

# ÚVOD DO ROZPOZNÁVÁNÍ

Václav Hlaváč

Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze  
katedra kybernetiky, **Centrum strojového vnímání**  
hlavac@fel.cvut.cz, <http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac>

## Osnova přednášky

- ◆ Modelování a teorie systémů.
- ◆ Rozpoznávání.
- ◆ Formulace Bayesovské úlohy.
- ◆ Příznakové a strukturní rozpoznávání.

# K NÁZVU ROZPOZNÁVÁNÍ

- ◆ Význam českého pojmu **rozpoznávání** chápou jako ekvivalent disciplíny anglicky nazývané **pattern recognition**.
- ◆ Zejména v dřívějších českých publikacích z šedesátých až sedmdesátých let zazníval ve stejném smyslu i pojem rozpoznávání obrazců. Do češtiny asi přešel z původního anglického názvu přes ruský překlad—распознавание образцов.
- ◆ V ruštině obrazec odpovídá českému **vzor** či **anglickému pattern**.

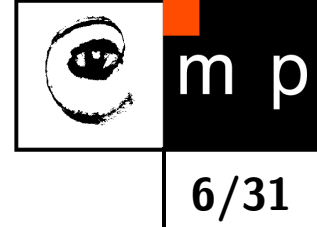
# MOTIVACE

- ◆ Člověk je na špičce pomyslné pyramidy živočichů i proto, že je schopen přemýšlet o postupech, jakými sám uvažuje.
- ◆ Panuje všeobecný zájem o strojové napodobení biologického vnímání s cílem napodobit inteligentní chování v nepříliš známém prostředí.
- ◆ Základním atributem inteligentního chování je schopnost **učit se** na základě vnímání okolního prostředí.
- ◆ Klíčová je **otázka reprezentace znalosti**. Přirozený jazyk je nejdokonalejší nástroj lidí pro vyjádření pozorování, pro popis jevu, formulaci úloh, jejich řešení a pro související otázky učení.

- ◆ Potřeba porozumět složitým jevům například v biologii, technice nebo sociálních vědách vede k nutnosti zkoumat jevy komplexně v mnoha souvislostech.
- ◆ Přístup je nazýván **systemovým myšlením**, aby se odlišil od newtonovské snahy zredukovat každý jev na vztahy mezi základními prvky a jejich vlastnostmi.

- ◆ Při zkoumání složitého jevu se omezujeme na část, která nás zajímá, a říkáme jí **objekt** (nebo systém).
- ◆ Vše ostatní, co nám z daného pohledu připadá nezajímavé, nazýváme **pozadí**.
- ◆ Objekty většinou nezkoumáme v celé jejich složitosti. Při jednom zkoumání pozorujeme nebo měříme jen určité vlastnosti, které nám právě připadají zajímavé. Teorie systémů zde používá pojem **rozlišovací úroveň**.
- ◆ Popis a chápání objektu se přirozeně může vyvíjet s měnící se rozlišovací úrovní. Jde o metapohled hledající kvalitativní změnu v popisu objektu.

# DVA MOŽNÉ PŘÍSTUPY



Snaha o exaktní popis objektů nástroji matematiky vede zhruba řečeno ke dvěma možným přístupům:

1. Matematické modelování (v newtonovském smyslu).
2. Rozpoznávání.

- ◆ Podstatné rysy objektu se napodobují formou matematických rovnic. Často se hledá relace mezi vstupem a výstupem.
- ◆ Obvykle blíže k newtonovskému pojetí. Snaha o co nejpodrobnější a deterministické vysvětlení.
- ◆ *Příklad:* dobrý matematický model elektrárenského kotle v teorii řízení předpovídá téměř stejné odezvy na vstupní signály jako kotel sám.
- ◆ V mnoha případech nejsme schopni matematický model vůbec vytvořit (např. model fungování lidského těla).

# ALTERNATIVOU K MODELOVÁNÍ JE ROZPOZNÁVÁNÍ

- ◆ Rozpoznávání **zařazuje** pozorování podle nějakého rozhodovacího pravidla **do** předem známých **tříd**.
- ◆ Třídy ekvivalence (relace ekvivalence: reflexivní, symetrická, tranzitivní).
- ◆ Uvnitř těchto tříd jsou si objekty podobnější než mezi třídami navzájem.
- ◆ V rozpoznávání bývá porozumění objektu méně podrobné než v modelování.



# ROLE UČENÍ V ROZPOZNÁVÁNÍ

- ◆ Výhodou rozpoznávání je, že člověk vytvářející rozhodovací pravidlo (rozhodovací strategii, klasifikátor) nemusí rozumět složité podstatě objektu či jevu, o kterém se má rozhodovat.
- ◆ Rozhodovací pravidlo může být naučeno empiricky z mnoha pozorovaných příkladů.

**Učení s učitelem** na základě trénovací množiny zahrnující pozorování a informaci o třídě, kterou přisoudil učitel (znalec).

**Učení bez učitele** na základě hledání podobnosti mezi pozorováními, aniž by byla k dispozici znalcová klasifikace.

Teorii rozpoznávání lze oddělit od aplikačních disciplín.



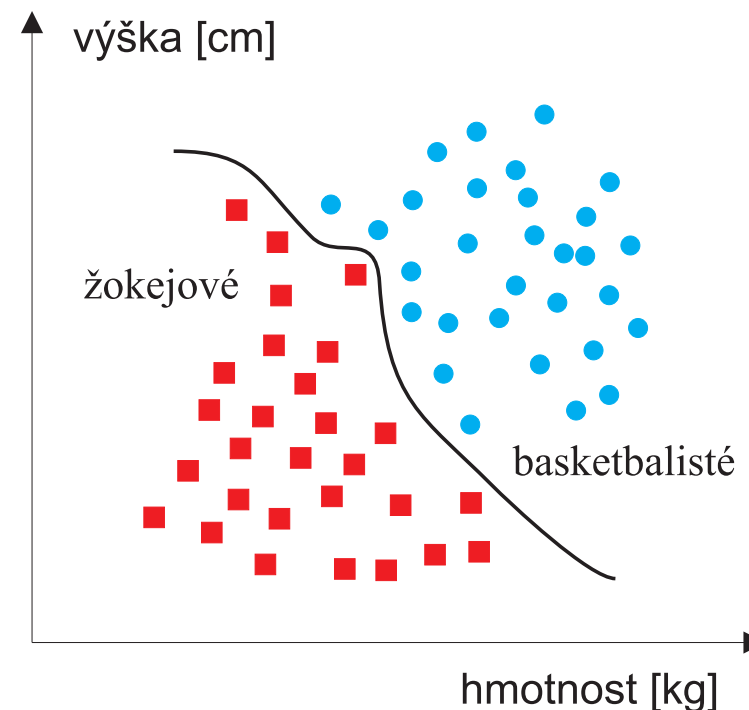
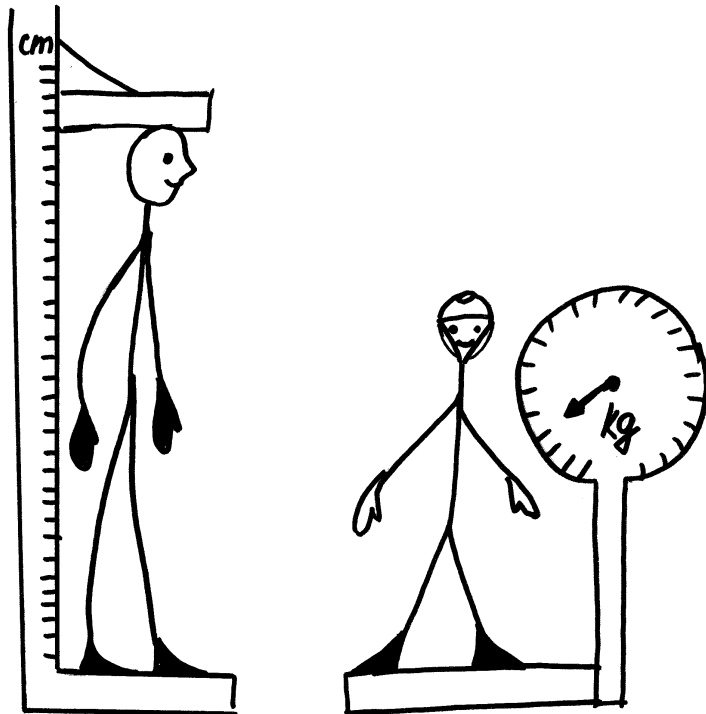
# ROZPOZNÁVÁNÍ, MOTIVAČNÍ PŘÍKLAD

**Objekt (situace)** se popisuje dvěma parametry:

$x$  – pozorovatelný *příznak* (též pozorování).

$k$  – *skrytý parametr* (stav, speciální případ—klasifikační třída).

**Příklad** statistické rozpoznávání: *žokejové a basketbalisté*.

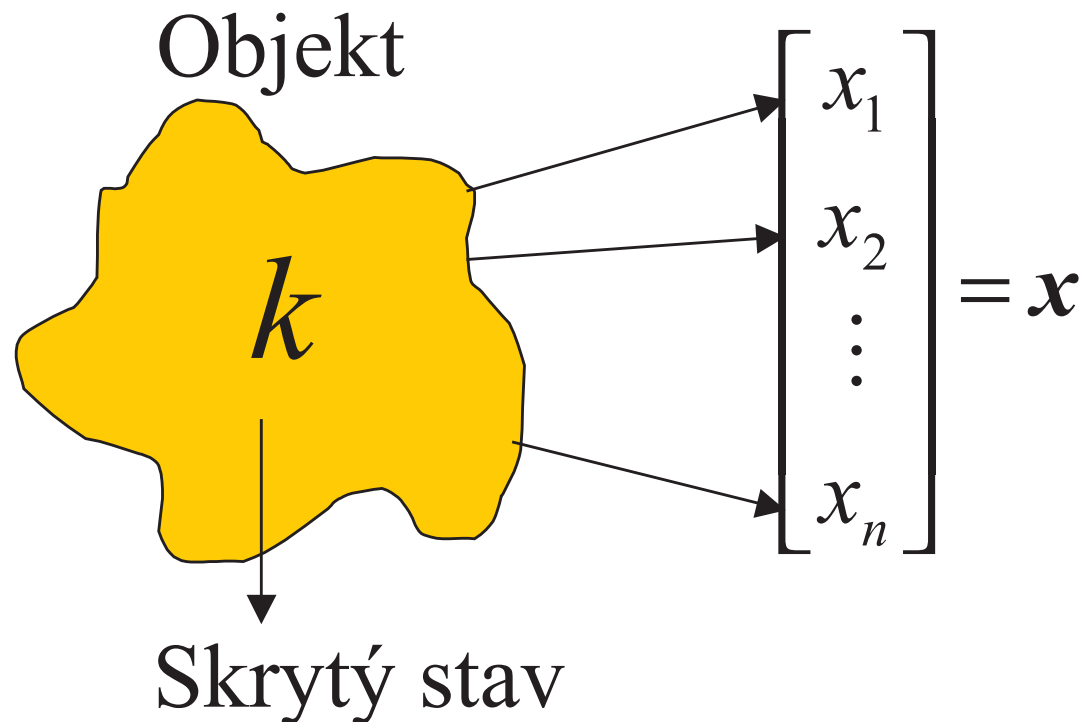


# BAYESOVSKÉ ROZHODOVÁNÍ, POJMY (1)

$X$  je konečná množina pozorování,  $x \in X$ .

$K$  konečná množina skrytých stavů,  $k \in K$ .

$D$  je konečná množina možných *rozhodnutí*.



# BAYESOVSKÉ ROZHODOVÁNÍ, POJMY (2)

$p_{XK}: X \times K \rightarrow \mathbb{R}$  je sdružená pravděpodobnost jevu, že objekt je ve stavu  $k$  při pozorování  $x$ .

$W: K \times D \rightarrow \mathbb{R}$  je *pokutová funkce*. Pokuta  $W(k, d)$ ,  $k \in K$ ,  $d \in D$  se platí, když je objekt ve stavu  $k$  a přijalo se rozhodnutí  $d$ .

$Q: X \rightarrow D$  je *rozhodovací funkce* (pravidlo, strategie) přiřazující pozorování každému  $x \in X$  nějaké rozhodnutí  $Q(x) \in D$ .

$R(Q)$  je *riziko*, tj. matematické očekávání pokuty.

# BAYESOVSKÁ ÚLOHA, FORMULACE

V bayesovské úloze statistického rozhodování se hledá

- ◆ pro množiny  $X$ ,  $K$  a  $D$ , pro sdruženou pravděpodobnost  $p_{XK}: X \times K \rightarrow \mathbb{R}$  a pokutovou funkci  $W: K \times D \rightarrow \mathbb{R}$
- ◆ strategie  $Q: X \rightarrow D$ , která **minimalizuje Bayesovské riziko**

$$R(Q) = \sum_{x \in X} \sum_{k \in K} p_{XK}(x, k) W(k, Q(x)) .$$

Řešením bayesovské úlohy je **bayesovská strategie**  $Q$  minimalizující riziko.

# PŘÍKLAD

## 2 SKRYTÉ STAVY, 3 ROZHODNUTÍ

**Objekt:** pacient vyšetřovaný lékařem.

**Pozorování  $X$ :** některé měřitelné parametry (teplota, krevní tlak, ...).

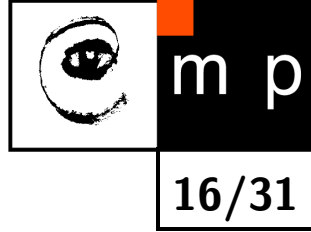
**2 skryté stavy  $K = \{\text{zdravý, nemocný}\}$ .**

**3 rozhodnutí  $D = \{\text{neléčit, slabý lék, silný lék}\}$ .**

**Pokutová funkce  $W: K \times D \rightarrow \mathbb{R}$**

$W(k, d)$	neléčit	slabý lék	silný lék
nemocný	10	2	0
zdravý	0	5	10

# OBECNOST BAYESOVSKÉ ÚLOHY

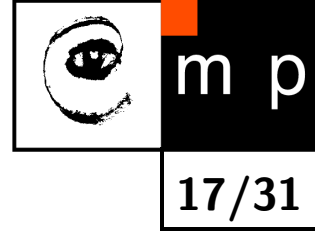


Poznámka:

**Obecnost bayesovské formulace:** Pozorováním  $x$  může být číslo, symbol, funkce dvou proměnných (např. obrázek), graf, algebraická struktura.



# DVĚ ZÁKLADNÍ SKUPINY METOD ROZPOZNÁVÁNÍ



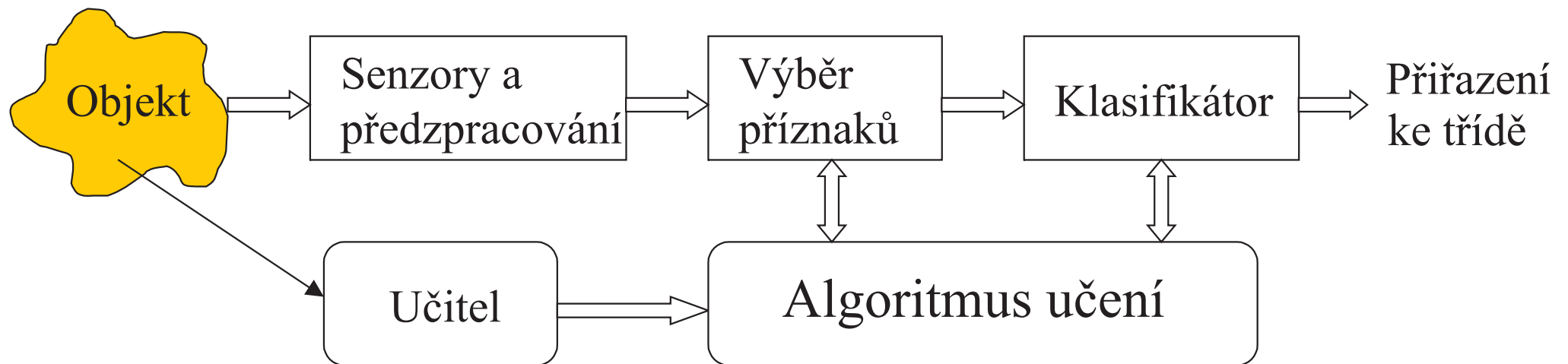
## 1. Statistické (příznakové) rozpoznávání.

- ◆ Objekty jsou reprezentovány jako body ve vektorovém prostoru.
- ◆ Souřadné osy prostoru odpovídají jednotlivým číselně vyjádřeným pozorováním.

## 2. Strukturní rozpoznávání.

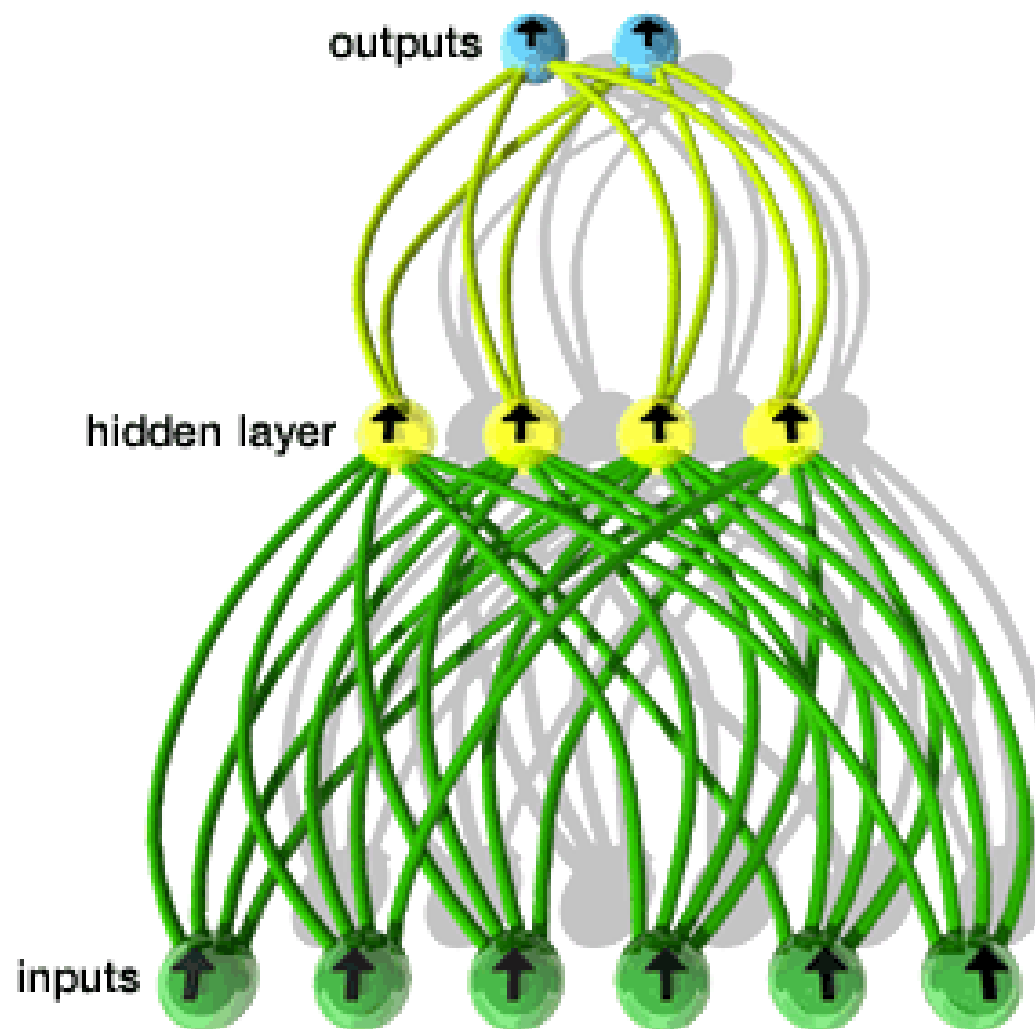
- ◆ Mezi pozorováními existuje struktura a ta je reprezentována.
- ◆ Nejrozvinutější a nejstarší je reprezentace struktury gramatikami.

# KOMPONENTY ROZPOZNÁVACÍHO SYSTÉMU



# UMĚLÉ NEURONOVÉ SÍTĚ

Model dopředné neuronové sítě (McCulloch, Pitts, 1943).



- ◆ Duda Richard O., Hart Peter E., Stork, David G.: Pattern Classification, John Wiley & Sons, New York, USA, 2001, 654 s.
- ◆ Schlesinger M.I., Hlaváč V.: Ten lectures on statistical and syntactic pattern recognition, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2002, 521 p. (předchůdce v češtině, Vydavatelství ČVUT 1999).

## NÁSTROJ PRO EXPERIMENTY

- ◆ Franc V. (doktorand CMP): Statistical Pattern Recognition Toolbox, nad MATLABem, 2000 - stále rozvíjen, <http://cmp.felk.cvut.cz>

**Popis objektu  $n$ -ticí čísel**, která odpovídají  $n$  podstatným vlastnostem a jsou oceněny reálným číslem (míra vlastnosti).

**Příznakový prostor.**  $n$ -tice popisující jeden objekt  $\Rightarrow$  bod v příznakovém prostoru.

**Hledá se reprezentace objektu pro klasifikaci** v příznakovém prostoru, v níž body jedné třídy tvoří kompaktní shluky dobře oddělitelné rozhodovací strategií.

S příznaky se zde zachází metodami matematické statistiky.

**Naučení klasifikátoru** ze statisticky významné trénovací množiny.

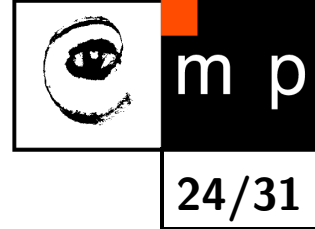
# VYUŽITÍ MATEMATICKÉ STATISTIKY

- ◆ Nástroji matematické statistiky se dají vyjádřit mnohé praktické úlohy.
  - ◆ Nejrozvinutější částí statistiky je statistika náhodných čísel.
  - ◆ Doporučení se opírají o pojmy jako: matematické očekávání, rozptyl, korelace, kovarianční matice, . . .
  - ◆ Úspěch ve statistickém rozpoznávání.
- 
- ◆ Selhání pro obrázky, tj.  $f(x, y)$ , kde  $f$  je jas nebo barva a  $x, y$  jsou souřadnice pixelu.

# CO SE UMÍ VE STATISTICKÉM ROZPOZNÁVÁNÍ (1) ?

- ◆ Učení z příkladů—v rozpoznávání se ví, kterým souvisejícím úlohám rozumí. Je zřejmé, které úlohy již nejsou pohádkami.
- ◆ Tato znalost je vyjádřena matematicky formulovanými větami. Lze rozlišit
  - co se umí,
  - co nelze řešit nebo nelze řešit s polynomiální složitostí,
  - o čem nelze nic říci.

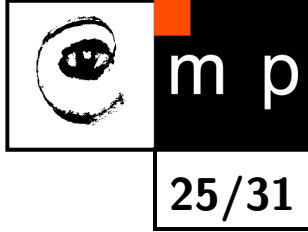
# CO SE UMÍ VE STATISTICKÉM ROZPOZNÁVÁNÍ (2) ?



- ◆ Některé nebayesovské úlohy. Např. s úlohy nenáhodnými zásahy. Lze zavést třídu “nevím”.
- ◆ Lineární klasifikátory. Dnes je oblíbený speciální případ—Support Vector Machines.
- ◆ Odhad potřebné velikosti trénovací množiny pro předepsanou přesnost a spolehlivost klasifikace (Vapnikova teorie učení).
- ◆ Zanoření úlohy vedoucí na nelineární klasifikaci do příznakového prostoru vyšší dimenze  $\Rightarrow$  lineární klasifikace.
- ◆ Učení bez učitele, též shluková analýza, EM algoritmus.
- ◆ Výběr a uspořádání příznaků.



# MNOŽINA POZOROVÁNÍ versus LINEÁRNÍ PROSTOR



Pozorování o jednom objektu:  $n$ -tice čísel.

Mnozí považují za samozřejmý předpoklad, že  $n$ -tici čísel lze chápat jako bod v  $n$ -rozměrném lineární prostoru.

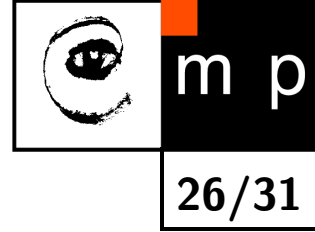
Teorie rozpoznávání platí obecněji. Mnozí udělali chybu, že formalizaci množiny pozorování  $X$  jako lineární prostor považovali za jedinou možnou.

---

**Příklad:**

obrázek  $n \times n$ . Lze uspořádat po řádcích a chápat jako  $n^2$  čísel, tj. příznaků. Dokonce se používá - eigen images.

# OBECNOST STATISTICKÉHO ROZPOZNÁVÁNÍ JE I NEVÝHODOU



- ◆ Pro účelné použití statistických metod musí být množiny  $X$  a  $K$  vyjádřeny co nejkonkrétněji.
- ◆ Z nepřehledné množiny možností musí vybrat taková, která odpovídá příslušné aplikační úloze. To nemusí být vůbec lehké.

# STRUKTURNÍ ROZPOZNÁVÁNÍ

- ◆ Objekt je popsán primitivy, tj. nejjednoduššími kvalitativními charakteristikami.
- ◆ Strukturní rozpoznávání se opírá o teorii formálních jazyků. Gramatiky. Syntaktická analýza.
- ◆ Primitiva tvoří abecedu jazyka. Vztahy mezi primitivy lze vyjádřit relacemi.
- ◆ Kolik je tříd, tolik je potřebných gramatik.
- ◆ Slovo odpovídající určité třídě generuje právě jedna gramatika.
- ◆ Rozpoznávání = syntaktická analýza.
- ◆ Problém: zašuměná data.

Motto: *“Necht’ množiny  $X$  pozorování a  $K$  stavů jsou dvě konečné množiny.”*

- ◆ Výsledky ve statistickém rozpoznávání jsou velmi obecné. Vlastnosti množin pozorovatelných parametrů  $X$  a skrytých parametrů  $K$  nebyly nijak blíže omezeny.
- ◆ Výsledky (zákony) platí pro různorodé aplikace.
- ◆ Množiny pozorovatelných parametrů  $X$  a skrytých parametrů  $K$  mohou být i formálně (matematicky) rozmanité. Zhruba řečeno, mají rozmanitou strukturu.

# PŘÍKLADY RŮZNÉ STRUKTURY JEDNOHO POZOROVÁNÍ

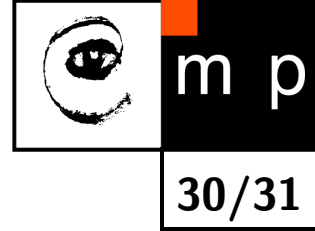
**Hmotnost pacienta** - kladné reálné číslo [kg]. Dobře strukturovaná množina (sčítání, násobení, invertování, atd.).

**Známka na vysvědčení** -  $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ . Úplně uspořádaná množina, nic víc,  $=$ ,  $<$ ,  $>$ .

**Číslo tramvajových linek** - výčtový typ. Tramvaj číslo 22 není o nic horší/lepší než tramvaj číslo 12.

# STRUKTURA VZTAHŮ MEZI VÍCE PŘÍZNAKY

## ILUSTRACE



Uvažujme  $n$ -tici  $x_1, x_2, \dots, x_n$

**Údaje o jednom pacientovi.** Věk, výška, hmotnost, teplota, krevní tlak dolní, krevní tlak horní, množství cukru v moči  
...

Nic by se nestalo, kdyby příznaky byly očíslovány jinak.  
Žádná struktura.

Jednotlivá čísla se chápou jako symboly v abstraktní abecedě.

**$n$ -krát měření údaje v pravidelných časových intervalech.**

Posloupnost.

Index příznaku má význam celého čísla. Množina indexů má jasnou strukturu.

# SPOJOVÁNÍ STATISTICKÉHO A STRUKTURNÍHO ROZPOZNÁVÁNÍ

- ◆ Je teprve v samých začátcích. Zatím nespojené izolované ostrovy vědění.
- ◆ Kde se již dosáhlo pokroku?
  - Rozpoznávání markovských posloupností a acyklických struktur (též bayesovské sítě).
  - Nepodobnost mezi výrazem a regulárním jazykem (Levensteinova nepodobnost).
  - Úloha konzistentního značkování.