

基于 iGPS 的复杂曲面三维形貌机器人柔性测量技术

刘丽¹, 马国庆^{1*}, 高艺¹, 王强²

¹ 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 针对工业机器人和形貌传感器组成的三维形貌机器人测量系统精度低的问题, 提出一种基于室内全局定位系统(iGPS)的三维形貌复杂曲面测量系统, 并介绍了该测量系统的总体设计方案, 建立了相应的数学模型。对长度测量精度和重复测量精度进行实验验证, 结果表明, 此测量系统在大型复杂曲面形貌测量中具有较高的精度及可靠性。对包含双拱形曲面的大尺寸工件进行形貌测量, 测量结果验证了此测量系统的可行性。

关键词 测量; 复杂曲面; 三维形貌测量; 工业机器人; 精度

中图分类号 N34

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0304006

Flexible Measurement Technology of Complex Curved Surface Three-Dimensional Shape Robot Based on iGPS

Liu Li¹, Ma Guoqing^{1*}, Gao Yi¹, Wang Qiang²

¹College of Mechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Aiming at the low precision problem of the three-dimensional shape robot measurement system composed of industrial robots and topographic sensors, a three-dimensional shape complex curved surface measurement system based on iGPS (indoor global positioning system) is proposed. The overall design scheme of the proposed measurement system is introduced and a mathematical model is established for it. Experiments on length measurement accuracy and repeated measurement accuracy are carried out. The experimental results verify the accuracy and reliability of this measurement system for large-scale complex curved surface topography measurement. The shape measurement of large-sized workpiece with double arched surface is carried out. The measurement results verify the feasibility of this measurement system.

Key words measurement; complex curved surface; three-dimensional shape measurement; industrial robot; precision

OCIS codes 120.4640; 120.4880; 120.5800

1 引 言

复杂曲面三维形貌测量往往要求测量系统具有较高的柔性、测量精度及自动化程度。工业机器人作为典型的柔性运动平台, 具有较高的运动灵活性; 而光学非接触式形貌传感器具有较高的测量精度,

在形貌测量器件方面应用广泛^[1-2]。因此, 将二者结合搭建的三维形貌柔性测量系统兼具上述两者的优点, 可实现复杂曲面三维形貌的柔性测量。然而, 该系统存在工业机器人的定位精度较低导致最终点云拼接精度较低的问题, 本文在传统机器人三维形貌柔性测量系统的基础上提出了一种新的大型复杂曲

收稿日期: 2018-09-29; 修回日期: 2018-10-15; 录用日期: 2018-10-22

基金项目: 吉林省科技发展计划(20160204016GX, 20180623031TC)、吉林省省级产业创新专项资金(2016C088, 2017C045-2)、长春理工大学青年科学基金(XQNJJ-2016-04, XQNJJ-2017-11)、吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20170626KJ)

* E-mail: magq@cust.edu.cn

面三维形貌柔性测量技术。该技术引入室内全局定位系统(iGPS)来提高点云拼接的精度,并将 iGPS 世界坐标系作为点云拼接的坐标系,而工业机器人仅作为移动载体,因此避免了工业机器人的低定位精度对系统精度的影响,从而提高了测量系统的点云拼接精度。

2 测量系统总体设计方案

基于 iGPS 的复杂曲面三维形貌机器人柔性测量系统的设计方案如图 1 所示,该系统主要由计算机、工业机器人、形貌测量传感器、iGPS 定位跟踪测量系统(iGPS 发射器、iGPS 接收器)和机器人控制系统等组成。在测量系统中,形貌传感器通过转接件刚性连接在工业机器人末端法兰盘上,而该系统工作时将由工业机器人带动形貌传感器并按照规划的轨迹进行逐站测量;iGPS 接收传感器通过固定座安装在形貌传感器上,而 iGPS 定位跟踪系统可实时获取其空间姿态,并将形貌传感器在各测量站位的点云数据进行基于 iGPS 世界坐标系的点云拼接;为了提高点云拼接的精度,避免在测量过程中存在信号遮挡的情况,采用 4 站式 iGPS 激光发射器进行定位跟踪。此外,在整个测量场中设置安全栏和安全光幕,以确保系统安全运动。总体布局方案如图 2 所示。

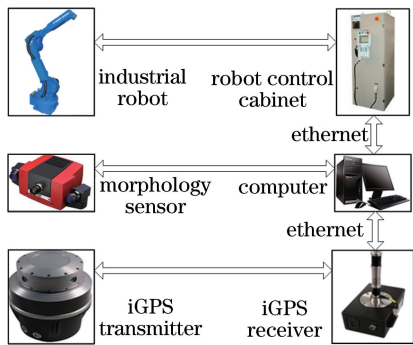


图 1 系统组成框图

Fig. 1 System composition block diagram

2.1 工业机器人

一般情况下,工业机器人的重复定位精度较高,但是由于机器人在制造过程中会产生误差,并且在日常工作中会产生磨损,其定位精度仅能达到几毫米^[3]。如果把工业机器人作为精度链中的环节,将会出现测量结果误差过大,测量系统无法满足测量要求的情况。因此,引入 iGPS 以实现定位跟踪与拼接,并使工业机器人仅作为移动平台,不再是测量精度链中的组成环节,以有效避免因工业机器人定

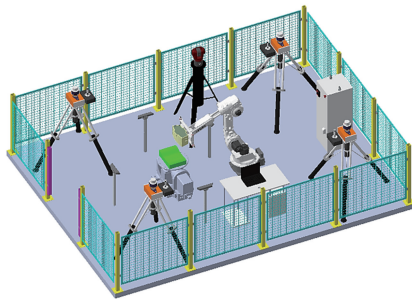


图 2 总体布局

Fig. 2 Overall layout

位误差过大导致测量结果不符合要求的情况。

2.2 形貌传感器

光学形貌传感器系统如图 3 所示,该系统主要由光源、光栅器件和 2 个 CCD (Charge-coupled Device) 相机组成。光学形貌传感器系统结合了激光三角法、光栅条纹投影及编码结构光测量技术,可采用基于相位法的光栅编码式结构光进行测量,再由该系统对 2 个 CCD (CCD₁ 和 CCD₂) 相机所采集的图像进行傅里叶分析、阈值滤波及傅里叶逆变换等相关操作,并在采集的图像中计算得到物体的数字化轮廓特征^[4],测量原理如图 4 所示,其中点 P 为物体上的被测点, P₁ 和 P₂ 分别为被测点在 CCD₁ 和 CCD₂ 上所成的像点。



图 3 光学形貌传感器

Fig. 3 Optical topography sensor

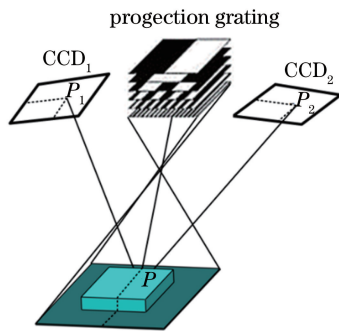


图 4 形貌传感器测量原理

Fig. 4 Morphology sensor measurement principle

2.3 iGPS 定位跟踪测量系统

iGPS 定位跟踪测量系统起源于 20 世纪 90 年

代,主要用于解决大尺寸室内空间测量与定位的问题,并广泛应用于航空航天领域。iGPS 测量系统的构成器件主要包括激光发射器、接收传感器、iProbe 手持测量杆、标准杆、三角架和 workstation 等(图 5)。iGPS 与全球定位系统(GPS)类似,均是利用三角测量原理建立三维坐标系来实现定位;区别在于 iGPS 是以红外脉冲激光信号代替 GPS 卫星的微波信号,具有测量范围广、抗干扰能力强、无需转站测量、可视化程度高、可进行多用户测量等优点^[5]。

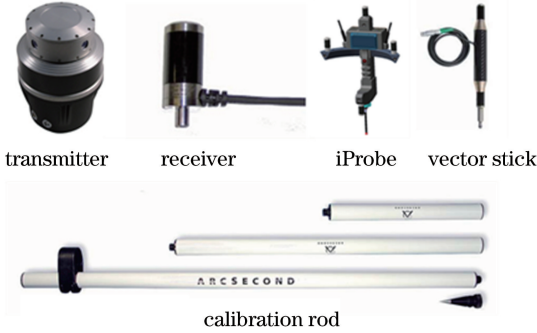


图 5 iGPS 系统的构成器件

Fig. 5 Compositional devices of iGPS system

iGPS 测量时,由激光发射器发出 3 个光学模拟信号,其中包涵 2 个由发射器经 360°高速旋转产生的扇形红外激光面信号和 1 个由发射器基座发出的红外 LED 频闪脉冲信号;接收传感器则接收来自发射器的 3 个信号,并将其转换为时间信号,再利用时间差计算出该发射器对测量区域内任一接收传感器的俯仰角和方位角信息。单一的激光发射器仅可获得接收传感器上目标点的俯仰角和方位角信息,若要得到一条由发射器原点指向被测接收传感器的测量射线,至少需要 2 条这样的测量射线才能确定接收传感器在测量坐标系下的空间位置,因此至少需要 2 个激光发射器参与建站测量^[6-8],测量原理如图 6 所示,其中 $O-XYZ$ 为世界坐标系, O_1 和 O_2 分别为发射器 1 和发射器 2 的坐标原点, E_1 和 E_2

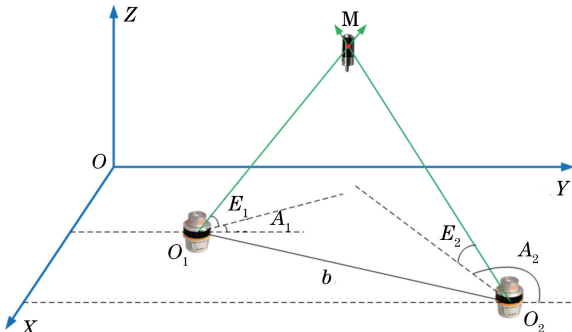


图 6 iGPS 测量原理图

Fig. 6 iGPS measurement principle schematic

分别为发射器 1 和发射器 2 的俯仰角, A_1 和 A_2 分别为发射器 1 和发射器 2 的水平角, b 为两坐标系之间的距离。 M 为接收器,同时发射器的数量也影响着 iGPS 系统的测量精度。研究结果表明,3 个发射器的测量精度比 2 个发射器提高了 50%,4 个发射器的测量精度比 3 个发射器提高了 30%,4 个以上发射器的测量精度变化不明显^[9]。为了提高 iGPS 的测量精度,同时避免在现场复杂工作环境中所产生信号遮挡,在本系统中将使用了 4 站式 iGPS 激光发射器。

3 测量系统的数学模型

基于 iGPS 的机器人三维形貌柔性测量系统中坐标系将由以下几部分构成:形貌传感器测量坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 、iGPS 接收传感器构成的 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 、iGPS 测量坐标系构成的世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 和被测量的产品坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$ 。系统中各坐标系如图 7 所示,而各坐标系定义如下。

1) 形貌传感器测量坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 。形貌传感器系统中的 Z_s 轴与投影头轴线重合且正向指向传感器,而 X_s 轴与 Y_s 轴都在投影光平面上。从被测量的产品坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$ 到形貌传感器测量坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 的转换关系 s_pT 随着测量站位的改变而不断变化。

2) iGPS 接收传感器构成的 Frame 坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 。由安装在形貌扫描仪顶端的 4 个 iGPS 接收传感器构成的 Frame 坐标系是测量数据传递的中转站。Frame 坐标系将由 iGPS 测量系统所创建,其创建规则为:选择其中一个接收传感器作为原点,并以 4 个传感器所在的平面作为 X_fY_f 平面,该平面的法线即为 Z_f 轴方向,作为原点的接收传感器指向另外一个接收传感器为 X_f 轴, Y_f 轴可由右手定则确定。由于 iGPS 接收传感器固定安装在形貌传感器上,所以坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 与 $O_f-X_fY_fZ_f$ 之间的转换关系 f_sT 不随测量系统的运动而改变。

3) iGPS 测量坐标系构成的世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 。世界坐标系将由 iGPS 来确定,该系统存在多种坐标系创建的方式:a)使用其中一个激光发射器的坐标系作为世界坐标系;b)使用 iProbe 通过对点、线进行测量,可在测量域内任意选取一点作为原点建立所需的笛卡儿坐标系;c)配合激光跟踪仪来建立基站坐标系。为了方便数据拼接,本研究采用第 a)种方式建立世界坐标系。iGPS 激光发射器

在系统标定后不可移动,而形貌传感器上的 iGPS 接收传感器会随着测量站位的改变而变化,所以坐标系 $O_f-X_fY_fZ_f$ 与 $O_w-X_wY_wZ_w$ 之间的转换关系 w_fT 是不断变化的。

假设 P 为测量范围内任意一点,在产品坐标系下 P 点的坐标矢量为 P_p ,在 iGPS 世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 下 P 点的坐标矢量为 P_w 。则两坐标系下 P 点的坐标满足关系:

$$P_w = {}^w_fT \cdot {}^f_sT \cdot {}^s_pT \cdot P_p \quad (1)$$

产品坐标系下 P_p 在每次测量时都会先转换到形貌传感器坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 下,所以转换关系 s_pT 的转换结果可由标定后的形貌传感器测量得到,只须在测量前标定转换关系 w_fT 和 f_sT ,从而使测量系统正常工作即可。

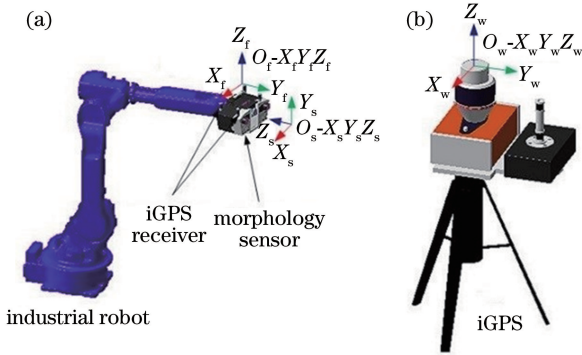


图 7 系统坐标系。(a) 机器人系统相关坐标系;
(b) iGPS 坐标系

Fig. 7 System coordinate system. (a) Coordinate system related to robot system; (b) iGPS coordinate system

4 测量实例实验

实验所搭建的基于 iGPS 的复杂曲面三维形貌柔性机器人测量系统如图 8 所示,该系统主要由工业机器人、形貌测量传感器和 iGPS 等组成。其中工业机器人采用日本 YASKAWA 公司生产的 Motoman-HP20D 型机器人,该机器人为六自由度垂直多关节



图 8 机器人测量系统

Fig. 8 Robot measurement system

型机器人,末端最大负载为 20 kg。形貌测量传感器采用德国 GOM 公司生产的 ATOS-Compact Scan 5M 型流动式光学扫描仪,该扫描仪的单站测量范围为 40~1200 mm²,测量点数目可达 10⁷ 个,最小的测量点间距为 0.017 mm,是目前市场上最先进的非接触式形貌测量设备之一。本实验采用日本 Nikon Metrology 公司生产的 iSpace 型 iGPS,它是工作范围外 10 m 区域内测量精度最高的测量系统之一。iGPS 激光发射器的测量范围为 2~55 m,激光频率为 780 nm;iGPS 接收传感器的角度接收范围:水平方向的范围为 ±180°,垂直方向的范围为 ±55°。

4.1 坐标测量精度验证实验

基于 iGPS 的复杂曲面三维形貌机器人柔性测量系统主要是针对大尺寸器件进行高自动化、高精度的柔性化形貌测量。而形貌测量得到的点云由大量的点构成,因此对测量系统的坐标测量精度进行实验验证是十分必要的。本节将从测量系统的长度测量精度和重复测量精度两个方面进行实验验证。

4.1.1 长度测量精度验证实验

在传统坐标测量精度的验证实验中,往往需要将三坐标测量机或激光跟踪仪的测量结果与要验证的测量结果进行坐标统一,并使两种测量结果处在相同的坐标系,再进行坐标的精度分析。而在实验过程中需要对坐标系进行重新标定和转换,这主要是因为实验过程较复杂,且精度验证过程又引入了坐标系转换的影响因素。

针对上述问题,可采用长度测量精度来代替坐标测量的精度。在测量域内随机布置一组磁力靶座,以其中一个磁力靶座为中心,使用实验所搭建的测量系统和球形特制靶标测量其他磁力座到中心磁力座的距离,并将其结果视为测量值;使用激光跟踪仪和球形特制靶标测量其他磁力座到中心磁力座的距离,将其结果视为真值,测量结果如表 1 所示。

由表 1 的结果可知,基于 iGPS 的复杂曲面三维形貌机器人柔性测量系统的长度测量精度方均根误差在 0.2 mm 以内,最大误差百分比为 0.06025%,基本符合工业测量要求。

4.1.2 重复测量精度验证实验

对测量系统进行长度测量精度的验证可间接验证该系统的绝对测量精度,但是在现场测量的过程中,当形貌测量传感器运动到不同的位置时,工业机器人由于电机的传动可能会产生轻微的振动,这将对长度测量结果的精度产生影响,因此有必要对测量系统的稳定性进行验证。

表 1 长度测量精度的验证实验数据

Table 1 Verification experiment data of length measurement accuracy

Serial number	Theoretical value /mm	Measured value /mm	Absolute error /mm	Error percentage /%
d_1	160.997	161.094	0.097	0.06025
d_2	1258.216	1258.070	-0.116	-0.00922
d_3	356.222	356.068	-0.154	-0.04323
d_4	1445.726	1445.807	0.081	0.005603
d_5	556.791	556.966	0.125	0.02245
d_6	680.309	680.463	0.154	0.022637
d_7	1771.174	1770.885	-0.189	-0.01067
d_8	883.220	883.042	-0.178	-0.02015
d_9	1013.956	1013.861	-0.095	-0.00937
d_{10}	1143.799	1143.937	0.138	0.012065
d_{11}	1289.820	1289.992	0.172	0.013335
d_{12}	956.423	956.261	-0.162	-0.01694
d_{13}	1245.562	1245.709	0.147	0.011802
d_{14}	1821.452	1821.260	-0.192	-0.01054
d_{15}	2015.433	2015.301	-0.132	-0.00655

本实验采用在测量域内对同一点进行多次重复测量,并以测量系统的重复测量精度来评估测量系统的稳定性。首先,在测量域内布置一个磁力座,并将形貌测量传感器特制球形靶标安装在磁力座上作为被测点;然后,根据工业机器人和特制靶标的相对位置编写机器人程序,使形貌测量传感器可在空间 15 个不同的方位($P_1 \sim P_{15}$)对球形靶标进行坐标测量,并且 15 个测量站位可围绕球形靶标的一周进行测量。重复测量结果如表 2 所示,其中 x 、 y 、 z 为点云空间坐标分量。

表 2 重复测量精度验证实验数据

Table 2 Data of repeated measurement accuracy verification experiment

Serial number	x /mm	y /mm	z /mm
P_1	1354.525	-580.849	-887.229
P_2	1354.548	-580.857	-887.287
P_3	1354.537	-580.881	-887.264
P_4	1354.550	-580.832	-887.243
P_5	1354.537	-580.813	-887.259
P_6	1354.529	-580.849	-887.301
P_7	1354.540	-580.875	-887.287
P_8	1354.518	-580.842	-887.244
P_9	1354.561	-580.831	-887.274
P_{10}	1354.534	-580.900	-887.307
P_{11}	1354.581	-580.874	-887.256
P_{12}	1354.523	-580.856	-887.288
P_{13}	1354.544	-580.829	-887.231
P_{14}	1354.558	-580.893	-887.216
P_{15}	1354.576	-580.837	-887.296
3σ	0.058	0.086	0.078

由表 2 的结果可知,在 3σ 准则下(σ 为标准差),测量系统的重复测量精度优于 0.1 mm,重复性较好,可见测量系统具有较好的稳定性。由于在测量系统的精度链中不再含有工业机器人,即使工业机器人在大范围内作业时存在较大的连杆误差,也不会影响测量系统的测量精度,因此引入 iGPS 的方案不仅具有较高的测量精度,而且系统的重复测量精度更高,稳定性更好。

4.2 测量实例

为了验证测量系统对复杂曲面形貌测量的可行性,将利用所搭建的测量系统对一种包含双拱形曲面的大尺寸工件进行形貌测量(图 9)。测量前根据被测工件的面形特点规划了机器人的测量路径,设置了 8 个测量站位,并在工件表面孔的位置沿着孔心轴线方向设置测量站位。



图 9 双拱形工件测量实验

Fig. 9 Measurement experiment of double arched workpiece

对测量得到的点云数据进行处理和封装后,再与理论模型进行最佳拟合对齐,并对其进行三维偏差分析,其偏差分析结果如图 10 所示,右侧彩色偏

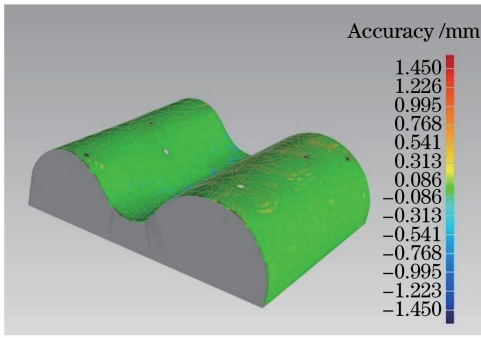


图 10 被测工件偏差对比结果

Fig. 10 Measured workpiece deviation comparison result

差分布条形图(数值为拼接精度,单位为 mm,绿色为在公差范围内,红色为正偏差,蓝色为负偏差)结果显示点云拼接精度在 ± 0.06625 mm 以内。偏差分析结果表明测量系统可完整地还原被测工件的形貌,并有效保留被测工件表面孔的特征,说明对大尺寸、高曲率、连续曲面具有测量的能力。

5 结 论

介绍了一种基于 iGPS 的复杂曲面机器人三维形貌柔性测量系统,该系统主要由形貌测量传感器、工业机器人和 iGPS 等构成,在对各系统的参数和原理进行研究的基础上,建立了测量系统的数学模型。通过对测量域内坐标进行测量的方式,验证了系统的长度测量精度和重复测量精度,并对一种包含双拱形曲面的大尺寸工件进行形貌测量,其测量结果验证了此测量系统的可靠性和可行性。各项实验结果表明:测量系统长度测量精度的方均根误差在 0.2 mm 以内,最大误差百分比为 0.06025%,在 3σ 准则下,测量系统的重复测量精度优于 0.1 mm。因此,所提测量系统的测量精度可满足工业生产的要求。

参 考 文 献

[1] Xie Z X, Zhu R X, Zhang A Q. Extrinsic parameters calibration of three-dimensional measurement system for ultra-large scale line-structured light sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1004003. 解则晓, 朱瑞新, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器三维测量系统外参数标定 [J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1004003.

[2] Yang S R, Yin S B, Ren Y J, *et al.* Improvement of calibration method for robotic flexible visual measurement systems [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3239-3246. 杨守瑞, 尹仕斌, 任永杰, 等. 机器人柔性视觉测量

系统标定方法的改进 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(12): 3239-3246.

[3] He Q X, You Z Z, Kong X D. Positioning error compensation method of industrial robot based on closed-loop feedback of position and orientation [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(7): 872-876. 何庆稀, 游震洲, 孔向东. 一种基于位姿反馈的工业机器人定位补偿方法 [J]. 中国机械工程, 2016, 27(7): 872-876.

[4] Hou M S, Wang Q, Ma G Q, *et al.* Calibration and verification method for 3D shape flexible measurement system [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(3): 385-391. 侯茂盛, 王强, 马国庆, 等. 三维形貌柔性测量系统标定方法及验证 [J]. 应用光学, 2018, 39(3): 385-391.

[5] Xue B, Zhu J G, Zhao Z Y, *et al.* Validation and mathematical model of workspace measuring and positioning system as an integrated metrology system for improving industrial robot positioning [J]. Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(3): 422-440.

[6] Sun F L, Zhao G, Wang W, *et al.* Analysis method of iGPS measurement uncertainty spatial distribution [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(1): 174-180. 孙涪龙, 赵罡, 王伟, 等. iGPS 测量不确定度空间分布分析方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(1): 174-180.

[7] Jiang Q, Zhang Y Z, Zhang S Q, *et al.* Path planning method of the AGV navigated by IGPS in aircraft digital assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(22): 72-77. 蒋倩, 张云志, 张少擎, 等. 飞机数字化装配中 IGPS 导航的 AGV 路径规划方法 [J]. 航空制造技术, 2016(22): 72-77.

[8] Song Z H, Zhao G, Sun Z L, *et al.* Research on iGPS measurement point selection method in fuselage docking [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(5): 57-61. 宋彰桓, 赵罡, 孙占磊, 等. 基于 iGPS 的飞机部件对接测量点选取方法研究 [J]. 航空制造技术, 2016(5): 57-61.

[9] Lin X Z, Li L J, Cao G H, *et al.* Optimal design based on iGPS high-precision posture measurement for large size component joining [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(4): 1299-1311. 林雪竹, 李丽娟, 曹国华, 等. 大部件对接中 iGPS 高精度位姿测量优化设计 [J]. 航空学报, 2015, 36(4): 1299-1311.