

基于四参数仿射模型的频域运动估计技术

王 栋,王 伟,许晓鸣

(上海交通大学电信学院智能控制实验室,上海 200030)

摘 要: 仿射模型能比块平移模型更好地拟合真实运动场景,但待解的参数也相应地增加了.基于梯度的搜索算法在高阶问题中存在局部极小和收敛速度的缺陷,基于 Hough 变换和 Gabor 滤波等的变换域方法同样存在运算量的问题,影响了仿射模型在实时运动估计中的应用.传统的相位相关法仅利用了傅氏频谱的相位信息求解块平移而未利用频谱的幅值特性.本文通过对仿射运动场域特性的分析,将仿射模型的线性项和平移项解耦,结合频谱的幅值特性和相位特性在频率域内求解仿射运动参数.实验结果表明该算法在运算量增加不大的情况下运动估计效果得到明显改善.

关键词: 四参数仿射模型; 频率域运动估计; 相位相关; 幅值相关

中图分类号: TP335 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 01-0131-04

Four Parameter Model Based Motion Estimation in Frequency Domain

WANG Dong, WANG Wei, XU Xiao-ming

(The Institute of Intelligent Control, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Although affine model has more ability to describe the motion field, it's very difficult to be used for its high computational complexity. In this paper, a novel fast algorithm is proposed which is derived from traditional phase-correlation motion estimation method. In FFT frequency domain, the phase shift indicates the translation components of affine motion and the spectrum magnitude indicates the linear components of affine motion. So we utilize this FFT spectrum characteristic to separate the affine parameters estimation to translation components and linear components. The computational complexity is decreased dramatically. For improving the robust of linear component estimation, we use an affine-invariant feature to calculate the correlative points between magnitude spectrums. Simulation indicates that our method can improve the estimation result greatly with sustainable computational complexity.

Key words: affine motion; frequency domain motion estimation; phase correlation; magnitude correlation

1 引言

运动估计作为图像序列处理的基础技术,在诸如视频编码、对象识别和跟踪、帧场率变换、超分辨率等场合都有广泛的应用.现有的运动估计算法虽然种类繁多,但其设计都围绕三个基本命题展开:如何选择运动场模型、匹配准则和搜索策略.

传统的2D是在运动估计采用平动来建模运动场.这样做虽然能简化匹配计算,但此模型只在小区域内有效,大区域的平动假设会造成块效应,而另踞方面小区域的运动估计又容易受到干扰信号和孔径效应的影响,使运动估计的鲁棒性不够.为此,近年来出现了一些基于仿射模型的运动估计算法,采用具有丰富描述参数的仿射模型来建模运动场,提高了估计结果的准确性、可靠性.如线性回归法^[1]将问题转化为多参数线性回归问题,选用空间域的帧差信号最小化为其匹配准则,以基于梯度的搜索策略求得最佳解,其计算量非常可观;通用区域匹配法^[2]以区域间方差和最小为准则,在全空间或部分空间搜索最佳特征点匹配位置以求得仿射参数.上述

的空间域仿射模型估算都有算法量大的缺点,原因在于在空间域中仿射参数不能有效地隔离,使求解维数过大.为此提出了变换域求解方案,如 Hough 变换方法^[3]将原问题转换到随机集束空间,并将原6参数仿射问题转化为两个3参数仿射问题来求解,减少了运算量,但此算法建立诸如块匹配等方法预先算出的光流场结果之上;Gabor 滤波器法采用 Gabor 滤波器组对图像进行局部分析,通过滤波输出的二阶距特征计算仿射参数.为了保证算法的精度,此 Gabor 滤波器组将保持较大的规模,增加了计算复杂性.基于付氏变换域的相位相关法是图像块平动估计的成熟算法,R. N. Bracewell 等^[4]在研究中发现频谱域中不仅相位与图像位移相关,而且其频谱密度分布与仿射模型的线性项相对应,由此将付氏域运动估计的适用范围扩展到了仿射模型.

在付氏域中进行仿射参数估计的优点是通过平动与线性变换两个部分的分离将原始问题降维,从而减少了运算复杂度,同时由于频域相关运算中的归一化处理,频谱域内的估计结果对光照变化不敏感^[5],与空间域相比具有更强的鲁棒性.

频域仿射参数估计的难点集中在线性项估计上。De Castro 等^[6]将仿射模型简化为由刚体旋转、缩放、平移的四参数模式,采用频域极坐标域下的角度搜索方法求解旋转因子,算法量依然很大。B. S. Reddy^[7]等将求解空间转换到对数极坐标,改进了此算法。L. Luccese^[8]等将频谱按角度分割,以块内的局部最大值作为仿射不变量,通过其对应关系求解仿射参数,这种基于局部峰值匹配的算法虽然运算简单,但在峰值不明显或多峰值的场合此算法将失效。为此,我们采用了两阶段求解法,第一步以频谱图像的二阶距作为仿射不变量进行频谱密度图对称分割,通过半平面的重心匹配来求解仿射线性参数;第二步由经线性参数补偿后的频谱进行平移参数的相位相关估计。与前述方法相比,由于充分利用了数据的统计特性,整个算法的稳定性得以提高。

2 四参数仿射模型及其频域分析

在仿射模型决定的运动场中,连续两场图像中的像素点位置满足如下对应关系:

$$x_2 = Ax_1 + d \quad (1)$$

$$I_1(x_1) = I_2(x_2) = I_2(Ax_1 + d) \quad (2)$$

式中 x_1 、 x_2 分别为图像 I_1 、 I_2 中的像素位置, $A_{2 \times 2}$ 为仿射模型的线性项, d 为仿射模型的平移项。在二维图像中,小范围的区域的运动可以看作平面刚体的转动和平动以及镜头拉动造成的缩放,因此通用的六参数仿射模型 (a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} , d_1 , d_2) 可以简化为四参数模型 (k , θ , d_1 , d_2), 此时 (d_1 , d_2) 为平动量, k 为缩放系数, θ 为旋转角, 线性项 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} k \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & k \cos(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ -k_2 & k_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(2)两边取付立叶变换可以得到前后两帧图像间的频域关系式:

$$I_1(A^T \omega) = e^{j\omega d} I_2(\omega) \quad (4)$$

式中 $|A|$ 为 A 的行列式值, A^T 为 A 的转置, ω 为频率域的坐标向量。观察此式可以看到频率域坐标轴经过线性变换 A^T 校准后, I_1 和 I_2 之间将只存在相位偏移 d 。研究 I_1 、 I_2 的频谱密度:

$$|I_1(A^T \omega)| = \frac{|I_2(\omega)|}{|A|} \quad (5)$$

在给定线性项 A 的情况下 $|A|$ 为常数, 式(5)表明两图像间的频谱密度存在关系为 A^T 的一一对应, 从图1可以观察到频谱域内这样的对应关系, 我们称之为幅值相关。

由此, 可以将频率域的仿射运动参数估算分为如下两步进行:

Step1: 由频谱密度 $|I_1|$ 、 $|I_2|$ 的幅值相关性, 估计仿射方程中的线性项 A ;

Step2: 由 A 进行频谱校准 $I_1(\omega) = I_1(A^T \omega)$, 由 $I_1(A^T \omega)$ 与 $I_2(\omega)$ 进行相位相关求解 d 。

从这个过程可以看到, 频域的仿射参数估计实质是利用了频谱密度图的平移不变性将平动与线性项分离, 从而降低

了参数估计的维数。

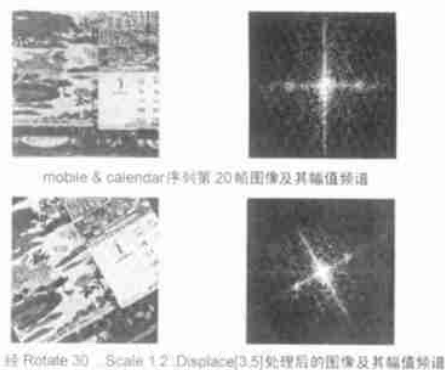


图1 仿射变换图像的频谱密度图

3 频域仿射运动估计算法

上述频域仿射估计过程的难点在于 Step1 中通过幅值相关性求解线性项 A 。由式(3)决定的线性项 A 具有 (k , θ) 两个参数, 需要联立两个方程求解。如果能够在频谱密度图中找到一个具有线性变换不变性的特征点, 那么由两特征点的位置就可以求解线性项 A 了。可以证明频谱图中对应区域的形心就具有线性变换不变性。

定理1 若频谱图中 μ_1 与 μ_2 为两对应区域, 且满足线性关系 A , 即 $\forall x_1 \in \mu_1, Ax_1 \in \mu_2, \forall x_2 \in \mu_2, A^{-1}x_2 \in \mu_1$, 则形心也满足线性关系, 即 $\mu_1 = A\mu_2$ 。

$$\mu_1 = \frac{\int_{\mu_1} I_1(\omega) |d\omega|}{\int_{\mu_1} |I_1(\omega)| |d\omega|},$$

$$\mu_2 = \frac{\int_{\mu_2} I_2(\omega) |d\omega|}{\int_{\mu_2} |I_2(\omega)| |d\omega|}.$$

$$\text{证明: } \mu_1 = \frac{\int_{\mu_1} I_1(\omega) |d\omega|}{\int_{\mu_1} |I_1(\omega)| |d\omega|}$$

$$\mu_1 = \frac{\int_{\mu_1} |A| |I_1(A\omega)| |dA\omega|}{\int_{\mu_1} |I_1(A\omega)| |dA\omega|}$$

$$= \frac{\int_{\mu_2} |A| |I_2(\omega)| |d\omega|}{\int_{\mu_2} |I_2(\omega)| |d\omega|} = A\mu_2$$

又由式(5)代入得

$$\mu_1 = \frac{|A| \int_{\mu_2} |I_2(\omega)| |d\omega|}{\int_{\mu_2} |I_2(\omega)| |d\omega|} = A\mu_2 \quad (6)$$

证毕

由于二维离散付立叶变换是周期性的, 其频谱中心对称, 因此整个频谱密度图的形心落在零点, 利用这样的形心坐标无法从式(6)中求解 A , 为此需要将频谱密度图进行分割。为了利用尽可能多的数据且避免信息冗余, 我们将频谱密度图分割成对称的两个部分: $(\vartheta_1, \vartheta_1 + \pi)$ 和 $(-\vartheta_1, \vartheta_1 + \pi)$, 分别表示在极坐标系中从 ϑ_1 到 $\vartheta_1 + \pi$ 的半平面和剩下的半平面。同样, 此分割也应当具备线性变换不变特性, 即分割出的区域在仿射变换下能在图像序列中一一对应。我们证明了利用具有仿射不变特性的特征矩可以完成这样的分割。

定理2 由仿射不变矩的最小值生成的频谱密度图分割

具有线性变换不变性,即

$$\begin{aligned} \forall x_1, x_2, f_2(Ax_1) = f_1(x_1), \quad 1 = \min(M_{f_1, 1}), \\ 2 = \min(M_{f_2, 2}), M(A) = K_A M(\quad) \\ \Rightarrow Ax_1, A^{-1}x_2 \end{aligned}$$

其中 A 为仿射参数, K_A 为由 A 确定的常数, M_f 为对频谱图 f 进行分割的仿射不变特征矩.

证明 设 1 为频谱密度图 f_1 的一个使仿射不变特征矩 $M(\quad)$ 最小的对称分割,

则 $M_{f_1, 1} < M_{f_1, 1'}$, $1'$ 为频谱密度图 f_1 中任一非 1 的分割

$$\begin{aligned} \text{设 } 2, 2 = \min M_{f_2, 2} \quad A^{-1}x_2 \in 1, \\ \text{则有 } 2' \text{ 为分割 } 1 \text{ 对应的仿射区域, } \forall x_1, x_2 \\ 2', Ax_1, A^{-1}x_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{同样 } 2 \text{ 为分割 } 1' \text{ 对应的仿射区域, } \forall x_1, x_2 \\ 2, Ax_1, A^{-1}x_2 \\ \text{则 } M_{f_1, 2} < M_{f_2, 2'} \Rightarrow K_A^{-1}M_{f_2, 2'} < K_A^{-1}M_{f_2, 2} \\ \Rightarrow M_{f_2, 2} < M_{f_2, 2'} \\ \Rightarrow M_{f_1, 1'} < M_{f_1, 1} \end{aligned}$$

矛盾,故假设 不成立,即 $A^{-1}x_2 \in 1$,同理 $Ax_1 \in 2$,证毕

```

START:输入图像和块尺寸
以块为单位计算连续图像  $I_1$  和  $I_2$  的离散傅立叶变换  $f_1$  和  $f_2$ 
及频谱密度  $|f_1|$  和  $|f_2|$ :
step1 {
    初始化最佳分割二阶矩  $M_{f_1, 1min}, M_{f_2, 2min}$  为一大数:
    FOR  $\theta$  IN 0 TO LOOP
         $\bar{1} = \frac{|f_1|}{1_\theta} / \frac{|f_1|}{1_\theta}$ 
         $\bar{2} = \frac{|f_2|}{2_\theta} / \frac{|f_2|}{2_\theta}$ 
         $M_{f_1, 1} = \det \begin{pmatrix} |f_1| & (\quad) & (\quad) \\ |f_1| & (\quad) & (\quad) \end{pmatrix}$ 
         $M_{f_2, 2} = \det \begin{pmatrix} |f_2| & (\quad) & (\quad) \\ |f_2| & (\quad) & (\quad) \end{pmatrix}$ 
        if  $\left\{ \begin{matrix} M_{f_1, 1} < M_{f_1, 1min} \\ M_{f_2, 2} < M_{f_2, 2min} \end{matrix} \right\}$   $M_{f_1, 1min} = M_{f_1, 1}, 1min = \bar{1}$  endif;
        if  $\left\{ \begin{matrix} M_{f_2, 2} < M_{f_2, 2min} \\ M_{f_1, 1} < M_{f_1, 1min} \end{matrix} \right\}$   $M_{f_2, 2min} = M_{f_2, 2}, 2min = \bar{2}$  endif;
    END LOOP
    由  $1min$  和  $2min$  计算 A 中的参变量  $k_1, k_2$ ,
     $k_1 = \frac{1min_x \cdot 2min_y + 1min_y \cdot 2min_x}{2min_x + 2min_y}$ 
     $k_2 = \frac{1min_x \cdot 2min_y - 1min_y \cdot 2min_x}{2min_x + 2min_y}$ 
    由 A 补偿  $f_1$  的频谱:  $\hat{f}_1(\quad) = \hat{f}_1(A^T)$ 
    由相位相关计算平移:  $d = phase\ correlation(\hat{f}_1, \hat{f}_2)$ 
step2 {
END:输出参数 d,  $k_1, k_2$ 
    
```

图 2 频域四参数仿射运动估计算法伪码

这样,由定理 2 可知,依据仿射不变矩可以将频谱密度图

分成对称的两个部分,对图像序列中相对应的部分计算形心就能得到求解式(3)所需的方程了.

文献[9]中给出了一些具有仿射不变特性图像特征矩,可以从其中选取最简单的二阶矩作为分割依据,

$$M_f = \frac{1}{|f(\quad)|} \left(\frac{\quad}{\quad} \right)^T d \quad (7)$$

式中 $\bar{\quad}$ 为图像 f 的一个对称分割的形心坐标.由此可以构造如下的频域四参数仿射运动估计算法,如图 2 所示.

4 实验结果及分析

我们采用上述算法对合成图像进行了运动估计实验.如图 3 所示,合成图像序列以静止图像为模板,通过连续仿射变换生成测试序列及合成运动场.图 4 列出了基于平动模型的频域相位相关运动估计算法的结果并与合成序列的标准参数进行了比较,可以看到本算法较好地跟踪了有平动和转动构成的运动场.从图 3 中可以看到以较大的块为处理单元进行运动估计时,通用的基于块平移模型的运动估计将产生明显的块虚像,而本文的运动估计结果有显著改善.图 5 列出了由两种算法得到的运动场进行运动补偿的效果对比.可以看到对测试序列本文算法的补偿图像品质有 3dB 的改善.

表 1 列出了本文算法的复杂度分析,与传统的相位相关法相比,本文提出的算法增加了线性参数估计、频谱补偿两个比较复杂的运算步骤,实验中以 32×32 的块为处理单位,其运算量大致增加了五倍,显然增加的两维待估参数并未使算法以几何级数上升.这是由线性参数估计与平动参数估计相分离,使得四维空间搜索问题转为两次二维空间搜索问题而获得的.

表 1 频域四参数仿射运动估计计算量分析

步骤	DFT	线性参数估计	频谱补偿	频谱相关	IDFT
运算量 ($N \times N$ 的块)	$N(\lg(N) - 3)$ $/2 + 2$ 次 Mc	$4N^2L$ 次 M	$4N^2$ 次 M	$2N^2$ 次 Mc	$N(\lg(N) - 3)$ $/2 + 2$ 次 Mc
	$3N(\lg(N) - 1)$ $/2 + 2$ 次 Ac	$4N^2L$ 次 A	$2N^2$ 次 A		$3N(\lg(N) - 1)$ $/2 + 2$ 次 Ac

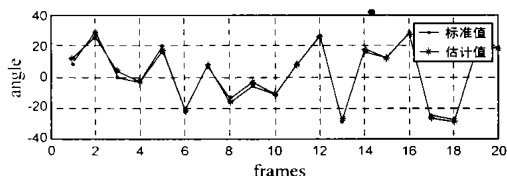
注:1.表中 Mc 为复数乘, Ac 为复数加, M 为乘法, A 为加法, N 为块的大小, L 为角度搜索的分块数目;
2.表中忽略了比较、取绝对值等操作,减法归入加法统计,除法归入乘法统计.

5 结论

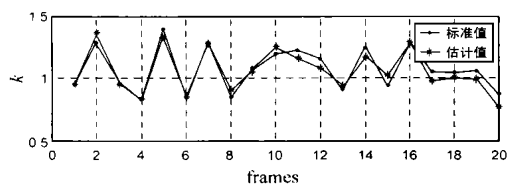
本文提出了一种基于四参数仿射模型的频域运动估计新方法,利用付氏变换域内幅值谱与线性参数对应,相位谱与平移参数对应的特性,提出了一种线性参数与平移参数分离的快速求解算法,同时采用幅值谱的统计特性作为线性参数估计的匹配特征提高了求解线性参数的鲁棒性.实验结果表明该算法在较少的运算量内有效地提高了运动估计的准确性.由于采用了四参数的仿射模型,使该算法能高效率地匹配由镜头缩放、平移等产生的运动场,但对于局部区域的任意变形运动效果有限,对此改进的方向将集中在两方面:



图3 运动估计及补偿效果



(a) 旋转角估计曲线



(b) 缩放比估计曲线

图4 估计的仿射参数与标准值比较曲线

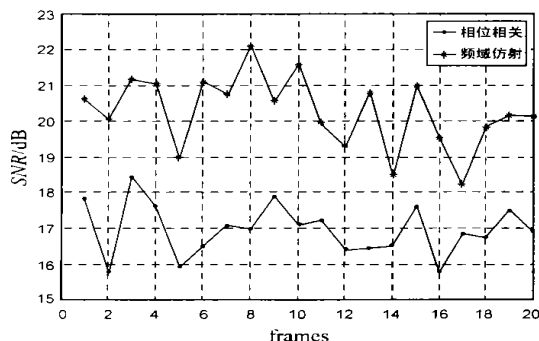


图5 运动估计补偿结果的信噪比曲线

(1) 采用六参数的完全仿射模型. 此时, 线性参数将增加到四个, 如果采用本文相同的算法框架将需要幅值谱中两个特征点的对应. 如何在不增加运算量的情况下提取两个仿射不变的特征点是问题的关键.

(2) 采用多分辨率模型, 通过在低分辨率匹配误差较大的区域进行局部高分辨率估计来改善四参数仿射模型的局部特性. 此时问题的关键是不同分辨率结果如何有效地融合.

上述的改进措施仍在研究之中.

参考文献:

- [1] J Y A Wang, E H Adelson. Representing moving images with layers [J]. IEEE Trans. On Image Process, 1994, 3(5): 625 - 638.
- [2] V Seferidis, M Ghanbari. General approach to block-matching motion estimation. Optical Engineering [J]. 1993, 32(7): 1464 - 1474.
- [3] G Adiv. Determining three-dimensional motion and structure from optical flow generated by several moving objects [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(4): 384 - 401.
- [4] R N Bracewell, K Y Chang, A K Jha, Y H Wang. Affine theorem for 2-dimension Fourier transforms [J]. Electronic Letters, 1993, 29(3): 304.
- [5] A Murat Tekalp. Digital video processing [M]. Prentice Hall, Inc. 1998.
- [6] E De Castro, C Morandi. Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(5): 700 - 703.
- [7] B S Reddy, B N Chatterji. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(8): 1266 - 1271.
- [8] L Luccese, G M Cortelazzo, C Monti. Estimation of affine transformations between image pairs via Fourier transform [A]. Proceedings IEEE International Conference on Image Processing [C]. USA: IEEE, 1996. 715 - 718.
- [9] J Flusser, T Suk. Pattern recognition by affine moment invariants [J]. Pattern Recognition, 1993, 26(1): 167 - 174.

作者简介:

王 栋 男, 1974 年生于江苏海门, 现为上海交通大学智能控制实验室在读博士, 研究方向为视频信号处理和 DSP 算法的 ASIC 设计. e-mail: wangdong@cdiv.org.cn

王 伟 多特蒙特大学博士, 上海交大智能控制实验室副博导, 研究方向鲁棒控制、频率域控制理论和系统辨识.

许晓鸣 男, 上海交大智能控制实验室主任, 博士生导师, 研究方向控制理论、人工智能、计算机网络和数字信号处理.