



1. L'Intelligenza Artificiale è una delle tecnologie chiave su cui le nazioni si giocano la supremazia globale 2. Un settore nel quale la rivoluzione è prossima è la medicina: specialisti umani e «dottori sintetici» lavoreranno fianco a fianco 3. L'IA sarà anche decisiva per dare vita all'industria 4.0 e ai suoi prodotti di nuova generazione 4. Le città diventeranno «smart cities» grazie alle reti neurali



I problemi del "machine learning"

# Il sogno dell'onnipotenza e i limiti imposti da Gödel

FRANCESCO VACCARINO  
POLITECNICO DI TORINO

**G**ennaio 2019, i matematici Shai Ben-David, Pavel Hrubeš, Shay Moran, Amir Shpilka e Amir Yehudayoff pubblicano su «Nature - Machine Intelligence» un lavoro che lega il mondo del «machine learning» (il campo più sviluppato e rilevante dell'Intelligenza Artificiale) a quello della teoria degli insiemi: la «learnability» (l'apprendibilità) è in generale indecidibile, cioè non si può sempre dimostrare che sia vera o falsa. Per ottenere questo risultato hanno costruito un collegamento tra l'IA e uno dei risultati più eclatanti della matematica del XX secolo: la prova da parte di Gödel e Cohen della indecidibilità dell'ipotesi del continuo, formulata da Georg Cantor nel XIX secolo.

Nel 1874 Cantor dimostrò che l'insieme dei numeri naturali (0, 1, 2...) era più piccolo di quello dei numeri reali (interi, frazioni, radici, pi greco...), pur essendo entrambi gli insiemi infiniti. Cantor ipotizzò che tra i naturali e i reali non potesse starci nulla, così come tra 2 e 3 non vi sono altri interi. Questa considerazione venne chiamata ipotesi del continuo e fu oggetto di numerosi tentativi di dimostrazione sino a quando Gödel nel 1938 per una parte e Cohen nel 1963 dimostrarono che l'ipotesi del continuo era indecidibile, cioè che era logicamente impossibile dimostrarne la verità o la falsità a partire dagli assiomi della teoria degli insiemi. E così i teoremi di incompletezza di Gödel e la loro incarnazione nell'indecidibilità del continuo frantumarono definitivamente il sogno faustiano di David Hilbert che tutta la verità di tutti gli enunciati matematici di una teoria si potesse provare, o refutare, a partire da una lista di assiomi iniziali.

## Questioni statistiche

Adesso ci risiamo: l'umanità coltiva nuovi sogni in stile torre di Babele, sogni «data-driven», guidati dai dati, ma la hybris viene mortificata dall'intervento di Gödel & Co. In che modo?

Il «machine learning» ha a che fare con una varietà di problemi statistici, come la classificazione («banana o pera?»), la regressione (approssimare una funzione) e il «clustering» (dividere e unire per similarità). Un elemento accumuna questi temi: approssimare un concetto-obiettivo mediante un numero finito di informazioni che lo riguardano.



Kurt Gödel (1906 - 1978)

Il «machine learning» è come un sarto che realizza un abito, basandosi sulle misure di pochi clienti, ma che si può adattare a più clienti possibili (è la «generalizzazione»). La «learnability», l'apprendibilità, è, invece, legata al numero di persone di una determinata popolazione che devo misurare per realizzare un abito che vada abbastanza bene a tutti.

## L'esempio degli utenti

Un esempio degli autori: «Ho un sito web e voglio pubblicare annunci mirati per vari gruppi di utenti in modo da «colpire» i gruppi che più di frequente vi accedono». Che cosa fa il «machine learning»? Prende a caso un certo numero di visite al sito e cerca di «istruire» un modello matematico, o un algoritmo, calcolandone i parametri a partire dai dati che ho (le visite passate), così da minimizzare una funzione di costo (quanto sbaglia a fare previsioni). Qui il problema è un po' più complesso, perché voglio trovare un insieme di annunci che massimizzi la probabilità di essere interessanti, ma la probabilità che arrivi un certo utente è sconosciuta. Un problema di questo tipo viene quindi chiamato «Emx», vale a dire «Estimating the maximum».

Astraendo dall'esempio e utilizzando una famiglia di sottoinsiemi dei numeri reali, i matematici sono stati in grado di dimostrare che la «learnability» dell'«Emx» è indecidibile ed è indipendente dalla teoria degli insiemi. Sebbene questo problema non abbia risvolti applicativi diretti, il risultato evidenzia le intrinseche debolezze formali nella teoria dell'apprendimento e come la matematica, se usata come linguaggio, da serva divenga padrona (citando Paolo Zellini) e non si possa non tenerla nel dovuto conto: l'Intelligenza Artificiale - per il momento - è scritta in lingua matematica. —

© BY-ND-NC/ALCUNI DIRITTI RISERVATI

## SMART CITY

Una città intelligente deve ancora vedere la luce in modo compiuto, eppure è già superata: adesso si sta progettando lo «smart landscape», un paesaggio iper-connesso dove le auto a guida autonoma sono soltanto un elemento tra i tanti. Tutto si parla e si influenza, organizzando reti multiple, dai pedoni al traffico e all'energia. Ai cittadini - spiega Simone Calderara dell'Università di Modena e Reggio Emilia - si promette una quotidianità molto più controllata ma, si spera, meno ansiogena. —

## CYBERSICUREZZA

In aeroporto o in stazione saremo non solo numeri, ma volti: controllati da telecamere che scoprono ogni identità (vera o falsa) grazie all'IA. È lo scenario (utopico e distopico) della biometria - dice Giorgio Giacinto dell'Università di Cagliari -, che affianca il riconoscimento del linguaggio a quello dei comportamenti sospetti. Ma i cattivi sono hacker e malware: ecco perché - dice Fabio Cocurullo della società Leonardo - ci vuole l'«adversarial AI», che controlla, previene e interviene prima che sia tardi. —

## INDUSTRIA

La manifattura non morirà, ma diventa industria 4.0. Le fabbriche imitano i laboratori e l'IA gestisce la progettazione così come l'afflusso dei componenti. Customizza ogni oggetto e controlla se stessa e le macchine. Sia la manutenzione sia l'ideazione diventano predittive. Anziché inseguire il mercato, si anticipano gusti e tendenze. La «pipeline dei dati» - sottolinea Luigi di Stefano dell'Università di Bologna - è l'indispensabile linfa con la quale si potrà produrre in modo sempre più veloce, efficiente e, non ultimo, sostenibile. —

## SPAZIO

Il Big Data diventa anche «geo»: dai satelliti si riversa sulla Terra una quantità crescente di informazioni da decifrare e analizzare. La tutela del Pianeta - spiega Stefano Beco di Telespazio - passa attraverso l'abilità di «leggere» indizi che solo l'IA riesce a scoprire, mentre i sistemi di decisione autonoma stanno prendendo piede su tutte le sonde inviate oltre l'atmosfera. Senza questi «agenti» che si muovono in habitat sconosciuti - commenta Amedeo Cesta del Cnr - è impensabile l'esplorazione dello spazio profondo, da Marte alle lune del Sistema Solare e oltre. —

## FINANZA

Banche e assicurazioni non saranno più le stesse. Dai prodotti finanziari alle polizze, ideazione e gestione transitano sugli algoritmi che simulano e prevedono. E se Wall Street è governata dall'IA, l'intreccio umani-sistemi automatici - dice Nicola Gatti del Politecnico di Milano - diventa stretto e problematico. Denaro e diritti vanno di pari passo. È necessario - osserva Carlo Sansone dell'Università di Napoli - entrare nella «black box» dell'IA e carpirne i segreti. —

## ENTERTAINMENT

Sfide agli scacchi e al Go sono già il passato dell'IA. Le reti neurali iniziano a flirtare con la creatività e stanno sperimentando storytelling e storyboard, per film e videogames. Massimizzano il divertimento e - osserva Marco Gori dell'Università di Siena - ci presentano problemi iper-complessi in forma di gioco (come sosteneva Minsky). Al di là delle «console», l'IA è impegnata in un'altra avventura, con al centro le «fake news». Lei è imbattibile nel crearle e solo lei può smascherarle. —

## CIBO

Anche l'agricoltura diventa 4.0. Mini-robot nei campi gestiscono produzioni di precisione e le reti neurali tengono sotto controllo la filiera. La qualità - dichiara Giovanni Maria Farinella dell'Università di Catania - si può «costruire» e anche agrofarmaci e Ogm finiscono sotto il superocchio dell'IA. Piattaforme interattive garantiranno la tracciabilità di ogni alimento e monitoreranno l'ambiente. Molto si deciderà - nota Fulvio Conti della società Almagiva - con le interazioni dei dati, ancora sparsi e insufficienti. —

## BUROCRAZIA

La definiscono il «terreno fertile»: è la pubblica amministrazione, che con le sue masse di dati e documenti - nota Maurizio Lenzerini dell'Università La Sapienza - non può non razionalizzare e automatizzare. L'IA è il facilitatore, quando si è alle prese con la burocrazia: che si tratti di documenti o procedure le reti neurali fanno la differenza. Le potenzialità - dice Raniero Romagnoli di Almagiva - sono immense. Lì si testano metodologie universali - nota Luca Console dell'Università di Torino - che poi si allargano: dalla telefonia all'energia. —