

文章编号 1004-924X(2014)10-2796-10

视觉测量中点目标的实时全局搜索

于潇宇, 郭玉波, 陈刚, 叶东*

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:对基于嵌入式平台的视觉测量系统进行了改进,将数字信号处理(DSP)中基于双阈值的搜索算法移植至现场可编程门阵列(FPGA),解决了传统的全局搜索与邻域搜索中目标提取准确性与数据更新率之间的矛盾。在嵌入式平台的FPGA中实现了合作目标标记点的像素级算法。在相机图像的传输过程中完成了基于双阈值全局搜索的标记点像素检测、像素区域识别、10级流水运算的质心提取、多标记点并行运算等功能,避免了邻域搜索带来的邻域尺寸设定、系统更新率、合作目标速度之间的矛盾。实验结果表明,应用文中方法后,视觉测量系统在 2048×2048 分辨率、5标记点的情况下的数据更新率达到186.33 frame/s;与改进前的全局搜索和邻域搜索相比,分别提高了33.5倍和2.7倍,使视觉测量系统的应用范围扩展到了高速运动目标测量领域。

关键词:视觉测量;全局搜索;嵌入式平台;现场可编程门阵列;高速运动目标
中图分类号:TP274.2;TP242.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2796

Real-time global search for point targets in vision measurement

YU Xiao-yu, GUO Yu-bo, CHEN Gang, YE Dong*

(School of Electrical Engineering and Automation,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: yedong@hit.edu.cn

Abstract: The vision measurement system based on a embedded platform was improved. A research algorithm based on dual-threshold in Digital Signal Processing (DSP) was transplant in a Field Programming Gata Arrage (FPGA) to resolve the conflict between target extraction accuracy and data update rate of traditional global search and adjacent domain search. A pixel-level algorithm for cooperative targets was implemented in FPGA on embedded platform. Some functions based on dual-threshold searching in frame data transmission, such as pixel detection, pixel region identification, centroid calculation by a 10-level pipeline, and parallel computing in a multiple marker region were realized. Benefited from this, the contradiction among the neighborhood-size setting, system update rate and the target speed was avoided. Experimental results show that the data update rate of the vision measurement system with proposed method is up to 186.33 frame/s base on 5 markers with the resolution of 2048×2048 . Comparing with the time-consuming of global search and neighborhood search without

收稿日期:2014-01-07;修订日期:2014-03-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075095);黑龙江省自然科学基金资助项目(No. E201045)

the proposed structure, the speed is increased by 33.5 times and 2.7 times, which extends the application of the system to the measurement of high-speed moving targets.

Key words: vision measurement; global searching; embedded system; Field Programming Gate Array (FPGA); high-speed moving target

1 引 言

在视觉测量中,为了实现合作目标,通常采用主动或被动红外光源结合滤光片的方法较好地分离被测目标与背景,由此简化后端处理算法,便于在保证精度的前提下提高了系统的实时性^[1]。在图像处理过程中,需要先搜索合作目标的标记点,以确定其质心或形心,而后进行空间坐标解算。标记点的搜索方式主要有全局搜索和邻域搜索两种。全局搜索即将图像中所有像素点逐一与阈值进行比较,当搜索到大于阈值的点后,通过遍历其周围所属合作目标的像素来获得标记点的质心特征。全局搜索的耗时随着视觉传感器分辨率的增加而增加,在分辨率为 $2\ 048 \times 2\ 048$ 的嵌入式双目视觉测量系统中,采用工作频率为 1 GHz 的数字信号处理器(DSP)对两台相机的图像进行标记点全局搜索时,耗时约为 100~200 ms,因此严重影响了视觉测量系统的数据更新率。

为了解决这一问题,Z. Feng-Yun^[2]、K. Neelesh^[3]等在计算机平台上采用基于邻域的搜索方式,即仅在系统初始化时执行全局搜索,确定出标记点在当前帧中的位置;对于后续帧,则以上一帧标记点的质心为中心,并设定邻域范围,仅搜索邻域范围内的像素。通过这种方式,标记点的搜索耗时减少了 95%以上。

然而采用邻域搜索方式时还需要解决以下问题:第一,系统的数据更新率要与目标的运动速度相匹配。当帧频保持不变、目标在与像面平行的平面中运动时,目标的运动速度决定了图像中同一标记点在相邻帧间的移动距离。随着目标速度的增加,简单的邻域设定已经不再适合,为了避免邻域范围设置过大带来的种种问题,需加入对目标运动轨迹的估计。此时,邻域范围取决于估计偏差。当目标进行高速复杂运动时,较大的估计偏差会造成多点邻域重合等情况,从而对标记点的识别造成干扰。同时,较大的邻域增加了像素

的读取数量,使更新率进一步降低。这种情况在高速运动目标测量领域中尤为明显,如航空航天、交通安全、军事侦察、靶场测试、运动分析^[4]等。第二,当被测目标存在俯仰、偏航、滚转等运动或测量过程中受到其他物体遮挡时,会使置于其上的标记点在图像中消失和重现。当标记点消失时,视觉测量系统需从邻域搜索切换到全局搜索,重新进行初始化。此时,受到搜索耗时的影响,系统的数据更新率会产生一定的波动,进而影响了系统的实时性;当标记点重现时,帧间的邻域搜索方式并不能及时发现重现的标记点,只有到下一次切换到全局搜索时,才能搜索到该标记点,这在一定程度上影响了目标的位姿解算过程。

综上所述,视觉测量中,在计算机、DSP 等串行结构处理器上执行全局、邻域搜索都有各自的局限性,尤其是在测量高速运动目标时。因此,若能找到一种高速的全局搜索方法或逻辑结构来解决全局搜索中实时性差的问题,就会大大扩展测量系统的应用领域,使得对高速运动目标的测量成为可能。

本文提出了基于现场可编程门阵列(FPGA)多流水线结构的全局搜索方式,避免了由于邻域设置不当带来的一系列问题。利用 FPGA 并行结构的特点,将运算单元构建为多级流水线,可在图像传输的过程中同时完成多个标记点的搜索与质心计算,从而当一帧图像传输结束后,即可输出所有标记点的坐标。通过这种方式,系统更新率不再受制于目标的运动速度,后端的 DSP 等嵌入式处理器可以专注于目标的空间位姿解算,从而增强了系统的实时处理能力。

2 系统处理过程与结构

在基于合作目标的视觉系统中,经红外滤光片成像后,标记点与背景已得到良好的分离。为了减少干扰、准确提取标记点,文中采用双阈值

法^[5]进行搜索,按照图像传输过程中像素的到达顺序,识别标记点像素,并将隶属于同一标记点的各像素的坐标及其灰度值代入式(1),获得质心坐标:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p_i^2}{\sum_{i=1}^n p_i^2} \\ \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i p_i^2}{\sum_{i=1}^n p_i^2} \end{cases} \quad (1)$$

在这一过程中,每搜索到一个属于标记点的像素点,都需判断该像素属于哪一个标记点区域,从而利用公式(1)在该标记点区域内进行累加。为了实现上述操作,需要建立相应的标记点区域管理机制:对于新出现的标记点,创建相应的标记点区域;对于已经完成传输的标记点,则注销其对应的标记点区域和累加计算。上述过程在图像的传输过程中实时完成。对单个像素的处理相对简单,然而在高速相机的图像传输中,通常一个像素周期会同时到达多个像素,当相机数量增加时,一个周期需处理的像素数也成倍增加。因此,若要在一个周期内完成诸多像素的实时处理和标记点区域管理,应采用并行运算结构,并设计一种可在一个像素周期内执行多项操作的流水线。这适合在具有并行处理能力的 FPGA 中实现。针对上述过程, FPGA 中设计的实时处理结构如图 1 所示。

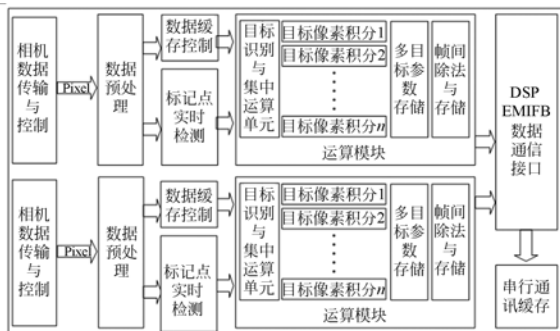


图 1 基于 FPGA 的全局搜索算法模块框图

Fig. 1 Block diagram of global searching algorithm in FPGA

当相机完成初始化,经过数据预处理模块后,通过分频将每个传输时钟到达的 8 pixel 扩展为 16 pixel,来改善时序。在预处理中,并行数据同时输出到数据缓冲控制模块和标记点实时检测模块。标记点实时检测模块用于实现基于双阈值的

像素检测,完成标记点区域的管理,并将标记点的后续相关数据发送到运算模块;在该模块中计算出标记点质心数据并将其存入相应的缓存; DSP 用于读取缓存中的数据,并进行空间坐标解算。

在上述过程中,共有 3 个运算处理单元,即标记点实时检测模块,运算模块,以及执行空间位姿解算算法的 DSP。其中,标记点实时检测模块和运算模块分别由多级流水线构成,前者用于完成像素的检测与识别,后者用于完成标记点的质心搜索、计算与相关缓存调度。在整个系统中, FPGA 以协处理器的模式完成以定点操作为主的部分算法, DSP 来处理浮点运算。

3 基于流水线的全局搜索算法结构

3.1 缓存参数的界定

用于标记点搜索的双阈值法的核心思想是通过高阈值 Th_H 搜索标记点的大致位置,通过低阈值 Th_L 搜索该位置附近所有属于该标记点的像素,然后计算加权平均值,以获得亚像素的质心坐标^[6]。按照像素到来顺序进行搜索,在 t 时刻搜索到大于高阈值的像素点 P_t 后,在 P_t 的邻域中继续使用低阈值进行搜索。此时,需搜索 t 时刻前属于相同标记点且像素值大于低阈值的像素 $P_{t-1} \sim P_{t-m}$, 和 t 时刻之后属于相同标记点且像素值大于低阈值的像素 $P_t \sim P_n$, 之后对这两项求和,计算质心,即将公式(1)变形为:

$$\begin{cases} \bar{x} = \left(\sum_{i=t-m}^{t-1} x_i p_i^2 + \sum_{i=t}^n x_i p_i^2 \right) / \left(\sum_{i=t-m}^{t-1} p_i^2 + \sum_{i=t}^n p_i^2 \right) \\ \bar{y} = \left(\sum_{i=t-m}^{t-1} y_i p_i^2 + \sum_{i=t}^n y_i p_i^2 \right) / \left(\sum_{i=t-m}^{t-1} p_i^2 + \sum_{i=t}^n p_i^2 \right) \end{cases} \quad (2)$$

上述过程在 FPGA 中实现时, t 时刻之前的像素区域即图 2 中 h 行所在区域。

图 2 中, h 值为 3。在基于双阈值的标记点检测中,需根据测量范围统计 h 的最大取值 h_{\max} , 从而将缓存容量设定为 h_{\max} 行像素的容量。根据实验结果,当相机镜头的焦距为 35 mm,高阈值 $Th_H=90$,低阈值 $Th_L=30$,测量距离为 0.5~10 m 时,取 $h_{\max}=8$ 。此时,图 1 中数据缓存控制模块的缓存容量为 2048×8 (bit)。当图像开始传输,写满 8 行缓冲区后,缓冲区的输出端每个周

期输出 16 个像素值 Pixel_R 1~Pixel_R 16。

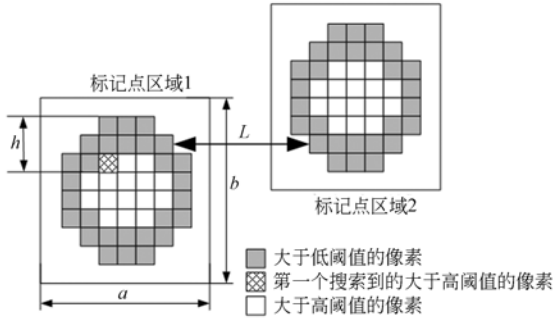


图 2 标记点分布的参数定义

Fig. 2 Parameter definition of marker distribution

3.2 标记点的实时检测与识别

在标记点的检测与识别中,首先确定检测中所需的相关参数,然后设计检测与识别的逻辑结构。

3.2.1 相关假设

由于被测目标上放置的多个标记点具相似的深度信息,假设:

1)同一被测目标上的多个标记点在同一帧图像中具有相同尺寸的外切矩形,且其长宽分别为 D_x 、 D_y 。

相邻两帧内,标记点在深度方向上的移动距离决定了在这两帧中标记点外切矩形的缩放尺寸。在高速视觉测量中,相机通常具有较高的帧频,当相邻两帧图像的时间间隔足够短时,被测目标在深度方向上移动距离较小,因此假设:

2)相邻两帧图像中,运动目标上标记点的外切矩形具有相近的外形尺寸,即当允许偏差为 e 时,有:

$$\begin{cases} |D_x(t) - D_x(t-1)| < e \\ |D_y(t) - D_y(t-1)| < e \end{cases} \quad (3)$$

在实际测量中,应根据测量距离选用相应焦距的镜头进行标定,从而获得适当的标记点成像尺寸;同时,应至少采用 3 个以上的标记点,且在标记点布局时,应避免遮挡且有利于区分,因此得出假设 3 与假设 4:

3)在图像中,定义标记点区域($Area_{a \times b}$)为以标记点质心为中心,长宽分别为 a 和 b 的矩形,且 n 个标记点区域之间不重合,即

$$Area_{a \times b}(q) \cap \left\{ \bigcup_{j=0}^{q-1} Area_{a \times b}(j) \cup \bigcup_{j=q+1}^n Area_{a \times b}(j) \right\} = \emptyset, \quad (4)$$

其中: a 和 b 的取值需根据测量距离、标记点的物理尺寸和成像尺寸 D_x 、 D_y 等参数确定,相关分析见 3.2.2 节。

4)在相邻的两个标记点区域中,位于同一行且距离最近的两个标记点的像素之间的距离(L)大于 12 pixel,如图 2 所述, $L > 12$ pixel。

3.2.2 矩形区域参数 a 和 b 的取值

在 3.2.1 节中,第 t 帧邻域矩形长宽的取值分别为 $a(t)$ 和 $b(t)$,它们是标记点外切矩形尺寸 $D_x(t)$ 、 $D_y(t)$ 的函数。由于在数据传输时当前帧标记点外切矩形的尺寸未知,根据 3.2.1 节的假设 2,并在计算中使用 $D_x(t-1)$ 、 $D_y(t-1)$ 代替 $D_x(t)$ 、 $D_y(t)$ 。当采用主动式标记点,且相关参数保持不变时,标记点区域可被定义为:

$$\begin{cases} a(t) = \alpha_1 D_x(t-1)/2 + \beta_1 \\ b(t) = \alpha_2 D_y(t-1)/2 + \beta_2 \end{cases}, \quad (5)$$

设外切矩形为正方形,则有:

$$D_x(t-1) = D_y(t-1) = \frac{Af}{\lambda z_{t-1} \times 10^{-3}} + c, \quad (6)$$

其中: α 为比例系数; A 为标记点的物理尺寸; f 为标定后的镜头焦距; λ 为图像传感器的像元尺寸; z_{t-1} (单位 mm)为上一帧的空间坐标定位中深度方向的计算结果; β_1 和 β_2 为标记点外切矩形到标记点区域范围的补偿值。文中,取 $f=35$ mm, $A=6$ mm, $\lambda=5.5$ μ m, 设定 $\alpha_1 = \alpha_2 = 2.8$, $\beta_1 = \beta_2 = 2$, $c=0$ 。当 DSP 处理完一帧图像后,利用式(5)、(6)进行计算,将结果写回 FPGA,作为式(7)、(8)的判定依据。

根据改进的 Marr 理论可知,将后期处理获得的高层知识(z_{t-1})作为反馈对早期处理进行校正的方式更适于应用在视觉系统中^[7]。通过反馈,可以更加精确的估计标记点的成像尺寸,以自适应的方式设定标记点像素的判定范围,从而避免因标记点范围划分不当产生的像素的错误划分。当被测目标沿 z 方向做远离相机运动时,图像中相邻标记点不会因为距离缩小而出现在同一个标记点范围中。

3.2.3 像素检测与识别的相关逻辑

根据 3.2.1 节的假设及 3.2.2 节的参数说明,标记点实时检测模块设计如下。在并行的 16 pixel 数据进入数据缓存控制模块的同时,另一路数据进入标记点实时检测模块,经 2 级 D 触发器缓冲后,同高阈值 Th_H 进行比较,如图 3 所示。

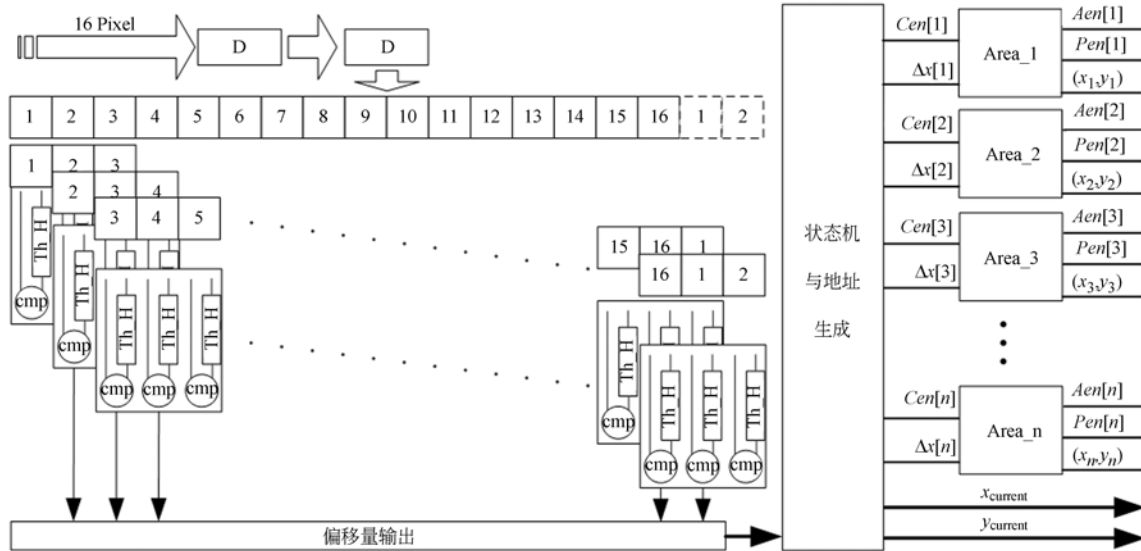


图 3 标记点实时检测模块

Fig. 3 Real-time marker detection module

为了提高检测的准确性,将相邻的 3 个像素定义为一个像素段,并将标记点判定条件定义为同一像素段中的 3 个像素同时大于高阈值 Th_H 。每个时钟周期,将同时到来的像素分成如图 3 所示的 16 个像素段,在同一周期内完成所有像素段的判别。当像素时钟为 42.5 MHz 时,每秒完成 6.8×10^8 次判别。上述过程中,第 15、第 16 像素段的部分数据使用的是下一周期中的像素数据,其可从上一级 D 触发器的缓存中读取,如图 3 中虚线部分所示。当在检测中发现某一像素段大于高阈值后,将该段中首像素 P_{th} 在当前 16 像素中的偏移量 Δx 输出。生成地址后,分别与区域 1 至区域 n 中已使能的 k 个标记点位置计算水平方向的欧式距离,以判定该像素段所属标记点区域,即:

$$\{P_{th} \in Area_j \mid |x_{current} + \Delta x - x_j| < a/2\}_{j=1}^k \quad (7)$$

若不满足式(7),则当前像素段为新出现的标记点所属区域,此时,使能第 $k+1$ 个标记点位置子模块,按顺序检测标记点位置子模块,并将其存入序号最小且未使用的标记点位置子模块,使能该标记点位置子模块对应的目标像素积分模块 $Area_j$ 。记录当前坐标 $(x_{current}, y_{current})$ 和像素段偏移量 $\Delta x[j]$,并计算新标记点的位置坐标 (x_j, y_j) ,同时,根据当前行号 $y_{current}$ 计算已使能的 k 个标记点位置坐标中 y_j 与当前行号 $y_{current}$ 的偏差。

若大于 $b/2$,则关闭该标记点位置子模块相关逻辑,并通过使能信号 $Aen[j]$ 关闭与之对应的目标像素积分模块,表明当前位置已超出该模块对应的像素区域,即:

$$\{Cen[j]=0, Aen[j]=0 \mid |y_{current} - y_j| > b/2\}_{j=1}^k \quad (8)$$

每个标记点的位置输出中, $Aen[j]$ 表示当前传输的像素行 $y_{current}$ 是否满足 $|y_{current} - y_j| < b/2$, $Pen[j]$ 表示在当前输出的像素值是否满足 $|x_{current} + \Delta x - x_j| < a/2$,即当前输出的像素值是否参与标记点位置 (x_j, y_j) 的质心计算。

3.3 标记点位置子模块的配置

在上述检测过程中,标记点位置子模块的数量 n 受限于视觉测量系统的设计指标和 FPGA 内部资源的占用情况,在同一时间段内,所能处理的标记点的个数是有限的。设在像素传输过程中的某个时间段 t_i 内,按照标记点所属像素的出现顺序,垂直方向上有彼此靠近的 5 个标记点,如图 4 所示。

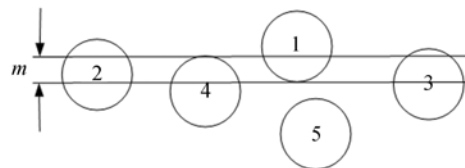


图 4 同时处理标记点数目分析

Fig. 4 Analysis of multi markers simultaneously

在同一行像素中,标记点实时检测模块中检测出的多个像素段可能归属于不同的标记点。在图中 m 行区域,像素段可能归属的标记点区域个数达到最大值,为 4 点。此时,当在检测中发现标记点像素 P_{th} 时,需将 P_{th} 的列地址同时与 4 个标记点位置 x_j 计算欧式距离。设计时,可根据系统需求和可用资源设计 n 个标记点位置子模块及其后续目标像素积分单元。文中,取 $n=4$ 。

3.4 集中运算单元与多级流水线

在数据从数据缓存控制模块输出后,运算式(2)。该运算中,需获得 p_i^2 、 $x_i p_i^2$ 、 $y_i p_i^2$ 等参数。这部分以乘法器为主的硬件结构在数据缓存控制模块输出端实现,其中: p_i^2 运算的相关逻辑及其 10 级流水线结构如图 5 所示。像素数据 Pixel_R

1~Pixel_R 16 从数据缓冲控制模块输出,通过与低阈值 Th_L 进行比较后,输入每个像素各自的平方单元,获得 p_i^2 ,而后求得 $\sum_{i=1}^{16} p_i^2$ 。在此过程中,需要完成多次高位宽加法,导致较高的逻辑延时。为了优化时序,需使用 7 级流水线实现整个乘方、求和过程,而后延迟到 3 个流水周期,以便与后续计算过程同步。根据 3.2.1 节的假设 4,输入的 16 个像素仅来源于一个标记点区域。

$\sum_{i=1}^{16} x_i p_i^2$ 、 $\sum_{i=1}^{16} y_i p_i^2$ 的实现过程与 $\sum_{i=1}^{16} p_i^2$ 类似。求取 $x_i p_i^2$ 和 $y_i p_i^2$ 的过程中,使用 p_i^2 的计算结果在第 3 级流水周期后获得,故完整的运算单元共需要 10 级流水线。

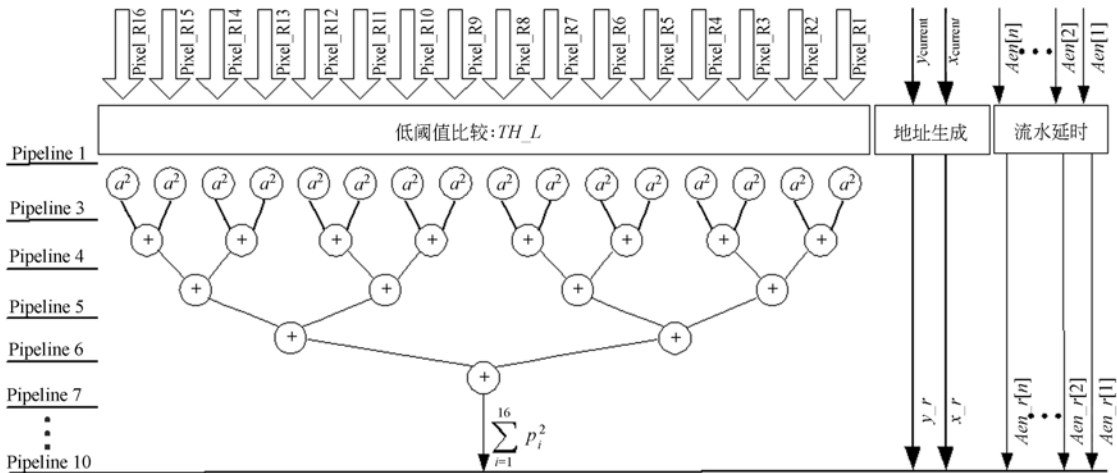


图 5 乘方运算流水线结构

Fig. 5 Pipeline structure for exponentiation calculation

3.5 目标像素积分单元

3.3 节中提到,每一个标记点位置子模块对应一个目标像素积分单元。该积分单元完成属于同一标记点,且对其像素分布在多行间的 $\sum_{i=1}^{16} p_i^2$ 、 $\sum_{i=1}^{16} x_i p_i^2$ 、 $\sum_{i=1}^{16} y_i p_i^2$ 求和,获得式(1)中的 $\sum_{i=1}^n p_i^2$ 、 $\sum_{i=1}^n x_i p_i^2$ 、 $\sum_{i=1}^n y_i p_i^2$ 。求和之前,需判定当前输出数据 (x_r, y_r) 是否属于当前目标像素积分单元。若满足 $|x_r - x_j| < a/2$,则将求和结果输入加法器。当 y_r 继续增加,导致 $|y_r - y_j| > b/2$ 时,则结束该标记点的积分过程,此时使能自加加法

器后端移位模块,将获得的 48 位数据转换为 64 位数据后左移 10 位,来解决定点运算无法满足对小数精度要求的问题。

3.6 帧间除法存储与输出

由于除法运算中的 Acc_p^2 、 $Acc_x p^2$ 、 $Acc_y p^2$ 都具有较高的位宽,计算时需要较多周期,并不适合对实时性要求较高的场合。因此,设计时,在每幅图像传输完成后进行除法运算,利用帧间延时实现。利用帧间除法与存储模块通过对除法使能信号的边沿检测触发状态机,分别从 3 个 RAM 中读取当前帧中所有标记点的 Acc_p^2 、 $Acc_x p^2$ 、 $Acc_y p^2$ 数据,依次输入两个除法器进行除法运算。

完成除法运算后,将 \bar{x} 和 \bar{y} 位宽合并,并存入 RAM。RAM 的数据输出端口调整为 16 位,以适应 DSP 的外部存储器接口的位宽。

4 FPGA 的现场应用与性能估计

4.1 FPGA 的结构实现

在 FPGA 的实现过程中,平方、乘法、除法等操作使用 Altera 自带的算法 IP;数据缓存控制模块中使用的双端口 RAM,以及多目标参数的存储模块、帧间除法存储模块中的双端口 RAM 均使用 Altera 自带的存储编辑器 IP。

将设计通过 Altera FPGA 工具 Quartus II 应用于 Cyclone III 系列中的 EP3C120F780C7 器件进行双相机合作目标的后端处理。综合后,当 3.3 节中标记点位置子模块和目标像素积分单元的并行处理数目 $n=4$ 时,基于双相机的算法各功能模块资源占用如表 1 所示。其中逻辑单元 LE、存储位、DSP 块分别占用了所用 FPGA 的 21%、8%、11%。

表 1 FPGA 各模块的资源占用

Tab.1 Resource consumption of each module in FPGA

模块名称	模块数量	LE	存储/ kbit	DSP 单元
数据缓存控制	2	169	131.7	0
标记点实时检测	2	578	0	0
目标识别与集中运算	2	2 695	0.96	32
目标像素积分单元	8	280	0	0
多目标参数存储	2	482	10.24	0
帧间除法与存储	2	7 474	11.62	0
总计		25 234	307.77	64

按照资源余量计算,该器件可满足并行处理数目 $n=200$ 的设计,即 200 个标记点出现在图像同一行中的情况。

4.2 嵌入式视觉测量平台与全局搜索算法的应用

将基于 FPGA 的全局搜索算法应用于嵌入式视觉测量系统中,该系统的硬件平台如图 6 所示。

工业相机采用 Point Grey 公司的 GZL-CL-41C6 型号灰度相机。测试时,将光学靶标安装在高精度转台上。开始先增加相机曝光时间,通过

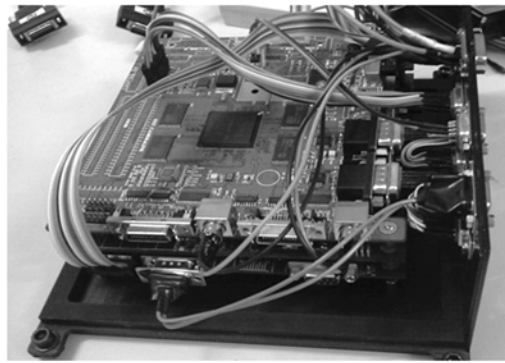


图 6 嵌入式视觉测量系统实物图

Fig. 6 Platform of embedded vision measurement system

与嵌入式视觉测量平台 VGA 接口相连的两台显示器确定视场,然后降低曝光时间,直至标记点与背景良好分离,再进行系统测试。测试环境如图 7 所示。

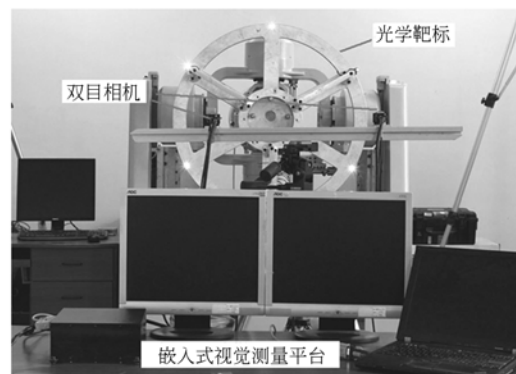


图 7 嵌入式视觉测量系统及其测试环境

Fig. 7 Vision measurement system and its testing environment

与其他嵌入式视觉测量系统类似^[8-9],文中的嵌入式视觉测量硬件平台主要由 FPGA 和 DSP 组成。前期的研发过程中,在该平台上完成了双目视觉测量功能^[10]:FPGA 用于完成接口逻辑部分,DSP 用于读取图像。经全局搜索初始化后,在后续帧中进行邻域搜索,来提升处理速度,使得测量数据的更新率达到 68.66 frame/s。当 DSP 采用 TMS320C6416 时,基于 DSP 的各部分耗时如表 2“DSP 全局”和“DSP 邻域”所示。由表 2 可知,从更新率上看,基于 DSP 的全局算法和邻域算法中,数据读取和质心提取 2 部分耗时分别占总耗时的 97.06%和 63.19%,成为阻碍更新率提

高的主要因素。

应用文中提出的基于 FPGA 的全局搜索算法后,系统各部分耗时如表 2 中“FPGA 全局”所示。其中,数据传输部分包括 DSP 读取标记点质心坐标的读取耗时和空间坐标结果写 RS232 缓存耗时。通过比较表中数据可知,采用常用的 5 点靶标时,由于 FPGA 对标记点进行实时处理,从而节约了 DSP 处理中的数据传输和质心提取耗时,在忽略相机帧频限制且同为全局搜索的情况下,基于 FPGA 的全局算法的数据更新率提高

了 33.5 倍;即使与速度较快的 DSP 邻域方法相比较,数据更新率也提高了 2.7 倍。

DSP 的性能决定了空间坐标的解算耗时,从而决定了视觉测量系统的数据更新率。当标记点搜索与质心提取在 FPGA 内实现后,这部分耗时成为提升视觉测量系统数据更新率的主要瓶颈。对于这一问题,可以通过在 FPGA 中增加浮点运算单元来实现,例如增加内部软核、采用具有硬核 CPU 的 FPGA 来完成部分浮点运算,或采用新型多核 DSP 等。这部分内容将在后续研究中进行。

表 2 基于质心提取的全局与邻域算法耗时分析

Tab. 2 Time-consuming analysis of centroid calculation in global search and neighborhood search

对比项	数据读取耗时/ms	质心提取/ms	数据传输/ μ s	坐标解算/ms	总耗时/ms	帧频/frame \cdot s ⁻¹
DSP 全局	83.04 \times 2 相机	8.18	0	5.36	179.54	5.57
DSP 邻域	0.51 \times 2 相机	8.18	0	5.36	14.56	68.66
FPGA 全局	0	0	2.4	5.36	5.36	186.33

注:表中数据为合作目标数量为 5 点时测得的数据,DSP 邻域算法中,帧间标记点邻域大小为 64 pixel \times 64 pixel,曝光时间 1 ms。

4.3 亚像素精度估计

为验证 FPGA 全局搜索质心提取的重复性,采用 35 mm 镜头,在 3 m 距离下对 5 标记点靶标连续采集 100 frame 图像,重复性如表 3 所示。表中,5 点的标准差基本在 0.015 pixel 以下,稳定性良好。

表 3 标记点重复性验证

Tab. 3 Repeatability verification (Pixel)

标记点	1	2	3	4	5
x 标准差	0.013 1	0.013 3	0.013 6	0.014 8	0.011 8
y 标准差	0.016 5	0.014 2	0.014 8	0.015 5	0.016 7

4.4 性能对比与系统应用

表 4 列出了几种利用合作目标进行特征定位的系统。从搜索方式上看,Aoyama, T 等同样使用 FPGA 完成标记点的 FPGA 全局搜索方法的帧频分别达到了 500 frame/s^[14]和 2 000 frame/s^[15],但其仅使用单阈值对单目标进行质心提取,没有多标记点的识别过程。Dubois J 等提出的智能相机同样使用基于 FPGA 全局搜索方式进行单阈值的提取,但它仅在 FPGA 内在 1 024 \times 32 窗口下实现对合作点目标的质心提取预处理,且不支持标记点区域管理和后续的空间坐标解算等。因此,上述两种系统对多标记点的支持较差,不适合应用在基于多个合作目标的视觉测量领域。

表 4 几种合作目标视觉系统处理能力的对比

Tab. 4 Comparison of processing capabilities between several vision systems based on cooperative targets

实时系统	组成方式	分辨率	标记点数目	系统结构	搜索方式	帧频	数据流量/(Gb \cdot s ⁻¹)	应用
本文系统	2 相机(灰度)	2 048 \times 2 048	5	FPGA+DSP	FPGA(全局)	186.33	6.252	视觉测量
Vogt S ^[11]	2 相机(灰度)	1 024 \times 768	17	PC	-	30	0.337	现实增强
Bruyant PP ^[12]	5 相机(彩色)	352 \times 240	16	PC	-	30	0.304	运动分析
Dubois J ^[13]	1 相机(灰度)	1 280 \times 1 024	-	FPGA	FPGA(全局)	500	5.242	质心提取预处理
Aoyama, T ^[14]	3 相机(灰度)	512 \times 512	1	FPGA+PC	FPGA(全局)	500	2.097	运动控制

5 结 论

本文对基于嵌入式平台的视觉测量系统进行改进,将 DSP 中基于双阈值的搜索算法移植到 FPGA 中,从而解决了传统全局搜索与邻域搜索方法中目标提取准确性与数据更新率之间的矛盾。通过在 FPGA 中构建多个并行的关键处理单元,并在每个处理单元中设计多级流水线,使处理能力大大增加,实时完成了标记点像素检测、像素区域识别、质心提取、基于多标记点的并行运算等操作。在一帧图像传输结束后,即可输出质心坐标,适用于高速运动目标的视觉测量系统。

实验结果显示,相比于 DSP 的全局搜索和邻

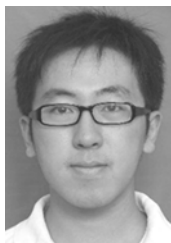
域搜索方法,在忽略相机帧频限制的情况下本文算法的 DSP 处理耗时分别减少了 97.06% 和 63.19%,视觉测量系统的数据更新率分别提高了 33.5 倍和 2.7 倍。同时,由于使用全局搜索替代系统初始化后的邻域搜索,避免了高速运动标记点的邻域搜索中出现的目标丢失、错误识别、帧频降低等问题。

文中使用的 FPGA 资源最多可满足同一行中出现 200 个标记点的情况,仅需在设计中增加目标像素积分单元的并行数量即可。文中提出的基于 FPGA 的实时处理部分对图像分辨率并不敏感。当采用更高分辨率、更高帧频的高速相机时,只需根据相机数据时钟更改系统时钟和数据预处理部分即可。

参考文献:

- (ICIG' 2002), 2002, 4875:333-339.
- [1] GENOVESE K, CASALETTO L, RAYAS J A. Stereo-Digital Image Correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(3): 278-285.
- [2] Z Feng-Yun, Q Shi-Yin. A detection algorithm for maneuvering IR point target and its performance evaluation[C]. *2006 IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications*, 2006, 5-5.
- [3] KUMAR N, KUNJU N, KUMAR A, et al.. Active marker based kinematic and spatio-temporal gait measurement system using labview vision [J]. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2010, 69:600-605.
- [4] 刘博, 叶东, 陈刚, 等. 火箭喷管运动视觉测试精度的校准与实验[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(11): 2513-2520.
- LIU B, YE D, CHEN G, et al.. Calibration and experiment of vision measurement accuracy for motion of rocker nozzle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11):2513-2520. (in Chinese)
- [5] YU ZH J, CHEN G, CHE R SH, et al.. Bilinear interpolation centroid algorithm using for circular optical target location [C]. *Proceedings of Second International Conference on Image and Graphics*
- [6] 刘震, 尚砚娜. 多尺度光点图像中心的高精度定位[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(6): 1586-1591.
- LIU ZH, SHANG Y N. High precision location for multi-scale light spot center [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1586-1591. (in Chinese)
- [7] ALOIMONOS Y. Purposive, qualitative, active vision [J]. *Cvgip-Image Understanding*, 1992, 56(1):1-2.
- [8] HANNU R. Method for monitoring a rapidly-moving paper web and corresponding system, U S: Patent Application 12/224,162[P].
- [9] ZHOU P, LIU Y, WANG Y. Multiple infrared markers based real-time stereo vision positioning system for surgical navigation [C]. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2009, 668-672..
- [10] YU X Y, YE D, CHEN G, et al.. Real-time vision coordinate measurement system with high resolution based on cooperation target [C]. *Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, 2013, 33-37.
- [11] VOGT S, KHAMENE A, SAUER F. Reality augmentation for medical procedures: System architecture, single camera marker tracking, and system evaluation[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2006, 70(2):179-190.
- [12] BRUYANT P P, GENNERT M A, SPECKERT G C, et al.. A robust visual tracking system for pa-

- tient motion detection in SPECT; Hardware solutions [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2005, 52(5):1288-1294.
- [13] DUBOIS J, MOSQUERON R, PAINDAVOINE M, *et al.*. High-speed smart camera with embedded feature extractions and profilometry measurements [C]. *Conference on Optical and Digital Image Processing*, 2008.
- [14] AOYAMA T, MIURA T, HARADA, *et al.*. Deflection sensing via high speed vision system for robotic motion control [C]. *International Symposium on Micro-Nanomechatronics and Human Science (Mhs)*, 2012, 342-345.
- [15] ISHII I, TATEBE T, GU Q, *et al.*. 2000 fps real-time vision system with high-frame-rate video recording [C]. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1536-1541.

作者简介:

于潇宇(1981—),男,辽宁抚顺人,博士研究生,2005年于大连理工大学获得学士学位,2009年于沈阳工业大学获得硕士学位,主要研究方向为机器视觉、高速嵌入式图像处理、并行计算、工业自动化检测等。E-mail: yxy_hit@163.com

导师简介:

叶东(1968—),男,湖北武汉人,博士,教授,博士生导师,1990年、1995年和1999年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事基于串/并联结构的坐标测量理论和技术、双目/单目视觉坐标测量理论和技术等方向的研究。E-mail: yedong@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)