

组合测量设备不确定度的实验研究

王少锋¹, 洪军^{1,2}, 贺巧玲¹, 杨杨¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了弥补传统组合式测量系统仅通过仪器的机械组合与测量数据的融合来扩大测量范围、从而提高测量精度的不足,通过分析典型近端与远端测量设备——七关节测量臂与激光跟踪仪的测量模型,提取影响测量不确定度的关键参数,进而基于静态单点重复测量实验,综合评定了各关键参数对测量不确定度分布规律的影响趋势. 实验结果表明:测量臂腰部支撑关节 1 的精度(小于 0.04 mm)明显高于其他关节,因此对终端测量不确定度的影响较小;关节 7 对测量不确定度的影响最小(小于 0.03 mm),而其余各关节转角的增大对测量不确定度的影响均有增大的趋势,其中铰链关节的增幅明显大于转动关节,且越靠近基座端的关节转角变化对不确定度的影响越大;激光跟踪仪水平、竖直方位角对不确定度的影响对称分布于 90°两侧,且随测量极径的增大呈上升趋势.

关键词: 不确定度;关节测量臂;激光跟踪仪

中图分类号: TB92 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0084-06

Uncertainty Experiment for Large Scale Measuring Equipment

WANG Shaofeng¹, HONG Jun^{1,2}, HE Qiaoling¹, YANG Yang¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To make up the shortage of the traditional combined measurement which enlarge measurement range and improve accuracy only by mechanical combination and measured value fusion, the measurement model of the multi-joint measuring arm and the laser tracker are analyzed, and the key parameters affecting measurement uncertainty are extracted. Following the repeated measurements of static single point, the above key parameter influences on uncertainty distribution are evaluated synthetically. The experimental results show that the waist joint 1 exerts lesser influence on the terminal measurement uncertainty, less than 0.04 mm, because the stiffness and accuracy of the waist joint 1 are obviously higher than the other joints; joint 7 has the least influence on it, less than 0.03 mm, which meets the design aim for improving flexibility of measurement arm. The other joints have ascending influence on it, and the influence from the hinge joints gets greater than the rotational joints. The measurement uncertainty, which affected by the laser tracker horizontal and vertical azimuth, distributes symmetrically two sides of 90°.

Keywords: uncertainty; multi-joint coordinate measuring machine; laser tracker

符号表

Ω	关节臂位姿	α	水平方位角, (°)	A_x	x 方向误差模量, mm
P	待测点, m	β	竖直方位角, (°)	A_y	y 方向误差模量, mm
θ_i	关节转角, (°)	L	测量极径, m	A_z	z 方向误差模量, mm
A	误差模量, mm	i	关节编号		

几何测量在装备制造业中扮演着重要的角色,是实现制造与装配精度控制的技术瓶颈。目前,对测量常规尺寸的研究日趋完善^[1],但大型尺寸复杂装备的测量体系还不够健全,例如,难以平衡测量范围大与局部关键结构极高测量精度之间的矛盾,导致现有技术条件下单一采用远距离测量仪器(如激光跟踪仪^[2]等)或近距离测量仪器(如关节式三坐标测量机^[3]等)均无法精确地测量到全部被测特征,需进行多次“转站”测量,但“转站”过程中测量不确定度的多次叠加将导致测量精度大幅降低。因此,基于空间复杂装备大范围、高精度的测量需求,急需研究一种能够极大限度降低测量不确定度的多仪器组合式测量方法。

目前,已出现了基于组合机制的测量系统,如 Metris 公司研发了 iSpace 系统^[4],该系统集成了 iGPS 系统、便携式三维测量臂、激光跟踪仪等多种测量仪器,可实现不同技术优势设备类型的信息互补和优化配置,完成待测特征最小误差的测量。全志民等^[5]组合了激光跟踪仪和关节式三坐标测量机,以激光跟踪仪为系统测量基准,用以解决大型复杂工业测量任务中的测量盲区问题。张福民等^[6]利用激光跟踪仪测距单元精度高的优点,对多路激光跟踪测量系统进行了研究,拓展了激光跟踪仪的测量范围。但是,目前的研究多停留在机械组合式的扩大测量范围,以及终端测量值的简单融合,并未结合仪器不确定度的分布规律来充分挖掘测量规划信息,进行终端测量不确定度的溯源,以此优化测量与融合策略,将终端测量不确定度降至最低。

各国的计量院如德国 PTB、英国 NPL 与美国 NIST^[7]都积极开展了对现场测量不确定度的评定标准和表示方法的研究。张福民等^[8]针对大尺寸测量的特殊性,研究了基于蒙特卡罗法的不确定度的表示方法。虽然上述研究工作仅以测量不确定度为切入点,对统一测量精度的评价方法与仪器校准方法进行了研究,而未对测量仪器不确定度分布规律本身进行研究,但这并不妨碍本文借鉴上述研究思想,通过物理实验,对典型的近端测量设备——多关节测量臂与远端测量设备——激光跟踪仪的不确定度分布规律进行研究,构建不确定度“可观测”、“可控制”模型,以便有效地指导用户选择最优组合测量方案。

1 实验装置和测试方法

实验采用 Faro P12t 关节测量臂和 Leica

AT901-LR 激光跟踪仪,通过分析仪器测量误差模型,提取影响测量不确定度的关键参数,探索表征仪器精度特性的现场不确定度分布规律,以此构建设备的最佳使用规范,为指导用户选择最优组合测量方案奠定基础。

1.1 Faro P12 七关节测量臂

如图 1 所示,测量臂是由 7 个旋转关节与连杆连接形成的一个空间开链式连杆机构,各关节处均配置了高精度旋转编码器,属典型的近端测量设备。基于 D-H 法构建了测量模型,由此解算各关节坐标系的位姿关系,最终确定待测点 P 的三维空间坐标为

$$\mathbf{T}_{i-1,i} = \mathbf{R}(Z_{i-1}, \theta_{i-1}) \mathbf{T}(Z_{i-1}, d_{i-1}) \mathbf{T}(Y_{i-1}, b_{i-1}) \mathbf{T}(X_{i-1}, \gamma_{i-1}) \mathbf{R}(X_{i-1}, \gamma_{i-1}) \mathbf{R}(Y_{i-1}, \Psi_{i-1}) \quad (1)$$

$$P = \prod_{i=1}^7 \mathbf{T}_{i-1,i} d_8 = f(a_i, b_i, d_i, \gamma_i, \Psi_i, \theta_i) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{R}$ 与 $\mathbf{T}$ 分别为关节坐标系转换的旋转与平移矩阵; γ_i, Ψ_i 为 Z_{i-1} 轴与 Z_i 轴平行时分别绕 X_{i-1} 轴和 Y_{i-1} 轴的角度(逆时针方向转动时为正); a_i, b_i, d_i 为沿 X_{i-1} 轴、 Y_{i-1} 轴、 Z_{i-1} 轴方向移动的距离; θ_i 为测量过程中第 i 个连杆绕 Z_{i-1} 轴转过的角度; $\mathbf{T}_{i-1,i}$ 为关节坐标系相对 $\{O_i, X_i, Y_i, Z_i\}$ 的位姿转换矩阵。

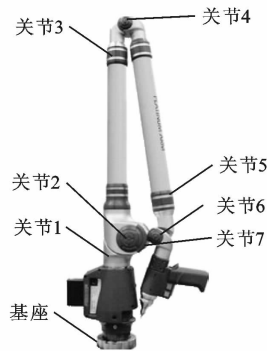


图 1 Faro P12 七关节测量臂

由此可见,仪器在定期校准标定良好的条件下,各关节坐标系的 X_i 轴均保持同向,两相邻关节轴线正交, Ψ_i, a_i 与 b_i 均为 0, γ_i 为 $\pi/2$ (或 $-\pi/2$), d_i 经标定后,为机械结构唯一确定的参数。因此,影响关节臂终端测量精度的关键因素为 θ_i ($i=1\sim7$)。本实验以 $\Omega=(0, \pi/6, 0, \pi/4, 0, \pi/4, 0)$ 为关节臂零位测量位姿,进而分别在 θ_i 的转动范围内均匀提取 5 个测量位置进行 50 次连续测量采样,共获取 7 类、35 组实验数据。

1.2 Leica AT901-LR 激光跟踪仪

Leica AT901-LR 激光跟踪仪(见图 2)集成应

用激光干涉仪、角度解码器和光束导向跟踪机构,可形成半径达 80 m 的球形测量空间,属于典型的远端测量系统. 基于球坐标定位原理,以其回转中心为坐标原点,水平度盘的零方向、法线方向分别为 X 轴、 Z 轴,确定待测点的三维空间坐标为

$$P(L, \alpha, \beta) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \sin \beta \cos \alpha \\ L \sin \beta \sin \alpha \\ L \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

由此可见,仪器在定期校准标定良好的条件下,激光跟踪仪的测量精度主要取决于测角精度和测长精度,即影响终端测量不确定度的关键因素为 L 、 α 与 β .

1.3 测试方法

实验以仪器坐标系为测量基准,基于 L 、 α 与 β , 对其球形测量空间进行三维网格划分,在网格交点处设置测量位置,对待测点进行 50 次连续测量采样. 其中:① L 分别为 2、3、4 和 6.3 m;② α 分别为 45° 、 60° 、 70° 、 80° 、 90° 、 100° 、 110° 、 120° 、 130° 等;③ β 分别为 85° 、 90° 、 95° 和 100° . 该实验部分拟从多组实验数据中提取 L 、 α 与 β 对仪器终端测量不确定度的影响规律.

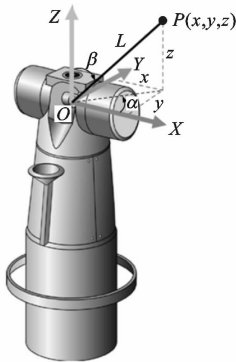


图2 Leica AT901-LR 激光跟踪仪的测量原理

2 实验结果与讨论

2.1 实验数据处理

随机抽取上述实验中的测量数据,上述仪器终端测量的不确定度分布近似球体与椭球体分布,无法精确描述. 因此,为了反映重复测量数据的离散程度,本文引入了标准差的概念,以 A_x 、 A_y 、 A_z 来构造仪器测量误差模量

$$A = (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2)^{1/2} \quad (4)$$

2.2 Faro P12 七关节测量臂不确定度分析

基于初始测量 Ω , 通过改变 θ_i ($i=1 \sim 7$), 对各测量位置处测量数据的标准差 A_x 、 A_y 、 A_z 及 A 进

行统计计算,进而获取各关节转角对误差模量的影响规律,如图3所示.

图3a为测量 A 随 θ_1 ($0 \leq \theta_1 \leq 2\pi$) 的变化趋势,随 θ_1 的角度由小到大, A 的波动幅度较小,总体变化趋势为递减,并在 $\pi \leq \theta_1 \leq 2\pi$ 内基本趋于一致, A_x 、 A_z 与 A 的变化趋势一致,而 A_y 基本保持不变,表明关节转角 θ_1 在 $[\pi, 2\pi]$ 内变化对测量不确定度的影响最小. 图3b为测量误差模量随 θ_2 ($0 \leq \theta_2 \leq \pi/2$) 的变化趋势,随 θ_2 的角度由小到大, A 的波动幅度较大,总体变化趋势由逐渐增大转变为减小,并在 $0 \leq \theta_2 \leq \pi/4$ 内基本趋于一致, A_x 、 A_y 、 A_z 与 A 的变化趋势基本一致,表明关节转角 θ_2 在 $[0, \pi/4]$ 内变化对测量误差模量的影响最小. 测量误差模量随其他关节转角 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 与 θ_6 的变化趋势与规律类同,如图3g所示,随 θ_7 的角度由小到大, A 的波动幅度很小,总体变化趋势基本保持不变, A_x 、 A_y 、 A_z 与 A 的变化趋势基本一致,表明关节转角 θ_7 在 $[0, 2\pi]$ 内变化对测量误差模量的影响不大,验证了此关节的设计目的,即为提高测量臂的灵活性,可选关节7的配置.

2.3 Leica AT901-LR 激光跟踪仪不确定度的分析

随着 α 的变化,对应不同的 L , 测量误差模量的变化趋势如图4所示. 在 L 不变的条件下,随着 α 的角度由小到大, A 的波动幅度较小,总体变化趋势由逐渐减小转变为增大,但增幅并不显著. 其中,在 $L=3$ m、 $\alpha=70^\circ$ 处, A 产生的突变源于该测量位置 A_x 的突变属于实验瑕疵数据. A_x 、 A_z 波动较小,但 A_y 对称分布于 $\alpha=90^\circ$ 两侧,同时在 α 不变的条件下,随着 L 的增大,测量误差模量具有增大的趋势.

由 α 对测量误差模量影响的实验结果可看出: 当 $\alpha=90^\circ$ 时, α 处于对测量误差模量分布影响的对称位置,即影响最小. 因此,为了降低 α 与 β 对测量误差模量的交叉影响,保持水平方位角不变, β 应在 85° 、 90° 、 95° 和 100° 之间变动,如图5所示. 对应不同的 L 测量误差模量的变化趋势,随 β 的角度由小到大, A 的总体变化趋势为先减小后增大,且影响程度较 α 大幅降低,其中 A_x 、 A_z 影响相当, A_y 影响最小. 同时,在 β 不变的条件下,随 L 的增大,测量误差模量具有增大的趋势.

由 α 、 β 对测量误差模量影响的实验结果可看出: 当 $\alpha=90^\circ$ 时、 $\beta=90^\circ$, 分别为 α 、 β 对测量误差模量分布影响的对称位置,即影响最小,且在 α 、 β 不变的条件下随着 L 的增大,测量误差模量具有增大的趋势. 为了进一步验证上述规律,进行了相应的实

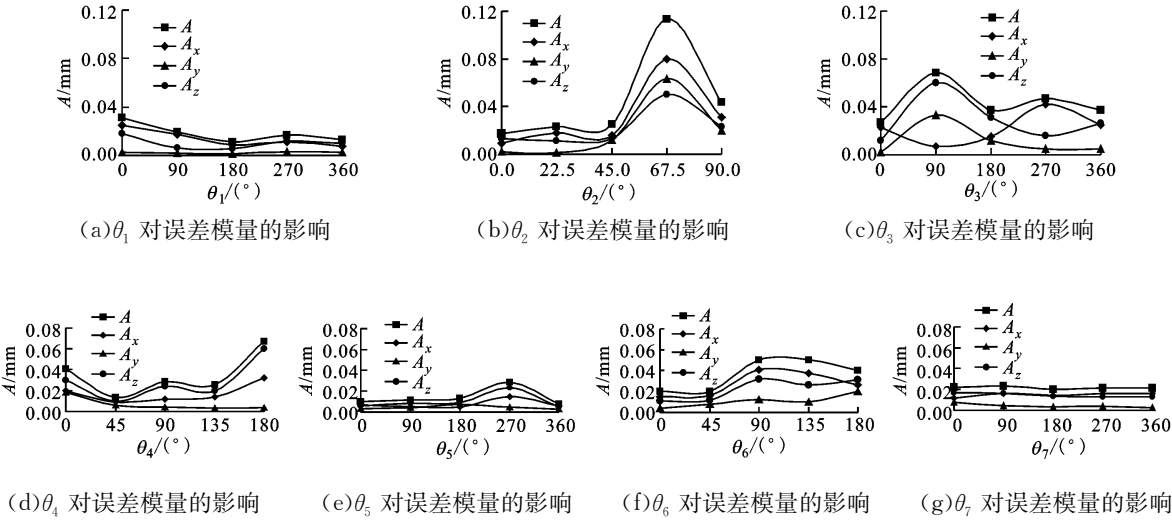


图 3 Faro 终端测量误差模量的影响规律

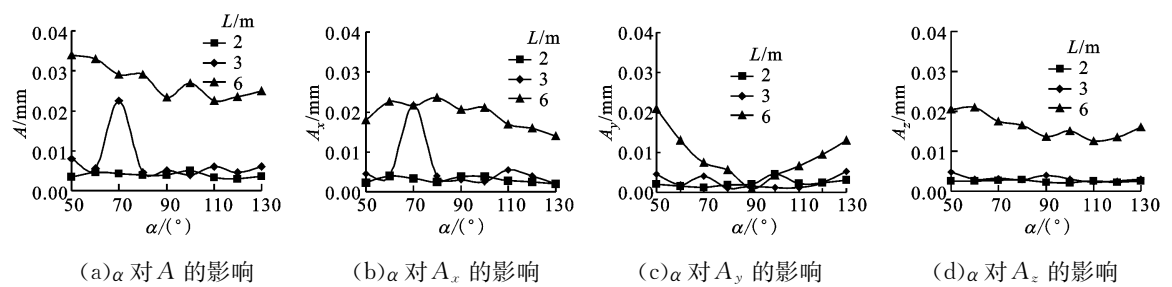


图 4 α 对测量误差模量的影响

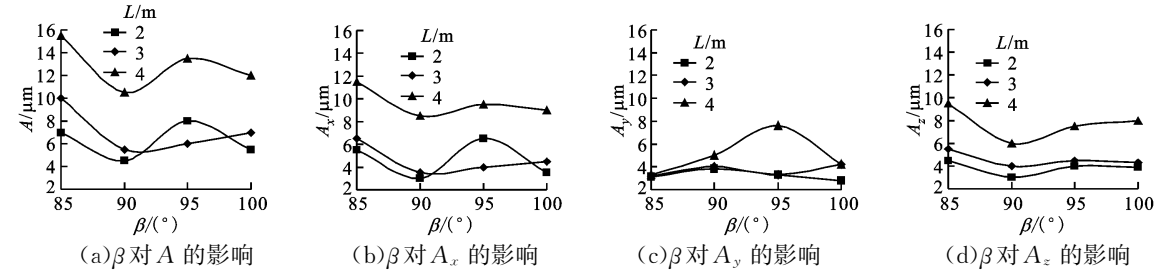


图 5 β 对测量误差模量的影响

验,实验结果如图 6~图 8 所示。

图 6 为当 $\alpha=\beta=0^\circ$ 时,随着 L 的增大, A 的总体变化趋势为逐渐增大, A_x 、 A_y 与 A 的变化趋势基本一致,但 A_y 增长的幅度较小。图 7 为当 $\beta=0^\circ$, α 在 45° 、 90° 和 120° 之间变动时,对应不同 L (2、3、4 和 6.3 m) 的测量误差模量在 β 方向上的变化趋势。误差模量对称分布于 $\alpha=90^\circ$ 两侧,且在 $\alpha=90^\circ$ 处取得最小值。同时,随着 L 的增大,测量误差模量具有增大的趋势。

图 8 为当 $\alpha=0^\circ$, β 在 85° 、 90° 、 95° 之间变动时,对应不同 L (2、3、4 和 6.3 m) 的测量误差模量在 α

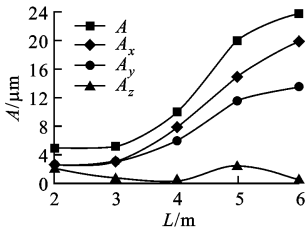
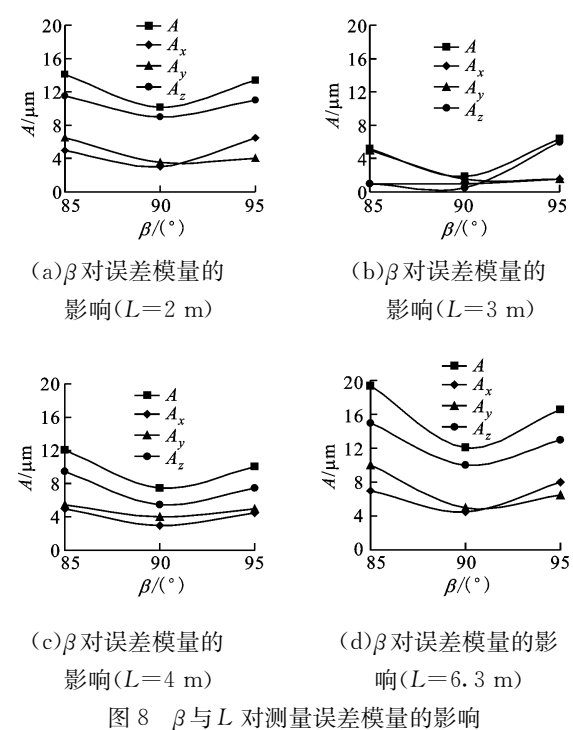
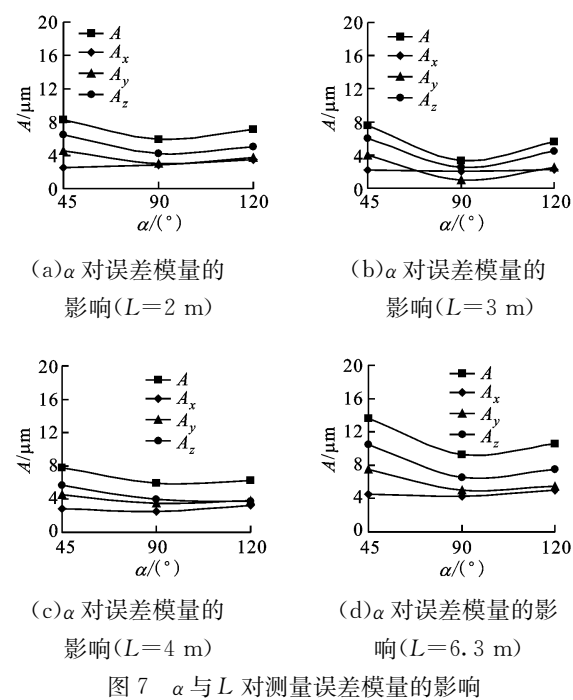


图 6 L 对测量误差模量的影响

方向上的变化趋势。测量误差模量对称分布于 $\beta=90^\circ$ 两侧,在 $\beta=90^\circ$ 处取得最小值,且 β 对测量误差模量的影响较 α 显著。同时,随着 L 的增大,测量误差模量具有增大的趋势。



3 测量案例分析

3.1 Faro P12 测量臂的测量案例

为了验证 Faro P12 七关节测量臂的测量不确定度分布,对 $\Omega_1=(0,\pi/2,0,\pi,0,\pi/2,0)$ 、 $\Omega_2=(0,\pi/2,0,\pi,0,\pi/2,\pi/2)$ 、 $\Omega_3=(\pi/2,\pi/2,0,\pi,0,\pi/2,0)$ 、 $\Omega_4=(0,\pi/4,0,\pi/4,0,\pi/4,\pi/4)$ 进行 10 mm 标准量块长度的测量实验,结果如表 1 所示. 实验结果

表明:①除关节 1、7 外,相对应的其他关节对测量不确定度的影响均具有增大的趋势;②测量臂腰部支撑关节 1 对测量不确定度的影响较小,而选配关节 7 对测量不确定度的影响最小;③对应的铰链关节对测量不确定度的影响明显大于转动关节,且越靠近基座端,关节转角变化对不确定度的影响就越大.

表 1 测量臂实验结果

测量位姿	采样 1		采样 2	
	测量值/mm	误差/mm	测量值/mm	误差/mm
Ω_1	10.040 4	0.040 4	10.039 8	0.039 8
Ω_2	9.962 9	−0.037 1	9.970 4	−0.029 6
Ω_3	10.031 3	0.031 3	9.967 6	−0.032 4
Ω_4	9.996 2	0.003 8	10.010 8	0.010 8

3.2 Leica AT901-LR 激光跟踪仪测量案例

如表 2~表 4 所示,为了验证 Leica AT901-LR 激光跟踪仪的测量不确定度分布,对测量规划长度为 90 mm 的标准量块进行了测量实验,其结果为:①随着 L 的增大,测量不确定度的总体变化趋势为逐渐增大;②随着 α 的增大,不确定度对称分布于 $\alpha=90^\circ$ 两侧,在 $\alpha=90^\circ$ 处取得最小值;③随着 β 的增大,测量不确定度对称分布于 $\beta=90^\circ$ 两侧,在 $\beta=90^\circ$ 处取得最小值,且 β 对测量不确定度的影响较 α 显著;④激光跟踪仪的径向不确定度较小,横向不确定度较大,这与激光跟踪仪测距精度大于测角精度的特性相吻合.

表 2 $\beta=90^\circ, L=3\text{ m}$ 时的测量结果

$\alpha/(^\circ)$	测量值/mm	误差/mm
0	10.063	+0.063
45	10.052	+0.052
90	9.985	−0.015
135	9.945	−0.055
180	9.914	−0.086

表 3 $\alpha=90^\circ, L=3\text{ m}$ 时的测量结果

$\beta/(^\circ)$	测量值/mm	误差/mm
45	10.058	+0.058
60	10.045	+0.045
90	9.858	−0.015
120	9.982	−0.018
135	9.930	−0.070

表 4 $\alpha=90^{\circ},\beta=90^{\circ}$ 时的测量结果

L/m	测量值/mm	误差/mm
2	10. 008	+0. 008
3	9. 858	−0. 015
4	9. 970	−0. 030
5	9. 932	−0. 068
6	9. 870	−0. 130

4 结 论

本文基于静态单点的重复测量实验,分析了典型近端与远端测量设备——七关节测量臂与激光跟踪仪的不确定度分布,进而规划了关节测量臂与激光跟踪仪的测量案例. 实验结果验证了各测量参数对上述设备测量不确定度的影响规律,由此得到的多关节测量臂与激光跟踪仪的使用规范如下.

(1)对于 Faro P12 测量臂:①设备应尽量布置在离测量物体较近的位置;②在铰链关节与转动关节转动能同样到达目标点时,要尽量通过转动关节实现;③选择转动离基座坐标系较远的关节进行操作;④对于铰链关节尽量保持角度不要过大,而对于转动关节应使其处在初始位置周围.

(2)对于 Leica AT901-LR 激光跟踪仪:①仪器与待测体呈纵向布置,即物体的待测摆放位置必需符合不确定度点云的椭球状;②设备的布置应适当地将高精度的测量特征在偏 Y 方向上进行测量.

参考文献:

[1] VADER A M, CHADDA A, ZHU Wenjuan, et al. An integrated calibration technique for multi-camera vision systems[C]//Proceedings of ASME 2010 World Conference on Innovative Virtual Reality. Ames, USA; ASME, 2010: 267-274.

[2] BURGE J H, SU Peng, ZHAO Chunyu, et al. Use of a commercial laser tracker for optical alignment [C]// International Society for Optical Engineering. San Die-

go, USA; SPIE, 2007: 1-12.

[3] 王学影,刘书桂,王斌,等. 关节臂式柔性三坐标测量系统的数学模型及误差分析 [J]. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(4): 262-267.

WANG Xueying, LIU Shugui, WANG Bin, et al. Mathematical model and error analysis of the articulated arm flexible CMM [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005, 3(4): 262-267.

[4] NIKON METROLOGY N V. Metris iSpace prepares large castings for accurate milling in record time [EB/OL]. [2010-10-20]. http://de.nikonmetrology.com/case_studies/inspace/castings/.

[5] 全志民,唐文彦,刘建新,等. 基于激光跟踪仪和坐标测量臂的工业测量系统 [J]. 计量技术, 2008(5): 13-16.

TONG Zhimin, TANG Wenyan, LIU Jianxin, et al. Industrial measuring system based on coordinate measuring machine and laser tracker [J]. Measurement Technique, 2008(5): 13-16.

[6] 张福民,曲兴华,戴建芳,等. 一种现场大尺寸测量精度的评价 [J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2153-2158.

ZHANG Fuming QU Xinghua, DAI Jianfang, et al. A method of precision evaluation for field large-scale measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2153-2158.

[7] CALKINS J M. Quantifying coordinate uncertainty fields in coupled spatial measurement systems [D]. Blacksburg, USA: Virginia Polytechnic Institute, 2002.

[8] 张福民,曲兴华,叶声华. 基于蒙特卡罗仿真方法的大尺寸测量不确定度分析 [J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(1): 184-187.

ZHANG Fumin, QU Xinghua, YE Shenghua. Uncertainty analysis in large-scale measurement based on Monte Carlo simulation method [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(1): 184-187.

(编辑 管咏梅)