

文章编号: 0258-7025(2006)11-1467-05

# 基于数字信号处理器的激光成像雷达 目标识别算法实现

孙剑峰, 李琦, 陆威, 王骥

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 激光成像雷达的空间分辨率较高,能成四维像(强度像+三维距离像),适合作为目标识别探测器。支持向量机(SVM)是一种能在小样本学习的情况下,仍有较高识别正确率的目标识别方法。通过优化支持向量机算法,将它嵌入到激光成像雷达系统的数字信号处理器(DSP)芯片内,实现目标识别的功能,有很高的现实意义。首先用真实激光成像雷达强度像做实验,测试 56 个样本,共耗时 31.97  $\mu$ s,证明嵌入到数字信号处理器的支持向量机算法能满足实时性要求,识别正确率为 98.2%;再用仿真激光成像雷达距离像验证支持向量机的推广能力,证明支持向量机在实时性和识别性能两方面都能满足激光成像雷达的识别要求。

**关键词** 成像系统;模式识别;激光成像雷达;支持向量机算法实现;数字信号处理器

**中图分类号** TN 958.98 **文献标识码** A

## Implementing the Algorithm of Target Recognition for Laser Imaging Radar Based on Digital Signal Processing

SUN Jian-feng, LI Qi, LU Wei, WANG Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronic of  
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Laser imaging radar has high space resolution, and can output four-dimensional (4D) image (intensity image+three-dimensional (3D) range image), so it is fit to be the sensor of target recognition. Support vector machine (SVM) is a way of target recognition, which has high correct recognition rate, in the case of learning with small samples. Through optimizing the algorithm of SVM, it is embedded into digital signal processing (DSP) of laser imaging radar, achieving the function of target recognition, which has high practical meaning. The experiments with the real intensity images of laser imaging radar are finished. In the experiments, the testing set totally has 56 samples, and the costing time is 31.97  $\mu$ s, which can state that the algorithm can meet the real-time requirement, and the correct recognition rate is 98.2%. Another experiments with simulated range images of laser imaging radar validate the generalization of SVM. The experiments results show that SVM can meet the recognition demands of laser imaging radar in the real-time and recognition performance.

**Key words** imaging systems; pattern recognition; laser imaging radar; implement the algorithm of support vector machine; digital signal processing

### 1 引言

激光成像雷达能同时成反应目标材料特性的强度像和反应目标空间几何特性的三维距离像<sup>[1,2]</sup>,

可得到雷达视场的空间四维像,能提高目标识别正确率及目标打击点的精确度,因此成为近年来国际上研究的热点<sup>[3~5]</sup>。支持向量机(SVM)是 20 世纪 90 年代新兴起来的一种机器学习方法,在解决小样

收稿日期:2006-04-07;收到修改稿日期:2006-05-25

**作者简介:**孙剑峰(1978—),男,山东省平邑县人,哈尔滨工业大学光电子研究所博士研究生,主要从事激光雷达目标识别、跟踪等方面的研究。E-mail:hit\_sunjianfeng@yahoo.com.cn

**导师简介:**王骥(1942—),男,黑龙江省哈尔滨人,哈尔滨工业大学光电子技术研究所教授,博士生导师,主要研究方向为激光成像技术,X光激光技术和激光介质光谱技术。E-mail:QiWang@hit.edu.cn

本、非线性及高维模式识别问题中表现出许多特有的优势,是继神经网络研究之后机器学习领域新的研究热点<sup>[6,7]</sup>。如果能将支持向量机算法应用到激光雷达系统里,使其具有自动目标识别的功能,这对进一步完善激光雷达系统具有非常好的现实意义。

影响支持向量机需求内存空间有两个因素:样本的维数和支持向量数。如果样本的维数大、支持向量多,支持向量机需求的系统资源消耗就大,计算量也就随之增加。而数字信号处理器(DSP)本身的存储空间有限,如果数字信号处理器不能满足支持向量机对系统资源的要求,这就需要优化程序、降低输入空间维数或外加存储芯片扩展存储空间。

## 2 原 理

研究工作的硬件实验平台是一块图像处理板,如图 1 所示,其硬件结构框图如图 2 所示。图中数字信号处理器芯片型号是 TMS320C6203,其工作频率可达 250 MHz 或 300 MHz,有较高的处理速度。A/D 芯片可在 200 MHz 情况下稳定工作,保证了对数据采样的准确性。

激光雷达回波信号经 A/D 模数转换,变成两路输出,通过 FIFO,进入到现场可编程门阵列器件(Field Programmable Gate Array, FPGA);现场可

编程门阵列器件对回波信号进行预处理,选取回波信号的最大值作为强度像的像素值,同时得到相应的距离像,当现场可编程门阵列器件存满一帧图像时,就给数字信号处理器一个中断,通知数字信号处理器读取图像数据;数字信号处理器承担了主要的图像处理工作,如除噪、目标增强、目标识别及目标跟踪;最后将图像处理结果通过双口 RAM,输出到计算机上显示,并将跟踪的偏差信号输出到随动系统,实现激光成像雷达的闭环控制。

支持向量机是从线性可分情况下的最优分类面发展而来的<sup>[6]</sup>。设有两个不同类  $y \in \{-1, +1\}$  的线性可分样本集  $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, l, x \in R^d$ ,要构造最优超平面  $w \cdot x + b = 0$  把向量集合无错误地分开,如图 3 所示,图中  $H_1$  和  $H_2$  分别表示不同的超平面。

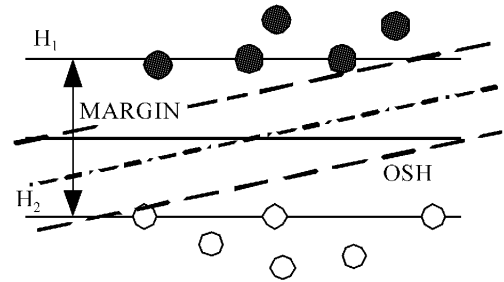


图 3 最优超平面  
Fig. 3 Optimal hyperplane

所谓最优超平面是要求样本集合没有被超平面错误地分开,并且离超平面最近的样本与超平面之间的距离最大。要找到这个超平面,需要求解二次规划问题,最小化泛函

$$\Phi(w) = \frac{1}{2}(w \cdot w), \tag{1}$$

约束条件为不等式类型

$$y_i[(x_i \cdot w) - b] \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, l \tag{2}$$

这个优化问题可由 Lagrange 泛函解出,最后最优超平面的表达式为

$$f(x) = \text{sgn}[\sum_{\text{support vector}} y_i \alpha_i^0 (x \cdot x_i) - b_0], \tag{3}$$

其中  $x_i$  为支持向量,  $b_0$  是阈值并为常数

$$b_0 = \frac{1}{2} \{ [w_0 \cdot x(1)] + [w_0 \cdot x(-1)] \}, \tag{4}$$

其中  $x(1)$  表示第一类任意一个支持向量,  $x(-1)$  表示第二类任意一个支持向量。

C. Cortes 等<sup>[6]</sup>通过引入核函数映射的思想,巧妙地解决了支持向量机的"维数灾难"问题,则式(3)变化为

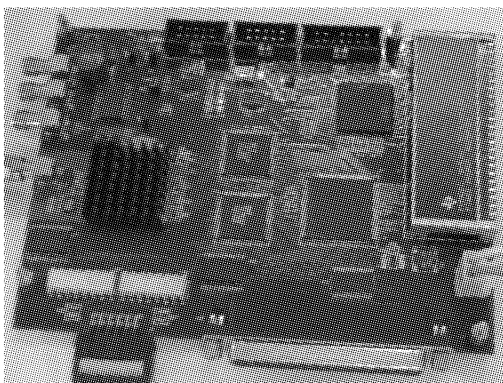


图 1 电路板照片

Fig. 1 Picture of circuit board

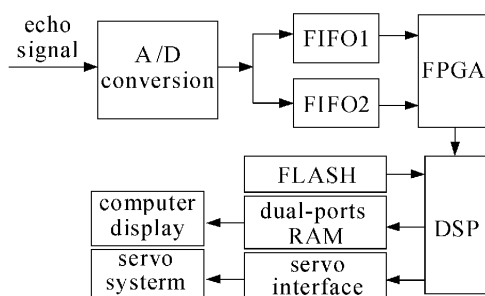


图 2 硬件结构框图

Fig. 2 Chart of hardware architecture

$$f(x) = \text{sgn}[\sum_{\text{support vector}} y_i \alpha_i^0 K(x \cdot x_i) - b_0], \quad (5)$$

其中  $K(x, x_i)$  需满足 Mercer 定理, 即对任意向量函数  $g(x) \in L^2$ , 这时将有不等式成立

$$\iint K(u, v) g(u) g(v) du dv > 0, \quad (6)$$

其中,  $g(x)$  需满足  $\int g^2(u) du < \infty$  且  $g \neq 0$ 。

### 3 算法实现

实现支持向量机目标识别算法一般分为两个步骤: 训练和预测。首先要对训练集进行训练, 从中确定支持向量及相应的系数, 这就找到了最优超平面; 然后, 对测试集进行预测, 输出识别结果。可以看出, 支持向量机是一种离线训练、在线识别技术, 即嵌入数字信号处理器的是预测函数。文中简化的是

Chih-Chung Chang 等编写的 LIBSVM 软件<sup>[8]</sup>, 它用 C++ 实现, 是目前使用比较方便的支持向量机实现工具。

支持向量机算法实现的流程框图如图 4 所示。在初始化支持向量机参数中, 将设定支持向量机的核函数及一些变量定义; 将训练过程中得到的支持向量放入到  $M \times K$  二维数组, 其中,  $M$  为支持向量个数,  $K$  为图像的总像素数; 数字信号处理器等待现场可编程门阵列器件传送的中断信号, 一旦接收到, 就读取一帧的激光雷达图像数据; 对图像进行预处理, 再将其输入到最优超平面函数, 计算输入图像所属类别; 将得出的结果和雷达图像通过 PCI 接口, 输出到计算机上显示; 同时, 返回到执行中断程序的入口地址, 继续等待下一个中断的到来。

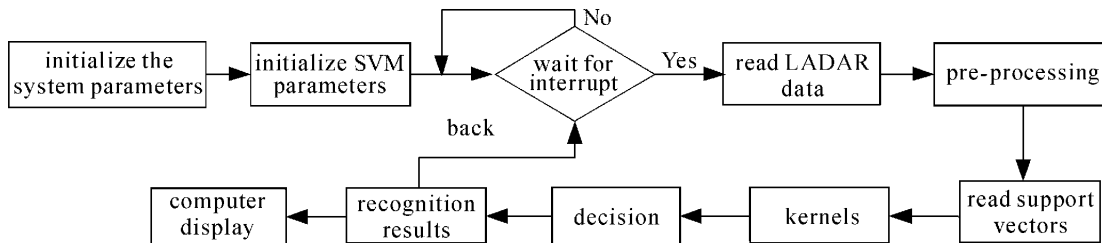


图 4 程序流程框图

Fig. 4 Chart of program flow

实现支持向量机算法中的核函数为多项式核函数, 其表达式

$$K(x, x_i) = [(x \cdot x_i) + 1]^d, \quad (7)$$

已知训练集为  $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, l, x \in R^d$ , 其中  $x_i$  为第  $i$  幅图像数据,  $y_i$  为第  $i$  幅图像的分类, 如果是两类识别,  $y_i \in \{1, -1\}$ 。令  $S(1 | X_1, 1)$  表示“1”类测试样本被正确分类的数量,  $S(-1 | X_1, 1)$  表示“1”类测试样本被错误分类的数量, 其中,  $X_1$  为“1”类的测试样本数量; 同理也有  $S(-1 | X_{-1}, -1)$  和  $S(1 | X_{-1}, -1)$ 。这样, 对识别结果的定义为

$$\text{测试样本数} = X_1 + X_{-1}, \quad (8)$$

$$\text{识别正确率} = \frac{S(1 | X_1, 1) + S(-1 | X_{-1}, -1)}{X_1 + X_{-1}}, \quad (9)$$

$$\text{识别错误率} = \frac{S(-1 | X_1, 1) + S(1 | X_{-1}, -1)}{X_1 + X_{-1}}. \quad (10)$$

### 4 实验结果

#### 4.1 真实激光雷达像实验

实验中采用的数据是事先存储的真实激光成像

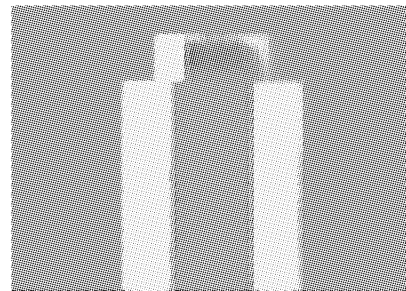


图 5 实物照片

Fig. 5 Picture of the building

雷达强度像, 其分辨率较低。激光成像雷达的目标是远距离的某建筑物, 实物照片如图 5 所示, 样本已经过噪声抑制预处理<sup>[9]</sup>, 处理结果如图 6 所示。该图像是由本课题组自主研发的激光雷达成像器获得的。

由于受到实验环境的限制, 只能人为地以获取该建筑物不同位置的图像为真假目标, 图 6(a) 为感兴趣目标, 标记为 1; 图 6(b) 为拒绝目标, 标记为 -1。

样本集共有 168 个样本, 其中训练集 112 个, 测试集 56 个。在测试集中,  $X_1 = 36, X_{-1} = 20$ 。支持向量机的核函数是多项式, 其阶数等于 3。确定支

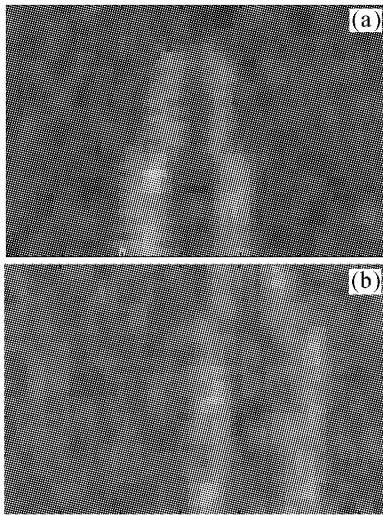


图 6 建筑物的激光雷达图像((a) 感兴趣目标;(b) 拒绝目标)

Fig. 6 Images of laser radar

(a) interesting target; (b) reject target

持向量 34 个,并将它们写入到数字信号处理器芯片内。数字信号处理器测试全部测试集样本,其识别结果如表 1 所示。共耗时大约 31.97  $\mu\text{s}$ ,每个样本平均耗时约 0.57  $\mu\text{s}$ 。表 2 给出详细的测试情况,根据(8)~(10)式的定义,正确识别 54 个,识别正确率为 98.2%。

一般来讲,能够达到 25 帧/s 即可认为是实时显示,即每帧处理时间为 40 ms,从表 1 可以看出,即使包括图像预处理,支持向量机算法也完全可满足高帧频激光成像雷达实时性要求。

表 3 是对不同阶数的多项式核函数的时间测试结果,5 阶多项式需要的时间比 3 阶多项式大约多出 22  $\mu\text{s}$ ,即高阶多项式的计算量比较大,但也能满足实时性要求。

表 1 测试结果

Table 1 Test result

Support vector number	Kerned function	Correction recognition rate / (%)	Consume-time / $\mu\text{s}$	Mean consume-time / $\mu\text{s}$
34	Polynomial	98.2	31.97	0.57

表 2 详细的测试情况

Table 2 Detailed test instance

Correct classification numbers	$S(1   X_1, 1)$	$S(-1   X_{-1}, -1)$	Correct recognition rate / (%)
	36	18	
False classification numbers	$S(-1   X_1, 1)$	$S(1   X_{-1}, -1)$	Flase recognition rate / (%)
	0	2	

表 3 不同阶数的测试结果

Table 3 Test results for the different orders

Test samples numbers	Kernel function	Order	Consume-time / $\mu\text{s}$
56	Polynomial	3	31.97
		5	54.19

### 4.2 仿真激光雷达像实验

上述实验由于受实验环境限制,获取的样本不完全,因此,采用仿真方法验证支持向量机的识别性能。以激光雷达仿真距离像为样本,它是根据激光雷达成像原理,利用计算机生成的。以四种军事目标为模型:坦克 2,坦克 80,军用卡车和装甲车,它们的三维模型如图 7 所示。样本的大小为  $64 \times 64$  像素,假定背景为平坦地面,仿真的无噪声距离像如图 8 所示。采用美国 MIT 的 S. M. Hannon 等提出的激光雷达仿真公式<sup>[10]</sup>,相应的仿真结果如图 9 所示。

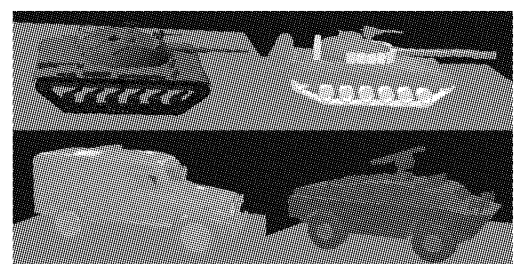


图 7 坦克三维模型

Fig. 7 3D model of tanks

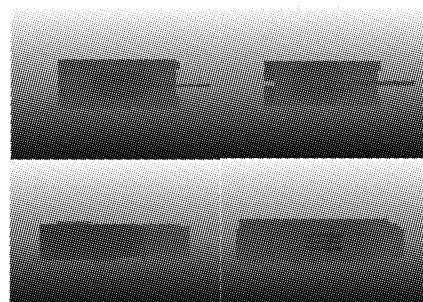


图 8 仿真无噪声距离像

Fig. 8 Simulated non-noise image

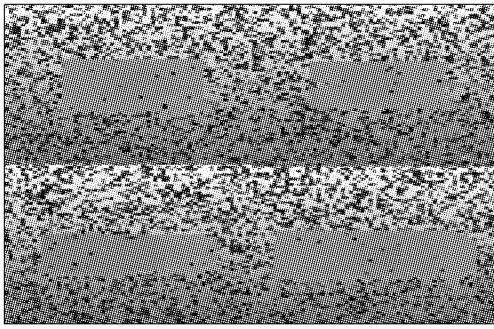


图 9 加噪的距离像

Fig. 9 Adding-noise range image

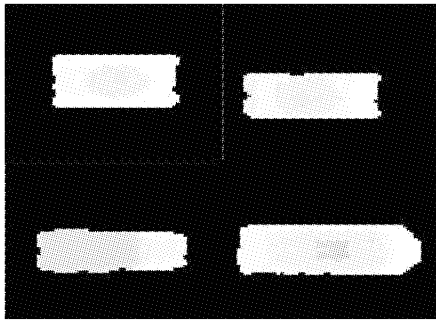


图 10 滤噪后的距离像

Fig. 10 Range images of filtering noise

哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室已经发展了一些激光雷达距离像噪声抑制的算法<sup>[11,12]</sup>。利用激光雷达强度像和距离像的相关性，可以有效地滤除距离像的背景和噪声，再对距离像进行均值处理，处理后的结果如图 10 所示，距离像的地面背景和噪声基本滤除。

实验中使用的样本是将平面内目标绕中心轴旋转，每隔  $10^\circ$  提取出来的，则每个目标库有 36 个样本，即目标库共有  $4 \times 36 = 144$  个样本。为了考察支持向量机的推广能力，取目标库中的偶数样本作为训练集，目标库中的所有样本作为测试集。假设采用相关技术已经将目标按模板大小分割，一般地，分割后目标会有一些的平移，需消除这种平移。仍使用多项式核函数，随机从测试集里每个目标库中提取 100 个样本，即共有 400 个测试样本。支持向量机对测试集的认识结果如表 4，具体的识别情况如表 5 所示。从仿真结果可看出，支持向量机有较高的正确识别率，能很好地区分相似目标。

表 4 支持向量机识别结果

Table 4 Recognition results of SVM

	Tank 2	Tank 80	Camion	Armored car
SVM	98%	93%	100%	86%

表 5 识别具体结果

Table 5 Detailed recognition results

	Tank 2	Tank 80	Camion	Armored car
Tank 2	98	2	0	0
Tank 80	7	93	0	0
Camion	0	0	100	0
Armored car	10	4	0	86

## 5 结 论

将支持向量机识别算法嵌入到数字信号处理器内，初步完成了激光成像雷达的目标识别功能。数字信号处理器处理真实激光成像雷达强度像，单帧耗时能满足实时要求；仿真激光成像雷达距离像验证了支持向量机的识别性能。经实验验证，支持向量机可作为激光成像雷达目标识别技术之一。

## 参 考 文 献

- 1 Jeffrey H. Shapiro. Target-reflectivity theory for coherent laser radars [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(18):3398~3407
- 2 Lena Klasen, Pierre Andersson, Hakan Larsson *et al.*. Aided target recognition from 3-D laser radar data [C]. *SPIE*, 2004, **5412**:321~332
- 3 Brett A. Hutchinson, Ruben L. Galbraith, Barry L. Stann. Simulation-based analysis of range and cross-range resolution requirements for the identification of vehicles in lidar imagery [J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(9):2734~2745
- 4 Nicolas Vandapel, Daniel F. Huber, Anuj Kapuria. Natural terrain classification using 3-D lidar data [J]. *Proc. IEEE*, 2004, ( ):5117~5122
- 5 Li Ziqin, Wang Qi, Li Qi *et al.*. Multiplication model of speckle image and speckle suppression in imaging lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):717~720  
李自勤,王 骐,李 琦等. 激光成像雷达系统中散斑像的乘法模型及其滤除[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):717~720
- 6 C. Cortes, V. N. Vapnik. Support-vector networks [J]. *Machine Learning*, 1995, **20**:1~25
- 7 Zhang Xuegong. Introduction to statistical learning theory and support vector machines [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(1):32~42  
张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. *自动化学报*, 2000, **26**(1):32~42
- 8 Chih-Chung Chang, Chih-Jen Lin. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/libsvm.pdf>
- 9 Jianfeng Sun, Qi Li, Qi Wang. Object recognition of lidar with support vector machine [C]. *SPIE*, 2004, **5640**:434~439
- 10 S. M. Hannon, J. H. Shapiro. Laser radar target detection with a multipixel joint range-intensity processor [C]. *SPIE*, 1988, **999**:162~175
- 11 Li Qi, Wang Yongzhen, Wang Qi *et al.*. Noise suppression algorithm of coherent lidar range image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5):581~584  
李 琦,王永珍,王 骐等. 相干激光雷达距离像的噪声抑制算法研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5):581~584
- 12 Li Ziqin, Wang Qi, Li Qi *et al.*. Noise mechanism of range image in coherent laser radar and the range anomalies suppression [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):356~360  
李自勤,王 骐,李 琦等. 相关激光雷达距离像噪声机理及距离反常抑制[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):356~360