

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205480

一种双臂激光测距系统设计和误差分析*

汪石农¹ 程志军² 任超洋² 万仕帅¹

(1. 安徽工程大学电气工程学院 芜湖 241000; 2. 龙信建设集团有限公司 南通 226100)

摘要:长度是7个基本物理量之一,在人们工作和生活中有着广泛的应用场景。本文提出了一种由两个激光测距传感器构成的双臂激光测距系统,可以通过非接触方式测量仪器与空间中任意一点以及空间中任意两点之间的距离,还具备测量阴角、阳角和二维垂直度的功能。本系统测量误差从理论上被分析,并通过MATLAB软件进行了仿真。实际的实验测试表明,测量距离在1 m以内时绝对误差能控制在1 mm以内,测量距离在50 m以内时相对误差能控制在1‰的数量级。同时,重复性测量实验和测量不确定度评定验证了本系统的误差指标,也为本系统的改进指明了方向。本仪器还具有功耗低、成本低和便于便携化等优势,因此有着广阔的应用前景。

关键词:双臂测距;激光测距;角度编码器;垂直度测量;误差分析

中图分类号: TH711; TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.40

Design and error analysis of a two-arm laser ranging system

Wang Shinong¹ Cheng Zhijun² Ren Chaoyang² Wan Shishuai¹

(1. School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China;

2. Longxin Construction Group Co., Ltd., Nantong 226100, China)

Abstract: Length is one of the seven basic physical quantities, which is widely used in people's work and life. In this paper, a two-arm laser ranging system composed of two laser ranging sensors is proposed. It can measure the distance between the instrument and any point in space and between any two points in space in a non-contact way. It also has the function of measuring internal angle, external angle and two-dimensional perpendicularity. The measurement error of the system is analyzed theoretically and simulated by MATLAB software. The actual experimental test shows that the absolute error can be controlled within 1 mm when the measurement distance is less than 1 m, and the relative error can be controlled within the order of 1‰ when the measurement distance is less than 50 m. And the repeatability measurement experiment and measurement uncertainty evaluation verify the error index of the system, and point out the direction for the system improvement. The instrument also has the advantages of low power consumption, low cost and easy portability, so it has broad application prospects.

Keywords: two-arm ranging; laser ranging; angle encoder; perpendicularity measurement; error analysis

0 引言

长度和距离测量在人们日常生活、工程建设、机械加工、工业生产和地形勘察与测绘等领域有着广泛的应用。随着社会的发展,人们对长度测量仪器也提出了更高的要求。设计出功能强、使用方便和价格便宜的长度测量

仪器将会具有很广阔的应用前景,同时也是科研人员追求的目标。

长度测量方式可以分为接触式测量和非接触式测量两种,其中接触式长度测量仪器的种类有很多,比如钢卷尺、钢直尺、游标卡尺和千分尺等,这些不同种类的仪器在不同应用场合被使用。对于接触式长度测量仪,往往具有量程不大或在量程大时具有误差大的特点,并且在

接触不到或不方便接触的地方更是无能为力。非接触式测量方法是以光电、电磁和超声波等技术为基础,在仪器与被测物体表面不接触的情况下获取相应的长度^[1]。现有的非接触式长度测量方法主要有基于红外技术^[2-4]、超声波技术^[5-7]和激光技术^[8-11]等。随着技术的快速发展,这些非接触式测量仪表向高集成度、高精度和高度智能化方向发展,在各种场合下有着越来越广泛的应用。但是对于空间中任意两点之间距离的测量,这类仪器还是无法实现。

现有的双目测距基本都是基于计算机视觉技术,利用空间点在左右相机图像上的视差来获取场景的三维信息,进而达到测距的目的。杨敬辉等^[12]提出了一种基于 ORB 特征的双目测距方法,并具有测距精度高、运行速度快和鲁棒性强的优势。安果维等^[13]提出一种将显著性检测与焦距拟合相结合的双目测距方法,达到提升算法执行速度的目的,同时还提升双目测距的精度。孔焱斌^[14]重点研究了高精度双目测距中的关键技术,并通过实验对相关的理论进行了验证。李一航等^[15]提出了一种基于透视变换的远距离双目测距方法,通过透视变换和三角测量的方法计算目标物体与相机之间距离。对于双目视觉测距系统,由于涉及到较为复杂的立体标定、立体校正和立体匹配等图像处理算法,因此对系统存储单元容量和 CPU 运算性能要求较高,测量的实时性不够好,同时在系统的产品化、小型化和便携化等方面具有较大的难度。

本文提出了一种由两个激光测距传感器构成的双臂激光测距系统,通过两个激光测距传感器完成测量仪器与空间中任意一点以及空间中任意两点之间距离的非接触测量。系统还内置了角度编码器和陀螺仪等传感器,因此集激光测距、靠尺和阴阳角尺等功能于一体,实现了一机多用。实际测量实验结果表明,本系统的测量精度要优于现有的双目视觉测距,同时在成本、功耗和产品便携化等方面具有明显的优势。通过互联网搜索引擎和各类中英文数据库检索,并无发现类似产品,因此本系统有着广阔的市场应用前景。

1 双臂激光测距系统原理

本双臂激光测距系统由左、右两臂组成,如图 1 所示。左、右两臂各装一个激光传感器,图 1 中 D、E 两点分别为两个激光束的发射点,O 点为左、右两臂转动轴的中心点。两个激光传感器发射的激光束要严格地与臂的左右边平行,且左边激光束发射点 D 与左臂右边界距离等于右边激光束发射点 E 与右臂左边界距离,即图 1 中的 d 。因此当左、右两臂从合为一体的状态切换到完全平行的状态(即角度 α 从 0° 变化到 180°)时,两边

激光束反向延长线的交点一定在线段 OC 或线段 OC 延长线的交点上。

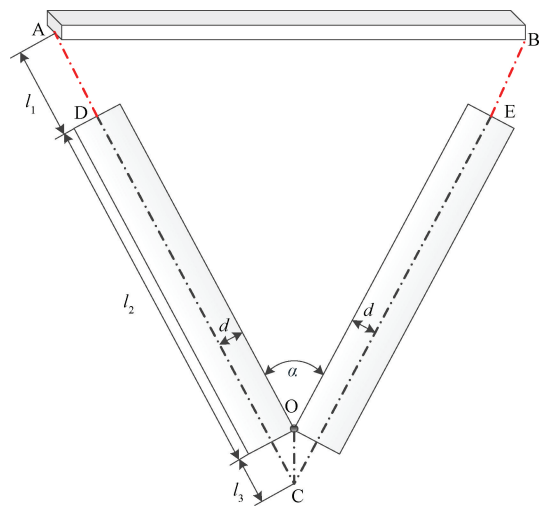


图 1 双臂激光测距原理

Fig. 1 Schematic diagram of binocular laser ranging

设左、右两臂的夹角为 α ,由图 1 可知 l_3 的长度为:

$$l_3 = \frac{d}{\tan \frac{\alpha}{2}} \quad (1)$$

设左边激光发射点 D 与 A 点之间的长度为 l_1 ,左、右两臂的长度为 l_2 ,则构成三角形 ABC 的 AC 边的长度 l_{AC} 为:

$$l_{AC} = l_1 + l_2 + l_3 \quad (2)$$

同理可以得到三角形 ABC 另一条边 BC 的长度 l_{BC} ,则空间中任意两点 A、B 之间的长度 l_{AB} 为:

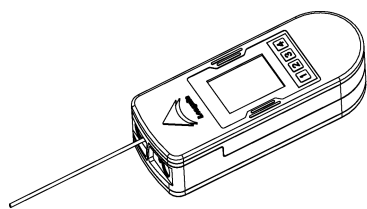
$$l_{AB} = \sqrt{l_{AC}^2 + l_{BC}^2 - 2l_{AC}l_{BC}\cos\alpha} \quad (3)$$

另外,左、右两臂转动轴中心点 O 处内置了角度编码器用于测量左、右两臂的夹角 α ,同时系统内部还集成有陀螺仪传感器用于测量二维垂直度,因此本系统具有单臂测距、双臂测距、垂直度测量、阴角测量和阳角测量等多种功能,如图 2 所示。

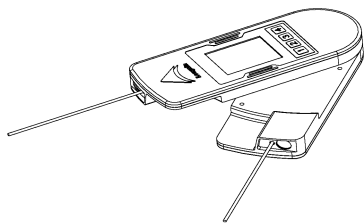
2 系统电路和模型设计

图 3 给出了本系统的硬件结构框图,其中图 3(a)给出了电源部分结构框图,图 3(b)给出了 STM32 ARM 的外围结构框图。本系统内部装有容量为 3 500 mAh 的锂电池,正常工作时由锂电池通过 DC/DC 转换器和低压降稳压器分别产生 5 V 和 3.3 V 的稳定电压给控制器和各种传感器供电。另外,系统还可以采用 USB 接口使用外部电源给锂电池充电,同时也给系统供电。

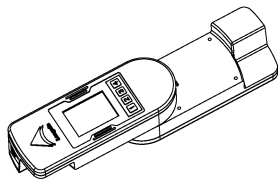
由图 3(b)可以看出,本系统配置了 2 个激光传感器,分别装在左、右两臂的前端用于测量各自激光发射点



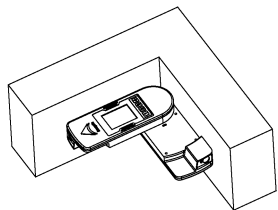
(a) 单臂测距
(a) Single arm ranging



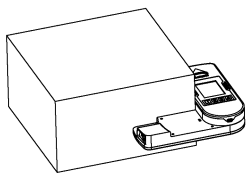
(b) 双臂测距
(b) Dual arm ranging



(c) 垂直度测量
(c) Perpendicularity measurement



(d) 阴角测量
(d) Internal angle measurement



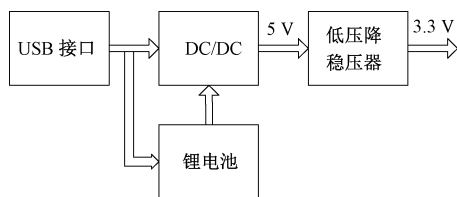
(e) 阳角测量
(e) External angle measurement

图 2 双臂激光测距系统功能示意图

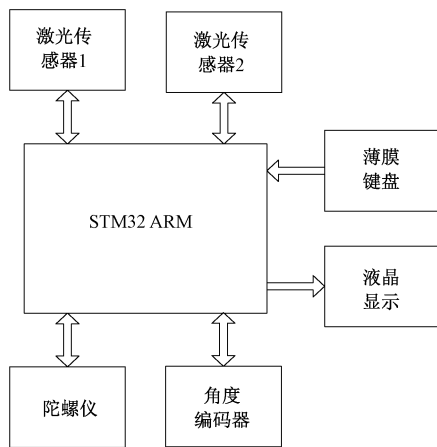
Fig. 2 Functional diagram of binocular laser ranging system

到空间中任意一点之间的距离。本系统采用的激光传感器是波长为 635 nm 的低功率激光器,其测量标准差是 1.0 mm。

本系统要求阴阳角分辨率为 0.05°,同时长度测量相对误差指标为 1‰,而 l_{AB} 的测量误差和角度的精度密切相关,因此本系统对角度编码器的精度要求较高。对于



(a) 电源部分结构框图
(a) Block diagram of power supply



(b) STM32 ARM 外围结构框图
(b) Peripheral block diagram of STM32 ARM

图 3 系统硬件结构框图

Fig. 3 Block diagram of system hardware

市场上现有的基于霍尔原理的磁敏角度传感器虽然价格相对便宜,但基本都是模拟量输出。当传感器以较低电压供电时,输出的模拟电压或模拟电流会由于系统负载轻微波动而发生小幅度变化,从而影响到角度精度,因此此类传感器在本系统中不被使用。对于光电编码器,现有的技术能实现高分辨率和高精度,因此在智能制造等高端应用中得到广泛的使用。但是对于高分辨率的光电编码器,要么外径尺寸偏大要么价格相对昂贵,同时还容易受灰尘和油污的污染,因此本系统也不考虑这类传感器。而基于巨磁阻原理的角度编码器可检测平行于封装表面磁场的 360°变化,同时其电路及机械结构设计简单、成本低和空间小^[16]。这类传感器的角度分辨率能达到 15 位(即 0.01°),并可设任意机械位置为零点,降低了仪器的安装难度,因此被本系统采用。

本系统的机械结构由左、右两臂组成,两臂通过交叉滚子轴承连接构成一个整体,左臂传感器的数据通过转轴处电滑环传递给右臂的 STM32 ARM 控制器。如图 2 所示,在需要双臂测距、垂直度测量和阴阳角测量时两臂展开,在单臂测距或系统不工作时两臂合为一个整体,减少了仪器体积也增加了仪器美观性,本系统实现的样机实物图片如图 4 所示。



图 4 样机实物图片
Fig. 4 Picture of prototype

3 系统误差分析和实验

在本系统中, l_{AC} 和 l_{BC} 的测量误差分别由激光传感器 1 和激光传感器 2 的误差决定, 角度的测量误差由角度编码器决定, 垂直度测量误差由陀螺仪决定, 而这些传感器在选型时就确保了它们的误差能满足系统指标要求。而长度 l_{AB} 是间接测量值, 由式(3)可知, l_{AB} 的误差是直接测量值 l_{AC} 、 l_{BC} 和 α 误差的函数, 即函数误差。

对于多元函数 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其增量 dy 可用函数的全微分表示^[17], 即:

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \quad (4)$$

在本系统中, 直接测量值 l_{AC} 、 l_{BC} 和 α 误差 Δl_{AC} 、 Δl_{BC} 和 $\Delta\alpha$ 的数值皆为微小值, 可以近似代替微分量 dl_{AC} 、 dl_{BC} 和 $d\alpha$, 所以 l_{AB} 误差 Δl_{AB} 的近似计算公式为式(5):

$$\Delta l_{AB} = \frac{\partial l_{AB}}{\partial l_{AC}} \Delta l_{AC} + \frac{\partial l_{AB}}{\partial l_{BC}} \Delta l_{BC} + \frac{\partial l_{AB}}{\partial \alpha} \Delta \alpha = \frac{l_{AC} - l_{BC} \cos \alpha}{\sqrt{l_{AC}^2 + l_{BC}^2 - 2l_{AC}l_{BC} \cos \alpha}} \Delta l_{AC} + \frac{l_{BC} - l_{AC} \cos \alpha}{\sqrt{l_{AC}^2 + l_{BC}^2 - 2l_{AC}l_{BC} \cos \alpha}} \Delta l_{BC} + \frac{l_{AC} l_{BC} \sin \alpha}{\sqrt{l_{AC}^2 + l_{BC}^2 - 2l_{AC}l_{BC} \cos \alpha}} \Delta \alpha \quad (5)$$

为了对 Δl_{AB} 和各个直接测量值误差之间的关系进行量化分析, 在 MATLAB 中对式(5)进行了仿真。 l_2 和 d 根据样机实际大小来取值, 分别是 180 和 14.5 mm。在图 5 中, l_{AC} 的取值取为 50 000 mm 并假定没有误差, α 是在 0° 和 180° 之间无误差地变化, 而 l_{BC} 分别取 10 000、20 000、30 000、40 000 和 50 000 mm 5 个不同的值, 并假定 l_{BC} 在 5 个不同取值下的测量误差都为 1 mm。从图 5

可以看出, 在 5 种不同的情况下, α 在 $[0^\circ, 180^\circ]$ 区间内变化时, Δl_{AB} 的数值始终在 $[-1, +1]$ 区间内。因此, 可以得出如下结论: 当 α 没有测量误差时, l_{AB} 的测量误差能和 l_{AC} 、 l_{BC} 的测量误差基本保持一致, 并且不会随着 l_{AC} 、 l_{BC} 的增加而变大。

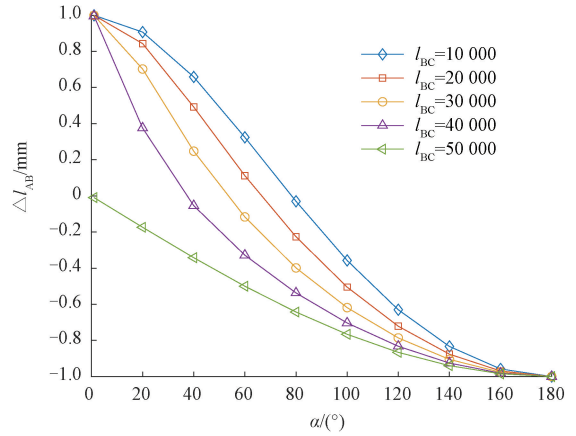


图 5 Δl_{BC} 对 Δl_{AB} 的影响
Fig. 5 Effect of Δl_{BC} on Δl_{AB}

在图 6 中, l_{AC} 的取值取为 50 000 mm 并且没有误差, l_{BC} 仍然取 10 000、20 000、30 000、40 000 和 50 000 mm 5 个不同的数值并且也没有误差, 而 α 在 $[0^\circ, 180^\circ]$ 区间内变化并且在每个测量点的误差都是 0.01° 。从图 6 可以看出, 当 l_{BC} 取不同的值时, α 的固定误差对 Δl_{AB} 的影响是不一样的, 随着 l_{BC} 的变大, Δl_{AB} 绝对值的最大值也在不断的增加。因此, 可以得出如下结论: 角度 α 误差的控制对确保本系统测量精度至关重要。

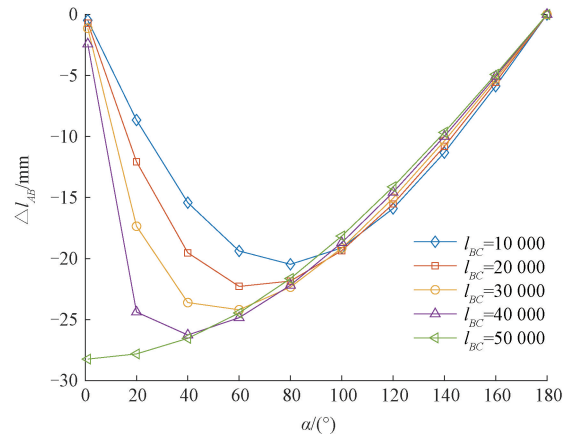


图 6 $\Delta\alpha$ 对 Δl_{AB} 的影响
Fig. 6 Effect of $\Delta\alpha$ on Δl_{AB}

另外, 图 1 中两个激光传感器发射的激光束 DA、EB 要分别和两臂的左、右边沿保持平行, 且 DA、EB 要和 CD、CE 保持在同一个平面。如果这两个条件不能满足,

也会给 l_{AB} 的测量结果带来误差。在图 7 中,右边激光束 EB 没有和右臂的边缘平行并向外侧偏转,使得右边激光束测量的长度不是线段 EB 的长度 l_{EB} 而是线段 EF 的长度 l_{EF} 。此时根据式(3)计算的结果是线段 AF' 的长度 $l_{AF'}$,而两个激光点之间实际长度是线段 AF 的长度 l_{AF} 。根据三角形关系,此时 $l_{AF'}$ 一定大于 l_{AF} ,即 Δl_{AB} 是负数。类似地,如果激光束 EB 向内侧偏转会使得 Δl_{AB} 变成一个正数。

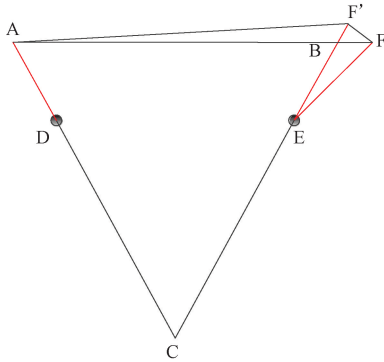


图 7 激光束水平方向偏转对 l_{AB} 测量结果的影响
Fig. 7 Effect of laser beam horizontal deflection on measurement results of l_{AB}

在图 8 中,右边激光束 EB 没有和三角形 ABC 保持在同一个平面,而是在垂直方向上向下偏转,使得右边激光束测量的长度不是 l_{EB} 而是 l_{EF} 。此时根据式(3)计算的结果是长度 $l_{AF'}$,而两个激光点之间实际长度是 l_{AF} 。

根据图 8 的三角形关系,等式(6)和(7)可以被得到:

$$l_{AF'}^2 = l_{AB}^2 + l_{EB}^2 \tan^2 \theta \quad (6)$$

$$l_{AF'}^2 = l_{AB}^2 + l_{EB}^2 \frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta} \left[\frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta} - 2 \cos \gamma \frac{l_{AB}}{l_{EB}} \right] \quad (7)$$

由于激光传感器位置没有安装好造成的右边激光束 EB 垂直方向偏转角 θ 一般很小,因此 $\tan \theta$ 和 $(1 - \cos \theta) / \cos \theta$ 的数值会比较小,分别处于 10^{-2} 和 10^{-4} 的数量级。

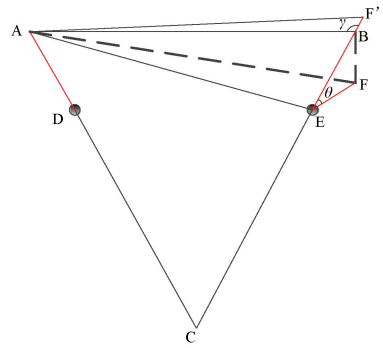


图 8 激光束垂直方向偏转对 l_{AB} 测量结果的影响
Fig. 8 Effect of laser beam vertical deflection on measurement results of l_{AB}

所以从式(6)和(7)可以看出, $l_{AF'}$ 和 l_{AF} 之间的误差主要由 l_{AB} , l_{EB} 和角度 γ 决定,并且当 l_{AB} 远大于 l_{EB} 且 γ 接近 0° 或 180° 时误差达到最大值。而在实际测量时, l_{AB} 和 γ 的大小由左右臂激光束长度 l_{DA} , l_{EB} 和左右臂夹角 α 决定。

按照上述理论对样机左右臂的激光传感器进行位置调整,以确保图 1 中三角形 ABC 被正确地构成,同时对角度编码器设置正确的零点。为了对样机的测量精度进行评估,进行了实际测量实验。在表 1 中, l_{AC} , l_{BC} 和 α 的测量误差忽略不计, l_{AB} 计算值是根据 l_{AC} , l_{BC} 和 α 的测量值由式(3)计算得到, l_{AB} 实际值是由标准尺测量得到。从表 1 可以看出,本仪器在 1 149 mm 测量范围内的绝对误差处在 ± 1 mm 以内,而在 50 m 测量范围内相对误差能控制在 1‰ 的数量级,从而实现了长距离的高精度测量。而文献[12]基于 ORB 特征的双目测距系统进行了 1 800 mm 范围内的测距实验,平均误差为 2.042 mm。文献[13]基于显著性检测的双目测距系统只进行了 1 200 mm 范围内的测距实验,测量误差达到了 2.83% 以内。文献[18]的双目变焦测距系统在测量距离为 3 120 mm 时,测量相对误差为 1.57%。通过对比可以发现,本仪器在测量距离、测量精度和样机成本等方面具有较为明显的优势。

表 1 样机实际测量结果

Table 1 Actual measurement results of prototype

序号	l_{AC} 测量值/mm	l_{BC} 测量值/mm	α 测量值/($^\circ$)	l_{AB} 计算值/mm	l_{AB} 实际值/mm	l_{AB} 绝对误差/mm	l_{AB} 相对误差/%
1	502	483	30.04	256	256	0	0
2	645	386	20.43	314	314	0	0
3	297	794	17.69	519	519	0	0
4	987	994	55.95	929	928	1	1.1
5	1 581	990	46.33	1 148	1 149	-1	-0.9
6	13 245	9 168	48.65	9 952	9 947	5	0.5
7	16 479	15 236	62.78	16 553	16 540	13	0.8
8	22 165	28 748	60.53	26 283	26 266	17	0.6
9	29 945	36 174	67.84	37 257	37 266	-9	-0.2
10	36 857	38 763	75.74	46 445	46 394	51	1.1

根据误差理论,对工件进行测量并给出报告时,不仅要测量结果,还需要结果的不确定度^[19-20]。为了对本系统的长度测量不确定度进行评定,还进行了相应的重复性测量实验。在此实验中,选择长度为 10 m 的空间中两

个点,然后以不同的 l_{AC} 、 l_{BC} 和 α 组合对这两点之间的距离进行测量,结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, l_{AB} 的绝对误差最大值为 6 mm,其相对误差的范围为 $-0.3\% \sim 0.6\%$,能满足既定的误差指标要求。

表 2 样机重复测量结果

Table 2 Repeated measurement results of prototype

序号	l_{AC} 测量值/mm	l_{BC} 测量值/mm	α 测量值/(°)	l_{AB} 计算值/mm	l_{AB} 绝对误差/mm	l_{AB} 相对误差/%
1	19 051	19 028	30.46	10 003	3	0.3
2	17 374	13 134	34.88	9 998	-2	-0.2
3	16 051	14 528	37.78	10 004	4	0.4
4	15 248	10 051	40.39	10 003	3	0.3
5	9 688	14 500	43.39	9 997	-3	-0.3
6	11 371	13 874	45.33	9 998	-2	-0.2
7	9 310	12 825	50.73	10 000	0	0.0
8	10 312	11 646	53.79	10 004	4	0.4
9	10 836	10 025	57.11	9 997	-3	-0.3
10	8 676	10 874	60.33	10 006	6	0.6

根据表 2,可以算出 l_{AB} 的平均值为 10 001 mm,那么相应的单次测量标准差为 3.366 mm。因此,根据测量不确定度评定理论,本系统 A 类不确定度分量 U_A 为 3.366 mm。而本系统 B 类不确定分量可以根据最大误差来确定。由图 5 可知,当 l_{BC} 误差为 1 mm 时, Δl_{AB} 的区间为 $[-1, +1]$ 。因此, l_{BC} 误差引起的 B 类不确定度分量 U_{B1} 为:

$$U_{B1} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 \quad (8)$$

类似地, l_{AC} 误差引起的 B 类不确定度分量 U_{B2} 也为 0.577 mm。另外,根据图 6, l_{AC} 和 l_{BC} 的值都取为 50 000 mm 时,0.01° 的 α 误差引起的 Δl_{AB} 最小值为 -28.24 mm,所以此时 α 误差引起的 B 类不确定度分量 U_{B3} 为:

$$U_{B3} = \frac{28.24}{\sqrt{3}} = 16.304 \quad (9)$$

因此本系统的 B 类不确定度分量 U_B 为:

$$U_B = \sqrt{U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + U_{B3}^2} = 16.324 \quad (10)$$

所以,本系统合成标准不确定度 U_C 为:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = 16.67 \quad (11)$$

如果取置信概率 99%,则置信因子 k 为 3,则本系统扩展不确定度 U 为:

$$U = kU_C = 50.01 \quad (12)$$

可见,本系统的设计能达到既定的误差指标。另外,由图 6 可知,当 l_{BC} 取不同数值时, Δl_{AB} 的最小值是不一样的,会影响到本系统的合成标准不确定度和扩展不确定度的数值。尤其当 l_{BC} 或 l_{AC} 偏小时,本系统的相对误

差理论上会存在超过 1% 的可能,这也是本系统后续需要改进的地方。

4 结 论

本文利用两个激光传感器和一个角度编码器实现了一种双臂测距系统,可以对空间中任意两点之间的距离进行测量。并且从理论上对本系统的测量误差进行了分析,还通过 MATLAB 软件进行了仿真验证,为样机的安装和调试提供了指导意义。同时,样机 50 m 以内的实际测量实验证实了样机长距离测量的高精度性。并通过重复性测量实验和测量不确定度评定给本系统的进一步改进指明了方向。另外,本系统还具备单臂测距、二维垂直度测量、阴角测量和阳角测量等多种功能,从而提高了产品的适用性,有利于减少企业仪器仪表的购置成本。

参考文献

- [1] 罗胜彬,宋春华,韦兴平,等. 非接触测量技术发展研究综述 [J]. 机床与液压, 2013, 41(23): 150-153. LUO SH B, SONG CH H, WEI X P, et al. Review for the development and research of non-contact measurement technology [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2013, 41(23): 150-153.
- [2] KANG Y, CUI Z. Design of tram collision prevention system based on infrared ranging and Kalman filtering [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1237(3): 032084.
- [3] 王慧娟,袁全波,房好帅. 基于 ARM 的移动机器人

- 红外测距系统的设计 [J]. 北华航天工业学院学报, 2010, 20(2): 18-20.
- WANG H J, YUAN Q B, FANG H SH. Design of the infrared range-measurement system for mobile robots based on ARM [J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2010, 20(2): 18-20.
- [4] YANG K, ZHAO C. Design of tram collision prevention system based on infrared ranging and Kalman filtering [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1237(3): 032084.
- [5] 吕军, 张天鹏. 超声波测距仪的设计 [J]. 仪器仪表标准化与计量, 2020(2): 41-43.
- LYU J, ZHANG T P. Design of ultrasonic rangefinder [J]. Instrument Standardization and Metrology, 2020(2): 41-43.
- [6] CHEN X, XU J, CHEN H, et al. High-accuracy ultrasonic rangefinders via pMUTs arrays using multi-frequency continuous waves [J]. Journal of Micro Electromechanical Systems, 2019, 28(4): 634-642.
- [7] SUMATHI P, JANAKIRAMAN P A. SDFT-based ultrasonic range finder using AM continuous wave and online parameter estimation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(8): 1994-2004.
- [8] 秦宇, 黄翔, 邓正平, 等. 基于激光测距的大部件对接方法及误差分析 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(3): 728-738.
- QIN Y, HUANG X, DENG ZH P, et al. Novel posture alignment method and error analysis for large component assembly based on laser range sensing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(3): 728-738.
- [9] XU X, CHEN Y, ZHU K, et al. Research on FPGA pulse laser ranging method based on deep learning [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021(70): 2511611.
- [10] YANG H, JIN Y, ZHAO X, et al. Extraction of signal frequency in laser ranging of space target based on FPGA [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2021, 26(3): 215-226.
- [11] WU B, HAN S J, XIAO J, et al. Error compensation based on BP neural network for airborne laser ranging [J]. Optik, 2016, 127(8): 4083-4088.
- [12] 杨敬辉, 刘德康, 杜万和, 等. 基于图像特征的双目测距系统的研究 [J]. 系统仿真学报, 2022, 34(3): 624-632.
- YANG J H, LIU D K, DU W H, et al. Research on binocular ranging system based on image features [J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(3): 624-632.
- [13] 安果维, 王耀南, 周显恩, 等. 基于显著性检测的双目测距系统 [J]. 智能系统学报, 2018, 13(6): 913-920.
- AN G W, WANG Y N, ZHOU X EN, et al. Binocular distance measurement system based on saliency detection [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2018, 13(6): 913-920.
- [14] 孔炽斌. 高精度双目测距中关键技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- KONG ZH B. Research on key technology in high accuracy binocular ranging [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [15] 李一航, 周东兴, 韩东升. 一种基于透视变换的远距离双目测距方法 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(7): 93-99.
- LI Y H, ZHOU D X, HAN D SH. Long-distance binocular ranging method based on perspective transformation [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(7): 93-99.
- [16] 陈如意, 周翟和, 王锋, 等. 基于 TLE5012B 的高精度多圈绝对式磁编码器设计 [J]. 测控技术, 2017, 36(7): 116-120.
- CHEN R Y, ZHOU ZH H, WANG F, et al. Design of high precision multiloop absolute magnetic encoder based on TLE5012B [J]. Measurement and Control Technology, 2017, 36(7): 116-120.
- [17] 王世佳, 王世博, 刘万里. 采煤机截割高度测量模型与测量误差分析 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 140-149.
- WANG SH J, WANG SH B, LIU W L. The measurement model and error analysis for shearer cutting height [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 140-149.
- [18] 刘诗婷, 金伟其, 李力, 等. 基于双目变焦超分辨率成像的测距方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1411004.
- LIU SH T, JIN W Q, LI L, et al. Ranging method based on binocular zoom super-resolution imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1411004.
- [19] 张珂, 张玮, 成果, 等. 支持向量机评定同轴度误差测量不确定度 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 29-36.
- ZHANG K, ZHANG W, CHENG G, et al. Evaluation of coaxiality error measurement uncertainty by support vector machine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 29-36.
- [20] ZHANG J Y. Generating real random numbers with

uncertainty principle [J]. Instrumentation, 2020, 7(3): 43-49.

作者简介



汪石农 (通信作者), 毕业于南京航空航天大学, 现为安徽工程大学副教授, 主要研究方向为单片机与嵌入式系统设计。

E-mail: wsn@ahpu.edu.cn

Wang Shinong (Corresponding author) graduated from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Now he is an associate professor in Anhui Polytechnic University. His main research interests include design of MCU and embedded system.



程志军, 2000 年于浙江大学获得博士学位, 现为龙信建设集团有限公司副总经理、技术中心主任, 研究员职称, 国务院政府特殊津贴获得者, 主要研究方向为智慧建筑和智能建造。

E-mail: chengzhijun123@139.com

Cheng Zhijun received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2000. He is now the vice-general manager of Longxin Construction Group Co., Ltd., the director of the technology center, the title of researcher, and the winner of the special government allowance of the State Council. His main research interests include intelligent building and intelligent construction.