DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.008

基于DM6467的车辆轮对磨耗检测算法优化实现*

祝中科,吴开华*,陈 杰
(杭州电子科技大学 生命信息与仪器工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对如何提高轮对磨耗检测速度的问题,对轮对磨耗检测的方法、磨耗检测算法、基于DSP的算法优化方法等方面进行了研究和归纳,提出了基于TI公司定点DSP芯片TMS320DM6467的车辆轮对磨耗检测算法的优化方法。在实现基于DSP图像处理系统的基础上,根据轮对磨耗检测算法的特点和硬件结构特点,采用几种算法优化方法对磨耗检测算法进行了优化,包括运用软件流水实现DSP并行处理、运用内联函数提高代码执行效率、优化存储器提高系统运行速度等方法,最后进行了实验。实验结果表明,优化后算法执行的效率是优化前算法的3.3倍,优化效果明显。

关键词: 轨道交通; 车辆轮对磨耗检测; 图像处理; DM6467; 检测算法效率; 算法优化
中图分类号: TH117; TP751.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4551(2014)06-0716-05

Optimized for vehicle wheelset wear detection algorithm based on DM6467

ZHU Zhong-ke, WU Kai-hua, CHEN Jie
(College of Life Information Science & Instrument Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at how to improve the speed of wheelset detection, methods for wheelset wear detection, wear detection algorithm and algorithm optimization methods based on DSP were researched and generalized. The optimization methods for vehicle wheelset wear detection algorithm based on TI's fixed-point DSP DM6467 were proposed. The DSP-image processing system was implemented. Depending on the features of detection algorithm and structural characteristics of the hardware. Some algorithm optimization methods had been used to optimize the wear detection algorithm. Software pipelining was used to achieve parallel processing for DSP. Inline functions were used to improve the efficiency of the code. Memory was optimized to improve the speed of the system. The results indicate that, the efficiency of optimized algorithm is 3.3 times as fast as before. The optimization of result is obvious.

Key words: rail transport; wear measurement of vehicle wheelset; image processing; DM6467; efficiency of detection algorithm; algorithm optimization

0 引 言

铁路是我国最重要的交通运输基础设施之一,车辆轮对的质量是影响安全运行的一个重要因素[1]。同时,随着高速轨道交通技术的发展,列车安全监控领域对轮对质量检测效率的要求也日益提高[2]。因此,非常有必要研究高效率的轮对磨耗检测方法。

20世纪90年代末,日本研制了"车轮踏面形状自动测定装置",采用2台CCD相机高速拍摄轮对被照部

收稿日期: 2014-01-20
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372155)
作者简介: 祝中科(1989-),男,湖北鄂州人,主要从事精密测量与光电检测技术方面的研究. E-mail:258520975@qq.com
通信联系人: 吴开华,男,博士,副教授,硕士生导师. E-mail:wukaihua@hdu.edu.cn

分散射光图像，然后使用计算机进行滤光和细线化处理，提取图像中心线并计算车轮尺寸。21世纪初，国内研制出了“基于CCD成像技术的火车轮对检测系统”，提出了“基于结构光成像的机车轮对磨耗参数在线检测技术”[3]，都是采用计算机对CCD采集到的轮对图像进行相应的处理和计算，以得到所需测量的几何参数。目前，国内外提出的轮对磨耗检测方法大都是基于PC计算机系统的。近些年来，虽然也提出了基于DSP的车辆轮对检测方法[4-6]，但在图像处理速度上还有很大的提升空间。针对DSP的体系结构和具体算法特点，国内外也提出了不少基于DSP的程序优化方法[7-11]。

DSP是一种独特的微处理器，是以数字信号来处理大量信息的器件，其实时运行速度可达每秒数千万条复杂指令程序，被广泛应用于图像处理领域。

本研究提出一种基于DSP的车辆轮对磨耗检测算法的优化实现方法。检测算法主要包括图像预处理和参数计算两部分，分别使用软件流水、内联函数、缓存优化等主要优化手段对图像预处理部分进行优化。

1　轮对磨耗检测系统组成

轮对磨耗检测系统由图像采集与图像处理两大部分组成，系统组成如图1所示。当车辆经过检测区域时，笔者使用4组图像采集装置分别采集车辆轮对4个工位的轮对轮廓图像，然后将这些图像传输至图像处理设备DSP，执行轮对磨耗检测算法，分析得到磨耗参数数据。

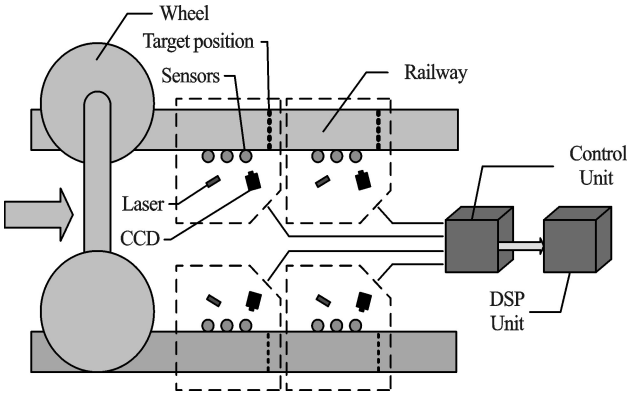


图1　轮对磨耗检测系统组成

轮对磨耗检测算法流程如图2所示。其中，图像阈值分割[12]、图像细化、像素跟踪属于图像预处理部分。

轮对磨耗检测算法复杂，需要进行大量运算，而基于DSP的嵌入式系统因功耗低、速度快、利于系统集成和扩展升级，为轮对磨耗检测系统提供了高效率的图

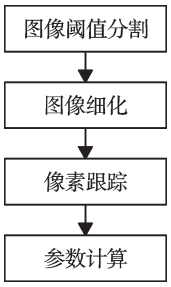


图2　算法流程

像处理平台。该在线轮对磨耗检测系统的图像处理部分采用TI的数字信号处理平台TMS320DM6467，该平台采用ARM + DSP双核架构，包括ARM926EJ-S内核和32位C64x+内核，工作频率分别为297 MHz和594 MHz，将Ve2lociTI体系结构和超长指令字（VLIW）结构完美结合，使得DSP能够在一个指令周期并行执行8条指令，具有很强的运算处理能力。

在现有已实现图像处理系统的基础上，为了进一步提高检测算法执行效率，本研究提出了以下几种算法优化方法。

2　轮对磨耗检测算法的优化实现

以下优化算法中，width和height分别为待处理图像的宽和高，neighbour[m][n]为算法中某一点的邻域矩阵；lpSrc为图像源缓存区；lpDst为图像目的缓存区；bCount[i]对应为一幅图像0~255灰度级中，灰度值为i的像素点的个数；bCondition1、2、3、4为细化算法中是否将某点置为255的判断条件。

2.1　内联函数的使用

TI的C6400编译器提供了很多内联函数，用下划线“_”开头，在使用上和普通函数类似，和C环境兼容，不用增加额外的编程工作量，它们直接映射为C6400内嵌的汇编指令特殊函数，所以执行效率可以接近于汇编指令，是一种既方便又高效的函数。常用内联函数有_add2、_sadd、_mpy、_sub2等。

轮对磨耗检测算法中，优化前的图像阈值分割算法统计bCount每个灰度级所对应的像素个数之和时使用以下程序：

```
for(m = 0;,m < 256;m++)
{
    bsum +=(int)bCount[m];
}
```

使用内联函数的优化方法后，程序如下：

```
int bsum_1 = 0;
int bsum_h = 0;
for(m = 0;m < 256;m +=2)
```

```
{
    bsum_l = _add2((int)bCount[m],bsum_l);
    bsum_h = _add2((int)bCount[m+1],bsum_h);
}
    bsum = _add2(bsum_l,bsum_h);
}
```

使用编译器内联函数进行优化后，函数执行效率接近于汇编指令，较优化前有明显提高。

2.2 软件流水实现

算法执行时，对性能影响较大的是其中的循环代码段，而在DSP算法优化过程中，软件流水是一项核心技术，它通过安排循环内的指令运行方式，充分利用DSP的功能单元资源，对提高算法执行效率起着至关重要的作用，所以在进一步优化之前，需要尽可能简化代码的结构并去除影响流水的因素，使其能够被编译器充分流水，具体方法介绍如下：

2.2.1 循环展开

当C代码中存在多重循环嵌套时，编译器最多只在最内层循环中形成一个流水，循环语句就无法充分利用DSP的软件流水功能。这时，可将循环嵌套展开，形成一个单层的循环，虽然增加了代码的长度，但这样有利于软件流水的进行。轮对磨耗检测算法中，优化前的细化算法使用以下这段程序来获取当前点相邻的3×3区域内的像素值：

```
for(m = 0;m < 3;m++ )
{
    for(n = 0;n < 3;n++)
    {
neighbour[m][n]=(unsigned char)(*(lpSrc +((2 - m)- 1)*width +
n - 1 ));
    }
}
```

循环展开优化后的代码如下：

```
    neighbour[0][0]=(unsigned char)(*(lpSrc +((2- m)- 1)*width-
1 ));
    neighbour[0][1]=(unsigned char)(*(lpSrc+((2-m)-1)*width));
    ……
    neighbour[2][1]=(unsigned char)(*(lpSrc +((2- m)- 1)*width +
1 ));
    neighbour[2][2]=(unsigned char)(*(lpSrc +((2- m)- 1)*width +
1 ));
```

原程序中，最内层循环只有1次内存的读写操作，没有充分利用C64x+结构的所有资源，循环展开优化后，通过创造一个比较大的内循环，提高了代码的执行性能。

2.2.2 循环中跳转的消除

循环中的条件判断语句if-else会引入跳转指令，每个跳转指令有5个延迟间隙，会导致程序执行时间延长，同时也会阻塞软件流水。因此应尽可能地用逻辑判断语句来替代if-else判断，减少不必要的跳转。

优化前，在轮对磨耗检测算法的细化算法中，当某点满足bCondition的4个条件时，将该点置255，使用以下程序实现：

```
for(m = 0;m < width;m++)
    {
    for(n = 0;n < height;n++)
    {
    if(bCondition1 && bCondition2 &&bCondition3 && bCondi-
tion4)
    {
    *lpDst =(unsigned char)255;
    }
    else
    {
    *lpDst =(unsigned char)0;
    }
    }
}
```

优化后，用以下代码代替之前的if-else判断：

```
    *(lpDst)=(bCondition1 && bCondition2 && bCondition3 &&
bCondition4)?(unsignedchar)255 :(unsignedchar)0;
```

2.2.3 循环次数的指明

一般使用#pragma MUST_ITERATE（min，max，multiple）指令告知编译器循环的相关信息，其中min和max是循环的最小和最大执行次数，multiple默认为4，循环次数必须为multiple的整数倍。优化后的轮对磨耗检测算法中，在使用循环遍历图片指定列的每一个像素点时，调用：

```
    #pragma MUST_ITERATE(height,,)
    for(n = 0 ;n < height;n++)
    {
        ……
    }
```

如果没有pragma伪指令，编译器会认为循环迭代次数可能为0，导致软件流水产生时会产生冗余循环。而使用了#pragma MUST_ITERATE()后，则不存在这个问题。

通常，算法中存在大量的循环操作，如果能有效地建立起软件流水，则多条指令并行运行，算法运行效率大幅提高。

2.3 存储器及数据传输优化

DM6467的存储结构包括两级高速缓存L_1和L_2。L_1包括程序高速缓存L_1P及数据高速缓存L_1D，大小都为32 KB。L_2的大小为128 KB，与L_1P、L_1D

一样，均可配置为SRAM和Cache。CPU访问L_1几乎不需要等待，而访问L_2的速度只有L_1的一半，访问片外存储器的速度就更慢了。

CPU访问存储器流程图如图3所示，在访问数据时，CPU优先访问离它最近的一级存储器，如果命中，则可以直接读取数据。否则，访问下一级存储器，直到在片外存储器中获取到有效的数据。

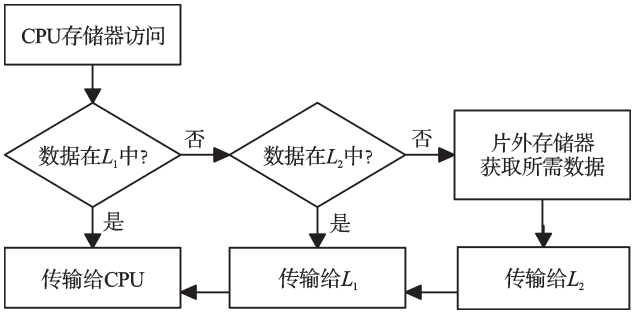


图3　CPU访问存储器流程图

因此，为了避免从片外存取器读取数据消耗大量时间，必须提高访问L_1和L_2的命中率，而最有效的方式是使片内Cache尽可能大，并将数据存放在片内SRAM中。但轮对磨耗检测算法需要处理的数据量很大，而L_1和L_2的大小有限，无法将图像数据全部放入其中。

优化前，笔者将数据全部放在片外存储器中，CPU从片外存储器读取图像数据将耗费大量时间。优化后，将全局变量、静态变量、栈空间这些使用频繁且容量较少的数据放入片内SRAM中，将容量较大的图像数据放在片外存储器，并采用Ping-pong缓存技术进行数据传输。在L_2的SRAM中建立两个数据缓冲区，Pingbuffer和Pongbuffer，在CPU处理SRAM中数据的同时，启动EDMA将图像数据从片外存储器传入片内SRAM中，实现了数据传输和处理的并行机制，大大提高了CPU的利用率。

配置L_1和L_2时，既要使Cache尽可能大，还要确保SRAM有足够的空间进行数据存储和乒乓缓存。经过反复实验，得到的最优化缓存配置如表1所示。

表1　Cache和SRAM的配置

高速缓存	L_1D	L_1P	L_2
SRAM	16 KB	0 KB	64 KB
Cache	16 KB	32 KB	64 KB

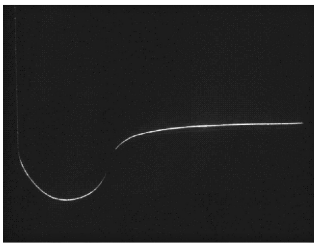
2.4　其他优化

此外，笔者还采用了其他的优化方法，例如：C6400编译器定义了如下几种数据类型。char：8 bit；short：16 bit；int：32 bit；long：40 bit；float：32 bit；double：64 bit。轮对磨耗检测算法中，乘法运算较多，优化前默认使用int型作为输入，每次乘法运算需消耗数个机器周期。而C64x+DSP核完成1次16 bit×16 bit的乘法只需要1个乘法器周期，优化后，使用short型作为定点乘法的输入，极大的缩短了乘法运算的耗时。

笔者还采用了设置编译器优化选项为-O3，开启最高等级的程序优化，执行软件流水；除法算法用移位代替；使用关键字const，消除寄存器相关性等优化方法，进一步提高了算法执行效率。

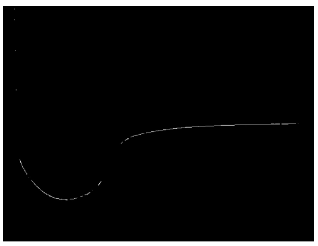
3　实验结果及分析

该检测系统在TI的TMS320DM6467评估板上进行软、硬件的调试，DM6467的DSP主频为574 MHz。实验数据采用的车辆轮对图像为300幅分辨率为764×576大小的8位BMP图像，以其中一幅具有代表性的轮对图像为例，图像预处理实验结果如图4所示，

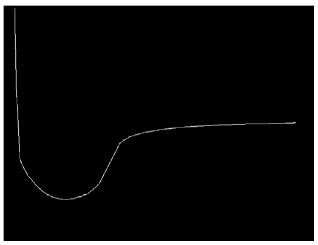


（a）原始车辆轮对图像

（b）阈值分割后得到的轮对图像



（c）图像细化处理后得到的轮对图像



（d）经过像素跟踪处理后最终得到的图像

图4　图像预处理结果

原始车辆轮对图像如图4(a)所示,阈值分割后得到的轮对图像如图4(b)所示,图像细化处理后得到的轮对图像如图4(c)所示,经过像素跟踪处理后最终得到的图像如图4(d)所示。

图像阈值分割算法优化前、后耗时对比如图5所示。图5中,以图像阈值分割算法为例,对所述的主要优化方法的优化性能进行分析,优化顺序为:软件流水优化→内联函数优化→Cache优化→其他优化方法。其中,软件流水优化后,算法执行效率是优化前的2.0倍;另外,内联函数优化后,算法执行效率是优化前的1.2倍;存储器优化后,算法执行效率是优化前的1.4倍。所有的优化完成后,算法执行效率是优化前的3.4倍。

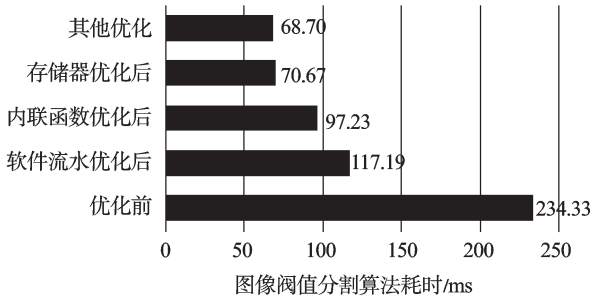


图5 图像阈值分割算法优化前、后耗时对比

图像细化算法和像素跟踪算法的优化效果与图像阈值分割算法相似,在算法优化前、后,其执行速度都有大幅提升。

对优化前后各算法耗时及DSP处理器总耗时进行统计对比的结果如表2所示。可以看出,优化后耗时大大低于优化前,算法执行效率是优化前的3.3倍,优化效果明显。

表2 优化前、后耗时对比

算法	优化前耗时/ms	优化后耗时/ms	优化后算法执行效率与优化前之比/倍
图像阈值分割	234.33	68.70	3.4
图像细化	3.34	1.91	1.7
像素跟踪	48.80	16.08	3.0
总耗时	286.47	86.69	3.3

4 结束语

本研究提出了一种基于TMS320DM6467的车辆轮对磨耗检测算法优化实现方案。笔者采用数种优化方式对检测算法中的图像预处理算法进行优化,包括软件流水优化,内联函数优化,Cache优化等等,最后给出的实验结果表明,该算法执行效率得到了大幅提高,优化效果明显。

参考文献(References):

[1] 王君可. 基于CCD成像技术的火车轮对检测系统[D]. 大连:大连交通大学软件学院,2007.
[2] 郭静涛,戴立新,王泽勇. 轮对状态动态检测系统应用综述[J]. 铁道技术监督,2009,37(7):11-12.
[3] 班 韬. 基于结构光成像的机车轮对磨耗参数在线检测技术研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学自动化学院,2010.
[4] 范建新. 基于DM6467的轮对磨耗图像高速采集与处理技术的研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学自动化学院,2010.
[5] 杨 凯,王 黎,高晓蓉. 便携式轮对外形检测装置数字信号处理器的实现[J]. 光学技术,2005,31(6):898-903.
[6] 陈益新,吴开华. 基于DM6467的高速图像预处理技术研究[J]. 杭州电子科技大学学报,2011,31(4):24-27.
[7] 王继东,鲁 琴,罗武胜. 位平面算术编码的编码分离与MQ编码器改进[J]. 中国图象图形学报,2007,12(10):1806-1810.
[8] 雷 涛,周 进,吴钦章. DSP实时图像处理软件优化方法研究[J]. 计算机工程,2012,38(14):177-180.
[9] 纪铁军,任丽军,赵爱明. 基于TMS320C6000系列DSP的C代码优化方法[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2003(7):76-77.
[10] TI ApplicationReport(SPRU198I). TMS320C60 00 programmer's Guide[M]. Dallas:TexasInstru ments,2006:1-53.
[11] 黄德天,陈建华. DSP图像处理的程序优化[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(5):452-459.
[12] 史 倩,吴开华. 区域生长的轮对图像分割[J]. 中国图象图形学报,2012,17(9):1122-1127.

[编辑:张 翔]

本文引用格式:
祝中科,吴开华,陈 杰. 基于DM6467的车辆轮对磨耗检测算法优化实现[J]. 机电工程,2014,31(6):716-720.
ZHU Zhong-ke, WU Kai-hua, CHEN Jie. Optimized for vehicle wheelset wear detection algorithm based on DM6467[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2014,31(6):716-720.
《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn