

景象匹配算法研究进展与展望

谭志园¹, 孙继银², 王 忠², 张财兴¹

(1. 中国人民解放军 96401 部队, 陕西 宝鸡 721013;
2. 第二炮兵工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要:景象匹配是精确制导武器精确定位目标的重要方法,景象匹配算法决定了精确制导武器系统的作战性能。论文介绍了景象匹配算法实现的关键要素,详细综述了具有代表性的基于区域、基于特征、基于变换域以及基于模型的四类匹配算法的不同原理、适用性及其改进算法,探讨了景象匹配算法中有待进一步研究的问题和未来发展的方向,为未来的景象匹配制导研究工作提供技术参考和依据。景象匹配制导技术正朝着更稳定可靠、更智能、更快捷、更精确的方向发展,必将推动精确制导武器装备实现现代化和自动化。

关键词:景象匹配;相似性度量;矩不变量;角点;SIFT

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)09-0066-05

Status and Prospect of Algorithm for Scene Matching Systems

TAN Zhi-yuan¹, SUN Ji-yin², WANG Zhong², ZHANG Cai-xing¹

(1. Troops No. 96425 of PLA, Baoji 721013, China;
2. Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: Scene matching is the important method to pinpoint targets for precision guide weapon. Scene matching algorithm determines the operational performance of the precision weapons system. In this paper, the key elements of scene matching algorithm are introduced, describe the different principle and applicability of some representative algorithms which include the classical algorithms based on region, feature, transformation domain and model as well as its improved method in detail, the issue needed to be investigated farther and future direction is discussed. Provide the technical reference and basis for scene matching systems in the future. The development of scene matching guidance technology which will push precision weapons equipment minute and automatic will be more intelligent, faster and more accurate.

Key words: scene matching; similarity measure; moment invariant; angular point; SIFT

0 引言

图像匹配是指通过某种匹配算法在两幅或多幅图像之间把一个图像区域从目标区域中识别出来,找到它们之间的识别同名点的图像分析与图像处理技术。图像匹配技术具有重要的应用价值,在许多领域发挥了关键作用,如在导弹制导系统模板匹配的军事应用领域,生理病变检测的医药领域,基于主成分分析的指纹、虹膜以及人脸识别等民用领域等等^[1]。

景象匹配是一类特殊的图像匹配技术,参与匹配的实时图像来源可以是 SAR 图像、航空照片、红外图像、卫星照片等,且背景常常是分辨率较低的复杂自然

场景^[2]。它的概念来源于 1992 年的海湾战争。景象匹配是精确制导武器高精度定位目标的关键技术之一,广泛地应用在各种飞行器的制导中。寻找实现速度快、高精度、鲁棒性好的匹配算法,一直是景象匹配研究的方向和目标,经过研究者多年的努力,景象匹配算法研究已经发展和形成了一套完整的体系。

1 景象匹配算法实现关键要素

根据实际应用的需要,人们在提高匹配精度、匹配速度、实时性以及抗干扰性等方面做了大量的研究工作,取得了丰硕成果^[3]。

现在普遍认为匹配算法研究的关键要素有四个方面分别是特征空间、搜索空间、相似性度量和搜索策略^[4~7]。人们提出的各种适应性景象匹配算法都是在这四个要素出发,有效组合的结果,算法的改进也是基于这四个要素中一个方面或几个方面,融合新的思路或理论实现算法改进的。

收稿日期:2012-02-05; **修回日期:**2012-05-11

基金项目:总装武器装备预研基金(513220208)

作者简介:谭志园(1986-),女,山东菏泽人,助理讲师,硕士研究生,研究方向为图像匹配与目标识别;孙继银,教授,研究方向为指挥自动化及航空信息应用等。

1.1 特征空间

特征空间是指参与匹配的多幅图像共同具有某些的特征所构成的一定空间,这些特征构成了待匹配图像的基本元素,反映了图像的某种特质以及基本的信息。对图像进行不同角度的分析,即可抽象提取出不同的图像特征信息。像素值是反映图像信息的基本元素,包含了最丰富最直接的图像信息,是景象匹配算法中广泛应用的图像特征。为了进一步克服实时图像由于受到成像、环境以及不同相源等多种因素的影响而产生噪声和灰度畸变的情况研究人员利用数理统计方法提出了如直方图、信息熵等以景象区域像素灰度值的统计特征描述图像局部信息的方法,取得了良好的实验效果。根据图像典型结构作为特征提取是另一种有效的特征空间,能够弥补灰度特征的不足,具有较好的鲁棒性,但匹配的目标图像一定要有明确的几何形状作为前提。在图像分析领域,还有基于解释的图像特征抽象,这是更高一级的结构抽象称为高层结构描述^[3]。

1.2 搜索空间

搜索空间是指在景象匹配过程中对图像进行变换的方式及范围。这些变换的基本操作包括:目标尺度的改变、目标图像的平移、目标图像的旋转、仿射变换、透视变换等^[4]。图像的变换方式主要有线性变换和非线性变换两种。常见的线性变换有刚体变换(Rigid Body Transform)、仿射变换(Affine Transform)和投影变换(Projective Transform)。非线性变换一般使用多项式函数,如二次、三次函数及薄板样条函数,有时也使用指数函数^[5]。

1.3 相似性度量

相似性度量指用什么度量来确定待匹配特征之间的相似性,它通常定义为某种代价函数或者是距离函数的形式^[5]。相似性度量是衡量图像匹配变换结果优劣的准则,对变换结果进行评估,为搜索策略的下一步动作提供依据。归一化积相关(Nprod)和 Hausdorff 距离是经典的相似性度量方法。工程上常用的相似性度量还包括联合熵、相关性、互信息、梯度差、模式灰度、梯度互相关、欧氏距离等。

1.4 搜索策略

搜索策略是在搜索空间中用一种有效的搜索算法,通过检测某种图像变换类型后的变换参数 进行估计,从而找出相似性度量值最大值的方法。在搜索范围大,搜索空间复杂的情况下,搜索策略的选择十分重要,找到有效的搜索策略它 will 有效减小搜索范围,提升算法整体速度。搜索算法可以是基于广度优先或者是基于深度优先的搜索方法,它的思路可以是盲目搜索也可以是启发式搜索。通过现有算法的总结具有代表

性的搜索算法包括与树图、多尺度搜索、序贯判决、广义 HOUGH 变换、穷举法、线形规划、动态规划等。上述四个要素共同组成了景象匹配算法,每种算法都要根据匹配目标的种类和具体应用确定特征空间,运用一定的搜索策略在图像变换类型的基础上找到相似性度量的最大值,完成匹配。它们之间的关系如图 1 所示:

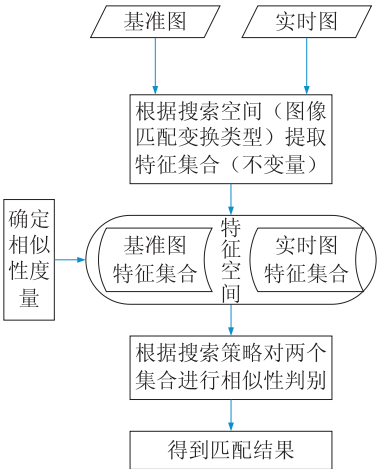


图 1 景象匹配四要素

2 景象匹配算法研究

由于不同应用领域的特点,各种景象匹配算法的适用范围也有一定的局限性。目前,有很多的研究是在某些特定的应用背景下提出的。依据图像特征提取的层次可分为基于灰度的景象匹配算法、基于图像物理形状特征的匹配和基于高级特征的匹配^[8];依据参与匹配运算的数据结构的不同,匹配算法可以分为基于区域的匹配算法和基于特征的匹配算法;近年来,神经网络、进化算法等智能优化算法在目标匹配中也得到了应用^[7]。郭勤在此基础上又将景象匹配算法进一步划分为基于区域的匹配,基于解释的匹配和基于特征的匹配^[9]。该文将景象匹配算法划分为四大类:基于区域的匹配算法、基于特征的匹配算法、基于变换域的匹配算法以及基于模型的匹配算法,并对每一类景象匹配算法的不同原理及适用性,逐一进行介绍。

2.1 基于区域的景象匹配算法

2.1.1 算法的定义和实现

基于区域的匹配算法研究已经比较成熟,主要运用于各种不存在旋转变化的匹配对象,在巡航制导中,传统的下视匹配采用的就是这种算法,由于基准图与弹载相机所拍的实时图属同源图像,图像灰度差异及各种形变小,因此匹配的效果很好,匹配算法的适应性很强。在工程实践中这类算法得到了广泛应用。基于区域的匹配算法用数学描述的形式如下:建立一个目标模板 T(template)其大小(size)为 $m \times n$,对应的像素

灰度表示为 $t(x, y)$, $x \in [1, m]$, $y \in [1, n]$, 目标图像 (实时图) I 大小为 $M \times N$, 其对应点的像素灰度值为 $f(x, y)$, $x \in [1, M]$, $y \in [1, N]$ 。模板 T 在图像 I 中以不同的中心点依次扫描与自身大小相同的区域, 匹配比较找出最相似某个区域, 即满足:

$$(x', y') = \arg \max / \min d(x, y) \quad (1)$$

其中, $x \in [1, M - m + 1]$, $y \in [1, N - n + 1]$

(x', y') 即为匹配位置坐标, $d(x, y)$ 为点 (x, y) 处实时图 I 和模板 T 之间的相似度。

基于灰度相关的匹配算法是区域匹配中最为常见的, 在工程实践中具有重要地位, 其重要环节主要是对相似性度量函数的选择和求解。绝对差 (Absolute Difference)、平均绝对差 (Mean Absolute Difference)、零均值平均绝对差 (Zero Average Mean Absolute Difference)、平均平方差 (Mean Difference Square)、零均值平均平方差 (Zero Average Mean Difference Square) 以及归一化积相关 (Nprod, Normalized Product Correlation) 等都是常见的相似性度量。其中, Leese 提出的平均绝对差算法 (MAD) 和 Silverman 提出的归一化积相关 (Nprod) 是基于灰度相关的经典算法。其相似度量函数分别为:

MAD 算法的度量函数:

$$d(x, y) = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |f(x + i, y + j) - t(i, j)| \quad (2)$$

Nprod 算法的度量函数为:

$$d(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x + i, y + j) t(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t(i, j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x + i, y + j)^2}} \quad (3)$$

Nprod 算法函数表达的是对目标图像 I 与模板 T 对应像素值乘积的平均值的求解, 函数值最大时, 即为最终的匹配点^[10]。Nprod 没有伪极大值, 不受图像间刻度误差的影响, 在导弹制导、跟踪和预警等工程应用中, 常被用作相似性度量。

2.1.2 算法改进

根据基于区域的景象匹配算法的数学描述, 设每个像素点上计算相似度量函数 $d(x, y)$ 所消耗的时间为 t , 那么完成整个匹配过程所需的时间即为 $(M - m + 1) \times (N - n + 1) \times m \times n \times t$ 。可见, 随着待匹配图像尺寸的增大, 运算量成倍加大, 为此产生了许多快速算法, 在搜索策略上进行了改进。包括变灰级相关算法、变分辨率相关算法、傅里叶变换快速相关算法 (FFT) 和序贯相似性检测算法 (Sequence Similar Detection Arithmetic, SSDA) 等等。SSDA 算法是一种被广泛应用

的快速景象匹配算法, 其相似性度量以平均绝对差 (MAD) 为基础。在国外 Mikhail H Atallah, Federico Tombari^[11] 和 Di Stefano, S. Mattoccia 等人分别对 MAD、SSDA 和 NCC 算法进行了改进, 李俊山^[12] 等人提出了一种基于边缘特征, 采用单调递减的阈值序列 SSDA 改进算法, 该算法综合利用了图像的梯度信息和灰度信息, 同时改进算法搜索策略, 提高了算法计算速度。刘国权^[13] 等人提出了一种基于小波金字塔的 SSDA 快速模板匹配算法, 通过改进算法搜索策略, 不断对阈值进行自适应更新来减少运算量。刘晓光等人提出了一种单调递减阈值自适应的 SSDA 算法^[14], 利用序列来代替固定阈值以达到阈值的目的, 减少了匹配搜索范围, 提高了匹配精度。

2.2 基于特征的匹配算法

基于特征的匹配算法能够克服图像旋转以及图像尺度变换对图像匹配造成的影响, 较传统的区域匹配有很强的抗干扰性。随着对基于特征匹配的研究不断发展和深入, 形成了很多成熟的研究成果。特征提取类型通常可分为三类: 边缘特征、区域特征以及点特征^[10]。

2.2.1 边缘特征

图像的边缘保留了图像最基本也是最重要的信息。反映出图像的形状纹理等宏观特性。它是图像的高频分量和低频分量发生陡然骤变的区域, 对图像噪声模糊能敏感反映出来, 基于简单清晰的思路边缘检测算法同样易于实现。好的分割算法是边缘提取的关键, 通常用数学形态学的方法过滤掉杂乱的边界并加宽边界作为分割方法, 在图像结构特征不发生变化的情况下, 可以有效抵御灰度畸变对图像结构的影响。但是, 图像的边缘特征提取对发生旋转、缩放等几何畸变的图像适应性弱, 提取效果很不理想, 在这种情况下, David M. Mount 提出了将边界点作为点特征, 并用 Hausdorff 距离方法作为相似性度量, 采用 “branch-and-bound”^[15] 算法作为搜索策略对特征空间进行搜索, 实验证明该算法具有很好的鲁棒性。在算法中, X. L. Dai 首次提出了用链码进行描述, 采用轮廓链码匹配算法完成相关匹配^[1]。研究者提出了很多轮廓描述的方法有用轮廓分段表示成线段进行描述的、有傅里叶描述子以及弧等^[16, 17]。边缘检测算子的设计研究是根据图像边缘不同方向像素变化的程度而设计提出的。现在常见的边缘检测算子有 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子、Laplacian 算子以及 Canny 算子等。

2.2.2 区域特征

如果具有较明显的区域性, 比如海空、陆空等几何区域, 则可采用基于区域统计特征的匹配算法。景象匹配的纹理和重心特征都归为区域特征。早在 20 世

纪 70 年代,Haralick 等就提出用共生矩阵表示纹理,但共生矩阵提取的纹理特征缺乏明确视觉意义^[18]。从人类视觉感知心理学角度出发,Tamura 等提出六种纹理特征:粗糙度、方向性、类线性、对比度、规整度和粗糙度。从 90 年代以来,纹理分析受到了人类视觉系统(HVS)的启发,形成了如 Gabor 滤波器和小波变换等多分辨率空间/尺度纹理模型^[19]。基于该思想,孙继银^[5]等人提出了一种结合无下采样轮廓波变换(Non-subsampled Contourlet Transform, NSCT)和 LBP 特征的局部不变纹理描述子,不仅能有效地表示图像局部纹理描述,同时可以很好地描述图像空间结构等重要信息,进而实现精确匹配。David G. Lowe 对国内外现有的包括矩不变量等多种基于不变量技术的特征检测方法进行了总结,并提出了图像局部特征描述算子 SIFT (Scale Invariance Feature Transform)称为尺度不变特征转换,这种局部特征不变量的原理是基于尺度空间理论提出来的。SIFT 算子对于图像旋转、尺度缩放、亮度变化、仿射变换以及噪声干扰都具有较好的鲁棒性。近年来成为了特征匹配算法中的研究热点,是亚精度匹配的关键技术,同时基于它的改进算法层出不穷,如 PCA-SIFT、SURF、SSIFT^[20,21]等。

2.2.3 点特征

图像的点特征是匹配中较为常用的特征之一,目前研究者发现的特征点有很多,包括拐点、交叉点、轮廓上曲率最大点及质心等。Moravec 提出的角点检测算法,是特征提取的一个重要发现。它通过对区域亮度梯度变化的最值计算实现分割,通常角点信息包含了图像中的重要信息,且数目相对较少,随着算法的改进,目前角点检测算法主要有 Moravec 算子,Hannah 算子,Dreschler 算子、Forstner 算子、Harris 算子、Beaudet 算子、Plessey 算子及小波算子等等^[10]。

Harris 和 Stephens 通过对 Moravec 角点检测算法进行改进提出了 Hessian 算子,虽然一定程度提高了算法的鲁棒性,但对于图像的尺度变化还存在很大的局限性,因此,Mikolajczyk 和 Schmid 通过利用 Linderberg 提出的图像尺度空间理论,提出了 Harris-Laplace 检测算子和 Hessian 仿射不变算子,有效地改进了算法的鲁棒性。Smith 等设计提出的 SUSAN 角点检测算子,因其设计简单易行在准确搜索角特征点的同时具有良好的抗噪声干扰能力,而得到广泛应用。

2.3 基于变换域的匹配算法

基于变换域的匹配算法可以分为基于图像空间域和基于频率域变换的匹配^[8]。以往的景象匹配算法多是基于图像空间域上的匹配算法,近年来,在频率域上进行匹配的景象匹配技术不断发展起来,成为景象匹配技术研究的热点。傅里叶变换以及现在十分常见的

小波变换都属于频率域的变换。傅里叶变换的原理是用复数乘法代替原来空间运算的卷积。小波图像金字塔的思想如图 2 所示,其原理是对图像进行小波分解用低通分解滤波(对应尺度分析函数)和高通分解滤波(对应分析小波)对图像的行列分别进行滤波(卷积),然后进行 2 取 1 的亚抽样。这样得到一次小波变换的结果 4 个子带分量,分辨率降为 1/2,同样的方法进行二次变换,频率范围进一步减半,依此进行多次小波变换。

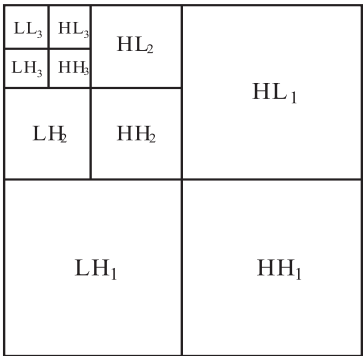


图 2 三层小波分解

小波变换工具由于具有良好的时频局部化特性和计算上的简单性。由于小波变换的灵活性以及丰富的信息量与搜索策略结合,在景象匹配图像预处理、图像特征提取以及在提高算法实时性等方面发挥了重要作用^[17]。

2.4 基于模型的匹配算法

基于模型的匹配算法设计过程是,先依据目标图像建立视觉仿真模型这是基于模板匹配的关键,然后确定坐标系,再对目标变换参数进行估计通过 Kalman 滤波得到匹配位置。基于模型的匹配算法依据建立的模型可分为二维(2D)和三维(3D)的^[20-23]。基于二维的模型可看成是平面的模板从变换参数的角度可划分为 RTS(旋转-缩放-平移)模型、平移模型、仿射变换模型(六参数)、射影变换模型(八参数)以及更复杂的高阶非线性模型(如非刚体运动的广义形态变换)等五种模型^[10]。基于三维模型的算法,首先是对待匹配目标的三维模型的建立,然后在匹配过程中进行模板匹配。在这类匹配算法中,准确生成二维或三维模型是模型匹配结果正确的关键。近年来,人们对目标图像发生复杂形变的情况下模型生成技术进行了大量的研究。如刘靖、孙继银^[21,22]等人提出了一种针对复杂地面目标的前视红外景象匹配算法,该算法将灰度与形状特征相结合通过由粗到精进行匹配,在精匹配阶段,利用实时图与所制备二维基准图模板形状相似的特点,采用了形状上下文的方法进行匹配。熊斌^[23]等人提出了一种三维模型的前视红外景象匹配算法,其思路 and 实现过程是首先由场景的 3D 数据建立目标三

维模型,并以人工标记的方式进行编号以保留交界线信息;然后根据实时观测参数进行二维投影绘制得到目标的二维模板图像;最后提取边缘加权 HOG 特征在观测图像中进行匹配。基于模型的匹配算法应用的针对性较强,需要建立三维模型从而绘制二维的目标模板,匹配的过程易于实现。

3 发展趋势

可以预见,景象匹配制导技术在精确制导任务中的重要地位将日益显著。提高景象匹配算法的自动化程度、提升匹配精度和提高运算速度是景象匹配技术的发展方向,未来景象匹配算法的发展趋势主要包括:

(1)随着成像设备的不断更新以及红外技术在匹配制导领域的应用,设计实现能够适应前视红外影像和可见光影像特征的景象匹配算法组合,是景象匹配技术研究的热点和难点。

(2)军用民用对空间频域的应用与争夺,使得战场环境更加复杂,利用异源影像特征,结合复杂战场环境实验提出匹配算法相关性统计指标,提高复杂条件下景象匹配的可靠性、适应性和自动化程度是景象匹配制导技术另一个研究方向。

(3)建立多种典型景象匹配样本数据库,设计和开发影像模拟生成软件,可以有效提升景象匹配算法研究和测试环境。

(4)采用大视场覆盖目标的终点散布范围,实现自动目标捕获。在景象匹配算法上解决搜索策略和目标识别判据的制定问题,提高景象匹配算法探测、识别弱小目标的能力。

4 结束语

景象匹配制导技术正朝着更稳定可靠、更智能、更快捷、更精确的方向发展。景象匹配算法的设计发展会使精确制导武器系统的性能全面跃升,推动精确制导武器向精度更高、威力更大、作战打击能力更强、智能化水平更高的方向发展。

参考文献:

- [1] 赵锋伟.景象匹配算法、性能评估及其应用[D].长沙:中国人民解放军国防科学技术大学,2002.
- [2] 刘宝生,闫莉萍,周东华.基于最小最大圆度量的鲁棒模板匹配方法[J].红外与激光工程,2006,35(5):618-620.
- [3] 张银银.图像匹配技术的算法研究[D].武汉:华中科技大学,2010.

- [4] 黄 帅.基于 Harris 尺度不变特征的图像匹配算法研究[D].合肥:合肥工业大学,2010.
- [5] 苏吕洁.一种变化环境下的景象匹配方法[D].武汉:华中科技大学,2010.
- [6] 孙继银,孙向东,王 忠,等.前视红外景象匹配技术[M].北京:科学出版社,2011:120-135.
- [7] 罗海波,史泽林.红外成像制导技术发展现状与展望[J].红外与激光工程,2009,38(4):65-70.
- [8] 王红梅,张 科,李言俊.图像匹配研究进展[J].计算机工程与应用,2004(19):42-44.
- [9] 郭 勤.景象匹配技术发展概述[J].红外与激光工程,2007,36(z2):57-61.
- [10] 胡璟璟.复杂场景下目标跟踪的多模板匹配算法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2010.
- [11] Stefano L D, Mattocia S, Tombari F. ZNCC-based template matching using bounded partial correlation[J]. Pattern Recognition Lett, 2005, 26(14):2129-2134.
- [12] 李俊山. SSDA 的改进算法[J]. 电光与控制, 2007, 14(2): 66-68.
- [13] 刘国权.基于小波图像金字塔的 SSDA 快速模板匹配算法[J].科技广场,2007,20(6):59-86.
- [14] 刘晓光.基于图像灰度的 SSDA 匹配算法[J].航空计算技术,2010,40(1):20-24.
- [15] Xu C, Liu J, Tang X. 2D shape matching by contour flexibility[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(1):180-186.
- [16] Brunelli R. Template Matching Techniques in Computer Vision: Theory and Practice[M]. New York: John Wiley & Son, 2009:88-122.
- [17] Liu Li, Peng Fuyan. Fast Image Matching for Localization in Deep-Sea Based on the Simplified SIFT (Scale Invariant Feature Transform) Algorithm[C]//Second International Conference on Space Information Technology. Wuhan: [s. n.], 2007.
- [18] Lin W S, Fang C H. Lossless parameterization of image contour for shape recognition[J]. Computer Vision, 2009, 3(1):36-46.
- [19] Brown L G. A Survey of Image Registration Techniques[J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24(4):325-376.
- [20] 余 萍,袁 辉.图像识别中的兴趣点匹配方法研究[J].计算机工程与应用,2010,46(5):132-135.
- [21] 刘 婧,孙继银,朱俊林,等.复杂地面目标前视红外景象匹配算法[J].计算机应用研究,2010,27(1):350-352.
- [22] 刘 婧,孙继银,朱俊林,等.基于模板匹配的前视红外目标识别方法[J].弹箭与制导学报,2010,30(1):17-26.
- [23] 熊 斌,丁晓青.基于三维模型的前视红外目标匹配识别方法[J].激光与红外,2011,41(3):345-350.

景象匹配算法研究进展与展望

作者:

作者单位:

刊名:

英文刊名:

年, 卷(期):

[谭志园, 孙继银, 王忠, 张财兴](#)

[谭志园, 张财兴\(中国人民解放军 96401 部队, 陕西 宝鸡 721013\), 孙继银, 王忠\(第二炮兵工程大学, 陕西 西安 710025\)](#)

[计算机技术与发展](#)

[Computer Technology and Development](#)

[2012\(9\)](#)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201209019.aspx