



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

**I SENSORI NELLE AUTOMOBILI:
TECNOLOGIA E APPLICAZIONI**

Relatore: Prof. Gaudenzio Meneghesso

Laureando: Michele Morari

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Data di laurea 25 Novembre 2022

Indice

Introduzione.....	1
1. Breve storia sull'evoluzione dei sensori automobilistici.....	3
2. I sensori automobilistici e i loro impieghi.....	7
2.1. Sensori per la gestione del motore e dei gas di scarico	8
2.2. Sensori per il confort e la sicurezza	14
3. Sensori per la guida assistita ed autonoma	19
3.1. Sensore ultrasonico.....	20
3.2. Radar.....	21
3.4. Telecamera.....	22
3.4. Sensore Lidar	22
3.4.1. Modalità pulsata.....	23
3.4.2. Modalità ad onda continua modulata in ampiezza (AMCW).....	24
3.4.3. Modalità a modulazione di frequenza ad onda continua (FMCW).....	25
Conclusioni.....	27
Bibliografia.....	31

Introduzione

Lo sviluppo tecnologico e gli enormi progressi compiuti in questi ultimi decenni nell'ambito dell'intelligenza artificiale e della connettività hanno permesso una diffusione straordinaria dei sensori in tutti i campi della nostra vita quotidiana: industriale, aeronautico, agricolo, ambientale, civile, medico, etc.

Uno dei settori più influenzati dallo sviluppo e dall'impiego sempre maggiore dei sensori è senza ombra di dubbio l'automotive. Quest'ultimo sta godendo di una crescita senza precedenti sotto la spinta della transizione elettrica e dello sviluppo della guida autonoma.

Oggi, le auto sono molto più che un semplice mezzo di spostamento. Una volta saliti al loro interno possiamo ascoltare musica, guardare film, dar loro degli input utilizzando la nostra voce, possiamo addirittura rilassarci alla guida senza dover toccare il volante o premere l'acceleratore. Oltre a questo, il computer di bordo ha sottomanifestante per istante la situazione di tutti i componenti elettro-meccanici presenti, può dialogare con il motore, con il serbatoio, con gli pneumatici, ecc. Tutto questo è possibile grazie ai sensori.

I sensori per auto non sono altro che dei dispositivi intelligenti che monitorano costantemente le condizioni del veicolo e, interfacciandosi al computer di bordo, eseguono direttamente delle azioni correttive o invitano l'utente ad apportare delle modifiche per evitare guasti, rotture, risparmiare carburante e viaggiare in sicurezza.

Il primo capitolo di questo elaborato di tesi contiene un breve excursus sulla storia dei sensori, le principali date e i passaggi chiave che hanno portato ad uno sviluppo senza precedenti dell'automotive.

Nel secondo capitolo si sono riportati in modo generale i diversi sensori usati nelle moderne automobili suddividendoli in tre macrocategorie: per la gestione del motore e dei gas di scarico, per il comfort e la sicurezza, per la guida assistita ed autonoma. Per ciascuna categoria vengono elencati i principali sensori con una breve spiegazione dei loro compiti e dei principi di funzionamento.

Nel terzo capitolo vengono presentati i sensori usati per i dispositivi per la guida assistita (ADAS) ed autonoma, mettendo in evidenza le loro caratteristiche e criticità, indicandone il campo di utilizzo.

Nelle conclusioni viene esposta una previsione relativa al tempo che impiegheranno le tecnologie ADAS per passare dallo stadio di ingresso sul mercato automobilistico all'adozione su larga scala. Si evidenzia inoltre come i sensori stiano diventando sempre più importanti per garantire la sicurezza della guida anche se, al momento attuale, il loro impiego non ha ancora consentito di spingersi oltre il livello di guida di tipo SAE 3, lasciando quindi al guidatore la facoltà di prendere il controllo del veicolo in caso di emergenza.

Capitolo 1

Breve storia sull'evoluzione dei sensori automobilistici

I sensori non esistono da sempre sulle auto. La loro invenzione e diffusione, infatti, è una conquista tecnico scientifica degli ultimi decenni.

La prima applicazione automobilistica dei sensori è stata nei motori a combustione. Com'è noto, questi ultimi hanno bisogno di tre ingredienti per poter operare: un combustibile (la benzina o il gasolio), un comburente (l'ossigeno dell'aria) e una fonte di innesco (la scintilla). In passato, i sistemi di controllo che regolavano la combustione del motore endotermico erano prevalentemente di natura meccanica o elettromeccanica. Il carburatore, ad esempio, si occupava della formazione della miscela combustibile-comburente e del dosaggio del carburante mentre un distributore meccanico innescava e gestiva la scintilla. Due dei limiti principali di questi sistemi elettro-meccanici erano però l'usura e l'inevitabile invecchiamento dei componenti. Il motore doveva pertanto essere sottoposto ad una rigorosa manutenzione ogni 50.000 km. [1]

Negli anni '70 ed '80, le prime normative internazionali che fissavano dei limiti massimi per le emissioni dei gas esausti e l'esigenza di ridurre sempre più i consumi a causa dell'aumento del costo dei carburanti (si ricordi ad esempio la crisi petrolifera del 1973), avevano portato le grandi case automobilistiche a stanziare enormi investimenti in ricerca e sviluppo per modificare e riprogettare i motori in modo che soddisfacessero i nuovi e più stringenti requisiti. È proprio in questi anni che si iniziano ad installare i primi sensori nelle auto. Questi inizialmente non erano altro che dei trasduttori che inviavano informazioni ad un processore analogico, il quale, a sua volta, prendeva decisioni basandosi su semplici algoritmi prestabiliti e, inviando ai diversi attuatori dei segnali elettrici, gestiva e regolava le principali funzioni del motore. Sebbene fossero appena nati ed ancora ad uno stadio embrionale, i sensori automobilistici portarono fin da subito ad una drastica riduzione delle manutenzioni necessarie. I sistemi analogici però avevano numerosi svantaggi, primo fra tutti il fatto che erano in grado di gestire soltanto valori predefiniti di una determinata grandezza. Qualsiasi parametro che non

rientrasse nei valori programmati dava luogo ad un errore sconosciuto e al conseguente fallimento del sistema. [1]

La diffusione a macchia d'olio dei sensori si ebbe solamente un decennio dopo con l'avvento delle centraline elettriche e dei microprocessori che erano in grado di gestire rapidamente un'infinità di segnali e prendere decisioni immediate basandosi sull'analisi di dati contenuti in database.

All'inizio degli anni '80 cominciarono a trovare applicazione i primi sensori adibiti al miglioramento della sicurezza di guida. Il primo di questi fu l'ABS cioè quel dispositivo studiato per impedire il bloccaggio delle ruote del veicolo, e di conseguenza i testa coda, durante le frenate brusche. Questo venne poi integrato a metà degli anni '90 con il sistema di controllo della stabilità o ESC. In seguito, cominciarono la loro diffusione anche i sensori per il parcheggio e la rilevazione di ostacoli (è del 1984 il primo brevetto italiano per l'applicazione di sensori ad ultrasuoni per il rilevamento di ostacoli negli autoveicoli). [2]

L'esempio più emblematico per comprendere quanto i sensori fossero diventati di vitale importanza nell'automotive è senza ombra di dubbio l'avvento dei motori ad iniezione che soppiantarono completamente i carburatori dei vecchi sistemi di alimentazione dei motori a combustione interna. Il motore ad iniezione, infatti, richiedeva un semplice processore che fosse in grado di azionare più iniettori che spruzzavano il carburante direttamente nell'aria che entrava nel collettore di aspirazione. Per far sì che la combustione avvenisse in condizioni sempre ideali venivano poi impiegati cinque sensori che avevano il compito di rilevare istante per istante: la posizione della valvola a farfalla, la temperatura del liquido di raffreddamento, la pressione assoluta nel collettore e la concentrazione di ossigeno nei gas di scarico.[3], [4]



Figura 1.1. Iniezione diretta del carburante all'interno del cilindro.

Di più recente diffusione poi, sono i sensori ADAS (Advanced Driver Assistance System). Questi ultimi hanno debuttato nel mercato internazionale agli inizi degli anni 2000 ma stanno tuttora rivoluzionando il concetto di guida assistita. I sensori ADAS sono costituiti da sensori radar, ad ultrasuoni, lidar e videocamere che vengono combinati insieme per riuscire a rilevare le condizioni dell'ambiente circostante sia nelle vicinanze che a distanza dal veicolo. Alcuni esempi di dispositivi basati su questa tecnologia che sono da poco stati adottati su larga scala nel mercato automobilistico, sono l'ACC (Adaptive Cruise Control) che permette all'automobile di adattare automaticamente la propria velocità a seconda di quella dell'auto che la precede e il LDWS (Lane Departure Warning System) che aiuta il conducente a mantenere la corsia nei momenti di distrazione.

Quello che emerge da questa breve sequenza cronologica di avvenimenti chiave della storia dei sensori, è che nel giro di soli quarant'anni essi hanno acquisito un ruolo sempre più importante nel mercato automobilistico e hanno portato a miglioramenti sensazionali in termini di sicurezza, confort di guida e diminuzione dei consumi. D'altra parte, però, è evidente che si è ancora agli inizi di questa corsa tecnologica e che la chiave di volta sarà quella di fondere sempre più sensori diversi, in modo da acquisire molti più dati e rendere i processori in grado di compiere scelte sempre più complesse e rapide. Non è casuale, infatti, che gli esperti prevedano nei prossimi anni un'enorme crescita tecnica e commerciale dell'automotive dovuta ai dispositivi basati su tecnologia ADAS

Capitolo 2

I sensori automobilistici e i loro impieghi

Un sensore è un dispositivo che è in grado di acquisire dati su grandezze chimico-fisiche dall'ambiente circostante e di trasmetterle ad un sistema di controllo che fornisce informazioni utili per la supervisione del veicolo oppure confronta i valori istantanei ricevuti con il rispettivo valore di set-point e, a seconda dello scostamento da quest'ultimo, genera delle azioni correttive. Si può quindi pensare ai sensori come agli organi di senso umani, questi ricevono continuamente informazioni dall'ambiente circostante e le inviano al cervello che è quindi informato e prende una decisione.

Come detto, i sensori acquisiscono input direttamente dall'ambiente circostante, questo significa che nell'atto pratico, il loro funzionamento può essere influenzato da una o più variabili ambientali. Un sensore può quindi essere influenzato da fattori quali la temperatura, l'umidità, la pressione, la polvere, la luminosità, ecc. Dal punto di vista progettuale, è pertanto di fondamentale importanza, tenere bene a mente tutti questi diversi elementi quando si sceglie un sensore, così da scegliere quello più adatto al luogo in cui deve svolgere la sua funzione.

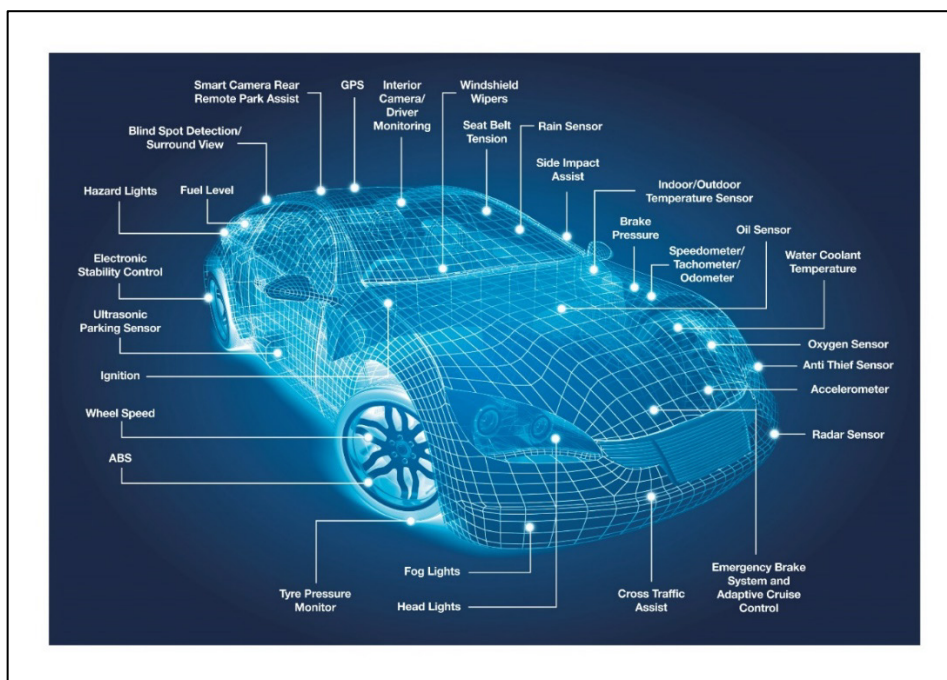


Figura 2.1. I principali sensori che oggi si trovano su un'automobile.

Il numero di sensori che vengono attualmente impiegati nelle automobili è già di per sé alto (in Figura 2.1 sono riportati solamente i sensori automobilistici fondamentali) ma è anche in continua evoluzione. Ogni nuova vettura che esce sul mercato, infatti, ha sempre in dotazione dei sensori di nuova concezione o comunque molto più precisi rispetto ai predecessori.

Per fare un po' di chiarezza, è possibile ordinare i sensori automobilistici in tre grandi famiglie:

- Sensori per la gestione del motore e dei gas di scarico;
- Sensori per il confort e la sicurezza;
- Sensori per la guida assistita e la guida autonoma.

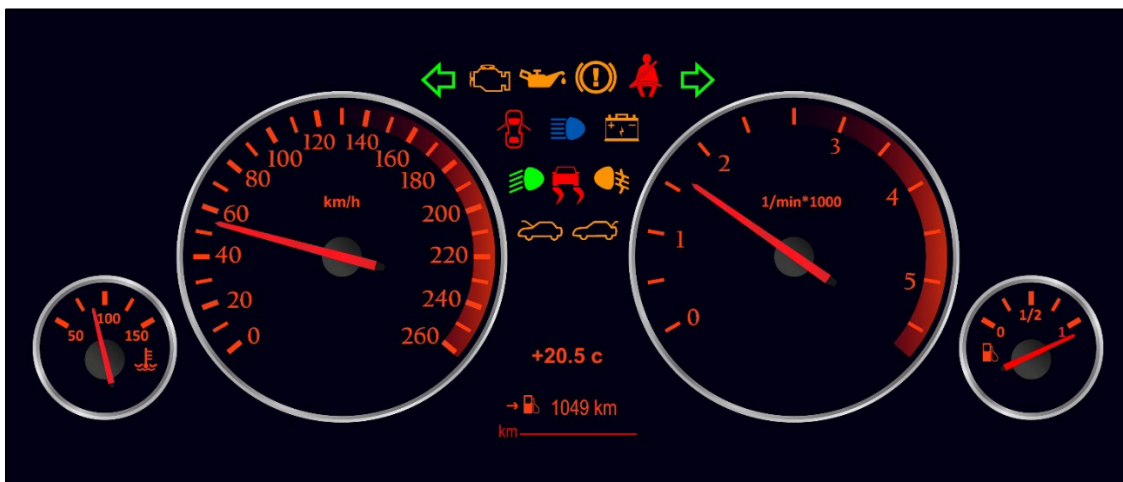


Figura 2.2. Tachimetro di un'auto con alcuni dei sensori più importanti

In questo capitolo verranno elencati per ogni macrocategoria tutti i sensori oggi esistenti nelle auto. Nell'impossibilità di presentare il funzionamento per ciascuno di essi, rendendo di fatto questa tesi un complesso trattato sui sensori, si è deciso di descrivere brevemente i sensori necessari per il corretto funzionamento di un'automobile e di studiare nel dettaglio solamente i sensori più importanti, quelli che hanno rivoluzionato il mercato dell'automotive.

2.1 Sensori per la gestione del motore e dei gas di scarico

Essi hanno lo scopo principale di fornire dati alla centralina di controllo motore così da poterlo far funzionare in modo efficace, riducendo il consumo di carburante e contenendo quanto più possibile le emissioni di inquinanti. Questi sensori devono poter resistere a temperature e umidità elevate, non risentire di campi magnetici generati da altri sensori, resistere ad agenti chimici (idrocarburi, liquido di raffreddamento, ecc.) e alla sporcizia. [5]

I sensori per il controllo del motore sono:

1. **Debimetro o misuratore della massa d'aria aspirata;**
2. **Sensore di detonazione;**
3. **Sensore di posizione dell'albero a camme;**
4. **Sensore di pressione assoluta dell'aria;**
5. **Sensore di temperatura del liquido di raffreddamento;**
6. **Sensore dell'ossigeno;**
7. **Sensore di velocità;**
8. Sensore di posizione dell'acceleratore;
9. Sensore di posizione dell'albero motore;
10. Sensore di Hall;
11. Sensore di pressione dell'olio motore;
12. Sensore del livello di olio motore;
13. Sensore di pressione del carburante;
14. Sensore di fase;
15. Sensore della temperatura dell'aria aspirata.

Qui di seguito, si scenderà nei dettagli tecnici dei sensori fondamentali (evidenziati in grassetto nell'elenco sopra).

Debimetro o misuratore della massa d'aria aspirata: è generalmente posizionato subito dopo la cassa filtro e si occupa di misurare la massa d'aria aspirata sfruttando il riscaldamento elettrico di una lamina o di un filo metallico. Il controllo elettronico del motore utilizza questo sensore per regolare correttamente il rapporto aria/combustibile in modo che questo sia sempre pari al rapporto stechiometrico, che permette la combustione completa del carburante evitando sprechi. Tra le tipologie principali ricordiamo quello a palette, ormai in disuso, quello a filo caldo e quello a film caldo. Il funzionamento dei debimetri a filo e a film caldo si basa sullo schema del ponte di Wheatstone. [6]



Figura 2.3. *Debimetro*

Sensore di detonazione: la detonazione è uno dei fenomeni più pericolosi cui possono andare incontro i motori a combustione interna. Essa provoca degli innalzamenti di pressione molto elevati e si manifesta attraverso vibrazioni con frequenza ben determinata. Il sensore di detonazione è solitamente montato sul blocco cilindri e sfrutta le sue doti piezoelettriche per informare la centralina in merito alla presenza dell'incipiente battito in testa. [6]



Figura 2.4. *Sensore di detonazione*

Sensore di posizione albero a camme: da quando i motori moderni sono stati dotati di impianti di iniezione elettronica, il sensore di posizione dell'albero a camme è diventato uno dei protagonisti principali. Questo componente sfrutta, per il suo funzionamento, il noto effetto Hall.[6], [7]

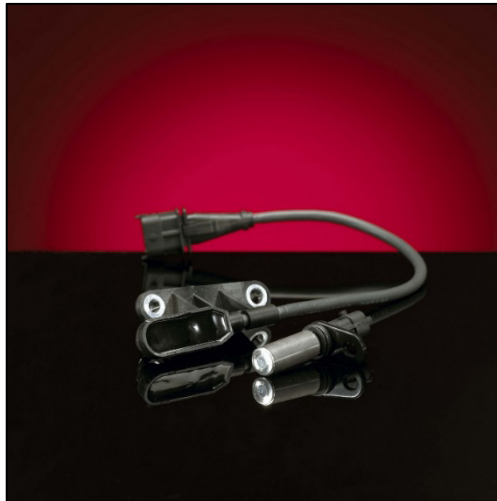


Figura 2.5. *Sensore di posizione dell'albero motore e dell'albero a camme*

Sensore di pressione assoluta dell'aria: anche in questo caso si tratta di un componente costituito da un sistema di resistenze, anch'esse collegate ad un ponte di Wheatstone e posizionate su di un supporto in ceramica. La variazione di pressione induce la flessione del supporto in ceramica (da un lato o dall'altro a seconda che si tratti di pressione relativa positiva o negativa). La flessione, a sua volta, induce una variazione della resistenza e quindi uno squilibrio del ponte elettrico. In pratica, il sensore viene alimentato dalla centralina con una tensione e restituisce in uscita un segnale variabile in tensione.[6]



Figura 2.6. *Sensore di pressione assoluta dell'aria*

Sensore di temperatura del liquido refrigerante: il sensore di temperatura è composto da una resistenza a coefficiente di temperatura negativo (NTC). Questo significa che la resistenza aumenta al diminuire della temperatura del sistema. Il sensore viene montato con l'elemento

sensibile a contatto con il liquido refrigerante. Il segnale trasmesso alla centralina è pertanto una tensione variabile con la temperatura del refrigerante.[6]



Figura 2.7. Sensore di temperatura del liquido refrigerante

Sensore dell'ossigeno (sonda lambda): l'obiettivo di questo sensore è quello di aiutare il motore a funzionare nel modo più efficiente possibile e anche di produrre il minor numero di emissioni. Il sensore di ossigeno è posizionato nel tubo di scarico e monitora la quantità di ossigeno incombusto presente nei gas di scarico. Il meccanismo, nella maggior parte dei sensori, comporta una reazione chimica che genera una tensione. Il computer del motore esamina la tensione per determinare se la miscela è ricca o magra e regola, di conseguenza, la quantità di carburante che entra nel motore.[8]



Figura 2.8. Sonda lambda

Le sonde lambda sono sostanzialmente di tre tipi: al biossido di zirconio, al biossido di titanio e a banda larga. Le prime due sono dette anche sonde lambda a salto o binarie, in quanto il segnale della sonda oscilla tra due valori limite, a seconda della concentrazione di ossigeno

della miscela carburante-aria. Quelle del terzo tipo invece, sono anche dette lineari poiché possono rilevare la concentrazione di ossigeno residuo nei gas di scarico in modo continuo. [9]

a) Sonde lambda al biossido di zirconio

In base al tipo di veicolo, queste sonde vengono utilizzate come metodo di regolazione e di diagnosi. Al suo interno hanno un materiale ceramico cavo, la cui forma è simile a un ditale, permeabile agli ioni di ossigeno a partire da una temperatura di 350 °C. Per arrivare a questa temperatura, viene automaticamente attivato l'elemento riscaldante inserito al suo interno.

Il lato interno dell'elemento ceramico è a contatto con l'aria dell'ambiente, mentre il lato esterno viene attraversato dal gas di scarico. Tutti e due i lati sono rivestiti da un sottile strato in platino che funge da elettrodo. Quando la sonda lambda raggiunge la temperatura di esercizio, gli ioni di ossigeno si spostano nell'elettrolita dalla zona a concentrazione maggiore di ossigeno a quella con una concentrazione minore, cercando di raggiungere uno stato di equilibrio. La diffusione degli ioni attraverso lo strato ceramico, carica elettricamente il platino e genera pertanto un segnale elettrico che viene raccolto dal cavo di connessione in uscita al sensore. [9]

b) Sonde lambda al biossido di titanio

Le sonde lambda al biossido di titanio si differenziano dalle precedenti per il fatto di non generare una tensione. In questo caso, l'elemento ceramico è un semiconduttore e la resistenza elettrica varia proporzionalmente alla pressione parziale dell'ossigeno (e quindi alla sua concentrazione) all'interno della miscela dei gas di scarico. Questa tipologia di sonda lambda è più compatta, avendo l'elemento riscaldante integrato, e non necessita della rilevazione dell'aria esterna. Le sonde lambda al biossido di titanio, diversamente da quelle al biossido di zirconio, funzionano però ad una temperatura di esercizio di 700 °C e temperature superiori a 850 °C possono danneggiarle. [9]

c) Sonde lambda a banda larga per motori diesel

Per avere performance adeguate nelle partenze a freddo, può essere richiesta una miscela magra (lambda inferiore ad 1, ossia miscela carburante-aria ricca di comburente). Ciò richiede una continua regolazione del rapporto aria-combustibile, ed è questa la fondamentale funzione assoluta delle sonde a banda larga che sono in grado di dare un segnale d'uscita proporzionale al rapporto tra aria e carburante. Con un funzionamento più rapido e preciso, queste sonde lambda trovano applicazioni anche nei moderni motori diesel, che solitamente operano in una condizione di eccesso d'aria.

L'elemento planare di una sonda lambda a banda larga è composto da più strati e presenta al suo interno una cella di pompaggio, una cella di misurazione e generalmente anche un riscaldatore integrato. Nella cella di misurazione viene rilevata la concentrazione dell'ossigeno dei gas di scarico; tale misura viene confrontata con un valore di riferimento di 450 mV. Se il risultato della misurazione è una miscela grassa, cioè con una minore concentrazione di ossigeno, viene generata una corrente negativa nella cella di pompaggio in modo da inviare ossigeno all'interno della cella di misura. Quando invece, la miscela è magra, viene prodotta nella cella di pompaggio una corrente positiva così da rimuovere l'ossigeno eccedente dalla cella di misura.[9]

Sensore di velocità: esso monitora la velocità e la posizione dell'albero motore del veicolo. Esistono due tipologie differenti di sensori dell'albero motore: quelli induttivi e gli Hall. Generalmente, il sensore dell'albero motore viene installato su una corona dentata poiché la sua rotazione provoca dei mutamenti del campo magnetico che a loro volta generano segnali di tensione trasmessi alla centralina del motore.



Figura 2.9. Sensore di velocità

2.2 Sensori per il confort e la sicurezza

Com'è noto, negli ultimi anni, le auto vengono equipaggiate sempre di più con dispositivi atti a garantire standard di sicurezza costantemente più elevati e maggior confort di viaggio.

Di seguito si riporta l'elenco dei principali sensori che stanno alla base di questi congegni:

1. Sensore ABS
2. Sensore pioggia

3. Sensore luci

4. Sensori di crash
5. Sensore di pressione del sedile
6. Sensore di tensione della cintura di sicurezza
7. Sensore di pressione dell'aria condizionata
8. Sensore di pressione degli pneumatici
9. Sensore porta socchiusa
10. Sensore di temperatura dell'abitacolo
11. Sensore di temperatura dell'aria esterna
12. Sensore angolo di sterzata
13. Sensore volante

Anche in questo caso, qui di seguito si andranno a descrivere brevemente dal punto di vista tecnico solamente i sensori più importanti.

Sensori numero di giri ruote (ABS): registrano il movimento delle ruote. Essi vengono spesso definiti anche come sensori ABS poiché hanno trovato applicazione la prima volta con l'introduzione dell'ABS nei veicoli. Le informazioni raccolte da questi sensori vengono oggi sfruttate in molteplici dispositivi di sicurezza ed assistenza (ABS, ASR, ESP o ACC) ma vengono messe a disposizione anche di altri apparati non direttamente correlati alla sicurezza e al confort di guida (motore, cambio, navigazione e regolazione telaio) grazie alla centralina ABS. I sensori numero giri ruote si distinguono per il loro funzionamento in due tipologie:

- Sensore passivo: funziona senza tensione di alimentazione aggiuntiva;
- Sensore attivo: per funzionare necessita di una tensione di alimentazione.



Figura 2.10. *Tipologie di sensori ABS*

a) Sensori numero giri ruote passivi (induttivi)

Sono installati in corrispondenza della ruota fonica collegata al mozzo o all'albero primario. Il pin terminale, provvisto di un avvolgimento, è collegato ad un magnete permanente la cui azione giunge fino al rotore. Il movimento di rotazione della ruota fonica e la conseguente alternanza dente-vano modificano il flusso magnetico attraverso il pin terminale e l'avvolgimento. Il campo magnetico variabile induce nell'avvolgimento una tensione alternata misurabile (Figura 2.11.). La frequenza e le ampiezze di questa tensione alternata sono in stretto rapporto con il numero di giri della ruota. Come anticipato, i sensori induttivi passivi non necessitano di un'alimentazione di tensione da parte della centralina.

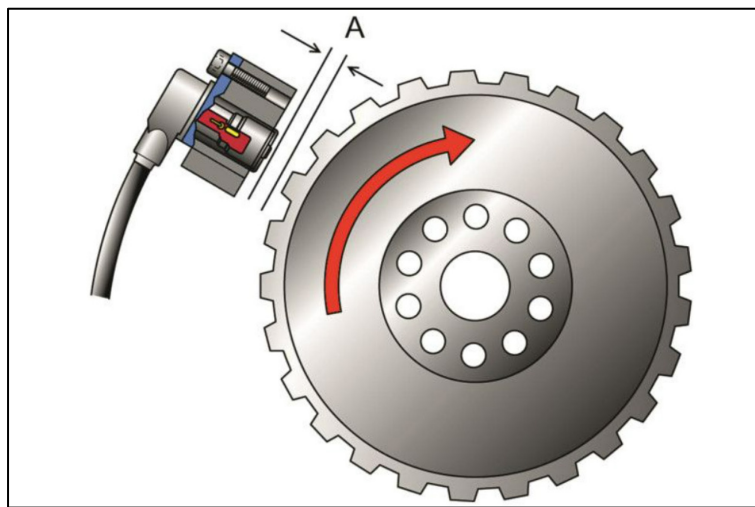


Figura 2.11. Schema di funzionamento di un sensore numero giri ruote passivo

b) Sensori numero giri ruote attivi

Sono sensori di prossimità con elettronica integrata, alimentati con una tensione definita dalla centralina ABS. Come ruota fonica viene usato un anello multipolare che può essere montato in un anello di tenuta di un cuscinetto ruota. In questo anello di tenuta sono inseriti magneti con polarità alternata.

Le resistenze magnetoresistive integrate nel circuito elettronico del sensore, riconoscono un campo magnetico alternato nel movimento di rotazione dell'anello multipolare. Questo segnale sinusoidale viene convertito in un segnale digitale dall'elettronica del sensore. La trasmissione alla centralina avviene come segnale di corrente nella procedura di modulazione ad ampiezza d'impulsi.

Oltre ai componenti di sensori magnetoresistivi, oggi vengono integrati anche componenti di sensori Hall che consentono trasferri maggiori e rispondono a minimi cambiamenti del campo

magnetico. Se in un veicolo viene installata una ruota fonica in acciaio al posto di un anello multipolare, sul componente del sensore viene integrato anche un magnete. Con la rotazione della ruota fonica varia il campo magnetico costante del sensore. L'elaborazione del segnale e il circuito integrato sono identici al sensore magnetoresistivo. [10]

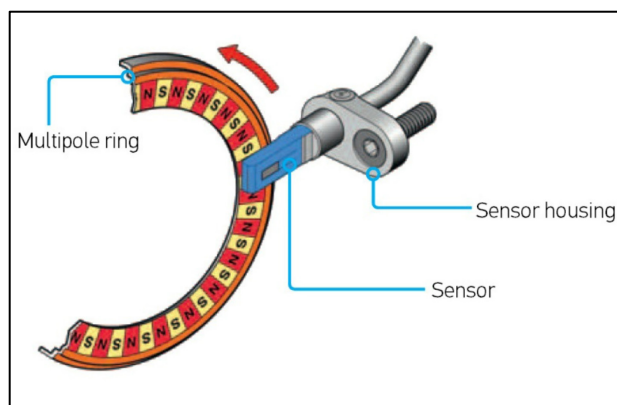


Figura 2.12. Schema di funzionamento di un sensore numero giri ruote attivo

Sensore pioggia: a metà degli anni '90 arrivarono le prime auto con i tergicristalli che si azionavano da soli in caso di pioggia. Inizialmente il sensore era collocato alla base dello specchietto retrovisore, mentre adesso è integrato all'interno del parabrezza.

Alla base degli attuali sensori pioggia e crepuscolari (verranno spiegati a breve) c'è la stessa tecnologia che sfrutta i sensori optoelettronici, in grado di rilevare variazioni di luce.

I moderni sensori di pioggia proiettano una luce infrarossa sul parabrezza dall'interno dell'abitacolo: se il vetro è bagnato la luce riflessa che ritorna al sensore sarà minore. Questa diminuzione dell'intensità del raggio che viene rilevata, attiva automaticamente i tergicristalli. Non solo, visto che l'intensità del raggio infrarosso che viene rilevato dal fotodiode è direttamente proporzionale all'intensità della pioggia (più piove, meno luce verrà riflessa) l'elettronica di bordo è in grado di calcolare la quantità d'acqua che sta cadendo e regolare la velocità del tergicristallo di conseguenza. [11], [12]

Sensore crepuscolare: è composto da un rilevatore optoelettronico che misura le condizioni esterne di luminosità, riuscendo a distinguere tra luce artificiale e luce naturale. Ad essere misurata è sia la luce ambiente sia la luminosità dell'area antistante il veicolo. Sulla base dei dati forniti dai due sensori indipendenti e da ulteriori informazioni raccolte dall'elettronica del veicolo, un algoritmo riconosce le varie condizioni di luce. Il sensore crepuscolare, infatti, non distingue banalmente solo fra notte e giorno, ma individua il crepuscolo, il passaggio in un tunnel o sotto un ponte e accende o spegne conseguentemente i fanali dell'auto.[11], [12]

Capitolo 3

Sensori per la guida assistita ed autonoma

Se fino a qualche anno fa l'auto in grado di guidare senza conducente rientrava nella categoria del "futuribile", oggi la maggior parte delle persone ha definitivamente familiarizzato con questa idea e non si stupisce più nel vedere le mani che si staccano dal volante. Dietro la guida autonoma c'è però tanta tecnologia, che dà un contributo decisivo a quello che ormai si incomincia a dar per scontato quando si parla di assistenza alla guida o guida automatizzata. Alla base di tutto, come nel cervello, c'è la ricostruzione virtuale dell'ambiente circostante. È proprio tale ricostruzione, resa possibile dalla continua analisi e ricombinazione degli input raccolti dai sensori, a ricreare l'ambiente dove il mezzo è in grado di muoversi in completa autonomia. Dispositivi come ultrasuoni, radar, telecamere, lidar, devono collaborare tra loro per fornire al cervello dell'auto informazioni sempre aggiornate per muoversi in sicurezza. Ecco perché, negli ultimi anni, molti tra i più importanti produttori di componenti per auto hanno sancito alleanze strategiche con i più grandi player dell'Information Technology (IT) e dell'universo dei software: sviluppare e perfezionare sempre più le tecnologie alla base dei dispositivi che sono indispensabili per la guida autonoma.

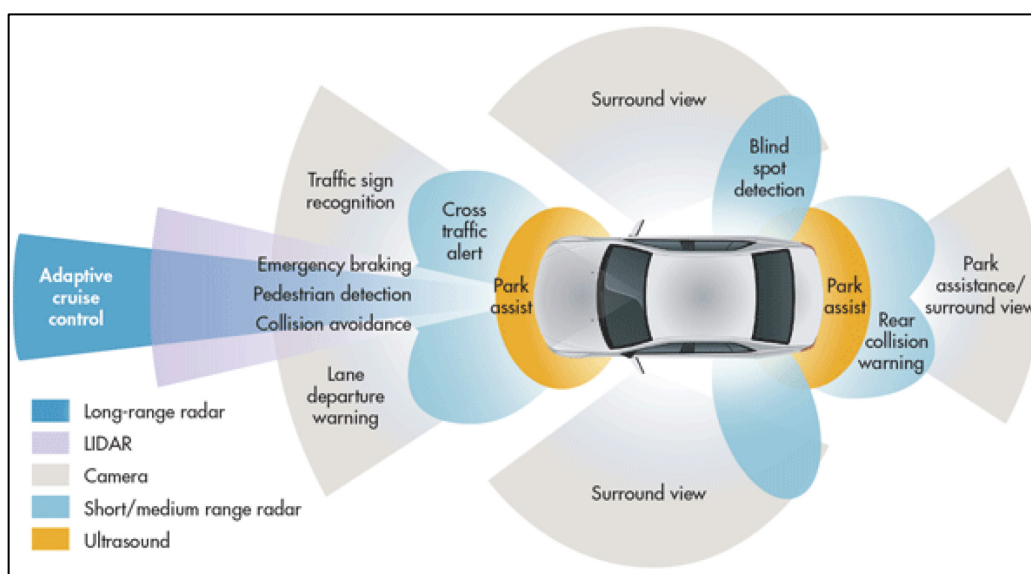


Figura 3.1. Dispositivi per la guida assistita e loro sensori

Qui di seguito sono riportate le ultime tecnologie e dispositivi che stanno rendendo possibile questa “rivoluzione” (già in corso) dell’auto, e che porterà ad un’accelerazione verso livelli di guida autonoma sempre più alti, fino ad arrivare al “non più fantascientifico” livello cinque: la guida completamente automatizzata.

3.1 Sensore ultrasonico

Un sensore a ultrasuoni è un dispositivo elettronico che misura la distanza di un oggetto-bersaglio mediante l’uso di onde sonore ultrasoniche, ossia di vibrazioni longitudinali elastiche la cui frequenza è maggiore del limite superiore di udibilità dell’orecchio umano (20 KHz), e converte il suono riflesso dal bersaglio in un segnale elettrico.

I sensori a ultrasuoni sono costituiti da due componenti principali: il trasmettitore (che emette il suono utilizzando cristalli piezoelettrici) e il ricevitore (che riceve il suono riflesso). Per calcolare la distanza tra il sensore e l’oggetto, si misura il tempo intercorso tra l’emissione del suono e il rilevamento dell’onda riflessa.[13]

I sensori a ultrasuoni sono in grado di rilevare oggetti ad una distanza compresa tra 20 mm e 10 m, ragion per cui, sono utilizzati principalmente come sensori di prossimità. Si trovano, infatti, nella tecnologia di autoparcheggio delle automobili e nei sistemi di sicurezza anticollisione. Un aspetto fondamentale di questi sensori è quello di rilevare gli oggetti indipendentemente dal colore, dalla superficie o dal materiale di cui sono composti; funzionano perciò egregiamente anche in caso di nebbia e con il buio.[14], [15]



Figura 3.2. Sensore di parcheggio

3.2 Radar

Il radar, acronimo dell'inglese "radio detection and ranging" (ovvero "radiatorilevamento e misurazione di distanza"), è un sistema che utilizza onde elettromagnetiche appartenenti allo spettro delle onde radio per il rilevamento e la determinazione della posizione degli oggetti. Più precisamente, può essere impiegato anche per calcolare la velocità dell'oggetto, sfruttando il fenomeno dell'effetto doppler che consiste nell'apparente variazione della frequenza di una radiazione, dovuta al moto relativo tra sorgente e ricevitore. I sensori radar hanno inoltre il grosso vantaggio di non essere fortemente influenzati da elementi come la pioggia o la neve.

Anche i radar, così come gli ultrasuoni, sono composti da due apparati fondamentali: il trasmettitore (che lavora in perfetta simbiosi con un'antenna, così da poter concentrare le onde emesse nella zona prescelta) e il ricevitore (che raccoglie ed elabora le onde che vengono riflesse dalla superficie del bersaglio).

Se fino a ieri questi sensori non erano in grado di riconoscere e "classificare" gli oggetti rilevati (ad esempio, non era possibile distinguere se quello davanti fosse un ingorgo o un cartello stradale), oggi questo limite è stato superato grazie all'incrementata risoluzione verticale e orizzontale, che consente di distinguere in modo inequivocabile anche oggetti di piccole dimensioni ed eventuali pedoni o animali presenti a bordo strada. In aggiunta, utilizzando sensori multicanale, è possibile osservare il movimento del bersaglio da diverse prospettive riuscendo così a determinare anche i movimenti più complessi. [16]

Nella tecnologia radar per auto si distinguono radar a corto e lungo raggio. I primi lavorano con ampi angoli di apertura ed una portata ridotta (fino a 100 metri) che ne indirizza l'installazione verso l'estremità del paraurti. Questi vengono utilizzati nei sistemi di assistenza e di avviso del cambio di corsia e in quelli per l'uscita dal parcheggio. I secondi invece, dispongono di una portata lunga, completa e coprono distanze maggiori (fino a 250 metri). Vengono pertanto sfruttati nella raccolta dati per funzionalità come la frenata di emergenza o la regolazione automatica della distanza (Adaptive Cruise Control o ACC). [17]



Figura 3.2. Sensori radar a corto e lungo raggio

3.3 Telecamera

Nelle auto moderne vengono impiegati anche diversi tipi di telecamere. Tra tutte, quella sicuramente più nota e richiesta è quella che facilita la manovra di parcheggio, ossia la telecamera di retromarcia. Essa funziona con un ampio angolo di apertura e ha il vantaggio di riprendere un ampio campo di visuale.

Per le funzionalità di guida, di grande importanza sono invece le telecamere che hanno obiettivi in grado di lavorare con diverse distanze focali, dal grandangolo al teleobiettivo, e che in genere vengono posizionate dietro al parabrezza. Rispetto agli altri dispositivi sopra elencati, questo sistema di acquisizione dati ha due grossi vantaggi: un'altissima risoluzione d'immagine e, di conseguenza, una grande precisione nel distinguere, valutare e riconoscere oggetti ed ostacoli. Quest'ultima è merito soprattutto dell'intelligenza artificiale; è chiaro, infatti, che per identificare e riconoscere i diversi oggetti incontrati, il sistema di elaborazione delle immagini dev'essere programmato e addestrato a migliorare autonomamente.

Grazie alle telecamere, si possono anche integrare informazioni come lo stato di un semaforo o i segnali stradali. Le funzionalità di questi sensori possono però essere limitate da elementi ambientali come l'oscurità o il sole al tramonto, oppure da sporcizia depositatasi sulla lente. Inoltre, grazie al principio di misurazione passiva, distanze e velocità sono valutabili solo dai dati delle immagini e in questo campo sono più efficaci altri sensori. La sfera di utilizzo della telecamera è complessivamente ampia: riconosce le strisce delle corsie e supporta funzionalità di assistenza alla guida come il sistema di mantenimento della corsia o la frenata di emergenza, che reagiscono alla presenza di veicoli, pedoni e biciclette. [14], [18], [19]

3.4 Sensore Lidar

Il lidar (Light Detection and Ranging) è una tecnica attiva di rilevamento della distanza, fondata sul principio di misura del tempo di volo (anche detto toF, acronimo di time of Flight). Il principio di funzionamento del Lidar è molto simile a quello di ultrasuoni e radar, in questo caso però, viene misurato il tempo intercorso tra l'emissione di un impulso luminoso e il rilevamento del corrispondente segnale riflesso a causa dello scontro con un bersaglio posto ad una distanza incognita. Un dispositivo elettronico procede quindi all'elaborazione del segnale retrodiffuso al fine di creare una nuvola di punti 3D dell'ambiente circostante alla sorgente.

In Tabella 3.1 è possibile vedere schematicamente le principali caratteristiche delle tre tipologie di lidar che sono state sviluppate negli ultimi decenni. Esse sono tutte incentrate sul principio

del tempo di volo e sono state ottenute modulando intensità, fase e frequenza del segnale trasmesso.

	Impulso	AMCW	FMCW
Parametro misurato	Intensità dell'impulso emesso e ricevuto	Fase dell'ampiezza modulata	Battito relativo della frequenza modulata e spostamento Doppler
Misurazione	Diretto	Indiretto	Indiretto
Rilevamento	Incoerente	Incoerente	Coerente
Utilizzo	Interno/esterno	Solo al coperto	Interno/esterno
Vantaggio principale	Semplicità di impostazione; ampio campo di ambiguità	Stabilito a livello commerciale	Misure simultanee di velocità e portata
Limitazione principale	Basso SNR dell'impulso restituito	Breve distanza di ambiguità	Lunghezza di coerenza/Stabilità in condizioni operative (ad esempio, termiche)
Risoluzione in profondità (tip)	1 cm	1 cm	0,1 cm

* Nota: la portata massima raggiungibile è stata evitata perché richiede la definizione di molti altri parametri (FOV istantaneo, riflettività del bersaglio, livello di sicurezza per gli occhi, ecc.)

Tabella 3.1. Principali caratteristiche di lidar ad impulsi, AMCW e FMCW

Nei sottoparagrafi qui sotto, invece, sono stati analizzati i principali vantaggi e svantaggi di ciascuna modalità di funzionamento del lidar.

3.4.1. Modalità pulsata

Questa tecnica si basa sul semplice principio di modulazione del fascio di illuminazione: la distanza viene determinata moltiplicando la velocità della luce nel mezzo di propagazione per il tempo impiegato dall'impulso a percorrere la distanza dal bersaglio. Dal momento che la velocità della luce è una costante nota, quando si rimane all'interno dello stesso mezzo ottico la distanza dall'oggetto è direttamente proporzionale al tempo di volo. Si deve però tenere in considerazione che il tempo misurato è rappresentativo del doppio della distanza dall'oggetto (la luce viaggia verso il bersaglio avanti e indietro), pertanto esso deve essere dimezzato per fornire il valore effettivo della distanza dal bersaglio. In definitiva, quindi:

$$R = \frac{c}{2} \cdot t_{oF} \quad (3.1)$$

dove R è la distanza dal bersaglio, c è la velocità della luce nello spazio libero ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) e t_{oF} è il tempo che impiega l'impulso di energia a viaggiare dal suo emettitore all'oggetto osservato e tornare indietro al ricevitore.

La Figura 3.3 mostra uno schema semplificato di un'implementazione tipica.

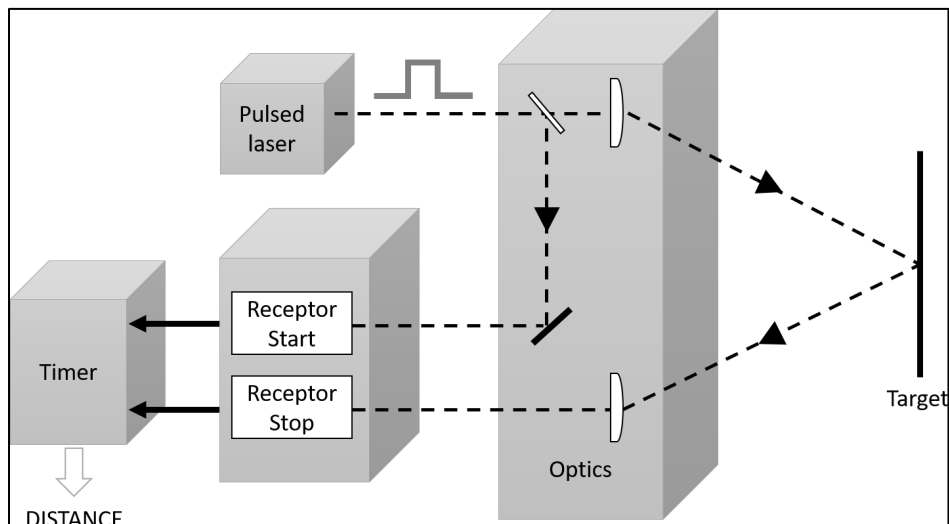


Figura 3.3. Principio di misura del tempo di volo pulsato

Uno degli svantaggi principali dei lidar ad impulsi è sicuramente dato dalla loro bassa portata. Le perdite di energia del laser durante la sua corsa (soprattutto nei bersagli diffondenti), combinate con l'elevata larghezza di banda del circuito di rilevamento, creano infatti una competizione tra il debole segnale di ritorno e il rumore elettronico, rendendo di fatto il rapporto segnale/rumore (SNR) il fattore limitante della portata. Per questo motivo, questi dispositivi necessitano di impulsi luminosi molto intensi (sempre rispettando la luminosità massima oltre la quale il laser diventa pericoloso per la vista umana) e di rilevatori molto sensibili che lavorino ad alte frequenze, così da rilevare anche i deboli impulsi ricevuti. I grandi fattori di amplificazione nel rilevamento e l'esigenza di lavorare a frequenze elevate, fanno sì che l'elettronica che gestisce i lidar ad impulsi sia piuttosto complessa.

Un altro aspetto da tenere bene in considerazione è la distanza di ambiguità (ovvero la massima portata che può essere misurata senza ambiguità) che, nell'approccio pulsato, è limitata dalla presenza di più impulsi simultanei in volo. La portata massima è invece correlata alla velocità di ripetizione degli impulsi laser.

A fronte di questi svantaggi però, i lidar ad impulsi vantano un principio di funzionamento semplice, dato dalla misurazione diretta del tempo di volo, hanno di per sé una lunga distanza di ambiguità e, grazie all'utilizzo di impulsi laser ad alta energia, non soffrono più di tanto dell'illuminazione di fondo. Ecco perché l'approccio ad impulsi è il sistema che oggi giorno viene scelto più frequentemente. [20]

3.4.2. Modalità ad onda continua modulata in ampiezza (AMCW)

L'approccio AMCW, differentemente dagli impulsi laser citati in precedenza, prevede l'utilizzo di un'onda luminosa continua la cui ampiezza viene opportunamente modulata. In particolare, la potenza ottica è modulata con una frequenza costante f_M (tipicamente di qualche decimo di MHz) che genera un'onda sinusoidale o quadra di frequenza appunto f_M .

Il principio di funzionamento di questi lidar è basato sulla determinazione della portata grazie allo sfasamento indotto in un segnale periodico, nel suo viaggio di andata e ritorno verso il bersaglio. Qui di seguito viene riportata la formula per il calcolo della distanza R dall'oggetto di riferimento

$$R = \frac{c \cdot \Delta\phi}{4 \cdot \pi \cdot f_M} \quad (3.2)$$

dove c è la velocità della luce nello spazio libero, $\Delta\phi$ lo sfasamento tra il segnale riflesso, raccolto dal ricevitore e quello emesso e f_M è la frequenza di modulazione dell'ampiezza del segnale.

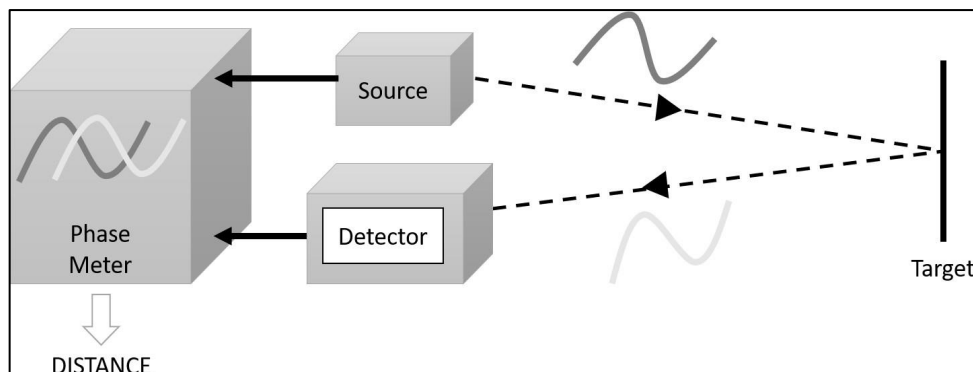


Figura 3.4. Principio di misurazione della fase nei sensori a modulazione di ampiezza d'onda continua

In questo approccio, la risoluzione del lidar è determinata dalla frequenza f_M del segnale di misura effettivo (che può essere regolato) e dalla risoluzione del misuratore di fase. Se quest'ultima viene fissata a priori, allora un eventuale aumento di f_M determina un corrispondente incremento della risoluzione del sensore.

Tuttavia, frequenze f_M più elevate comportano misure con intervalli di ambiguità più brevi, pertanto, è necessario adottare un compromesso tra la portata massima non ambigua e la risoluzione della misura. Come anticipato sopra, le frequenze di modulazione tipiche sono generalmente dell'ordine di pochi decimi di MHz.

Dal punto di vista dell'SNR, associato anche all'accuratezza della profondità, è necessario un tempo di integrazione relativamente lungo per ottenere un tasso di segnale accettabile. Ciò introduce, a sua volta, una sfocatura da movimento in presenza di oggetti in moto. A causa della necessità di questi lunghi tempi di integrazione, è infatti difficile ottenere velocità dell'otturatore o frame rate elevati.[20]

3.4.3. Modalità a modulazione di frequenza ad onda continua (FMCW)

L'approccio FMCW si basa sui principi dell'interferometria, un'importante tecnica diagnostica che si avvale delle interferenze fra più onde coerenti per misurare distanze e spostamenti.

Vista la sua complessità tecnica, si è scelto di tralasciare la trattazione teorica della modulazione di frequenza ad onda continua e di limitarsi a riportare i punti di forza di questa tecnologia rispetto alle precedenti.

I lidar a modulazione di frequenza presentano infatti, due vantaggi eccezionali: un'ottima risoluzione nella misurazione della portata (che può arrivare fino a 150 μm a grandi distanze) e la possibilità di misurare oltre che alla distanza, anche la velocità di spostamento del bersaglio, sfruttando il principio dell'effetto Doppler. [20]

Conclusioni

La cosa che più emerge da questo lavoro di tesi è la quantità di sensori che oggi giorno si trovano montati nelle auto. Nel giro di una trentina d'anni essi sono cresciuti esponenzialmente, portando benefici così evidenti da diventare oggi dispositivi indispensabili per la stragrande maggioranza dei guidatori. A riprova di ciò, proprio quest'anno, si stanno riscontrando notevoli ritardi, da parte dei concessionari, nella consegna di nuove auto agli acquirenti. Questi continui rinvii sono dovuti esclusivamente alla difficoltà delle grosse case automobilistiche a reperire i microchip necessari per la costruzione delle centraline elettroniche.

Un'analisi di IDTechEX (riportata in Figura 4.1) mostra che, generalmente, ad una nuova tecnologia, sono necessari circa 15-20 anni per passare dallo stadio di ingresso sul mercato automobilistico all'adozione su larga scala. Le previsioni degli esperti indicano però, che le tecnologie relative alla sicurezza saranno adottate sempre più rapidamente perché verranno incoraggiate o imposte dagli organismi di sicurezza internazionali. Un esempio recente a tal riguardo, è dato dal regolamento UE 2019/2144, entrato in vigore il 6 Luglio 2022, che dispone l'obbligo di equipaggiare le auto di nuova immatricolazione con una serie di dispositivi ADAS atti a innalzare la sicurezza attiva e passiva durante la guida e con l'Event Data Recorder, una sorta di scatola nera che andrà a monitorare e memorizzare tutta una serie di dati acquisiti durante la guida. [21]

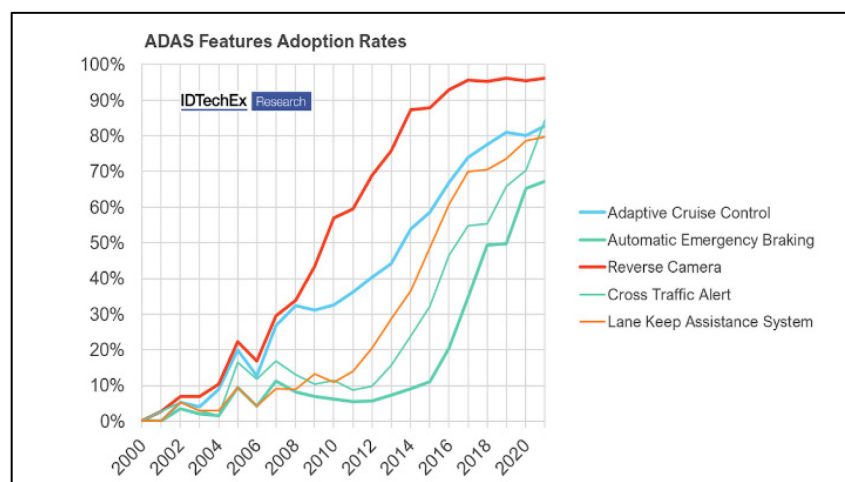


Figura 4.1 Progressione nell'adozione dei dispositivi ADAS negli ultimi 20 anni

Quello che deve essere chiaro però, è che se da una parte tutti questi nuovi dispositivi di ausilio avanzato alla guida, basati sull'interazione di sensori sempre più evoluti, porteranno

indiscutibilmente ad una riduzione degli incidenti e pertanto ad un aumento della sicurezza sulle strade, dall'altra parte, si dovrà comunque tenere bene a mente che il conducente deve mantenere un comportamento responsabile alla guida. Almeno per ora, infatti, i sistemi ADAS non sono piloti automatici in grado di sostituire completamente il guidatore, sono dei software che aiutano i conducenti a guidare meglio e con maggiore sicurezza, prevenendo eventuali cali di concentrazione.

Bibliografia

- [1] “Car Sensors: What Are Car Sensors and How Do They Work?”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.carbibles.com/car-sensors/>
- [2] “La storia dell’ABS”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: https://www.tuttosport.com/news/motori/news-motori/2019/10/09-62099622/la_storia_dell_abs
- [3] “Tecnica: la storia dell’iniezione diretta”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://tuttoautoweb.com/index.php/2016/10/12/tecnica-la-storia-delliniezione-diretta/>
- [4] “Iniezione diretta del carburante: una breve storia”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://bizinsightsnews.com/it/iniezione-diretta-del-carburante-una-breve-storia/>
- [5] “Tutte le differenti tipologie di Sensore”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.itsensor.it/blog/tutte-le-differenti-tipologie-di-sensore/>
- [6] “introduzione ai sensori”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.autotecnica.org/breve-introduzione-ai-sensori/>
- [7] “Effetto Hall, che cosa è? Vantaggi e soluzioni”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://consystem.it/faq/che-cosa-e-leffetto-hall-vantaggi-e-soluzioni-sensori-ad-effetto-hall/>
- [8] “Come funziona il sensore di ossigeno in un’auto?”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://ottima-power.com/it/come-funziona-il-sensore-di-ossigeno-in-unauto/>
- [9] “Sonda lambda nei veicoli: che cos’è e a cosa serve”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://motori2.quotidiano.net/comefare/sonda-lambda-nei-veicoli-cosa-e-a-cosa-serve.htm>
- [10] “SENSORE ABS”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.hella.com/techworld/it/Tecnica/Sensori-e-attuatori/Sensore-ABS-4074/>
- [11] “Sensori pioggia e luce in auto, come funzionano”, Accessed: Nov. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.iconwheels.it/info-utili/sensore-pioggia-luce-auto-come-funzionano>
- [12] “Sensore luci e pioggia: l’evoluzione di un sistema sempre più diffuso”, Accessed: Nov. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.sicurauto.it/ricambi-e-accessori/tecnica-e-manutenzione/sensore-luci-e-pioggia-levoluzione-di-un-sistema-sempre-piu-diffuso/>
- [13] “What is an Ultrasonic Sensor?”, Accessed: Nov. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-ultrasonic-sensor>
- [14] “Sensori automotive: organi di senso dei sistemi ADAS”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.bmw.com/it/innovation/sensori-automotive.html>

- [15] “An Ultrasonic Sensor System for Vehicle Detection Application”, Accessed: Nov. 18, 2022. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1204/1/012017/pdf>
- [16] “What is a radar sensor?”, Accessed: Nov. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-a-radar-sensor>
- [17] C. Liang *et al.*, “Cooperative Automotive Radars with Multi-Aperture Multiplexing MIMO Sparse Array Design,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 8, Apr. 2022, doi: 10.3390/electronics11081198.
- [18] “ADAS Sensors Guide”, Accessed: Nov. 18, 2022. [Online]. Available: <https://caradas.com/adas-sensors-guide/>
- [19] “What Are ADAS Sensors?”, Accessed: Nov. 18, 2022. [Online]. Available: <https://chieftechnology.com/blog/what-are-adas-sensors/>
- [20] S. Royo and M. Ballesta-Garcia, “An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 19, Oct. 2019, doi: 10.3390/app9194093.
- [21] “A History of ADAS: Emergence to Essential”, Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.idtechex.com/en/research-article/a-history-of-adas-emergence-to-essential/25592>