

模式识别与计算机视觉

支持向量机SVM

吴建鑫

南京大学人工智能学院，2026

统计学习方法的粗略分类

✓ Statistical learning methods

- $p(y = i), p(y = i|\mathbf{x}), p(\mathbf{x}|y = i), p(\mathbf{x})$
- 还记得其含义吗?
- Generative (probabilistic) models: 估计 $p(\mathbf{x}|y = i)$ 和 $p(y)$
 - 然后用贝叶斯定理求 $p(y = i|\mathbf{x})$
 - 生成式模型（下一章）
- Discriminative (probabilistic) models: 直接估计 $p(y = i|\mathbf{x})$
 - 判别式模型（下一章）
- Discriminant function: 直接求一个把各类分开的边界
 - 不假设概率模型，如FLD（上一章），SVM（本章）
 - 更多阅读PRML1.5.4

目标

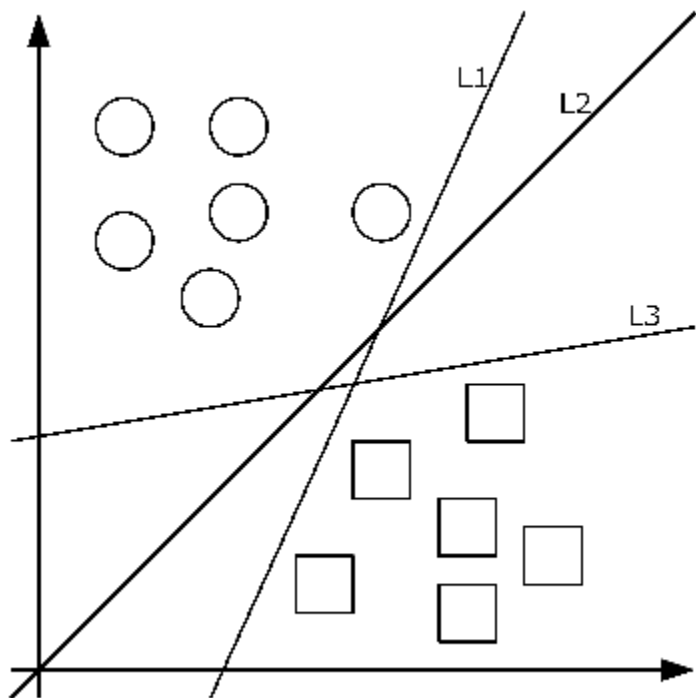
- ✓ 理解并掌握SVM中主要思想的含义、描述、数学表述
- ✓ 如何将一个好的idea形式化
- ✓ 能实际应用SVM
- ✓ 提高目标
 - 理解相关推导，能在有文献帮助下自主完成推导
 - 进一步能通过独立阅读、了解统计学习

SVM

Support vector machines 支持向量机

注意SVM的**形式化**过程，和**简化**的思路

large margin (最大边际?)

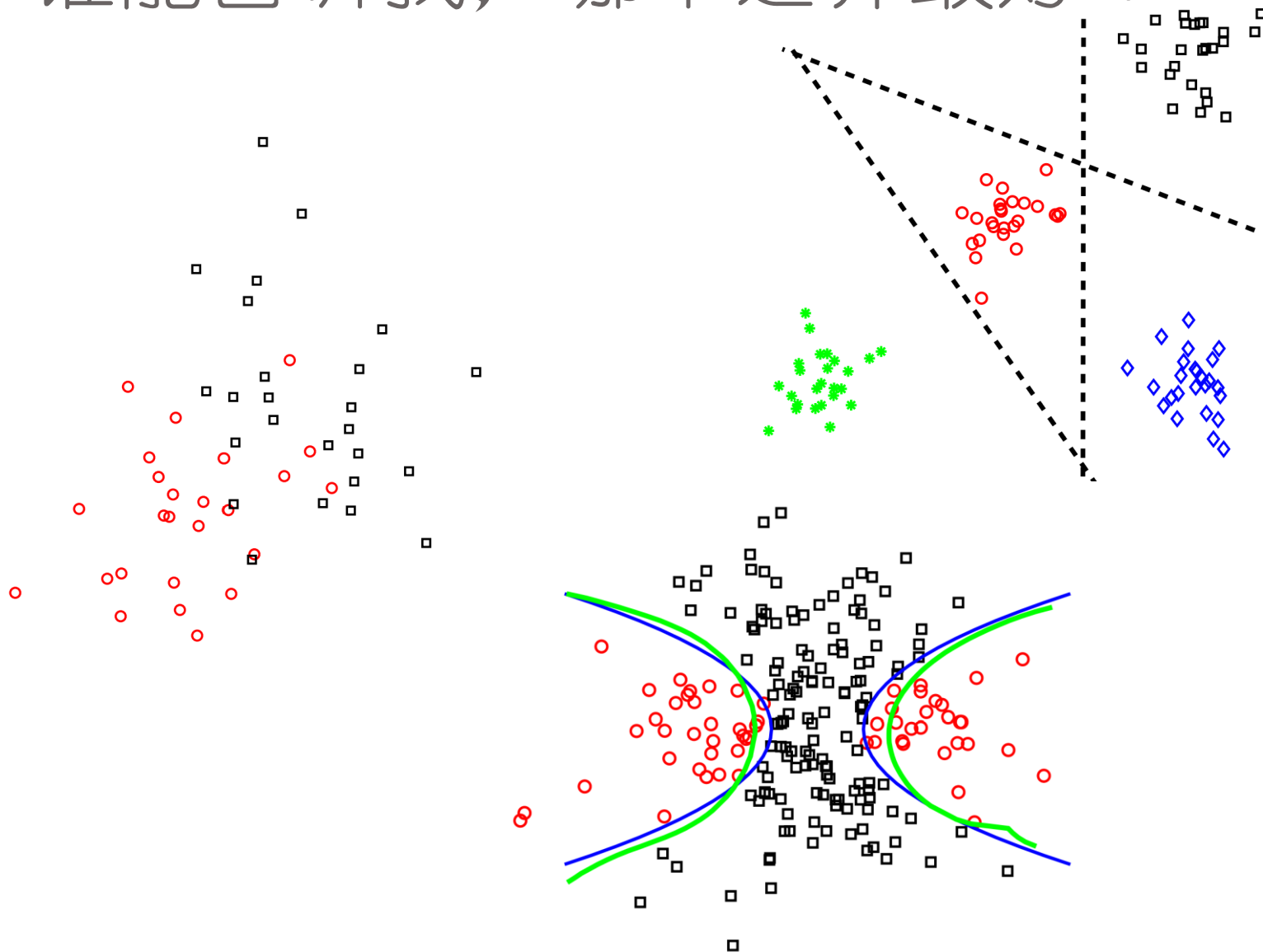


用线性边界分开二类

- 正类positive class, $y_i = 1$
- 负类negative class, $y_i = -1$
- 可以有很多边界L1, L2, L3, ..., 在训练集上都100%正确 (假设能完全分开)
- 哪个最好?

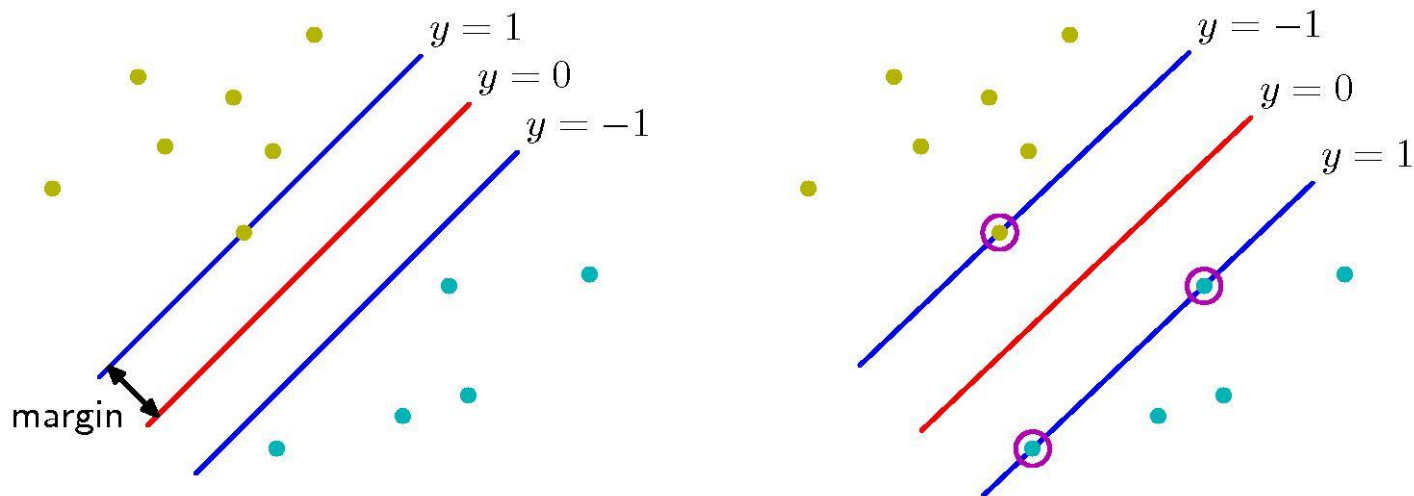
<http://zh.wikipedia.org/wiki/File:Classifier.svg>

谁能告诉我，哪个边界最好？



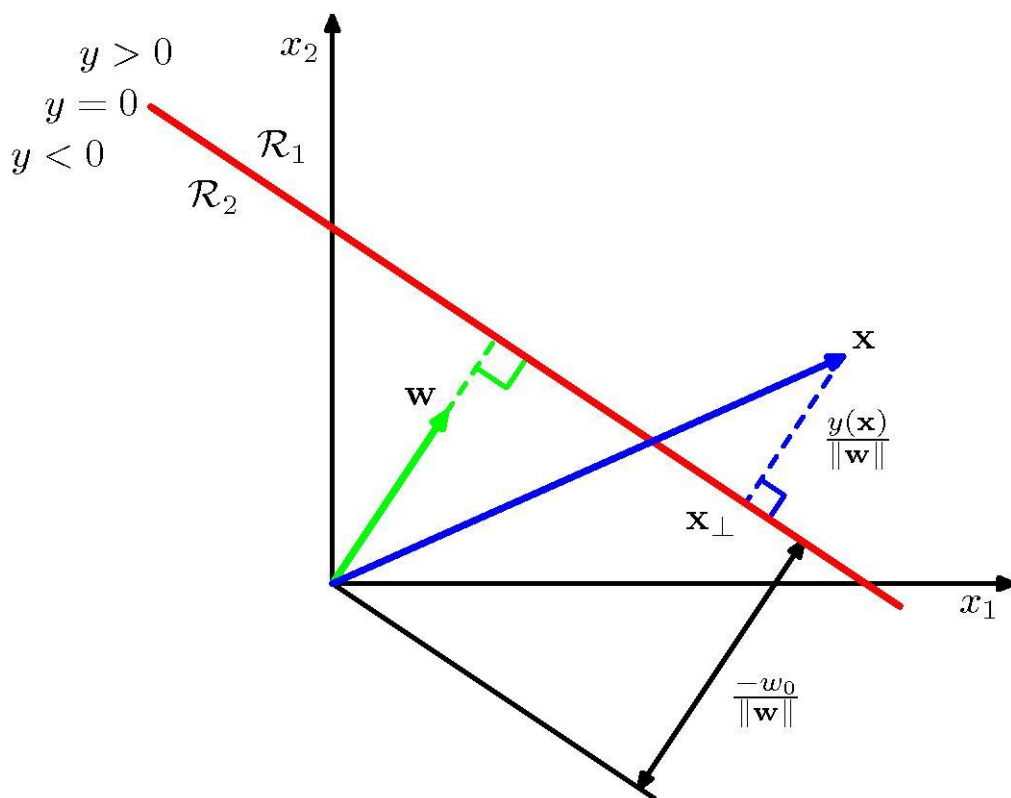
margin

图片来自PRML第7章



- 一个点（样例）的边距margin是其到分界超平面separating hyperplane的垂直距离
- SVM最大化（所有训练样本的）最小边距
- 有最小边距的点称为支持向量(support vectors)
 - 所以叫支持向量机support vector machines

几何geometry示意图



- 分类超平面
 $f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + b = 0$
 - 红色
 - 绿色为其法向量
normal vector
- $\mathbf{x}$ 为任一点/样例
 - 其到超平面的距离为?

图片来自PRML第4章

计算margin

- ✓ 投影点为 $\mathbf{x}_\perp$, $\mathbf{x} - \mathbf{x}_\perp$ 为距离向量
 - 其方向与 $\mathbf{w}$ 相同, 为 $\mathbf{w}/\|\mathbf{w}\|$
 - 其大小 r 可为0, 或正, 或负; margin为其大小的绝对值
- ✓ $\mathbf{x} = \mathbf{x}_\perp + r \frac{\mathbf{w}}{\|\mathbf{w}\|}$, 两边同乘以 $\mathbf{w}^T$, 然后加上 b
 - $\mathbf{w}^T \mathbf{x} + b = \mathbf{w}^T \mathbf{x}_\perp + b + r \frac{\mathbf{w}^T \mathbf{w}}{\|\mathbf{w}\|}$
 - $f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}_\perp) + r\|\mathbf{w}\|$ 为什么?
 - $r = \frac{f(\mathbf{x})}{\|\mathbf{w}\|}$ 为什么?
 - $\mathbf{x}$ 的margin是 $\frac{|f(\mathbf{x})|}{\|\mathbf{w}\|} = \frac{|\mathbf{w}^T \mathbf{x} + b|}{\|\mathbf{w}\|}$

分类、评价

✓ 怎么样分类？

- $f(\mathbf{x}) > 0$ — 分为正类, $f(\mathbf{x}) < 0$ — 分为负类
- 那么 $f(\mathbf{x}) = 0$ 怎么办？

✓ 对于任何一个样例，怎么知道预测的对错？

- $y_i f(\mathbf{x}_i) > 0$ 正确 $y_i f(\mathbf{x}_i) < 0$ 错误
- 即，因为我们假设能完全分开，所以

$$y_i f(\mathbf{x}_i) = |f(\mathbf{x}_i)|$$

SVM的形式化描述

✓ 那么，SVM问题是什么？

$$\operatorname{argmax}_{\mathbf{w}, b} \left(\min_i \left(\frac{|\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b|}{\|\mathbf{w}\|} \right) \right)$$

$$\operatorname{argmax}_{\mathbf{w}, b} \left(\min_i \left(\frac{y_i (\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b)}{\|\mathbf{w}\|} \right) \right)$$

$$\operatorname{argmax}_{\mathbf{w}, b} \left(\frac{1}{\|\mathbf{w}\|} \min_i (y_i (\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b)) \right)$$

✓ 非常难以优化，怎么办？

- 继续简化

换个角度看问题

✓ 到目前为止

- 对 $\mathbf{w}$ 没有限制，要求最大化最小的边际，难优化

✓ 判断对错: 如果 $yf(\mathbf{x}) > 0$ ，即分类正确

- 即 $y(\mathbf{w}^T \mathbf{x} + b) > 0$ ，只需要方向，完全不需要大小！
- 如果 $(\mathbf{w}, b)$ 变为 $(\lambda \mathbf{w}, \lambda b)$ ，预测和边际会变吗？

✓ 那么我们可以限定 $\min_i (y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b))$ 为1

- 问题变为：在限制 $\min_i (y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b))$ 为1时，最大化 $\frac{1}{\|\mathbf{w}\|}$

$$\begin{aligned} & \arg\min_{\mathbf{w}, b} \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} \\ \text{s. t. } & y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b) \geq 1, \forall i \end{aligned}$$

拉格朗日乘子法,again

✓ $L(\mathbf{w}, b, \mathbf{a}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} - \sum_{i=1}^n a_i (y_i (\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b) - 1)$

• Subject to $a_i \geq 0$

✓ 作业：证明最优化的必要条件

✓ $\frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} = \mathbf{0} \quad \rightarrow \quad \mathbf{w} = \sum_{i=1}^n a_i y_i \mathbf{x}_i$

✓ $\frac{\partial L}{\partial b} = 0 \quad \rightarrow \quad 0 = \sum_{i=1}^n a_i y_i$

✓ 在此两条件下，将两个等式代入回 L

$$\tilde{L}(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j y_i y_j \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j$$

SVM的对偶形式

- ✓ 在原来的空间（输入空间，input space）中
 - 变量是 $\mathbf{x}_i$ ，称为SVM的primal form
- ✓ 现在的问题里面
 - 变量是 a_i ，即拉格朗日乘子，称为对偶空间dual space
 - 对偶空间完成优化后，得到最优的 $\mathbf{a}$ ，可以得到原始空间中的最优解 $\mathbf{w}$
- ✓ SVM的对偶形式dual form

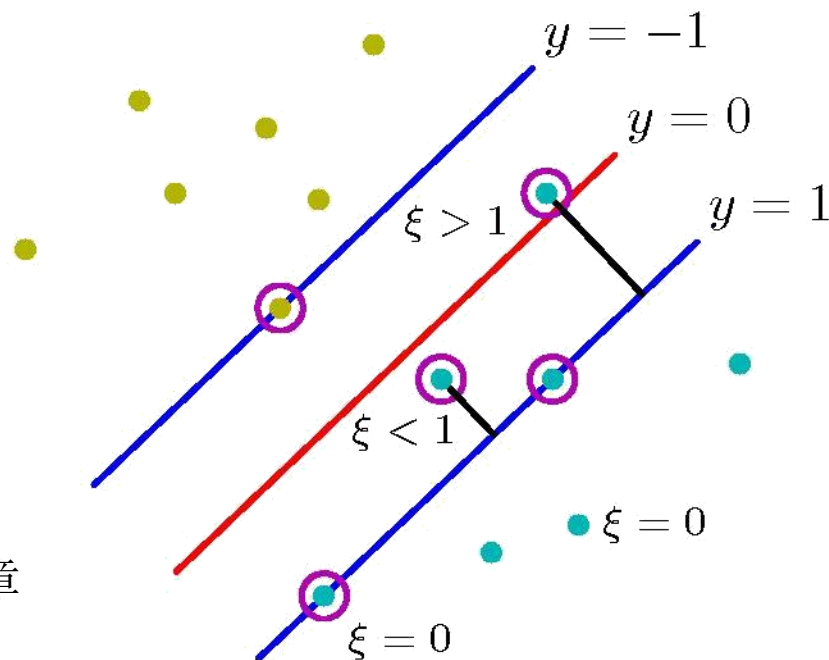
$$\begin{aligned} \arg\max_{\mathbf{a}} \quad & \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j y_i y_j \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j \\ \text{s. t.} \quad & a_i \geq 0 \\ & \sum_{i=1}^n a_i y_i = 0 \end{aligned}$$

剩下的问题

- ✓ 如何最优化？
 - 对偶空间中
 - 原始空间中
- ✓ 如果能允许少数点 $y_i f(\mathbf{x}_i) < 1$
 - 如果允许一个点 $y_i f(\mathbf{x}_i) < 1$ ，但是大幅度增加margin呢？
- ✓ 如果不是线性可分的linearly separable，但是可以用非线性的边界分开non-linearly separable？
- ✓ 如果不是两个类，而是多个呢？

Soft margin

- ✓ 可以允许少数点margin比1小
 - 但是犯错误是有惩罚的，否则？
 - $y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b) \geq 1 \rightarrow y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b) \geq 1 - \xi_i$
 - ξ_i : 松弛变量slack variable, 即允许犯的错误
 - $\xi_i \geq 0$
- $\xi_i = 0$, $0 < \xi_i < 1$, $\xi_i = 1$, $\xi_i > 1$ 各自代表什么？



图片来自PRML第7章

如何惩罚？

✓ Primal space

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin}_{\mathbf{w}, b, \xi} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + C \sum_{i=1}^n \xi_i \\ \text{s. t.} \quad & y_i (\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b) \geq 1 - \xi_i \\ & \xi_i \geq 0 \end{aligned}$$

✓ $C > 0$: 正则化参数 regularization parameter

- ξ_i —代价，我们要最小化代价函数（总代价）
- $\frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w}$ —正则项 regularization term，对分类器进行限制，使复杂度不至于太高（另一个角度，还是最大化边际）
- 那么，怎么确定 C 的值？

Soft margin的对偶形式

✓ 自主阅读PRML

$$\begin{aligned} \operatorname{argmax}_a \quad & \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j y_i y_j \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j \\ \text{s.t.} \quad & C \geq a_i \geq 0 \\ & \sum_{i=1}^n a_i y_i = 0 \end{aligned}$$

✓ 对偶形式仅依赖于内积！

内积：线性和非线性的联系

✓ 线性和非线性有时候紧密联系在一起—通过内积

✓ $\mathbf{x} = (x_1, x_2), \mathbf{z} = (z_1, z_2)$

✓ $K(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = (1 + \mathbf{x}^T \mathbf{z})^2 = (1 + x_1 z_1 + x_2 z_2)^2$
 $= 1 + 2x_1 z_1 + 2x_2 z_2 + x_1^2 z_1^2 + x_2^2 z_2^2 + 2x_1 z_1 x_2 z_2$

$$= \begin{pmatrix} 1 \\ \sqrt{2}x_1 \\ \sqrt{2}x_2 \\ x_1^2 \\ x_2^2 \\ \sqrt{2}x_1 x_2 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 1 \\ \sqrt{2}z_1 \\ \sqrt{2}z_2 \\ z_1^2 \\ z_2^2 \\ \sqrt{2}z_1 z_2 \end{pmatrix}$$

Kernel trick

- ✓ 两个向量 $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^d$, 一个非线性函数 $K(\mathbf{x}, \mathbf{y})$
- ✓ 对于满足某些条件的函数 K , 一定存在一个映射 (mapping) $\phi: \mathbb{R}^d \mapsto \Phi$, 使得对任意的 $\mathbf{x}, \mathbf{y}$
$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \phi(\mathbf{x})^T \phi(\mathbf{y})$$
 - 非线性函数 K 表示两个向量的相似程度
 - 等价于 Φ 里面的内积
- ✓ Φ : 特征空间 feature space
 - 可以是有限维的空间, 但也可以是无穷维的空间 infinite dimensional Hilbert space

什么样的限制条件？

- ✓ 必须存在特征映射 **feature mapping**，才可以将非线性函数表示为特征空间中的内积
- ✓ Mercer's condition（Mercer条件，是充分必要的）：
对**任何**满足 $\int g^2(\mathbf{u})d\mathbf{u} < \infty$ 的非零函数，**对称**函数 K 满足条件：
$$\iint g(\mathbf{u})K(\mathbf{u}, \mathbf{v})g(\mathbf{v})d\mathbf{u}d\mathbf{v} \geq 0$$
- ✓ 看上去眼熟？另一种等价形式：对**任何**一个样本集合 $\{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}$, $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^d$ ，如果矩阵 $K = [K_{ij}]_{i,j}$ （矩阵的第 i 行、第 j 列元素 $K_{ij} = K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ ）总是半正定的，那么函数 K 满足 Mercer 条件
- ✓ 如何判定是否满足？有几种方法？

核支持向量机Kernel SVM

✓ 核函数kernel function: K

✓ 对偶形式:

$$\operatorname{argmax}_a \sum_{i=1}^n a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j y_i y_j K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$$

✓ 分类边界: $\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n a_i y_i \phi(\mathbf{x}_i)$

✓ 怎样预测: $\mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}) = \phi(\mathbf{x})^T \left(\sum_{i=1}^n a_i y_i \phi(\mathbf{x}_i) \right) = \sum_{i=1}^n a_i y_i K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$

- 线性: $\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n a_i y_i \mathbf{x}_i$, $\mathbf{w}^T \mathbf{x}$ 计算量为 $O(d)$
- 非线性 (核) 方法测试所需时间为?
- 假设计算 K 的时间为 $O(d)$, 是 $O(nd)$ 吗?

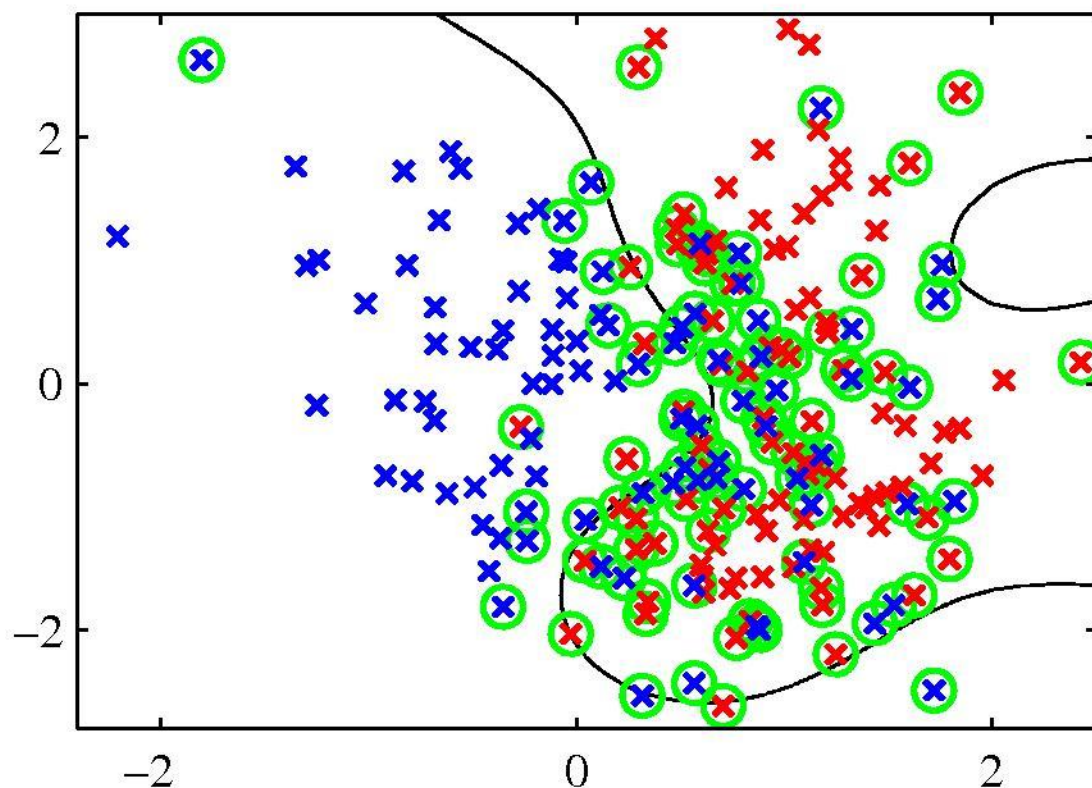
Complementary Slackness

- ✓ 对所有 i , KKT条件包括 $(C - a_i)\xi_i = 0$
 - 情况1: $C > a_i > 0$, $\xi_i = 0$, 在特征空间中边际为1的两个超平面上
 - 情况2: $a_i = C$, 对 ξ_i 没有限制
 - 可以在超平面上、介于两个超平面之间、或以外（即分类错误）
 - 情况3: $a_i = 0$, 在预测时不需要计算
- ✓ 这代表什么？
 - 复杂度由 $a_i > 0$ 的个数, 而非样本的总数目来决定
 - $\mathbf{a}$ 是稀疏的
 - 在soft margin SVM中, 称 $a_i > 0$ 对应的 $\mathbf{x}_i$ 为支持向量

非线性核

- ✓ 线性核linear kernel, dot-product kernel: $K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{x}^T \mathbf{y}$
- ✓ 非线性核non-linear kernel
 - RBF(radial basis function)、高斯(Gaussian)核:
 $K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \exp(-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2)$
 - 多项式核: $K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\gamma \mathbf{x}^T \mathbf{y} + c)^d$
 - ...

非线性核的例子(RBF)



图片来自PRML第7章

超参数

- ✓ 如何决定 C 、 γ 、 ...
 - 必须给定这些参数parameter的值，才能进行SVM学习，SVM本身不能学习这些参数！
 - 称为超参数hyper-parameter
 - 对SVM的结果有极大的影响！
- ✓ 用交叉验证在训练集上来学习
 - 在训练集上得到不同参数的交叉验证准确率
 - 选择准确率最高的超参数的数值

多类Multiclass(1)

- ✓ 思路：转化为2类问题
- ✓ 1-vs-1 (one versus one): C 个类 $\{1, 2, \dots, C\}$
 - 设计 $\binom{C}{2}$ 个分类器: 用 i 和 $j (i > j)$ 两类的训练数据学习
 - 一共 $C(C - 1)/2$ 个, 其中每个类出现 $C - 1$ 次
 - 对测试样本 $\mathbf{x}$, 一共会得到 $C(C - 1)/2$ 个结果, 然后投票vote
 - 每个分类器 f_i 采用其二值输出, 即 $\text{sign}(f_i(\mathbf{x}))$

	1	2	3
1			
2	1		
3	1	3	

多类Multiclass(2)

✓ 1-vs.-all (或1-vs.-rest)

- 设计 C 个分类器，第 i 个分类器用类 i 做正类，把所有 $C - 1$ 个类别的数据合并在一起做负类
 - 和交叉验证的步骤有些类似
 - 每个新的分类器 f_i 采用其实数值输出，即 $f_i(\mathbf{x})$
- $f_i(\mathbf{x})$ 的实数输出可以看成是其“信心” confidence
- 最终选择信心最高的那个类为输出

$$\operatorname{argmax}_i f_i(\mathbf{x})$$

多类Multiclass(3)

✓ 直接解决多类问题(进一步阅读)

- Crammer-Singer方法
- <http://jmlr.org/papers/v2/crammer01a.html>

✓ DAGSVM(进一步阅读)

- <http://research.microsoft.com/apps/pubs/?id=68541>

✓ ECOC(进一步阅读)

- <http://www.jair.org/papers/paper105.html>

从SVM的介绍学到的思想？

1. 确定问题，对问题有充分的认识（实践、理论）
2. 好的思路、想法idea（如margin）
 - 从理论（概率、统计？）中来
 - 或者实践（已有线性分类器的缺点，如感知机perceptron）
3. 形式化
 - 用精确的数学形式表达出来
 - 如果不能精确描述，或说明你的idea有问题
 - 简化，开始时避免复杂、模糊的想法：限制条件(如，线性可分)，从较小范围开始（如，2类）
4. 数学基础和研究
 - 用到的几何、凸优化、拉格朗日乘子法、Hilbert空间...
 - 经典的相关数学背景要熟悉：至少知道到哪里查

简化：一种可靠的思路

- ✓ 问题（特别是数学问题）难以解决时，尽量简化
 - 问题的表述，如果难以形式化，可以将问题简化
 - 简化后的问题可以去除很多复杂的考虑，但是
 - 原问题的核心要保持
 - 如SVM从二类、线性、可分的情况开始
- ✓ 有时可以通过换思路的方法等价简化
 - 如SVM限定 $\min_i (y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b))$ 为1
 - 也可以对原问题做不重要的修改以使简化成为可能
 - 如（**进一步**阅读）LIBLINEAR假设不使用 b

进一步的阅读

✓ 如果对本章的内容感兴趣，可以参考如下文献

- 凸函数、拉格朗日乘子法、KKT条件：

- Convex Optimization 第一、二、五章

- SVM和统计学习

- <http://research.microsoft.com/pubs/67119/svmtutorial.pdf>

- 最新会议论文集：ICML、NIPS、AISTATS、COLT、...

- SMO:

- http://en.wikipedia.org/wiki/Sequential_minimal_optimization

- LIBSVM, SVMLight

- Pegasos: <http://www.cs.huji.ac.il/~shais/code/>

- DCD/LIBLINEAR: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/liblinear/>

- 加性核：我的主页 → publications 页面 → [W5]