第33卷 第18期 计 算 机 工 程 2007年9月
Vol.33 No.18 Computer Engineering September 2007
·人工智能及识别技术· 文章编号：1000—3428(2007)18—0205—03 文献标识码：A 中图分类号：TP391

LARPBS上图像的模板匹配和中值滤波算法

舒红霞[1]，杨俊敏[2]
(1. 武汉数字工程研究所，武汉 430074；2. 重庆邮电大学网络及信息管理中心，重庆 400065)

摘　要：图像的模板匹配和中值滤波是图像处理和计算机视觉中的基本操作。给定一个 $N\times N$ 图像、$M\times M$ 模板和 $W\times W$ 窗口，该文在 $p^2\times N^2$ 个处理器的LARPBS模型上，分别提出了一个时间复杂度为 $O(M^2\cdot p^{-2})$ 模板匹配算法和一个时间复杂度为 $O((W\times\log\log N)^2/(p^2\times\log\log\log N))$ 的中值滤波算法，其中，$1\le p\le M,W<N$。

关键词：图像处理；模板匹配；中值滤波；并行算法；可重构流水线总线

Algorithms for Template Matching and Median Filtering of Images Based on LARPBS

SHU Hong-xia[1], YANG Jun-min[2]
(1. Wuhan Digital Engineering Institute, Wuhan 430074;
2. Centre of Network & Information Management, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065)

【Abstract】Template matching and median filtering are fundamental operations in image processing. For $N\times N$ image, $M\times M$ template, and $M\times M$ window, this paper proposes a $O(M^2\cdot p^{-2})$ time parallel template matching algorithm and a $O((W\times\log\log N)^2/(p^2\times\log\log\log N))$ time parallel median filtering algorithm on LARPBS with $p^2\times N^2$ processors, where $1\le p\le M,W<N$.

【Key words】image processing; template matching; median filtering; parallel algorithm; reconfigurable pipelined bus

一维可重构流水线总线并行机(a linear array with a reconfigurable pipelined bus system, LARPBS)是近年来提出的一种采用光连接的并行计算模型，诸多领域的基本问题的研究都借助了该模型[1,2]，但利用该模型研究图像的模板匹配和中值滤波问题尚未取得任何成果。

模板匹配是进行边缘检测、目标识别和图像匹配的一种基本和有效的方法；中值滤波是一种对干扰脉冲和点状噪声有良好抑制作用，而能较好地保持图像边缘非线性图像增强技术。目前，已有许多模板匹配和中值滤波算法[3~5]被提出。

1　预备知识

1.1　LARPBS模型

本文所用到的LARPBS[1]中的引理如下：

引理1[1] 分段、点对点通信、广播、多播、多重多播以及有界值求和在LARPBS均可在 $O(1)$ 时间内完成。

引理2[2] N个数据的选择算法在N个处理器的LARPBS上可在 $O\left(\dfrac{(\log\log N)^2}{\log\log\log N}\right)$ 时间内确定。

引理3[3] 对于规模为 $N\times M$ 的矩阵，在具有 $N\times M$ 个处理器的LARPBS上可在 $O(1)$ 时间内实现矩阵转置操作。

1.2　相关概念及操作

1.2.1 相关概念

(1)模板。模板是为了检测某些图像区域特征而设计的阵列。

给定一个 $N\times N$ 的图像矩阵 $\boldsymbol{I}[0\ldots N-1,0\ldots N-1]$ 和一个 $M\times M$ 的模板矩阵 $\boldsymbol{T}[0\ldots M-1,0\ldots M-1]$，其中，$\boldsymbol{I}[i,j]$ $(0\le i,j<N)$ 表示像素 (i,j) 的像素值；$T[u,v]$ $(0\le u,v<M)$ 表示点 (u,v) 的模板值。对于 $0\le i,j<N$，定义像素(i,j)的 $M\times M$ 右邻域为

$$\{(l,m)\,|\,l=(i+u)\bmod N, m=(j+v)\bmod N, 0\le u,v\le M\}$$

(2)模板匹配。模版匹配是指在像素(i,j)的 $M\times M$ 右邻域中，计算该像素的模板匹配值

$$G[i,j]=\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{M-1}\left(I[(i+u)\bmod N,(j+v)\bmod N]\times T[u,v]\right)$$

给定一个 $N\times N$ 的图像矩阵 $\boldsymbol{I}[0\ldots N-1,0\ldots N-1]$ 和一个 $W\times W$ 的窗口，对于 $0\le i,j<N$，定义像素(i,j)的 $W\times W$ 邻域为

$$\left\{(u,v)\,\middle|\,u=(i+l)\bmod N, v=(j+m)\bmod N, -\left\lfloor\frac{W-1}{2}\right\rfloor\le l,m\le\left\lfloor\frac{W-1}{2}\right\rfloor\right\}$$

(3)中值滤波。中值滤波是将像素(i,j)的 $W\times W$ 邻域中的所有像素按像素值进行排序，并将排序后的中间值作为该像素的灰度输出值。即

$$\{I[(i+l)\bmod N,(j+m)\bmod N], -\omega\le l,m\le\omega\}$$

其中，$\omega=\left\lfloor\dfrac{W-1}{2}\right\rfloor$；$MED$ 是窗口中第 $\omega=\left\lceil\dfrac{W^2}{2}\right\rceil$ 小元素。

通常，假定 N 能被 M 整除，M 能被 p 整除，且 $1\le p\le M<N$。

1.2.2　相关操作

(1)矩阵广播操作。给定矩阵$\boldsymbol{A}[0\ldots M-1,0\ldots M-1]$，该矩阵按行主序存储在规模为$N^2$的LARPBS的前$M^2$个处理器上，即$\boldsymbol{A}[i,j]$$(0\le i,j<M)$存储于处理器$PE_{i\times M+j}$上。矩阵广播操作将整个

作者简介：舒红霞(1980－)，女，硕士，主研方向：并行算法，并行体系结构，实时操作系统；杨俊敏，硕士

收稿日期：2006-09-26　　**E-mail**：shirleyshu@ustc.edu.cn

总线分成 N^2/M^2 个独立的子段，每段有M^2个连续的处理器，即第$s(0≤s<N^2/M^2)$段包括以下处理器：$PE_{s×M^2}$, $PE_{s×M^2+1}$, …, $PE_{(s+1)×M^2-1}$分别对应存储着$A[0,0],A[0,1],…,A[M-1,M-1]$。

(2)矩阵循环移动操作。给定矩阵 $\boldsymbol{A}[0…N-1,0...N-1]$，对 $0≤x,y<p$，矩阵循环移动操作 MCS($\boldsymbol{A},x,y,\boldsymbol{A'}$)是将矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中的所有元素循环向上移动 x 个单位，向左移动 y 个单位，即在移动所得的矩阵 $\boldsymbol{A'}$ 中，$A'\left[(i-x)\bmod N,(j-y)\bmod N\right]=\boldsymbol{A}[i,j](0\le i,j<N)$。

(3)矩阵旋转操作。给定矩阵$\boldsymbol{A}[0…p×N-1,0…p×N-1]$，将矩阵分成$p^2$个大小为 $N\times N$ 的子矩阵，即对 $0≤k<p^2$，在原矩阵中，下列下标所代表的元素按原来的次序构成第k个大小为 $N\times N$ 的子矩阵，记为$SA_{x,y}$，其中，$x=k/p, y=k\bmod p$：$(x×N,y×N),(x×N,y×N+1),…,(x×N,(y+1)×N-1),(x×N+1,y×N),(x×N+1,y×N+1),…,(x×N+1,(y+1)×N-1),…,((x+1)×N-1,y×N),((x+1)×N-1,y×N+1),…,((x+1)×N-1,(y+1)×N-1)$。

矩阵旋转操作是将子矩阵$SA_{0,0}$播送到$SA_{x,y}(0≤x,y<p)$中，然后将子矩阵$SA_{x,y}$中的所有元素循环向上移动x个单位，向左移动y个单位，即

$$A\left[x\times N+(i-x)\bmod N,y\times N+(j-y)\bmod N\right]=A[i,j](0\le i,j<N)$$

对矩阵广播操作，有如下定理：

定理 1 在具有 N^2 个处理器的 LARPBS 上，对于规模为 $M\times M$ 的矩阵，可在$O(1)$时间内实现矩阵广播操作。

证明 给出一个 $O(1)$ 时间的矩阵广播算法。$\boldsymbol{A}[0…M-1,0...M-1]$表示规模为$M×M$的矩阵，将$N^2$个处理器依次记为$PE_0,PE_1,…,PE_{N^2-1}$：

算法 1 矩阵广播

输入 $A[i,j]$存储于处理器$PE_{i×M+j}(0≤i<M; 0≤j<M)$

输出 数组元素$A[i,j]$存储于处理器$PE_{(u×N×M+v×M×M)+i×M+j}$ $(0≤i<M; 0≤j<M, 0≤u<N/M; 0≤v<N/M)$

(1)当 $0≤j<M^2$时，处理器PE_j令$B[0,j]=A[\lfloor j/M\rfloor,j\bmod M]$；

当$M^2≤j<N^2$时，处理器PE_j令$B[\lfloor j/M^2\rfloor,j\bmod M^2]=0$。

(2)将矩阵$B[0...N^2/M^2-1,0...M^2-1]$进行转置；

(3)将LARPBS分成M^2个独立的子段，每段有N^2/M^2个连续处理器：处理器$PE_i(0≤i<N×N)$计算$i\bmod(N^2/M^2)$，结果为 0 的处理器断开左边的重构开关；

(4)在第$i(0≤i<M^2)$段中，处理器$PE_{i×N^2/M^2}$向处理器$PE_{i×N^2/M^2+j}$ $(0≤j<N^2/M^2)$播送$B[0,i]$(即$A[\lfloor i/M\rfloor,i\bmod M]$)。处理器$PE_{i×N^2/M^2+j}$ $(0≤j<N^2/M^2)$将接收到的$B[0,i]$存于$C[i,j]$，并且令$A[\lfloor i/M\rfloor,i\bmod M]= C[i,j]$。各段并行执行。

在该算法中，步骤(2)采用了矩阵转置操作，由引理 3 知，该操作可在$O(1)$时间内完成；步骤(3)采用分段操作；步骤(4)采用了广播操作。由引理 1 知，这些操作均可在$O(1)$时间内完成。因此，算法 1 的执行时间复杂度为$O(1)$，定理 1 得证。

与定理 1 证明类似，可得定理 2 和定理 3。

定理 2 在具有 N^2 个处理器的 LARPBS 上，对于规模为 $N\times N$ 的矩阵，$0\le x,y<p$，可在$O(1)$时间内实现 MCS(A,x,y,A')操作。·

定理 3 在具有 $p^2\times N^2$ 个处理器的 LARPBS 上，对于规模为 $(p\times N)\times(p\times N)$ 的矩阵，可在$O(1)$时间内实现旋转操作。

2 图像的模板匹配算法

2.1 基本原理

给定图像$\boldsymbol{I}[0…N-1,0…N-1]$，先将其均匀地分成 N^2/M^2 个大小为 $M\times M$ 的子图$SI_{u,v}(0≤u,v<N/M)$，然后将每个子图均匀地分成 M^2/p^2 个大小为 $p\times p$ 的子块$G_{s,t}(0≤s,t<M/p)$。当N=27，M=9，p=3 时，划分示意如图 1 所示。

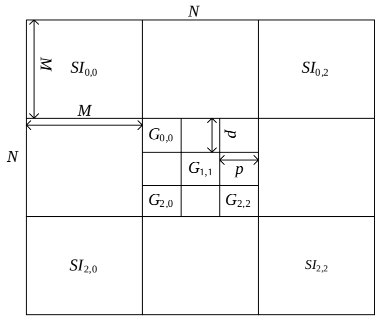

图 1 划分示意

将 $p^2\times N^2$ 的LARPBS均匀地分成p^2个规模为N^2的子段，即第$k(0≤k<p^2)$段包括以下处理器：$PE_{k×N^2},PE_{k×N^2+1},…, PE_{(k+1)×N^2-1}$，将该段记为$SA_{x,y}$，其中，$x=\lfloor k/p\rfloor$；$y=k\bmod p$。同理，将$SA_{x,y}(0≤x,y<p)$均匀地划分成 N^2/M^2 个规模为M^2的子段，将第$h(0≤h<N^2/M^2)$段记为$B_{u,v}$，其中，

$$u=\lfloor h/(N/M)\rfloor,v=h\bmod(N/M)$$

为了便于对算法的理解，可将所有处理器排列成一个二维图(图 2)。在图 2 中，$B_{u,v}(0≤u,v<N/M)$包含了M^2个处理器，依次按每行M个排列，共有M行；$SA_{x,y}(0≤x,y<p)$包含了 N^2/M^2 个$B_{u,v}$，依次按每行 N/M 个排列，共有 N/M 行；整个总线包含了p^2个$SA_{x,y}$，依次按每行p个排列，共有p行。当N=27，M=9，p=3 时，上述排列方法如图 2 所示。

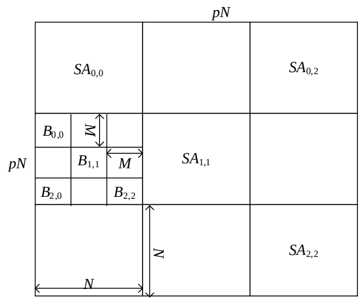

图 2 处理器排列

在第$s×M/p+t(0≤s,t<M/p)$次迭代过程中，对于 $0≤x,y<p$，$0≤u,v<N/M$并行操作：$SA_{x,y}$中的子段$B_{u,v}$计算子图$SI_{u,v}$中块$G_{s,t}$中像素(x,y)的模板匹配，然后将其模板匹配值播送到像素(x,y)所在图像中的初始位置。

这样，在一次迭代过程中计算了 $p^2\times N^2/M^2$ 个模板匹配，共需要 M^2/p^2 次迭代。

2.2 算法

给定一个 $N\times N$ 的图像矩阵$\boldsymbol{I}[0…N-1,0...N-1]$和一个 $M\times M$ 的模板矩阵$\boldsymbol{T}[0...M-1,0...M-1]$，其中，$I[i,j](0≤i,j<N)$表示像素$(i,j)$的像素值；$T[u,v](0≤u,v<M)$表示点$(u,v)$的模板值；执行模板匹配操作后，$G[i,j](0≤i,j<N)$表示像素$(i,j)$的模板匹配值。下面给出规模为 $p^2\times N^2$ 的LARPBS上的模板匹配算法，该 $p^2\times N^2$ 个处理器依次记为$PE_0,PE_1,…,PE_{p^2×N^2-1}$。

输入 $I[i,j](0≤i,j<N)$存储于处理器$PE_{i×N+j}$，$T[u,v](0≤u,v<M)$存储于处理器$PE_{u×M+v}$

输出 $G[i,j](0≤i,j<N)$存储于处理器$PE_{i×N+j}$

(1)对模板矩阵$\boldsymbol{T}[0\ldots M-1,0\ldots M-1]$在$p^2\times N^2$个处理器上进行矩阵广播操作。

(2)for(s=0;s<M/p;s++)

for(t=0;t<M/p;t++){

1)对图像矩阵$\boldsymbol{I}[0\ldots N-1,0\ldots N-1]$，在处理器$PE_0,PE_1,\ldots,PE_{N^2-1}$上进行MCS($I,s\times p,t\times p,I'$)操作。

2)处理器$PE_\alpha(0\le\alpha<p^2\times N^2)$计算$i'=(\alpha-\lfloor\alpha/N^2\rfloor\times N^2)/N;$

$j'=(\alpha-\lfloor\alpha/N^2\rfloor\times N^2)\bmod N, i=\lfloor\lfloor\alpha/N^2\rfloor/p\rfloor\times N+i', j=(\lfloor\alpha/N^2\rfloor\bmod p)\times N+j';$

$\beta=\lfloor\alpha/N^2\rfloor\times N^2+(\lfloor i'/M\rfloor\times(N/M)+\lfloor j'/M\rfloor)\times M^2+(i'\bmod M)\times M+j'\bmod M$。

若 $0\le\alpha<N^2$，则令$I''[i,j]=I'[i,j]$；否则，令$I''[i,j]=0$。

3)对步骤 2)得到的矩阵 $\boldsymbol{I}''$,在所有处理器上进行矩阵旋转操作。

4)处理器$PE_\alpha(0\le\alpha<p^2\times N^2)$向处理器$PE_\beta$播送$I''[i,j]$，处理器$PE_\beta$令$Itemp[i'\bmod M,j'\bmod M]=I''[i,j]$。

5)将规模为$p^2\times N^2$的LARPBS分成$(p^2\times N^2)/M^2$个独立的子段，每段有M^2个连续的处理器；处理器$PE_{i\times M^2}(0\le i<(p^2\times N^2)/M^2)$断开左边的重构开关。

6)在第$i(0\le i<(p^2\times N^2)/M^2)$段中，处理器$PE_{i\times M^2+j}(0\le j<M^2)$计算$i'=\lfloor j/M\rfloor$; $j'=j\bmod M$; $GTemp[i',j']=Itemp[i',j']\times T[i',j']$。然后在段内对$GTemp[0,0],GTemp[0,1],\ldots,GTemp[M-1,M-1]$求和，并将结果$Temp_i$存入处理器$PE_{i\times M^2}$中。恢复所有连接。

7)处理器$PE_{i\times M^2}(0\le i<(p^2\times N^2)/M^2)$计算

$x=\lfloor\lfloor i/(N^2/M^2)\rfloor/p\rfloor$; $y=\lfloor i/(N^2/M^2)\rfloor\bmod p$; $u=\lfloor(i\bmod(N^2/M^2))/(N/M)\rfloor$;

$v=(i\bmod(N^2/M^2))\bmod(N/M)$; $\alpha=u\times M+s\times p+x$; $\beta=v\times M+t\times p+y$;

$\gamma=\alpha\times N+\beta$。令$G[\alpha,\beta]=Temp_i$并向处理器$PE_\gamma$播送$G[\alpha,\beta]$。

}

在该算法中，步骤(1)采用了矩阵广播操作，由定理 1 知，该操作可在$O(1)$时间内完成；步骤(2)分别用到了 MCS、矩阵旋转、分段、有界值求和和点对点通信等操作，由定理 2、定理 3 及引理 1 可知，这些操作均可在$O(1)$时间内完成。步骤(2)需执行这些操作 M^2/p^2 次，故该步的时间复杂度是 $O(M^2\cdot p^{-2})$。所以，算法 2 的时间复杂度为 $O(M^2\cdot p^{-2})$。因此，可得定理 4。

定理 4 对于一个 $N\times N$ 的图像矩阵和一个 $M\times M$ 的模板矩阵，在规模为 $p^2\times N^2(1\le p\le M<N)$ 的 LARPBS 上可在 $O(M^2\cdot p^{-2})$ 时间内完成模板匹配操作。

3 图像的中值滤波算法

由模板匹配和中值滤波的定义可知，其计算方法与第 2 节中的算法类似，因此，可以由第 2 节中提出的 LARPBS 上的模板匹配算法推导得到 LARPBS 上的中值滤波算法。同样，可以得到定理 5。

定理 5 对于一个 $N\times N$ 的图像矩阵和一个 $W\times W$ 的窗口，在规模为 $p^2\times N^2(1\le p\le W<N)$ 的 LARPBS 上可在 $O\left(\frac{(W\times\log\log N)^2}{p^2\times\log\log\log N}\right)$时间内完成中值滤波操作。

4 总结

模板匹配和中值滤波是图像处理中的基本问题，在很多领域都有重要的应用。对于这些问题的串行算法已经非常成熟，而它们在 RMESH 等并行模型上也有了很好的结果，但是针对新出现的 LARPBS 模型的研究还很少。本文充分利用 LARPBS 的通信灵活性，提出了 LARPBS 上图像的模板匹配算法和中值滤波算法。这些算法都基于该模型，达到了最优成本。

参考文献

1 Li K, Pan Y, Zheng S Q. Fast and Processor Efficient Parallel Matrix Multiplication Algorithms on a Linear Array with a Reconfigurable Pipelined Bus System[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1998, 9(8): 705-720.

2 Han Y, Pan Y, Shen H. Fast Parallel Selection on the Linear Array with Reconfigurable Pipelined Bus System[C]//Proc. of the 7th Symp. on the Frontiers of Massively Parallel Computation. 1999: 286-293.

3 Jenq J F, Sahni S. Reconfigurable Mesh Algorithms for Image Shrinking, Expanding, Clustering, and Template Matching[C]//Proc. of the 5th International Parallel Processing Symposium. 1991: 208-215.

4 Tsai H R, Horng S J, Tsai S S, et al. Optimal Speed-up Parallel Image Template Matching Algorithms on Processor Arrays with a Reconfigurable Bus System[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 71(3): 393-412.

5 Wu C H, Horng S J, Pan Y. Parallel Algorithms for Median Filtering on Arrays with Reconfigurable Optical Buses[C]//Proceedings of International Symposium on Parallel and Distributed Processing. 2002: 150-157.

6 舒红霞, 郑启龙, 李春生, 等. 可重构流水线总线并行机上图像的聚类算法[J]. 计算机工程, 2005, 31(23): 156-158.

~~~~~~

(上接第 192 页)

约的辨识矩阵及辨识函数，给出了包含核属性之外的属性集如何删除依赖性的计算方法，通过决策矩阵及决策函数，求解最小决策规则集的方法。该方法的求解过程，可以自动实现，从而大大提高了知识的自动化获取程度，具体实例验证了该算法的有效性。

参考文献

1 刘同明. 数据挖掘技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 82-85.

2 张文修. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

3 张文修, 仇国芳. 基于粗糙集的不确定决策[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 32-35.

4 张微敬, 欧进萍. 基于粗糙集理论的结构振动模糊控制[J]. 振动工程学报, 2005, 18(4): 406-411.

5 罗秋瑾, 陈世联. 基于值约简和决策树的最简规则提取算法[J]. 计算机应用, 2005, 25(8): 1853-1855.

6 Greco S, Matarazzo B, Slowinski R. Rough Approximation by Dominance Relations[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2002, 32(17): 153-171.

7 王国胤, 安久江. Rough 集理论代数观与信息观的差异量化分析[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(7): 1187-1190.

8 李 凯, 赵 克. 概率粗糙集模型的机械故障诊断研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(12): 1437-1440.
~~~~~~