

# 图象序列运动目标特征点对应的极指数栅格方法

张海燕 宋克欧

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

王东木

(北京仿真中心, 北京 100854)

**摘要** 目前的图象序列特征点对应方法是建立在相邻图象间的特征点在运动形式上变化不大, 即相邻两帧图象间的时间间隔较小这样的一个假设之上的, 但当相邻图象间的时间间隔较大时, 则这些方法很难找到对应的特征点。为此, 提出了一个由粗到细解决图象序列特征点对应的新方法, 该方法首先进行粗定位, 即利用极指数栅格方法来得到运动后目标特征点的大致范围; 然后通过细定位来得到对应的特征点。为了使人们对该方法有一全面了解, 还介绍了该方法的原理, 并给出了实验结果。实验证明, 该方法可以很好地解决时间间隔较大的两帧图象间的特征点对应问题, 其最大的优点是比通常的方法简单有效。

**关键词** 计算机图象处理(520·6040) 图象序列 极指数栅格技术 极对数坐标变换 特征点对应

**中图法分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)05-0527-06

## Feature Point Correspondence Using Polar-Exponential Grid Technique

ZHANG Hai-yan, SONG Ke-ou

(College of Computer Science & Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

WANG Dong-mu

(Beijing Simulation Center, Beijing 100854)

**Abstract** The current approaches to feature point correspondence are based on the hypothesis that the displacements for feature points between consecutive frames are small. That is, there is very short time interval between successive two frames in image sequences. These approaches are difficult to find the corresponding feature points when the time interval is large. In the paper, a new approach to feature point correspondence is proposed. It includes two steps. First, approximate location of feature points of moving targets can be obtained using polar-exponential grid sampling and log-polar coordinate mapping. The parameters of feature point position, including translation, rotation and scale, are got in log-polar coordinate and Cartesian coordinate. Then the corresponding feature points can be got with available traditional means, because feature points corresponding when the time interval is large turns into feature points corresponding when the time interval is small by the first step of the approach. The best advantage of the method is simple and efficient. In the paper, the principle of the method is introduced and the result of experiment is given. It turns out that the problem of feature point correspondence can be finally solved when the time interval between consecutive frames in image sequences is large, and that the first step of the approach is enough to resolve feature point correspondence of plane object moving.

**Keywords** Computer image processing, Image sequence, Polar-exponential grid technique, Polar-log coordinate transform, Feature point correspondence

## 0 引言

特征点对应 是动态图象跟踪中的一个基本问题, 其任务就是在图象序列中, 找出相同的特征点

不同帧图象间的一一对应关系。由于在时间间隔很小的情况下, 图象序列帧间目标运动位置变化不大, 因此可以在特征点相应的一个很小的范围内搜索运动后的对应点, 且准确率较高。这就不仅要求必须能够足够快地拍摄目标和计算特征点的位移, 而且对

基金项目: 导弹控制系统仿真国防科技重点实验室基金项目(51474040201CB0101)

收稿日期: 2002-08-14; 改回日期: 2002-12-03

运算速度也要求较高。在这种情况下,搜索对应点常用的方法是光流法<sup>[1]</sup>,包括基于梯度的光流计算、基于区域匹配的光流计算和基于频率域的计算等方法。此外,Sethi和Jain提出了路径连贯的概念,并给出了两种不同的迭代算法<sup>[2]</sup>;汪亚明提出了特征点运动平滑的代价函数,并将目标跟踪技术应用于特征点的跟踪<sup>[3]</sup>。若相邻两帧图象时间间隔较大,且此时两帧图象间的对应点运动也较大,则需要在整幅图象上搜索,以上算法搜索时间长,且不一定准确。本文针对图象序列帧间时间间隔较大,搜索对应点困难的问题,提出了由粗到细地搜索对应点的极指数栅格方法。

## 1 极指数栅格技术

极指数栅格采样和极对数坐标变换技术于1979年提出<sup>[4]</sup>,1985年又提出了适合于并行处理的硬件结构<sup>[5]</sup>,1989年曾在机器人及机器视觉国际会议上列为专题<sup>[6]</sup>,其应用成果多在军事上。又由于其中心清晰,周围模糊的成像特点,且变换本身对图象进行了极大的压缩,因此与传统的压缩标准结合可得到很高的压缩比<sup>[7]</sup>,由于变换具有旋转不变性和缩放不变性,因此可用于目标跟踪<sup>[8]</sup>。在人脸检测和跟踪研究中,也获得了很好的效果<sup>[9,10]</sup>。

大家知道,人眼的视网膜上,视神经细胞的分布是不均匀的,由于其在视网膜的中心凹处最密集,因此所形成的投影图象具有最大的分辨率,而且随着与中心凹处距离的增大,视神经细胞按指数规律减少,这就造成了人眼观察外界事物时,出现中心清晰周围模糊的现象,并且越到周边模糊度越重,以致无法分清物体的轮廓和颜色,人只能通过转动眼球、脖颈,以使关心的物体位于视网膜中心凹处,才能更加仔细地观察它。而极指数栅格技术则可通过模拟人眼特性来进行极指数栅格采样,然后进行极对数坐标变换,以获得类似人眼的观察效果,使某些在直角坐标中较难解决的问题简单化,其变换原理如图1所示。

由图1可看出,极指数栅格坐标中,靠近变换中心区域的栅格单元较小,随着距变换中心距离的增大,栅格单元越来越大,图象也就越模糊,且分辨率也降低,其变换表达式为

$$u = k_u \ln \left( \frac{r}{r_{\min}} \right) \quad (1)$$

$$v = \theta = k_v \arctan \left( \frac{y}{x} \right) \quad (2)$$

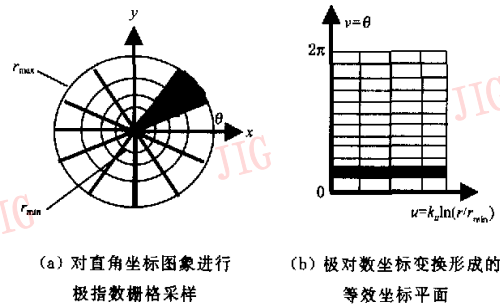


图1 极对数坐标变换

其中, $k_u$ 、 $k_v$ 分别为距离分辨率和角度分辨率常数,可根据需要设定,其中 $k_u$ 、 $k_v$ 的取值分别为40.23、20.4; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为像素距变换中心(图1(a)中的坐标原点)的长度, $(x, y)$ 是像素在直角坐标中的坐标; $u$ 是极对数栅格坐标的横坐标轴,其对应像素距变换中心的长度; $v$ 是极对数栅格坐标的纵坐标轴,等于该像素极径与水平轴的夹角; $r_{\min}$ 是进行极对数坐标变换时,采样的最小半径,这里设定 $r_{\min}$ 为10pixels; $r_{\max}$ 是进行极对数坐标变换时采样的最大半径,这里设定其为图象的高度、宽度最小值的一半。极指数栅格采样和极对数坐标变换算法可参阅文献<sup>[11]</sup>。

变换到极对数栅格坐标中的图象具有很多特点,如,

(1)能将包围变换中心的目标轮廓变换成一维目标曲线,然后利用曲线匹配就可以很方便地提取目标轮廓不变量,这些不变量对于图象缩放、旋转具有不变性;

(2)当目标远离摄像机或靠近摄像机时,从图象上表现为目标形状的放大或缩小;而在极对数栅格坐标中,目标曲线则呈现沿 $u$ 轴的平移。设 $h(h > 0)$ 为放大或缩小的倍数,经过缩放后,像素点坐标从 $(x, y)$ 变为 $(hx, hy)$ ,利用式(1)和式(2)可得到在极对数栅格坐标系中原像素点的坐标为 $(u_0, v_0)$ ,变换后的像素坐标为

$$\begin{aligned} u &= k_u \ln \left( \frac{\sqrt{(hx)^2 + (hy)^2}}{r_{\min}} \right) = k_u \ln \left( \frac{hr}{r_{\min}} \right) \\ &= k_u \ln h + k_u \ln \left( \frac{r}{r_{\min}} \right) = k_u \ln h + u_0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$v = \theta = \arctan \left( \frac{hy}{hx} \right) = \arctan \left( \frac{y}{x} \right) = v_0 \quad (4)$$

(3)当目标在二维平面上作旋转时,其变换到极对数栅格坐标中就成为沿轴的平移。设在直角坐标

中像素点旋转前后的坐标分别为 $(x, y)$ ,  $(x_1, y_1)$ , 则二者满足下面关系式

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \quad (5)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y_1}{x_1}\right) = \alpha_0 + \Delta\alpha \quad (6)$$

在极对数栅格坐标中, 旋转前的坐标为 $(u_0, v_0)$ , 旋转后的坐标为

$$u = k_r \ln\left(\frac{r}{r_{\min}}\right) = u_0 \quad (7)$$

$$v = \theta = k_\alpha \arctan\left(\frac{y_1}{x_1}\right) = k_\alpha (\alpha_0 + \Delta\alpha) = v_0 + k_\alpha \Delta\alpha \quad (8)$$

## 2 特征点对应算法

### 2.1 粗定位算法

粗定位算法在直角坐标和极对数坐标中交替进行, 即在直角坐标中得到目标平移量, 在极对数坐标中得到目标的旋转角度、缩放尺度等参数。由以上3个参数(称为位置姿态参数)即可得到运动目标的大致位置。

#### 2.1.1 目标质心的获取

由于目标质心是进行极对数坐标变换的变换中心, 因此首先需要计算目标质心。对于输入的单目标图象序列, 可在直角坐标中快速搜索跟踪目标质心, 并可计算平移量<sup>[11,12]</sup>。本文利用的传统目标质心公式如下

$$\bar{x} = \frac{\sum_{x=1}^H \sum_{y=1}^W xf(x, y)}{\sum_{x=1}^H \sum_{y=1}^W f(x, y)} \quad (9)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{x=1}^H \sum_{y=1}^W yf(x, y)}{\sum_{x=1}^H \sum_{y=1}^W f(x, y)} \quad (10)$$

其中,  $f(x, y)$ 是二值图象灰度值,  $H$ 、 $W$ 分别是图象的高度和宽度。

#### 2.1.2 位置参数的估计

位置参数就是输入图象相对于参考图象的旋转角度、缩放尺度和平移量。其中平移量在直角坐标中计算, 旋转角度和缩放尺度在极对数坐标中得到, 即在极对数坐标平面中, 首先对运动目标曲线和标准目标曲线进行匹配, 再根据峰值平移位置即可计算运动目标姿态参数。

(1) 基于直角坐标的目标平移量计算

假设图象序列中,  $t_i$ 和 $t_{i+1}$ 时刻直角坐标中的图象灰度值分别是 $f(x, y, t_i)$ 和 $f(x, y, t_{i+1})$ , 则其平移量 $(X_p, Y_p)$ 可用下式计算

$$X_p = \tilde{x}_{t_{i+1}} - \tilde{x}_{t_i} \quad (11)$$

$$Y_p = \tilde{y}_{t_{i+1}} - \tilde{y}_{t_i} \quad (12)$$

其中,  $(\tilde{x}_{t_{i+1}}, \tilde{y}_{t_{i+1}})$ 是 $t_{i+1}$ 时刻图象的质心,  $(\tilde{x}_{t_i}, \tilde{y}_{t_i})$ 是 $t_i$ 时刻图象的质心。

(2) 基于极坐标的相关函数计算

设 $f(x, y, t_i)$ 和 $f(x, y, t_{i+1})$ 在极对数坐标中的图象灰度值分别是 $g(u, v, t_i)$ 和 $g(u, v, t_{i+1})$ , 则 $g(u, v, t_i)$ 和 $g(u, v, t_{i+1})$ 的互相关为

$$r_{i, i+1}(u, v) = g(u, v, t_i) \otimes g(u, v, t_{i+1}) \quad (13)$$

这里,  $\otimes$ 号代表二维相关。直接在极对数空间域内计算两幅图象的相关函数是复杂的, 但由相关定理可知, 在频域内计算两幅图象的傅立叶谱函数, 然后对其进行逆傅立叶变换, 即可得到相关函数, 因此式(13)相关函数可由以下方法得到:

① 对式(13)两边同时做傅立叶变换, 得到互功率谱

$$R_{i, i+1}(\alpha, \beta) = G_i(\alpha, \beta) G_{i+1}^*(\alpha, \beta) \quad (14)$$

其中,  $G_{i+1}^*(\alpha, \beta)$ 表示 $G_{i+1}(\alpha, \beta)$ 的共轭复数,  $G_{i+1}(\alpha, \beta)$ 、 $G_i(\alpha, \beta)$ 分别是 $g(u, v, t_{i+1})$ 和 $g(u, v, t_i)$ 的傅立叶变换。

② 对式(14)两边取傅立叶反变换, 即得到式(13)相关函数。

(3) 基于相关函数极大的旋转角度与缩放尺度计算

相关函数是一个二维图象, 类似于草帽状, 并有尖峰, 而根据尖峰坐标就可以计算目标的旋转、缩放位置参数。设原始图象平面的大小为 $384 \times 384$ , 极对数坐标变换后图象平面的大小为 $128 \times 128$ , 变换后图象平面的中心为 $\left(\frac{128}{2}, \frac{128}{2}\right)$ , 尖峰的坐标为 $U_{\text{peak}}$ 和 $V_{\text{peak}}$ , 则当极对数坐标变换输入图象与极对数变换参考图象匹配时, 就可以通过尖峰的平移来计算旋转和缩放变化。由式(3)和式(8)可得

$$\varphi = \frac{\left(\frac{128}{2} - V_{\text{peak}}\right)}{k_r} \quad (15)$$

$$s = e^{\frac{U_{\text{peak}} - \frac{128}{2}}{k_\alpha}} \quad (16)$$

其中,  $\varphi$ 是旋转的角度, 设沿 $x$ 轴正向逆时针为正, 顺时针为负。 $s$ 是缩放尺度。

由以上步骤即可得到运动目标的大致位置。

## 2.2 细定位算法

细定位算法在直角坐标系中进行,采用最近距离法来实现特征点匹配.若将 $t_i$ 时刻的 $f(x, y, t_i)$ 按照粗定位算法得到的参数进行平移、旋转、缩放变换,则变换后的 $\tilde{f}(x, y, t_i)$ 与第 $t_{i+1}$ 时刻的 $f(x, y, t_{i+1})$ 的对应特征点位置之间的距离应较小.这样,在时间间隔较大情况下,图象序列帧间的特征点对应问题就转化成时间间隔较小情况下,图象序列帧间的特征点对应问题,即 $f(x, y, t_i)$ 与 $f(x, y, t_{i+1})$ 之间的特征点对应问题就转换成 $\tilde{f}(x, y, t_i)$ 与 $f(x, y, t_{i+1})$ 之间的特征点对应问题.为了建立正确的对应关系,采用以下的代价函数,将 $t_{i+1}$ 时刻的图象中的特征点按此代价函数分类,以得到正确的对应.

$$M(i, j) = w \left\| P_{\tilde{f}(x, y, t_i)}^{(i)} - P_{f(x, y, t_{i+1})}^{(j)} \right\| \quad (17)$$

其中, $w$ 是权系数, $P_{f(x, y, t_i)}^{(i)}$ 是二维位置向量,表示特征点 $i$ 在 $\tilde{f}(x, y, t_i)$ 中的位置坐标, $\left\| P_{\tilde{f}(x, y, t_i)}^{(i)} - P_{f(x, y, t_{i+1})}^{(j)} \right\|$ 表示特征点 $i, j$ 之间的距离.

对于特征点 $i$ ,将 $t_{i+1}$ 时刻的图象中的每一特征点代入式(17),并计算出最小的 $M(i, j)$ ,这样,特征点 $i, j$ 就得到对应.如果特征点 $j$ 同时使下面两式成立

$$M(i, j) = \min(M(i, s)) \quad 1 \leq s \leq N \quad (18)$$

$$M(k, j) = \min(M(k, s)) \quad 1 \leq s \leq N \quad (19)$$

其中, $N$ 表示 $t_{i+1}$ 时刻图象中特征点的总数,则在这种情况下,还要比较 $M(i, j)$ 和 $M(k, j)$ 的大小,当 $M(i, j) < M(k, j)$ 时,则 $t_i$ 时刻的特征点 $i$ 与 $t_{i+1}$ 时刻的特征点 $j$ 对应.因此细定位算法步骤可归纳如下:

(1) 将 $t_i$ 时刻的 $f(x, y, t_i)$ 按照粗定位算法得到的参数进行平移、旋转、缩放变换,得到变换后的 $\tilde{f}(x, y, t_i)$ ;

(2) 根据代价函数(式(17))使 $t_{i+1}$ 时刻的图象中的特征点分别得到对应.

对于细定位详细算法可参看文献[3],该文考虑到在图象序列帧间时间间隔较小的情况下,目标运动具有平滑性,提出了运动平滑的代价函数,结合式(17)来判定特征点之间的对应.

如果目标运动仅限于与摄像机投影轴线正交的平面内,那么本文所述粗定位方法可达到相当高的精度,旋转角度误差不到 $1^\circ$ ,缩放尺度误差最高数量级为0.01,此时可免去细定位计算.如果目标作

三维运动,情况会很复杂,则细定位算法不能省略,本文在结论中对目标的三维运动作了简单介绍.

## 3 实验结果

在实验中用的目标如图2所示.

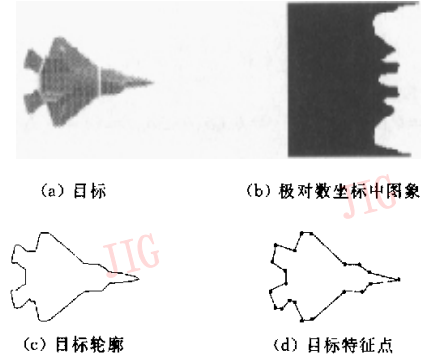


图2 目标、极对数坐标中图象、轮廓及其特征点

该物体运动图象序列如图3所示,图3(a)是起始图象目标的轮廓,在其余的图象中,实线表示实际运动目标的轮廓,虚线表示的是粗定位算法目标的定位结果.由图3可以看出,在相邻两帧图象时间间隔较大的情况下,目标特征点发生了大距离的偏移,根据本文所提出的粗定位算法,可以得到运动目标的大致位置,且和实际情况相差不大,在图中表现为实线和虚线基本上重合,再做细定位即可得出目标精确的位置.表1给出了粗定位算法目标的定位结果(以图3(a)作为标准图象,后面图象帧所作的旋

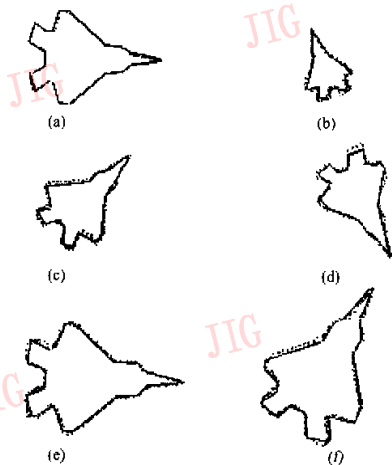


图3 目标运动图象序列

转、缩放都是相对图 3(a)而言的,在此只列出了旋转角度和缩放尺度)。从表 1 中可以看出,本算法得到的旋转角度误差最大不到  $1^\circ$ , 缩放尺度误差数量级为 0.01。若将物体运动图象序列加入高斯噪声, 再用粗定位算法进行定位角度, 其计算结果见表 1。由表 1 可以看出, 有噪声图象的旋转角度误差和缩放尺度误差比无噪声图象大, 但旋转角度误差在  $1^\circ$  左右, 缩放尺度误差数量级也是 0.01, 说明本算法具有较强的鲁棒性。图 3(b)与图 3(a)的相关函数图象三维表示如图 4 所示。其他相关函数三维表示见图 5。

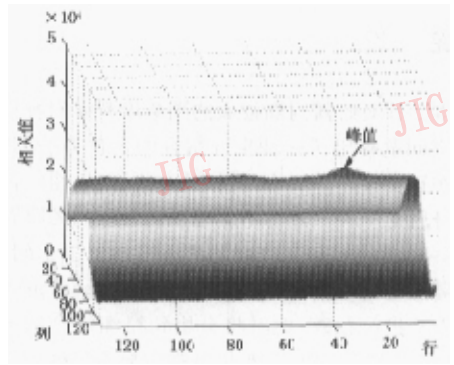
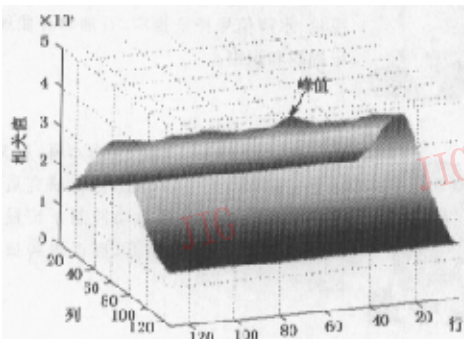


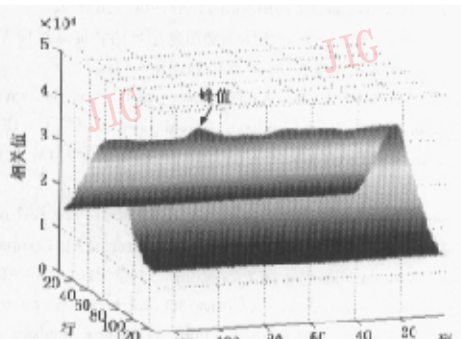
图 4 图 3(b)与图 3(a)的相关函数图象

表 1 图 3 目标运动图象粗定位算法计算结果

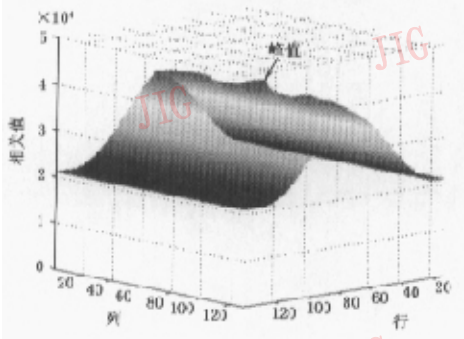
	实际情况		无噪声粗定位算法		有噪声粗定位算法		无噪声误差		有噪声误差	
	旋转角度( $^\circ$ )	缩放尺度	旋转角度( $^\circ$ )	缩放尺度	旋转角度( $^\circ$ )	缩放尺度	旋转角度( $^\circ$ )	缩放尺度	旋转角度( $^\circ$ )	缩放尺度
图 3(b)	110	0.4	109.6875	0.407	109.6375	0.385	0.3125	0.007	0.3725	0.015
图 3(c)	45	0.8	45	0.804	45	0.761	0	0.004	0	0.039
图 3(d)	-60	0.8	-59.0625	0.804	-58.9625	0.761	0.9375	0.004	1.0375	0.039
图 3(e)	0	1.2	0	1.210	0	1.178	0	0.010	0	0.022
图 3(f)	60	1.2	59.0625	1.178	58.9625	1.178	0.9375	0.022	1.0375	0.022



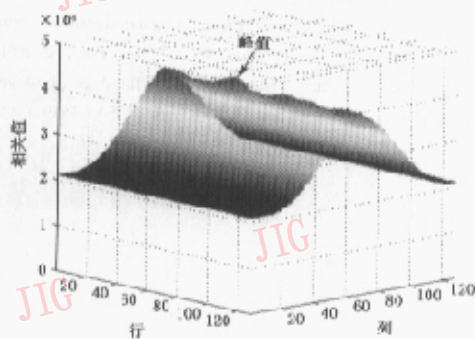
(a) 图 3(c)与图 3(a)的相关函数图象



(b) 图 3(d)与图 3(a)的相关函数图象



(c) 图 3(e)与图 3(a)的相关函数图象



(d) 图 3(f)与图 3(a)的相关函数图象

图 5 图 3(c)至图 3(f)的相关函数图象

## 4 结 论

本文针对时间间隔较大的图象序列帧间特征点的对应问题提出了一种粗细结合的定位方法. 其中对于在正交投影平面内, 目标的二维运动, 粗定位方法本身就是一种很好的不受运动情况限制的跟踪方法, 不一定需要细定位; 但如果目标在三维空间中, 运动姿态变化复杂, 就要结合方面图(aspect graph)技术<sup>[6]</sup>来进行跟踪, 此时将会用到粗细结合的定位方法; 对于多目标跟踪, 利用极指数栅格采样和极对数坐标变换也可以进行定位跟踪. 作者将会继续开展多目标三维运动定位和运动参数估计方法的研究, 并且将陆续提供研究成果.

### 参 考 文 献

- 1 贾云得编著. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- 2 Sethi I K, Jain R. Finding trajectories of feature point in a monocular image sequence [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(1): 56~72.
- 3 汪亚明, 楼正国等. 一种非刚体运动图象序列的特征点对应方法[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5A(3): 232~236.
- 4 Hall C F, Hall E L. A non-linear model for the spatial characteristics of the human visual system [J]. IEEE Transactions, Systems, Man & Cybernetic, 1979, 9(3): 161~170.
- 5 Messner R A. An image processing architecture for real-time generation of scale and rotation invariant patterns[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1985, 31(1): 50~66.
- 6 Seiter M, Waxman A M. Adaptive 3D object recognition from multiple views[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 107~124.
- 7 吴晖. 仿生视觉理论及其在图象压缩中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学硕士研究生论文, 1998.
- 8 Carl F R Weiman, Richard D Juday. Tracking algorithms using log-polar mapped image coordinates [A]. In: Proc. of SPIE Intelligent Robots and Computer Vision VIII: Algorithms and Techniques[C]. Philadelphia, Pennsylvania, USA, 1989, 1192: 843~853.

- 9 Jurie F. A new log-polar mapping for space variant imaging application to face detection and tracking [J]. Pattern Recognition, 1999, 32(5): 865~875.
- 10 Michael Seibert, Allen M Waxman. Recognizing faces from their parts [A]. In: Proc. of SPIE Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures [C]. Boston, Massachusetts, USA, 1991, 1611: 129~140.
- 11 宋克欧, 黄凤岗, 吴晖. 极指数栅格采样和极对数坐标映射[J]. 模式识别与人工智能, 1999, 12(4): 402~407.
- 12 宋克欧, 黄凤岗, 兰晓婷. 二值图象目标质心快速搜索跟踪算法[J]. 模式识别与人工智能, 1998, 11(2): 161~168.



**张海燕** 1976年生, 博士研究生, 1998年在山东师范大学获理学学士学位, 2001年在哈尔滨工程大学获工学硕士学位. 主要研究方向为计算机视觉、图象处理、模式识别.



**宋克欧** 1940年生, 大学本科, 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院教授. 主要研究方向为图象处理、模式识别、计算机视觉、水声信号特征提取、石油测井曲线特征提取和识别.



**王东木** 1944年生, 大学本科, 航天科工集团北京仿真中心总工程师, 研究员. 主要研究方向是飞行器自动控制系统设计、系统仿真、分布交互仿真、虚拟现实技术、试验学.