

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312024

一种数字水准标尺的新型编码规则及识读方法*

黄秋红, 潘莎莎, 刘超, 朱凌建, 赵敏

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘要:为满足高精度、大视距的数字水准测量需求,提出了一种新型二维复合编码的数字水准标尺编码规则,标尺条码由绝对编码和相对编码两列组成。绝对编码由不同宽度的黑白条码组成,沿标尺长度方向上若干个条码组合形成一个码段,采用二-十进制的编码规则唯一确定该码段在标尺上的绝对位置;相对编码由等宽度,相对大尺寸的黑白条码组成,通过同时存在于相对编码和绝对编码中的参考码表示标尺上的位置。针对所提出的编码规则,设计了视线位置的精确识读方法。对所设计水准标尺进行高差、重复性以及远视距实验,结果表明,该二维复合编码的水准测量在30 m以内的测量时间小于1.57 s,条码识别率为100%,最大偏差小于0.09 mm,具有解码快速、识别精确、稳定等优点。

关键词:二维复合编码;二-十进制解码;参考码;码段绝对位置;视线精确高度

中图分类号: TH761 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.60

New encoding rule and reading method for the digital leveling ruler

Huang Qiuhong, Pan Shasha, Liu Chao, Zhu Lingjian, Zhao Min

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To meet the requirements of high-precision and large-distance digital leveling measurement, a new two-dimensional composite encoding rule for the digital level ruler is proposed in this article. The leveling ruler consists of two column-coded bars, including an absolute-coded bar and a relative-coded bar. The absolute coded column consists of black and white stripes of different widths, and several coded bars along the ruler are combined to form a code segment adopting a binary-decimal coding rule, which uniquely determines the absolute position of the code segment on the ruler. The relative coded column consists of black and white stripes of equal width and relatively large size. The position on the ruler is represented by reference codes that exist simultaneously in the relative coded column and the absolute coded column. According to the proposed coding rules, an accurate reading method for the sight line is designed. The experiments of height difference, repeatability and long visual distance are carried out on the designed level ruler. The results show that the measurement time of the 2-D composite code is less than 1.57 s within 30 m, the barcode recognition rate is 100%, and the maximum deviation is less than 0.09 mm, which has the advantages of fast, accurate recognition and stability.

Keywords: two-dimensional composite coding; binary-decimal decoding; relative bars; segment absolute position; sight-line precision height

0 引言

编码水准标尺是用于水准系统中的测量器具,与数字水准仪配套使用,被广泛应用于沉降监测、工程建设、地形测定等多个领域^[1-2]。自1990年莱卡公司推出首台数字水准仪NA2000以来^[3],国外出现几何编码(Trimble Dini系列)、相关编码(原Leica NA系列)和相位编码

(TOPCON DL/SDL系列)等多种水准标尺的编码规则,国内也相继出现了叶氏编码^[4]和RAB编码^[5],然而,目前高精度的水准测量仍然依赖国外设备,因此,新型水准标尺的编码规则和水准测量系统的自主研发迫在眉睫。大尺寸、高分辨率的图像传感技术的迅速发展,为二维编码用于水准测量提供了可能。董忠言等^[6]、李学鹏等^[7]、胡鹏等^[8]分别提出了采用圆形码与二维码组合、圆形码的二维阵列、多个二进制码阵列等的二维编码设计方案。

收稿日期:2023-10-16 Received Date: 2023-10-16

* 基金项目:陕西省重点研发计划(2023-ZDLGY-14)项目资助

姜东^[9]在尺带上设置了两列蔡司编码规则的条码,进行了双条码水准测量的验证。王同合等^[10]针对文献[6-8]提出改进方案,采用圆形码、数字码加上字母码的编码方法。上述研究对不同二维编码方案的水准标尺及测量进行了尝试,但其复杂的编码图案不仅增加了识别检测的运算量,还极大地增加了加工形成高精度标尺分划的难度,截止目前,暂未见到相关二维水准标尺及测量系统面市。

与高精度水准标尺测量应用类似,二维或三维的靶标技术在视觉测量领域中已有广泛研究和应用。Barone等^[11]采用高分辨率屏幕上二进制条纹形成的棋盘图案作为标定板用于立体相机的标定,实现立体相机的标定,用类似的编码投影实现三维表面测量。翟玉生等^[12]进行二维平面互补靶标的线结构光标定系统设计。Yang等^[13]采用二维柔性拼接由小标定板扩展成大标定板适应视距变化时不同大小视场的需求。潘海鸥等^[14]利用视差法获取线结构光投影在靶标上形成的点云集,采用最小二乘法实现线结构光平面的标定。胡佳兴等^[15]建立了编码规则和靶标系统用于存储和提取装配信息,并仿真了 5 m 桁架装配中的应用。李云辉等^[16]同时采集平面靶标的图像与 3D 点云数据,求解平面靶标在摄像机坐标系与 LiDAR 坐标系中的法向量,实现视觉-激光雷达结构参数的高精度标定。Chan-Ley 等^[17]设计并采用圆环形的二维编码靶标,利用摄像机的投影特性和投影模型,实现摄像机在三维空间中位置的确定。李云雷等^[18]设计探针式立体定向靶标,基于近景摄影测量原理,通过靶标局部区域实现包括遮挡部位的全部区域的探测。杨昭辉等^[19]利用整合有 4 个空间姿态的编码平面靶标,通过一次拍摄完成双目相机的高精度标定。Sato 等^[20]进行了编码靶标用于高精度摄像机标定的研究。二维或三维靶标不仅用作视觉系统的标准靶标,又可作为测量器具,靶标测量中既有小成像视场的高分辨率要求、又有大测量范围的需求。

因此,本文依据水准标尺、水准仪相关标准^[21-23],结合靶标测量小瞄准视场、大测量范围的特征,根据 2~3 m 水准标尺长度内瞄准视线高精度识读要求,提出一种新型复合编码的设计规则的水准标尺,以期在不增加加工工艺以及识别检测难度的同时满足测量要求,为国内高精度水准测量系统的研究和实现提供方案。

1 数字水准测量的基本原理

数字水准测量系统主要由编码水准标尺、数字水准仪(包含望远光学系统、图像传感器和图像识别检测系统)组成^[9]。编码水准标尺经过望远光学系统成像

在图像传感器上,图像识别检测系统对标尺条码图像识别检测,准确获取水平视线瞄准的标尺上的高度。

编码水准标尺的分划由有序排列的黑白条码组成,黑白条码的编码组合表征了所在位置的高度信息。图像传感器对标尺条码进行瞄准成像,对标尺图像进行解码和视线位置的准确识读,实现水准测量。视距越近,像面上的条码个数越少,条码边缘细节越清晰;视距越远,条码边缘细节变模糊,像素当量增大。图像识别检测的主要任务是根据条码组合在标尺上的唯一确定性、分划线纹尺寸和位置的精确性,准确确定望远光学系统的水平视线瞄准标尺上的位置。

2 复合编码的编码规则

光学等间隔水准标尺由数字和分划线纹两部分组成。以一定长度间隔标注的数字指示了标尺上的概略位置,目视读取标尺的标注数字,获得望远光学系统水平视线的高度范围;分划线纹成像在分划板上,与分划板的刻度中心比较,计算视线的精确位置。水平视线高度的精确测量主要依赖于标尺上的数字读取和以分划板的刻度与分划线纹位置的匹配读取。

受光学水准测量基本原理的启发,本文提出一种数字水准标尺的复合编码规则,以分划线形成标尺上的黑白条码,水准标尺由绝对编码与相对编码两列条码组成(暂命名为 CDJD 编码),绝对编码表示分划线纹在标尺上的位置,相对编码用于计算水平视线的准确高度,二维编码标尺上的局部条纹图案如图 1 所示。

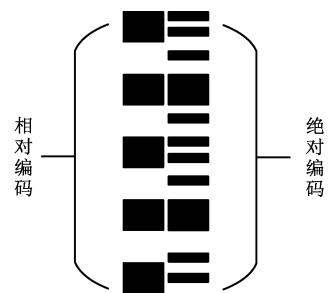


图 1 二维编码标尺的局部条纹图案
Fig. 1 Partial stripe pattern of 2D barcoded

2.1 绝对编码

宽窄不同的分划线纹形成标尺的黑白条码,一定长度上的黑白条码组合在标尺上具有唯一确定性,用于表示标尺上的位置,代替光学水准标尺上的数字。常见水准标尺的长度为 2 m 或 3 m,绝对编码表示的尺寸范围需不小于 3 m。若编码得到 3 个十进制位,分别表示标尺上对应位置的 m、dm、cm,则可编码长度为 10 m。

若用黑、白分划线纹表示二进制中的“1”和“0”，欲表示0~9的数字，则需要4个二进制位，采用12个二进制位可实现3个十进制位的任意数据的编码^[24]。因此，以1个基本宽度形成1个二进制位，12个基本宽度作为1个码段，则可采用图像传感器识别检测二进制码，表示标尺上的高度。

局部绝对编码条码如图2所示，码段中，从下向上编码，形成的二进制码依次为001001010010，解码为3个十进制位：2、5、2，表示该码段起始分划在标尺上的位置为2.520 m。

2.2 相对编码

与光学水准标尺类似，等宽度的分划形成黑、白条码，各条码在标尺上的位置由绝对编码确定。

为保持黑、白条码的等宽度和等间隔特性，采用3个等宽度的条码对应绝对编码中的3个十进制宽度。

为保持等间隔条码位置与绝对编码位置相对应，以及黑、白等间隔条码的交替特性，在3个十进制位宽度的基础上，增加1个十进制位宽度，作为绝对编码与相对编码共同的参考码。

在两种编码规则中，参考码具有相同宽度、相同高度位置等特性，如图2所示。

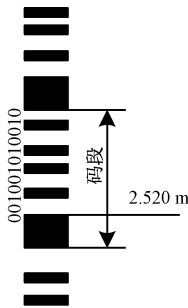


图2 局部绝对编码条码

Fig. 2 Partial absolute encoded barcodes

相对编码条码具有等宽度、等间隔特性，高精度的水准测量对水准标尺有较高的分划精度要求，一等水准标尺的分划标准差 $\leq 13 \mu\text{m}$ ^[21]，以亮或暗分划线纹宽度为标准尺寸，用于精确估计视线位置。

如图3所示，高精度分划的水准标尺既是图像检测系统的靶标、又是测量器具。以分划条码的标称尺寸为标准尺寸，获取像面上所覆盖的像素个数，得到像素当量，依据视线位置与边缘位置的像素差，与像素当量的乘积实现视线高度的精确测量。

以绝对编码表示标尺上的位置，通过图像处理自动识别确定；以像素当量为最小长度单位，检测视线相对于码段起始位置的偏差，绝对位置与相对尺寸偏差之和即为望远光学系统水平视线的高度^[22]。

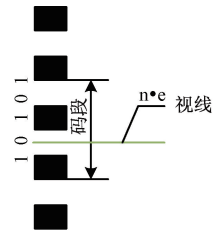


图3 局部相对编码条码

Fig. 3 Partial relative encoded barcodes

2.3 条码宽度的确定

文献[23]对一、二等数字水准测量测站视线长度的规定：其中一等视线长度 $\geq 4 \text{ m}$ 且 $\leq 30 \text{ m}$ ，二等视线长度 $\geq 3 \text{ m}$ 且 $\leq 50 \text{ m}$ 。

当绝对编码中的每个二进制位对应的实际宽度为2.5 mm，则4个二进制位为10 mm，与编码形成的数字范围10相对应，则一个码段长度为30 mm，加上10 mm宽度的参考码，则一个码段的宽度为40 mm。

若采用像元尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 、像元个数为 1360×1024 的面阵CCD接收CDJD码，设数字水准仪在最远距离时光学系统放大率为360倍，则一个2.5 mm的基本宽度在像面上的宽度为：

$$W_b = 2.5/360 = 0.00694 \text{ mm} = 6.94 \mu\text{m} \quad (1)$$

2.5 mm基本码的像宽大于CCD的一个像素宽度，即在最远视距时面阵CCD仍然可以分辨标尺上的每一个分划线纹。2.5 mm基本宽度的绝对编码分划线纹和10 mm宽的相对编码亮、暗分划线纹在全部视距范围具有可分辨性。

2.4 基于复合编码测量的视距范围

复合编码CDJD的测量应用需满足国家标准(GB/T 12897—2006)的视距范围要求^[23-24]。近视距测量应用时需对足够多的条码成像，以解码识别出一个完整的码段。如图2所示，12个二进制位形成的一个码段，用于识别公称高度，根据相对编码的分划尺寸、位置的精确性识别出相对高度。不失一般性，在对绝对编码任意位置成像时，包含一个完整码段的最大尺寸为50 mm。

面阵CCD的尺寸为 $(1360 \times 4.65 \mu\text{m} \times 1024 \times 4.65 \mu\text{m})$ $6.3 \text{ mm} \times 4.7 \text{ mm}$ ，面阵CCD长度取6 mm计算，码段取50 mm计算，成像比例为 $50 \text{ mm}/6 \text{ mm} = 8.333$ ，焦距为280 mm计算，则可观测的近视距约为：

$$S_{\min} = 280 \times 8.333 \approx 2333 \text{ mm} \quad (2)$$

即CDJD码可以观测的近视距 $< 2.5 \text{ m}$ 。

远视距成像测量时需对最小宽度条码具有可分辨性，即2.5 mm的基本码在像面上不小于1 pixel宽度。最远视距约为：

$$S_{\max} = 280 \times \frac{2.5}{0.00465} = 150537 \text{ mm} \approx 150 \text{ m} \quad (3)$$

满足国家水准测量规范对一、二等水准测量的视距范围 3~50 m 的要求。

2.5 刻制加工工艺对复合编码标尺图案的兼容性

在数字水准测量中,编码标尺既是成像系统标定的靶标又是测量对象,对分划尺寸位置需有可溯源性。

CDJD 码条纹形的标尺图案,使用激光刻制,易于按照标尺长度方向进行加工,并未对传统一维标尺加工工艺提出新要求。

尺面宽度为 25 mm,满足绝对编码与相对编码的分布。若相对编码与绝对编码间隔 2 mm,统计从 40 mm 分划到 2 960 mm 分划范围的 2 920 mm 长度内,黑色条码面积 30 963.75 mm²,白色条码面积 36 196.25 mm²,黑、白面积比约为 85.5%,黑码面积略小于白码面积。

同理,若采用 3 040 mm 的绝对编码到 5 960 mm 的绝对编码代表标尺上的 40~2 960 mm,则黑码面积 33 723.75 mm²,黄码面积 33 436.25 mm²,黑码面积占黄码面积的 100.1%,两者面积近似相等。条纹形的分划和近似相等的亮暗比例使得新型水准标尺易于激光刻制加工并保证分划精度。

3 水准标尺识别与检测

条码标尺的识别检测处理主要包含条码识别和视线高的检测,即正确识别图像中每个条码宽度并准确获取水平视线瞄准标尺上的位置。主要包括图像中水准标尺区域的分割、参考码的获取、绝对编码的解码、相对条码视线位置检测等处理,如图 4 所示。

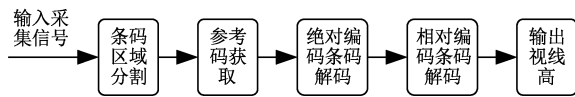


图 4 水准标尺识别检测软件框图

Fig. 4 Software diagram of leveling rod recognition and detection

3.1 视线高的识别确定原理

若视线位于边缘 e_1 、 e_2 之间,与这两个分划边缘的像素距离设为 Δ_1 、 Δ_2 ,如图 5 所示,则视线高为:

$$h = h_{e_1} + \frac{(h_{e_2} - h_{e_1}) \times \Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} = h_{e_1} + \Delta_1 e \quad (4)$$

$$e = \frac{(h_{e_2} - h_{e_1})}{\Delta_1 + \Delta_2} \approx \frac{10}{\Delta_1 + \Delta_2} (\text{mm/pixel}) \quad (5)$$

式中: h 为水平视线到标尺底面的距离; e 为成像系统像素当量; h_{e_1} 、 h_{e_2} 表示 e_1 、 e_2 边缘到标尺底面的距离; e_1 、 e_2 为参考码上一条分划的两个边缘,标称距离为 10 mm。通过边缘位置 e_1 、 e_2 的位置检测,像素当量 e 的计算即可实现视线高的确定。

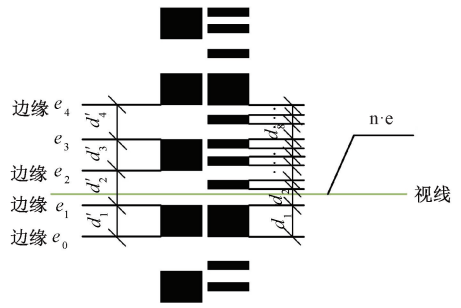


图 5 视线高识别检测原理

Fig. 5 Diagram of sight-height detection

同理,视线位置也可看作视线位于 e_0 和 e_4 之间,与此两个分划之间距离设为 Δ_0 、 Δ_4 ,则视线高为:

$$h = h_{e_0} + \frac{(h_{e_4} - h_{e_0}) \times \Delta_0}{\Delta_0 + \Delta_4} = h_{e_0} + \Delta_0 e \quad (6)$$

$$e = \frac{(h_{e_4} - h_{e_0})}{\Delta_0 + \Delta_4} \approx \frac{40}{\Delta_0 + \Delta_4} (\text{mm/pixel}) \quad (7)$$

式中: h_{e_0} 、 h_{e_4} 表示 e_0 、 e_4 边缘到标尺底面的距离;边缘 e_0 、 e_4 之间的标称距离为 40 mm。依此,若获得水平视线与一个码段中的任意两分划间的距离和该码段的参考码,则可以获得视线高。

3.2 标尺条码解码

由 3.1 节可知,欲获得视线高首先要获取参考码在标尺上的位置,即式(3)、(4)中的 h_{e_1} 或 h_{e_0} ,参考码所代表的位置可由绝对编码解码得到,根据绝对编码唯一确定性,只需确定码段中每一条码的亮暗和宽度即可确定其码值。图中条纹图像,码段中各个黑白条码的宽度 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 、 d_6 、 d_7 、 d_8 、 d_9 、 d_{10} 和对应码段内等间隔条码宽度 d'_1 、 d'_2 、 d'_3 、 d'_4 ,计算相对编码各条码宽度的平均值 d ,表示为:

$$d = \frac{d'_1 + d'_2 + d'_3 + d'_4}{4} \quad (8)$$

平均值 d 的宽度即为标称尺寸 10 mm 条码所对应的像面尺寸,像素当量为 $e = 10/d$ (mm/pixel), $d/4$ 为 2.5 mm 基本宽度所对应的像面尺寸,通过条码宽度与基本宽度对比,获得各黑白条码对应的二进制位数,图 5 的码段中各条码对应的二进制位的个数为 4、2、1、2、1、1、1、2、1、1,16 个二进制位 1111 0010 0101 0010 分别形成参考码和 3 个十进制数,表示该参考码的起始位置 e_1 为 2 520 mm,即位于该码段范围内的视线高度为 2 520~2 560 mm。

绝对编码的正确识别确保了码段定位的唯一性。只需区分基本码的个数和亮暗即可获得该码段的读数,处理运算简单,保证了识别处理的快速性。

3.3 视线高位置的检测

由式(4)、(6)及图5可知,视线位置依赖于标称尺寸(如10 mm)对应图像上尺寸位置的准确检测。

亚像素的分划边缘检测具有重要的意义。首先通过Canny边缘检测算法划边缘进行像素定位,再以边缘像素为中心,利用同一边缘上多像素点坐标统计平均,代表 $e_1, e_2, e_3, e_4, \dots$ 等边缘的纵向像素坐标,记为 $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$,相对应标尺上的位置表示为 $y_1, y_2, y_3, y_4, \dots$,将 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4), \dots$ 采用最小二乘法拟合,即可得到像面上分划边缘位置与标尺上高度之间的函数关系,如图6所示,并由该函数计算出水平视线像素为视场高度中心时,所瞄准视线对应标尺上的高度。

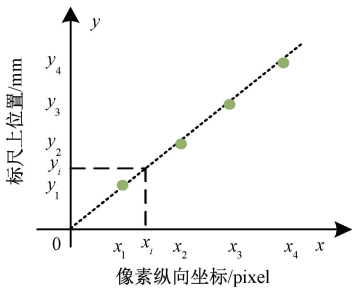


图6 最小二乘拟合求解视线高

Fig. 6 The sight-height by the least-squares fitting

相对编码等宽度、明暗交替的分划线纹均是10 mm的标称尺寸,进行像素当量的标定,基于多个分划的拟合求解,减小了条码宽度误差、像素当量随机误差等的影响,提高了测量精度。

4 实验验证与分析

根据所提出的复合编码,激光刻制加工出3 m长的水准标尺,如图7所示。实验采用自动安平光学望远系统,以映美精的DMK37AUX273型工业相机接收标尺图像,获得2D图像如图7(a)所示。

根据视场中瞄准标尺上条码的交替特征,左右延伸至无交替亮暗分布出现为止,分割标尺分划区域,如图7(b)所示。为了验证所提出编码标尺测量应用的快速性、准确性以及稳定性,分别进行了高差测量实验、重复性测量实验以及远视距测量实验。

4.1 高差测量实验

为了验证采用所提出编码规则用于测量的精度,进行高差实验。

将标尺水平固定于导轨上,标尺面与水准仪光轴垂直,视距为5 m,标尺沿导轨方向每移动10 mm,进行图像

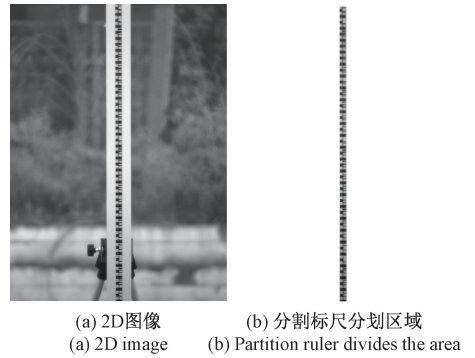


图7 2D水准测量图像

Fig. 7 2D leveling image

采集识别检测,每个位置重复测量10组,取10组平均获得标尺读数,数据如表1所示,高差分布如图8所示。

表1 10 mm高差下的实验结果

Table 1 Experimental results of 10 mm sight-height difference

标尺读数 均值/mm	标准高差 /mm	测量高差 /mm	误差绝对 值/mm	测量时间 /s	识别率 /%
1 490.42				0.81	100
1 480.41	10.00	10.01	0.01	0.83	100
1 470.35	10.00	10.06	0.06	0.80	100
1 460.20	10.00	10.05	0.05	0.81	100
1 450.21	10.00	10.00	0.00	0.86	100
1 440.25	10.00	9.96	0.04	0.84	100
1 430.21	10.00	10.04	0.04	0.84	100
1 420.18	10.00	10.02	0.02	0.88	100
1 410.13	10.00	10.05	0.05	0.85	100
1 400.01	10.00	10.02	0.02	0.86	100
1 389.98	10.00	10.02	0.02	0.86	100

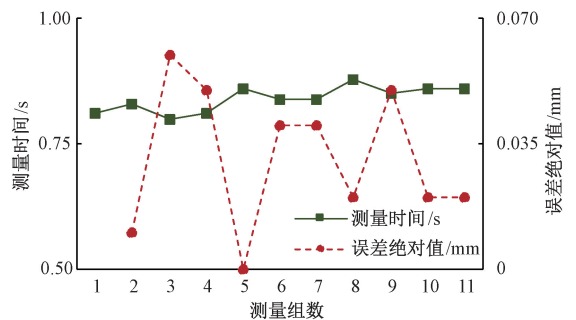


图8 高差实验折线图

Fig. 8 Line-chart of sight-height difference experiment

测量结果表明,在视距为 5 m 时,编码识别率为 100%,10 mm 高差测量时间均小于 1 s,误差绝对值最大为 0.06 mm,表明 CDJD 编码水准标尺用于测量识读的准确性。

4.2 重复性测量实验

为了对不同视距处测量时间以及系统稳定性验证,进行重复性实验,在同一测量环境下,分别在视距为 5、10、15、20、25、30 m 时连续采集测量 10 次,进行重复性验证。数据如表 2 所示,测量时间分布如图 9 所示。

表 2 重复性实验数据
Table 2 Repeatability experiment data

视距/m	测量均值/mm	最大偏差/mm	测量时间/s	识别率/%
5	1 147.03	0.07	0.88	100
10	1 155.80	0.03	1.07	100
15	1 157.46	0.09	1.17	100
20	1 229.56	0.05	1.32	100
25	1 277.43	0.06	1.48	100
30	1 303.18	0.07	1.57	100

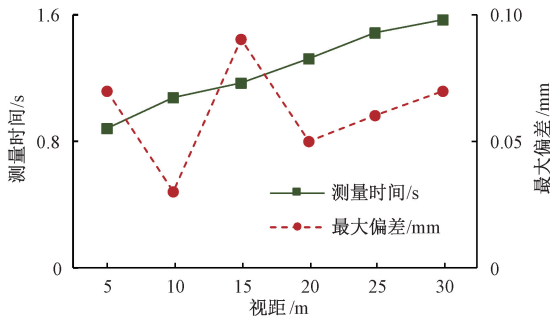


图 9 30 m 内重复性测量曲线

Fig. 9 Repeatability measurement curves within 30 meters

从表 2 可知,在 30 m 以内条码识别率为 100%。10 次重复性测量最大偏差均小于 0.1 mm,说明系统具有较高的识别测量稳定性。测量时间随着视距会逐渐增大,30 m 时约为 1.57 s。根据分析,随着视距的增大,视场中码段个数增多,采用逐码段识别检测时,解码所需要的时间变长。根据所设计编码规则先验知识可知,相邻码段相隔 40 mm,由此可知,只要获取一个码段的绝对编码的值,则可递推出视野中所有码段的绝对编码读数,保证定位快速性,减少测量时间。

4.3 远视距测量实验

为了验证在 CDJD 编码规则用于远视距测量的有效性,从 40 m 视距开始,每隔 5 m 进行一次测量,每个测点重复测量 10 次,直到 80 m 处。测量数据如表 3 所示。

表 3 远视距测量实验数据

Table 3 Far-sightedness measurement experiment data

视距/m	测量均值/mm	最大偏差/mm
40	1 350.71	0.08
45	1 373.54	0.27
50	1 449.15	0.10
55	1 471.67	0.26
60	1 505.17	0.22
65	1 528.64	0.27
70	1 548.50	0.39
75	1 636.72	0.34
80	1 669.34	0.38

从表 3 可知,在远视距重复性测量中,随着视距的增加,最大偏差总体呈上升趋势,反映出识别检测的随机性增大,测量稳定性有所降低,这主要是因为远视距像素当量增大、图像质量下降以及图像质量受环境光影响等所致。

5 结 论

针对数字水准测量对高精度、大视距范围的需求,基于水准视线定位与精确检测分离的思想,提出了绝对编码和相对编码组合读数的新型复合编码规则,采用二-十进制的编码规则、对每一个码段进行编、解码,实现标尺分划线纹在标尺上绝对位置的确定。等间隔分划线纹宽度为标称尺寸,用于成像系统的标定和细分精确水准测量。二-十进制的绝对编码和等间隔的相对编码均采用线条形式的分划线纹,具有条码形状、标尺图案、编码和解码算法简单,易于高精度加工实现等优点。

刻制加工二维复合编码规则的水准标尺,对绝对编码的亮暗、基本宽度个数的识别,快速确定码段在标尺上的高度;以相对编码的条码宽度为标称尺寸进行瞄准视线位置的精确确定。通过对水准标尺的高差测量、重复性测量、远视距测量等实验,表明复合编码水准标尺水准测量稳定、准确。不同宽度组合的绝对编码和较大宽度条码的相对编码对远视距测量准确性也具有重要的意义。

参考文献

[1] 肖兴,吴琪,陈果,等. 考虑温度效应的静力水准仪测试精度修正模型[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 131-139.
XIAO X, WU Q, CHEN G, et al. Modified model for the temperature effect-induced error in the hydrostatic leveling system [J]. Chinese Journal of Scientific

- Instrument, 2022, 43(8): 131-139.
- [2] YANG D L, ZOU J G, SHEN Y W, et al. Research and application of trigonometric leveling to replace precise leveling[J]. Journal of Surveying Engineering, 2021, 147(3): 04021012.
- [3] ARABATZI O, MAVRELLIST G, STATHAS D. Survey review testing the digital level wild-na2000 in laboratory and field conditions [J]. Survey Review, 1993, 32(248): 99-108.
- [4] 叶晓明. 用于数字水准仪条码尺和电子经纬仪度盘的条码及其编码解码方法[P]. 中国: CN1632464, 2005-06-29.
- YE X M. Barcodes and their encoding and decoding methods for digital level barcode rulers and electronic theodolite dials[P]. China: CN1632464, 2005-06-29.
- [5] 张晓, 王志兴, 李相银. 图像式双正弦条码高程定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(7): 739-742.
- ZHANG X, WANG ZH X, LI X Y. Height positioning method based on double sinusoidal barcode[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(7): 739-742.
- [6] 董忠言, 蒋理兴, 肖凯. 一种二维编码标尺的数字水准仪系统原理设计与试验进展[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(2): 114-119.
- DONG ZH Y, JIANG L X, XIAO K. The principle design and testing progress of a digital level system based on two-dimension encoding staff[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015, 32(2): 114-119.
- [7] 李学鹏, 仲思东. 数字水准仪测量编解码技术研究[J]. 中国测试, 2018, 44(5): 17-23.
- LI X P, ZHONG S D. Research on digital level measurement coding and decoding technology[J]. China Test, 2018, 44(5): 17-23.
- [8] 胡鹏, 郝向阳, 程传奇, 等. 一种条形二进制编码标尺的数字水准仪系统设计与实验[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(2): 207-210.
- HU P, HAO X Y, CHENG CH Q, et al. Design and experiment of digital level system based on bar binary coding ruler [J]. Geomatics & Spatial Information technology, 2019, 42(2): 207-210.
- [9] 姜东. 双条码数字水准钢尺的研发[J]. 中国测试, 2017, 43(S1): 106-108.
- JIANG D. Research and development of double barcode digital level indium steel ruler[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(S1): 106-108.
- [10] 王同合, 李晨阳, 蒋理兴, 等. 改进二维编码的数字水准测量系统[J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38(2): 111-116.
- WANG T H, LI CH Y, JIANG L X, et al. A digital leveling system with improved two-dimensional coding2[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2021, 38(2): 111-116.
- [11] BARONE S, NERI P, PAOLI A, et al. 3D acquisition and stereo camera calibration by active devices: A unique structured light encoding framework [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105989.
- [12] 翟玉生, 杨犇, 张志峰, 等. 基于平面互补靶标的线结构光标定系统[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 371-379.
- ZHAI Y S, YANG B, ZHANG ZH F, et al. Line structured light calibration system based on planar complementary target [J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(2): 371-379.
- [13] YANG J, LU N G, DONG M. Calibrating camera based on the flexible spliced two-dimensional target [C]. International Conference on Machine Vision & Human-machine Interface. IEEE Computer Society, 2010.
- [14] 潘海鸿, 王耀玮, 徐大斌, 等. 使用非特制靶标实现线结构光平面标定[J]. 光学精密工程, 2021, 29(1): 54-60.
- PAN H H, WANG Y W, XU D B, et al. Calibration of line-structure light plane using non-specific target [J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(1): 54-60.
- [15] 胡佳兴, 赵常捷, 郭为忠. 面向在轨智能装配的太空桁架结构编码与靶标系统设计[J]. 机械工程学报, 2021, 57(15): 15-22.
- HU J X, ZHAO CH J, GUO W ZH. Component encoding and fiducial marker system design for the on-orbit intelligent assembly of modular space tuss structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(15): 15-22.
- [16] 李云辉, 修贤超, 苗中华, 等. 基于交叉矢量的视觉-激光测距系统结构参数标定[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 185-194.
- LI Y H, XIU X CH, MIAO ZH H, et al. Structural parameter calibration of the Cam-LiDAR system based on cross vector [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 185-194.
- [17] CHAN-LEY M, OLAGUE G, ALTAMIRANO-GOMEZ G E, et al. Self-localization of an uncalibrated camera through invariant properties and coded target location[J]. Applied optics, 2020, DOI: 10.1364/AO.385841.
- [18] 李云雷, 张曦, 屠大维. 基于立体定向靶标的探针式多

- 视场三维视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1):34-44.
- LI Y L, ZHANG X, TU D W. Probe-based multi-view field 3D vision measurement system based on three-dimensional orientation target[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1):34-44.
- [19] 杨昭辉,朱华炳,殷玉龙,等. 基于编码立体靶标的高精度双目相机标定[J]. 中国激光, 2023, 50(6):65-73.
- YANG ZH H, ZHU H B, YIN Y L, et al. High-precision binocular camera calibration based on coding stereoscopic target[J]. China Journal of Lasers, 2023, 50(6):65-73.
- [20] SATO K, SUDO Y, KOCH R. Coded targets for high-precision camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(7):1479-1492.
- [21] GB/T 10156—2009. 水准仪[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- GB/T 10156—2009. Level[S]. Beijing:Standards Press of China,2009.
- [22] JB/T 9315—1999. 大地测量仪器 水准标尺[S]. 北京:机械工业仪器仪表综合技术经济研究所,2001.
- JB/T 9315—1999. Geodetic instruments-Leveling staffs[S]. Beijing: Instrumentation technology and economy institute, p. r. China,2001.
- [23] GB/T 12897—2006, 国家一、二等水准测量规范[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- GB/T 12897—2006, Specifications for the first and second order leveling[S]. Beijing: Standards press of China,2006.
- [24] 黄秋红,刘超,朱凌建,等. 一种二维水准测量标尺及识读方法[P]. 中国,CN110864666A,2020-03-06.
- HUANG Q H, LIU CH, ZHU L J, et al. A two-dimensional leveling rod and recognition method[P]. China,CN110864666A,2020-03-06.

作者简介



黄秋红(通信作者),1997年于河南大学获得学士学位,分别于2000和2006年于西安理工大学获得硕士学位和博士学位,现在为西安理工大学副教授,主要研究方向为计算机测控和视觉测量技术。

E-mail:huangqihong@xaut.edu.cn

Huang Qihong (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Henan University in 1997, M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Xi'an University of Technology in 2000 and 2006, respectively. She is currently an associate professor at Xi'an University of Technology. Her main research interests includes computer measurement & control, and visual measurement technique.