

图像式光电编码器的测角技术及其硬件实现

齐荔荔^{1,2} 万秋华¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为提高光电编码器的分辨力,并缩小体积,提出一种基于图像处理技术的面阵图像式光电编码器。根据光电编码器的性能指标要求设计了光学码盘;然后,通过互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器采集旋转码盘的图案,由复杂可编程逻辑控件(CPLD),数字信号处理器(DSP)组成的处理电路接收图像数据,通过图形识别算法得到粗码角度,并采用改进的基准线质心算法,计算亚像素级的精码角度信息。最后由粗码和精码组成光电编码器测角数据。实验结果表明,设计码盘直径为 45 mm 的图像式光电编码器,在不配备光学镜头的前提下,采用精码细分技术,可实现 4096 份细分,测角分辨力达到 5",角度测量误差峰峰值为 51"。且改进质心算法能有效地抑制噪声,提高测量精度。该图像式编码和精码细分技术可以提高编码器的分辨力,缩小编码器体积,减轻重量。满足航空航天领域对小型化光电编码器的需求。

关键词 图像处理;图像式光电编码器;高分辨力;互补金属氧化物半导体图像传感器;细分算法

中图分类号 TH741.2; TP212.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0412001

Angle-Measurement Technology of an Optical Pattern Rotary Encoder and Its Hardware Implementation

Qi Lili^{1,2} Wan Qiuhua¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to improve the optical encoder's resolution and reduce its volume, an optical pattern rotary encoder based on the image processing technology with an array image sensor is studied. Optical pattern code disc is designed according to the required performance of the optical encoder. The pattern of the spinning disc is acquired by the complementary metal oxide semiconductor (CMOS) image sensor. The processing circuit composed by complex programmable logic device (CPLD) and digital signal processor (DSP) receives the image data, gets the coarse code by the pattern recognition algorithm, and calculates the precision code with sub-pixel size by the improved baseline centroid algorithm. The optical encoder's angular output is made up of the coarse code and the precision code. In the experiment, this method in an optical pattern rotary encoder whose diameter is 45 mm is applied. Without any additional optical lens, the results show that the encoder's angular resolution reaches 5" and the number of subdivision is up to 4096. The peak to peak value of the angle measurement error is 51". The improved centroid algorithm can suppress the noise and improve the measurement accuracy. The optical pattern rotary encoder can get high resolution, reduce the volume and weight using this pattern code and electronic subdivision technology. It can be used in space flight.

Key words image processing; optical pattern rotary encoder; high resolution; complementary metal oxide semiconductor image sensor; subdivision algorithm

OCIS codes 120.3930; 120.4640; 210.4590

1 引言

光电轴角编码器是集光、机、电为一体的数字化

测角装置,具有高分辨力、高精度、智能化和无接触测量等优点,因此被广泛应用于国防、工业和科技领

收稿日期: 2012-08-21; 收到修改稿日期: 2012-10-24

基金项目: 国家 863 计划(2008AA7034320B)资助课题。

作者简介: 齐荔荔(1982—),男,博士研究生,主要从事光电传感器方面的研究。E-mail: lulili56@hotmail.com

导师简介: 万秋华(1962—),女,博士,研究员,主要从事角位移光电传感器方面的研究。E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn

域的动态测量和实时控制系统中^[1]。传统的光电编码器分为增量式编码器和绝对式编码器,它们都是在光栅位置测量装置中通过一对计量光栅副相对位移产生叠栅条纹,由光电元件接收其信号,通过电路进行放大、鉴相、细分和计数等处理环节,最终实现位置计量的^[2]。然而由于编码器的机械装调工艺及码盘刻划技术比较复杂,因此限制了光电编码器分辨力的提高。若通过增加码盘尺寸来提高分辨力,不仅增加体积,而且还将增加相应的光学元件及处理电路。

21世纪以来,国内外先后开展了以图像处理技术为基础的图像式光电编码器的研制^[3,4]。图像式光电编码器的关键技术在于对码道图像的亚像素级精密测量,从而提高编码器的细分精度。在粗码角度不变的情况下,有效地调高编码器的分辨力。与传统光电编码器相比,图像式光电编码器省略了光电接收器件及模数转换电路,并且在装调工艺上,由传统双计量光栅的偏心调整,简化为只需对一个编码码盘的偏心调整。由中国科学院成都光电研究所研制的图像式光电编码器,采用线阵图像传感器,通过刻划单圈码道实现粗码的128份细分;再经过精码细分计算,最终实现测角分辨力4",测角精度52.6"^[5]。近年来,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和浙江大学也分别对基于线阵图像传感器的光电编码器进行了研究^[6,7]。然而我国对面阵图像式光电编码器的研究比较少。

面阵图像式光电编码器的角度测量结果由粗码和精码两部分组成。与线阵图像式光电编码器一样,面阵图像式光电编码器通过识别码盘上的编码信息得到角度粗码。但在精码细分计算上,面阵图像式光电编码器可利用图像处理技术方面的算法对图像噪声进行一定的去除,并通过图形亚像素级的定位^[8~11],得到高分辨力的精码细分角度。

本文将主要介绍面阵图像式光电编码器的光学码盘设计,角度测量原理,精码细分算法及其硬件实现。

2 图像式光电编码器工作原理

图像式光电编码器的系统由光源、轴系、码盘、图像传感器、存储器、图像处理电路、控制电路和数据输出接口等部分组成,如图1所示。码盘安装在编码器的主轴上随其转动,光源发出的光通过码盘图案的透光部分照射到图像传感器上。在控制电路的作用下,将图像数据送至外部存储器,然后通过图像识别算法对其进行图像识别,得到相应的粗码信

息,再根据角度细分算法得到精码数据,最后输出高精度的角度信息。

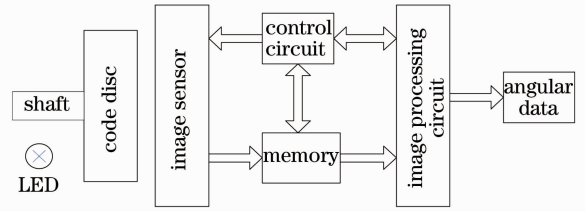


图1 图像式编码器系统原理框图

Fig. 1 Block diagram of optical pattern rotary encoder

3 图像式光学码盘的设计

3.1 码盘的编码设计

码盘的编码由一组等间距码道组成,每条码道分为码元和基准线两部分,如图2所示。码元采用6位二进制绝对式编码,用于角度粗码的识别及编码纠错。因考虑到码盘的划损及灰尘附着会引起粗码错误,设计中采用图像区内至少取2条完整的码道的方案,当相邻码道差值不为1时,表明存在错码。若像区内存在3条码道,且只有一条码道错码,则可以自动将其纠正;若只有2条码道,则需要对下一码道图像进行采集,然后纠正前一码道。因为此种错码为物理性损伤,故纠错一次即可由软件对此后测量自动纠正。图2右侧所示的2条码道所代表的粗码为111110,111111,基准线主要用于编码器精码细分的计算。

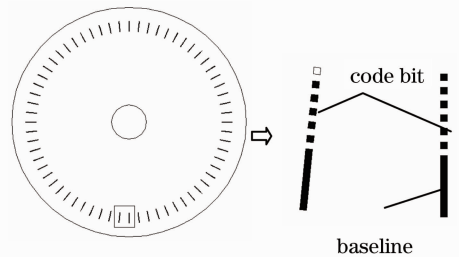


图2 码盘编码结构

Fig. 2 Framework of code disc

3.2 基准线设计

3.2.1 依据设计指标设计基准线间距

基于图像处理技术的图形质心测量算法,精度小于0.07 pixel^[12]。若要实现L份细分的精码设计指标,设相邻码道之间线宽为 Δ pixel:

$$\Delta \geq 0.07L, \quad (1)$$

保证图像中含有K条完整的码道区域,则图像传感器行像素S应不小于 $(K-1)\Delta$ 。根据S值选取适当的图像传感器。

3.2.2 依据光学器件设计基准线间距

选取合适的光学器件可使图像传感器得到清晰且大小适当的码道图像。设码道基准线质心外径为 D ，相邻码道质心直径间距为 d 。若保证图像传感器获取 K 条完整的码道区域，则所需光学器件的放大倍数 M 为

$$M = \frac{Sa}{d_{\max}(K-1)}, \quad (2)$$

式中 a 为单位像元尺寸。由(2)式得

$$d_{\max} = \frac{Sa}{M(K-1)}, \quad (3)$$

$$D_{\max} = \frac{d_{\max} \times 64}{\pi}. \quad (4)$$

3.3 码盘设计

编码器的设计指标定为，精码细分 L 为 4096 份，码盘直径小于 50 mm。根据设计指标，由(1)式得， $S \geq 287$ pixel。因此性能指标为 640 pixel \times 480 pixel， a 为 $6 \mu\text{m}$ 的图像传感器满足上述设计要求，故 $S \geq 1.722$ mm。若不选取光学器件，即 $M=1$ ，则由(3)-(4)式得， $d_{\max} \approx 3.84$ mm。故 1.722 mm $\leq d \leq 3.84$ mm。取 $d=2.0$ mm，则 $D \approx 41$ mm。采用 K9 光学玻璃制作的图像式光电编码器码盘，码盘直径为 45 mm，厚度为 1.5 mm，码元为 0.1 mm \times 0.1 mm，码元间隔为 0.1 mm，基准线为 0.9 mm \times 0.1 mm，基准线中心外径为 41 mm。

4 图像式光电编码器的测角技术

4.1 信号提取

图 3 为互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器所采集的码盘图像。将以图 3 为例详细介绍编码器粗码识别和精码细分算法。图 3 中 CMOS 传感器的图像尺寸为 640 pixel \times 480 pixel，判断第一条码道的位置，从图像的左侧起将各列图像数据累加，若第 1 条码道不在图像的边缘，则将第 1 条码道作为角度计算基准码道。将第 1 条码道各行图像灰

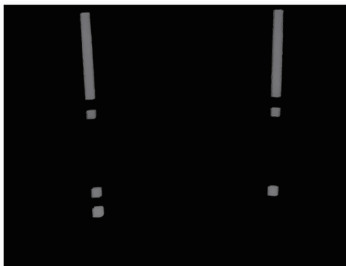


图 3 传感器采集的码盘图像

Fig. 3 Image of code discs acquired by sensors

度值累加，得到像素累加信息。若第 1 条码道在图像的边缘，则将第 2 条码道作为角度计算基准码道，并对第 2 条码道进行各行灰度值相加。码盘信息经处理后如图 4 所示。图 4(a)是对第 1 条码道各行累加后的结果；图 4(b)是对第 1 条基准线码道各列累加后的结果。

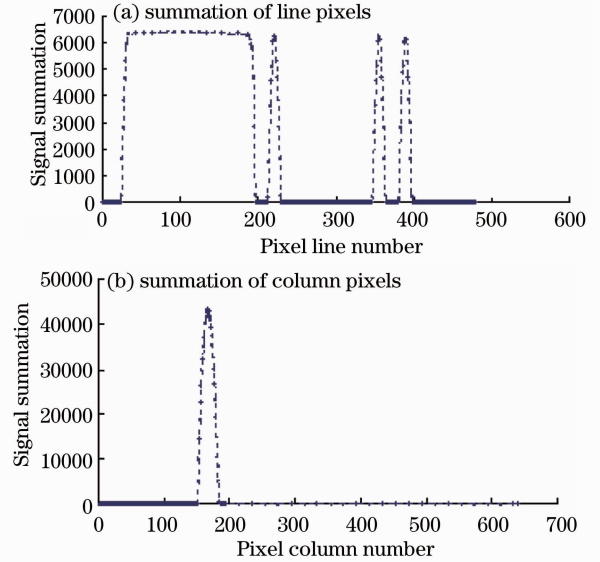


图 4 码盘图样行列累加信息

Fig. 4 Summation of line pixels and column pixels of pattern images of code disc

4.2 角度粗码计算

由码盘设计可知，码元的大小是基准线的 $1/9$ 。虽然不同时刻 CMOS 传感器采集的粗码角度各不相同，且随着码盘的旋转，码元与基准线的斜率也在变化，但可通过图 4(a)中基准线的宽度计算出码元的纵向投影宽度，并以此作为角度粗码识别的基准。在图 4(a)中，以两倍码元宽度为单位，沿基准线末端进行图像扫描，可确定出角度粗码的信息。

角度粗码二进制数值为

$$D_b = \sum_{i=0}^5 2^i d_i, \quad (5)$$

式中 d_i ($i=0, 1, 2, 3, 4, 5$) 为 6 位码元。根据图 4(a)所示，所读取的角度粗码数据为 100011。则角度粗码为

$$x = D'_b \cdot \frac{360^\circ}{2^6}, \quad (6)$$

式中 D'_b 为 D_b 的十进制数值。

4.3 角度精码计算

编码器的角度测量结果

$$X = x + \theta, \quad (7)$$

式中 X 为角度测量结果， x 为角度粗码， θ 为角度精

码。角度精码细分的实现是基于基准线图像亚像素级角度测量。如图 2 所示,每一个粗码码元都配有一条基准线,虽然码盘图像随编码器的转动而各不相同,但是基准线的质心始终位于直径为 D 的圆周上,且 D 的大小在码盘设计时已确定下来。

图 5 中 O 为码盘旋转圆心, O' 为图像传感器中心像元, θ 为某基准线旋转过中心像元的角度,即精码角度, A 为基准线质心位置, A' 为基准线质心在图像传感器上的投影, A 、 B 两点间的距离为 l_{AB} , O 、 A 两点间的距离为 l_{OA} 。则角度精码 θ 为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{l_{AB}}{l_{OA}}\right). \quad (8)$$

设 $l_{OA} = \frac{D}{2}$ mm, 故只需求

$$l_{AB} = (x_o - x_c)a \times 10^{-3}, \quad (9)$$

式中 x_o 为基准线质心行像元位置, x_c 为图像中心行像元位置, a 为像元大小。

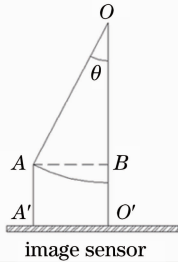


图 5 精码细分示意图

Fig. 5 Diagram of angular subdivision

5 图像式光电编码器的精码细分算法

5.1 改进基准线质心算法求角度精码

基准线质心 x_o 的计算, 可通过灰度质心法求得

$$x_o = \frac{\sum_{x=m_1}^{m_2} \sum_{y=n_1}^{n_2} xg(x, y)}{\sum_{x=m_1}^{m_2} \sum_{y=n_1}^{n_2} g(x, y)}, \quad (10)$$

式中 x_o 为基准线的质心位置, m_1 和 m_2 为图像窗口的行边界, n_1 和 n_2 为图像窗口的列边界, $(m_2 - m_1) \cdot (n_2 - n_1)$ 为用于计算质心图像的窗口, 由图 4(b) 可确定窗口的大小, $g(x, y)$ 为图像像素的灰度值。根据 (9) 式可计算出 l_{AB} 。

由于传统的质心法对于图像窗口的设置有着较高的要求, 窗口过宽会引入更多的噪声误差, 减低分辨率; 窗口过窄会略去图像边缘的信息^[13,14]。这里将采用一种改进的基准线质心法。

因像素灰度值 $g(x, y)$ 由光强和噪声共同决定。在码道刻划线的透光区域, 其光强近似相等, 故像素间 $g(x, y)$ 的差异体现在噪声的影响上。利用 Sobel 算子, 对图像中基准线区域进行掩膜运算, 把基准线图像分成基准线内部区域 Z_1 , 边缘区域 Z_2 和外部区域 Z_3 3 部分, 如图 6 所示。将 Z_1 内像素灰度累加均值化, 得灰度累加均值

$$\bar{g} = \frac{1}{k} \sum_{x, y \in Z_1} g(x, y), \quad (11)$$

式中 k 为 Z_1 区域内像素数。

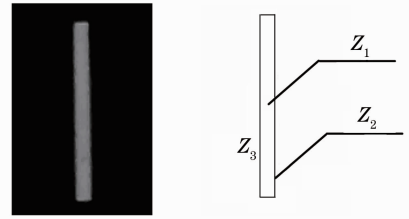


图 6 经 Sobel 算子处理的基准线图像

Fig. 6 Image of reference line processed by Sobel operator

将 (11) 式代入到 (10) 式中得到改进后的基准线灰度质心位置为

$$x_o = \frac{\sum_{x, y \in Z_1} x\bar{g} + \sum_{x, y \in Z_2} xg(x, y)}{k\bar{g} + \sum_{x, y \in Z_2} g(x, y)}. \quad (12)$$

根据 (8)、(9) 和 (12) 式, 可求得编码器角度精码

$$\theta = \arcsin\left\{\frac{\left[\left[\sum_{x, y \in Z_1} x\bar{g} + \sum_{x, y \in Z_2} xg(x, y)\right] / \left[k\bar{g} + \sum_{x, y \in Z_2} g(x, y)\right] - x_c\right] a \times 10^{-3}}{D/2}\right\}. \quad (13)$$

5.2 改进基准线质心算法的误差分析

根据误差理论, (12) 式得到的 x_o 的标准差可通过 x_o 的全微分表示, 即

$$dx_o = \sum_{x_{z_1}, y_{z_1} \in Z_1} \frac{\partial x_o}{\partial x_{z_1}} dx + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} \frac{\partial x_o}{\partial x_{z_2}} dx + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} \frac{\partial x_o}{\partial g(x_{z_2}, y_{z_2})} dg(x_{z_2}, y_{z_2}) + \frac{\partial x_o}{\partial \bar{g}} d\bar{g}, \quad (14)$$

$$\sigma_{x_o} = \left\{ \sum_{x_{z_1}, y_{z_1} \in Z_1} \left(\frac{\partial x_o}{\partial x_{z_1}} \right)^2 \sigma_{x_{z_1}}^2 + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} \left(\frac{\partial x_o}{\partial x_{z_2}} \right)^2 \sigma_{x_{z_2}}^2 + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} \left[\frac{\partial x_o}{\partial g(x_{z_2}, y_{z_2})} \right]^2 \sigma_{g(x_{z_2}, y_{z_2})}^2 + \left(\frac{\partial x_o}{\partial \bar{g}} \right)^2 \sigma_{\bar{g}}^2 \right\}^{1/2}, \quad (15)$$

式中 x_{z_i}, y_{z_i} 为 (x, y) 在 Z_i 区域内的像素点。设

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{\partial x_o}{\partial x_{z_1}} = \frac{\bar{g}}{k\bar{g} + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})}, \\ A_2 &= \frac{\partial x_o}{\partial x_{z_2}} = \frac{g(x_{z_2}, y_{z_2})}{k\bar{g} + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})}, \\ A_3 &= \frac{\partial x_o}{\partial g(x_{z_2}, y_{z_2})} = \frac{x_{z_2} [k\bar{g} + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})] - [\bar{g} \sum_{x_{z_1}, y_{z_1} \in Z_1} x_{z_1} + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} x_{z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})]}{[k\bar{g} + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})]^2}, \\ A_4 &= \frac{\partial x_o}{\partial \bar{g}} = \frac{[k\bar{g} + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})] \sum_{x_{z_1}, y_{z_1} \in Z_1} x_{z_1} - [\bar{g} \sum_{x_{z_1}, y_{z_1} \in Z_1} x_{z_1} + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} x_{z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})] k}{[k\bar{g} + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})]^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

若采用传统的质心算法,按照 Z_1, Z_2 区域的划分,将(10)式改写为如下形式:

$$x'_o = \frac{\sum_{x_{z_1}, y_{z_1} \in Z_1} x_{z_1} g(x_{z_1}, y_{z_1}) + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} x_{z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})}{\sum_{x_{z_1}, y_{z_1} \in Z_1} g(x_{z_1}, y_{z_1}) + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})}. \quad (17)$$

根据(14)、(15)式求得 x'_o 的标准差

$$\sigma'_{x_o} = \left\{ \sum_{x_{z_1}, y_{z_1} \in Z_1} \left(\frac{\partial x'_o}{\partial x_{z_1}} \right)^2 \sigma_{x_{z_1}}^2 + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} \left(\frac{\partial x'_o}{\partial x_{z_2}} \right)^2 \sigma_{x_{z_2}}^2 + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} \left[\frac{\partial x'_o}{\partial g(x_{z_2}, y_{z_2})} \right]^2 \sigma_{g(x_{z_2}, y_{z_2})}^2 + \sum_{x_{z_1}, y_{z_1} \in Z_1} \left[\frac{\partial x'_o}{\partial g(x_{z_1}, y_{z_1})} \right]^2 \sigma_{g(x_{z_1}, y_{z_1})}^2 \right\}^{1/2}. \quad (18)$$

设

$$\begin{aligned} A'_1 &= \frac{\partial x'_o}{\partial x_{z_1}} = \frac{g(x_{z_1}, y_{z_1})}{\sum_{x_{z_1}, y_{z_1} \in Z_1} g(x_{z_1}, y_{z_1}) + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})}, \\ A'_2 &= \frac{\partial x'_o}{\partial x_{z_2}} = \frac{g(x_{z_2}, y_{z_2})}{\sum_{x_{z_1}, y_{z_1} \in Z_1} g(x_{z_1}, y_{z_1}) + \sum_{x_{z_2}, y_{z_2} \in Z_2} g(x_{z_2}, y_{z_2})}, \\ A'_3 &= \frac{\partial x'_o}{\partial g(x_{z_2}, y_{z_2})} = \frac{x_{z_2} \sum_{x, y \in Z_1+Z_2} g(x, y) - \sum_{x, y \in Z_1+Z_2} xg(x, y)}{[\sum_{x, y \in Z_1+Z_2} g(x, y)]^2}, \\ A'_4 &= \frac{\partial x'_o}{\partial g(x_{z_1}, y_{z_1})} = \frac{x_{z_1} \sum_{x, y \in Z_1+Z_2} g(x, y) - \sum_{x, y \in Z_1+Z_2} xg(x, y)}{[\sum_{x, y \in Z_1+Z_2} g(x, y)]^2}. \end{aligned} \quad (19)$$

在 Z_1 区域内, $g(x, y)$ 各点 $g(x_{z_1}, y_{z_1})$ 近似相等,因此设定 $\sigma_{x_{z_1}} = \sigma'_{x_{z_1}}, \sigma_{x_{z_2}} = \sigma'_{x_{z_2}}, \sigma_{g(x_{z_1}, y_{z_1})} =$

$\sigma'_{g(x_{z_1}, y_{z_1})}$, 且 $\sigma_g = \sqrt{\frac{1}{k}} \sigma'_{g(x_{z_1}, y_{z_1})}$ 。故(14)式第1项为

$$\sum_{x,y \in Z_1} A_1^2 \sigma_{x_{Z_1}}^2 = \sum_{x_{Z_1}, y_{Z_1} \in Z_1} \left[\frac{\bar{g}}{k\bar{g} + \sum_{x,y \in Z_2} g(x_{Z_2}, y_{Z_2})} \right]^2 \sigma_{x_{Z_1}}^2 = \sum_{x_{Z_1}, y_{Z_1} \in Z_1} \left[\frac{\frac{1}{k} \sum_{x_{Z_1}, y_{Z_1} \in Z_1} g(x_{Z_1}, y_{Z_1})}{k\bar{g} + \sum_{x_{Z_2}, y_{Z_2} \in Z_2} g(x_{Z_2}, y_{Z_2})} \right]^2 \sigma_{x_{Z_1}}^2 \leq \sum_{x_{Z_1}, y_{Z_1} \in Z_1} \left\{ \frac{g^2(x_{Z_1}, y_{Z_1})}{\left[\sum_{x_{Z_1}, y_{Z_1} \in Z_1} g(x_{Z_1}, y_{Z_1}) + \sum_{x_{Z_2}, y_{Z_2} \in Z_2} g(x_{Z_2}, y_{Z_2}) \right]^2} \right\} \sigma_{x_{Z_1}}^2 = \sum_{x,y \in Z_1} A_1^2 \sigma_{x_{Z_1}}^2. \quad (20)$$

同理可证

$$\sum_{x,y \in Z_2} A_2^2 \sigma_{x_{Z_2}}^2 \leq \sum_{x,y \in Z_2} A_2^2 \sigma_{x_{Z_2}}^2, \quad \sum_{x,y \in Z_2} A_3^2 \sigma_{g(x_{Z_2}, y_{Z_2})}^2 \leq \sum_{x,y \in Z_2} A_3^2 \sigma_{g(x_{Z_2}, y_{Z_2})}^2, \quad A_4^2 \sigma_g^2 \leq \sum_{x,y \in Z_1} A_4^2 \sigma_{g(x_{Z_1}, y_{Z_1})}^2, \quad (21)$$

故 $\sigma_{x_o} \leq \sigma'_{x_o}$ 。可见 (12) 式在求基准线质心时能有效地降低标准差。

6 图像式光电编码器的硬件实现

6.1 图像式光电编码器的光源设计

与传统光电编码器一样,图像式光电编码器期望

照明系统为平行光照射^[15]。但是,理想的平行光源很难得到,为此采用准直性好的光学器件能有效地减少因光的斜射而引入的测量误差。设计中,选用

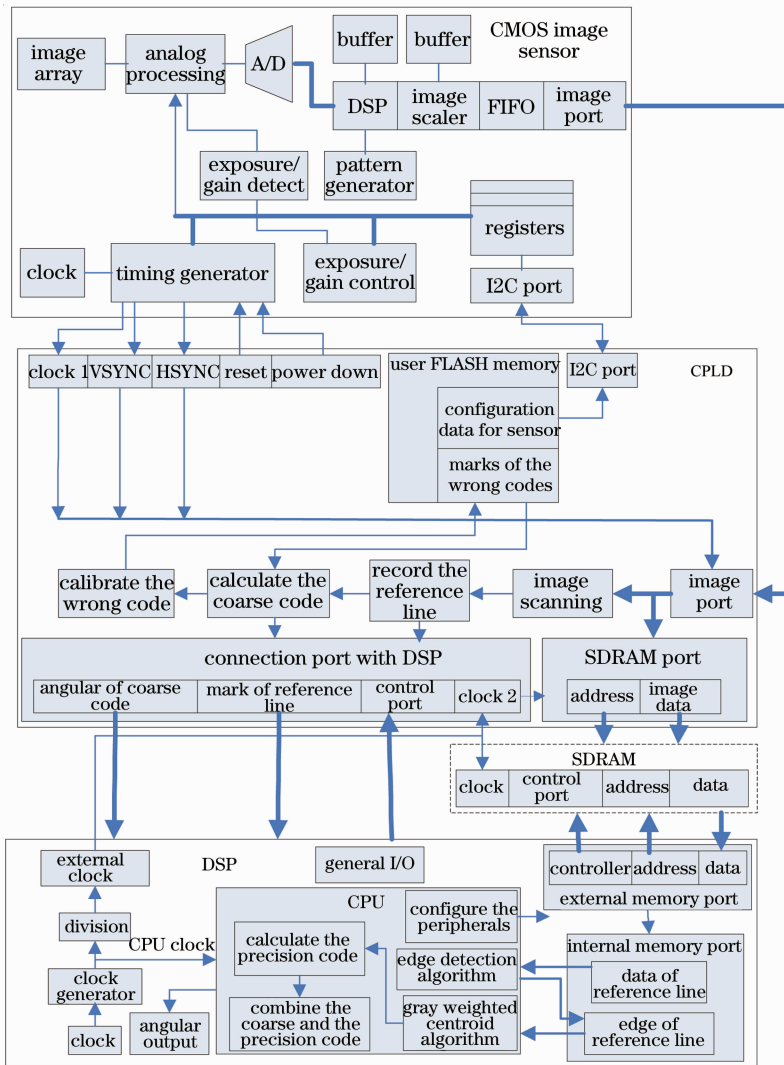


图 7 图像式光电编码器硬件功能设计结构图

Fig. 7 Hardware framework of an optical pattern rotary encoder

SFH4511 型红外发光二极管,其波长 $\lambda=950\text{ nm}$,半功率辐射角为 8° 。

CMOS 图像传感器的成像面积为 $3.984\text{ mm}\times 2.952\text{ mm}$,根据光学的几何特性,为使整个成像区都接收到光强,则发光二极管距离码盘的距离 $L\geq \cot 4^\circ\times 1.992\text{ mm}\approx 28.5\text{ mm}$ 。因未配备光学镜头,则 CMOS 图像传感器与码盘的间距可控制在 1 mm 以内。根据菲涅耳近场衍射条件

$$z_1^3 \gg \frac{1}{4\lambda} [(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2]_{\max}^2, \quad (22)$$

式中 z_1 为码盘到图像传感器之间的距离, (x,y) , (x_1,y_1) 分别为图像传感器上的点和码盘狭缝上的点的坐标值。在本文中,基准线狭缝的尺寸为 $0.9\text{ mm}\times 0.1\text{ mm}$ 。故由(20)式得, $z_1\gg 25\text{ mm}$ 。所以在不配备光学镜头的情况下,可忽略光的衍射对角度测量的影响。

6.2 图像式光电编码器的电路设计

图像式光电编码的硬件功能设计结构图如图 7 所示。由 CMOS 图像传感器采集码盘的角度信息,

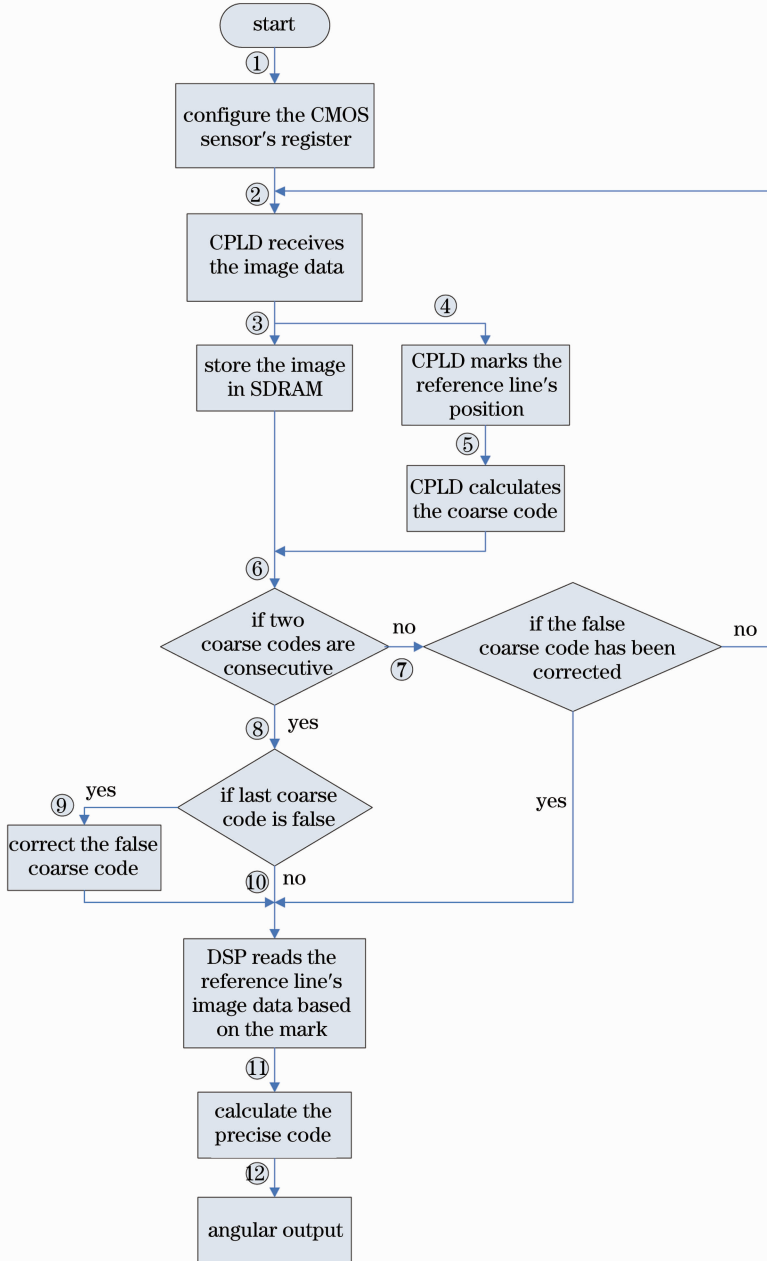


图 8 图像式光电编码器工作流程图

Fig. 8 Flow chat of an optical pattern rotary encoder

通过复杂可编程逻辑控件(CPLD)内部的 FLSH 模块配置 CMOS 图像传感器中的寄存器,涉及图像格式、时序和增益等,使其输出的图像质量最佳;CLPD 将接收的图像传感器数据存储在 SDRAM 存储器中。CPLD 器件具有并行工作的特点,可在图像数据传输的同时完成角度粗码的识别及粗码错码的识别和纠正。数字信号处理器(DSP)根据图像基准线的位置读取基准线图像数据,并采用改进灰度质心算法求取精码角位移量;再将粗码、精码组合后输出角度数据。图像式光电编码器的工作流程如图 8 所示。

7 实验验证

7.1 改进质心算法仿真实验

采用对指定图形质心求解的对比实验,验证传

统质心算法与改进质心算法的测量误差。测试图形如图 9 所示,图 9(a)和(c)的图像中没有加入噪声;设定图 9(a)的横向质心为 200.0 pixel,图 9(c)的横向质心为 188.5 pixel;图 9(b)和(d)是对原图进行了模糊处理后加入均值为零的高斯噪声。

分别用传统质心算法和改进质心算法求图形质心的横向位置 x_o ,结果如表 1 所示。改变图 9(d)中的噪声强度,在不同信噪比的情况下,再次测量图形的质心横向位置 x_o ,结果如表 2 所示。

由表 1 和表 2 可知,在没有加入随机噪声时,两种质心算法测量的结果相同。当加入随机噪声,且随着噪声的强度增强时,改进质心算法的测量结果要优于传统质心算法。可见通过改进质心算法均值化图形内部区域,能有效地抑制噪声,提高测量精度。

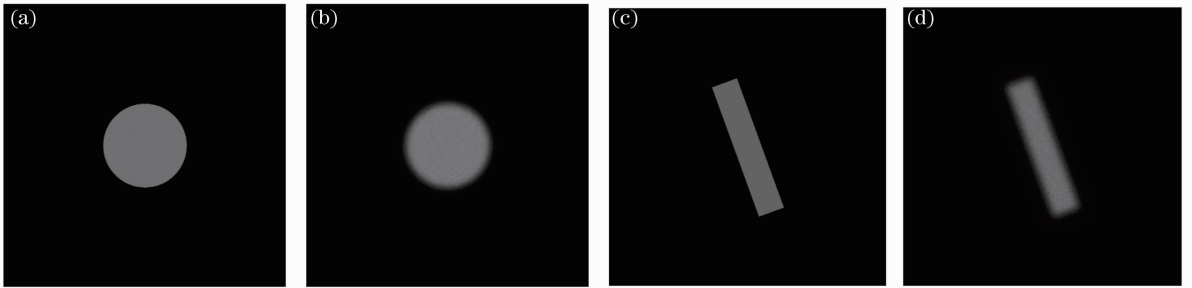


图 9 质心检测算法测试图形

Fig. 9 Test patterns for centroid detection algorithm

表 1 在不同图形中的定位结果

Table 1 Accuracy comparison at different patterns

Image number	Centroid algorithm		Improved centroid algorithm	
	x_o /pixel	Error /pixel	x_o /pixel	Error/pixel
a	200.042	0.042	200.042	0.042
b	200.124	0.124	200.082	0.082
c	188.561	0.061	188.561	0.061
d	188.345	-0.155	188.423	-0.077

表 2 不同噪声下的定位结果

Table 2 Accuracy comparison at different noise levels

Signal-to-noise ratio /dB	Centroid algorithm		Improved centroid algorithm	
	x_o /pixel	Error /pixel	x_o /pixel	Error/pixel
41	188.550	0.050	188.541	0.041
35	188.568	0.068	188.552	0.052
26	188.308	-0.192	188.405	-0.095

7.2 图像式光电编码器的分辨力检测

编码器检测装置原理图如图 10 所示,基准光电编码器是一台精度为 $2''$ 的 23 bit 绝对式光电编码器。将图像式光电编码器及基准编码器数据经采集

电路送至计算机。

图 11 为图像式编码器软件调试界面。光电编码器的分辨力,是指编码器所能测量的最小角度值。如果通过数字量显示编码器的分辨力,很有可能因

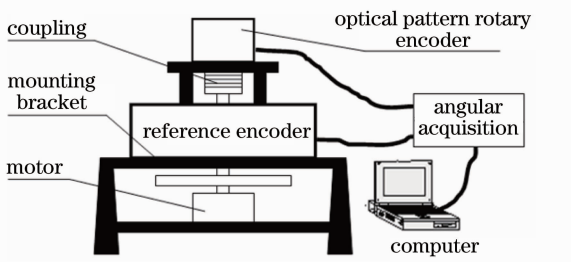


图 10 检测装置原理图

Fig. 10 Framework of the measuring system

为编码器的转动过快或处理器的处理延迟出现低位漏检的情况,为此将角度值变换为指示灯的形式便于观察,如图 11(b)所示,18 bit 显示灯对应编码器的分辨力为 $\frac{360^\circ \times 3600}{2^{18}} \approx 5''$ 。通过基准编码器的微调转动,编码器调试窗口的右侧的 18 bit 显示灯逐位闪亮。

检测方法:对图像式光电编码器的分辨力进行检测,分别按顺时针和逆时针方向观察调试软件中数据显示灯 7~18 bit 的进位情况,检测两个粗码码道之间的精码分辨力(共 4096 个)。

检测结果:1)编码器读数从 0~4095 进位连续,无跳码、漏码,进位正常;2)对应每一个量化值的读数稳定;3)正、反转工作正常。

7.3 角度测量精度检测

以 30° 为图像式光电编码器检验间隔,用 23 bit 基准编码器作为检验基准,测量图像式光电编码器的角度误差,结果如图 12 所示。可知,分辨力为 $5''$ 的图像式光电编码器的角度测量误差峰峰值为 $51''$ 。

处理电路对粗码的识别及亚像素级精码细分,可提

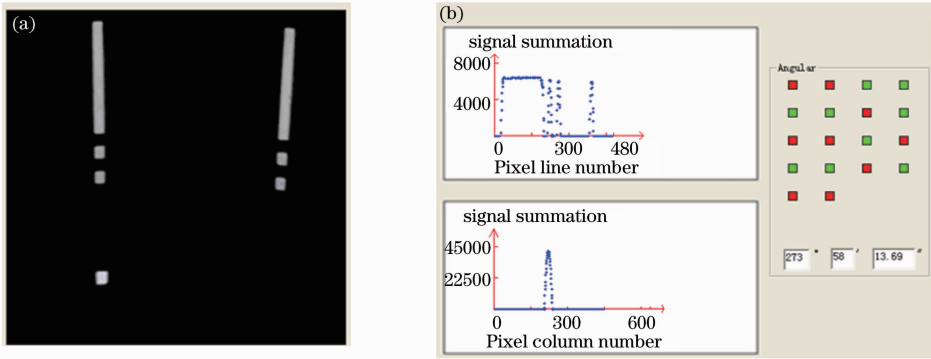


图 11 图像式编码器软件调试软件

Fig. 11 Software for an optical pattern rotary encoder

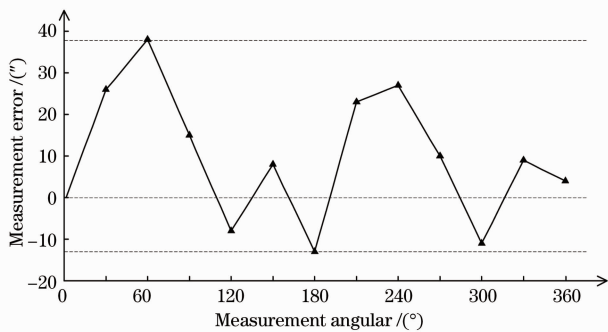


图 12 图像式光电编码器精度检测误差

Fig. 12 Precision measurement error for an optical pattern rotary encoder

8 结 论

研究的面阵图像式光电编码器,采用 6 bit 二进制编码及编码基准线相结合的方式,通过 CMOS 图像传感器对码盘编码图像的提取,经过 CPLD、DSP

高编码器测角分辨力。实验结果表明,在未配备光学镜头的情况下,经过对码盘图像的粗码识别和精码计算,可实现光电编码器精码的 4096 份细分,测角分辨力达 $5''$,角度测量误差峰峰值 $51''$,满足航天设备对小型角位移光电编码器的测角使用要求。

参 考 文 献

- Sun Ying, Wan Qiu-hua, Wang Shui-je *et al.*. Design of signal process system for spaceborne photoelectric encoder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(5): 1182~1188
- 孙莹, 万秋华, 王树洁等. 航天级光电编码器的信号处理系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(5): 1182~1188
- Zhu Fan, Wu Yiming, Liu Changchun. Eliminating influence of grating encoder's eccentricity and vibration to Moire fringes signal by four reading heads [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412008
- 朱帆, 吴易明, 刘长春. 四读头法消除码盘偏心 and 振动对叠栅条纹相位测量的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412008
- Chen Tingzheng, Lü Haibao. CCD subdivision method and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1396~1399
- 谌廷政, 吕海宝. CCD 细分技术方法研究及应 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1396~1399

- 4 M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó *et al.*. Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder [J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2010, **157**(1): 161~167
- 5 Su Haibing, Liu Enhai. Research on single-ring absolute encoder and its applications[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(2): 74~78
苏海冰, 刘恩海. 单圈绝对式编码器的研究[J]. 光学精密工程, 2002, **10**(2): 74~78
- 6 Chen Yun, Zhao Xingguo. Research on single-ring absolute photoelectric shaft encoder[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 230~233
陈 贇, 赵兴国. 单圈绝对式光电轴角编码器的研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(2): 230~233
- 7 Tan Yinghao, Yuan Bo, Meng Zibo. A single-track absolute angular encoder using the linear detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1771~1775
谈颖皓, 袁 波, 孟子博. 基于线阵探测器的单圈绝对轴角编码器[J]. 光子学报, 2011, **40**(12): 1771~1775
- 8 Wang Shaobai, Wang Chunhong, Rao Changhui. Centroid detection error analysis of a point source with a single blind pixel in spot area[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(3): 030101
王少白, 王春鸿, 饶长辉. 光斑区域内存在单个盲元条件下点源目标质心探测误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(3): 030101
- 9 Zeng Guiying, Xie Yuan. Sub-pixel locating accuracy for a CMOS imaging system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(7): 69~73
曾桂英, 解 园. CMOS成像系统亚像元定位精度研究[J]. 光电工程, 2011, **38**(7): 69~73
- 10 Shen Baoliang, Sun Jianfeng, Zhou Yu *et al.*. Influence of time-varying atmospheric turbulence to facular orientation deviation in dynamic process[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805004
沈宝良, 孙建锋, 周 煜等. 时变湍流对动态移动光斑定位精度的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(8): 0805004
- 11 Liu Guodong, Liu Bingguo, Chen Fengdong *et al.*. Study on the method of the accuracy evaluation of sub-pixel location operators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3446~3451
刘国栋, 刘炳国, 陈凤东等. 亚像素定位算法精度评价方法的研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(12): 3446~3451
- 12 Xia Aili, Ma Caiwen. Measurement of focal spot centroid based on image processing [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2011, **22**(10): 1542~1545
夏爱利, 马彩文. 基于图像处理技术的光斑质心高精度测量[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(10): 1542~1545
- 13 Cheng Xuan, Zhao Huijie. Dark-current calculation method of area CCD based on bad pixels detection in the scene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0404002
程 宣, 赵慧洁. 基于场景坏点检测的面阵 CCD 暗电流估计方法[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0404002
- 14 Su Chengzhi, Chen Dong, Cao Guohua *et al.*. Reducing the influence of non-uniformity of luminous intensity on the inhomogeneity correction for CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(4): 680~684
苏成志, 陈 栋, 曹国华等. 减小光强不均对 CCD 非均匀性校正的影响[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(4): 680~684
- 15 Zhu Xiaoli, Chen Junning. Beam collimation of LED in optical encoder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(4): 750~756
朱孝立, 陈军宁. 光电编码器 LED 光源的准直[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(4): 750~756

栏目编辑: 何卓铭