

文章编号 1004-924X(2009)09-2321-07

# 基于 Rao-Blackwellized 粒子滤波的 多特征融合多光谱目标自适应跟踪

李春鑫<sup>1</sup>, 王孝通<sup>2</sup>

(1. 海军大连舰艇学院 博士生队, 辽宁 大连 116018; 2. 海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018)

**摘要:**针对复杂背景下视频目标跟踪的实时性和可靠性问题,提出了基于 Rao-Blackwellized 粒子滤波(RBPF)的颜色矩形特征和方向边缘信息融合的自适应跟踪算法。该算法采用 Rao-Blackwellized 粒子滤波提高滤波算法性能,采用积分图像快速计算颜色特征和方向边缘信息。根据跟踪实际情形,利用模糊逻辑自适应调节各特征权值,提高算法的跟踪速度和精度。视频跟踪仿真试验表明,该算法稳健、跟踪精度高,实时性好,能够在复杂背景下对可见光及红外等运动目标进行有效、可靠的跟踪。

**关键词:**Rao-Blackwellized 粒子滤波;多特征自适应融合;积分图像;颜色矩形特征;方向边缘

**中图分类号:**TP751;TP391 **文献标识码:**A

## Adaptive multi-spectrum object tracking of multi-feature fusion based on Rao-Blackwellized particle filter

LI Chun-xin<sup>1</sup>, WANG Xiao-tong<sup>2</sup>

(1. *Dalian Naval Academy, Doctoral Student Team, Dalian 116018, China;*  
2. *Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China*)

**Abstract:** Aiming at the problem of real time and reliability of visual object tracking in a clutter background, an adaptive tracking algorithm by fusion of the color rectangle feature with the Edge Orientation Histogram is presented based on the Rao-Blackwellized Particle Filter(RBPF). To improve the tracking speed and precision, the RBPF is adopted to improve the filter performance, and an integral image is used to quickly compute the color rectangle feature and Edge Orientation Histogram. Finally, a fuzzy logic is applied to adaptively adjust each feature weight and to improve tracking accuracy in real time. The simulation result from a video tracking illustrates that the algorithm is robust and effective for visible and infrared object tracking under complex backgrounds.

**Key words:** Rao-Blackwellized particle filter; multi-feature adaptive fusion; integral image; color rectangle feature; edge orientation

收稿日期:2008-12-07;修订日期:2009-01-05.

基金项目:辽宁省自然科学基金资助项目(No. 20082176);浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放基金资助项目(No. A0906)

## 1 引言

复杂背景下运动目标的精确可靠跟踪一直是计算机视觉领域中一个极具挑战性的问题。基于区域匹配的跟踪算法如差方和法(SSD法)<sup>[1]</sup>、颜色法<sup>[2]</sup>、形状法<sup>[3]</sup>等由于用到目标的全局信息,具有较高的可信度,但目标发生部分遮挡时跟踪效果往往不好;基于差分的跟踪算法如光流法<sup>[4]</sup>,在简单背景下跟踪效果较好,但在复杂背景下经常发生失效情况,而且实时性不好;卡尔曼滤波(KF)<sup>[5]</sup>对目标进行预测可以有效地缩小搜索邻域,但不适合处理非线性问题。近年来,基于粒子滤波的跟踪算法<sup>[6-11]</sup>已成为视觉跟踪领域的研究重点之一。粒子滤波为复杂背景和遮挡条件下的目标跟踪问题提供了一个开放式的解决框架,使目标跟踪更为可靠。因此,本文研究利用一种改进粒子滤波算法(Rao-Blackwellized Particle Filter, RBPF)进行目标跟踪,提高跟踪的实时性;特征信息采用颜色和边缘方向(Edge Orientation Histogram, EOH)特征融合,并根据跟踪实际情形,采用模糊逻辑自适应调整各特征的权值,提高跟踪精度。

## 2 RBPF 算法

考虑如下的非线性动态模型的系统方程和观测方程:

$$\begin{cases} x_t = f(x_{t-1}, u_{t-1}) \\ z_t = h(x_t, v_t) \end{cases}, \quad (1)$$

其中,  $x_t$  为系统在  $t$  时刻的状态,  $z_t$  为系统状态  $x_t$  的观测值,  $u_{t-1}$ 、 $v_t$  分别为过程和观测噪声,  $f(\cdot)$  和  $h(\cdot)$  为有界非线性映射函数。粒子滤波算法在处理非线性时变系统的参数估计和状态滤波问题方面具有优势,但随着精度的提高,需要大量粒子,尤其处理高维模型,计算量较大,实时处理非常困难。G. Casella 等<sup>[12]</sup>提出的一种改进粒子滤波算法 RBPF,将系统状态分为线性和非线性两部分,利用贝叶斯原理将线性状态从系统

模型中分离出来,采用 KF 对其进行估计,而对非线性状态的估计采用粒子滤波,有效降低所需的粒子数目和滤波发散,减少计算量,优化滤波算法。该算法的系统噪声服从高斯分布。令  $\mathbf{x} = [x_t^1 \ x_t^2]^T$ ,  $x_t^1$  和  $x_t^2$  分别为系统的非线性和线性状态,则模型(1)可写成线性和非线性两部分<sup>[13]</sup>,由贝叶斯原理可得

$$p(x_t | z_{0:t}) = p(x_t^1, x_t^2 | z_{0:t}) = p(x_t^2 | x_t^1, z_{0:t}) p(x_t^1 | z_{0:t}) \quad (2)$$

对于线性状态  $x_t^2$ ,采用卡尔曼滤波进行估计;对于非线性部分,则采用 PF 依次进行重要性采样、权值计算及归一化处理、重采样等对  $x_t^1$  进行估计。

## 3 目标多特征自适应融合算法

粒子滤波选择不同特征可获得不同的跟踪效果。目前,基于粒子滤波跟踪算法的特征一般选择颜色、轮廓、形状和纹理等<sup>[14-17]</sup>,颜色直方图对噪声和部分遮挡具有鲁棒性,但对于光照变化和易被混淆的背景跟踪效果不好。轮廓或边缘特征可以对光照变化和易被混淆的背景具有鲁棒性,但对噪声等混乱干扰敏感。一种自然的想法就是就将多种特征融合<sup>[18-20]</sup>,但这些算法要么耗时,要么仅局限于单个形状模型。本文研究采用基于积分图像的颜色和边缘方向特征融合的自适应快速算法。

### 3.1 积分图像及矩形特征

积分图像在图形学中也称为 Summed Area 表,所谓积分图像就是图像中某一点左上方所有像素值的和<sup>[21]</sup>,点  $(x, y)$  的积分图像可通过下式计算得出:

$$ii(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} i(x', y'), \quad (3)$$

其中,  $ii(x, y)$  为计算后的积分图像,  $i(x, y)$  为原图像。矩形特征值是指图像上两个或多个形状大小相同的矩形内部所有像素灰度值之和的差值。单个矩形特征虽然仅可表示有限的形状,但多个矩形特征的组合可表示任意形状和任意复杂的特

征。本文选用如图 1 所示的矩形边缘特征。



图 1 矩形边缘特征

Fig. 1 Rectangle edge feature

矩形特征值就是白色矩形与黑色矩形内所有像素灰度值之和的差值。显然,采用积分图像可以快速计算出矩形特征值。

### 3.2 颜色特征和 EOH 描述

本文采用颜色矩形特征,令  $R_i$  表示所选的第  $i$  个矩形区域,  $R_i(r_i, g_i, b_i)$ , 代表着矩形区域内  $(r, g, b)$  颜色像素的均值,  $A_i$  表示  $R_i$  内所有像素的个数, 则颜色矩形特征表达式为:

$$R_i(r_i, g_i, b_i) = \sum_{(x,y) \in R_i} (r(x,y), g(x,y), b(x,y)) / A_i. \quad (4)$$

式中不采用常用的颜色直方图, 而选择 RGB 三色均值的理由是: 不仅可以对目标空间排列进行编码, 还对噪声干扰具有较好的鲁棒性。令  $(r_i, g_i, b_i)$  表示参考颜色, 则候选颜色  $(r_i, g_i, b_i)$  与其相似性可用欧几里德距离计算:

$$\rho = \sqrt{(r_i - r_i)^2 + (g_i - g_i)^2 + (b_i - b_i)^2}, \quad (5)$$

颜色似然分布如下:

$$p_{\text{color}}(z_t | x_t) \propto \exp(-\lambda \rho^2), \quad (6)$$

$\lambda$  为归一化常数。

其中对于 EOH<sup>[22]</sup>, 分别用水平和垂直 Sobel 算子  $\mathbf{K}_x, \mathbf{K}_y$  与图像  $\mathbf{I}$  卷积:

$$\begin{cases} G_x(x, y) = \mathbf{K}_x * \mathbf{I}(x, y) \\ G_y(x, y) = \mathbf{K}_y * \mathbf{I}(x, y) \end{cases}. \quad (7)$$

边缘的强度和方位分别为:

$$\begin{cases} S(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \\ \theta(x, y) = \arctan(G_y(x, y) / G_x(x, y)) \end{cases}. \quad (8)$$

为了滤除噪声, 我们取一个阈值  $T$ , 令

$$S(x, y) = \begin{cases} S(x, y), & S(x, y) \geq T \\ 0, & \text{else} \end{cases}.$$

将边缘分成  $K$  个方向子区域, 则矩形区域内第  $k$

个方向子区域的值定义为:

$$E_k(R) = \sum_{(x,y) \in R} S(x, y), \theta(x, y) \in \text{bin}_k. \quad (9)$$

边缘方向直方图的一个例子如图 2 所示: 从左到右依次是实验图像、边缘强度图像和边缘方向极坐标直方图。



图 2 边缘方向直方图

Fig. 2 Edge orientation histogram

设目标模板矩形区域为  $\bar{R}$ , 则当前图像与模板 EOH 的相似性同样可用欧几里德距离来衡量:

$$l = \sqrt{\sum_{k=1}^K (E_k(\bar{R}) - E_k(R))^2}, \quad (10)$$

EOH 似然分布为:

$$p_{\text{EOH}}(z_t | x_t) \propto \exp(-\mu l^2), \quad (11)$$

$\mu$  为归一化常数。显然, 上述两种特征的选取都可以在积分图像中快速求取。

### 3.3 多特征信息的融合

将颜色特征和 EOH 融合起来, 视频图像目标的总观测似然函数为:

$$\begin{cases} p(z_t | x_t) = \alpha p_{\text{color}}(z_t | x_t) + \beta p_{\text{EOH}}(z_t | x_t) \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases}, \quad (12)$$

其中,  $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$ , 分别为两种特征信息的权值, 本文采用模糊的方法根据以前的跟踪结果来自适应调节两者的权值大小, 从而实现各特征信息的自适应融合。模糊规则如下:

$R^j$ : If  $x_1$  is  $A_1^j$  and  $x_2$  is  $A_2^j \cdots$  and  $x_l$  is  $A_l^j$  then  $y$  is  $B^j, j=1, \cdots, L$

$R^j$  为第  $j$  条模糊规则,  $L$  为模糊规则数,  $(x_1, x_2, \cdots, x_l)^T$  为输入,  $y$  为输出。模糊逻辑的输入为当前帧目标颜色和 EOH 信息的可信度, 模糊逻辑输出为下一帧颜色信息的权值  $\alpha$ , 而  $\beta = 1 - \alpha$ 。颜色和 EOH 信息的可信度分别用  $R_c$  和  $R_e$  来表示, 可分别通过各自的似然分布函数计算得到。本文将  $R_c$  和  $R_e$  模糊化为  $\{RS, S, M, S, B, RB\}$ , 将  $\alpha$  模糊化为  $\{LS, VS, RS, S, M, B, RB, VB, LB\}$ , 代表特小、很小、较小、小、中、大、较大、很大、特大。这里给出如表 1 所示的模糊规则。根

据规则,模糊逻辑对跟踪期间不可靠的特征信息赋予较小权值,可靠的特征信息赋予较大权值。

表 1 模糊规则表

Tab. 1 Fuzzy rule table

$R_c$	$R_s$	S	M	B	RB
RS	M	B	RB	VB	LB
S	S	M	B	RB	VB
M	RS	S	M	B	RB
B	VS	RS	S	M	B
RB	LS	VS	RS	S	M

## 4 目标跟踪算法

综上所述,基于 RBPF 的多特征自适应融合的目标跟踪算法步骤如下:

(1)初始化:根据先验信息初始化粒子状态  $\{x_0^{1:i}\}_{i=1}^N$ ,设定协方差设置特征信息初始权值:  $\alpha = \beta = 0.5$ ;

(2)PF 重要性采样,由式(6)、(11)、(12)分别计算颜色似然函数、EOH 似然函数和总的似然函数,计算粒子权值并归一化,从而进行粒子权值更新,并进行粒子重采样处理;

(3)利用 PF 得到的  $x_t^{1:i}$ ,由 KF 对  $x_t^{2:i}$  和误差协方差矩阵  $P_t^2$  进行更新,用以支撑下一时刻 PF 算法的进行;

(4)计算状态均值,输出被估计状态;

(5)根据式(6)和式(11)分别计算颜色和 EOH 信息的可信度  $R_c$  和  $R_s$ ;

(6)由  $R_c$  和  $R_s$ ,根据模糊规则表调节每个特征信息的权值  $\alpha$  和  $\beta$ ,令  $t=t+1$ ,返回(2)。

## 5 仿真试验

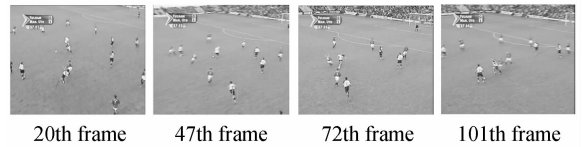
为了便于比较和说明问题,本文依次对可见光和红外三个视频序列进行跟踪仿真测试。在试验中,目标模板选为第一帧图像中的目标,目标运动模型采用一阶自回归模型,每个目标采用 200 个粒子进行跟踪,各视频参数如表 2 所示。

表 2 跟踪仿真试验视频参数表

Tab. 2 Video parameters of tracking simulation

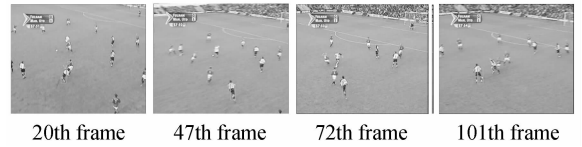
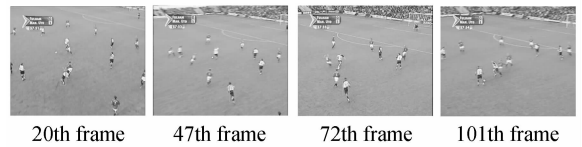
视频	视频 1(体育)	视频 2(红外)	视频 3(行人)
总帧数	238	148	83
帧大小	700×256	360×270	720×480

视频 1 仿真跟踪结果如图 3 所示。第一行是采用 PF 进行跟踪,特征采用常用的颜色直方图;第二行同样采用 PF,特征采用颜色和 EOH 融合,特征权值取固定值,即  $\alpha = \beta = 0.5$ ;第三行是



(a)基于 PF 的颜色特征目标跟踪结果

(a)Tracking result with color feature based on particle filter

(b)基于 PF 的颜色和 EOH 特征固定权值跟踪结果  
(b)Fixed weight tracking result with color and EOH features based on particle filter

(c)本文算法的跟踪结果

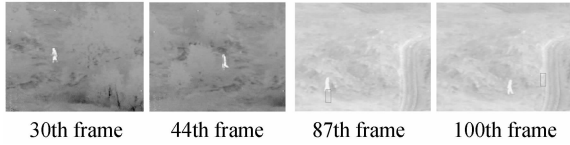
(c)Tracking results of presented algorithm

图 3 视频 1 跟踪仿真结果

Fig. 3 Tracking results of video 1

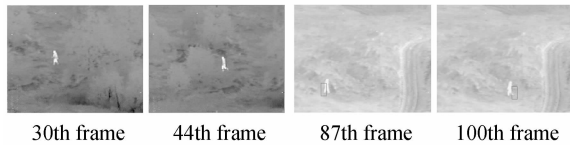
采用本文提出的算法进行跟踪。从仿真结果可以看出:第一种方法从第 47 帧之后,跟踪就已经开始偏移,到第 72 帧基本已脱离目标,到 101 帧跟踪失败;第二种方法自始至终都能跟踪到目标,但跟踪精度不高,处理速度较慢,约 20 frame/s;本文算法采用 RBPF 和积分图像提高算法速度,利用颜色矩形特征和 EOH 信息自适应融合来提高跟踪精度,这里 EOH 取 4 个方向,即  $K=4$  就可以达到很好的跟踪效果,算法处理速度约为 22 frame/s。视频 2 为红外视频目标跟踪仿真,仿真结果如图 4 所示。从仿真结果可以看出:第

一种方法跟踪失败,第二种方法跟踪精度不高,本文提出的方法可以很好的跟踪到红外目标,再一次验证了算法的性能。为了进一步测试本文算法的性能,对视频3进行了跟踪测试,仿真结果如图5所示。目标在复杂背景下由远及近运动,仿真结果表明算法在目标运动过程中能够保持很好的实时性和较高的精度。



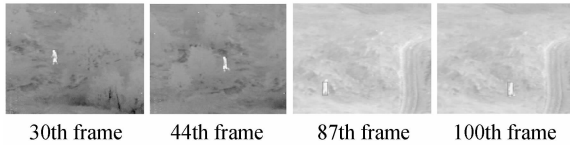
(a)基于 PF 灰度特征目标跟踪结果

(a)Tracking color feature result based on particle filter



(b)基于 PF 灰度和 EOH 特征固定权值跟踪结果

(b)Fixed weight tracking result with color and EOH features based on particle filter



(c)本文算法的跟踪结果

(c)Tracking result of presented algorithm

图4 视频2跟踪仿真结果

Fig. 4 Tracking results of video 2

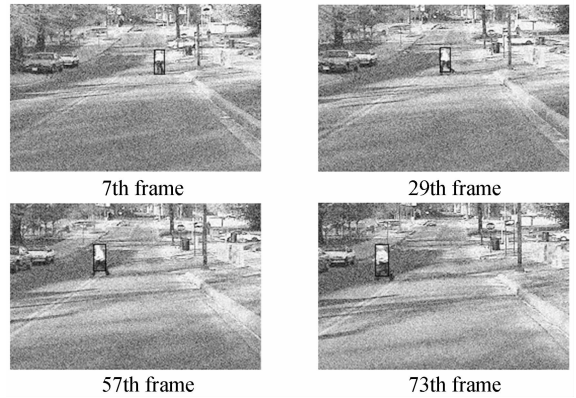


图5 视频3跟踪仿真结果

Fig. 5 Tracking results of video 3

## 6 结 论

本文主要对复杂背景下运动目标的精确可靠跟踪问题进行了研究,针对目前常用跟踪算法存在的,诸如视频目标跟踪的实时性和精度问题,提出了基于 RBPF 的颜色特征和 EOH 信息自适应融合的跟踪算法。考虑 RBPF 作为一种改进的粒子滤波算法可以减少计算量,本文采用积分图像快速计算颜色矩形特征和 EOH 信息,并根据跟踪过程中的实际情况,用模糊逻辑对两种特征信息的权重进行自适应调整以提高跟踪精度,视频目标的仿真跟踪测试验证了该算法的有效性。

## 参考文献:

- [1] HAGER G D, DEWAN M, STEWART C V. Multiple kernel tracking with SSD[C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2004:790-797.
- [2] NUMMIARO K, KOLLER-MEIER E, SVOBODA T, et al.. Color-based object tracking in multi-camera environments[C]. *Proceedings of the 25th Pattern Recognition Symposium DAGM*, 2003: 591-599.
- [3] LI P H, CHAUMETTE F, TAHRI O. A shape

- tracking algorithm for visual servoing[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005:2858-2863.
- [4] BARRON J L, FLEET D J, BEAUCHEMIN S S. Performance of optical flow techniques[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 12(1): 43-77.
- [5] SHALOMY B, RONG L X. *Estimation and Tracking Principles, Techniques, and Software* [M]. Boston: Artech House, 1992.
- [6] 赵鹏, 沈庭芝, 单宝堂. 一种基于粒子滤波的无人机电视导引系统目标跟踪算法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 134-139.

- ZHAO P, SHEN T ZH, SHAN B T. An object tracking algorithm for TV guiding system of UAV based on particle filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):134-139. (in Chinese)
- [7] 孟勃, 朱明. 粒子滤波算法在非线形目标跟踪系统中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2007,15(9):1421-1426.
- MENG B, ZHU M. Nonlinear object tracking using particle filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1421-1426. (in Chinese)
- [8] 姚剑敏, 许廷发, 倪国强. 一种基于优化小波特征的非线性目标跟踪算法[J]. *光学 精密工程*, 2007,15(3):428-433.
- YAO J M, XU T F, NI G Q. Nonlinear target tracking method based on optimized wavelet features [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(3):428-433. (in Chinese)
- [9] 程建, 周越, 蔡念, 等. 基于粒子滤波的红外目标跟踪[J]. *红外与毫米波学报*, 2006,25(2):113-117.
- CHEN J, ZHOU Y, CAI N, *et al.*. Infrared object tracking based on particle filters[J]. *Infrared Millim. Waves*, 2006,25(2):113-117. (in Chinese)
- [10] DOUCET A, GODSILL S. On sequential monte carlo sampling methods for bayesian filtering[R]. *Cambridge; University of Cambridge*, 1998:1-36.
- [11] ISARD M, BLAKE A. Condensation-conditional density propagation for visual tracking[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1998,28(1):5-28.
- [12] CASELLA G, ROBERT C P. Rao Blackwellisation of sampling schemes[J]. *Biometrika*, 1996,83(1):81-94.
- [13] 庄泽森, 张建秋, 尹建君. 混合线性/非线性模型的准高斯 Rao-Blackwellized 粒子滤波法[J]. *航空学报*, 2008,29(2):450-455.
- ZHUANG Z S, ZHANG J Q, YIN J J. Quasi-gaussian Rao-Blackwellized particle filter for mixed linear/nonlinear state space models[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2008,29(2):450-455. (in Chinese)
- [14] 李静, 陈兆乾. 基于颜色的粒子滤波非刚性目标实时跟踪算法[J]. *郑州大学学报*, 2006,38(4):60-63.
- LI J, CHEN ZH Q. An improved particle filter algorithm for color-based non-rigid object tracking [J]. *J. of Zhengzhou Univ.*, 2006,38(4):60-63. (in Chinese)
- [15] 周寿军, 陈武凡, 王涌天. 医学图像轮廓跟踪的广义模糊粒子滤波方法[J]. *计算机学报*, 2005,28(1):88-95.
- ZHOU SH J, CHEN W F, WANG Y T. Active contours tracking of medical images based on the generalized fuzzy particle filter[J]. *Chinese Journal of Computer*, 2005,28(1):88-95. (in Chinese)
- [16] MACCORMICK J, BLAKE A. A probabilistic exclusion principle for tracking multiple objects[C]. *Int'l Conf. Computer Vision*, 1999:572-578.
- [17] KHAN Z, BALCH T, DELLAERT F. A rao-blackwellized particle filter for eigen tracking[C]. *In Proc. IEEE Conf. Comp. Vision Pattern Recognition*, Washington DC, 2004,2:980-986.
- [18] BIRCHFIELD S. Elliptical head tracking using intensity gradients and color histograms[C]. *IEEE Conf. Comp. Vision Pattern Recognition*, Santa Barbara, 1998:232-237.
- [19] ISARD M, BLAKE A. Icondensation: unifying low-level and high-level tracking in a stochastic framework[C]. *European Conf. Computer Vision*, 1998,1:893-908.
- [20] WU Y. Robust visual tracking by integrating multiple cues based on co-inference learning[J]. *Int'l Journal of Computer Vision*, 2004,58(1):55-71.
- [21] VIOLA P, JONES M J. Robust real-time face detection[J]. *Int'l Journal of Computer Vision*, 2004,52(2):137-154.
- [22] LEVI K, WEISS Y. Learning object detection from a small number of examples: the importance of good features[C]. *IEEE Conf. Comp. Vision Pattern Recognition*, Washington, DC, 2004,2:53-60.

## 作者简介:



李春鑫(1980—),男,辽宁大连人,博士研究生,2003 于海军工程大学获得学士学位,2006 年于海军大连舰艇学院获得硕士学位,现于海军大连舰艇学院攻读博士,主要研究工作是视频目标跟踪技术。E-mail: chunxinlij@yahoo.com.cn

## 导师简介:



王孝通(1962—),男,浙江义乌人,教授,博士生导师,1996 年于大连理工大学获博士学位,1999 年于上海交通大学自动控制专业博士后流动站出站,主要从事信息处理工程和军事航海领域的研究。E-mail: gaiqiang@yahoo.com.cn.

## ●下期预告

## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷薄片 CO<sub>2</sub> 连续激光弯曲试验

吴东江,张 强,郭东明

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

脆性材料的激光弯曲成形技术是激光快速成形技术的重要应用,有着广阔的应用前景。本文通过改变激光功率、扫描速度等工艺参数,利用 CO<sub>2</sub> 连续激光对氧化铝陶瓷薄片进行弯曲试验,同时引入线能量密度来寻求适合弯曲的最佳工艺参数,并结合氧化铝陶瓷的高温性能分析了其激光弯曲特点。试验结果表明:采用 CO<sub>2</sub> 连续激光可以对氧化铝陶瓷薄片进行弯曲,弯曲角度可达 2°;氧化铝陶瓷的激光弯曲过程具有强烈的温度敏感性,当试样表面温度大于临界温度时,弯曲角度迅速增加;适合弯曲的最佳线能量密度范围为 17~24 J/mm。