



国防科技著作精品译丛



Springer

Physics of Automatic Target Recognition

自动目标识别的 物理学原理

【美】Firooz Sadjadi Bahram Javidi 著
祝开建 牛威 鲁敏 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

自动目标识别的物理学原理

Physics of Automatic Target Recognition

[美] Firooz Sadjadi Bahram Javidi 著
祝开建 牛 威 鲁 敏 译

著作权合同登记 图字: 军-2012-087 号

图书在版编目 (CIP) 数据

自动目标识别的物理学原理 / (美) 萨贾迪 (Sadjadi, F.), (美) 贾维迪 (Javidi, B.) 著; 祝开建, 牛威, 鲁敏译. — 北京: 国防工业出版社, 2014. 4
(国防科技著作精品译丛)
书名原文: Physics of automatic target recognition
ISBN 978-7-118-09276-9

I. ①自… II. ①萨… ②贾… ③祝… ④牛… ⑤鲁… III. ①自动识别—物理学—理论研究 IV. ①TP391.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 307990 号

Translation from English language edition: Physics of Automatic Target Recognition By Firooz Sadjadi and Bahram Javidi
Copyright ©2007, Springer New York
Springer New York is a part of Springer Science+ Business Media
本书简体中文版由 Springer New York 授权国防工业出版社出版发行。
版权所有, 侵权必究。

自动目标识别的物理学原理

[美] Firooz Sadjadi Bahram Javidi 著
祝开建 牛威 鲁敏 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 16¼

插 页 6

字 数 252 千字

版 印 次 2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—2500 册

定 价 78.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

译者序

随着信息技术的不断突破,以及类似无人飞行器的低成本平台技术的快速发展,自动目标识别技术研究吸引了更广泛科学家和工程师的参与。我国安全应用技术也正在进入一个快速发展时期,海洋运动目标分析、地面移动目标辨识、空中/空间目标识别正稳步推进。为了更好地学习、借鉴国外的研究成果,为我国安全应用服务,我们翻译了 *Physics of Automatic Target Recognition*。

Physics of Automatic Target Recognition 是一本很好的自动目标识别前沿技术指导书,该书的原著者是从事目标识别的国际知名专家,该书的特点是汇集了众多国际知名专家的研究成果,将最新的理论与实践应用效果有机地结合在一起,这些专家学者在各自的领域都非常突出,而且在自动目标识别领域也活跃了几十年。本书旨在从物理学的角度对自动目标识别技术提供一些思路,自动目标识别可以看作是电磁学和声学的逆问题。本书试着从了解问题的本质,分析信号传输过程中的变换入手,希望解决这种逆问题。

本书由宇航动力学国家重点实验室祝开建、牛威和自动目标识别国防科技重点实验室鲁敏翻译。翻译过程中,我们得到了中国西安卫星测控中心、宇航动力学国家重点实验室和自动目标识别国防科技重点实验室领导的大力支持,中国西安卫星测控中心探测识别室、轨道室、总体室许多

同行也参与了部分章节的翻译和校对, 西安电子科技大学崔艳鹏副教授, 澳大利亚西澳大学郭裕兰博士, 中国西安卫星测控中心肇刚、侯鹰、朱民才、杨开忠、张荣之、徐东、张轲和李少敏等也提出了宝贵意见。本书的翻译工作得到了国家自然科学基金项目 (61179010) 和博士后科研基金项目 (20110491873) 的资助。译者深表感谢!

限于译者水平, 加之仓促付梓, 错误之处难免, 恳请读者指正。

译 者

2014 年 3 月

序

自动目标识别 (Automatic Target Recognition, ATR) 是研究利用各种传感器, 特别是成像传感器, 如可见光、红外线、合成孔径雷达、超宽带雷达、激光雷达等, 从客观世界获取目标/背景信号, 并使用光/电子及计算机信息处理手段自动地分析场景, 检测、识别感兴趣目标的科学技术领域。ATR 从数学抽象上讲是一个逆问题, 再加上目标所处场景的复杂性, 特别是电磁环境的复杂性、目标运动规律的动态性以及传感器性能受工业水平发展阶段的制约, 致使 ATR 技术的高水平实现, 面临着巨大的挑战。在众多学者、科学研究人员和工程技术人员致力于 ATR 技术研究的长期实践中, 已经形成了一个广泛的共识, 那就是迄今为止任何形式的 ATR 技术, 都是立足于对目标特征信号的抽取, 或者更确切地说对其特征矢量的抽取, 来实现对目标的自动识别的。因此深入分析研究目标的特征信号, 深入研究其特征矢量的抽取算法, 对于 ATR 而言, 有着根本性意义。我十分赞赏本书著者的努力, 他们从目标特征信号物理学角度更本质地来探讨 ATR 问题, 相信本书的出版会为广大读者提供一些新视角、新思路的启示。

Physics of Automatic Target Recognition 的中文版书名为《自动目标识别的物理学原理》, 系由宇航动力学国家重点实验室联合自动目标识别国防科技重点实验室翻译。原书著者系美国安全应用技术领域的知名专家

Firooz Sadjadi 和 Bahram Javidi 教授。该书介绍了图像匹配、不变代数理论、加权 Zak 变换、偏振光学成像、地下目标自动识别与地雷检测、数字全息技术等领域和技术的最新研究成果。多位目标识别领域的专家对译稿进行了认真审校, 翻译忠于原著, 同时也渗透着译者多年来参与安全应用任务的丰富经验。

近年来, 我国海洋运动目标分析、地面移动目标辨识、空中/空间目标识别正稳步推进, 技术与研究攻关正进入一个关键时期。这些安全分析工作都对自动目标识别提出了较高要求, 其信号传输的变换机理和目标识别方法都需要不断完善和改进。希望该书的翻译和出版能对我国自动目标识别的科学研究和工程应用起到积极的促进和借鉴作用。

郭桂林

前言

本书旨在从物理学的角度对自动目标识别技术提出一些看法。自动目标识别 (ATR) 可以看作是电磁学和声学的逆问题。目标通过反射、散射、折射、辐射等特性信号被传感器感知,但是在探测器捕获这些信号之前,信号会通过一些介质进行传输。ATR 的主要目的就是利用这些信号区分原始目标。经验表明,只有了解问题的本质,即信号传输过程中的变换,才有希望解决这种逆问题。因此,除了集中研究抽象模式分类技术以外,我们还需要关注信号的物理特征,比如来自极化红外、超光谱或者超宽带雷达。从这些内容来看,ATR 是一个令人激动的物理学问题,因为它的一般解都是难以捉摸的。

随着传感器设计技术、高速计算机技术,以及类似无人飞行器的低成本平台技术的快速发展,ATR 技术研究吸引了更广泛科学家和工程师的参与。本书主要想描述这些需求,因此提供了与 ATR 物理学相关的各种交叉观点。

非常感谢为本书做出杰出贡献的研究人员,他们有的是朋友,有的是同事。他们在各自的领域都非常突出,而且在自动目标识别领域也活跃了几十年。同时,也非常感谢施普林格出版社的编辑和工作人员 Virginia Lipsy 女士和 Vasudha Gandhi 女士,她们在书稿出版过程中给予了很大的帮助。

目录

第 1 章 基于核函数的非线性子空间目标检测技术在高光谱图像中的应用	1
1.1 引言	1
1.2 核方法和核技巧	2
1.3 线性子空间匹配检测器和核匹配子空间检测器	3
1.4 OSP 和核 OSP 算法	8
1.5 线性光谱匹配滤波器和核光谱匹配滤波器	10
1.6 自适应子空间检测器和核自适应子空间检测器	13
1.7 实验结果	15
1.8 结论	21
1.9 附录 I (核 PCA)	21
参考文献	24
第 2 章 不变代数理论及其在自动目标识别中的应用	27
2.1 引言	27
2.2 不变代数理论	28
2.3 二元齐次多项式不变量的应用	30
2.4 三元齐次多项式不变量	34

2.5 复杂性分析	37
2.6 结论	41
参考文献	42
第 3 章 基于时频分析和优化技术的地下目标自动识别 . .	43
3.1 引言	43
3.2 理论模型	45
3.3 试验场里的目标识别	50
3.4 结论	56
致谢	56
参考文献	57
第 4 章 加权 Zak 变换的性质及其在信号处理中的应用 .	59
4.1 引言	59
4.2 背景和定义	60
4.3 加权 Zak 变换和模糊函数	61
4.4 加权函数	64
4.5 加权 Zak 变换的逆变换	70
4.6 综合信号的加权 Zak 变换	73
致谢	74
参考文献	74
第 5 章 可见光的偏振特征在自动地雷检测中的应用 . . .	76
5.1 引言	76
5.2 采用照相机系统的地雷检测	76
5.3 检测	78
5.4 检测试验	81
5.5 试验结果	85
5.6 结论	91
参考文献	92

第 6 章 偏振光学成像的物理性质研究	94
6.1 引言	94
6.2 斯托克斯向量和密勒矩阵	95
6.3 偏振成像的目标形状信息	95
6.4 结论	105
参考文献	105
第 7 章 色散及其影响与补偿	107
7.1 引言	107
7.2 基本概念与定义	109
7.3 脉冲的空间矩	110
7.4 色散 – 不变矩	114
7.5 例子	116
7.6 波传播过程的维格纳近似和近似不变矩	120
7.7 对偶例子, 给定 $u(x, 0)$ 的情况	122
7.8 结论	127
参考文献	127
第 8 章 利用进化算法在图像响应空间中进行多传感器 目标识别	129
8.1 引言	129
8.2 用于不同成像类型目标识别的进化算法混合模型	131
8.3 不同成像类型的数值实验	133
8.4 结论	141
参考文献	142
第 9 章 计算机视觉中眼睛的生物物理学原理、方法和 先进的技术	144
9.1 引言	144
9.2 背景回顾: 光、眼睛响应和运动	146
9.3 眼睛外观变化	149

9.4 眼睛图像表示	151
9.5 眼睛变化的建模	152
9.6 眼睛自动定位	154
9.7 跟踪问题描述	157
9.8 跟踪方法模型	159
9.9 基于粒子滤波的眼睛跟踪方法	160
9.10 基于眼睛跟踪的先进技术	169
9.11 结论	171
参考文献	171

第 10 章 使用单次在线曝光数字全息技术的两种 3D

微生物识别方法	178
-------------------	-----

10.1 引言	178
10.2 单次在线曝光数字全息技术	180
10.3 基于形态学的 3D 识别	181
10.4 能够容忍 3D 形变的识别	184
10.5 实验结果	187
10.6 结论	194
参考文献	194

第 11 章 采用单曝光共轴数字全息的容忍畸变三维目标

识别	198
--------------	-----

11.1 引言	198
11.2 单曝光共轴数字全息	199
11.3 复合滤波器设计	201
11.4 实验结果	202
11.5 结论	207
参考文献	208

第 12 章 用于畸变情况下远程目标识别和验证的不变光

学身份标签设计 210

12.1 引言	210
12.2 识别系统	211
12.3 签名的加密和解密	212
12.4 畸变情况下的不变身份标签	214
12.5 签名的验证	218
12.6 识别结果	219
12.7 结论	225
参考文献	226

第 13 章 采用最大似然估计和等值线正则化的相干斑

消除 229

13.1 引言	229
13.2 算法描述	230
13.3 结果和参数的影响	237
13.4 结论	243
参考文献	243

第 1 章

基于核函数的非线性子空间目标检测技术在高光谱图像中的应用

摘要: 本章比较了几种基于光谱匹配滤波器 (子空间) 的检测算法, 给出了这些光谱匹配检测器的非线性 (核) 版本, 并将它们的性能和线性版本进行了比较。基于核的匹配滤波器和核匹配的子空间检测器可以利用光谱带之间的非线性相关性, 而这种相关性被传统的检测器所忽略。非线性实现主要是为了减少高维特征空间数据的复杂性, 从而对数据辨识提供更加简单的决策规则。几种常见的匹配检测器, 如匹配子空间检测器、正交子空间检测器、光谱匹配滤波器和自适应子空间检测器 (自适应余弦估计), 都基于核的学习理论扩展了相应的核版本。在基于核的检测算法中, 数据通过一个与核函数相关联的非线性映射被隐式地映射到一个高维核特征空间中。为了避免在高维特征空间涉及显式计算, 提出了核化特征空间的检测算法。基于玩具算例和高光谱实测图像的实验结果表明, 这些检测器的核版本性能优于传统线性检测器。

1.1 引言

噪声环境下的信号检测, 特别是对于动态范围大的信号检测, 长期以来一直是信号处理各个领域中具有挑战性的问题。在以前开发的大量检

测器中, 常见的子空间匹配检测器 (Matched Subspace Detector, MSD)^[1]、正交子空间检测器 (Orthogonal Subspace Detector, OSD)^[1,2]、光谱匹配滤波器 (Spectral Matched Filter, SMF)^[3,4]和自适应子空间检测器 (Adaptive Subspace Detectors, ASD) 及自适应余弦估计 (Adaptive Cosine Estimator, ACE)^[5,6], 都已被广泛用于相应的信号 (目标) 检测中。

信号匹配检测器, 如谱匹配滤波器和谱子空间匹配检测器 (无论自适应或者非自适应), 仅利用二阶相关性而完全忽略光谱带间的非线性 (高阶) 相关性, 但这种非线性相关性往往是区分目标和背景的关键。本章将引入非线性版本的 MSD、OSD、SMF 和 ASD 检测器。通过核学习方法获得的特定映射函数后, 这些检测器将有效地利用与之相关联的高维 (可能是无限维) 特征空间中高阶谱间的相关性^[7]。将输入数据非线性映射到高维特征空间, 通常被认为可增加数据的可分性, 同时减少对应数据结构的复杂性^[8]。

在核空间中已经定义了若干信号处理技术的非线性版本, 如主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)^[9]、费舍尔 (Fisher) 判别分析^[10]、特征空间聚类^[8]、线性分类^[11]、基于核正交质心方法的非线性特征提取^[12]、用于目标检测的核匹配信号检测器^[13,14,15]、基于核的异常检测^[16]、基于核的非线性子空间分类^[17]、基于核贝叶斯 (Bayes) 规则的分种类^[18]等。文献 [19] 进行目标分类时将核用于广义相异性测量; 在文献 [20] 中, 核方法被应用于人脸识别。

本章安排如下: 1.2 节介绍基于核的学习方法和核技巧的背景; 1.3 节介绍线性匹配子空间和它的核版本; 1.4 节定义正交子空间检测器及其核版本; 1.5 节描述传统频谱匹配滤波器及其在特征空间的核版本, 并采用核函数重新表述其表达式; 1.6 节介绍自适应子空间检测器及其核版本; 1.7 节对传统算法及其核版本进行性能比较; 1.8 节给出各算法的比较结果及结论。

1.2 核方法和核技巧

假设输入的高光谱数据表示的数据空间为 $(\mathcal{X} \subseteq \mathcal{R}^l)$, $\mathcal{F}$ 是通过一个

非线性映射函数 Φ 与 $\mathcal{X}$ 相关联的特征空间, 有

$$\Phi: \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{F}, x \mapsto \Phi(x) \quad (1.1)$$

式中, x 是 $\mathcal{X}$ 中的输入向量; $\mathcal{X}$ 可以被映射到一个高维 (可能是无限维) 的特征空间。由于特征空间 $\mathcal{F}$ 的高维特性, 在特征空间中直接采用任何算法在计算上都是不可行的。然而, 基于核的学习算法采用式 (1.2) 给出的一种有效的核技巧, 通过核函数实现了特征空间中的点积运算^[7]。基于核技术的思想是通过在特征空间中隐式地重新定义算法获得其在输入空间的非线性版本, 利用点积运算将其转化。使用核技巧在 $\mathcal{F}$ 中隐式计算点积时不需要将输入向量映射到 $\mathcal{F}$ 中。因此, 在核方法中映射 Φ 并不需要确定。

在 $\mathcal{F}$ 中点积的核表达式为

$$k(x_i, x_j) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j) \quad (1.2)$$

式中, k 是原始数据的一个核函数。有大量的默瑟 (Mercer) 核具有核技巧性能, 关于不同核的性能以及基于核的学习算法的详细信息可参考文献 [7]。在本章选择的核是高斯 RBF 核, 这个核与相关非线性函数 Φ 生成一个无限维度的特征空间。

1.3 线性子空间匹配检测器和核匹配子空间检测器

在此模型中, 目标像素向量表示为目标光谱信号与背景光谱信号的线性组合, 分别由子空间目标光谱和子空间背景光谱组成。在 p 维输入空间中的高光谱目标检测问题可以表述为二元竞争假设 H_0 和 H_1

$$\begin{cases} H_0: y = B\zeta + n & (\text{目标不存在}) \\ H_1: y = T\theta + B\zeta + n = [TB] \begin{bmatrix} \theta \\ \zeta \end{bmatrix} + n & (\text{目标存在}) \end{cases} \quad (1.3)$$

式中, T 和 B 分别表示两个正交矩阵, 其 p 维列向量分别张成目标和背景子空间; θ 和 ζ 是未知向量, 其元素系数分别与 T 和 B 的列向量对应; n

为服从 $\mathcal{N}(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ 分布的高斯随机噪声 ($\mathbf{n} \subseteq \mathcal{R}^p$); $[\mathbf{T}\mathbf{B}]$ 是将 $\mathbf{T}$ 和 $\mathbf{B}$ 的连接后得到矩阵。 $\mathbf{T}$ 和 $\mathbf{B}$ 的列向量维数 N_t 和 N_b 通常比 p 小 ($N_t, N_b < p$)。

1.3.1 用于目标检测的广义似然比检验 (GLRT)

给定线性子空间检测模型和式 (1.3) 所示的输入矢量的两种假设, 采用似然比检验 (Likelihood Ratio Test, LRT) 来预测输入向量 $\mathbf{y}$ 是否包括目标, 定义为

$$l(\mathbf{y}) = \frac{p_1(\mathbf{y}|\mathbf{H}_1)}{p_0(\mathbf{y}|\mathbf{H}_0)} \underset{\mathbf{H}_0}{\overset{\mathbf{H}_1}{\geq}} \eta \quad (1.4)$$

式中, $p_0(\mathbf{y}|\mathbf{H}_0)$ 和 $p_1(\mathbf{y}|\mathbf{H}_1)$ 分别表示给定 $\mathbf{H}_0$ 和 $\mathbf{H}_1$ 假设下的 $\mathbf{y}$ 的类条件概率密度; η 是一个检验门限。由于假定 $\mathbf{n}_i$ 为高斯随机噪声, 则 $p_0(\mathbf{y}|\mathbf{H}_0)$ 和 $p_1(\mathbf{y}|\mathbf{H}_1)$ 可以分别表示为高斯概率密度 $\mathcal{N}(\mathbf{B}\boldsymbol{\zeta}, \sigma^2 \mathbf{I})$ 和 $\mathcal{N}(\mathbf{T}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{B}\boldsymbol{\zeta}, \sigma^2 \mathbf{I})$ 。根据奈曼 - 皮尔逊准则推导得到 LRT, 即在虚警概率 P_F 保持为常数的情况下使得检测 P_D 最大^[21]。将 $l(\mathbf{y})$ 与 η 比较来判断哪个假设与 $\mathbf{y}$ 最相关。

LRT 包含需要采用最大似然准则估计得到的未知参数 $\boldsymbol{\zeta}$ 和 $\boldsymbol{\theta}$ 。广义似然比检验 (Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT) 是通过将 $l(\mathbf{y})$ 中的未知参数采用其极大似然估计值 (Maximum Likelihood Estimates, MLEs) $\hat{\boldsymbol{\zeta}}$ 和 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 代替并采用 $(2/P)^{\textcircled{1}}$ 次方根得到^[1], 即

$$L_2(\mathbf{y}) = (\hat{l}(\mathbf{y}))^{2/P} = \frac{\mathbf{y}^T(\mathbf{I} - \mathbf{P}_B)\mathbf{y}}{\mathbf{y}^T(\mathbf{I} - \mathbf{P}_{TB})\mathbf{y}} \underset{\mathbf{H}_0}{\overset{\mathbf{H}_1}{\geq}} \eta \quad (1.5)$$

其中, $\mathbf{P}_B = \mathbf{B}(\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T = \mathbf{B} \mathbf{B}^T$ 是与 N_b 维背景子空间 $\langle \mathbf{B} \rangle$ 相关的投影矩阵; $\mathbf{P}_{TB}$ 是与 $(N_{bt} = N_b + N_t)$ 维目标和背景的子空间 $\langle \mathbf{T}\mathbf{B} \rangle$ 相关的投影矩阵。

$$\mathbf{P}_{TB} = [\mathbf{T} \ \mathbf{B}] [(\mathbf{T} \ \mathbf{B})^T (\mathbf{T} \ \mathbf{B})]^{-1} [\mathbf{T} \ \mathbf{B}]^T \quad (1.6)$$

^① 原书有误, 译者更正。——译者注