

# 基于相关系数的相关跟踪算法研究

朱永松 国澄明

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘要** 提出了一种以相关系数作为相似度量准则的相关跟踪算法, 克服了传统的以点对点乘累加作为相似度量准则的相关跟踪算法跟踪精度低的缺点。给出了相似性度量的快速实现方法, 解决了目标跟踪的实时性要求。同时, 还提出了一种新的模板更新策略, 使得跟踪算法对环境的适应能力和稳定性得到较大的提高。此外, 提出了跟踪失败判决策略, 解决了因目标暂时消失或环境突然变化, 如瞬间明暗变化, 造成的成像质量差而引起的跟踪失败。试验结果表明, 该相关跟踪算法减少了相关跟踪的复杂度, 具有跟踪精度高和速度快的特点。目前, 该算法已经应用在实时目标跟踪系统中。

**关键词** 目标跟踪 相关系数 相关跟踪 模板更新

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2004)08-0963-05

## Research of Correlation Tracking Algorithm Based on Correlation Coefficient

ZHU Yong-song, GUO Cheng-ming

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** This paper presents a correlation tracking algorithm based on correlation coefficient, which overcomes the disadvantages of traditional correlation tracking based on point-to-point multiple with accumulation and has the advantages of good accuracy and high stability. At the same time, many measures are put forward to improve the speed of the algorithm, which resolve the requirement of real-time of object tracking. And during the object-tracking, there may be many changes in a sequence of the object images, therefore, a reasonable strategy of template updating will be the key of the object-tracking problem. On the basis of the similarity measurement and template buffers, a suitable template updating strategy is given, which effectively decreases the accumulation of the object-tracking error, and greatly improves the stability of the object-tracking. The failure judgement of object-tracking presented effectively resolves the transitory failure of tracking, caused by sudden changes, such as the changes between the dark and the bright, or the tracked object is covered temporarily. The experiments show the solution decreases the complex of correlation tracking, and has the advantages of good accuracy and high speed as well. Now this algorithm has been applied to real-time object-tracking system.

**Keywords** object-tracking, correlation coefficient, correlation tracking, template updating

### 1 引言

相关跟踪是基于图像相似性度量, 在现场获取的实时图像中寻找最接近目标模板图像区域的一种跟踪方式。它无需对图像进行分割和特征提取处理, 只在原始图像数据上进行运算, 从而保留了图像的

全部信息, 在许多复杂环境场景中这是一种切实可行的跟踪测量方法。然而, 跟踪是一个动态过程。随着目标与传感器在距离、高度、方位、姿态、环境条件等因素的变化, 目标图像的尺寸、位置、方向和形态也会发生变化, 场景中每次获取的图像都只是随机过程中的一个样本函数, 因此, 跟踪过程中对两幅有变化的图像去求相似度是一个复杂的问题。在相关

跟踪技术研究中,所要解决的是目标图像存在二维和三维变化时目标图像相似性度量和精确定位问题,有效地评估相关跟踪的置信度问题,以及灵活地更新目标模板内容等问题。相关跟踪技术研究在国民经济和现代化发展中有着重要的应用前景和理论意义<sup>[1,2]</sup>。

传统的相关跟踪算法采用点对点乘累加作为相似性判定准则,跟踪精度不高,常造成目标漂移。本文提出的基于相关系数的相关跟踪算法采用相关系数作为相似性度量准则。相关系数是判定图像相似性的一种较好的准则,在传统相关算法中之所以不采用它,是因为它的运算量很大。本文采取了许多措施,解决了由于采用相关系数作为度量准则所带来运算量大的瓶颈问题。而且,本文提出的目标模板更新策略,使得跟踪误差累积大为减少,目标跟踪精度大大提高。此外,本文提出的跟踪失败判决策略解决了因目标暂时消失或环境突然变化,如瞬间明暗变化,造成的成像质量差而引起的跟踪失败;本文根据目标模板在目标图像中的相关系数分布特点提出的快速算法,比不采用快速算法前运算速度至少提高了3~5倍。

## 2 基于相关系数的相似性度量

相关系数定义为

$$R(u, v) = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (f_{j+u, k+v} - \bar{f})(g_{j, k} - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (f_{j+u, k+v} - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (g_{j, k} - \bar{g})^2}}$$

$$\bar{f} = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N f_{j, k}, \quad \bar{g} = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N g_{j, k}$$

式中,  $f$  为目标图像,  $g$  为目标模板,  $\bar{f}$  为目标图像均值,  $\bar{g}$  为目标模板均值,  $MN$  为模板大小。

相关系数满足  $|R(u, v)| \leq 1$ , 在  $[-1, 1]$  绝对尺度范围之间衡量两者的相似性。相关系数刻划了两者之间的近似程度的线性关系。一般说来,  $R(u, v)$  越接近 1, 两者越近似的有线性关系<sup>[3]</sup>。

目标跟踪中,若目标模板和目标图像中含有未知偏置量,则可采用去均值后的图像进行相似度量,从而可以充分地利用图像中变化部分的信息,使函数  $R(u, v)$  的峰值尽量锐化。同时,在图像灰度比例刻度未知的条件下,采用相关系数算法可以补偿比例刻度的影响。此外,相关系数方法具有固有的抑

制噪声的能力,并且当相对的缩放,旋转和畸变差异不大时,也能够得到满意的匹配。虽然相关系数作为目标跟踪的相似性度量有这么多优点,但需要很大的运算量,正是因为这一点使得它在实时目标跟踪领域不能得到广泛的应用。为此,针对这个缺点,提出了许多改进措施,使得求解相关系数所需的运算量大幅度减小,从而满足目标跟踪系统的实时性要求。

目标跟踪过程中拍摄到的图像序列中,连续两帧图像之间的平移、旋转和伸缩都比较小,因此图像具有很强的相似性,可采用相关系数作为相似性度量。由于相关系数得到的值为归一化值,介于  $-1$  到  $+1$  之间,这个值反映了两者的相似程度,可作为判断跟踪是否成功的判定依据。这也是优越于传统相关跟踪算法所采用的其他相似性度量准则的地方。上述的相关系数公式,化简后为<sup>[4]</sup>

$$R(u, v) = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N f_{j+u, k+v} \times g_{j, k} - MN \bar{f} \times \bar{g}}{\sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N f_{j+u, k+v}^2 - MN \bar{f}^2} \sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N g_{j, k}^2 - MN \bar{g}^2}} \quad (1)$$

在相关系数作为相似性度量性能的前提下,对式(1)采取以下一些措施,实现相关系数的近似计算。

(1) 每次跟踪开始时,先计算实时图的均值  $\bar{g}$  和  $\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N g_{j, k}^2 - MN \bar{g}^2$ 。这样在求解相关系数时,就用不着再计算这两项了。

(2) 均值公式的近似计算:如果根据均值公式  $\bar{g} = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N g_{j, k}$  直接计算,则完成一次均值运算需要  $(MN-1)$  次加法运算和一次除法运算。通常 CPU 内部没有除法单元,完成一次除法运算需要耗费大量时钟周期。实际上一次整数除法运算常常可以近似为移位操作和加法操作,如目标模板大小取  $13 \times 13$ , 则  $1/MN = 1/(13 \times 13) \approx 1/256 + 1/512$ , 误差仅为  $0.000\ 057\ 784$ 。这样如果一个数要被 169 整除,就可以化简为两次移位运算和一次加法运算,这是因为除 256 相当于右移 8 位,除 512 相当于右移 9 位。由于 DSP 内部有硬件移位器,移位操作可以和加法操作或取数操作在同一指令周期执行,所以并不多占执行时间。因此,化简后的均值计算所花费的运算量可近似为  $MN$  次加法操作。

(3) 当  $R(u, v) < 0$  时,目标图像中以点  $(u, v)$  为

中心的区域不可能存在跟踪点,因此只要式(1)的分子小于零,就可以将该点所在的区域排除,从而直接转到下一点计算,而不需要再计算分母了。这样一来,相当于只要  $MN$  次乘累加和  $MN$  次加法就可以完成一次相关系数的计算了。

(4)若  $R(u,v)$  的分子大于零时,对分子和分母同时平方,就不需要计算根号了。因为开根号需要花费大量的时钟周期。因此分母的运算量近似为  $MN$  次乘累加运算。

(5)还需要一个浮点除法才能最后得到  $R(u,v)$  的值。浮点除法的运算量要大于整数除法的运算量。从措施3可知,当分子小于0时,就不需要计算分母。这样一来,得到的  $R(u,v)$  值始终保持在0和1之间。把分子乘以100,同时分母乘以一定的倍数(介于0到100之间)与分子乘100之后的结果进行比较,来粗略估计  $R(u,v)$  值,从而将浮点除法转为乘法和比较,大大减少了运算量。

经过以上化简后,完成一次相关系数,所需的运算量最小为  $MN$  次乘累加和  $MN$  次加法,最大也不过  $2MN$  次乘累加和  $MN$  次加法。

### 3 目标模板更新策略

在对目标进行跟踪的过程中,目标模板维系了整个跟踪的动态过程。在目标跟踪过程中,实时拍摄到的目标在不断地变化,因此实际图像必然存在着变形、噪声、遮挡等等变化。对模板合理地进行更新是相关跟踪的关键。选择合适的模板更新策略,可以在一定程度上克服这些变化对跟踪效果的影响。

现有的目标模板更新策略,大体上可归结为三大类。第1类,单纯地将当前目标图像的最佳匹配位置处的图像作为目标模板进行下一帧图像的匹配;第2类,按照一个固定的权值对当前目标图像最佳匹配位置的图像和旧模板加权来生成新模板;第3类,根据当前帧跟踪的跟踪质量产生一个权值,对当前目标图像最佳匹配位置的图像和旧模板加权来产生新模板<sup>[2]</sup>。前两类的更新策略没有考虑到跟踪效果的好坏,显然是不合理的。因为若前一帧图像质量较差,或者前一帧跟踪质量不佳,势必影响后续帧的跟踪,造成跟踪误差累积,从而导致跟踪失败,或者跟踪错误。第3类的更新策略在碰到上述情况时,同样也会或多或少给当前更新的目标模板带来误差。

由此可见,上述3种更新策略都无法使当前更

新的目标模板处于最佳状态。为此提出了一种新的模板更新策略,以解决这个问题。

首先,本文采用的相似度量准则——相关系数,直接反映了目标跟踪的质量,可以作为度量目标模板和当前帧目标图像最佳匹配位置的匹配度。这个值用于决定当前帧是否进行目标模板更新。因为,如果当前帧跟踪质量很差或者跟踪失败的话,再用当前帧的信息来产生新的模板,没有任何意义,只会给后续的跟踪带来不良影响,甚至导致后续的跟踪失败。

如果可以进行目标模板更新的话,那么将用上面得到的匹配度值作为权值,对旧模板和目标图像最佳匹配位置的图像进行加权,获得新模板。加权方法如下:

$$M_{\text{new}} = aM_{\text{old}} + (1-a)M_{\text{curr}}$$

其中,  $M_{\text{new}}$  是新模板,  $M_{\text{old}}$  是当前使用的旧模板,而  $M_{\text{curr}}$  是目标图像中最佳匹配位置的图像,这里的  $a$  为加权的权值即相关系数值。此时得到的新目标模板并不一定作为下一帧跟踪的目标模板。进一步,还需要更新目标模板缓冲区,并从目标模板缓冲区中取出最佳的目标模板作为下一帧跟踪的目标模板。

所谓目标模板缓冲区,它在内存中开辟,用于存放最近几帧中跟踪较好的目标模板。将上面产生的新目标模板取代目标模板缓冲区中最旧的目标模板,并保存相应的相关系数值,然后选出目标模板缓冲区中相关系数值最大的目标模板作为下一帧跟踪的目标模板。这样一来,既保证了目标模板永远是最好的,又保证了目标模板是新的。

实践证明:采用这种目标模板更新策略,不仅有效地抑制了跟踪误差的累积,以及跟踪目标的漂移,而且即使跟踪过程中有些帧跟踪得不好,下一帧往往又能回到正确的跟踪位置。

### 4 跟踪失败判决

跟踪过程中,由于某种原因,如别的物体遮挡,使跟踪目标瞬间丢失,或者由于瞬间的明暗变化而造成的成像质量差,而使得当前帧的跟踪失败。这种失败往往可能是虚假的目标跟踪失败,在后续的拍摄目标图像中,跟踪目标往往会重新出现,或者成像质量变好时又会重新得到正确的跟踪结果。所以只有当跟踪失败连续超过一定的数目时,才真正判决跟踪失败。

实践证明,采用这种跟踪失败判决,解决了目标虚假丢失或暂时丢失而造成的跟踪失败,使得正确的跟踪能够继续进行。

## 5 相关跟踪的快速算法

如果将目标模板与目标图像上的所有点都做相关系数,得到相关系数值分布图如图1所示。经过大量的实验,发现这个分布图具有以下几个特点:

(1) 相关系数值的分布具有区域性,即在某些区域会出现相关峰,其中有一个特别突出的相关峰,这个峰的峰值比其他相关峰的峰值大,这个峰就是最后的跟踪点位置。

(2) 相关峰有正相关峰和负相关峰。

(3) 除相关峰外,绝大部分的相关系数值都较小。

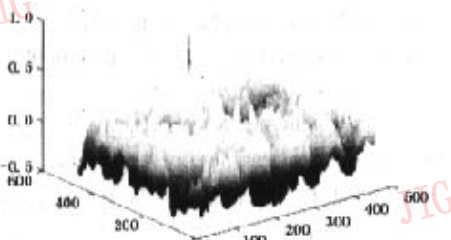


图1 相关系数值分布图

由于正确的跟踪位置位于最大相关峰处,因此算法的任务是找出这个最大相关峰。如果在目标图像中逐点寻找,固然能找到它,但却以巨大的计算量为代价。由相关系数值分布特点可知,相关峰的分布既有区域性也有正负性,邻近正相关峰区域的值较大,而其他区域的值较小。因此算法的第一步先确定出最大相关峰可能位于哪个区域,然后从这个区域中找出最大相关峰所在的点。

如图2所示,搜索过程采用十字交叉快速搜索法。搜索步长由上次得到的相关系数值决定,相关系数数值大的点,搜索步长小,反之,搜索步长大。首先计算目标图像中心点的相关系数值,再以该点为中心,以与相关系数值相应的搜索步长为半径,分别计算其十字方向上的4个点,根据这4个点的相关系数值的大小,决定下次搜索方向的优先级。在下次搜索中,如果第1个计算的点的相关值大于上一次计算

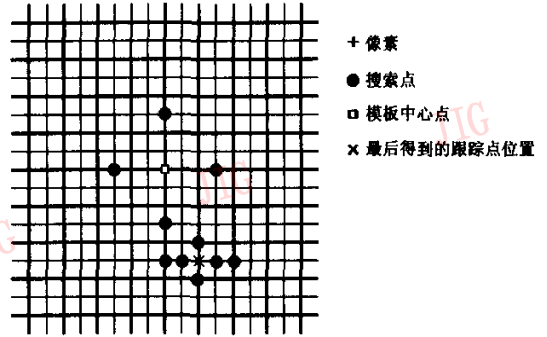


图2 十字交叉快速搜索示意图

的点的相关值,则这次搜索完毕,进入下次搜索,否则根据方向优先级的顺序,计算另一个方向的值;如果4个方向的值都小于上一次搜索得到的值,搜索步长加倍,重新搜索,如果4个方向的值还是小于上一次搜索得到的值,则上次搜索点,即为最后结果,此时再根据相关系数值的大小,决定这次跟踪成功与否,如果成功则更新目标模板缓冲区,跟踪失败次数清零;否则跟踪失败次数累加一,判断失败次数是否超过失败次数门限,若超过,则总的跟踪失败。

这种利用相关系数值的分布特点,快速地实现了目标的跟踪。试验证明,采用快速算法后,完成一次跟踪过程,最多只需要计算23次左右的相关系数计算,有时甚至只需要计算5次左右的相关系数计算,运算效率大大提高。

## 6 相关跟踪的实现流程

相关跟踪算法的实现流程如图3所示。在开始跟踪之前,需要从采集到的原始图中指定待跟踪的目标,并提取出目标模板,更新目标模板缓冲区,然后就进入了跟踪过程。采集图像,根据上次跟踪结果,提取目标图像(如果是第一次跟踪,则以待跟踪目标所在的位置为中心提取目标图像)。之所以要提取目标图像,是因为原始图像很大,而实际系统的存储空间可能有限。从目标模板缓冲区中选择相关系数值最大的目标模板作为当前帧的目标模板。开始跟踪,最后得到跟踪点和该跟踪点所对应的相关系数值。根据相关系数值判定本次跟踪是否成功。如果成功,则将跟踪失败次数清零;不然,跟踪失败次数累加1,再判断跟踪失败次数是否超过跟踪失败次数门限,若超出,跟踪失败,退出跟踪状态,否则继续跟踪。

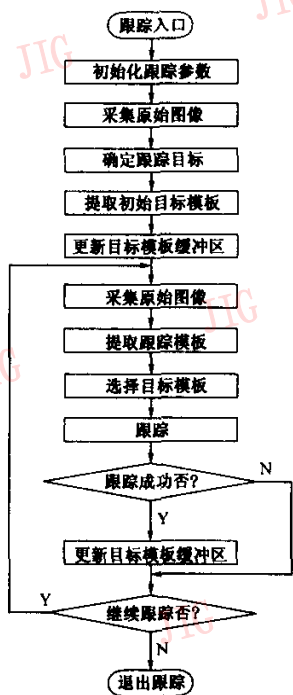


图 3 相关跟踪算法流程

## 7 结 论

当  $R(u, v) < 0$  时, 大约只需要  $MN$  次乘累加操作和  $MN$  次加法操作就可以完成一次相关系数; 当  $R(u, v) > 0$  时, 完成一次相关系数大约需要  $2MN$  次乘累加操作和  $MN$  次加法操作。而如果采用点对点相应相乘相关法, 当窗口大小相同时, 计算一次相关需要  $MN$  次乘累加操作。因此就计算一次相关而言, 前者所需的运算量大约是后者的 2~3 倍。但是如果就一次跟踪过程而言, 在所耗费的运算量上后者未必比前者有优势, 这是因为采取快速算法后, 并不需要对窗口中的所有点都分别进行一次相关运算, 一般完成一次跟踪最多不会超过计算 23 个相关系数, 有时只需计算 5 个相关系数; 而采用点对点对应相乘的相关法, 如果目标可能运动 15 个像素, 那么它就可能需要计算 225 次相关, 而如果目标运动超过 15 个像素, 由于这种判决取的是相关值最小的点为最后的跟踪点, 因此造成判决失误。而采用本算法目标运动与计算相关系数的次数的关系并不是很密切。

总之, 通过对相似性度量公式的化简, 以及采用十字交叉快速搜索法进行搜索跟踪点, 大大减少了

算法的运算量, 克服了传统的采用相关系数作为相似性度量的目标跟踪算法运算量大的缺点, 而又不失去其跟踪精度高的优点, 从而可满足目标跟踪系统的实时性要求。本文提出的目标模板更新策略, 使得跟踪误差累积大为减少, 目标跟踪精度大大提高。此外, 本文提出的跟踪失败判决策略解决了因目标暂时消失或环境突然变化, 如瞬间明暗变化, 造成的成像质量差而引起的跟踪失败。目前此算法已经在实时目标跟踪系统中应用。应用结果表明: 采用这种算法, 运算速度快, 跟踪精度高, 能满足目标跟踪系统的实时性要求。

## 参 考 文 献

- 1 杨宜禾, 周维真. 成像跟踪技术导论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992: 71~73.
- 2 任仙怡, 廖云海, 张桂林等. 一种新的相关跟踪方法研究[J]. 中国图象图形学报(A版), 2002, 7(6): 553~557.
- 3 刘嘉焜. 应用随机过程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 12~13.
- 4 Sun Changming. Fast stereo matching using rectangular subregioning and 3D maximum-surface techniques [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1/2/3): 99~117.



朱永松 1977年生。现为天津大学信号与信息处理专业博士生。主要研究领域为实时图像处理、多媒体技术及DSP开发与应用。



国澄明 1943年生。教授、博士生导师。主要研究领域为实时图像处理、数字电视与高清晰度电视、多媒体技术及DSP开发与应用等。