[SWCON253] Machine Learning – Lec.09

Perceptron & Decision Boundary

Fall 2025

김 휘 용

hykim.v@khu.ac.kr

경희대학교
KYUNG HEE UNIVERSITY

Contents

References

- *패턴 인식* by 오일석, *기계 학습* by 오일석
- *Intro to Deep Learning & Generative Models* by Sebastian Raschka (http://pages.stat.wisc.edu/~sraschka/teaching/stat453-ss2020/)

(Recap.) What we have learned

- **Linear Regression**
  - For regression task
  - Linear model
  - MSE loss

- **Logistic Regression**
  - For binary classification task
  - Linear model + sigmoid activation
  - (Binary) CE loss

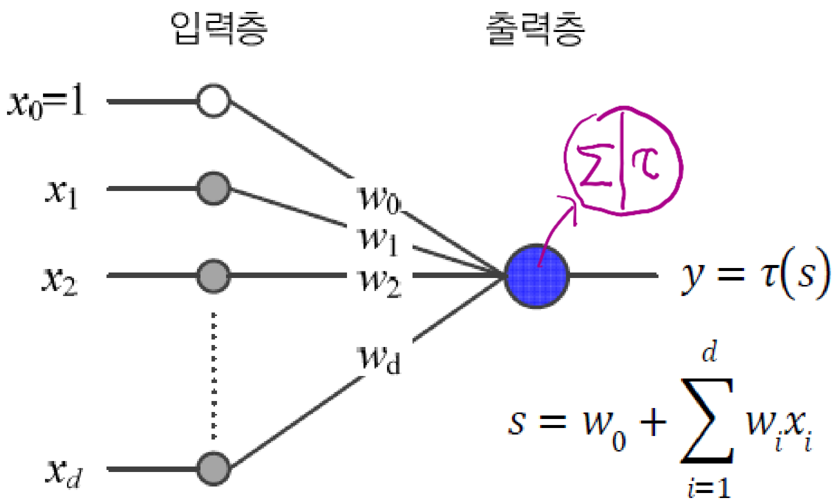
1. Perceptron

- ✓ Model & Terminology
- ✓ Learning Problem
- ✓ Cost Function
- ✓ Gradient
- ✓ Learning Algorithm

Perceptron – *Model & Terminology*

◆ 퍼셉트론의 구조와 동작

- **입력층**의 i번째 **노드**는 특징 벡터 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_d)^{\mathrm{T}}$의 i번째 요소 x_i를 담당
- **출력층**은 한 개의 노드
- i번째 입력층 노드와 출력층을 연결하는 **에지**는 **가중치** w_i를 가짐
- 해당하는 특징값과 가중치를 곱한 결과를 모두 더하여 s를 구하고, **활성함수** τ를 적용함

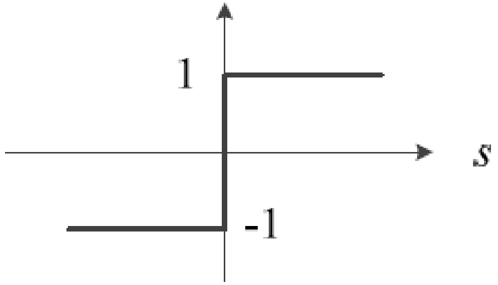


$$s = w_0 + \sum_{i=1}^{d} w_i x_i$$

$$= \sum_{i=0}^{d} w_i x_i \quad (x_0 = 1)$$

(a) 퍼셉트론의 구조

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

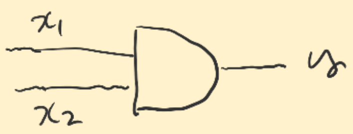


(b) 계단함수를 활성함수 $\tau(s)$로 이용함

Perceptron – *Example*

◆ Logical OR Gate

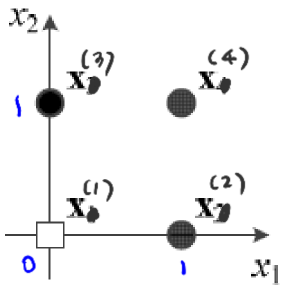
※ OR Gate



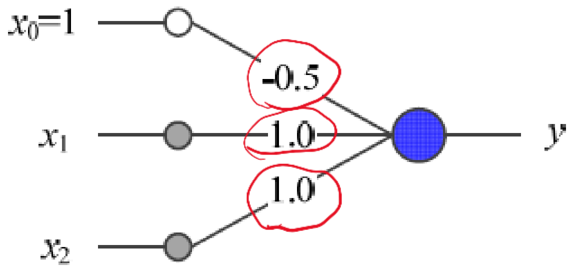
x_1	x_2	y		
0	0	0	(−1)	□
0	1	1		●
1	0	1		●
1	1	1		●

2차원 특징 벡터로 표현되는 샘플을 4개 가진 훈련집합 $\mathbb{X} = \{\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \mathbf{x}^{(3)}, \mathbf{x}^{(4)}\}$, $\mathbb{Y} = \{y^{(1)}, y^{(2)}, y^{(3)}, y^{(4)}\}$를 생각하자. [그림 3-4(a)]는 이 데이터를 보여준다.

$$\mathbf{x}^{(1)} = \begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix},\ y^{(1)} = -1,\quad \mathbf{x}^{(2)} = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix},\ y^{(2)} = 1,\quad \mathbf{x}^{(3)} = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix},\ y^{(3)} = 1,\quad \mathbf{x}^{(4)} = \begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix},\ y^{(4)} = 1$$



(a) 훈련집합



(b) 퍼셉트론

그림 3-4 OR 논리 게이트를 이용한 퍼셉트론의 동작 예시

샘플 4개를 하나씩 입력하여 제대로 분류하는지 확인해 보자.

$$\begin{aligned}
&\mathbf{x}^{(1)}:\ s = -0.5 + 0 * 1.0 + 0 * 1.0 = -0.5, && \tau(-0.5) = -1\\
&\mathbf{x}^{(2)}:\ s = -0.5 + 1 * 1.0 + 0 * 1.0 = 0.5, && \tau(0.5) = 1\\
&\mathbf{x}^{(3)}:\ s = -0.5 + 0 * 1.0 + 1 * 1.0 = 0.5, && \tau(0.5) = 1\\
&\mathbf{x}^{(4)}:\ s = -0.5 + 1 * 1.0 + 1 * 1.0 = 1.5, && \tau(1.5) = 1
\end{aligned}$$

결국 [그림 3-4(b)]의 퍼셉트론은 샘플 4개를 모두 맞추었다. 이 퍼셉트론은 훈련집합을 100% 성능으로 분류한다고 말할 수 있다.

Notation

2차원 특징 벡터로 표현되는 샘플을 4개 가진 훈련집합 $\mathbb{X} = \{\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \mathbf{x}^{(3)}, \mathbf{x}^{(4)}\}$, $\mathbb{Y} = \{y^{(1)}, y^{(2)}, y^{(3)}, y^{(4)}\}$를 생각하자. [그림 3-4(a)]는 이 데이터를 보여준다.

$$\mathbf{x}^{(1)} = \begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix},\ y^{(1)} = -1,\ \mathbf{x}^{(2)} = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix},\ y^{(2)} = 1,\ \mathbf{x}^{(3)} = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix},\ y^{(3)} = 1,\ \mathbf{x}^{(4)} = \begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix},\ y^{(4)} = 1$$

☆ Notation

- $\underline{x}_k = \begin{bmatrix} x_{k0} \\ \vdots \\ x_{kd} \end{bmatrix} \rightarrow \underline{x}^{(k)} = \begin{bmatrix} x_0^{(k)} \\ \vdots \\ x_d^{(k)} \end{bmatrix}$
- $y_k \rightarrow y^{(k)}$

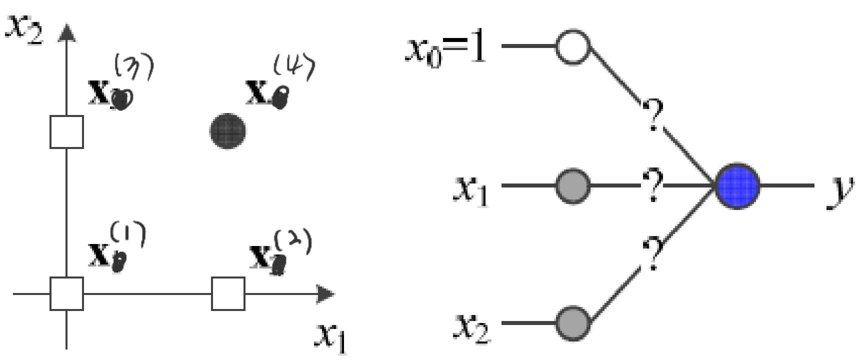
"기계학습" 교재   "Coursera ML" & 김휘용

Perceptron – *Learning Problem*

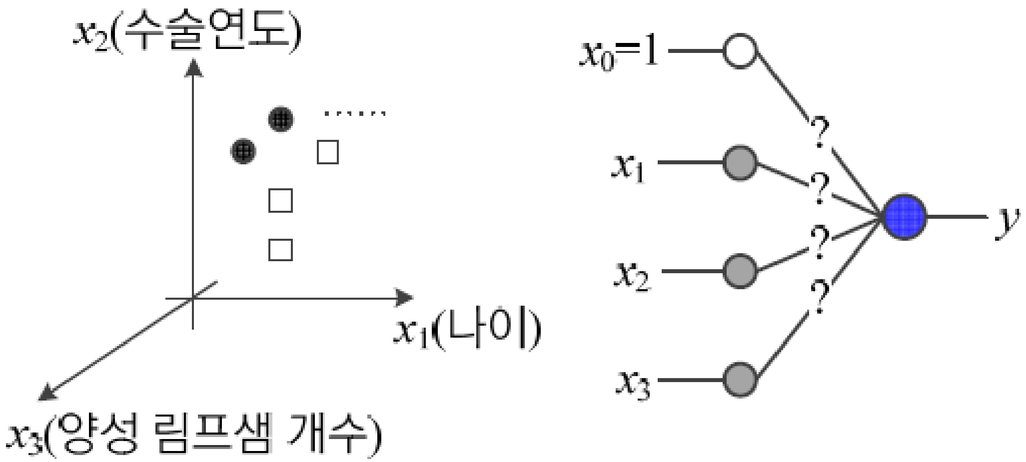
◆ 학습 문제

- w_1과 w_2, w_0이 어떤 값을 가져야 100% 옳게 분류할까?
- 현실 세계는 d차원 공간에 수백~수만 개의 샘플이 존재

  ★ 예, MNIST는 784차원에 6만개 샘플



(a) AND 분류 문제

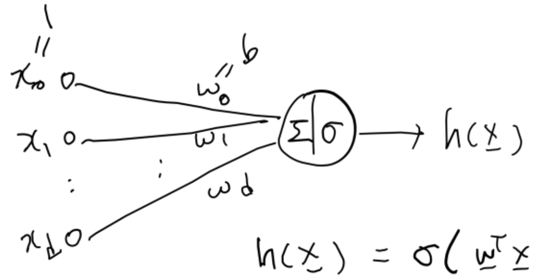


(b) Haberman survival 분류 문제

Perceptron – *Cost Function*

Cost Function

- Parameters (가중치): $\mathbf{w} = (w_0, w_1, w_2, \cdots, w_d)^{\mathrm{T}}$



$h(x) = \sigma(w^T x + b)$

- Cost Function의 조건:
  - $J(\mathbf{w}) \geq 0$이다.
  - $\mathbf{w}$가 최적이면, 즉 모든 샘플을 맞히면 $J(\mathbf{w}) = 0$이다.
  - 틀리는 샘플이 많은 $\mathbf{w}$일수록 $J(\mathbf{w})$는 큰 값을 가진다.

- **Cost Function for Perceptron**:

  ★ ***Y*를 오분류된 샘플의 집합**이라 할 때,

$$\boxed{J(\mathbf{w}) = \sum_{\mathbf{x}^{(k)} \in Y} -y^{(k)}\left(\mathbf{w}^{\mathrm{T}} \mathbf{x}^{(k)}\right)}$$

$y^{(k)} = 1 : -(w^T x^{(k)})$
- 오분류: $w^T x^{(k)} < 0 \Rightarrow -(w^T x^{(k)}) > 0$
- (정분류: $> 0 \Rightarrow < \;)$

$y^{(k)} = -1 : (w^T x^{(k)})$
- 오분류: $w^T x^{(k)} > 0 \Rightarrow (w^T x^{(k)}) > 0$
- (정분류: $< 0 \Rightarrow < 0 \;)$

Perceptron – *Gradient*

- **Gradient**

$$J(\mathbf{w}) = \sum_{\mathbf{x}_k \in Y} -y_k \left(\mathbf{w}^{\mathrm{T}} \mathbf{x}_k\right)$$

$$\frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial w_i} = \sum_{\mathbf{x}_k \in Y} \frac{\partial(-y_k(w_0 x_{k0} + w_1 x_{k1} + \cdots + w_i x_{ki} + \cdots + w_d x_{kd}))}{\partial w_i} = \sum_{\mathbf{x}_k \in Y} -y_k x_{ki}$$

$$\boxed{\frac{\partial J(\mathbf{w})}{\partial w_i} = \sum_{\mathbf{x}_k \in Y} -y_k x_{ki}, \qquad i = 0,1,\cdots,d}$$

$$\boxed{w_i = w_i + \rho \sum_{\mathbf{x}_k \in Y} y_k x_{ki}, \qquad i = 0,1,\cdots,d}$$

Perceptron – *Learning Algorithms*

- **(Full) Batch mode:**
  - 훈련집합의 샘플을 모두 맞출(즉 $Y = \emptyset$) 때까지 세대[epoch](라인 3~9)를 반복함

알고리즘 3-1 퍼셉트론 학습(배치 버전)

입력: 훈련집합 $\mathbb{X}$와 $\mathbb{Y}$, 학습률 ρ

출력: 최적 가중치 $\hat{\mathbf{w}}$

1 난수를 생성하여 초기해 $\mathbf{w}$를 설정한다.

2 repeat

3 $\quad Y = \emptyset$ // 틀린 샘플 집합

4 $\quad$ for j=1 to n // 모든 training sample에 대해

5 $\qquad y = \tau(\mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x}_j)$ // 식 (3.4) : 출력값 계산 (forward)

6 $\qquad$ if$(y \neq y_j)$ $Y = Y \cup \mathbf{x}_j$ // 틀린 샘플을 집합에 추가한다. → Y

7 $\quad$ if$(Y \neq \emptyset)$ // 오분류 샘플이 하나라도 있으면

8 $\qquad$ for i=0 to d // 식 (3.9)

9 $\qquad\quad w_i = w_i + \rho \sum_{\mathbf{x}_k \in Y} y_k x_{ki}$

10 until $(Y = \emptyset)$

11 $\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{w}$

epoch

오분류

parameter update (iteration)

행렬 표기

8. for $i = 0$ to d
9. $\quad w_i = w_i + \rho \sum_{\mathbf{x}_k \in Y} y_k x_{ki}$

$\rightarrow$ 8. $\mathbf{w} = \mathbf{w} + \rho \sum_{\mathbf{x}_k \in Y} y_k \mathbf{x}_k$

Perceptron – *Learning Algorithms (cont'd)*

Stochastic mode:

- 샘플 순서를 섞음. 틀린 샘플이 발생하면 즉시 갱신

알고리즘 3-2 퍼셉트론 학습(스토캐스틱 버전)

입력: 훈련집합 $\mathbb{X}$와 $\mathbb{Y}$, 학습률 ρ
출력: 최적 가중치 $\hat{\mathbf{w}}$

1 난수를 생성하여 초기해 $\mathbf{w}$을 설정한다.
2 repeat
3    $\mathbb{X}$의 샘플 순서를 섞는다. // stochastic
4   quit=true
5   for j=1 to n // 모든 traning sample에 대해
6       $y = \tau(\mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x}_j)$ // 식 (3.4) : 출력값 계산
7   if($y \neq y_j$) // 이 샘플의 출력이 오분류 됐으면
8   quit=false
9   for i=0 to d
10             $w_i = w_i + \rho y_j x_{ji}$
11 until(quit) // 틀린 샘플이 없을 때까지
12 $\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{w}$

epoch

parameter update (iteration)

행렬 표기

$$\left.\begin{array}{ll} 9. & \text{for } i = 0 \text{ to } d \\ 10. & \quad w_i = w_i + \rho y_j x_{ji} \end{array}\right\}$$

$$\longrightarrow \quad 9. \quad \mathbf{w} = \mathbf{w} + \rho y_j \mathbf{x}_j$$

[주의] 선형분리 불가능한 경우에는 무한 반복함
→ until($Y = \emptyset$) 또는 until(quit)를
until(더 이상 개선이 없다면)으로 수정해야 함

Perceptron – *Learning Algorithms (cont'd)*

- **Stochastic Mini-batch mode:**

[illegible] 보세요!

2. Decision Boundary

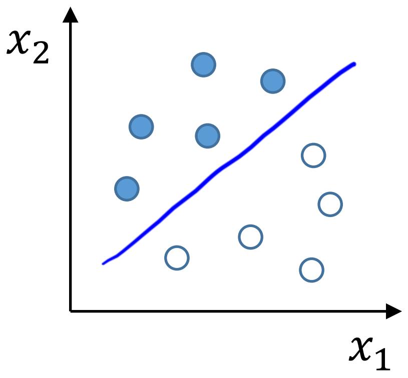
Decision Boundary

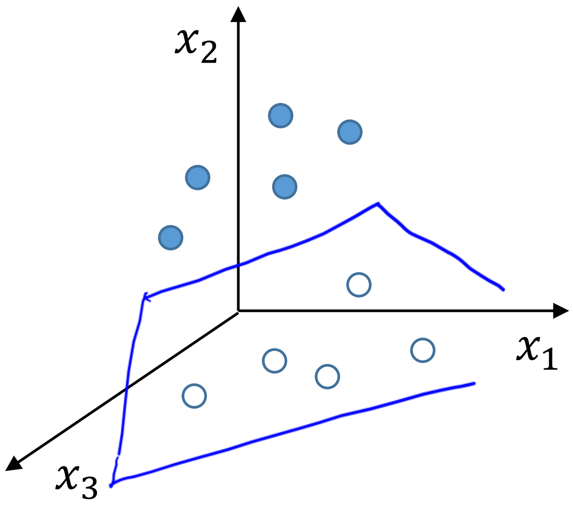
결정 경계 (Decision Boundary)

- The boundary in the ***feature space*** that separates the area of each class: $d(\mathbf{x}) = 0$
  - ★ 결정 경계는 전체 특징 공간을 두 부분공간으로 분할하는 분류기 역할

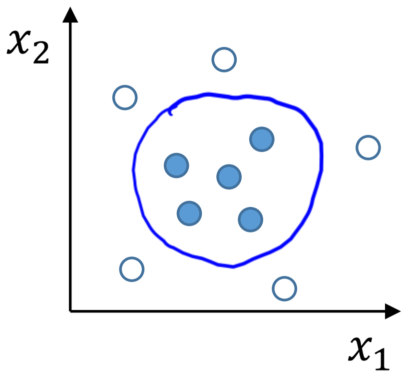
Examples (*for Binary Classifications*)

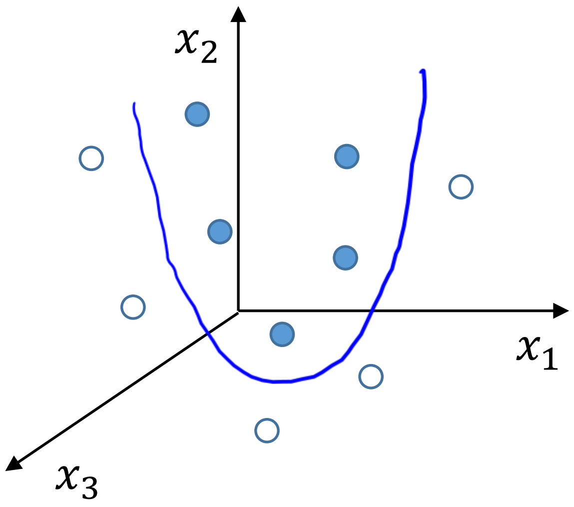
Linear Decision Boundary ⇒ 선형 분류기





Non-linear Decision Boundary ⇒ 비선형 분류기





Linear Decision Boundary

- Equation for *Linear Decision Boundary* (선형 결정 경계)

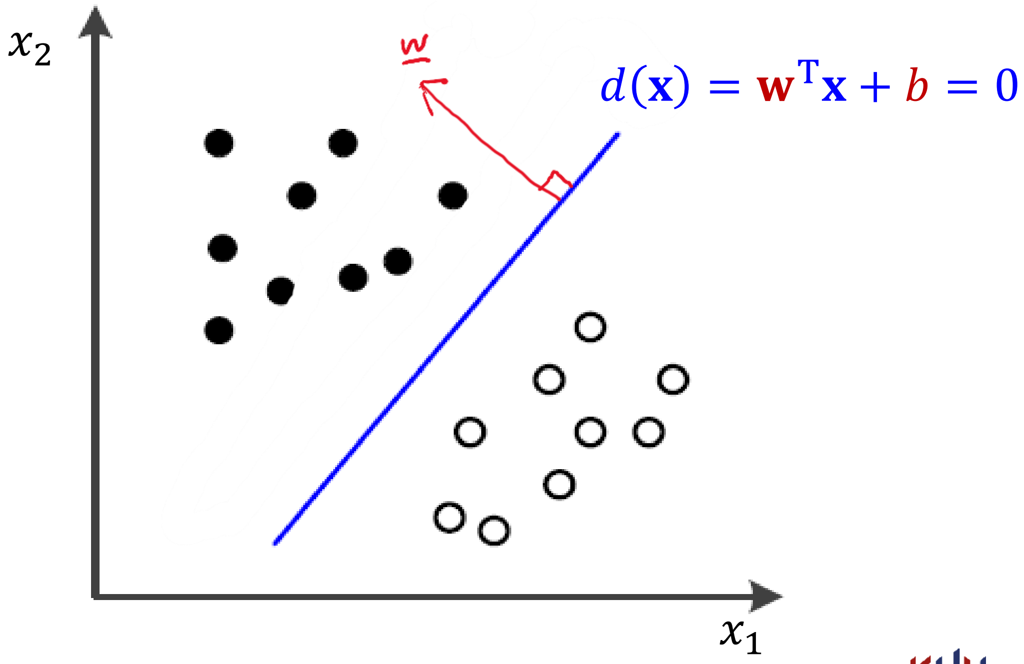
$$\boxed{d(\mathbf{x}) = w_1x_1 + w_2x_2 + \cdots + w_dx_d + w_0 = 0}$$

★ class 1 if $d(\mathbf{x}) > 0$, class 2 if $d(\mathbf{x}) < 0$

- Two types of vector representation:
  - ★ Let $\mathbf{x} = [x_0\ x_1\ \ldots x_d], \mathbf{w} = [w_0\ w_1\ \ldots w_d]$: $d(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} = 0$
  - ★ Let $\mathbf{x} = [x_1\ \ldots x_d], \mathbf{w} = [w_1\ \ldots w_d]$: $d(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + b = 0$

- Geometric Interpretation
  - $d(\mathbf{x}) = 0$ is a ***hyperplane*** in the feature space.
  - $d(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + b = 0$
    - ★ $\mathbf{w}$ is the surface ***normal vector*** of the hyperplane.
    - ★ b determines the ***position*** (i.e., the displacement from the origin) of the hyperplane.

$\mathbf{w}$는 결정경계의 방향을 결정하고, b는 위치를 결정한다.



* 초평면의 방정식

Let $\underline{x} \in R^n$.

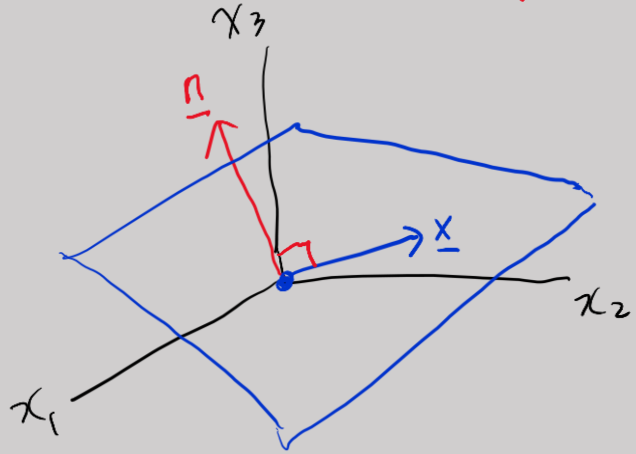
Consider an linear equation :

$$d(\underline{x}) = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_n x_n = 0$$

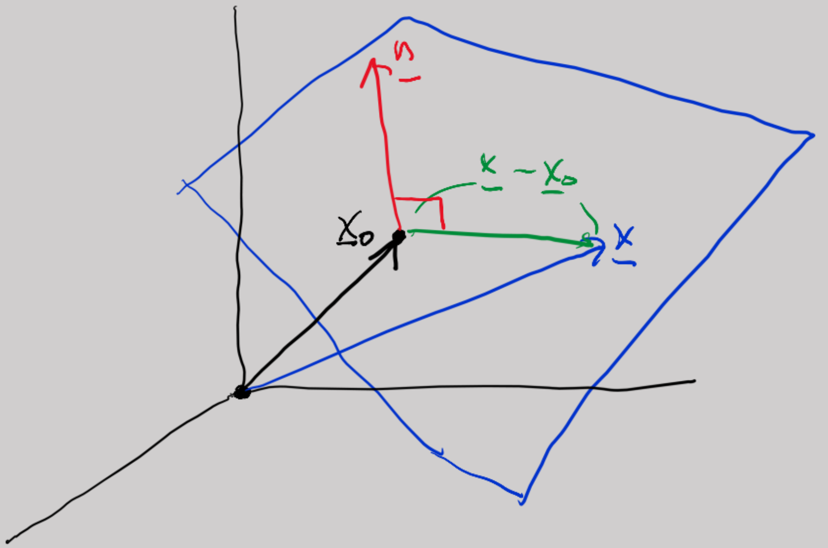
Let $\underline{n} \triangleq [a_1\ a_2 \cdots a_n]$, then

$$d(\underline{x}) = \underline{n}^T \underline{x} = 0$$

$$(\therefore\ \underline{n} \perp \underline{x})$$



Now, let $\underline{x} \leftarrow \underline{x} - \underline{x}_0$ (원점 이동).



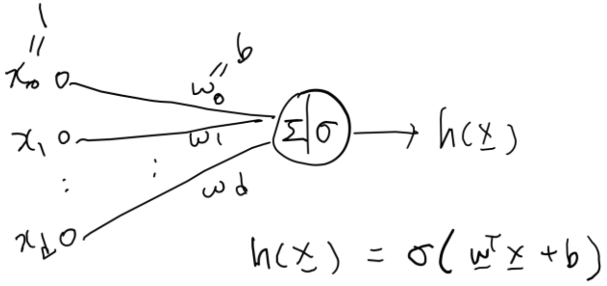
이 경우 초평면의 방정식은 :

$$d(\underline{x}) = \underline{n}^T (\underline{x} - \underline{x}_0) = 0$$

or $\underline{n}^T \underline{x} + b = 0 \quad (b \triangleq -\underline{n}^T \underline{x}_0)$

Linear Decision Boundary (cont'd)

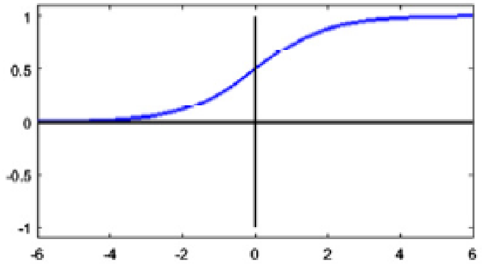
- **For *Logistic Regression***



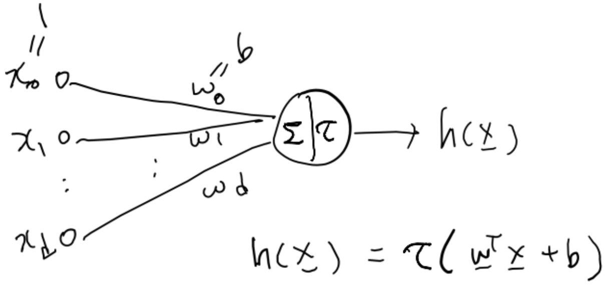
$$h(\mathbf{x}) = \sigma\left(\mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + \mathrm{b}\right) \lesseqgtr Th = 0.5$$

$$\Longrightarrow \ \mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + \mathrm{b} \lesseqgtr 0$$

$$\Longrightarrow d(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + b = 0$$



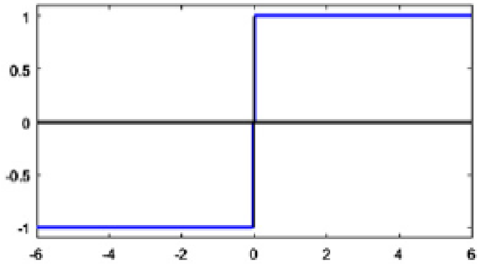
- **For *Perceptron***



$$h(\mathbf{x}) = \tau\left(\mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + \mathrm{b}\right) \lesseqgtr Th = 0$$

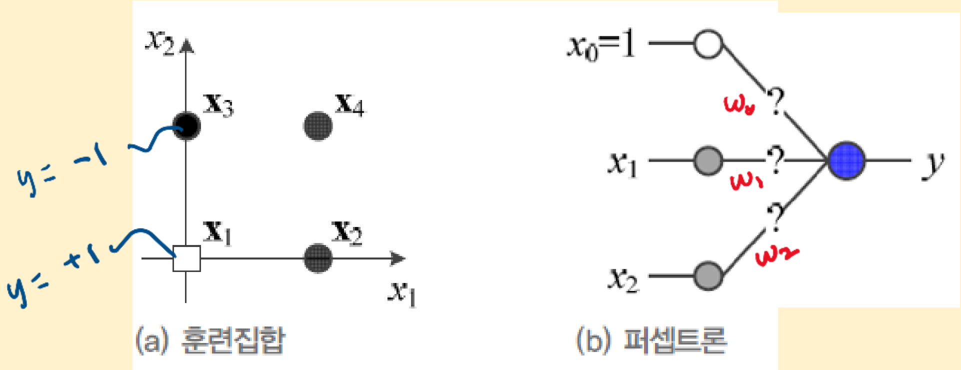
$$\Longrightarrow \ \mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + \mathrm{b} \lesseqgtr 0$$

$$\Longrightarrow d(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} + b = 0$$



Perceptron – *Quiz*

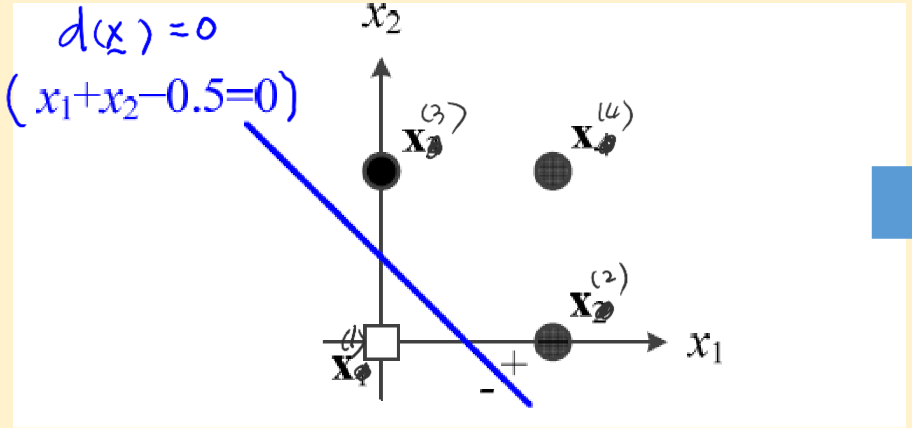
◆ 아래 그림의 OR Gate를 Perceptron으로 구현하시오.



(a) 훈련집합 (b) 퍼셉트론

$$w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 \underset{\hat{y}=-1}{\overset{\hat{y}=1}{\gtrless}} 0$$

● 결정 직선 구하기: $d(\mathbf{x}) = d(x_1, x_2) = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_0 = 0$



$d(\underline{x}) = 0 \rightarrow x_2 = -x_1 + 0.5$

$$\begin{cases} \bullet \ (\hat{y}=1) : & d(\underline{x}) > 0 \\ \square \ (\hat{y}=-1) : & d(\underline{x}) < 0 \end{cases}$$

$\Rightarrow [w_0 \ w_1 \ w_2] = [-0.5 \ 1 \ 1]$

Q & A