بسم الله الرحمن الرحیم

بازشناسی الگو

درس ۱

مقدمه‌ای بر بازشناسی الگو

An Introduction to Pattern Recognition

کاظم فولادی قلعه

دانشکده مهندسی، پردیس فارابی

دانشگاه تهران

http://courses.fouladi.ir/pr

مقدمه

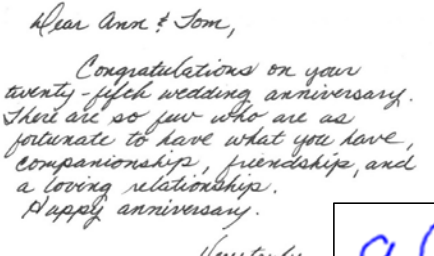
۱

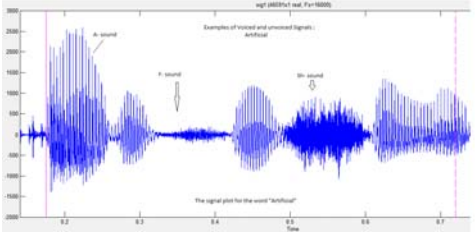
الگوها و بازشناسی الگو

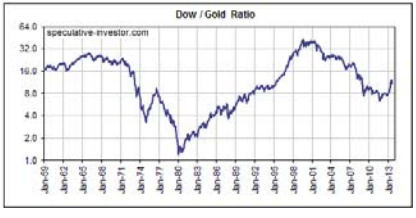
الگوها

PATTERNS

الگو *Pattern*	الگو یک پدیده‌ی دارای نظم است. (مفهومی ذهنی، معمولاً دارای یک نام)







شناخت / بازشناخت

COGNITION VS. RECOGNITION

شناخت *Cognition*	بازشناخت *Recognition*
نخستین مواجهه برای تشخیص	تشخیص آنچه قبلاً دیده شده است.
استفاده از تجربیات خود و دیگران؛ **ایجاد مفهوم جدید**	الگو با موارد دیده شده‌ی قبلی شباهت‌هایی دارد؛ **استفاده از مفاهیم از قبل تعریف شده**

بازشناسی الگو

PATTERN RECOGNITION

بازشناسی الگو
Pattern Recognition

نسبت‌دهی الگوها به طبقه‌های متناظر با آنها

طبقه‌بندی
Classification

بازشناسی با هدف دسته‌بندی الگوها
در **طبقه‌های از پیش معلوم**

طبقه
Class

خوشه‌بندی
Clustering

بازشناسی با هدف دسته‌بندی الگوها
در **خوشه‌های از پیش نامعلوم (اما معیار شباهت معلوم)**

خوشه
Cluster

مقدمه

۲

کاربردهای بازشناسی الگو

بازشناسی الگو

کاربردها

PATTERN RECOGNITION: APPLICATIONS

Problem Domain	Application	Input Pattern	Pattern Classes
Document image analysis	Optical character recognition	Document image	Characters, words
Document classification	Internet search	Text document	Semantic categories
Multimedia database retrieval	Internet search	Video clip	Video genres
Speech recognition	Telephone directory assistance	Speech waveform	Spoken words
Natural language processing	Information extraction	Sentences	Parts of speech
Biometric recognition	Personal identification	Face, iris, fingerprint	Authorized users for access control
Medical	Diagnosis	Microscopic image	Cancerous/healthy cell
Military	Automatic target recognition	Optical or infrared image	Target type
Industrial automation	Printed circuit board inspection	Intensity or range image	Defective/non-defective product
Industrial automation	Fruit sorting	Images taken on a conveyor belt	Grade of quality
Remote sensing	Forecasting crop yield	Multispectral image	Land use categories
Bioinformatics	Sequence analysis	DNA sequence	Known types of genes
Data mining	Searching for meaningful patterns	Points in multidimensional space	Compact and well-separated clusters

بازشناسی الگو

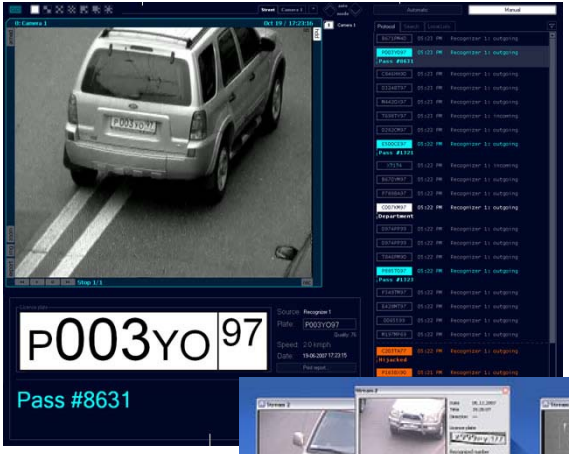
کاربرد در بازشناسی کدهای تصویری

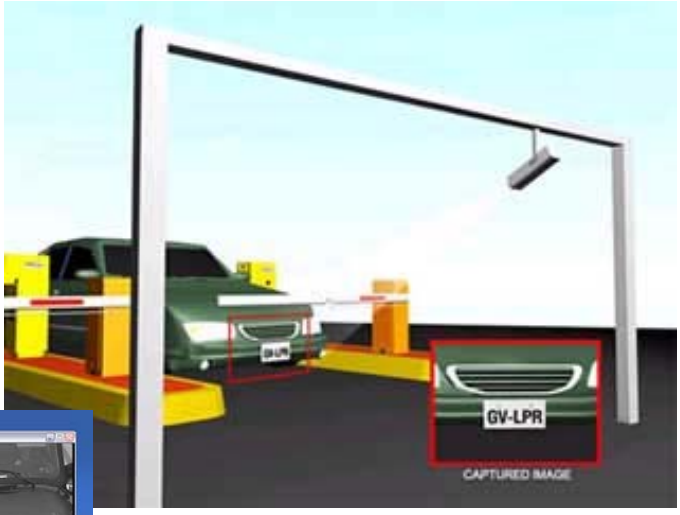
IMAGE-CODE RECOGNITION

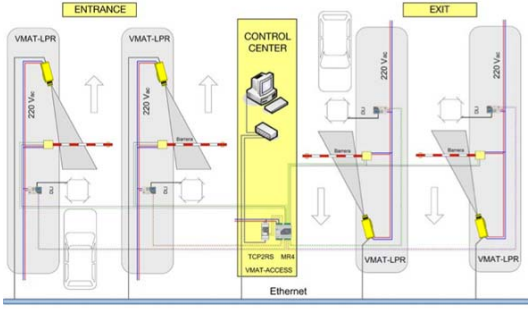
بازشناسی الگو

کاربرد در بازشناسی پلاک خودرو

CAR LICENSE-PLATE RECOGNITION







بازشناسی الگو

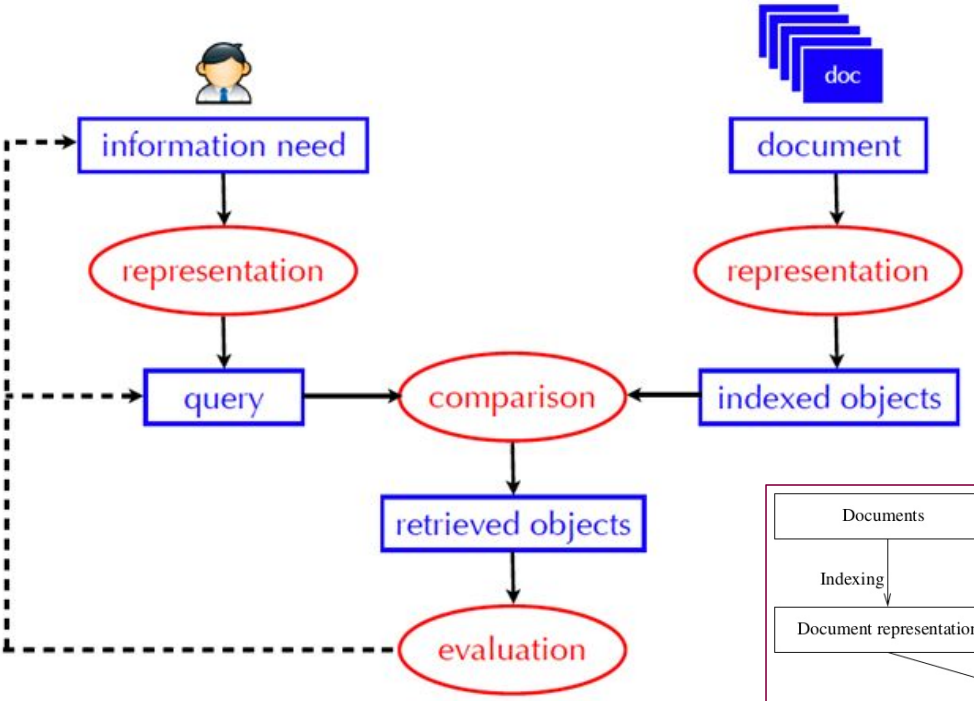
کاربرد در داده‌کاوی

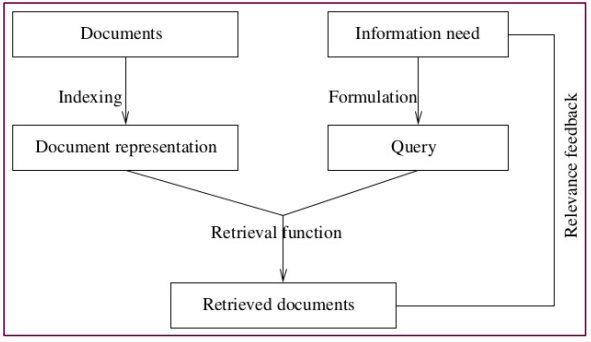
DATA MINING

بازشناسی الگو

کاربرد در بازیابی هوشمند اطلاعات

INTELLIGENT INFORMATION RETRIEVAL

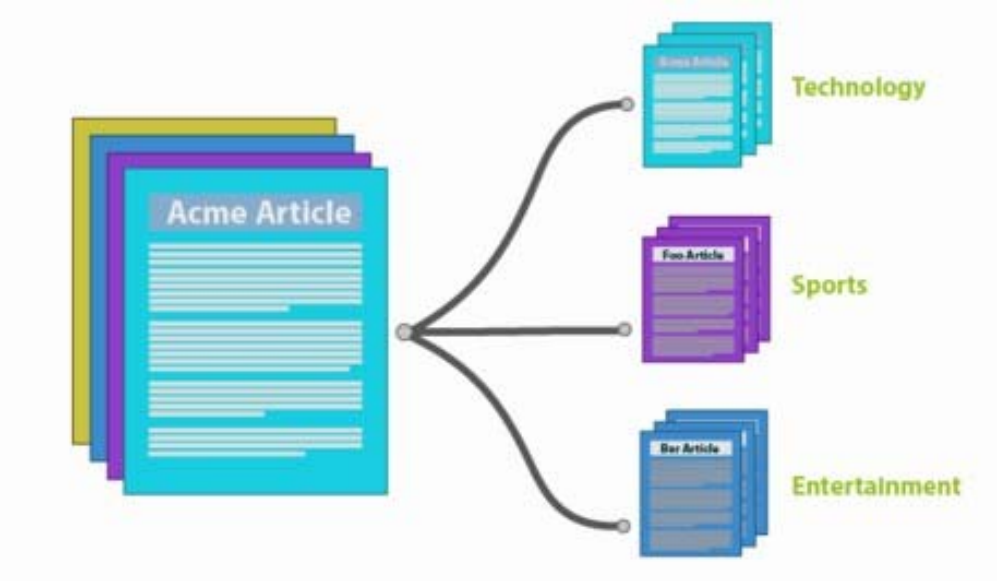




بازشناسی الگو

کاربرد در دسته‌بندی متون

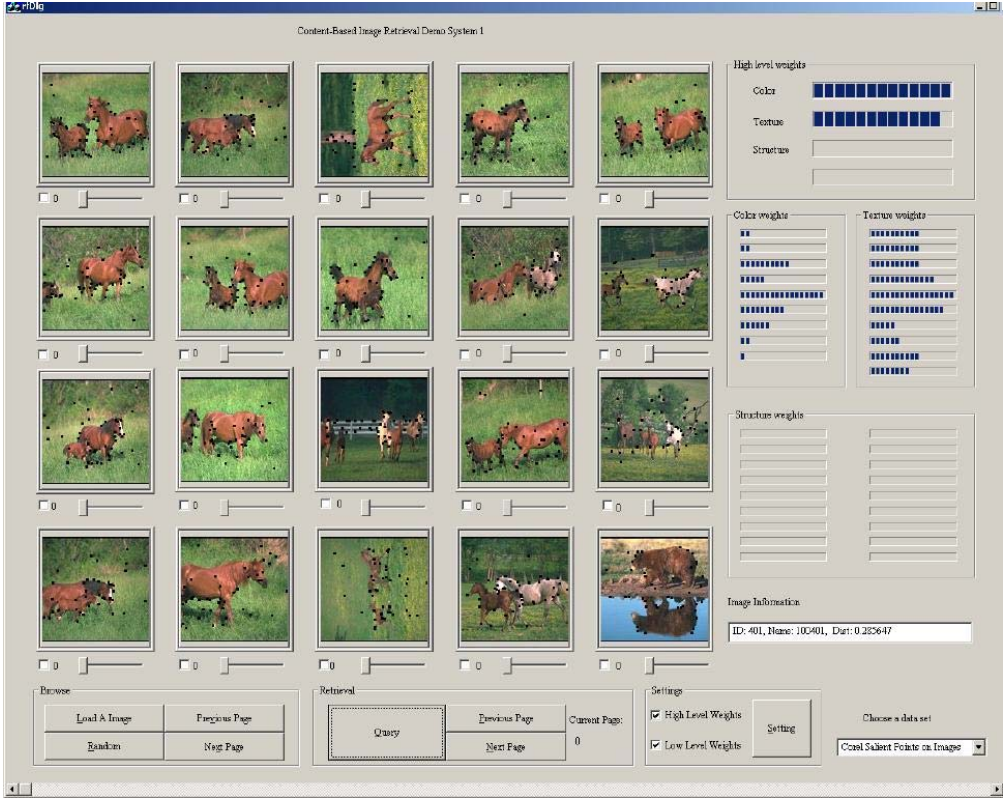
TEXT CATEGORIZATION



بازشناسی الگو

کاربرد در بازیابی تصویر

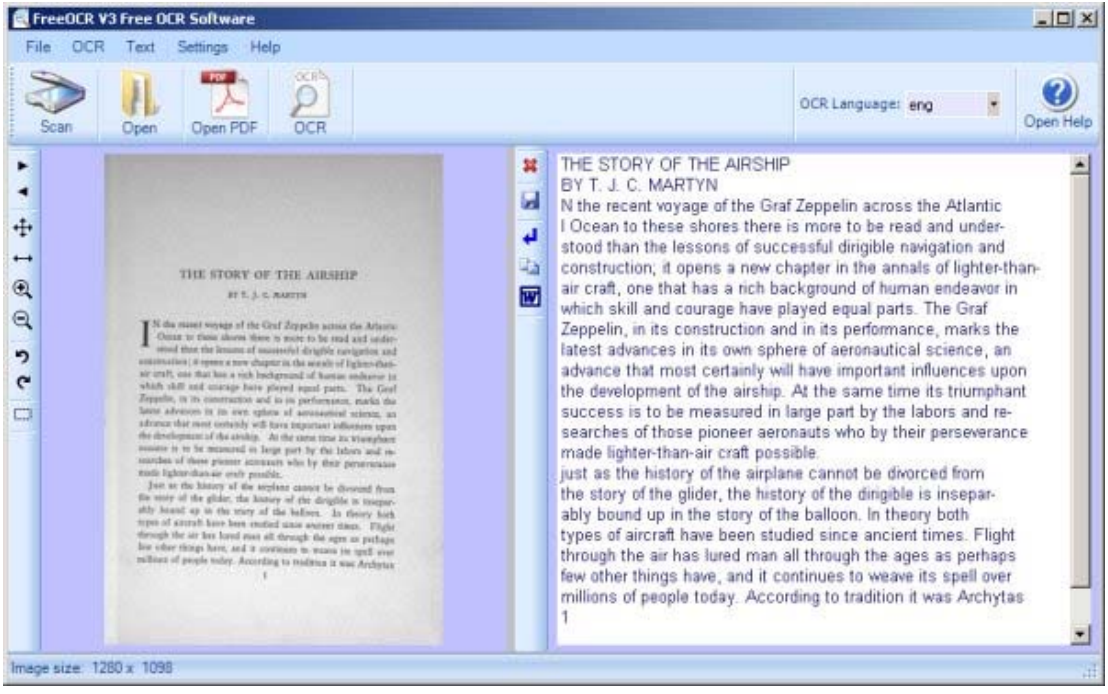
IMAGE RETRIEVAL



بازشناسی الگو

کاربرد در بازشناسی نوری کاراکترها

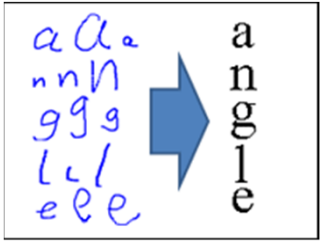
OPTICAL CHARACTER RECOGNITION (OCR)



بازشناسی الگو

کاربرد در بازشناسی دست‌نوشته

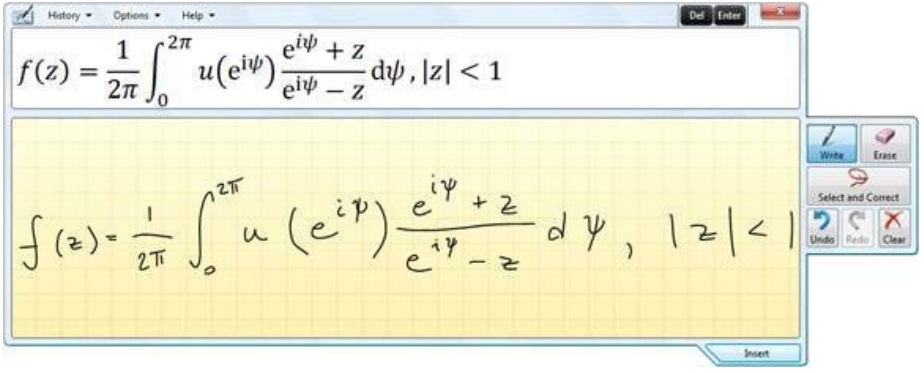
HANDWRITING RECOGNITION



بازشناسی الگو

کاربرد در بازشناسی فرمول

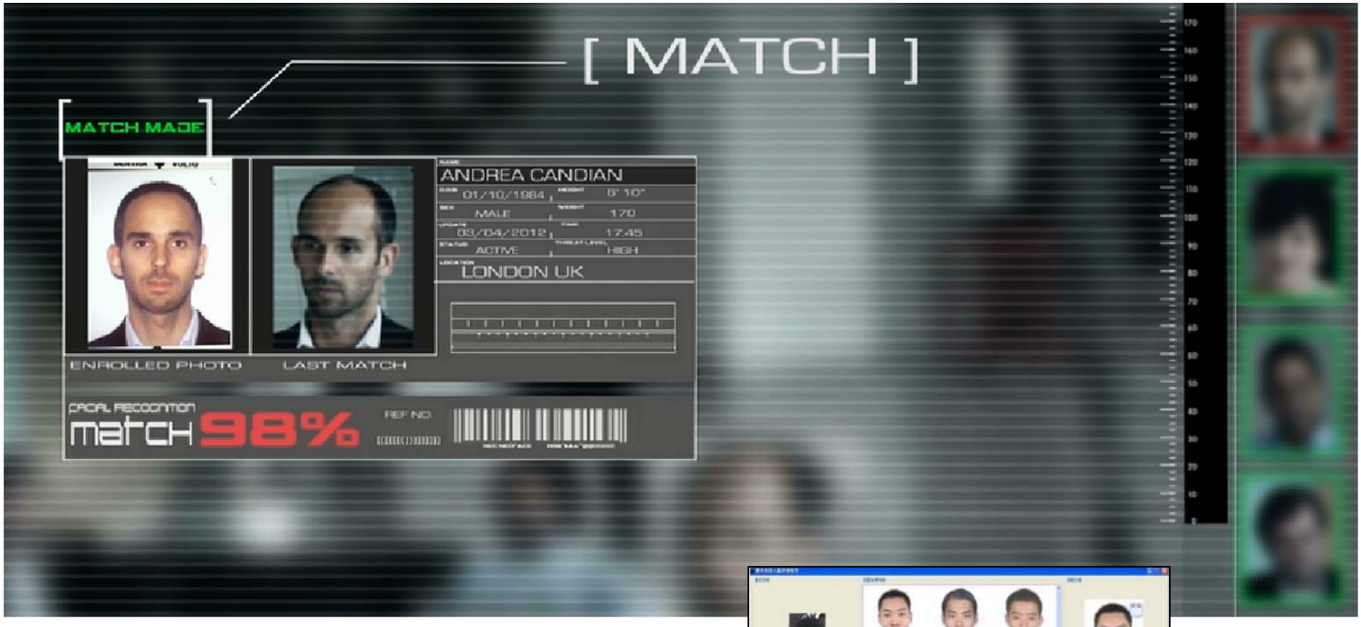
FORMULA RECOGNITION

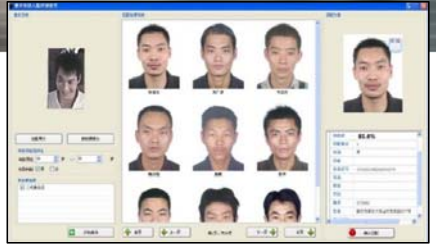


بازشناسی الگو

کاربرد در بازشناسی چهره

FACE RECOGNITION





بازشناسی الگو

کاربرد در بازشناسی حالت چهره

FACE EXPRESSION RECOGNITION

بازشناسی الگو

کاربرد در بازشناسی گفتار

SPEECH RECOGNITION

بازشناسی الگو

کاربرد در بازشناسی گوینده

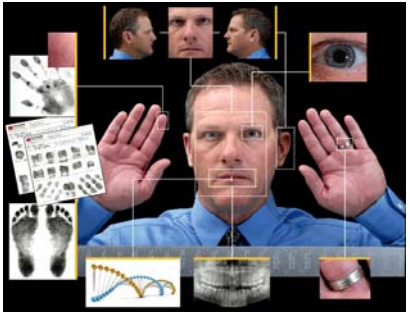
SPEAKER RECOGNITION

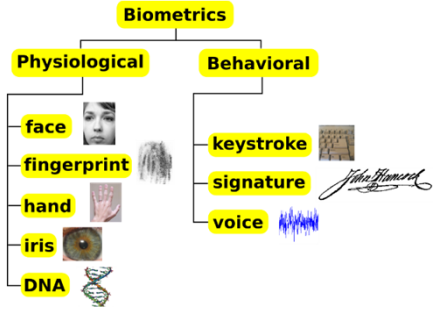
بازشناسی گوینده *Speaker Recognition*	
تصدیق هویت گوینده *Speaker Verification*	شناسایی هویت گوینده *Speaker Identification*

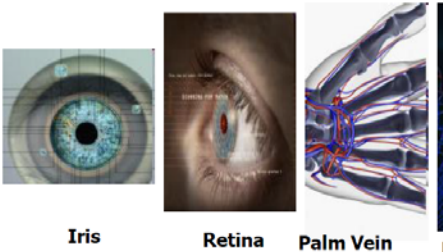
بازشناسی الگو

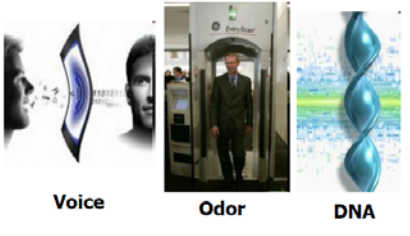
کاربرد در زیست‌سنجی (بیومتری)

BIOMETRICS





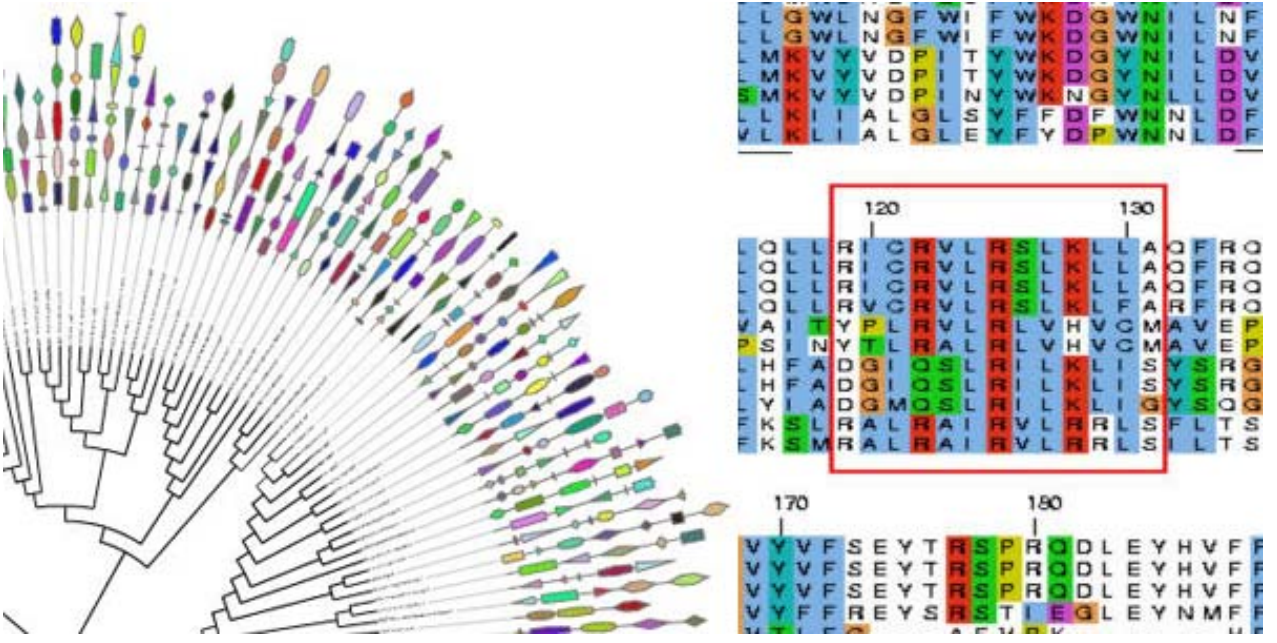




بازشناسی الگو

کاربرد در بیوانفورماتیک

BIOINFORMATICS



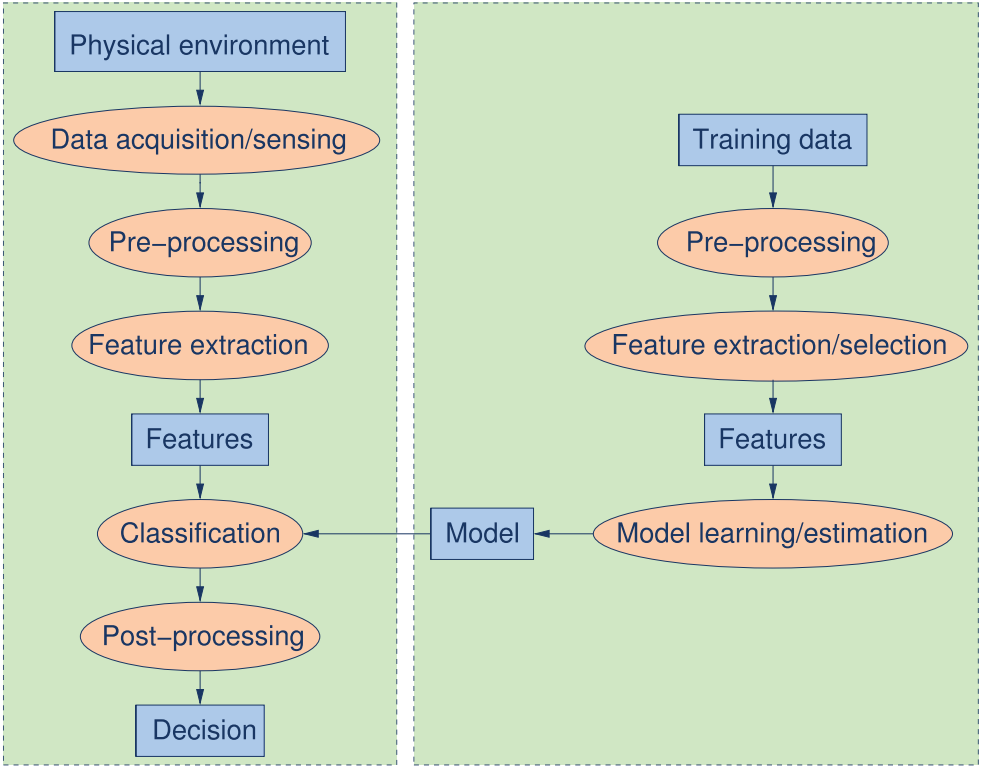
مقدمه

۳

سیستم بازشناسی الگو

سیستم بازشناسی الگو

PATTERN RECOGNITION SYSTEM



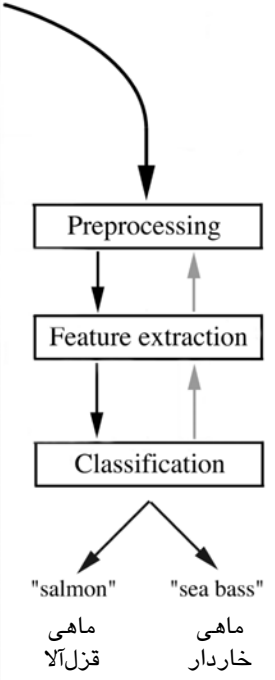
بازشناسی شیئ

مثال: طبقه‌بندی دو نوع ماهی

OBJECT RECOGNITION

اشیایی که باید طبقه‌بندی شوند، ابتدا توسط یک تراگذر (دوربین) **حس** می‌شوند و سیگنال‌های دریافتی **پیش‌پردازش** می‌شوند. سپس ویژگی‌ها استخراج می‌شوند و سرانجام طبقه‌بندی (دو نوع ماهی) انجام می‌شود.

جریان اصلی اطلاعات از مبدأ به سمت طبقه‌بندی کننده است (پیکان‌های سیاه) اما در برخی سیستم‌ها مراحل قبلی پردازش می‌توانند بر اساس مراحل بعدی پردازش تغییر پیدا کنند (پیکان‌های خاکستری).



From: Richard O. Duda, Peter E. Hart, and David G. Stork, Pattern Classification, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

بازشناسی شیئ

مثال: طبقه‌بندی دو نوع ماهی (استخراج ویژگی: طول ماهی)

OBJECT RECOGNITION

طول تعدادی از دو نوع ماهی را محاسبه و ثبت می‌کنیم.

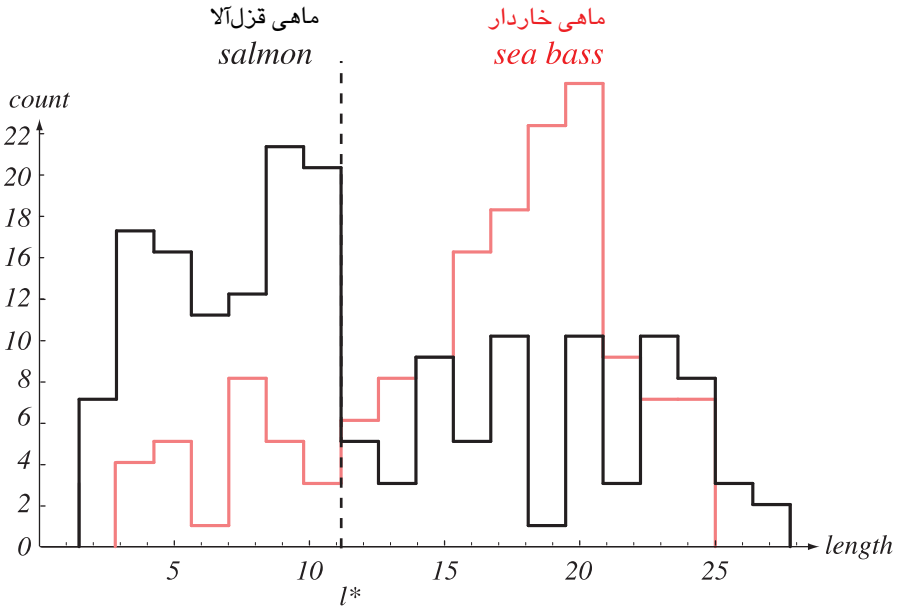
به طور متوسط، طول ماهی خاردار، از ماهی قزل‌آلا بیشتر است، اما همیشه این‌گونه نیست.

در شکل، هیستوگرام ویژگی طول برای هر دو دسته رسم شده است.

یک آستانه‌ی واحد برای مقدار طول که بتواند بدون ابهام دو دسته را از هم تفکیک کند، وجود ندارد.

با استفاده از طول به‌عنوان تنها ویژگی، مقداری خطا خواهیم داشت.

مقدار l^* حداقل مقدار خطا به‌طور متوسط را ایجاد می‌کند.



From: Richard O. Duda, Peter E. Hart, and David G. Stork, Pattern Classification, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

بازشناسی شیئ

مثال: طبقه‌بندی دو نوع ماهی (استخراج ویژگی: وزن ماهی)

OBJECT RECOGNITION

وزن تعدادی از دو نوع ماهی را محاسبه و ثبت می‌کنیم.

به طور متوسط، سبُکی ماهی خاردار، از ماهی قزل‌آلا بیشتر است، اما همیشه این‌گونه نیست.

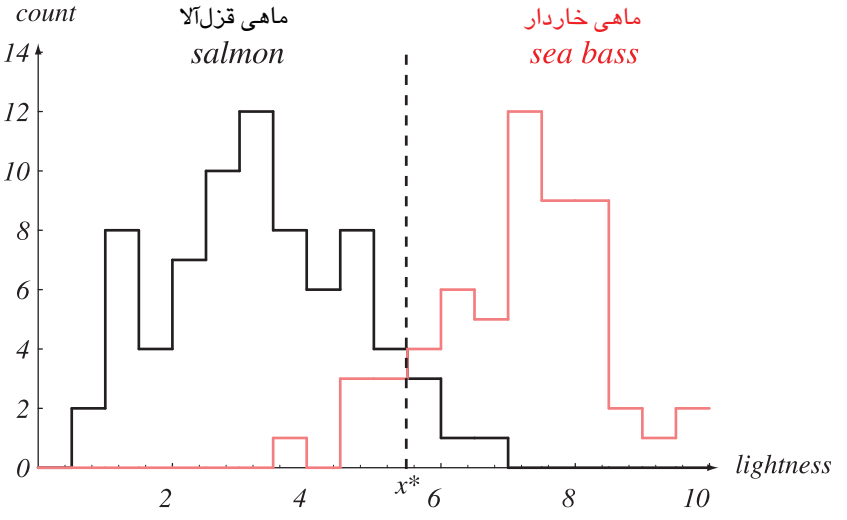
اما همپوشانی مقادیر وزن این دو نوع ماهی از همپوشانی طول آنها کمتر است (⇐ وزن: ویژگی بهتر)

در شکل، هیستوگرام ویژگی وزن برای هر دو دسته رسم شده است.

یک آستانه‌ی واحد برای مقدار وزن که بتواند بدون ابهام دو دسته را از هم تفکیک کند، وجود ندارد.

با استفاده از وزن به‌عنوان تنها ویژگی، مقداری خطا خواهیم داشت.

مقدار x^* حداقل مقدار خطا به‌طور متوسط را ایجاد می‌کند.



From: Richard O. Duda, Peter E. Hart, and David G. Stork, Pattern Classification, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

بازشناسی شیئ

مثال: طبقه‌بندی دو نوع ماهی (استخراج ویژگی: طول و وزن ماهی)

OBJECT RECOGNITION

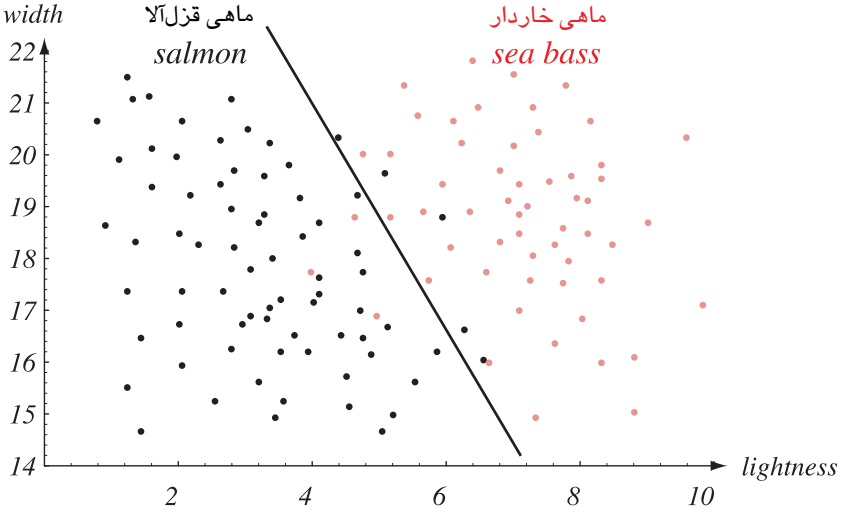
بهتر است از بیش از یک ویژگی استفاده کنیم.

فضای الگوها با استفاده از تعداد بیشتری ویژگی، بیشتر تفکیک می‌شود.

در این مثال،
از دو ویژگی وزن x_1 و طول x_2 دو نوع ماهی استفاده می‌کنیم. ⇐
فضای ویژگی دوبعدی ⇐
بردار ویژگی دوبعدی

خط سیاه:
مرز تصمیم برای طبقه‌بندی کننده

خطای کلی طبقه‌بندی بر روی این داده‌ها، کمتر از زمانی است که فقط از یک ویژگی استفاده می‌شود، اما هنوز مقداری خطا وجود دارد.



$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

From: Richard O. Duda, Peter E. Hart, and David G. Stork, Pattern Classification, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

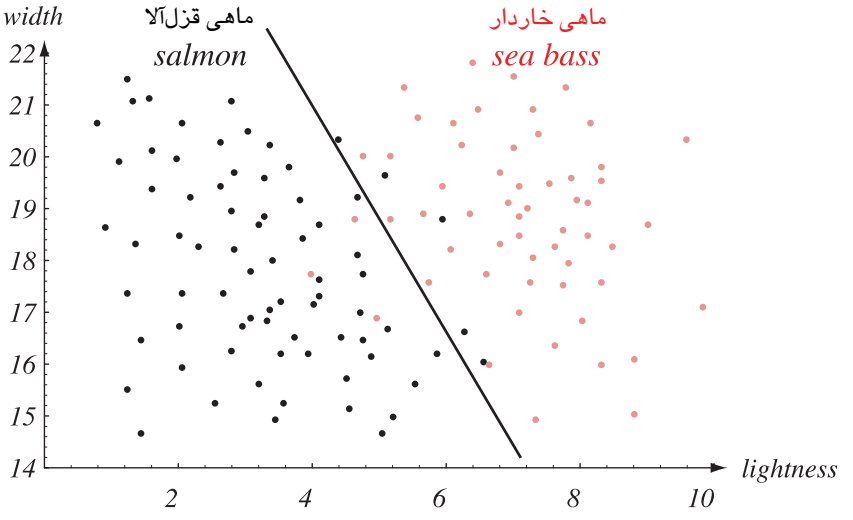
بازشناسی شیئ

مثال: طبقه‌بندی دو نوع ماهی (استخراج ویژگی: تعداد ویژگی؟)

OBJECT RECOGNITION

می‌توان از بیش از دو ویژگی هم استفاده کرد
(مثلاً نسبت طول به عرض ماهی / تعداد باله‌های ماهی / ...).

- تعداد ویژگی لازم؟
- خوب بودن یک ویژگی؟
- ویژگی‌های همبسته؟



- هر چه استخراج یک ویژگی ساده‌تر باشد، بهتر است.
- هر چه یک ویژگی قدرت تفکیک بالاتری داشته باشد، بهتر است.
- هر چه افزونگی ویژگی‌ها پایین‌تر باشد، بهتر است.
- هر چه تعداد کل ویژگی‌ها کمتر باشد، بهتر است.
- هر چه پردازش یک ویژگی ساده‌تر باشد، بهتر است.

From: Richard O. Duda, Peter E. Hart, and David G. Stork, Pattern Classification, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

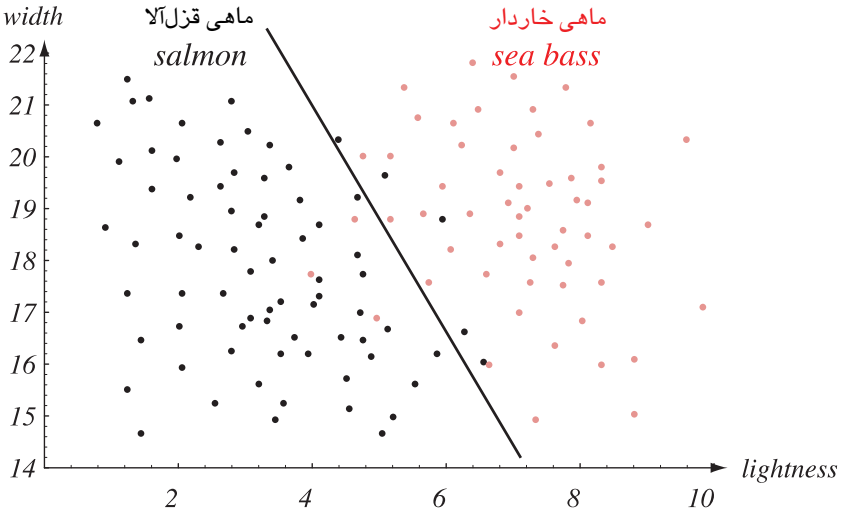
بازشناسی شیئ

مثال: طبقه‌بندی دو نوع ماهی (مرز تصمیم ساده)

OBJECT RECOGNITION

مرز تصمیم ساده = **مرز خطی** ⇐

- دسته‌بندی نادرست برخی نمونه‌ها
- واریانس بالا
- تعمیم‌پذیری بالا



From: Richard O. Duda, Peter E. Hart, and David G. Stork, Pattern Classification, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

بازشناسی شیئ

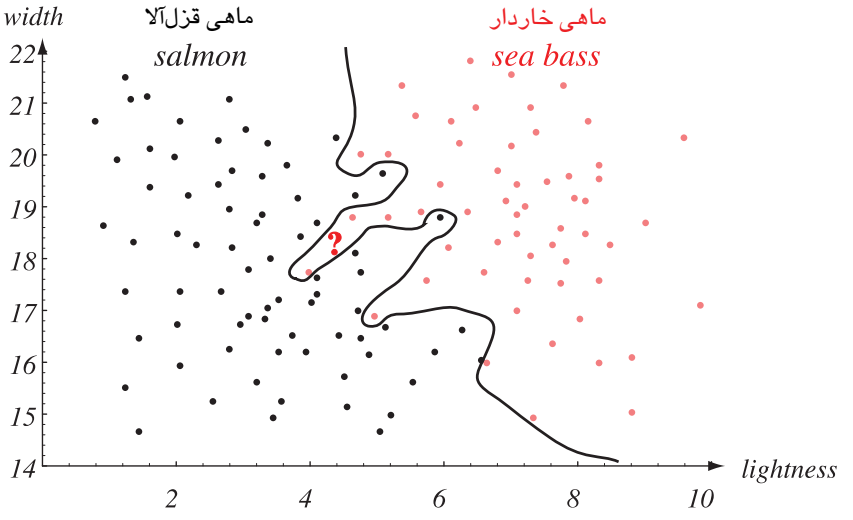
مثال: طبقه‌بندی دو نوع ماهی (مرز تصمیم پیچیده)

OBJECT RECOGNITION

مرز تصمیم خیلی پیچیده ⇐

- دسته‌بندی درست تمام (اغلب) نمونه‌ها
- بایاس بالا (حساسیت به تغییر داده‌ها)
- تعمیم‌پذیری پایین

مدل‌های خیلی پیچیده برای ماهی، به مرزهای تصمیمی منجر می‌شوند که پیچیده هستند.
با وجود اینکه چنین مرز تصمیمی می‌تواند به طبقه‌بندی کامل نمونه‌های آموزشی ما منجر شود، اما برای الگوهای آینده کارایی ضعیفی خواهد داشت (تعمیم‌پذیری پایین):
نمونه‌ی آزمایشی جدید که با ? نشان داده شده است، اتفاقاً بیشتر شبیه قزل‌آلا است اما مرز تصمیم پیچیده باعث شده است که در دسته‌ی ماهی‌های خاردار قرار گیرد.



From: Richard O. Duda, Peter E. Hart, and David G. Stork, Pattern Classification, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

بازشناسی شیئ

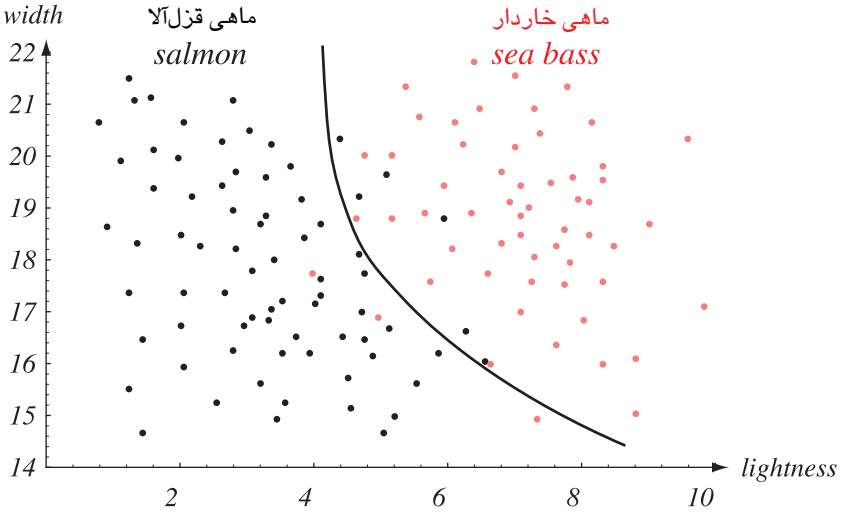
مثال: طبقه‌بندی دو نوع ماهی (مرز تصمیم نه‌چندان پیچیده)

OBJECT RECOGNITION

مرز تصمیم نه چندان پیچیده ⇐

- دسته‌بندی درست تمام (اغلب) نمونه‌ها
- بده‌بستان میان **بایاس** و **واریانس**
- تعمیم‌پذیری بالا

مرز تصمیم نشان‌داده‌شده، می‌تواند یک بده‌بستان بهینه بین کارآیی روی داده‌های مجموعه‌ی آموزشی و سادگی طبقه‌بندی‌کننده باشد، که از این طریق بالاترین دقت روی الگوهای جدید حاصل می‌شود.



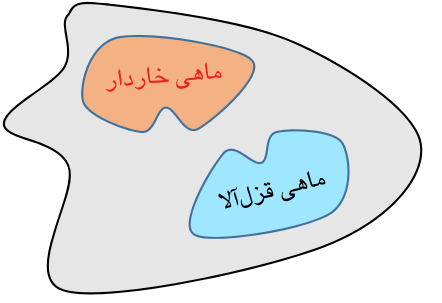
From: Richard O. Duda, Peter E. Hart, and David G. Stork, Pattern Classification, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

بازشناسی شیئ

مثال: طبقه‌بندی دو نوع ماهی (فضای الگو)

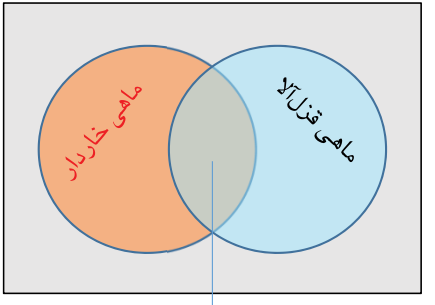
OBJECT RECOGNITION

فضای الگو ایده‌آل
Ideal Pattern Space



فضای الگوی رئال
Real Pattern Space

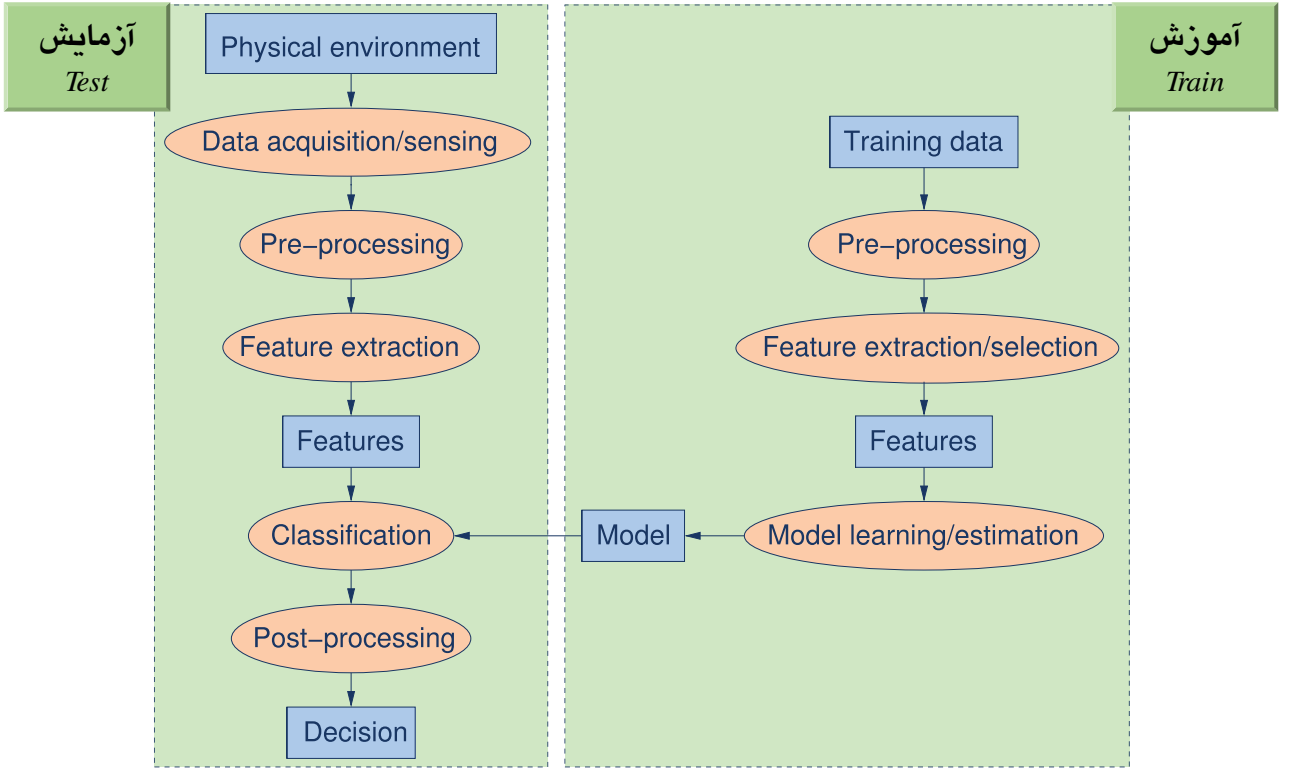
حاصل از ویژگی‌های استخراج‌شده



خطای طبقه‌بندی

سیستم بازشناسی الگو

PATTERN RECOGNITION SYSTEM



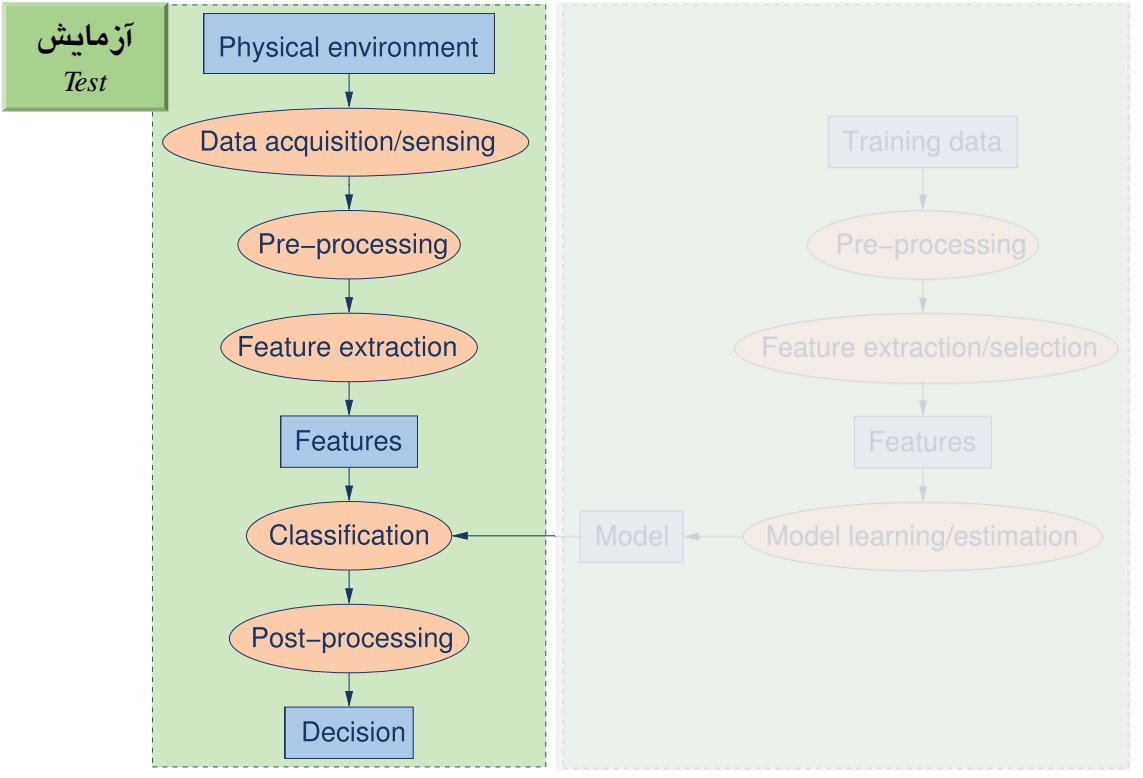
استفاده از مدل آموزش‌یافته

ساخت مدل در مرحله‌ی آموزش بر اساس داده‌های آموزشی

سیستم بازشناسی الگو

زیرسیستم تصمیم‌گیری

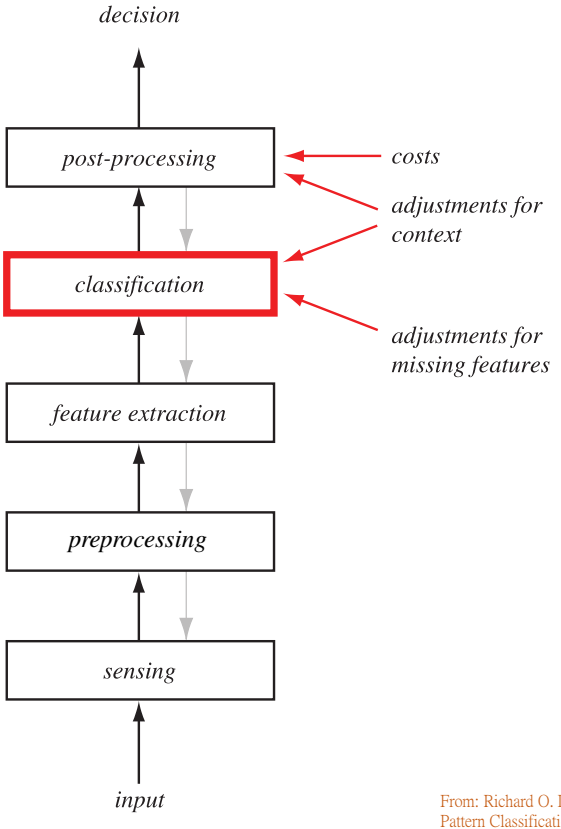
PATTERN RECOGNITION SYSTEM



استفاده از مدل آموزش‌یافته

سیستم بازشناسی الگو

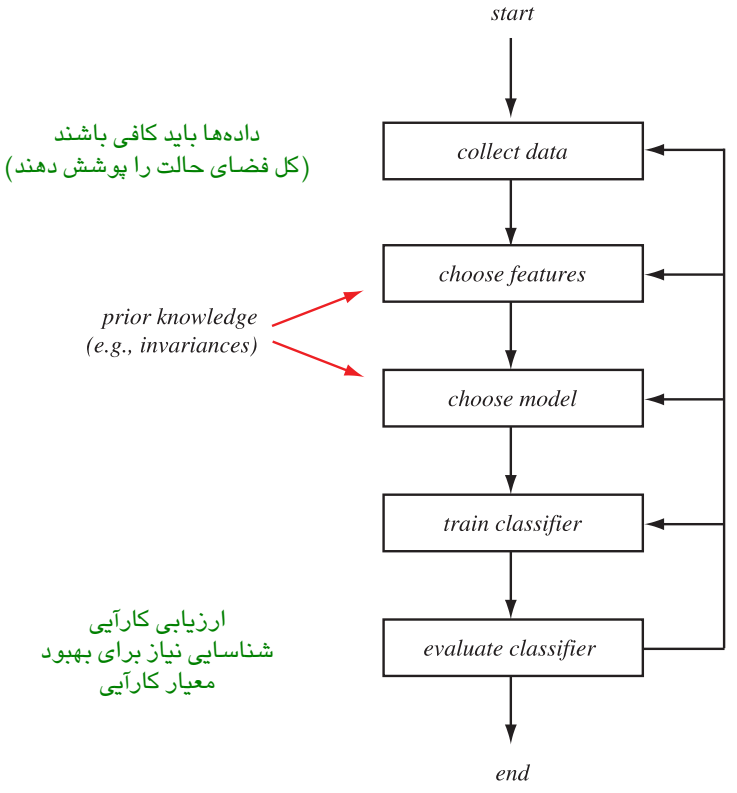
فرآیند بازشناسی



From: Richard O. Duda, Peter E. Hart, and David G. Stork, Pattern Classification, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

چرخه‌ی طراحی سیستم بازشناسی الگو

PATTERN RECOGNITION SYSTEM: THE DESIGN CYCLE



From: Richard O. Duda, Peter E. Hart, and David G. Stork, Pattern Classification, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

مقدمه

۴

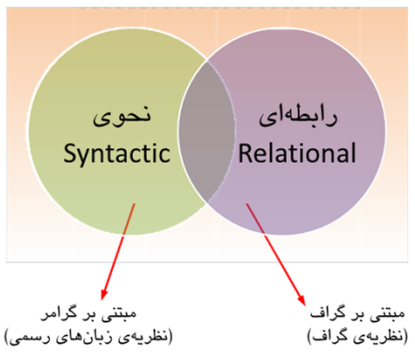
روی‌کردها در بازشناسی الگو

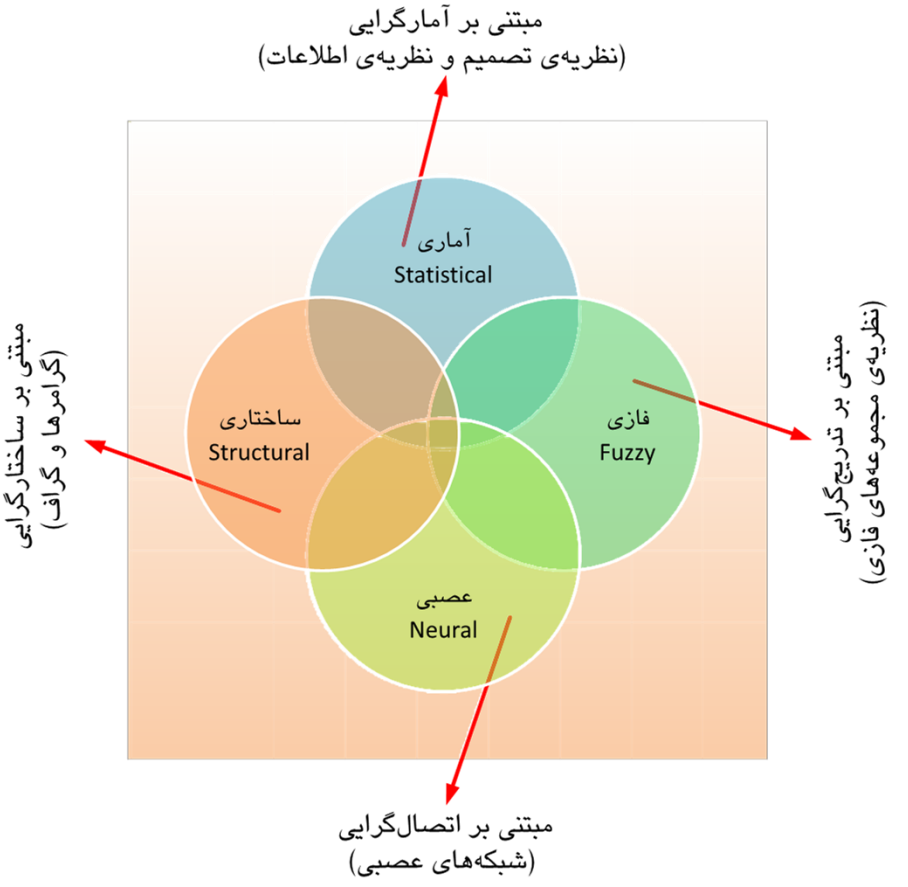
چیدمان الگوها

PATTERN ARRANGEMENTS

روی‌کردهای بازشناسی الگو

APPROACHES



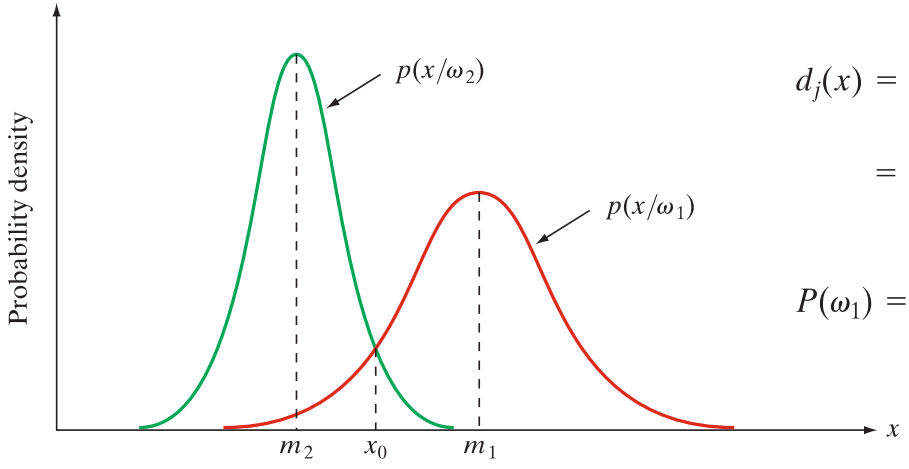


رویکردهای بازشناسی الگو

رویکرد آماری

STATISTICAL PATTERN RECOGNITION

استفاده از خصوصیت‌های آماری الگوها برای بازشناسی



$$d_j(x) = p(x/\omega_j)P(\omega_j)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} e^{-\frac{(x-m_j)^2}{2\sigma_j^2}} P(\omega_j) \qquad j = 1, 2$$

$$P(\omega_1) = P(\omega_2) = 1/2$$

$$d_1(x_0) = d_2(x_0)$$

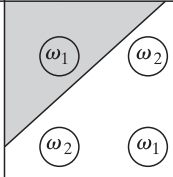
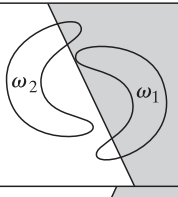
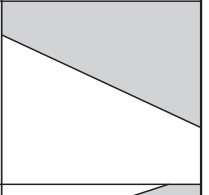
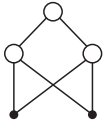
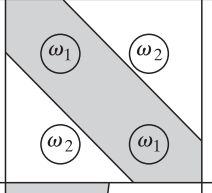
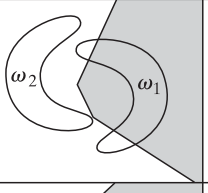
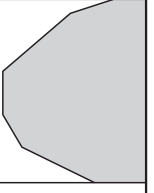
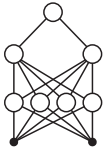
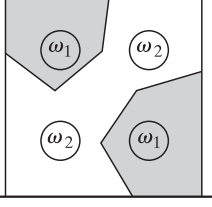
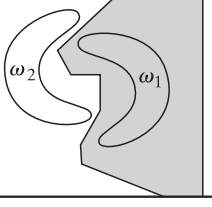
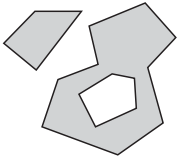
$$p(x_0/\omega_1) = p(x_0/\omega_2)$$

روی‌کردهای بازشناسی الگو

روی‌کرد عصبی

NEURAL PATTERN RECOGNITION

استفاده از شبکه‌های عصبی برای بازشناسی الگوها

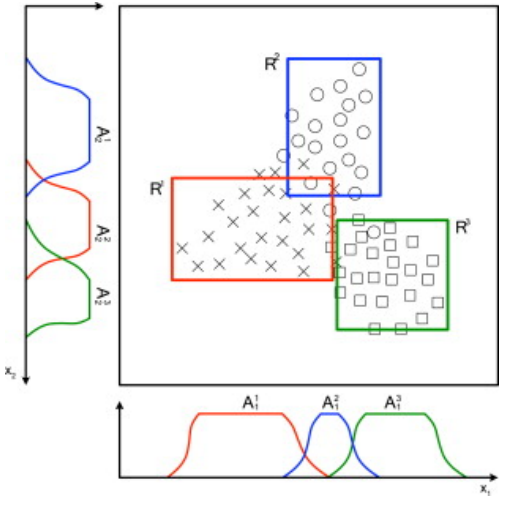
Network structure	Type of decision region	Solution to exclusive-OR problem	Classes with meshed regions	Most general decision surface shapes
Single layer	Single hyperplane			
Two layers 	Open or closed convex regions			
Three layers 	Arbitrary (complexity limited by the number of nodes)			

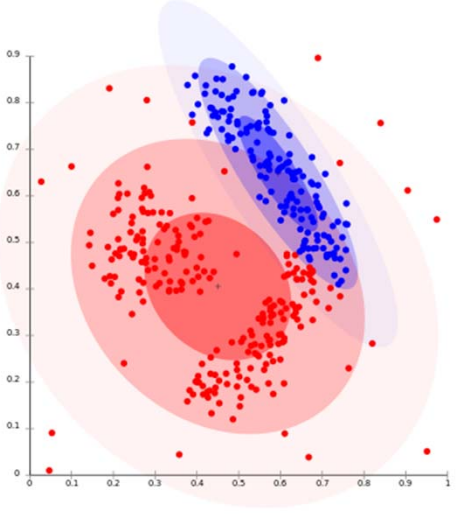
روی‌کردهای بازشناسی الگو

روی‌کرد فازی

FUZZY PATTERN RECOGNITION

استفاده از مجموعه‌ها و سیستم‌های فازی برای بازشناسی الگوها



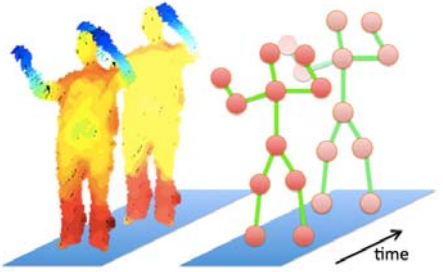


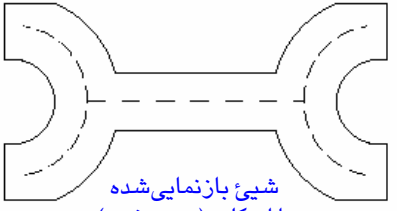
روی‌کردهای بازشناسی الگو

روی‌کرد ساختاری

STRUCTURAL PATTERN RECOGNITION

استفاده از روابط ساختاری ذاتی در پدیده‌ها برای بازشناسی الگوها



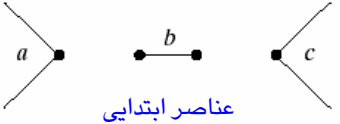


شیئ بازنمایی‌شده
با اسکلت (هرس‌شده)

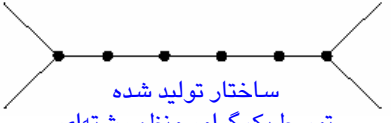
چیدمان الگوها
Pattern Arrangements

گراف *Graph*	**درخت** *Tree*	**رشته** *String*

برای
توصیف‌های ساختاری



عناصر ابتدایی



ساختار تولید شده
توسط یک گرامر منظم رشته‌ای

بازشناسی الگو

مقدمه

۵

یادگیری ماشینی

یادگیری ماشینی

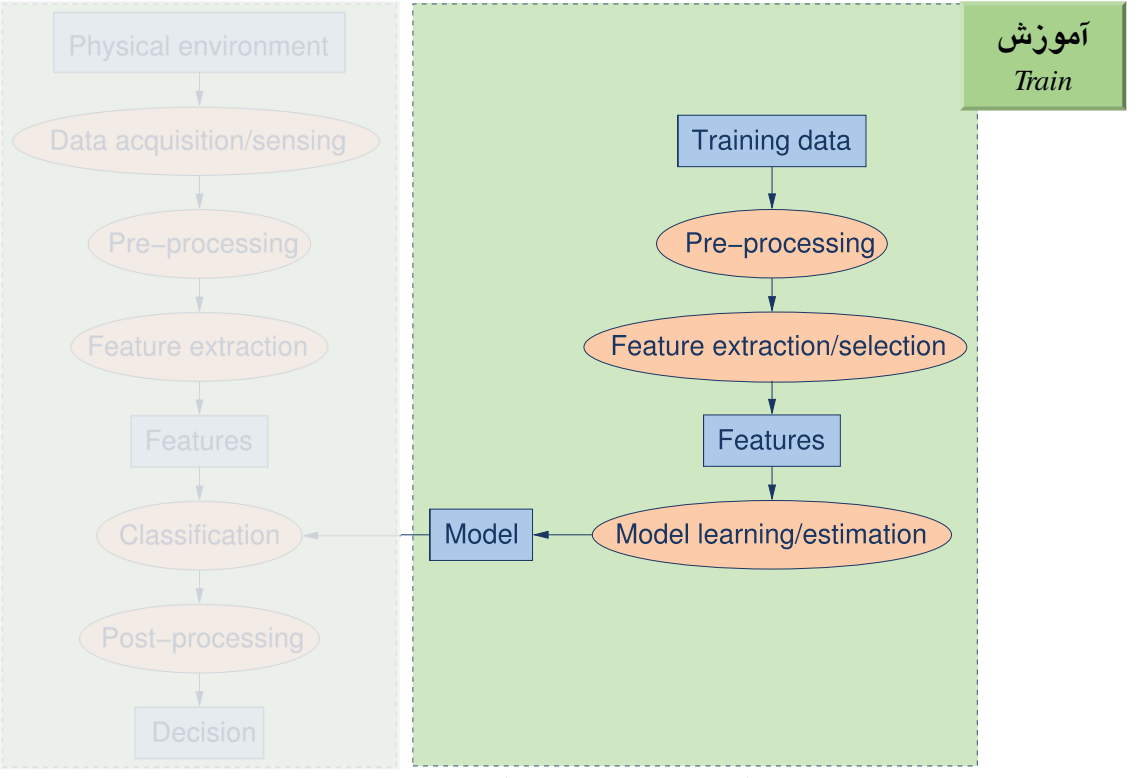
MACHINE LEARNING

هدف:
یادگیری مدل مورد استفاده برای تصمیم‌گیری

سیستم بازشناسی الگو

زیرسیستم یادگیری

PATTERN RECOGNITION SYSTEM



ساخت مدل در مرحله‌ی آموزش بر اساس داده‌های آموزشی

صورت‌های یادگیری

FORMS OF LEARNING

صورت‌های یادگیری					
یادگیری استنباطی *Deductive Learning*	**یادگیری استقرائی** *Inductive Learning*				
یادگیری کل به جزء	**یادگیری جزء به کل**				
یادگیری تحلیلی *Analytical Learning*	یادگیری یک تابع یا قاعده‌ی عمومی (درست/نادرست) از روی جفت‌های خاص ورودی ـ خروجی				
حرکت از یک قاعده‌ی عمومی شناخته‌شده به قاعده‌ی جدیدی که منطقاً استلزام می‌شود. (مفید است، زیرا امکان پردازش کارآمدتر را فراهم می‌کند.)	**یادگیری نیمه‌نظارتی** *Semisupervised*	**یادگیری تقویتی** *Reinforcement*	**یادگیری بی‌نظارت** *Unsupervised*	**یادگیری بانظارت** *Supervised*	
	یادگیری با وجود تعداد کمی مثال برچسب‌دار و مجموعه‌ی بزرگی از داده‌های بی‌برچسب	یادگیری از روی یک سری تقویت‌ها (پاداش‌ها و جریمه‌ها)	یادگیری الگوهای درون ورودی بدون وجود فیدبک صریح (مثل clustering)	یادگیری نگاشت ورودی به خروجی با دیدن مثال‌های برچسب‌دار	
	تقسیم‌بندی بر اساس **نوع فیدبک** موجود برای یادگیری				
	سه نوع اصلی یادگیری				

یادگیری استقرائی

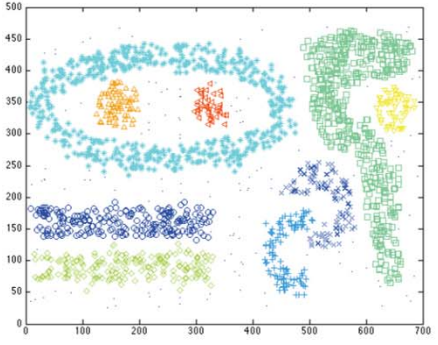
INDUCTIVE LEARNING

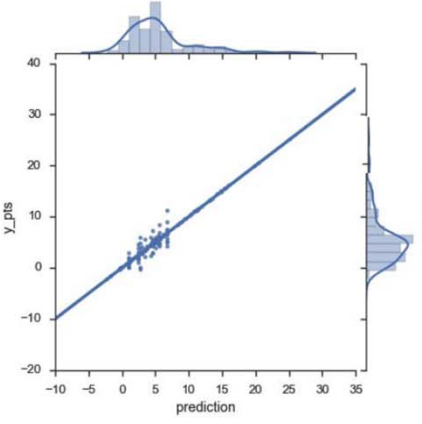
یادگیری استقرائی *Inductive Learning*			
یادگیری جزء به کل			
یادگیری یک تابع یا قاعده‌ی عمومی (درست/نادرست) از روی جفت‌های خاص ورودی ـ خروجی			
یادگیری بانظارت *Supervised*	**یادگیری بی‌نظارت** *Unsupervised*	**یادگیری تقویتی** *Reinforcement*	**یادگیری نیمه‌نظارتی** *Semisupervised*

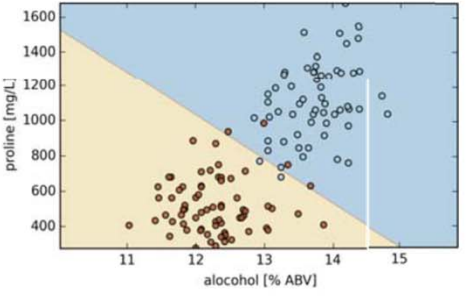
یادگیری با نظارت / یادگیری بی‌نظارت

طبقه‌بندی / رگرسیون / خوشه‌بندی

یادگیری بی‌نظارت *Unsupervised*	یادگیری بانظارت *Supervised*	
خوشه‌بندی *Clustering*	**رگرسیون** *Regression*	**طبقه‌بندی** *Classification*







$\{\mathbf{x}^i\}_{i=1}^N$ $\{(\mathbf{x}^i, y^i)\}_{i=1}^N$ $\{(\mathbf{x}^i, \omega^i)\}_{i=1}^N$

یادگیری بانظارت

SUPERVISED LEARNING

یادگیری بانظارت
Supervised Learning

یک **مجموعه‌ی آموزشی** از N جفت ورودی–خروجی نمونه داده شده است:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \ldots, (x_N, y_N)$$

که در آن هر y_j به‌وسیله‌ی یک تابع مجهول f تولید شده است:

$$y = f(x)$$

یک تابع h را کشف کنید که تابع واقعی f را تقریب بزند.

یادگیری بانظارت

مفاهیم کلیدی

SUPERVISED LEARNING

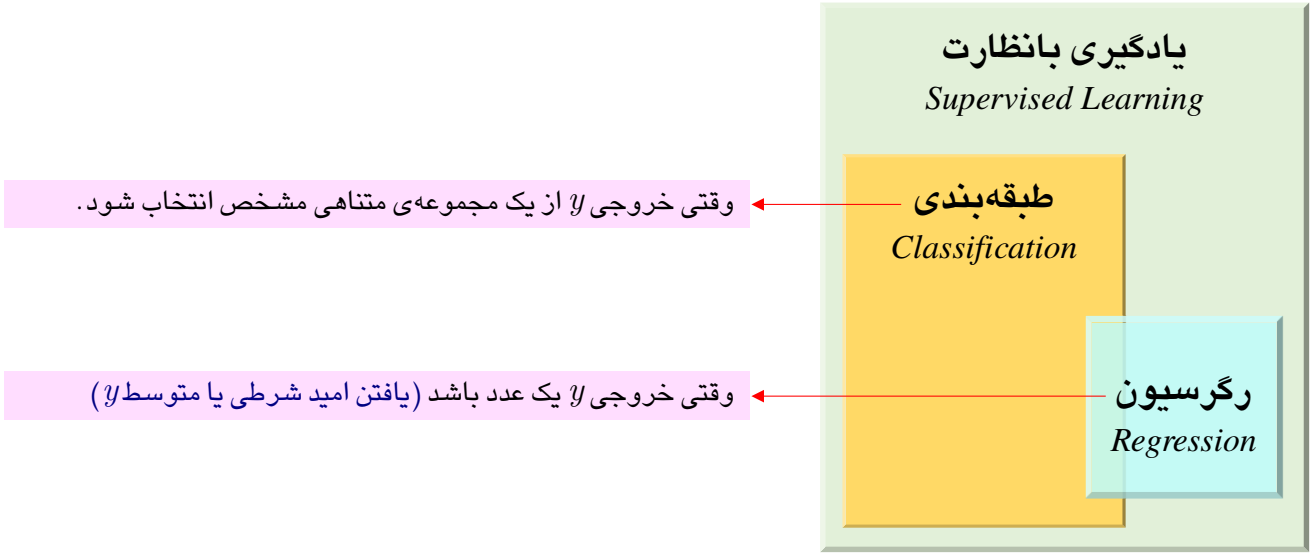
یادگیری بانظارت *Supervised Learning*	
مجموعه‌ی آموزشی *Training Set*	مجموعه‌ی جفت‌های ورودی–خروجی معلوم برای آموزش یادگیرنده
مجموعه‌ی آزمایشی *Test Set*	مجموعه‌ی جفت‌های ورودی–خروجی معلوم برای آزمایش یادگیرنده
هدف *Target*	تابع f که باید یاد گرفته شود
فرضیه *Hypothesis*	تابع مجهول h که باید تقریب مناسبی برای f باشد
فضای فرضیه *Hypothesis Space*	مجموعه‌ی همه‌ی توابع منتخب h برای تقریب f

$\mathcal{H}$

یادگیری بانظارت

طبقه‌بندی و رگرسیون

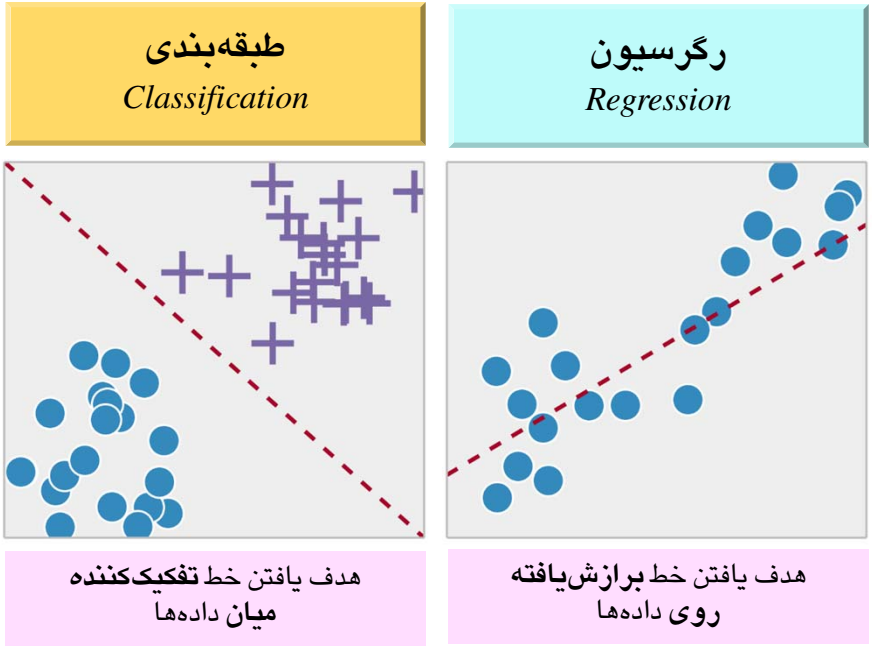
SUPERVISED LEARNING



یادگیری بانظارت

طبقه‌بندی و رگرسیون

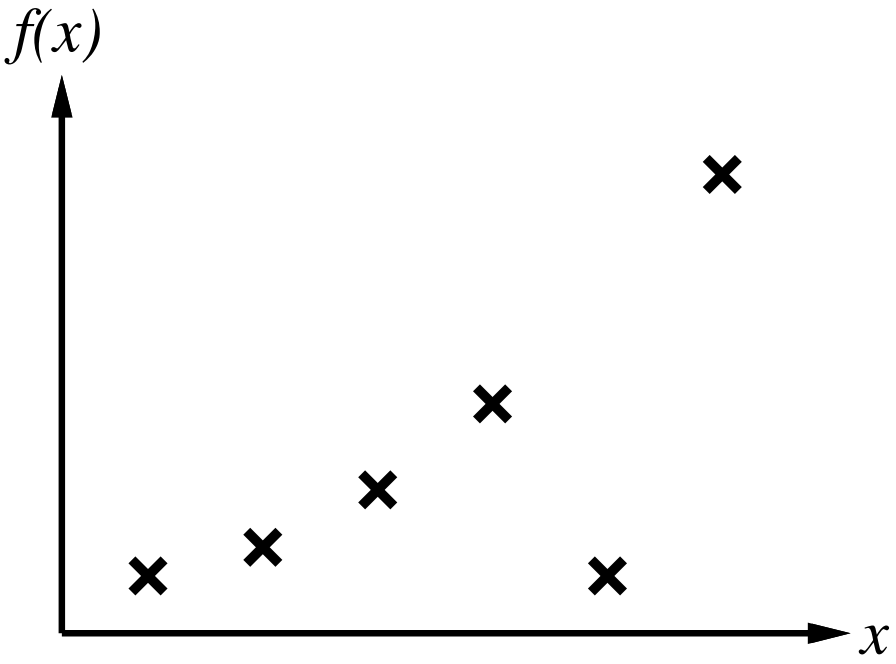
SUPERVISED LEARNING



روش یادگیری بانظارت

رگرسیون: مثال: برازش منحنی (۱ از ۵)

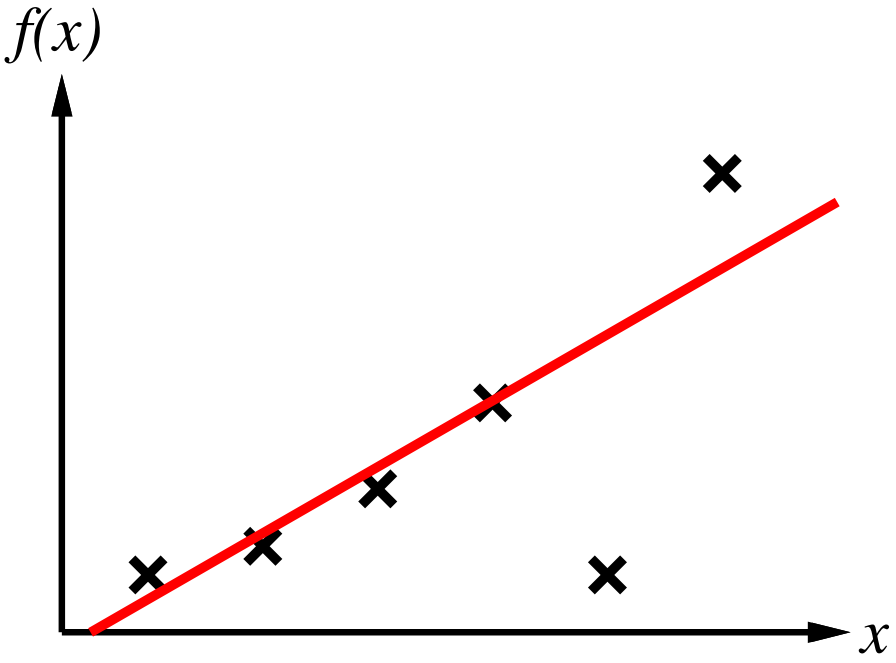
SUPERVISED LEARNING METHOD



روش یادگیری بانظارت

رگرسیون: مثال: برازش منحنی (۲ از ۵)

SUPERVISED LEARNING METHOD

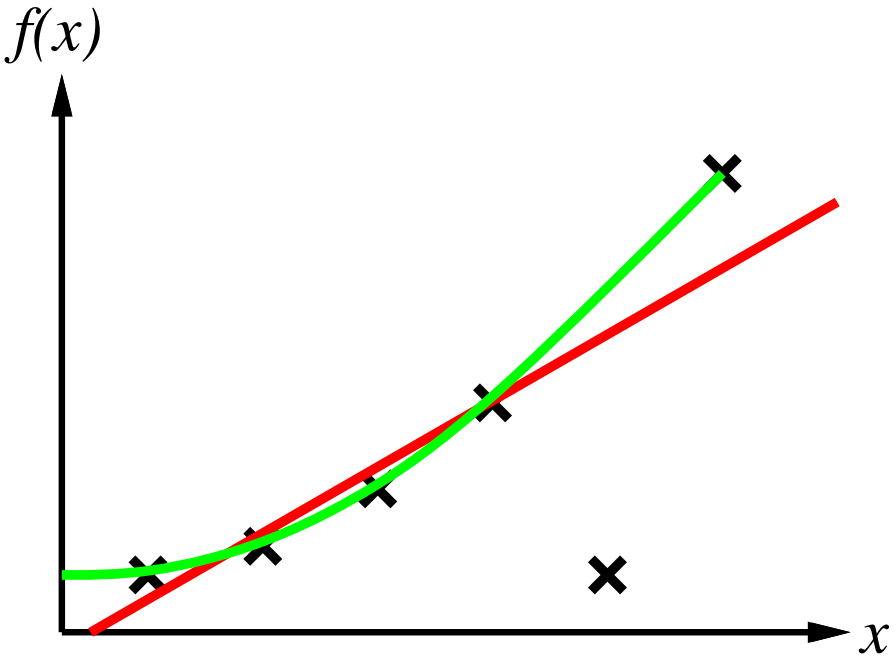


فرضیه بسیار ساده (چندجمله‌ای خطی)، ناسازگار، تعمیم‌پذیری خوب

روش یادگیری استقرائی

رگرسیون: مثال: برازش منحنی (۳ از ۵)

SUPERVISED LEARNING METHOD

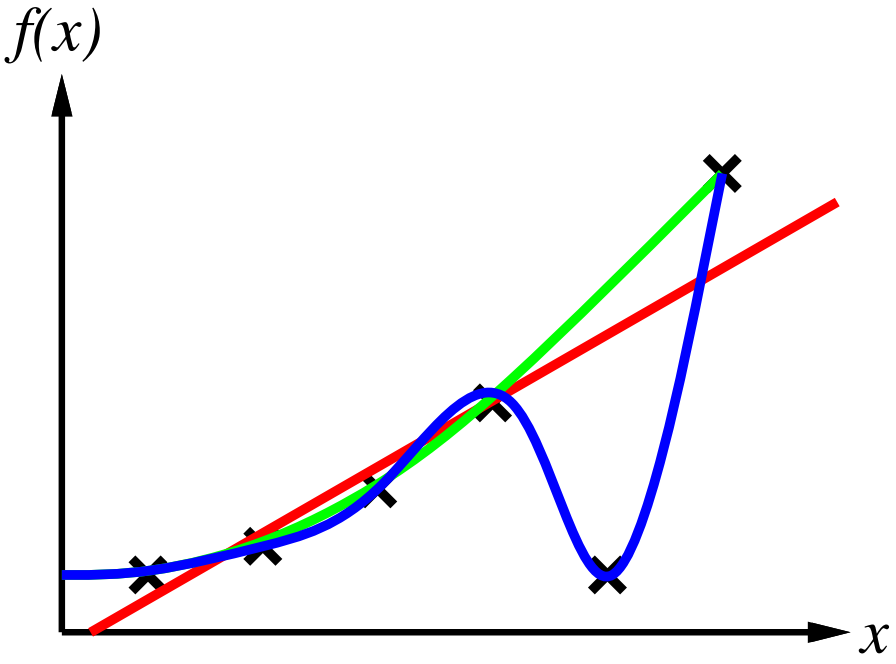


فرضیه ساده (چندجمله‌ای درجه‌دوم)، ناسازگار، تعمیم‌پذیری خوب

روش یادگیری بانظارت

رگرسیون: مثال: برازش منحنی (۴ از ۵)

SUPERVISED LEARNING METHOD

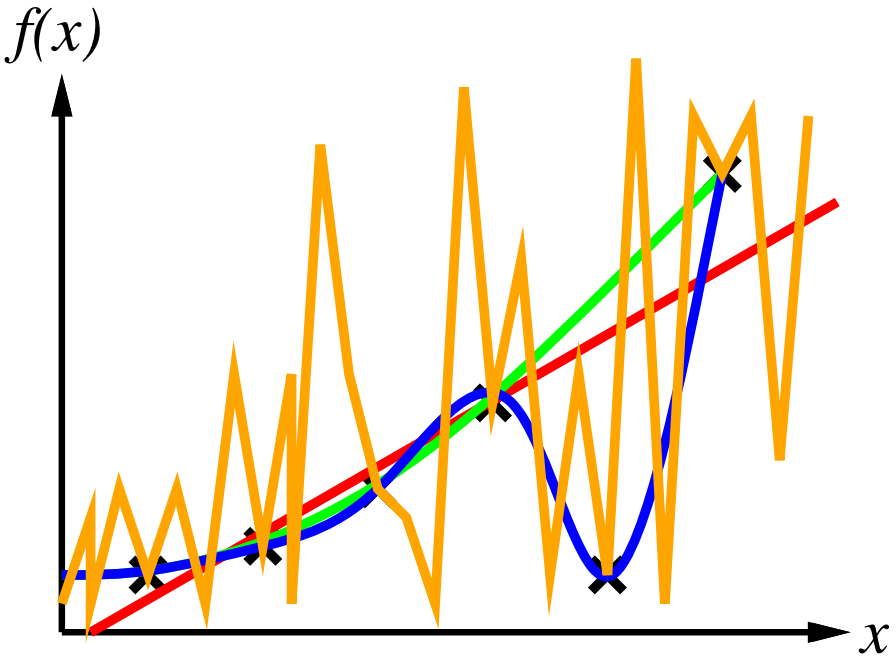


فرضیه پیچیده (چندجمله‌ای درجه بالا)، سازگار، تعمیم‌پذیری متوسط

روش یادگیری بانظارت

رگرسیون: مثال: برازش منحنی (۵ از ۵)

SUPERVISED LEARNING METHOD



فرضیه بسیار پیچیده (چندجمله‌ای با درجه‌ی بسیار بالا)، سازگار، تعمیم‌پذیری پایین

یادگیری بانظارت

سازگاری و تعمیم

سازگاری *Consistency*	تعمیم *Generalization*
یک فرضیه سازگار است اگر بر روی همه‌ی نمونه‌های آموزشی درست باشد.	یک فرضیه تعمیم‌پذیر است اگر مقادیر خروجی نمونه‌های جدید را به‌درستی پیش‌بینی کند.

بده‌بستان میان **سازگاری ـ تعمیم‌پذیری:**
فرضیه‌های پیچیده با سازگاری کامل و فرضیه‌های ساده‌تر با تعمیم‌پذیری بالاتر

بده‌بستان میان **رسایی ـ پیچیدگی:**
رسایی یک فضای فرضیه و **پیچیدگی** یافتن یک فرضیه‌ی خوب در آن فضا

تیغه‌ی اوخامی

کدام مدل بهتر است؟

OCKHAM'S RAZOR

یک مسئله‌ی بنیادی در یادگیری استقرائی:

چگونه بین چند فرضیه‌ی سازگار یکی را انتخاب کنیم؟

ترجیح با **ساده‌ترین فرضیه‌ی سازگار با داده‌ها** است.

تیغه‌ی اوخامی
Ockham's Razor

بهترین مدل برای هر پدیده، ساده‌ترین مدل توصیف‌کننده‌ی آن است.

«به نام ویلیام اوخامی فیلسوف انگلیسی قرن 14 میلادی»

یادگیری بانظارت

محتمل‌ترین فرضیه برای داده‌های موجود

یادگیری بانظارت، با انتخاب فرضیه‌ی h^* انجام می‌شود:

محتمل‌ترین فرضیه با داشتن داده‌ها

$$h^* = \underset{h \in \mathcal{H}}{\operatorname{argmax}} P(h|data)$$

عبارت معادل از طریق قاعده‌ی بیز

$$h^* = \underset{h \in \mathcal{H}}{\operatorname{argmax}} P(data|h)\, P(h)$$

مقدمه

۶

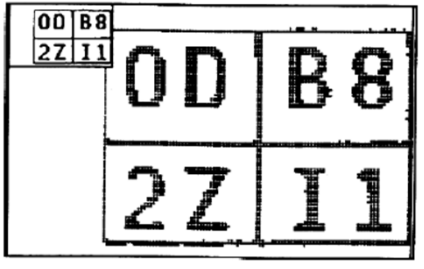
چالش‌ها و ارزیابی

چالش گوناگونی

VARIABILITY CHALLENGE

گوناگونی *Variability*	
گوناگونی درون–طبقه‌ای *Intra-Class Variability*	**گوناگونی میان–طبقه‌ای** *Inter-Class Variability*
ویژگی‌ها باید به‌گونه‌ای باشند که گوناگونی درون–طبقه‌ای آنها کم باشد.	ویژگی‌ها باید به‌گونه‌ای باشند که گوناگونی میان–طبقه‌ای آنها زیاد باشد.

مثال: شکل‌های مختلف یک کاراکتر



مثال: کاراکترهای مشابه / چهره‌های مشابه

معیارهای ارزیابی یک سیستم بازشناسی الگو

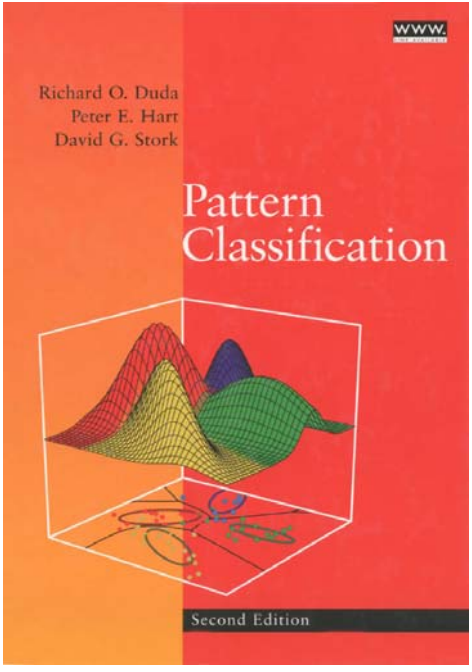
دقت *Accuracy*	سرعت *Speed*	هزینه‌ی ساخت *Construction Cost*	قوام *Robusness*
نرخ خطا درصد بازشناسی درست	پیچیدگی محاسباتی	هزینه‌ی طراحی و ساخت	عدم حساسیت به نویز

مقدمه

۷

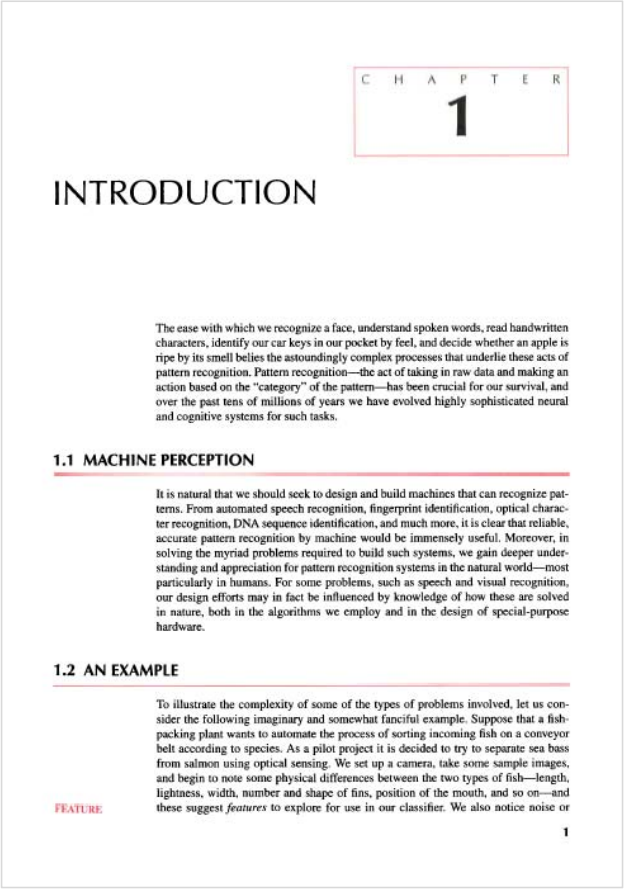
منابع

منبع اصلی



R.O. Duda, P.E. Hart, and D.G. Stork,
Pattern Classification,
Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

Chapter 1



CHAPTER 1

INTRODUCTION

The ease with which we recognize a face, understand spoken words, read handwritten characters, identify our car keys in our pocket by feel, and decide whether an apple is ripe by its smell belies the astoundingly complex processes that underlie these acts of pattern recognition. Pattern recognition—the act of taking in raw data and making an action based on the "category" of the pattern—has been crucial for our survival, and over the past tens of millions of years we have evolved highly sophisticated neural and cognitive systems for such tasks.

1.1 MACHINE PERCEPTION

It is natural that we should seek to design and build machines that can recognize patterns. From automated speech recognition, fingerprint identification, optical character recognition, DNA sequence identification, and much more, it is clear that reliable, accurate pattern recognition by machine would be immensely useful. Moreover, in solving the myriad problems required to build such systems, we gain deeper understanding and appreciation for pattern recognition systems in the natural world—most particularly in humans. For some problems, such as speech and visual recognition, our design efforts may in fact be influenced by knowledge of how these are solved in nature, both in the algorithms we employ and in the design of special-purpose hardware.

1.2 AN EXAMPLE

To illustrate the complexity of some of the types of problems involved, let us consider the following imaginary and somewhat fanciful example. Suppose that a fish-packing plant wants to automate the process of sorting incoming fish on a conveyor belt according to species. As a pilot project it is decided to try to separate sea bass from salmon using optical sensing. We set up a camera, take some sample images, and begin to note some physical differences between the two types of fish—length, lightness, width, number and shape of fins, position of the mouth, and so on—and these suggest *features* to explore for use in our classifier. We also notice noise or

FEATURE

1