

## 基于对数极坐标变换的灰度投影稳像算法

余 博, 郭 雷, 赵天云

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

(boboy163@163.com)

**摘 要:**常规的灰度投影稳像算法仅能对存在平移运动的图像进行稳像,而对具有旋转和尺度变化的图像无能为力。为了克服灰度投影算法这一局限性,提出了基于图像对数极坐标变换(LPM)的灰度投影稳像算法,把具有尺度和旋转变化的图像进行对数极坐标变换,这样笛卡儿坐标系下图像的旋转和尺度变化在对数极坐标系下表现为平移变化,从而能够用灰度投影算法处理旋转和尺度变化问题。

**关键词:**灰度投影;对数极坐标;笛卡儿坐标系;旋转变换;稳像

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A

## Gray projection image stabilizing algorithm based on log-polar image transform

YU Bo, GUO Lei, ZHAO Tian-yun

(School of Automation, Northwestern Polytechnic University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

**Abstract:** Traditional gray projection image stabilizing algorithm just works under horizontal and vertical movement; but it is unable to deal with either scaling or rotation of the matched images. Due to the limitation, a gray projection image stabilizing algorithm based on log-polar image transform was introduced. When log-polar image transform was used in scaling or rotation image, the scaling or rotation movement in Descartes reference frame was represented by horizontal and vertical movement in log-polar reference frame. Accordingly, gray projection algorithm could be used in scaling or rotation image.

**Key words:** gray projection; log-polar reference frame; Descartes reference frame; rotation transform; image stabilization

### 0 引言

电子稳像是一种新型的图像稳定方法,与传统的光学稳像、机械稳像相比,电子稳像方法简单灵活,是现代稳像技术发展的一个方向<sup>[1]</sup>。目前实现电子稳像的算法有很多种,如块匹配法、位平面匹配法、特征点匹配法等。灰度投影算法是一种统计意义上的特征匹配方法,该算法将二维图像灰度数据匹配简化成两个一维灰度特征匹配问题,可以准确获取图像运动矢量<sup>[2-3]</sup>。但是灰度投影算法不能处理存在旋转和尺度变换的图像,现在处理存在旋转和尺度变换主要利用仿射变换。由于仿射变换需要选取初始参数点以计算变换参数,目前选取初始参数点的方法往往不够理想,因而解决此类问题较为困难。本文提出了基于图像对数极坐标变换的灰度投影稳像算法,在对数极坐标系下构建一个能够利用灰度投影算法处理图像旋转运动实时数字图像稳定系统。

本文介绍灰度投影算法平移运动估计的方法以及对数极坐标变换,着重分析和研究对数极坐标变换下灰度投影算法在处理旋转图像中的应用,最后通过 Matlab 实现算法仿真。

### 1 基于灰度投影的平移运动估计

灰度投影算法是一种基于投影相关运算的稳像方法,可分为图像映射和相关计算两个步骤<sup>[4]</sup>。

#### 1.1 行、列灰度投影

输入图像序列的每一帧图像经过适当的预处理后,将其灰度值映射成两个独立的一维波形,即把两维图像信息用两

个独立的一维信息来表示,投影方法可表示为:

$$\begin{cases} G_k(j) = \sum_i G_k(i,j) \\ G_k(i) = \sum_j G_k(i,j) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $G_k(j)$  为第  $k$  帧图像第  $j$  列的灰度投影值,  $G_k(i)$  为第  $k$  帧图像第  $i$  行的灰度投影值;  $G_k(i,j)$  为第  $k$  帧图像上  $(i,j)$  位置处的像素灰度值。

#### 1.2 位移相关检测

将第  $k$  帧图像的行、列灰度投影曲线与参考帧图像的行、列灰度投影曲线作互相关运算,根据两条相关曲线的波谷值即可确定当前帧图像相对于参考帧图像的行、列位移矢量值。式(2)为行列相关运算的计算公式:

$$C(w) = \sum_{j=1}^N [G_k(j+w) - G_r(m+j)]^2; 1 \leq w \leq 2m+1 \quad (2)$$

式中  $G_k(j)$  和  $G_r(j)$  分别为第  $k$  帧图像和参考帧图像的第  $j$  列的灰度投影值,  $N$  为列的长度,  $m$  为位移矢量相对于参考帧在一侧的搜索宽度。设  $w_{\min}$  为  $C(w)$  最小时  $w$  的值,则第  $k$  帧图像相对于参考帧图像在垂直方向的位移矢量为:

$$\delta_c = m + 1 - w_{\min} \quad (3)$$

得到了水平方向和垂直方向的位移矢量后,就可以将当前图像向位移矢量的反方向运动相应大小的像素距离,从而实现图像序列的稳定。

#### 1.3 灰度投影算法的缺陷

从灰度投影算法的原理可了解到,灰度投影算法是建立

收稿日期:2008-06-23;修回日期:2008-09-01。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60675015)。

作者简介:余博(1980-),男,陕西西安人,博士研究生,主要研究方向:目标识别与跟踪;郭雷(1956-),男,山东海阳人,教授,博士生导师,主要研究方向:神经计算、视觉计算、图像和视频处理、模式识别;赵天云(1970-),男,河南鄢陵人,博士研究生,主要研究方向:图像和视频处理。

在图像只做平移运动的假设之上,所以当图像间存在尺度或旋转变换时,灰度投影的稳像算法就会失效,这样就大大限制了灰度投影算法的应用。

## 2 旋转和缩放系数的确定

### 2.1 对数极坐标变换

对数极坐标的变换(Log-polar Transformation, LPM)源于对人视觉机制的研究,LPM 的主要优点是对旋转和尺度的不变性<sup>[5-6]</sup>。

图像中任一像素  $I$  的位置可以用笛卡尔坐标  $I(x, y)$  来表示,也可以用极坐标  $I(r, \theta)$  来表示,这样图像  $I(x, y)$  到  $I(r, \theta)$  的对数极坐标变换定义为:

$$r = \log_a \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (4)$$

$$\theta = \arctan \left( \frac{y - y'}{x - x'} \right) \quad (5)$$

式中,  $(r, \theta)$  分别对应数极坐标系的极径和极角,  $(x', y')$  为选定的坐标原点。变换关系如图 1 所示。图像  $I(r, \theta)$  的行列分辨率记为  $\delta_r \times \delta_\theta$ , 且有:

$$\delta_r = \text{每列像素个数} / \max(r)$$

$$\delta_\theta = \text{每行像素个数} / 2\pi$$

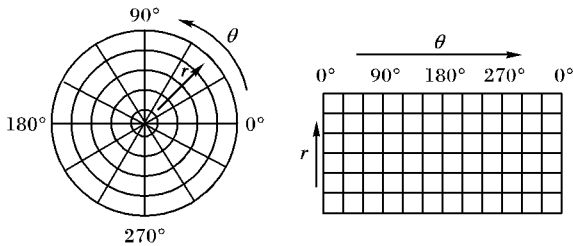


图 1 图像对数极坐标变换示意图

如果取坐标原点为  $(0, 0)$ , 则它们之间满足如下关系:

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2)}, \theta = \arctan(y/x) \quad (6)$$

在复平面可以表示为:

$$z = x + iy = r(\cos \theta + i \sin \theta) = re^{i\theta} \quad (7)$$

对数极坐标变换有:

$$w = \log(z) = \log(re^{i\theta}) = \log r + i\theta \quad (8)$$

从上式可以看出进行了对数极坐标变换后,尺度轴和角度轴变换相对独立,即:

$$\rho = \log r, \varphi = \theta \quad (9)$$

如果以注视点为中心缩放  $k$  倍,且旋转  $\Delta\theta$ , 则有:

$$\begin{cases} \rho_1 = \log kr = \log r + \log k = \rho + \Delta\rho \\ \varphi_1 = \theta + \Delta\theta \end{cases} \quad (10)$$

比较式(10)与式(9)可以看出:尺度变化  $k$  倍,变换后图像在尺度轴方向向下平移  $\Delta\rho$  个单位;而在角度方面,旋转角度变化  $\Delta\theta$ , 在变换后表现为在对数极坐标角度轴方向平移  $\Delta\theta$  个单位。显然,在笛卡尔坐标系中的尺度和旋转运动在对数极坐标系中分别变成了沿极径  $r$  和极角  $\theta$  的平移运动。

图 2 为 LPM 实验图, (a) ~ (c) 分别为旋转  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $90^\circ$  的笛卡尔坐标系图像; (d) ~ (f) 为旋转  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $90^\circ$  的 LPM 变换图像。

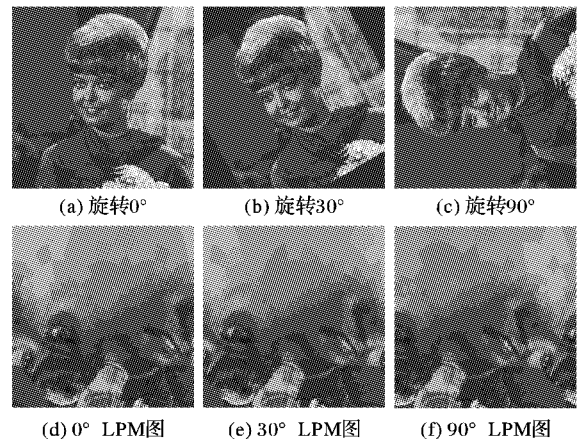


图 2 对数极坐标变换

从对数极坐标变换可以看出,图像由笛卡尔坐标空间转换至对数极坐标空间后,图像间的旋转变换在对数极坐标系中表现为沿  $x$  轴的平移变换。利用灰度投影算法检测对数极坐标系的平移运动,再将对数极坐标系的平移距离换算为笛卡尔坐标系中的旋转角度,最后进行旋转的逆处理,就可解决图像间的旋转问题。

以图 2(a)、(b) 为例,图 2(d)、(e) 为其对数极坐标变换图,对图 2(d)、(e) 进行灰度投影计算,图 3(a)、(b) 分别为图 2(d)、(e) 的列灰度投影曲线,图 3(c) 为对数极坐标系下图 2(d)、(e) 根据式(2)进行互相关计算所得相关曲线。从相关曲线可以看出,两幅图像的相关曲线存在谷值,计算相关曲线谷值的偏移量,即得到对数极坐标系下两幅图像的位移矢量。

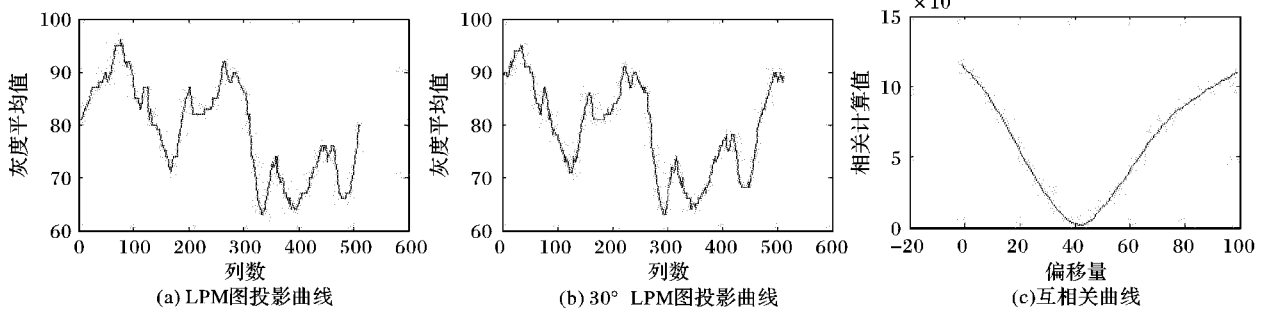


图 3 灰度投影曲线及相关曲线

要得到笛卡尔坐标系下的旋转角度,还需要将位移矢量换算为旋转角度,进行下面计算:

假设对数极坐标变换后图像分辨率为  $m \times n$ , 位移矢量为  $(\Delta m, \Delta n)$ , 笛卡尔坐标系下的旋转角度为  $\Delta\theta$ 、缩放因子为  $\Delta k$ , 进行对数极坐标变换所取对数的底为  $\alpha$ 。

则有:

$$\begin{cases} \Delta k = \alpha^{\Delta m/m} \\ \Delta\theta = \Delta n \cdot 2\pi/n \end{cases} \quad (11)$$

图 3(c) 相关曲线计算所得位移矢量为 43, 图 2(d) 和 (e) 的对数极坐标变换的图像分辨率为  $512 \times 512$ , 代入式(11), 得到  $\Delta\theta$  为  $30.23^\circ$ , 与实际旋转  $30^\circ$  相比相差  $0.23^\circ$ , 满足误差要求。如果要进一步提高精度, 可以提高映射变换的分辨率,

但提高分辨率意味着算法计算量增加。最后对图2(b)旋转 $-30.23^\circ$ 即为本算法稳像后的图像。

## 2.2 基于对数极坐标变换的灰度投影算法

基于对数极坐标变换处理旋转和缩放问题的具体计算步骤为:假设 $P1$ 和 $P2$ 分别为参考帧和当前帧,首先对参考帧 $P1$ 和当前帧 $P2$ 进行对数极坐标变换,变换结果分别为 $Q1$ 和 $Q2$ ,对数极坐标变换后的图像分辨率为 $m \times n$ ;对 $Q1$ 、 $Q2$ 进行中值滤波、直方图均衡等以提高稳像质量,然后采用灰度投影算法处理 $Q1$ 、 $Q2$ ,得到平移矢量 $(\Delta m, \Delta n)$ , $(\Delta m, \Delta n)$ 为对数极坐标系下的平移矢量。按式(11)计算得到旋转角度为 $\Delta\theta$ 和缩放因子为 $\Delta k$ ,最后,对当前帧进行旋转 $-\Delta\theta$ 和缩放 $-\Delta k$ 倍,即可得到消除旋转和缩放的稳像图像。

与传统的仿射变换方法相比,基于对数极坐标变换的灰度投影算法将复杂的旋转运动转化为平移运动进行计算,不存在特征点的选取问题;同时该算法仅需要进行一次对数极坐标变换和一次投影匹配运算即可得到旋转角度,计算量较小,方法简单,易于实现。

## 3 实验结果分析

为验证此算法的有效性,在PC机上采用Matlab进行仿真实验,本次仿真实验视频为从美国洛马公司网站下载的AGM-158导弹攻击地面建筑物的试验录像,分辨率为 $320 \times 240$ 像素。由于本实验旨在消除旋转运动,因此未进行缩放比例计算。

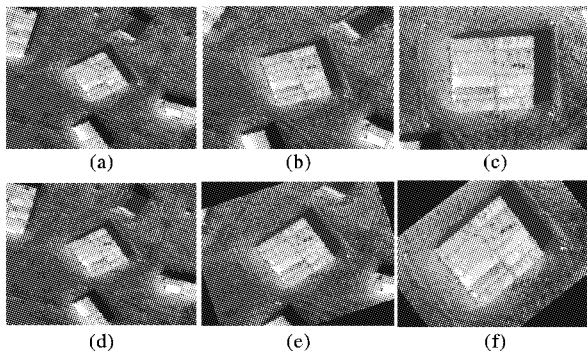


图4 消旋稳像处理视频图像

用本方法对AGM-158导弹攻击视频进行稳像处理,图4中(a)~(c)分别为未处理视频第1帧、17帧、32帧的三个样本图像,(d)~(f)为采用基于对数极坐标变换的灰度投影算法处理后第1帧、17帧、32帧的视频图像,算法计算过程中可以精确得出图(b)相对于图(a)旋转 $27.4^\circ$ ,图(c)相对于图(a)旋转 $39.3^\circ$ 。图(b)逆旋转 $27.4^\circ$ 得到图(e),图(c)逆旋

转 $39.3^\circ$ 得到图(f)。从图(e)、(f)来看,显然采用本方法能很好去除旋转运动,稳像效果相当理想。

同时在仿真实验中发现,对旋转角度的计算是建立在以图像中心为旋转中心基础上的,但是在实际应用中,旋转中心一般不会恰恰位于图像中心,因此本方法不能对此旋转进行完全补偿。但是从对数极坐标变换过程了解,笛卡尔坐标系的中心位置,经对数极坐标系变换后分布在对数极坐标系图像上部,而笛卡尔坐标系中图像四周边缘的位置,经对数极坐标系变换后分布在对数极坐标系下部(图2所示)。为了减小旋转中心对灰度投影算法的影响,可以仅对对数极坐标系图像的下部分进行投影匹配运算,在实验中选择对数极坐标系图像的下部2/3区域作为匹配区域。通过实际实验,在旋转中心偏离图像中心10个像素以内,使用本方法能明显改善旋转的波动。

上述仿真实验仅进行消除旋转运动的计算,对既存在平移运动又存在旋转运动的图像,可以先采用灰度投影算法进行一次平移的稳像,将平移稳像后的视频图像进行对数极坐标变换,然后再进行旋转图像的稳像即可。

## 4 结语

本文介绍了基于对数极坐标变换的灰度投影稳像算法,并对算法进行了仿真实验。实验证明,经过本方法处理后的视频与原始视频相比,剧烈的旋转明显改善,稳像效果令人满意,若采用运算能力强大的专用硬件可以实现实时稳像。本方法在侦察、识别、目标检测与跟踪等领域有很好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 赵红颖,金宏,熊经武.电子稳像技术概述[J].光学精密工程,2001,9(4):353-359.
- [2] VELLA F, CASTORINA A, MANCUSO M, et al. Digital image stabilization by adaptive block motion vectors filtering [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2002, 48(3): 796-801.
- [3] 孙辉,张永祥,熊经武,等.高分辨率灰度投影算法及其在电子稳像中的应用[J].光学技术,2006,32(3):378-380.
- [4] 汪小勇,李奇,徐之海,等.用于实时数字稳像的灰度投影算法研究[J].光子学报,2006,35(8):1268-1271.
- [5] WOLBERG G, ZOKAI S. Robust image registration using log-polar transform [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2000, 1: 493-496.
- [6] WANG LI, LI YAN-JUN, ZHANG KE. The application of target recognition algorithm based on log polar transformation for imaging guidance[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(3): 330-333.
- [7] BARNHILL R E, LITTLE F F. Three- and four-dimensional surfaces [J]. Rocky Mountain Journal Math, 1984, 14(1): 77-102.
- [8] NIELSON G M. The side vertex method for interpolation in triangles [J]. Journal of Approximation Theory, 1979, 25(4): 318-336.
- [9] HAGEN H. Geometric surface patches without twist constraints [J]. Computer Aided Geometric Design, 1986, 3(3): 179-184.
- [10] HAGEN H. Curvature continuous triangular interpolants [C]// Methods in CAGD. Oslo: Academic Press, 1989: 373-384.
- [11] NIELSON G M. A transfinite, visually continuous, triangular interpolant [C]// Geometric Modeling, Applications and New Trends, SIAM. Philadelphia: [s.n.], 1987: 235-246.
- [12] 徐琳.三角域上的超限插值方法[J].软件学报,2007,18(2): 430-441.
- [13] BARSKY B A. Local control of bias and tension in beta-splines [J]. Computer Graphics, 1983, 17(3): 193-218.
- [14] ZHANG JI-WEN. C-curves: An extension of cubic curves [J]. Computer Aided Geometric Design, 1996, 13(3): 199-217.
- [15] CHEN QIN-YU, WANG GUO-ZHAO. A class of Bézier-like curves [J]. Computer Aided Geometric Design, 2003, 20(1): 29-39.
- [16] 吕勇刚,汪国昭,杨勋年.均匀三角多项式样条曲线[J].中国科学: E辑,2002,32(2): 281-288.
- [17] WANG GUO-ZHAO, CHEN QIN-YU, ZHOU MING-HUA. NUAT B-spline curves [J]. Computer Aided Geometric Design, 2004, 21(7): 193-205.
- [18] 吴晓勤,韩旭里.带有形状参数的 Bézier 三角曲面片 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(11): 1735-1740.

(上接第3125页)