_2, c_2)$ , 和  $\Delta d$ 。  $n_1$  和  $n_2$  分别是两个光平面在初始时刻的法向量,  $\Delta d$  是两个光平面在  $z$  轴的截距之差(激光器模块装配误差造成)<sup>[12]</sup>。这 3 个参数在发射站参数标定时被标定好。随着转子旋转, 两个光平面先后扫过点  $A$ , 其相对应的旋转角可以由公式(1)计算, 那么两个光平面扫过点  $A$  时的法向量可以表示为:

$$n_i' = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i & 0 \\ \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} n_i = \begin{bmatrix} a_i' \\ b_i' \\ c_i' \end{bmatrix}, i=1, 2 \quad (2)$$

那么, 当两个光平面扫过点  $A$  时, 其在  $O-XYZ$  坐标系下的方程可以表示为:

$$\begin{cases} a_1'x + b_1'y + c_1'z = 0 \\ a_2'x + b_2'y + c_2'(z + \Delta d) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2 光电扫描多角度周向约束定位原理

wMPS 测量系统是一个多站分布式网络测量系统, 如上文所述, 单台发射站可以提供通过待测点的两个光平面方程, 如果测量空间布置  $n$  台发射站, 则可获得  $2n$  个光平面方程。由于接收器的坐标含有 3 个未知数, 故当  $2n > 3$  时, 用最小二乘法求解即可得到空间坐标。然而, 由于复杂测量现场中遮挡问题的干扰以及接收器视场角度的限制等会阻断测量光学通路, 交会条件往往难以满足, 无法建立足够的约束以求解接收器的空间三维坐标<sup>[13]</sup>。结合多站分布式测量网络的特性, 文中提出了一种不受限于空间交会条件的有效定位方法: 三控制点多角度周向约束定位法。在测量过程中, 只需综合 3 个光电接收单元的测量信息, 即可建立无需交会条件的光电扫描多角度周向约束, 从而实现空间定位。

在多站分布式测量网络的基础上, 设计一个安装有 3 个光电接收单元作为控制点的周向接收器, 其测量原理如图 3 所示。

假设控制点  $P_n$  可以测得发射站  $k$  的光学信号, 则根据公式(3)及各控制点间的距离值, 可以建立多控制点多角度周向约束:

$$\begin{cases} F_{g1n} = a_{gk1n}x_{gn} + b_{gk1n}y_{gn} + c_{gk1n}z_{gn} + d_{gk1} = 0 \\ F_{g2n} = a_{gk2n}x_{gn} + b_{gk2n}y_{gn} + c_{gk2n}z_{gn} + d_{gk2} = 0 \\ D_{nm} = Pp_{gn} - p_{gn2}P_2 - L_{nm} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $k$  为发射站的编号;  $m, n$  均为接收控制点的编号,  $k=1, 2, 3, m=1, 2, 3, n=1, 2, 3$ , 且  $m \neq n$ ,  $\angle nm$  为控制点  $n$  与  $m$  间的距离值, 再根据各控制点与测头  $P_t$  间的距离可求解测头坐标。

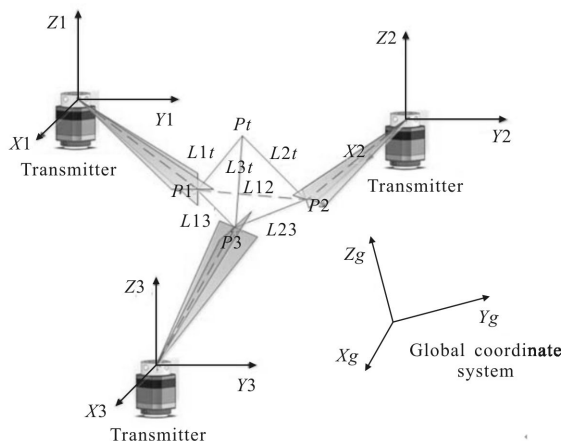


图 3 周向接收器测量模型

Fig.3 Measurement model of circumference receiver

由公式(4)可知, 方程组中含有多个二次距离长度方程, 且方程的总数与未知量的个数相等, 不存在冗余条件。因此, 文中在三控制点法的基础上加以改进, 将控制点数量增加到 6 个, 保证其中至少 4 个控制点接收到发射站信号, 则方程组个数大于未知数个数, 此时可以运用最优化算法计算各控制点间的距离值。建立优化目标函数如下:

$$E = \sum_{n=1}^6 (F_{g1n}^2 + F_{g2n}^2) + \sum_{n=1}^6 \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^6 D_{nm}^2 = \min \quad (5)$$

采用 Levenberg-Marquardt 算法即可对公式(5)进行优化求解。其中, 迭代初值可以通过如下方法得到: 首先, 针对单个接收控制点, 综合与其相对应的两个平面方程和与其他控制点相对应的任一平面方程, 即可求解其全局坐标初值。

在得到各控制点的全局坐标后, 再根据各控制点与待测点间的距离值即可求解得到待测点的全局坐标:

$$\|P_{gn} - P_{gt}\|_2 = L_{nt} \quad (6)$$

式中:  $P_{gn}$  控制点全局坐标;  $P_{gt}$  为待测点坐标;  $L_{nt}$  为两者间距离。

基于周向定位原理, 文中设计了一种全新的周向接收器, 其结构如图 4 所示。

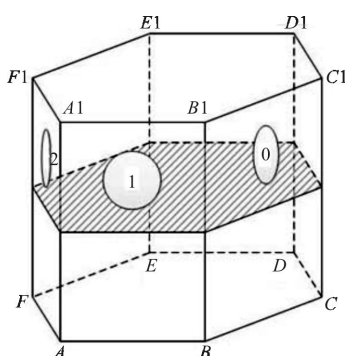


图 4 周向接收器结构

Fig.4 Structure of circumference receiver

该接收器为一六棱柱,在六棱柱的每一面上安装一光电接收单元,且 6 个光电接收单元在同一圆上。

## 2 周向接收器标定方法

由上文可知,在使用周向接收器进行坐标测量前,必须知道 6 个控制点两两之间的距离以及各控制点与测头之间的距离。由于各控制点沿接收器周向分布,无法在影像仪同一视场内完成标定。因此,使用 wMPS 系统对其进行标定。通过 wMPS 系统,可以测出 6 个光电接收单元以及测头在同一坐标系下的坐标,从而计算出所需要的距离值。然而,该方法需要在周向接收器的周围布置多台发射站以保证每个光电接收单元都可以至少接收到两台发射站的信号,使得标定过程变得复杂。因此,文中提出了一种只使用两台发射站的基于坐标系转换的标定方法。

在六棱柱的顶面和底面各固定一标准球座,在一 L 型工件的两面上也各固定一标准球座,这样就可以通过两个标准尺寸的钢球将周向接收器的旋转轴与 L 型工件固定在一起,如图 5 所示。

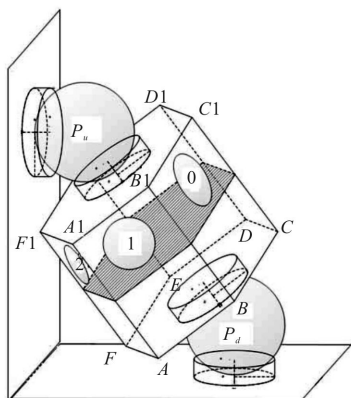


图 5 周向接收器标定示意图

Fig.5 Calibration schematic diagram of circumference receiver

在接收器正前方 5 m 处相隔 3 m 布置两台发射站,对其进行内参、外参的标定。在完成 wMPS 的坐标系建立工作后,分别将球形接收器(同标准钢球体积一致)放置于 L 形工件的两个球座上,测量此两点的坐标。上方点  $P_u=(x_u, y_u, z_u)$ , 下方点  $P_d=(x_d, y_d, z_d)$ 。将周向接收器通过标准钢球放置于 L 形工件上,并将 0、1 号光电接收单元旋转至正对发射站的方向,使两接收单元均可接收到两台发射站的信号,则可以测得两光电接收单元的坐标  $P_0=(x_0, y_0, z_0)$ ,  $P_1=(x_1, y_1, z_1)$ 。以  $P_1, P_u, P_d$  3 点建立周向接收器坐标系  $O-XYZ$ 。以两标准钢球球心连线为旋转轴,旋转周向接收器,使 1、2 号光电接收单元旋转至正对发射站的方向,保证两接收单元均可接收到两台发射站的信号,此时可以测得两光电接收单元的坐标  $P_1'=(x_1', y_1', z_1')$ ,  $P_2'=(x_2', y_2', z_2')$ 。以  $P_1', P_u, P_d$  3 点建立周向接收器坐标系  $O'-X'Y'Z'$ 。通过旋转前后 3 点的坐标,可以求出两坐标系之间的旋转平移矩阵  $R, T$ :

$$\begin{cases} R \begin{bmatrix} x_u-x_1 \\ y_u-y_1 \\ z_u-z_1 \end{bmatrix} + T = \begin{bmatrix} x_u-x_1' \\ y_u-y_1' \\ z_u-z_1' \end{bmatrix} \\ R \begin{bmatrix} x_d-x_1 \\ y_d-y_1 \\ z_d-z_1 \end{bmatrix} + T = \begin{bmatrix} x_d-x_1' \\ y_d-y_1' \\ z_d-z_1' \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

根据  $R, T$  矩阵,可以求出 0 号光电接收单元在坐标系  $O'-X'Y'Z'$  下的坐标:

$$\begin{bmatrix} x_0' \\ y_0' \\ z_0' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + T \quad (8)$$

至此,可以求得  $P_u, P_d, P_0, P_1, P_2$  在同一坐标系下的坐标。同理,运用该方法可将周向接收器的 6 个光电接收单元以及  $P_u, P_d$  均用同一坐标系下的坐标表示出来,从而计算出 6 个光电接收单元与  $P_u, P_d$  两两之间的距离。

## 3 实验验证

### 3.1 标定实验

周向接收器实物如图 6 所示。

在测量空间内相距 2.5 m 布置两台 wMPS 发射站,按照上文所述方法测量周向接收器各光电接收单元两两之间的距离,从而完成标定,如图 7 所示。



图 6 周向接收器

Fig.6 Circumference receiver

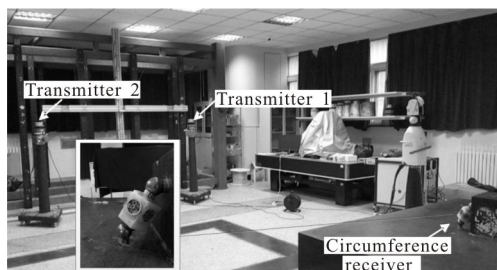


图 7 实验装置示意图

Fig.7 Calibration schematic of experimental setup

标定结果如表 1 所示。

表 1 标定结果

Tab.1 Calibration result

Calibrated content/mm	Distance
$L_{01}$	34.50
$L_{02}$	60.96
$L_{03}$	69.25
$L_{12}$	34.39
$L_{13}$	60.82
$L_{23}$	34.77
$L_{04}$	66.42
$L_{14}$	61.75
$L_{24}$	63.62
$L_{34}$	69.94

表中  $L_{01}$  为  $P_0$  与  $P_1$  两点间的距离,以此类推。

### 3.2 重复性验证实验

文中提出的周向接收器标定方法依托于天津大学精仪学院研发的 wMPS 测量空间定位系统进行原理验证。在测量场内相距 4 m 布置两台发射站,将标定好的周向接收器通过一标准钢球放置在距两发射站连线中点 3 m 的一球座上,保证 0 号、1 号光电接

收单元收到 1 号发射站的信号,2 号、3 号光电接收单元收到 2 号发射站的信号,并开始测量,通过文中所述算法对标准钢球球心坐标进行解算。以标准钢球球心为中心任意转动周向接收器 9 次并重复上述测量过程,解算 10 组标准钢球球心坐标,并进行对比,结果如表 2 所示。

表 2 球心坐标

Tab.2 Centre coordinate

Receiver attitude	x/mm	y/mm	z/mm
1	2 785.34	1 294.65	73.91
2	2 785.17	1 294.62	73.88
3	2 785.32	1 294.57	73.94
4	2 785.16	1 294.66	73.95
5	2 785.25	1 294.63	73.85
6	2 785.28	1 294.57	73.79
7	2 785.32	1 294.59	73.89
8	2 785.28	1 294.56	73.90
9	2 785.29	1 294.57	73.91
10	2 785.30	1 294.62	73.88

由实验结果可知,多次转动周向接收器后的测量结果在  $x, y, z$  3 个方向均在 0.2 mm 的范围内变化,满足设计需求。

### 3.3 精度验证实验

将周向接收器放置在测量场中的 8 个位置,该 8 个位置大致为测量场内一边长为 2 m 的正方体的 8 个顶点,通过文中所述算法解算钢球球心坐标;再用球形接收器替代钢球,再次求得钢球球心坐标。由于前后两次的测量均以 wMPS 系统为测量平台,所以可以认为球形接收器所测坐标为准确值,从而可以不考虑系统误差。实验数据如表 3 所示。

表 3 球心坐标对比

Tab.3 Comparison of center coordinates

Position	Coordinates measured by circumference receiver/mm	Coordinates measured by spherical receiver/mm
1	3 150.15,953.45,-870.22	3 150.21,953.67,-870.21
2	3 476.66,3075.39,-878.15	3 476.45,3 075.19,-878.22
3	5 416.73,3013.45,-882.84	5 416.45,3 013.22,-882.99
4	5 383.11,892.06,-864.25	5 383.33,892.25,-864.05
5	3 225.96,921.35,1 249.32	3 225.74,921.07,1 249.21
6	3 485.34,3 030.61,1 245.78	3 485.46,3 030.75,1 245.80
7	5 405.79,2 987.14,1 255.43	5 405.63,2 986.92,1 255.23
8	5 276.76,833.96,1 250.67	5 276.87,834.05,1250.71

将两者进行对比,周向接收器在各点位的测量误差如表 4 所示。

表 4 测量误差

Tab.4 Measurement error

Position	$d_x/mm$	$d_y/mm$	$d_z/mm$
1	-0.06	-0.22	-0.01
2	0.21	0.20	0.07
3	0.28	0.23	0.15
4	-0.22	-0.19	-0.20
5	0.22	0.28	0.11
6	-0.12	-0.14	-0.02
7	0.16	0.22	0.20
8	-0.11	-0.09	-0.04

由实验结果可知各测量点的测量误差在  $x, y, z$  3 个方向均在 0.3 mm 以下,满足设计需求。

#### 4 结 论

(1) 文中介绍了多角度周向定位原理,分析了当前主要的测量方法及其优缺点。

(2) 提出了一种六控制点多角度周向约束定位法,更好地适应了现场测量的需要。

(3) 以两台发射站为基础详细阐述了该方法的数学原理以及周向接收器的标定方法,包括非线性方程组的建立,采用 L-M 迭代法所需初值的获取以及坐标值的解算。

(4) 依托天津大学研发的 wMPS 实验平台对文中方法进行了验证。实验结果表明,该方法的坐标测量重复性可控制在 0.2 mm 以内,精度可控制在 0.3 mm 以内,满足工业应用要求,并且解决了空间遮挡问题,从原理上消除了交汇误差,在大尺寸工业测量领域具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

[1] Yang Linghui, Yang Xueyou, Lao Dabao, et al. Large-scale coordinates measurement method based on intersection of optical planes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1105-1109. (in Chinese)

[2] Duanmu Qiong, Yang Xueyou, Zhu Jigui, et al. 3D coordinate measurement system based on optoelectronic

scanning[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2014-2019. (in Chinese)

[3] Yang Linghui, Zhu Jigui, Wei Zhenzhong, et al. Correction method for orientation parameters of workspace measurement positioning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1629-1634. (in Chinese)

[4] Ye Shenghua, Zhu Jigui, Zhang Zili, et al. Status and development of large-scale coordinate measurement research [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29 (4A): 1-6. (in Chinese)

[5] Yang Linghui. Research on large-scale space coordinate measurement location technology based on optical scanning [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)

[6] Liu Zhexu. Research on measurement and positioning method in large complex field[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)

[7] Muelaner J E, Wang Z, Jamshidi J. Uncertainty of angle measurement for a rotary-laser automatic theodolite(R-LAT) [J]. *Engineering Manufacture*, 2008, 223(B3): 217-229.

[8] Xiong Z, Zhu J, Zhao Z, et al. Workspace measuring and positioning system based on rotating laser planes [J]. *Mechanika*, 2012, 18(1): 94-98.

[9] Yang Linghui, Yang Xueyou, Zhu Jigui, et al. Novel method for spatial angle measurement based on rotating planar laser beams [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 23(6): 758-764.

[10] Lao Dabao, Yang Xueyou, Zhu Jigui, et al. Study on calibration technology of network laser scan space positioning system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(6): 1-6. (in Chinese)

[11] Yang Linghui, Zhu Jigui, Zhang Guangjun, et al. Orientation method for workspace measurement positioning system based on scale bar[J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(9): 814-819. (in Chinese)

[12] Lao D B, Yang X Y, Zhu J G, et al. 2011 Optimization of calibration method for scanning planar laser coordinate measurement system [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(4): 870-877.

[13] Maisano D A, Jamshidi J, Franceschini F, et al. Indoor GPS: system functionality and initial performance evaluation [J]. *International Journal of Manufacturing Research*, 2008, 3 (3): 335-349.