

Klasifikace

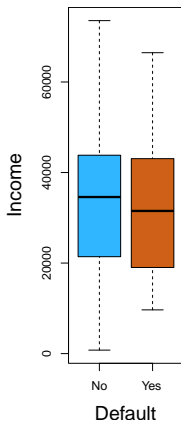
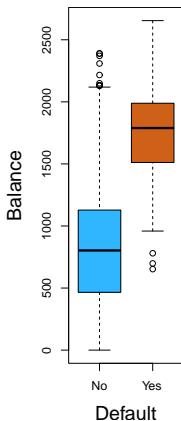
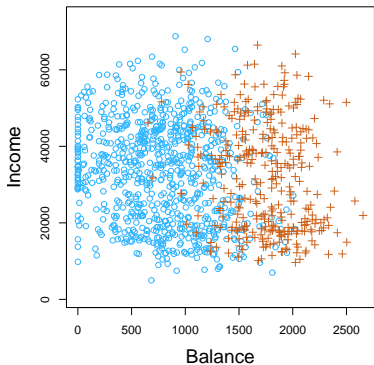
- Kvalitativní proměnné nabývají hodnot z neuspořádané množiny \mathcal{C} , například

$$\begin{aligned} \text{eye color} &\in \{\text{brown, blue, green}\} \\ \text{email} &\in \{\text{spam, ham}\}. \end{aligned}$$

- Pro daný vektor charakteristik X a kvalitativní odpověď Y nabývající hodnot z množiny \mathcal{C} spočívá klasifikační úloha ve vytváření funkce $C(X)$, která jako vstup bere vektor charakteristik X a předpovídá hodnotu Y , tj. $C(X) \in \mathcal{C}$.
- Často nás spíše zajímají odhady *pravděpodobností*, že X patří do té které kategorie v \mathcal{C} .

Je například hodnotnější mít odhad pravděpodobnosti, že pojistný nárok je podvodný, než klasifikaci podvodný nebo ne.

Příklad: Neplatiči kreditních karet



Default = neplatič

Můžeme použít lineární regresi?

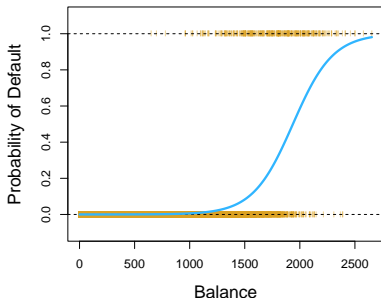
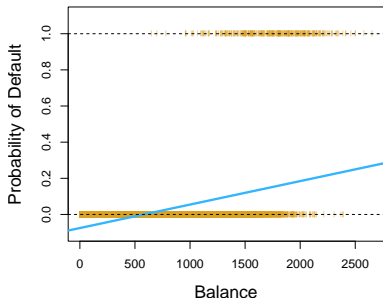
Předpokládejme, že pro klasifikační úlohu **Default** kódujeme

$$Y = \begin{cases} 0 & \text{jestliže No} \\ 1 & \text{jestliže Yes.} \end{cases}$$

Můžeme prostě provést lineární regresi Y vzhledem k X a klasifikovat jako **Yes**, jestliže $\hat{Y} > 0,5$?

- V tomto případě binárního výstupu odvádí lineární regrese jako klasifikátor dobrou práci a je ekvivalentní *lineární diskriminační analýze*, kterou budeme probírat později.
- Protože v dané populaci $E[Y|X = x] = P(Y = 1|X = x)$, mohli bychom si myslet, že regrese je pro tuto úlohu perfektní.
- Lineární regrese však **může produkovat hodnoty pravděpodobnosti menší než nula nebo větší než jedna**.
Vhodnější je zde *logistická regrese*.

Lineární versus logistická regrese



Svisle: Pravděpodobnost nesplácení

Oranžové značky označují odpověď Y — 0 nebo 1. Lineární regrese neodhaduje $P(Y = 1|X)$ dobře. Logistická regrese se zdá být pro tuto úlohu zcela vhodná.

Lineární regrese — pokračování

Nyní předpokládejme, že odpověď Y může nabývat tří hodnot. Do pohotovostní místnosti se dostaví pacient a my jej musíme klasifikovat podle jeho symptomů:

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{pokud} & \text{mrtvice} \\ 2 & \text{pokud} & \text{předávkování léky} \\ 3 & \text{pokud} & \text{epileptický záchvat} \end{cases}$$

Toto kódování naznačuje, že je zde uspořádání, což ve skutečnosti implikuje, že rozdíl mezi *mrtvice* a *předávkování léky* je stejný jako mezi *předávkování léky* a *epileptický záchvat*.

Lineární regrese zde není vhodná.

Vhodnější jsou *vícetřídní logistická regrese* nebo *diskriminační analýza*.

Logistická regrese

Budeme pro zkrácení psát $p(X) = P(Y = 1|X)$ a budeme uvažovat použití proměnné **balance** k předpovídání **default**. Logistická regrese používá výraz

$$p(X) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X}}$$

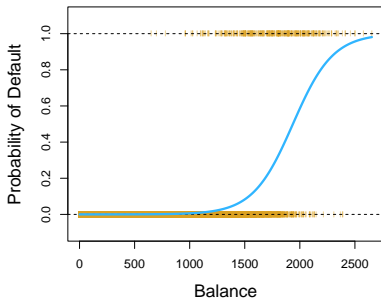
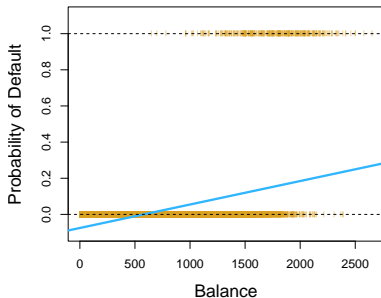
($e \approx 2,71828$ je matematická konstanta — Eulerovo číslo). Je snadné vidět, že bez ohledu na hodnoty β_0, β_1 nebo X bude $p(X)$ nabývat hodnot mezi 0 a 1.

Jednoduchá úprava dává

$$\log \left(\frac{p(X)}{1 - p(X)} \right) = \beta_0 + \beta_1 X.$$

Tato monotónní transformace se nazývá **log odds** (logaritmus rizika) nebo **logitová transformace** (logit) $p(X)$.

Lineární versus logistická regrese



Logistická regrese zaručuje, že náš odhad $p(X)$ bude ležet mezi 0 a 1.

Maximální věrohodnost

K odhadu parametrů používáme maximální věrohodnost:

$$\mathcal{L}(\beta_0, \beta_1) = \prod_{i:y_i=1} p(x_i) \prod_{i:y_i=0} (1 - p(x_i)).$$

Tato *věrohodnost* udává pravděpodobnost pozorovaných nul a jedniček v datech. Hodnoty β_0 a β_1 vybíráme tak, abychom maximalizovali věrohodnost pozorovaných dat.

Většina statistických balíčků umí proložit lineární logistické regresní modely pomocí maximální věrohodnosti. V R používáme funkci `glm()`, v Matlabu obdobné `fitglm()`.

	Koef.	SE	z-statistika	p-hodnota
Regr. konst.	-10,6513	0,3612	-29,5	< 0,0001
balance	0,0055	0,0002	24,9	< 0,0001

Tvorba předpovědí

Jaké je naše odhadovaná pravděpodobnost nesplácení (**default**) při zůstatku (**balance**) \$1000?

$$\hat{p}(X) = \frac{e^{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X}}{1 + e^{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X}} = \frac{e^{-10,6513 + 0,0055 \times 1000}}{1 + e^{-10,6513 + 0,0055 \times 1000}} = 0,006$$

Při zůstatku \$2000?

$$\hat{p}(X) = \frac{e^{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X}}{1 + e^{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X}} = \frac{e^{-10,6513 + 0,0055 \times 2000}}{1 + e^{-10,6513 + 0,0055 \times 2000}} = 0,586$$

Udělejme to znovu a použijme **student** jako prediktor:

	Koef.	SE	z-statistika	p-hodnota
Regr. konst.	-3,5041	0,0707	-49,55	< 0,0001
student [Yes]	0,4049	0,1150	3,52	0,0004

$$\hat{P}(\text{default} = \text{Yes} | \text{student} = \text{Yes}) = \frac{e^{-3,5041+0,4049 \times 1}}{1 + e^{-3,5041+0,4049 \times 1}} = 0,0431,$$

$$\hat{P}(\text{default} = \text{Yes} | \text{student} = \text{No}) = \frac{e^{-3,5041+0,4049 \times 0}}{1 + e^{-3,5041+0,4049 \times 0}} = 0,0292.$$

Logistická regrese s několika proměnnými

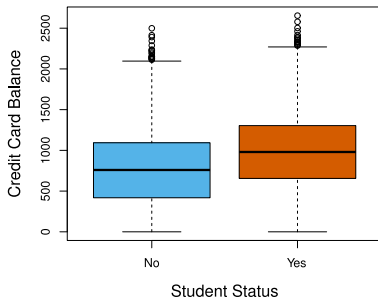
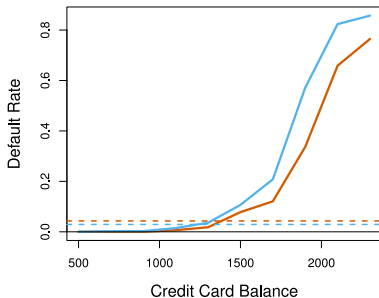
$$\log\left(\frac{p(X)}{1-p(X)}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p$$

$$p(X) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p}}$$

	Koef.	SE	z-statistika	p-hodnota
Regr. konst.	-10,8690	0,4923	-22,08	< 0,0001
balance	0,0057	0,0002	24,74	< 0,0001
income	0,0030	0,0082	0,37	0,7115
student [Yes]	-0,6468	0,2362	-2,74	0,0062

Proč je koeficient u proměnné **student** záporný, když předtím byl kladný?

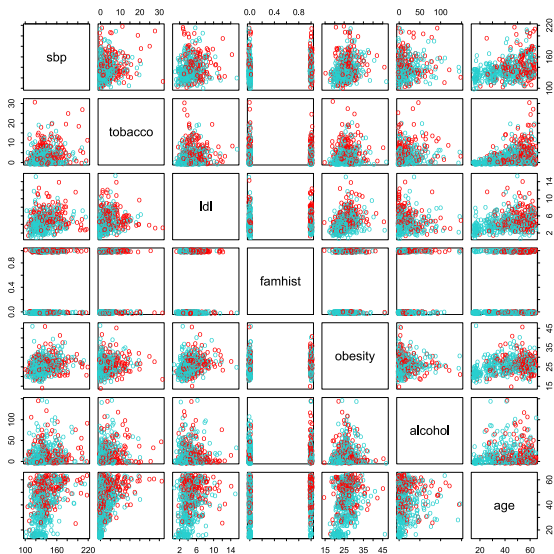
Protiklady



- Studenti mají tendenci mít vyšší zůstatky než nestudenti, takže jejich marginální míra nesplácení je vyšší než u nestudentů.
- Ale pro každou úroveň zůstatku studenti nesplácejí méně často než nestudenti.
- Toto lze odhalit logistickou regresí s více proměnnými.

Příklad: Srdeční choroby v Jižní Africe

- 160 případů IM (infarktu myokardu) a 302 kontrolních osob (všechno muži ve věku 15–64 let), z oblasti Western Cape, Jižní Afrika, počátkem 80. let.
- Celkový výskyt choroby v této oblasti je velmi vysoký: 5,1%.
- Měření na sedmi prediktorech (rizikových faktorech), výsledky zobrazeny v matici bodových grafů.
- Cílem je identifikovat relativní síly a směřování rizikových faktorů.
- Jde tu o část intervenční studie s cílem vést veřejnost ke zdravějšímu stravování.



Matrice bodových grafů pro data srdečních chorob v Jižní Africe.

Odpověď je kódována barevně — případy choroby (IM) jsou červené, kontrolní osoby tyrkysové, **famhist** je binární proměnná, u níž 1 označuje rodinnou historii IM.

```

> heartfit<-glm(chd~., data=heart, family=binomial)
> summary (heartfit)
Call:
  glm(formula=chd~., family=binomial, data=heart)
Coefficients:
              Estimate   Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -4.1295997  0.9641558  -4.283  1.84e-05 ***
sbp           0.0057607  0.0056326   1.023  0.30643
tobacco       0.0795256  0.0262150   3.034  0.00242 **
ldl           0.1847793  0.0574115   3.219  0.00129 **
famhist[Yes]  0.9391855  0.2248691   4.177  2.96e-05 ***
obesity      -0.0345434  0.0291053  -1.187  0.23529
alcohol       0.0006065  0.0044550   0.136  0.89171
age           0.0425412  0.0101749   4.181  2.90e-05 ***
(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)
Null deviance: 596.11 on 461 degrees of freedom
Residual deviance: 483.17 on 454 degrees of freedom
AIC: 499.17

```

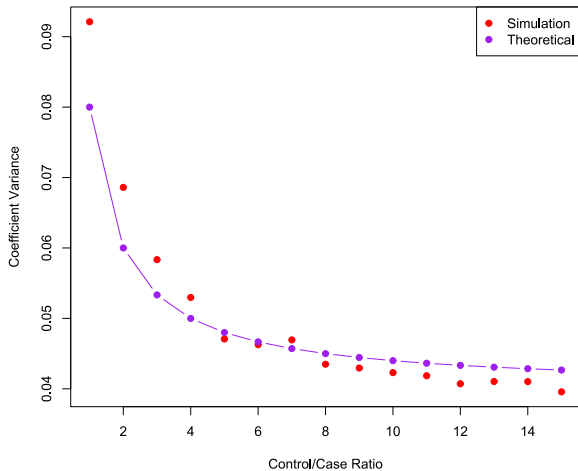
Vzorkování případ-kontrola a logistická regrese

- V datech z Jižní Afriky je 160 případů a 302 kontrol — $\tilde{\pi} = 0,35$ jsou případy. Přesto je riziko IM v této oblasti $\pi = 0,05$.
- Při vzorkování případ-kontrola můžeme odhadnout regresní parametry β_j přesně (pokud je náš model správný); regresní konstanta β_0 je nesprávná.
- Odhadnutou regresní konstantu můžeme opravit jednoduchou transformací

$$\hat{\beta}_0^* = \hat{\beta}_0 + \log \frac{\pi}{1 - \pi} - \log \frac{\tilde{\pi}}{1 - \tilde{\pi}}.$$

- Často jsou případy vzácné a bereme je všechny; počet kontrol až do pětinasobku je postačující. Viz následující slajd.

Snižování rozptylu v nevyvážených binárních datech



Vzorkování více kontrol než případů snižuje rozptyl odhadů parametrů. Ale po dosažení poměru zhruba 5 k 1 se snižování rozptylu zastavuje.

Logistická regrese s více než dvěma třídami

Až dosud jsme probírali logistickou regresi se dvěma třídami. Dá se snadno zobecnit na více než dvě třídy. Jedna verze (používaná v balíčku `glmnet` jazyka R má symetrický tvar

$$P(Y = k|X) = \frac{e^{\beta_{0k} + \beta_{1k}X_1 + \dots + \beta_{pk}X_p}}{\sum_{\ell=1}^K e^{\beta_{0\ell} + \beta_{1\ell}X_1 + \dots + \beta_{p\ell}X_p}}$$

Je zde lineární funkce pro *každou* třídu.

(*Matematicky založený student si může všimnout, že výraz lze zjednodušit a že je zapotřebí pouze $K - 1$ lineárních funkcí podobně jako u dvoutřídní logistické regrese.*)

Logistická regrese s více třídami se nazývá také *multinomiální regrese*.

Diskriminační analýza

Náš přístup zde je modelovat rozdělení X v každé třídě odděleně a pak použít *Bayesovu větu* k obrácenému pohledu na věc a získat $P(Y|X)$.

Použijeme-li v každé třídě normální (Gaussovo) rozdělení, vede to k lineární nebo kvadratické diskriminační analýze.

Nicméně je tento přístup zcela obecný a mohou být použita rovněž jiná rozdělení. My se soustředíme na normální rozdělení.

Bayesova věta pro klasifikaci

Thomas Bayes byl známý matematik, jehož jméno je spojeno s velkou podoblastí statistického a pravděpodobnostního modelování. Zde se soustředíme na jeden jednoduchý výsledek známý jako *Bayesova věta*:

$$P(Y = k|X = x) = \frac{P(X = x|Y = k) \cdot P(Y = k)}{P(X = x)}$$

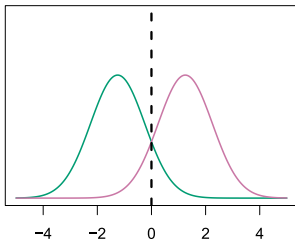
Pro diskriminační analýzu se to zapisuje trochu odlišně:

$$P(Y = k|X = x) = \frac{\pi_k f_k(x)}{\sum_{l=1}^K \pi_l f_l(x)}, \quad \text{kde}$$

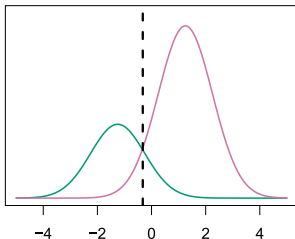
- $f_k(x) = P(X = x|Y = k)$ je *hustota* X ve třídě k . Budeme zde používat normální hustoty, odděleně v každé třídě.
- $\pi_k = P(Y = k)$ je marginální nebo *apriorní* pravděpodobnost pro třídu k .

Klasifikace na nejvyšší hustotu

$$\pi_1 = .5, \quad \pi_2 = .5$$



$$\pi_1 = .3, \quad \pi_2 = .7$$



Nový bod klasifikujeme podle toho, která hustota je nejvyšší. Jsou-li apriorní pravděpodobnosti odlišné, bereme to rovněž v úvahu, a porovnáváme $\pi_k f_k(x)$. V obrázku napravo upřednostňujeme purpurovou třídu — rozhodovací hranice se posunula doleva.

Proč diskriminační analýza?

- Jsou-li třídy dobře oddělené, jsou odhady parametrů u logistického regresního modelu překvapivě nestabilní. Lineární diskriminační analýza tímto problémem netrpí.
- Pokud n je malé a rozdělení prediktorů X je v každé ze tříd přibližně normální, je lineární diskriminační model opět stabilnější než logistický regresní model.
- Lineární diskriminační analýza je oblíbená v situacích, kdy máme více než dvě třídy odpovědí, protože rovněž poskytuje zobrazení dat v méně dimenzích.

Lineární diskriminační analýza při $p = 1$

Gaussova hustota má tvar

$$f_k(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_k}{\sigma_k}\right)^2}.$$

Zde je μ_k střední hodnota a σ_k^2 je rozptyl (ve třídě k). Budeme předpokládat, že všechny hodnoty $\sigma_k = \sigma$ jsou stejné.

Dosadíme-li toto do Bayesova vzorce, dostaneme poměrně komplikovaný výraz pro $p_k(x) = P(Y = k|X = x)$:

$$p_k(x) = \frac{\pi_k \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_k}{\sigma}\right)^2}}{\sum_{l=1}^K \pi_l \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_l}{\sigma}\right)^2}}$$

Naštěstí je zde možnost zjednodušení a krácení.

Diskriminační funkce

Abychom klasifikovali v hodnotě $X = x$, potřebujeme zjistit, která z hodnot $p_k(x)$ je největší. Zlogaritmujeme a odstraníme členy, které nezávisí na k , a zjistíme tak, že toto je ekvivalentní přiřazení x do třídy s největším *diskriminačním skóre*:

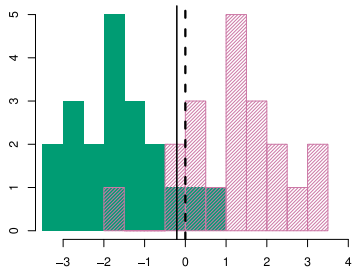
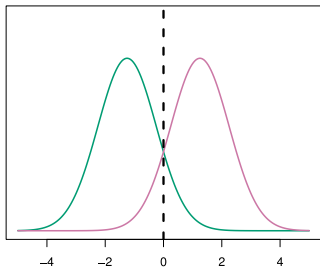
$$\delta_k(x) = x \cdot \frac{\mu_k}{\sigma^2} - \frac{\mu_k^2}{2\sigma^2} + \log(\pi_k)$$

Všimněte si, že $\delta_k(x)$ je *lineární* funkce x .

Jestliže máme $K = 2$ třídy a $\pi_1 = \pi_2 = 0,5$, pak se dá ukázat, že *rozhodovací hranice* je v bodě

$$x = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}.$$

(Zkuste to ukázat sami.)



Příklad s $\mu_1 = -1,5$, $\mu_2 = 1,5$, $\pi_1 = \pi_2 = 0,5$ a $\sigma^2 = 1$.

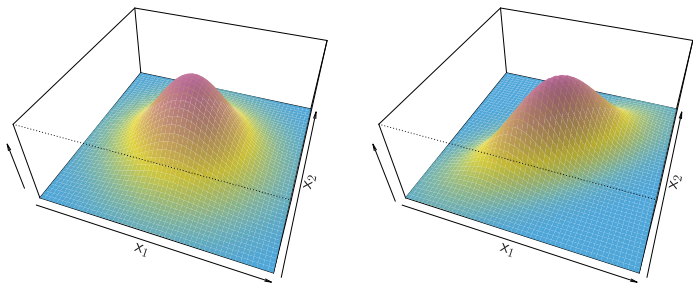
V typické situaci tyto parametry neznáme; máme jen trénovací data. V takovém případě prostě parametry odhadneme a dosadíme je do příslušného vzorce.

Odhadování parametrů

$$\begin{aligned}\hat{\pi}_k &= \frac{n_k}{n} \\ \hat{\mu}_k &= \frac{1}{n_k} \sum_{i:y_i=k} x_i \\ \hat{\sigma}^2 &= \frac{1}{n-K} \sum_{k=1}^K \sum_{i:y_i=k} (x_i - \hat{\mu}_k)^2 \\ &= \sum_{k=1}^K \frac{n_k - 1}{n - K} \cdot \hat{\sigma}_k^2\end{aligned}$$

kde $\hat{\sigma}_k^2 = \frac{1}{n_k - 1} \sum_{i:y_i=k} (x_i - \hat{\mu}_k)^2$ je obvyklý vzorec pro odhad rozptylu v k -té třídě.

Lineární diskriminační analýza při $p > 1$



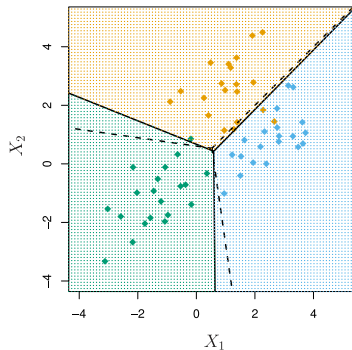
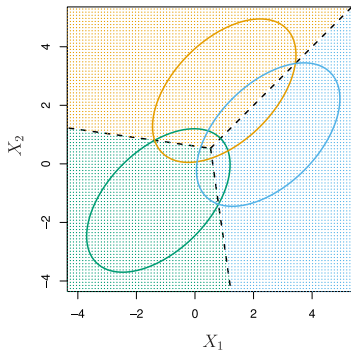
$$\text{Hustota : } f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2} |\Sigma|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}(x-\mu)^T \Sigma^{-1}(x-\mu)}$$

$$\text{Diskriminační funkce: } \delta_k(x) = x^T \Sigma^{-1} \mu_k - \frac{1}{2} \mu_k^T \Sigma^{-1} \mu_k + \log \pi_k$$

Nehledě na její složitý tvar je $\delta_k(x)$ lineární funkce:

$$\delta_k(x) = c_{k0} + c_{k1}x_1 + c_{k2}x_2 + \cdots + c_{kp}x_p.$$

Ilustrace: $p = 2$ a $K = 3$ třídy



Je zde $\pi_1 = \pi_2 = \pi_3 = 1/3$.

Čárkované úsečky jsou známy jako *Bayesovy rozhodovací hranice*.

Pokud by byly známy, poskytovaly by nejméně chyb se špatnou klasifikací mezi všemi možnými klasifikátory.

Fisherova data o kosatcích (iris)

4 proměnné

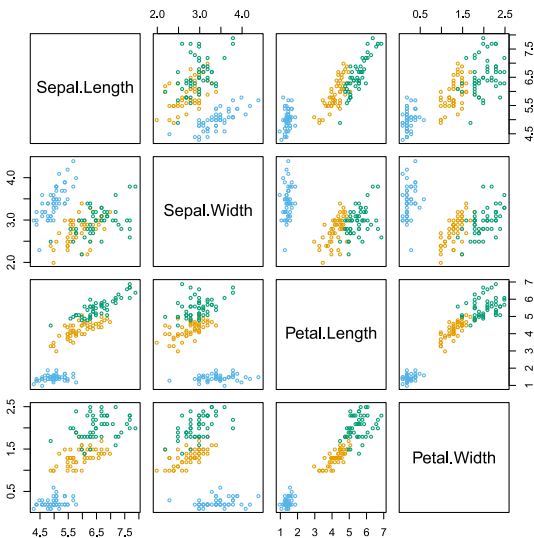
3 odrůdy

50 vzorků na třídu

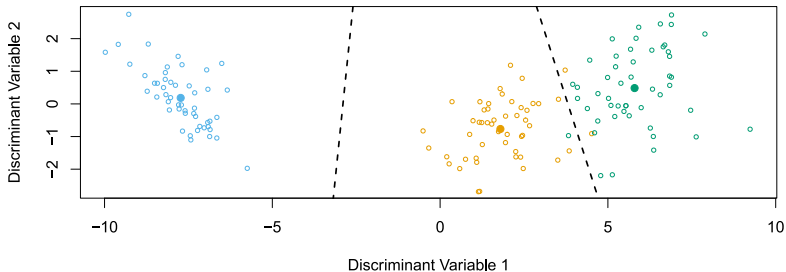
- Setosa
- Versicolor
- Virginica

sepal = kališní
lístek, petal =
okvětní lístek

LDA klasifikuje
všechny až na 3 ze
150 trénovacích
vzorků správně.



Fisherův diskriminační graf



Jestliže máme K tříd, lineární diskriminační analýzu lze vidět přesně na $(K - 1)$ -rozměrném grafu.

Proč? Protože v podstatě klasifikuje na nejbližší centroid, a ty generují $(K - 1)$ -rozměrnou rovinu.

I pro $K > 3$ můžeme nalézt „nejlepší“ dvourozměrnou rovinu pro vizualizaci diskriminačního pravidla.

Od $\delta_k(x)$ k pravděpodobnostem

Jakmile máme odhady $\hat{\delta}_k(x)$, můžeme je převést na odhady pravděpodobností tříd:

$$\hat{P}(Y = k|X = x) = \frac{e^{\hat{\delta}_k(x)}}{\sum_{l=1}^K e^{\hat{\delta}_l(x)}}.$$

Klasifikace na největší $\hat{\delta}_k(x)$ tak znamená klasifikaci do třídy, pro niž je $\hat{P}(Y = k|X = x)$ největší.

Jestliže $K = 2$, klasifikujeme do třídy 2, pokud $\hat{P}(Y = k|X = x) \geq 0,5$, jinak do třídy 1.

LDA na kreditních datech

		Skutečný stav nesplácení		
		Ne	Ano	Celkem
Předpověděný stav nesplácení	Ne	9644	252	9896
	Ano	23	81	104
Celkem		9667	333	10000

$(23 + 252)/10000$ chyb — míra chybné klasifikace je 2,75%!

Některá upozornění:

- Toto je *trénovací* chyba, a možná tu je přeúčtení. Tady nás to příliš neznepokojuje, protože zde $n = 10000$ a $p = 4$.
- Pokud bychom klasifikovali podle apriorní pravděpodobnosti — vždy do třídy **Ne** v tomto případě — udělali bychom $333/10000$ chyb, neboli pouze 3,33%.
- Na skutečných **Ne** děláme $23/9667 = 0,2\%$ chyb; na skutečných **Ano** děláme $252/333 = 75,7\%$ chyb!

Typy chyb

Míra falešných pozitiv: Podíl negativních příkladů, které jsou klasifikovány jako pozitivní — 0,2% v našem příkladu.

Míra falešných negativ: Podíl pozitivních příkladů, které jsou klasifikovány jako negativní — 75,7% v našem příkladu.

Tuto tabulku jsme vytvořili tak, že jsme klasifikovali do třídy **Ano**, pokud

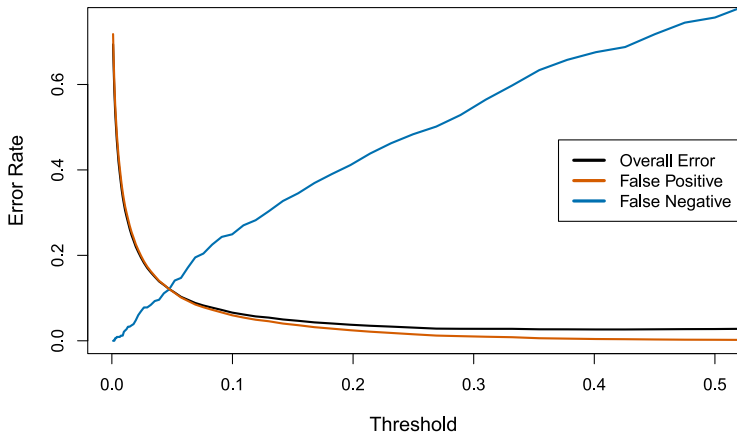
$$\hat{P}(\text{Neplatič} = \text{Ano} | \text{Zůstatek}, \text{Student}) \geq 0,5.$$

Ty dvě míry chyb můžeme pozměnit tak, že změníme prahovou hodnotu z 0,5 na nějakou jinou hodnotu v intervalu [0, 1]:

$$\hat{P}(\text{Neplatič} = \text{Ano} | \text{Zůstatek}, \text{Student}) \geq \text{práh}$$

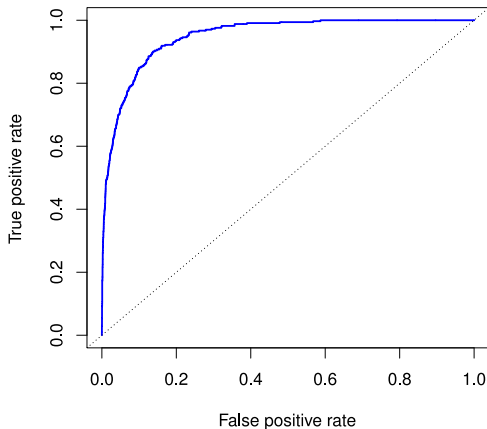
a měníme *práh*.

Měníme *prahovou hodnotu*



Abychom snížili míru falešných negativ, můžeme chtít snížit prahovou hodnotu na 0,1 nebo méně.

Křivka ROC



Graf ROC zobrazuje obě míry současně. Někdy se používá *AUC* neboli *area under the curve* (oblast pod křivkou) k vyhodnocení celkové účinnosti. Větší *AUC* je dobré.

Další způsoby diskriminační analýzy

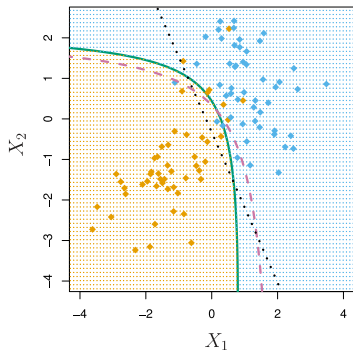
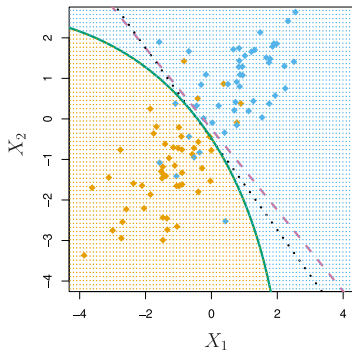
$$P(Y = k|X = x) = \frac{\pi_k f_k(x)}{\sum_{l=1}^K \pi_l f_l(x)}$$

Pokud jsou $f_k(x)$ Gaussovy hustoty se stejnou kovarianční maticí Σ v každé třídě, toto vede na lineární diskriminační analýzu.

Měněním tvarů $f_k(x)$ dostáváme odlišné klasifikátory.

- S Gausiány, ale odlišnou Σ_k v každé třídě, dostáváme *kvadratickou diskriminační analýzu*.
- Pro $f_k(x) = \prod_{j=1}^p f_{jk}(x_j)$ (model s podmíněnou nezávislostí) v každé ze tříd dostaneme *naivní Bayesův klasifikátor*. Pro Gausián toto znamená, že Σ_k jsou diagonální.
- Mnoho dalších způsobů, tím, že pro $f_k(x)$ použijeme specifické modely hustoty, počítaje v to neparametrické přístupy.

Kvadratická diskriminační analýza



$$\delta_k(x) = -\frac{1}{2}(x - \mu_k)^T \Sigma_k^{-1}(x - \mu_k) + \log \pi_k$$

Protože matice Σ_k jsou rozdílné, kvadratické členy zde hrají roli.

Naivní Bayesův klasifikátor

Předpokládá se, že vlastnosti jsou v každé třídě nezávislé.

Užitečné, je-li p velké, takže metody pro více proměnných jako QDA a dokonce LDA selhávají.

- Gaussovský naivní Bayesův klasifikátor předpokládá, že každá matice Σ_k je diagonální:

$$\delta_k(x) \propto \log \left[\pi_k \prod_{j=1}^p f_{kj}(x_j) \right] = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^p \frac{(x_j - \mu_{kj})^2}{\sigma_{kj}^2} + \log \pi_k$$

- Dá se použít pro *smíšené* vektory vlastností (kvalitativní a kvantitativní). Jestliže je X_j kvalitativní, nahraďte $f_{kj}(x_j)$ pravděpodobnostní funkcí (histogramem) přes diskrétní kategorie.

Nehledě na silné předpoklady poskytuje naivní Bayesův klasifikátor často dobré klasifikační výsledky.

Logistická regrese versus LDA

Pro úlohu s dvěma třídami se dá ukázat, že pro LDA platí

$$\log \left(\frac{p_1(x)}{1 - p_1(x)} \right) = \log \left(\frac{p_1(x)}{p_2(x)} \right) = c_0 + c_1 x_1 + \dots + c_p x_p.$$

Má tedy stejný tvar jako logistická regrese.

Rozdíl je v tom, jak jsou odhadovány parametry.

- Logistická regrese používá podmíněnou věrohodnost založenou na $P(Y|X)$ (je to známo jako *diskriminační učení*).
- LDA používá úplnou věrohodnost založenou na $P(X, Y)$ (to je známo jako *generativní učení*).
- Nehledě na tyto rozdíly jsou výsledky v praxi často velmi podobné.

Poznámka: logistická regrese může také prokládat kvadratické hranice jako QDA, a to tak, že se do modelu explicitně zahrnou kvadratické členy.

Shrnutí

- Logistická regrese je pro klasifikaci velmi oblíbená, zejména při $K = 2$.
- LDA je užitečná, je-li n malé nebo jsou-li třídy dobře odděleny, a jsou-li rozumné předpoklady o Gaussiánu. Také při $K > 2$.
- Naivní Bayesův klasifikátor je užitečný, je-li p velmi velké.
- V odst. 4.5 lze nalézt materiál k porovnání logistické regrese, LDA a KNN.