

网络化旋转激光经纬仪的现场平差标定方法

贾 昆, 李培林, 王 巍, 潘 晓
(空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051)

摘 要: 针对网络化旋转激光经纬仪定位系统在现场环境中标定精度低、过程复杂以及成本高等问题, 提出了一种高精度快速的现场平差标定方法。利用标定杆采集空间标定点建立发射机与标定杆坐标系转换关系, 间接联系发射机之间的位姿关系, 并采用最小二乘原理求解系统外参数估算值; 以外参数估算值为初值, 采用非线性优化的方法求解系统外参数最优值, 实现系统全局标定。该现场平差标定方法实现了在 5000 mm × 5000 mm 范围内系统测量精度为 0.12 mm, 重复定位精度为 0.02 mm, 能够满足实际现场应用要求。

关键词: 大尺寸测量; 旋转激光经纬仪; 平差标定; 标定杆

中图分类号: TB92; TP274 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2015.11.002

Field adjustment calibration method of network rotary laser theodolites

JIA Kun, LI Pei-lin, WANG Wei, PAN Xiao

(College of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: As positioning system of network rotary laser theodolites (R-LTs) has low accuracy, complex process and high cost of calibration in the field environment, a high-precision and rapid field adjustment calibration method is proposed. The transform relations between the coordinate system of transmitters and the coordinate system of calibration bar are established by collecting space calibration points using a calibration bar. As a result, the pose relations of transmitters are indirectly linked. And the estimated value of the external parameter is solved by the least square principle. Then the estimated value is used as initial value to compute the optimal solution of the external parameter using non-linear optimization methods. And a global calibration is realized finally. The experimental results show that the field adjustment calibration method realizes that the measurement precision of system is 0.12 mm and repeatability precision is 0.02 mm in the range of 5000 mm × 5000 mm, which can satisfy the practical field application requirements.

Key words: large-scale measurement; rotary-laser theodolites; adjustment calibration; calibration bar

1 引 言

随着航空、航天、船舶、汽车等领域在制造装配过程中对大型部件精确定位和位姿实时测控的要求不断提高, 大尺寸测量系统, 如经纬仪测量系统、工业近景摄影测量系统、激光跟踪仪、网络化旋转激光经纬仪定位系统^[1-3]等, 在工业领域中的应用越来越广泛^[4-7]。其中, 网络化旋转激光经纬仪是结合

经纬仪原理和 GPS 原理开发的新型大尺寸空间测量系统, 能够精确测量被测部件的空间三维坐标, 该系统由发射机网络和传感器组成, 具有测量精度高, 测量范围近似等精度扩展, 多目标并行测量等优点, 通过增加发射机来扩大测量范围, 协调了测量精度与大空间的矛盾, 然而, 发射机越多, 分布空间越广, 系统标定过程就越复杂, 网络化测量系统基站坐标

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51405505) 资助。

作者简介: 贾 昆 (1991 -), 男, 硕士, 主要从事激光测量技术方面的研究。E-mail: kunjia0131@163.com

收稿日期: 2015-03-21

系统一精度直接限制系统的测量精度。

文献[8]和[9]提出了基于经纬仪的全局标定方法,文献[10]提出了基于激光跟踪仪的全局标定方法,此类全局标定方法均借助大型辅助测量设备,操作过程较繁琐且成本高,难以达到现场快速标定的要求。针对这一问题,文献[11]提出了基于多对相交激光线的全局标定方法,该方法避免了使用其他测量设备,但受外界环境影响较大,难以在复杂现场环境中应用。在此基础上,文献[12]提出了利用接收器设计直角靶标的平差标定,该方法虽然操作简单,但制约了系统的测量范围,难以满足大尺寸空间测量的要求。

针对网络化旋转激光经纬仪在现场环境中的标定问题,根据系统测量原理,提出了高效实用的现场平差标定方法,主要研究了系统数学模型和现场平差标定算法。采集空间标定点作为已知点,建立发射机与标定杆坐标转换关系,以最小二乘原理求解系统外参数估算值并作为初值,然后以标定杆长为约束建立目标函数,基于 Levenberg-Marquardt 算法^[13-14]采用非线性优化的方法求解外参数最优值,实现系统测量数据统一。在此基础上,进行了实际标定测量实验和重复性测量实验,分析了现场平差标定后系统测量精度和重复定位精度,验证了该方法的可行性。

2 测量系统工作原理

网络化旋转激光经纬仪由发射机网络和传感器组成^[1-3],每台发射机发出2个扇形激光平面,工作时在电机的驱动下对空间进行360°扫描,每4台发射机作为测量单元,多个测量单元连接构成测量网络,置于待测点处的传感器接收多台发射机的激光信号,基于发射机几何结构,计算出激光平面方程,根据空间平面前方交汇原理计算出待测传感器的三维坐标。系统测量过程如图1所示。

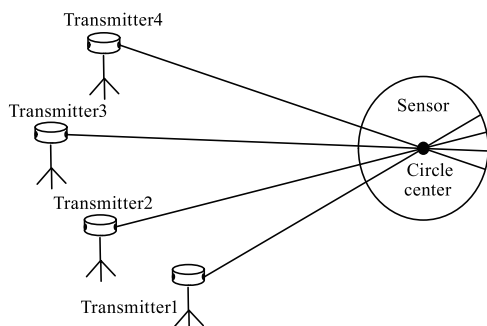


图1 系统测量过程

Fig. 1 Measurement process of system

测量系统中发射机几何模型如图2所示, $i = 1, 2, \dots, n$ 为发射机编号,每台发射机有自身坐标系 $O_i - X_i Y_i Z_i$,激光平面 LP_{1i} 扫过参考传感器时刻作为计时零点,平面 LP_{1i} 、 LP_{2i} 在发射机坐标系下的初始法向量分别为 $H_{1i} = (A_{1i}, B_{1i}, 1)^T$ 、 $H_{2i} = (A_{2i}, B_{2i}, 1)^T$,是结构参数,称为系统内参数,激光平面绕旋转轴旋转时,两个激光平面先后扫过待测点 S ,激光平面相对初始位置的旋转角度分别为 θ_1 和 θ_2 ,通过 S 点时,激光平面的法向量为:

$$H_\theta = R_\theta H \quad (1)$$

式中, R_θ 为旋转矩阵。

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

H 为激光平面初始法向量。

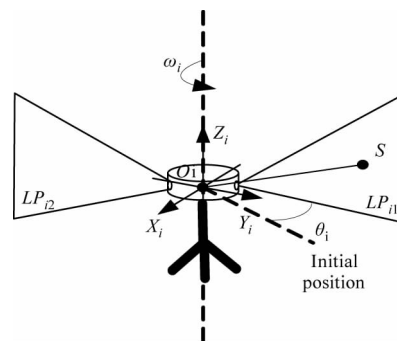


图2 发射机几何模型

Fig. 2 Geometric model of transmitter

由式(1)建立通过 S 点的激光平面方程:

$$H_\theta \cdot (S - O) = 0 \quad (2)$$

式中, S 为待测点坐标; O 为发射机坐标系原点坐标。

由式(1)和式(2)建立单台发射机激光平面的平面方程组,即图1中通过待测点的空间直线方程:

$$L_i: \begin{cases} (R_{\theta 1} H_{1i}) \cdot (S - O_i) = 0 \\ (R_{\theta 2} H_{2i}) \cdot (S - O_i) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

每个测量单元以4条空间直线基于最小二乘原理求解待测点坐标。

由于发射机有各自的坐标系,因此要实现坐标数据的统一,必须将发射机坐标系变换到世界坐标系下。单台发射机变换过程:

$$R_i L_i + P_i \quad (4)$$

式中, L_i 为发射机到待测点方向矢量; R_i 、 P_i 为发射机到世界坐标系的转换矩阵,称为系统外参数。

因此,建立系统数学模型:

$$\begin{cases} R_1 R_{11} H_{11} \cdot (S - P_1) = 0 \\ R_1 R_{21} H_{21} \cdot (S - P_1) = 0 \\ \vdots \\ R_i R_{1i} H_{1i} \cdot (S - P_i) = 0 \\ R_i R_{2i} H_{2i} \cdot (S - P_i) = 0 \\ \vdots \\ R_n R_{1n} H_{1n} \cdot (S - P_n) = 0 \\ R_n R_{2n} H_{2n} \cdot (S - P_n) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $R_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}^\circ$

R_i 为发射机到世界坐标系的旋转矩阵, 含 3 个未知量即发射机坐标系 X 、 Y 、 Z 轴相对于世界坐标系 X 、 Y 、 Z 轴的旋转角 α 、 β 、 γ ; $P_i = (p_{xi}, p_{yi}, p_{zi})^T$ 为发射机坐标系原点在世界坐标系下坐标; H_{1i} 和 H_{2i} 是系统内参数; R_{1i} 、 R_{2i} 是激光平面从初始位置到待测点的旋转矩阵, 是 θ_1 和 θ_2 的函数; S 为待测点坐标。

因此, 系统进行测量之前需要先对数学模型中的内参数 H_{1i} 和 H_{2i} 以及外参数 R_i 和 P_i (即 α_i 、 β_i 、 γ_i 、 p_{xi} 、 p_{yi} 、 p_{zi}) 进行标定, 利用最小二乘原理求解式 (5), 计算出待测点 S 的空间坐标。

3 现场平差标定原理

本文提出的现场平差标定方法是在内参数已知的前提下, 精确标定系统外参数。首先通过多次摆放标定杆采集空间标定点, 可建立发射机与标定杆坐标系之间的转换关系, 将所有发射机统一到发射机 1 坐标系下, 以求解系统外参数估算值; 然后以外参数估算值作为初值, 采用非线性优化的方法求解系统外参数最优值, 实现系统全局标定。标定杆模型如图 3 所示。

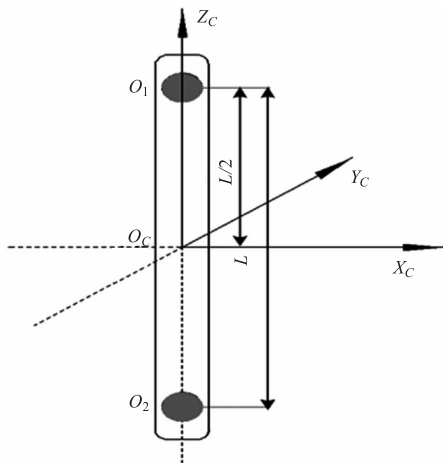


图3 标定杆模型

Fig. 3 Model of calibration bar

主要由二维杆和光电传感器组成, 光电传感器之间的距离已知且为定值。为了简化标定模型, 采集标定点过程中, 标定杆尽量竖直放置, 具体标定过程如下。

3.1 求解外参数估算值

如图 4 所示, 在采集空间标定点过程中, 设标定杆在第一个位置建立的坐标系为标定杆坐标系, 记为 $O_c - X_c Y_c Z_c$, 即所有采集位置的标定点坐标均在 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 下。

$$\begin{cases} O_{1k} = O_{11} + T_{k1} \\ O_{2k} = O_{21} + T_{k1} \end{cases} \quad (6)$$

其中, T_{k1} 是位置 k 相对于标定杆坐标系原点的平移矢量。

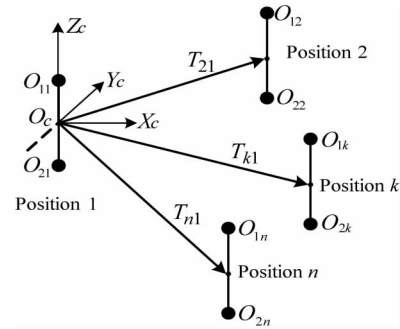


图4 标定点采集过程

Fig. 4 Process of calibration points acquisition

在此基础上, 采集空间标定点, 将发射机转换到标定杆坐标系下, 完成初步定向。

1) 标定杆置于位置 1 时, 根据式 (5) 建立单台发射机与标定杆定向模型:

$$\begin{cases} R_i R_{1i}^{O_{11}} H_{1i} \cdot (O_{11} - P_i) = 0 \\ R_i R_{2i}^{O_{11}} H_{2i} \cdot (O_{11} - P_i) = 0 \\ R_i R_{1i}^{O_{21}} H_{1i} \cdot (O_{21} - P_i) = 0 \\ R_i R_{2i}^{O_{21}} H_{2i} \cdot (O_{21} - P_i) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $R_{1i}^{O_{11}}$ 、 $R_{2i}^{O_{11}}$ 、 $R_{1i}^{O_{21}}$ 、 $R_{2i}^{O_{21}}$ 为发射机激光平面从初始位置到标定点 O_{11} 、 O_{21} 的旋转矩阵, 是 θ_1 和 θ_2 的函数; H_{1i} 和 H_{2i} 为系统内参数; O_{11} 和 O_{21} 为位置 1 的标定点在标定杆坐标系下坐标 $O_{11} = (0, 0, L/2)^T$, $O_{21} = (0, 0, -L/2)^T$; R_i 为发射机到标定杆坐标系的旋转矩阵, 含 3 个未知量; P_i 为发射机坐标系原点在标定杆坐标系下的坐标, 含 3 个未知量。因此得到一个含有 6 个未知量的方程组。

2) 标定杆置于 k 位置时, 由式(7)得:

$$\begin{cases} R_i R_{1i}^{01k} H_{1i} \cdot (O_{1k} - P_i) = 0 \\ R_i R_{2i}^{01k} H_{2i} \cdot (O_{1k} - P_i) = 0 \\ R_i R_{1i}^{02k} H_{1i} \cdot (O_{2k} - P_i) = 0 \\ R_i R_{2i}^{02k} H_{2i} \cdot (O_{2k} - P_i) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, R_{1i}^{01k} 、 R_{2i}^{01k} 、 R_{1i}^{02k} 、 R_{2i}^{02k} 为发射机激光平面从初始位置到标定点 O_{1k} 、 O_{2k} 的旋转矩阵; O_{1k} 和 O_{2k} 为 k 位置的标定点在标定杆坐标系下坐标, 由式(6) 得:

$$\begin{cases} O_{1k} = (0, 0, L/2)^T + T_{k1} \\ O_{2k} = (0, 0, -L/2)^T + T_{k1} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $T_{k1} = (t_{xk1}, t_{yk1}, t_{zk1})^T$ 是标定杆在 k 位置到位置 1 的平移矢量, 含 3 个未知量; R_i 和 P_i 与位置 1 时一致。

因此, 标定杆移动一个位置将增加 3 个未知数及 4 个方程。移动 n 个位置时, 根据式(7) 建立定向约束方程组, 方程共 $4n$ 个, 未知数共 $6 + 3(n-1)$ 个, 基于最小二乘原理求解该方程组计算 R_i 和 P_i , 得到发射机与标定杆坐标系的转换关系。其中, 发射机 i 到发射机 1 的转换关系:

$$\begin{cases} R_{i1} = (R_1)^{-1} R_i \\ P_{i1} = (R_1)^{-1} (P_i - P_1) \end{cases} \quad (10)$$

式中, R_{i1} 为发射机 i 到发射机 1 的旋转矩阵; P_{i1} 为发射机 i 坐标系原点在发射机 1 坐标系下的坐标; R_{i1} 和 P_{i1} 为系统外参数估算值。

3.2 求解外参数最优值

外参数估算值作为迭代优化初值, 以标定杆长为约束建立目标函数:

$$J = \sum_{i=1}^n (L_i - L)^2 \quad (11)$$

式中, L_i 为标定杆置于位置 i 时两端光电传感器之间距离计算值; L 为标定杆两端光电传感器实际距离。

在测量空间内以任意姿态放置标定杆, 测量标定杆两端光电传感器的空间坐标, 并采用 Levenberg-Marquardt 方法对式(11) 进行非线性优化, 得到系统外参数最优值, 实现系统全局标定。现场平差标定流程图如图 5 所示。

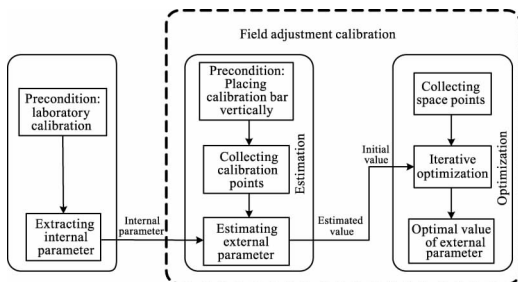
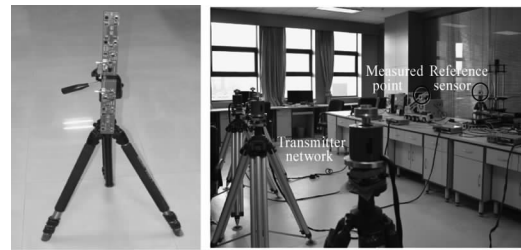


图 5 现场平差标定流程图

Fig. 5 Flowchart of field adjustment calibration

4 实验结果和分析

为了验证现场平差标定方法的可行性, 进行了实际标定测量实验和重复性测量实验, 分别对标定精度和重复定位精度进行分析。实验中以 4 台发射机作为标定单元, 近半圆形布置, 各发射机间相距约 2 m, 在距离发射机约 5 m 处放置标定杆, 借助水平仪保证标定杆尽量竖直放置, 标定杆实物图如图 6(a) 所示, 网络式旋转激光经纬仪如图 6(b) 所示。



(a) 标定杆实物 (b) 网络化旋转激光经纬仪

图 6 标定杆和测量系统实物图

Fig. 6 Image of calibration bar and measurement system

实验中利用高精度三维运动平台进行系统内参数标定。将传感器置于三维台上, 控制三维运动平台采集标定点数据, 采集方式为: 3 行 11 列, 行距是 100 mm, 列距是 50 mm, 通过优化求解由 8 个平面方程构成的超定方程组, 得到发射机内参数, 作为现场平差标定已知条件, 并按图 5 所述流程对系统进行现场平差标定。

为检测现场平差标定的标定精度, 实验中借助一个两端分别布置传感器的标准杆, 杆长经过激光跟踪仪测量为 $L = 914.173$ mm, 标准杆置于测量空间内不同位置, 用经过现场平差标定方法标定的系统测量两端传感器坐标, 计算杆长, 并与实际值 (914.173) 进行比较。表 1 为现场平差标定后系统测量不同位置标准杆端点的空间坐标及杆长测量值与实际值比较结果。

为检测现场平差标定方法标定后系统重复定位精度, 本文进行了系统重复性测量实验, 对系统重复精度进行分析, 用标定后的系统测量空间内 25 个固定点, 每个点重复测量 30 次, 各坐标分量重复定位精度如图 7 所示。

对于网络化旋转激光经纬仪, 分别进行标定测量实验和重复性测量实验, 分析实验数据可以得到以下结论:

1) 由表 1 可以看出, 现场平差标定后, 系统测

量杆长与实际杆长相比,偏差在 ± 0.12 mm 内,充分验证该方法的可行性。

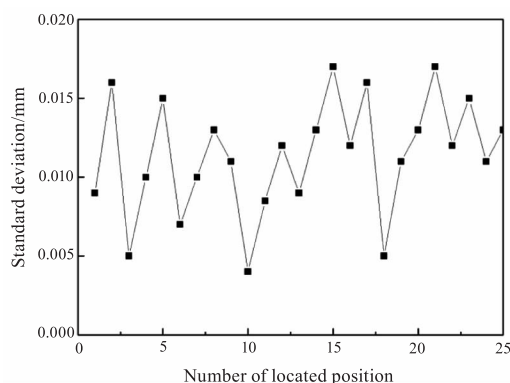
2) 由图 7 可以看出,现场平差标定后,系统对固定点进行重复测量,各坐标分量重复定位精度为

0.02 mm,满足现场应用要求,而且在实验过程中,现场平差标定方法操作简单、标定速度快,能够大幅度提高工作效率,充分体现了该方法在现场应用中的优越性。

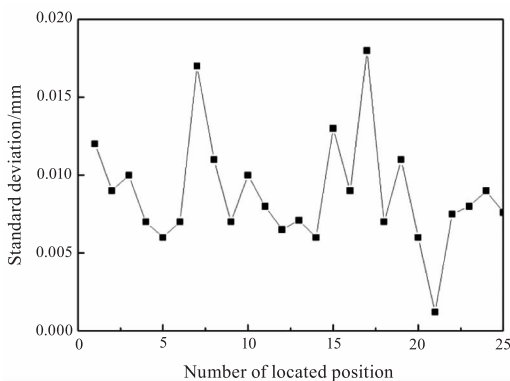
表 1 测点三维坐标及比对结果(单位:mm)

Tab. 1 Three-dimensional coordinates of measured points and intercomparison results (Unit:mm)

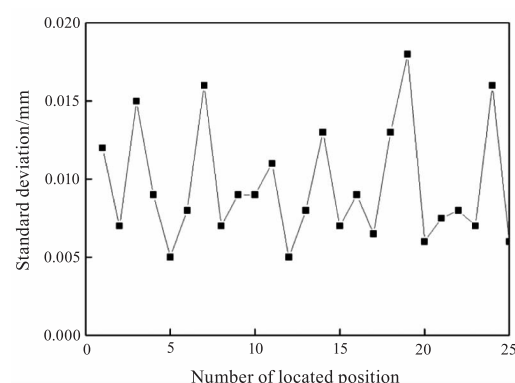
NO.	Sensor 1			Sensor 2			Distance	Error
	X_1	Y_1	Z_1	X_2	Y_2	Z_2		
1	1 520.223	4 100.021	55.354	2 207.042	3 496.660	67.820	914.287	0.114
2	1 506.256	4 048.142	57.546	2 187.362	4 657.589	70.460	914.056	-0.117
3	1 515.102	4 593.800	53.542	2 228.235	4 022.132	65.771	914.064	-0.109
4	1 524.023	3 023.492	53.026	2 231.605	3 602.336	65.683	914.272	0.099
5	2 410.546	3 082.416	56.456	3 129.803	3 646.705	69.347	914.286	0.113
6	3 721.645	3 100.475	57.021	4 429.803	3 678.278	69.509	914.057	-0.116
7	3 432.987	-4 921.472	56.492	4 128.959	-4 328.733	69.023	914.261	0.088
8	3 494.617	-4 425.361	56.156	4 212.145	-3 859.207	68.816	914.077	-0.096
9	3 428.265	-3 965.421	55.362	4 116.873	-3 364.433	67.735	914.068	-0.105
10	4 550.489	-4 986.452	55.145	5 258.478	-4 408.093	67.819	914.280	0.107



(a) x坐标标准差



(b) y坐标标准差



(c) z坐标标准差

图 7 系统重复定位精度

Fig. 7 Repeatability of system

3) 分析上述数据可以看出,现场平差标定仍具有一定误差,原因主要在于电机转速波动、发射机转轴偏摆以及传感器信号提取存在偏差,因此,通过减小硬件误差,有利于提高标定精度和系统测量精度。在后续工作中,将在提高系统精度方面做进一步研究。

5 结论

为解决网络化旋转激光经纬仪在现场环境的精确标定问题,根据系统测量模型,提出了一种高精度

快速的现场平差标定方法,该方法利用标定杆采集标定点,建立系统定向模型,得到系统外参数估算值;基于 Levenberg-Marquardt 算法采用非线性优化方法求解外参数最优值,统一系统测量数据。实验结果表明,现场平差标定方法实现了在 $5000\text{ mm} \times 5000\text{ mm}$ 范围内系统测量精度为 0.12 mm ,重复定位精度为 0.02 mm ,并分析了产生误差的原因,通过改善硬件误差对整体测量的影响,标定精度和系统测量精度将进一步提高。

参考文献:

- [1] LIU Zhigang, XU Yaozhong, LIU Zhongzheng, et al. A large scale 3D positioning method based on a network of rotating laser automatic theodolites [C]. Harbin: International Conference on Information and Automation, 2010: 513–518.
- [2] Muelaner J E, WANG Z, Martain O, et al. Verification of the indoor GPS system, by comparison with calibrated coordinates and by angular reference [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(6): 2323–2331.
- [3] LAO Dabao, YANG Xueyou, ZHU Jigui, et al. Constructing measuring network with scanning planar laser space position systems [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 22(2): 261–265. (in Chinese)
劳达宝, 杨学友, 郝继贵, 等. 扫描平面激光空间定位系统测量网络的构建 [J]. 光电子·激光, 2011, 22(2): 261–265.
- [4] HE Binggao, AN Zhiyong. Research on horizontal measurement technology based on laser radar [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(8): 866–869. (in Chinese)
何秉高, 安志勇. 基于激光雷达的水平测量技术研究 [J]. 激光与红外, 2014, 44(8): 866–869.
- [5] SUN Bo, ZHU Jigui, REN Yu, et al. A novel method for calibrating linear array cameras based on laser tracker [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(2): 311–316. (in Chinese)
孙博, 郝继贵, 任瑜, 等. 一种利用激光跟踪仪标定线阵相机的方法 [J]. 光电子·激光, 2014, 25(2): 311–316.
- [6] LU Rongsheng, LI Wanhong, LAO Dabao, et al. Angular error compensation for laser tracker [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2299–2305. (in Chinese)
卢荣胜, 李万红, 劳达宝, 等. 激光跟踪仪测角误差补偿 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2299–2305.
- [7] ZHI Qiang, HUO Yujing, GONG Ke. Handheld laser rangefinder and its transmitter circuit [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(5): 532–535. (in Chinese)
智强, 霍玉晶, 巩柯. 手持激光测距仪及其发射电路 [J]. 激光与红外, 2013, 43(5): 532–535.
- [8] ZHANG Guangjun, WEI Zhenzhong. Unique world coordinates based global calibration method for multi-vision inspection system [J]. Journal of Beijing University Aeronautics and Astronautics, 2007, 32(11): 1268–1272. (in Chinese)
张广军, 魏振忠. 多视觉检测系统的世界坐标系唯一全局标定方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 32(11): 1268–1274.
- [9] Lu R S, Li Y F. A global calibration method for large-scale multi-sensor visual measurement systems [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 116(3): 384–393.
- [10] LI Zhe, DING Zhenliang, YUAN Feng. Global calibration method for multi-vision measurement system with coplanar targets [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(3): 467–472. (in Chinese)
李喆, 丁振良, 袁峰. 基于共面点的多视觉测量系统的全局标定 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 467–472.
- [11] LIU Q Z, SUN J H, LIU Z, et al. Global calibration method of multi-sensor vision system using skew laser lines [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(2): 405–410.
- [12] 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)
劳达宝, 杨学友, 郝继贵, 等. 网络式激光扫描空间定位系统标定技术研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(6): 1–6.
- [13] Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm; implementation and theory [M]. Numerical Analysis; Springer Berlin Heidelberg, 1978: 105–116.
- [14] SUN Junhua, WU Ziyang, LIU Qianzhe, et al. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 633–640. (in Chinese)
孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视觉双目视觉传感器的现场标定 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 633–640.