月球车地面试验位姿测量技术研究

杨再华，陈启威，唐赖影，易旺民，孙 刚

（北京卫星环境工程研究所，100094 北京）

摘 要：为了在地面验证月球车的位姿确定性能和移动控制性能，文中设计了一种基于室内 GPS 测量系统的月球车跟踪测量方案，首先介绍了室内 GPS 系统的构成和测量原理，然后针对月球车地面验证试验，设计了试验场地坐标系建立方案、月球车坐标系建立方案和月球车坐标系的跟踪测量方案，最后对试验测量系统进行了精度分析.

关键词：月球车；室内 GPS；位姿测量；动态跟踪测量

中图分类号：TH74；V416.8 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2013)05－0124－05

Technology of lunar rover position and orientation measurement in test

YANG Zaihua, CHEN Qiwei, TANG Laiying, YI Wangmin, SUN Gang

(Beijing Satellite Environment Engineering Research Institute, 100094 Beijing, China)

Abstract: To test the position and orientation's certainty performance and movement control performance, this paper designed a Lunar Rover tracking measurement scheme based on the indoor GPS measurement system. Firstly, it introduced the structure and the measurement fundamental of the indoor GPS, then based on the Rover's ground verifying test, the test site coordinate system establishment scheme, the Lunar Rover coordinate establishment scheme and tracking measurement scheme were designed, finally, the precision of the test measurement system was analyzed and some conclusions were obtained.

Key words: lunar rover; indoor GPS; position and orientation measurement; dynamic tracking measurement

为了提高月球车在月面工作的可靠性，需要在地面研制过程中对月球车的位姿确定性能、路径规划能力和移动控制能力进行验证[1－2]. 在室内试验过程中，月球车的太阳敏感器、星敏感器等姿态测量设备无法工作，需要外测设备实时测量月球车的位置、姿态数据，将位姿数据传输给月球车模拟太敏，供月球车使用. 此外还需要通过外测方法对月球车的位置、姿态、速度等进行测量，并与设计输入值比对验证月球车性能.

在室内，高精度的跟踪测量领域内较为成熟的测量手段主要有全站仪测量系统、激光跟踪仪测量系统和室内 GPS 测量系统[3－4]. 单台全站仪或激光跟踪仪只能实现单点位置的跟踪，若实现姿态角度的实时测量需要配置 3 台以上设备，成本昂贵. 针对月球车试验测量范围大、相对精度高、实时性快的特点，试验中采用了室内 GPS 测量方法对月球车进行跟踪测量.

收稿日期：2012－05－07.
作者简介：杨再华(1980—)，男，高级工程师.
通信作者：杨再华，zaihuayang@139.com.

1 测量系统

1.1 系统组成

室内 GPS 系统包括红外发射器、信号接收器、标尺、手持探针及软件等[5]，如图 1 所示.

红外发射器发射出两束红外激光，每束激光呈扇面形，扇面中心对称，覆盖范围为 ±30°，如图 2. 两束扇面激光也相互对称，与对称中心平面的夹角为 ±30°，如图 3. 两束激光扇面围绕发射器中心呈 360°高速旋转，在测量区域内高速划扫[6－7].

接收装置包括信号传感器、信号处理器及电源等. 传感器用于探测激光扇面，处理器用于处理接收到的信号并与工控机软件通过无线信号通信. 接收装置测角原理如图 4 所示，通过探测两束激光扇面到达接收装置的时间差，来获得其相对发射器的俯仰角和方位角信息，并通过与发射器旋转角速度对比来识别发射器的编号[8－9].

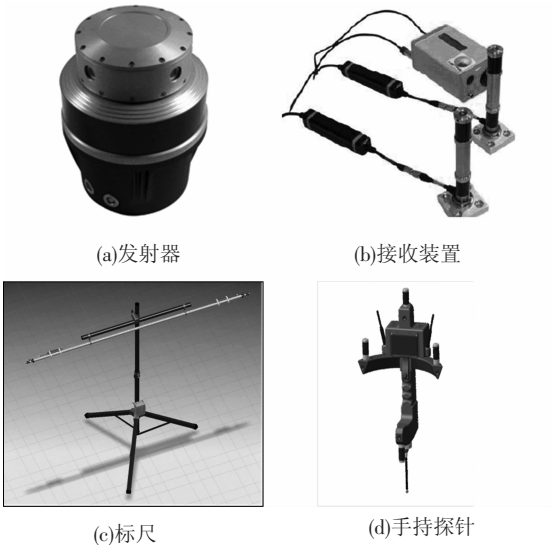


图 1　GPS 系统组成

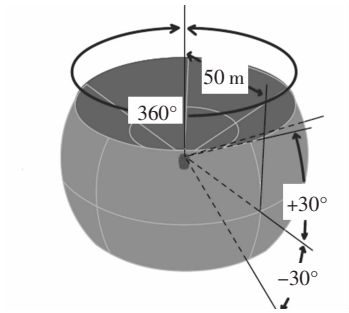


图 2　扇面覆盖范围

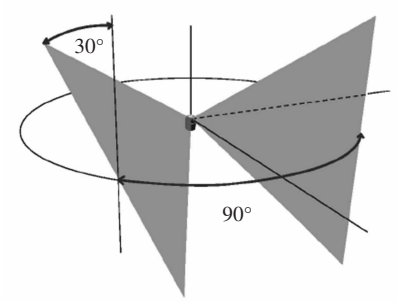


图 3　扇面夹角

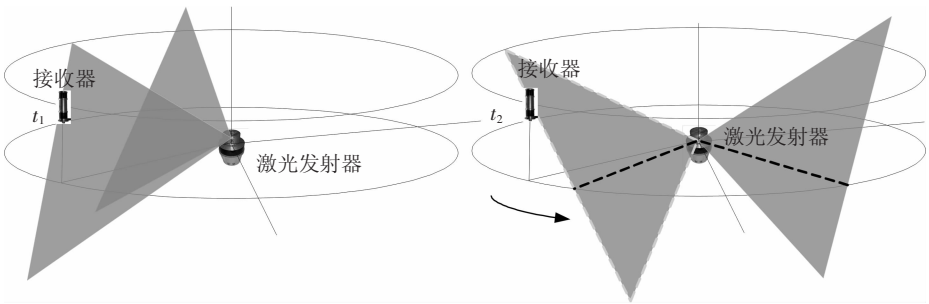


图 4　角度测量原理

标尺的作用在于标定发射器间的相对位置. 在标准杆两侧各有一个信号传感器接收发射器信号，两传感器之间的距离经过标定. 在测量任务实施前，操作人员手持标准杆在被测项目所在空间范围内不同位置采集发射器信号，利用软件解算出各个发射器间的相对位置，从而实现测量系统坐标系建立.

手持探针用于测量固定点坐标. 测量笔上有 4 个接收器，接收器的位置与测量笔的笔尖相对位置固定. 通过测量 4 个接收器的位置后，反算出笔尖接触点的位置.

1.2　测量原理

室内 GPS 系统采用光束法原理测量接收器坐标[8]，由多台发射器构成的测量网络，原理类似经纬仪空间交会测量[9]. 如图 5 所示，由多台发射器组成测量网络，通过标尺标定构建全局坐标系[10].

设某发射器编号 n，通过标定得到该发射器坐标系到全局测量坐标系的旋转矩阵为 $\boldsymbol{R}_n$，在全局坐标系下的平移矢量为 $\boldsymbol{T}_n(x_{Tn}, y_{Tn}, z_{Tn})^{\mathrm{T}}$. 当系统测量空间中 p 点处接收器位置时，首先得到 p 点处接收器在发射器 n 坐标系下的方位角 α_n 和俯仰角 β_n，则在全局测量坐标系下由发射器 n 指向 p 点的方向矢量 $\boldsymbol{l}_n$，可以由公式(1) 表示.

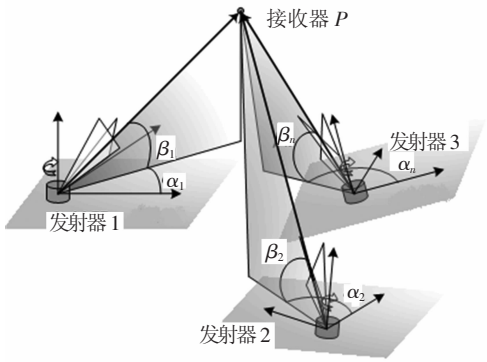


图 5　多站角度交汇坐标测量

$$\boldsymbol{l}_n = \begin{bmatrix} l_{nx} \\ l_{ny} \\ l_{nz} \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}_n \begin{bmatrix} \cos\alpha_n \cos\beta_n \\ \sin\alpha_n \cos\beta_n \\ \sin\beta_n \end{bmatrix}. \quad (1)$$

设 p 点坐标为 (x_p, y_p, z_p)，根据共线约束关系可得

$$\begin{cases} \dfrac{x_p - x_{T1}}{l_{1x}} = \dfrac{y_p - y_{T1}}{l_{1y}} = \dfrac{z_p - z_{T1}}{l_{1z}}, \\ \dfrac{x_p - x_{T2}}{l_{2x}} = \dfrac{y_p - y_{T2}}{l_{2y}} = \dfrac{z_p - z_{T2}}{l_{2z}}, \\ \vdots \\ \dfrac{x_p - x_{Tn}}{l_{nx}} = \dfrac{y_p - y_{Tn}}{l_{ny}} = \dfrac{z_p - z_{Tn}}{l_{nz}}. \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)进行转换可得到如下式(3)：

$$\begin{cases} l_{1y}x_p - l_{1x}y_p = l_{1y}x_{T1} - l_{1x}y_{T1}, \\ l_{1z}y_p - l_{1y}z_p = l_{1z}y_{T1} - l_{1y}z_{T1}, \\ l_{2y}x_p - l_{2x}y_p = l_{2y}x_{T2} - l_{2x}y_{T2}, \\ l_{2z}y_p - l_{2y}z_p = l_{2z}y_{T2} - l_{2y}z_{T2}, \\ \vdots \\ l_{ny}x_p - l_{nx}y_p = l_{ny}x_{Tn} - l_{nx}y_{Tn}, \\ l_{nz}y_p - l_{ny}z_p = l_{nz}y_{Tn} - l_{ny}z_{Tn}. \end{cases} \quad (3)$$

式(3)可以简化成 $\boldsymbol{M}p = \boldsymbol{k}$ 的线性方程组. 其中 M 见式(4)，k 见式(5).

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} l_{1y} & -l_{1x} & 0 \\ 0 & l_{1z} & -l_{1y} \\ l_{2y} & -l_{2x} & 0 \\ 0 & l_{2z} & -l_{2y} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{ny} & -l_{nx} & 0 \\ 0 & l_{nz} & -l_{ny} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\boldsymbol{k} = \begin{bmatrix} l_{1y}x_{T1} - l_{1x}y_{T1} \\ l_{1z}y_{T1} - l_{1y}z_{T1} \\ l_{2y}x_{T2} - l_{2x}y_{T2} \\ l_{2z}y_{T2} - l_{2y}z_{T2} \\ \vdots \\ l_{ny}x_{Tn} - l_{nx}y_{Tn} \\ l_{nz}y_{Tn} - l_{ny}z_{Tn} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

根据最小二乘算法解公式(3) 得到公式(6)，最终得到了 p 点坐标.

$$p = (\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M})^{-1}\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{k}. \quad (6)$$

2 球车位姿测量试验

2.1 试验原理

月球车室内试验时，分别建立测量系统坐标系 $O_m - X_mY_mZ_m$、试验场地坐标系 $O_s - X_sY_sZ_s$、月球车坐标系 $O_c - X_cY_cZ_c$，如图6所示. 测量系统和试验场地固定，首先测量试验场地坐标系相对测量系统坐标系间的姿态关系矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和平移位置矢量 $\boldsymbol{T}_1$，再实时测量月球车坐标系相对测量系统坐标系间的姿态关系矩阵 $\boldsymbol{B}$ 和平移位置矢量 $\boldsymbol{T}_2$，由软件自动计算出月球车坐标系相对试验场地坐标系的姿态关系矩阵 $\boldsymbol{C}$ 和平移位置矢量 $\boldsymbol{T}_3$.

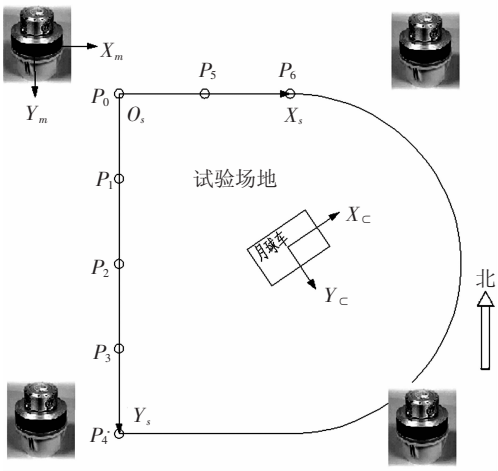


图 6 试验场地坐标系

2.2 试验场地坐标系建立

试验场地坐标系如图6所示. 在场地西北角建立坐标系原点，固定设置标志靶球 P_0；向南定义为 $+Y$ 方向，沿 Y 方向固定设置标志靶球 P_1、P_2、P_3、P_4；向东定义为 $+X$ 方向，沿 X 方向固定设置标志靶球 P_5、P_6；按右手法则确定 Z 方向.

室内 GPS 发射器固定在试验场地四周，建立测量坐标系 $O_m - X_mY_mZ_m$，在该坐标系下测量固定设置在试验场地内的标志靶球 P_0、P_1、P_2、P_3、P_4、P_5、P_6. 在测量软件中利用 P_0、P_1、P_2、P_3、P_4 拟合直线，作为 X_s 轴，利用 P_0、P_1、P_2、P_3、P_4、P_5、P_6 拟合平面，作为 X_sY_s 平面，$P0$ 为原点 O_s. 测量软件自动生成试验场地坐标系 $O_s - X_sY_sZ_s$ 相对于测量系统坐标系 $O_m - X_mY_mZ_m$ 的姿态关系矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和平移位置矢量 $\boldsymbol{T}_1$，并以 FRAME 的形式储存.

2.3 月球车坐标系建立

月球车坐标系由 4 个基准孔定义，如图 7 所示. 坐标系原点定义为 4 个基准孔的对称中心，X 轴指向月球车前进方向与两个孔中心连线平行，Z 轴垂直 4 个孔端面中心构成的平面指向月面，Y 轴与 Z 轴和 X 轴成右手法则.

测量时在 4 个基准孔上分别安装室内 GPS 的信号接收器，4 个接收器在月球车坐标系 $O_c - X_cY_cZ_c$ 下的坐标分别为 $J_1(x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})$、$J_2(x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})$、$J_3(x_{c3}, y_{c3}, z_{c3})$ 和 $J_4(x_{c4}, y_{c4}, z_{c4})$，且相对位置固定.

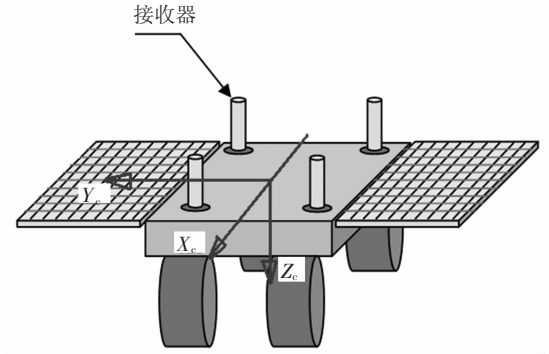


图 7　月球车坐标系

2.4　月球车实时跟踪

4 个接收器随着月球车在试验场地内移动，接收发射器发出的信号，实时计算出每个接收器在测量坐标系 $O_m - X_m Y_m Z_m$ 下的坐标，设坐标分别为 $J_1(x_{m1}, y_{m1}, z_{m1})$、$J_2(x_{m2}, y_{m2}, z_{m2})$、$J_3(x_{m3}, y_{m3}, z_{m3})$ 和 $J_4(x_{m4}, y_{m4}, z_{m4})$，根据几何原理可以得到如下公式：

$$\begin{bmatrix} x_{mi} \\ y_{mi} \\ z_{mi} \end{bmatrix} = \boldsymbol{B} \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \end{bmatrix} + \boldsymbol{T}_2, i = 1,2,3,4. \quad (7)$$

将测量得到的坐标数据代入公式，由最小二乘法求出姿态关系矩阵 $\boldsymbol{B}$ 和位置平移矢量 $\boldsymbol{T}_2$. 实际测量时，由软件实时自动计算得到. 并根据实验场地坐标系相对测量坐标系的姿态关系矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和位置平移矢量 $\boldsymbol{T}_1$，计算得到月球车坐标系 $OX_cY_cZ_c$ 相对实验场地坐标系 $OX_sY_sZ_s$ 的姿态关系矩阵 $\boldsymbol{C}$ 和位置平移矢量 $\boldsymbol{T}_3$[11].

2.5　月球车运动性能分析

当建立完月球车坐标系并实现实时跟踪后，就可以在软件中实时获取巡视器的位置姿态信息，将月球车实时位姿数据与试验场地三维数字信息融合，就可以实时显示月球车运行轨迹，效果如图 8 所示. 并根据位姿信息绘制时间位移曲线、时间速度曲线、时间加速度曲线，并计算月球车的里程统计、计算转弯半径、计算路径偏移等，如图 9 ~ 10 所示.

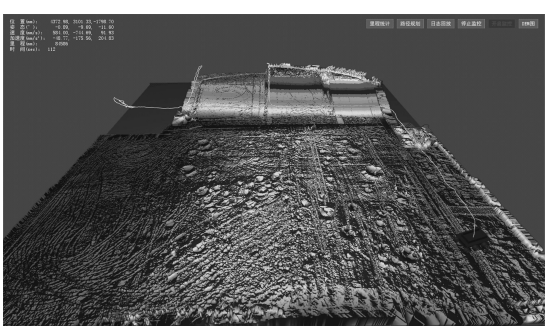


图 8　巡视器位姿测量系统监控效果图

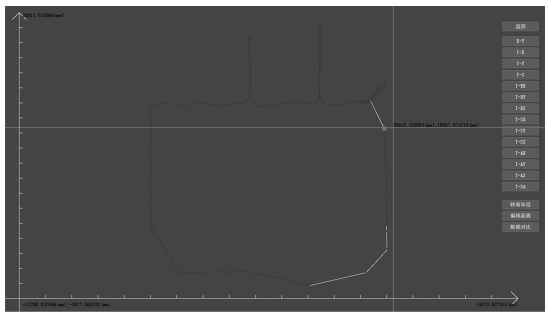


图 9　巡视器运行过程的 $X-Y$ 曲线图

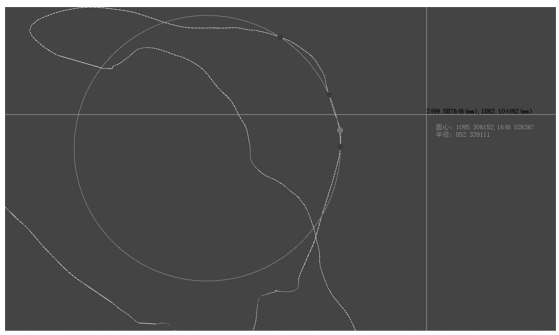


图 10　巡视器运行过程的 $T-X$ 曲线图

3　误差分析

3.1　位置误差

室内 GPS 系统获得某接收器空间坐标的计算理论通过 NPL 认证，其单点位置测量误差与信号接收器接收到发射器的数量有关[12-13]. 如图 11 所示，根据测量不确定度区域正态分布和光线交汇图可知：在 30 m × 30 m 范围内，当只有 2 个发射器同时覆盖到某个测量点时，仅仅可以获得该点的空间坐标 XYZ 值，而精度只能达到 1 mm 左右，当增加 1 个发射器覆盖时（有 3 个发射器），其不确定区域缩小 65%，即精度提高 65%，达到 0.35 mm；如果再增加 1 个发射器（有 4 个发射器）覆盖时，不确定区域再次缩小 10% ~ 20%，即精度再次提高 10% ~ 20%，达到 0.25 mm；4 个以上的激光发射器同时覆盖不确定度区域机会没有变化，即测量精度基本上不再增加. 因此本试验中采用了 4 个发射器，精度可以达到 0.25 mm，即使某个发射器被遮挡精度也能保证在 0.35 mm.

3.2　角度误差

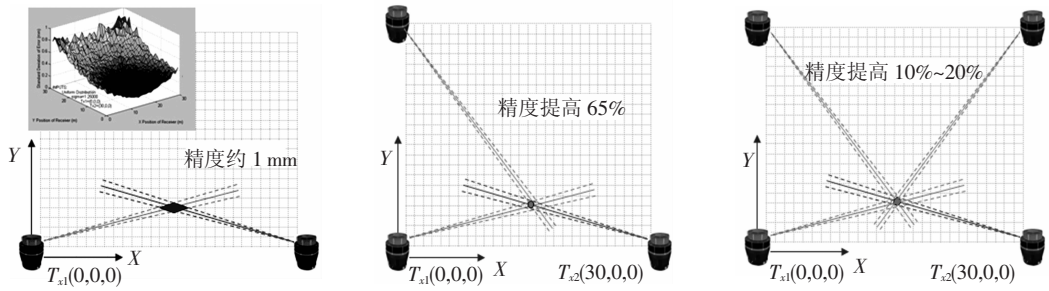
试验系统角度误差 ϕ 可以由月球车上距离最短的两个接收器的位置估算. 由于接收器的测量精度是各向同性的，因此可以将接收器之间的关系简化为二维模型如图 12 所示，假设两个接收器沿 X 轴放置，二者间距为 r，测点精度为 Δr，那么在测量过程中二者的测量指向不确定度 θ 由 r 和 Δr 决定，设 M_1、M_2 为两接收器位置的测量值，则 θ 的计算如下式所示：

$$\theta = \arctan \frac{r_{M1,\,M2}}{\| r_{M1,\,M2} \|} = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \quad (8)$$

θ 的极值计算为

$$\theta_{\max} = \arctan \frac{2\Delta r}{\sqrt{r^2 - 4\Delta r^2}} \quad (9)$$

本试验过程中,接收器之间的最短距离为 500 mm,接收器位置测量不确定度为 0.25 mm,则角度测量精度优于 0.06°,当某个发射器被遮挡时角度测量精度可以达到 0.08°.



(a) 2 台 GPS 发射器 (b) 3 台 GPS 发射器 (c) 4 台 GPS 发射器

图 11 单点位置测量误差

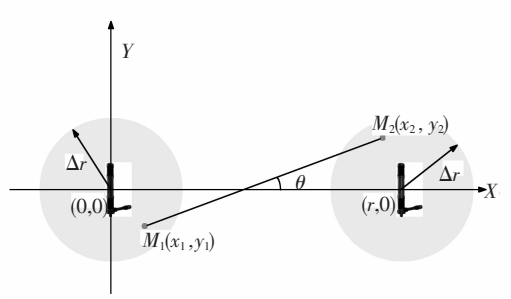


图 12 角度测量误差

4 结 论

室内 GPS 系统测量范围大、测量频率快、相对精度高,在实时监测、大部件装配等大尺寸工程测量中有较强的优势,已经广泛应用于汽车、飞机、船舶制造等领域. 本文根据月球车动态性能测试的需求,设计了室内 GPS 测量方案,从跟踪测量原理及跟踪坐标系建立等方面开展了室内 GPS 系统的技术应用研究. 分析了测量系统实时动态跟踪中的位置测量误差和角度测量误差,可为大尺寸高精度动态测量研究提供一定的参考.

参考文献

[1] YIN Liming, JIA Yang. Algorithm evaluation for lunar rover path-planning [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(4): 996 – 1000.

[2] YIN Liming, WANG Jinsong, Li Xuewen. Cost evaluation of path planning of lunar rovers based on span [J]. Chinese High Technology Letters, 2007, 17(1): 39 – 43.

[3] ZHU Jigui, WANG Dawei, WANG Xin, *et al.* Key techniques on optical coordinate measuring system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 296 – 299.

[4] ZHU Jigui, GUO Lei, YE Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1872 – 1876.

[5] Metris Canada, Inc. Ispace user manual and startup guide[M]. Waterloo: [s. n.], 2009.

[6] MAISANO D A, JAMSHIDI J. Indoor GPS: system functionality and initial performance evaluation [J]. International Journal of Manufacturing Research, 2008, 3(3): 335 – 349.

[7] MUELANER J E, WANG Z, JAMSHIDI J, *et al.* Study of the uncertainty of angle measurement for a rotary-laser automatic theodolite (R – LAT) [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008, 223(B3): 217 – 229.

[8] 杨凌辉,杨学友,劳达宝,等. 采用光平面交汇的大尺寸坐标测量方法[J]. 红外与激光工程,2010,39(6): 1105 – 1109.

[9] QIANG Xifu, LIU Qinwei, SUN Xiaoming, *et al.* Theoretical study of multi-theodolite measurement system [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 1999, 6(1): 88 – 90.

[10] 杨凌辉. 基于光电扫描的大尺度空间坐标测量定位技术研究[D]. 天津:天津大学,2010.

[11] 杨再华. 航天器总装精度测量方法分析[J]. 航天器环境工程, 2007,(6): 390 – 392.

[12] KANG S, TESAR D. A noble 6-DOF measurement tool with indoor GPS for metrology and calibration of modular reconfigurable robots [C]//IEEE ICM International Conference on Mechatronics. Istanbul: [s. n.], 2004.

[13] MOSQUEIRAA G, APETZB J, SANTOS K M, *et al.* Analysis of the indoor GPS system as feedback for the robotic alignment of fuselages using laser radar measurements as comparison [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(6): 700 – 709.

(编辑 张 宏)