

# 基于 DSP6678 的 KCF 算法实现及优化系统设计

杜文彬 毛 征 梅伟军 贾文洋 韩嘉隆  
(北京工业大学信息与通信工程学院 北京 100124)

**摘 要:**核相关滤波算法在目标旋转、部分遮挡等情况下具有很强的鲁棒性,但是其在实际工程上无法满足实时性跟踪的要求。借助 DSP 嵌入式平台,提出一种实时目标跟踪系统实现方案。首先,基于 TMS32C6678 处理器的硬件平台,对二维快速傅里叶变换(FFT2D)进行算法优化;其次,对 KCF 算法进行 C 语言级代码优化,包括循环展开、使用内联函数、使用关键字 const 等。实测结果表明,对  $640 \times 480$  像素的图像,跟踪目标为  $32 \times 64$  像素时,波门大小为  $64 \times 128$ 。在满足跟踪效果的同时,其跟踪速度最高达到 25 ms/帧,符合实时性要求。

**关键词:**KCF 跟踪算法;程序优化;多核数字信号处理器;实时性跟踪

**中图分类号:** TN820.4 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Implementation of KCF tracking algorithm based on DSP6678 and optimization system design

Du Wenbin Mao Zheng Mei Weijun Jia Wenyang Han Jialong

(College of Information and Communication Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The kernel correlation filtering algorithm (KCF) is robust to target rotation and partial occlusion. However, it can not meet the requirements of real-time tracking in the actual project. Based on DSP embedded platform, this paper proposes an implementation scheme of real time target tracking system. Firstly, based on the hardware resources of TMS320C6678 processor, the algorithm is optimized for two-dimensional Fast Fourier Transform(FFT2D). Secondly, optimize the KCF algorithm by C language-level code, including loop expansion, the use of inline functions, the use of const keywords and so on. The results show that when the input image's size is  $640 \times 480$  pixels and the tracking target's size is  $32 \times 64$  pixels, the size of bomen is  $64 \times 128$ . It meets the tracking effect, meanwhile the speed up to 25 ms per frame, which meets the real-time requirements.

**Keywords:** KCF tracking algorithm; program optimization; DSP; real-time tracking

### 1 引 言

目标跟踪在计算机视觉中具有重要的地位,它广泛应用于运动分析、行为识别、监控及人机交互等领域。目标跟踪本质上就是在图像序列的初始帧中获取目标的初始信息(比如尺寸和位置),并在后续的图像序列中找到给定目标出现的最佳位置等信息。

近年,已有学者开始将基于相关滤波器<sup>[1-5]</sup>引入到目标跟踪<sup>[6-8]</sup>领域,并取得了显著的跟踪效果。Bolme 等人<sup>[1]</sup>将设计的最小平方误差和输出(minimum output sum of squared error, MOSSE)自适应相关滤波器应用于目标跟踪,该算法只需要一个目标区域的样本图像来训练目标模型,通过离散傅里叶变换(discrete fourier transform,

DFT)将目标与所有候选区域之间的相似度计算转换到频域。从而显著地提高了算法的运行速度。Henriques 等人<sup>[2-3]</sup>通过学习正则化最小二乘分类器来判别目标,并引入循环矩阵对训练样本进行循环移位,可近似看做是对目标的密集采样,从而高效的获得大量的训练样本。然后利用循环矩阵将相关滤波器和核函数联系起来,从而提出了核相关滤波器(kernelized correlation filter, KCF),该算法在目标旋转、部分遮挡等方面具有很好的跟踪效果。

目前,很多学者对 KCF 算法的研究主要是针对于尺度变化、严重遮挡等长期目标跟踪方面的理论性研究。但是,将其应用到实际工程中的研究还是很少。由于 KCF 算法的大运算量,限制了其实际性运算。近年,随着高速

收稿日期:2017-03

数字信号处理器<sup>[9-15]</sup>(digital signal processor, DSP)的迅猛发展,各种高性能 DSP 可以满足在数据处理性能方面的实时性需求,因此以 TI 公司的 TMS320 系列为代表的高性能 DSP 在实时目标跟踪<sup>[6-8]</sup>中获得了广泛的应用。由于 KCF 算法在目标跟踪应用中数据量大,数据关联性高,阻碍了其在工程上的应用,因此如何利用 DSP 平台对 KCF 算法进行优化编程,从而实现算法跟踪的实时性效果是整个系统的关键。

本文介绍以 TMS320C6678 为平台,分析了 KCF 算法特点,借助于 DSP6678 硬件平台,在代码调试器(code composer studio, CCS)上对此算法进行了整体架构、数据处理等方面的优化<sup>[9-15]</sup>,最终得出相关结论。

## 2 硬件平台介绍

TMS320C6678 是一款超高性能的、支持定点和浮点运算的 DSP 处理器,其工作时钟最高可达 1.25 GHz,该 DSP 内包括一级数据存储器(L2D)32 KB 和 512 KB 的二级缓存(SL2)以及一级程序存储器(L1P)。该 DSP 还包含一个最多分配 2 GB 的外部 DDR3 存储器和一个 4 096 KB 的多核共享内部存储空间(MSM)。整个芯片提供 160 G FLOP 浮点计算能力或 320 G MAC 定点计算能力。同时,该 DSP 还具有丰富的外设接口,包括 Serial RapidIO、HyperLink、EMIF、I2C 等适用于数据传输。

本文通过 MATLAB 程序将 BMP 格式的图像转换为 DAT 格式,然后通过 CCS v5 中 Load Memory 将 DAT 格式的数据加载到 DDR3 中。DAT 数据文件格式有特定的要求,具体的文件头格式如下表 1 所示。

表 1 DAT 文件头格式

固定格式	数据格式	基地址	页类型	长度
1651	2	80000000	0	92160000

其中数据格式:1 代表十六进制,2 代表十进制,3 代表十进制长整型,4 代表十进制浮点型;页类型:0 代表数据,1 代表数据;长度表示装入数据的长度。

## 3 KCF 跟踪算法

KCF 跟踪算法分为样本训练和目标检测两个过程。在样本训练过程中,通过对选定的目标进行循环移位来获取大量的训练样本,然后通过这些样本来训练分类器。在目标检测过程中,通过核函数来计算待选区域和跟踪目标的相关系数,选取相关系数最大的待选区域为新的目标。同时,利用二维快速傅里叶变换(two dimensional fast fourier transform, FFT2D)将时域映射到频域,降低样本训练和目标检测过程中的运算量。最后,在快速目标检测过程中再利用二维快速傅里叶反变换(two dimensional inverse fast fourier transform, IFFT2D)将频域映射到时域得到下一帧图像中目标出现的最佳位置。

### 3.1 循环矩阵

在样本训练过程中,通过在第一帧中选定的样本图像  $x$  作为基样本,记  $x$  为  $1 \times n$  的向量。然后使用置换矩阵  $P$  对该基样本进行循环移位,获取训练样本集合  $\{P^i x \mid i = 0, 1, 2, \dots, n-1\}$ , 其中:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

记  $X_i$  为基样本循环移动  $i$  个位置后的训练样本,则  $X_i = P^i x, \forall i = 0, 1, 2, \dots, n-1$  构成  $X$ , 其中:

$$X = C(x) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{n-1} & x_n \\ x_n & x_1 & \cdots & x_{n-2} & x_{n-1} \\ x_{n-1} & x_n & \cdots & x_{n-3} & x_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_n & x_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

该  $C(x)$  表示对基样本  $x$  循环移位操作获得的矩阵,循环矩阵可通过离散傅里叶变换(DFT)实现矩阵对角化,即:

$$X = G^H \text{diag}(\hat{x}) G \quad (3)$$

式中:  $G$  是一个与基样本  $x$  无关的常量矩阵,  $G^H$  表示  $G$  的共轭转置,  $\hat{x}$  表示  $x$  的 DFT 变换,即  $\hat{x} = F(x)$ 。下文中将使用“ $\hat{\cdot}$ ”来表示一个向量的离散傅里叶变换。

### 3.2 训练样本分类器

KCF 跟踪算法是在岭回归分类器的基础上引入核函数,即  $f(z) = w^T z$ 。则该分类器通过最小正则化风险泛函进行训练的最优解可表示为:

$$\sum_w^{\min} (\langle w, \varphi(x_i) \rangle - y_i)^2 + \lambda \|w\|^2 \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为一个固定的正则化参数,  $x_i$  为训练样本,  $y_i$  为期望输出,  $\varphi(x_i)$  为将训练样本  $x_i$  映射到高维特征空间的函数。由上述公式可得到其最优解为样本的线性组合  $w$ 。

$$w = \sum_i \alpha_i \varphi(x_i) \quad (5)$$

根据文献[4]可以得到:

$$\alpha = (K + \lambda I)^{-1} y \quad (6)$$

其中向量  $\alpha$  由样本训练参数  $\alpha_i$  组成,向量  $\alpha$  的表达式为  $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$ ,  $I$  为单位矩阵,向量  $y$  的元素为  $y_i$ ,  $K$  为核矩阵,矩阵元素为  $K_{ij} = \kappa(x_i, x_j)$ 。核函数  $\kappa(x_i, x_j)$  是酉不变核函数,则由  $K_{ij}$  构成的核矩阵  $K$  是循环矩阵。利用式(3)的循环矩阵的性质对式(6)进行 DFT 变换可得:

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{y}}{\hat{k}^{x^i} + \lambda} \quad (7)$$

其中,  $\hat{k}^{x^i}$  为核矩阵  $K$  的第一行元素。

### 3.3 快速目标检测

对于新输入的图像块  $z$ ,分类器的回归函数为:

$$f(z) = w^T z = \sum_i^n \alpha_i \kappa(x_i, z) \quad (8)$$

利用循环矩阵对图像块  $z$  进行循环移位可构造待选图像块, 设  $K^z$  为训练样本和所有候选图像块的核矩阵, 利用酉不变核函数定理, 可知  $K^z$  为循环矩阵。

$$K^z = C(k^{xz}) \quad (9)$$

其中  $k^{xz}$  是  $x$  和  $z$  之间的核相关运算。利用式(8)和(9), 可获得所有候选图像块的响应函数。

$$f(z) = (K^z)^T \alpha \quad (10)$$

由于  $K^z$  为循环矩阵, 利用循环矩阵的性质对上述公式进行 DFT 变换。

$$\hat{f}(z) = \hat{k}^{xz} \otimes \hat{\alpha} \quad (11)$$

其中  $\otimes$  表示点乘。对式(11)进行离散傅里叶逆变换 (IDFT), 即可得到所有候选图像块的相关响应系数, 系数最大的位置即为目标在该帧中出现的最佳位置。

### 3.4 模板更新

在快速检测过程中, 会出现目标部分遮挡、姿态旋转等情况的出现, 对训练参数  $\alpha$  和目标区域的 DFT 变换的及时更新是提高跟踪鲁棒性的必要条件。本文的更新模型如下:

$$\hat{x}_t = \eta \hat{x}_{t-1} + (1 - \eta) \hat{x}_t \quad (12)$$

$$\hat{\alpha}_t = \eta \hat{\alpha}_{t-1} + (1 - \eta) \hat{\alpha}_t \quad (13)$$

其中,  $\hat{x}_t$  和  $\hat{x}_{t-1}$  分别表示当前帧和上一帧的目标区域的离散傅里叶变换,  $\hat{\alpha}_t$  和  $\hat{\alpha}_{t-1}$  分别表示当前帧和上一帧的模板训练参数,  $\eta$  为更新因子, 当目标出现遮挡时, 对当前帧获得的参数不进行更新, 即  $\eta$  的取值有如下规定。

$$\eta = \begin{cases} 1, & \text{遮挡} \\ 0.075, & \text{非遮挡} \end{cases} \quad (14)$$

## 4 系统优化

在嵌入式平台下实现 KCF 跟踪算法的实时性跟踪面临的主要问题: 1) KCF 算法中多次应用 FFT2D, 此变换计算量大, 时间复杂度高, 简单的 C 代码无法满足实时性跟踪要求; 2) 此算法中涉及到数学公式运算和除法运算, 其运算的 CPU 周期比较长, 标准 C 函数的执行效率普遍偏低。

### 4.1 算法优化

利用时域到频域的转换来简化计算量, 同时在频域计算中采用 FFT2D 来替代 DFT2D。但是纯手编 C 语言实现的 FFT2D 运算耗时巨大, 对  $64 \times 128$  尺寸波门中的点进行 FFT2D 运算时间大约为 47 ms, IFFT2D 耗时大约为 51 ms, 并且本文多次调用 FFT2D, 导致程序运行效率相当低下, 无法满足实时性的要求。

针对上述难点, 对输入的图像先对每一行进行 FFT 变换, 然后行列转置, 再对每一列进行 FFT, 最后再进行一次行列转置获得最终的数据。在 FFT 和矩阵转置运算中调用 dsplib 中的 DSPF\_sp\_fftSPxSP() 和 DSPF\_dp\_mat\_trans() 两个内联函数, 最后优化得到的时间为 269  $\mu$ s。同

理, 针对 IFFT2D 可采用同样的原理, 最后 IFFT2D 的优化时间为 270  $\mu$ s, 其中 FFT2D 的具体实现代码如下:

```
void C66X_FFT2_64x128(const float * in, float *
out, int height, int width)
{
    int i, j;
    float ptr_wwf_w[M] = {0};
    float ptr_wwf_h[M] = {0};
    float temp_fft[M] = {0};
    float temp_tran[M] = {0};
    tw_gen_fft((float *)ptr_wwf_w, width);
    tw_gen_fft((float *)ptr_wwf_h, height);
    //对每一行做一次 FFT
    for(i = 0; i < height; i++)
    {
        DSPF_sp_fftSPxSP(width, (float *)in + 2 * i *
width,
        ptr_wwf_w, temp_fft + 2 * i * width, brev, 4, 0,
width);
    }
    //行列翻转
    DSPF_dp_mat_trans((double *)temp_fft, height,
width, (double *)temp_tran);

    //对每一列(翻转后变为行)进行 FFT
    for(j = 0; j < width; j++)
    {
        DSPF_sp_fftSPxSP(height, temp_tran + 2 * j *
height, ptr_wwf_h, temp_fft + 2 * j * height, brev, 4, 0,
height);
    }
    //行列翻转
    DSPF_dp_mat_trans((double *)temp_fft, width,
height, (double *)out);
}
```

同理, IFFT2D 只需要改变旋转因子对应的内联函数, 然后更改反变换对应的 FFT 变换的内联函数即可。

### 4.2 内联函数优化

内联函数的特点为可直接映射为 C6000 的汇编, 代码执行效率与汇编相同; 减少代码的程序量。TI 公司提供了丰富的底层库函数 mathlib、dsplib、imglib, 其中包括大量的内联函数, 用于实现定点及浮点数的算术运算。针对本文利用到的高斯函数, 若采用简单的数学公式运算, 调用标准 C 函数执行一次运算的时间为 6 755  $\mu$ s。本文合理的利用 mathlib 中的除法函数 divdp() 和 expdp() 函数来完成优化, 最后该段代码的最终运行时间为 2 000  $\mu$ s。本文中用到的内联函数有 cosdp()、divsp()、expdp()、DSPF\_sp\_fftSPxSP()、DSPF\_dp\_mat\_trans() 等。

### 4.3 编译器优化

编译器优化是指通过 CCS 提供的强大的编译优化指令来完成优化的功能,通过合理的选择编译选项,可以提升代码的运行效率。编译器优化选项如表 2 所示。

表 2 编译器优化选项

选项	描述
-ox	对流程进行简化,优化循环,执行并行计算,加速代码执行效率。x 代表数字 0、1、2、3。
-pm	进行程序级别优化,将所有的 C 文件联合在一起进行优化,去除没有调用的函数。
-mu	禁止软件流水。
-ms	减少冗余代码循环,减少程序的尺寸。

### 4.4 其他优化

除此之外,本文还用到了一些其他的优化方法。可使用移位的操作来替代整数的乘除运算;对一些代码段比较短且使用频率较高的函数,可使用宏定义的方式来实现,比如本文出现的取最大值的函数;循环展开亦是改进代码执行效率的另一种方法,编译器仅对内部循环执行软件流水,可通过创造一个较大的内循环来提高代码的执行效率;由于 C6678 对 16 位数据的运算做了指令集优化,采用 short 来定义图像的像素值,以加快指令的执行速度;合理的使用 const 关键字,减少别名问题,从而提高流水效率。

## 5 实验结果与分析

利用标准 C 实现 KCF 跟踪算法,将此算法移植到 TMS320C6678 开发板,对  $640 \times 480$  像素的原始图像中的  $32 \times 64$  的目标图像进行实时跟踪,其波门尺寸为 2 倍目标大小。对 KCF 算法做了两部分实验:首先,利用图像序列验证 KCF 算法的跟踪效果可行性;其次,对 KCF 算法进行优化,实现系统的跟踪性能。

针对不同的场景验证 KCF 算法的跟踪可行性,从定性和定量两方面来对 KCF 算法和 NCC 算法的跟踪效果进行对比。在定性方面根据两算法的跟踪显示效果进行对比分析,在定量方面对两种算法的跟踪精度进行对比分析。

场景一:目标旋转及姿态变化是目标跟踪过程中常见的情况,选择 Benchmark 数据集中的 Girl 图像序列来对比分析 KCF 算法和 NCC 算法的跟踪效果。跟踪结果如图 1 所示,根据图 1 所示可以发现,在实际工程应用中 KCF 算法具有很强的鲁棒性,跟踪效果优于 NCC 算法。

场景二:在实际应用中往往会遇到目标周围亮度变化的情况,图像亮暗的变化亦是对算法鲁棒性的重要参考标准。选择 Benchmark 数据集中的 David 图像序列对 KCF 算法和 NCC 算法的跟踪效果进行对比分析。其跟踪结果如图 2 所示,根据图 2 可以发现 KCF 算法在光照变化的情况下跟踪效果明显优于 NCC 算法。

在定量分析方面,选择距离精确度 (distance percen-

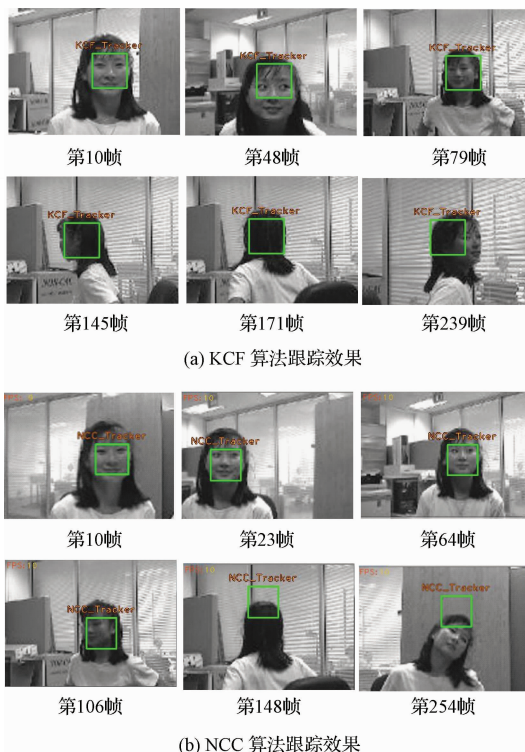


图 1 KCF 算法和 NCC 算法跟踪效果对比



图 2 KCF 算法和 NCC 算法跟踪效果对比

sion, DP) 曲线作为衡量跟踪性能的指标,其是指跟踪目标输出的坐标中心与真实人工标注的坐标中心位置的欧氏距离小于某一阈值的帧数与整个测试视频序列图像长度的百分比。上述两个图像序列的 DP 曲线如图 3 所示。

对 KCF 算法进行优化。针对本文用到的两种不同的

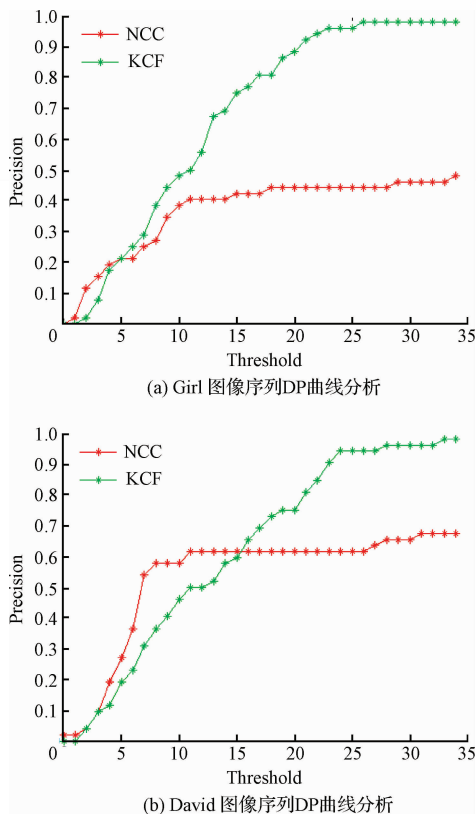


图3 KCF和NCC算法DP曲线分析

核函数:线性核函数和高斯核函数,对该算法依次进行编译器优化、内联函数优化等优化方法,其优化结果如表3所示。

表3 优化结果对比分析

时间/ms	DSP 优化前	FFT2D 优化后	内联函数等优化后
线性核函数	162.3	36.38	10.89
高斯核函数	370.9	38.41	24.16

在DSP6678平台下对KCF算法实现的两种不同核函数完成算法优化后,算法执行时间满足跟踪算法实时性的要求。对线性核函数而言,在优化前为161.3ms,算法执行耗时主要集中在FFT2D的运算上,经过FFT2D优化后算法执行效率提高了近10倍,最后再通过循环展开、内联函数的调用等优化方法,使其最终的执行时间缩小到10.89ms,完全满足系统实时性的要求;对高斯核函数而言,系统的另外一个时间开销主要集中在高斯核函数的计算上,此处亦是对FFT2D和IFFT2D的运算优化,经过FFT2D优化并对除法运算采用内联函数divsp()来执行,最终的执行时间缩短到24.16ms,系统执行效率提高15倍。

## 6 结论

本文提出了一种基于TMS320C6678处理器的KCF

跟踪算法优化实现方案,在640×480的原始图像对32×64尺寸大小的目标进行跟踪,利用dsplib和mathlib等TI系统中的库函数进行优化,取得很好的优化效果。针对线性核和高斯核两个不同的核函数,一帧图像的算法执行时间分别为10.89和24.16ms。满足系统跟踪的实时性要求。

## 参考文献

- [1] BOLME D S, BEVERIDGE J R, DRAPER B, et al. Visual object tracking using adaptive correlation filters[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 2544-2550.
- [2] HENRIQUES J F, RUI C, MARTINS P, et al. Exploiting the circulant structure of tracking-by-detection with kernels[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2012, 75(1): 702-715.
- [3] HENRIQUES J F, RUI C, MARTINS P, et al. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014, 37(3): 583-596.
- [4] DANELLJAN M, KHAN FS, FELSBURG M, et al. Adaptive color attributes for real-time visual tracking[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014: 1090-1097.
- [5] 张雷,王延杰,孙宏伟,等.采用核相关滤波器的自适应尺度目标跟踪[J].光学精密工程,2016,24(2): 448-459.
- [6] 李红岩,毛征,袁建建.一种基于算法融合的运动目标跟踪算法[J].国外电子测量技术,2013,32(12):36-40.
- [7] 谢英红,李凌.基于双边滤波的协方差目标跟踪算法[J].电子测量与仪器学报,2016,30(8):1282-1287.
- [8] 毛征,贾文洋,杜文彬,等.基于带权重多样例学习的视觉跟踪算法[J].北京工业大学学报,2017(2):217-223.
- [9] 李雁斌,曹作良,刘常杰,等.基于DSP利用粒子滤波算法实现目标跟踪[J].光电子·激光,2009(6): 771-774.
- [10] 闫钧华,姜惠华,杨勇,等.DSP实现基于改进压缩跟踪算法的目标实时跟踪[J].电子设计工程,2016,24(20): 9-12.
- [11] 吴强,任琳,张杰.快速归一化互相关算法及DSP优化实现[J].电子测量与仪器学报,2011,25(6): 495-499.
- [12] 陈仁爱,凌强.基于DSP的实时圆检测算法的设计实现与优化[J].微型机与应用,2016,35(11):93-96.
- [13] 刘鑫,王涌天.基于DSP的红外标志点实时跟踪方法研究[J].仪器仪表学报,2010,31(12):2654-2660.
- [14] 朱学俊,凌强,李博伦,等.基于DSP的实时去雾优化与实现[J].微型机与应用,2015,34(22):96-98.
- [15] 王职军,梁光明,刘任任.共生矩阵纹理特征的DSP优

化实现[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(11): 13-16.

### 作者简介

杜文彬, 1991 年出生, 硕士, 主要从事光电跟踪和系

统仿真方面的研究。

毛征, 1959 年出生, 工学博士, 教授, 主要研究方向为兵器系统仿真与光电跟踪技术研究。

E-mail: maozheng@bjut.edu.cn

(上接第 57 页)

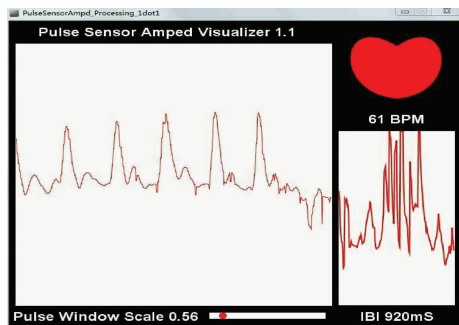


图 6 脉搏波效果

受测者在平静状态下进行的心率检测, 同时采用医用指夹式心率计同时监测, 作为基准数据。经多次测量记录, 本文所介绍的心率计与基准数据的平均误差在 2 BMP 以内。

## 6 结论

本文介绍了一款基于低功耗蓝牙的脉搏波监测仪, 采用光电容积脉搏波技术, 可用于非运动状态下的心率、血氧饱和度、体温等体征的测量。改进的 R 波检测算法充分考虑脉搏波的特点, 提高 R 波选取的有效性, 显著的提升了心率估算的精度。由实验结果可以看出, 该心率计具有低功耗、精度高、便携等特点, 具有很高的实用价值。

### 参考文献

- [1] 朱广, 黎海涛, 马银童, 等. 低功耗物联网网关设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(6): 31-36.
- [2] 欧阳骏, 陈子龙, 黄宁淋. 蓝牙 4.0 BLE 开发完全手册[M]. 北京: 北京化学工业出版社, 2013.
- [3] 王冬梅, 张涛, 闫丰. 基于光电容积脉搏波描记法的无创连续血压测量[J]. 中国生物医学工程学, 2012, 31(4): 607-614.
- [4] 季忠, 刘旭. 基于波形特征和小波的脉搏波特征点识别研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 379-386.

- [5] 吴金奖, 陈建新, 田峰. 可穿戴心电信号监测中运动伪影消除技术研究[J]. 信号处理, 2014, 30(11): 1388-1393.
- [6] 陈妮, 张国栋, 颜焕欢. 便携式无线光电容积脉搏波采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(1): 101-104.
- [7] 周岳斌, 杨凯, 陈家顺. 腕带式无线心率检测仪设计[J]. 微型机与应用, 2017, 36(4): 99-102.
- [8] 洋洋, 陈小惠, 王保强, 等. 脉搏信号中有效信号识别与特征提取方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 126-132.
- [9] 朱平安, 胡春生. 简单快速实时 R 波检测算法的研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(13): 3462-3464, 3521.
- [10] 张家盛, 张加岭, 禹东川, 等. 可穿戴式心率检测系统的设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2015, 183(2): 107-112.
- [11] 熊界, 周晓青, 刘志朋, 等. 基于低功耗蓝牙的跌倒检测系统的设计[J]. 中国医疗设备, 2016, 31(12): 23-25, 34.
- [12] 赵志强, 郑国维, 沈巍, 等. 脉搏波信号降噪和特征点识别研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(5): 57-60.
- [13] 石建飞. 数字心率计的单片机设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(5): 67-69, 76.
- [14] 刘劲松, 朱纯午. 一种基于 STM32 和 PPG 技术的腕带式心率计设计[J]. 电子技术应用, 2016, 42(10): 62-64, 68.
- [15] 张洪涛, 毛洪飞, 袁烽, 等. 基于 Sopc 的数字心率计设计[J]. 电子设计工程, 2011, 26(2): 31-33.

### 作者简介

马银童, 1990 年出生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信。

黎海涛, 1974 年出生, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为无线通信。

E-mail: tongxj.ok@163.com