

# Mean-shift 跟踪算法及其在光电跟踪系统中的应用

王铭明<sup>1,2</sup>, 陈涛<sup>1\*</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 阴玉梅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对光电跟踪系统中实时提取运动目标脱靶量的应用需求,设计了一种基于灰度直方图的 Mean-shift 图像跟踪算法,对算法中目标模型与候选模型的建立进行了改进,抑制了背景像素对目标跟踪产生的影响。算法在系统上位机 Visual C++ 6.0 平台上实现,当光电跟踪系统捕获到运动目标后,利用 Mean-shift 图像跟踪算法跟踪运动目标,并实时将运动目标脱靶量作为伺服控制系统的输入信号,驱动跟踪器跟踪目标。实验结果表明:设计的算法可以实时、准确、有效地跟踪运动目标,使稳定后的脱靶量换算得到的角偏差量控制在 30"之内。

**关键词:**光电跟踪系统;图像跟踪;运动目标;Mean-shift;背景加权;脱靶量

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20140702.0332

## Mean-shift tracking algorithm and its application in optoelectronic tracking system

WANG Ming-ming<sup>1,2</sup>, CHEN Tao<sup>1\*</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, YIN Yu-mei<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: chent@ciomp.ac.cn

**Abstract:** In order to fulfill the requirement to extract miss distance of moving target in real time in optoelectronic tracking system, a Mean-shift image tracking algorithm based on gray histogram is designed. The target model and the candidate model of the algorithm are improved, and the impact of background pixels on target tracking is suppressed. The algorithm is implemented in the Visual C++ 6.0 platform in the upper computer of the system. When the optoelectronic tracking system captures the moving target, the system uses the Mean-shift image tracking algorithm to track the moving target. The miss distance is used as the input signal of the servo control system to drive the tracking device to track the target. Experiment results show that the proposed Mean-shift algorithm is able to track the moving target in real time precisely and effectively so that the angle

收稿日期:2013-12-21;修订日期:2014-02-23

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 065X32CN60)

deviation can be limited within 30 arc sec.

**Key words:** optoelectronic tracking system; image tracking; moving object; Mean-shift; background weighted; miss distance

## 1 引言

光电跟踪系统是典型的光、机、电、控制和信号处理一体化的集成装置,广泛应用于实时监控、导弹导引、激光通信、武器火控系统等领域<sup>[1-2]</sup>。

光电跟踪系统的光学传感器捕捉到运动目标后,将图像信号传送至图像处理系统,图像处理系统利用图像跟踪算法跟踪运动目标,得到运动目标相对视场中心的脱靶量,并将脱靶量发送至伺服控制系统,伺服控制系统控制电机驱动负载,使光学传感器光轴始终对准目标,对运动目标完成自动跟踪。由此可见,图像处理系统对于脱靶量的准确提取是光电跟踪系统能否稳定跟踪运动目标的关键。

为提取运动目标脱靶量,需要利用图像跟踪算法实时稳定地跟踪运动目标。光电跟踪系统中图像跟踪算法有质心迭代法、相关跟踪法、波门跟踪算法、光流法和 Mean-Shift 跟踪算法等。

质心迭代法通过计算初始候选区域的质心并反复迭代,最终获得被跟踪目标的位置信息。质心迭代法的计算复杂度低,实时性好,但跟踪稳定度较低,要求被跟踪目标的像素权值较大,背景像素对目标跟踪的影响也相对较大<sup>[3]</sup>;相关跟踪算法主要是基准图像的匹配过程,是应用较广的一种跟踪算法,可用来跟踪较小、对比度较差或背景较复杂的运动目标,但是相关跟踪算法的运算量较大,而且目标运动、图像噪声干扰等因素会影响跟踪算法的可靠性;波门跟踪算法可分为矩心跟踪算法、边缘跟踪算法、双边边缘跟踪算法和区域平衡跟踪算法,其中矩心跟踪算法是以阈值分割图像预处理为基础确定目标中心位置的算法,矩心跟踪算法计算简便、精度较高,适合背景单一的目标稳定跟踪,另外几种波门跟踪算法稳定度较差,在光电跟踪系统中应用较少;光流法给图像的每

一个像素点赋予一个速度矢量,根据各个像素点的速度矢量特征,可以对图像进行动态分析。但光流法计算量非常大、实时性很差,对于光电跟踪系统的硬件处理能力具有很高的要求<sup>[4]</sup>。

本文采用基于灰度直方图的 Mean-shift 图像跟踪算法。Mean-shift 算法是一种基于密度梯度的无参数估计方法<sup>[5-6]</sup>,在目标跟踪方面,Mean-shift 算法具有很高的稳定性,其迭代次数少、计算量小,能够保证目标跟踪系统的实时性和稳定性,已经广泛应用于目标实时跟踪系统中<sup>[7-16]</sup>。本文针对光电跟踪系统跟踪运动目标的实际效果,对 Mean-shift 算法的目标模型与候选模型的建立进行改进,引入了背景加权系数,抑制了目标模型与候选模型中背景像素对目标跟踪产生的影响,实验结果证明了本文介绍的图像跟踪算法在光电跟踪系统中具有较高的工程应用价值。

## 2 Mean-shift 算法原理

Mean-shift 跟踪算法是一个迭代过程,即先算出当前点的偏移值,移动该点到偏移值,计算目标模型与候选模型的相似性函数系数,相似性函数系数越大,表示目标模型与候选模型越匹配,然后以此点为新起点,继续移动,直到寻找到相似性函数系数取得最大值的点,这个点就是 Mean-shift 跟踪算法得到的被跟踪目标的中心位置。由于被跟踪目标的灰度特征便于描述,且稳定性较好,所以本算法选择灰度空间作为特征统计空间。

Mean-shift 跟踪算法主要包括 3 个步骤:目标模型和候选模型的建立,相似性度量,目标定位。

### 2.1 目标模型和候选模型的建立

为了完成对运动目标地稳定跟踪,首先需要目标模型进行描述,确定被跟踪目标模型的特征空间并计算该区域的加权灰度直方图,通过  $n$  级核加权直方图来表示目标模型的灰度分布,如式(1)所示。

$$q_u = C \sum_{i=1}^n k\left(\left\|\frac{x_0 - x_i}{h}\right\|^2\right) \delta[b(x_i) - u], \quad (1)$$

式中:  $x_i (i=1, \dots, n)$  表示像素在目标模型中的位置, 且其中心位置为  $x_0$ ,  $b(x_i)$  表示目标模型图像中位置  $x_i$  处的像素灰度,  $C$  是归一化系数,  $C =$

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^n k\left(\left\|\frac{x_0 - x_i}{h}\right\|^2\right)},$$

$h$  为带宽,  $k(x)$  是核函数的轮廓函数。由于目标模板区域的边缘像素易受遮挡和背景噪声的干扰, 使用核函数进行加权处理可以起到弱化边缘像素而突出中心像素的作用, 因此本文选择 Epanechnikov 核函数, 核函数如式(2)所示。

$$k(x) = \begin{cases} 1 - x, & \text{if } (\|x\| < 1) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (2)$$

目标模型建立后, 运动目标在第二帧和以后每帧中可能包含目标的区域称为候选目标区域。令  $y_i (i=1, \dots, n)$  表示像素在候选目标区域中的位置, 其中心位置设为  $y_0$ , 与式(1)相似, 以  $y_0$  为中心的候选模型可表示成  $p_u(y)$ , 如式(3)所示。

$$p_u(y) = C \sum_{i=1}^n k\left(\left\|\frac{y_0 - y_i}{h}\right\|^2\right) \delta[b(y_i) - u], \quad (3)$$

式中:  $C = \frac{1}{\sum_{i=1}^n k\left(\left\|\frac{y_0 - y_i}{h}\right\|^2\right)}$ .

## 2.2 相似性度量

在利用 Mean-shift 跟踪算法跟踪运动目标时, 需要相似性函数度量目标模型与候选模型的匹配程度, 即  $p_u(y)$  与  $q_u$  的相似程度。

本文使用 Bhattacharyya 系数作为相似性函数, 如式(4)所示。

$$\hat{\rho}(y) \equiv \rho[p(y), q] = \sum_{u=1}^m \sqrt{p_u(y)q_u}. \quad (4)$$

Bhattacharyya 系数的值在 0 ~ 1 之间。  $\hat{\rho}(y)$  越大, 表示候选目标与模板目标越匹配, 那么对应的中心  $y$  越有可能是被跟踪目标在当前帧图像中的位置。

目标跟踪的过程即是寻找最优的  $y$ , 使得

Bhattacharyya 系数最大。

## 2.3 目标定位

Mean-shift 图像跟踪算法目标定位的过程是利用计算得到的均值向量反复迭代, 更新核函数窗口的中心位置, 直到满足判断条件, 算法主要分为以下几个步骤:

(1) 计算当前窗内各像素点的权重:

$$w_i = \sum_{u=1}^m \sqrt{\frac{q_u}{p_u(y_0)}} \delta[b(y_i) - u]. \quad (5)$$

(2) 计算候选目标的下一个新位置:

$$y_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i w_i g\left(\left\|\frac{y_0 - y_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n w_i g\left(\left\|\frac{y_0 - y_i}{h}\right\|^2\right)}, \quad (6)$$

式中:  $g(x) = -k'(x)$ 。

(3) 判断是否需要继续计算

首先判断是否  $\|y_1 - y_0\| < \varepsilon$ , 如不等式成立, 则停止计算, 得到被跟踪目标的位置信息, 否则将  $y_1$  替  $y_0$  返回到目标定位过程的第一步, 继续寻找满足判断条件的候选目标位置。由于光电跟踪系统对实时性具有较高的要求, 所以实际应用中设定迭代次数最多是 30 次。

## 3 Mean-shift 跟踪算法的改进

利用传统的 Mean-shift 图像跟踪算法, 在建立目标模型区域的加权灰度直方图时, 被跟踪目标图像像素与背景图像像素都会对目标灰度直方图的分布产生影响。当目标模型区域中包含的背景区域像素较少时, 传统的 Mean-shift 跟踪算法可以得到较好的跟踪效果, 但在目标模型区域中包含背景图像像素较多或者背景不断变化的情况下, 容易造成候选区域直方图与目标模型区域直方图的最佳匹配位置有所偏差, 尤其对于快速运动目标的跟踪, 容易导致目标丢失<sup>[17-19]</sup>。

为减少背景像素对目标跟踪产生的影响, 本文对目标模型和候选模型均采用背景加权的方法。如果某灰度特征值在背景灰度直方图所占权重较大, 在建立目标模型和候选模型时对此灰度特征值赋予较小权重; 相反如果某灰度特征值在背景灰度直方图所占权重较小, 则在建立目

标模型和候选模型时对此灰度特征值赋予较大权重。利用此方法可以有效抑制背景像素对目标跟踪产生的影响,实现了对 Mean-shift 算法跟踪准确性的有效改进。具体实现方法如下:

### 3.1 计算背景区域灰度直方图

首先计算目标模板以外一定区域的背景灰度直方图,如式(7)所示。

$$O_u = \sum_{i=1}^n k_2 \left( \left\| \frac{x_0 - x'_i}{h} \right\|^2 \right) \delta [b(x'_i) - u], \quad (7)$$

式中: $x'_i (i=1, \dots, n)$ 表示像素在背景区域中的位置,其中心位置为 $x_0$ ,令 $b(x'_i)$ 表示位置 $x'_i$ 处的像素灰度, $k_2(x)$ 是核函数,此时的核函数如式(8)所示。

$$k_2(x) = \begin{cases} x, & \text{if } (1 < \|x\| \leq 2) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (8)$$

### 3.2 计算背景加权系数

通过 $O_u$ 可以计算得到背景加权系数 $\lambda_u (u=1, \dots, m)$ ,如式(9)所示。

$$\lambda_u = \min(O_{\min}/O_u, 1), \quad (9)$$

式中: $O_{\min}$ 是 $O_u$ 中最小的非零值。

### 3.3 计算背景加权后的目标模型和候选模型

在得到背景加权系数 $\lambda_u$ 后,即可计算背景加权后重新定义的目标模型和候选模型,如式(10)和式(11)所示。

$$q_u = C_1 \sum_{i=1}^n k \left( \left\| \frac{x_0 - x_i}{h} \right\|^2 \right) \lambda_u \delta [b(x_i) - u], \quad (10)$$

$$p_u(y) = C_2 \sum_{i=1}^n k \left( \left\| \frac{y_0 - y_i}{h} \right\|^2 \right) \cdot \lambda_u \delta [b(y_i) - u], \quad (11)$$

式中,  $C_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n k \left( \left\| \frac{x_0 - x_i}{h} \right\|^2 \right) \lambda_u}$ ,  $C_2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n k \left( \left\| \frac{y_0 - y_i}{h} \right\|^2 \right) \lambda_u}$ , 分别是重新定义的目标模型和候选模型的归一化常数。

## 4 实验结果与分析

为验证改进后的 Mean-shift 图像跟踪算法在

光电跟踪系统中的应用效果,利用光电跟踪系统跟踪民航飞机。光电跟踪平台实物图如图1所示。



图1 光电跟踪平台实物图

Fig. 1 Optoelectronic tracking platform picture

当飞机飞进光电跟踪系统附近空域时,开启大视场捕获相机,转动单杆控制光电跟踪平台,使飞机进入大视场捕获相机的视场中心,这时目标飞机也将出现在小视场跟踪相机的视场中,手动选取初始跟踪框在跟踪相机视场中锁定跟踪目标,进入自动跟踪模式,录像并记录数据。

进入自动跟踪模式后,每隔 25 frame 记录存储一张跟踪图像,由于跟踪相机的帧频是 25 frame/s,所以每两张存储图像的间隔约为 1 s。进入自动跟踪模式后的跟踪存储图像如图2所示,被跟踪的飞机一直比较稳定地处于跟踪相机

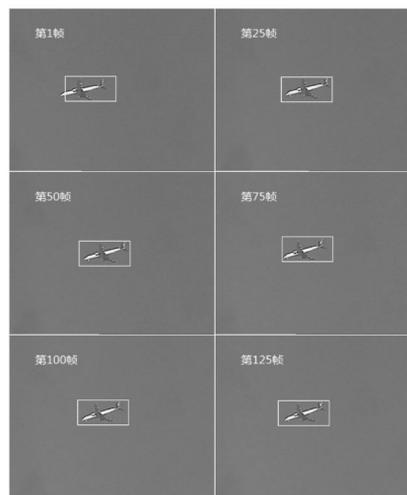


图2 跟踪图像

Fig. 2 Tracking image

视场中心附近,由此可知,基于目标灰度直方图的改进 Mean-shift 图像跟踪算法可以准确地跟踪飞

机目标,并将飞机距离相机视场中心的脱靶量实时发送至光电跟踪系统的伺服控制系统,使飞机始终位于图像的中心区域附近,完成对运动目标的实时稳定跟踪。通过脱靶量换算得到的俯仰轴角偏差量如图3所示,方位轴角偏差量如图4所示。

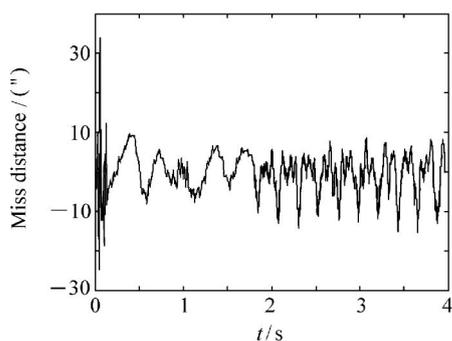


图3 俯仰轴角偏差量

Fig. 3 Angle deviation of pitch axis

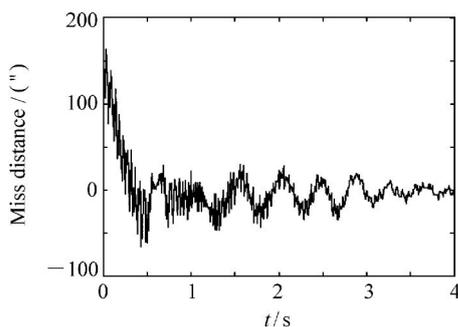


图4 方位轴角偏差量

Fig. 4 Angle deviation of azimuth axis

通过图3和图4记录的角偏差量波形可以发现,由于飞机基本做水平飞行,因而在跟踪过程中光电跟踪平台的俯仰轴转动范围很小,导致俯仰

轴方向脱靶量在较小的范围内浮动,进入稳态后,俯仰轴角偏差量能控制在 $15''$ 之内,光电跟踪平台的方位轴要跟随飞机水平飞行而不断转动,加上脱靶量延迟等因素,导致方位轴方向的脱靶量相对俯仰轴较大,在进入稳定后,方位轴的角偏差量可控制在 $30''$ 之内。

改进的 Mean-shift 图像跟踪算法是在上位机 Microsoft Windows XP 的 Visual C++ 6.0 软件平台下实现的。上位机的配置是 Intel Celeron G550 双处理器,2.6 GHz 主频,4 G 内存和 500 G 硬盘。图像大小为  $720 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$ ,每帧图像的跟踪处理时间在 25 ms 以内,跟踪相机的帧频是 25 frame/s,可以保证光电跟踪系统对于图像处理的实时性要求。

实验证明了改进的 Mean-shift 图像跟踪算法的有效性,满足了光电跟踪系统中实时提取运动目标脱靶量的实际需求,实验结果达到了预期效果。

## 5 结 论

本文针对光电跟踪系统中实时提取运动目标脱靶量的应用需求,设计了一种基于灰度直方图的 Mean-shift 跟踪算法,并在传统算法的基础上,改进了目标特征选取机制,重新定义了背景加权后的目标模型和候选模型。实验证明:所设计的图像跟踪算法可以实时有效地跟踪运动目标,使稳定后运动目标脱靶量换算得到的角偏差量控制在 $30''$ 之内,保证了光电跟踪系统对运动目标的实时准确跟踪。

## 参考文献:

- [1] 侯志强,韩崇昭. 视觉跟踪技术综述[J]. 自动化学报,2006,32(4):603-617.  
HOU ZH Q,HANG CH ZH. A survey of visual tracking[J]. *Acta Automatica Sin.*,2006,32(4):603-617. (in Chinese)
- [2] 张秉华,张守辉. 光电成像跟踪系统[M]. 成都:电子科技大学出版社,2003.  
ZHANG B H,ZHANG SH H. *Optical Imaging Tracking System*[M]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China Press,2003. (in Chinese)
- [3] 吕娜,冯祖仁. 质心迭代图像跟踪算法[J]. 西安交通大学学报,2007,41(12):1387-1391.  
LÜ N,FENG Z R. Centroid iteration image tracking algorithm[J]. *J. Xi'an Jiaotong University*,2007,41(12):1387-1391. (in Chinese)

- [4] 孙承志,熊天忠,吉顺平,等.基于差分的光流法在目标检测跟踪中的应用[J].机床与液压,2010,38(14):59-62.  
SUN CH ZH,XIONG T ZH,JI SH P,*et al.*. Application of optical flow algorithms based on difference in target detection and tracking[J]. *Machine Tool Hydraulics*,2010,38(14):59-62. (in Chinese)
- [5] CHEN Y Z. Mean shift, mode seeking, and clustering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 1995,17(8):790-799.
- [6] 冯伟兴,唐墨,贺波,等. Visual C++ 数字图像模式识别技术详解[M].北京:机械工业出版社,2010.  
FENG W X,TANG M,HE B,*et al.*. *Digital Image Pattern Recognition Programming Using Visual C++* [M]. Beijing: China Machine Press,2010. (in Chinese)
- [7] 毛建国,柏方超,沈岷,等.复杂场景下动态目标视觉跟踪方法[J].传感器与微系统,2010,29(3):23-28.  
MAO J G,BAI F CH,SHEN H,*et al.*. Vision based dynamic target tracking under complicated scenes[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*,2010,29(3):23-28. (in Chinese)
- [8] 颜佳,吴敏渊,陈淑珍,等.应用 Mean Shift 和分块的抗遮挡跟踪[J].光学精密工程,2010,25(6):890-895.  
YAN J,WU M Y,CHEN SH ZH,*et al.*. Anti-occlusion tracking algorithm based on Mean Shift and fragments[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,25(6):890-895. (in Chinese)
- [9] 胡明昊,任明武,杨靖宇.一种基于直方图模式的运动目标实时跟踪算法[J].计算机工程与应用,2004(3):71-74.  
HU M H,REN M W,YANG J Y. A real-time moving object tracking algorithm based on histogram model[J]. *Computer Eng. Appl.*,2004(3):71-74. (in Chinese)
- [10] 黄永梅,马佳光,付承毓.目标速度预测在光电跟踪控制系统中的应用[J].红外与激光工程,2004,33(5):477-481.  
HUANG Y M,MA J G,FU CH Y. Application of forecast of moving target velocity in electro-optical tracking control system[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2004,33(5):477-481. (in Chinese)
- [11] 薛陈,朱明,刘春香.遮挡情况下目标跟踪算法综述[J].中国光学,2009,2(5):388-394.  
XUE CH,ZHU M,LIU CH X. Review of tracking algorithms under occlusions[J]. *Chinese Optics*,2009,2(5):388-394. (in Chinese)
- [12] 张玲,蒋大永,何伟,等.基于 Mean-shift 的改进目标跟踪算法[J].计算机应用,2008,28(12):3120-3122.  
ZHANG L,JIANG D Y,HE W,*et al.*. Improved target tracking algorithm based on Mean-shift[J]. *Computer Appl.*, 2008,28(12):3120-3122. (in Chinese)
- [13] 彭宁嵩,杨杰. Mean-Shift 跟踪算法中核函数窗宽的自动选取[J].软件学报,2005,16(9):1542-1550.  
PENG N S,YANG J. Automatic selection of kernel-bandwidth for Mean-Shift object tracking[J]. *J. Software*,2005,16(9):1542-1550. (in Chinese)
- [14] 彭宁嵩,杨杰. Mean-Shift 跟踪算法中目标模型的自适应更新[J].数据采集与处理,2005,20(2):125-129.  
PENG N S,YANG J. Mean-shift tracking with adaptive model update mechanism[J]. *J. Data Acquisition Processing*, 2005,20(2):125-129. (in Chinese)
- [15] 颜佳,吴敏渊,陈淑珍,等.跟踪窗口自适应的 Mean Shift 跟踪[J].光学精密工程,2009,17(10):2606-2611.  
YAN J,WU M Y,CHEN SH ZH,*et al.*. Mean Shift tracking with adaptive tracking window[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(10):2606-2611. (in Chinese)
- [16] COMANICIU D,RAMESH V,MEER P. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift[J]. *IEEE*,2000,2: 142-149.
- [17] 王田,刘伟宁,韩广良,等.基于改进 Mean-Shift 的目标跟踪算法[J].液晶与显示,2012,27(3):396-400.  
WANG T,LIU W N,HANG G L,*et al.*. Target tracking algorithm based on improved Mean-Shift[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*,2012,27(3):396-400. (in Chinese)
- [18] 杜超,刘伟宁,刘恋.一种基于卡尔曼滤波及粒子滤波的目标跟踪算法[J].液晶与显示,2011,26(3):384-389.  
DU CH,LIU W N,LIU L. Target tracking algorithm based on kalman filter and particle filter[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*,2011,26(3):384-389. (in Chinese)
- [19] 刘扬,张云峰,董月芳.复杂背景下抗遮挡的运动目标跟踪算法[J].液晶与显示,2010,25(6):890-895.

LIU Y, ZHANG Y F, DONG Y F. Anti-occlusion algorithm of tracking moving object in clutter background[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(6): 890-895. (in Chinese)

作者简介:



王铭明(1987—),男,吉林长春人,硕士研究生,2007年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事图像处理,图像跟踪、嵌入式系统等方面的研究。E-mail: marswmm@126.com



曹景太(1985—),男,黑龙江大庆人,博士研究生,助理研究员,2007年、2009年于吉林大学获得学士、硕士学位,主要从事高速图像处理、嵌入式系统方面的研究。E-mail: jingtai1985@163.com



陈涛(1965—),男,内蒙古赤峰人,博士,研究员,博士生导师,1987年于大连理工大学获得学士学位,1990年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电精密跟踪测量技术方面的研究。E-mail: chent@ciomp.ac.cn



阴玉梅(1960—),女,吉林长春人,副研究员,主要从事电子信息技术、制造工艺等方面的研究。E-mail: 453528606@qq.com