

一种对亮度变化鲁棒的相关跟踪方法

穆欣侃¹, 罗海波²

- (1. 沈阳理工大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168 ;
2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 针对复杂背景目标跟踪过程中, 目标亮度和对比度发生变化易导致跟踪不稳定或失败的问题, 提出了一种对亮度变化鲁棒的相关跟踪方法。该方法利用图像相位一致性特征对亮度变化不敏感的特点, 对原始图像进行相位一致性计算, 得到相位一致性图像, 再采用传统的最小绝对差(MAD)相关跟踪方法对目标进行跟踪。实验结果表明, 该方法对图像的亮度变化具有很强的适应性, 较好地解决了传统相关跟踪算法因图像亮度变化导致跟踪点漂移甚至目标丢失的问题。

关键词: 相关跟踪; 相位一致性图像; 亮度变化; 鲁棒

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0255-06

Correlation tracking approach robust to the variation of image brightness

Mu Xinkan¹, Luo Haibo²

- (1. School of Information Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China;
2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: In the process of target tracking with complex background, changes in the target brightness and contrast easily lead to instability or failure of target tracking. To deal with such problem, a new correlation tracking approach was presented which was robust to the variation of brightness. Taking advantage of the merit of phase congruency that was insensitive to the variation of image brightness, the phase congruency was calculated firstly from the original image, and then the traditional MAD (Minimum Absolute Difference) correlation tracking approach was used to track the target. Experimental results show that the proposed algorithm is considerably adaptive to the variation of image brightness. It can successfully solve the problem of the tracking point excursion and even the failure of tracking which the traditional tracking methods is unable to deal with when the image brightness changes.

Key words: correlation tracking; phase congruency image; variation of brightness; robust

收稿日期: 2011-05-15; 修订日期: 2011-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(60802031)

作者简介: 穆欣侃(1977-), 男, 讲师, 研究方向为信息处理、软件无线电等。Email: syitcn@163.com

0 引言

相关跟踪是目前视频跟踪系统普遍采用的一种对复杂背景下目标进行高精度跟踪的图像处理算法,广泛应用于光电火控、成像制导等领域^[1-2]。然而在实际应用中,特别是在武器系统应用领域,相关跟踪存在一定的局限性,主要表现在以下几个方面:

(1) 对目标的亮度变化较敏感,当目标的亮度发生变化时,相关跟踪容易出现跟踪点漂移问题,严重时甚至会导致目标丢失;

(2) 当目标对比度发生变化时,易导致跟踪点漂移或者目标丢失;

(3) 对目标的旋转、尺度变化适应性较差。

针对前两个问题,文中利用相位一致函数值在 $[0,1]$ 区间内且无量纲、对图像的亮度和对比度变化具有不变性等特点,先对图像进行相位一致性检测,得到相位一致性图像,然后对此图像进行相关跟踪,将对原始灰度图像进行跟踪的问题转化为对相位一致性图像进行跟踪的问题,取得了较好的结果。

1 相位一致性检测^[3]

1.1 相位一致模型

Morrone^[4]等从傅里叶级数定理出发,分析了各类信号傅氏级数在各点处的相位特点,提出了相位一致(PC)模型。相位一致性是一种较新的特征检测方法,它不是基于局部亮度梯度来进行特征检测,而是以信号中傅里叶分量相位最一致的点为特征点。例如,方波展开为傅里叶级数时,所有的傅里叶分量都是余弦波,如图1(a)所示。在方波的阶跃点各余弦分量相位变化均为 90° 或 270° (取决于上升沿还是

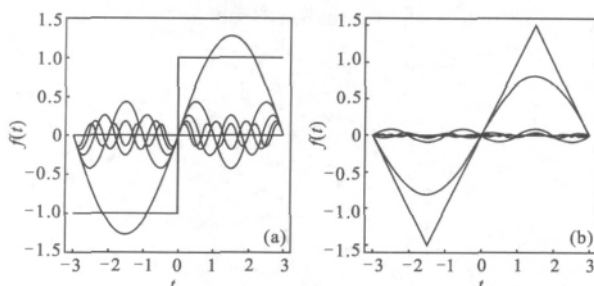


图1 傅里叶级数展开

Fig.1 Fourier series expansion

下降沿),此时相位一致程度最高;而在其他点单个相位值都在变化,使得相位一致的程度变低。与此相似,相位一致的程度在三角波的顶点(0° 或 180°)最高,如图1(b)所示。相位一致性模型的主要特点是无需对波形进行任何假设,只是在傅里叶变换域里简单地按相位一致的顺序寻找特征点^[4]。

相位一致函数可表示为如下形式:

$$PC(x) = \max_{\bar{\varphi}(x) \in [0, 2\pi]} \frac{\sum_n A_n \cos(\varphi_n(x) - \bar{\varphi}(x))}{\sum_n A_n} \quad (1)$$

式中: A_n 为尺度 n 上的幅值; $\varphi_n(x)$ 表示 x 处第 n 个傅里叶分量的相位值; $\bar{\varphi}(x)$ 是使公式(1)在 x 取最大值时,其傅里叶各分量局部相角的加权平均。

直接利用公式(1)计算各点的相位一致是相当繁琐的,因此,Venkatash^[5]等利用局部能量模型进行相位一致的计算:

$$PC(x) = \frac{E(x)}{\sum_n A_n(x) + \varepsilon} \quad (2)$$

其中, ε 是一个很小的常数,它是为了防止当 $\sum_n A_n(x)$ 很小时,表达式不稳定。局部能量见公式(3), M_n^o 和 M_n^e 为频带 n 下的奇、偶对称滤波器。

$$E(x) = \sqrt{\sum_n (I(x) \times M_n^e)^2 + \sum_n (I(x) \times M_n^o)^2} \quad (3)$$

$$\sum_n A(x) = \sum_n \sqrt{(I(x) \times M_n^e)^2 + \sum_n (I(x) \times M_n^o)^2} \quad (4)$$

相位一致系数 PC 、局部能量 $E(x)$ 和 $\sum_n A(x)$ 之间的关系可以参照图2。图2中局部傅里叶分量以向量首尾相接的方式表示,将这些分量的和映射到实

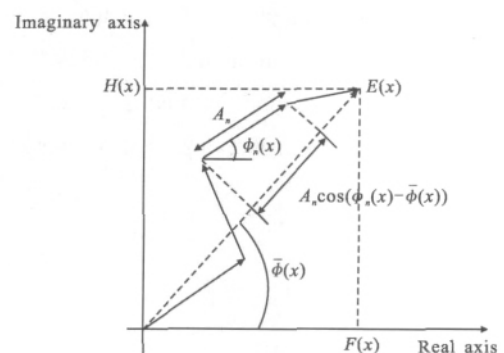


图2 极坐标下的关系图

Fig.2 Polar diagram showing the relationships

轴上即为 $F(x)$,映射到虚轴上为 $H(x)$;从原点指向

结束点用虚线表示的向量就是局部能量 $E(x)$ 。可以看到, $E(x)$ 就等于 $\sum_n A_n \cos(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x))$, 计算相位一致量就等价于计算 $E(x)$ 与各个傅里叶分量长度和的比值。即相位一致量是独立于信号总幅值的, 它提供了一个对图像亮度和对比度不变的度量。

1.2 Log Gabor 小波

上述模型中, 通过局部能量计算相位一致性, 而局部能量的计算则需先对信号进行带通滤波, 以得到信号的局部频率特征。采用 Log Gabor 小波滤波器进行带通滤波, 这是因为 Log Gabor 函数不仅同 Gabor 函数一样都能取得时频测不准下限, 具有很好的方向选择性; 而且 Log Gabor 函数总是没有 DC 分量, 利用 Log Gabor 函数可以用较少的滤波器得到宽度合理、统一覆盖的谱, 能更真实地反映自然图像的频率。此外, Log Gabor 函数也与人类视觉系统的细胞响应在对数频率尺度下对称这一特性相符合^[6]。

在线性频率尺度上, Log Gabor 函数的传递函数形式为:

$$g(\omega) = e^{-\frac{[\log(\omega/\omega_0)]^2}{2[\log(\beta/\omega_0)]^2}} \quad (5)$$

式中: ω_0 为滤波器的中心频率。为保证滤波器的形状恒定, 对于不同的中心频率 ω_0 , β/ω_0 必须保持不变。例如, 当 β/ω_0 为 0.74 时, 大致相当于滤波器为 1 倍频的带宽, 为 0.55 时, 相当于 2 倍频, 为 0.41 时, 相当于 3 倍频^[7]。

1.3 利用 Log Gabor 小波修正 PC 函数

由公式(2)给出的相位一致性度量是相位偏差余弦的函数, 故其定位精度不高。Kovesi^[6]提出了一种改进的相位一致性度量:

$$PC_2(x) = \frac{\sum_n W(x) [A_n(x) \Delta \Phi_n(x) - T]}{\sum_n A_n(x) + \varepsilon} \quad (6)$$

式中: 局部能量函数 $E_n(x) = A_n(x) \Delta \Phi_n(x)$, 通过信号 $I(x)$ 与 Log Gabor 小波滤波器卷积获得。相位偏移函数 $\Delta \Phi(x)$ 定义为:

$$\Delta \Phi_n(x) = \cos(\varphi_n(x) - \bar{\varphi}(x)) - \left| \sin(\varphi_n(x) - \bar{\varphi}(x)) \right| \quad (7)$$

滤波器频带加权函数定义为:

$$W(x) = \frac{1}{1 + e^{\frac{1}{g(c-s(x))}}} \quad (8)$$

式中: $s(x) = \frac{1}{N} \left(\frac{\sum_n A_n(x)}{A_{\max}(x) + \varepsilon} \right)$; $A_{\max}(x)$ 为 x 处滤波器组

的最大响应幅值; c 为滤波器的频带阈值; g 用于控制转移函数的平滑性, 通常 c 取 0.4, g 取 10。 T 表示估计的噪声能量:

$$T = k A_0' \sum_n \frac{1}{\sqrt{m^n}} \quad (9)$$

式中: m 为相邻滤波器的响应振幅; k 为比例因子, 用于估计噪声响应的最大振幅, 通常取 2.0。

2 相位一致性图像

到目前为止, 文中的讨论还局限在一维信号分析中, 当分析二维图像时, 可采用一维分析方法通过一些调整, 再将得到的结果按某种方式组合起来。在此过程中必须解决以下问题: (1) 二维滤波器的形状; (2) 二维分析选用的方向数目; (3) 各个方向输出结果的组合方式。

2.1 二维滤波器的设计

前面讨论的一维滤波器可以通过扩展函数很容易地推广到二维, 该扩展函数由与其方向垂直的滤波器获得。这种二维滤波器是可分离的, 图像的卷积可以通过先与扩展函数进行一维卷积, 然后在垂直方向上与小波函数进行一维卷积的方式来实现。既然感兴趣的是相位信息, 那么在用扩展函数做卷积时不破坏图像的相位数据是很重要的。所以选择高斯函数作为扩展函数, 这是因为任何函数经过高斯平滑后只改变它的幅度部分, 而相位不受影响。因此, 相位一致性的所有特征都被保留下来。

2.2 滤波器的方向

为了检测所有方向上的特征, 所设计的滤波器组必须能一致地覆盖频域面。在频域面上, 滤波器是以二维高斯对称还是反对称的形式放置在原点取决于其空间对称性。二维小波的长宽比控制了它们的方向选择性, 这个比例会随着用来完成二维频谱一致覆盖的滤波器的方向数而改变。

在频域中构建二维滤波器的一个合理的方法是采用极坐标可分离的二维高斯滤波器。在径向方向上, 沿频率轴滤波器的设计与一维滤波器的设计方法一样(即: Log Gaussians 的中心频率和带宽成几何级数增加)。在角方向上, 滤波器有高斯截面, 标准差和滤波器的角间距的比例是大致恒定的, 确保了滤波器在空间域有个固定的长宽比。因此, 传递函数在

角方向的横截面为:

$$G(\theta)=e^{-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{2\sigma_\theta^2}} \quad (10)$$

式中: θ_0 是滤波器的方向角; σ_θ 是 高 斯 扩 展 函 数 在 角 方 向 的 标 准 偏 差。滤 波 器 之 间 的 方 向 间 距 必 须 是 基 本 固 定 的 比 值, 以 确 保 能 够 一 致 覆 盖 各 个 方 向 的 频 谱。研 究 发 现, 当 一 个 滤 波 器 的 方 向 间 隔 设 定 为 30° 时, 它 能 够 在 满 足 覆 盖 整 个 频 域 面 的 条 件 下 选 取 最 少 方 向 的 滤 波 器。因 为 选 择 更 多 的 滤 波 器 方 向 并 不 能 显 著 地 改 善 结 果, 所 以 选 择 了 一 组 在 频 率 面 具 有 玫 瑰 型 重 叠 的 二 维 极 坐 标 可 分 高 斯 滤 波 器 组。

2.3 各方向输出结果的组合方式

在考虑各个方向输出结果的组合方式时, 非常重要的一点就是要确保所有可能方向上的特征都能够得到相同的处理, 并且对于所有的节点特征(比如角点和“T”型节点)也都能够处理。事实上, 笔者希望避免对任何可能遇到的二维形式的特征作假设。另一个需要注意的问题是要在计算完各个方向的能量和之后再对相位一致性的能量进行归一化。因为希望得到的最终结果是一个加权的归一化值, 是对各个方向的值按照各自能量的比例进行加权的结果。

文中采用的方法如下: 首先计算图像中每个位置 x 上的能量 $E(x)$, 补偿各个方向上噪声的影响, 采用加权函数进行频率扩展, 得到所有方向的能量和; 再用这个能量和除以该位置 x 处所有尺度、所有方向对应小波响应幅值的和, 得到计算二维相位一致性的公式:

$$PC_2(x)=\frac{\sum_o \sum_n W_o(x)[A_{no}(x)\Delta\Phi_{no}(x)-T_o]}{\sum_o \sum_n A_{no}(x)+\varepsilon} \quad (11)$$

式中: o 代表方向的索引。在上式中, 噪声补偿是在各个方向上独立进行的^[5]。

文中称对原始图像进行相位一致性计算后得到的图像为相位一致性图像。图 3 给出了一段模拟图像亮度变化的序列图像中 3 幅同一场景不同亮度的灰度图像及其相位一致性图像。由图中不难看出, 虽然原始图像的亮度和对比度发生了很大的变化, 但其相位一致性图像几乎没有变化, 即: 相位一致性图像对图像亮度和对比度具有很好的鲁棒性。



图 3 同一场景不同亮度的原始图像及其相位一致性图像
Fig.3 Original and phase congruency image of the same scene with different brightness

3 基于相位一致性度量的相关跟踪方法

利用相位一致性图像对亮度和对比度变化不敏感的特点, 提出了一种对亮度变化鲁棒的相关跟踪方法。即通过对原始图像进行相位一致性计算得到相位一致性图像, 再对此图像进行相关跟踪。为提高算法的实时性, 采用了 MAD 相关跟踪算法^[1]。该跟踪算法的基本原理如下。

设 $T(m, n)(m \in [1, M], n \in [1, N])$, 为目标模板, $F(i, j)(i \in [1, I], j \in [1, J])$ 为实时图像, 则利用公式(12)可计算目标模板与实时图像的平均绝对差值:

$$MAD(i, j)=\frac{1}{M \times N} \sum_{m=-M/2}^{M/2} \sum_{n=-N/2}^{N/2} |T(m, n)-F(m+i, n+j)| \quad (12)$$

当 (i, j) 遍历整幅图像后即可得到一相关系数矩阵, 其最小值对应的像素点即为最佳匹配点(如图 4 所示的谷底)。



图 4 相关曲面

Fig.4 Graph of correlation coefficient

4 试验结果与分析

文中还通过计算“跟踪误差”的方式从另一个角度来验证基于相位一致性的相关跟踪算法在提高算法对图像亮度和对比度的适应能力方面所取得的显著成绩。测试图像仍为图 3 所示的序列图像,图 5 为该序列图像的亮度变化曲线。选择图 3 中的同一个目标作为目标模板,在一个固定的包含目标区域的窗口中进行相关运算,设通过相关运算得到的目标坐标为 (x,y) ,目标的已知坐标为 (x_0,y_0) ,则跟踪误差可表示为:

$$e = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \quad (13)$$

图 5 为 MAD、ZMAD 算法对原图像及其相位一致性图像进行跟踪试验的跟踪误差曲线。可以看出, MAD、ZMAD 对相位一致性图像的跟踪误差曲线几乎重合在一起,且跟踪误差基本为零,只在第 68~98 帧之间有很小的波动,说明该方法对亮度变化和对比度变化具有很好的鲁棒性。而 MAD、ZMAD 算法对原图像的跟踪误差随着图像亮度的变化急剧变化,说明这两种跟踪算法对亮度变化很敏感,由图中还可以看出, MAD 对原图像的跟踪误差曲线在第 19 帧附近发生突变,而 ZMAD 对原图像的跟踪误差曲线在第 20 帧附近发生突变,这个结果与图 3 的试验结果是吻合的。

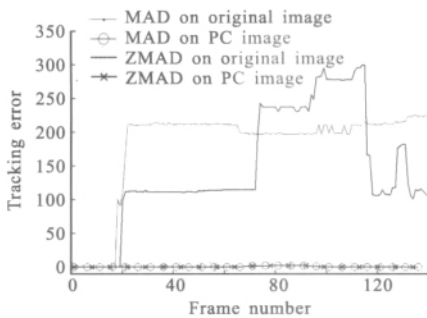


图 5 3 种相关跟踪算法的跟踪误差曲线

Fig.5 Tracking error curves of the proposed algorithm compared with three other correlation tracking algorithms

图 6 是采用传统的 MAD、ZMAD 算法以及文中算法对一组模拟光照变化的序列图像进行跟踪试验的试验结果。可以看出, MAD 算法在第 19 帧跟踪点偏离目标, ZMAD 算法在第 23 帧跟踪点偏离目标,

而文中算法在整个光照变化过程中都可以保持对目标的稳定跟踪,这个结果是与图 5 的跟踪误差曲线相吻合的。

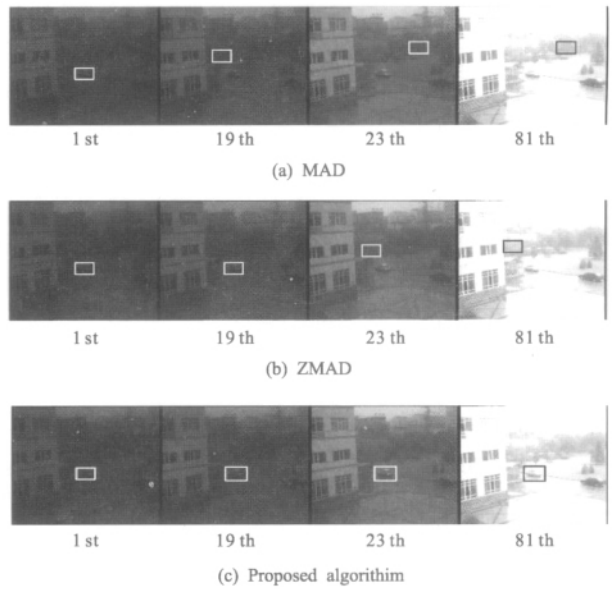


图 6 两种传统相关跟踪算法与文中算法的跟踪效果比较
Fig.6 Effectivity comparison between the proposed and two traditional correlation tracking algorithms

图 7 是利用文中方法对一组红外图像序列的部分跟踪结果,该序列图像包含 3000 帧实地拍摄的由远及近的红外图像,不但图像亮度发生了变化,而且图像尺寸也发生了一定的变化。试验从第 1 帧开始跟踪,一直到图像序列的最后一帧,都能保持对目标的稳定跟踪。

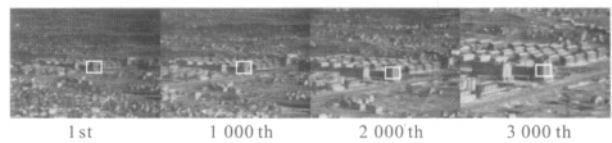


图 7 文中方法对红外图像序列的跟踪结果
Fig.7 Tracking result of the proposed algorithm in infrared image sequence

5 结论

文中利用图像相位一致性特征对光照不敏感的特点构造了一种对亮度变化鲁棒的相关跟踪方法。试验结果表明,该算法对图像亮度变化具有很强的适应能力。因为相位一致性检测和 MAD 相关跟踪算法都可以用硬件实时实现,所以该算法很适合用于工程上对实时性要求较高的光电火控、成像制导等领域。值

得注意的是,由于该算法只利用了图像相位一致性特征对图像亮度和对比度不敏感的特点,所以只对传统相关跟踪算法的亮度适应能力有很大的改善,而对目标仿射变换的适应能力与 MAD 算法相当。

参考文献:

- [1] Wang Yan, Wang Xiangjun. Fast correlation tracking algorithm in low contrast conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 89-92. (in Chinese)
王研, 王向军. 低对比度条件下的快速相关匹配算法[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 89-92.
- [2] Zeng Luan, Tan Jiubin, Song Shengli, et al. Improved tracking algorithm for moving target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 556-560. (in Chinese)
曾峦, 谭久彬, 宋胜利, 等. 一种改进的运动目标跟踪算法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 556-560.
- [3] Hui Ying, Luo Haibo. Phase congruency based on target segmentation and tracking method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 984-987. (in Chinese)
惠颖, 罗海波. 基于相位一致性检测的目标分割和跟踪方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 984-987.
- [4] Morrone M C, Owens R A. Feature detection from local energy[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1987, 6: 303-313.
- [5] Venkatesh S, Owens R. An energy feature detection scheme [C]// International Conference on Image Processing, 1989, 553-557.
- [6] Kovess P. Invariant image measures of image features from phase information [D]. Australia: The University of Western Australia, 1996.
- [7] Xiao Zhitao, Yu Ming, LI Qiang, et al. Log Gabor wavelet performance analysis and application in phase congruency [J]. *Journal of Tianjin University*, 2003, 36(4): 443-446. (in Chinese)
肖志涛, 于明, 李锵, 等. Log Gabor 小波性能分析及其在相位一致性中应用[J]. 天津大学学报, 2003, 36(4): 443-446.

下期预览

面向图像复原的广义岭估计模式波前重构

陈波¹, 程承旗¹, 濮国梁¹, 耿则勋², 杨阳²

(1. 北京大学 工学院, 北京 100871; 2. 信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 为了提高自适应光学图像复原效果, 提出了一种面向图像复原的广义岭估计 Zernike 模式波前重构算法。首先按照时间换精度的思路, 把广义岭估计引入自适应光学波前重构算法, 改善最小二乘估计的奇异性, 抑制波前测量误差的放大。然后引入迭代计算提高方程的解算精度, 进一步提高 PSF 重建质量。最后利用广义岭估计重建的 PSF 对降质图像进行复原实验验证 PSF 的重建质量。实验结果证明: 广义岭估计 PSF 的复原效果高于最小二乘估计 PSF 约 15%, 更接近成像系统的光学衍射极, 复原计算迭代次数也减少了 35%。新算法重构的 PSF 在图像复原中有更好的图像重建效果。