

2025-2026学年 第1学期(秋)



数据挖掘

支持向量机分类

2025 年 11 月

目录

01

了解SVM

02

深入SVM

03

非线性SVM

了解SVM

- 简介

- SVM (Support Vector Machine) 是一种二分类模型，是特征空间上的间隔最大的线性分类器，其学习策略是间隔最大化，最终可转化为一个凸二次规划问题求解

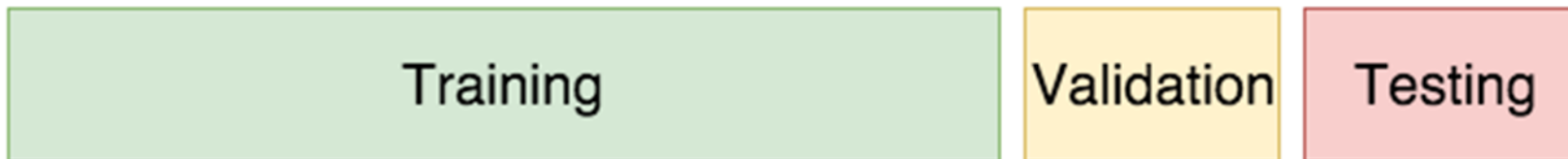


- 来历

- 思想由Vladimir Vapnik (弗拉基米尔·瓦普尼克) 和他的同事于1964年提出
- 1992年由Boser等通过核方法得到了非线性SVM
- 90年代后得到快速发展并衍生出一系列改进和扩展算法，在机器学习和数据挖掘领域得到广泛应用

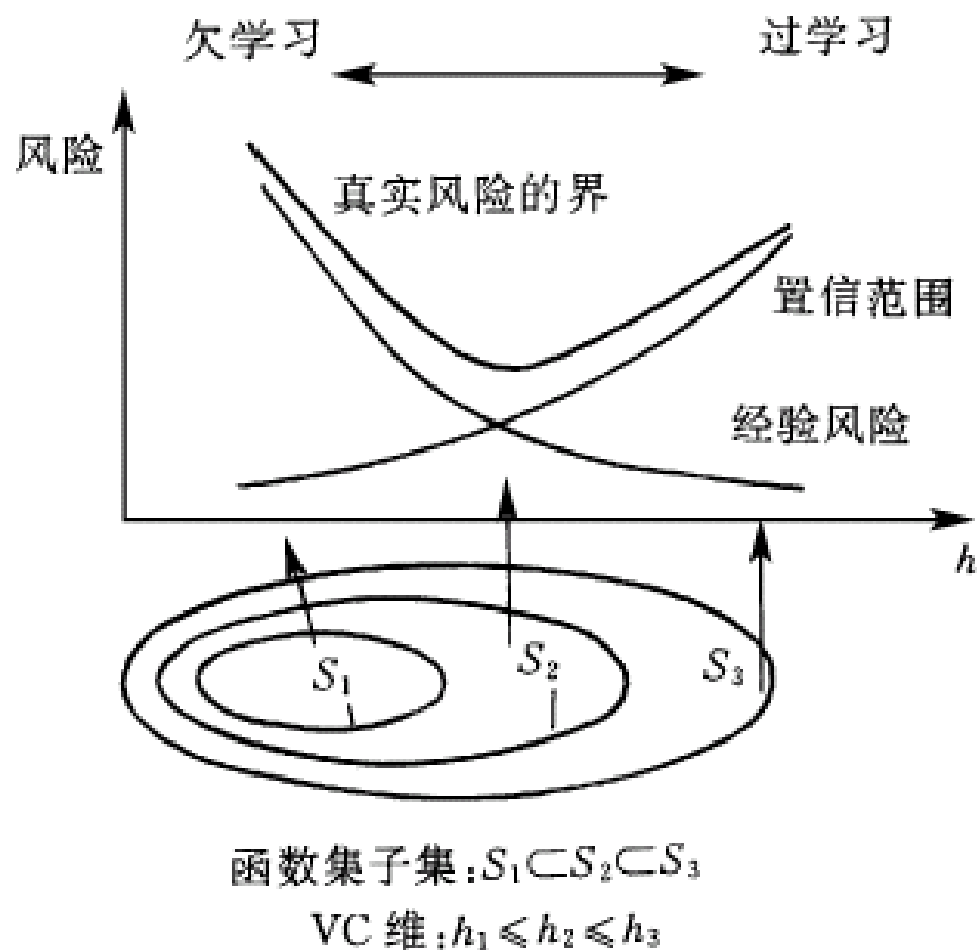
了解SVM

- 传统的统计模式识别方法在进行机器学习时，强调经验风险最小化。而单纯的**经验风险最小**化会产生“过学习问题”，其泛化能力较差。
- **泛化能力**是指：将学习机器(即预测函数,或称学习函数、学习模型)对未来输出进行正确预测的能力。



了解SVM

- “过学习问题”：某些情况下，当训练误差过小反而会导致泛化能力的下降。



了解SVM

- 根据统计学习理论，学习机器的实际风险由**经验风险值**和**置信范围值**两部分组成。而基于经验风险最小化准则的学习方法只强调了训练样本的经验风险最小误差，没有**最小化**置信范围值，因此其泛化能力较差。
- Vapnik于1995年提出的支持向量机（Support Vector Machine, SVM）以训练误差作为优化问题的约束条件，以置信范围值最小化作为优化目标，即SVM是一种基于**结构风险最小化**准则的学习方法，其泛化能力明显优于一些传统的学习方法。

了解SVM

- 由于SVM 的求解最后转化成二次规划问题的求解，因此SVM 的解是全局唯一的最优解
- SVM在解决小样本、非线性及高维数据挖掘问题中表现出许多特有的优势，并能够推广应用到函数拟合等其他机器学习问题中。

分类标准起源：线性分类器

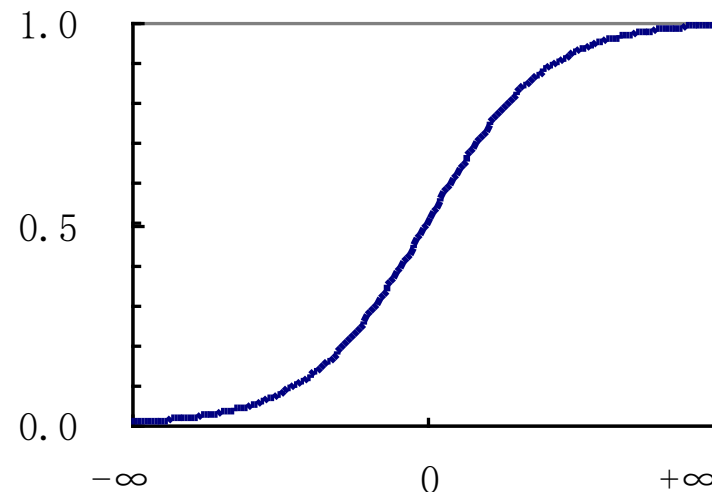
- 线性分类器的目标
 - 假设 x 表示数据点， y 表示类别 $(-1,1)$
 - 目标： 找一个超平面把数据分成两类，超平面方程可表示为：

$$w^T x + b = 0$$

分类标准起源：Logistic 回归

- Logistic回归

$$h_{\theta}(x) = g(\theta^T x) = \frac{1}{1 + e^{-\theta^T x}}$$



- 将特征的线性组合作为自变量，自变量取值为负无穷到正无穷，使用Logistic函数（sigmoid函数）将自变量映射到(0,1)上
- x 是 n 维度特征向量， g 是Logistic函数
- 若 $\theta^T x > 0$, 则 $h_{\theta}(x) > 0.5$, x 属于 $y=1$ 的类
- 若 $\theta^T x \leq 0$, 则 $h_{\theta}(x) \leq 0.5$, x 属于 $y=-1$ 的类

分类标准起源：Logistic 回归

- Logistic变形

- 将 $\theta^T x = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \cdots + \theta_n x_n (x_0 = 1)$ 中的 θ_0 替换为 b ，将 $\theta_1 x_1 + \cdots + \theta_n x_n$ 替换为 $w^T x$ ，有：

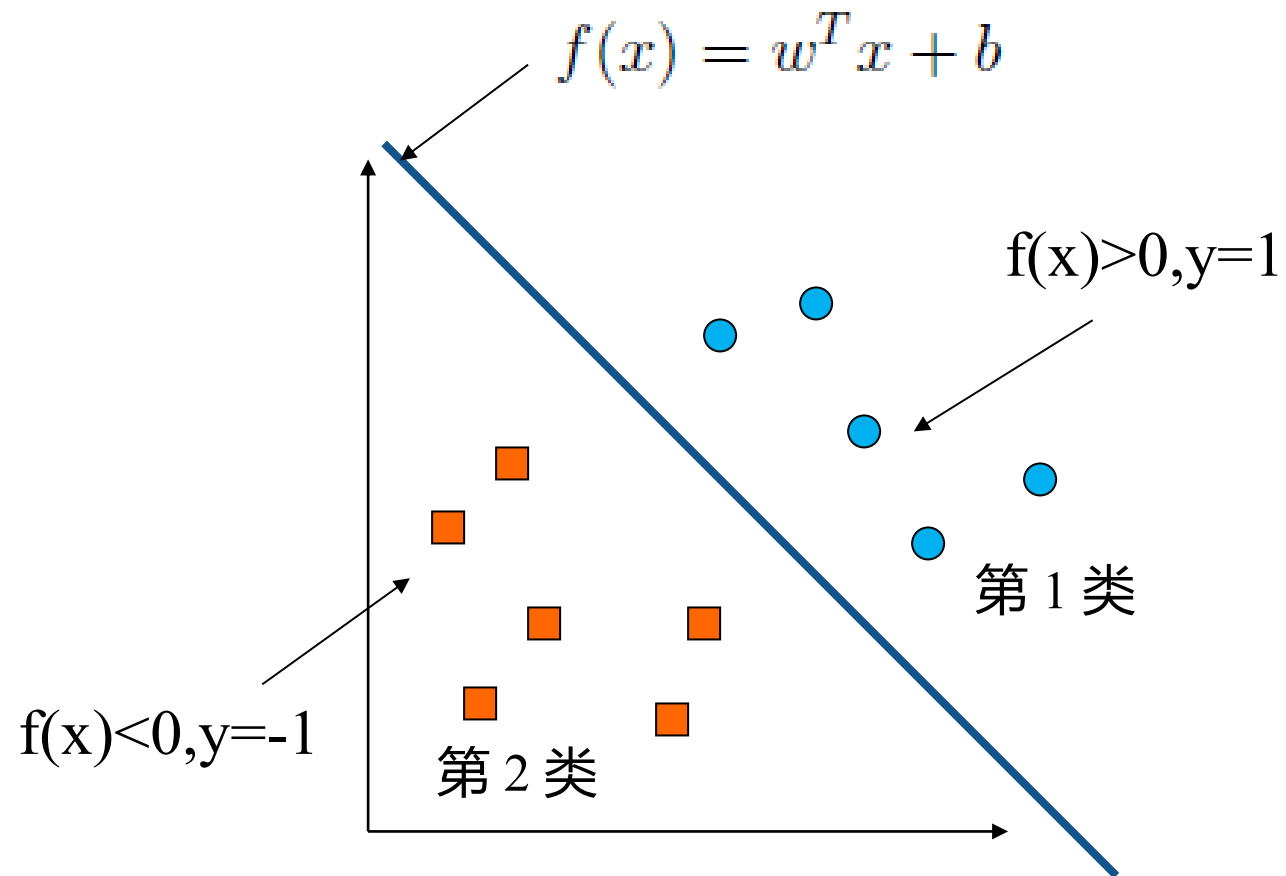
$$\theta^T x = w^T x + b$$

- 将上述函数 $g(z)$ 映射到 $y=1$ 和 $y=-1$ 上，映射关系为：

$$h_{\theta}(x) = g(\theta^T x) = g(w^T x + b)$$

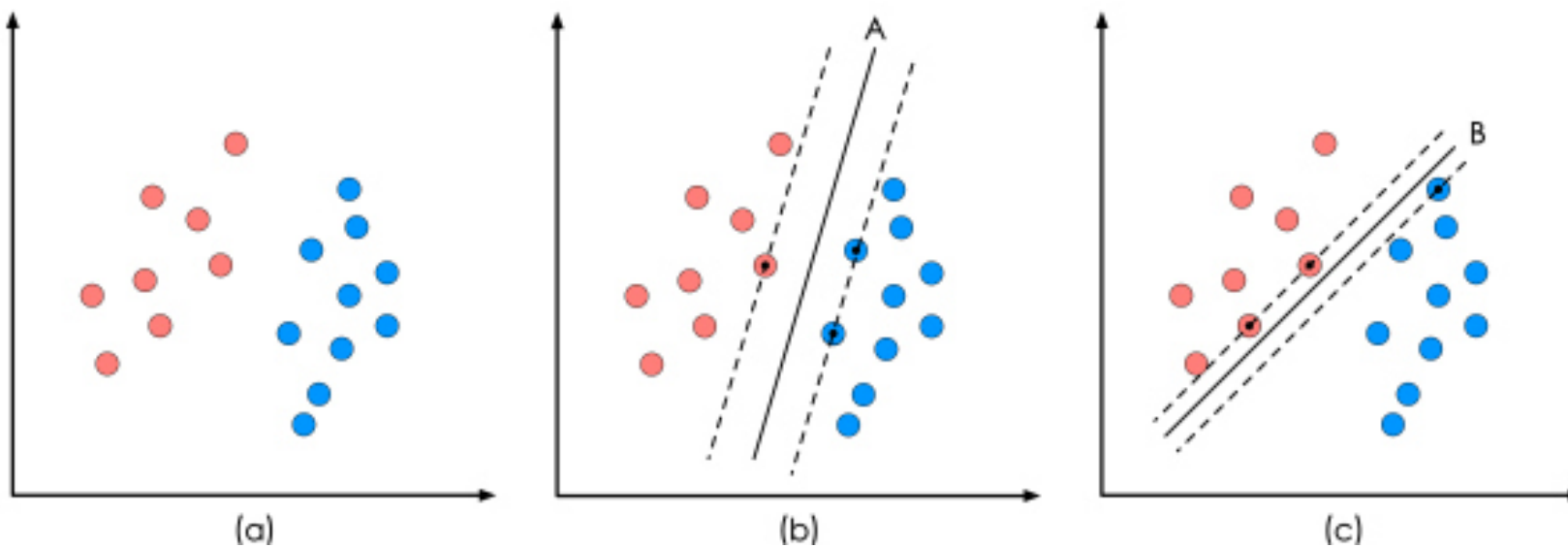
$$g(z) = \begin{cases} 1 & z \geq 0 \\ -1 & z < 0 \end{cases}$$

线性分类的一个例子



线性分类的一个例子

许多决策边界可以分割这些数据点出为两类，我们选取哪一个？





南京大學
NANJING UNIVERSITY

目录

01

了解SVM

02

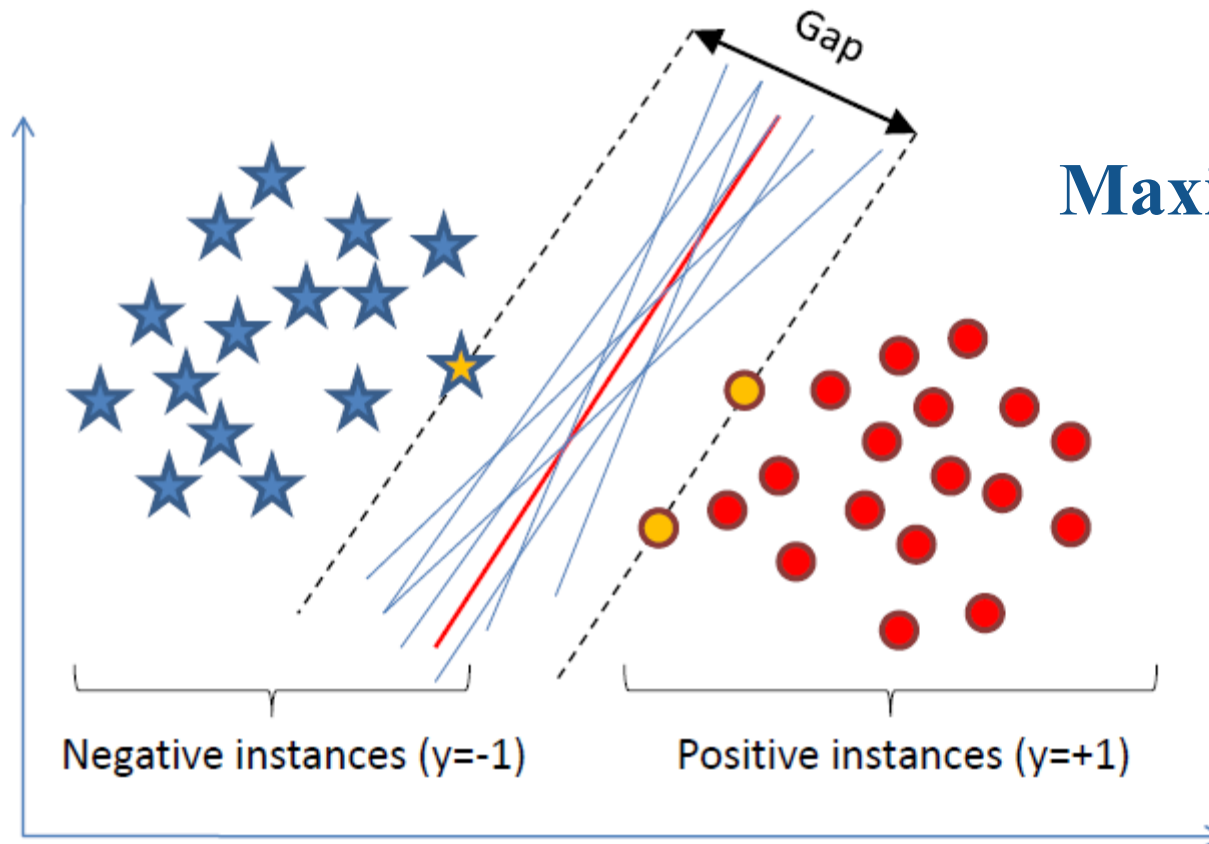
深入SVM

03

非线性SVM

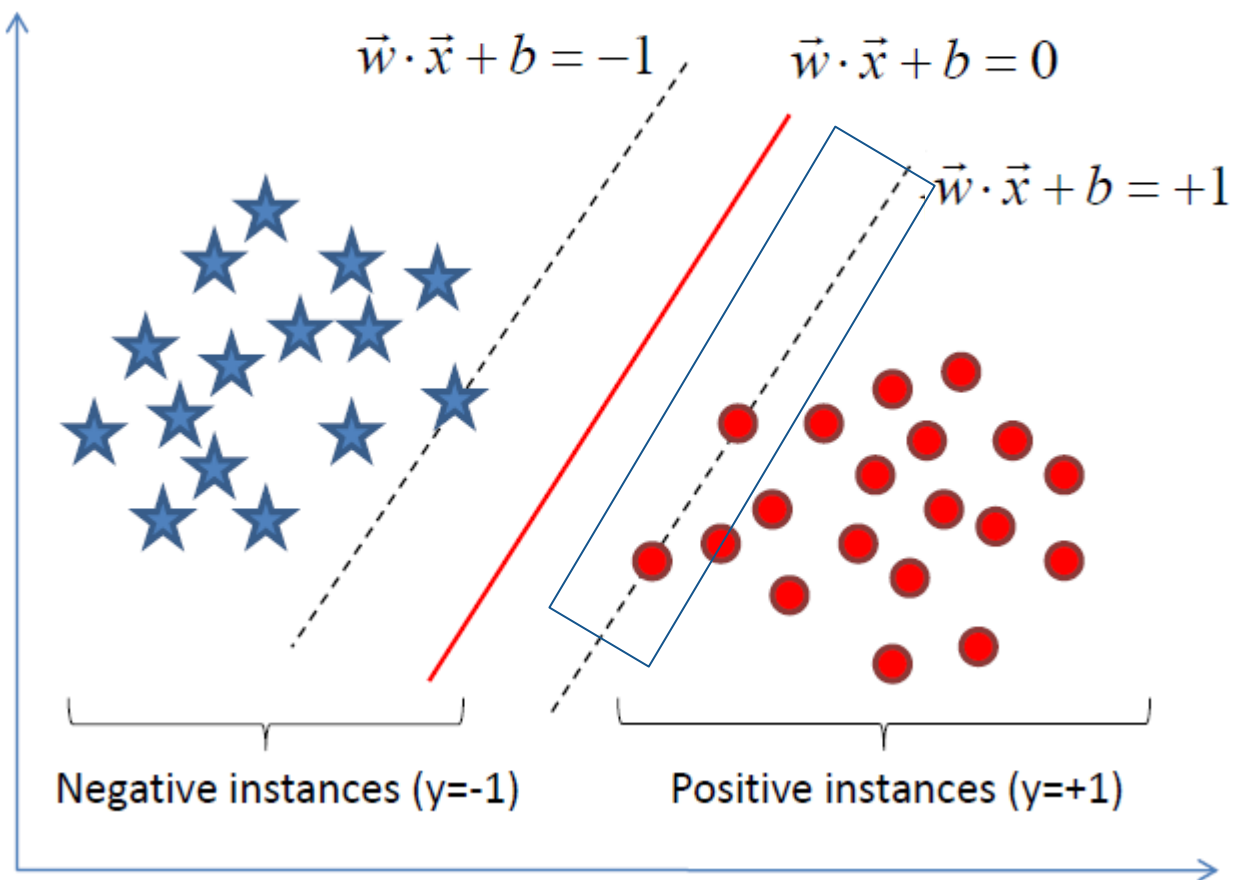
最小间隔面推导

Given training data: $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N \in R^n$
 $y_1, y_2, \dots, y_N \in \{-1, +1\}$

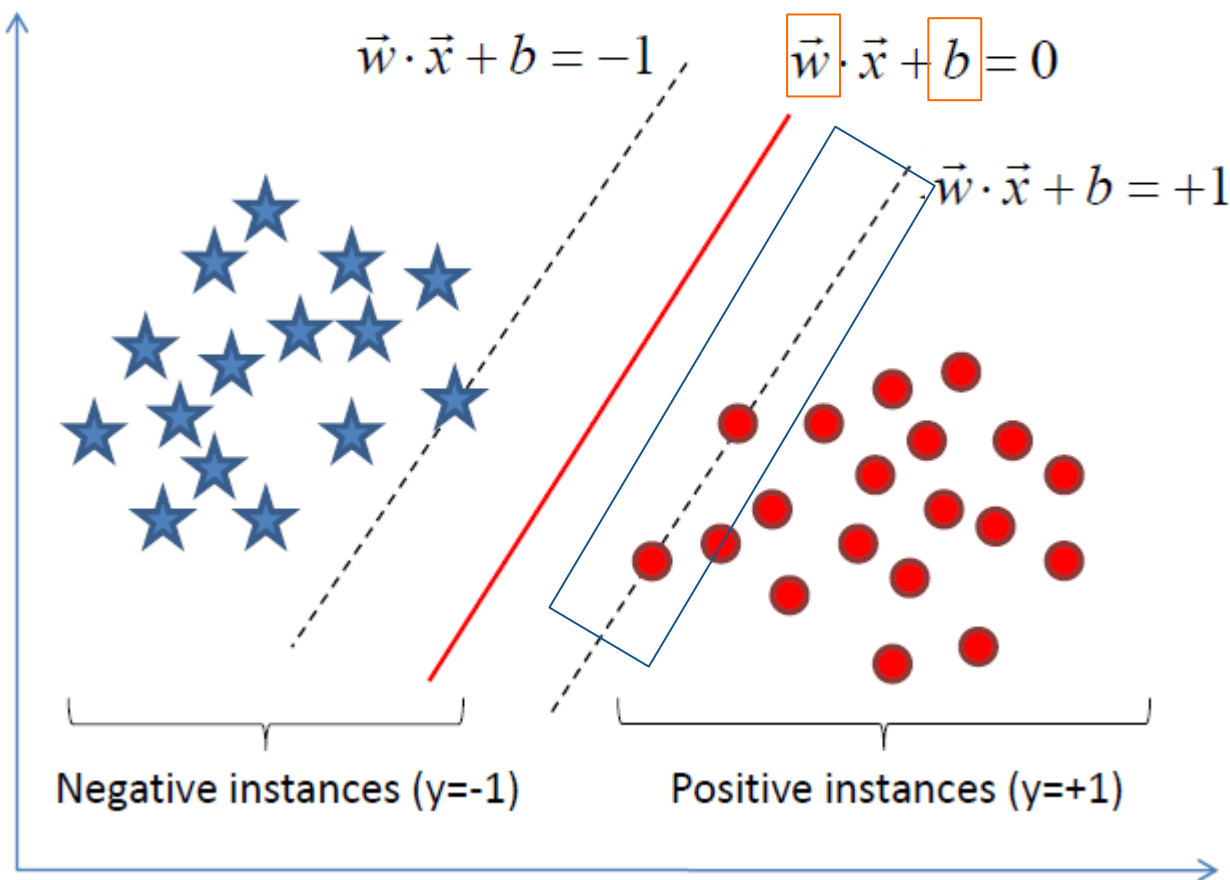


Maximize the Gap!

最小间隔面推导



最小间隔面推导



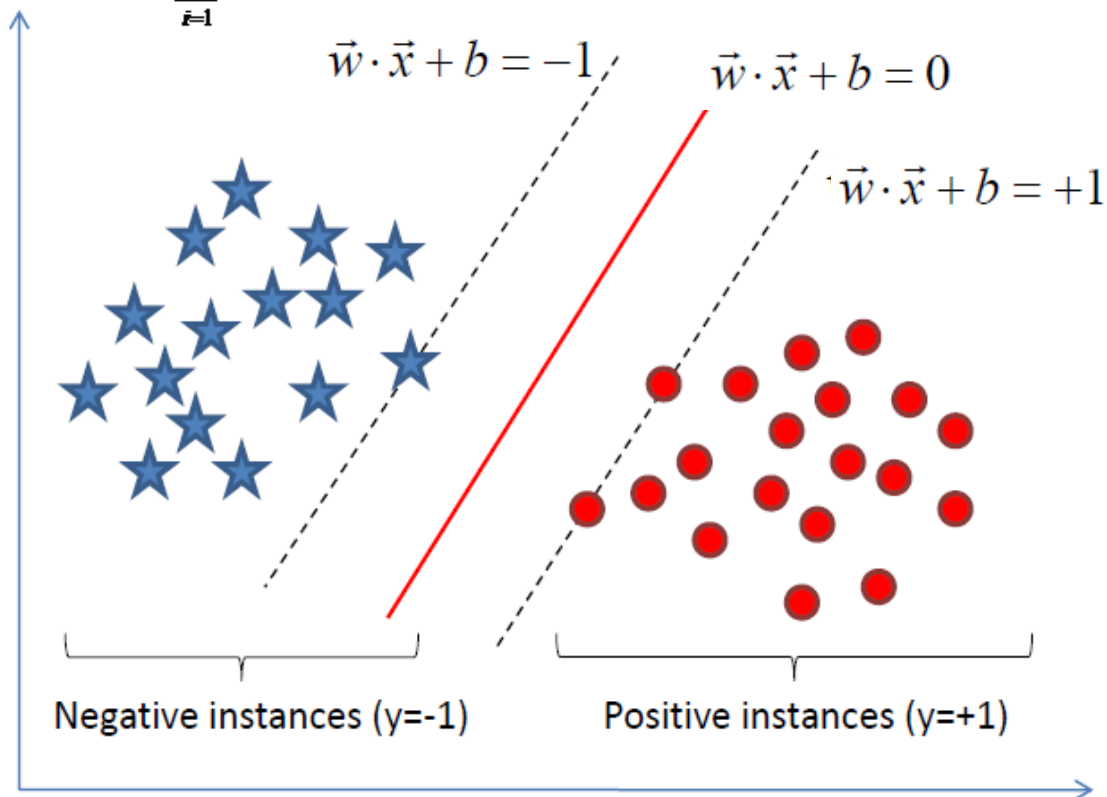
要找最优分割面，只要确定
权值向量 w 和常数 b 即可

如何确定权值向量 w 和常数 b 呢？

最小间隔面推导

$$g(x) = \langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b$$

$$= \langle \sum_{i=1}^n (\alpha_i y_i \mathbf{x}_i), \mathbf{x} \rangle + b$$



Since we want to maximize the gap,

we need to minimize $\|\vec{w}\|$

or equivalently minimize $\frac{1}{2} \|\vec{w}\|^2$

($\frac{1}{2}$ is convenient for taking derivative later on)

应用几何知识，两根平行线的距离为常数项相减后除以法向量的模长

We know that

$$D = |b_1 - b_2| / \|\vec{w}\|$$

Therefore:

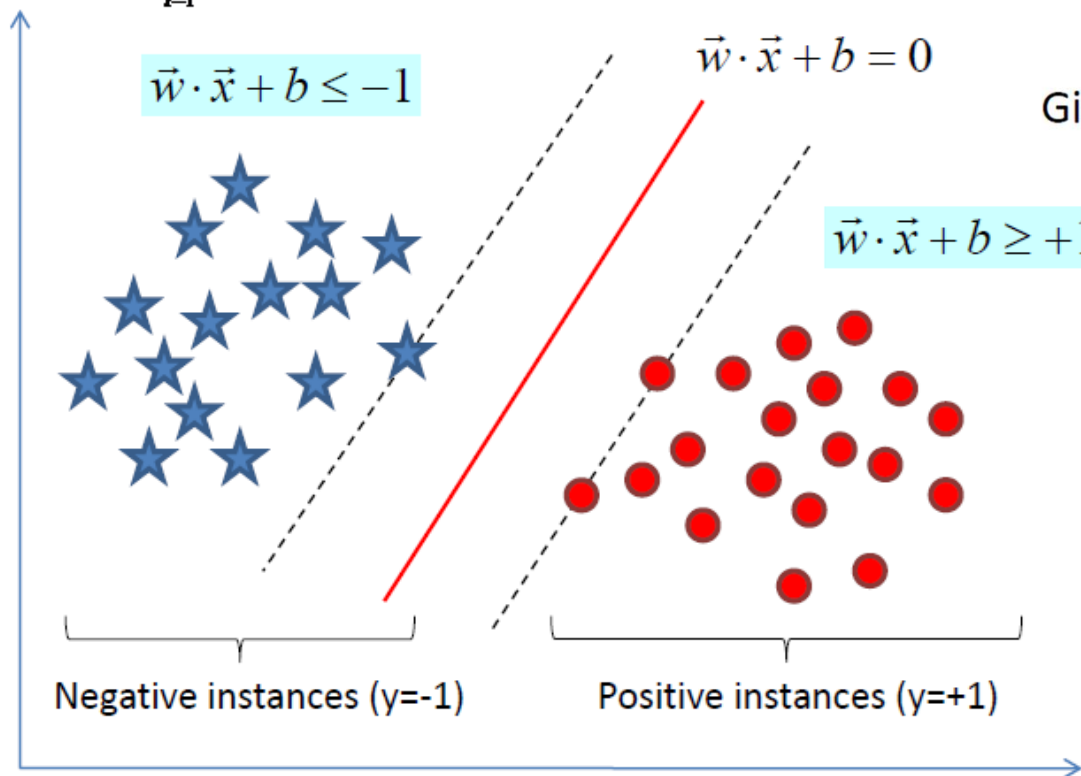
$$D = 2 / \|\vec{w}\|$$

最小化 w 跟最小化 w 平方是等价的，之所以这些做，是因为这样能够把问题变成二次规划问题，而二次规划问题是有通用的解法的

最小间隔面推导

$$g(x) = \langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b$$

$$= \langle \sum_{i=1}^n (\alpha_i y_i \mathbf{x}_i), \mathbf{x} \rangle + b$$



Given training data: $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N \in R^n$
 $y_1, y_2, \dots, y_N \in \{-1, +1\}$

Equivalently:

$$y_i (\vec{w} \cdot \vec{x}_i + b) \geq 1$$

In summary:

Want to minimize $\frac{1}{2} \|\vec{w}\|^2$ subject to $y_i (\vec{w} \cdot \vec{x}_i + b) \geq 1$ for $i = 1, \dots, N$

Then given a new instance x , the classifier is $f(\vec{x}) = \text{sign}(\vec{w} \cdot \vec{x} + b)$

最小间隔面推导

$$\text{Minimize } \boxed{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_i^2} \quad \text{subject to} \quad \boxed{y_i(\vec{w} \cdot \vec{x}_i + b) - 1 \geq 0} \quad \text{for } i = 1, \dots, N$$

Objective function Constraints

$$\text{Gap(Margin): } D = 2 / \|\vec{w}\|$$

Problem Transformation:

$$\max D \rightarrow \min \|\vec{w}\| \rightarrow \min \|\vec{w}\|^2 \rightarrow \min \frac{1}{2}(\|\vec{w}\|^2)$$

最小间隔面推导

我们分类问题也被转化成一个带约束的最小值的问题：

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{subject to} \quad & y_i[(wx_i) + b] - 1 \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (N \text{ 是样本数}) \end{aligned}$$

在这个问题中，自变量就是 w ，而目标函数是 w 的二次函数，所有的约束条件都是 w 的线性函数。因此它是一个**凸二次规划**问题。

最小间隔面推导

$$\text{Minimize } \boxed{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_i^2} \quad \text{subject to } \boxed{y_i(\vec{w} \cdot \vec{x}_i + b) - 1 \geq 0} \quad \text{for } i = 1, \dots, N$$

Objective function Constraints

- 用惩罚项来表达约束条件，从而能够转化带约束的优化问题为无约束的优化问题

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 + \text{penalty term}$$

- 为训练数据中的每个数据样本，定义penalty term如下：

$$\max_{\alpha_i \geq 0} \alpha_i (1 - y_i(w^T x_i + b))$$

- 从而可以重写SVM的优化问题：

$$\begin{aligned} & \min \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + \sum_{i=1}^n \max_{\alpha_i \geq 0} \alpha_i (1 - y_i(w^T x_i + b)) \right\} \\ & = \min_{w,b} \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - y_i(w^T x_i + b)) \right\} \end{aligned}$$

拉格朗日
乘子

最小间隔面推导

- 通过交换“max”和“min”，形式化为对偶问题(1):

$$\begin{aligned} \min_{w,b} \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} & \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - y_i (w^T x_i + b)) \right\} & g(x) = \langle w, x \rangle + b \\ & & = \langle \sum_{i=1}^n (\alpha_i y_i x_i), x \rangle + b \\ = \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \min_{w,b} & \underbrace{\left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - y_i (w^T x_i + b)) \right\}}_{L(w,b,\alpha)} \end{aligned}$$

- 求解该对偶问题，在每一个固定的拉格朗日乘子 α_i 下，求解满足最小化 $L(w, b; \alpha)$ 的 w 和 b

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \mathbf{w}^\top - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i^\top = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (2)$$

最小间隔面推导

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \mathbf{w}^\top - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i^\top = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (2) \quad \text{支持点理论解释}$$

- 基于上式 (1) 可以得到, $\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i$

$$g(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b$$

$$= \langle \sum_{i=1}^n (\alpha_i y_i \mathbf{x}_i), \mathbf{x} \rangle + b$$



最小间隔面推导

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \mathbf{w}^\top - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i^\top = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (2) \quad \text{支持点理论解释}$$

- 基于上式 (1) 可以得到, $\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i$

- 所以 $\min_{\{w,b\}} L(w, b, \alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i^\top x_j)$

$$g(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b$$

$$= \langle \sum_{i=1}^n (\alpha_i y_i \mathbf{x}_i), \mathbf{x} \rangle + b$$



$$\begin{aligned} & \min_{w,b} \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - y_i (\mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i + b)) \right\} \\ &= \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \min_{w,b} \underbrace{\left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - y_i (\mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i + b)) \right\}}_{L(w,b,\alpha)} \end{aligned}$$



最小间隔面推导

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \mathbf{w}^\top - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i^\top = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (2) \quad \text{支持点理论解释}$$

$$g(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b$$

$$= \langle \sum_{i=1}^n (\alpha_i y_i \mathbf{x}_i), \mathbf{x} \rangle + b$$

- 基于上式 (1) 可以得到, $\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i$

- 所以 $\min_{\{\mathbf{w}, b\}} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i^\top x_j)$

- 原始的优化问题 (1) 变成如下问题 (2) :

$$\max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i^\top x_j) \right\}$$

$$s. t. \alpha_i \geq 0, \forall i,$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0$$

$$\min_{\mathbf{w}, b} \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - y_i (\mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i + b)) \right\}$$

$$= \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \min_{\mathbf{w}, b} \underbrace{\left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - y_i (\mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i + b)) \right\}}_{L(\mathbf{w}, b, \alpha)}$$

最小间隔面推导

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \mathbf{w}^\top - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i^\top = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (2) \quad \text{支持点理论解释}$$

$$g(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b$$

$$= \langle \sum_{i=1}^n (\alpha_i y_i \mathbf{x}_i), \mathbf{x} \rangle + b$$

- 基于上式 (1) 可以得到, $\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i$

- 所以 $\min_{\{\mathbf{w}, b\}} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i^\top x_j)$

- 原始的优化问题 (1) 变成如下问题 (2) :

$$\begin{aligned} & \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i^\top x_j) \right\} \\ & s. t. \alpha_i \geq 0, \forall i, \\ & \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{w}, b} \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - y_i (\mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i + b)) \right\} \\ & = \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \min_{\mathbf{w}, b} \underbrace{\left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - y_i (\mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i + b)) \right\}}_{L(\mathbf{w}, b, \alpha)} \end{aligned}$$

- 仍然是一个二次规划问题, 可以求解到全局最优解。(方法: SMO)

最小间隔面推导

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \mathbf{w}^\top - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i^\top = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = -\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (2) \quad \text{支持点理论解释}$$

$$g(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b$$

$$= \langle \sum_{i=1}^n (\alpha_i y_i \mathbf{x}_i), \mathbf{x} \rangle + b$$

- 基于上式 (1) 可以得到, $\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i$

- 所以 $\min_{\{\mathbf{w}, b\}} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i^\top x_j)$

- 原始的优化问题 (1) 变成如下问题 (2) :

$$\begin{aligned} \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} & \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i^\top x_j) \right\} \\ \text{s.t. } & \alpha_i \geq 0, \forall i, \\ & \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}, b} \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} & \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - y_i (\mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i + b)) \right\} \\ = \max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \min_{\mathbf{w}, b} & \underbrace{\left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i (1 - y_i (\mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i + b)) \right\}}_{L(\mathbf{w}, b, \alpha)} \end{aligned}$$

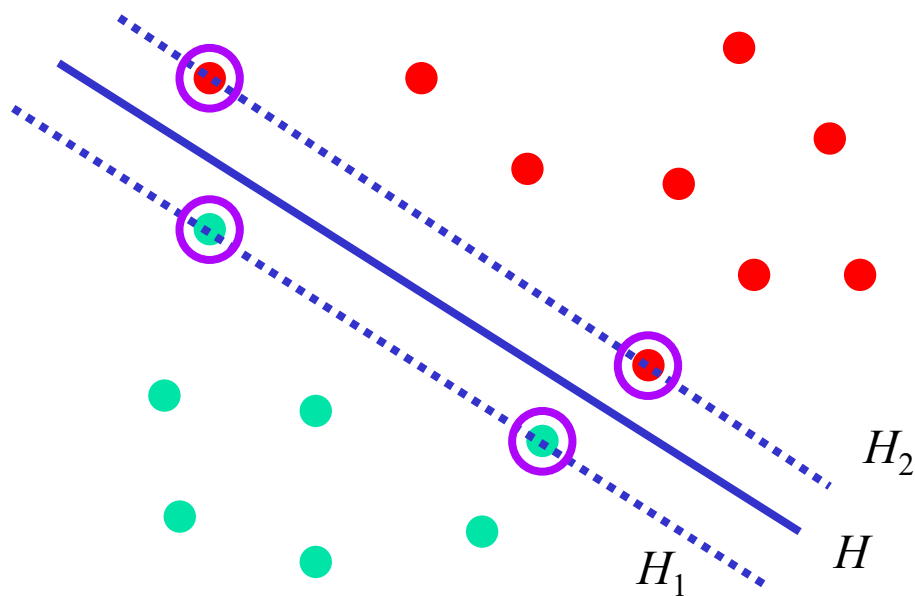
- 得到问题的解 $\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \mathbf{x}_i$
 $b = y_i - \mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i$

- 仍然是一个二次规划问题, 可以求解到全局最优解。(方法: SMO)
- 一般来说, 解仅含有部分非零
- 所谓支持向量, 即对应非零向量

SVM目标函数求解：对偶问题求解

- 发现
 - 所有非支持向量对应的系数 α 都等于0

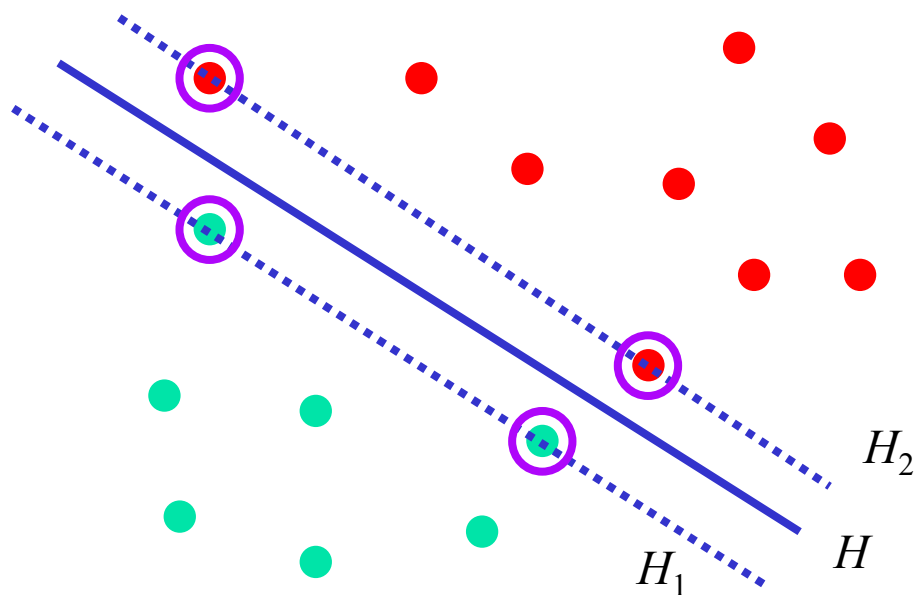
$$\mathcal{L}(w, b, \alpha) = \frac{1}{2}\|w\|^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i (y_i (w^T x_i + b) - 1)$$



SVM目标函数求解：对偶问题求解

- 发现
 - 所有非支持向量对应的系数 α 都等于0

$$\mathcal{L}(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i (y_i (w^T x_i + b) - 1)$$



支持向量机解的**稀疏性**：训练完成后，大部分的训练样本都不需保留，最终模型仅与支持向量有关。

SVM目标函数求解：稀疏性理论解释

- 最终模型：

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^\top \mathbf{x} + b = \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i \mathbf{x}_i^\top \mathbf{x} + b$$

- KKT条件：

$$\begin{cases} \alpha_i \geq 0, \\ y_i f(\mathbf{x}_i) \geq 1, \\ \alpha_i (y_i f(\mathbf{x}_i) - 1) = 0. \end{cases}$$

$$y_i f(\mathbf{x}_i) > 1 \quad \Rightarrow \quad \alpha_i = 0$$

支持向量机解的**稀疏性**：训练完成后，大部分的训练样本都不需保留，最终模型仅与支持向量有关。

SVM分类

- x的分类

- 预测x的分类时，就是将x代入到 $f(x) = w^T x + b$ 中，算出结果，根据其正负号判断其类别

- 根据前面推导

$$w^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i$$

- 可得分类函数为

$$\begin{aligned} f(x) &= \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i \right)^T x + b \\ &= \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \langle x_i, x \rangle + b \end{aligned}$$

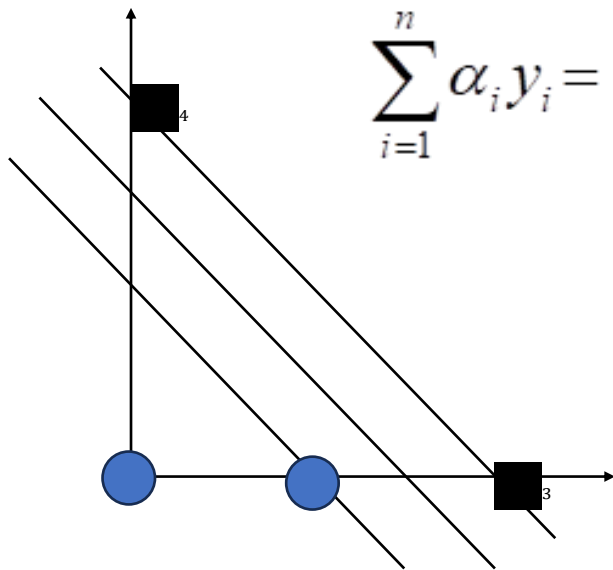
- 可见新点x的类别预测，实际上只需要计算x与训练数据点的内积即可

一个例子

$$\max_{\{\alpha_i \geq 0\}} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i^T x_j) \right\}$$

$$s.t. \alpha_i \geq 0, \forall i,$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0$$



$$\mathbf{x}_1 = (0, 0), y_1 = +1$$

$$\mathbf{x}_2 = (1, 0), y_2 = +1$$

$$\mathbf{x}_3 = (2, 0), y_3 = -1$$

$$\mathbf{x}_4 = (0, 2), y_4 = -1$$

$$Q(\alpha) = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) - \frac{1}{2}(\alpha_2^2 - 4\alpha_2\alpha_3 + 4\alpha_3^2 + 4\alpha_4^2)$$

可调用Matlab中的二次规划程序，求得 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 的值，
进而求得w和b的值。

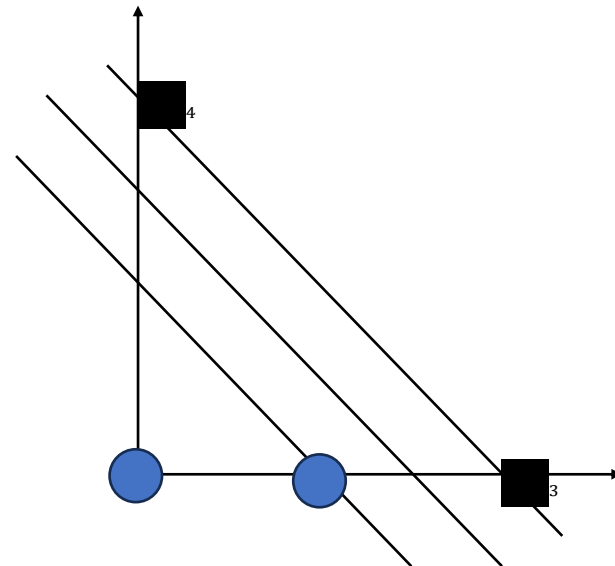
一个例子

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0 \\ \alpha_2 = 1 \\ \alpha_3 = 3/4 \\ \alpha_4 = 1/4 \end{cases}$$

$$w = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{3}{4} \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$b = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{3}{4}$$

$$g(x) = 3 - 2x_1 - 2x_2 = 0$$



目录

01

了解SVM

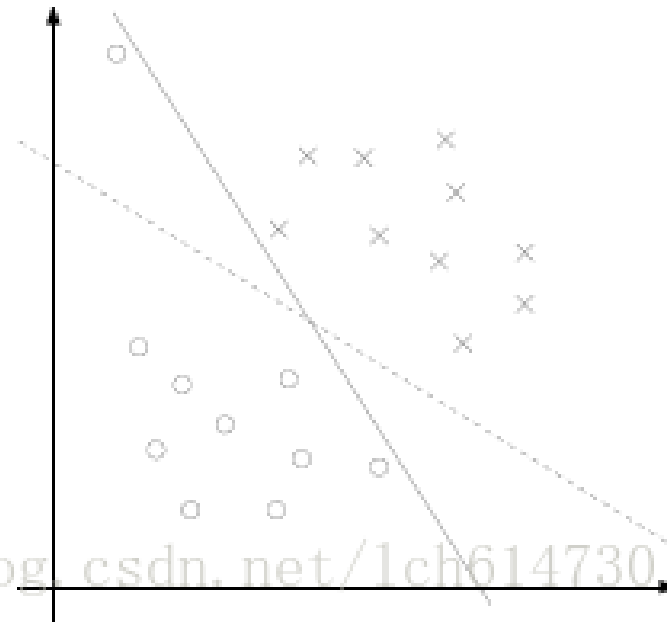
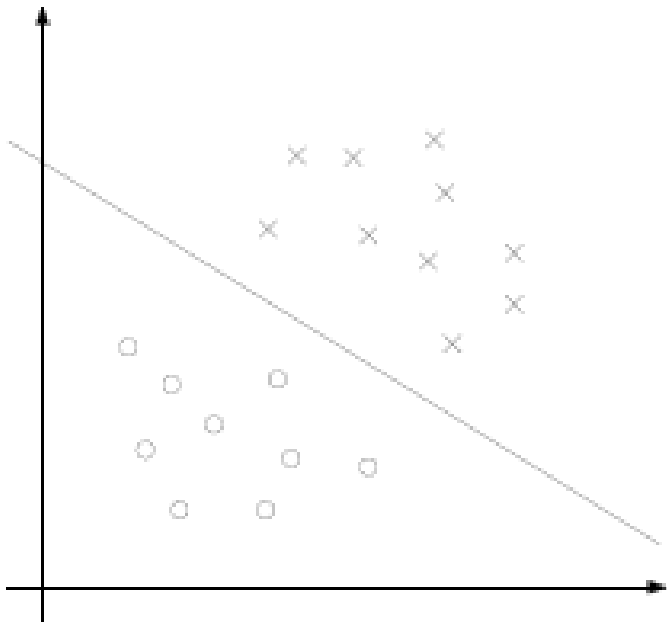
02

深入SVM

03

非线性SVM

基于软间隔的C-SVM

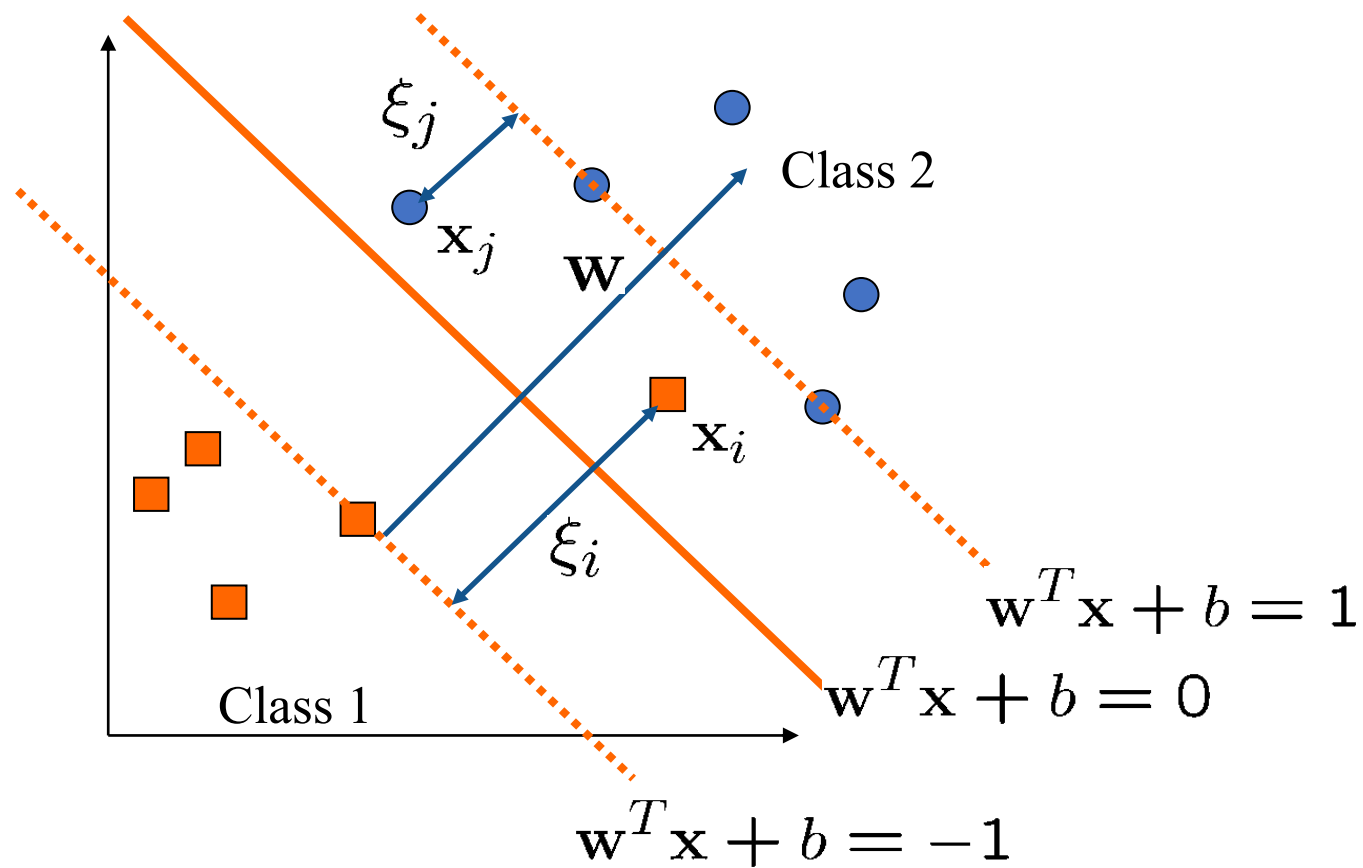


<http://blog.csdn.net/lch614730>

基于软间隔的C-SVM

- 概述：
 - 经典SVM的基本假设是样本之间线性可分。但这在实践中常常并不合理——线性不可分是更普遍的现象。
 - 为了解决线性不可分的情况，Cortes和Vapnik于1995年提出通过修改和扩展上述裕量最大化问题来予以解决。
 - 这种方法的核心思想是：不再像经典SVM那样要求所有的训练样本均能被正确划分，**而是允许一定数量的训练样本被分错，也即训练过程容忍一定程度的分类误差**。这样，训练过程挑选的是一个尽可能能够正确划分训练样本的超平面，而训练的目标仍然是最大化该超平面与分类正确的、最近的正/负例训练样本之间的距离（仍然称之为裕量——软裕量）。

基于软间隔的C-SVM



基于软间隔的C-SVM

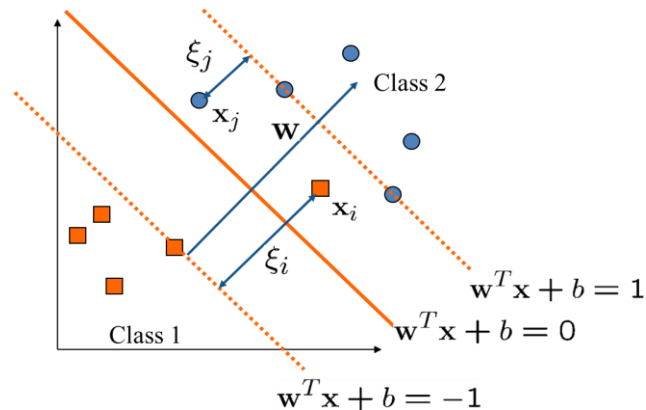
- 形式化：
 - 具体的，这种所谓软间隔方法引入了松弛变量 $\xi_i (\geq 0)$ ，用以表征或者说度量分类器针对训练样本 x_i 的差错程度。则最优划分平面求解的优化问题转化为：

$$\min_{(w,b)} \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \right\}$$
$$s. t. \quad (y_i(w x_i + b) \geq 1 - \xi_i) \text{ and } (\xi_i \geq 0), \quad \forall i = 1, \dots, n$$

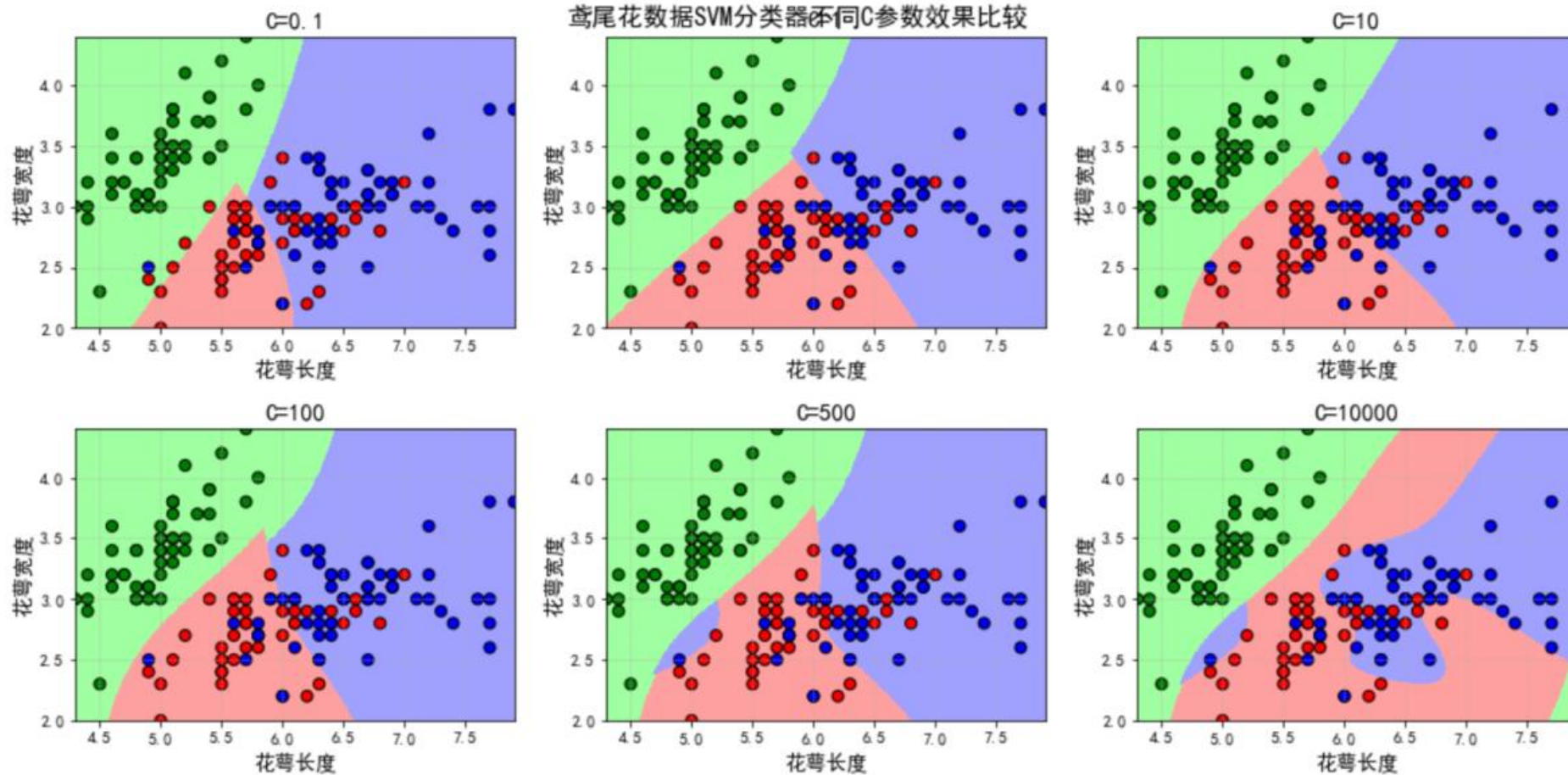
其中C为预先选定的调和参数。

同样运用Lagrange数乘法，通过引入非负的Lagrange乘子矢量 α 和 β ，可得到此时优化问题的原始形式如下：

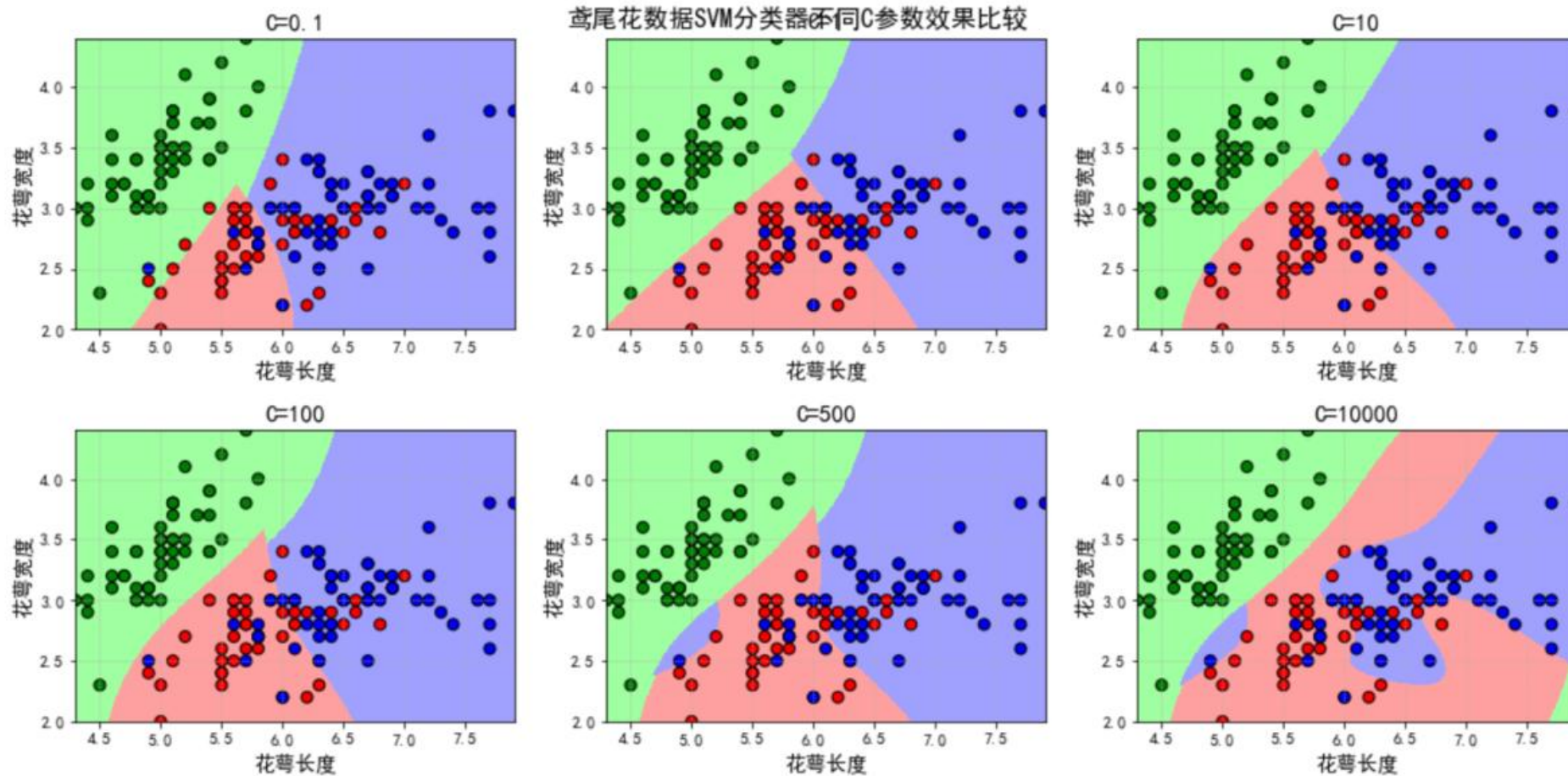
$$\min_{(w,b)} \max_{\alpha, \beta} \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i - \sum_{i=1}^n \alpha_i [y_i(w \cdot x_i + b) - 1 + \xi_i] - \sum_{i=1}^n \beta_i \xi_i \right\}$$



不同的C的影响



不同的C的影响



$$\min_{(w,b)} \left\{ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \right\}$$

s. t. $(y_i(wx_i + b) \geq 1 - \xi_i) \text{ and } (\xi_i \geq 0), \quad \forall i = 1, \dots, n$

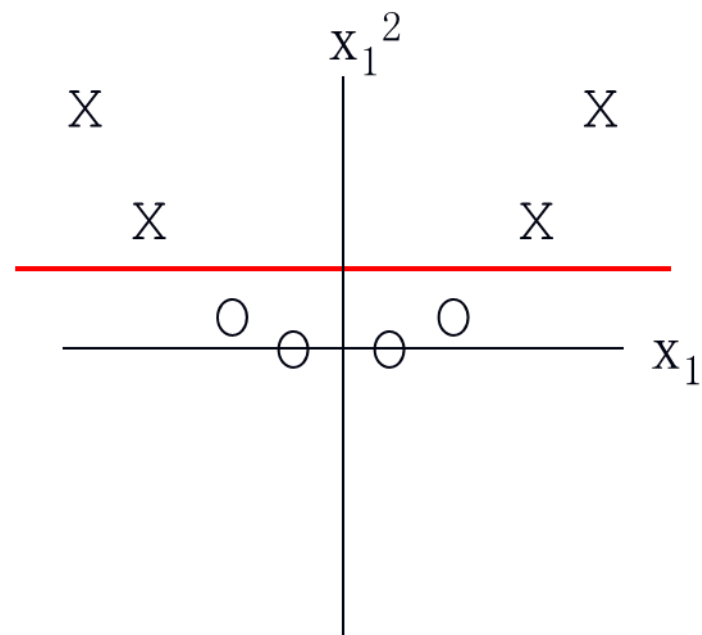
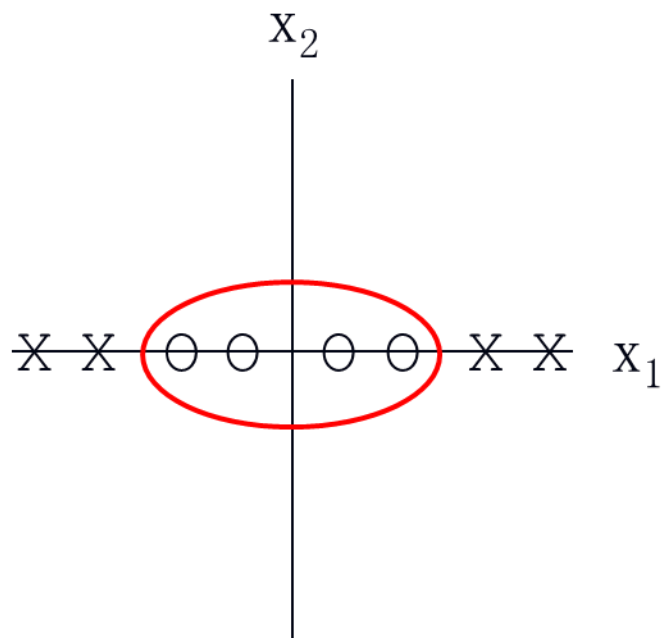
C值太小时，使得松弛变量过大，**导致样本误分较多，但模型泛化能力强**

C值太大时，使得松弛变量过小，**导致过分拟合训练数据，导致过拟合**

非线性SVM与核变换

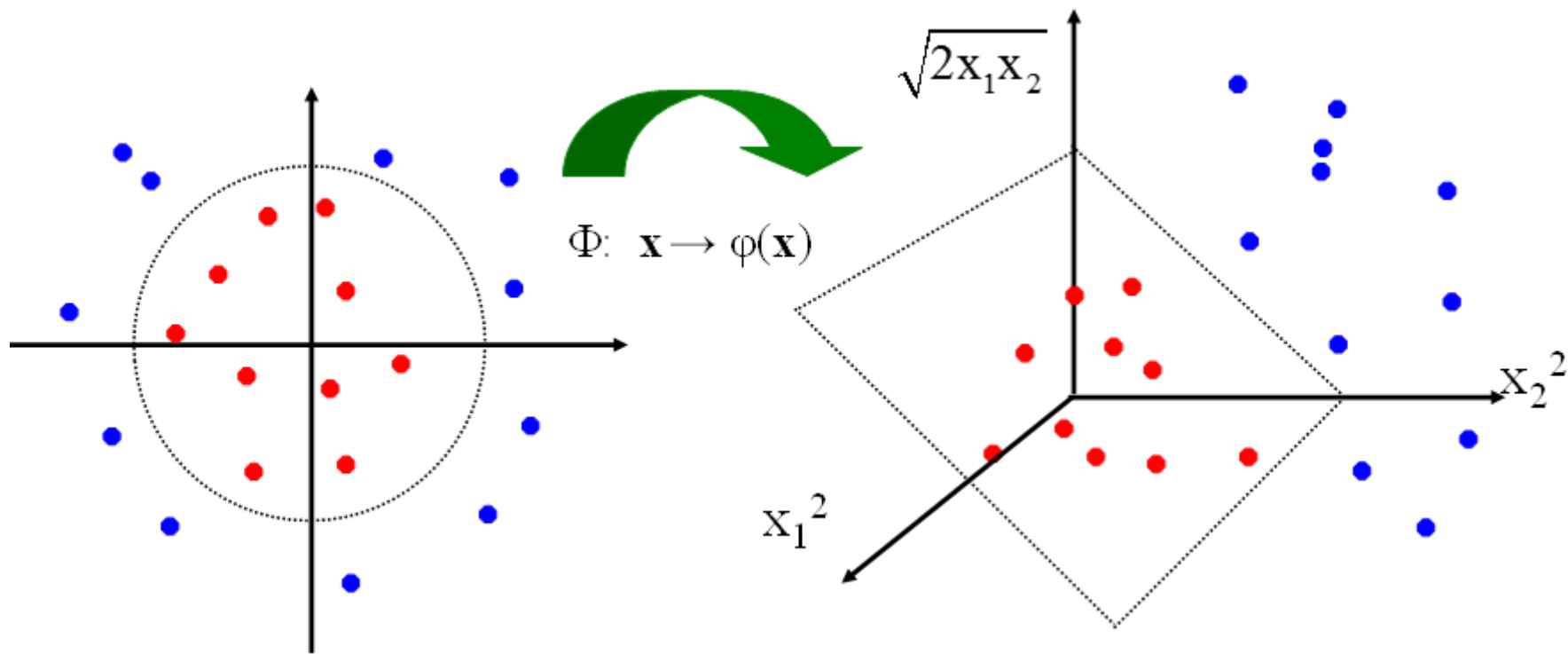
- 概述:
 - 上面讨论的都是训练样本(大致)线性可分的情形，这时分类器为线性函数，即分类超平面。
 - 但现实情况中（见下面两图所示的情形），训练样本往往并非线性可分的，也即任何超平面都无法较好的分开两类训练样本，或者说使用任何超平面带来的、对训练样本的分类误差都是不可容忍的。

非线性SVM与核变换



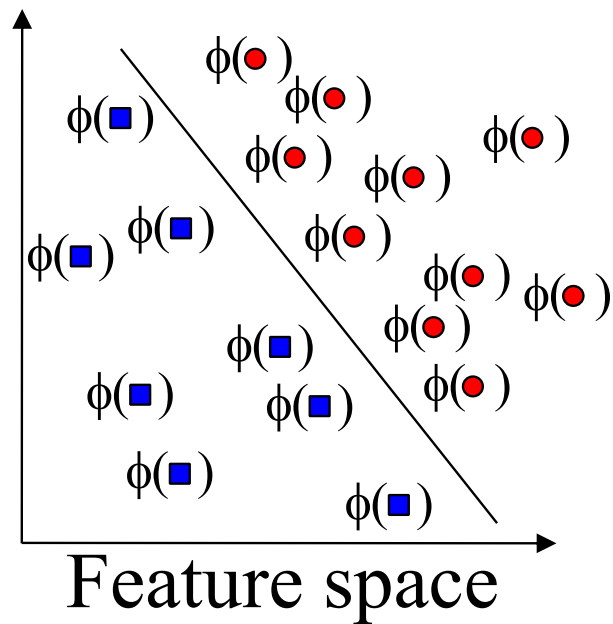
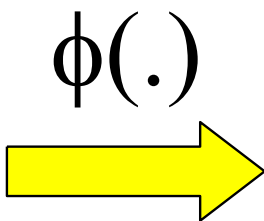
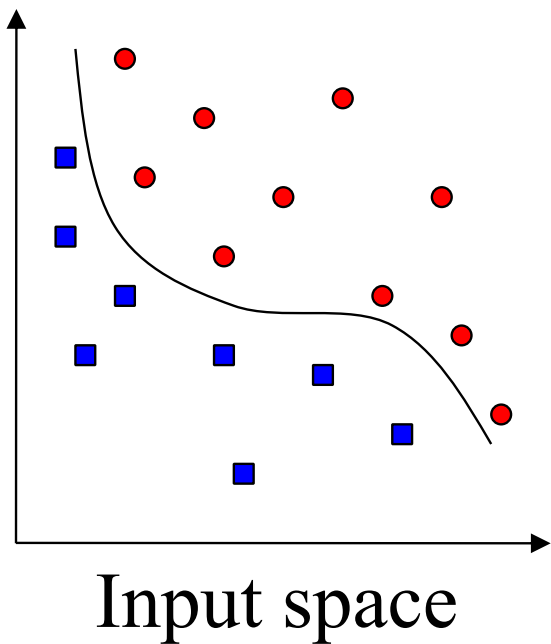
非线性SVM与核变换

- 概述:



非线性SVM与核变换

- 概述:

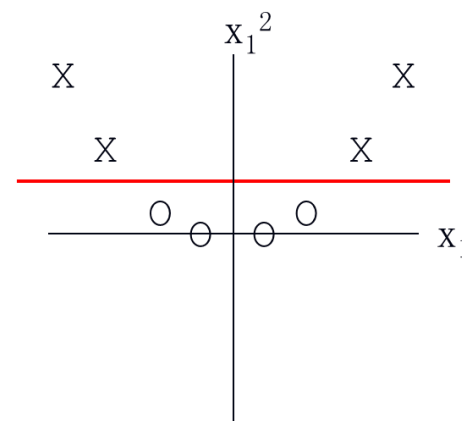
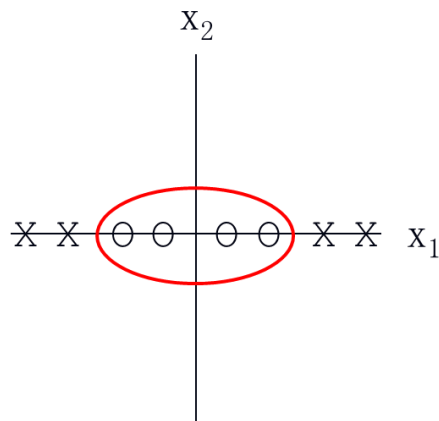


非线性SVM与核变换

- 概述：
 - 由于特征维度的提高一般总是能提升样本之间的可区分性，所以可以考虑将原始样本特征描述映射至某个高维空间中，使得映射后的样本之间线性可分。

形式化的，记此映射为 $\Phi: \mathbf{x} \rightarrow \varphi(\mathbf{x})$ ，其中 $\mathbf{x} \in R^p$ ，而 $\mathbf{z} = \varphi(\mathbf{x}) \in R^q$ ，且通常有 $q \gg p$ 。这样，原始的训练样本集合 D 被映射为线性可分的高维空间中的集合：

$$D' = \{(z_i, y_i) | z_i \in R^q, y_i \in \{-1, 1\}\}_{i=1}^n$$



非线性SVM与核变换

- 概述:

- 在 R_q 空间中, 因为 D' 是线性可分的, 所以其判别函数和最优分类平面求解的对偶形式分别为:

$$f(z) = \text{sign}(wz + b - 1) = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i z_i^T z + b - 1\right)$$

$$\max_{\alpha \geq 0, \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0} \left\{ \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j z_i^T z_j \right\}$$

观察以上两个式子可见: 无论判别函数还是对偶形式中的目标函数都只涉及到高维空间中两个矢量之间的内积, 而并不需要知道它们的具体坐标。

$$z_i^T z_j = K(x_i, x_j)$$

$$\sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j)$$

非线性SVM与核变换

- 常用核函数:

- 高斯RBF (Radial Basis Function)核:

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp(-\gamma \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

- 齐次多项式(homogeneous polynomial)核:

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j)^d$$

- 非齐次多项式(inhomogeneous polynomial)核:

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j + 1)^d$$

- Sigmoid核:

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \tanh(\kappa \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j + \theta)^d$$

多分类问题

- 如何将SVM的二分类转换成多分类问题？
 - 一对一
 - 对N 类训练数据两两组合,构建 $C^2N = N(N - 1) / 2$ 个支持向量机。
最后分类的时候采取“投票”的方式决定分类结果。
 - 一对其余
 - 对N分类问题构建N个支持向量机,每个支持向量机负责区分本类数据和非本类数据。最后结果由输出离分界面距离 $w \cdot x + b$ 最大的那个支持向量机决定。

大模型（特征提取） + SVM（决策 / 回归）

- **互补优势：** 解决大模型小样本过拟合、SVM 特征表达不足问题，提升精度与泛化性

应用领域	融合方案	核心效果
工业故障诊断	Transformer + SVM	小样本场景下风力发电机组故障诊断分类
生命科学	ProteinBERT（蛋白质领域大模型） + SVM	提升蛋白质分类的准确性
医疗影像分析	ResNet + SVM	有效提升肿瘤分类的精度，降低因医学影像样本量少导致的过拟合风险