

用低精度 CCD 获得高精度测量方法的研究

王和顺^{1,2} 陈次昌¹ 黄惟公¹

(¹ 西华大学机械工程与自动化学院, 成都 610039)
(² 西南交通大学机械工程学院, 成都 610031)

摘要: 为了大幅提高线阵 CCD 的测量精度, 提出了一种全新的 CCD 使用方法。该方法是将 N 个像元间距为 H 的线阵 CCD 器件并排组合在一起, 并沿像元线性分布方向以距离为 H/N 依次均匀错开排列。多个线阵 CCD 的感光电信号经多通道模-数同步采集, 保存到存储器中指定位置。然后, 通过对所有 CCD 测量数据的分析计算来获得精确的测量值。分别采用单 CCD 和双 CCD 错排对长为 30mm, 直径为 5.000 mm、8.000 mm、12.000 mm 的三个标准杆件的直径进行了测量。结果表明, 双 CCD 错排可获得两倍于单 CCD 的测量精度。该方法可从理论上彻底打破 CCD 像元间距的限制, 并使线阵 CCD 的测量精度大幅度地提高。

关键词: 测量; CCD 像素错排; 非接触式测量; 像元间距

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A

Research on the Method of High Accuracy Measurement by Use of Low Accuracy CCD

Wang Heshun^{1,2} Chen Cichang¹ Huang Weigong¹

(¹ School of Mechanical Engineering and Automation, Xihua University, Chengdu 610039)
(² School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: For higher measurement accuracy of linear charge coupled device (CCD), a new method of using CCD was proposed. Several linear CCDs were fit together, and staggered by the distance of H/N , H was space between pixels, N was CCD amount. The photo electric signals were collected in-phase by multicenter A/D, and saved in memorizer. Then accurate value was obtained through analyzing all these data. Diameters of 5.000 mm, 8.000 mm and 12.000 mm of three standard poles were measured by single CCD and two staggered CCD with 30 mm stagger long. The result showed that accuracy using two staggered CCD was twice as high as that using single CCD. The method could avoid space between pixels astriction theoretically, so higher measurement accuracy was gained.

Key words: measurement; CCD image stagger; noncontacting measurement; image space-between

1 引 言

CCD 图像传感器自问世以来, 由于其具有高灵敏度、低噪声、长寿命、低功耗和高可靠性等优点, 发展十分迅速, 在工业生产中得到广泛地应用。CCD 像元间距小, 几何精度高, 配置适当的光学系统, 可以获得很高的分辨力, 特别适用于各种精密图像传感和无接触工件尺寸的在线检测^[1,2]。

但是长期以来, 对于给定的 CCD 器件, 如采用

1:1 光学成像系统来进行测量, 由于其像元间距恒定, 往往像元间距的大小就决定了此 CCD 器件用来进行测量时的测量精度。如采用放大光学成像系统来进行测量, 理论上可使测量精度提高相应的倍数, 但光学成像系统相对较复杂。在数据处理方法上, 对于传统的信号处理方法如二值法来说, 其测量误差从理论上分析就可达到像元间距量级。虽然国内外的很多专家学者在提高 CCD 测量精度方面, 从不

* 国家自然科学基金(90410013)资助课题。

作者简介: 王和顺(1975~), 男, 四川西昌市人, 西南交通大学机械工程学院博士研究生, 主要从事单片机应用、CCD 测量技术的教学和科研工件。E-mail: wangheshun@sohu.com

收稿日期: 2004-10-11; 收到修改稿日期: 2005-03-08

同的角度提出了很多有效的方法^[3],但都没能突破 CCD 像元间距的影响,因而很难使测量精度有质的飞跃。

目前,国内外对提高 CCD 测量精度方法的研究很多。综合起来看,主要集中在两个方面,其一是通过增加系统元件^[4],改善系统硬件构成以提高测量精度;其二是通过软件进行数据处理来提高测量精度^[4,5]。

模糊成像法就是通过增加系统元件达到提高 CCD 测量分辨力的一种方法。其特点是对 CCD 测量系统的信号获取部分进行简单的改进。该方法难以从理论上准确地确定测量精度的提高程度,但从实验数据来看,它在一定的范围内效果是显著的,如使用像元间距为 $14\ \mu\text{m}$ 的线阵 CCD 来对一标准样件的直径进行测量,其测量误差基本上可控制在 $5\sim 7\ \mu\text{m}$ 以内^[4]。

边缘拟合法是通过对 CCD 实际输出的信号曲线进行算法处理,以获得更精确的边缘位置。同样,该方法难以从理论上准确地确定其测量精度的提高数值,但从统计数据来看,合理地使用它至少可使测量误差减小一半^[5]。

本文在对现阶段主要的提高 CCD 测量精度方法研究的基础上,提出了一种全新的使用低精度线阵 CCD 获得高精度测量的方法,可从理论上彻底打破其像元间距的影响,其基本原理是将多个 CCD 器件组合在一起使用。在文献^[6]中作者提出了一种将多个 CCD 组合起来对空间物体位置进行准确测量的方法,其主要是利用多 CCD 来确定被测物的空间位置,虽然它对线性尺寸的测量没有直接关系,但它也给研究人员提供了一种思路。

2 基本原理

图 1 所示为用低精度线阵 CCD 获得高精度测量的方法的基本原理示意图(单边测量,双边测量可类推),它是将多个(此处为 7 个)型号相同的线阵 CCD 器件依次均匀排列,具体是先将它们并排放在一起,然后将它们沿线阵 CCD 像元线性分布方向依次均匀错开排列,相邻两 CCD 器件沿像元线性分布方向错开的距离为该 CCD 器件像元间距与所使用的 CCD 器件数量的商,假定 A 为相邻像元中心错开的距离, H 为该 CCD 器件沿其像元线性分布方向相邻两像元中心间距, N 为 CCD 器件的个数,则有

$$A = H/N, \quad (1)$$

在图 1 中,假定被测物轮廓边缘刚好为一水平线,黑心圆点和空心圆点代表 CCD 器件的像元,其中黑心圆点代表该像元处无明显感光,即该处为被测物所遮挡,空心圆点代表该像元处明显感光,即该处为被测物轮廓以外。罗马数字代表 CCD 器件的序号, (n) 和 $(n+1)$ 代表某个 CCD 器件上的第 n 个或第 $n+1$ 个像元。

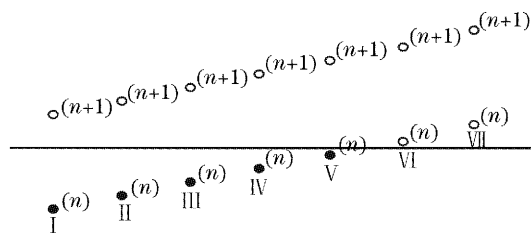


图 1 基本原理

Fig. 1 Fundamental

首先对序号为 I 的 CCD 器件进行分析,被测物轮廓边缘刚好处于该器件的第 n 个和第 $n+1$ 个像元之间,如仅仅就此一个 CCD 器件,就很难确定被测物边缘在该 CCD 器件第 n 个和第 $n+1$ 个像元之间的准确位置,在此暂不对被测物的边缘位置作出最后判断。再看序号为 II 的 CCD 器件,如被测物的边缘仍刚好落在该 CCD 器件第 n 个和第 $n+1$ 个像元之间,则继续依次看下一个 CCD 器件的第 n 个和第 $n+1$ 个像元的感光情况,直到某个 CCD 器件的第 n 个和第 $n+1$ 个像元都明显感光为止,在图 1 中即为第 VI 个 CCD 器件。

在以上分析中,如设第 I 个 CCD 器件的第 n 个像元位置处所对应的测量值为 a ,第 n 个和第 $n+1$ 个像元都明显感光的 CCD 器件序号为 m ,被测物的测量值为 L ,并按精度较低的二值法进行处理,则有

$$L = a + (H/N)(m - 1), \quad (2)$$

或
$$L = a + (H/N)(m - 2), \quad (3)$$

无论是采用(2)式或(3)式来计算测量值,其误差理论上均不会超过 H/N 。

在以上讨论中假定被测物轮廓边缘刚好为一直线,而实际应用中因线阵 CCD 整个集成电路结构的外形尺寸较大,不能使多列 CCD 像素紧密排列,所以该方法仅适合于被测物边缘与假定条件基本一致的对象,如对卷烟外径、阶梯轴外径的测量。

3 一种特殊情况的处理

在实际操作中,有一种特殊情况如仍按以上的分析来进行判断,则无论如何也找不到这样一个

CCD 器件,使其上第 n 个和第 $n+1$ 个像元都明显感光。如图 2 所示。

在图2所示的这种情况中,被测物轮廓边缘刚

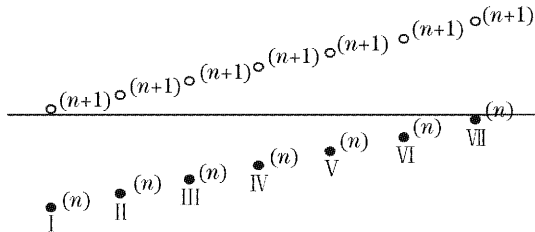


图 2 一种特殊情况

Fig. 2 A special instance

好处于第一个 CCD 器件的第 $n+1$ 个像元和最后一个 CCD 器件的第 n 个像元之间,因此遍历所有的 CCD 器件,也找不到一个使其第 n 个和第 $n+1$ 个个像元都明显感光,而此时根据被测物边缘所处的特殊位置,不难确定此时有

$$m = N + 1, \tag{4}$$

然后仍可按(2)式或(3)式来计算测量值。

4 测量系统及数据处理流程

图 3 所示为测量系统中,CCD 感光信号的处理过程框图。

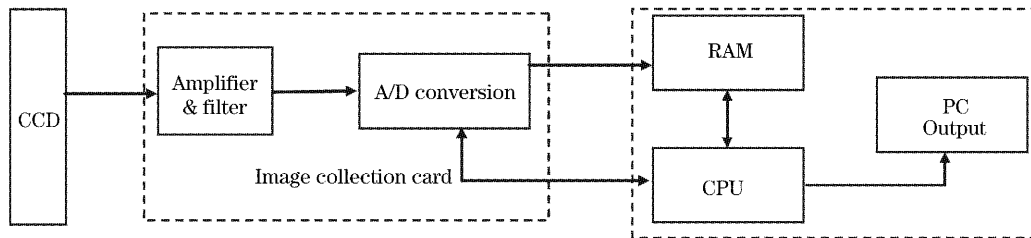


图 3 测量系统数据处理框图

Fig. 3 Block diagram of measurement system data processing

多个线阵 CCD 传感器产生的电信号,经放大滤波,由多通道输入模-数转换器同时进行采集。然后在 CPU 的控制下,首先读出第一个线阵 CCD 的采集信号,并依次存入存储器数组的第一行中,再读出第二个线阵 CCD 的采集信号,并依次存入存储器数组的第二行中,按此方式分别将所有线阵 CCD 图像传感器上的感光信号依次分别存入数组的对应位置。假定该数组为 $D(i, j)$,是一个二维数组,其中,数组的行数为线阵 CCD 图像传感器的个数,数组的列数为单个线阵 CCD 像素的个数。所以在数据处理时,该数组中的各元素就分别对应 CCD 图像传感器上的各感光单元。

测量结果分析过程可简单描述如下:首先读取数组 D 中第一行元素,先从第一行第一个元素读取,直到第一行最后一个元素,找到其中第 n 个元素明显感光(不明显感光),而第 $n+1$ 个元素不明显感光(明显感光)的那两个感光二极管位置,并标定它。然后,读取数组 D 中第二行,寻找与第一行中已经标定的光电二极管列数相同的数组元素,判断它们的感光情况,如与第一行相同,则继续读取下一行数据,否则标定 m ,如当前行号为 i ,则 $m=i-1$ 。

CCD 采样信号的处理流程如图 4 所示。

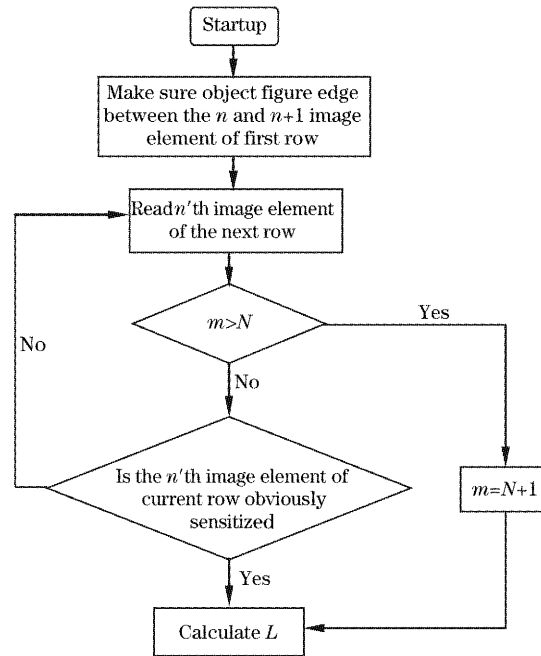


图 4 数据处理流程图

Fig. 4 Data disposing flow chart

5 实验及误差分析

图 5 所示为双边测量时测量装置构成示意图,其中 1 为光源,2 为透镜组,3 为待测试件,4 为线阵 CCD 器件组,其信号处理电路构成如图 3 所示。

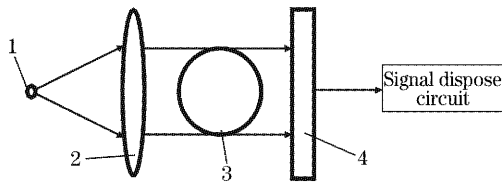


图 5 测量装置示意图

Fig. 5 Measurement device sketch map

对三个长为 30 mm, 直径分别为 5.000 mm, 8.000 mm, 12.000 mm 的标准杆件, 分别采用单 CCD 和双 CCD 进行了测量, 在数据处理时分别采用二值法和模糊成像法进行了计算, 测量结果如表 1 所示。在实验中 CCD 中心距为 14 μm , 像距 $L=10\text{ cm}$, 光栏孔径为 0.3 cm 并采用白光照射, 成像比例为 1:1。被测量三个标准杆件的直径均精确至微

表 1 实验数据

Table 1 Experiment data

Measurement order	Single CCD /mm		Double CCD /mm		Accurate value /mm
	Two-value method	Fuzzy image method	Two-value method	Fuzzy image method	
First time	4.998	5.003	4.998	5.000	5.000
	7.994	7.998	8.001	7.999	8.000
	11.998	12.003	11.998	12.000	12.000
Second time	4.998	5.002	4.998	5.000	5.000
	8.008	8.004	8.001	8.000	8.000
	11.998	12.001	11.998	12.001	12.000
Third time	5.012	5.003	4.998	5.000	5.000
	7.994	8.001	8.001	8.000	8.000
	12.012	12.002	11.998	12.000	12.000

图 6 所示为 CCD 器件数量与测量系统最大理论误差的关系图, 由图可见, 在少量增加 CCD 的数量时, 测量精度大幅提高, 但当 CCD 数量超过 5 以后, 再增加 CCD 数量对提高测量精度作用已不大。

从表 1 中的多次测量数据来看, 测量过程并没有出现大的误差, 所有的测量误差都是落在理论分析的范围以内的。但在两种情况下, 多线阵 CCD 测

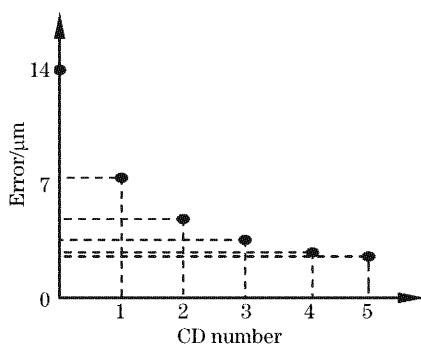


图 6 CCD 数量与误差关系

Fig. 6 Relation of CCD number and error

米。双 CCD 测量时使用分辨力小于 1 μm 的千分螺杆校准器来对两 CCD 错排距离进行校准。

由表 1 可见, 采用二值法测量, 因为像元间距的存在, 测量值总是在真实值两边跳动, 在单 CCD 测量时其最大测量误差为一个像元间距; 在双 CCD 测量时其最大测量误差为半个像元间距, 依此可推知, 如采用 N 个 CCD 组合起来进行测量, 则使用二值法计算其最大误差应为该 CCD 像元间距的 N 分之一。而采用模糊成像法, 在单 CCD 进行测量时, 其误差控制在 5 μm 以内, 在双 CCD 进行测量时, 误差控制在 2 μm 以内, 与真实值非常接近。依此计算, 如采用 4 片 CCD 组合进行测量, 并采用模糊成像法, 则测量误差将控制在 0.5 μm 以内。如果使用像元间距稍小一些的 CCD 器件组合将获得更高的测量精度。

量系统将会出现大的误差。

其一是在确定被测物边缘, 落在第一个线阵 CCD 的第 n 个和 $n+1$ 个像元之间时判断出错, 这种情况在实际应用中是有可能出现的, 这是因为被测物边缘经 CCD 成像后的信号, 因为光的衍射效应以及成像系统的球差、像差和调焦误差等原因, 并不是刚好在相邻两个像元上发生突变, 而往往是在相邻几个像元处渐变, 这就有可能造成对被测物边缘位置的误判, 如果这样的错误一旦发生, 多线阵 CCD 将不会起到任何作用。但根据以往对单线阵 CCD 的测量系统的使用和研究情况来看, 这种情况在实际应用中, 如边缘检测算法和系统设计得当, 是很少出现的, 对它的控制, 应该说已经比较成熟。

其二是线阵 CCD 排列时, 如排列不均匀, 有可能使测量误差变大。例如, 本来被测物准确的边缘位置是落在第 5 个 CCD 器件的第 n 个像元和第 6 个 CCD 器件的第 n 个像元之间的, 但由于第 5 个 CCD 器件的排列位置错误, 有可能使测量时结果为

边缘位置落在第 4 个 CCD 器件的第 n 个像元和第 5 个 CCD 器件的第 n 个像元之间,这将造成系统测量值误差至少扩大为理论值的两倍以上。对这种情况,处理方法,其一是尽量使各线阵 CCD 的排列位置调整准确,其二是在数据处理时,要对感光情况发生变化的 CCD 器件相邻的多个器件进行分析,以使误差尽量控制在理论值的两倍左右。

6 结 论

在对现阶段主要的提高 CCD 测量精度方法研究的基础上,提出了一种全新的使用低精度线阵 CCD 获得高精度测量的新方法。主要结论如下:

- 1) 基本原理是使用多个线阵 CCD 并使其像素错开排列,组合起来进行测量。
- 2) 可从理论上彻底打破 CCD 像元间距及感光像素自身大小对测量精度的影响。
- 3) 因单个线阵 CCD 的集成电路结构尺寸的影响,使该方法适用范围受到限制。
- 4) 针对 3) 所提出的应用范围受到限制的问题,有必要研制一种新型 CCD 图像传感器,它既可打破 CCD 像元间距及感光像素自身大小对测量精度的影响,又不会受自身集成电路结构尺寸的影响。

参 考 文 献

- 1 Zhou Jie, Qiu Shenggen, Liu Xu *et al.* Measurement system of projection lens based on CCD modulation transfer function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 260~263 (in Chinese)
周 杰, 邱胜根, 刘 旭 等. 应用 CCD 的投影物镜调制传递函数测量系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 260~263
- 2 Pan Wei, Zhao Yi, Ruan Xue Yu. A new method for getting high precision phase in structural light measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 687~691 (in Chinese)
潘 伟, 赵 毅, 阮雪榆. 结构光测量中获取高精度相位的新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 687~691
- 3 Chen Tingzheng, Lu 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用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1396~1399
- 4 Wang Heshun, Chen Hua. A new method for high accuracy in CCD measurement [J]. *January of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2001, **33**(5): 63~65 (in Chinese)
王和顺, 陈 华. 一种提高 CCD 测量精度的新方法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2001, **33**(5): 63~65
- 5 Jin Jie, Xu Xilin. A new way to improve the resolution of CCD [J]. *Modern Metrology & Measurement*, 1997, **5**(3): 37~41 (in Chinese)
金 杰, 徐锡林. 提高 CCD 分辨力的一种尝试[J]. *现代计量测试*, 1997, **5**(3): 37~41
- 6 Lu Haibao, Yang Huayong, Huang Rui *et al.*. Research on the intersection measuring techniques with multiple charges coupled devices[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(2): 14~19 (in Chinese)
吕海宝, 杨华勇, 黄 锐 等. 多 CCD 交汇测量技术研究[J]. *光电工程*, 1998, **25**(2): 14~19