

基于 CMOS 图像传感器的实时二维相关测速法

张玉欣^{1,2,3}, 刘 宇⁴, 葛文奇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, E-mail: qxlife816@163.com;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 北华大学 电气信息工程学院, 吉林 132021;

4. 吉林铁道职业技术学院 铁道工程系, 吉林 132001)

摘要: 为了提高非接触式测量的精度与实时性, 以 FPGA 为基础提出了一种基于 CMOS 图像传感器的实时二维相关测速法。介绍了二维相关测速的原理和实现方法, 推导出该方法的二维测速范围和测速精度。所采用的 CMOS 图像传感器具有 1280×1024 像素的分辨率, 测量精度可达 1 个像素, 并在此基础上采用求重心法进行 8 细分将测量精度提高到 $1/8$ 像素。利用 FPGA 将传统的数学运算转换为逻辑运算提高了运算速度和可靠性, 实现了实时性测量。通过实验验证了该方法的可行性。

关键词: COMS; 相关测速; 二维; FPGA

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A

Real-Time Two-Dimensional Correlation Speed Measurement Based on CMOS Image Sensor

ZHANG Yu-xin^{1,2,3}, LIU Yu⁴, GE Wen-qi¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail: qxlife816@163.com;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China;

3. Institute of Electric and Information Engineering, Beihua University, Jilin 132021, China;

4. Department of Railway Technology Engineer, Jilin Railway Vocational and Technology College, Jilin 132001, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and real-time performance of the non-contact measurement, a real-time two-dimensional correlation speed measurement was proposed on image processing using high speed CMOS based on FPGA. The principle and practical work method of the measurement were analyzed, the range and accuracy of this two-dimensional correlation speed measurement were deduced. The resolving power of the CMOS image sensor is one pixel, and it can be improved to $1/8$ pixel by Subdivision Technology. The mathematical operation is converted to logical operation through FPGA. Finally, a preliminary test result is presented.

Key words: CMOS; correlation speed measurement; two-dimension; FPGA

1 引言

非接触式速度测量能够避免接触式测量中出

现的机械磨损和前滑现象而提高测量精度, 结构简单, 因而被广泛应用于速度、流量等的测量领域。传统的相关测速利用两个光电探测器的信号

进行相关运算, 由于信息量小而导致测速精度低, 不能捕捉精确的速度变化过程。若利用一个线阵 CCD 作为光电探测器, 虽然可以提高采样信息量, 但是只适用于严格一维线性运动的场合。高速、大面阵 CCD 和 CMOS 图像传感器的出现, 为非接触式速度在线测量提供了性能优良的光电传感器^[1-2], 信号采集量大、精度高, 并且能够实现二维速度测量; 但是, 由于运算量大, 实现高速运算解决实时测量成为所要解决的主要问题。目前, FPGA 技术发展迅速, 由于 FPGA 是利用硬件实现相关运算, 所以速度快、精度高; 同时, 采用 FPGA 能实现相关器件的高度集成化, 减少分立元件带来的系统误差大、精度低、各元件速度不匹配、极间电容导致的 PCB 制版困难等问题。

本文提出了一种基于 CMOS 图像传感器的实时二维相关测速法, 采用 FPGA 提高了运算速度和可靠性, 实现了实时性测量。

2 测速系统组成

2.1 图像传感器的选择

目前, 采用主动像敏单元结构的 CMOS 图像传感器的性能参数已与 CCD 图像传感器接近, 而在功能、功耗、尺寸和价格方面都要优于 CCD 图像传感器, 因此我们选用 CMOS 图像传感器^[3] 构成测速系统。

为了实现瞬时速度的测量, 需要采用高帧频的图像传感器以尽量缩小两帧的时间间隔; 为了保证测量精度, 应该尽量采用高像素图像传感器增加参与相关运算的样本数且提高分辨率。综合各种因素, 我们采用 LUPA-1300-2 传感器, 它是 Cypress 出品的一款高灵敏度、高速 SXGA(超级扩展型图形阵列) CMOS 图像传感器, 针对机器视觉和运动分析应用而开发, 具备 500 帧/s 的高帧频以及窗口功能, 能够提供无失真图像并执行快速读出。这款传感器拥有 $1\ 280 \times 1\ 024$ 像素, 像素尺寸为 $14\ \mu\text{m} \times 14\ \mu\text{m}$, 12 路 10 位数字 LVDS 输出。通过 SPI 接口进行编程, 采用窗口或二次采样读出模式, 可以使这款传感器达到更高的帧频。

2.2 系统构成

由于激光具有单色性好、相干性强、光束准直精度高的优点, 所以我们采用激光作为系统的光源。系统安装时, 要注意不要将激光束直接照射

到 CMOS 图像传感器的光敏单元上, 以免激光过强的能量损坏光敏单元。

本文利用激光在运动物体表面造成的散斑获取灰度起伏明显的图像信号, 通过检测其连续两帧的图像灰度频谱进行相关运算来确定被测物体的运动速度^[4-5]。所设计的测速系统结构如图 1 所示。

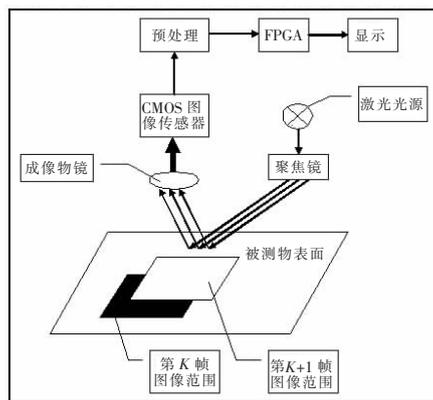


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 System structure diagram

2.3 测速范围

下面以计算被测物体的横向(即水平方向)运动速度为例加以说明。如果光学系统的缩放率为 β , CMOS 像素尺寸为 σ , 被测物体的横向相对移动量为 ΔL , 在像敏上对应的移动量为 $\Delta L'$, 被测物体横向速度为 v , 两帧时间间隔为 Δt , 则有式(1)成立^[6]:

$$\Delta L' = \beta \cdot \Delta L = \beta \cdot v \cdot \Delta t \quad (1)$$

再设 $\Delta L'$ 对应像素个数为 m , 则:

$$\Delta L' = \sigma \cdot m \quad (2)$$

由式(1)、(2)得:

$$v = \frac{\sigma \cdot m}{\beta \cdot \Delta t} \quad (3)$$

当式(3)中 $m=M$ 时, 相关函数 $R_{k,k+1}(m, n)$ 达到最大值。设两帧最大横向位移为 128 像素, 最大纵向(即垂直方向)位移为 32 像素。当 $M=128, \beta=0.35$ 时有:

$$v_{\max} = \frac{14 \times 10^{-6} \times 128}{0.35 \times 0.002} = 2.56 \text{ m/s} \quad (4)$$

即该系统纵向最大可测运动速度为 2.56 m/s。

同理, 可推导出横向最大可测运动速度为 0.64 m/s。

系统位置测量精度为 1 个像素, 测速分辨率为 0.02 m/s。为了进一步提高测量精度可采用重心法对相关函数最大值附近的数据进行 8 细分

运算,这样测速分辨率可达到 2.5 mm/s。

3 FPGA 实现图像实时相关测速的原理

3.1 相关原理

两个信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的互相关函数表示它们的相关性或相似程度,定义为:

$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t - \tau) dt \quad (5)$$

信号 $x(t)$ 的自相关函数表示其本身在相距时间为 τ 的两点间的相似性和关联程度,定义为:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t - \tau) dt \quad (6)$$

自相关函数在 $\tau=0$ 处取得最大值,其物理意义是信号与其自身的相关值总是最大。

对于二维信号 $x(t, l)$ 、 $y(t, l)$ 的二维自相关函数和互相关函数分别为:

$$R_{\alpha, \beta} = \lim_{T, L \rightarrow \infty} \frac{1}{T \cdot L} \int_0^T \int_0^L x(t, l) x(\alpha + t, \beta + l) \cdot dl \cdot dt \quad (7)$$

$$R_{\alpha, \beta} = \lim_{T, L \rightarrow \infty} \frac{1}{T \cdot L} \int_0^T \int_0^L x(t, l) y(\alpha + t, \beta + l) \cdot dl \cdot dt \quad (8)$$

在实际情况下,由于 T 只能取有限值,因此信号的互相关函数和自相关函数的一、二维情况分别如下所示:

$$R_{XY}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t - \tau) dt \quad (9)$$

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t - \tau) dt \quad (10)$$

$$R_{\alpha, \beta} = \frac{1}{T \cdot L} \int_0^T \int_0^L x(t, l) x(\alpha + t, \beta + l) \cdot dl \cdot dt \quad (11)$$

$$R_{\alpha, \beta} = \frac{1}{T \cdot L} \int_0^T \int_0^L x(t, l) y(\alpha + t, \beta + l) \cdot dl \cdot dt \quad (12)$$

在数字电路中一、二维自相关函数的定义分别为:

$$R_x(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k\delta) x(k\delta - \tau) \quad (13)$$

$$R_{i, j} = \frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} y(n, m) x(i + n, j + m) \quad (14)$$

CMOS 图像传感器两帧之间的最大移动距离如果过短就降低最大可测速度,如果过长则会由于图像中可能出现的相似区域使得相关测量的结果出现多个峰值导致测量错误。设两帧最大横向位移为 128 像素,最大纵向位移为 32 像素。根据最大横向位移、最大纵向位移的限定,我们可以选定第 $k+1$ 帧图像上 129~732 之间的任意行、32~928 之间的任意列构成的 320×64 像素块与第 k 帧同等大小的对应像素块进行相关运算,进而保证在被测物体的运动情况下第 $k+1$ 帧与第 k 帧上最大相关区域为准确值,否则可能导致第 $k+1$ 帧与第 k 帧的最大相关区域不准确,不能正确计算出物体的运动速度。这里我们取第 200 行第 50 列开始的像素块。

两帧的互相关函数如下:

$$R_{k, k+1}(m, n) = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{n=-32}^{n=32} \sum_{m=0}^{m=128} \sum_{y=0}^{y=63} \sum_{x=0}^{x=319} [\text{sign}P_{k+1}(200 + x, 50 + y) \times \text{sign}P_k(200 + x + m, 50 + y + n)] \quad (15)$$

其中, $P_{k+1}(200 + x, 50 + y)$ 表示第 $k+1$ 帧上位于第 $200 + x$ 行、第 $50 + y$ 列像素的灰度值; $P_k(200 + x + m, 50 + y + n)$ 表示第 k 帧上位于第 $200 + x + m$ 、 $50 + y + n$ 列像素的灰度值; m 表示横向像素位移数; n 表示纵向像素位移数。根据 m 、 n 的限定,全部相关运算共需要第 k 帧中 $129 \times 65 \times 2$ 个像素块(每个像素块为 320×64 像敏单元)与第 $k+1$ 帧中同等大小像素块进行相关运算,根据互相关函数最大值的 m 、 n 值即可得出两帧图像二维的位移量,进而根据式(3)可求出二维运动速度。

式(15)中 $m \cdot n$ 为常数,不影响最大值出现的位置,因此可忽略。符号函数 $\text{sign}()$ 只有 ± 1 两种取值,那么两个符号函数相乘共有 3 种可能的形式,即 $1 \times 1 = 1$, $(-1) \times (-1) = 1$, $1 \times (-1) = -1$ 。由此可以看出,当两乘数相同时得 1,相异时得 -1 。采取布尔形式进一步化简,布尔量 1 代替数值 1,布尔量 0 代替数值 -1 ;那么在 FPGA 实现式(15)的相关运算时,即可用异或非门代替乘法运算,计数器代替加法运算。

3.2 实时性相关运算及其 FPGA 实现

第 k 帧的 320×64 像敏单元与第 $k+1$ 帧

320×64 像敏单元进行一次相关运算需要进行 320×64 次乘法(异或非)运算, (320×64-1) 次加法(计数)运算, 即共计约 20 480×2 次运算。若 FPGA 时钟频率为 100 MHz, 时钟周期为 10 ns, 则进行一次相关运算的耗时为: 20 480×2×10 ns≈0.000 4 s。

根据 m 、 n 的限制, 我们知道完成全部相关运算共需要第 k 帧中 129×65×2 个像素块(320×64 像敏单元)与第 $k+1$ 帧中同等大小像素块进行相关运算。那么完成全部相关运算所需时间为: 129×65×2×0.000 4 s=6.708 s。而 LUPA-1300-2 型 CMOS 图像传感器帧频为 500 帧/s, 即两帧之间时间间隔为 0.002 s, 远远小于 3.354 s, 不能满足实时性测速的要求。

为了实现实时性测速, 我们采用并行算法来提高运算速度^[7-9]。用矩阵 \mathbf{A} 表示第 $k+1$ 帧参与运算的像素块, 用矩阵 \mathbf{B} 表示第 k 帧参与运算的像素块, m 、 n 分别为横向、纵向位移像素数。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{1,t+1} & a_{1,t+2} & \cdots & a_{1,t+128} \\ a_{2,t+1} & a_{2,t+2} & \cdots & a_{2,t+128} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{3,t+1} & a_{3,t+2} & \cdots & a_{3,t+128} \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{1+m,t+1+n} & b_{1+m,t+2+n} & \cdots & b_{1+m,t+128+n} \\ b_{2+m,t+1+n} & b_{2+m,t+2+n} & \cdots & b_{2+m,t+128+n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{3+m,t+1+n} & a_{3+m,t+2+n} & \cdots & a_{3+m,t+128+n} \end{pmatrix} \quad (17)$$

完成一次相关运算, 即 m 、 n 在取值范围内取某一值时, 完成矩阵 \mathbf{A} 与矩阵 \mathbf{B} 的对应元素相乘再相加。根据 m 、 n 的不同取值, \mathbf{B} 共有 129×65×2=16 770 种取值。如果矩阵 \mathbf{A} 能同时与 16 770 个 \mathbf{B} 完成对应元素相乘再相加的运算(并行运算), 则完成全部相关运算只需 0.000 4 s, 等同于完成一次相关运算所需时间。由于 0.000 4 s<0.002 s, 所以可以满足实时速度检测的要求。

FPGA 是基于查找表的大规模可编程逻辑器件, 目前集成的门电路可高达上百万, 系统速度可高达上百兆。ACEX1K 系列 FPGA 自带的嵌入式阵列块 EAB 是一种在输入输出端口上带有寄存器的灵活的 RAM 电路, 实现存储功能时, 每个 EAB 能提供 4 096 bit 的空间。使用时可以把若干个 EAB 组合起来构成大容量 RAM, 当 RAM 容量不超过 2 048 字节时, EAB 的时钟不受影

响。RAM 的读写时钟可以彼此独立, 时钟使能信号、读写地址都可以独立工作, 甚至各个端口的触发器都可以彼此独立, 因此采用 EAB 实现 RAM 的方法非常灵活有效。

在进行相关运算的过程中, 第 k 帧中需要存储纵向最大位移 32 像素、横向最大位移 128 像素的全部 320×64 像素块数据:

$$(64+32+32) \times (320+128+128) = 73\ 728 \text{ bit}$$

第 $k+1$ 帧中需要存储 320×64 像素块的数据:

$$320 \times 64 = 20\ 480 \text{ bit}$$

将第 k 帧 73 728 bit(矩阵 \mathbf{B}) 数据存入由 FPGA 逻辑门编程构成的存储单元中, 将第 $k+1$ 帧 20 480 bit(矩阵 \mathbf{A}) 数据存入由 EAB 构成的存储单元中, 再根据如前所述采用并行算法实现相关运算。

4 实验结果

实验装置如图 2 所示。相机正对面是一维电控平移台, 它的纵向速度为 0, 平移速度和方向由图中相机后侧的独立的电控箱完成, 行程为 300 mm, 最快移动速度为 78 mm/s。测量时, 由电控平移台带动固定在其上的带有图像的硬纸板横向运动, 测量结果列于表 1, 最终比较测量速度与设定速度之间的误差值。

以上的测量值在相同测量条件下获得。从表 1 实验数据可以得到横向速度测量的算术平均值、纵向速度测量的算术平均值分别为:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = 72.5 \text{ mm/s} \quad (18)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} = 7 \text{ mm/s} \quad (19)$$

横向速度实验标准差、纵向速度实验标准差分别为:



图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental facilities

表 1 实验结果
Table 1 Experimental results

	设定 横向速度 (mm/s)	测量 横向速度 (mm/s)	设定 纵向速度 (mm/s)	测量 纵向速度 (mm/s)
1	60.00	85	0	35
2	60.00	75	0	15
3	60.00	50	0	-5
4	60.00	65	0	-10
5	60.00	110	0	-45
6	60.00	105	0	55
7	60.00	85	0	-30
8	60.00	55	0	5
9	60.00	75	0	20
10	60.00	35	0	30

$$\sigma_{sh} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 23.66 \mu\text{m/s} \quad (20)$$

$$\sigma_{sv} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} = 30.48 \mu\text{m/s} \quad (21)$$

在测量结果中存在随机误差和系统误差。其中随机误差一般由许多难以控制的和经常变化的微小因素所造成,且大小和符号无法预知;而系统

误差是可以控制的,应该设法发现并消除。系统误差主要来源于以下几个方面:

- (1)一维电控平移台速度的设定精度;
- (2)测速系统中被测物、物镜、CMOS 传感器的安装定位是否正确合理,FPGA 及系统中各元器件精度如何,各电路模块是否正常工作;
- (3)测量场地的环境条件变化,如尘污、振动、温度、空气折射率等因素;
- (4)测量人员引入的主观误差等。

为了提高测量精度,我们要从误差来源入手设法截断或减小系统误差,在数据处理环节针对不同类型的定值系统误差和变值系统误差采取不同的方法消除。另外,在提高所用仪器设备精度的同时应设法完善二维速度测量的方法。

5 结 论

提出了一种基于 CMOS 图像传感器的实时二维相关测速法。采用 FPGA 用逻辑运算代替算术乘加运算,降低了运算的难点和对 CPU 的要求,简化了硬件电路,提高了可靠性,降低了系统的成本。实验结果表明,利用 CMOS 图像传感器的两帧图像可以实现实时的二维测速,准确度高。该方法可用于一定速度范围内的管道粉末等固体物质的二维速度测量。

参 考 文 献:

- [1] 徐正平,葛文奇,杨守旺,等. 基于 CMOS 摄像头与 FPGA 的位置检测系统设计[J]. 液晶与显示,2009,24(5):746-750.
- [2] 马岩,胡君,吴伟平. 基于 CCD 成像单元仿真测试系统的实时性实现[J]. 液晶与显示,2008,23(2):200-204.
- [3] 王庆有. 图像传感器应用技术[M]. 北京:电子工业出版社,2003:207-244.
- [4] 卢万欣. 采用 CCD 线阵做探测器的数字相关测速系统[J]. 长春光学精密机械学院学报,1992,15(2):85-90.
- [5] 谢维达,邵德荣,王春辉. 基于面阵图像传感器的二维相关测速研究[J]. 光电子技术,2003,23(4):224-228.
- [6] 周瑛,魏平. 基于 FPGA 并行处理的实时图像相关速度计[J]. 光学技术,2006,32(1):108-110.
- [7] 谢维达,王春辉,邵德荣. 基于 FPGA 的二维相关测速方法研究[J]. 测控技术,2004,23(1):66-68.
- [8] 杨守旺,龙科慧,周磊,等. 航空相机调焦单元仿真系统的实时显示方法研究[J]. 液晶与显示,2009,24(5):740-745.
- [9] Xu Cheng, Liu Yongcai, Qiang Wenyi, et al. Image velocity measurement based on motion blurring effect[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2008,37(4):625-628.