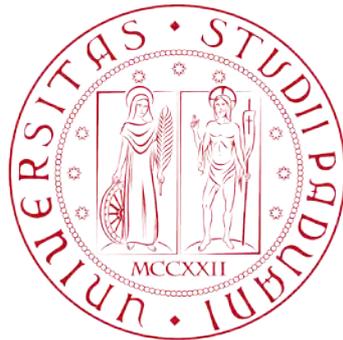


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**



**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE INDIRIZZO TRASPORTI**

**Dipartimento di Ingegneria Civile Edile ed Ambientale - ICEA**

**TESI DI LAUREA**

**SISTEMI PER L'AUTOMAZIONE DEL DEFLUSSO  
VEICOLARE NELLE RETI AUTOSTRADALI**

**Relatore: Prof. Claudio Meneguzzer**

**Laureando: Enrico Vivori**

**Matricola: 1057625**

**ANNO ACCADEMICO**

**2013-2014**







# Indice

<b>INDICE .....</b>	<b>3</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE.....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>15</b>
<b>CAPITOLO 1 IL SISTEMA AHS .....</b>	<b>17</b>
1.1 Cenni Storici.....	19
1.1.1 Dal 1930 al 1970.....	19
1.1.2 Dal 1970 al 1980.....	19
1.1.3 Dal 1980 al 1997.....	19
1.1.3.1 Dimostrazione del 1997.....	22
1.1.4 Dal 1997 al 2005.....	23
1.1.5 Dal 2005 ad oggi.....	24
1.1.5.1 SARTRE .....	25
1.1.5.2 HAVEit.....	26
1.1.6 AHS in Italia .....	27
1.2 Livelli di Automazione e Cooperazione.....	29
1.2.1 Sistemi di Avvertimento Autonomi.....	30
1.2.1.1 Assistenza alla guida.....	30
1.2.1.2 Assistente di cambio corsia.....	31
1.2.1.3 Assistenza alla frenata di emergenza .....	31

1.2.2	<i>Sistemi di Avvertimento Cooperativi</i> .....	32
1.2.3	<i>Adattamento Intelligente della Velocità</i> .....	33
1.2.4	<i>Cruise Control Adattivo</i> .....	34
1.2.5	<i>Veicoli Autonomi</i> .....	34
1.3	<i>Caratteristiche del sistema AHS</i> .....	37
1.3.1	<i>Obiettivi e benefici</i> .....	37
1.3.1.1	<i>Sicurezza</i> .....	37
1.3.1.2	<i>Capacità</i> .....	37
1.3.1.3	<i>Efficienza</i> .....	38
1.3.1.4	<i>Effetto ambientale</i> .....	38
1.3.2	<i>Problemi</i> .....	39
1.3.2.1	<i>Costi</i> .....	39
1.3.2.2	<i>Accettazione del pubblico</i> .....	40
1.3.2.3	<i>Organizzazione</i> .....	40
1.3.2.4	<i>Responsabilità</i> .....	40
<b>CAPITOLO 2</b>	<b>STRUTTURA DI UN SISTEMA AHS</b> .....	<b>43</b>
2.1	<i>Introduzione</i> .....	43
2.2	<i>Modello Highway</i> .....	45
2.3	<i>Sistemi di controllo dell'infrastruttura</i> .....	46
2.3.1	<i>Network layer</i> .....	46
2.3.2	<i>Link layer</i> .....	48
2.4	<i>Sistemi di controllo del veicolo</i> .....	50
2.4.1	<i>Coordination layer</i> .....	50
2.4.2	<i>Regulation layer</i> .....	53
2.4.3	<i>Physical layer</i> .....	55

<b>CAPITOLO 3</b>	<b>ASPETTI TECNOLOGICI DEI SISTEMI AHS .....</b>	<b>57</b>
3.1	<i>Veicolo.....</i>	57
3.1.1	<i>Requisiti della struttura PATH.....</i>	57
3.1.1.1	<i>Sensori di rilevazione.....</i>	57
3.1.1.2	<i>Sistema di comunicazione.....</i>	59
3.1.2	<i>Veicolo SatAnt.....</i>	60
3.1.2.1	<i>Sistemi di controllo elettronico.....</i>	62
3.1.2.1.1	<i>Sistema di controllo elettronico dello sterzo.....</i>	62
3.1.2.1.2	<i>Sistema di controllo elettronico della velocità.....</i>	62
3.1.2.1.3	<i>Sistema di controllo elettronico dei freni.....</i>	63
3.1.2.2	<i>Software a bordo del veicolo.....</i>	63
3.1.2.2.1	<i>Struttura modulare.....</i>	64
3.1.2.2.2	<i>Comportamento del veicolo.....</i>	65
3.1.3	<i>Confronto con altre tipologia di veicoli automatizzati.....</i>	67
3.2	<i>Infrastruttura.....</i>	69
3.2.1	<i>Requisiti della struttura PATH.....</i>	69
<b>CAPITOLO 4</b>	<b>MODELLI PER I SISTEMI AHS.....</b>	<b>71</b>
4.1	<i>Strategies and Spacing Requirements for Lane Changing and Merging in Automated Highway Systems.....</i>	71
4.1.1	<i>Controllo longitudinale.....</i>	74
4.1.2	<i>Controllo laterale.....</i>	76
4.1.3	<i>Comportamenti.....</i>	77
4.1.3.1	<i>Condizioni di sforzo.....</i>	77
4.1.3.2	<i>Sicurezza.....</i>	78
4.1.3.2.1	<i>Veicoli autonomi.....</i>	79
4.1.3.2.2	<i>Plotoni coordinati.....</i>	82

4.1.3.2.3	<i>Distanza di sicurezza</i> .....	83
4.1.3.3	<i>Simulazioni</i> .....	86
4.1.3.3.1	<i>Valore massimo della distanza minima di sicurezza tra i veicoli <math>l_1</math> e <math>m</math></i> .....	87
4.1.3.3.2	<i>Valore massimo della distanza minima di sicurezza tra i veicoli <math>l_2</math> e <math>m</math></i> .....	87
4.1.3.3.3	<i>Valore massimo della distanza minima di sicurezza tra i veicoli <math>m</math> e <math>f_1</math></i> .....	88
4.1.3.3.4	<i>Valore massimo della distanza minima di sicurezza tra i veicoli <math>m</math> e <math>f_2</math></i> .....	88
4.1.3.4	<i>Conclusioni</i> .....	89
4.2	<i>Mixed Manual/Semi-Automated Traffic: a Macroscopic Analysis</i> .....	90
4.2.1	<i>Diagrammi fondamentali flusso - densità</i> .....	90
4.2.1.1	<i>Traffico di veicoli a guida manuale</i> .....	90
4.2.1.2	<i>Traffico a guida semi-automatica</i> .....	94
4.2.1.3	<i>Traffico misto</i> .....	97
4.3	<i>Safety and Capacity Analysis of Automated and Manual Highway Systems</i> .....	99
4.3.1	<i>Modellazione</i> .....	100
4.3.1.1	<i>Calcolo della velocità di collisione</i> .....	101
4.3.1.2	<i>Calcolo della capacità dell'autostrada</i> .....	101
4.3.1.3	<i>Tipologie di AHS</i> .....	102
4.3.2	<i>Scelta dei parametri</i> .....	103
4.3.2.1	<i>Veicoli a guida automatica</i> .....	103
4.3.2.1.1	<i>Ritardo</i> .....	103
4.3.2.1.2	<i>Velocità relativa</i> .....	104
4.3.2.1.3	<i>Decelerazione massima</i> .....	104

4.3.2.1.4	<i>Distanza fra i veicoli.....</i>	<i>105</i>
4.3.2.1.5	<i>Velocità dei veicoli.....</i>	<i>105</i>
4.3.2.2	<i>Veicoli a guida manuale.....</i>	<i>106</i>
4.3.2.2.1	<i>Parametri del veicolo.....</i>	<i>106</i>
4.3.2.2.2	<i>Tempo di reazione.....</i>	<i>106</i>
4.3.2.2.3	<i>Distanza fra i veicoli.....</i>	<i>107</i>
4.3.2.2.4	<i>Velocità del veicolo follower .....</i>	<i>107</i>
4.3.3	<i>Risultati.....</i>	<i>108</i>
4.3.3.1	<i>Confronto fra guida manuale e automatica .....</i>	<i>108</i>
4.3.3.2	<i>Confronto fra tipologie AHS.....</i>	<i>109</i>
4.3.3.3	<i>Confronto fra veicoli individuali e plotoni a diverse velocità .....</i>	<i>110</i>
4.3.3.4	<i>Confronto fra distanze tra veicoli all'interno di un plotone.....</i>	<i>112</i>
4.3.3.5	<i>Rapporto tra sicurezza e capacità .....</i>	<i>113</i>
<b>CONCLUSIONI.....</b>		<b>117</b>
<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....</b>		<b>121</b>
<b>CITAZIONI INDIRETTE .....</b>		<b>125</b>



# Indice delle figure

<b>Figura 1.1</b> Test di guida di un veicolo a guida automatica del progetto PROMETHEUS (Mercedes, 2014) .....	20
<b>Figura 1.2</b> Plotone dei veicoli durante la dimostrazione (Bryant, 1997).....	22
<b>Figura 1.3</b> Posizionamento dei magneti al centro della corsia ogni 1,2 metri per il controllo dello sterzo del veicolo (Bryant, 1997) .....	22
<b>Figura 1.4</b> Bus IMTS all'Expo di Aichi (Toyota, 2014).....	24
<b>Figura 1.5</b> Funzionamento del sistema previsto nel progetto SARTRE (SARTRE-Consortium, 2014) .....	25
<b>Figura 1.6</b> Livelli di automazione del veicolo (Shladover, 2012).....	26
<b>Figura 1.7</b> Immagini del veicolo utilizzato per la MilleMiglia in Automatico (Argo, 2014).....	27
<b>Figura 1.8</b> Prototipi BRAiVE (a sinistra) e Deeva (a destra) (VisLab, 2014).....	28
<b>Figura 1.9</b> Alternative di Cooperazione e Automazione tra veicoli (Shladover, 2012) .....	29
<b>Figura 1.10</b> Indicatore di presenza di un'autovettura nell'angolo cieco (Toyota, 2014) .....	31
<b>Figura 1.11</b> Rappresentazione del sistema di avvertimento e comunicazione (Fraunhofer-Gesellschaft, 2014).....	32
<b>Figura 1.12</b> Indicazione dei limiti di velocità sul cruscotto della vettura (Google, 2014) .....	33
<b>Figura 1.13</b> Google Lexus RX 450H Self Driving Car (Lowensohn, 2014).....	35
<b>Figura 1.14</b> Visione tridimensionale della vettura (Google, 2014).....	35
<b>Figura 1.15</b> Prototipo Deeva (VisLab, 2014).....	36
<b>Figura 1.16</b> Visione tridimensionale dei sensori (VisLab, 2014).....	36

<b>Figura 1.17</b> Problemi e soluzioni per un sistema AHS.....	41
<b>Figura 2.1</b> Rappresentazione della struttura del sistema PATH.....	44
<b>Figura 2.2</b> Rappresentazione della topologia della strada mediante il modello Highway (Eskafi, 1996) .....	45
<b>Figura 2.3</b> Derivazione delle patches dal modello Highway (Eskafi, 1996).....	46
<b>Figura 2.4</b> Derivazione della struttura del Link layer dal modello Highway (Eskafi, 1996).....	48
<b>Figura 2.5</b> Interazione tra Network e Link layer.....	49
<b>Figura 2.6</b> Struttura del Coordination layer.....	52
<b>Figura 2.7</b> Struttura del Regulation layer .....	55
<b>Figura 3.1</b> Sensori di rilevazione laterali e longitudinali (Eskafi, 1996).....	59
<b>Figura 3.2</b> Prototipo di autovettura SatAnt (Barberá & Pérez, 2014).....	60
<b>Figura 3.3</b> Struttura dei sistemi di controllo e comunicazione della vettura (Barberá & Pérez, 2014).....	61
<b>Figura 3.4</b> Struttura modulare del sistema di guida automatica del veicolo (Barberá & Pérez, 2014).....	65
<b>Figura 3.5</b> Caratteristiche di comportamento del veicolo (Barberá & Pérez, 2014) .	66
<b>Figura 3.6</b> Comparazione tra i diversi veicoli autonomi (Barberá & Pérez, 2014) ....	68
<b>Figura 4.1</b> Veicoli condizionati dalla manovra di Lane Changing (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001).....	72
<b>Figura 4.2</b> Variazione dell'accelerazione longitudinale in funzione del tempo (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001).....	74
<b>Figura 4.3</b> Variazione dell'accelerazione longitudinale in funzione del tempo (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001).....	75
<b>Figura 4.4</b> Forza longitudinale e laterale in funzione dell'angolo di scorrimento (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001).....	77
<b>Figura 4.5</b> Schema di posizionamento dei veicoli (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001).....	79
<b>Figura 4.6</b> Profili di accelerazione dei veicoli l, f e m (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001) .....	80
<b>Figura 4.7</b> Schema di posizionamento dei veicoli (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001).....	81

<b>Figura 4.8</b> Profili di accelerazione dei veicoli $l$ , $f$ e $m$ (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001) .....	81
<b>Figura 4.9</b> Profili di accelerazione dei veicoli nel plotone (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001) .....	82
<b>Figura 4.10</b> MSSLC massimo tra $l_1$ e $m$ in funzione della velocità relativa tra le due corsie (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001) .....	87
<b>Figura 4.11</b> MSSLC massimo tra $l_2$ e $m$ in funzione della velocità relativa tra le due corsie (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001) .....	87
<b>Figura 4.12</b> MSSLC massimo tra $m$ e $f_1$ in funzione della velocità relativa tra le due corsie (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001) .....	88
<b>Figura 4.13</b> MSSLC massimo tra $m$ e $f_2$ in funzione della velocità relativa tra le due corsie (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001) .....	88
<b>Figura 4.14</b> Distanza fra veicoli nella stessa corsia (Ioannou & Bose, 2003) .....	91
<b>Figura 4.15</b> Diagramma $q - k$ per veicoli a guida manuale (Ioannou & Bose, 2003).....	93
<b>Figura 4.16</b> Diagramma $q - k$ per veicoli a guida semi-automatica (Ioannou & Bose, 2003).....	95
<b>Figura 4.17</b> Condizione di traffico con veicoli a guida manuale e semi-automatica (Ioannou & Bose, 2003) .....	97
<b>Figura 4.18</b> Diagramma $q - k$ per un assegnato valore della percentuale di veicoli a guida semi-automatica (Ioannou & Bose, 2003).....	98
<b>Figura 4.19</b> Densità di probabilità della capacità frenante dei veicoli automatizzati (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998).....	105
<b>Figura 4.20</b> Densità di probabilità del tempo di reazione (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998).....	106
<b>Figura 4.21</b> Distanza fra i veicoli in funzione della velocità relativa (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998).....	107
<b>Figura 4.22</b> Confronto sicurezza fra guida manuale e automatica (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998).....	108
<b>Figura 4.23</b> Confronto sicurezza fra diversi livelli di cooperazione (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998).....	109
<b>Figura 4.24</b> Veicoli a bassa cooperazione con differenti velocità (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998).....	110

<b>Figura 4.25</b> <i>Veicoli coordinati a plotoni con differenti velocità (Carbaugh, Godbole, &amp; Sengupta, 1998)</i> .....	111
<b>Figura 4.26</b> <i>Sicurezza plotoni a diverse distanze tra veicoli (Carbaugh, Godbole, &amp; Sengupta, 1998)</i> .....	112
<b>Figura 4.27</b> <i>Relazione fra probabilità di non collisione e capacità per tutte le tipologie di AHS (Carbaugh, Godbole, &amp; Sengupta, 1998)</i> .....	113
<b>Figura 4.28</b> <i>Relazione fra gravità collisione e capacità per tutte le tipologie di AHS (Carbaugh, Godbole, &amp; Sengupta, 1998)</i> .....	114





# Introduzione

Negli ultimi anni la tecnologia ha assunto un ruolo sempre più importante nella vita comune sia in ambito lavorativo che in ambito sociale. Anche il settore dei trasporti ha risentito degli effetti positivi dello sviluppo delle conoscenze nel campo delle telecomunicazioni, dell'elettronica e dell'informatica portando alla nascita dei cosiddetti *Intelligent Transportation Systems (ITS)*.

Tra i vari sistemi ITS gli *Automated Highway Systems (AHS)* si collocano ad un livello tecnologico molto avanzato e vedono tuttora una grande ricerca da parte di industrie automobilistiche, università ed enti governativi di varie nazioni.

Il presente lavoro si occupa dei sistemi AHS con riferimento ad aspetti funzionali, tecnologici e modellistici descrivendo il loro sviluppo negli ultimi vent'anni.

La tesi si struttura in quattro capitoli:

- Nel primo vengono descritti i sistemi AHS con cenni storici e principali caratteristiche
- Nel secondo si descrive quale può essere una struttura funzionale del sistema AHS fra quelle proposte dai vari studi di ricerca
- Il terzo capitolo è dedicato agli aspetti tecnologici che riguardano la progettazione del veicolo e dell'infrastruttura
- Il quarto capitolo, infine, illustra alcuni modelli che permettono di descrivere il funzionamento di un sistema AHS in particolari situazioni e di confrontarlo con le autostrade tradizionali

Le informazioni sono state principalmente ottenute da riviste specializzate nel settore dei trasporti quali *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* e *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.



# CAPITOLO 1

## IL SISTEMA AHS

L'utilizzo di sistemi avanzati di gestione e controllo del traffico, come pannelli informativi a messaggio variabile, installazioni di ramp-metering e limiti di velocità dinamici, è uno dei metodi più efficaci per il controllo del flusso di traffico e la diminuzione della frequenza e dell'impatto di fenomeni di blocco stradale nel breve termine.

Nel lungo periodo, sistemi tecnologici di informazione e comunicazione possono essere adottati nell'infrastruttura e nei veicoli per permettere una gestione del traffico e un controllo del sistema più ampio.

Questi sistemi vengono chiamati *Intelligent Vehicle Highway Systems (IVHS)*, *Intelligent Transportation Systems* e *Automated Highway Systems (AHS)*.

L'*Automated Highway System* è un sistema basato su veicolo e infrastruttura stradale che permette la guida automatica della vettura. Questo è possibile grazie all'utilizzo di sensori che permettono la localizzazione delle automobili e la determinazione delle distanze e velocità dei veicoli all'interno della rete AHS. Il sistema AHS fa riferimento ad un insieme di corsie con accesso limitato a mezzi equipaggiati con dotazioni specifiche.

Sistemi di controllo elettronico del veicolo vengono utilizzati per gestire velocità, accelerazione e sterzo in maniera automatica rispettando i comandi impartiti da un sistema computerizzato presente sia sul veicolo che sull'infrastruttura.

Tale sistema permette la coordinazione dei veicoli che si possono muovere in gruppi ravvicinati chiamati plotoni. All'interno di un plotone i veicoli viaggiano con distanze interne molto basse di circa 2 m e velocità elevate.

I plotoni sono tra loro distanziati di circa 30-60 m, così da consentire un migliore controllo ed una più facile risposta ad eventi straordinari che si possono verificare.

Questa modalità di gestione del deflusso permette ad un maggior numero di veicoli di entrare nella rete, aumentando la densità ed il flusso massimo raggiungibile.

Oltre alla comunicazione che avviene tra vettura e infrastruttura, i veicoli autonomi sono dotati di un sistema per comunicare fra loro e gestire le manovre in maniera indipendente.

Le vetture e l'infrastruttura lavorano simultaneamente per coordinare i movimenti delle vetture allo scopo di migliorare il flusso di traffico in modo da diminuire la congestione e aumentare in maniera significativa il livello di sicurezza.

## 1.1 Cenni Storici

### 1.1.1 Dal 1930 al 1970

L'idea di un sistema di trasporto stradale automatizzato che permettesse la guida senza conducente fu per la prima volta presentata al pubblico da *General Motors* con il suo modello di *driverless car* alla *World's Fairs*, a New York nel 1939. Negli anni '50 le ricerche compiute da grandi industrie automobilistiche concretizzarono l'idea mediante l'utilizzo di sistemi di controllo meccanici e comunicazioni radio. Con l'arrivo dei computer negli anni '60 le ricerche iniziarono a considerare il loro potenziale utilizzo per fornire il controllo laterale e longitudinale dei veicoli in maniera completamente automatica (Cheon, 2000).

### 1.1.2 Dal 1970 al 1980

Negli anni '70, il Ministero del Commercio Internazionale e dell'Industria del Giappone finanziò lo sviluppo di un sistema per la guida automatica chiamato *Computer-Controlled Vehicle System (CVS)*. Questo sistema doveva permettere il trasporto di passeggeri e merci utilizzando dei binari che consentissero al veicolo la guida automatica nelle autostrade, grazie alle guide posizionate sulla pavimentazione, e la guida manuale nelle strade tradizionali (Elston, 2012).

In Germania un consorzio sponsorizzato dal Ministero della Ricerca e della Tecnologia sviluppò un progetto chiamato *Cabintaxi* ma, come per il progetto CSV, non raggiunse mai la presentazione al pubblico fermandosi alla fase di sperimentazione.

### 1.1.3 Dal 1980 al 1997

L'industria dell'auto in Germania ebbe un grande coinvolgimento nello sviluppo di veicoli autonomi. Nel 1986 Mercedes lanciò il progetto *PROMETHEUS*, un progetto europeo per lo sviluppo dei sistemi ITS con particolare riguardo alla guida automatica.

Nel 1994 ci fu la prima dimostrazione in cui il veicolo sviluppato, chiamato *VITA II*, permetteva la guida completamente autonoma utilizzando principalmente telecamere, senza alcuna cooperazione con l'infrastruttura o altri veicoli, basandosi esclusivamente sull'ambiente circostante (Figura 1.1).



*Figura 1.1* Test di guida di un veicolo a guida automatica del progetto PROMETHEUS (Mercedes, 2014)

Al contrario, Volkswagen in collaborazione con il progetto PROMETHEUS sviluppò un sistema automatico di deflusso a plotoni chiamato *Convoy Driving* (Ioannou, 1997).

Essendo il progetto di un'azienda privata, le informazioni riguardo il funzionamento del sistema non sono state rese pubbliche.

Nel video di una simulazione era possibile notare come i ricercatori erano riusciti a creare una gestione dei plotoni con veicoli che viaggiavano a velocità elevate e distanze molto basse, mostrando anche situazioni di emergenza in varie condizioni atmosferiche.

Il programma di ricerca dell'*University of California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)* del 1989 fu il primo a produrre significativi risultati, grazie anche allo sviluppo di nuove tecnologie per l'assistenza alla guida, creando una struttura capace di controllare in maniera autonoma i veicoli all'interno dell'infrastruttura senza necessità di interventi da parte del guidatore.

Con il passaggio della legge *Intermodal Surface Transportation Efficiency Act (ISTEA)* del 1991 si introdusse il finanziamento per i sistemi di trasporto intelligenti (*ITS*) che comprendevano anche i sistemi AHS chiamati all'epoca *Intelligent Vehicle-Highway Systems (IVHS)*.

Nel 1994 il Dipartimento dei Trasporti degli Stati Uniti (*USDOT*) istituì il *National Automated Highway Systems Consortium (NAHSC)*, formato da una collaborazione tra governo, industria e università, con l'obiettivo di studiare le alternative di progettazione della struttura AHS, sperimentare alcuni elementi base della tecnologia e sviluppare un progetto dettagliato del sistema.

Dopo la creazione del NAHSC, il Giappone formò l'*Assist Highway Systems Research Association (AHSRA)*, per analizzare sistemi completamente automatizzati con cooperazione tra infrastruttura e veicoli.

### 1.1.3.1 Dimostrazione del 1997

Nell'agosto del 1997 la ricerca portò alla prima dimostrazione pratica di un sistema AHS nell'autostrada I-15 di San Diego in California. L'obiettivo era mostrare che la creazione di un sistema automatizzato era possibile e l'adozione di tale sistema poteva portare ad un miglioramento della sicurezza ed efficienza della rete. Per la dimostrazione, un gruppo di veicoli Buick LeSabre vennero equipaggiati con attuatori per sterzo, acceleratore e freno, dei magnetometri nei paraurti anteriore e posteriore, un radar per il controllo frontale, apparecchiature di comunicazione e due computer Pentium (Postema & Luke, 1998).

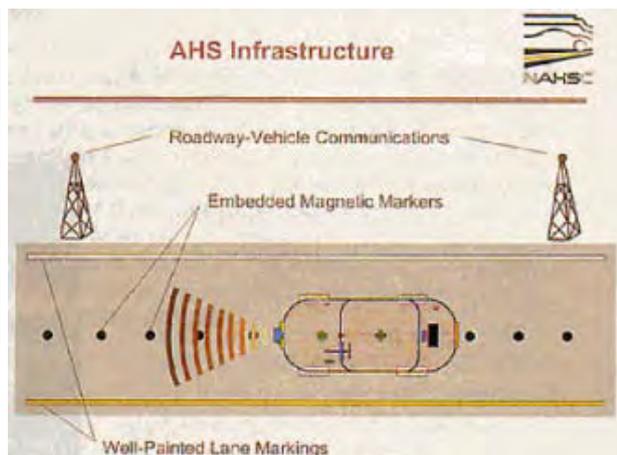


*Figura 1.2* Plotone dei veicoli durante la dimostrazione (Bryant, 1997)

Nel corso della prova sono stati mostrati diversi scenari e differenti tecnologie, come ad esempio un controllo laterale effettuato utilizzando telecamere, magneti, radar e laser. Per poter far mantenere la corsia al veicolo sono stati posti dei magneti sulla strada ogni 1,2 metri (Figura 1.3).



*Figura 1.3* Posizionamento dei magneti al centro della corsia ogni 1,2 metri per il controllo dello sterzo del veicolo (Bryant, 1997)



I magneti vengono rilevati dalla macchina con un errore minore di 7 centimetri. Per la prova fu utilizzato un tratto di autostrada lungo 12,2 km con corsie chiuse ad altri veicoli. Il costo per l'installazione dei magneti è stato pari a 10.000 \$ per miglio per ogni corsia (Bryant, 1997).

Il sistema basato sui magneti permette una maggior affidabilità anche con condizioni meteo sfavorevoli come neve o pioggia. Tale sistema consente inoltre di trasmettere informazioni, come posizione, direzione e caratteristiche del tracciato, alternando le polarità dei magneti.

Il plotone utilizzato per la dimostrazione era formato da otto veicoli distanziati tra loro di 6,5 m che mantenevano una velocità costante di 105 km/h. I veicoli comunicavano tra loro 50 volte in un secondo e, nel caso in cui un qualsiasi veicolo perdeva 10 trasmissioni consecutive, in automatico l'interspazio tra i veicoli aumentava fino a 15 metri per sicurezza.

Durante le tre giornate della dimostrazione i veicoli hanno trasportato più di 1350 passeggeri e percorso quasi 16000 km.

#### **1.1.4 Dal 1997 al 2005**

Nel 1997 il Dipartimento dei Trasporti degli Stati Uniti creò l'*Intelligent Vehicle Initiative (IVI)* per facilitare nuove ricerche e sviluppi, combinando tre sistemi avanzati di controllo:

- *Driver-Vehicle Interface*
- *Collision-avoidance Systems*
- *Automated Highway Systems*

L'obiettivo dell'IVI era di aumentare la sicurezza nelle autostrade mediante la progettazione e l'utilizzo delle tecnologie volte ad aiutare il guidatore a prendere decisioni migliori e guidare in maniera più sicura e confortevole.

In Giappone, Toyota concentrò gli sforzi sullo sviluppo di vetture con passeggeri e bus che utilizzassero la tecnologia utilizzata dal PATH con una guida basata su magneti e coordinazione con l'infrastruttura. La multinazionale giapponese ha condotto molte dimostrazioni aperte al pubblico nel suo showroom *MegaWeb* a Tokyo.

Nel 2005, il trasporto utilizzato dai visitatori della fiera mondiale dell'Expo ad Aichi era composto da bus a guida automatica. Il progetto chiamato *Intelligent Multimode Transit System* permetteva il coordinamento di tre bus che viaggiavano su una corsia dedicata (Figura 1.4).



*Figura 1.4 Bus IMTS all'Expo di Aichi (Toyota, 2014)*

### **1.1.5 Dal 2005 ad oggi**

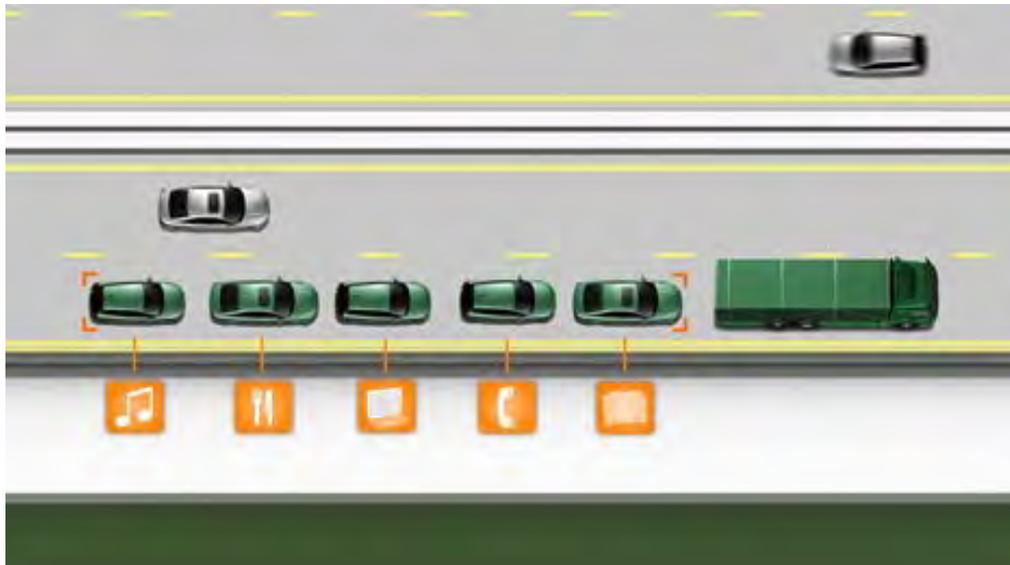
In Europa la ricerca è guidata principalmente dalla necessità di diminuire l'emissione di CO<sub>2</sub> dovuta ai mezzi di trasporto, come concordato dal protocollo di Kyoto entrato in vigore il 16 febbraio del 2005. La politica dei trasporti europea prevede il dimezzamento dei consumi di carburante entro il 2030.

Ad occuparsi della selezione e finanziamento delle ricerche sono le *Direzioni Generali (DG)* che compongono la Commissione Europea. Le Direzioni Generali che si occupano dei trasporti e dei sistemi AHS sono la *DG-MOVE (Mobility and Transport)*, *DG-CONNECT (Communications Networks, Content and Technology)* e *DG-RTD (Research and Innovation)*.

### 1.1.5.1 SARTRE

Il progetto *SARTRE* (*SAfe Road TRains for the Enviroment*) è uno dei più recenti progetti finanziati dalla Comunità Europea riguardante l'automazione dei veicoli e la gestione del traffico mediante l'organizzazione in plotoni. Questo progetto non richiede la creazione di corsie apposite per i veicoli automatizzati ma permette il controllo dei plotoni con un traffico misto con veicoli anche a guida manuale. Lo scopo principale del progetto è l'aumento dell'efficienza e della sicurezza delle reti stradali.

Il funzionamento del sistema prevede l'utilizzo di un camion a guida manuale, che ha il compito di guidare il plotone, e una serie di veicoli, autovetture o camion, che seguono automaticamente il veicolo leader (Figura 1.5).



*Figura 1.5* Funzionamento del sistema previsto nel progetto SARTRE (SARTRE-Consortium, 2014)

L'entrata o uscita delle vetture dal plotone avviene in maniera semi-automatica, con il controllo longitudinale dell'autovettura attuato in maniera automatica e il controllo dello sterzo effettuato dall'autista. Il controllo laterale del veicolo avviene seguendo la traiettoria del veicolo leader comunicata utilizzando una connessione wireless a corto raggio così da non dover equipaggiare i veicoli follower con ulteriori sensori. Non è prevista alcuna coordinazione con l'infrastruttura.

Il progetto si è concluso nel 2012 dopo 3 anni di ricerche con una dimostrazione pratica effettuata in Svezia.

### 1.1.5.2 HAVEit

Il progetto *HAVEit* (*Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport*) è sponsorizzato dal distretto DG-CONNECT.

Questo progetto studia come il guidatore interagisce con il veicolo a diversi livelli di automazione (Figura 1.6).

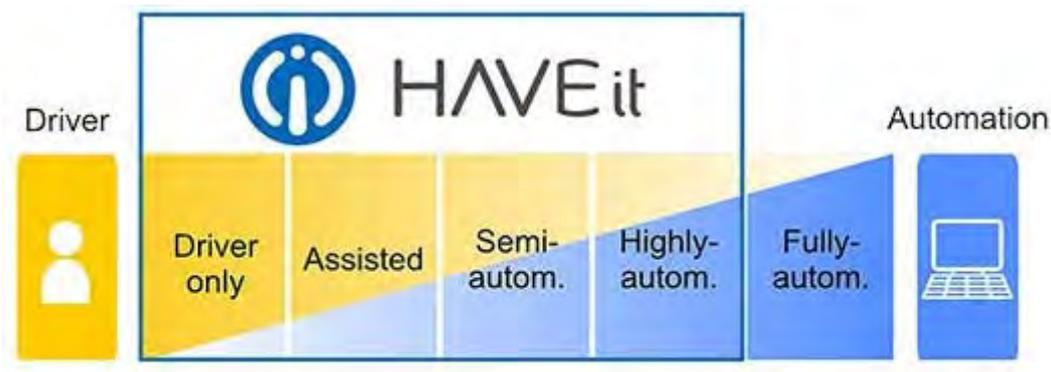


Figura 1.6 Livelli di automazione del veicolo (Shladover, 2012)

I diversi livelli di automazione, attivati tramite una leva posta dietro il volante, sono:

- *Driver only*  
La guida è completamente manuale
- *Assisted*  
Il conducente è assistito utilizzando un sistema di avvertimento che si attiva quando il veicolo esce dalla corsia o è troppo vicino al veicolo che lo precede
- *Semi-automated*  
Questo livello combina il sistema di avvertimento con un controllo longitudinale come l'*Adaptive Cruise Control (ACC)*
- *Highly automated*  
Questo livello adotta un sistema di controllo longitudinale abbinato ad un sistema di controllo laterale utilizzato per mantenere la posizione nella corsia

### 1.1.6 AHS in Italia

I primi progetti in Italia per la realizzazione di sistemi AHS iniziarono negli anni novanta. Il *Centro di Ricerca Fiat (CRF)* e l'*Università di Parma* svilupparono i primi prototipi che dimostrarono la possibilità di utilizzo di alcune tecnologie per il controllo del veicolo. Il progetto *ARGO*, finanziato dall'Università di Parma, aveva lo scopo di sviluppare un primo prototipo di veicolo autonomo che fu utilizzato poi nel 1998 per percorrere le strade in un tour chiamato *MilleMiglia in Automatico*. Il veicolo era in grado di mantenere la corsia, sorpassare i veicoli lenti e rilevare gli ostacoli nel percorso utilizzando delle telecamere e un computer portatile (Figura 1.7).



*Figura 1.7 Immagini del veicolo utilizzato per la MilleMiglia in Automatico (Argo, 2014)*

L'Università di Parma con il *Laboratorio di Visione Artificiale e Sistemi Intelligenti (VisLab)* ha partecipato a varie competizioni organizzate dalla *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)* nel 2004, 2005 e 2007, ottenendo buoni risultati grazie al veicolo Terramax, unico veicolo ad utilizzare un sistema di visione artificiale come sensori primari, riuscendo a competere con altre università americane.

Attualmente il centro di ricerca VisLab continua lo studio per la creazione di un'auto a guida autonoma utilizzando telecamere a basso costo.

L'ultimo prototipo realizzato è chiamato Deeva (Figura 1.8).



*Figura 1.8* Prototipi BRAiVE (a sinistra) e Deeva (a destra) (VisLab, 2014)

## 1.2 Livelli di Automazione e Cooperazione

A seconda del livello di automazione dei veicoli e di cooperazione tra questi, si possono definire vari tipi di sistemi (Figura 1.9).

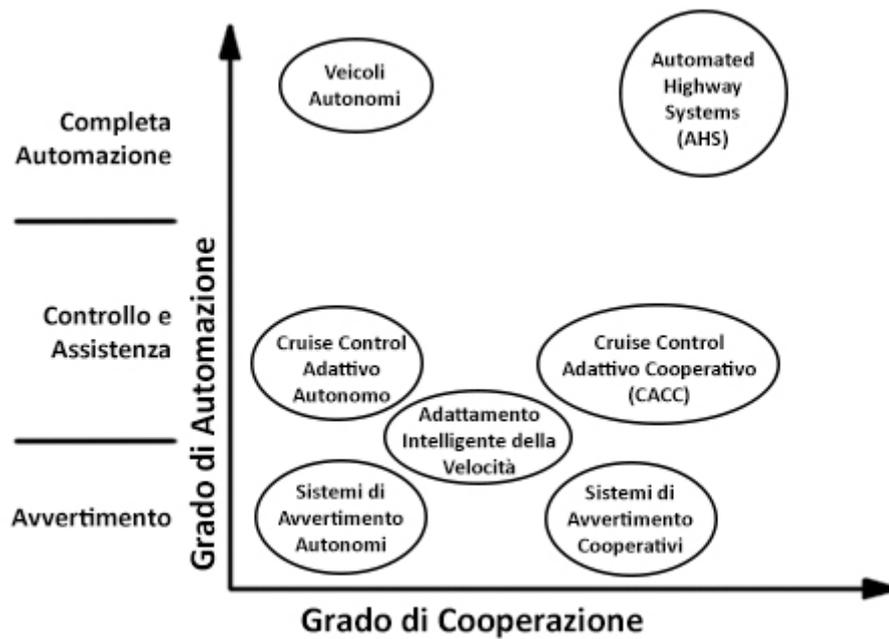


Figura 1.9 Alternative di Cooperazione e Automazione tra veicoli (Shladover, 2012)

### 1.2.1 Sistemi di Avvertimento Autonomi

I moderni veicoli dispongono di molteplici supporti per la sicurezza (*Autonomous Warning Systems*). Tali sistemi aiutano a padroneggiare il veicolo anche in situazioni difficili e di pericolo.

#### 1.2.1.1 Assistenza alla guida

Il sistema di assistenza alla guida, chiamato anche *Lane Keeping Assist*, è un dispositivo progettato per avvisare il conducente quando il veicolo inizia a muoversi fuori dalla sua corsia nel caso in cui non sia attivo alcun indicatore di direzione.

Questo dispositivo è stato introdotto per la prima volta da Nissan nel 2001 nella vettura *Cima* venduta in Giappone (Katzourakis, Olsson, Lazic, & Lidberg, 2013).

Ci sono due principali tipologie del sistema:

- *Lane Departure Warning System (LDW)*  
Sistema che avvisa il guidatore se il veicolo esce dalla corsia
- *Lane Keeping System (LKS)*  
Sistema che avvisa il guidatore e, se non viene presa alcuna azione, automaticamente sterza per assicurarsi che la vettura rimanga all'interno della corsia

Questi sistemi hanno lo scopo di evitare che, a causa di una distrazione o per un improvviso colpo di sonno del conducente, la vettura fuoriesca dalla corsia di marcia.

Per i sensori è possibile utilizzare tre diverse tecnologie:

- Video
- Laser
- Infrarossi

Tipicamente vengono utilizzate delle telecamere in quanto il costo è molto minore. Tutte richiedono la presenza di segnaletica di demarcazione della corsia e non sono in grado di funzionare quando questa è coperta da neve. Funzionano bene invece con altre condizioni atmosferiche e il sistema computerizzato permette di riconoscere i limiti di corsia anche quando la segnaletica è interrotta per brevi tratti a causa di degrado della pavimentazione.

### 1.2.1.2 Assistente di cambio corsia

Questo sistema, chiamato *Blind Spot Assist (BSA)*, permette di controllare tramite sensori la parte posteriore della vettura, compreso l'angolo cieco. Sopra una certa velocità, il sistema segnala al conducente la presenza di eventuali veicoli che si avvicinano velocemente da dietro o che si trovano nell'angolo cieco della vettura tramite una spia luminosa posta negli specchi retrovisori esterni (Figura 1.10).



Figura 1.10 Indicatore di presenza di un'autovettura nell'angolo cieco (Toyota, 2014)

### 1.2.1.3 Assistenza alla frenata di emergenza

Il sistema di assistenza alla frenata di emergenza è un sistema progettato per assistere il guidatore nella frenata. Nel momento in cui il conducente non riesce ad applicare la forza massima possibile richiesta per ottenere la minore distanza di frenata, questo sistema applica la forza ottenuta come differenza tra la forza massima e quella applicata dal guidatore.

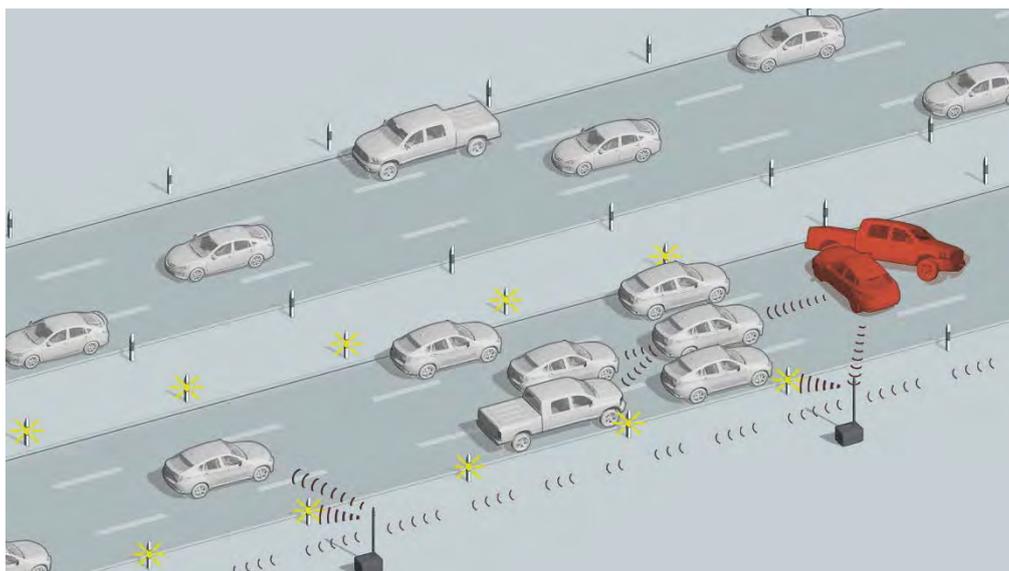
Per sistemi più avanzati, chiamati *Collision Avoidance Systems*, la vettura utilizza radar, laser o telecamere per rilevare un ostacolo imminente. Quando il veicolo si avvicina ad un oggetto ad una velocità elevata, avverte il conducente e prepara il sistema frenante per una frenata di emergenza o automaticamente applica la massima forza frenante, a seconda della configurazione.

Lo scopo è quello di fermare il veicolo o ridurne la velocità in modo da rendere meno grave l'eventuale collisione.

### 1.2.2 Sistemi di Avvertimento Cooperativi

I *Sistemi di Avvertimento Cooperativi (Cooperative Collision Warning)* hanno lo stesso funzionamento dei *Sistemi di Avvertimento Autonomi* ma sono molto più avanzati.

Per quanto riguarda l'assistenza alla frenata di emergenza, la comunicazione tra più veicoli e la combinazione di più sensori permette una più veloce ed affidabile rilevazione di situazioni di emergenza nelle autostrade (Figura 1.11).



*Figura 1.11* Rappresentazione del sistema di avvertimento e comunicazione (Fraunhofer-Gesellschaft, 2014)

Quando il veicolo si avvicina al luogo del pericolo, il conducente è avvisato mediante un sistema di luci poste sia a bordo carreggiata che sul cruscotto del veicolo.

Per poter utilizzare tale tecnologia è necessario che i dati forniti dai sensori dei veicoli siano elaborati in tempo reale.

Il problema principale è rappresentato dalla necessita di fusione dei dati generati da vetture diverse in modo da creare una corretta rappresentazione della situazione del traffico.

### 1.2.3 Adattamento Intelligente della Velocità

I sistemi di *Adattamento Intelligente della Velocità (Intelligent Speed Adaption)* permettono di controllare la velocità della vettura monitorando costantemente la velocità del veicolo e la velocità limite della strada. Quando quest'ultima è minore della velocità del veicolo, il sistema frena automaticamente per far rientrare la velocità nei limiti di legge (Figura 1.12).



*Figura 1.12* Indicazione dei limiti di velocità sul cruscotto della vettura (Google, 2014)

Esistono tre tipi di tecnologia (Wikipedia, 2014):

- GPS  
Il GPS permette di localizzare la vettura e, attraverso mappe digitali, è possibile conoscere il limite della strada percorsa
- Radiofari  
Radiofari posizionati sul ciglio della strada trasmettono le informazioni al ricevitore collocato sulla macchina. La velocità limite viene aggiornata ogni volta che la vettura passa vicino un radiofaro
- Sistemi di riconoscimento ottico  
Questa tecnologia permette di riconoscere i segnali dei limiti di velocità

#### 1.2.4 Cruise Control Adattivo

Il *Cruise Control* è un sistema che permette di assistere il conducente per mantenere il veicolo ad una velocità assegnata. Viene usato principalmente per la guida in zone extraurbane e disattivato automaticamente alla pressione del freno.

I limitatori di velocità più evoluti dispongono inoltre di un dispositivo di regolazione della distanza che si adatta alla velocità del veicolo che precede e mantiene la velocità costante.

#### 1.2.5 Veicoli Autonomi

Un veicolo autonomo, chiamato anche *Driverless Car* (auto senza conducente), è un veicolo in grado di rilevare l'ambiente circostante permettendo la navigazione senza intervento umano.

L'industria automobilistica è molto impegnata nella ricerca in questo campo e negli ultimi anni nuove leggi in America hanno permesso l'utilizzazione di tali vetture nelle reti stradali. Alcune previsioni portano a considerare il 2020 come anno in cui le auto saranno realmente in grado di gestire le varie situazioni che si possono presentare e saranno quindi vendute al pubblico.

Solitamente questi veicoli sono dotati di:

- Radar  
Permette di determinare la posizione e velocità di oggetti
- Lidar  
Questa tecnologia misura la distanza di un oggetto illuminandolo con un laser e analizzando la luce riflessa
- GPS  
Permette la localizzazione della vettura

Tra i vari progetti, ha suscitato molto interesse la vettura di Google presentata nel 2012. Nell'aprile del 2014 il vicolo aveva percorso più di un milione di km senza che vi sia stato alcun incidente sotto il controllo del computer (Rosen, 2014).



*Figura 1.13 Google Lexus RX 450H Self Driving Car (Lowensohn, 2014)*

La vettura progettata da Google utilizza un sensore laser posto sul tetto della vettura per produrre una mappa tridimensionale dettagliata (Figura 1.14).



*Figura 1.14 Visione tridimensionale della vettura (Google, 2014)*

A maggio 2014 Google ha presentato l'ultimo prototipo di vettura nella quale non è presente alcun tipo di controllo manuale come pedali o sterzo.

Importante è anche il progetto italiano di VisLab, guidato dal prof. Alberto Broggi, il cui ultimo prototipo è chiamato *Deeva*. La principale caratteristica che lo differenzia dagli altri progetti di veicoli autonomi è l'utilizzazione di sensori a basso costo, principalmente telecamere, e la grande integrazione che questi hanno con la vettura. In un video pubblicato nel 2013 viene mostrato come la vettura sia già in grado di viaggiare in diverse situazioni sia a livello extraurbano che urbano (VisLab, 2014).



*Figura 1.15 Prototipo Deeva (VisLab, 2014)*

La vettura si serve di 28 microtelecamere e 4 laser che trasformano l'ambiente circostante in un'immagine a tre dimensioni (Figura 1.16).



*Figura 1.16 Visione tridimensionale dei sensori (VisLab, 2014)*

## 1.3 Caratteristiche del sistema AHS

### 1.3.1 Obiettivi e benefici

Il sistema AHS mantiene invariato il funzionamento dell'automobile modificandone il comportamento solo all'interno di reti specifiche. I benefici che si otterrebbero con questo tipo di sistema sono molteplici e riguardano aspetti di forte interesse pubblico.

#### 1.3.1.1 Sicurezza

La maggior parte degli incidenti nell'ambito dei trasporti è causata da errore umano, nonostante il continuo miglioramento della progettazione sia di strutture autostradali che di veicoli. I sistemi di controllo elettronico, che permettono di assumere alcune o tutte le responsabilità del conducente, sono il metodo più semplice per ridurre questa causa. Mediante l'utilizzo di sistemi AHS la componente di errore umano verrebbe eliminata riducendo significativamente il numero di incidenti.

Alcune analisi e simulazioni mostrano come l'impiego di una struttura AHS potrebbe portare alla diminuzione del 35-85% di incidenti mediante l'utilizzo di tecnologie per evitare gli ostacoli e del 50% degli incidenti mortali (Postema & Luke, 1998).

#### 1.3.1.2 Capacità

Le autostrade sono ampiamente impiegate per il trasporto merci e per gli spostamenti a lunga distanza. Mentre il traffico nelle autostrade è sempre stato in aumento, con un lieve calo dal 2009 per effetto della crisi economica (Aiscat, 2014), la capacità delle strade è rimasta sostanzialmente invariata provocando continui fenomeni di congestione.

Il flusso di veicoli per corsia può essere drasticamente aumentato diminuendo la distanza di sicurezza tra i veicoli e aumentando la velocità a cui viaggiano. L'aumento di capacità previsto impiegando un sistema AHS sulle autostrade tradizionali è di due o tre volte il livello di capacità raggiungibile attualmente (Cheon, 2000).

### ***1.3.1.3 Efficienza***

Il livello di servizio dell'autostrada è dato da una combinazione di fattori che permettono di valutare la qualità del servizio e il grado di soddisfacimento degli utenti. Un importante componente del livello di servizio è il tempo necessario per raggiungere la destinazione. Il sistema AHS può riportare ad una condizione equivalente a quella di free flow precedenti condizioni di congestione, riducendo notevolmente i tempi di viaggio.

Un'altra componente importante è il comfort, che può aumentare con la guida automatica definendo delle velocità e accelerazioni che pongono dei limiti alle forze che agiscono sul veicolo.

### ***1.3.1.4 Effetto ambientale***

Il sistema AHS ha anche lo scopo di gestire in maniera efficiente l'energia, attraverso la riduzione del consumo assoluto di carburante, sfruttando al meglio le capacità del motore.

La riduzione del consumo di carburante avviene anche grazie all'eliminazione di situazioni di congestione, così come fenomeni di stop and go, e permette un flusso regolare di veicoli a velocità costante. Nel lungo periodo questo sistema può inoltre supportare altri sistemi di propulsione senza la necessità di modificare le sue componenti.

Oltre alla riduzione di inquinamento, una rete AHS permette di aumentare la capacità senza aumentare le aree occupate da servizi e infrastrutture stradali.

### 1.3.2 Problemi

Oltre ai problemi dovuti allo sviluppo di un sistema di tale complessità, vi sono problemi di tipo economico e di livello istituzionale.

#### 1.3.2.1 Costi

Il problema dei costi riguarda sia gli utenti che le istituzioni e deve essere tenuto in considerazione nella fase di progettazione.

- Costo dell'infrastruttura

Il costo dell'infrastruttura è composto principalmente dalle componenti computerizzate e di comunicazione con i veicoli.

Ciò che bisogna considerare però sono anche i benefici. Se la quantità di risorse economiche necessaria per il finanziamento e costruzione dell'infrastruttura AHS varia a seconda della tecnologia utilizzata, essa rimane comunque di molto inferiore rispetto alla creazione di una nuova strada parallela, portando comunque allo stesso obiettivo di aumento della capacità.

- Costo del veicolo

I prototipi realizzati per le dimostrazioni possono avere un costo fino a 100.000 € maggiore rispetto ad un veicolo normale. Quando il sistema sarà disponibile al pubblico, si stima che l'equipaggiamento verrà a costare dai 7000€ ai 10000€ nel 2025, scendendo fino a 3000€ nel 2035 (Juliussen & Carlson, 2014). Il costo del veicolo può diventare un problema sociale nel caso in cui solo gli utenti con reddito elevato possono permettersi di utilizzare il sistema.

- Incentivi economici per gli utenti

L'adozione di un sistema AHS può essere incentivata da finanziamenti dello Stato per l'acquisto di veicoli con dotazioni adeguate

- Tariffa di utilizzo del servizio

Aumentando la qualità del servizio, la tariffa può essere aumentata in modo da coprire anche i costi dovuti alla manutenzione e aggiornamento dei sistemi computerizzati

### ***1.3.2.2 Accettazione del pubblico***

La progettazione del sistema, la scelta di quali controlli sono automatizzati dal veicolo e come questi sistemi si interfacciano con il guidatore influenzano il livello di accettazione del pubblico. Un sistema completamente automatizzato come l'AHS richiede un periodo di controllo, entro il quale vengano effettuate ricerche di mercato sui potenziali utenti. Una componente importante che può essere un problema per l'accettazione di questo sistema è la privacy.

Uno studio del Dipartimento dei Trasporti degli Stati Uniti rivela come generalmente l'utente sia disposto ad una minor privacy per ottenere i benefici che porta l'automatizzazione. (Cheon, 2000)

La diffidenza degli utenti verso le nuove tecnologie è più facile da eliminare adottando strategie di implementazione graduale.

### ***1.3.2.3 Organizzazione***

Molti problemi potrebbero sorgere nel momento della realizzazione e funzionamento dell'autostrada automatizzata. Le componenti del sistema AHS sono tecnologicamente avanzate e richiedono operatori esperti per l'installazione e manutenzione.

Deve essere considerata la necessità da parte degli stati ed enti locali di lavorare insieme nella progettazione e pianificazione del sistema AHS in modo da utilizzare le stesse metodologie.

### ***1.3.2.4 Responsabilità***

Se attualmente la responsabilità di un incidente è sempre del conducente del veicolo, con l'attuazione di un sistema AHS diventa difficile individuare il responsabile per un eventuale sinistro (Cheon, 2000). I soggetti potenzialmente interessati sono:

- L'utente del veicolo
- La casa costruttrice del veicolo
- L'ente proprietario dell'autostrada

Un esempio di tecnologia già largamente adottata nei veicoli che ha causato problemi legali alle case costruttrici è l'airbag. Alcune società sono state denunciate per malfunzionamento dell'apparecchiatura per infortuni dovuti all'espansione dell'airbag, anche quando hanno funzionato come previsto. Il motivo di queste lamentele è stato ricondotto a pubblicità che fornivano aspettative diverse dal reale funzionamento.

Il problema della responsabilità può essere risolto fornendo degli standard di progettazione. Gli standard di progettazione sono delle pratiche accettate e come tali possono fornire protezione agli sviluppatori e costruttori che li utilizzano. Degli standard troppo dettagliati possono però provocare una barriera per l'innovazione tecnologica, quindi sarebbe bene stabilirli in una fase avanzata della progettazione.



*Figura 1.17 Problemi e soluzioni per un sistema AHS*



# CAPITOLO 2

## STRUTTURA DI UN SISTEMA AHS

### 2.1 Introduzione

Le prime ricerche per la definizione della struttura di un sistema AHS iniziarono negli anni '80 del secolo scorso. Da allora sono state presentate molte proposte per un sistema che potesse gestire in maniera efficiente tutte le componenti e funzioni senza compromettere la sicurezza nel suo utilizzo.

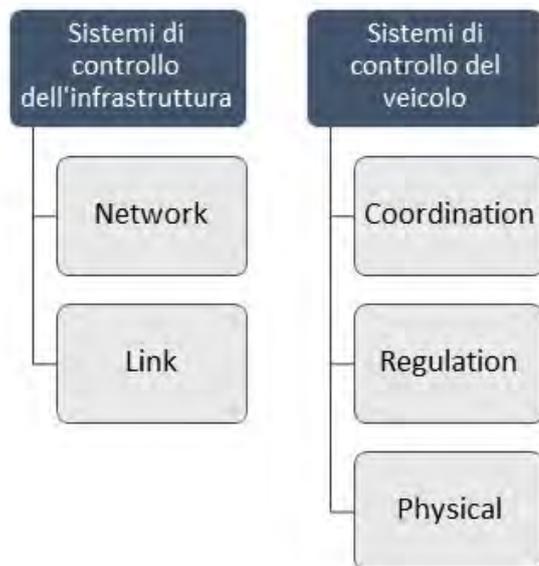
In base alla definizione delle funzioni compiute attribuite all'infrastruttura e al veicolo è possibile classificare la struttura del sistema in tre tipologie:

- *Independent Vehicle Concept*  
La tecnologia utilizzata da questo tipo sistema risiede completamente nel veicolo senza che vi sia cooperazione fra i mezzi e assistenza da parte dell'infrastruttura
- *Cooperative Concept*  
I veicoli che percorrono la rete AHS interagiscono con l'infrastruttura attraverso un sistema di comunicazione, permettendo così una cooperazione fra i veicoli, con l'obiettivo di ottimizzare il funzionamento della rete e di migliorare la sicurezza del sistema
- *Infrastructure Concept*  
Un sistema completamente centralizzato determina la posizione dei veicoli e comunica agli stessi quali manovre eseguire. Questo tipo di struttura è già applicato in alcune infrastrutture ferroviarie

La scelta della tipologia di appartenenza della struttura del sistema è rilevante in quanto determina le tecnologie adottate dai veicoli e dall'infrastruttura, condizionando i costi che dovranno sostenere gli utenti e gli enti gestori del servizio. Una delle proposte più conosciute ed elaborate è il sistema denominato *PATH AHS*, sviluppato presso la University of California (USA), che adotta una struttura basata sulla cooperazione fra infrastruttura e veicoli.

In questo capitolo viene descritta l'architettura del sistema di controllo AHS con la sua suddivisione in *layer*, sviluppata negli ultimi vent'anni dall'*University of California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)*. La descrizione che segue è basata su Eskafi, 1996.

Il programma di ricerca PATH AHS iniziò nel 1989 e prevede un sistema articolato in cinque layers: network, link, coordination, regulation e physical. I primi due compongono il sistema di controllo dell'infrastruttura mentre gli ultimi tre costituiscono il sistema di controllo del veicolo (Figura 2.1).



*Figura 2.1* Rappresentazione della struttura del sistema PATH

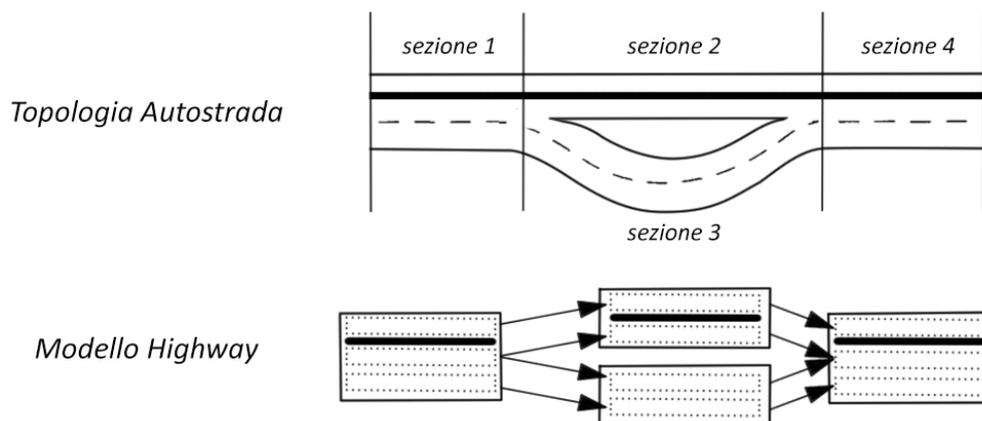
## 2.2 Modello Highway

La struttura interna della rete per ciascun layer deriva da una schematizzazione della rete AHS fornita dal cosiddetto modello Highway (Eskafi, 1996).

Questo modello divide la rete in *sezioni*. Una sezione è definita come un tratto di strada avente numero di corsie costante per tutta la sua lunghezza e geometria invariata. Ogni sezione è caratterizzata da una lunghezza pari alla lunghezza della corsia più interna della strada.

I *segmenti* sono elementi che compongono la sezione e rappresentano le corsie al suo interno. Per ogni sezione è necessario conoscere l'eventuale presenza di barriere tra due segmenti che non permettano lo spostamento di un veicolo da un segmento ad un altro.

Infine vengono determinate le *connessioni* tra i segmenti delle sezioni (Figura 2.2).



*Figura 2.2* Rappresentazione della topologia della strada mediante il modello Highway (Eskafi, 1996)

## 2.3 Sistemi di controllo dell'infrastruttura

### 2.3.1 Network layer

Il Network layer ottimizza il funzionamento della rete mediante l'emissione di istruzioni di percorso e l'indicazione delle distribuzioni di traffico desiderate per i vari rami della rete (Raza, 1996). Il compito di questo layer è di controllare le entrate dei veicoli e di assegnare un percorso a ciascuno di essi utilizzando i link della rete AHS. Tale percorso viene definito in base all'origine e alla destinazione dei veicoli, cercando di ottimizzare la capacità e la media del tempo di viaggio, e riducendo per quanto possibile la congestione dei collegamenti che costituiscono la rete.

Per poter scegliere il percorso ottimale, la rete viene scomposta in *patches* (Eskafi, 1996). Ciascuna patch è composta da corsie connesse tra di loro senza la presenza di ostacoli o barriere. I veicoli possono quindi spostarsi liberamente tra corsie che compongono la stessa patch. Il Network layer deriva la configurazione delle patches dal modello Highway precedentemente citato, creando una patch con lunghezza pari alla sezione nel caso in cui non siano presenti barriere e creando invece più patches nel caso in cui queste siano presenti (Figura 2.3).

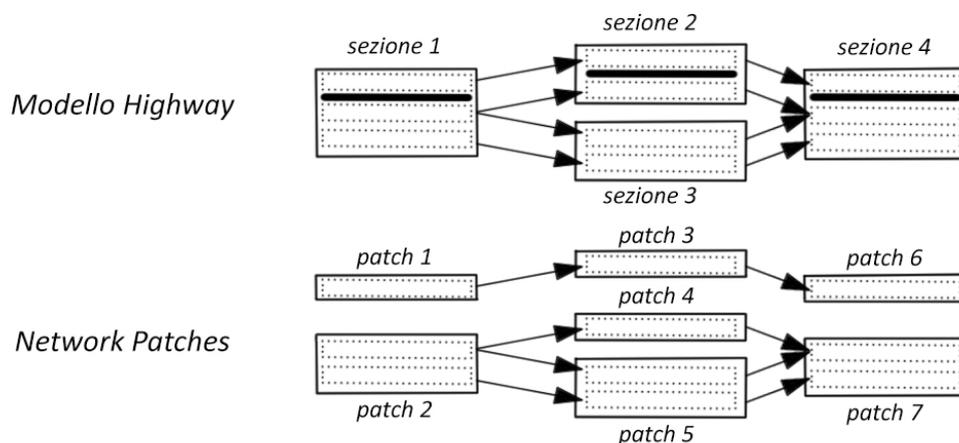


Figura 2.3 Derivazione delle patches dal modello Highway (Eskafi, 1996)

Una volta determinate tutte le patches della rete è necessario identificare i collegamenti tra quest'ultime. Due patches sono collegate se hanno almeno una corsia in comune o se è presente un collegamento corrispondente ad un immissione o uscita.

Il Network layer fornisce quindi la sequenza di patches che permettono al veicolo che deve spostarsi da  $o$  a  $d$  di raggiungere la destinazione nel minor tempo di viaggio utilizzando il percorso minimo  $R_{od}$ .

Si definisce  $G = (N, E)$  il grafo della rete AHS, dove  $N \in 1, 2, \dots, n$  è l'insieme delle patches ed  $E \in N \times N$  è l'insieme delle connessioni tra le patches. Ciascuna delle connessioni è formata da una coppia  $(i, j)$  dove  $i$  indica il nodo di origine e  $j$  il nodo di destinazione.

Il problema di scelta del percorso è ricondotto alla determinazione del percorso minimo tra due nodi del grafo che rende minimo il tempo medio di viaggio per andare da  $o$  a  $d$ .

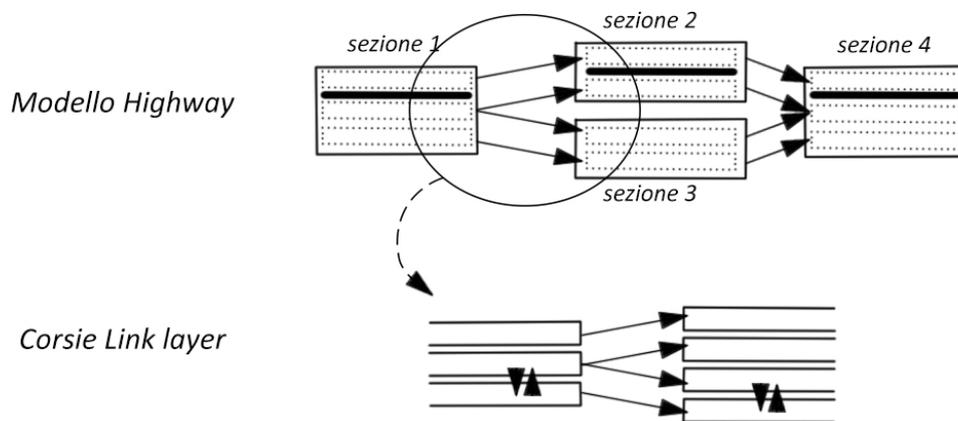
Questo tipo di approccio per la determinazione del percorso minimo porta una serie di vantaggi:

- Il veicolo riceve l'indicazione di una lista di patches da seguire per arrivare a destinazione; tale indicazione potrà essere modificata durante il viaggio in modo da fornire sempre il percorso minimo anche in seguito a modifiche della rete dovute al verificarsi di eventi esterni
- Essendo l'informazione basata sulle patches, per la scelta della corsia da occupare è possibile utilizzare un altro layer di controllo per fornire informazioni di "micro routing" al veicolo
- Il metodo può essere utilizzato per reti di varie dimensioni. Per reti di grandi dimensioni vengono utilizzate reti parziali che permettono la determinazione del percorso minimo per destinazioni all'interno del loro dominio e percorsi con destinazione nodi di entrata alle reti vicine nel caso in cui la destinazione finale sia al di fuori della rete parziale

### 2.3.2 Link layer

Il Link layer ha il compito di controllare il flusso di traffico all'interno dell'arco in modo da ottimizzare la sua capacità e minimizzare il tempo di percorrenza e la probabilità del verificarsi di fenomeni di congestione. Fornisce comandi di "micro routing" ai veicoli che transitano nell'arco determinati in funzione del flusso dell'arco occupato, dei flussi degli archi vicini e del percorso determinato dal Network layer.

La struttura della rete utilizzata dal Link layer è anch'essa derivata dal modello Highway. Questa è organizzata secondo corsie interconnesse dove ogni corsia è collegata alle corsie adiacenti e a quelle successive. Una corsia può essere collegata al massimo a due corsie successive (Figura 2.4).



*Figura 2.4 Derivazione della struttura del Link layer dal modello Highway (Eskafi, 1996)*

Il Link layer riceve i comandi dal Network layer sotto forma di flusso del traffico in ingresso e traffico in uscita.

Essendo una corsia collegata al massimo alle due corsie adiacenti e alle due corsie successive, i comandi che potrà assegnare ad un veicolo saranno:

- Cambia corsia a destra
- Cambia corsia a sinistra
- Procedere dritto
- Svolta a destra
- Svolta a sinistra

Il sistema di controllo necessario al Link layer (*link-layer controller*) è caratterizzato dalla presenza di strumenti per il trasferimento delle informazioni al veicolo ogni 0,5 - 5 km (Horowitz & Varaiya, 2000). La distribuzione è tale per cui ciascuna stazione di controllo gestisce i veicoli appartenenti ad una sezione del modello Highway. I link-layer controller permettono la determinazione di misure di densità per ogni sezione della rete. È possibile inoltre conoscere le densità a seconda della tipologia di veicoli, del percorso O - D e della condizione del veicolo (leader, follower o lane changing).

Le informazioni scambiate tra le stazioni di controllo generalmente sono costituite dal valore previsto del tempo di viaggio necessario a percorrere la sezione e dal valore di flusso previsto all'ingresso. È importante che il Link layer sia in grado di gestire le condizioni della rete in tempo reale per poter coordinare i veicoli in situazioni straordinarie (ad esempio incidenti). Questo è possibile solo mediante una corretta distribuzione delle stazioni di controllo. L'interazione tra Network layer e Link layer proposta dal PATH consiste nello scambio di informazioni su tempi di viaggio, ricavati dal Link layer mediante l'utilizzo delle stazioni di controllo della rete, e sui piani di percorso previsti (Figura 2.5).



Figura 2.5 Interazione tra Network e Link layer

Il Network layer utilizza i tempi di viaggio per calcolare i percorsi minimi da assegnare ai veicoli. Le informazioni sui percorsi vengono trasferite al Link layer che le comunica ai veicoli attraverso le stazioni di controllo.

## 2.4 Sistemi di controllo del veicolo

### 2.4.1 Coordination layer

Il Coordination layer è responsabile della scelta dell'attività che il veicolo deve compiere per il corretto svolgimento del piano di percorso fornito dal Link layer. Esso comunica e si coordina con i veicoli vicini e con il sistema di controllo del Link layer dal quale riceve i piani di percorso aggiornati (Raza, 1996). Il Coordination layer si occupa inoltre di supervisionare e comandare il Regulation layer per quanto riguarda l'esecuzione o l'annullamento di manovre del veicolo.

Le manovre che il veicolo dovrà eseguire sono decise dal Link layer mediante il piano di percorso che fornisce una serie di comandi in modo da ottenere il percorso minimo. Il momento in cui eseguire la manovra è deciso invece dal Coordination layer, che cerca di dare la priorità alla sicurezza, rispettando le manovre degli altri veicoli e le condizioni di traffico (Horowitz & Varaiya, 2000). Alcune delle manovre possono comunque essere compiute senza un diretto comando del Link layer. A seconda delle tecnologie utilizzate per la rete AHS queste manovre generalmente riguardano il lane keeping e il lane changing. Per l'effettuazione di questi spostamenti il veicolo si basa sui sensori di rilevamento posti sull'auto per determinare le velocità dei mezzi vicini e verificare che le distanze siano sufficienti ad effettuare la manovra in sicurezza.

Prima che il veicolo possa eseguire una manovra, il Coordination layer deve ottenere l'autorizzazione dai veicoli circostanti (Eskafi, 1996). Questa può essere ottenuta in modo esplicito attraverso comunicazioni fra i veicoli, oppure in modo implicito usando i sensori del veicolo. Dopo aver ottenuto il permesso per la manovra, il Coordination layer istruisce il Regulation layer affinché la manovra possa essere eseguita.

È possibile dividere il Coordination layer in due sub-layer:

- Supervisor sub-layer
- Maneuver sub-layer

Il primo si occupa della supervisione dei comandi forniti dal Link layer e del comportamento del veicolo. Questo sub-layer può fornire l'approvazione o abortire un'azione che viene eseguita dal mezzo.

Il funzionamento del Supervisor sub-layer è caratterizzato da tre fasi:

1) Attesa di un evento

Gli eventi che si possono verificare sono di tre tipi:

- Eventi relativi a cambiamenti della posizione del veicolo
- Richiesta di manovra da parte di altri veicoli
- Comunicazione di manovra completata da parte di altri veicoli

2) Verifica della sicurezza per l'esecuzione dell'evento

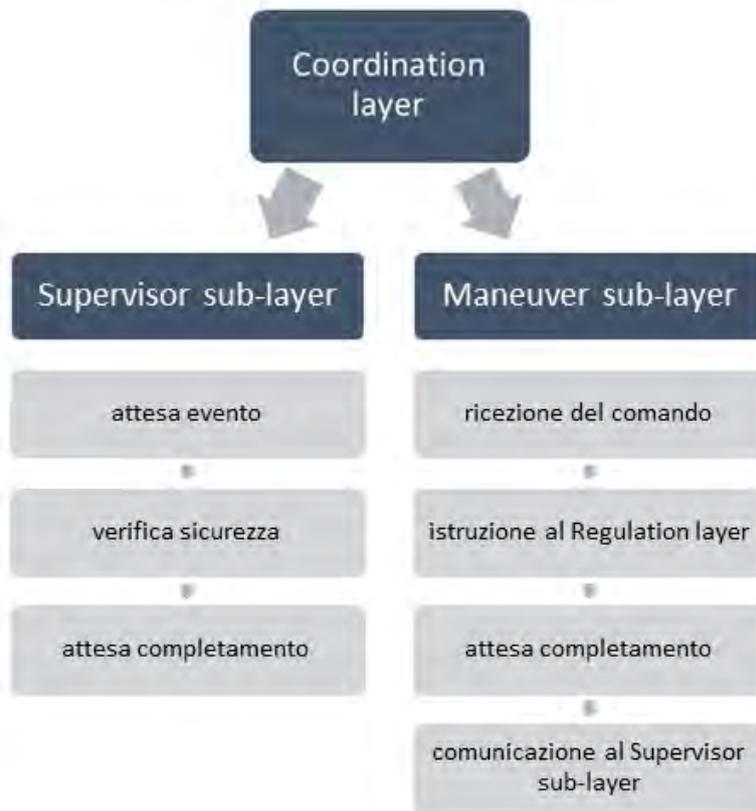
3) Attesa del completamento dell'evento

Nel caso in cui venga ricevuta una richiesta di manovra in questa fase, il sub-layer fornisce informazioni riguardanti il suo stato occupato (*busy*). Il veicolo che ha effettuato la richiesta dovrà attendere il completamento della manovra in atto prima di poter eseguire a sua volta lo spostamento

Il Maneuver sub-layer contiene i protocolli per tutte le manovre eseguibili dal veicolo.

La struttura del sub-layer è composta da quattro fasi:

- 1) Ricezione del comando dal Supervisor sub-layer
- 2) Ordine al Regulation layer riguardo alla manovra da effettuare
- 3) Attesa di comunicazione del Regulation layer riguardo al completamento della manovra
- 4) Comunicazione al Supervisor sub-layer



*Figura 2.6 Struttura del Coordination layer*

Un'ultima funzione del Coordination layer è quella di contenere e aggiornare le informazioni riguardanti lo stato corrente del veicolo:

- Codice identificativo

Mediante questo codice è possibile identificare univocamente il veicolo, determinarne la sua tipologia (automobile, bus, ...) e conoscere la sua origine e destinazione

- Posizione

Questa comprende la corsia e la sezione del modello Highway che il veicolo sta utilizzando e informazioni a livello microscopico come la posizione all'interno del plotone nel quale il veicolo sta viaggiando

- Piano di percorso assegnato

Le informazioni sul piano di percorso variano a seconda della condizione del veicolo all'interno del plotone. Per veicoli leader o liberi (veicoli non appartenenti ad un plotone), il piano di percorso contiene informazioni riguardanti la velocità, il numero massimo di veicoli all'interno del plotone e permessi che riguardano la possibilità di unirsi ad un altro plotone o di cambiare corsia. Il piano di percorso per veicoli follower consiste nel mantenere le caratteristiche di guida del leader e informazioni che riguardano la separazione dal plotone nel caso in cui sia necessario un cambio di corsia.

Come scritto in precedenza il piano di percorso del veicolo viene costantemente aggiornato a seconda della posizione e delle caratteristiche del flusso nella rete, nelle stazioni di controllo del Link layer.

#### 2.4.2 Regulation layer

Il Regulation layer è responsabile del controllo longitudinale e laterale del veicolo e dell'esecuzione delle manovre ordinate dal Coordination layer (Horowitz & Varaiya, 2000).

Le manovre di tipo longitudinale controllate dal Regulation layer possono essere:

- Leader law

Regola la velocità del plotone secondo la velocità desiderata

- Join law

Permette ad un veicolo di unirsi al plotone che lo precede

- Split law

Permette ad un veicolo di separarsi dal plotone in cui è inserito

- Split to change lanes law

Permette di separarsi dal plotone mantenendo una distanza di sicurezza dai plotoni nelle corsie adiacenti per poi cambiare corsia

Le manovre di tipo laterale possono essere:

- Lane keeping  
Consiste nel mantenere la corsia assegnata
- Lane changing  
Permette di cambiare corsia con una adiacente

Oltre alle manovre descritte in precedenza, il Regulation layer è in grado di controllare le manovre di entrata e uscita nella/dalla rete AHS.

Tutte le manovre compiute dal Regulation layer sulla base di comandi del Coordination layer vengono dette *activities*.

Il funzionamento del Regulation layer è fortemente dipendente dai sensori installati sulle autovetture. Tutti i sensori sono caratterizzati da un tempo di campionamento dell'ordine dei 20 millisecondi, per questo il sistema di guida viene detto *time-driven system* (Eskafi, 1996). Questi sensori permettono di determinare le distanze dagli altri veicoli e mantenere il mezzo all'interno della corsia desiderata.

Il funzionamento del Regulation layer è caratterizzato dalle seguenti fasi:

- 1) Attesa dell'aggiornamento dei sensori
- 2) Controllo richieste di manovra
- 3) Controllo della sicurezza della manovra
- 4) Esecuzione della manovra in sicurezza

La fase iniziale è caratterizzata da un tempo di attesa di aggiornamento dei valori forniti dai sensori. La durata di questa fase varia a seconda della tecnologia e del tipo di sensore utilizzato. Ottenuti i valori aggiornati dai sensori, il Regulation layer controlla la presenza di richieste di manovra da parte del Coordination layer. Nel caso non vi sia alcuna richiesta, passa direttamente all'ultima fase continuando la manovra di Lane keeping, controllando che le distanze di sicurezza dal veicolo che precede siano rispettate e tornando successivamente allo stato iniziale della fase 1. Nel caso in cui sia richiesta l'effettuazione di una manovra, il Regulation layer verifica che vi siano le condizioni di sicurezza per poterla effettuare.

Per fare questo, deve attendere un nuovo aggiornamento dei sensori. Se si verifica che non è possibile eseguire la manovra in sicurezza, questa viene annullata. Una volta completato lo spostamento, il Regulation layer comunica al Coordination layer il completamento della manovra e torna allo stato iniziale (Figura 2.7).



*Figura 2.7 Struttura del Regulation layer*

### 2.4.3 Physical layer

Il Physical layer comprende tutti gli strumenti e le componenti di controllo a bordo del veicolo. Questi sono costituiti dal motore, dai freni, dal sistema di controllo dello sterzo e dai sensori per le misure di distanza laterali e longitudinali (Horowitz & Varaiya, 2000).

La funzione del Physical layer è quella di controllare il veicolo rispondendo agli ordini che vengono forniti dal Regulation layer.



# CAPITOLO 3

## ASPETTI TECNOLOGICI DEI SISTEMI AHS

### 3.1 Veicolo

Per poter implementare un sistema AHS è necessario che il veicolo sia dotato di specifici dispositivi e sensori che permettano il controllo della vettura e la comunicazione tra veicoli e con l'infrastruttura.

#### 3.1.1 Requisiti della struttura PATH

La struttura PATH AHS richiede alcuni requisiti del veicolo affinché il sistema funzioni correttamente (Eskafi, 1996). Tali requisiti generalmente sono comuni in tutte le strutture AHS.

##### 3.1.1.1 *Sensori di rilevazione*

I sensori di rilevazione sono necessari per la determinazione della distanza rispetto agli altri veicoli, per la determinazione delle loro velocità e per la rilevazione degli ostacoli.

I sensori di rilevazione si dividono in due tipologie (Figura 3.1):

- Longitudinali
- Laterali

I primi sono necessari per la rilevazione della presenza di veicoli o ostacoli e per mantenere le distanze di sicurezza. Il loro range di funzionamento necessario varia a seconda della velocità e decelerazione massima ammesse nella rete AHS.

Assumendo una velocità massima  $v_{max}$  (m/s), una decelerazione massima  $a_{max}$  (m/s<sup>2</sup>) e un tempo di transizione per raggiungere la decelerazione massima pari a 1 s., avremo:

$$a(t) = - a_{max} t \quad \text{per } 0 \leq t \leq 1s$$

$$v(t) = v_{max} - (a_{max}/2) t^2$$

$$x(t) = v_{max} t - (a_{max}/6) t^3$$

$$d_1 = v_{max} - a_{max}/6$$

$d_1 =$  distanza percorsa in 1 s. per raggiungere la decelerazione massima

$$d_2 = v_1^2/2a_{max}$$

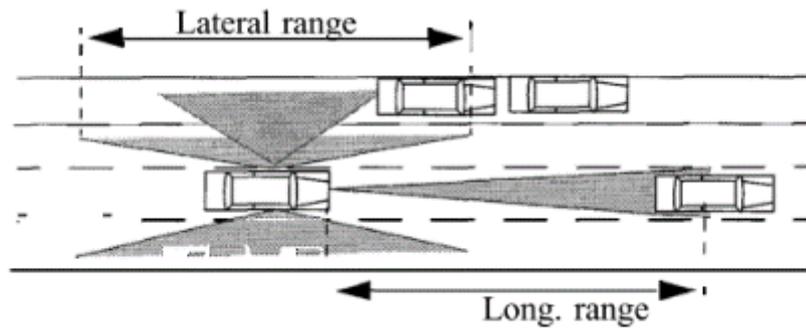
$$v_1 = v(t = 1 s.)$$

$d_2 =$  distanza percorsa necessaria a fermare il veicolo

$$d_{tot} = d_1 + d_2$$

La distanza di rilevamento dovrà quindi essere pari almeno a  $d_{tot}$  per permettere al veicolo di fermarsi prima di collidere con un ostacolo fermo.

I sensori laterali sono usati principalmente per la manovra di lane changing. Questi sensori devono permettere la determinazione della presenza di un veicolo sulle due corsie a sinistra e a destra della corsia occupata. È necessario un certo range longitudinale affinché il sensore sia in grado di rilevare un veicolo nella corsia adiacente, consentendo quindi di effettuare la manovra in condizioni di sicurezza anche quando le differenze di velocità tra i due veicoli sono elevate.



*Figura 3.1* Sensori di rilevazione laterali e longitudinali (Eskafi, 1996)

### **3.1.1.2 Sistema di comunicazione**

Il sistema di comunicazione deve essere in grado di scambiare informazioni con l'infrastruttura e con gli altri veicoli all'interno della rete AHS. Questi dati vengono utilizzati principalmente per la determinazione del percorso e per l'esecuzione delle manovre in sicurezza.

### 3.1.2 Veicolo SatAnt

Dato che i sistemi AHS sono ancora in fase sperimentale, non esiste un'autovettura unica per la guida automatica ma sono stati proposti alcuni prototipi che possono essere adatti a tale utilizzo.

Un esempio di veicolo idoneo per l'impiego in una rete AHS è il *SatAnt* (Figura 3.2), ottenuto modificando una normale vettura da strada affinché potesse essere controllata da un sistema computerizzato (Barberá & Pérez, 2014). Durante la sperimentazione, questo veicolo è stato in grado di seguire un altro mezzo a guida manuale in modo completamente automatico.



Figura 3.2 Prototipo di autovettura SatAnt (Barberá & Pérez, 2014)

Le modifiche che sono state apportate riguardano il controllo automatico della marcia e un sistema di controllo elettronico dello sterzo, della velocità e dei freni. Sono stati inoltre aggiunti i seguenti sensori:

- Novatel GPS  
Permette la localizzazione del veicolo all'interno della rete AHS
- Compasso elettronico di precisione  
Permette di determinare la direzione e l'inclinazione del veicolo
- Misuratori di posizionamento relativo collegati alle ruote  
Permettono di determinare la velocità del veicolo
- Misuratore di posizionamento collegato al volante  
Permette di determinare l'angolo d'inclinazione delle ruote
- Radar  
Permette di determinare le distanze dagli ostacoli posti di fronte e lateralmente all'autovettura

La struttura hardware è stata divisa in due layers con velocità di connessione diverse (Figura 3.3):

- *Low-level layer*  
Questo layer è caratterizzato da una connessione a bassa velocità (500 Kbps) e connette tutti i sistemi di controllo elettronico del veicolo
- *High-level layer*  
Questo layer è caratterizzato da una connessione Ethernet ad alta velocità (100 Mbps) e connette il sistema computerizzato e di comunicazione del veicolo

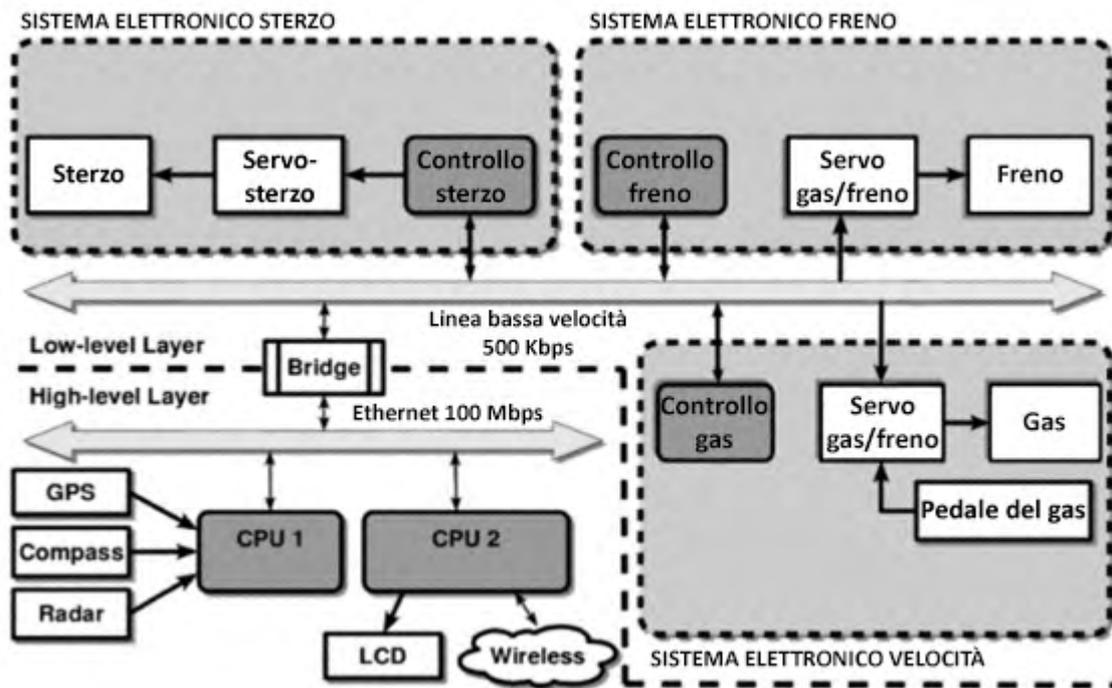


Figura 3.3 Struttura dei sistemi di controllo e comunicazione della vettura (Barberá & Pérez, 2014)

Questo tipo sistema composto da layers diversi è già utilizzato in altri sistemi computerizzati e permette la non interferenza dei diversi controlli e la possibilità di modificare la struttura aggiungendo nuovi sensori senza particolari difficoltà.

### **3.1.2.1 Sistemi di controllo elettronico**

#### 3.1.2.1.1 Sistema di controllo elettronico dello sterzo

Il sistema di controllo elettronico dello sterzo permette di mantenere la vettura all'interno della corsia e di effettuare un cambio di corsia quando richiesto dal Coordination layer.

Questo sistema regola lo sterzo del veicolo e utilizza il sensore collegato al volante per la determinazione dell'angolo di inclinazione delle ruote e per controllare che la direzione sia corretta.

#### 3.1.2.1.2 Sistema di controllo elettronico della velocità

Il sistema di controllo elettronico della velocità permette al veicolo di mantenere una velocità costante pari alla velocità desiderata comunicata al veicolo dal Link layer.

Per il calcolo della potenza del motore da erogare per mantenere la velocità costante, il sistema di controllo della velocità utilizza i dati forniti dai sensori posti sulle ruote e il compasso elettronico di precisione per determinare la velocità attuale del veicolo e la pendenza della strada. Queste informazioni sono importanti per conoscere il valore dell'accelerazione in funzione della potenza fornita.

Per poter mantenere un livello di comfort adeguato, si identificano tre possibili configurazioni corrispondenti a:

- Salita
- Discesa
- Pianura

Ciascuna configurazione permette di avere dei valori di accelerazione e decelerazione tali da non disturbare i passeggeri a bordo del veicolo. Inoltre, conoscendo il valore della pendenza, è possibile utilizzare una combinazione tra due configurazioni per poter ottenere livelli di accelerazione adeguati per qualsiasi situazione.

### 3.1.2.1.3 Sistema di controllo elettronico dei freni

Il sistema di controllo elettronico dei freni permette di azionare in maniera automatica i freni nel caso in cui ciò sia richiesto dalla manovra del veicolo, oppure nel caso in cui i sensori rilevino un ostacolo.

L'operazione di frenatura è caratterizzata da tre parametri:

- Pressione dei freni
- Tempo di frenatura
- Tempo di rilascio

### **3.1.2.2 Software a bordo del veicolo**

Per poter utilizzare correttamente i sistemi di controllo, il veicolo è dotato di un software sviluppato dal progetto *MIMICS* (Barbera, Irquierdo, Moreo, Ubeda, & Skarmeta, 2003). Tale applicazione è stata modificata per l'utilizzo specifico sul veicolo SatAnt.

Il software è stato progettato per gestire plotoni di veicoli dotati di strumentazione adeguata, permettendo al veicolo leader di guidare i veicoli follower all'interno del plotone, utilizzando i sensori di cui è dotata la vettura per trasmettere informazioni attraverso una connessione wireless.

Tutte le informazioni condivise vengono memorizzate su un disco di memoria locale del veicolo e successivamente trasferite alla stazione di controllo, utilizzando un router, dove è possibile monitorare lo stato del sistema.

### 3.1.2.2.1 Struttura modulare

Ciascun veicolo è dotato di quattro moduli (Figura 3.4):

- *Virtual Robot*
- *Perception*
- *Controller*
- *Navigation*

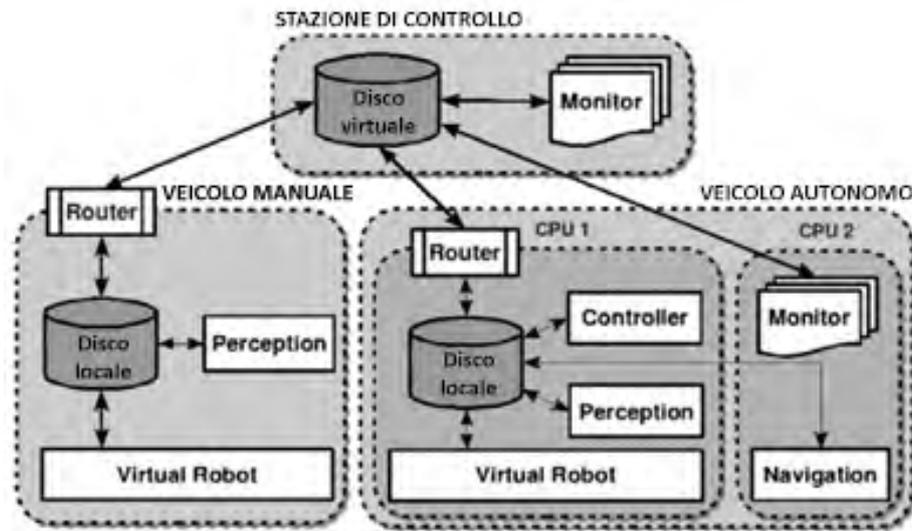
Il Virtual Robot legge le informazioni fornite dai sensori della vettura e le memorizza all'interno del disco di memoria locale.

Il secondo modulo elabora le informazioni e produce la corretta posizione e direzione del veicolo. Oltre alle informazioni di posizionamento, vengono registrati anche i dati forniti dal radar e i tempi per una possibile collisione. Per poter migliorare le informazioni di posizionamento, è stato sviluppato uno schema di localizzazione che opera su un sistema di coordinate globale utilizzato da tutto il plotone. Questo schema permette di registrare la localizzazione, l'orientamento e le velocità lineare ed angolare mediante l'utilizzo dei dati forniti dal radar.

Il modulo di controllo, sulla base dei dati elaborati e in funzione del percorso desiderato, verifica che ciascuna operazione sia eseguita in sicurezza. Per poter eliminare gli errori dovuti a disturbi del segnale radar, il tempo di collisione stimato ( $t_c$ ) viene calcolato pesando le distanze con un fattore che dipende dall'istante di misurazione. Con questo metodo le distanze misurate più recentemente hanno maggior rilevanza nel calcolo di  $t_c$ . Viene utilizzata una memoria temporanea per memorizzare le varie distanze misurate, che vengono automaticamente cancellate superato un certo intervallo di tempo.

Infine il modulo di navigazione genera un percorso per guidare il veicolo con velocità desiderata sulla base delle posizioni dei veicoli all'interno del plotone.

È possibile inoltre equipaggiare l'autovettura con un ulteriore modulo per monitorare lo stato dell'autovettura, permettendo di visualizzare il posizionamento dei veicoli e le loro traiettorie su una mappa.



**Figura 3.4** Struttura modulare del sistema di guida automatica del veicolo (Barberá & Pérez, 2014)

### 3.1.2.2.2 Comportamento del veicolo

Il sistema di guida del veicolo è basato su tre caratteristiche di comportamento (Figura 3.5):

- Keep speed
- Avoid collision
- Follow path

La prima caratteristica analizza le velocità dei veicoli leader in un certo periodo di tempo (circa 10 secondi) e ne calcola la media per poi impostarla come velocità del veicolo.

La seconda permette di mantenere costante la distanza, così come il tempo di collisione, rispetto al veicolo che precede. Questo comportamento utilizza come input il tempo di collisione e la velocità corrente per trasmettere comandi di accelerazione e frenatura al sistema di controllo elettronico. Tale caratteristica consente di evitare collisioni con altri veicoli.

Il terzo comportamento utilizza il percorso assegnato dal modulo Navigation per produrre dei comandi di velocità e controllo dello sterzo.

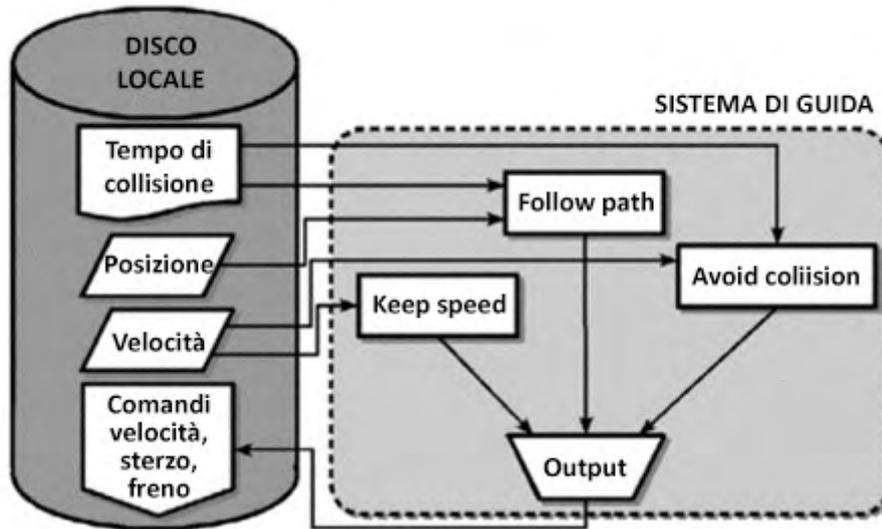


Figura 3.5 Caratteristiche di comportamento del veicolo (Barberá & Pérez, 2014)

A seconda della distanza dell'ostacolo vengono impostate le priorità ai comportamenti di guida. Vi sono tre possibili situazioni:

- Ostacolo lontano (tempo di collisione > 2,5 secondi)
  - Avoid collision priorità bassa
  - Follow path priorità alta
  - Keep speed priorità alta
- Ostacolo vicino (1,5 s < tempo di collisione < 2,5 s)
  - Avoid collision priorità bassa
  - Follow path priorità alta
  - Keep speed priorità bassa
- Pericolo (tempo di collisione < 1,5 s)
  - Avoid collision priorità alta
  - Follow path priorità bassa
  - Keep speed priorità bassa

### 3.1.3 Confronto con altre tipologia di veicoli automatizzati

Il prototipo di vettura SatAnt è stato confrontato con altre vetture automatizzate.

Sono stati presi in considerazione tre veicoli sperimentali: *Boss*, *Junior* e *Odin*.

La struttura della vettura Boss è composta da tre layers (McNaughton, 2012):

- *Mission planning*
- *Behavioral executive*
- *Motion planning*

Il software permette una semplice configurazione del sistema e delle comunicazioni.

Il linguaggio di programmazione utilizzato per il veicolo è ADA.

Il comportamento del veicolo è deciso in funzione del contesto in cui si trova a livello macroscopico all'interno della rete di trasporto, cambiando a seconda che si trovi a muoversi in tronchi stradali, intersezioni o specifiche zone preimpostate.

Il progetto della vettura Junior è stato sviluppato dal *Center for Automotive Research at Stanford (CARS)* (Montemerlo, 2006). Il primo prototipo fu presentato nel 2005 alla *DARPA Grand Challenge*.

A livello strutturale, il veicolo è composto da due layers:

- *Top level control*
- *Path planner*

Il linguaggio di programmazione utilizzato è chiamato *Task Definition Language (TDL)*, basato su C++, e permette una veloce elaborazione dei dati e l'utilizzo simultaneo di trenta moduli.

Il progetto Odin è sviluppato dalla *Virginia Tech University* e da *TORC Technologies* (Currier, 2012). Questo veicolo è in grado di decidere quale comportamento adottare in determinate situazioni e reagisce in maniera automatica a pericoli che possono verificarsi. La struttura è articolata su tre layer: *base vehicle platform*, *perception* e *planning*. Il linguaggio di programmazione utilizzati sono C++ e LabVIEW.

Veicolo Autonomo	Caratteristiche dello sviluppo		
	Architettura funzionale	Organizzazione comportamento	Linguaggio di programmazione
SatAnt	Decisionale-reattivo (due layers)	Gerarchica, combinazione di comportamenti	Java
Boss	Decisionale (tre layers)	Gerarchica, selezione del comportamento	ADA
Junior	Decisionale (due layers)	Finite State Machine (FSM)	C/C++ (TDL)
Odin	Decisionale-reattivo (tre layers)	Gerarchica, selezione del comportamento	C++ e LabVIEW

*Figura 3.6* Comparazione tra i diversi veicoli autonomi (Barberá & Pérez, 2014)

## 3.2 Infrastruttura

Così come per il veicolo, anche l'infrastruttura necessita dell'installazione di strumenti specifici per il corretto funzionamento del sistema.

La tipologia di AHS basata su veicoli indipendenti è l'unica struttura che non richiede alcuna modifica ed equipaggiamento dell'infrastruttura. Per le strutture AHS di tipo Cooperative e Infrastructure Concept è richiesto come minimo l'implementazione di un sistema di comunicazione che permette la trasmissione di informazioni fra infrastruttura e veicolo.

### 3.2.1 Requisiti della struttura PATH

Nel caso della struttura PATH AHS, essendo le informazioni raggruppate in base alla sezione e alla corsia su cui viaggia il veicolo, dovrebbero essere assegnati a ciascuna sezione e corsia diversi canali di comunicazione. Ogni veicolo deve sintonizzare il ricevitore sul nuovo canale non appena entra in una nuova sezione.

Il canale inverso, da veicolo a infrastruttura, può funzionare nello stesso modo ma poiché il numero di veicoli può essere elevato (fino alla capacità di una corsia in una sezione) è necessario uno schema robusto per minimizzare l'interferenza fra trasmettitori.

Oltre agli strumenti di comunicazione, la struttura del PATH AHS necessita di sensori suddivisibili in due tipologie:

- Sensori che forniscono informazioni al Link layer sullo stato del traffico (velocità media e flusso)
- Sensori che forniscono informazioni riguardo il livello di occupazione nella rete



# CAPITOLO 4

## MODELLI PER I SISTEMI AHS

### 4.1 Strategies and Spacing Requirements for Lane Changing and Merging in Automated Highway Systems

In questo modello (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998) si analizza il problema delle manovre di lane changing e di unione di plotoni nel caso in cui i veicoli siano indipendenti e non vi sia alcuna comunicazione tra questi. Questa situazione è la più sfavorevole per quanto riguarda la sicurezza della manovra comportando quindi dei vincoli di distanza maggiori.

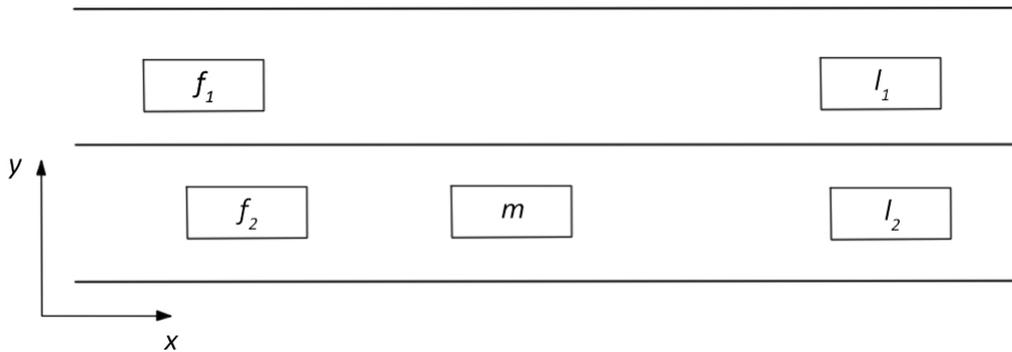
Viene inoltre calcolata, attraverso un algoritmo, la minima distanza di sicurezza per l'effettuazione di una manovra di lane changing, denominata *minimum safety spacing for lane changing (MSSLC)*. Tale distanza permette di evitare una collisione tra i veicoli nel caso in cui venga effettuata una frenata di emergenza durante la manovra.

Essendo la manovra di unione di plotoni un caso molto simile e più semplice della manovra di lane changing, viene considerato solo il problema di quest'ultima.

Durante una manovra di lane changing vengono coinvolte al massimo cinque vetture (Figura 4.1).

I veicoli  $l_1$  e  $f_1$  sono i veicoli leader e follower della corsia di destinazione,  $l_2$  e  $f_2$  sono i veicoli leader e follower della corsia di origine mentre  $m$  è il veicolo che deve effettuare la manovra di lane changing.

Tutti i veicoli hanno lunghezza pari a  $L_i$  con  $i = l_1, f_1, l_2, f_2, m$ .



**Figura 4.1** Veicoli condizionati dalla manovra di Lane Changing  
(Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

Si considera un sistema a due dimensioni, con  $x$  parallelo alla direzione dell'asse della strada e  $y$  ortogonale all'asse della strada. Con questo sistema di riferimento è possibile descrivere il moto del veicolo utilizzando tre vettori a due dimensioni:

- Distanza  $x^i$
- Velocità  $v^i$
- Accelerazione  $a^i$

Con  $i = l_1, f_1, f_2, l_2, m$ .

La posizione del veicolo viene misurata rispetto al punto centrale del paraurti frontale. La velocità e l'accelerazione invece vengono misurate rispetto al baricentro del veicolo.

La distanza tra due veicoli è pari a:

$$d_{ij} = x^i - x^j - L_i \quad (1)$$

Durante la manovra di lane changing, questa distanza dovrà essere tale da garantire uno spazio sufficiente ad arrestare il veicolo nel caso in cui venga effettuata una frenata di emergenza da uno dei cinque veicoli considerati in precedenza.

Si suppone che al tempo  $t = 0$  il veicolo  $m$  cominci ad effettuare la manovra di lane changing.

Per quanto riguarda il controllo longitudinale, la manovra è composta da due fasi:

- Nella prima fase il veicolo diminuisce la velocità per rendere la distanza con il veicolo leader sufficientemente grande per poter effettuare la manovra in sicurezza
- Nella seconda fase viene regolata la velocità in modo che sia uguale alla velocità della corsia di destinazione

È possibile che la manovra sia caratterizzata da un'unica fase nel caso in cui la velocità della corsia di destinazione sia minore della velocità attuale del veicolo come illustrato nel prossimo paragrafo.

Il tempo complessivo impiegato per effettuare il controllo longitudinale è pari a  $t_{long}$ .

Nell'istante  $t_{lat} \geq 0$  il veicolo inizia a sviluppare un'accelerazione laterale per poter cambiare corsia.

Queste due manovre sono trattate separatamente ma possono essere compiute nello stesso momento ( $0 < t_{lat} < t_{long}$ ) oppure in istanti separati ( $t_{lat} \geq t_{long}$ ).

#### 4.1.1 Controllo longitudinale

L'accelerazione longitudinale del veicolo dipende principalmente dalla velocità relativa tra la corsia di origine ( $V_o$ ) e la corsia di destinazione ( $V_d$ ).

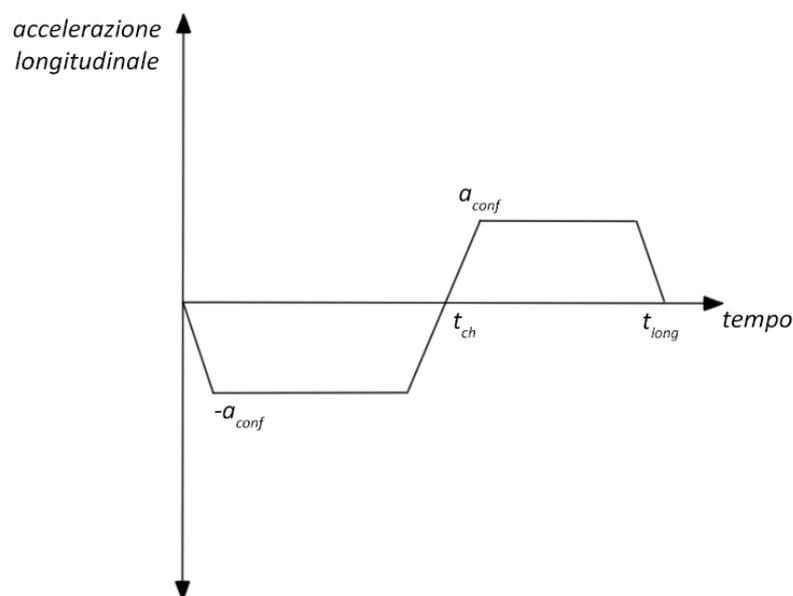
A seconda dei valori delle due velocità vi possono essere due casi:

- $V_o < V_d$

In questo caso la velocità della corsia di destinazione è maggiore della velocità della corsia di origine.

Il veicolo  $m$  inizialmente decelera per rendere la distanza dal veicolo che lo precede sufficientemente ampia per poi accelerare fino ad avere una velocità pari alla velocità della corsia di destinazione.

Si assume che l'accelerazione longitudinale diminuisca linearmente fino a raggiungere la decelerazione massima  $-a_{conf}$ , scelta in modo da garantire sicurezza e comfort. Raggiunta la decelerazione massima, questa rimane costante fino a raggiungere la distanza voluta con il veicolo leader. Ottenuta la distanza desiderata, il veicolo inizia la fase di accelerazione. Anche in questa fase l'accelerazione aumenta in maniera lineare fino a raggiungere un valore pari a  $a_{conf}$ . Raggiunta l'accelerazione massima, questa rimane costante fino a raggiungere una velocità pari a  $V_d$  (Figura 4.2).



**Figura 4.2** Variazione dell'accelerazione longitudinale in funzione del tempo  
(Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

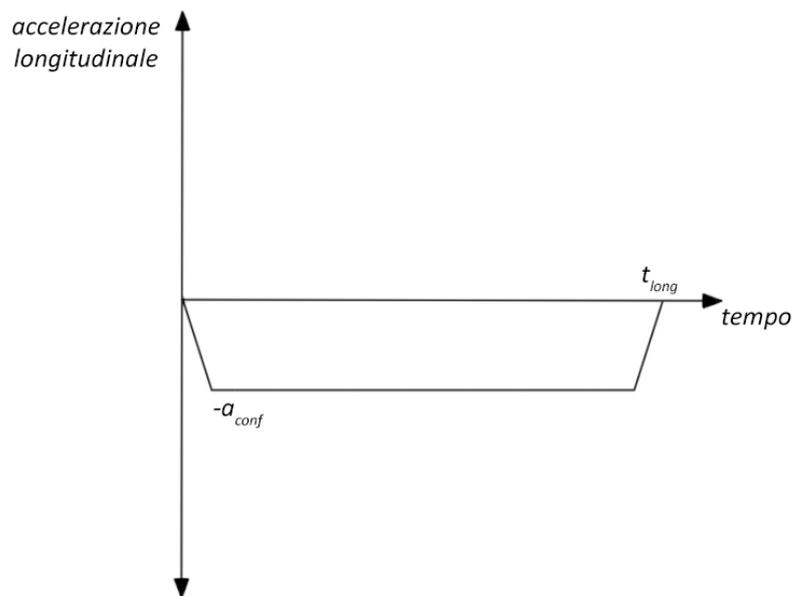
Nell'istante  $t_{ch}$  il veicolo passa dalla fase di decelerazione alla fase di accelerazione mentre nell'istante  $t_{long}$  la velocità del veicolo è pari alla velocità della corsia di destinazione.

- $V_o > V_d$

In questo caso la velocità della corsia di destinazione è minore della velocità della corsia di origine.

Il veicolo decelera in modo da ottenere una distanza di sicurezza con il veicolo che lo precede e raggiungere la velocità desiderata.

Si assume che l'accelerazione longitudinale decresca linearmente fino a raggiungere  $-a_{conf}$ . Raggiunta la decelerazione massima, questa rimane costante fino a che non vi sia una distanza di sicurezza sufficiente e la velocità del veicolo sia pari a  $V_d$ . Quando entrambe queste due condizioni sono rispettate, l'accelerazione torna ad un valore nullo (Figura 4.3).



**Figura 4.3** Variazione dell'accelerazione longitudinale in funzione del tempo (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

#### 4.1.2 Controllo laterale

Per la determinazione dell'accelerazione laterale viene considerato un modello della traiettoria della manovra di lane changing che assume un andamento sinusoidale per l'accelerazione laterale. Il modello è simmetrico rispetto alla direzione di cambio di corsia.

Con un'approssimazione di primo ordine, secondo questo modello l'accelerazione laterale risulta essere pari a:

$$a_{lat} \begin{cases} \frac{2\pi d_I}{t_{LC}^2} \sin\left(\frac{2\pi}{t_{LC}}(t - t_{lat})\right), & \text{se } t \in [t_{lat}, t_{lat} + t_{LC}] \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (2)$$

Dove:

$a_{lat}$  = accelerazione laterale istantanea

$t_{LC}$  = tempo totale richiesto per il completamento della manovra di lane changing

$t_{lat}$  = istante di inizio della manovra

$d_I$  = distanza da percorrere lateralmente

L'accelerazione massima è pari a:

$$A = \frac{2\pi d_I}{t_{LC}^2} \quad (3)$$

### 4.1.3 Comportamenti

Utilizzando i due modelli per il controllo longitudinale e laterale descritti in precedenza, a seconda dei valori assegnati ai parametri di tempo ( $t_{long}$ ,  $t_{lat}$ ,  $t_{ch}$ ,  $t_{LC}$ ) e di accelerazione ( $a_{comf}$ ) è possibile ottenere diversi comportamenti che influenzano la sicurezza della manovra di lane changing.

Una manovra viene considerata effettuata in sicurezza quando le distanze di sicurezza vengono rispettate durante tutta la durata della manovra. La distanza di sicurezza è tale da garantire la possibilità ai veicoli di fermarsi senza che vi sia alcuna collisione nel caso in cui un veicolo effettui una frenata di emergenza prima, durante o dopo la manovra di lane changing. Tale assunzione richiede di considerare la situazione peggiore in quanto non viene considerata la possibilità di sterzare per evitare una collisione.

#### 4.1.3.1 Condizioni di sforzo

Le condizioni del veicolo che effettua la manovra sono diverse da quelle degli altri veicoli che viaggiano con una traiettoria dritta. In particolare la forza longitudinale massima di frenatura che il veicolo riesce a raggiungere è minore in quanto le ruote sono inclinate.

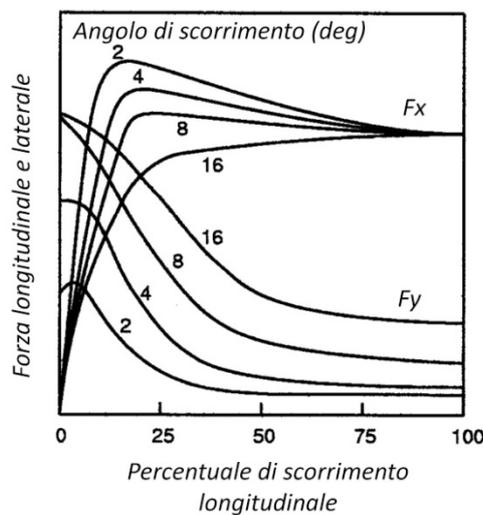


Figura 4.4 Forza longitudinale e laterale in funzione dell'angolo di scorrimento (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

Assumendo che le forze  $F_x$  e  $F_y$  dipendano linearmente dalle accelerazioni  $a_x$  e  $a_y$ , è necessario che venga sempre rispettata la condizione:

$$a_x^2 + a_y^2 \leq F_{cost} \quad (4)$$

Dove  $F_{cost}$  è una costante positiva.

Questa condizione vale solo nel caso in cui siano applicate delle accelerazioni longitudinale e laterale simultaneamente. Non vale invece per i veicoli che viaggiano in traiettoria rettilinea dove  $a_y$  è uguale a zero e  $a_x$  può essere maggiore di  $F_{cost}$ .

Maggiore è l'accelerazione laterale, maggiore sarà la distanza longitudinale percorsa necessaria al veicolo per fermarsi.

#### 4.1.3.2 Sicurezza

In questo paragrafo viene analizzato il comportamento dei veicoli nel caso in cui venga effettuata una frenata di emergenza.

Si possono verificare quattro scenari differenti:

- Il veicolo  $l_1$  effettua una frenata di emergenza
- Il veicolo  $l_2$  effettua una frenata di emergenza
- Il veicolo  $m$  effettua una frenata di emergenza
- Entrambi i veicoli  $l_1$  e  $l_2$  effettuano una frenata di emergenza

Viene considerato solo il primo caso in quanto sono tutti simili tra loro e riconducibili allo scenario preso in esame.

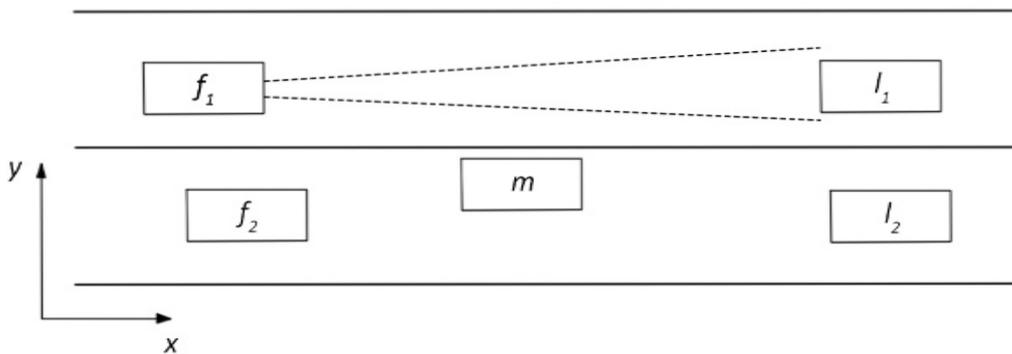
La situazione di frenata può essere descritta specificando i profili di decelerazione dei veicoli in funzione del tempo. La decelerazione dipende dalle condizioni della strada, dalle caratteristiche del veicolo, dai sensori con cui è equipaggiata la vettura e dalla tipologia di AHS adottata.

#### 4.1.3.2.1 Veicoli autonomi

Nel caso in cui i veicoli siano autonomi, questi sono in grado di determinare la corsia utilizzata e i veicoli vicini grazie ai sensori con cui è equipaggiata la vettura senza alcuna comunicazione fra veicoli o con l'infrastruttura.

È necessario valutare due possibili situazioni a seconda della posizione del veicolo che effettua la manovra di lane changing per verificare la sicurezza:

- Il veicolo  $l_1$  è visibile dal veicolo  $f_1$   
 In questo caso i sensori del veicolo  $f_1$  riescono ad individuare il veicolo  $l_1$  e permettono di determinare la sua posizione e velocità relativa senza che il veicolo  $m$  sia di ostacolo (Figura 4.5).

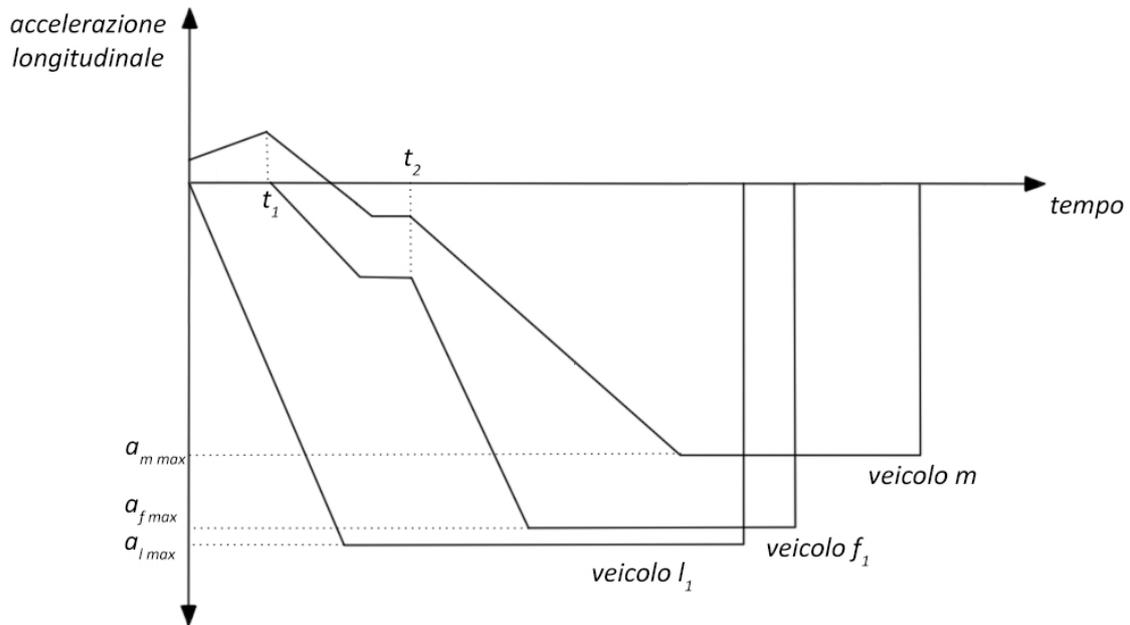


*Figura 4.5 Schema di posizionamento dei veicoli  
 (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)*

I veicoli  $f_1$  e  $m$  rilevano la frenata del veicolo  $l_1$  nello stesso momento e cominciano a decelerare mantenendo la decelerazione a livelli di comfort normali in quanto, in assenza di comunicazioni, non sono a conoscenza del fatto che il veicolo leader sta eseguendo una frenata di emergenza.

Rilevata la frenata di emergenza, i veicoli applicano a loro volta la decelerazione massima. La distanza percorsa dal veicolo  $m$  per fermarsi sarà maggiore degli altri veicoli in quanto, oltre ad un'accelerazione longitudinale, il veicolo è soggetto ad un'accelerazione laterale.

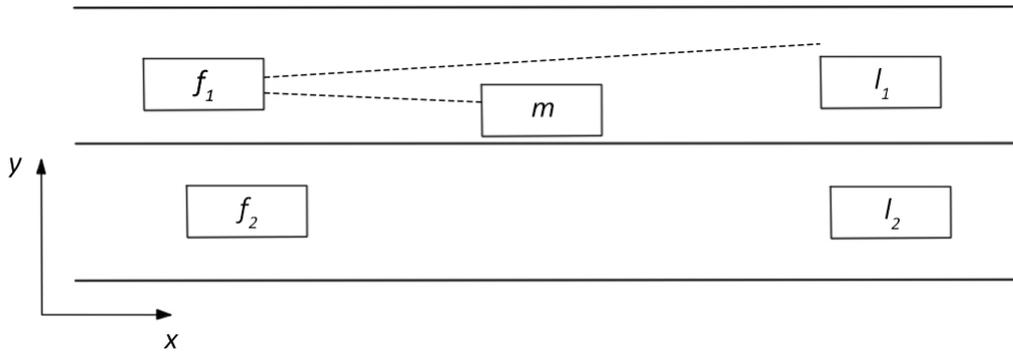
Per semplificare il modello si assume che entrambe le accelerazioni longitudinale e laterale decrescano linearmente col tempo rispettando in ogni istante la condizione  $a_x^2 + a_y^2 \leq F_c$  (Figura 4.6).



**Figura 4.6** Profili di accelerazione dei veicoli  $l, f$  e  $m$   
(Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

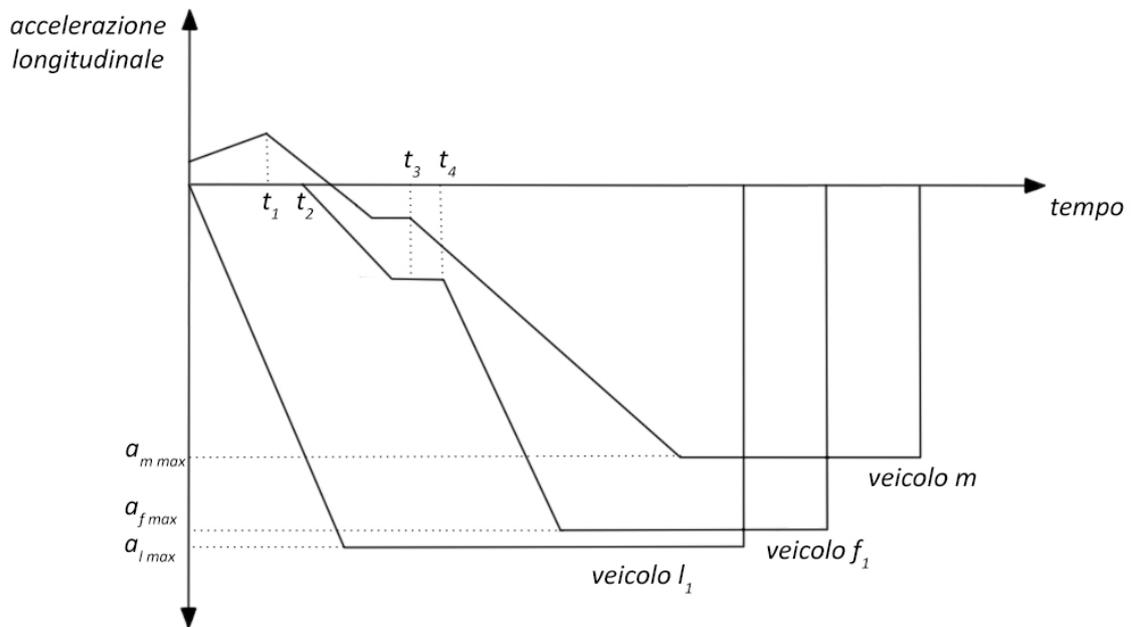
Nell'istante  $t_1$  i veicoli  $f_1$  e  $m$  iniziano a frenare per mantenere la distanza di sicurezza con il veicolo leader fino ad una decelerazione massima di comfort. All'istante  $t_2$  i veicoli riconoscono la frenata di emergenza e frenano al massimo della loro capacità in modo da ridurre al minimo la distanza necessaria a fermare il veicolo.

- Il veicolo  $l_1$  non è visibile dal veicolo  $f_1$   
 In questo caso i sensori del veicolo  $f_1$  non riescono ad individuare il veicolo  $l_1$  perché il veicolo  $m$  ostruisce la rilevazione (Figura 4.7).



**Figura 4.7** Schema di posizionamento dei veicoli  
 (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

Il comportamento del veicolo  $m$  rimane invariato. Il veicolo  $f_1$  comincia a decelerare poco dopo il veicolo  $m$ . I sensori del veicolo  $f_1$ , rilevando solo il veicolo  $m$ , individuano la frenata di emergenza con un ritardo molto maggiore del caso precedente (Figura 4.8).



**Figura 4.8** Profili di accelerazione dei veicoli  $l, f$  e  $m$   
 (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

In questo caso gli istanti di rilevazione sono sfalsati.

#### 4.1.3.2.2 Plotoni coordinati

Nel caso in cui i veicoli siano coordinati fra loro e la comunicazione avvenga sia tra i veicoli che con l'infrastruttura, è possibile diminuire la distanza di sicurezza in quanto la frenata non è imposta in maniera autonoma dai sensori del veicolo ma coordinata grazie agli strumenti di comunicazione. In questa situazione il veicolo leader, durante una manovra di frenata, fornisce una sequenza di decelerazione che deve essere seguita dagli altri veicoli in modo che la manovra sia compiuta senza che vi siano collisioni. Tale sequenza può richiedere all'ultimo veicolo di iniziare la frenata per primo, seguito poi dal penultimo veicolo e così a seguire.

Il veicolo leader è responsabile dell'individuazione di eventuali ostacoli e la determinazione di situazioni di emergenza per la quale è necessario avviare procedure specifiche per evitare un incidente. In queste condizioni la comunicazione avviene direttamente fra i veicoli in modo da diminuire i ritardi dovuti dalla tecnologia di trasmissione. Il leader del plotone notifica a tutti i veicoli la forza da applicare per la frenata e l'esatto istante in cui applicare tale forza. Questo tipo di sistema elimina il ritardo dovuto al rilevamento della frenata di emergenza e permette una maggiore sicurezza (Figura 4.9).

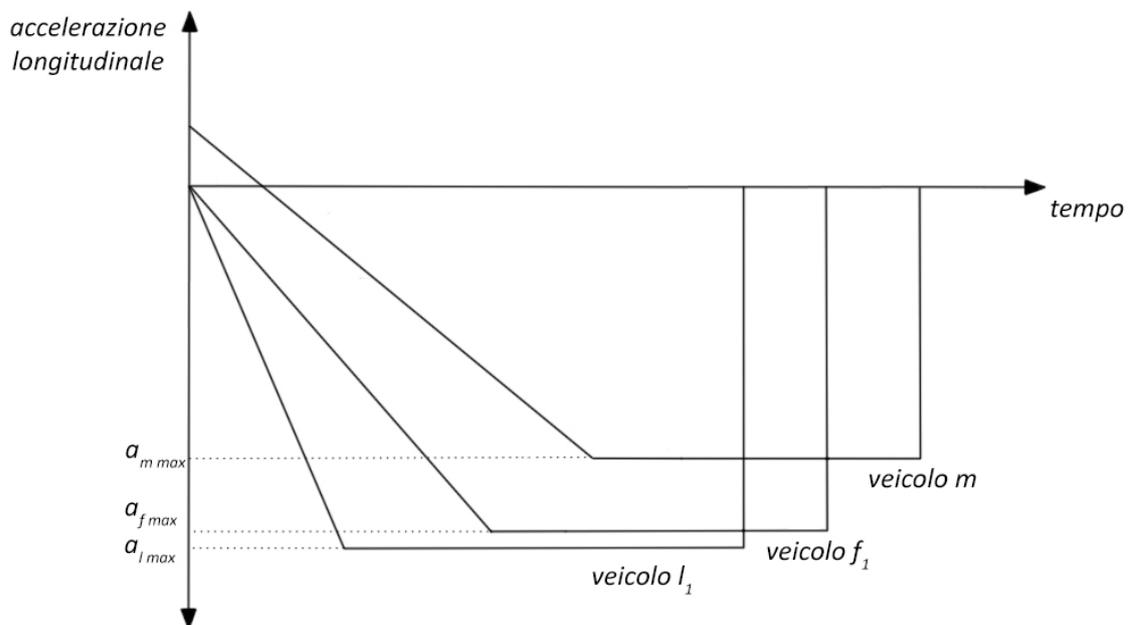


Figura 4.9 Profili di accelerazione dei veicoli nel plotone  
(Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

#### 4.1.3.2.3 Distanza di sicurezza

Per semplificare il calcolo si ipotizza che durante la manovra di lane changing i veicoli leader e follower viaggino ad una velocità costante. All'istante  $t_s$  il veicolo  $j$ -esimo, con  $j \in \{l_1, l_2, m\}$ , inizia una frenata di emergenza.

Le accelerazioni saranno:

$$a_x^{(i)}(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } t < t_s \\ \bar{a}_x^{(i)}(t; j), & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \text{con } i \in \{l_1, l_2, f_1, f_2\} \quad (5)$$

$$a_y^{(i)}(t) = 0, \quad \forall t, \quad \text{con } i \in \{l_1, l_2, f_1, f_2\} \quad (6)$$

$$a_x^{(m)}(t) = \begin{cases} \tilde{a}_x^{(m)}(t), & \text{se } t < t_{m_{emerg}} \\ \bar{a}_x^{(m)}(t; j), & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (7)$$

$$a_y^{(m)}(t) = \begin{cases} \tilde{a}_y^{(m)}(t), & \text{se } t < t_{m_{emerg}} \\ \bar{a}_y^{(m)}(t; j), & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (8)$$

Dove:

$\bar{a}_x^{(i)}(t; j), i \in \{l_1, l_2, f_1, f_2\}$  = decelerazione dell' $i$ -esimo veicolo nel caso in cui il  $j$ -esimo veicolo compie una frenata di emergenza

$\tilde{a}_x^{(m)}(t), \tilde{a}_y^{(m)}(t)$  = accelerazione longitudinale e laterale del veicolo che esegue la manovra di lane changing

$\bar{a}_x^{(m)}(t; j), \bar{a}_y^{(m)}(t; j)$  = accelerazione longitudinale e laterale del veicolo che esegue la manovra di lane changing nel caso in cui il  $j$ -esimo veicolo compie una frenata di emergenza

$$t_{m_{emerg}} = t_s + t_d$$

$t_d$  = tempo necessario al veicolo che esegue la manovra di lane changing per identificare la frenata di emergenza

Si possono calcolare la posizione e la velocità calcolando gli integrali dell'accelerazione:

$$v^{(i)}(t) = v^{(i)}(0) + \int_0^t a^{(i)}(t) dt \quad (9)$$

$$x^{(i)}(t) = x^{(i)}(0) + \int_0^t v(t) dt \quad (10)$$

Se lo spazio iniziale tra i veicoli è sufficientemente ampio, in caso di frenata di emergenza non avverrà alcuna collisione tra i veicoli.

Le distanze di interesse sono  $d_{l_1 f_1}$ ,  $d_{l_1 m}$ ,  $d_{l_2 f_2}$ ,  $d_{l_2 m}$ ,  $d_{m f_1}$  e  $d_{m f_2}$ .

Chiamiamo la distanza  $d_{kh}$  una delle distanze a cui si è interessati.

Consideriamo ogni veicolo individualmente su una corsia di autostrada.

$T_s^{(h)}(t_s; j)$  è il tempo che impiega il veicolo  $h$  per fermarsi dopo che il veicolo  $j$  ha iniziato la frenata di emergenza all'istante  $t_s$ .

Si verificherà un incidente se esiste un tempo  $t_c$  per cui  $d_{kh}(t_c)$  è minore di 0 e la distanza laterale fra i due veicoli soddisfa l'equazione:

$$|y^{(k)} - y^{(h)}| < L_{lat}^{hk} \quad (11)$$

Dove:

$L_{lat}^{hk}$  = minima distanza laterale per cui i veicoli  $k$  e  $h$  con la stessa posizione longitudinale non collidono

Il calcolo della distanza minima di sicurezza è stato eseguito mediante simulazioni, calcolando il valore di  $D^{kh}$  minimo definito come:

$$D_{min}^{kh} = - \min_{t_s \in [0, t_{LC}], j \in \{l_1, l_2, m\}} \left\{ \min_{t \in [0, T_s^{(h)}(t_s; j)]} \{I_{hk}(t) \cdot d_{hk}(t), 0\} \right\}$$

Dove:

$$I_{hk}(t) \begin{cases} 1, & \text{se } |y^{(k)} - y^{(h)}| < L_{lat}^{hk} \\ 0, & \text{altrimenti} \end{cases}$$

La simulazione è stata eseguita solo per il caso di veicoli autonomi e si serve di un algoritmo per calcolare la distanza  $D_{min}^{kh}$  per tutti i possibili casi.

Per semplicità sono stati considerati veicoli con caratteristiche di dimensioni e prestazionali uguali:

- Lunghezza = 5 m
- Decelerazione massima = 0.5g m/s<sup>2</sup>
- Contraccolpo massimo = 50 m/s<sup>3</sup>
- Tempo di inizio frenata = 0.3 s
- Tempo rilevazione frenata di emergenza = 1 s
- Tempo di inizio frenata di emergenza = 0.3 s
- $L_{lat}^{hk} = 2$  m
- $F_{cost} = 0.25$  m<sup>2</sup>/s<sup>4</sup>

La velocità della corsia di destinazione ( $V_d$ ) viene considerata per tutti i valori compresi tra 10 m/s e 30 m/s.

#### 4.1.3.3 Simulazioni

Per la determinazione della distanza minima sono state eseguite tre diverse simulazioni facendo variare  $a_{comf}$  e  $t_{LC}$ :

- $a_{comf} = 0.1 g$   $t_{LC} = 5 s$

Questa simulazione viene rappresentata dalla linea continua

- $a_{comf} = 0.3 g$   $t_{LC} = 5 s$

Questa simulazione viene rappresentata dalla linea tratteggiata

- $a_{comf} = 0.1 g$   $t_{LC} = 10 s$

Questa simulazione viene rappresentata dalla linea tratto-punto

Ciascuna linea corrisponde alla distanza massima individuata per diversi valori delle velocità dei veicoli.

Per esempio, a velocità relativa -5 m/s è stato calcolato il valore di MSSLC per valori di velocità ( $V_0 = 30$  m/s,  $V_d = 25$  m/s), ( $V_0 = 28$  m/s,  $V_d = 23$  m/s), ( $V_0 = 26$  m/s,  $V_d = 21$  m/s), ecc.

4.1.3.3.1 Valore massimo della distanza minima di sicurezza tra i veicoli  $l_1$  e  $m$

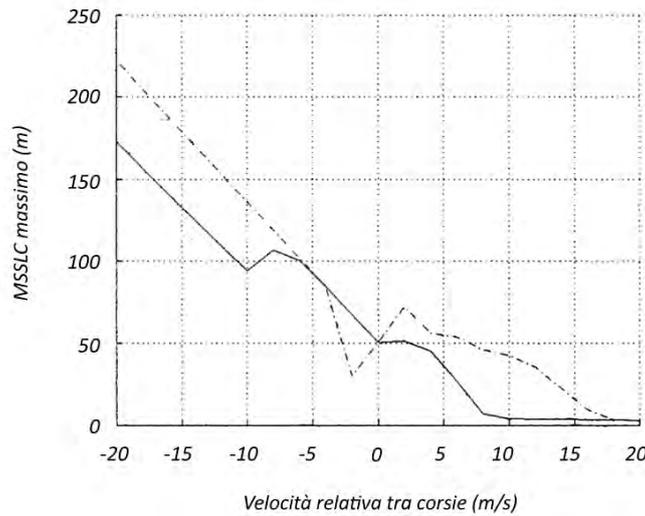


Figura 4.10 MSSLC massimo tra  $l_1$  e  $m$  in funzione della velocità relativa tra le due corsie (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

In questa simulazione la linea continua e la linea tratteggiata sono sovrapposte.

Il valore di MSSLC tra il veicolo leader nella corsia di destinazione ed il veicolo che effettua la manovra diminuisce rapidamente all'aumentare della velocità relativa.

4.1.3.3.2 Valore massimo della distanza minima di sicurezza tra i veicoli  $l_2$  e  $m$

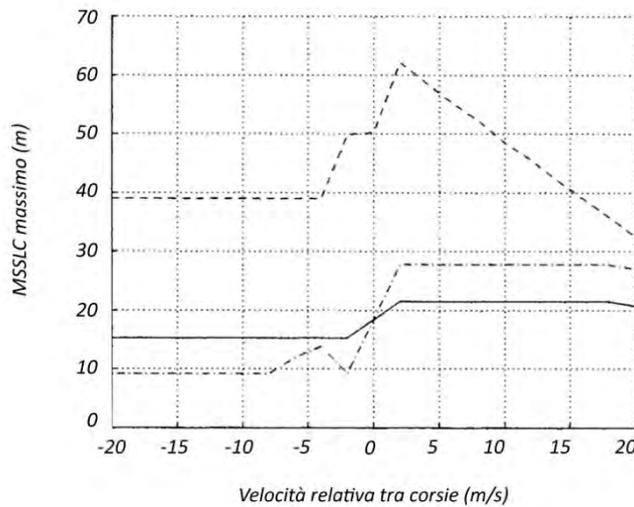
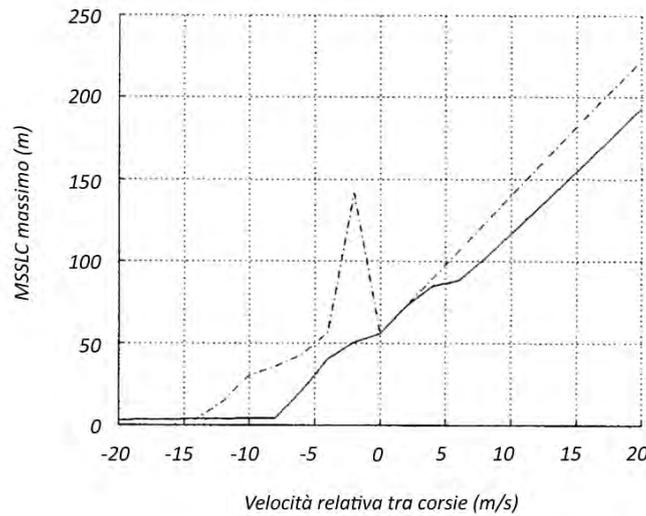


Figura 4.11 MSSLC massimo tra  $l_2$  e  $m$  in funzione della velocità relativa tra le due corsie (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

Il valore di MSSLC tra il veicolo leader nella corsia di origine ed il veicolo che effettua la manovra rimane a livelli bassi con poca influenza della velocità relativa tra le due corsie. Con valori di  $a_{comf}$  pari a  $0.3g$  sono necessarie distanze di sicurezza maggiori.

#### 4.1.3.3 Valore massimo della distanza minima di sicurezza tra i veicoli $m$ e $f_1$

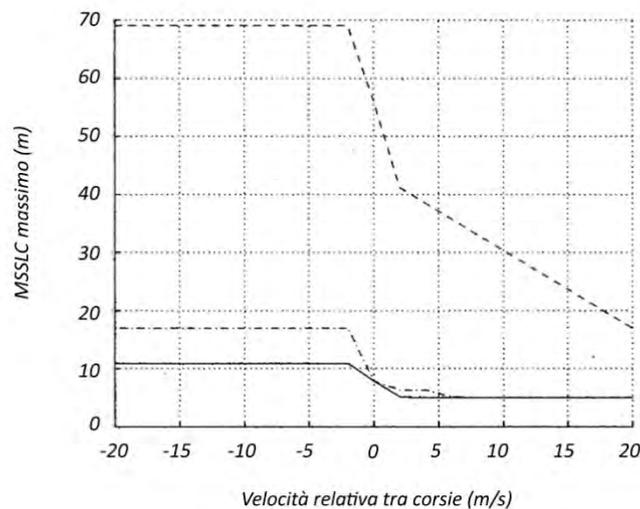


**Figura 4.12** MSSLC massimo tra  $m$  e  $f_1$  in funzione della velocità relativa tra le due corsie (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

In questa simulazione la linea continua e la linea tratteggiata sono sovrapposte.

Il valore di MSSLC tra il veicolo che effettua la manovra ed il veicolo follower nella corsia di destinazione aumenta rapidamente all'aumentare della velocità relativa.

#### 4.1.3.3.4 Valore massimo della distanza minima di sicurezza tra i veicoli $m$ e $f_2$



**Figura 4.13** MSSLC massimo tra  $m$  e  $f_2$  in funzione della velocità relativa tra le due corsie (Kanaris, Kosmatopoulos, & Ioannou, 2001)

Il valore di MSSLC tra il veicolo che effettua la manovra ed il veicolo follower nella corsia di origine rimane a livelli bassi ad eccezione del caso con valori di  $a_{comf}$  pari a 0.3g in cui sono necessarie distanze di sicurezza maggiori.

#### **4.1.3.4 Conclusioni**

Sulla base dei risultati delle simulazioni gli autori hanno proposto le seguenti osservazioni:

- La variabile che influisce maggiormente sul valore di MSSLC è la velocità relativa fra le due corsie
- Maggiore è il valore di  $a_{\text{comf}}$ , maggiore è la distanza minima di sicurezza richiesta per la manovra
- Il valore di  $t_{\text{LC}}$  non influisce sulla distanza minima di sicurezza fra il veicolo che deve effettuare la manovra e i veicoli della corsia di destinazione mentre modifica considerevolmente i valori di MSSLC per i veicoli nella corsia di origine

## 4.2 Mixed Manual/Semi-Automated Traffic: a Macroscopic Analysis

In questo paragrafo, che si basa sul lavoro di *Ionnaou & Bose (2003)*, vengono analizzate le relazioni flusso - densità per reti tradizionali con veicoli a guida manuale e per veicoli con guida semi-automatica.

I veicoli con guida semi-automatica sono dotati di strumentazione che permette di seguire un altro veicolo che precede nella stessa corsia. La tecnologia che permette tale automazione viene chiamata *Intelligent Cruise Control (ICC)*. Questo sistema utilizza sensori di misura longitudinali che permettono di determinare la velocità e distanza relativa fra i due veicoli per poi produrre controlli di regolazione per l'acceleratore e freno.

### 4.2.1 Diagrammi fondamentali flusso - densità

#### 4.2.1.1 Traffico di veicoli a guida manuale

Per analizzare il traffico a guida manuale viene utilizzato un modello di car following considerando una singola corsia di un'autostrada:

$$\dot{x}_{n+1}(t + \tau) = \lambda[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (1)$$

Dove:

$\tau$  = ritardo psicotecnico

$$\lambda = \text{sensibilità} = \lambda_0 \frac{\dot{x}_{n+1}^m(t + \tau)}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l}$$

Ponendo  $m = 0$  e  $l = 1,5$  si ottiene:

$$\dot{x}_{n+1}(t + \tau) = \lambda_0 \frac{[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^{1.5}} \quad (2)$$

Definiamo l'intervallo spaziale tra i veicoli  $n$  e  $n+1$  come:

$$s_{n+1} = x_n(t) - x_{n+1}(t) \quad (3)$$

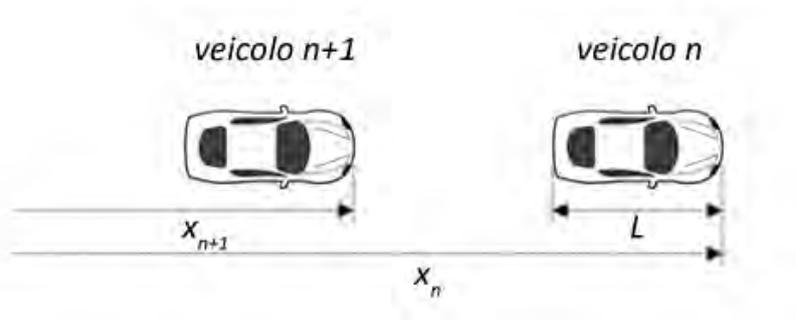
Sostituendo in (2) otteniamo:

$$\dot{v}_{n+1}(t + \tau) = \lambda_0 \frac{\dot{s}_{n+1}}{s_{n+1}^{1.5}} \quad (4)$$

Per analizzare il fenomeno a livello macroscopico si omette la variabile  $\tau$  in quanto questa non condiziona l'equazione che descrive il comportamento del flusso del traffico (Leutzbach, 1972). È possibile inoltre dimostrare che il reciproco della media dell'intervallo spaziale tra i veicoli è pari alla densità del traffico.

Possiamo quindi scrivere:

$$\dot{v} = \lambda_0 \frac{\dot{s}}{s^{1.5}}; \quad \dot{v} = -\lambda_0 k^{1.5} \frac{\dot{k}}{k^2} \quad (5)$$



**Figura 4.14** Distanza fra veicoli nella stessa corsia (Ioannou & Bose, 2003)

Integrando tra la condizione  $(v, k)$  e la condizione di jam  $(0, k_j)$  otteniamo:

$$\int_v^0 \dot{v} = -\lambda_0 \int_k^{k_j} \frac{\dot{k}}{k^{0.5}} \quad (6)$$

$$v = 2\lambda_0(\sqrt{k_j} - \sqrt{k}) \quad (7)$$

Considerando come condizione iniziale la condizione di free flow, avremo:

$$v = v_f, \quad k = 0 \quad (8)$$

Con queste condizioni è possibile ottenere il valore di  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = \frac{v_f}{2\sqrt{k_j}} \quad (9)$$

Sostituendo il valore di  $\lambda_0$  in (7) otteniamo:

$$v = v_f \left( 1 - \sqrt{\frac{k}{k_j}} \right) \quad (10)$$

Utilizzando la relazione fondamentale della teoria del deflusso, il flusso sarà pari a:

$$q = kv \quad (11)$$

$$q = kv_f \left( 1 - \sqrt{\frac{k}{k_j}} \right) = Q(k) \quad (12)$$

Tramite l'equazione (12) è possibile ricavare il diagramma flusso - densità (Figura 4.15).

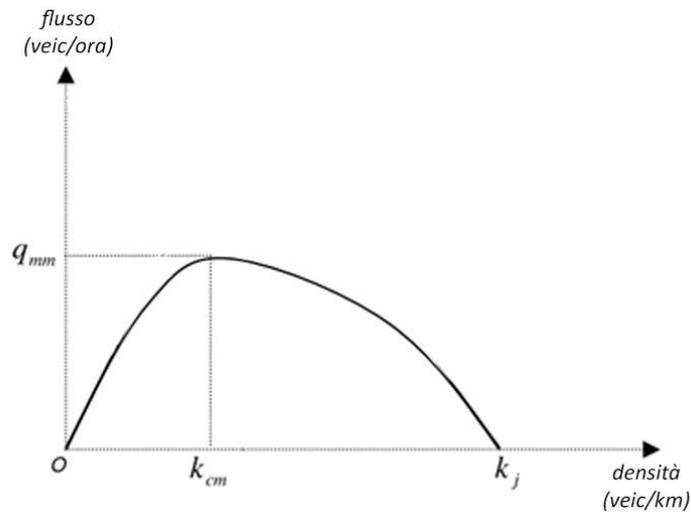


Figura 4.15 Diagramma  $q - k$  per veicoli a guida manuale (Ioannou & Bose, 2003)

Nella curva è possibile individuare tre condizioni di deflusso:

- Condizione di free - flow
- Condizione critica
- Condizione di jam

La condizione di free - flow è caratterizzata da veicoli che viaggiano a velocità massima  $v_f$  e da un'assenza di interferenza. Nella condizione critica il flusso è pari al valore massimo ( $q_{mm}$ ) pari alla capacità della strada. Nella condizione di jam la densità è pari al suo valore massimo ( $k_j$ ) e la corrente veicolare ha velocità nulla.

La pendenza della linea che unisce un punto della curva con l'origine fornisce la velocità media dei veicoli che viaggiano in quella condizione.

La condizione critica divide il regime di deflusso stabile dal regime di flusso instabile. Quando il deflusso è instabile è possibile che si verifichino fenomeni di "stop and go" causati da perturbazioni che possono portare a condizioni di jam.

#### 4.2.1.2 Traffico a guida semi-automatica

La creazione di un modello per la determinazione del diagramma flusso - densità con traffico a guida semi-automatica è più semplice in quanto il comportamento di guida è deterministico e non si ha più la variabile comportamentale come per il traffico a guida manuale.

Un veicolo a guida semi-automatica è dotato di un sistema di ICC che permette di seguire un altro veicolo di fronte alla vettura che utilizza la stessa corsia.

Esistono due tipologie di ICC (Ioannou & Bose, 2003):

- Sistema a intervallo temporale costante
- Sistema a intervallo spaziale costante

Per la realizzazione di questo modello viene considerato un sistema a intervallo temporale costante progettato da *Ioannou & Xu (1994)*. L'intervallo temporale considerato è pari al tempo che il veicolo impiega a percorrere la distanza tra il paraurti posteriore del veicolo leader e il paraurti anteriore del veicolo seguente, definito come *gap temporale* ( $g_t$ ).

Per semplificare il modello si ipotizza che tutti i veicoli abbiano lunghezza pari a  $L$ . L'intervallo spaziale fra i veicoli che viaggiano a velocità  $v$  e utilizzano un sistema a intervallo costante  $g_t$  è pari a:

$$s = g_t v + L \quad (13)$$

La media dell'intervallo spaziale è pari al reciproco della densità. Quando l'intervallo spaziale è maggiore o uguale di (13), i veicoli viaggiano a velocità di free flow ( $v_f$ ) e il flusso dato da (11) aumenta linearmente con la densità:

$$q = kv_f \quad (14)$$

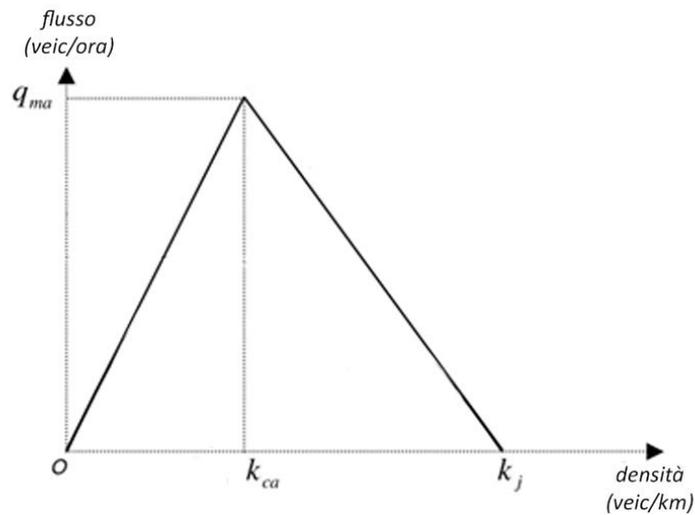


Figura 4.16 Diagramma  $q - k$  per veicoli a guida semi-automatica (Ioannou & Bose, 2003)

Nel punto di flusso massimo ( $q_{ma}$ ) la densità raggiunge un valore pari a:

$$k = k_{ca} = \frac{1}{g_t v_f + L} \quad (15)$$

Passato il punto di massimo, essendo il valore del gap temporale pari a quello minimo, per poter aumentare la densità è necessario che la velocità diminuisca in modo da diminuire la spaziatura media fra i veicoli:

$$s = g_t v + L < g_t v_f + L \quad (16)$$

$$k = \frac{1}{g_t v + L} > k_{ca} = \frac{1}{g_t v_f + L} \quad (17)$$

La velocità diminuisce all'aumentare della densità in base alla relazione:

$$v = \frac{1}{g_t} \left( \frac{1}{k} - L \right) \quad (18)$$

La relazione tra flusso - densità sarà pari a:

$$q = kv = \frac{1}{g_t}(1 - kL) \quad (19)$$

La pendenza della linea che unisce un punto della curva con l'origine fornisce la velocità media dei veicoli che viaggiano in quella condizione. È possibile notare come prima che il flusso raggiunga il suo valore massimo, la velocità dei veicoli è costante e pari a  $v_f$ . Oltrepassata tale situazione la velocità diminuisce fino ad arrivare ad un valore nullo per cui tutti i veicoli sono fermi.

Il flusso è descritto quindi da:

$$q = \begin{cases} kv_f & \text{se } k \leq k_{ca} \\ \frac{1}{g_t}(1 - kL) & \text{se } k > k_{ca} \end{cases} \quad (20)$$

Per ogni valore di densità del traffico, il flusso dei veicoli a guida semi-automatica è sempre maggiore o al limite uguale del flusso dei veicoli a guida manuale.

### 4.2.1.3 Traffico misto

Per la determinazione di un modello per flusso di traffico misto composto in parte da veicoli a guida manuale e in parte da veicoli a guida semi-automatica si assume che, in condizioni stazionarie, tipologie di guida uguali utilizzano gap temporali e spaziali uguali.

Consideriamo il traffico misto di Figura 4.17.

La media dell'intervallo spaziale sarà pari a:

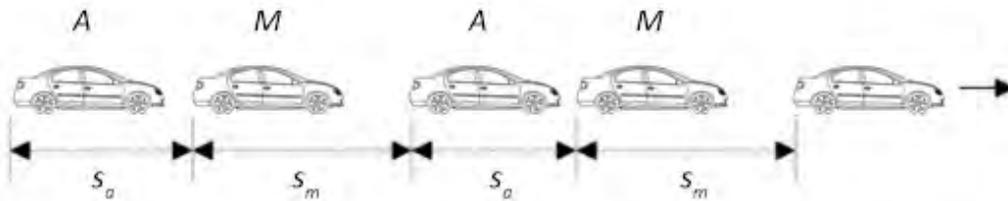
$$\bar{s} = ps_a + (1 - p)s_m \quad (21)$$

Dove:

$p$  = percentuale di veicoli a guida semi-automatica

$s_a$  = intervallo spaziale dei veicoli a guida semi-automatica =  $g_{t_a}v + L$

$s_m$  = intervallo medio spaziale dei veicoli a guida manuale =  $g_{t_m}v + L$



**Figura 4.17** Condizione di traffico con veicoli a guida manuale e semi-automatica  
(Ioannou & Bose, 2003)

La densità del traffico sarà pari a:

$$k_{mix} = \frac{1}{s} \quad (22)$$

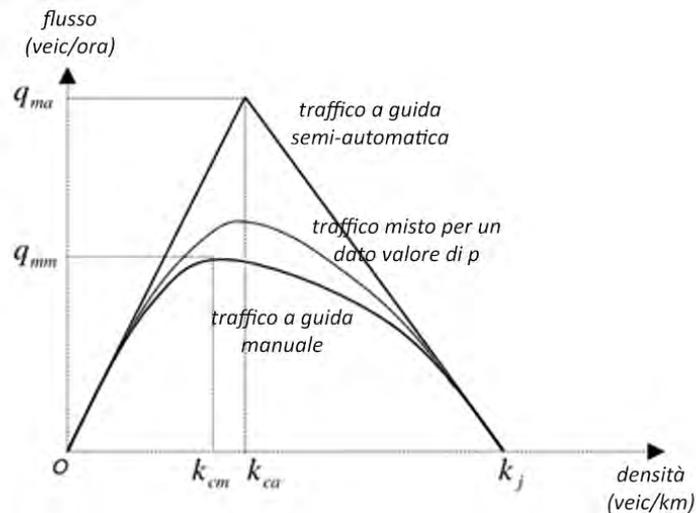
$$\frac{1}{k_{mix}} = \frac{p}{k_a} + \frac{(1-p)}{k_m} \quad (23)$$

Moltiplicando per  $1/v_{mix}$  si ottiene:

$$\frac{1}{k_{mix}v_{mix}} = \frac{p}{k_a v_{mix}} + \frac{(1-p)}{k_m v_{mix}} \quad (24)$$

$$\frac{1}{q_{mix}} = \frac{p}{q_a} + \frac{(1-p)}{q_m} \quad (25)$$

Essendo  $p > 0$ , la curva flusso - densità per traffico misto sarà contenuta tra la curva con tutte le vetture a guida semi-automatica e la curva con tutte le vetture a guida manuale (Figura 4.18).



**Figura 4.18** Diagramma  $q - k$  per un assegnato valore della percentuale di veicoli a guida semi-automatica (Ioannou & Bose, 2003)

All'aumentare della percentuale di veicoli a guida semi-automatica la curva di traffico misto tende alla curva di traffico con soli veicoli a guida semi-automatica.

### 4.3 Safety and Capacity Analysis of Automated and Manual Highway Systems

In questo paragrafo, che si basa sul lavoro di *Carbaugh, Godbole & Sengupta (1998)*, viene confrontata la sicurezza dei sistemi AHS rispetto alle attuali condizioni autostradali e osservato il rapporto tra sicurezza e capacità nei sistemi AHS.

La sicurezza di un sistema di trasporto dipende dalla frequenza e dalla gravità degli incidenti che si verificano in un certo periodo.

Viene esaminato il caso in cui si verifichi un incidente tra due veicoli che viaggiano sulla stessa corsia dovuto ad una frenata effettuata dal veicolo leader. Nel 1994 negli USA il numero di incidenti riconducibili a questa tipologia era pari al 18% di tutte le cause di incidente (NHTSA, 1996). Maggiore è la decelerazione e la sua durata, maggiore è la probabilità che si verifichi un incidente.

Non essendoci dati e statistiche riguardanti gli incidenti per sistemi AHS, viene stimata la sicurezza per il peggior caso corrispondente ad una frenata di emergenza.

La gravità dell'incidente dipende inoltre dalla velocità e dalla distanza tra i due veicoli.

Come politica di separazione tra i veicoli a guida manuale, viene considerata la distanza che separa i due veicoli come funzione della velocità. Per i veicoli a guida automatica invece, lo spazio di separazione dipende dalla programmazione del veicolo.

Vengono analizzate quattro tipologie di sistemi AHS:

- *Veicoli individuali autonomi*
- *Veicoli a bassa cooperazione*
- *Veicoli ad alta cooperazione*
- *Veicoli coordinati con plotoni*

Per la prima tipologia con veicoli autonomi, si assume che la frenata viene eseguita solo in base al rilevamento dei sensori. Per le altre tipologie invece è presente una comunicazione fra i veicoli che avverte del pericolo imminente.

Per poter confrontare gli incidenti sono utilizzate due grandezze:

- Frequenza dell'incidente  
Probabilità che la velocità di collisione sia maggiore di zero
- Gravità dell'incidente  
Questa misura viene calcolata come il quadrato della velocità di collisione. È proporzionale all'energia cinetica scambiata nell'impatto ed un buon indicatore del danno sostenuto dai passeggeri, anche se questo dipende dalle misure di sicurezza presenti nel veicolo (airbag, cinture)

#### 4.3.1 Modellazione

Il comportamento dei due veicoli in una situazione di frenata di emergenza viene caratterizzato utilizzando sei parametri:

- $\tau$  tempo di reazione in s  
Nel caso di guida manuale questo valore rappresenta la somma dei tempi di percezione, decisione/reazione e pressione del pedale del freno per il veicolo follower. Per guida automatica il tempo è dato dalla somma dei tempi di rilevazione, calcolo e attuazione
- $\Delta x$  distanza fra i veicoli in m  
Distanza che separa il paraurti posteriore del veicolo leader dal paraurti anteriore del veicolo follower
- $v_f$  velocità del veicolo follower in m/s
- $\Delta v$  velocità relativa in m/s  
Questa velocità è calcolata come differenza delle velocità del veicolo leader e del veicolo follower ( $v_l - v_f$ )
- $d_l^{max}$  decelerazione massima del veicolo leader in  $m/s^2$
- $d_f^{max}$  decelerazione massima del veicolo follower in  $m/s^2$

#### 4.3.1.1 Calcolo della velocità di collisione

Si assume che il valore massimo della decelerazione del veicolo leader sia raggiunta al tempo zero. Il veicolo follower raggiunge la sua massima decelerazione al tempo  $\tau$ .

#### 4.3.1.2 Calcolo della capacità dell'autostrada

Se la distanza fra i veicoli è nota, la capacità dell'autostrada è pari a:

- Veicoli individuali:

$$C = 3600 \frac{v}{(\Delta x + L)} \quad (1)$$

- Plotoni:

$$C = 3600 \frac{vN}{((LN) + i(N - 1) + I)} \quad (2)$$

Dove:

$C$  = capacità dell'autostrada per corsia [veicoli/ora per corsia]

$L$  = lunghezza dei veicoli in m

$N$  = numero di veicoli in un plotone

$i$  = distanza tra veicoli appartenenti allo stesso plotone in m

$I$  = distanza tra plotoni in m

$v$  = velocità in m/s

La capacità delle autostrade con veicoli a guida manuale è data da misurazioni e rilevazioni effettuate su strada.

#### 4.3.1.3 *Tipologie di AHS*

Si assume che per tutte e quattro le tipologie non sono ammessi veicoli a guida manuale nella rete AHS. La distanza fra i veicoli per le tipologie di AHS con veicoli individuali è identica per tutti i veicoli e dipende dalla velocità, per i plotoni invece si identificano la distanza che separa i veicoli dello stesso plotone e la distanza che separa i plotoni.

- *Veicoli individuali autonomi*

Questo tipo di AHS è costituito da veicoli automatizzati. Durante la fase di frenata di emergenza non viene inviato alcun messaggio di emergenza. Il veicolo follower identifica la frenata solo grazie ai sensori longitudinali

- *Veicoli singoli a bassa cooperazione*

Questa tipologia è costituita da veicoli che inviano un messaggio di emergenza attraverso un canale di comunicazione condiviso che però non garantisce la ricezione del messaggio entro un certo limite di tempo

- *Veicoli singoli ad alta cooperazione*

Questa tipologia prevede un sistema di comunicazione che garantisce la ricezione dei messaggi entro un certo periodo di tempo, riducendo il ritardo della frenata

- *Veicoli coordinati con plotoni*

Come nella tipologia precedente, i veicoli all'interno di un plotone comunicano tra loro inviando messaggi di emergenza. La comunicazione tra plotoni invece è più lenta e il ritardo di frenata del veicolo leader si assume pari a quello dei veicoli appartenenti alla tipologia di Low Cooperative Individual Vehicle

### 4.3.2 Scelta dei parametri

La distribuzione e i valori dei parametri possono variare a seconda della tipologia di AHS considerata.

#### 4.3.2.1 Veicoli a guida automatica

Per veicoli a guida automatica, il valore dei parametri è determinato dalle caratteristiche dei suoi componenti (sensori, computer, attuatori).

##### 4.3.2.1.1 Ritardo

Il ritardo della frenata di emergenza è dato dalla somma dei seguenti tempi:

- Tempo di attuazione

$$\tau_{act} = 100 \text{ ms}$$

Questo ritardo è il tempo che intercorre dal momento in cui il comando di frenatura viene impartito dal sistema a quando la vettura inizia realmente a frenare al massimo della capacità

- Tempo di comunicazione e calcolo con tempo limite di ricezione garantito

$$\tau_{com,high} = 20 \text{ ms}$$

Questo ritardo è il tempo necessario al veicolo follower per stabilire se il veicolo leader sta eseguendo una frenata di emergenza, assumendo che venga utilizzata una comunicazione fra i due veicoli che garantisce la ricezione entro un limite di tempo

- Tempo di comunicazione e calcolo con tempo limite di ricezione non garantito

$$\tau_{com,low} = 50 \text{ ms}$$

In questo caso si assume che il valore del tempo di ricezione abbia una distribuzione esponenziale con media pari a 20 ms. La probabilità che il tempo di ricezione sia minore di 50 ms è pari al 90%

- Tempo caratteristico dei sensori e calcolo

$$\tau_{sen,no} = 200 \text{ ms}$$

Questo ritardo è necessario per determinare una frenata di emergenza del veicolo leader utilizzando solo i sensori del veicolo senza alcuna comunicazione

Il valore del ritardo complessivo è dato dalla somma della componente di ritardo variabile a seconda della tipologia di AHS e il tempo di attuazione uguale per tutte le tipologie:

- Veicoli individuali autonomi  
 $\tau = \tau_{sen,no} + \tau_{act} = 300 \text{ ms}$
- Veicoli singoli a bassa cooperazione  
 $\tau = \tau_{com,low} + \tau_{act} = 150 \text{ ms}$
- Veicoli singoli ad alta cooperazione  
 $\tau = \tau_{com,high} + \tau_{act} = 120 \text{ ms}$
- Veicoli leader di plotoni  
 $\tau = \tau_{com,low} + \tau_{act} = 150 \text{ ms}$
- Veicoli follower di plotoni  
 $\tau = \tau_{com,high} + \tau_{act} = 120 \text{ ms}$

#### 4.3.2.1.2 Velocità relativa

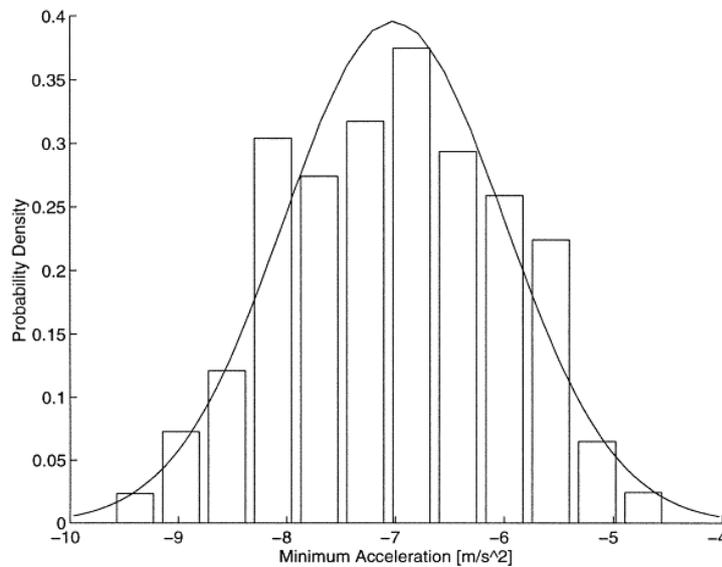
Essendo i veicoli appartenenti alla stessa corsia con velocità costante, la velocità relativa desiderata è zero. Viene comunque utilizzato un valore di velocità relativa pari all'1,5% della velocità per tutte le tipologie di AHS, considerando un possibile errore di stima della velocità del veicolo leader da parte del veicolo follower ed un errore dovuto ai limiti del sistema di controllo automatico.

Utilizzando il valore 1,5%, pari all'errore massimo a cui può essere soggetto il veicolo, viene considerata la situazione peggiore per cui si otterranno probabilità di incidente maggiori.

#### 4.3.2.1.3 Decelerazione massima

La capacità di frenata è modellata utilizzando i dati di decelerazione massima su pavimentazione asciutta per veicoli leggeri. Essendo la decelerazione dipendente dalle condizioni del pneumatico e della pavimentazione, viene applicato alla decelerazione massima un fattore di declassamento pari al 30%.

La capacità di frenata ha distribuzione gaussiana con media  $-7,01 \text{ m/s}^2$  e deviazione standard pari a  $1,01 \text{ m/s}^2$  (Figura 4.19).



*Figura 4.19* Densità di probabilità della capacità frenante dei veicoli automatizzati (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998)

#### 4.3.2.1.4 Distanza fra i veicoli

Il modello misura le prestazioni della rete AHS con capacità che varia tra 500 e 8000 veicoli/ora per corsia. Utilizzando la formula (1) è possibile ricavare la distanza fra i veicoli che sarà compresa tra 4 e 280 m.

Per veicoli che viaggiano in plotoni, la distanza tra veicoli appartenenti allo stesso plotone viene considerata compresa tra 1 e 10 m. La distanza fra plotoni è invece compresa tra 40 e 160 m a seconda della velocità, in modo da permettere ai plotoni non coinvolti nella frenata di emergenza di decelerare e fermarsi senza alcun pericolo.

#### 4.3.2.1.5 Velocità dei veicoli

Per poter confrontare un certo numero di scenari possibili si assumono tre condizioni di velocità pari a 20, 30 e 40 m/s.

### 4.3.2.2 Veicoli a guida manuale

Per i veicoli a guida manuale il valore dei parametri varia a seconda del comportamento del conducente e dalle caratteristiche del veicolo.

#### 4.3.2.2.1 Parametri del veicolo

La massima decelerazione della vettura viene considerata uguale alla decelerazione dei veicoli a guida automatica.

L'unico ritardo in comune sui veicoli a guida manuale è il tempo di attuazione pari a 100 ms. Tutti i ritardi associati ai tempi di aggiornamento dei sensori, comunicazione e calcolo sono sostituiti dal comportamento del conducente.

#### 4.3.2.2.2 Tempo di reazione

Una stima della distribuzione dei tempi di reazione del conducente è ottenuta approssimando i dati forniti da (Taoka, 1989) con una distribuzione log normale con media 1,21 s e deviazione standard 0,63 s (Figura 4.20).

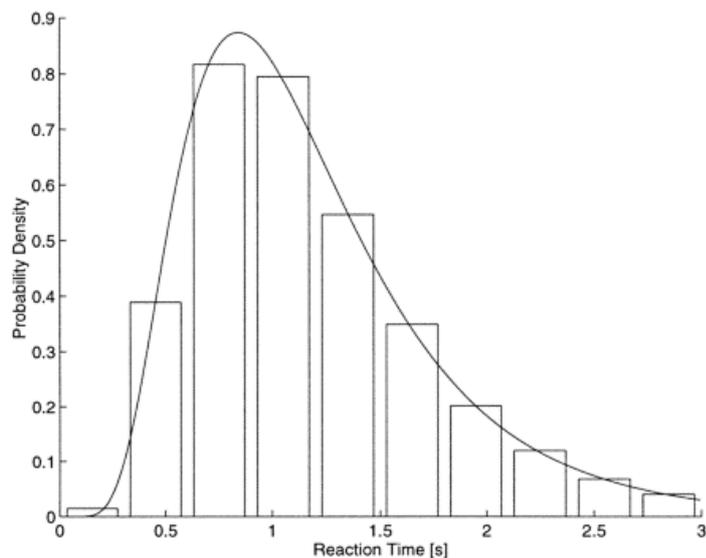
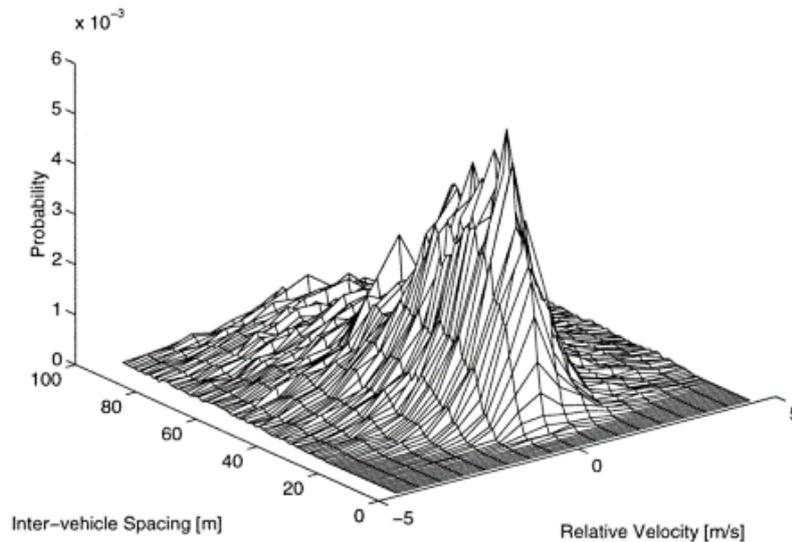


Figura 4.20 Densità di probabilità del tempo di reazione (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998)

#### 4.3.2.2.3 Distanza fra i veicoli

Per determinare la distanza fra i veicoli viene utilizzato uno studio effettuato dall'*University of Michigan Transportation Research Institute*. Questi valori sono stati misurati utilizzando sensori ad infrarossi per calcolare la distanza e la velocità relativa tra i veicoli su un campione di 36 conducenti.



*Figura 4.21* Distanza fra i veicoli in funzione della velocità relativa  
(Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998)

#### 4.3.2.2.4 Velocità del veicolo follower

Si assume che la velocità del veicolo follower sia uguale alla media della velocità calcolata nello studio usato per determinare la distanza fra i veicoli, pari a 29,3 m/s.

### 4.3.3 Risultati

#### 4.3.3.1 Confronto fra guida manuale e automatica

Viene confrontata la sicurezza fra veicoli a guida manuale e veicoli indipendenti a guida automatica con velocità pari a 30 m/s. Lo spazio fra i veicoli a guida automatica è tale da avere una capacità pari a 2500 veicoli/ora per corsia. Per la guida manuale invece, la capacità è minore di 1500 veicoli/ora per corsia. Vengono inoltre valutate due situazioni di guida manuale considerando anche il caso in cui il guidatore è attento ed ha un tempo di reazione pari a 0,5 s.

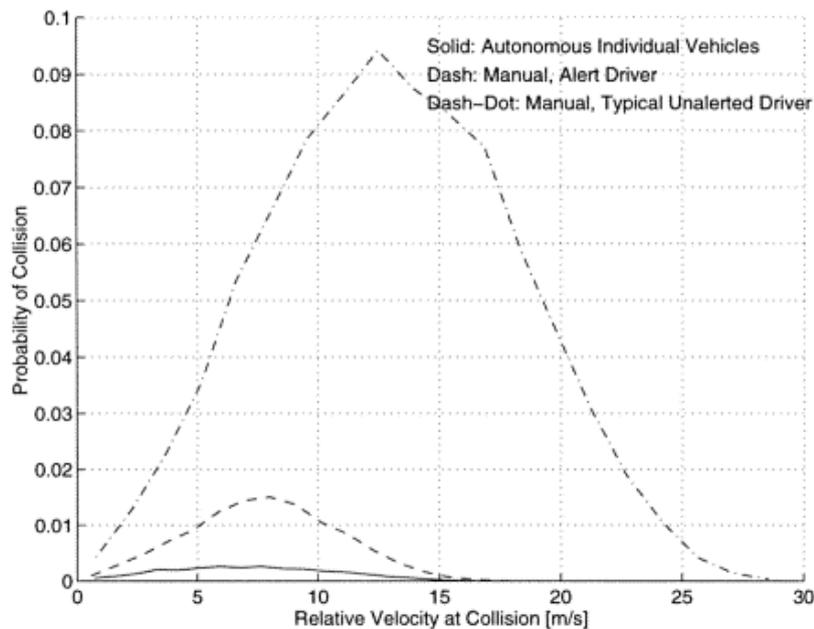


Figura 4.22 Confronto sicurezza fra guida manuale e automatica (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998)

Tipologia AHS	Capacità [veic/ora/corsia]	Probabilità di collisione	Gravità collisione ( $\Delta v^2$ ) [ $m^2/s^2$ ]
Veicoli individuali a guida automatica	2500	0,028	64,1
Guida manuale attenta	<1500	0,11	69,5
Guida manuale	<1500	0,87	195

È possibile notare come per i veicoli a guida automatica diminuisca sia la probabilità d'incidente che la gravità.

**4.3.3.2 Confronto fra tipologie AHS**

Il confronto fra diverse tipologie di AHS viene eseguito considerando la velocità di 30 m/s e capacità sempre pari a 2500 veicoli/ora per corsia (Figura 4.23).

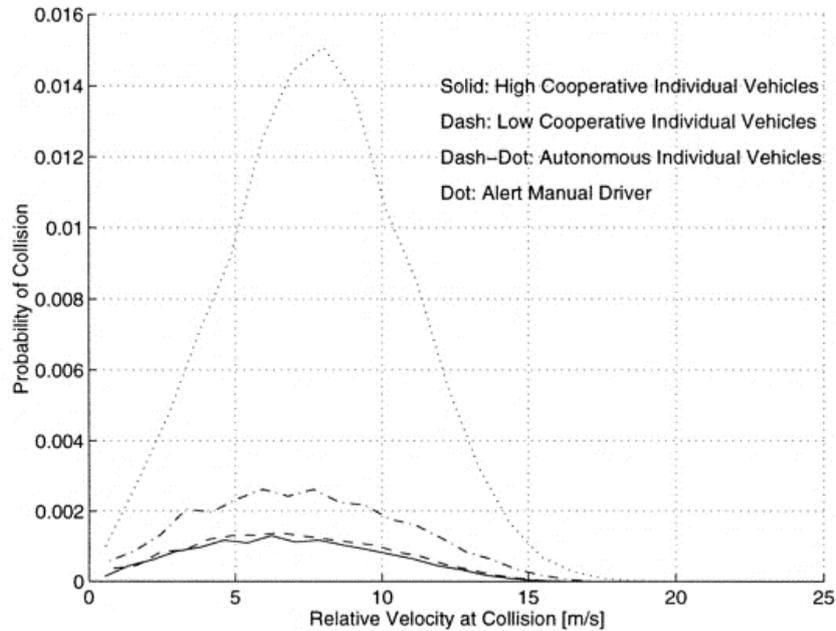


Figura 4.23 Confronto sicurezza fra diversi livelli di cooperazione (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998)

Tipologia AHS	Capacità [veic/ora/corsia]	Probabilità di collisione	Gravità collisione ( $\Delta v^2$ ) [ $m^2/s^2$ ]
Veicoli individuali a guida automatica	2500	0,028	64,1
Bassa cooperazione	2500	0,015	58,2
Alta cooperazione	2500	0,013	56,9
Guida manuale attenta	<1500	0,11	69,5

Si può notare come i veicoli a bassa cooperazione sono molto più sicuri dei veicoli individuali a guida automatica a causa del minore ritardo necessario per iniziare la frenata (da 300 ms a 150 ms). La differenza di sicurezza tra i due sistemi a cooperazione è invece piccola in quanto la diminuzione di ritardo che si ha nell'utilizzo di un sistema AHS ad alta cooperazione è solo di 30 ms.

#### 4.3.3.3 Confronto fra veicoli individuali e plotoni a diverse velocità

Vengono considerate ora tre diverse velocità di funzionamento per sistemi AHS a bassa cooperazione e con coordinazione a plotoni. Per mantenere la capacità costante a velocità elevate i veicoli viaggiano con distanze di sicurezza maggiori.

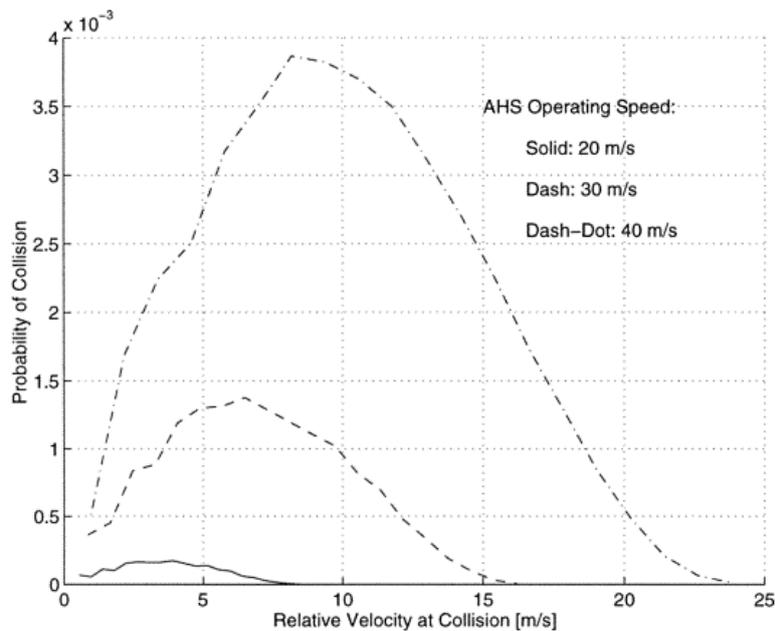


Figura 4.24 Veicoli a bassa cooperazione con differenti velocità (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998)

Velocità AHS [m/s]	Capacità [veic/ora/corsia]	Probabilità di collisione	Gravità collisione ( $\Delta v^2$ ) [ $m^2/s^2$ ]
20	2500	0,002	16,8
30	2500	0,015	58,2
40	2500	0,041	121

Per mantenere la capacità costante per i plotoni ogni plotone viaggia con un numero minore di vetture. Viene considerata una distanza fra veicoli appartenenti allo stesso plotone pari a 2 m (Figura 4.25). Essendo la distanza tra veicoli all'interno di un plotone molto piccola, la severità dell'incidente rimane bassa per tutte e tre le velocità considerate.

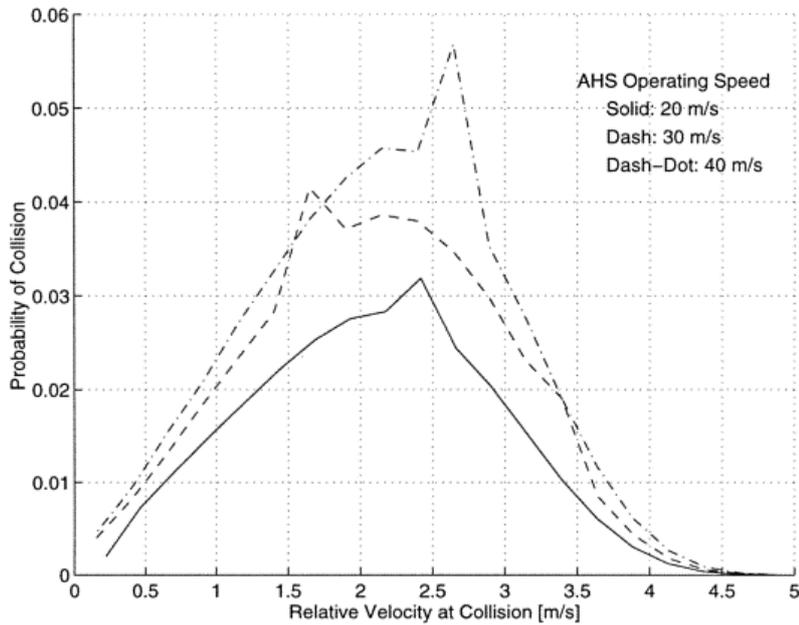


Figura 4.25 Veicoli coordinati a plotoni con differenti velocità (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998)

Velocità AHS [m/s]	Capacità [veic/ora/corsia]	Probabilità di collisione	Gravità collisione ( $\Delta v^2$ ) [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
20	2500	0,27	5,03
30	2500	0,37	5,13
40	2500	0,44	5,29

Una coordinazione a plotoni comporta una maggior probabilità di collisione per qualsiasi velocità considerata, ma una gravità dell'incidente molto minore.

#### 4.3.3.4 Confronto fra distanze tra veicoli all'interno di un plotone

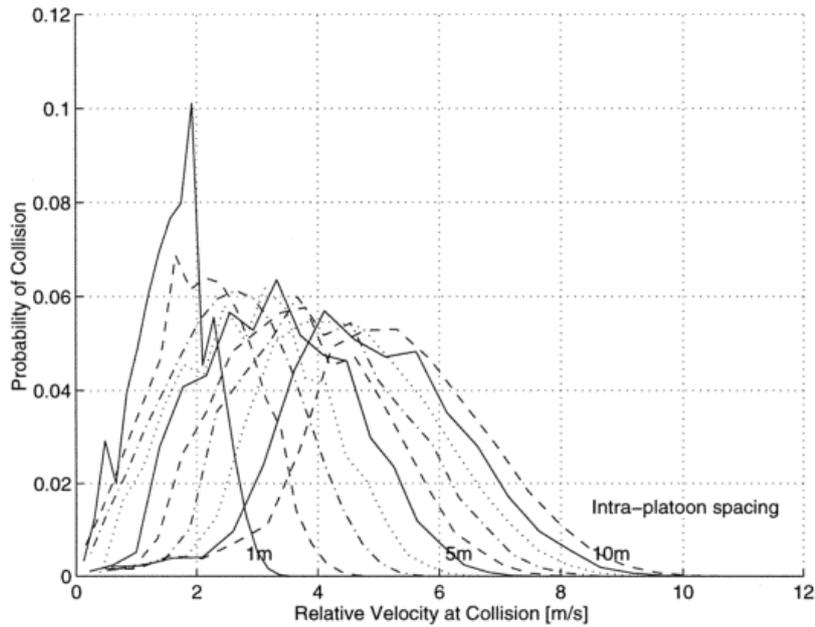


Figura 4.26 Sicurezza plotoni a diverse distanze tra veicoli  
(Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998)

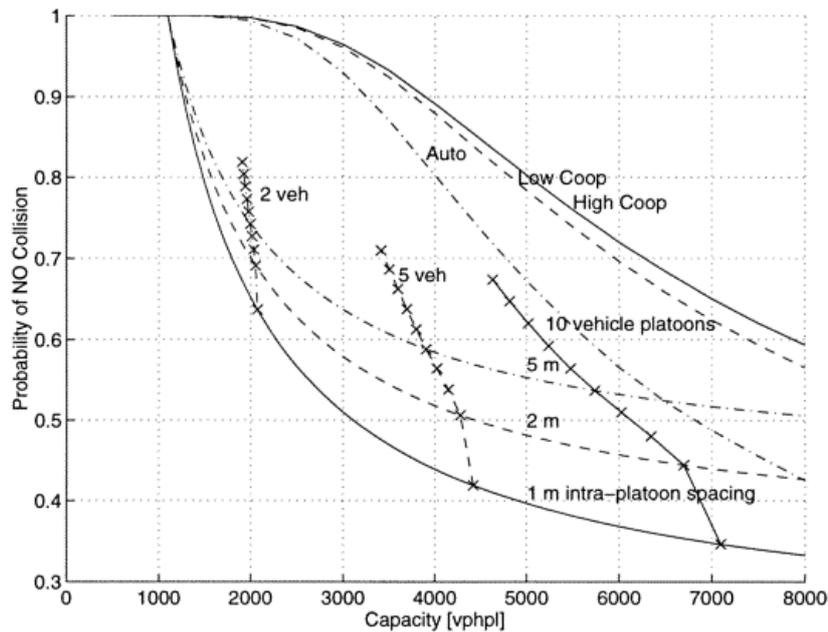
Distanza tra veicoli [m]	Probabilità di collisione	Gravità collisione ( $\Delta v^2$ ) [ $m^2/s^2$ ]
1	0,73	2,94
2	0,62	5,13
3	0,58	7,38
4	0,54	9,87
5	0,51	12,6
6	0,48	15,6
7	0,45	18,9
8	0,42	22,4
9	0,39	26,2
10	0,36	30,2

All'aumentare della distanza tra i veicoli la probabilità di collisione diminuisce mentre la gravità dell'incidente aumenta.

**4.3.3.5 Rapporto tra sicurezza e capacità**

Per il confronto della sicurezza viene sempre considerata una velocità dei veicoli pari a 30 m/s.

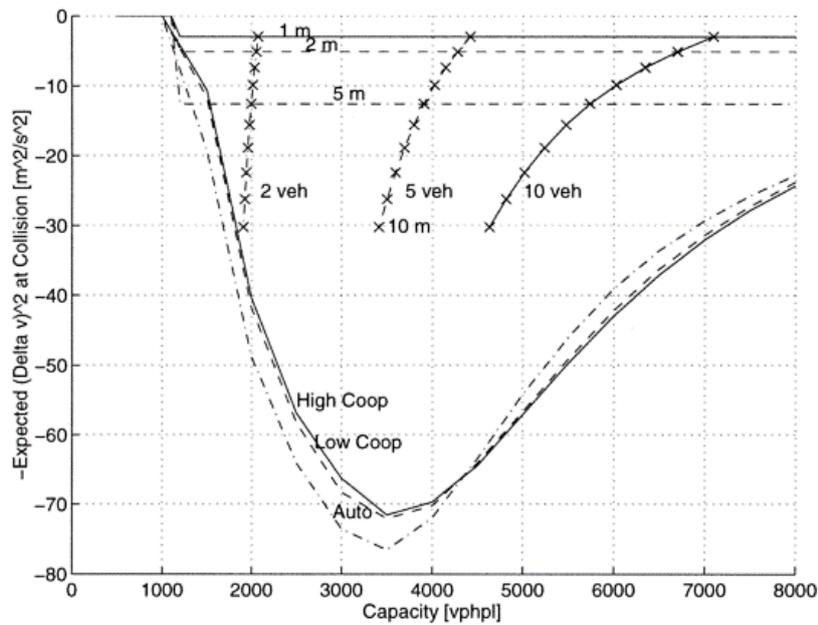
I grafici sono realizzati in modo che all'aumentare della sicurezza la linea si trovi ad un livello maggiore dell'asse y (probabilità di non collisione).



*Figura 4.27 Relazione fra probabilità di non collisione e capacità per tutte le tipologie di AHS (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998)*

È possibile notare come il numero di collisioni è nullo con una tipologia AHS formata da plotoni con capacità pari a 1200 veic/ora per corsia. A questo livello di capacità infatti corrispondono plotoni composti da un unico veicolo che viaggiano a distanze molto elevate fra loro.

Per qualsiasi livello di cooperazione, i veicoli individuali hanno una minore probabilità di collisione di veicoli che viaggiano in plotoni.



*Figura 4.28* Relazione fra gravità collisione e capacità per tutte le tipologie di AHS (Carbaugh, Godbole, & Sengupta, 1998)

È possibile notare come la gravità della collisione per plotoni a velocità e distanza tra veicoli costanti non varia in funzione della capacità. Questo perché viene considerata solo la prima collisione longitudinale tra veicoli. La gravità dipende quindi solo dalle velocità dei due veicoli coinvolti e non aumenta all'aumentare dei veicoli all'interno del plotone.

La gravità della collisione risulta molto maggiore per veicoli singoli con diversi livelli di cooperazione in confronto a veicoli che viaggiano all'interno di plotoni, e raggiunge i valori massimi per capacità intorno a 3500 veicoli/ora per corsia.





# Conclusioni

Il presente lavoro si è posto come obiettivo la descrizione dei sistemi AHS nelle loro principali componenti, descrivendone soprattutto gli sviluppi negli ultimi anni.

L'incessante avanzare delle tecnologie, specialmente a livello di hardware, ha dato la possibilità ai ricercatori di utilizzare strumenti tecnologicamente molto avanzati con dei costi non proibitivi.

Tramite l'utilizzo di modelli è stato dimostrato come l'implementazione di sistemi AHS nelle autostrade permetterebbe una diminuzione notevole del numero degli incidenti ed in particolare della loro gravità.

La continua ricerca ha permesso lo studio di diverse situazioni che possono verificarsi nella pratica di utilizzo creando dei modelli capaci di gestire la maggior parte degli scenari possibili.

Indubbiamente i sistemi AHS consentono una minore occupazione del territorio rispetto alle infrastrutture autostradali tradizionali, garantendone un miglior sfruttamento ma sono ancora da realizzare studi che dimostrino la capacità di questi sistemi di ridurre l'inquinamento prodotto dalle vetture.

Da un lato infatti è certo che la guida automatica produce un minore consumo di carburante sia per un'ottimizzazione migliore del funzionamento del motore sia per una riduzione della congestione nelle strade.

Non è ancora chiaro se l'impiego di sistemi AHS possa portare ad un aumento degli spostamenti effettuati dagli utenti e ad una loro maggior lunghezza comportando di conseguenza un aumento dell'inquinamento.

Sicuramente la guida automatica costituisce il futuro per quanto riguarda il settore dei trasporti.

Mentre la ricerca e lo sviluppo di questi sistemi ha continuato a progredire in maniera costante, in ambito legislativo nella maggior parte degli stati non è stato fatto alcun progresso significativo.

L'unico paese che già nel 2011 ha adottato leggi per l'adozione dei veicoli automatizzati sulle strade sono gli Stati Uniti. In Europa solo l'Inghilterra ha previsto di consentire la guida automatica sulle strade pubbliche da gennaio 2015 (Dent, 2014).

È necessario che anche altre nazioni propongano leggi specifiche che regolino il loro utilizzo e vengano individuati degli standard di progettazione per focalizzare la ricerca e permettere un rapido sviluppo ed applicazione di questa tecnologia.





# Riferimenti bibliografici

- Aiscat. (2014, Settembre 3). *Aiscat in cifre 2013*. Tratto da Aiscat:  
<http://www.aiscat.it/pubblicazioni/downloads/aiscat-in-cifre-2013.pdf>
- Argo. (2014, Agosto 29). *Il Progetto*. Tratto da Argo:  
<http://www.argo.ce.unipr.it/argo/english/index.html>
- Barberá, H. M., & Pérez, D. H. (2014). Multilayer distributed intelligent control of an autonomous car. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.
- Barberá, H. M., Irquierdo, M. Z., Moreo, R. T., Ubeda, B., & Skarmeta, A. G. (2003). The MIMICS project: an application for intelligent transport systems. *Proc. of IEEE Intell. Veh. Symp.*, 633–638.
- Baskar, L. D., Schutter, B. D., & Hellendoorn, H. (2012). Traffic Management for Automated Highway. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- Bryant, B. (1997). Actual Hands-off Steering: And Other Wonders of the Modern World. *Public Roads*.
- Carbaugh, J., Godbole, D. N., & Sengupta, R. (1998). Safety and capacity analysis of automated and manual highway systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.
- Cheon, S. (2000). An Overview of Automated Highway Systems (AHS) and the Social and Institutional Challenges They Face.
- Chien, C., Zhang, Y., & Lai, M. (1995). Regulation Layer Controller Design for Automated Highway Systems. *Mathl. Comput. Modelling Vol.*

- Currier, P. H. (2012). *Experience from the DARPA Urban Challenge*. Springer London.
- Dent, S. (2014, Settembre 29). *UK to let driverless cars loose on roads by January*. Tratto da Engadget:  
<http://www.engadget.com/2014/07/30/uk-to-let-driverless-cars-loose-on-roads-by-january>
- Elston, D. S. (2012). *Recent International Activity in Cooperative Vehicle-Highway Automation Systems*. Federal Highway Administration Exploratory Advanced Research Program.
- Eskafi, F. H. (1996). *Modeling And Simulation Of The Automated Highway System*. California PATH Research Report.
- Fraunhofer-Gesellschaft. (2014, Settembre 9). *Projects*. Tratto da Fraunhofer:  
<http://www.esk.fraunhofer.de/en/projects/VIP.html>
- Google. (2014, Settembre 10). Tratto da Google Immagini: <http://db2.stb.s-msn.com/i/71/35D9ABF1DCF2FD944AD8D52F734E.jpg>
- Google. (2014, Settembre 9). *Google Self-Driving Car on City Streets*. Tratto da Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=dk3oc1Hr62g>
- Horowitz, R., & Varaiya, P. (2000). *Control Design of an Automated Highway System*. IEEE Intelligent Transportation Systems.
- Ioannou, P. (1997). *Automated Highway Systems*. New York Plenum Press.
- Ioannou, P., & Bose, A. (2003). *Mixed Manual/Semi-Automated Traffic: a Macroscopic Analysis*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies.
- Juliussen, E., & Carlson, J. (2014). *Autonomous Cars - Not if, but when*. IHS Automotive.

- Kanaris, A., Kosmatopoulos, E., & Ioannou, P. (2001). Strategies and Spacing Requirements for Lane Changing and Merging in Automated Highway Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*.
- Kastrenakes, J. (2014, Settembre 9). *Google is testing its autonomous cars in a 'Matrix-style' version of California*. Tratto da The Verge:  
<http://www.theverge.com/2014/8/21/6054481/google-testing-autonomous-cars-on-matrix-style-road-simulation>
- Katzourakis, D., Olsson, C., Lazic, N., & Lidberg, M. (2013). *Driver Steering Override Strategies for Steering based Active Safety*. Nagoya: Society of Automotive Engineers of Japan. Tratto da:  
<http://auto2014.wordpress.com/2014/01/25/mercedes-benz-lane-keeping-assist/>
- Lowensohn, J. (2014, Settembre 9). *Behind the wheel: a look inside Google's self-driving cars*. Tratto da The Verge:  
<http://www.theverge.com/google/2014/5/14/5714602/photos-inside-googles-self-driving-cars>
- Mercedes. (2014, Settembre 06). *Autonomous Driving*. Tratto da Mercedes Benz:  
<http://next.mercedes-benz.com/en/autonomous-driving/>
- Postema, & Luke, D. (1998). Incremental Deployment as a Solution for The Future of Transportation. *Washington Internships for Students of Engineering*.
- Raza, H. (1996). Vehicle Following Control Design for Automated Highway Systems. *IEEE Intelligent Transportation Systems*.
- Rosen, R. J. (2014, Settembre 10). *Google's Self-Driving Cars: 300,000 Miles Logged, Not a Single Accident Under Computer Control*. Tratto da The Atlantic:  
<http://www.theatlantic.com/technology/archive/2012/08/googles-self-driving-cars-300-000-miles-logged-not-a-single-accident-under-computer-control/260926/>
- SARTRE-Consortium. (2014, Settembre 7). *Home*. Tratto da SARTRE:  
<http://www.sartre-project.eu/en/Sidor/default.aspx>

- Shladover, S. (2012). Literature Review on Recent International Activity in Cooperative Vehicle–Highway Automation Systems. *Federal Highway Administration*.
- Shladover, S. (2012). Recent International Activity in Cooperative Vehicle–Highway Automation Systems. *Federal Highway Administration*.
- Toyota. (2014, Settembre 10). *Atara SL*. Tratto da Toyota:  
<http://www.toyota.com.au/camry/specifications/atara-sl>
- Toyota. (2014, Settembre 5). *Museum*. Tratto da Toyota:  
<http://www.toyota.co.jp/Museum/collections/list/chronologies.html>
- VisLab. (2014, Agosto 26). *Photo Gallery*. Tratto da VisLab: <http://vislab.it/>
- VisLab. (2014, Settembre 11). *PROUD2013 - Inside VisLab's driverless car*. Tratto da YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=PiUZ5NCXu-c&list=UUrZwtwV3mA86u5ipxhu-E5g>
- VisLab. (2014, Settembre 11). *VisLab's 3DV sensing technology. 1 of 2 (HD)*. Tratto da YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=FIVD9G1pxIc>
- Wikipedia. (2014, Settembre 10). *Intelligent Speed Adaption*. Tratto da Wikipedia:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent\\_speed\\_adaptation](http://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_speed_adaptation)

## Citazioni indirette

Leutzbach, W. (1972). *Introduction to the Theory of Traffic Flow*. Berlin: Springer-Verlag.

McNaughton, M. B. (2012). *Experience from the DARPA Urban Challenge*. Springer London.

Montemerlo, M. T. (2006). *Winning the DARPA grand challenge with an AI ROBOT*. *Proc. of the AAAI*.

NHTSA. (1996). *Preliminary Assessment of Crash Avoidance Systems Benefits*. *NHTSA Benefits Working Groups*.

Taoka, G. (1989). *Brake reaction times of unalerted drivers*. *ITE Journal*.