

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA – SCIENZA E INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA E SCIENZE INFORMATICHE

TITOLO DELL'ELABORATO

Il sistema di guida autonoma di Tesla

Elaborato in

Visione Artificiale

Relatore
Raffaele Cappelli

Presentata da
Davide Boldini

Anno Accademico 2021/22

Indice

Introduzione	1
1. Storia della guida autonoma.....	2
1.1 Primi passi	2
1.2 I primi prototipi	3
1.3 Ai giorni nostri	6
1.4 Problemi	8
1.5 Il futuro.....	10
2. Principi base della guida autonoma.....	13
2.1 Introduzione.....	13
2.2 Percezione	15
2.3 Localizzazione	16
2.4 Predizione	17
2.5 Capacità di decisione.....	17
2.6 Reti neurali	22
3. Tesla Full Self-Driving.....	29
3.1 Storia	29
3.2 Single-Cam Object Detection.....	30
3.3 Vector Space & Memory.....	35
3.4 Planning & Control	40
3.5 Data Labeling	42
3.6 Simulazione	44
4. Altri sistemi.....	46
4.1 Uber ATG.....	46
4.2 Waymo	47
4.3 Tesla vs Waymo	49
5. Conclusioni	51
Ringraziamenti	52
Bibliografia & Sitografia	53

Il trasporto e la mobilità rientrano nell'immaginario dell'uomo fin dai tempi più antichi: già i nostri antenati come priorità videro quella di addestrare il bestiame per il trasporto di merci e persone. In particolare, i cavalli furono per molti anni ciò che per noi ora sono le automobili, un mezzo di trasporto che rendeva gli spostamenti più rapidi e meno faticosi.

Il pensiero dell'utilizzare un mezzo per rendere ogni spostamento più comodo e rapido è, e sarà sempre, uno degli obiettivi fondamentali dell'uomo. Fu la seconda rivoluzione industriale nella seconda metà dell'Ottocento a dare una nuova spinta al concetto di trasporto, l'introduzione delle prime automobili, le catene di montaggio che ridussero notevolmente i costi di produzione; si intravedeva l'inizio di una nuova visione del concetto di trasporto, più rapido ed efficiente. Queste furono le basi di ciò che vediamo noi tutti i giorni tra le nostre strade, automobili, mezzi pesanti, moto, sono tutti eredi di quella rivoluzione che nell'Ottocento cambiò il mondo.

Ed è qui che tutti noi potremmo essere davanti ad una nuova rivoluzione del concetto di mobilità. Se nell'Ottocento l'evoluzione è stata il mezzo di trasporto vero e proprio, dal cavallo all'automobile, ora l'evoluzione si concentra sull'uso che ne facciamo di tale mezzo. Il cavallo e le automobili sono guidati da un fantino ed un guidatore che hanno il compito di controllarne i movimenti e dettargli la via; ma se noi salissimo in auto e dicessimo soltanto la destinazione per poi accomodarci e occuparci di altro?

Questa è la rivoluzione in atto: vedere l'auto come un mezzo autonomo che non necessita di controllo da parte di un umano, un mezzo in grado di districarsi ed interagire autonomamente col mondo che lo circonda. Come detto precedentemente gli step evolutivi nell'ambito della mobilità hanno come focus: l'efficienza e la comodità; avere un'auto che non richiede alcuna azione da parte di un guidatore aumenterebbe parecchio l'efficienza di quest'ultimo (il guidatore potrebbe sbrigare altre faccende durante il viaggio) e la comodità (niente più stress per il traffico, ad esempio).

Altro fattore degno di nota è la sicurezza: è presumibile che, avendo in circolazione sistemi in grado di agire calcolando ogni volta l'azione migliore, il numero di incidenti diminuirebbe notevolmente.

In questo elaborato andremo ad approfondire il concetto di "guida autonoma", partendo dal lato storico analizzandone la nascita e l'evoluzione attraverso esperimenti e prototipi, passando poi al lato puramente teorico trattandone i punti fondamentali, le principali tecnologie utilizzate ed il loro funzionamento. Ci focalizzeremo poi su una specifica implementazione di sistema di guida autonomo creato da una delle case automobilistiche più attive e famose del settore: Tesla.

Non si tratta però dell'unica azienda ad aver cercato di addentrarsi ad esplorare il trasporto automatizzato: l'elaborato tratterà anche degli sforzi fatti in questo settore da altre aziende, quali Google e Uber.

1. Storia della guida autonoma

1.1 Primi passi

Il pensiero di “guida autonoma” affascina l’uomo fin dai tempi più antichi [3]. Il primo ad immaginarsi un sogno di guida autonoma, seppur molto arcaico e semplicistico, fu Leonardo Da Vinci. Intorno al 1478, Da Vinci immaginò e illustrò, in uno dei suoi fogli, un “carro semovente” (Fig. 1, Fig. 2) funzionante attraverso un particolare meccanismo di ruote dentate e molle. Questo concept può essere inteso come l’antenato delle automobili moderne.

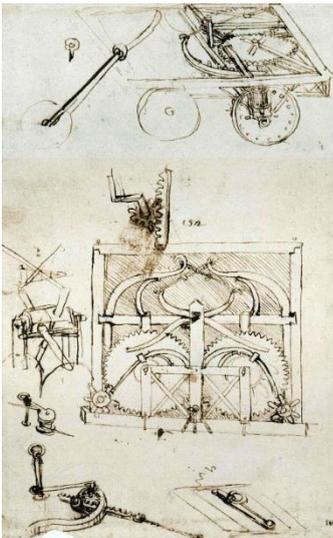


Fig. 1 Foglio f. 812r "Bozza Carro semovente"



Fig. 2 Prototipo del progetto di Carro semovente

Dovettero passare quasi 500 anni prima di vedere un tentativo concreto di guida autonoma. A metà degli anni 20 a New York la compagnia Houdina Radio Control Company, fondata dall’ex ingegnere elettrico dell’esercito americano Francis P. Houdina, diede una prima dimostrazione pubblica di un’auto funzionante senza conducente (Fig. 3) [7]. La compagnia installò sul veicolo una rete di motori elettrici tutti collegati ad un’unica antenna radio montata sul tetto mentre una seconda auto, che lo seguiva da vicino, fungeva da radiocomando per definirne velocità e direzione. La presentazione avvenne per le strade di Broadway, dove effettuò cambi di direzione, accelerazioni, frenate e suonò anche il clacson. La presentazione però terminò quando l’American Wonder, nome del progetto, si schiantò contro un altro veicolo pieno di fotografi chiamati proprio per quell’evento.

Il New York Times scrisse: *“Fu alla Quarantatreesima Strada che lo schianto contro un’autopompa fu a malapena evitato. La polizia ha consigliato a Houdina di posticipare i suoi esperimenti, ma dopo che l’auto è stata guidata su Broadway, è stata nuovamente gestita dalla radio lungo le strade di Central Park.”* [6]

Questa è la prima prova di un esperimento sulla guida “semi-autonoma”.

Purtroppo, tutta questa enfasi iniziale venne a scemare a causa dei problemi tecnici durante la presentazione ma soprattutto perché il pubblico vedeva queste presentazioni come pura forma di

intrattenimento e non come una possibile idea da sviluppare per il futuro dei trasporti. Nonostante ciò, la compagnia non perse la speranza e proseguì nel suo lavoro di ricerca e sviluppo del pensiero di auto radiocomandata.

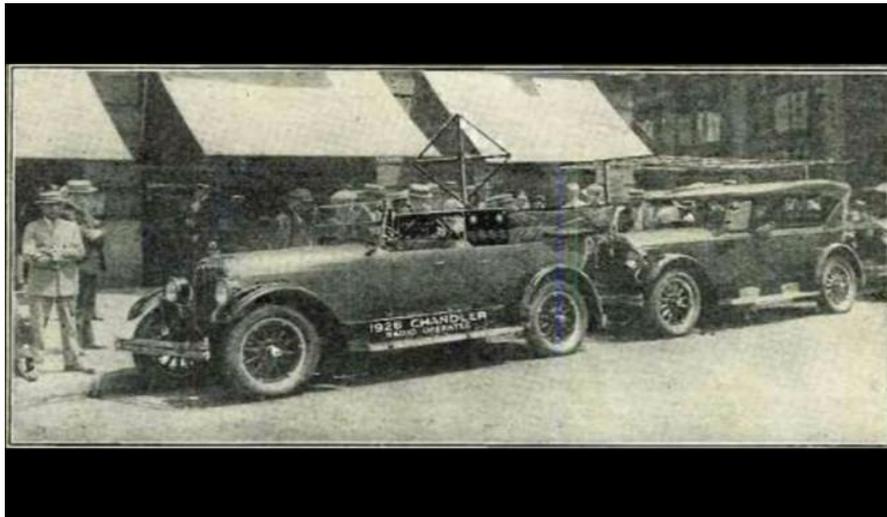


Fig. 3 Chandler del 1926 "American Wonder"

Un anno dopo, un'altra compagnia, la Achen Motor presentò per le strade di Milwaukee un secondo progetto di guida radio-comandata chiamato "Phantom Auto" [4]. Anch'essa attirò grandi folle durante le sue presentazioni per le strade, ma anche in quei casi prese il sopravvento l'idea dell'intrattenimento più che quella del progresso tecnologico.

Poi, nel 1939, durante la Fiera Mondiale a New York, General Motors presentò il progetto "Futurama". Il progetto rappresentava un insieme di scenari su un ipotetico futuro dell'urbanistica e della mobilità, come l'utilizzo di veicoli radio-comandati da campi magnetici. L'idea base era molto semplice: immaginare di guidare l'automobile fino all'ingresso di un'autostrada per poi inserire il pilota automatico e godersi il viaggio in tranquillità, senza il rischio di possibili incidenti. Il tutto si immaginava essere comandato tramite bande magnetiche su cui scorrevano ruote metalliche accoppiate agli pneumatici. In questa occasione General Motors creò anche un primo modello "teorico" di guida autonoma basato su questa corrente di pensiero. Un veicolo elettrico guidato da campi elettromagnetici radiocomandati e azionato da punte metalliche magnetizzate incastonate nella carreggiata. Questa idea prese forma come prototipo solo nel 1958 [3].

1.2 I primi prototipi

Passati gli anni della guerra, durante la quale venne interrotto qualsiasi progetto di guida autonoma, nei primi anni '50 General Motors e RCA (Radio Corporation of America) crearono un primo prototipo di mezzo guidato e controllato attraverso cavi metallici annegati nel pavimento [7]. Questo progetto venne mostrato al pubblico nel 1958, quando percorse un tratto di strada di 121 metri, nella città di Lincoln, lungo la quale venne posta una rete di sensori capaci di controllare la posizione di un veicolo e segnalarne la presenza di ostacoli, il tutto era in grado di dialogare con la sensoristica del prototipo per comandargli velocità e direzione.

I risultati furono molto promettenti, al punto da far prevedere ai produttori automobilistici e all'opinione pubblica che il 1975 sarebbe stato l'anno in cui la tecnologia della guida autonoma sarebbe stata perfettamente funzionante e fruibile.

Visti i risultati più che positivi, la compagnia americana proseguì i suoi sviluppi in tale ambito progettando una serie di vetture dal nome in codice "Firebird", prodotte dal 1956 al 1964 [7].

Un primo modello, la Firebird II fu la prima della serie ad avere un sistema di guida autonoma progettata per le "autostrade del futuro", quelle con un cavo elettrico annegato nell'asfalto utile a mandare segnali all'auto per evitare incidenti.

Il modello successivo, la Firebird III (*Fig. 4*) costruita nel 1958 e considerata ai tempi come una delle auto più geniali ed innovative mai create, aveva un joystick come controllo per la guida oltre che ad una ricca sensoristica per la guida autonoma e cruise control.



Fig. 4 Prototipo di GM Firebird III

Concludendo in bellezza con la Firebird IV (*Fig. 5*) presentata alla Fiera Mondiale del 1964 a New York. La Firebird IV stravolgeva qualsiasi concetto dell'auto tradizionale, oltre che agli interni completamente rivisitati e con "servizi" individuali come televisione e frigorifero (*Fig. 6*), aveva due cloche sul sedile del guidatore per gestire acceleratore e sterzo, un computer di bordo per impartire comandi all'auto ed un display per la visualizzazione di una mappa.

Anche in questo caso però più che il pensiero di guida autonoma come un vero riferimento per il futuro, prese il sopravvento l'enfasi per le tecnologie avanzate che la caratterizzavano.



Fig. 5 Presentazione della Firebird IV



Fig. 6 Dettagli degli interni della Firebird IV

In Europa fu l'Inghilterra a fare da apripista in questo mondo. Addirittura, lo stesso governo se ne interessò e negli anni '60 il Transport and Road Research Laboratory realizzò una serie di prototipi con una tecnologia simile a quella della General Motors, ossia sfruttare una sensoristica posta nel corpo di asfalto delle strade [7].

Il primo risultato fu la Citroen DS19 (Fig. 7), una vettura che interagendo con cavi metallici inseriti nell'asfalto riusciva a procedere da sola, questa volta ciò che fece scalpore fu la velocità massima raggiunta, 130 km/h. In questo prototipo per la prima volta si inserì il concetto di "previsione" delle mosse dei veicoli che circondavano l'auto, il tutto grazie ad un computer centrale montato a bordo.

Gli studi e le ricerche proseguirono negli anni a seguire e a quel tempo si immaginava che verso la fine del secolo lo Stato si sarebbe rifatto di tutte le spese fatte per preparare le autostrade con la nuova sensoristica necessaria. Ma tutto ciò non avvenne e il progetto fu chiuso.



Fig. 7 Locandina pubblicitaria della Citroen DS19

Nel 1977, un team di ricerca giapponese realizzò il primo prototipo di veicolo di guida realmente autonoma ossia che non necessita di tecnologia stradale esterna. Il veicolo era guidato da un computer con l'aiuto di algoritmi di visione artificiale in grado di seguire i segnali bianchi stradali ed era in grado di raggiungere le venti miglia orarie [3].

Nel 1987 fu lanciato l'Eureka Prometheus Project, finanziato dai membri dell'Eureka, un'organizzazione europea per la ricerca che stanziò 749 milioni di euro per progetti relativi alla guida autonoma [7].

Grazie a questi finanziamenti, furono presentate nel 1994 a Parigi la VaMP (Fig. 8) e la Vita-2. La VaMP costruita sulla base di una Mercedes 500 SEL da un team dell'università di Monaco di Baviera era comandata completamente da un computer che grazie ad una capacità di analisi dell'ambiente circostante riusciva a regolare sterzo, acceleratore e freno [7]. Fu il primo prototipo di auto che era in grado di riconoscere strade e veicoli senza necessità di operazioni di rifacimento del manto stradale. Nel 1995 durante il suo collaudo fu in grado di percorrere 2000 chilometri da Monaco a Copenaghen, ad una velocità di 180 km/h con la quasi totale assenza di correzioni fisiche da parte del guidatore.

In ambito italiano vi fu un progetto degno di considerazioni, capitanato dal professor Alberto Broggi dell'Università di Parma. Il suo gruppo riuscì a modificare una Lancia Thema e nel 1998 riuscì a

percorrere duemila chilometri in 6 giorni col 94% del tempo in guida totalmente autonoma, grazie all'analisi dell'ambiente circostante tramite due semplici telecamere [4].

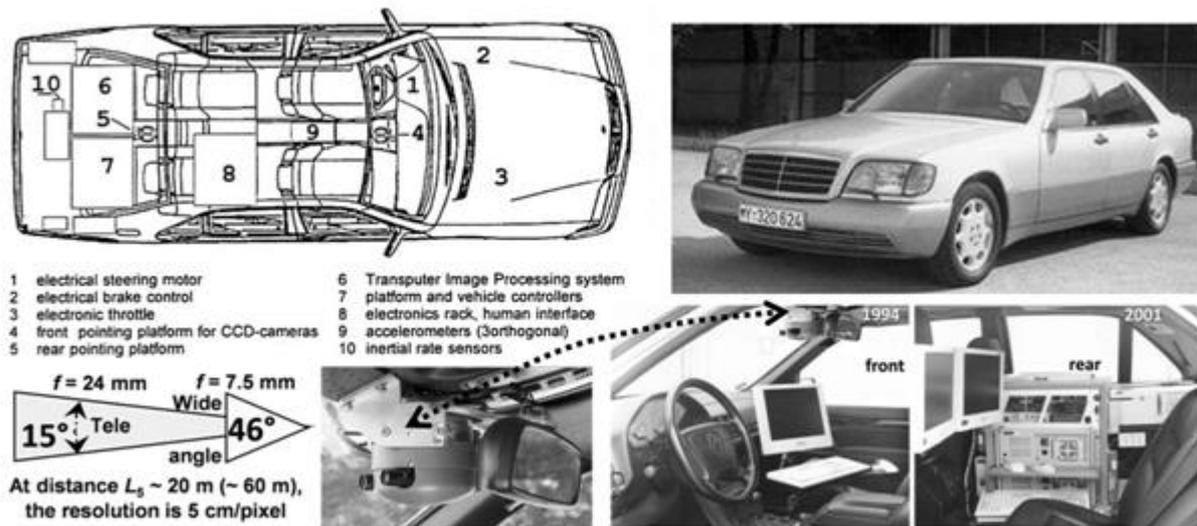


Fig. 8 Dettagli del progetto VaMP

1.3 Ai giorni nostri

All'inizio degli anni 2000, anche l'esercito americano iniziò ad interessarsi a questo mondo ed annunciò la DARPA Grand Challenge, una competizione su un percorso ad ostacoli di media-lunga distanza riservato ai veicoli con guida autonoma. Il premio era di un milione di dollari al team di ingegneri dell'auto vincitrice. Nessun'auto vinse, ma, nonostante ciò, questa competizione diede ulteriori stimoli ai team di sviluppo per proseguire i loro progetti di guida automatizzata [4].

Nel 2007 vi fu un secondo concorso DARPA questa volta simulando un percorso urbano lungo circa 60 miglia, in questa occasione quattro auto riuscirono a completare la sfida.

Negli anni successivi furono tenuti anche altri concorsi del genere, per incentivare ed incoraggiare i ricercatori.

In questi anni molte case automobilistiche iniziarono ad implementare sistemi di guida "semi-autonoma" sulle loro vetture, da Ford a BMW e Mercedes. Non si trattava tuttavia di sistemi di guida completamente automatizzata come invece era nelle volontà di altre aziende.

Il 2010 può essere considerato come l'anno della svolta: il colosso di Internet e della tecnologia, Google annuncia di avere in sviluppo da qualche anno un progetto di guida autonoma [5]. L'intento era più che pregevole, creare auto che permettessero di ridurre della metà il numero di incidenti stradali annuali. Al progetto presero parte alcune delle menti più brillanti in materia come Sebastian Thrun, direttore del laboratorio di Intelligenze Artificiali dell'università di Stanford, nonché altri ingegneri che avevano anche lavorato a progetti partecipanti alle challenge DARPA. Google si prefisso il 2020 come anno in cui lanciare un veicolo commerciale totalmente autonomo.

Il team lavorò su sette prototipi di auto commerciali ma modificate con complessi sistemi di sensori, telecamere, laser, radar speciali e sistemi GPS (Fig. 9). Al 2015 le auto prototipo percorsero più di 1 milione di miglia non causando incidenti, ma essendo coinvolte in collisioni non per loro colpa. Il primo vero incidente avvenuto per colpa dell'auto risale al 2016.



Fig. 9 Prototipo di vettura per guida autonoma Google

Anche a livello legislativo Google riuscì a far sentire la sua potenza facendo approvare in vari stati e distretti americani leggi per l'approvazione e per la legalità delle auto con guida autonoma nelle strade americane.

Il progetto, prima col nome di Google Car ed ora, girato ad una succursale di Google, col nome di Waymo è tuttora in sviluppo con continue sessioni di test lungo le strade americane (*Fig. 10*).



Fig. 10 Vettura di sviluppo di Waymo

Anche altre aziende iniziarono a sviluppare sistemi di guida autonoma, tra le più influenti ed importanti, Tesla, Uber, Audi, Microsoft ecc...

Fu proprio Tesla l'azienda che investì maggiormente nel settore, arrivando a diventarne leader sul mercato. Nell'ottobre del 2014 presentò la prima versione di Autopilot capace di controllare la corsia autonomamente, accelerare, frenare e sostare automaticamente (*Fig. 11*) [4]. A metà del 2015 fu rilasciata la versione 7 con l'implementazione della vera funzionalità di pilota automatico con la possibilità di ordinare all'auto di parcheggiare senza il conducente nell'abitacolo. Tesla aveva in conto di consentire la guida autonoma completa entro la fine del 2017, ma ai giorni d'oggi non è ancora accaduto.

Nel 2020 Tesla rilasciò in beta la prima "nuova" versione di Autopilot rinominata "Full-Self-Driving", una quasi completa revisione del software precedente con cui l'azienda promette di

compiere un enorme passo avanti nel raggiungimento del loro obiettivo di guida totalmente autonoma, grazie ad un pesante e complesso utilizzo di AI e Machine Learning.



Fig. 11 Tesla Autopilot in funzione

1.4 Problemi

Nella storia dello sviluppo della guida autonoma i problemi sono sempre stati all'ordine del giorno e lo saranno anche in futuro essendo questo un progetto teoricamente abbastanza semplice da immaginare ma all'atto pratico estremamente complesso per gli innumerevoli fattori coinvolti. La messa in pratica di algoritmi pensati e sviluppati su carta, si scontra, nel caso della guida autonoma, con un'infinità di variabili: il meteo, il comportamento dei pedoni, le scelte degli altri guidatori ecc...

Andiamo ad analizzare per punti i principali problemi:

1. Etica

Le auto a guida autonoma in certi scenari dovranno prendere delle decisioni [9]. Noi umani dinanzi ad una certa situazione di pericolo saremmo generalmente in grado di decidere la soluzione "più giusta", ma un'auto?

Immaginiamo ad esempio che l'auto stia viaggiando ad una velocità sostenuta, che scopra sul suo cammino un pedone ma che non faccia in tempo a fermarsi. Cosa fa? Ha due possibilità: cercare di fermarsi andando comunque a colpire il pedone oppure deviare andando a sbattere da qualche parte a scapito del guidatore. Quale sceglie?

Noi umani in una situazione del genere mettiamo in ballo molti fattori, come la tipologia di pedone (se è un anziano, un bambino, un animale, ecc...), lo scenario intorno a noi (se siamo in una strada trafficata o meno). L'auto queste analisi "emotive" non è in grado di compierle ed in caso di incidenti del genere, di chi è la colpa? Dell'auto o del conducente?

Un caso indicativo può essere quello della sperimentazione che aveva avviato Uber. In una sessione di test un veicolo autonomo dell'azienda investì un pedone uccidendolo, questa notizia fece il giro del mondo scatenando anche molte polemiche sulle responsabilità di questo incidente (Fig. 12). Le colpe erano dell'auto con l'incidente scatenato da un bug e quindi una fatale casualità oppure dell'azienda Uber? L'incidente segnò per sempre il progetto obbligando l'azienda ad interromperlo a tempo indeterminato.

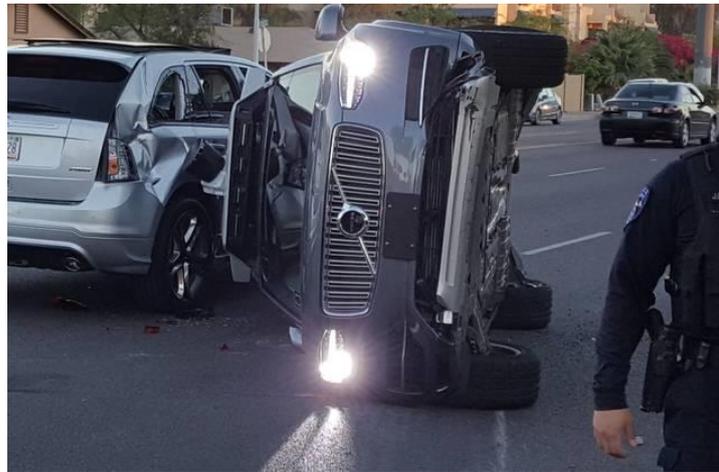


Fig. 12 Veicolo autonomo Uber dopo l'incidente

2. Sensori

Le auto a guida autonoma sono una miniera di sensori e telecamere posti dappertutto per vedere l'ambiente circostante [15]. Apparecchiature necessarie per avere una visione a 360 gradi attorno alla vettura, ma anche a metri di distanza, ad esempio per individuare pedoni a bordo strada con molto anticipo per evitarli. Purtroppo, il funzionamento di questa sensoristica è spesso dipendente dalle condizioni ambientali e meteorologiche dello scenario; con una giornata soleggiata tutto funziona alla perfezione, ma in una giornata con una fitta nebbia o una giornata con neve intensa? Oppure in situazioni di traffico intenso l'auto deve essere in grado di rilevare tutti i veicoli nelle carreggiate adiacenti, cosa che in certi casi è molto difficile da ottenere. È per questo che il discorso della sensoristica può rientrare nei problemi che necessitano una soluzione, forse però si tratta del problema più "semplice" da risolvere.

3. Machine Learning

Gli algoritmi di machine learning sono la mente che va a definire i comportamenti dell'auto per strada [15]. Ma proprio come dice il nome, devono "imparare" e per imparare spesso si fanno degli errori. Non esiste ancora "l'algoritmo perfetto" che assicura il 100% di successo in tutti i casi, e chissà se esisterà mai. Per ora dobbiamo fare affidamento ancora alla mano dell'uomo per evitare certi incidenti ed è per questo che le auto necessitano sempre di un conducente alla guida che mantenga le mani sul volante.

Un'altra attenta analisi nell'ambito machine learning va fatta sulla domanda "Impara cose nuove, ma ricorda ancora quelle vecchie?". Ad ogni nuovo apprendimento va infatti analizzata la capacità di memoria dei casi precedenti: solo in quel caso si avrà un vero apprendimento e non una semplice sovrascrittura. Queste caratteristiche sono molto difficili da verificare dato che ogni situazione è unica e difficilmente replicabile nella vita reale.

4. Regolamenti

Qui entriamo nel campo puramente legislativo: le normative riguardanti le autorizzazioni per veicoli con guida autonoma sono ancora oggetto di discussione a livello amministrativo. Ai nostri giorni ogni stato, ogni nazione fa storia a sé in quanto a normative: ad esempio negli Stati Uniti

non tutti gli stati autorizzano la circolazione di questi veicoli avendo ancora molti dubbi per quanto riguarda la sicurezza. A rilento, sono in atto dei tentativi di definire una legislazione unica internazionale, ma vi sono ancora dei problemi da risolvere: le tipologie di sensori, le tecniche di machine learning, etc. Dato che attualmente pressoché ogni azienda produttrice ha una propria politica di sviluppo, sarà difficile arrivare in breve tempo ad una omologazione internazionale sugli standard da rispettare [15].

All'atto pratico, ad esempio, Waymo e Tesla hanno due correnti di pensiero molto diverse. La prima fa uso di Radar e Lidar per l'analisi dell'ambiente, mentre la seconda utilizza (nella versione attuale) soltanto un set di telecamere montate sulla vettura. Qual è il metodo più affidabile? Come si può verificare?

5. Le città

Le città, sembrerà strano, ma sono uno dei tanti problemi che attanaglia la guida autonoma. Le nostre città sono state progettate e costruite con un tipo di viabilità che risulta parecchio complesso per le auto a guida autonoma. Vi sono innumerevoli fattori di rischio nel percorrere le strade urbane in auto, noi umani ci siamo "abituati" e sappiamo come venirne a capo, ma un computer risulta spesso in difficoltà. Ed è per questo che molti tra ingegneri e architetti stanno cercando di ripensare il concetto di città e di urbanizzazione per fare in modo che sia più coesa ed accessibile per questi sistemi di movimento. Il concetto di mobilità va rivisto per certi aspetti e questa risulta una problematica non di poco conto dato che molte opere necessarie richiederebbero un costo non irrilevante.

Anche in questo caso vi sono due correnti di pensiero: chi sostiene che le città vanno riadeguate per la guida autonoma in quanto essa ne aumenterebbe la sicurezza e chi, invece, sostiene che pedoni e guida autonoma non possono coesistere ed è quindi contrario a questa riqualificazione urbana.

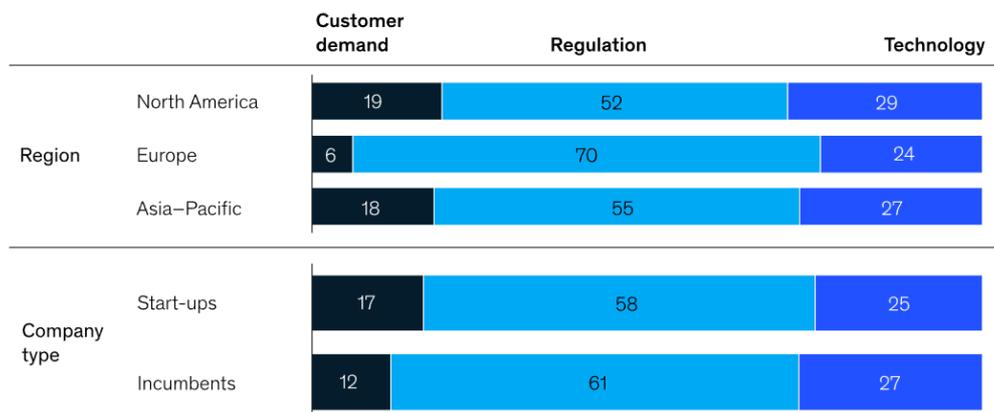
1.6 Il futuro

I progetti e la ricerca andranno sicuramente avanti, ma i tempi sono ancora poco maturi per pensare a sistemi di guida autonoma disponibili per tutti nella vita quotidiana.

Non sono pochi i cavilli legislativi e tecnologici da risolvere [10]. La maggior parte della popolazione ritiene che la mancanza e la disomogeneità delle normative sia uno dei più grandi freni all'espansione della guida autonoma (*Fig. 13*). Purtroppo per questo aspetto non è possibile fornire tempistiche e previsioni sul futuro più prossimo, mentre a lungo termine si può essere ottimisti.

Regulation is viewed as the main bottleneck to the adoption of autonomous driving.

Respondent category, %



Question: What will be the biggest bottleneck for autonomous driving? Select from the following options.
Source: 75 respondents (North America, n = 31; Europe, n = 33; Asia-Pacific, n = 11)

Fig. 13 Grafico di analisi sulle cause principali del collo di bottiglia per la guida autonoma

Altro fattore che ne definirà il futuro saranno i costi di produzione delle componenti: molti progetti fanno uso di strumentazioni molto costose, particolari tipi di radar (LiDAR) e sensori che ai giorni d'oggi richiedono costi e tempistiche di produzione molto elevati.

Lo sviluppo e la ricerca in ambito hardware procedono spediti e negli anni tali costi di sviluppo andranno man mano a ridursi andando a ridurre di conseguenza i costi di produzione dei veicoli rendendoli più accessibili al grande pubblico. Lo sviluppo però non riguarda solo il lato hardware, anche lato software vi sono costi di produzione non indifferenti necessitando di personale altamente specializzato per l'implementazione e la raffinazione di algoritmi molto complessi di big data, visione artificiale e machine learning. Importante è quindi anche il contributo del settore dell'istruzione, andando a creare una fetta sempre più ampia di figure compatibili con queste posizioni portando così a ridurre i costi di implementazione.

Un'ulteriore analisi è necessaria anche sul concetto di auto [13]. Noi siamo abituati ad immaginare l'auto come una proprietà privata, di nostro possesso e che possiamo utilizzare come desideriamo. Molte aziende produttrici e ricercatrici sulla guida autonoma, tra cui Waymo, però virano più sul pensiero di trasporto automatizzato andando a creare flotte di "robo-taxi" e di taxi con guida totalmente autonoma. Mentre altre, le più classiche case automobilistiche, come General Motors lavorano per commercializzare veicoli autonomi direttamente al pubblico.

Vi sono quindi due correnti di pensiero:

Auto come prodotto privato vs Auto come servizio pubblico

Le aziende facenti parte della prima puntano molto sul lato "emotivo" del cliente, dicendo che "Al cliente piace avere la propria auto da usare come vuole" anche se molti dati indicano come la maggior parte del tempo queste auto rimangono parcheggiate ed inutilizzate, quindi inutili.

Le aziende aderenti alla seconda corrente di pensiero indicano le auto come "bene pubblico della comunità", un qualcosa che deve risultare sempre utile a tutti e non deve rimanere parcheggiato inutilmente quando potrebbe risultare utile a qualcun altro.

Ritornando coi piedi per terra, il mondo della guida autonoma come la immaginiamo dai film di fantascienza resterà ancora lontano per un po' di anni [14]. Certi esperti sostengono che non vedremo a breve scene di vita quotidiana completamente automatizzate come il portare i bambini a scuola. Una scena del tipo: mettere il bambino in macchina da solo ed ordinare alla macchina di portarlo a scuola, resterà un'utopia ancora per molti anni secondo loro.

Altri invece sostengono che la guida autonoma, intesa come servizio, sarà molto probabile tra una decina di anni, come flotte di taxi o navette in aeroporto. Mentre il possedere privatamente un'auto a guida autonoma risulterà ancora molto improbabile soprattutto a causa dei costi.

Si avvicinerà più velocemente invece per il mondo del trasporto merci, come camion, treni e navi. Vi sono già delle sperimentazioni in atto di camion a guida completamente autonoma che percorrono tragitti per il trasporto merci, un esempio è la flotta di camion della miniera di Rio Tinto in Australia dove i camion sono senza conducente e controllati da un sistema centrale distante migliaia di chilometri.

Lo sviluppo va e andrà avanti, i tempi solo il futuro potrà dirli.

Forse tra qualche anno ci chiederemo come abbiamo fatto a vivere senza macchine che si guidano da sole...

2. Principi base della guida autonoma

2.1 Introduzione

Con guida autonoma si parla, in genere, di veicoli in grado di analizzare ed operare in un ambiente senza la necessità di un coinvolgimento umano. Il concetto ideale di guida autonoma si basa sul totale controllo da parte del veicolo sui movimenti da compiere e sulla gestione degli eventi. Un'auto a guida autonoma può andare ovunque vada un'auto tradizionale e fare tutto ciò che fa un guidatore umano esperto.

Per chiarezza è necessario definire alcuni termini che spesso confondono il lettore e l'utenza.

Il SAE (Society of Automotive Engineers) utilizza il termine *automatizzato* anziché *autonomo* [16]. Il motivo risiede nel puro valore lessicale delle due parole, con autonomo generalmente si intende un qualcosa consapevole di sé e in grado di fare scelte proprie, il tutto ovviamente non può rientrare nel contesto delle auto. Ad esempio, se un'auto fosse effettivamente autonoma noi potremmo dirle "portami dal medico", ma lei decide di portarci al cinema. Ed è per questo che sarebbe più giusto parlare di guida automatizzata perché parliamo di situazioni in cui vi deve essere pur sempre un umano pronto a prendere il controllo.

Sempre il SAE ha standardizzato la guida autonoma in 6 livelli di ordine crescente in termini di *automazione* (Fig. 1).

SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION™
 Learn more here: [sae.org/standards/content/J3016_202104](https://www.sae.org/standards/content/J3016_202104)

Copyright © 2021 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed AS-IS provided that SAE International is acknowledged as the source of the content.

	SAE LEVEL 0™	SAE LEVEL 1™	SAE LEVEL 2™	SAE LEVEL 3™	SAE LEVEL 4™	SAE LEVEL 5™
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in "the driver's seat"		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	
What do these features do?	These are driver support features			These are automated driving features		
	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met		This feature can drive the vehicle under all conditions
Example Features	<ul style="list-style-type: none"> • automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering OR • adaptive cruise control 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering AND • adaptive cruise control at the same time 	<ul style="list-style-type: none"> • traffic jam chauffeur 	<ul style="list-style-type: none"> • local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed 	<ul style="list-style-type: none"> • same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

Copyright © 2021 SAE International.

Fig. 1 Schema dei sei livelli di guida autonoma SAE

Andiamo ora ad approfondire questi sei livelli [8]:

Livello 0: in questo livello il veicolo non dispone di alcuna tecnologia di automazione della guida, è compito del guidatore avere il controllo di ogni elemento. Tutti i fondamentali, sterzo, accelerazione, frenata, parcheggio ecc... sono sotto il controllo del guidatore.

Tuttavia, al livello 0, vi possono essere piccoli strumenti di aiuto alla guida che possono intervenire temporaneamente durante la percorrenza. Alcuni di questi strumenti sono: la frenata automatica di emergenza, il mantenimento della corsia e l'aiuto per la visione dell'angolo cieco; vengono inseriti come aiuti di livello 0 perché non guidano il veicolo, ma offrono allarmi o azioni momentanee.

La maggior parte dei veicoli ora in circolazione rientra in questo livello.

Livello 1: i veicoli che rientrano nel primo livello di automazione sono quei veicoli che hanno almeno un sistema di supporto al conducente per lo sterzo oppure per la frenata. Ad esempio, il cruise control adattivo, quel sistema che permette di mantenere una distanza di sicurezza dal veicolo che ci precede senza che sia il conducente a mantenerla manualmente.

Si noti che qualora un veicolo disponga di un supporto sia per la sterza che per la frenata, esso rientra nel Livello 2.

Livello 2: vi rientrano quei veicoli in possesso di *sistemi avanzati di assistenza alla guida (ADAS)*, che possono assumere il controllo di sterzo, acceleratore e frenata in diversi scenari. Tuttavia, anche in questa situazione il conducente deve rimanere vigile e pronto per correggere eventuali errori. Un esempio di Livello 2 è il sistema *BlueCruise* di Ford, che permette al conducente di togliere le mani dal volante mentre l'auto è in specifiche autostrade di USA e Canada.

Nel Livello 2 rientra anche il sistema Full Self Driving di Tesla.

Livello 3: qui vi è un importante passo avanti rispetto al Livello 2, tanto che ancora nessun veicolo di Livello 3 è autorizzato all'uso sulle strade americane.

Questo livello è noto come "conditional driving automation", utilizza vari sistemi di aiuto alla guida e di algoritmi di intelligenza artificiale per prendere decisioni in base allo scenario. Le persone all'interno del veicolo non hanno l'obbligo di supervisionare il lavoro dell'auto e possono svolgere contemporaneamente altre attività, ovviamente è buona norma restare vigili e pronti alla gestione di eventuali problemi.

Vari produttori hanno in cantiere progetti di auto dotate di questo livello di automazione, tra cui Audi che nel 2019 cercò di omologare un suo modello di auto con questi sistemi avanzati integrati, ma la Germania non diede il via libera, perciò, questo progetto venne accantonato. Invece Honda e Mercedes non abbandonarono i loro progetti ed hanno presentato aggiornamenti software oppure nuovi modelli dotati di questi sistemi e in attesa di approvazione.

Livello 4: non richiede alcuna iterazione umana nel funzionamento del veicolo, in quanto anche in caso di guasti, l'auto è programmata per arrestarsi da sola. In un ipotetico modello di auto Livello 4 pedaliera e volante potrebbero essere rimossi ed il conducente potrà svolgere altre attività senza particolari problemi.

Livello 5: significa un veicolo che può guidare autonomamente in tutte le condizioni senza attenzioni umane. L'unico coinvolgimento umano sarà quello di definire una destinazione. Vetture dotate di questo livello non sono tuttora esistenti e probabilmente non lo saranno ancora per molti anni.

2.2 Percezione

La capacità di percezione di un'auto consiste nel vedere, riconoscere e classificare il mondo che la circonda [11]. Questo meccanismo è fondamentale per i passaggi successivi, dato che tutte le azioni automatiche dell'auto partono dal presupposto che le telecamere riescano a riconoscere e distinguere una persona da un albero, ad esempio.

Non solo le auto devono riconoscere pedoni, semafori, segnaletica stradale o parcheggi, ma devono essere anche in grado di riconoscere la distanza a cui si trovano tali elementi. Pertanto, il concetto di percezione non si limita al riconoscere e classificare, ma anche al misurare per poi decidere, ad esempio, se accelerare o frenare.

Tutto ciò è possibile grazie a particolari sensori che quasi tutte le auto con questa funzionalità possiedono:

1. Telecamere
2. LiDAR
3. Radar

Andiamo a chiarire il funzionamento e lo scopo di questi tre strumenti.

Telecamere

Le telecamere hanno lo scopo di rilevare gli oggetti a distanza ravvicinata e di riconoscere la segnaletica verticale ed orizzontale. Hanno come obiettivi, la classificazione (riconoscimento di oggetti), la segmentazione e localizzazione.

Un'auto deve montare un sistema di telecamere che permetta una visione a 360 gradi dell'ambiente circostante ed ovviamente devono risultare di una risoluzione medio-alta per evitare disturbi o artefatti.

Durante le manovre di parcheggio il sistema di telecamere può fornire una vista panoramica per un miglior coordinamento della manovra.

Vi è però un grande difetto che le telecamere non possono risolvere: è la visione in condizioni atmosferiche particolari come nebbie, piogge o semplicemente la vista notturna. In condizioni estreme le videocamere non possono assicurare immagini affidabili e processabili dal sistema di bordo portando possibili casi di *misunderstanding* con gravi conseguenze. Per superare queste limitazioni si utilizzano particolari sistemi di radar.

LiDAR

LiDAR è l'acronimo di "Light Detection And Ranging" è un metodo per la misurazione della distanza di oggetti tramite la tecnologia laser. Un raggio laser viene inviato e viene calcolato il tempo che impiega il riflesso per tornare, in tal modo è possibile ricavare la distanza dell'oggetto su cui è riflesso [12].

Con la combinazione di telecamere e LiDAR l'auto è in grado di creare una rappresentazione 3D dell'ambiente circostante andando quindi ad aumentare l'efficacia e la sicurezza delle sue decisioni. Questa tipologia di radar percepisce quindi le informazioni spaziali e risulta molto utile nei casi di guida complessi, come incroci a più vie dato che può rilevare tutte le vetture coinvolte.

Ma anche questi sensori hanno dei limiti, dato che utilizzano raggi laser o di luce per effettuare le misurazioni, in condizioni atmosferiche particolari come nebbia e pioggia potrebbero restituire delle misurazioni errate a causa di riflessi accidentali con gocce d'acqua. È per questo che, oltre a telecamere e LiDAR, la strumentazione si arricchisce anche coi Radar.

Radar

Da tanti anni ormai il Radar è conosciuto ed utilizzato soprattutto in ambito militare: esso utilizza i segnali delle onde radio per calcolare la distanza. Dato l'utilizzo di onde radio anziché laser o luce, non presenta criticità in condizioni atmosferiche particolari.

Nonostante un vantaggio a livello teorico rispetto ai LiDAR, anche i Radar presentano dei limiti, tra cui il fatto di restituire risultati molto "rumorosi", registrando ostacoli quando in realtà non ve ne sono (Fig. 2). Ciò obbliga ad inserire un livello di soglia per filtrare i segnali.

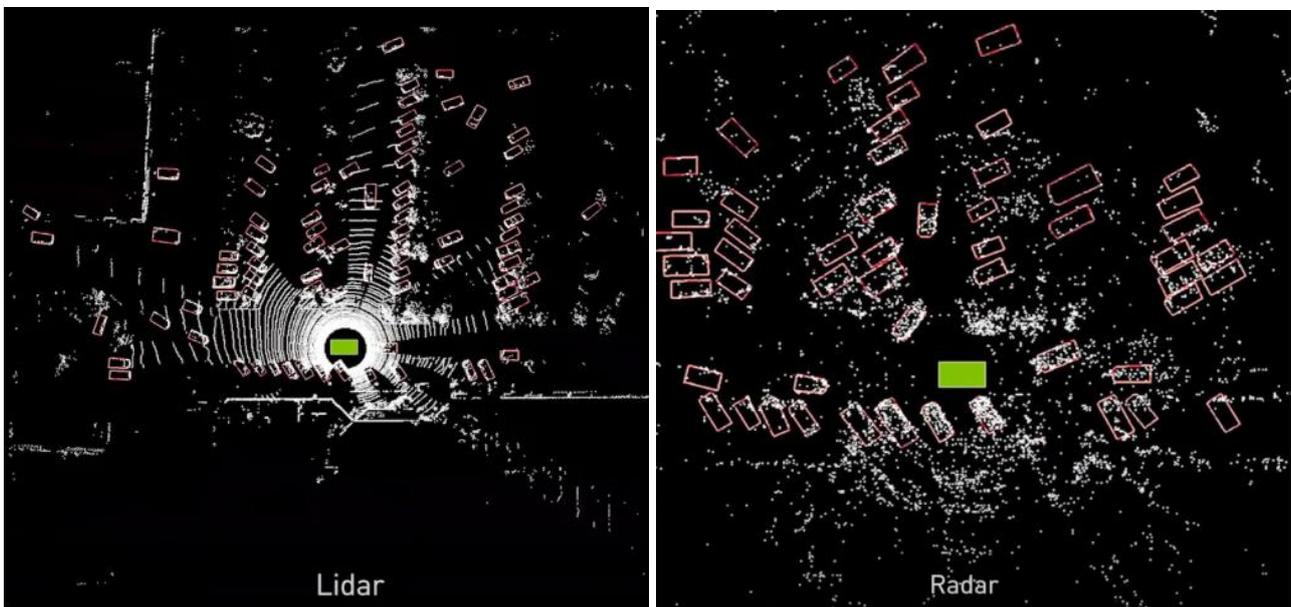


Fig. 2 Differenze delle rilevazioni tra Radar e LiDAR

2.3 Localizzazione

Altro concetto fondamentale è la *localizzazione* ossia come l'auto interpreta la sua posizione nell'ambiente, calcolando la posizione e l'orientamento [11]. Tutto ciò avviene grazie ad una pratica chiamata odometria visiva, una tecnica che usa sensori per stimare dove l'oggetto si trova nello spazio. Nell'ambito della guida autonoma la localizzazione tipicamente avviene facendo corrispondere certi punti chiave in fotogrammi consecutivi. Questi punti chiave vengono passati in input ad algoritmi di mappatura ambientale andando a calcolare la posizione e l'orientamento di ogni oggetto rispetto al frame precedente. Un modo per migliorare le prestazioni di odometria visiva è l'utilizzo di tecniche di deep learning per la classificazione di oggetti.

2.4 Predizione

In questa categoria, oltre che a particolari tecnici, occorre considerare anche il guidatore come persona, quindi analizzare i pensieri, le emozioni che si possono provare durante la guida e in momenti in cui occorre prendere una decisione [11]. Imparare, capire e prevedere quale può essere l'azione che un pedone o un altro guidatore andrà a fare, questo è uno degli obiettivi degli algoritmi di deep learning nella guida autonoma. I sensori restituiscono all'algoritmo tutte le immagini a 360 gradi dell'ambiente attorno al veicolo, esso dovrà andare ad "immaginare" tutti i possibili scenari che potrebbero verificarsi.

Ma è bene chiarire anche a livello più generale "Cos'è il deep learning?"

Il deep learning rappresenta una sottocategoria del machine learning, un insieme di tecniche basate su reti neurali organizzate in diversi strati, ogni strato calcola i valori per quello successivo in modo da raffinare ulteriormente l'informazione. Il deep learning è una tecnica di apprendimento in cui si espongono reti neurali a vaste quantità di dati, in modo che possano imparare a svolgere determinati compiti.

2.5 Capacità di decisione

Un'auto a guida autonoma deve essere in grado di prendere delle decisioni, ma deve anche considerare che non deve sempre ragionare in maniera precisa e calcolata [11]. L'ambiente intorno è popolato da altri guidatori e pedoni che potrebbero fare scelte irrazionali, non prevedibili da un sistema che segue uno schema fisso

Immaginiamo lo scenario classico di un incrocio, l'auto a guida autonoma dovrà prevedere in quale direzione andrà l'auto nell'incrocio e da ciò decidere quali manovre effettuare per evitare incidenti.

Riassumendo, la localizzazione consente all'auto di posizionarsi nell'ambiente e la predizione va a creare n possibili scenari e azioni, ora non resta che capire quale di questi scenari scegliere.

Per prendere delle decisioni si fa tipicamente uso di un algoritmo decisionale chiamato "processo decisionale di Markov (MDP)" [21].

Un processo è detto markoviano quando la decisione dipende soltanto dallo stato corrente S dell'agente (*Fig. 3*).



Fig. 3 Schema iniziale processo Markov

La variabile aleatoria è determinata dallo stato corrente. Ad ogni stato S sono associate delle azioni A e B che portano ad altri due stati futuri S' e S'' . In realtà ogni azione ha una probabilità di portare allo stato successivo S' o S'' , ma anche ad altri possibili stati peggiori S_x o S_y (*Fig. 4*).

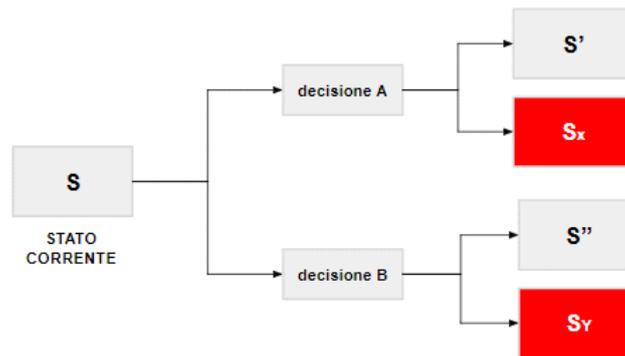


Fig. 4 Possibili stati dopo una decisione

In conclusione, l'agente che controlla quale decisione prendere deve decidere considerando sia la probabilità di successo che quella di eventuali rischi.

Nel processo decisionale di Markov vi è anche il concetto di ricompensa, sia negativa che positiva. Si ottiene una ricompensa positiva qualora si riesca a raggiungere l'obiettivo finale, la ricompensa negativa è la perdita di utilità o risorse conseguente a ogni decisione; viene anche detta *costo della decisione*.

La somma algebrica delle ricompense ottenute misura l'utilità delle decisioni, ma non vi è un unico metodo di calcolo per tale somma.

In altre parole, il sistema delle ricompense stimola l'efficienza delle decisioni e determina il grado di avversione al rischio dell'agente. Se il costo di ogni decisione è basso, l'agente è più spinto a intraprendere la strada più sicura, ma più lunga. Viceversa, se il costo di ogni decisione è alto, l'agente è disposto a rischiare di più per arrivare prima all'obiettivo.

In un contesto di guida autonoma è chiaro che la situazione sarà molto più complessa con la possibilità di avere n possibili stati futuri.

In generale un'auto dovrà seguire un processo decisionale costruito in modo gerarchico, processo da quattro macro-elementi.

- **Pianificazione del percorso**

L'auto dovrà calcolare il miglior percorso possibile da percorrere dalla sua posizione attuale sino alla destinazione. A tale scopo viene spesso utilizzato un algoritmo di ricerca euristica chiamato: Ricerca ad albero Monte Carlo (MCTS) [22].

- **Ricerca ad albero Monte Carlo (MCTS)**

La ricerca ad Albero Monte Carlo è un algoritmo di ricerca euristico utilizzato nel campo decisionale. Ha utilizzi soprattutto coi videogiochi con le AI nemiche e con giochi d'azzardo come il poker per prevedere il percorso che dovrebbe essere intrapreso per raggiungere la soluzione vincente finale.

Immaginiamo di avere un grafo ad albero (Fig. 5):

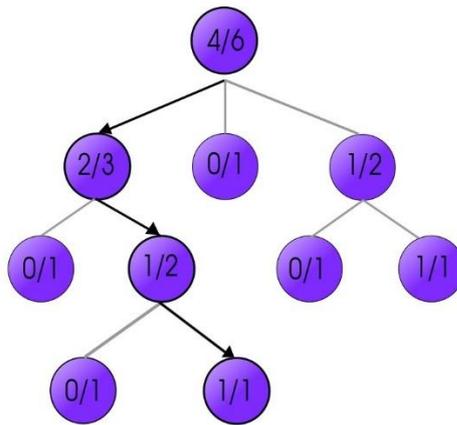


Fig. 5 Grafo ad albero iniziale, i valori X/Y indicano:

X: mosse con possibilità di vincita

Y: mosse complessive

Ogni passaggio dell'algoritmo MCTS è composto da quattro fasi:

1. **Selezione**
2. **Espansione**
3. **Simulazione**
4. **Aggiornamento**

Selezione

In questo passaggio si scorre l'albero in cerca del nodo avente la più alta possibilità di vincita (Fig. 5). Vengono quindi considerati:

- Al primo livello: 2/3, 0/1, 1/2. Viene scelto il nodo 2/3
- Al secondo livello, collegati al nodo scelto prima vi sono: 0/1 e 1/2. Viene scelto 1/2
- Al terzo livello: 0/1 e 1/1. Viene scelto 1/1

Espansione

Dopo aver selezionato il nodo migliore, l'espansione viene utilizzata per aumentare ulteriormente le opzioni nell'albero espandendo il nodo selezionato creandone di figli. In questo caso avendo scelto solo un nodo migliore sarà creato un nodo figlio 0/0 (Fig. 6).

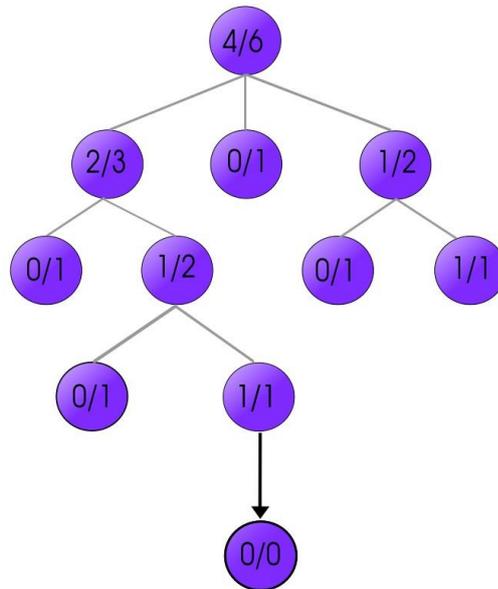


Fig. 6 Situazione del grafo dopo il passaggio di Espansione

Simulazione e Aggiornamento

Viene simulato un passaggio casuale, o mossa vincente (1/1) oppure mossa perdente (0/1). Nelle nostre ipotesi immaginiamo di essere nel caso fortunato quindi di una mossa vincente. Dopodiché sarà necessario aggiornare i valori anche dei nodi padre andando ad aggiungere un passaggio nelle Y e, in questo caso, un'unità nelle X dei casi vincenti (Fig. 7).

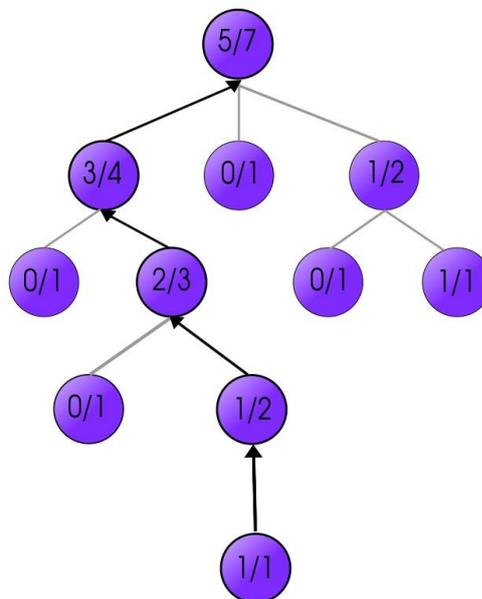


Fig. 7 Situazione del grafo dopo i passaggi di Simulazione e Aggiornamento

Dopo aver effettuato tutti i passaggi, il ciclo ricomincia effettuando di nuovo i passaggi di:

Selezione → Espansione → Simulazione → Aggiornamento

- **Comportamento arbitrario**

Dopo che l'auto ha pianificato il percorso dovrà procedere da sola verso la destinazione, sarà a conoscenza degli elementi statici sulla carreggiata (segnaletica, incroci, traffico...), ma non sarà in grado di sapere esattamente cosa faranno gli altri elementi dinamici presenti. Questa incertezza viene risolta utilizzando algoritmi probabilistici sulla realtà come il processo decisionale di Markov [11].

- **Pianificazione del movimento**

Il sistema di pianificazione del movimento dovrà lavorare in modo tale da garantire un viaggio il più possibile confortevole per i passeggeri del veicolo, andando ad agire sui movimenti dell'auto, come sterzate, frenate, accelerazioni e cambi di corsia, con lo scopo di renderli il più possibile piacevoli [11].

- **Controllo del veicolo**

Il meccanismo che attua a livello pratico il percorso calcolato nel passaggio di pianificazione del percorso. In pratica consiste nel seguire il percorso tracciato nel primo step [11].

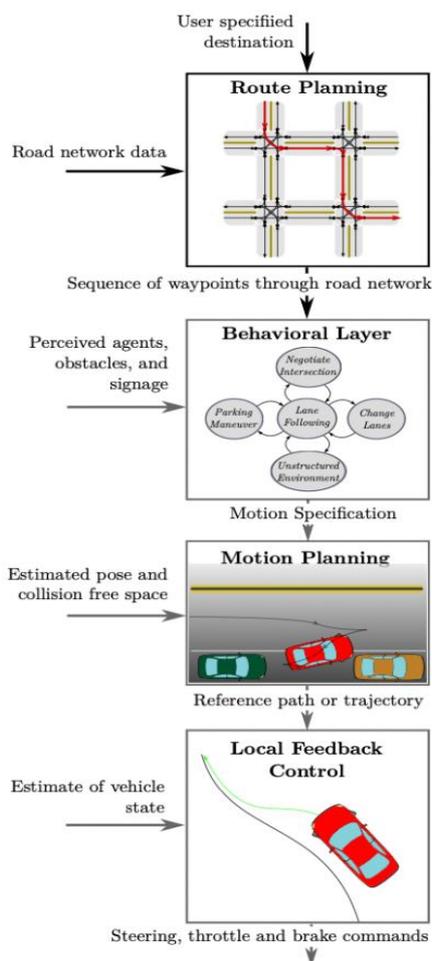


Fig. 8 Schema riassuntivo dei passaggi del processo gerarchico per le decisioni

2.6 Reti neurali

Un argomento che si ripresenterà spesso nel corso della trattazione sarà quello sulle reti neurali, uno strumento che ha rivoluzionato il modo di agire in certi ambiti come la ricerca scientifica e l'automotive. Ma esattamente cos'è una rete neurale?

Le reti neurali, anche note come ANN (Artificial Neural Network) sono un sottoinsieme del machine learning e sono alla base degli algoritmi di deep learning [25].

Le reti neurali artificiali sono formate da livelli di nodi che contengono un livello di input, uno o più livelli nascosti e un livello di output. Ciascun nodo si connette ad un altro ed ha un peso e una soglia associati. Se l'output di un nodo è al proprio valore di soglia, tale nodo viene attivato, inviando i dati al successivo livello della rete. Altrimenti, non viene passato nessun dato al livello successivo della rete (Fig. 9).

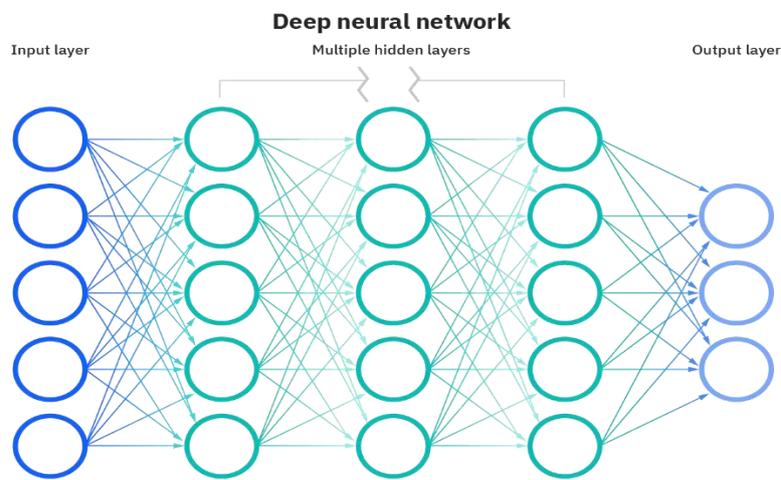


Fig. 9 Esempio di struttura di una rete neurale

Le reti neurali prima di essere sfruttate a pieno, necessitano di dati per l'addestramento in modo tale da migliorare l'accuratezza dei risultati nel tempo. Una delle reti neurali più famose è l'algoritmo di ricerca di Google.

Come funziona una rete neurale?

Immaginiamo una rete neurale come una funzione due valori in input ed uno in output, schematizzata come segue (Fig. 10):

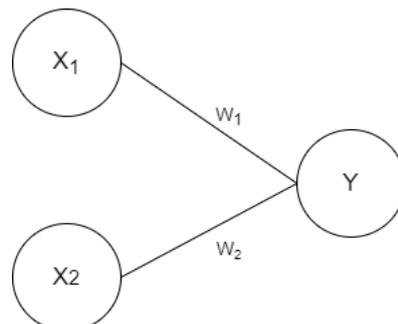


Fig. 10 Schema base di una rete neurale

Identifichiamo X_1 ed X_2 come le nostre variabili in input, W_1 e W_2 sono chiamati pesi e sono valori che aiutano a determinare l'importanza di una data variabile. Nel nostro caso se, ad esempio, ponessimo W_1 con un valore maggiore rispetto a W_2 vorrebbe dire che la variabile X_1 sarebbe più "importante" della variabile X_2 . Il valore viene assegnato manualmente ed è uno di quei valori che necessita dell'allenamento da parte della rete per arrivare ad un valore ottimale.

La rete neurale parte inizialmente con valori di pesi arbitrari, man mano che viene allenata con gli input del dataset di riferimento, questi valori vengono modificati fino ad arrivare ad un livello di accuratezza abbastanza sufficiente per ricevere dei valori veritieri in output.

La formula generica per arrivare al valore di Y sarebbe:

$$\sum_{i=1}^m w_i x_i + bias$$

Con m il numero di variabili in input e *bias*, un valore indipendente dai valori di input che serve a far compiere una traslazione sull'asse delle ascisse alla funzione di uscita. Anche il *bias* rientra nei parametri di allenamento, inizialmente viene posto a 0 solitamente e man mano che la rete viene allenata verrà variato anche il valore.

Successivamente questo valore Y viene passato ad una *funzione di attivazione* che determinerà l'output effettivo. Se tale output supererà una certa soglia, allora verrà attivato il nodo successivo al quale sarà dato in input l'output del nodo attuale, altrimenti il processo termina.

Un esempio di funzione di attivazione potrebbe essere:

$$output = f(y) = \begin{cases} 1 & \text{se } y \geq 5 \\ 0 & \text{se } y < 5 \end{cases}$$

Questo processo di passaggio dei dati da un livello a quello successivo definisce questa rete neurale come una rete feedforward.

Vi sono varie tipologie di reti neurali, ognuna dedicata a precisi compiti e campi. Nel mondo della guida autonoma le più utilizzate sono: CNN e RNN

- **CNN**

La Convolutional Neural Network (CNN) è una rete neurale artificiale usata per rilevare e riconoscere elementi data un'immagine [28]. Questa tipologia di rete neurale trova molti utilizzi in qualsiasi settore vi sia il bisogno di riconoscere degli elementi, ambito medico (come il rilevamento dei tumori), ma anche nella guida autonoma e in tanti altri settori.

La struttura di una CNN comprende: (*Fig. 8*):

- **Livelli convoluzionali**
- **Livelli di Pooling**
- **Livelli completamente connessi**

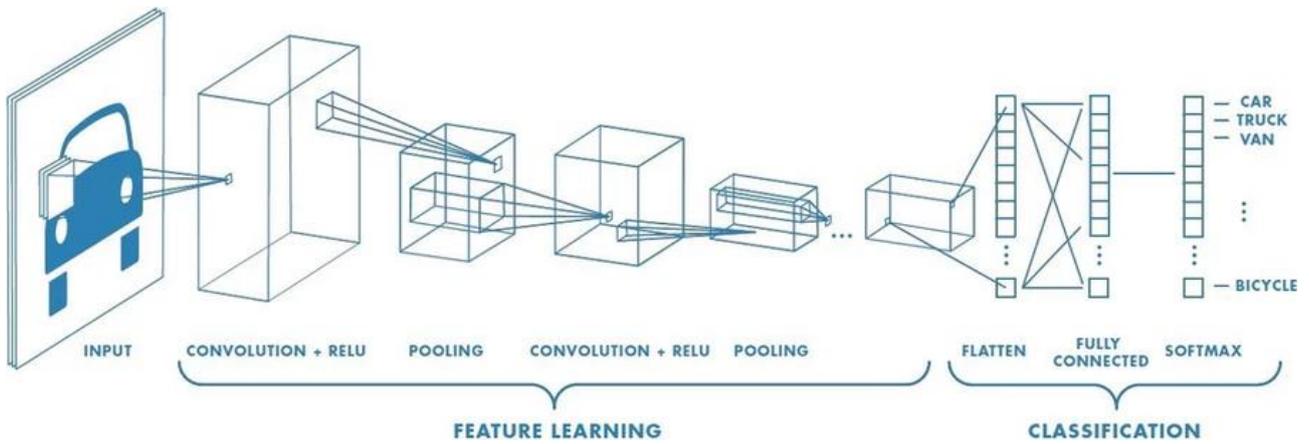


Fig. 8 Schema dei passaggi di una CNN

Livelli convoluzionali

Si tratta di livelli solitamente situati nella prima parte della CNN, in cui avviene appunto il processo di convoluzione. Presa un'immagine, essa viene considerata come una matrice di valori, viene applicato un filtro (o kernel) ottenendo così il risultato dell'operazione di convoluzione.

A livello matematico possiamo scriverla come:

Data un'immagine I ed un filtro F di dimensione $m \times m$ con $d = \frac{m}{2}$ allora avremo che l'immagine risultato I' sarà data da:

$$I'[y, x] = \sum_{i=-d}^d \sum_{j=-d}^d F[i, j] \cdot I[y - i, x - j]$$

con annotazione finale: $I' = I * F$

L'obiettivo dell'operazione di convoluzione è estrarre le caratteristiche di alto livello, come i bordi.

Pooling

La sua funzione è di ridurre progressivamente la dimensione dell'immagine risultante dalla convoluzione, detta Feature Map, per ridurre la quantità di parametri e di calcolo nella rete. Non ha parametri da impostare e può essere di diversi tipi: *max pooling*, *avg pooling* etc. (Fig. 11).

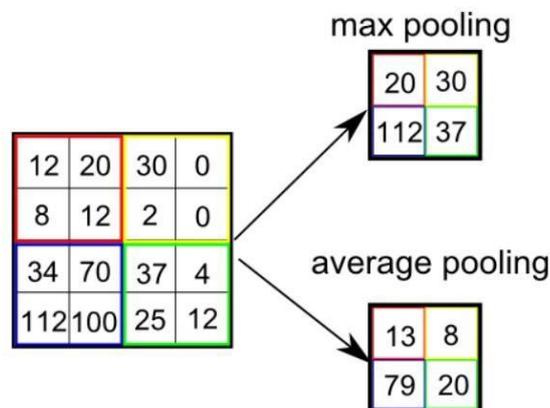


Fig. 11 Risultati differenti tra max pooling e average pooling

Di norma si utilizza un filtro di pooling di grandezza 2x2 con passo 2 con la tecnica di *max pooling* che consiste nel selezionare il valore maggiore della maschera analizzata. Si noti che il *max pooling* funziona anche come soppressore del rumore mentre l'*avg pooling* esegue solamente il ridimensionamento.

Più in generale un passaggio di pooling:

- Accetta una Feature Map: $W_1 \times H_1 \times D_1$
- Richiede due parametri:
 - Dimensione del filtro F
 - Il passo S
- Produce un risultato $W_2 \times H_2 \times D_2$ dove:
 - $W_2 = \frac{(W_1 - F)}{S + 1}$
 - $H_2 = \frac{(H_1 - F)}{S + 1}$
 - $D_2 = D_1$

Immaginiamo di applicare ad una feature map un filtro 2x2 con passo 2. Andiamo a far scorrere questo filtro lungo l'immagine lavorando in blocchi 2x2 andando a scegliere il valore più opportuno in base alla metodologia scelta.

Ad esempio, con una tecnica di *max pooling* (Fig. 12):

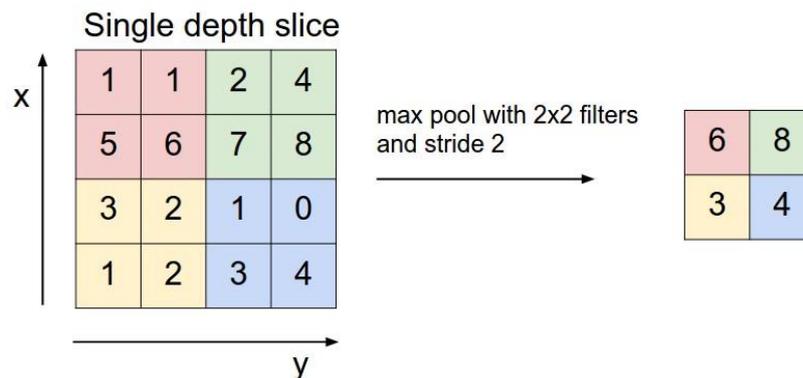


Fig. 12 Passaggi dell'applicazione di un'operazione di max pooling

Questa operazione aiuta parecchio l'intero procedimento dato che:

- Riduce le dimensioni per i passaggi successivi
- Riduce il carico di lavoro necessario per le elaborazioni
- Assicura l'affidabilità del risultato anche in caso di leggere trasformazioni nell'immagine di input dato che in genere si lavora con *max pooling* o *average pooling*
- Consente di arrivare ad una rappresentazione invariante dell'immagine ossia in cui è possibile rilevare gli elementi indipendentemente dalla loro posizione.

Livelli completamente connessi

Ora che abbiamo convertito la nostra immagine di input in una forma adatta, andremo ad appiattirla in un vettore colonna da passare poi ai nodi della rete neurale. Dopo una serie di passaggi la rete è in grado di distinguere le caratteristiche dominanti nell'immagine e classificarle tramite la tecnica di

classificazione Softmax. La tecnica Softmax assegna probabilità decimali a ciascuna classe in un problema multiclasse (Fig. 13).

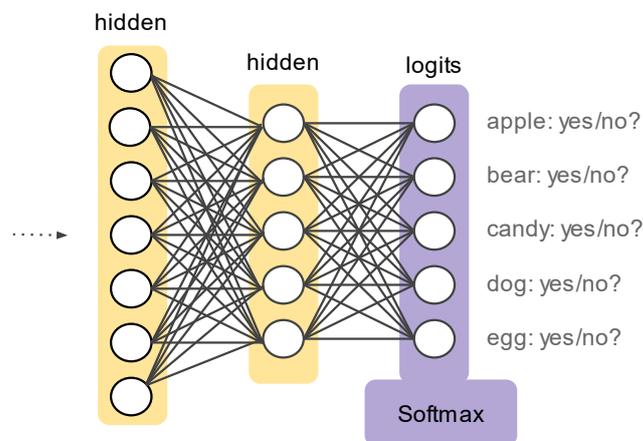


Fig. 13 Schema Softmax in una rete neurale

- **RNN**

Una rete neurale ricorrente (RNN) è una rete neurale in cui esistono cicli ricorsivi: i valori di uscita di un layer di livello superiore (più vicino all'uscita) vengono utilizzati come ingresso per un layer di livello inferiore (più vicino all'ingresso) [23].

Nelle reti neurali tradizionali tutte le uscite e le entrate sono indipendenti, nel caso delle reti neurali ricorrenti l'output dei passaggi precedenti viene immesso nell'input dello stato corrente (Fig. 14).

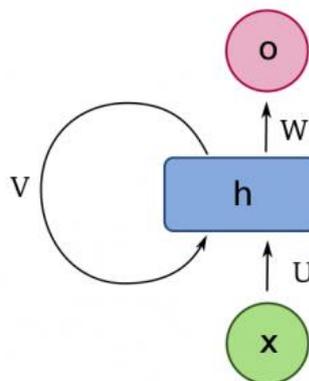


Fig. 14 Schema fondamentale di una RNN

Un semplice ciclo permette quindi alla rete di avere una forma di memoria degli ingressi passati ciò permette di gestire in maniera corretta situazione già vissute in precedenza, situazioni dove i risultati dipendono dal contesto.

Ma il sistema di "memoria" di una RNN è più complesso del previsto [24]. Certe volte necessitiamo di guardare solo le informazioni recenti per eseguire l'attività attuale. Ad esempio, consideriamo una RNN che ha il compito di predizione linguistica ossia che data una frase inconclusa riesca a trovare una/le parola/e per completarla. Immaginiamo di dover prevedere l'ultima parola nella frase: "le

nuvole sono nel cielo”. In un caso del genere non necessitiamo di un contesto complesso e possiamo intuire che molto probabilmente la parola da inserire sia *cielo* (Fig. 15).

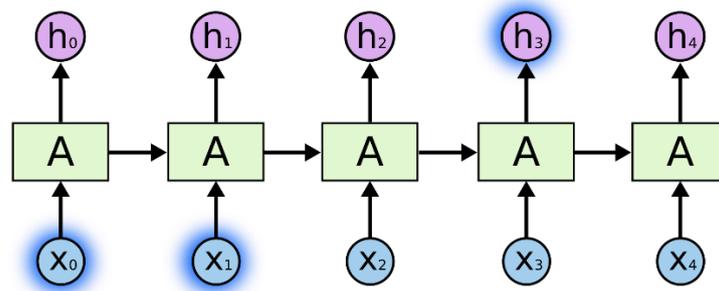


Fig. 15 Passaggi di una RNN nell'ipotetico scenario di un contesto di semplice interpretazione

Ma ci sono casi in cui è necessario analizzare un contesto più complesso. Proviamo a prevedere l'ultima parola nella frase: “*Sono cresciuta in Francia [..], parlo correttamente il francese*”. L'idea che la parola sia riferita ad una qualche lingua risulta facile come interpretazione, ma per avere un ristretto bacino di lingue tra cui scegliere bisogna risalire più indietro alla parte in cui si dice “*sono cresciuta in Francia*”. Purtroppo, però questa informazione è salvata in una parte troppo lontana della rete rispetto al blocco da completare (Fig. 16).

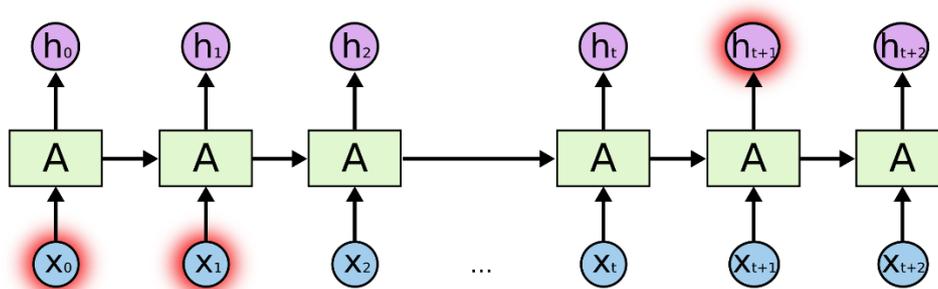


Fig. 16 Problema di interpretazione di una soluzione a causa dall'eccessiva distanza rispetto al contesto ideale

Ed è per risolvere questa problematica che sono state create le reti di memoria a lungo termine (LSTM) e Gadget Recurrent Unit (GRU) che può essere vista come una versione più semplificata di LSTM.

3. Tesla Full Self-Driving

3.1 Storia

Tesla Motors nasce nel 2003 per mano di Martin Eberhard e Marc Tarpenning, il nome è in onore di Nikola Tesla inventore della turbina del motore [35]. Mentre sono alla ricerca di investitori interessati al loro progetto, incontrano e attirano una figura importante e facoltosa come Elon Musk. È lo stesso Musk a gestire i primi cicli di finanziamenti, riuscendo ad accumulare oltre 180 milioni di dollari in 5 anni.

Nel 2008 Musk inizia a ricoprire la figura di CEO dell'azienda e a raccogliere altri finanziamenti per milioni di dollari, a tal punto che nel giugno 2009 Tesla Motors riceve un finanziamento da 500 milioni di dollari direttamente dal governo USA. Questo finanziamento tornerà utile per lo sviluppo della prima auto marchiata Tesla Motors: la Tesla Model S.

Nel giugno 2010 Tesla viene quotata a Wall Street dove attira ingenti correnti di investitori arrivando a raccogliere più di 200 milioni di dollari.

Nel 2012 iniziano le consegne delle Model S, viene annunciato un nuovo modello SUV la Model X e l'inizio della costruzione di una rete di ricarica Supercharger, partendo dalla California.

Col passare degli anni Tesla continua a crescere arrivando a vendere più di 30 mila veicoli nel 2014, 50 mila nel 2015 e più di 60 mila nel 2016, ma il vero boom di vendite lo si ha con l'annuncio dell'economica Tesla Model 3, per la quale si registreranno più di 200 mila preordini.

Imponenti anche gli investimenti per la creazione di "giga-fabbriche" necessarie per la creazione delle auto e delle batterie, nonché di acquisizioni di aziende terze specializzate nell'ambito elettrico, AI, semiconduttori e fotovoltaico.

Nel 2017 Tesla arrivò a superare Ford e General Motors a livello di capitale diventando l'azienda automobilistica di maggior valore negli USA.

Nel 2019 si ha la presentazione del nuovo pick-up marchiata Tesla, chiamato Cybertruck (*Fig. 1*).



Fig. 1 Modello di Tesla Cybertruck

3.2 Single-Cam Object Detection

Il sistema di guida autonomo di Tesla può essere suddiviso in più moduli, ognuno con un preciso compito con lo scopo finale di andare a creare uno spazio vettoriale 3D dell'ambiente che circonda l'auto, etichettando e riconoscendo segnaletica, linee, semafori, automobili etc. Tutto questo avviene facendo uso di complessi sistemi di reti neurali [17].

Il design di questa sezione di "trasformazione" da immagini a spazio vettoriale tridimensionale è stato ispirato dallo studio della visione umana e animale, quindi con un input (gli occhi), passaggi intermedi (retina e strati di corteccia cerebrale) per poi arrivare ad una visione effettiva.

Le immagini delle telecamere Tesla provengono da 8 telecamere con dati video in formato raw con risoluzione di 1280x960, 12 bit HDR, 36Hz. Come già accennato nei capitoli precedenti non vi sono né Radar né LiDAR.

Partiamo dal blocco fondamentale, il riconoscimento di oggetti a partire dalle immagini di una singola telecamera. Tale blocco può essere diviso in tre parti:

- **Spina dorsale (Backbone)**
- **Testa (Detective Head)**
- **Collo (Neck)**

I passaggi di elaborazione sono in ordine (Fig. 2):

Input → Spina dorsale → Collo → Testa → Output

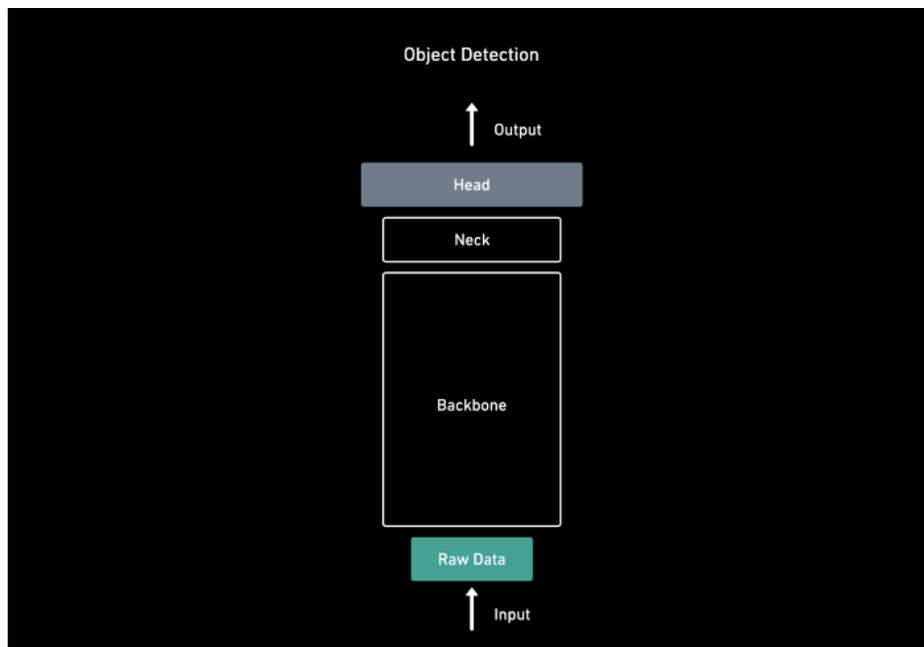


Fig. 2 Passaggi dall'input al riconoscimento oggetti

Le tecniche e gli algoritmi che vengono utilizzati in ogni sezione sono (Fig. 3):

- Spina dorsale: RegNet
- Collo: BiFPN
- Testa: HydraNet

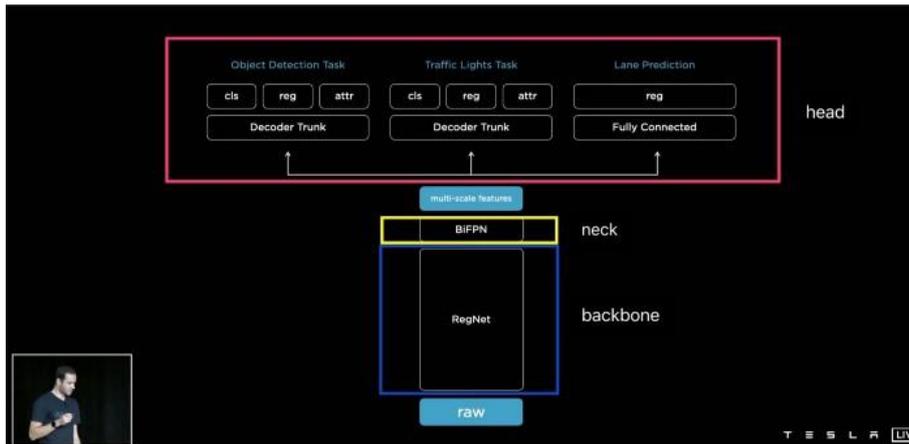


Fig. 3 Dettagli della struttura di elaborazione

Andiamo ad approfondire ognuna di queste sezioni:

Spina dorsale

Riguarda la rete neurale addestrata all'estrazione degli oggetti, al loro riconoscimento ed alla restituzione di dettagli rispetto alle loro funzionalità, il tutto partendo da un'immagine.

Nel caso di Tesla si utilizza la rete neurale convoluzionale chiamata RegNet, il cui schema architetturale è il seguente (Fig. 6):

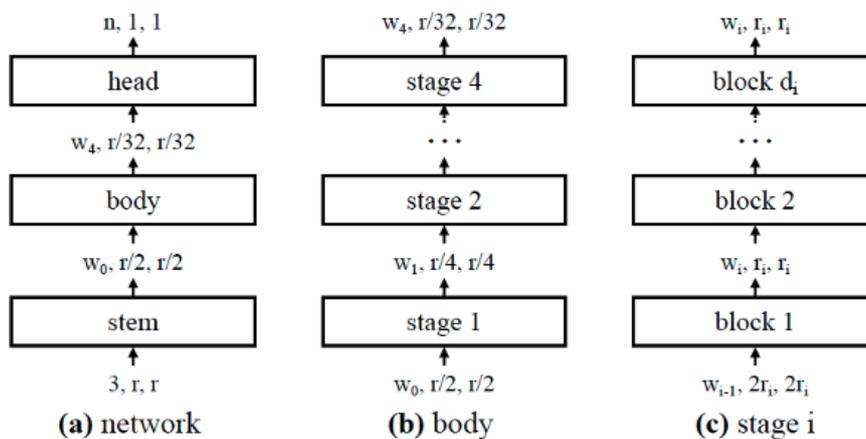


Fig. 6 Architettura di una RegNet

Vi sono tre passaggi principali:

- **Stem:** un'operazione di convoluzione dell'immagine in input, con:
 - Dimensione del kernel = 3
 - Stride = 2 (la velocità di traslazione del kernel sull'immagine, in pixel verticali e orizzontali)
 - $W_0 = 32$ canali di output

- **Body:** il fulcro di calcolo della RegNet, è composto da quattro stage che operano a risoluzioni progressivamente ridotte. Ogni stage è formato da una sequenza di blocchi identici.
- **Head:** prevede le n classi di riconoscimento per l'output.

Occorre approfondire più nel dettaglio le operazioni che avvengono in ogni blocco x (Fig. 7):

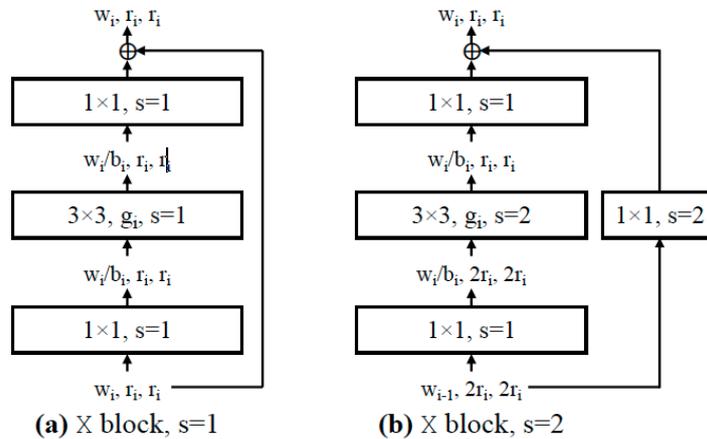


Fig. 7 Passaggi di un blocco X , con $stride = 1$ oppure $stride = 2$

Il procedimento di ogni blocco X è basato sul concetto di collo di bottiglia residuo standard con convoluzione di gruppo.

Il blocco di bottiglia residuo è una tecnica utilizzata per ridurre i numeri di parametri ed il numero di moltiplicazioni tra matrici. L'operazione consiste nell'eseguire due convoluzioni 1×1 con in mezzo una convoluzione di gruppo 3×3 . Le operazioni 1×1 hanno il compito di ridurre e ripristinare le dimensioni della matrice, questo permette all'operazione 3×3 di operare su una matrice meno complessa (Fig. 8).

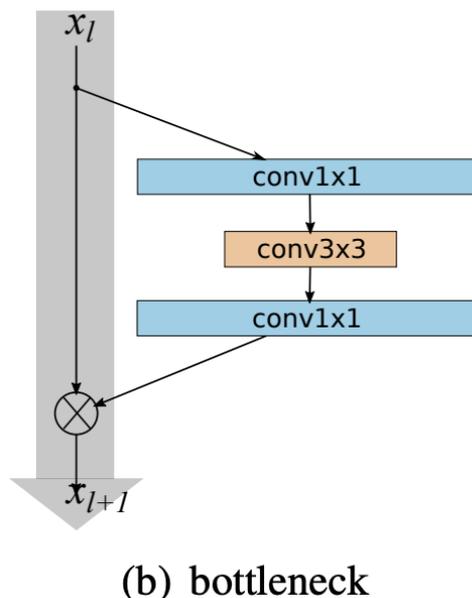


Fig. 8 Passaggi di un'operazione di collo di bottiglia residuo

In una convoluzione standard (Fig. 9, (a)), il kernel viene mantenuto intero per effettuare l'operazione sull'immagine. In una convoluzione di gruppo (Fig. 9, (b)), con due gruppi G , ogni metà del kernel viene applicato ad ogni metà dell'input consentendo una riduzione dei parametri utilizzati [26].

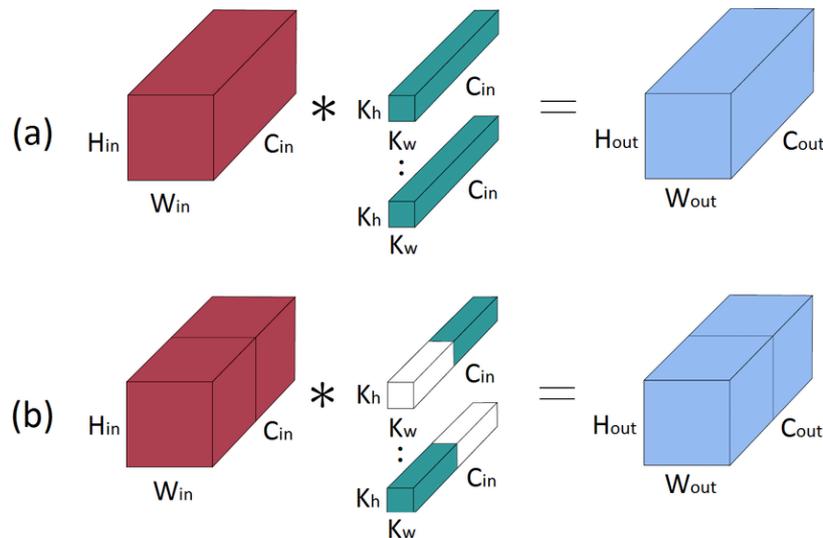


Fig. 9 Schema della struttura dell'operazione di convoluzione standard (a) vs convoluzione di gruppo (b)

Al termine degli step della RegNet, si avranno una serie di *feature* aventi risoluzioni e scale diverse: queste *feature* saranno passate al livello successivo.

Collo

Dopo aver passato lo step della spina dorsale, seguendo la sequenza delle operazioni, arriviamo al collo dove si fa uso delle *reti piramidali di caratteristiche (FPN)* (Fig. 10).

Prima della pubblicazione dell'articolo in cui per la prima volta si parla di FPN, avvenuta nel 2017, la maggior parte degli algoritmi riconoscitori basati su deep learning, effettuavano il riconoscimento solo sulle caratteristiche (*feature*) ottenute dagli ultimi livelli della rete neurale.

Prima dell'avvento degli algoritmi di deep learning, si riteneva che per estrarre le *feature* dall'immagine fosse necessario utilizzare la stessa immagine, ma con risoluzioni diverse (Fig. 11, (a)).

Con la crescita dell'utilizzo delle reti convoluzionali, il modello precedente fu abbandonato in quanto con questa nuova tecnologia era possibile ottenere le *feature* dell'immagine a partire da un'unica risoluzione di input (Fig. 11, (b)), anche se risultava abbastanza carente a livello di accuratezza.

Quindi si è pensato di ottenere le *feature* dell'immagine non solo dall'ultimo livello della rete/piramide, ma anche da quelli intermedi (Fig. 11, (c)). Questa tecnica però va a fare previsioni anche sull'immagine quando possiede scarso valore semantico, andando quindi a compromettere l'accuratezza del riconoscimento.

La tecnica FPN proposta nel documento del 2017 [1], consiste nel partire dalla *feature map* di minor risoluzione, ma con elevato valore semantico (quella ottenuta all'ultimo livello della rete/piramide), andandola a concatenare con la *feature map* del livello successivo della piramide che possiede una risoluzione maggiore, ma minor valore semantico (Fig. 11, (d)). Si procede così fino ad arrivare alla base della piramide. Il risultato finale sarà una piramide di *feature*, ricca di valore semantico ad ogni livello, senza la necessità di ridimensionare l'immagine.

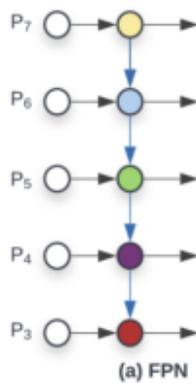


Fig. 10 Schema di una FPN

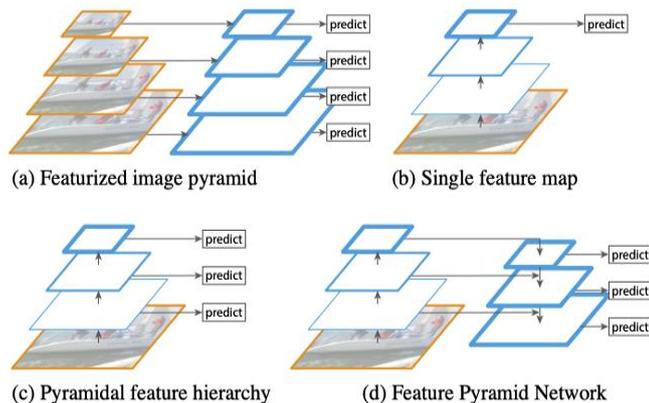


Fig. 11 Varie tecniche di riconoscimento nelle reti piramidali

L'algorithmo utilizzato da Tesla nella sua guida autonoma è una versione avanzata basata su FPN, chiamato BiFPN (Fig. 12). Questo nuovo algoritmo bidirezionale, descritto da Google Research nel 2019 [2], va a migliorare l'algorithmo base FPN facendo:

1. Dopo la concatenazione delle *feature map* dall'alto verso il basso, viene effettuata nuovamente la concatenazione dal basso verso l'alto
2. Quando vengono concatenate le *feature map* si può notare che le due *map* risultano di risoluzioni differenti, andando a contribuire all'output in modo diseguale. Viene quindi aggiunto un peso aggiuntivo per ogni input.

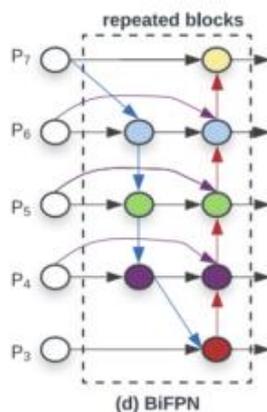


Fig. 12 Schema di una BiFPN

Testa

Dopo il passaggio per la spina dorsale con BiFPN, arriviamo alla testa che sarà composta da più teste, da qui il nome HydraNet con un riferimento alla creatura mitologica Hydra avente più teste in un unico corpo, ognuna specifica per una certa attività.

Per esempio, quando si richiederà di rilevare un'auto nell'immagine, verrà utilizzato un algoritmo di rilevamento simile a YOLO (You Look Only Once), in grado però di riconoscere un numero maggiore degli 80 tipi di oggetti di YOLO, oltre a individuare la loro posizione data un'immagine.

Ogni testa dell'HydraNet sarà specializzata nel riconoscimento di una specifica categoria di oggetti, in tre macrocategorie: oggetti, segnali luminosi, carreggiate e segnaletica orizzontale.

Questa architettura permette di ridurre i calcoli di convoluzione ripetitivi e di migliorare il riconoscimento degli oggetti, essendo presente una ramificazione per macrocategorie anziché un unico blocco.

Al momento però secondo questa spiegazione, è possibile elaborare soltanto da una singola immagine di input, ma il sistema Tesla è formato da 8 telecamere, in che modo è possibile ampliare questo meccanismo per funzionare con più immagini?

3.3 Vector Space & Memory

Tesla ha ritenuto necessario la creazione di uno spazio tridimensionale a partire dalle immagini delle otto telecamere, chiamato *Vector Space* [18]. In questo spazio 3D vi saranno le informazioni del veicolo e dello spazio in cui si trova che verranno digitalizzate e visualizzate.

Vi sono però due problematiche da affrontare:

- Come prevedere le aree occluse da un ostacolo,
- Gestire oggetti che si estendono su più di una telecamera.

L'idea per agire su queste situazioni è quella di raccogliere tutte le immagini in input ed inserirle in una rete neurale per poi creare lo spazio vettoriale.

C'è da considerare che i parametri delle otto telecamere sono diversi: la lunghezza focale, la profondità di campo, la posizione etc. Lo stesso oggetto appare diverso nelle diverse camere ciò ovviamente va ad intaccare l'elaborazione dell'ambiente. Perciò è necessario "standardizzare" le otto telecamere in una unica telecamera virtuale.

A tale scopo viene applicata la cosiddetta "rettifica dell'immagine" che consiste in un processo utile a proiettare n immagini su un piano immagine comune.

Un altro importante fattore da tenere in considerazione è il tempo. Oltre a rilevare gli oggetti, la segnaletica o gli altri veicoli, è necessario vedere come queste entità interagiscono con l'ambiente. Ad esempio, è necessario prevedere se un'auto rilevata nelle telecamere è in movimento oppure no, quanto è veloce. Pertanto, è necessario che il sistema abbia una memoria di come gli oggetti si stanno comportando nell'ambiente.

Dopo svariate ipotesi, si è deciso di implementare due moduli nell'architettura della rete neurale: un modulo avente la funzione di coda che memorizzerà n frame nel tempo ed un modulo video che fonderà temporaneamente questi frame. Oltre alle informazioni delle otto telecamere, vi si aggiungeranno anche i dati della cinematica dell'auto: velocità ed accelerazione.

Vi sono fondamentalmente tre code: Ego Kinematics, Multi-Cam Features e Positional Encoding che verranno concatenate in una unica coda che andrà a formare il modulo video temporaneo (*Fig. 13*).

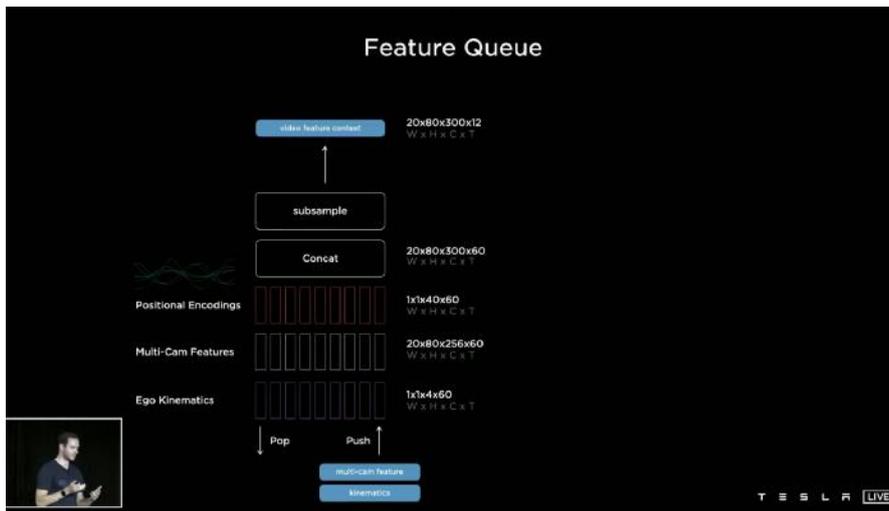


Fig. 13 Passaggi dalle immagini e cinematica al blocco video per interpretare i movimenti

La gestione di queste code avviene secondo la classica gestione FIFO (First In First Out), ma il vero problema è quando inserire i dati in queste code?

Esistono due politiche di gestione dell'aggiornamento delle: coda basata sul tempo (Memorizza le informazioni sulle serie temporali) e coda basata sullo spazio (Memorizza le informazioni sullo spazio).

Immaginiamo una situazione ad un incrocio: generalmente vi sono momenti in cui certe auto sono visibili, poi vengono momentaneamente coperte alla vista da altre auto, per poi ritornare visibili. La nostra auto dotata di guida autonoma deve ricordarsi che una macchina è ancora presente nell'incrocio anche se in quell'istante è nascosta alla vista. Ed è qui che torna utile una coda basata sul tempo, in quanto consente alla rete neurale di "ricordarsi" anche la presenza del veicolo nascosto (Fig. 14). L'intervallo di tempo utilizzato per aggiornare tali code è 27 millisecondi, dato derivato dalla frequenza di 36Hz del kit di telecamere.

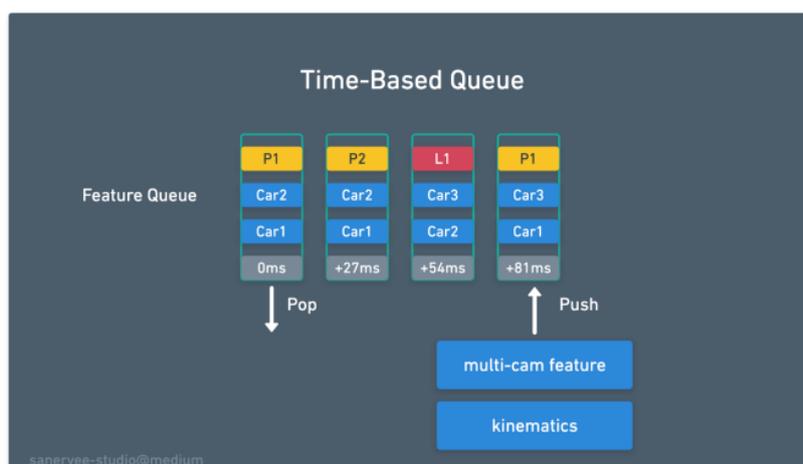


Fig. 14 Spiegazione grafica della coda basata sul tempo

Sempre considerando lo scenario dell'incrocio, è necessario sapere anche dove ci si trova a livello senso di marcia, se ci si trova in una corsia di svolta oppure una corsia che prosegue dritto. Se ci si

basasse solo su una coda temporale, non si riuscirebbe a gestire adeguatamente queste informazioni, per questo si utilizza anche una coda basata sullo spazio, con un aggiornamento ogni metro percorso (Fig. 15).

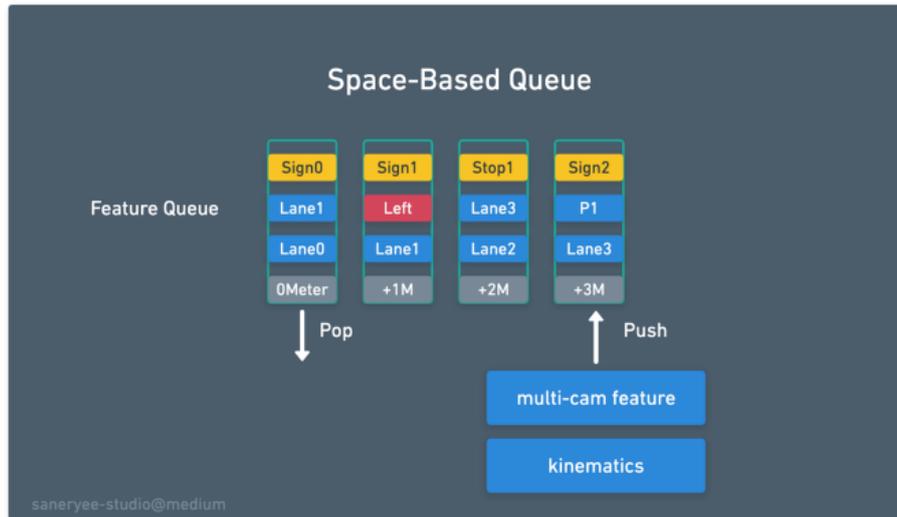


Fig. 15 Spiegazione grafica della coda basata sullo spazio

Per andare a creare il modulo video ci sono una serie di metodologie utili a fondere le informazioni provenienti dalle tre code, il team Tesla ha deciso di adottare una rete neurale ricorrente (RNN) [23].

Nel sistema RNN di Tesla si è deciso di adottare una rete GRU essendo più efficiente e richiedente meno parametri di lavoro. Quando l'auto è in movimento la RNN aggiorna soltanto le parti vicino all'auto e dove l'auto ha visibilità (Fig. 16).

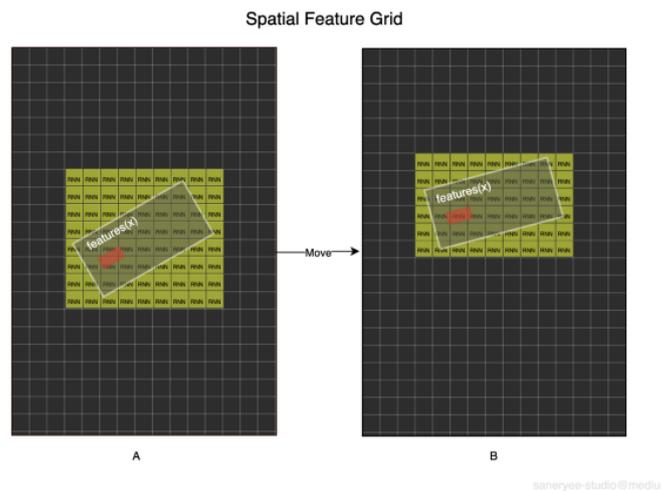


Fig. 16 Durante un movimento A – B saranno aggiornati soltanto i blocchi RNN presenti nell'area (rettangolo bianco) della vettura (rosso)

Durante le sessioni di test sia al simulatore che su strada, si è rilevata una enorme efficienza ed efficacia del sistema RNN spaziale in quanto permette:

- Il miglioramento dell'analisi dell'ambiente nel caso di occlusione,
- Maggiore efficienza computazionale

In conclusione, possiamo riassumere il sistema di analisi di immagini e di interpretazione dell'ambiente da 2D a 3D col seguente grafico (Fig. 17).

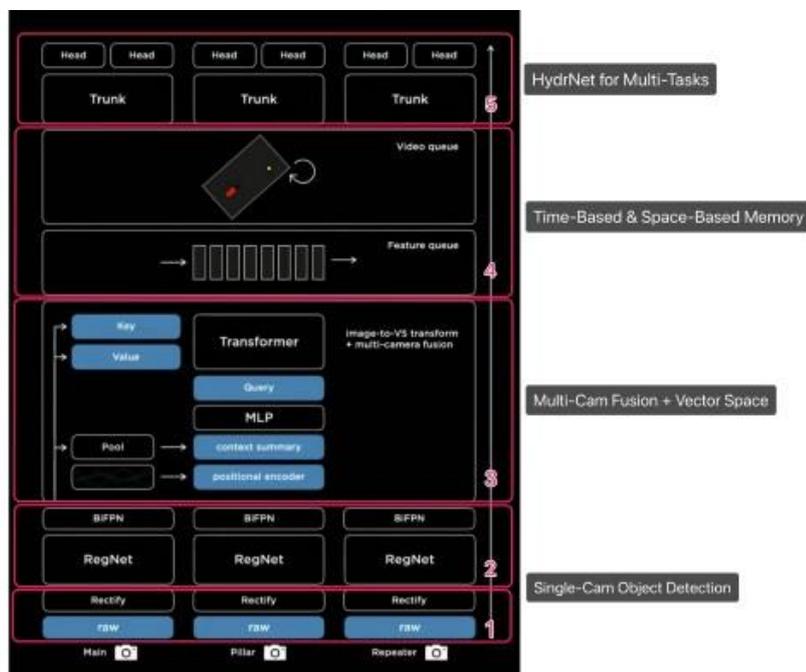


Fig. 17 Schema completo coi passaggi da un input di immagini raw al riconoscimento di oggetti in uno spazio vettoriale

In sintesi, i passaggi del sistema Tesla Vision sono:

1. Immagini Raw provenienti dalle telecamere passano attraverso il livello di rettifica per correggere la calibrazione della camera ed inserire il complesso in un'unica fotocamera virtuale.
2. Il risultato del passo precedente; viene processato dalle ResNet per elaborarlo in una serie di *feature* su scale diverse e fondere le informazioni multiscala con BiFBN.
3. Un modulo trasformatore per rappresentare il tutto in uno spazio vettoriale.
4. Code basata sullo spazio e sul tempo che sono elaborate da un modulo video come RNN spaziale.
5. Il risultato finale giunge al livello dell'HydraNet con più "teste", ognuna dedicata ad un preciso compito di riconoscimento.

A livello grafico possiamo schematizzare i cinque passaggi: come mostrato in Fig. 18.

Tesla Vision Technology Stacks



saneryee-studio@medium

Fig. 18 Stack riassuntivo dei passaggi del sistema di visione del sistema Tesla Full Self-Driving

3.3 Planning & Control

Dopo aver creato uno spazio vettoriale 3D, il prossimo step è quello di indicare all'auto quali percorsi scegliere e quali manovre compiere per arrivare a destinazione cercando di massimizzare sicurezza, comfort ed efficienza.

Il problema chiave in questa pianificazione è che lo spazio in cui agire è sia un problema non convesso che con un ampio dominio [19].

Con “non convesso” indichiamo un problema che possiede più soluzioni possibili, ma dove è piuttosto difficile ottenere la soluzione globalmente migliore. Possono esserci zone di minimi locali in cui l'operazione di pianificazione di una manovra può rimanere bloccata (*Fig. 1*).

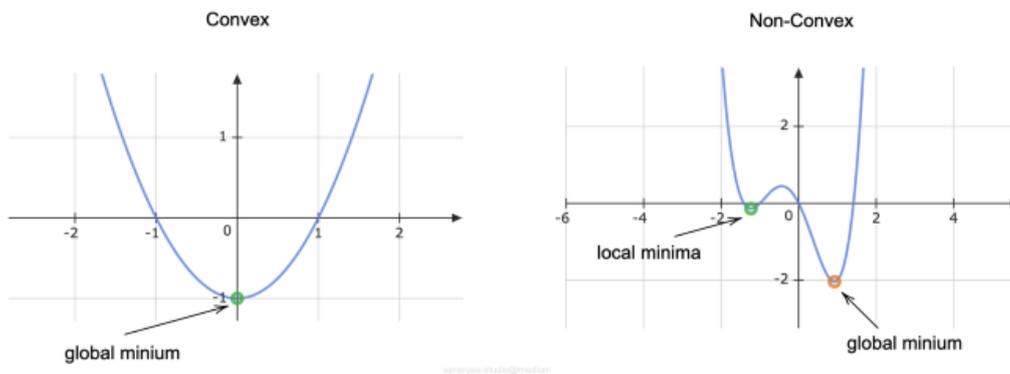


Fig. 1 Differenze sul piano cartesiano tra una funzione convessa ed una non-convessa

L'ampio dominio è dovuto dal fatto che l'auto deve pianificare le mosse per i prossimi 10-15 secondi andando ad ipotizzare velocità, accelerazione e posizione. Facile capire che si parla di una mole di dati e di una computazione molto pesanti.

Per risolvere situazioni del genere di norma esistono due soluzioni: metodi di ricerca discreti e ottimizzazione continua della funzione.

Nel caso dei metodi di ricerca discreti, essi risultano molto adatti alla soluzione dei problemi non-convessi dato che non vanno a bloccarsi nel caso di scoperta di un minimo locale, ciò però avviene andando ad esplorare ogni punto della funzione ed in funzioni con domini molto estesi risulta poco efficiente.

La soluzione di ottimizzazione continua della funzione risulta molto indicata con funzioni aventi un dominio molto esteso dato che utilizza metodi basati sul calcolo del gradiente, ciò ne assicura una buona efficienza e la sicurezza che non vi si blocchi nei minimi locali.

La soluzione adottata da Tesla è di “scomporre” lo spazio di azione andando prima ad utilizzare un metodo di ricerca per ridurre la non-convessità della funzione e poi utilizzare tecniche di ottimizzazione continua per rendere la traiettoria finale dell'auto più uniforme.

Analizziamo un possibile scenario come può essere un percorso con degli ostacoli per raggiungere un parcheggio (*Fig. 2*).

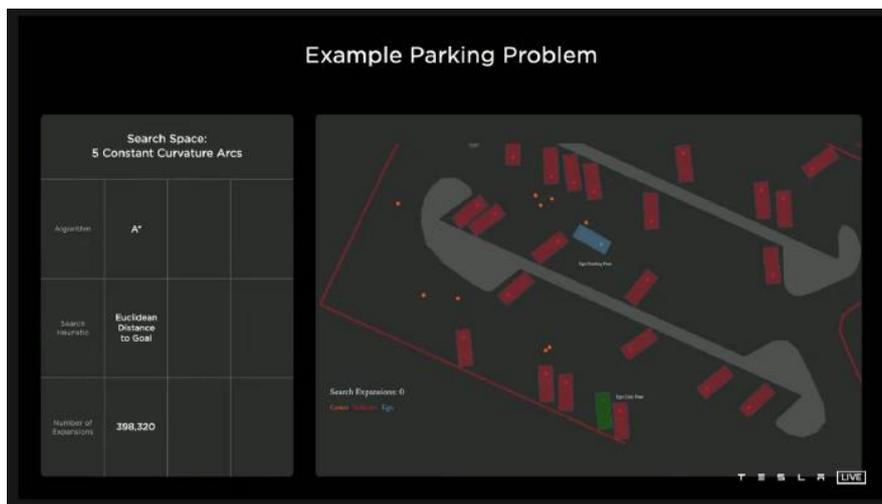


Fig. 2 Esempio di un problema di parcheggio con ostacoli nel percorso. In verde il traguardo ed in blu la nostra vettura

Una prima ipotesi può essere l'utilizzo di una semplice funzione euristica basata sulla distanza euclidea dal traguardo. Facile capire che a livello di efficienza è molto scadente con più di 400.000 passaggi necessari per trovare il minimo locale migliore (Fig. 3).



Fig. 3 Situazione con l'utilizzo di una funzione euristica basata su distanza euclidea

Una seconda ipotesi può essere quella di aggiungere un percorso di navigazione in modo da indicare un percorso ideale verso il traguardo. Questo aiuta la percorrenza quando non si incontrano ostacoli, ma in caso di ostruzioni lungo il percorso si ritorna nella prima ipotesi, il tutto costerebbe circa 22.000 passaggi (Fig. 4).

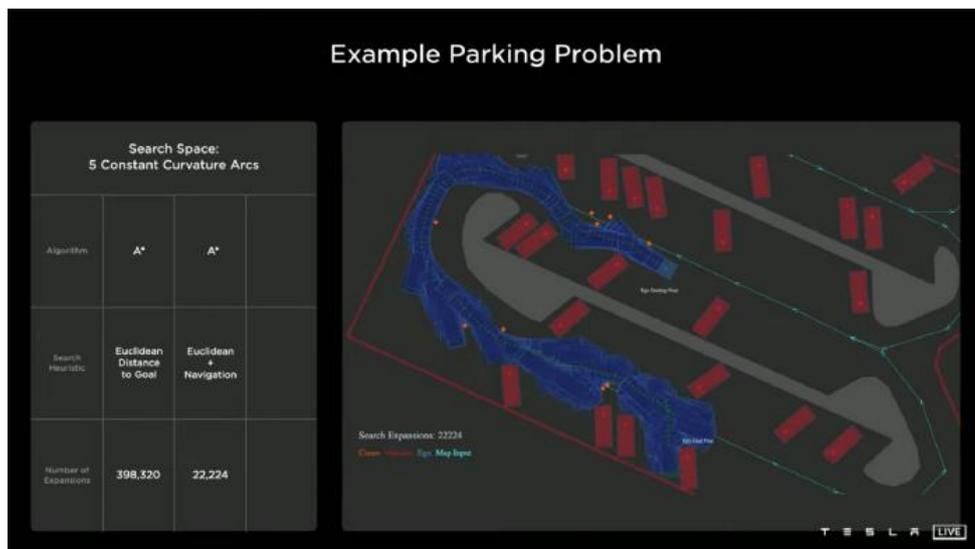


Fig. 4 Situazione con l'inserimento di un'idea di percorso per raggiungere il traguardo

La terza ipotesi, quella migliore, consiste nell'utilizzo di un algoritmo di ricerca euristica e in questo ambito il miglior algoritmo applicabile è la ricerca ad albero Monte Carlo (MCTS) [22]. Tale soluzione richiede solo 228 passaggi per arrivare alla soluzione.

Tornando all'analisi sul sistema Tesla, il team ha ingegnerizzato una rete neurale che grazie anche alla ricerca ad albero di Monte Carlo, adattata al loro scopo, riesce a creare una funzione che permetta di trovare i minimi globali consentendo all'auto di percorrere il percorso migliore per raggiungere il traguardo.

Ecco lo schema finale dell'architettura di guida autonoma di Tesla: (Fig. 8)

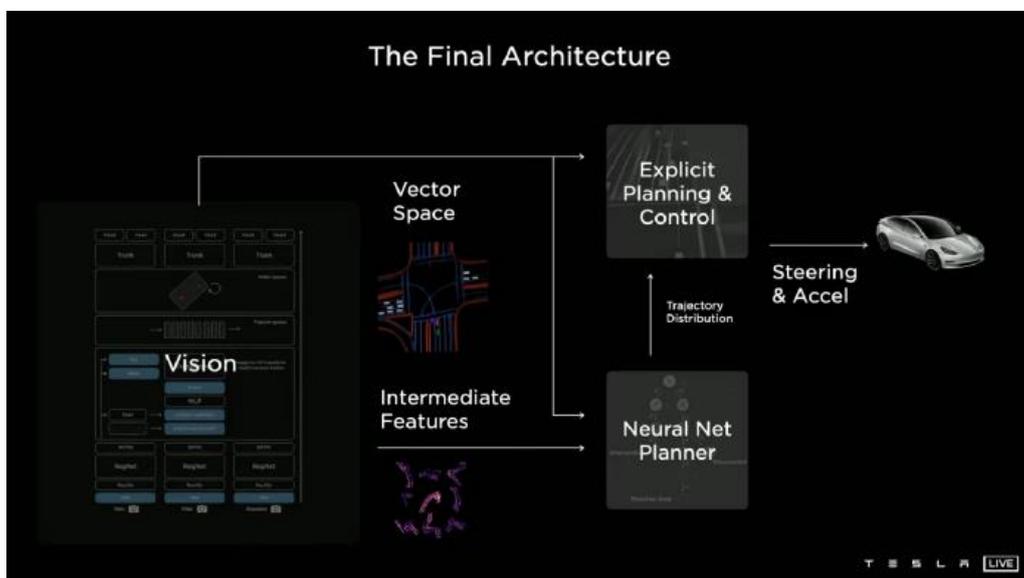


Fig.8 Struttura finale del sistema di guida autonoma di Tesla

3.4 Data Labeling

Tutto questo sistema però necessita di allenamento prima di essere efficiente ed operativo al 100% [20]. In che modo Tesla genera i dati necessari per questo speciale allenamento?

- **Etichettatura manuale**

All'interno del team Tesla vi è un reparto specializzato nell'etichettatura dei dati che provengono dai veicoli regolarmente in circolazione su strada e dai veicoli di test interni, un reparto con all'attivo più di mille addetti. L'etichettatura manuale è molto efficace in campi specifici come la semantica degli oggetti, ma quando bisogna gestire dettagli più correlati alla geometria ed al tracciamento è necessario l'utilizzo di sistemi più potenti ed efficienti. Quindi Tesla ha creato un secondo metodo di etichettatura degli oggetti: l'etichettatura automatica.

- **Etichettatura automatica**

Prima di entrare nel dettaglio del suo meccanismo, dobbiamo introdurre il concetto di *Clip*.

La clip è l'unità più piccola nell'attività di etichettatura dei dati di Tesla. Si tratta di un'entità che contiene dai 45 secondi a 1 minuto di dati completi provenienti da vari sensori come: video, GPS, odometria etc.

Raccolgono questi dati dalle auto attive dei clienti e dalle auto prototipo interne all'azienda e li inviano ai server interni Tesla (Dojo) dove attraverso l'utilizzo di speciali reti neurali e algoritmi di AI riescono a produrre un set finale di etichette divise in: oggetti statici e oggetti dinamici (*Fig. 1*).

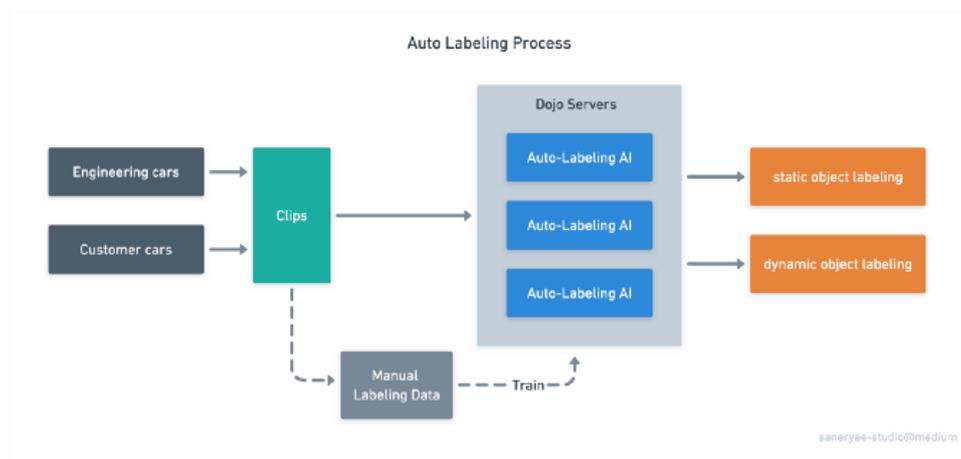


Fig.1 Passaggi del sistema di etichettatura automatica

Per gli oggetti statici dopodiché il sistema va a ricostruire la scena in 3D grazie a particolari sistemi di elaborazione delle immagini provenienti dalle 8 telecamere che riprendono l'oggetto da angolazioni differenti; per gli oggetti dinamici il sistema fornisce la velocità, l'accelerazione e la posizione, calcolando la traiettoria di movimento nello spazio vettoriale.

E la rimozione dei radar come è stata gestita da Tesla?

All'inizio del 2021 il team Tesla dichiarò che nei nuovi modelli di Model 3 e Model Y le auto non saranno più dotate di radar.

Immaginiamo una situazione di scarsa visibilità che rende difficile il lavoro di riconoscimento e previsione alle telecamere, Tesla ritiene che uno dei motivi di tale difficoltà risieda nella mancanza di dati di riferimento per tali situazioni. Così hanno avviato un piano di etichettatura automatica chiedendo alla flotta di auto interne di produrre molte clip con situazioni di scarsa visibilità o

estreme. La flotta fino ad oggi ha raccolto oltre 10.000 clip di situazioni eccezionali permettendo quindi al sistema di adattarsi al riconoscimento e previsione di situazioni analoghe (Fig. 2).



Fig.2 Esempi di immagini di situazioni particolari usate per addestrare il sistema grazie al sistema di etichettatura automatica

3.5 Simulazione

Per creare un sistema così complesso e sicuro su strada non sono sufficienti soltanto i dati provenienti dalle esperienze reali delle vetture, è necessario creare anche un sistema di simulazione digitale. Un sistema di simulazione risulta fondamentale per verificare il comportamento della vettura nelle situazioni più disparate e che nella vita reale potrebbero accadere, seppur con una probabilità quasi nulla.

Perciò Tesla ha implementato un sistema di simulazione fotorealistico le cui caratteristiche principali sono descritte nei paragrafi seguenti [20].

- **Simulazione accurata dei sensori**

Lo scopo di un sistema di simulazione è anche quello di calibrare adeguatamente le telecamere montate sul veicolo, andando a settare: esposizione, sfocatura di movimento, distorsione etc.

Permettendo inoltre decisioni hardware sul modello di obiettivo da montare, su dove posizionare le telecamere e persino la calibrazione della portata e luminosità dei fari.

- **Rendering fotorealistico**

Per sfruttare al meglio le potenzialità di un simulatore, esso deve restituire il mondo con una qualità che rispecchi il più possibile il mondo reale. Ed è per questo che sono state adottate molte politiche di raffinamento e miglioramento della grafica 3D, come sistemi di anti-aliasing per ridurre le frastagliature e di ray-tracing per produrre un'illuminazione realistica.

- **Vari modelli 3D**

Per popolare il mondo simulato sono stati creati più di migliaia di modelli 3D di persone con diversi vestiti, animali e oggetti di scena. Nonché anche migliaia di chilometri di strade, con le caratteristiche più varie, con dossi, carreggiata rovinata e segnaletica particolare.

- **Generazione di scenari**

La maggior parte degli scenari utilizzati nel simulatore vengono creati proceduralmente, utilizzando appositi algoritmi in modo tale da creare tutte le possibili combinazioni di illuminazione, ostacoli sulla carreggiata, segnaletica, veicoli in circolazione etc. Interessante è il fatto che questi algoritmi vanno a ricreare ed approfondire gli scenari dove si sono verificati dei problemi o degli errori, così da allenare e far capire al team dove risiede il problema software da correggere.

Tutto ciò per concludere il capitolo dedicato all'approfondimento della conferenza AI Day in cui Tesla ha mostrato al pubblico il suo modo di vedere ed implementare la guida autonoma sui suoi veicoli. Sono state scelte vie implementative molto innovative, ma anche coraggiose, il fatto di abbandonare il sistema Radar per adottare un sistema interamente di telecamere per molti addetti ai lavori è risultato un salto nel vuoto con più rischi che vantaggi. Si è deciso di far molto uso di reti neurali per gli scopi più vari, dal riconoscimento di oggetti in una singola immagine alla sezione di creazione di uno spazio vettoriale 3D. Il verdetto su chi avrà avuto veramente ragione lo si vedrà solamente quando questi veicoli aggiornati gireranno in massa su strada, Tesla si è giocata il tutto per tutto: se avrà ragione ciò comporterà un enorme vantaggio sulla concorrenza.

4. Altri sistemi

La guida autonoma ha attirato su di sé gli interessi di molte aziende hi-tech, che ne hanno intuito le possibilità di sviluppo, ma anche di guadagno. Il concetto di servizio di trasporto autonomo veniva e viene tuttora considerato come un enorme passo avanti per la civiltà a livello di benessere e di produttività, che sono fattori che attirano non pochi investimenti. In questo paragrafo andremo a trattare altri progetti di guida autonoma che si stanno sviluppando in concorrenza con quello di Tesla.

4.1 Uber ATG

Il progetto Uber ATG vide la luce nel febbraio 2015, con l'azienda che dichiarò di voler creare una flotta di auto autonome (*Fig. 1*) [27].

Ma perché Uber decise di investire in questo settore? La risposta può essere racchiusa in due semplici parole: "paura e concorrenza". In quegli anni, infatti, anche Google iniziava ad indagare sui possibili vantaggi della guida autonoma: Uber, conosciuta nel mondo per il suo servizio di "taxi", vedeva questo interesse di Google come una minaccia. Il pensiero che Google riuscisse a creare dei modelli di veicoli con guida autonoma in grado di fare concorrenza e di sopraffare il sistema Uber metteva l'azienda con le spalle al muro, a tal punto da spingerla quasi forzatamente in questo settore. Non a caso l'annuncio di Uber ATG avvenne la stessa settimana in cui Google annunciò il proprio progetto di guida autonoma.

Ma Google era notevolmente in vantaggio dato che si scoprì che aveva iniziato lo sviluppo di un concetto simile già nel 2009, Uber era appena all'inizio e fin da subito dovette rincorrere Google.

Inizialmente il progetto sembrava essere destinato al successo, poco dopo l'annuncio il governatore dell'Arizona diede il permesso all'azienda di testare i propri modelli nel suo stato, ma il vero inizio avvenne per le strade di Pittsburgh, in Pennsylvania, dove apparve clamorosa la presentazione di una flotta di addirittura 20 auto. Veicoli pieni di sensori, telecamere e radar, un vero capolavoro di tecnologia ed innovazione. Il sindaco di Pittsburgh diede enormi libertà all'azienda, fino al punto che Uber arrivò a creare una propria "città" Alamo per testare le proprie tecnologie.

I primi mesi però non iniziarono con i migliori degli auspici; infatti, vi furono numerosi leggeri incidenti ed infrazioni del codice della strada. Le relazioni col sindaco di Pittsburgh peggiorarono a causa di questi inconvenienti e anche perché si rese conto che la presenza di Uber non stava portando i miglioramenti che erano stati prospettati in termini di economia e occupazione.

Uber quindi si spostò a San Francisco nel dicembre 2016 per continuare i test, ma anche qui incontrò un pesante rifiuto: il Dipartimento dei veicoli a motore della California revocò l'autorizzazione alla registrazione dei veicoli Uber e ne vietò la circolazione per le strade californiane.

Uber si diresse quindi in Arizona, a Tampa, ma nel marzo del 2017 avvenne un incidente che rallentò il cammino del progetto ATG, vi fu uno scontro con un'altra automobile guidata da una persona che restò ferita. Dopo accurate analisi ed indagini si arrivò alla conclusione che fu la persona ad aver evitato una precedenza e quindi dalla parte del torto, ma a causa di questo incidente l'intera flotta Uber venne bloccata per ulteriori indagini.

Nel frattempo, a fine 2017 Uber si espanse anche in Canada, a Toronto per i suoi test.

Nel marzo 2018 avvenne il caso più grave a Tampa, in Arizona: un'auto della flotta Uber ATG investì ed uccise una donna in bicicletta che aveva attraversato la strada fuori da un passaggio pedonale.

L'auto era in modalità autonoma ed alla guida vi era un operatore umano che però non aveva il controllo sul veicolo. Si trattò del primo incidente mortale nel contesto della guida autonoma. Indagini successive scoprirono che non si era attivato il sistema di frenata automatica poiché il veicolo era in "modalità computer" che la disabilitava. Nonostante il veicolo si fosse accorto 1,3 secondi prima dell'impatto che vi fosse un pedone in traiettoria, esso non avvisò il conducente in alcun modo.

Immediatamente dopo questo incidente, Uber ordinò lo stop a tutte le proprie flotte presenti in circolazione in tutti i territori. Perse inoltre il permesso di circolazione in Arizona: fu un duro colpo per l'azienda, sia a livello di immagine che economico, dato che la maggior parte degli azionisti vedeva questo progetto come uno spreco di denaro, avendo esso già comportato una spesa di un miliardo di dollari.

A quel punto venne anche alla luce "il caso Levandowsky" [29].

Anthony Levandowsky era un ex ingegnere di Waymo (azienda creata da Google) ed una delle menti alla base dei sistemi LiDAR. Dopo il suo addio a Waymo fondò la propria società, Otto: una società di autocarri autonomi. Otto venne acquisita da Uber nel 2016 per 700 milioni di dollari, anno in cui Levandowsky prese il timone del progetto ATG. I primi problemi nacquero quando Waymo si accorse che certi elementi dei loro sistemi LiDAR erano troppo simili a quelli di Uber ATG; da quel momento iniziò la causa penale di Waymo contro Uber. Si scoprì che Levandowsky prima di abbandonare Google, scaricò circa 15.000 documenti riservati dai server aziendali che poi consegnò ad Uber nel momento dell'acquisizione di Otto. Il processo terminò con un risarcimento a carico di Uber e 18 mesi di reclusione per Levandowsky.

I problemi però non terminarono: nel 2018 emersero notizie secondo le quali l'ambiente di lavoro in Uber era tossico, con molestie e comportamenti violenti verso i dipendenti. Si scoprì che il cofondatore di Uber, Travis Kalanick adottava una cultura del lavoro molto aggressiva e pesante. Tali metodi furono la causa della sua espulsione dall'azienda che nel 2018 cambiò CEO che divenne Dara Khosrowshahi.

Il colpo di grazia al progetto ATG avvenne nel 2020 con la pandemia di COVID, che ridusse gli spostamenti e di conseguenza le entrate per l'azienda. Alla fine del 2020 Uber ATG venne venduta ad Aurora per 4 miliardi di dollari. Dopo questa acquisizione non si hanno più notizie su test o sviluppi del progetto ATG.



Fig. 1 Vettura Uber ATG

4.2 Waymo

Waymo è una filiale della casa madre di Google, Alphabet. Nasce nel 2009 da Google con il nome di "Google Self-Driving Car Project", nota ai più col nome di "Google Car" [31].

Il progetto prende forma nel 2009 da Sebastian Thrun, co-inventore di Google Street View, progetto che fu particolarmente innovativo. Nel 2010 il Dipartimento dei veicoli a motore della California si dichiarò preoccupata perché lo sviluppo delle auto a guida autonoma era molto più avanti rispetto alla legge in molte zone, in altre parole non vi erano norme adatte a gestire situazioni in cui uno degli attori fosse un'auto senza conducente.

Inizialmente le auto del progetto erano con un conducente a bordo, ma nel 2014 venne presentato un nuovo veicolo in cui vennero eliminati volante, pedali e specchietti, chiamato "Firefly" (Fig. 2). La Firefly venne testata nei quartieri di Austin, in Texas, senza particolari problemi o incidenti [32].



Fig. 2 Google Car "Firefly"

Nel 2015 una Google Car completò il primo viaggio internazionale su strade pubbliche.

Nel 2016 Google riorganizzò la divisione Self-Driving Car Project e nacque Waymo.

Waymo riuscì a siglare importanti collaborazioni con alcune delle più importanti case automobilistiche come Fiat-Chrysler, che le offrì una flotta di 600 minivan per la ricerca. Nello stesso periodo venne permesso ai residenti nell'area di Phoenix di fare domanda per viaggiare su un minivan a guida completamente autonoma di Waymo.

Ad oggi Waymo afferma di aver percorso 2,5 miliardi di miglia simulati con questi modelli di minivan.

Nello stesso mese Waymo dichiarò che era iniziata la sperimentazione anche per i grandi camion commerciali, un importante passo in avanti che nessun'altra azienda aveva mai intrapreso, riuscendo a stipulare accordi con importanti compagnie di trasporti e logistica (Fig. 3).



Fig. 3 Camion commerciale sperimentato da Waymo

Nel 2017 Waymo dichiarò che sarebbero iniziati i primi test con auto senza conducente a bordo, fino a quel momento per motivi di sicurezza vi era sempre un addetto a bordo pronto per intervenire in caso di emergenze.

Per ora i minivan realizzati vantano una guida autonoma di Livello 4, ma Waymo grazie anche ad una importante partnership con Intel, punta a raggiungere il Livello 5 in tempi ragionevoli.

Ad oggi Waymo è considerata la vera concorrente a Tesla per quanto riguarda la guida autonoma, arrivando a valere 175 miliardi di dollari, secondo le stime di Morgan Stanley [30].

4.3 Tesla vs Waymo

Nel mondo della guida autonoma vi sono dunque due colossi: Waymo e Tesla, che però hanno due visioni e due approcci completamente diversi. Mike Ramsey, vicepresidente della società di ricerca Gartner, descrive le visioni delle due aziende come segue:

"Tesla sta effettuando voli ad alta quota o nel vicino spazio e Waymo sta atterrando sulla luna [...]. Uno sta cercando di ottenere qualcosa che è molto più difficile da fare dell'altro. Ma questo non vuol dire che i voli ad alta quota non possano continuare a salire sempre più in alto" [34].

Ramsey vede un futuro in cui Tesla probabilmente non fornirà un veicolo totalmente autonomo in tempi brevi, ma fornirà sistemi di aiuto alla guida sempre più raffinati che la porterebbero verso la guida autonoma. Due politiche completamente diverse: Waymo si è data come target la guida completamente autonoma (Livello 4/5) da subito, ma impiegherà molto tempo per raggiungerla ed affinarla, mentre Tesla parte dalla base facendo man mano passi in avanti, questo fornisce prodotti con step intermedi già utilizzabili.

I veicoli Tesla attualmente in circolazione vengono considerati di Livello 2 con quindi necessità di un conducente in grado di intervenire in caso di emergenza. Waymo, invece, fornisce veicoli di Livello 4 che però non sono ancora adatti alla circolazione in aree al di fuori di quelle di testing.

Waymo monta sui propri veicoli un hardware molto più ricco (ma complesso) rispetto alle vetture Tesla, ricco di Radar, telecamere e LiDAR. Mentre le auto Tesla si affidano solamente ad un sistema di telecamere.

Indubbiamente avere più sensori aumenta la complessità ma anche la sicurezza e i costi, Tesla col suo kit di telecamere sarà sì “meno” sicura, ma fornisce prodotti molto più economici.

Una Tesla Model 3 con il sistema di guida autonoma è acquistabile per circa 75.000 \$.

Molti esperti del settore pensano però che non sia possibile implementare un sistema completamente autonomo con il kit Tesla e ritengono che se l'azienda di Elon Musk vorrà raggiungere tale obiettivo dovrà necessariamente montare sistemi più complessi.

Non siamo a conoscenza del possibile prezzo di listino di un veicolo Waymo, ma l'ex CEO afferma che *"non costava più di una Mercedes Classe S moderatamente equipaggiata"*, quindi intorno ai 180.000 \$, con costi che secondo l'azienda sono calati notevolmente rispetto al passato.

Lo scontro tra Waymo e Tesla passa anche attraverso certe dichiarazioni degli addetti ai lavori, come il CEO di Waymo, John Krafcik che afferma in una intervista:

"Per noi, Tesla non è affatto un concorrente [...] produciamo un sistema di guida completamente autonomo. Tesla è una casa automobilistica che sta sviluppando un ottimo sistema di assistenza alla guida [...] È un'idea sbagliata che tu possa continuare a sviluppare un sistema di assistenza alla guida fino a quando un giorno non potrai magicamente passare a un sistema di guida completamente autonomo" [33].

Da sottolineare il fatto che Waymo alle origini del progetto Google Car aveva preso in considerazione lo sviluppo di un sistema simile a Tesla, un software di guida autonoma da poter vendere alle case automobilistiche interessate, ma quando iniziarono le prime sessioni di test notarono che i guidatori di test al volante di auto con questo software installato non prestavano particolare attenzione alla strada, fidandosi troppo in fretta del sistema. Da questa esperienza trassero la conclusione che era più opportuno sviluppare un intero ambiente orientato alla guida autonoma.

Entrambe le aziende continuano a darsi battaglia con annunci di traguardi raggiunti e di scadenze sempre più prossime per vedere all'opera un vero sistema di guida autonoma, Waymo continua a dire che l'approccio di Tesla è un vicolo cieco.

5. Conclusioni

La guida autonoma entrerà a far parte delle nostre vite: ci vorranno anni probabilmente, come ce ne vollero per la precedente rivoluzione industriale, ma vedendo come certe aziende sono convinte ed ottimiste, si può ragionevolmente supporre che questo futuro, che oggi appare parecchio utopico, si avveri. Le ricerche e gli investimenti sono ingenti e aumentano di anno in anno: si pensi che una delle aziende più famose ed importanti del mondo come Alphabet, con la sua succursale Waymo, investe milioni in progetti di mobilità autonoma.

Lo sviluppo della guida autonoma non porterà vantaggi e miglioramenti solo nell'ambito della mobilità, ma anche nell'ambito tecnologico a trecentosessanta gradi. In un progetto di guida autonoma abbiamo analizzato essere coinvolte numerose tecnologie e ambiti scientifici che possono rientrare anche in altri progetti di futura vita quotidiana.

L'utilizzo delle reti neurali, l'utilizzo di algoritmi per il riconoscimento ed etichettatura di oggetti in un frame, sono solo esempi di ambiti che se sviluppati possono portare a miglioramenti nella vita di tutti i giorni, ad esempio nel mondo della domotica.

Anche le questioni giuridiche sono un importante capitolo di discussione che si protrarrà nei prossimi anni; il valutare le responsabilità in eventuali incidenti è complesso: dovremo dare le colpe al guidatore oppure alle auto?

Forse questa sarà una rivoluzione che richiederà più lavoro e più dedizione rispetto a quelle passate, non solo nell'ambito tecnologico, ma anche in quello giuridico; tutto ciò però potrebbe rivoluzionare le nostre abitudini in svariati ambiti in un futuro più o meno prossimo: si vedrà.

Ringraziamenti

Mi è doveroso dedicare questo spazio del mio elaborato alle persone che hanno contribuito, con il loro instancabile supporto, alla conquista di questo incredibile traguardo.

Ringrazio infinitamente i miei genitori che mi hanno sempre sostenuto e spronato, anche nei momenti più difficili, appoggiando ogni mia decisione, a partire dalla scelta del percorso da intraprendere dopo il diploma.

Un grazie di cuore ai miei colleghi ed amici Luca e Arber per aver vissuto questa avventura insieme a me, con tutte le risate, le esperienze di progetti sviluppati insieme, le ore in aula durante le lezioni, tutte situazioni che hanno aiutato a far passare questi anni incredibilmente in fretta.

Un ringraziamento speciale va anche a Ginevra, una ragazza meravigliosa che conosco ormai da anni, che mi ha motivato e sostenuto lungo questo percorso, aiutandomi anche a sdrammatizzare certi eventi a prima vista parecchio pesanti.

Non posso poi non ringraziare tutti i miei amici che, chi più chi meno, mi hanno aiutato a staccare la spina quando serviva e a farmi capire di prendere certe cose più alla leggera.

Infine, dedico questa tesi a me stesso, ai miei sacrifici e alla mia testardaggine che mi hanno permesso di arrivare fin qui.

1. Bibliografia

- (1) Tsung-Yi L., Piotr D., Ross G., Kaiming H., Bharath H., Serge B., *Feature Pyramid Networks for Object Detection*, in “Arxiv”, v2, 19/04/2017
- (2) Mingxing T., Ruoming P., Quoc V. Le, *EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection*, in “Arxiv”, v1, 20/11/2019

2. Sitografia

- (3) “History of autonomous Cars”, Tomorrow’s World Today, aggiornato al 09/08/2021, <https://www.tomorrowstoday.com/2021/08/09/history-of-autonomous-cars/>
- (4) “History of self-driving cars”, Wikipedia, aggiornato al 05/04/2022, https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_self-driving_cars
- (5) Anthony Townsend, “The 100-Year History of Self-Driving Cars”, Medium, aggiornato al 03/08/2020, <https://onezero.medium.com/the-100-year-history-of-self-driving-vehicles-10b8546a3318>
- (6) Carl Engelking, “The ‘Driverless’ Car Era Began More Than 90 Years Ago”, Medium, aggiornato al 13/12/2017, <https://www.discovermagazine.com/technology/the-driverless-car-era-began-more-than-90-years-ago>
- (7) Alvisè-Marco Seno, “Guida autonoma, un sogno partito quasi cent’anni fa”, Ruoteclasse, aggiornato al 05/05/2017, <https://ruoteclasse.quattroruote.it/guida-autonoma-un-sogno-partito-quasi-centanni-fa/>
- (8) Jessica Shea Choksey and Christian Wardlaw, “Levels of Autonomous Driving, Explained”, JDPower, aggiornato al 05/05/2021, <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/levels-of-autonomous-driving-explained>
- (9) James Morris, “Self-Driving Cars Won’t Go Mainstream Until We Solve This Problem”, Forbes, aggiornato al 13/02/2021, <https://www.forbes.com/sites/jamesmorris/2021/02/13/self-driving-cars-wont-go-mainstream-until-we-solve-this-problem/?sh=1221d3472f3b>
- (10) Kersten Heineke, Ruth Heuss, Ani Kelkar, and Martin Kellner, “What’s next for autonomous vehicles?”, McKinsey & Company, aggiornato al 22/12/2021, <https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/our-insights/whats-next-for-autonomous-vehicles>
- (11) Nilesh Barla, “Self-Driving Cars With Convolutional Neural Networks (CNN)”, Neptuneblog, aggiornato al 25/08/2021, <https://neptune.ai/blog/self-driving-cars-with-convolutional-neural-networks-cnn>
- (12) “How Machine Learning in Automotive Makes Self-Driving Cars a Reality”, Mindy Support, aggiornato al 12/02/2020, <https://mindy-support.com/news-post/how-machine-learning-in-automotive-makes-self-driving-cars-a-reality/>
- (13) Enrique Dans, “The Future Of Autonomous Vehicles: Product Or Service?”, Forbes, aggiornato al 11/06/2021, <https://www.forbes.com/sites/enriquedans/2021/06/11/the-future-of-autonomous-vehicles-product-orservice/?sh=45167e6b5892>
- (14) Jenny Cusack, “Self-driving vehicles are steadily becoming a reality despite the many hurdles still to be overcome – and they could change our world in some unexpected ways.”, BBC,

aggiornato al 30/11/2021, <https://www.bbc.com/future/article/20211126-how-driverless-cars-will-change-our-world>

(15) John McDerimid, “*Autonomous cars: five reasons they still aren’t on our roads*”, The Conversation, aggiornato al 30/07/2020, <https://theconversation.com/autonomous-cars-five-reasons-they-still-arent-on-our-roads-143316>

(16) “*What is an Autonomous Car?*”, Synopsys, <https://www.synopsys.com/automotive/what-is-autonomous-car.html>

(17) Jason Zhang, “*Deep Understanding Tesla FSD Part 1: HydraNet*”, Medium, aggiornato al 18/10/2021, <https://saneryee-studio.medium.com/deep-understanding-tesla-fsd-part-1-hydranet-1b46106d57>

(18) Jason Zhang, “*Deep Understanding Tesla FSD Part 2: Vector Space*”, Medium, aggiornato al 19/10/2021, <https://saneryee-studio.medium.com/deep-understanding-tesla-fsd-part-2-vector-space-2964bfc10b17>

(19) Jason Zhang, “*Deep Understanding Tesla FSD Part 3: Planning & Control*”, Medium, aggiornato al 05/11/2021, <https://saneryee-studio.medium.com/deep-understanding-tesla-fsd-part-3-planning-control-9a25cc6d04f0>

(20) Jason Zhang, “*Deep Understanding Tesla FSD Part 4: Auto Labeling, Simulation*”, Medium, aggiornato al 18/11/2021, <https://saneryee-studio.medium.com/deep-understanding-tesla-fsd-part-4-auto-labeling-simulation-60c9bfd3bcb5>

(21) Andrea Minimi, “*Il processo decisionale di Markov*”, <https://www.andreaminini.com/ai/ragionamento-artificiale/processo-decisionale-di-markov>

(22) Sagar Sharma, “*Monte Carlo Tree Search*”, Medium, aggiornato al 01/08/2018, <https://towardsdatascience.com/monte-carlo-tree-search-158a917a8baa>

(23) Cristiano Casadei, “*Le reti neurali ricorrenti*”, Maggioli Developers, aggiornato al 19/03/2020, <https://www.developersmaggioli.it/blog/le-reti-neurali-ricorrenti/>

(24) “*Understanding LSMT Networks*”, Colah’s blog, aggiornato al 27/08/2015, <https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>

(25) “*Reti neurali*”, IBM, aggiornato al 17/08/2020, <https://www.ibm.com/it-it/cloud/learn/neural-networks#toc-cosa-sono--nIYJFM88>

(26) “*Grouped Convolution*”, GeeksforGeeks, aggiornato al 16/03/2021, <https://www.geeksforgeeks.org/grouped-convolution/>

(27) Leif Johnson, Michelle Fitzsimmons, “*Uber self-driving cars: everything you need to know*”, Techradar, aggiornato al 25/05/2018, <https://www.techradar.com/news/uber-self-driving-cars>

(28) Sumit Saha, “*A Comprehensive Guide to Convolutional Neural Networks — the ELI5 way*”, Techradar, aggiornato al 15/12/2018, <https://towardsdatascience.com/a-comprehensive-guide-to-convolutional-neural-networks-the-eli5-way-3bd2b1164a53>

(29) Mario Herger, “*Aurora-Uber: Set Up For Failure?*”, The Last Driver License Holder..., aggiornato al 06/01/2021, <https://thelastdriverlicenseholder.com/2021/01/06/aurora-uber-set-up-for-failure/>

(30) Matthew DeBoard, “*Waymo could be worth as much \$175 billion — here’s a brief history of the Google Car project*”, Insider, aggiornato al 09/09/2018, <https://www.businessinsider.com/google-car-project-history-2018-8?r=US&IR=T>

(31) “*Company Profile: Waymo*”, CTD, <https://www.carsthatdrivethemselves.com/waymo/>

(32) Bernard Marr, “*Key Milestones Of Waymo - Google’s Self-Driving Cars*”, Forbes, aggiornato al 21/09/2018, <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/09/21/key-milestones-of-waymo-googles-self-driving-cars/?sh=7c0e87065369>

(33) Timothy B.Lee, “*Waymo CEO dismisses Tesla self-driving plan: “This is not how it works”*”, Arstechnica, aggiornato al 22/01/2021, <https://arstechnica.com/cars/2021/01/waymo-ceo-tesla-is-not-a-competitor-at-all/#main>

(34) Rani Molla, “*Self-driving cars: The 21st-century trolley problem*”, Vox, aggiornato al 06/10/2021, <https://www.vox.com/recode/22700022/self-driving-autonomous-cars-trolley-problem-waymo-google-tesla>

(35) “*Tesla (azienda)*”, Wikipedia, aggiornato al 25/04/2022, [https://it.wikipedia.org/wiki/Tesla_\(azienda\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Tesla_(azienda))