

Dimensione Cognitiva

3. Reti Neurali

Introduzione al Machine Learning

Giovanni Della Lunga
giovanni.dellalunga@unibo.it

A lezione di Intelligenza Artificiale

Siena - Giugno 2025

- 1 I Limiti dei Confini Lineari
- 2 Il Neurone Artificiale: Oltre la Linearità
- 3 Apprendimento Supervisionato
- 4 Rappresentazioni Interne

I Limiti dei Confini Lineari

Dove Abbiamo Lasciato...

Recap: La Visione Geometrica

- Ogni dato = punto nello spazio multidimensionale
- Machine Learning = trovare confini ottimali
- Classificazione = separazione geometrica

La Formula Magica

$$\text{Decisione} = \text{sign}(w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n + b)$$

Ma cosa succede quando...

...i dati non sono linearmente separabili?

Dove Abbiamo Lasciato...

Recap: La Visione Geometrica

- Ogni dato = punto nello spazio multidimensionale
- Machine Learning = trovare confini ottimali
- Classificazione = separazione geometrica

La Formula Magica

$$\text{Decisione} = \text{sign}(w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n + b)$$

Ma cosa succede quando...

...i dati non sono linearmente separabili?

Dove Abbiamo Lasciato...

Recap: La Visione Geometrica

- Ogni dato = punto nello spazio multidimensionale
- Machine Learning = trovare confini ottimali
- Classificazione = separazione geometrica

La Formula Magica

$$\text{Decisione} = \text{sign}(w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n + b)$$

Ma cosa succede quando...

...i dati non sono linearmente separabili?

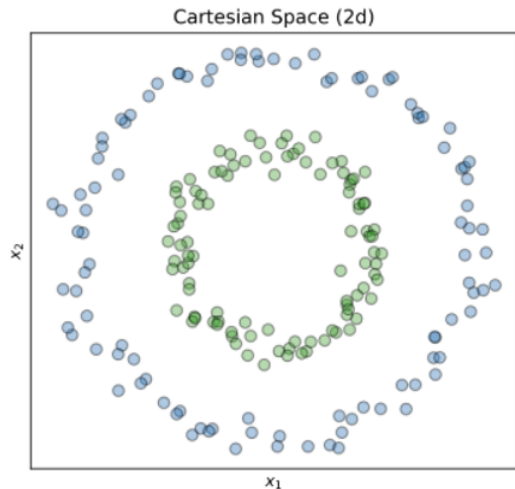
Un Problema che Non Riusciamo a Risolvere

Scenario: Riconoscimento Volti

- x_1 : Luminosità media
- x_2 : Contrasto dell'immagine

Il Problema:

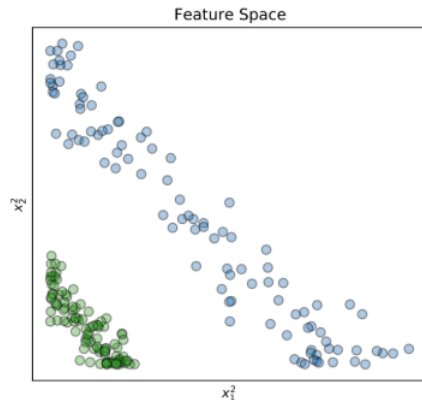
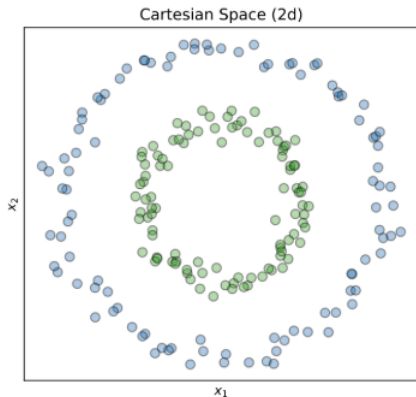
Non esiste una linea retta che separi “volto” da “non volto”!



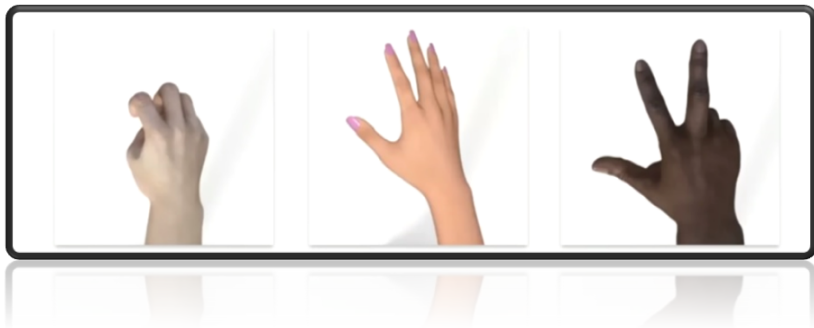
Un Problema che Non Riusciamo a Risolvere

La soluzione:

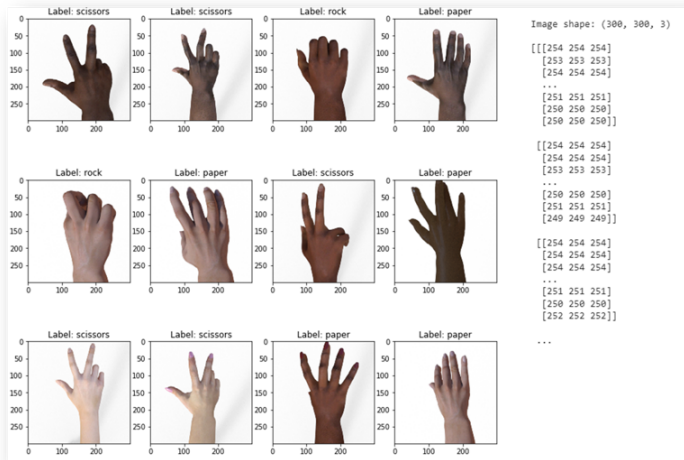
Possiamo però trasformare i dati del problema!



Un problema apparentemente semplice



Un problema apparentemente semplice



Perché i Problemi Reali Sono Difficili

Oltre i Confini Lineari

Esempio: Distinguere Email Spam

Regola semplice (lineare): "Se contiene più di 5 numeri \rightarrow Spam" **Problema:** Le email spam sono furbe!

- Usano sinonimi: "Vincere" \rightarrow "V1nc3r3"
- Cambiano strategia continuamente
- Imitano email legittime

Esempio: Riconoscere Funghi Velenosi

Regola semplice: "Se è rosso \rightarrow Velenoso" **Problema:** La natura è complessa!

- Funghi rossi commestibili esistono
- Funghi bianchi possono essere mortali
- Serve combinare: colore + forma + habitat + stagione

Il Neurone Artificiale: Oltre la Linearità

Ispirazione Biologica

Il cervello umano processa informazioni attraverso miliardi di neuroni interconnessi

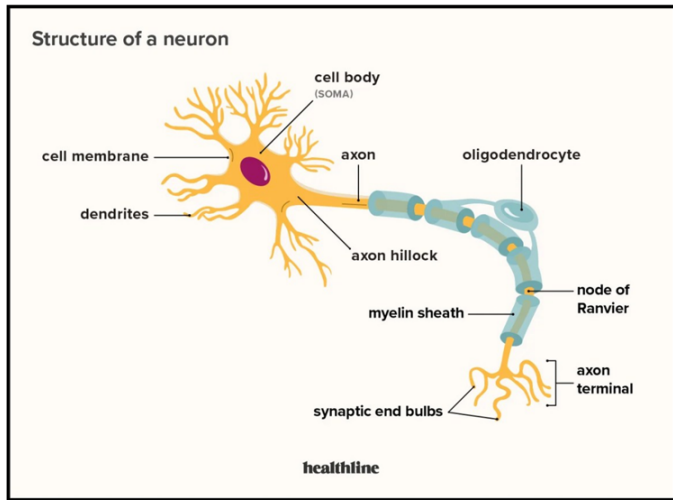
Neurone Artificiale = Modello Lineare + Funzione Non-Lineare

$$\text{output} = f \left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b \right)$$

dove f è una **funzione di attivazione non-lineare**

Ricezione del segnale

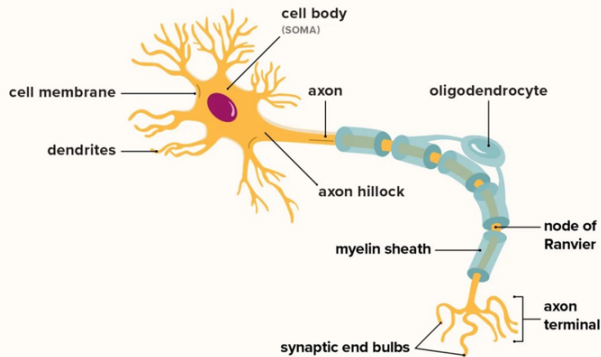
- Un neurone biologico riceve segnali attraverso le sue strutture dendritiche, che sono estensioni ramificate che catturano i segnali chimici inviati da altri neuroni attraverso le sinapsi.
- Questi segnali chimici, noti come neurotrasmettitori, vengono convertiti in segnali elettrici all'interno del neurone.



Processamento del segnale

- I segnali elettrici ricevuti dai dendriti si propagano verso il corpo cellulare del neurone, dove vengono **integrati** e processati.
- Se la **somma** dei segnali eccitatori e inibitori raggiunge una certa soglia, il neurone genera un potenziale d'azione, un impulso elettrico che viaggia lungo l'assone.

Structure of a neuron



healthline

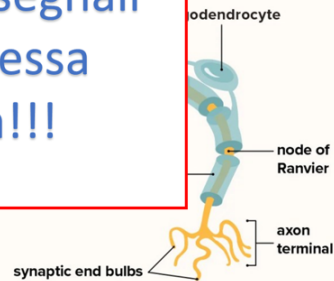
Processamento

- I segnali elettrici nei dendriti si propagano nel corpo cellulare dove vengono processati.
- Se la **somma** degli eccitatori e inibitori supera una certa soglia, il neurone genera un potenziale d'azione, un impulso elettrico che viaggia lungo l'assone.



Structure of a neuron

Non tutti i segnali hanno la stessa importanza!!!

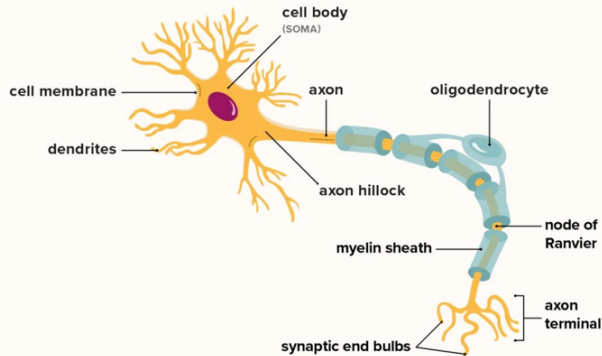


healthline

Trasmissione del segnale

- Il potenziale d'azione percorre l'assone, una lunga proiezione del neurone, fino a raggiungere le terminazioni sinaptiche.
- Qui, il segnale elettrico provoca il rilascio di neurotrasmettitori nelle sinapsi, che attraversano lo spazio sinaptico e si legano ai recettori sui dendriti del neurone successivo, ripetendo il ciclo di comunicazione neuronale.

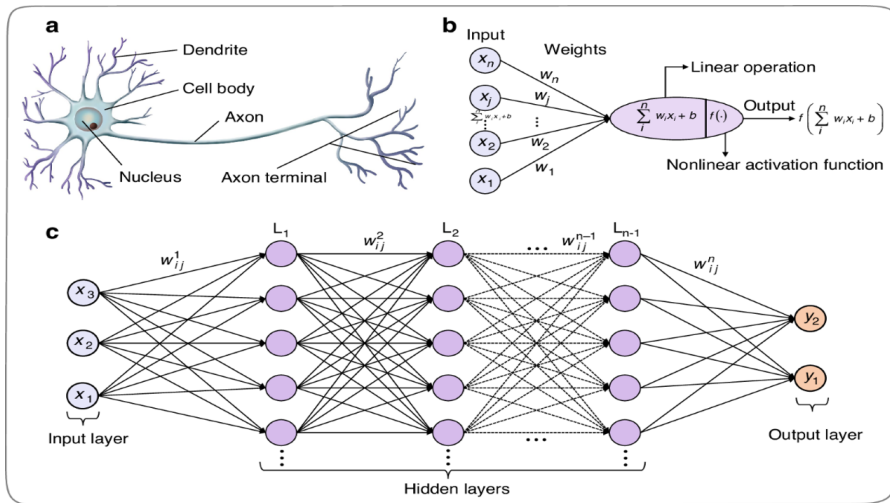
Structure of a neuron



healthline

DON'T PANIC

L'Idea Rivoluzionaria



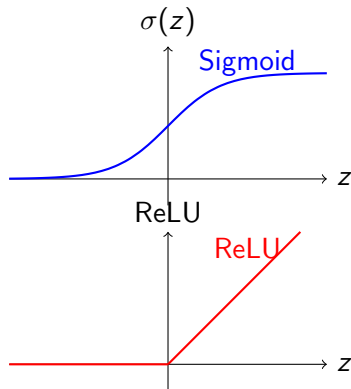
Funzioni di Attivazione: Gli Interruttori Intelligenti

Sigmoid: $\sigma(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$

- Output tra 0 e 1
- “Interruttore morbido”
- Interpretabile come probabilità

ReLU: $f(z) = \max(0, z)$

- Semplice ed efficace
- “Attiva o spegni”
- Molto usata oggi



Il Neurone Come Decisore Intelligente

Un'Analogia Familiare

Immaginate un Preside che Decide le Sospensioni:

Input (Informazioni):

- Gravità del comportamento
- Storia precedente dello studente
- Circostanze attenuanti
- Testimonianze di altri docenti

Pesi (Importanza):

- Gravità: **peso alto**
- Storia: **peso medio**
- Attenuanti: **peso basso**

Formula del Preside:

$$\text{Decisione} = f(\text{Gravità} \times 0.6 + \text{Storia} \times 0.3 + \text{Attenuanti} \times (-0.2))$$

Questo è un neurone artificiale!

Decisione: Sospensione SÌ/NO

Le Funzioni di Attivazione

Gli "Interruttori Intelligenti"

Sigmoid - "L'Acceleratore"

- Come l'acceleratore di un'auto
- Più premi → più veloce vai
- Ma c'è un limite massimo!
- Output: da 0 a 1 (come percentuale)

ReLU - "L'Interruttore"

- Come un interruttore della luce
- Se il segnale è debole → Spento (0)
- Se il segnale è forte → Acceso (il valore stesso)
- Semplice ma efficace!

Analogia con l'Insegnamento:

Sigmoid: Come dare voti da 0 a 10 - transizione graduale

ReLU: Come dare Sufficiente/Insufficiente - soglia netta

Entrambi trasformano l'input in output utile!

Apprendimento Supervisionato

Come Impara una Rete Neurale?

L'Analogia del Docente Inesperto

Immaginate un Docente alle Prime Armi:

Situazione iniziale:

- Non sa ancora valutare i compiti
- Ha criteri confusi e imprecisi
- Le sue valutazioni sono casuali
- Studenti e colleghi sono insoddisfatti

Cosa serve per migliorare?

- *Supervisione* di un tutor esperto
- *Correzione* degli errori
- *Pratica* con molti esempi
- *Feedback* costante

Una Rete Neurale è Identica!

Inizialmente:

I pesi sono casuali
Le previsioni sono sbagliate

Con l'addestramento:

I pesi si aggiustano
Le previsioni migliorano

Chiave del successo: *Apprendimento
Supervisionato*

I Dati di Addestramento: I "Libri di Testo" della Rete

Esempi con Risposte Corrette

Cosa Servono alla Rete per Imparare:

Dataset di Training:

- Migliaia (o milioni) di esempi
- Ogni esempio ha *input* + *output corretto*
- Qualità > Quantità (ma servono entrambe!)
- Diversità negli esempi

Analogia Scolastica:

- *Input*: Testo di un problema di matematica
- *Output corretto*: Soluzione step-by-step
- *Addestramento*: Mostrare 1000 problemi risolti
- *Test*: Dare un problema nuovo

Esempio: Riconoscimento Email Spam

Email	Etichetta
"Vinci 1000€!"	SPAM
"Riunione domani"	LEGITTIMA
"CLICCA QUI!!!"	SPAM
"Buon compleanno"	LEGITTIMA

La rete impara dai pattern:

Molte maiuscole + punti
esclamativi → SPAM

La "Matematica del Miglioramento"

Come Funziona la Correzione dei Pesi

Analogia: Aggiustare la Mira

Quando tirate una freccia:

- Mirate al centro del bersaglio
- Vedete dove colpite
- Aggiustate la mira per la prossima freccia
- *Se troppo a sinistra* → Mirate più a destra
- *Se troppo in alto* → Mirate più in basso

Nella Rete Neurale:

Formula Semplificata:

$$\text{Nuovo Peso} = \text{Vecchio Peso} + \text{Correzione}$$

La Correzione dipende da:

- *Quanto* è grande l'errore
- *Quanto* ha contribuito quel peso all'errore
- *Velocità* di apprendimento (learning rate)

La "Matematica del Miglioramento"

Come Funziona la Correzione dei Pesì

La Regola d'Oro:

Correzione proporzionale all'errore

Errore grande \rightarrow Correzione grande

Errore piccolo \rightarrow Correzione piccola

Esempio Numerico:

- Peso attuale: 0.3
- Errore: La rete ha sbagliato molto
- Questo peso ha causato l'errore
- Correzione: -0.1
- Nuovo peso: $0.3 - 0.1 = 0.2$

Rappresentazioni Interne

Il Concetto di Rappresentazione

Definizione

Una **rappresentazione** è il modo in cui i dati vengono codificati internamente dall'algoritmo per facilitare il compito da svolgere.

Rappresentazione Originale

- Pixel dell'immagine
- Parole del testo
- Note musicali

Rappresentazione Appresa

- Bordi e forme
- Concetti semantici
- Armonie e ritmi

Intuizione Chiave

Le reti neurali imparano a **trasformare** i dati in rappresentazioni più utili per il problema!

Il Concetto di Rappresentazione

Definizione

Una **rappresentazione** è il modo in cui i dati vengono codificati internamente dall'algoritmo per facilitare il compito da svolgere.

Rappresentazione Originale

- Pixel dell'immagine
- Parole del testo
- Note musicali

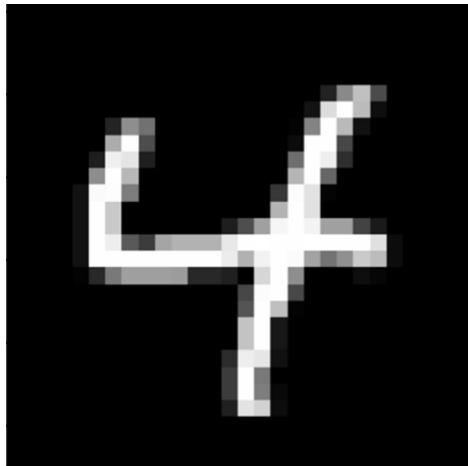
Rappresentazione Appresa

- Bordi e forme
- Concetti semantici
- Armonie e ritmi

Intuizione Chiave

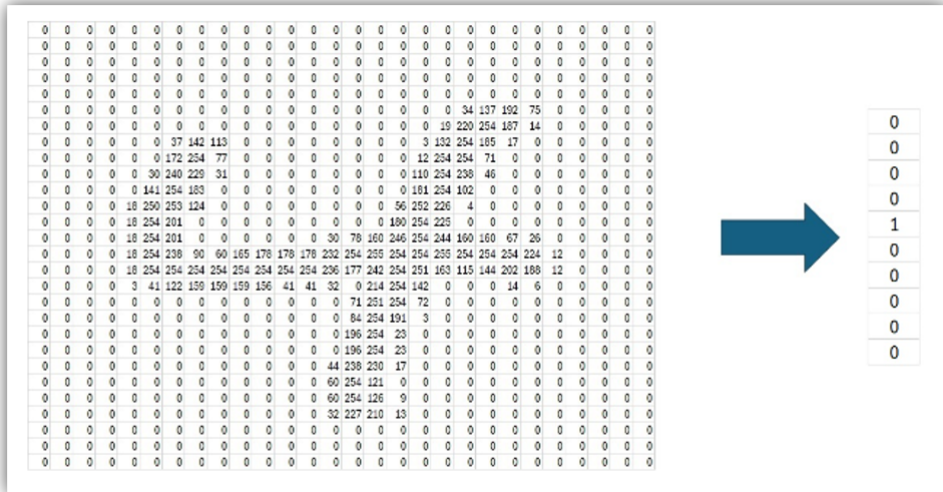
Le reti neurali imparano a **trasformare** i dati in rappresentazioni più utili per il problema!

Esempio: Dall'Immagine al Concetto

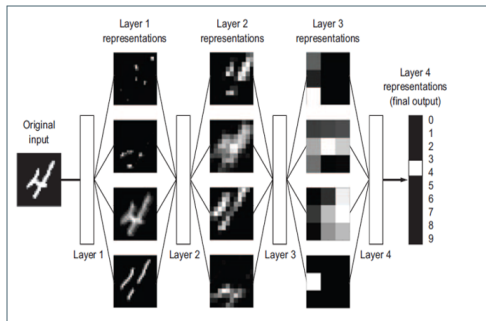


0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	37	142	113	0	0	0	0	0	0	0	0	3	132	254	185	17	0
0	0	0	0	0	172	254	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	254	254	71	0	0
0	0	0	0	0	30	240	229	31	0	0	0	0	0	0	0	0	110	254	238	46	0	0
0	0	0	0	0	141	254	183	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181	254	192	0	0	0
0	0	0	0	18	250	253	124	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56	252	226	4	0	0
0	0	0	0	18	254	201	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	180	254	225	0	0	0
0	0	0	0	18	254	201	0	0	0	0	0	0	30	78	160	246	254	244	160	160	67	26
0	0	0	0	18	254	238	90	60	165	178	178	178	232	254	255	254	254	255	254	254	254	224
0	0	0	0	18	254	254	254	254	254	254	254	254	236	177	242	254	251	161	115	144	202	198
0	0	0	0	3	41	122	159	159	159	156	41	41	32	0	214	254	142	0	0	0	14	6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	71	251	254	72	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84	254	191	3	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	196	254	23	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	196	254	23	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44	238	250	17	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	254	121	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	254	126	9	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	227	210	13	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Esempio: Dall'Immagine al Concetto



Esempio: Dall'Immagine al Concetto



Trasformazione Progressiva

- 1 **Layer 1:** Rileva bordi e texture dai pixel
- 2 **Layer 2:** Combina bordi in forme geometriche
- 3 **Output:** Riconosce oggetti dalle forme

La Magia delle Rappresentazioni Intermedie

Esempio: Riconoscimento di Volti

Cosa impara ogni livello:

- **Layer 1:** Bordi, linee, contrasti
- **Layer 2:** Naso, occhi, bocca (parti del volto)
- **Layer 3:** Configurazioni facciali
- **Output:** “È un volto” o “Non è un volto”

Perché È Rivoluzionario?

- La rete **scopre automaticamente** le caratteristiche rilevanti
- Non dobbiamo più programmare manualmente “cosa cercare”
- Ogni layer costruisce su quello precedente
- Rappresentazioni sempre più **astratte** e **significative**

La Magia delle Rappresentazioni Intermedie

Esempio: Riconoscimento di Volti

Cosa impara ogni livello:

- **Layer 1:** Bordi, linee, contrasti
- **Layer 2:** Naso, occhi, bocca (parti del volto)
- **Layer 3:** Configurazioni facciali
- **Output:** “È un volto” o “Non è un volto”

Perché È Rivoluzionario?

- La rete **scopre automaticamente** le caratteristiche rilevanti
- Non dobbiamo più programmare manualmente “cosa cercare”
- Ogni layer costruisce su quello precedente
- Rappresentazioni sempre più **astratte** e **significative**

Visualizzare le Rappresentazioni: Un Esperimento Mentale

Scenario: Classificazione di Animali

Dati originali: 1000 immagini di cani e gatti (28x28 pixel = 784 dimensioni)

Spazio Originale (784D)

- Ogni pixel = una dimensione
- Dati molto “sparsi”
- Difficile trovare pattern

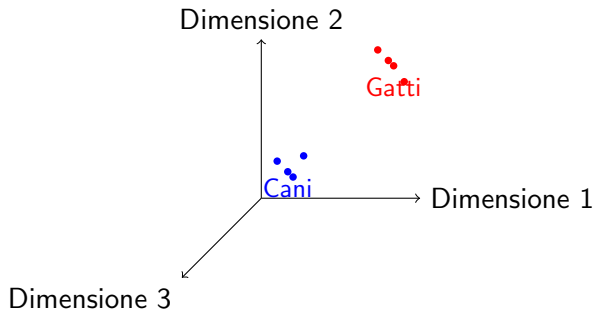
Rappresentazione Interna (3D)

- La rete “comprime” in 3D
- Cani e gatti si separano!
- Pattern evidenti

Visualizzare le Rappresentazioni: Un Esperimento Mentale

Scenario: Classificazione di Animali

Dati originali: 1000 immagini di cani e gatti (28x28 pixel = 784 dimensioni)



Immagini: Convolutional Neural Networks (CNN)

- **Rappresentazione:** Da pixel a feature maps
- **Trasformazioni:** Convoluzione, pooling
- **Risultato:** Gerarchia di pattern visivi

Testo: Transformer e Word Embeddings

- **Rappresentazione:** Da parole a vettori numerici
- **Trasformazioni:** Attention mechanisms
- **Risultato:** Significato semantico e relazioni