

基于 SAD 算法的立体匹配的实现*

岳陈平, 孟丽娅

(重庆大学 光电工程学院, 重庆 400030)

摘要: 利用 FPGA 并行性计算和合理的流水线设计完成了立体视觉中最核心的部分——立体匹配以及硬件结构, 选取 SAD 区域立体匹配算法, 利用补码来实现 SAD 算法, 在算法流程中采用窗口并行和像素串行来完成。在获得视差图时, 采用 128×128 图像对, 窗口大小为 3×3, 视差为 24, 在系统时钟为 50 MHz 情况下, 实现了每秒 425 帧的处理速度, 最后给出了视差图。实验证明, 选用 FPGA 来实现立体匹配系统的设计是可行的, 具有一定的鲁棒性。

关键词: 立体匹配; 区域匹配; SAD; FPGA

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)06-0041-03

Implementation of the stereo matching based on SAD algorithm

Yue Chenping, Meng Liya

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: This paper makes use of the parallelism computation and reasonable pipeline design of FPGA to complete the heart of a part of the stereoscopic vision—stereo matching. The algorithm is based on the sum of absolute differences(SAD), using of complement to achieve SAD algorithm. In the process of algorithm, we use window-parallel and pixel-serial to complete it. It computes the disparity map using 128×128 input images with a maximum disparity of 24 pixels and the chosen block size for the SAD is 3×3. With the system clock 50 MHz, it realize the 425 frames per second processing speed, and finally gives the disparity map. It proves that using the FPGA to realize the stereo matching system design is feasible and has some robustness.

Key words: stereo matching; area matching; SAD; FPGA

立体视觉理论的提出和美国 MIT 的 Robert 完成的三维景物分析工作把过去的二维图像分析推广到了三维景物^[1]。利用立体视觉来恢复物体的三维立体信息可以应用在工业自动化生产线等检测领域, 如产品检测、工业探伤、PCB 印制板检查以及各种危险场合工作的机器人等。而一个完整的立体视觉系统的核心工作就是立体匹配。立体匹配算法需要处理大量复杂数据, 采用 PC 来实现数据的快速处理不仅会占用 CPU 的大量时间, 而且在功耗方面也难以承受。而利用现场可编程门阵列 FPGA(Field Programmable Gate Array)等硬件的方法来进行立体视觉的研究, 有益于实现系统的实时性并降低功耗。本文采用 FPGA, 利用补码实现 SAD 匹配算法, 基于窗口并行和像素串行完成匹配算法的流程, 这种算法流程不仅效果好、速度快, 而且具有较强的鲁棒性, 很适合采用硬件方式来实现。

1 立体匹配算法

立体匹配算法中基于区域匹配的算法其性能在很大程度上要依赖于相似性测度因子的选取, 而最常用的测度因子有像素灰度差的绝对值和 SAD (Sum of Absolute Differences)、像素灰度差的平方和 SSD (Sum of Squared Differences)、归一化相关方法 NCC (Normalized Cross Correlation)^[2]。SSD 算法有平方运算, NCC 有除法和开方的运算, 而 SAD 只有加法运算, 从算法的复杂度和硬件实现的难易度来看, SSD 和 NCC 将会占用 FPGA 大量的逻辑单元并且耗时量大。SAD 算法表达式为^[3]:

$$SAD(i, j, disp) = \sum_{h=-\frac{w-1}{2}}^{\frac{w-1}{2}} \sum_{k=-\frac{w-1}{2}}^{\frac{w-1}{2}} |P_L(i+h, j+k) - P_R(i+h, j+k + disp)| \quad (1)$$

其中, disp 为左摄像机拍摄的图像上窗口在外极线上移动的距离, 即视差; $P_L(i, j)$ 表示基准图中的待匹配像素

《微型机与应用》2013 年 第 32 卷 第 6 期

* 基金项目: 重庆市自然科学基金 (CSTC, 2010BB0075)

图形、图像与多媒体

Image Processing and Multimedia Technology

的灰度值, $P_R(i, j)$ 表示配准图中的匹配点的灰度值。计算不同视差情况下的 SAD 值, 选取 SAD 的最小值, 此时, P_R 为 P_L 点在配准图中的最佳匹配点。

在常规的算法中, 绝对值 AD 为:

$$AD_{XY} = |X - Y| = \begin{cases} X - Y, & X > Y \\ Y - X, & X < Y \\ 0, & X = Y \end{cases} \quad (2)$$

在硬件实现中, 用这种方法来求取绝对值会耗费较多的 FPGA 逻辑单元, 如图 1 所示。其中, MSB 为选择器 MUX 的判断信号, 当 $X > Y$ 时, MSB=0, 此时, $AD=X-Y$; 相反时, $AD=Y-X$ 。

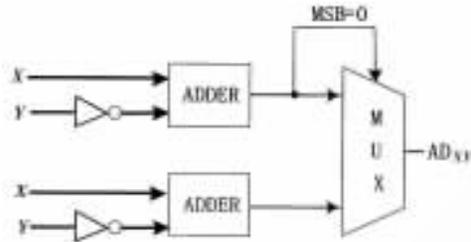


图 1 绝对值法的硬件实现

为了减少 FPGA 的逻辑单元使用率, 采用补码来计算 X、Y 的绝对值, 即:

$$AD_{XY} = |X - Y| = \begin{cases} X - Y = X + \bar{Y} + 1, & X \geq Y, MSB = 0 \\ X + \bar{Y} + 1 + 1 = \bar{X} + Y + 0 + 1 = \bar{X} + Y + 1, & X < Y, MSB = 1 \end{cases} \quad (3)$$

在求绝对值过程中, 如果 $X > Y$, 则 MSB=0; 相反, MSB=1, AD_{XY} 的取值为 $X - Y$ 的补码, 硬件实现过程如图 2 所示。

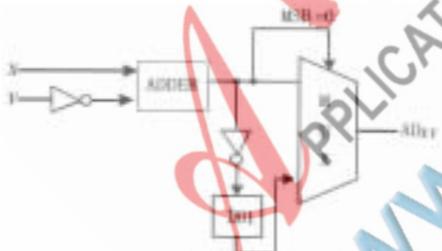


图 2 补码法的硬件实现

2 算法流程及硬件实现

2.1 算法流程

为了能够实现快速实时的图像处理, 硬件结构通常选择并行操作来实现具有高效率 and 实时性的图像处理算法。立体匹配算法有像素并行运算 (pixel-parallel) 和窗口并行运算 (window-parallel)^[2-3] 两种。在硬件资源的约束下, 像素并行运算方式只适用于窗口大小固定的立体匹配, 窗口大小可变以及要考虑硬件资源的利用率时, 像素并行运算方法就不适用。因

此, 在一般的硬件实现立体匹配运算中, 为了获得高效率的匹配值, 这两种并行结构可适当地结合使用或是有选择地使用。当把两种并行结构结合起来运算时, 可以分为像素并行和窗口串行 PPWS (Pixel-Parallel and Window-Serial) 以及像素串行和窗口并行 PSWP (Pixel-Serial and Window-Parallel)^[4-5]。综合考虑, 本文中采用了图 3 所示的 PSWP 算法流程。图 3 中共有 n 个匹配窗口, CW^n 表示第 n 个匹配窗口, R_i 表示基准图中匹配窗口的像素值, C_i^n 表示配准图中第 n 个匹配窗口中的像素值, AD 表示求取两个像素值绝对值差, 在每个窗口中采用像素值串行的运算方式, 并同时计算 n 个窗口的数据。



图 3 基于 PSWP 算法流程图

2.2 硬件实现

利用 FPGA 实现立体匹配算法。设计的关键在于, 在片内 RAM 带宽和容量制约的前提下, 充分利用 FPGA 并行性计算和合理的流水线设计来实现并行计算, 并且能够把算法直接映射到结构上^[6]。在 FPGA 上实现的具体流程如图 4 所示。将采集到的图像数据首先经过图像的中值滤波预处理, 左图像数据经过缓存单元输送至 SAD 计算单元, 右图像数据输送到由 FIFO 构成的移位寄存器组, 通过移位寄存器组后, 在控制单元的作用下与左图像缓存后的数据同时输送到 SAD 计算单元, 在 SAD 计算单元计算不同视差值情况下的 SAD 值, 经比较得出最小的 SAD 值, 输出最小 SAD 值所对应的视差值。

采用 Altera 公司的 Stratix 系列 EP2S15F672C3 器件, 利用 Verilog HDL 语言编写了程序代码, 并且在 QUARTUS



图 4 FPGA 上实现的数据流程

II 和 Modelsim 6.0 中进行功能和时序仿真。本文以图像大小 128×128 为例,窗口大小设置为 3×3 ,视差为 24,通过对算法的简化,实现 SAD 算法。所需的资源如表 1 所示。图 5 所示为最后的结果图。表 2 为本算法与其他算法性能对比。

表 1 SAD 算法所需要的资源

资源	数量	注释
移位寄存器/个	1	算法中所需的移位寄存器数量
减法器/个	9	一个窗口计算中所需的数量
加法器/个	8	一个窗口计算中所需的数量
比较器/个	24	比较视差内的 SAD 值大小
最小值检测器/个	1	检测最小值
移位寄存器大小/bit	328	

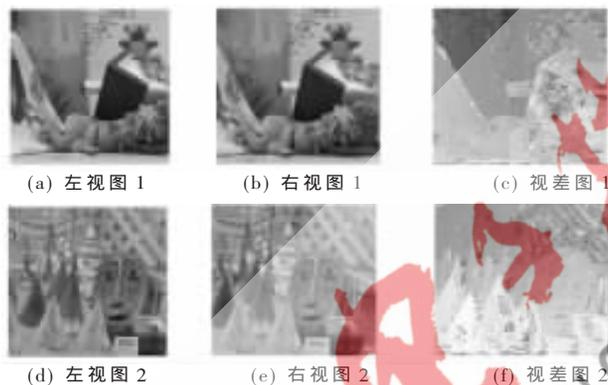


图 5 基于 SAD 匹配结果图

本文完成了一个基于 FPGA 实现立体匹配的算法过程,结合硬件结构的存储和资源的限制,在实现 SAD 算法过程中采用了并行计算和流水线结构,并且在具体的运算中选取了 PSWP 的运算流程。本方案共消耗该系列 FPGA 3 620 个逻辑单元,约相当于总数的 29%;消耗 FPGA 内部容量为 263 424 bit,约为总容量的 63%。将本文方案与其他方案进行比较,由于采用的匹配算法不同,获得的视差图也是不同的,因此直接比较每个方案占用的逻辑单元来判断帧率的大小是不可取的,但是可得到这样的结论:在简化算法和合理地采用并行流水线

表 2 不同匹配方案的比较

实现方案	图像尺寸	视差大小	窗口尺寸	匹配算法	帧率/(f/s)	工作平台
Miyajima et al.	640×480	200	7×7	SAD	18.9	2FPGAs+PC
PARTS	320×240	24	NA	LW Phase Corr	42	16FPGAs
Niitsuma et al.	640×480	27	7×7	SAD	30	1FPGA
Kim et al.	1 300×640	NA	NA	Trellis based	30	2FPGAs
Software impl.	320×240	100	3×3	SAD	1.24	PC
本文方案	128×128	24	3×3	SAD	325	1FPGA

结构的条件下,选择 SAD 算法运用硬件方法来实现匹配比用软件方法更胜一筹。因此,在搭建一个低功耗的立体视觉系统时,FPGA 器件是最佳的选择。

参考文献

- [1] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. 机器视觉算法与应用[M]. 杨少荣,等译. 北京:清华大学出版社,2008.
- [2] MARR D. 视觉计算理论[M]. 姚国正,刘磊,汪云久,译. 北京:科技出版社,1998.
- [3] AMBROSCH K, HUMENBERGER M, KUBINGER W, et al. Hardware implementation of an SAD based stereo vision algorithm [C]. Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Minneapolis, 2007: 1-6.
- [4] CHEN L, Jia Yunde. A parallel reconfigurable architecture for real-time stereo vision [C]. Proceedings of the International Conference on Embedded Software and Systems, 2009: 32-39.
- [5] HARIYAMA M, KAMEYAMA M. VLSI Processor for Reliable stereo matching based on window-parallel logic-in-memory architecture [C]. Proceedings of the Symp on VLSI Circuits Digital of Technology Papers, 2004.
- [6] HARIYAMA M, YOKOYAMA N, KAMEYAMA M, et al. FPGA implementation of a stereo matching processor based on window-parallel-and-pixel-parallel architecture [C]. Proceedings of the IEEE Int. Midwest Symp. on Circ. And Syst., 2005.

(收稿日期:2012-12-20)

作者简介:

岳陈平,女,1987年生,硕士,主要研究方向:立体视觉的研究。

孟丽娅,女,1974年生,博士,副教授,主要研究方向:固体图像传感器。