

文章编号:1002-2082(2007)03-0368-06

# 循环侧抑制网络的红外图像预处理 FPGA 实现研究

贺 明, 王新赛, 李 坚, 李志军

(防空兵指挥学院 红外与射频技术研究中心, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 在红外成像预处理中, 循环侧抑制网络具有很好的增强图像边缘反差、突出边框的功能。由于循环侧抑制网络处理运算的复杂性, 如何实时实现循环侧抑制网络的红外图像预处理成为关键问题。根据简化的循环侧抑制网络处理算法, 并结合硬件计算特点, 提出一种适合于硬件实现循环侧抑制网络的并行处理结构, 采用流水线设计方式在 FPGA 中实时实现。试验证明: 该算法在 FPGA 内具有与视频流同步的实时性, 达到了增强反差、突出边框的效果。用于图像目标实时跟踪系统时, 极大地提高了目标的跟踪精度和稳定性。

**关键词:** 循环侧抑制网络; 红外图像; 并行处理; FPGA

中图分类号: TN219-34

文献标志码: A

## FPGA implementation of infrared image preprocessing with cyclic lateral inhibition network

HE Ming, WANG Xin-sai, LI Jian, LI Zhi-jun

(Infrared & Radio-frequency Technology Center, Air Defence Command College, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** The cyclic lateral inhibition network has the functions of enhancing the contrast of image edge and highlighting the image frame in infrared imaging preprocessing. Since the processing computation complexity of the cyclic lateral inhibition network, it is important to realize the real-time preprocessing of infrared video images with cyclic lateral inhibition network. The parallel processing structure suitable for the implementation of the lateral inhibition network by hardware is proposed based on the simplified processing algorithm of the lateral inhibition network and the characteristics of hardware calculation. It is realized in FPGA by the pipeline design. The results show that the algorithm has the real-time characteristic and is synchronized with the video stream in the FPGA, and the effect of enhancing the contrast of image edge and highlighting the image frame is achieved. When it is used in real time target tracking system, the target tracking accuracy and stability are greatly increased.

**Key words:** cyclic lateral inhibition network; infrared image; parallel processing; FPGA

## 引言

侧抑制现象最初是由Hartline<sup>[1]</sup>在对海洋生物课堂的视觉系统神经电生理学实验中发现的。随后的

生物信息处理研究表明, 侧抑制现象是神经信息处理的一个基本原则, 从原始的节肢动物到人, 从外围神经系统至中枢, 从视觉、听觉至触觉等各种感

收稿日期: 2007-11-01; 修回日期: 2007-12-06

作者简介: 贺明(1981—), 男, 江苏丹阳人, 硕士, 主要研究方向为视频图像处理、红外成像技术、FPGA 和 DSP 图像处理系统设计等。E-mail: ming8797@gmail.com

觉系统中,都存在着侧抑制作用。所谓侧抑制是指相邻神经元之间能够彼此抑制对方兴奋的现象,我们可以用2个神经元之间的侧抑制来说明。设有2个神经元A和B,如图1所示,图1(a)为2个神经元的循环侧抑制机理;图1(b)为2个神经元的非循环侧抑制机理。当它们之间不存在相互抑制时,其活动量分别为 $e_A$ 和 $e_B$ ,当A的活动量大于某个阈值时,A对B的抑制与A的活动水平 $r_A$ 成线性关系;当B的活动水平大于某个阈值时,B对A的抑制与B的活动水平 $r_B$ 成线性关系。

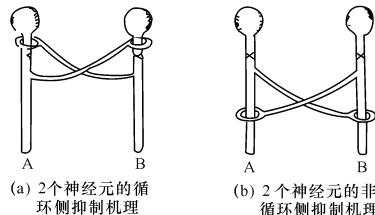


图1 2个神经元相互抑制示意图

Fig. 1 Schematic diagram for mutual inhibition of two neurons

由以上所述可得循环方式:

$$\begin{cases} r_A = e_A - k_{AB}(r_B - r_{AB}^0) \\ r_B = e_B - k_{AB}(r_A - r_{AB}^0) \end{cases} \quad (1)$$

非循环方式:

$$\begin{cases} r_A = e_A - k_{AB}(e_B - e_{AB}^0) \\ r_B = e_B - k_{AB}(e_A - e_{AB}^0) \end{cases} \quad (2)$$

侧抑制相互作用在视觉中的作用之一是增强反差。在视网膜影像中,在光照很亮的区域,强烈兴奋的感受器单元对光照较暗区域的感受器所施加的抑制要比后者对前者的抑制强。这样一来,加剧了这些感受活动的不一致性,因而反差增强。因靠得很近的相邻单元之间的抑制比分隔较远的单元之间的抑制要强,因此,视网膜影像中的强度梯度

边缘和周界就因反差得以强调。这种侧抑制现象常常在视觉信息处理中起到有益的作用,它可强调和突出视觉景象的重要特征以提高空间分辨率。视网膜中的侧抑制相互作用是一种单纯的神经机制,它对来自感受器的感觉信息起作用,进而影响其空间特性。这些“数据处理”的作用是一个初级视觉处理过程。

## 1 算法原理

实现侧抑制处理分为非循环网络和循环网络,对于非循环网络。对图像作用一次后,其效果往往不是很明显,达不到预期目的。若采用循环网络,经过几次循环后,可达到满意的效果,但因其计算复杂,难以实用。本系统通过采用非循环网络,提出了一种将循环网络用于图像预处理的简化方法。用 $f(i, j)$ 代表输入图像的灰度值, $g(i, j)$ 表示输出图像像素的灰度值, $B(r, s)$ 为所选取的抑制系数。文中选择如下模板<sup>[2]</sup>:

$$B = k_B \begin{bmatrix} \beta(-1, -1) & \beta(-1, 0) & \beta(-1, 1) \\ \beta(0, -1) & \beta(0, 0) & \beta(0, 1) \\ \beta(1, -1) & \beta(1, 0) & \beta(1, 1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.025 & 0.050 & 0.025 \\ 0.050 & 0 & 0.050 \\ 0.025 & 0.050 & 0.025 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$g(i, j) = f(i, j) - \sum_{r=-1}^{+1} \sum_{s=-1}^{+1} B(r, s) \times f(i - r, j - s) \quad (4)$$

简化为

$$g(i, j) = f(i, j) - B(r, s) \times f(r, s) \quad (5)$$

### 1.1 循环侧抑制网络的数学表达式

对于循环网络,作用于图像 $f(i, j)$ 后的输出图像为下列方程组的解:

$$\begin{cases} g(1, 1) = f(1, 1) - \sum_r \sum_s \beta_{11}(r, s) g(1 - r, 1 - s) \\ g(1, 2) = f(1, 2) - \sum_r \sum_s \beta_{12}(r, s) g(1 - r, 2 - s) \\ \dots \\ g(m, n) = f(m, n) - \sum_r \sum_s \beta_{mn}(r, s) g(m - r, n - s) \end{cases} \quad (6)$$

该式共有 $m \times n$ 个方程,需求 $m \times n$ 个解。困难在于方程太多,计算量大,而且在 $m \times n$ 个方程中抑制系数矩阵 $B$ 是变化的。这就在理论上产生了

循环侧抑制网络可行但实际应用困难的问题。

### 1.2 循环侧抑制网络的简化应用

本文采用多级非循环网络串联近似的方法<sup>[3]</sup>

实现循环侧抑制网络的图像预处理,如图 2 所示。无穷级非循环侧抑制网络逐级求出的输出相当于对循环侧抑制网络的迭代法求解。

$f(i,j)$  原始图像的灰度值对应的图像矩阵  $F(r,s)$  和  $g_1(i,j)$  为第 1 级非循环侧抑制网络的输出,对应的图像矩阵为  $G_1(r,s)$ , $g_2(i,j)$  为第 2 级的输出,图像矩阵为  $G_2(r,s)$ 。依次类推,假设  $m$  级后,可得到理想视觉效果,于是有如下方程式:

$$\begin{cases} g_1(i,j) = f(i,j) - B(r,s) \times F(r,s) \\ g_2(i,j) = f(i,j) - B(r,s) \times G_1(r,s) \\ \dots \\ g_m(i,j) = f(i,j) - B(r,s) \times G_{m-1}(r,s) \end{cases} \quad (7)$$

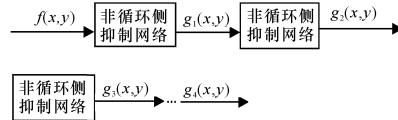


图 2 循环侧抑制网络的迭代法结构

Fig. 2 Structure of iteration procedure for cyclic lateral inhibition network

采用(7)式便可迭代完成循环侧抑制网络的算法,形成马赫效应,在视觉上突出边框,增强边缘信息。由于侧抑制网络是一种减法运算,经每一级运算后都有能量损失。为了使处理后的图像与处理前的明暗程度一致,有必要在网络中对图像进行线性拉伸,于是有:

$$g_n(i,j) = d g_{n-1}(i,j) \quad (8)$$

其中拉伸因子<sup>[4]</sup>为

$$d = \frac{1}{1 - \sum \beta_n} \quad (9)$$

利用 FPGA 实现循环侧抑制网络,是为了更好地保证每级非循环侧抑制网络计算精度,防止计算溢出。在每一级非循环侧抑制网络后额外增加了灰度自适应增益处理,进一步恢复被衰减的能量,使每一级处理后的图像恢复到统一的灰度动态范围。灰度自适应增益如下所示:

$$H(x,y) = \frac{h(x,y) - \text{Min}}{\text{Max} - \text{Min}} \times 255 \quad (10)$$

式中:  $H(x,y)$  为自适应增益后 8 位的字节型图像灰度数据;  $h(x,y)$  为增益前图像灰度数据; Max 为原始图像灰度数据的最大值; Min 为原始图像灰度数据的最小值。这样经过灰度自适应增益后,图像灰度数据分布在 0~255 的范围内,提高了图像对比度。

## 2 算法 FPGA 的实现

FPGA (field programmable gate array) 是一种大规模的可编程逻辑器件,可以用于各种数字逻辑系统,特别是在实时处理方面具有独特的优势。在本算法的实时实现过程中,选用 Altera 公司性价比高的 Cyclone II EP2C8 FPGA<sup>[5]</sup>。该器件内部有 8256 个 LE,18 个 DSP 模块,165888 bits 存储单元。这些存储单元可以配置大小、位数不同的存储器,减少外部存储器的使用,缩小硬件的体积,便于电路的小型化。

### 2.1 循环侧抑制网络在 FPGA 中的结构

图 3 为循环侧抑制网络在 FPGA 中的硬件结构,主要由视频数据流接口、视频流串并转换单元、非循环侧抑制模块、灰度拉伸模块、视频数据传输接口组成。可以看到,该框图的信号流程与简化的循环侧抑制算法是完全一致的。输入信号视频采集先输入行缓冲器,存满 3 行数据以后,并行打入移位寄存器中,同时对并行数据进行非循环侧抑制处理,并将处理结果送入灰度拉伸单元。在这个单元里,图像数据根据上一场图像计算的灰度最值进行拉伸能量补偿,随后将处理结果输入行缓冲单元。接下来,数据依次经过下 2 级非循环侧抑制,最后输出一像素值的循环侧抑制结果。

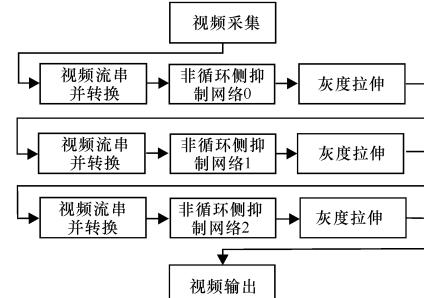


图 3 算法 FPGA 实现的硬件结构

Fig. 3 Hardware structure realized by algorithm FPGA

### 2.2 算法的并行流水线处理结构设计

由于图像并行处理技术可大幅度提高处理速度,因而获得了广泛的应用。常用的并行处理<sup>[6]</sup>(见图 4)有 2 种最基本的连接模式:流水线连接和并行阵列连接。

在流水线结构中,一个大任务被分解成复杂性大致相同的小任务,各小任务在流水线上同时执行,整个任务的速度取决于执行时间最长的子任务的执行时间,因而,具有处理速度高的特点。

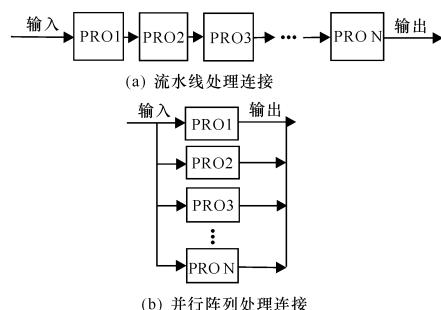


图 4 并行处理的连接模式

Fig. 4 Linking mode of parallel processing

流水线结构是以不同事务的并行处理为特征,而并行阵列结构是以相同事务的并行处理为特征,实际运用中常采用他们的组合形式。

在计算单个非循环侧抑制过程中,为了保持与视频流同步,采用并行处理和流水线处理结合的结构对整个循环侧抑制进行处理。这样,可保证在 1 个时钟周期内完成一个像素点的循环侧抑制计算。图 5 所示整个循环侧抑制过程共分为 6 个模块级流水线,从视频采集输入开始依次经过 3 级非循环侧抑制和灰度拉伸模块,最后输出结果。每个像素的计算值在延迟 6 步流水线后得出。

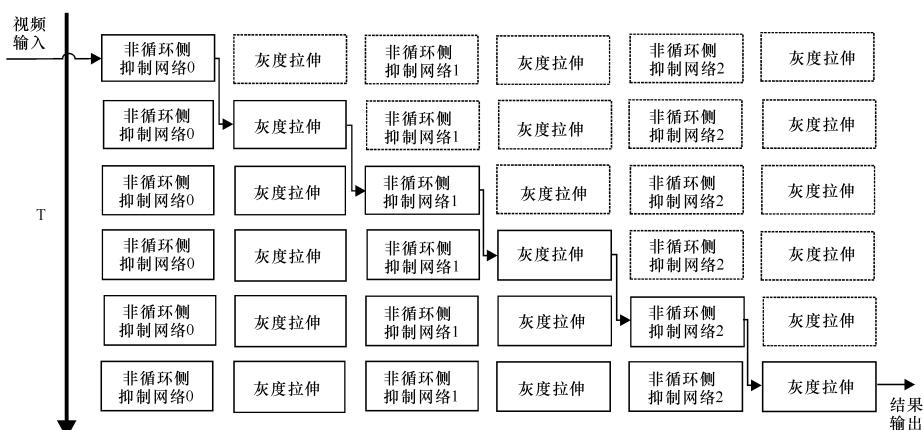


图 5 循环侧抑制处理的流水线结构

Fig. 5 Pipeline structure of cyclic lateral inhibition processing

### 2.3 非循环侧抑制模块

为了提高算法实现速度,把模块分为 4 级流水线处理,使工作量平均分配到每级流水线中。由于在 FPGA 中最消耗时间的操作是乘法运算,所以单独用一级流水线做  $3 \times 3$  模板中的并行乘法运算。对计算结果锁存,接着依次做加法和减法运算,最后得到一个像素点的非循环侧抑制值。计算一个像素点需要 4 个周期,速度相当于优化前的 4 倍。算法结构如图 6 所示。

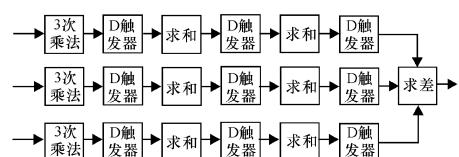


图 6 非循环侧抑制的模块结构

Fig. 6 Module structure of acyclic lateral inhibition

### 2.4 灰度拉伸模块

由于每级非循环侧抑制都会造成能量损耗,通过线性拉伸后往往会影响 FPGA 浮点数计算的原因,影响灰度数据能量恢复效果,所以需在每级非循环侧抑制计算完成后加上灰度拉伸模块(见图 7),实现进一步拉伸图像灰度。采用最值统计方式

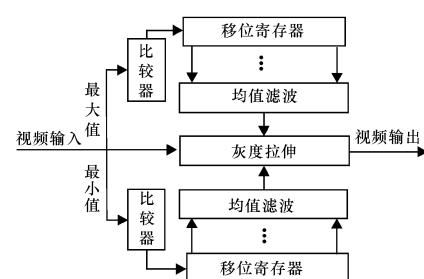


图 7 灰度拉伸模块结构

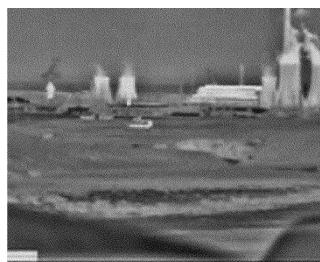
Fig. 7 Structure of gray stretch module

对图像线性拉伸,首先通过逐点比较的方法获得一场图像的最大值和最小值,然后对序列图像中的最值进行累积均值滤波。根据实验结果,图像的最值在累积到 15 帧以后得到的最值有很好的稳定性,利用滤波后的最值数据拉伸图像可以避免闪烁和

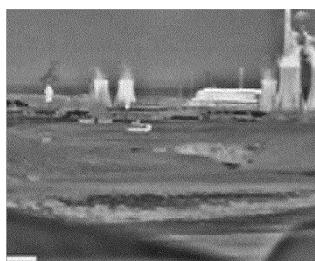
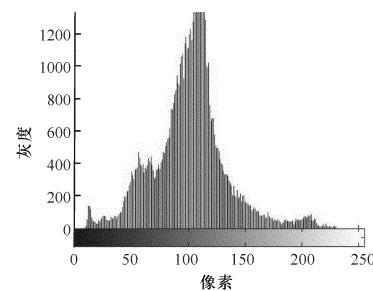
各帧图像亮度突变。

### 3 实验结果与分析

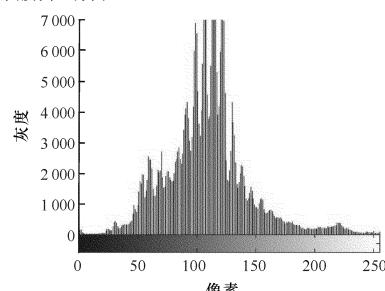
图 8 是采用 FPGA 实现循环侧抑制网络对含有坦克目标的红外图像的处理结果。由图 8 可以看



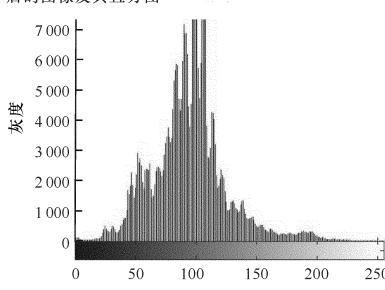
(a) 原图及其直方图



(b) 1次循环后的图像及其直方图



(c) 2次循环后的图像及其直方图



(d) 3次循环后的图像及其直方图

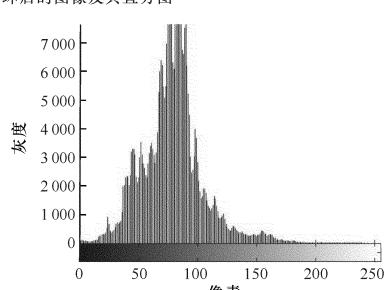


图 8 红外图像循环侧抑制在 FPGA 中实现的效果图

Fig. 8 Effect realized in FPGA by means of cyclic lateral inhibition for infrared images

出,随着循环次数增加,网络增强图像的效果越来越明显。从其直方图(横坐标为灰度,纵坐标为像素)可以看出,经侧抑制网络处理后的图像在灰度最小值及最大值处的像素点数大于处理前的图像,但在中间层次的点数减少了。通过采用侧抑制网络对红外图像进行预处理后,可以突出目标图像的边框,边缘突出过渡自然,灰度表现力较好,图像平滑性较好,有一定的抑制噪声的效果,符合人的视觉习惯,适用于对图像进一步的识别和跟踪。

#### 参考文献:

- [1] HARTLINE H K. The response of single optic nerve fibers of the vertebrate eye to illumination of the retina [J]. American Journal of Physiology, 1938,121:400-415.
- [2] 杨亚军. 红外图像处理与目标跟踪研究[D]. 西安:西北工业大学出版社,1998.  
YANG Ya-jun. Infrared image processing and

tracking research [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998. (in Chinese)

- [3] 王立. 视觉机制研究及其在红外成像制导中的应用 [D]. 西安:西北工业大学出版社,2003.  
WANG Li. Visual and in the mechanism of infrared imaging guidance of [D]. Xi'an Northwestern Polytechnical University Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 王立,张科,李言俊. 视网膜皮层图像信号处理的传输机制与仿真[J]. 光学技术,2003,29(4):420-422.  
WANG Li, ZHANG Ke, LI Yan-jun. Retinal cortex image signal processing and simulation of the transmission mechanism [J]. Optical Technology, 2003,29(4):420-422.
- [5] Altera Company. Cyclone II handbook[M]. US: Altera Company, 2005.
- [6] ALEXANDER W E. REEVES D S. GLOSTER C S. Parallel image processing with the block data parallel architecture[J]. IEEE, 1996,84(7):947-968.