



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &  
Μηχανικών Γπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρονικής και Γπολογιστών

## Διπλωματική Εργασία

---

Χάραξη βέλτιστου μονοπατιού και πλοϊγηση  
αυτόνομου οχήματος σε δυναμικό περιβάλλον με  
και χωρίς δυναμικά εμπόδια

---

Εκπόνηση:  
Μπεκιάρης Θεοφάνης  
ΑΕΜ: 8200

Επίβλεψη:  
Αν. Καθ. Συμεωνίδης  
Ανδρέας  
Δρ. Τσαρδούλιας  
Εμμανουήλ



*It's not about ideas, it's about making ideas happen.*  
— Scott, Belsky

*Self-driving cars are the natural  
extension of active safety and  
obviously something we should do.*  
— Elon Musk



---

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Ανδρέα Συμεωνίδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση και την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του τμήματος, Δρ. Εμμανουήλ Τσαρδούλια για την καθοδήγηση του, την πολύτιμη βοήθεια και την εξαιρετική συνεργασία των τελευταίων μηνών.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για τη στήριξη τους, την αγάπη τους και την ενθάρρυνση τους για το καλύτερο όλα αυτά τα χρόνια, δίνοντας μου κουράγιο να προχωρώ και να υπερπηδώ κάθε εμπόδιο για να φτάσω στο στόχο μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συγγενείς, φίλους και γνωστούς οι οποίοι πίστεψαν σε μένα και ο καθένας με τον δικό του μοναδικό τρόπο με παρακίνησε και μου έδωσε δύναμη να συνεχίσω την προσπάθεια μου, τόσο σε επαγγελματικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο.



---

## Περίληψη

Η τεχνολογία της αυτόνομης οδήγησης μελετάται εκτενώς τα τελευταία χρόνια και ειδικότερα την τελευταία δεκαετία. Τόσο η επιστημονική κοινότητα όσο και οι βιομηχανία καταβάλουν αξιοσημείωτες προσπάθειες για την ανάπτυξη της τεχνολογίας και τελικά προς την επίτευξη της αυτόνομης οδήγησης. Τα οχήματα και οι μεταφορές έχουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη του εμπορίου και κατ' επέκταση στην ανάπτυξη της κοινωνίας. Η αυτοματοποίηση της οδήγησης, στα επόμενα χρόνια, θα αυξήσει δραματικά την ασφάλεια των πολιτών, θα μειώσει το χρόνο των μεταφορών αλλά και την κυκλοφοριακή συμφόρηση των δρόμων.

Η τεχνολογία της αυτόνομης οδήγησης είναι αρκετά περίπλοκη και η ανάπτυξη της αποτελεί πρόκληση για τον επιστημονικό τομέα. Η λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων απαιτεί πολύ καλή αντίληψη του περιβάλλοντος, άμεση απόκριση σε μεταβολές αυτού και συνεπώς αξιόπιστη εκτίμηση της θέσης των οχημάτων μέσα στον χώρο. Το όχημα πρέπει να διαθέτει την κατάλληλη τεχνολογία που να του επιτρέπει τη πλοήγηση του μέσα στο οδικό δίκτυο και την εκτέλεση πολύπλοκων σεναρίων οδήγησης. Για το σκοπό αυτό τα οχήματα είναι εξοπλισμένα με κατάλληλους αισθητήρες τελευταίας τεχνολογίας και με το κατάλληλο σύστημα ελέγχου και λήψης αποφάσεων. Η υλοποίηση τέτοιων συστημάτων είναι μια αρκετά περίπλοκη διαδικασία, αποτελούνται από επιμέρους συστήματα τα οποία είναι εξειδικευμένα στην επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων της αυτόνομης οδήγησης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη ενός συστήματος αυτόνομης οδήγησης οχημάτων. Σκοπός του συστήματος είναι να κατευθύνει το όχημα με βέλτιστο τρόπο, με ασφάλεια, και με σεβασμό ως προς τους κανόνες οδικής κυκλοφορίας, από ένα αρχικό σημείο σε ένα τελικό σημείο μέσα σε μία πόλη στην οποία υπάρχουν οχήματα και πεζοί. Το σύστημα αναπτύχθηκε σε μορφή μεμονωμένου συστήματος (ego-only system) και επιλέχθηκε η μορφή του αρθρωτού συστήματος (modular system). Η κατασκευή του λογισμικού έγινε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python και του μεσολογισμικού ROS. Για την ανάπτυξη του συστήματος χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής Carla, με τον οποίο έγιναν οι δοκιμές και τα πειράματα και η προσομοίωση της αυτόνομης οδήγησης. Το σύστημα αναπτύχθηκε σε αρθρωτή μορφή και κατ' επέκταση αποτελείται από τα επιμέρους συστήματα α) αντίληψης, β) επιλογής συμπεριφοράς, δ) πρόβλεψης συμπεριφορών, ε) κατασκευή βασικού μονοπατιού, στ) κατασκευής τοπικών μονοπατιών και, ζ) ελέγχου οχήματος. Το καθένα από τα συστήματα αυτά είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση συγκεκριμένων διεργασιών, οι οποίες είναι απαραίτητες για την διαδικασία της αυτόνομης οδήγησης.

Στο σύστημα επιλογής συμπεριφοράς χρησιμοποιείται η ανάλυση απόφασης πολλαπλών κριτηρίων, για την αξιολόγηση και την επιλογή της κατάλληλης συμπεριφοράς για το όχημα, με βάσει το περιβάλλον στο οποίο κινείται. Το σύστημα πρόβλεψης, με χρήση της μεθόδου πρωτότυπων τροχιών και ενός κρυφού μαρκοβιανού μοντέλου πρόβλεψης, χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των οχημάτων και των πεζών που βρίσκονται γύρω από το αυτόνομο όχημα. Το σύστημα αντίληψης, χρησιμοποιώντας την προγραμματιστική διεπαφή του προσομοιωτή Carla, χρησιμοποιήθηκε για την απόκτηση των απαραίτητων δεδομένων που

---

σχετίζονται με το περιβάλλον του αυτόνομου οχήματος. Το όχημα κατά την πλοήγηση του πρέπει να έχει την δυνατότητα ανα πάσα στιγμή να ακολουθήσει εναλλακτικές διαδρομές αυτό το σκοπό καλύπτει το σύστημα κατασκευής εναλλακτικών διαδρομών. Χρησιμοποιώντας επομένως την μεθοδολογία για την δημιουργία Frenet μονοπατιών, κατασκευάστηκε το σύστημα δημιουργίας τοπικών εναλλακτικών μονοπατιών. Τέλος, το σύστημα ελέγχου αναπτύχθηκε για να ελέγχει το σύστημα σε χαμηλό επίπεδο. Με χρήση κατάλληλου ελεγκτή που κατασκευάστηκε για τον έλεγχο ταχύτητας και, με χρήση της μεθόδου Pure Pursuit για τον έλεγχο της κατεύθυνσης, επιτεύχθηκε ο συνολικός έλεγχος του οχήματος σε χαμηλό επίπεδο ελέγχου.

Το σύστημα με χρήση του προσομοιωτή Carla ελέγχθηκε για διάφορα περιβάλλοντα κίνησης και διάφορα σενάρια κίνησης. Έγινε αξιολόγηση της κίνησης με χρήση κριτηρίων που ορίστηκαν, τα οποία περιγράφουν τόσο την ασφάλεια της κίνησης του αυτόνομου οχήματος όσο την αποτελεσματικότητα του αυτόνομου οχήματος ώς προς την ικανότητα του να ολοκληρώσει τις διαδρομές. Επιπλέον, με σκοπό να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος, έγινε έλεγχος της λειτουργίας του συστήματος για την περίπτωση που οι αισθητήρες του οχήματος περιέχουν θόρυβο στις μετρήσεις τους. Για για επιτευχθεί αυτό, προστέθηκε λευκός θόρυβος στα δεδομένα θέσης και ταχύτητας των οχημάτων και των πεζών.

Μπεκιάρης Θεοφάνης  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
Αριστοτελείο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Ελλάδα  
Σεπτέμβριος 2020



---

# Title

## Optimal route planning and on-road autonomous vehicle navigation with and without dynamic obstacles.

### Abstract

The technology of autonomous driving has been extensively studied in recent years and especially in the last decade. Both the scientific community and industry are making significant efforts to develop the necessary sophisticated technology and ultimately to achieve autonomous driving. Vehicles and transportation play a key role in the development of trade and consequently in the development of societies as are known. Autonomous driving will dramatically increase citizens' safety in the coming years, reduce transportation time and traffic congestion.

The technology of autonomous driving is quite complex and its development is a challenge for the scientific community. The operation of autonomous vehicles requires a very good understanding of their environment, immediate response to changes in it and therefore, a reliable assessment of their position in space. The vehicle must have the appropriate technology to enable it to navigate the road network and execute complex driving scenarios. For this purpose, the vehicles are equipped with appropriate state-of-the-art sensors and also with the appropriate control and decision-making system. Implementing such systems is a quite complicated process, since they consist of individual systems that are specialized in solving specific problems of autonomous driving.

This dissertation focuses on the development of an autonomous driving system. The purpose of the system is to navigate the vehicle optimally and safely from a starting point to a destination point, within a city where there are vehicles and pedestrians, with respect for traffic rules. The system was developed in the form of an ego-only system and also the form of the modular system was chosen. The software was built using the Python programming language and the ROS middleware. The Carla simulator was used for the system development, with which the tests, the experiments and the simulation of autonomous driving were performed. The system was developed in a modular form and consequently consists of the following individual systems a) perception, b) behavior selection, d) behavior prediction, e) construction of a basic path (or route), f) construction of local paths, h) vehicle control. Each of these systems is responsible for performing specific processes that are necessary for successful autonomous driving.

The behavior selection system uses multi-criteria decision analysis to evaluate and select the appropriate behavior for the vehicle based on the environment in which it moves. The prediction system, using the "prototype trajectories" method and a Hidden Markov Model (HMM), is used to predict the behavior of vehicles and pedestrians around the autonomous vehicle. The perception system using the programming interface of the Carla simulator was used to obtain the necessary data related to the environment of the autonomous vehicle. The vehicle during its navigation must be able to follow alternative paths at any time, for this purpose the system of local path planning was constructed. Therefore, using the Frenet path construction methodology, the local alternative paths generation system was constructed. Finally, in order to the vehicle be controlled at a

---

low-level, the control system was built. Using a suitable controller built for speed control and using the Pure Pursuit method for direction control, the overall navigation of the vehicle was achieved.

Ultimately, the system was tested using the Carla simulator for various traffic environments and various motion scenarios. The vehicle's performance was assessed using criteria that describe both the autonomy of the autonomous vehicle and the effectiveness of the autonomous vehicle in terms of its ability to complete the route path. The system was finally tested by adding noise to the perception system, where white noise was added to the position and speed data of vehicles and pedestrians received by the perception system.

Mpekiaris Theofanis  
Electrical & Computer Engineering Department,  
Aristotle University of Thessaloniki, Greece  
September 2020



# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες . . . . .	iii
Περίληψη . . . . .	v
Abstract . . . . .	viii
<b>Κατάλογος Εξισώσεων</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Περιγραφή του Προβλήματος . . . . .	6
1.2 Σκοπός - Συνεισφορά της Διπλωματικής Εργασίας . . . . .	7
1.3 Διάρθρωση της Αναφοράς . . . . .	7
<b>2 Επισκόπηση της Ερευνητικής Περιοχής</b>	<b>9</b>
2.1 State-of-the-art συστήματα αυτόνομης οδήγησης . . . . .	9
2.1.1 Μεμονωμένα συστήματα έναντι συνδεδεμένων συστημάτων .	10
2.1.2 Αρθρωτή μορφή συστήματος . . . . .	11
2.1.3 Διατερματική μορφή συστήματος . . . . .	12
2.2 Αισθητήρια όργανα ενός αυτόνομου οχήματος . . . . .	14
2.2.1 Σύστημα κάμερας . . . . .	14
2.2.2 Αισθητήρες Radar . . . . .	15
2.2.3 Αισθητήρες Lidar . . . . .	16
2.2.4 Αισθητήρες υπερήχων . . . . .	16
2.2.5 Θέση αισθητήρων πάνω στο αυτόνομο όχημα . . . . .	17
2.2.6 Χαρακτηριστικά αισθητήριων οργάνων . . . . .	18
2.2.7 Παραδείγματα αισθητήρων σε πραγματικά μοντέλα . . . . .	19
2.3 Αλγόριθμοι και εργαλεία . . . . .	22
2.3.1 Κινηματικό μοντέλο κίνησης ποδηλάτου . . . . .	22
2.3.2 Κρυφά μαρκοβιανά μοντέλα . . . . .	24
2.3.3 Προσομοιωτής Carla . . . . .	26
2.3.4 Robot Operating System (ROS) . . . . .	30
<b>3 Υλοποιήσεις</b>	<b>33</b>
3.1 Υποθέσεις και παραδοχές για το περιβάλλον δοκιμών . . . . .	33
3.2 Περιγραφή της αρχιτεκτονικής του συστήματος αυτόνομης οδήγησης	34
3.3 Παρουσίαση υποσυστημάτων . . . . .	35
3.3.1 Υποσύστημα αντίληψης (Perception subsystem) . . . . .	35
3.3.2 Υποσύστημα πρόβλεψης (Prediction subsystem) . . . . .	35
3.3.3 Υποσύστημα επιλογής συμπεριφοράς (Maneuver generator subsystem)	
. . . . .	35

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

3.3.4 Υποσύστημα σχεδίασης τοπικών διαδρομών (Local path planning subsystem) . . . . .	36
3.3.5 Υποσύστημα ελέγχου (Control subsystem) . . . . .	36
3.3.6 Υποσύστημα κατασκευής βασικού μονοπατιού (Route planning subsystem) . . . . .	36
3.3.7 Υποσύστημα αξιολόγησης αυτόνομου οχήματος (Evaluation subsystem) . . . . .	36
3.3.8 Χρήση του ROS . . . . .	37
3.4 Σύστημα αντίληψης του οχήματος . . . . .	38
3.4.1 Εισαγωγή . . . . .	38
3.4.2 Περιγραφή υλοποίησης . . . . .	39
3.5 Επιλογή συμπεριφοράς για το αυτόνομο όχημα. . . . .	40
3.5.1 Εισαγωγή . . . . .	40
3.5.2 Ανάλυση απόφασης πολλαπλών κριτηρίων . . . . .	41
3.5.3 Μέθοδος επιλογής συμπεριφοράς . . . . .	41
3.5.4 Μέθοδος καταγραφής κριτηρίων αξιολόγησης . . . . .	42
3.5.5 Συναρτήσεις αξιολόγησης . . . . .	47
3.5.6 Αξιολόγηση και επιλογή συμπεριφοράς . . . . .	48
3.5.7 Αλγόριθμοι διαδικασίας . . . . .	49
3.5.8 Παράδειγμα της διαδικασίας αξιολόγησης και επιλογής συμπεριφοράς . . . . .	52
3.5.9 Περιγραφή των επιλεγμένων συμπεριφορών του οχήματος . . . . .	61
3.6 Πρόβλεψη συμπεριφοράς οχημάτων και πεζών . . . . .	66
3.6.1 Εισαγωγή . . . . .	66
3.6.2 Πρόβλεψη σύγκρουσης με πεζό . . . . .	67
3.6.3 Πρόβλεψη σύγκρουσης με όχημα . . . . .	70
3.6.4 Εκτίμηση της τροχιάς του αυτόνομου οχήματος . . . . .	85
3.6.5 Υπολογισμός της πιθανότητας, του χρόνου και του σημείου σύγκρουσης. . . . .	87
3.7 Κατασκευή της βασικής διαδρομής του αυτόνομου οχήματος . . . . .	89
3.7.1 Εισαγωγή . . . . .	89
3.8 Αλγόριθμος κατασκευή βασικού μονοπατιού . . . . .	89
3.9 Κατασκευή τοπικών εναλλακτικών διαδρομών . . . . .	92
3.9.1 Εισαγωγή . . . . .	92
3.9.2 Πολύωνυμο 5ης τάξης σε καμπυλόγραμμες συντεταγμένες (Frenet μονοπάτια) . . . . .	92
3.9.3 Ελαχιστοποίηση της μεταβολής της επιτάχυνσης (jerk) . . . . .	94
3.9.4 Γλοποίηση της μεθόδου και κατασκευή τοπικών εναλλακτικών διαδρομών. . . . .	95
3.9.5 Παράδειγμα εναλλακτικών μονοπατιών . . . . .	97
3.9.6 Αξιολόγηση τοπικών εναλλακτικών διαδρομών . . . . .	98
3.10 Σύστημα ελέγχου ταχύτητας και κατεύθυνσης αυτόνομου οχήματος . . . . .	103
3.10.1 Εισαγωγή . . . . .	103
3.10.2 Έλεγχος ταχύτητας . . . . .	103
3.10.3 Χρήση χαμηλοδιαβατού φίλτρου στο σύστημα ελέγχου ταχύτητας . . . . .	107

3.10.4 Έλεγχος κατεύθυνσης οχήματος . . . . .	109
<b>4 Πειράματα - Αποτελέσματα</b>	<b>115</b>
4.1 Εισαγωγή . . . . .	115
4.2 Η μετρικές αξιολόγησης του συστήματος αυτόνομης οδήγησης . . . . .	115
4.3 Πειράματα και αξιλόγηση του συστήματος οδήγησης. . . . .	116
4.3.1 Παρουσίαση των χαρτών των πόλεων . . . . .	118
4.3.2 Αποτελέσματα πειραμάτων . . . . .	122
4.3.3 Πειράματα με θόρυβο στην ταχύτητα και στην θέση των οχημάτων και των πεζών . . . . .	128
4.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων των πειραμάτων με και χωρίς θόρυβο	133
<b>5 Συμπεράσματα</b>	<b>139</b>
5.1 Γενικά Συμπεράσματα . . . . .	139
5.2 Προβλήματα . . . . .	141
<b>6 Μελλοντικές επεκτάσεις</b>	<b>145</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>147</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

1.1 Τα 6 επίπεδα αυτονομίας ενός οχήματος . . . . .	4
1.2 Αποτελέσματα με χρήση του εργαλείου Google trends για την αναζήτηση του όρου “Αυτόνομη Οδήγηση” από 1/2004 ως 7/2020 . . . . .	5
2.1 Κατηγοριοποίηση υψηλού επιπέδου συστημάτων αυτόνομης οδήγησης	10
2.2 Ένα μεμονωμένο και ένα συνδεδεμένο σύστημα αυτόνομης οδήγησης και . . . . .	11
2.3 α) Η γενική μορφή ενός αρθρωτού συστήματος οδήγησης, β) Ένα διατερματικό σύστημα οδήγησης . . . . .	13
2.4 Παράδειγμα ενός διατερματικού συστήματος το οποίο εκπαιδεύεται με άμεση εποπτευόμενη βαθιά μάθηση . . . . .	14
2.5 Παραδείγματα συστημάτων κάμερας αυτόνομου οχήματος . . . . .	15
2.6 Σύστημα ραντάρ ενός αυτόνομου οχήματος . . . . .	15
2.7 Αισθητήρας Lidar και χάρτης σημείων νέφους . . . . .	16
2.8 Αισθητήρες υπερήχων τοποθετημένοι περιμετρικά του οχήματος . . . . .	17
2.9 Οι τυπικές θέσεις των αισθητήρων πάνω σε ένα αυτόνομο όχημα . . . . .	18
2.10 Γράφημα χαρακτηριστικών των τεσσάρων κύριων τεχνολογιών αισθητήρων με βάσει την κλίμακα Likert . . . . .	19
2.11 α) Το μοντέλο του αυτόνομου οχήματος της Waymo, β) Οπτική παρουσίαση του συστήματος αντίληψης της Waymo . . . . .	20

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

2.12 α) Εσωτερικό οχήματος Tesla και εικόνες από το σύστημα αντίληψης,	21
β) Θέσεις και εύρος κάλυψης των αισθητήρων	21
2.13 Κινηματικό μοντέλου ποδηλάτου δύο τροχών	24
2.14 Παράδειγμα ενός κρυφού μαρκοβιανού μοντέλου	26
2.15 Carla Simulator	29
2.16 Αρχιτεκτονική μεσολογισμικού ROS	31
 3.1 Αρχιτεκτονική Blackboard	34
3.2 Ύποσυστήματα του συστήματος αυτόνομης οδήγησης	37
3.3 Διάγραμμα διασύνδεσης των nodes και των topics του συστήματος	38
3.4 Πιθανές συμπεριφορές ανά περιβάλλον λειτουργίας του οχήματος	40
3.5 Διαδικασία αξιολόγησης και επιλογής συμπεριφοράς	50
3.6 Στιγμιότυπο από ένα πιθανό σενάριο του οχήματος για την επίδειξη της διαδικασίας της αξιολόγησης και επιλογής συμπεριφοράς.	53
3.7 Διάγραμμα ροής της εφαρμογής μιας συμπεριφοράς	60
3.8 Περιγραφή της συμπεριφοράς Overtake με χρήση FSM.	62
3.9 Κινηματικό μοντέλο πρόβλεψης σύγκρουσης οχήματος και πεζού	69
3.10 Ο χώρος για τον οποίο λαμβάνονται υπόψη οι πεζοί και ο οποίος μεταβάλλεται με την ταχύτητα.	70
3.11 Συστάδες τροχιών, η κάθε συστάδα αντιστοιχεί σε ένα μοτίβο κίνησης [13]	72
3.12 Μέθοδος πρωτότυπων τροχιών. α) Όλες οι συστάδες των πρωτότυπων τροχιών (μονοπάτια πράσινου χρώματος). β), γ), δ) Επιλογή της πιο πιθανής τροχιάς σύμφωνα με την θέση και την κατεύθυνση του οχήματος.	74
3.13 Το μαρκοβιανό μοντέλο κρυφών καταστάσεων του συστήματος εκτίμησης της ταχύτητας	77
3.14 Σενάριο στο οποίο ένα ερχόμενο όχημα πλησιάζει ένα stop πάνω στο οποίο βρίσκεται το αυτόνομο όχημα.	80
3.15 Η πραγματική ταχύτητα του οχήματος κατά την εκτέλεση του σεναρίου	81
3.16 Εκτίμηση της μελλοντικής κατάσταση του οχήματος	82
3.17 Η Τρέχουσα κατάσταση του οχήματος	82
3.18 Παρατηρήσεις μαρκοβιανού μοντέλου κρυφών καταστάσεων	83
3.19 Πιθανότητες της εκτίμησης της μελλοντικής κατάστασης του οχήματος	83
3.20 Η εκτίμηση της μελλοντικής ταχύτητας από το μοντέλο.	84
3.21 Η εκτίμηση της μελλοντικής ταχύτητας από το μοντέλο.	85
3.22 Παρουσίαση της εκτιμώμενης τροχιάς του αυτόνομου οχήματος (μωβ σημεία), βασικό μονοπάτι (μπλε σημεία)	86
3.23 Πρόβλεψη σημείου σύγκρουσης διερχόμενου οχήματος με το αυτόνομο όχημα	88
3.24 Διαδικασία εύρεσης βασικού μονοπατιού με τον αλγόριθμο A*	90
3.25 α) Μια καμπύλη εκφρασμένη σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, β) η ίδια καμπύλη στο καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων	93
3.26 Μονοπάτι σε καμπυλόγραμμες συντεταγμένες. Το ίδιο μονοπάτι ποθετημένο κατά μήκος του μονοπατιού αναφοράς	93
3.27 Το μονοπάτι αναφοράς και οι εναλλακτικές frenet διαδρομές	94

3.28 Παράδειγμα μονοπατιών για διαφορετικό χρόνο ή διαφορετική ταχύτητα . . . . .	96
3.29 Εναλλακτικά Frenet μονοπάτια για την περίπτωση που α) το όχημα βρίσκεται σε κανονική πορεία κοντά στο μονοπάτι αναφοράς, β) το όχημα βρίσκεται εκτός δρόμου και ετοιμάζεται για την είσοδο του στο δρόμο . . . . .	98
3.30 Μονοπάτι(πράσινο) που βρίσκεται κοντά στο σημείο στόχου με πλευρική απόσταση 3.5 m από το βασικό μονοπάτι . . . . .	100
3.31 Απότομη αλλαγή της κατεύθυνσης του οχήματος λόγω αλλαγής του βέλτιστου τοπικού μονοπατιού . . . . .	101
3.32 Γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε για τα όρια γύρω από τα οχήματα για τον έλεγχο σύγκρουσης τους κατά την επιλογή των εναλλακτικών διαδρομών . . . . .	101
3.33 Παράδειγμα χρήσης ελλειψοειδούς μορφής ορίου (α) έναντι χρήσης κυκλικής μορφής ορίου (β) . . . . .	102
3.34 Διάγραμμα του συστήματος ελέγχου της ταχύτητας του οχήματος με χρήση του γκαζιού και του φρένου . . . . .	104
3.35 Διαδρομή οχήματος για την παρουσίαση του ελέγχου ταχύτητας . . . . .	105
3.36 Διάγραμμα επιθυμητής ταχύτητας και πραγματικής ταχύτητας οχήματος που επιτυγχάνεται από το σύστημα ελέγχου ταχύτητας . . . . .	106
3.37 Τιμές ενεργοποίησης των πεντάλ(φρένο, γκάζι) από το σύστημα ελέγχου ταχύτητας . . . . .	106
3.38 Εισαγωγή χαμηλοδιαβατού φίλτρου στο σύστημα . . . . .	107
3.39 Σενάριο κίνησης για την παρουσίασή της χρήσης χαμηλοδιαβατού φίλτρου . . . . .	107
3.40 Ταχύτητα του οχήματος με την χρήση και χωρίς την χρήση φίλτρου . . . . .	108
3.41 Ενεργοποίηση γκαζιού με και χωρίς χρήση χαμηλοδιαβατού φίλτρου για το ίδιο σενάριο . . . . .	109
3.42 Ενεργοποίηση φρένου με και χωρίς χρήση χαμηλοδιαβατού φίλτρου για το ίδιο σενάριο . . . . .	109
3.43 Γεωμετρία του αλγόριθμου Pure Pursuit . . . . .	111
3.44 Μονοπάτι για την επίδεξη του συστήματος ελέγχου κατεύθυνσης . . . . .	112
3.45 Διάγραμμα σύγκρισης διαδρομής του οχήματος με το βασικό μονοπάτι . . . . .	112
3.46 Η απόσταση της πραγματικής διαδρομής που ακολούθησε το όχημα από το βασικό μονοπάτι . . . . .	113
 4.1 Χάρτης πόλης 1 . . . . .	118
4.2 Παρουσίαση πόλης 1 . . . . .	118
4.3 Χάρτης πόλης 2 . . . . .	119
4.4 Παρουσίαση πόλης 2 . . . . .	119
4.5 Χάρτης πόλης 3 . . . . .	120
4.6 Παρουσίαση πόλης 3 . . . . .	120
4.7 Χάρτης πόλης 4 . . . . .	121
4.8 Παρουσίαση πόλης 4 . . . . .	121
4.9 Χάρτης πόλης 5 . . . . .	122
4.10 Παρουσίαση πόλης 5 . . . . .	122

4.11 Ραβδόγραμμα για την μετρική "Βαθμολογία Οδήγησης" . . . . .	126
4.12 Ραβδόγραμμα για την μετρική "Ολοκλήρωση Διαδρομής" . . . . .	127
4.13 Ραβδόγραμμα για την μετρική "Ποινή Παραβάσεων". Όσο μεγαλύτερη η τιμή τόσο λιγότερες παραβάσεις . . . . .	127
4.14 Σειρά εικόνων από τις θέσεις και τις ταχύτητες οχημάτων και πεζών με εισαγωγή θορύβου στο σύστημα. . . . .	129
4.15 Ραβδόγραμμα για την μετρική "Βαθμολογία Οδήγησης" . . . . .	132
4.16 Ραβδόγραμμα για την μετρική "Ολοκλήρωση Διαδρομής" . . . . .	133
4.17 Ραβδόγραμμα για την μετρική "Ποινή Παραβάσεων". Όσο μεγαλύτερη η τιμή τόσο λιγότερες παραβάσεις. . . . .	133
4.18 Ραβδόγραμμα για την περίπτωση 50 οχημάτων, πεζών με και χωρίς θόρυβο . . . . .	134
4.19 Ραβδόγραμμα για την περίπτωση 80 οχημάτων, πεζών με και χωρίς θόρυβο . . . . .	134
4.20 Ραβδόγραμμα για την περίπτωση 110 οχημάτων, πεζών με και χωρίς θόρυβο . . . . .	135

## Κατάλογος πινάκων

2.1 Χαρακτηριστικά διατερματικών συστημάτων . . . . .	12
2.2 Σύνγριση των χαρακτηριστικών των προσομοιωτών Carla και LGSVL	29
3.1 Λίστα συμπεριφορών και κατηγορίες συμπεριφορών ανάλογα με εξάρτηση τους. . . . .	42
3.2 Περιορισμοί, εξαρτήσεις συμπεριφορών και κριτήρια αξιολόγησης. .	47
3.3 Τιμές για περιορισμούς και εξαρτήσεις, παράδειγμα. . . . .	54
3.4 Ενεργοί κανόνες και βαθμός ενεργοποίησης . . . . .	56
3.5 Βάρη και εξαρτήσεις κανόνων για τις συμπεριφορές "Overtake" και "Vehicle Follow" . . . . .	56
3.6 Πίνακας συνθηκών τερματισμού συμπεριφοράς ανά συμπεριφορά(συνθήκες τερματισμού για το στάδιο Hold Maneuver). . . . .	61
3.7 Στιγμιότυπο πίνακα μεταβάσεων καταστάσεων μετά την εκπαίδευση. .	78
3.8 Στιγμιότυπο πίνακα εκπομπής . . . . .	78
3.9 Πίνακας πιθανοτήτων μεταβάσεων πριν το fitting . . . . .	79
3.10 Πίνακας πιθανοτήτων μεταβάσεων μετά το fitting . . . . .	79
4.1 Οι τιμές των παραβάσεων για την αξιολόγηση, μικρότερη τιμή σημαίνει και πιο σοβαρή παράβαση . . . . .	117
4.2 Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη . . . .	123
4.3 Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη . . . . .	123
4.4 Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη . . . .	123

4.5	Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη . . . . .	124
4.6	Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη . . . . .	124
4.7	Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη . . . . .	124
4.8	Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη . . . . .	125
4.9	Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη . . . . .	125
4.10	Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη . . . . .	125
4.11	Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη . . . . .	126
4.12	Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη . . . . .	130
4.13	Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη . . . . .	130
4.14	Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη . . . . .	131
4.15	Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη . . . . .	131
4.16	Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη . . . . .	132
4.17	Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη . . . . .	132

## Κατάλογος Εξισώσεων

2.1	Περιορισμός για τον πίσω τροχό . . . . .	23
2.2	Περιορισμός για τον μπροστινό τροχό . . . . .	23
2.3	Εξισώσεις συναρτήσει των μεταβλητών θέσης . . . . .	23
2.4	Εξισώσεις συναρτήσει των μεταβλητών θέσης σε σχέση με τον μπροστινό τροχό . . . . .	23
2.5	Η ταχύτητα του μπροστινού τροχού με τον πίσω τροχό συνδέονται με την σχέση . . . . .	23
2.6	Χρήση της γωνιακής ταχύτητας ωδ . . . . .	23
2.7	Χρήση ακτίνας του τόξου κύκλου . . . . .	24
2.8	Markov Assumption . . . . .	25
3.1	Συνάρτηση αξιολόγησης κανόνα . . . . .	47
3.2	Θετική εξάρτηση από τον κανόνα για την αξιολόγηση συμπεριφορών . . . . .	47
3.3	Αρνητική εξάρτηση από τον κανόνα για την αξιολόγηση συμπεριφορών . . . . .	48
3.4	Τιμή αξιολόγησης συμπεριφοράς . . . . .	48
3.5	Αξιολόγηση και επιλογή συμπεριφοράς . . . . .	49
3.6	Εξισώσεις για την συμπεριφορά Vehicle Follow . . . . .	63
3.7	Εξισώσεις κίνησης πεζού και οχήματος . . . . .	67
3.8	Απόσταση πεζού και οχήματος . . . . .	67
3.9	Στιγμή σύγκρουσης . . . . .	67
3.10	Στιγμή σύγκρουσης, τετραγωνική μορφή . . . . .	67
3.11	Στιγμή σύγκρουσης, διανυσματική μορφή . . . . .	68
3.12	Στιγμή σύγκρουσης, λύση εξίσωσης . . . . .	68
3.13	Στιγμή σύγκρουσης, διακρίνουσα . . . . .	68
3.14	Στιγμή όπου τα σώματα φτάνουν στην ελάχιστη απόσταση τους . . . . .	68

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

---

3.15 Στιγμή όπου τα σώματα συγκρούονται . . . . .	69
3.16 Κινηματικό μοντέλο των καταστάσεων . . . . .	80
3.17 Συνάρτηση κόστους C jerk . . . . .	94
3.18 Ρυθμός μεταβολής της επιτάχυνσης (jerk) . . . . .	94
3.19 Εξισώσεων Euler ελαχιστοποίησης jerk . . . . .	95
3.20 Εξισώσεων Euler ελαχιστοποίησης jerk (εναλλακτική) . . . . .	95
3.21 Εξισώσεων Euler ελαχιστοποίησης jerk (τελική εξίσωση) . . . . .	95
3.22 Πολυωνυμο πέμπτου βαθμού ως πρός το χρόνο, εναλλακτικές διαδρομές	95
3.23 Πολυωνυμο πέμπτου βαθμού ως πρός το χρόνο, εναλλακτικές διαδρομές, καμπυλόγραμμες συντεταγμένες . . . . .	95
3.24 Εναλλακτικές διαδρομές, υπολογισμός παραμέτρων . . . . .	95
3.25 Εναλλακτικές διαδρομές, συνάρτηση αξιολόγησης . . . . .	98
3.26 Εξισώσεις Pure Pursuit . . . . .	110
3.27 Καμπυλότητα τόξου κύκλου . . . . .	110
3.28 Η γωνία κατεύθυνσης των τροχών . . . . .	110
3.29 Η γωνία κατεύθυνσης των τροχών, τελική εξίσωση . . . . .	111
3.30 Εξίσωση γωνίας κατεύθυνσης σε συνάρτηση με το διάνυσμα απόκλισης	111
3.31 Εξίσωση pure pursuit σε μορφή αναλογικού ελεγκτή . . . . .	111
4.1 Βαθμολογία οδήγησης . . . . .	116
4.2 Ποινή παραβίασης . . . . .	116
4.3 Ολοκλήρωση διαδρομής . . . . .	116
4.4 Ποινή παραβάσεων . . . . .	116

# Κατάλογος Αλγορίθμων

Αλγόριθμος 3.5.7 : Select best maneuver

Αλγόριθμος 3.5.7 : Findactive manuevers

Αλγόριθμος 3.5.7 : Maneuversassessmentvalue

Αλγόριθμος 3.5.8 : F0ruleassessment

Αλγόριθμος 3.5.8 : ManeuverData

Αλγόριθμος 3.5.9 : Apply Overtake maneuver

Αλγόριθμος 3.5.9 : Apply Vehicle Follow maneuver

Αλγόριθμος 3.5.9 : Apply Acceleration

Αλγόριθμος 3.5.9 : Apply Deceleration

Αλγόριθμος 3.5.9 : Apply Stop And Wait

Αλγόριθμος 3.6.2 : Getpedestrians

Αλγόριθμος 3.6.2 : Predictcollisionwithpedestrian

Αλγόριθμος 3.6.3 : Prototypetrajectoriesprobabilities

Αλγόριθμος 3.6.4 : Autonomousvehiclepredictedtrajectory

Αλγόριθμος 3.6.5 : Predictvehiclescollision

Αλγόριθμος 3.8 : A\* for route path planning

Αλγόριθμος 3.9.6 : Local candidate trajectories(frenet path planning)



# Τ

## Εισαγωγή

Οι μεταφορές αποτελούν βασικό και αναπόσπαστο κομμάτι κάθε λειτουργικά εύρυθμης κοινωνίας. Καλύτερες και ταχύτερες λύσεις μεταφοράς επιτρέπουν μια μεγαλύτερη αγορά, περισσότερες ευκαιρίες, ταχύτερη προσφορά και ζήτηση, περισσότερη εξειδίκευση, υψηλότερη παραγωγικότητα και περισσότερη καινοτομία. Τα οχήματα από την εποχή της εμφάνισής τους έχουν συμβάλλει καθοριστικά στην ανάπτυξη των κοινωνιών και η αναγκαιότητα τους είναι εμφανής. Η αναγκαιότητα αυτή έχει οδηγήσει στην ενίσχυση των οδικών υποδομών και της παραγωγής οχημάτων σε μεγάλη κλίμακα, μειώνοντας το κόστος τους και δίνοντας την δυνατότητα στον οποιαδήποτε για την αγορά ενός οχήματος, αυξάνοντας έτσι την ποιότητα ζωής των ανθρώπων. Ωστόσο, αυτές οι αλλαγές έχουν δημιουργήσει διαφορετικής φύσης προβλήματα με πρώτο και κυριότερο τα αυτοκινητιστικά αυτοχήματα, τα οποία οδηγούν σε τραυματισμούς ακόμα και στην απώλεια ανθρώπινων ζωών, επίσης στην μόλυνση του περιβάλλοντος, στην αυξημένη κυκλοφοριακή συμφόρηση και στην εξάντληση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων.

Τα αυτόνομα οχήματα έρχονται να δώσουν λύση και να ξεπεράσουν ένα τελευταίο και σημαντικό πρόβλημα για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας των μεταφορών, το οποίο είναι ο ανθρώπινος παράγοντας. Παρόλο που ο άνθρωπος έχει την ικανότητα να χειρίζεται ένα όχημα με εξαιρετικό τρόπο μπορεί οποιαδήποτε στιγμή να κουραστεί, να αποσπαστεί η προσοχή του, να κάνει ένα λάθος για το οποίο δεν ευθύνεται η ικανότητα του στην οδήγηση, αλλά η ανθρώπινη φύση του. Ένα αυτόνομο όχημα μπορεί να οδηγηθεί χωρίς οδηγό, αυτό κάνει την διαδικασία οδήγησης πολύ πιο αποτελεσματική και ασφαλή. Η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να συγκριθεί με την βιομηχανική τυποποίηση και αυτοματοποίηση στην διαδικασία παραγωγής προϊόντων. Προϊόντα που χρειάζονται απόλυτη προσοχή και ακρίβεια για την παραγωγή τους αντί να κατασκευάζονται ένα ένα από κάποιον άνθρωπο, ο οποίος μπορεί οποιαδήποτε στιγμή να μην δώσει την απαραίτητη προσοχή και να κάνει λάθος, κατασκευάζονται σε μαζική κλίμακα από μηχανές και το προϊόν της παραγωγής ελέγχεται στο τέλος από κάποιον ειδικό. Κάνοντας αυτή την σύγκριση

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

είναι ξεκάθαρο ότι, αφαιρώντας τον ανθρώπινο παράγοντα και αυτοματοποιώντας την διαδικασία οδήγησης η ποιότητα και η απόδοση της οδήγησης μπορεί να αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό.

Πολλά οχήματα που πωλούνται σήμερα περιέχουν κάποια μορφή αυτοματοποιημένης λειτουργίας, η οποία μπορεί απλά να βοηθάει τον οδηγό στην οδήγηση ή ακόμα και να εκτελεί πλήρως κάποια αυτοματοποιημένη διαδικασία. Η τεχνολογία αναπτύσσεται με μεγάλη ταχύτητα και τα πρώτα μοντέλα αυτόνομων οχημάτων έχουν ξεκινήσει ήδη να δοκιμάζονται σε δημόσιους δρόμους στην Ευρώπη, την Ιαπωνία και την Αμερική. Τα αυτόνομα οχήματα θα μπορούν να προγραμματιστούν με βάση τις προτιμήσεις των χρηστών, για τη μεγιστοποίησης της ταχύτητας της κυκλοφορίας, την άνεση των επιβατών, την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και των κινδύνων για τους χρήστες του οδικού δικτύου. Τα οφέλη της συγκεκριμένης τεχνολογίας ωθούν την ανάπτυξη της με γοργό ρυθμό, η ιδέα για την είσοδό των αυτόνομων οχημάτων στο οδικό δίκτυο ξεκινάει πλέον να γίνεται πραγματικότητα.

Η τεχνολογία πρόκειται μέσα στα επόμενα χρόνια να ολοκληρώσει την διαδικασία ωρίμανσης της και να φτάσει στο σημείο στο οποίο θα είναι έτοιμη για χρήση από το ευρύ κοινό. Σε αυτό το σημείο, πλήρως αυτοματοποιημένα οχήματα θα μπορούν να κυκλοφορούν στους δρόμους, χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπου, αυξάνοντας την ασφάλεια και την ταχύτητα των μεταφορών, διευκολύνοντας έτσι την καθημερινότητα πολλών ανθρώπων. Για παράδειγμα ηλικιωμένοι, άτομα με κινητικά προβλήματα, προβλήματα όρασης ή με οποιοδήποτε άλλη ιδιαιτερότητα η οποία τους καθιστά ανίκανους για οδήγηση θα μπορούν να έχουν το προσωπικό τους αυτόνομο όχημα. Πριν φτάσουμε όμως σε αυτό το σημείο η σημερινή τεχνολογία θα πρέπει να ξεπεράσει αρκετά εμπόδια και θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι τα αυτόνομα οχήματα είναι ικανά να οδηγήσουν τόσο καλά όσο και ο άνθρωπος. Μέχρι στιγμής τα μοντέλα αυτόνομων οχημάτων που έχουν κατασκευαστεί μπορούν να οδηγήσουν με μεγάλο ποσοστό ασφάλειας αλλά υπό συγκεκριμένες συνθήκες και σε περιορισμένο χώρο, επομένως τα μοντέλα αυτά πρέπει να βελτιωθούν αρκετά για να καταφέρουν να φτάσουν το επιθυμητό επίπεδο ασφάλειας. Σύμφωνα με τον βαθμό πολυπλοκότητας της κίνησης ενός αυτόνομου οχήματος καθορίζεται και ο βαθμός αυτονομίας του οχήματος. Στην βιογραφία [1] [2] η αυτονομία ενός οχήματος χωρίζεται σε 6 επίπεδα τα οποία είναι:

- **Επίπεδο 0 (Χωρίς αυτοματοποίηση οδήγησης)**

Σε αυτό το επίπεδο το όχημα είναι πλήρως ελεγχόμενο από τον οδηγό, δεν ασκείται κανένας έλεγχος στην ταχύτητα και την κατεύθυνση του οχήματος από το ίδιο το όχημα. Σε αυτό το επίπεδο μπορεί να περιέχονται συστήματα που να βοηθούν τον οδηγό, όπως κάποια ηχητική προειδοποίηση για πιθανή σύγκρουση ή για την παρέκκλιση του οχήματος από το μέσο της λωρίδας κίνησης του (Σύστημα προειδοποίησης παρέκκλισης λωρίδας). Τέλος, σε αυτό το επίπεδο περιέχεται και το σύστημα πέδησης έκτακτης ανάγκης, το σύστημα αυτό δεν οδηγεί το όχημα αλλά ενεργοποιεί το σύστημα πέδησης στην περίπτωση που οδηγός αφήσει το γκάζι και πατήσει το φρένο, όχι όμως αρκετά γρήγορα για να αποφευχθεί μια σύγκρουση. Το όχημα σε αυτή την περίπτωση ενεργεί από μόνο του πιο γρήγορα, δηλαδή κάνει κάτι που θα έκανε και ο ίδιος ο οδηγός αλλά με πιο αποτελεσματικό τρόπο.

---

- **Επίπεδο 1 (Υποβοηθούμενη οδήγηση)**

Αυτὸν αποτελεῖ το κατώτερο επίπεδο αυτονομίας. Σε αυτό το επίπεδο το όχημα περιέχει κάποιο σύστημα ελέγχου ή για την κατεύθυνση ή για την ταχύτητα του οχήματος, όχι όμως και για τα δύο ταυτόχρονα. Ένα παράδειγμα αυτονομίας επιπέδου 1 είναι το προσαρμοζόμενο σύστημα ελέγχου πορείας (Adaptive Cruise Control) το οποίο ελέγχει την ταχύτητα του οχήματος ώστε να διατηρείται ασφαλής απόσταση από το προπορευόμενο όχημα, ενώ ο οδηγός είναι υπεύθυνος για τις υπόλοιπες παραμέτρους οδήγησης όπως η κατεύθυνση του οχήματος και το σύστημα πέδησης.

- **Επίπεδο 2 (Μερική αυτοματοποίηση οδήγησης)**

Σε αυτό το επίπεδο το όχημα μπορεί να ελέγχει αυτόνομα ταυτόχρονα την κατεύθυνση και την ταχύτητα του αλλά υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Ο οδηγός μπορεί να αφήσει τα χέρια του από το τιμόνι και τους ποδομοχλούς αλλά θα πρέπει συνεχώς να είναι συγκεντρωμένος στην διαδικασία, και άμα χρειαστεί να πάρει τον έλεγχο του οχήματος. Σε αυτό το επίπεδο βρίσκονται τα περισσότερα εμπορικά πιστοποιημένα αυτόνομα οχήματα μέχρι σήμερα.

- **Επίπεδο 3 (Αυτοματοποίηση υπό όρους οδήγησης)**

Στο επίπεδο 3 το όχημα μπορεί να αναλάβει πλήρως την ευθύνη για τον έλεγχο του οχήματος για την εκτέλεση συγκεκριμένων κινήσεων υπό συνθήκες χωρίς την επίβλεψη του οδηγού, ο οδηγός όμως θα πρέπει να είναι έτοιμος να πάρει τον έλεγχο του οχήματος ανά πάσα στιγμή αν το ζητήσει το όχημα. Το όχημα μπορεί να ανταποκριθεί στα δυναμικά γεγονότα του περιβάλλοντος και να εκτελέσει πλήρως διαδικασίες όπως η αλλαγή λωρίδας ή να επιταχύνει με σκοπό την προσπέραση ενός αργά κινούμενο οχήματος. Ο οδηγός όμως σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να πάρει τον έλεγχο αν το όχημα αποτύχει να φέρει εις πέρας την διαδικασία.

- **Επίπεδο 4 (Υψηλού βαθμού αυτοματοποίηση οδήγησης)**

Το επίπεδο αυτό βρίσκεται πολύ κοντά με το προηγούμενο επίπεδο. Το όχημα μπορεί να αναλάβει πλήρως τον έλεγχο χωρίς την επίβλεψη του οδηγού, η διαφορά όμως είναι ότι το επίπεδο αυτοματοποίησης είναι πολύ πιο ασφαλή. Αν το όχημα βρεθεί σε κάποια κατάσταση και ζητήσει την βοήθεια του οδηγού και ο οδηγός δεν ανταποκριθεί τότε το όχημα δεν θα θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια των επιβατών καθώς έχει την ικανότητα να διαχειριστεί με ασφάλεια ένα τέτοιο γεγονός. Μέχρι στιγμής τα οχήματα που λειτουργούν σε αυτό το επίπεδο αυτονομίας το κάνουν σε περιορισμένες χωρικά περιοχές όπου πληρούν κάποια κριτήρια όπως για παράδειγμα το ανώτατο όριο οδήγησης είναι λιγότερο από 50 χιλιόμετρα την ώρα και η δομή του οδικού δικτύου είναι σχετικά απλή χωρίς περίπλοκες διασταυρώσεις και σηματοδότηση. Επομένως τα οχήματα σε αυτό το επίπεδο είναι λειτουργικά σε περιορισμένο γεωγραφικό χώρο. Παρά την ικανότητα του οχήματος να μπορεί να πλοηγείται αυτόνομα, ο οδηγός πρέπει να μπορεί να πάρει τον έλεγχο του οχήματος οποιαδήποτε στιγμή το θελήσει. Αυτό το επίπεδο είναι πολύ κοντά στην απόλυτα αυτοματοποιημένη οδήγηση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- **Επίπεδο 5 (Πλήρης αυτοματοποίηση οδήγησης)**

Τα οχήματα που λειτουργούν σε αυτό το επίπεδο δεν περιορίζονται σε συγκεκριμένο γεωγραφικό χώρο και μπορούν να λειτουργήσουν πλήρως αυτόνομα σε οποιοδήποτε σενάριο. Η παρουσία του οδηγού δεν είναι υποχρεωτική και μπορούν να οδηγούνται αυτόνομα χωρίς να βρίσκεται κάποιος μέσα στο όχημα και μπορούν να μην διαθέτουν τιμόνι και ποδομοχλούς. Η μπροστινές θέσεις του οχήματος μπορούν να γυρίσουν προς τα πίσω ώστε οι επιβαίνοντες να μιλάνε με μεγαλύτερη άνεση καθώς δεν χρειάζεται η επιβλεψη από κάποιον κατά την οδήγηση. Αυτό είναι το τελευταίο και το ανώτερο επίπεδο αυτοματοποίησης της οδήγησης.

Στην παρακάτω εικόνα 1.1 παρουσιάζονται κατηγοριοποιημένα με τις απαραίτητες λεπτομέρειες τα επίπεδα αυτοματοποίησης που περιγράφηκαν προηγουμένως. Ανά επίπεδο, φαίνεται η ευθύνη του οδηγού και του αυτόνομου οχήματος για τον έλεγχο της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του οχήματος, της παρακολούθησης του περιβάλλοντος και τέλος του ελέγχου του οχήματος στην περίπτωση που κάτι διαταράξει την ομαλή λειτουργία του συστήματος οδήγησης.

		SAE Level	Name	Steering, acceleration, deceleration	Monitoring driving environment	Fallback performance of dynamic driving task	System capability (driving modes)
Human monitors environment	0	No automation the full-time performance by the human driver of all aspects of the dynamic driving task, even when enhanced by warning or intervention systems					
	1	Driver assistance the driving mode-specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the human driver perform all remaining aspects of the dynamic driving task.				Some driving modes	
	2	Partial automation the driving mode-specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the human driver perform all remaining aspects of the dynamic driving task				Some driving modes	
	3	Conditional automation the driving mode-specific performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task with the expectation that the human driver will respond appropriately to a request to intervene				Some driving modes	
	4	High automation the driving mode-specific performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task, even if a human driver does not respond appropriately to a request to intervene				Some driving modes	
	5	Full automation the full-time performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task under all roadway and environmental conditions that can be managed by a human driver				All driving modes	

Σχήμα 1.1: Τα 6 επίπεδα αυτονομίας ενός οχήματος<sup>1</sup>

Η διαδικασία για την κατασκευή ενός συστήματος ικανό να οδηγήσει αυτόνομα ένα όχημα μελετάται συστηματικά τις δύο τελευταίες δεκαετίες και ειδικότερα μέσα στην τελευταία δεκαετία έχει επιτευχθεί η μεγαλύτερη πρόοδος. Ο λόγος για αυτή την εμφανή πρόοδο των τελευταίων ετών είναι η εξέλιξη της τεχνολογίας που εμπλέκεται με τα συστήματα αυτόνομης οδήγησης. Η εξέλιξη στον τομέα της μηχανικής μάθησης, της επεξεργασίας εικόνας αλλά και η τεχνολογία που εμπλέκεται με τον υλικό εξοπλισμό και τους αισθητήρες που απαιτεί ένα αυτόνομο όχημα έχουν δώσει την δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων που την προηγούμενη δεκαετία ήταν σχεδόν αδύνατο να επιλυθούν. Τα συστήματα αυτόνομης οδήγησης των προηγούμενων ετών ακόμα και αν μπορούσαν να δώσουν λύση σε κάποια από τα υπάρχον προβλήματα, ήταν αρκετά πολύπλοκα με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος κατασκευής τους. Επιπροσθέτως, η απόδοση της λύσης που πρόσφεραν δεν ήταν αρκετή για τις απαιτήσεις του συστήματος.

Η επιστημονική κοινότητα ήταν αυτή που ξεκίνησε πρώτη να μελετά εκτενώς την αρχιτεκτονική συστημάτων αυτόνομων οχημάτων, τα τελευταία χρόνια όμως έχει δείξει ενδιαφέρον για τον συγκεκριμένο κλάδο η βιομηχανία και ιδιωτικές εταιρείες όπως εταιρείες παραγωγής και κατασκευής οχημάτων. Παλαιότερα τα μοντέλα δοκιμάζονταν και ελέγχονταν αποκλειστικά σε κλειστές περιοχές, όμως το ενδιαφέρον γύρω από το αντικείμενο έχει αυξηθεί και τα τελευταία χρόνια προτείνονται καινούργιες αρχιτεκτονικές και νέες προσεγγίσεις στην επίλυση των προβλημάτων με αποτέλεσμα πρωτότυπα μοντέλα αυτόνομων οχημάτων να έχουν κάνει ήδη την εμφάνιση τους στους δρόμους του οδικού δικτύου. Η ανάπτυξη των συστημάτων βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο και η απόδοση τους καθώς και η εμπειρία οδήγησης αποδεικνύουν ξεκάθαρα ότι η τεχνολογία αλλά και η τεχνογνωσία στο συγκεκριμένο τομέα δεν έχει ωριμάσει αρκετά ώστε να κατασκευαστεί ένα λειτουργικό και ασφαλή μοντέλο. Η ανάπτυξη ενός ασφαλή μοντέλου μπορεί να μην έχει επιτευχθεί ακόμα και μπορεί να χρειαστούν επιπλέον κάποια χρόνια μέχρι να γίνει αυτό πραγματικότητα, παρόλα αυτά, η πρόοδος των τελευταίων ετών αποδεικνύει ότι αυτό είναι εφικτό να γίνει δίνοντας επιπλέον κίνητρο για την συνέχεια της προσπάθεια.

Στη εικόνα 1.2 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα από το εργαλείο Google trends που δείχνει τις αναζητήσεις των χρηστών του διαδικτύου για τον όρο “Αυτόνομη Οδήγηση”. Από το διάγραμμα είναι εμφανή το ενδιαφέρον που αναπτύσσεται την τελευταία δεκαετία γύρω από την τεχνολογία της αυτόνομης οδήγησης .



Σχήμα 1.2: Αποτελέσματα με χρήση του εργαλείου Google trends για την αναζήτηση του όρου “Αυτόνομη Οδήγηση” από 1/2004 ως 7/2020<sup>2</sup>

Τα αυτόνομα οχήματα αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, διαθέτουν πληθώρα εφαρμογών που μπορούν αλλάξουν καθοριστικά τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούνται οι μεταφορές σήμερα. Ένα πραγματικό γεγονός είναι ότι για την πλειοψηφία των τροχαίων αυτοχημάτων που συμβαίνουν στους δρόμους ευθύνεται ο ανθρώπινος παράγοντας, δηλαδή η μη επαρκής προσοχή του οδηγού ή ο λάθος χειρισμός του οχήματος από τον οδηγό. Τα αυτόνομα οχήματα μπορούν να παρακολουθούν διαρκώς την κατάσταση του δρόμου, τα γειτονικά οχήματα και τους πεζούς και να είναι ανά πάσα στιγμή έτοιμα να πάρουν την κατάλληλη απόφαση για να οδηγήσουν τους επιβάτες με ασφάλεια στο προορισμό τους.

### 1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

---

Προβλήματα χάραξης μονοπατιού συναντιούνται συνήθως στην κλασική ρομποτική και έχουν μελετηθεί εκτενώς τα προηγούμενα χρόνια με αποτέλεσμα να έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που τα επιλύουν με μεγάλη επιτυχία και ακρίβεια. Όμως, οι τεχνικές αυτές δεν αρκούν για την χάραξη μονοπατιού στην περίπτωση ενός αυτόνομου οχήματος. Το πρόβλημα της χάραξης μονοπατιού σε ένα μη περιορισμένο, δυναμικό και δομημένο περιβάλλον με κανόνες κυκλοφορίας όπως είναι το οδικό δίκτυο είναι ένα περίπλοκο πρόβλημα με περίπλοκη λύση. Ένα όχημα μέσα σε ένα οδικό δίκτυο θα πρέπει να συνεργαστεί με τους υπόλοιπους χρήστες, ακόμα και να προβλέψει την κίνηση τους και την πρόθεση τους. Παράλληλα, το αυτόνομο όχημα κατά την κίνηση του θα πρέπει να αναγνωρίζει την σήμανση των δρόμων και να σέβεται τους κανόνες κυκλοφορίας. Η ταχύτητα του οχήματος ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο κινείται μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη κάνοντας την διαδικασία ακόμα πιο δύσκολη. Ο ρυθμός των δεδομένων που πρέπει να επεξεργαστεί το όχημα αυξάνεται ραγδαία με την αύξηση της ταχύτητας του οχήματος και κατ' επέκταση και ο χρόνος επεξεργασίας τους.

Είναι εμφανές ότι οι αλγόριθμοι που θα χρησιμοποιηθούν είναι δεσμευμένοι από το χρόνο εκτέλεσης, επομένως θα πρέπει να είναι αρκετά γρήγοροι ώστε το σύστημα αυτόνομης οδήγησης να προλαβαίνει να αντιλαμβάνεται όλα τα εξωτερικά ερεθίσματα, να τα επεξεργάζεται και να καθοδηγεί το όχημα με ασφάλεια. Το πρόβλημα είναι ότι δεν υπάρχει καμία αποδεδειγμένη μεθοδολογία που να περιγράφει το τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να κατασκευαστεί ένα σύστημα αυτόνομης οδήγησης που να εξασφαλίζει την απαραίτητη απόδοση και ασφάλεια. Στην βιογραφία υπάρχει πληθώρα μεθόδων που περιγράφουν μερικώς την διαδικασία της αυτόνομης οδήγησης. Στην πραγματικότητα όμως, δεν υπάρχει συγκεκριμένη αρχιτεκτονική ή μοντέλο που να περιγράφει την διαδικασία που θα πρέπει να ακολουθήσει ένα αυτόνομο όχημα κατά την οδήγηση του. Υπάρχουν μεθοδολογίες για την εκτέλεση επιμέρους διαδικασιών, πολλές φορές όμως αυτές οι μέθοδοι δεν είναι συμβατές μεταξύ τους ή μπορεί να αλληλοεπικαλύπτονται χωρίς εμφανή διαχωρισμό. Το πρόβλημα βρίσκεται σε διαδικασία μελέτης, δεν υπάρχουν ακόμη ολοκληρωμένες πρακτικές εφαρμογές και λογισμικό που να αναδεικνύουν τις μεθόδους συνολικά σε ένα ενιαίο σύστημα αυτόνομης οδήγησης.

## 1.2 ΣΚΟΠΟΣ - ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

---

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση ενός ολοκληρωμένου συστήματος χάραξης μονοπατιού που θα καθοδηγήσει το αυτόνομο όχημα από ένα αρχικό σημείο σε ένα τελικό μέσα σε έναν εκ των προτέρων γνωστό χάρτη. Ο σκοπός αυτός θα επιτευχθεί κατασκευάζοντας ένα σύστημα αυτόνομης οδήγησης με χρήση εξειδικευμένων και συγχρόνων τεχνικών. Το όχημα θα πρέπει να πλοηγηθεί με ασφάλεια στον τελικό προορισμό ακολουθώντας τους κανόνες οδικής κυκλοφορίας με και χωρίς δυναμικά εμπόδια στο περιβάλλον. Στην περίπτωση που στο περιβάλλον βρίσκονται δυναμικά εμπόδια όπως οχήματα και πεζοί το αυτόνομο όχημα θα πρέπει να αποφύγει οποιαδήποτε σύγκρουση και να εξασφαλίσει ότι δεν θα εμποδίσει την ομαλή πορεία τους ή ότι δεν θα παραβιάσει τους κανόνες οδικής κυκλοφορίας. Στόχος είναι το προτεινόμενο σύστημα να είναι αρκετά γρήγορο ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στις χρονικές απαιτήσεις της αυτόνομης οδήγησης. Η συνεισφορά της διπλωματικής στοχεύει στην μελέτη των τεχνολογιών και στον συνδυασμό αυτών για την ανάπτυξη ενός όσο το δυνατόν πιο πλήρους και λειτουργικού συστήματος αυτόνομης οδήγησης. Επιπλέον, κατά την εκπόνηση της διπλωματικής αναπτύχθηκε πρωτότυπη μέθοδος για την αξιολόγηση και την επιλογή της καλύτερης συμπεριφοράς για το αυτόνομο όχημα με χρήση της ανάλυσης απόφασης πολλαπλών κριτηρίων (Multi-Criteria Decision Analysis ή MCDA).

## 1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

---

Η διάρθρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

- **Κεφάλαιο 1:** Πραγματοποιείται μια γενική αναφορά της σημασίας των αυτόνομων οχημάτων και των κατηγοριών της αυτονομίας τους.
- **Κεφάλαιο 2:** Γίνεται ανασκόπηση της ερευνητικής περιοχής που αφορά την τρέχουσα τεχνολογία των αυτόνομων οχημάτων, των κατηγοριών των συστημάτων και κάποιες βασικές αναφορές σε μεθόδους για την καλύτερη κατανόηση της διπλωματικής από τον αναγνώστη.
- **Κεφάλαιο 3:** Πλήρης περιγραφή της υλοποίησης του συστήματος αυτόνομης οδήγησης, συγκεκριμένα γίνεται περιγραφή των υποσυστημάτων τα οποία είναι: α) σύστημα αντίληψης, β) σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς, γ) σύστημα αξιολόγησης και επιλογής συμπεριφοράς για το αυτόνομο όχημα, δ) σύστημα κατασκευής τοπικών διαδρομών, ε) σύστημα ελέγχου της κίνησης του οχηματος και, στ) σύστημα κατασκευής βασικής διαδρομής για το όχημα.
- **Κεφάλαιο 4:** Παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία των πειραμάτων και τα αποτελέσματα καθώς και τα τελικά συμπεράσματα. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με χρήση του προσωμοιωτή Carla.
- **Κεφάλαιο 5:** Αναφέρονται να συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής και τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την διάρκεια της ανάπτυξης του συστήματος αυτόνομης οδήγησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

- **Κεφάλαιο 6:** Προτείνονται θέματα για μελλοντική μελέτη, αλλαγές και επεκτάσεις του συστήματος αυτόνομης οδήγησης.

# 2

## Επισκόπηση της Ερευνητικής Περιοχής

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο κρίνεται ως απαραίτητη προαπαιτούμενη γνώση ώστε να βοηθήσει τον αναγνώστη στην κατανόηση των τεχνικών που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική. Πραγματοποιείται μια ανάλυση των χρήσιμων εννοιών που πραγματεύεται η διπλωματική εργασία, γίνεται αναφορά των εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν και τέλος, παρουσιάζονται οι σύγχρονες τεχνολογίες (State-of-the-art) στο τομέα της αυτόνομης οδήγησης.

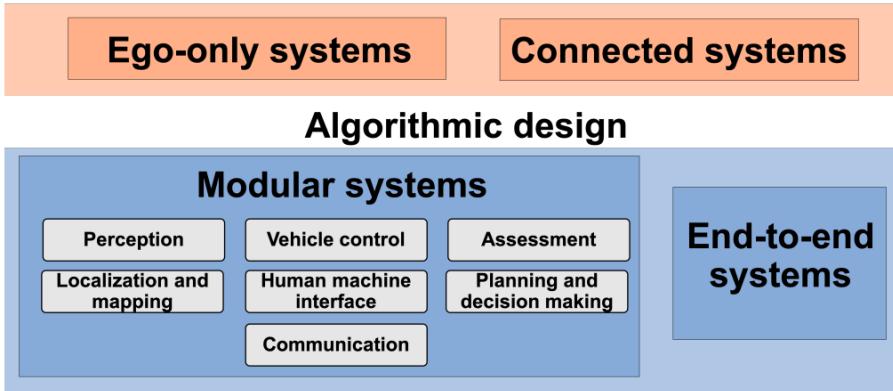
### 2.1 STATE-OF-THE-ART ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

---

Τα συστήματα αυτόνομης οδήγησης (ADS) είναι περίπλοκα ρομποτικά συστήματα που λειτουργούν σε περίπλοκα και απροσδιόριστα περιβάλλοντα. Ως εκ τούτου, υπάρχουν πολλά σενάρια που περιέχουν άλυτα προβλήματα. Αυτή η ενότητα ασχολείται με τις υψηλού επιπέδου προκλήσεις που συναντιούνται στην αυτόνομη οδήγηση. Η ταξινόμηση των αρχιτεκτονικών των συστημάτων αυτόνομης οδήγησης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.1. Τα σύγχρονα ADS συστήματα σχεδιάζονται είτε ως μεμονωμένα συστήματα (ego-only) [24],[25] ή ως συνδεδεμένα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων (connected systems) [26]-[28]. Οι παραπάνω φιλοσοφίες σχεδιασμού υλοποιούνται με δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις, την αρθρωτή (modular) [24],[25],[29]-[36] ή την διατερματική προσέγγιση (end-to-end) [37]-[44]

## High level system architectures

### Connectivity



Σχήμα 2.1: Κατηγοριοποίηση υψηλού επιπέδου συστημάτων αυτόνομης οδήγησης [23]

### 2.1.1 Μεμονωμένα συστήματα έναντι συνδεδεμένων συστημάτων

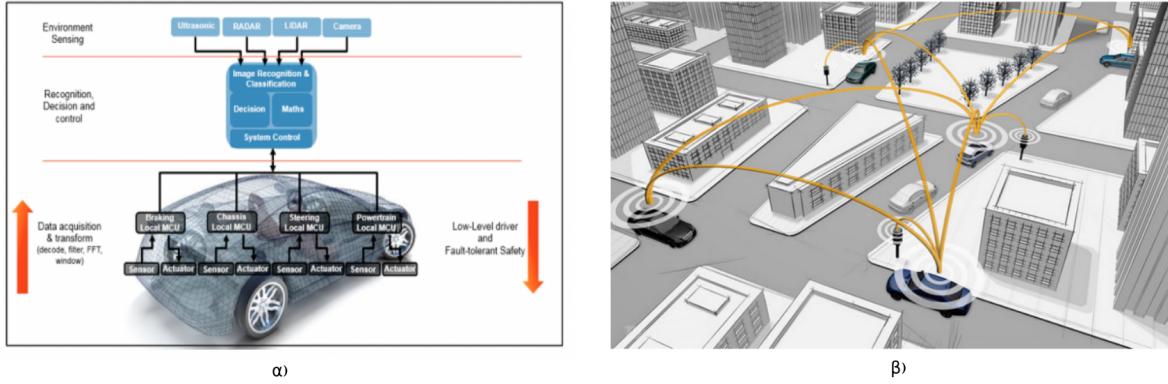
Η προσέγγιση των μεμονωμένων συστημάτων υποθέτει την εκτέλεση όλων των απαραίτητων αυτοματοποιημένων λειτουργιών από ένα αυτόνομο όχημα καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας, ενώ σε ένα συνδεδεμένο σύστημα ADS μπορεί ή και όχι να υπάρχει εξάρτηση από άλλα οχήματα. Στην περίπτωση των συνδεδεμένων συστημάτων είναι δυνατόν να υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του αυτόνομου οχήματος με στοιχεία υποδομής του περιβάλλοντος, όπως είναι τα φανάρια ή αισθητήρες τοποθετημένοι στο έδαφος. Τα μεμονωμένα συστήματα είναι η πιο κοινή προσέγγιση μεταξύ των σύγχρονων συστημάτων ADS [24],[25], [29]-[36]. Σε ένα μεμονωμένο σύστημα το αυτόνομο όχημα είναι υπεύθυνο να συλλέξει την πληροφορία που χρειάζεται από το περιβάλλον και στην συνέχεια να την επεξεργαστεί και να λάβει αποφάσεις για την κίνηση του.

Σε ένα συνδεδεμένο σύστημα, τα οχήματα του περιβάλλοντος του αυτόνομου οχήματος μπορούν να ανταλλάξουν πληροφορία και να λάβουν αποφάσεις από κοινού για τον τρόπο κινήσεις και κατεύθυνσης τους. Τα μεμονωμένα συστήματα έχουν υψηλές επεξεργαστικές απαιτήσεις, τα δεδομένα που λαμβάνονται πρέπει να επεξεργαστούν σε πραγματικό χρόνο, επίσης η διαδικασία λήψης αποφάσεων αποτελεί αρκετά πολυσύνθετη διαδικασία με επιμέρους στάδια και στρατηγικές. Από την άλλη πλευρά, τα συνδεδεμένα συστήματα έχουν υψηλές απαιτήσεις επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων, η αρχιτεκτονική του συστήματος σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων είναι αρκετά περίπλοκη καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψιν όλα τα τοπικά οχήματα γύρω από το αυτόνομο όχημα. Δεν υπάρχουν ακόμα υλοποιημένα συνδεδεμένα συστήματα αυτόματης οδήγησης, παρόλα αυτά, πολλοί ερευνητές θεωρούν την συγκεκριμένη τεχνολογία το μέλλον της αυτόνομης οδήγησης.

Τα τελευταία χρόνια μελετώνται και οι δύο μορφές συστημάτων με εμφανής όμως προτίμηση των μεμονωμένων συστημάτων. Τα μεμονωμένα συστήματα προτιμώνται λόγω της πρακτικότητας της ύπαρξης μιας αυτόνομης πλατφόρμας

## 2.1. STATE-OF-THE-ART ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

για την ανάπτυξη του συστήματος οδήγησης και λόγω των πρόσθετων προκλήσεων που συναντιούνται στα συνδεδεμένα συστήματα. Στην παρακάτω εικόνα 2.2 στα αριστερά παρουσιάζεται η δομή ενός μεμονωμένου συστήματος ενώ στα δεξιά ο τρόπος επικοινωνίας σε ένα συνδεδεμένο σύστημα.



Σχήμα 2.2: α) Ένα μεμονωμένο σύστημα αυτόνομης οδήγησης, η πληροφορία που λαμβάνεται επεξεργάζεται αποκλειστικά από το ίδιο το όχημα. β) Ένα συνδεδεμένο σύστημα στο οποίο τα οχήματα ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους και με το αυτόνομο όχημα<sup>3</sup>

### 2.1.2 Αρθρωτή μορφή συστήματος

Τα αρθρωτά συστήματα είναι δομημένα σε μορφή διοχέτευσης (pipelines) δεδομένων, αποτελούνται από επιμέρους συστήματα που συνδέουν την είσοδο των αισθητήρων στην έξοδο των ενεργοποιητών του συστήματος. Οι βασικές λειτουργίες ενός αρθρωτού ADS μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: α) εντοπισμός θέσης (localization) και χαρτογράφηση (mapping), β) αντίληψη (perception), γ) αξιολόγηση (assessment), δ) σχεδιασμός αποφάσεων (decision planning) και λήψη αποφάσεων (decision making), ε) έλεγχος του οχημάτων (vehicle control) και, στ) διεπαφή ανθρώπου-μηχανής. Τυπικές υλοποιήσεις τέτοιων συστημάτων [24],[25], [29]-[36] ξεκινούν με την τροφοδοσία ακατέργαστων δεδομένων εισόδων από αισθητήρες σε μονάδες εντοπισμού θέσης και εντοπισμού αντικειμένων, ακολουθούμενες από τεχνικές για πρόβλεψη σκηνής και λήψης αποφάσεων. Τέλος, οι εντολές που θα καθοδηγήσουν το μηχανικό μέρος του οχήματος, όπως είναι τα πεντάλ και το τιμόνι του οχήματος, δημιουργούνται στο τέλος της ροής από τη μονάδα ελέγχου.

Η ανάπτυξη επιμέρους υποσυστημάτων χωρίζει την απαιτητική εργασία της αυτόνομης οδήγησης σε ένα απλούστερο υποσύνολο προβλημάτων. Αυτά τα δευτερεύοντα υποσυστήματα συναντώνται συχνά στην βιβλιογραφία και ανήκουν στους τομείς της ρομποτικής, της υπολογιστικής όρασης, της επεξεργασίας εικόνας, της δυναμικής των οχημάτων, γεγονός που καθιστά αυτή την συσσωρευμένη τεχνογνωσία άμεσα και εύκολα εφαρμόσιμη σε αρθρωτά συστήματα αυτόνομης οδήγησης. Αυτό αποτελεί ένα μεγάλο πλεονέκτημα των αρθρωτών συστημάτων. Επιπροσθέτως, οι λειτουργίες και οι αλγόριθμοι μπορούν να ενσωματωθούν μεταξύ τους με μια αρθρωτή αρχιτεκτονική, για παράδειγμα, αν πρέπει να εφαρμοστεί ένας περιο-

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

ρισμός ασφαλείας για το αυτόνομο όχημα, αυτός μπορεί να εφαρμοστεί εξωτερικά και σε πιο υψηλό επίπεδο από την μονάδα σχεδιασμού της κίνησης του οχήματος. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να επιβληθούν ορισμένοι κανόνες ειδικού σκοπού, χωρίς όμως να γίνει τροποποίηση των εσωτερικών λειτουργιών του χαμηλότερου επιπέδου υποσυστημάτων. Τα κύρια μειονεκτήματα των αρθρωτών συστημάτων είναι η επιρρέπεια τους σε διάδοση σφαλμάτων και η υπερβολική πολυπλοκότητα, για παράδειγμα, η λανθασμένη ερμηνεία των δεδομένων εισόδου μπορεί να επηρεάσει τους υπολογισμούς των ακόλουθων υπομονάδων οδηγώντας το όχημα στην λήψη λανθασμένων αποφάσεων.

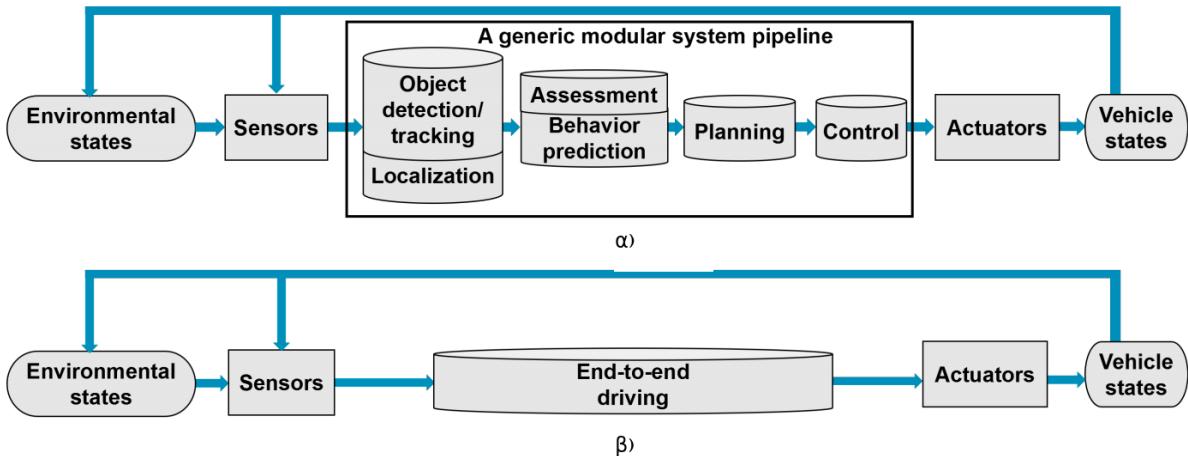
### 2.1.3 Διατερματική μορφή συστήματος

Ένα διατερματικό σύστημα λαμβάνει δεδομένα από τους αισθητήρες και τους μετατρέπει απευθείας σε εντολές κατεύθυνσης για το όχημα. Οι εντολές κατεύθυνσης μπορεί να είναι είτε η συνεχής σήματα για την λειτουργία του τιμονιού και των πεντάλ, είτε ένα ξεχωριστό σύνολο ενεργειών, όπως για παράδειγμα μπορεί να είναι η ενέργεια της επιτάχυνσης ή της στροφής αριστερά κλπ. Υπάρχουν τρεις βασικές προσεγγίσεις για οδήγηση με διατερματικό σύστημα, είναι η άμεση εποπτευόμενη βαθιά μάθηση (Supervised deep learning) [37]-[41], η νευροεξέλιξη (Neuroevolution) [46],[44] και η πιο πρόσφατη είναι η ενισχυμένη βαθιά μάθηση (Deep reinforcement learning) [42, 43]. Στην εικόνα 2.3 φαίνεται η μορφή ενός διατερματικού συστήματος σε σύγκριση με την μορφή ενός αρθρωτού συστήματος, επιπλέον στο παρακάτω πίνακα 2.1 συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά της κάθε τεχνικής.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά διατερματικών συστημάτων

Σχετικές δημοσιεύσεις	Τεχνική μάθησης / εκπαίδευσης συστήματος	Χαρακτηριστικά συστήματος
[37] - [41]	Supervised learning      deep	Μιμείται τα δεδομένα στόχου, συνήθως είναι τα δεδομένα που λαμβάνονται από έναν άνθρωπο οδηγό. Η εκπαίδευση μπορεί να γίνει σε μη πραγματικό χρόνο οδήγησης. Αδυναμία εντοπίζεται ως προς την δυνατότητα για γενίκευση των αποτελεσμάτων.
[46], [44]	Neuroevolution	Δεν είναι δυνατή η εκπαίδευση με διόρθωση του σφάλματος με οπισθοδρόμηση backpropagation). Απαιτείται εκπαίδευση σε πραγματικό κόσμο. Δεν έχει επιτευχθεί ακόμα οδήγηση σε πραγματικό κόσμο
[42], [43]	Deep reinforcement learning	Γίνεται εκμάθηση για οδήγηση με βέλτιστο τρόπο. Απαιτείται αλληλεπίδραση με τον περιβάλλον για την συλλογή δεδομένων και την εκπαίδευση του οχήματος. Δεν έχει επιτευχθεί ακόμα οδήγηση σε αστικό περιβάλλον.

## 2.1. STATE-OF-THE-ART ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

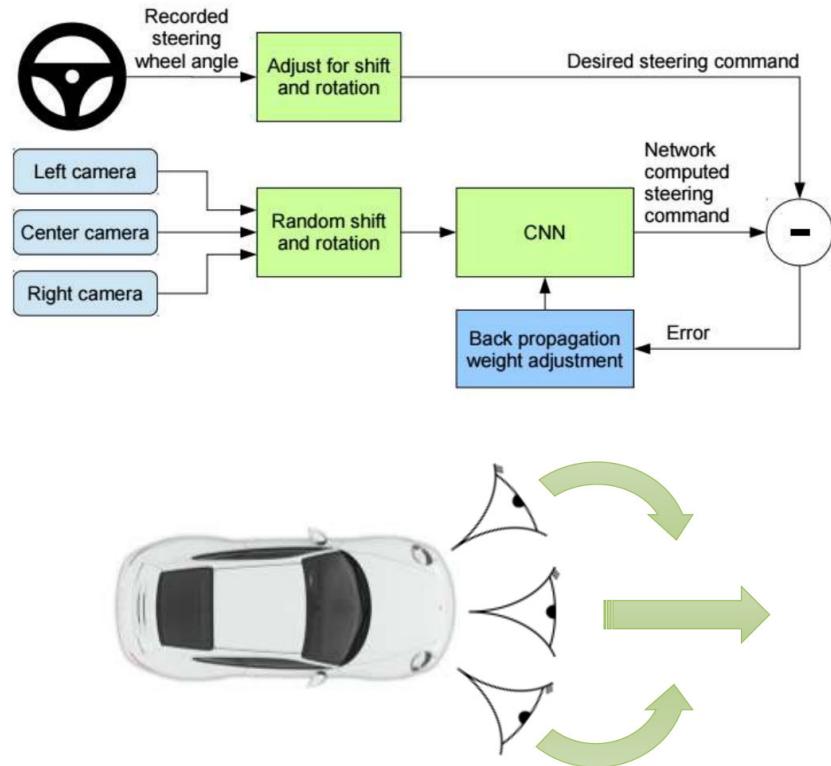


Σχήμα 2.3: α) Η γενική μορφή ενός αρθρωτού συστήματος οδήγησης το οποίο αποτελείται από επιμέρους συστήματα συγκεκριμένου σκοπού. β) Ένα διατερματικό σύστημα οδήγησης, τα δεδομένα εισόδου μετατρέπονται απευθείας σε εντολές κίνησης για το όχημα [23]

Η οδήγηση με διατερματικά συστήματα είναι πολλά υποσχόμενη και τα τελευταία χρόνια γίνεται εκτενής έρευνα για την υλοποίηση και αναβάθμιση τέτοιων συστημάτων οδήγησης, ωστόσο δεν έχει εφαρμοστεί ακόμη σε πραγματικά αστικά περιβάλλοντα, εκτός από κάποιες περιορισμένες ελεγχόμενες επιδείξεις. Τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα της οδήγησης με διατερματικά συστήματα είναι η εν γένει έλλειψη κωδικοποιημένων μέτρων ασφαλείας για την οδήγηση και η αδυναμία για την ερμηνεία των αποφάσεων που λαμβάνονται από το σύστημα [45].

Η μέθοδος νευροεξέλιξης έχει ένα μεγάλο μειονέκτημα σε σχέση με την άμεση εποπτευόμενη βαθιά μάθηση, στην οποία η σύστημα πρέπει να αλληλεπιδρά συνεχώς με το πραγματικό περιβάλλον και να αποτυγχάνει επανειλημμένα μέχρι να αποκτήσει την επιθυμητή συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι το όχημα θα πρέπει συνεχώς να συγκρούεται με οχήματα στο περιβάλλον του και να κάνει ίσως και καταστροφικά λάθη μέχρι το όχημα να μάθει να οδηγεί σωστά.

Αντίθετα, τα συστήματα που λειτουργούν με άμεση εποπτευόμενη βαθιά μάθηση μπορούν να εκπαιδευτούν εκτός σύνδεσης σε μη πραγματικό χρόνο με πραγματικά δεδομένα οδήγησης που έχουν ληφθεί από άνθρωπο οδηγό, μόλις ολοκληρωθεί η εκπαίδευση το σύστημα δεν αναμένεται να αποτύχει κατά τη λειτουργία του. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 2.4, το όχημα σε πρώτο στάδιο οδηγείται από έναν οδηγό, ταυτόχρονα καταγράφονται τα δεδομένα της κατεύθυνσης του τιμονιού και εικόνες σε μορφή βίντεο από κάμερες τοποθετημένες σε διάφορες κατευθύνσεις στο μπροστινό μέρος του οχήματος. Στο επόμενο στάδιο γίνεται η εκπαίδευση του διατερματικού συστήματος, με είσοδο τα δεδομένα από τις κάμερες γίνεται πρόβλεψη για τη σωστή γωνία κατεύθυνσης του τιμονιού με βάσει τα δεδομένα την κατεύθυνση του τα οποία καταγράφηκαν προηγουμένως. Η εκπαίδευση του συστήματος είναι μια διαδικασία που δεν γίνεται σε πραγματικό χρόνο και περιβάλλον, μπορεί να γίνει σε έναν υπολογιστή και στην συνέχεια εφόσον το σύστημα φτάσει την επιθυμητή απόδοση να μεταφερθεί στο όχημα χωρίς περαιτέρω τροποποιήσεις ή αλλαγές.



Σχήμα 2.4: Παράδειγμα ενός διατερματικού συστήματος το οποίο εκπαιδεύεται με άμεση εποπτευόμενη βαθιά μάθηση<sup>4</sup>

## 2.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΟΡΓΑΝΑ ΕΝΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

---

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα συστήματα αισθητήρων σε αυτόνομα οχήματα. Τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν καθοριστικό ρόλο για την αντίληψη που έχει το όχημα για το περιβάλλον του και χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλα τα υπό ανάπτυξη συστήματα αυτόνομης οδήγησης.

### 2.2.1 Σύστημα κάμερας

Τα αυτόνομα οχήματα έχουν συχνά βιντεοκάμερες και αισθητήρες (εικόνα 2.5) για να βλέπουν και να ερμηνεύουν τα αντικείμενα γύρω από το όχημα, όπως ακριβώς κάνουν οι άνθρωποι με τα μάτια τους. Εξοπλίζοντας ένα όχημα με κάμερες σε διάφορες θέσεις πάνω του, το όχημα είναι σε θέση να διατηρεί άποψη 360 μοιρών του εξωτερικού περιβάλλοντος, παρέχοντας έτσι μια ευρύτερη εικόνα των συνθηκών κυκλοφορίας γύρω του.

Σήμερα, οι 3D κάμερες είναι διαθέσιμες και χρησιμοποιούνται για την προβολή εξαιρετικά λεπτομερών και ρεαλιστικών εικόνων. Οι κάμερες έχουν την δυνατότητα να ανιχνεύουν αυτόματα αντικείμενα, να τα ταξινομούν και να καθορίζουν τις αποστάσεις μεταξύ αυτών και του οχήματος. Για παράδειγμα, οι κάμερες μπορούν να αναγνωρίσουν αυτοκίνητα, πεζούς, ποδηλάτες, πινακίδες και σήματα κυκλοφορίας, σήματα οδών, γέφυρες και προστατευτικά κιγκλιδώματα.

## 2.2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΟΡΓΑΝΑ ΕΝΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ



Σχήμα 2.5: Παραδείγματα συστημάτων κάμερας αυτόνομου οχήματος<sup>5</sup>

### 2.2.2 Αισθητήρες Radar

Οι αισθητήρες Radar (Radio Detection And Range) (εικόνα 2.6) συμβάλλουν καθοριστικά στη λειτουργία της αυτόνομης οδήγησης. Το Radar κατά την λειτουργία του στέλνει ραδιοκύματα για την ανίχνευση αντικειμένων, στην συνέχεια μετράει την απόσταση και την ταχύτητά τους σε σχέση με το αυτόνομο όχημα σε πραγματικό χρόνο. Τόσο οι αισθητήρες ραντάρ μικρής όσο και μεγάλης εμβέλειας τοποθετούνται συνήθως περιφερειακά του οχήματος και ο καθένας έχει διαφορετικές λειτουργίες. Η εφαρμογή ραντάρ μικρής εμβέλειας (24 GHz) επιτρέπει την παρακολούθηση τυφλών σημείων γύρω από το όχημα, είναι ιδανικό για βοήθεια κατά τη διαδικασία διατήρησης του οχήματος εντός των λωρίδων του δρόμου και για την διαδικασία στάθμευσης. Οι αισθητήρες ραντάρ μεγάλης εμβέλειας (77 GHz) χρησιμοποιούνται στον αυτόματο έλεγχο απόστασης από το μπροστινό όχημα και στο σύστημα βοήθειας φρεναρίσματος. Σε αντίθεση με τους αισθητήρες κάμερας, τα συστήματα ραντάρ συνήθως δεν έχουν κανένα πρόβλημα στην αναγνώριση αντικειμένων σε περιβάλλον με συνθήκες ομίχλης ή βροχής.

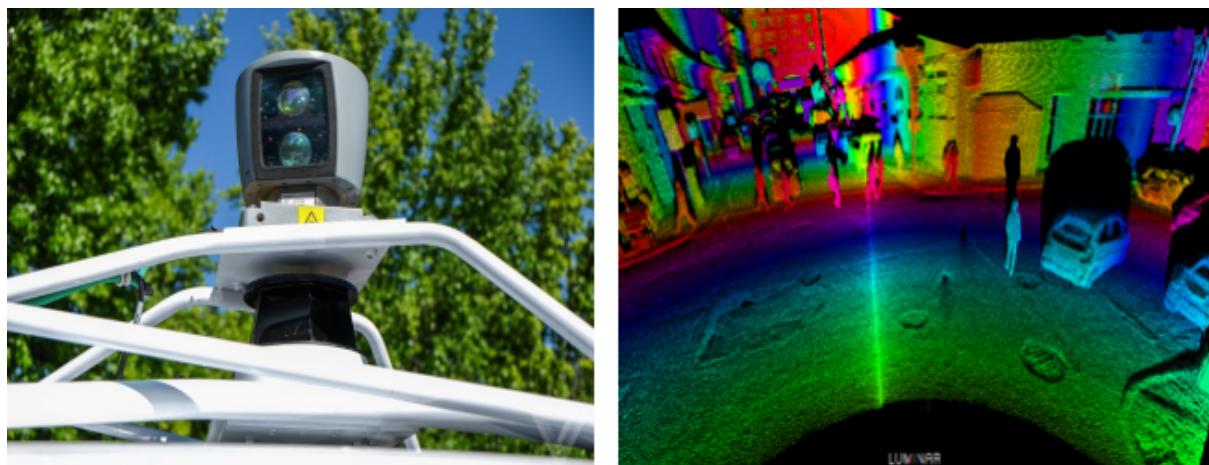


Σχήμα 2.6: Σύστημα ραντάρ ενός αυτόνομου οχήματος<sup>6</sup>

### 2.2.3 Αισθητήρες Lidar

Ο αισθητήρας Lidar (εικόνα 2.7) λειτουργεί παρόμοια με το ραντάρ, με την έννοια ότι και οι δύο αισθητήρες εκπέμπουν και λαμβάνουν κύματα και υπολογίζουν τον χρόνο εκπομπής-λήψης για τον προσδιορισμό της απόστασης. Ο αισθητήρας Lidar θεωρείται από πολλούς ερευνητές ο πιο σημαντικός αισθητήρας όλων για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία ενός αυτόνομου οχήματος. Αντί της εκπομπής ραδιοκυμάτων, οι αισθητήρες Lidar (Light Detection And Ranging) στέλνουν κάθε δευτερόλεπτο πολλούς στοχευμένους παλμούς λέιζερ και δημιουργούν έναν χάρτη βάθους (depth map), ή έναν χάρτη σημείων νέφους (point cloud map), που απεικονίζει τα αντικείμενα στο χώρο γύρω από το όχημα.

Σε αντίθεση με το ραντάρ, οι χάρτες σημείων νέφους είναι αρκετά ακριβείς και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν μια καλή ένδειξη για το είδος ενός αντικειμένου. Επίσης, λόγω του χαμηλού χρόνου της ανάγνωσης των χαρτών σε πραγματικό χρόνο και της φύσης των μετρήσεων του Lidar, οι χάρτες σημείων νέφους προσφέρουν καλή κατανόηση για ολόκληρο τον κόσμο γύρω από το όχημα και κυρίως χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση αντικειμένων και την παρακολούθηση της ταχύτητάς κίνησης τους. Δυστυχώς, οι αισθητήρες Lidar βασίζονται στην πληροφορία που προκύπτει από το βάθος και, ως εκ τούτου, δεν μπορούν να εντοπίσουν κρίσιμα στοιχεία χωρίς βάθος, όπως για παράδειγμα τα φανάρια και τις πινακίδες.



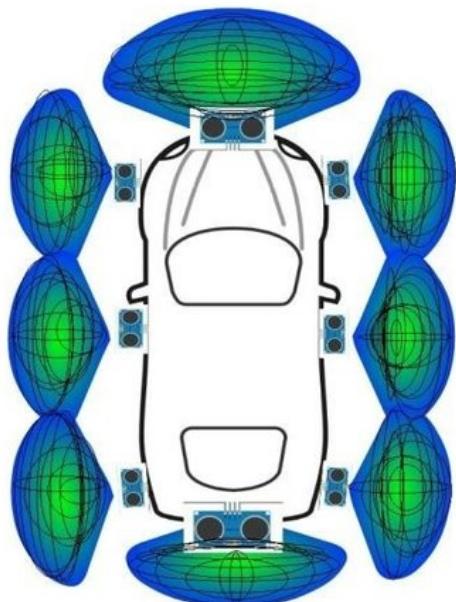
Σχήμα 2.7: Αισθητήρας Lidar και χάρτης σημείων νέφους<sup>7</sup>

### 2.2.4 Αισθητήρες υπερήχων

Οι αισθητήρες υπερήχων (εικόνα 2.8) στέλνουν παλμούς υπερήχων που αντανακλώνται από τα εμπόδια του περιβάλλοντος του αυτόνομου οχήματος. Στη συνέχεια, τα σήματα ηχούς λαμβάνονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία. Εντός της πλαστικής θήκης ενός αισθητήρα υπερήχου περιέχεται ο μετατροπέας υπερήχων. Αποτελείται από ένα δοχείο αλουμινίου με διάφραγμα που περιέχει ένα πίεζοκεραμικό στοιχείο. Ο αισθητήρας λαμβάνει ένα ψηφιακό σήμα μετάδοσης, αυτό αναγκάζει το διάφραγμα αλουμινίου να ταλαντώνεται με τετραγωνικά κύματα για

## 2.2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΟΡΓΑΝΑ ΕΝΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

περίπου 300 μsec με συχνότητα συντονισμού περίπου 48 kHz, που έχει ως αποτέλεσμα εκπομπή παλμών υπερήχων. Το διάφραγμα στη συνέχεια χαλαρώνει για περίπου 900 μsec λαμβάνει τον ανακλώμενο ήχο από ένα εμπόδιο και δονείται. Αυτές οι δονήσεις εξάγονται από το πιεζο-κεραμικό στοιχείο ως αναλογικά σήματα, στη συνέχεια ενισχύονται και μετατρέπονται σε φηφιακό σήμα. Το φηφιακό σήμα επεξεργάζεται και προκύπτει η πληροφορία για την απόσταση των αντικειμένων του χώρου. Ένας αισθητήρας υπερήχων αποτελεί μια αρκετά εύκολη και οικονομική λύση για εφαρμογές μέτρησης απόστασης. Συνήθως, συσκευές υπερήχων τοποθετούνται περιμετρικά του αυτόνομου οχήματος για την μέτρηση της απόστασης αντικειμένων γύρω από το όχημα. Το μειονέκτημα τους είναι η περιορισμένη ακρίβεια των μετρήσεων τους και η ευαισθησία τους στον θόρυβο. Σε αντίθεση όμως με τους αισθητήρες ραντάρ, οι αισθητήρες υπερήχων μπορούν να αναγνωρίσουν μη μεταλλικά αντικείμενα.



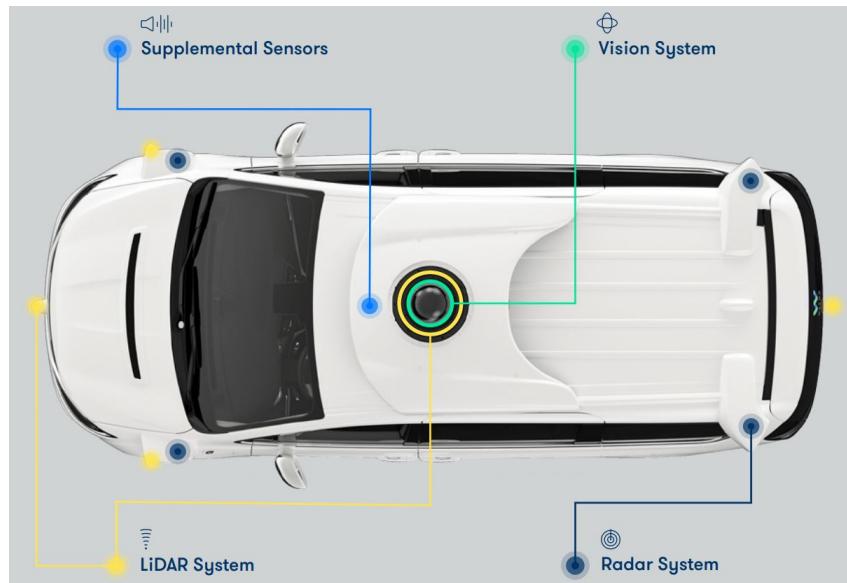
Σχήμα 2.8: Αισθητήρες υπερήχων τοποθετημένοι περιμετρικά του οχήματος<sup>8</sup>

### 2.2.5 Θέση αισθητήρων πάνω στο αυτόνομο όχημα

Οι αισθητήρες τοποθετούνται σε στρατηγικές θέσεις πάνω στο όχημα ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους και με σκοπό την υψηλότερη απόδοση τους. Ο αισθητήρας Lidar τοποθετείται στην οροφή του οχήματος για την ανίχνευση όλου του χώρου γύρω από το όχημα, συνήθως μικρότερες συσκευές Lidar τοποθετούνται στα άκρα του οχήματος για την ενίσχυση της αντίληψης των κρυφών σημείων του οχήματος. Οι κάμερες τοποθετούνται στην οροφή ή στο πάνω μέρος του παραπρίζ, ενώ μπορεί να τοποθετηθούν συμπληρωματικές κάμερες στο πίσω μέρος του οχήματος. Τα radar τοποθετούνται στα πλαϊνά του οχήματος για την αποτελεσματική εντόπιση οχημάτων σε κοντινή απόσταση από το όχημα. Οι αισθητήρες υπερήχων τοποθετούνται περιμετρικά του οχήματος με μεγαλύτερη έμφαση στα κρυφά σημεία του, όπως είναι τα πλαϊνά και το πίσω μέρος του οχήματος. Το όχημα μπορεί

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

να περιέχει επιπλέων αισθητήρες όπως αισθητήρες καταγραφής ήχου που τοποθετούνται συνήθως στην οροφή του οχήματος. Στην εικόνα 2.9 παρουσιάζονται οι συνήθης θέσεις των αισθητήρων πάνω σε ένα όχημα.

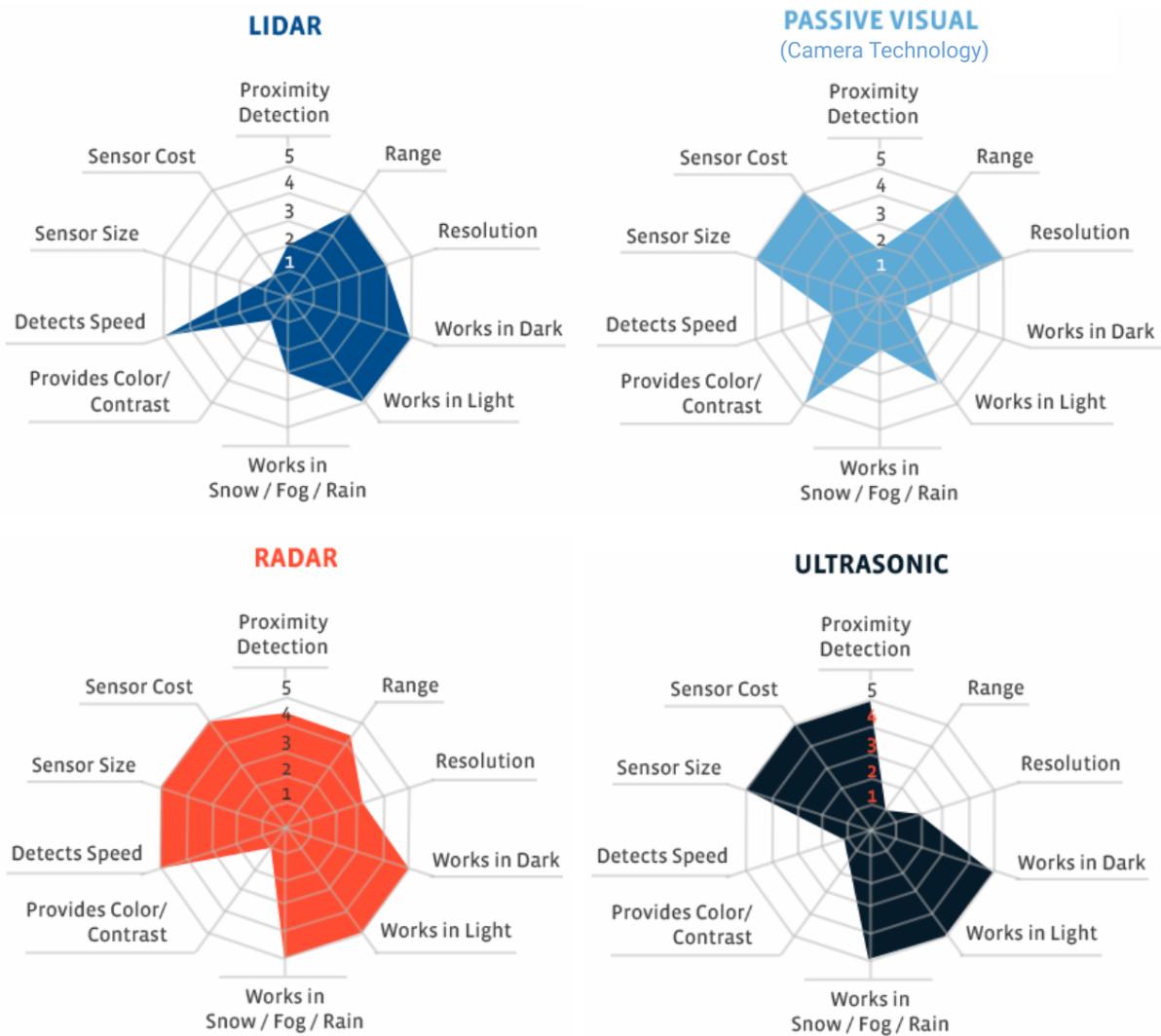


Σχήμα 2.9: Οι τυπικές θέσεις των αισθητήρων πάνω σε ένα αυτόνομο όχημα<sup>9</sup>

### 2.2.6 Χαρακτηριστικά αισθητήριων οργάνων

Η αντίληψη σε ένα αυτόνομο όχημα είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του, τα δεδομένα που λαμβάνονται από αυτές τις διαδικασίες τροφοδοτούν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται επιτρέπουν στο όχημα να κάνει μετρήσεις και παρατηρήσεις για συγκεκριμένες μεταβλητές του περιβάλλοντος. Κάποιοι αισθητήρες είναι πιο κατάλληλη για την μέτρηση της απόστασης ή της θέσης των αντικειμένων γύρω από το όχημα, ενώ κάποιοι άλλοι για την μέτρηση της ταχύτητας τους. Επίσης, οι αισθητήρες συσκευές που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα ανάλογα με το περιβάλλον και τις συνθήκες οδήγησης. Κάποιοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση είναι η φωτεινότητα και καιρικές συνθήκες όπως η βροχή, το χιόνι και η ομίχλη. Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σε κλίματα Likert για τους πιο διαδεδομένους αισθητήρες αυτόνομων οχημάτων, για κάθε αισθητήρα επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης τους. Για παράδειγμα ένας αισθητήρας Lidar λειτουργεί αποτελεσματικά στο σκοτάδι και στο φως, ενώ μια κάμερα δεν μπορεί να λειτουργήσει σε συνθήκες περιορισμένης φωτεινότητας.

## 2.2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΟΡΓΑΝΑ ΕΝΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ



Σχήμα 2.10: Γράφημα χαρακτηριστικών των τεσσάρων κύριων τεχνολογιών αισθητήρων με βάσει την κλίμακα Likert<sup>10</sup>

### 2.2.7 Παραδείγματα αισθητήρων σε πραγματικά μοντέλα

Οι αισθητήρες, που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, αποτελούν τους πιο κοινούς αισθητήρες στην τεχνολογία της αυτόνομης οδήγησης. Οι μεγαλύτερες εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον τομέα της αυτόνομης οδήγησης, χρησιμοποιούν ως βασικούς αισθητήρες τους παραπάνω αισθητήρες σχεδόν κατά αποκλειστικότητα. Συγκεκριμένα, οι εταιρείες συνήθως χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα ως πυρήνα του συστήματος αντίληψης, στον οποίο επικεντρώνονται, και αναπτύσσουν το μεγαλύτερο μέρος του συστήματος αντίληψης.

Για παράδειγμα, το αυτόνομο όχημα της εταιρείας Waymo, η οποία είναι θυγατρική της Google, και αποτελεί μια από τις πρωτοπόρες εταιρείες πάνω στην αυτόνομη οδήγηση, στηρίζεται και επικεντρώνεται σε μεγάλο βαθμό στους αισθητήρες Lidar. Το όχημα της εταιρείας Waymo παρουσιάζεται στην εικόνα 2.11, η εταιρεία χρησιμοποιεί στο όχημα της 3 συστήματα Lidar τα οποία υποστηρίζει ότι

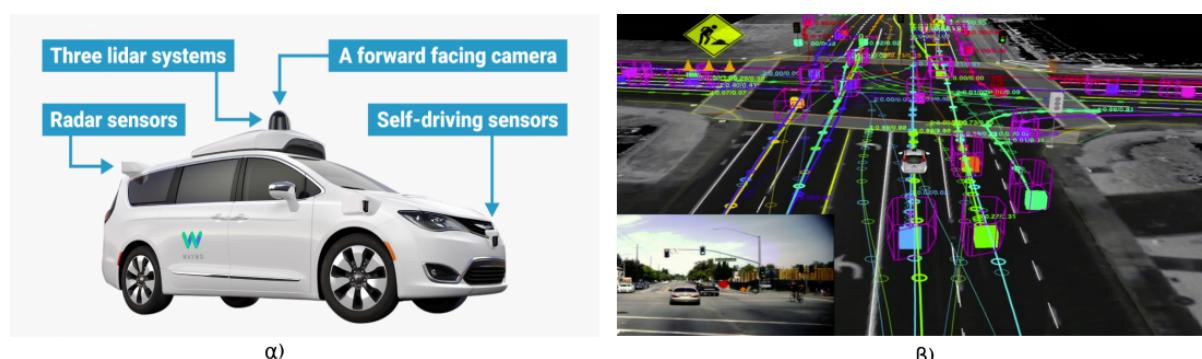
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

έχουν την ικανότητα να ανιχνεύσουν ένα κράνος μοτοσικλετιστή σε απόσταση περίπου 200 μέτρων. Τα συστήματα με τους αισθητήρες Lidar χρησιμοποιούνται για τις περισσότερες διεργασίες του συστήματος αντίληψης, όπως για παράδειγμα, για την ανίχνευση της θέσης των αντικειμένων, του είδους των αντικειμένων και της ταχύτητα τους. Γενικότερα, ο αισθητήρας Lidar χρησιμοποιείται σε διεργασίες που η μορφή του αντικειμένου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει την επιθυμητή πληροφορία.

Επίσης, η Waymo χρησιμοποιεί κάμερες, κυρίως στο μπροστινό μέρος του οχήματος, για την εξαγωγή πληροφορίας που δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί από την μορφή ή την γεωμετρία των αντικειμένων, όπως για παράδειγμα, για την ανάγνωση των σημάτων οδικής κυκλοφορίας και των φωτεινών σηματοδοτών. Οι αισθητήρες συνήθως χρησιμοποιούνται συνεργατικά για την υλοποίηση κοινών διεργασιών, έτσι, οι κάμερες αλλά και οι υπόλοιποι αισθητήρες χρησιμοποιούνται και αυτοί για την ανίχνευση των αντικειμένων του χώρου, ενισχύοντας την δυναμική του συστήματος αντίληψης.

Το δίχημα της Waymo είναι εξοπλισμένο με ένα προσαρμοσμένο σύστημα ραντάρ, το οποίο έχει περιφερειακή ορατότητα 360 μοιρών, ώστε να παρακολουθεί αντικείμενα και οχήματα που συνήθως κρύβονται από το ανθρώπινο μάτι. Τα ραντάρ είναι σε θέση να παρακολουθούν ένα όχημα καθώς έρχεται από πίσω και καθώς κινείται μπροστά από το όχημα χωρίς διακοπή. Τα συμβατικά ραντάρ έχουν σχεδιαστεί για να εστιάζουν αποκλειστικά στις κινήσεις των οχημάτων. Ωστόσο, τα πλήρως αυτοκινούμενα αυτοκίνητα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη όλους τους χρήστες του δρόμου, από τα αυτοκίνητα έως τους πεζούς και τους ποδηλάτες. Έτσι, τα ραντάρ της Waymo είναι ρυθμισμένα ώστε να ανιχνεύουν και τα πιο αργά κινούμενα αντικείμενα.

Τέλος, στην εικόνα 2.11 (β) παρουσιάζεται η γραφική διεπαφή του χρήστη για το σύστημα αντίληψης του οχήματος. Η διεπαφή αποτελείται από τη δορυφορική απεικόνιση του χώρου, και πάνω σε αυτήν έχουν προστεθεί τα δεδομένα που λαμβάνονται από το σύστημα αντίληψης. Η εικόνα δίνει μια ιδέα, για το είδος των δεδομένων που λαμβάνει από το περιβάλλον του το όχημα της Waymo.



Σχήμα 2.11: α) Το μοντέλο του αυτόνομου οχήματος της Waymo, β) Οπτική παρουσίαση του συστήματος αντίληψης της Waymo<sup>11</sup>

## 2.2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΟΡΓΑΝΑ ΕΝΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

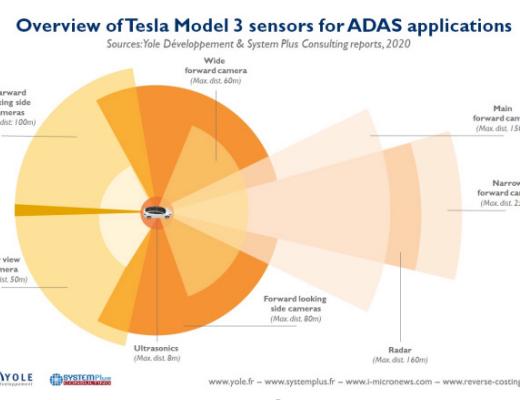
Μια ακόμα γνωστή εταιρεία στο τομέα της αυτόνομης πλοιόγησης οχημάτων είναι η εταιρεία Tesla. Η εταιρεία έχει ξεκινήσει την εμπορική της δραστηριότητα στο τομέα της αυτόνομης οδήγησης περίπου από το 2014, εισάγοντας στα οχήματα της ένα σύστημα υποβοήθησης για τον οδηγό, με ικανότητες αυτόνομης οδήγησης. Τα εν λόγω συστήματα που παράγει η εταιρεία μέχρι και σήμερα, δεν αντιστοιχούν σε συστήματα με πλήρης ικανότητα για αυτόνομη οδήγηση, ούτε να οχήματα της εταιρεία είναι πλήρως αυτόνομα, παρόλα αυτά η τεχνολογία που χρησιμοποιείται ανήκει στο πεδίο της αυτόνομης οδήγησης.

Στα μοντέλα της εταιρείας Tesla δεν χρησιμοποιούνται καθόλου αισθητήρες Lidar, η εταιρεία υποστηρίζει ότι έχει κάνει αυτή την επιλογή λόγω του υψηλού κόστους των αισθητήρων. Σε αντίθεση με την Waymo, η Tesla θεωρεί ότι οι κάμερες είναι ικανές να προσφέρουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για το περιβάλλον του οχήματος. Η Tesla χρησιμοποιεί σχεδόν αποκλειστικά κάμερες για την απόκτηση των επιθυμητών πληροφοριών. Έχει εστιάσει τις προσπάθειες της κυρίως στην υπολογιστική όραση, στην τεχνολογία δηλαδή στην οποία γίνεται πρώτα η επεξεργασία των εικόνων και στην συνέχεια πραγματοποιείται η εξαγωγή των δεδομένων μέσω από αυτές. Επιπροσθέτως, για την ανίχνευση αντικειμένων που δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν με χρήση των καμερών, χρησιμοποιούνται περιμετρικά του οχήματος αισθητήρες ραντάρ και αισθητήρες υπερήχων.

Στην εικόνα 2.12 παρουσιάζεται ένα όχημα Tesla από το εσωτερικό του, καθώς εξωτερικά δεν παρουσιάζει καμία διαφορά από ένα συνηθισμένο όχημα. Στην εικόνα 2.12 (α) φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο ανιχνεύονται τα αντικείμενα στις εικόνες που λαμβάνονται από τις κάμερες. Στην εικόνα 2.12 (β) παρουσιάζονται οι θέσεις των αισθητήρων, που στη πλειοφηφία τους είναι κάμερες, και σημειώνεται το εύρος κάλυψης τους περιμετρικά του οχήματος.



α)



β)

Σχήμα 2.12: α) Εσωτερικό οχήματος Tesla και εικόνες από το σύστημα αντίληψης, β) Θέσεις και εύρος κάλυψης των αισθητήρων<sup>12</sup>

## 2.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

---

### 2.3.1 Κινηματικό μοντέλο κίνησης ποδηλάτου

Τα κινηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ευρέως σε αλγόριθμους ελέγχου και σχεδιασμού κίνησης, έχουν σκοπό να προσεγγίσουν τη συμπεριφορά και την απόκριση ενός οχήματος στις ενέργειες ελέγχου στις αντίστοιχες συνθήκες λειτουργίας του. Ένα μοντέλο υψηλής πιστότητας μπορεί να αντικατοπτρίσει με ακρίβεια την απόκριση του οχήματος, αλλά η προσθήκη περιττής λεπτομέρειας μπορεί να περιπλέξει το πρόβλημα της σχεδίασης του μοντέλου. Θα πρέπει να γίνει συμβιβασμός ανάμεσα στην επιλογή ενός μοντέλου υψηλής ακρίβειας, που όμως προσδίδει επιπλέον δυσκολία στον προγραμματισμό, ή στην επιλογή ενός πιο απλού μοντέλου που προσεγγίζει το πραγματικό σύστημα με λιγότερη ακρίβεια αλλά κάνει το πρόβλημα του σχεδιασμού ευκολότερο.

Σε αυτή την παράγραφο, θα γίνει περιγραφή του μοντέλου που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό και τον έλεγχο της κίνησης του αυτόνομου οχήματος. Για την απλοποίηση του προβλήματος, στην παρούσα διπλωματική, έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο ποδηλάτου δύο τροχών. Η κίνηση του οχήματος πρέπει να προγραμματιστεί και να ρυθμιστεί με σεβασμό στους περιορισμούς που εισάγονται από το επιλεγμένο κινηματικό μοντέλο. Το μοντέλο ποδηλάτου χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο Pure Pursuit που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3 (βλ. ενότητα 3.10.4). Το μοντέλο ποδηλάτου στην περίπτωση ενός αυτόνομου οχήματος, το οποίο κινείται σε δρόμο σε συνηθισμένες συνθήκες, προσεγγίζει την κίνησή του οχήματος με μεγάλη ακρίβεια χωρίς να εισάγει στο σύστημα περιττή πολυπλοκότητα.

Το πιο απλό μοντέλο κίνησης, για πρακτική χρήση σε πραγματικά συστήματα, αποτελείται από δύο τροχούς συνδεδεμένους με σταθερό σύνδεσμο και η κίνηση περιορίζεται πάνω σε ένα επίπεδο [3]. Θεωρείται ότι οι τροχοί δεν ολισθαίνουν σε σχέση με το σταθερό τους σημείο πάνω στο έδαφος και μπορούν να περιστρέφονται ελεύθερα γύρω από τον άξονα περιστροφής τους. Ο μπροστινός τροχός έχει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας για να μπορεί να περιστραφεί γύρω από τον άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο κίνησης του. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά του μοντέλου αντικατοπτρίζουν την εμπειρία που βιώνει ένας επιβάτης κατά την κίνηση του οχήματος, δηλαδή περιγράφουν το ότι ένα όχημα δεν μπορεί να στρίψει εάν ταυτόχρονα δεν κινηθεί προς τα εμπρός. Οι περιορισμοί της κίνησης ενός οχήματος αναφέρονται ως “nonholonomic” περιορισμοί και καθορίζουν την μορφή των εξισώσεων που περιγράφουν το κινηματικό μοντέλο. Η μορφή των εξισώσεων εξαρτάται επίσης από την επιλογή του συστήματος συντεταγμένων.

Στο σχήμα 2.13 τα διανύσματα  $r_p$  και  $r_f$  δηλώνουν την θέση του πίσω και του μπροστινού τροχού ως προς ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων με μοναδιαία διανύσματα ( $\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$ ). Τα  $r_p$  και  $r_f$  είναι τα διανύσματα που ενώνουν το σταθερό σημείο του συστήματος συντεταγμένων με το σταθερό σημείο του εκάστοτε τροχού που εφάπτεται με το έδαφος. Οι παράγωγοι των  $\dot{r}_p$  και  $\dot{r}_f$  είναι περιορισμένοι από τους nonholonomic περιορισμούς που εισάγει το μοντέλο. Η γωνία  $\theta$  είναι η γωνία κατεύθυνσης του οχήματος και  $\delta$  η γωνία διεύθυνσης του μπροστινού τροχού. Με  $l$  δηλώνεται η απόσταση του μπροστινού από τον πίσω τροχό.

Η κίνηση των σημείων  $\dot{r}_p$  και  $\dot{r}_f$  πρέπει να είναι γραμμική σε σχέση με τον

προσανατολισμό του οχήματος ώστε να ικανοποιείται ο περιορισμός της μη ολίσθησης των τροχών. Ο παραπάνω περιορισμός περιγράφεται από τις παρακάτω μορφές εξισώσεων :

Για τον πίσω τροχό:

$$(\dot{p}_r \cdot \hat{e}_y) \cos(\theta) - (\dot{p}_r \cdot \hat{e}_x) \sin(\theta) = 0 \quad (2.1)$$

Για τον μπροστινό τροχό:

$$(\dot{p}_f \cdot \hat{e}_y) \cos(\theta + \delta) - (\dot{p}_f \cdot \hat{e}_x) \sin(\theta + \delta) = 0 \quad (2.2)$$

Οι εξισώσεις μπορούν να ξανά γραφούν συναρτήσει των μεταβλητών θέσης του πίσω τροχού  $\dot{x}_r$ ,  $\dot{y}_r$  ως πρός το σταθερό σύστημα συντεταγμένων και της γωνίας κατεύθυνσης με την παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= v_r \cos(\theta) \\ \dot{y}_r &= v_r \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \frac{v_r}{l} \tan(\delta) \end{aligned} \quad (2.3)$$

όπου  $v_r$  η ταχύτητα το πίσω τροχού. Επίσης σε σχέση με τον μπροστινό τροχό οι εξισώσεις διατυπώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= v_f \cos(\theta + \delta) \\ \dot{y}_f &= v_f \sin(\theta + \delta) \\ \dot{\theta} &= \frac{v_f}{l} \sin(\delta) \end{aligned} \quad (2.4)$$

όπου  $v_f$  η ταχύτητα το μπροστινό τροχού.

Η ταχύτητα του μπροστινού τροχού με τον πίσω τροχό συνδέονται με την σχέση:

$$\frac{v_r}{v_f} = \cos(\delta) \quad (2.5)$$

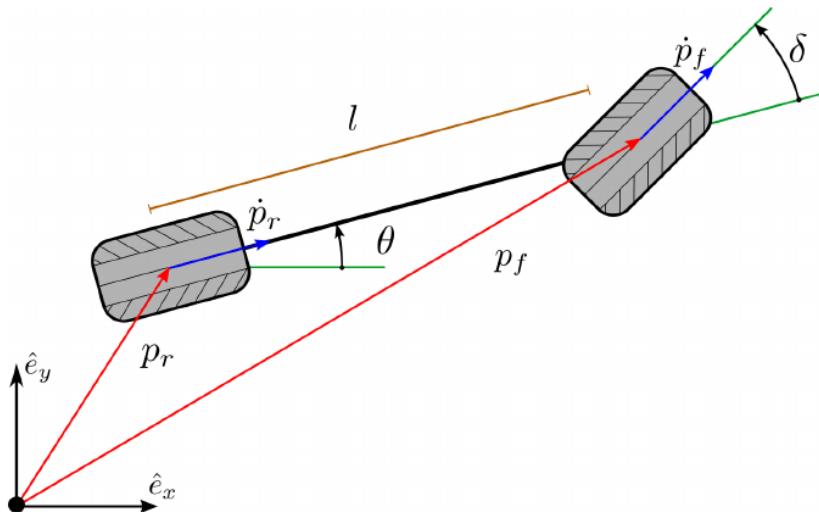
Το πρόβλημα του σχεδιασμού της κίνησης περιλαμβάνει την επιλογή της γωνίας διεύθυνσης ώστε να βρίσκεται μέσα στα μηχανικά όρια του οχήματος  $\delta \in [\delta_{\min}, \delta_{\max}]$  και η ταχύτητα του οχήματος  $v_r$  εντός επιτρεπτών τιμών  $v_r \in [v_{\min}, v_{\max}]$ . Αν πρέπει να χρησιμοποιηθεί η γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  αντί της γωνίας κατεύθυνσης  $\delta$  τότε οι σχέσεις μεταξύ τους δίνεται από τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \delta &= \arctan\left(\frac{l\omega}{v_r}\right) \\ \dot{\theta} &= \omega, \quad \omega \in \left[\frac{v_r}{l} \tan(\delta_{\min}), \frac{v_r}{l} \tan(\delta_{\max})\right]. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Αν θεωρήσουμε  $R$  την ακτίνα του τόξου κύκλου στο οποίο κινείται το όχημα τότε:

$$R = \frac{u_r}{\omega}, \dot{\alpha} \rho \alpha \\ \tan(\delta) = \frac{L}{R} \quad (2.7)$$

Σε αυτήν την περίπτωση, το μοντέλο αναφέρεται ως μοντέλο ποδηλάτου δεδομένου ότι μπορεί να προκύψει εξετάζοντας τη κίνηση ενός μόνο τροχού.



Σχήμα 2.13: Κινηματικό μοντέλου ποδηλάτου δύο τροχών [3]

### 2.3.2 Κρυφά μαρκοβιανά μοντέλα

Όπως περιγράφεται πολύ αναλυτικά στο [11] ένα κρυφό μαρκοβιανό μοντέλο ή Hidden Markov Model (HMM) είναι ένα μοντέλο μαρκοβιανής αλυσίδας και περιγράφει συστήματα που αποτελούν μαρκοβιανές διαδικασίες με κρυφές (hidden) καταστάσεις. Μια μαρκοβιανή αλυσίδα είναι ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της πιθανότητα για την ακολουθία τυχαίων μεταβλητών ή καταστάσεων. Οι καταστάσεις μπορεί να είναι απλές λέξεις, ταμπέλες ή σύμβολα που περιγράφουν το οτιδήποτε όπως για παράδειγμα τον καιρό. Σε μια μαρκοβιανή αλυσίδα γίνεται η παραδοχή ότι αν επιθυμείτε η πρόβλεψη της αλληλουχία των καταστάσεων του συστήματος που μελετάμε, το μόνο που επηρεάζει τη πρόβλεψη είναι η τωρινή κατάσταση του συστήματος. Οι προηγούμενες καταστάσεις στο σύστημα δεν έχουν καμία επιρροή στις μελλοντικές καταστάσεις του συστήματος. Ένα παράδειγμα μία μαρκοβιανής αλυσίδας είναι ο καιρός, για την πρόβλεψη του καιρού τις επόμενες μέρες θα μπορούσε να ληφθεί υπόψιν ο καιρός της σημερινής ημέρας, ο καιρός όμως των προηγούμενων ημερών δεν μπορεί να επηρεάσει με κάποιο τρόπο των καιρό των επόμενων ημερών και δεν θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Μαθηματικά θεωρούμε ένα σύνολο μεταβλητών  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ , ένα μαρκοβιανό μοντέλο εισάγει την παραδοχή για την ανεξαρτησία από το παρελθόν στη πιθανότητα για την ακολουθία των μεταβλητών :

$$\text{Markov Assumption : } P(q_i = a | q_1 \dots q_{i-1}) = P(q_i = a | q_{-1}) \quad (2.8)$$

Ένα μοντέλο μαρκοβιανής αλυσίδας είναι χρόσιμο όταν πρέπει να γίνει πρόβλεψη μιας ακολουθίας παρατηρήσιμων μεταβλητών. Πολλές φορές όμως οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν δεν είναι άμεσα παρατηρήσιμες (hidden) όπως για παράδειγμα αν θέλουμε να προβλέψουμε την συναισθηματική κατάσταση ενός ατόμου δεν μπορούμε να την παρατηρήσουμε άμεσα, μπορούμε όμως να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά του και μέσω αυτής να προβλέψουμε και την ψυχολογική του κατάσταση.

Τα κρυφά μαρκοβιανά μοντέλα εμπεριέχουν τις έννοιες των παρατηρήσιμων και των κρυφών καταστάσεων όπου οι κρυφές καταστάσεις είναι αυτές που δεν μπορούμε να παρατηρηθούν άμεσα αλλά για την πρόβλεψη τους χρησιμοποιούνται οι παρατηρήσιμες καταστάσεις.

Ενα κρυφό μαρκοβιανό μοντέλο ορίζεται από τις παρακάτω μεταβλητές.

$Q = q_1, q_2, \dots, q_n$  : Μία ακολουθία από καταστάσεις.

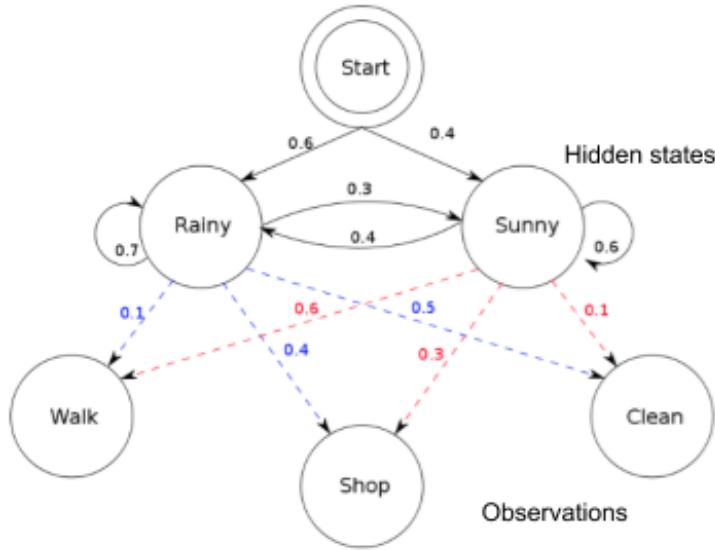
$A = a_{11} \dots a_{ij} \dots a_{NN}$  : Πίνακας πιθανοτήτων των μεταβάσεων. Κάθε στοιχείο  $a_{ij}$  αντιστοιχεί στην πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση  $i$  στην κατάσταση  $j$ . Ισχύει ότι  $\sum_{j=1}^N a_{ij} = 1 \forall i$

$O = o_1 o_2 \dots o_T$  : Μια ακολουθία από παρατηρήσεις.

$B = b_i(0_t)$  : Η ακολουθία πιθανοτήτων των παρατηρήσεων, ονομάζονται επίσης πιθανότητες εκπομπής (emission probabilities), η κάθε μία εκφράζει την πιθανότητα μια παρατήρηση  $o_t$  να έχει προκύψει από την κατάσταση  $i$ .

$\pi = \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N$  : Η αρχική κατανομή πιθανοτήτων των καταστάσεων, περιγράφει την πιθανότητα κάθε κατάστασης να είναι η αρχική κατάσταση του συστήματος. Αν κάποια κατάσταση  $j$  έχει  $\pi_j = 0$  αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί το σύστημα να ξεκινήσει από αυτή την κατάσταση. Ισχύει ότι  $\sum_{j=1}^N \pi_j = 1$ .

Στο παρακάτω σχήμα 2.14 οι κρυφές καταστάσεις  $Q$  είναι Rainy, Sunny, οι παρατηρήσεις  $O$  είναι Walk, Shop, Clean, το σύστημα ξεκινάει από τη κατάσταση start και οι μεταβάσεις αντιστοιχούν στην αρχική κατανομή των πιθανοτήτων  $\pi$ , οι αριθμοί πάνω από τις μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων είναι οι πιθανότητες των μεταβάσεων  $A$  και τέλος οι αριθμοί στις ενώσεις που συγδέουν τις καταστάσεις με τις παρατηρήσεις είναι οι πιθανότητες εκπομπής  $B$ .



Σχήμα 2.14: Παράδειγμα ενός χρυφού μαρκοβιανού μοντέλου<sup>13</sup>

### 2.3.3 Προσομοιωτής Carla

Ο Carla είναι προσομοιωτής οδήγησης ανοιχτού κώδικα. Κατασκευάστηκε για να χρησιμοποιηθεί ως μία ευέλικτη διεπαφή προγραμματισμού για αυτόνομο οχήματα και για την εκτέλεση μιας σειράς εργασιών που εμπλέκονται στο πρόβλημα της αυτόνομης οδήγησης. Ένας από τους κύριους στόχους του προσομοιωτή Carla είναι να δώσει την ευκαιρία σε περισσότερους χρήστες για ενασχόληση με την αυτόνομη οδήγηση, να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο εύκολο στην πρόσβαση και στην προσαρμογή του από τους χρήστες. Για να γίνει αυτό, ο προσομοιωτής πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις διαφορετικών περιπτώσεων χρήσης στο γενικό πρόβλημα της οδήγησης (π.χ. εκμάθηση πολιτικών οδήγησης, αλγόριθμοι εκπαίδευσης αντίληψης κλπ.). Ο Carla στηρίζεται στο Unreal Engine (σύστημα λογισμικού σχεδιασμένο για τη δημιουργία και την ανάπτυξη βιντεοπαιχνιδών) για την εκτέλεση της προσομίωσης και χρησιμοποιεί το πρότυπο OpenDRIVE (ανοιχτή μορφή αρχείου για τη λογική περιγραφή των οδικών δικτύων) για τον σχεδιασμό των δρόμων και κανόνων οδήγησης. Ο έλεγχος της προσομίωσης παρέχεται μέσω ενός API (Application Programming Interface ή Διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με γλώσσες προγραμματισμού Python και C++. Ο προσομοιωτής Carla έχει επιλεχθεί να χρησιμοποιηθεί για τις δοκιμές των αλγορίθμων αυτόνομης οδήγησης που θα δημιουργηθούν στην παρούσα διπλωματική καθώς και για την εκτέλεση των πειραμάτων. Ο εν λόγω προσομοιωτής αποτελεί ένα αρκετά εύχρηστο και λειτουργικό εργαλείο, για την επιλογή του έγινε σύγκριση με άλλους προσομοιωτές, μία λίστα από τους προσομοιωτές που εξετάστηκαν είναι :

1. Carla Simulator
2. CarND Udacity Simulator
3. Metamoto

4. LGSVL
5. Autoware
6. Apollo
7. TORCS
8. Gazebo based vehicle\_sim
9. Gazebo based CPFL/car\_demo
10. Donkey Car Simulator
11. RFPRO
12. Cognata
13. AirSim

Από την παραπάνω λίστα προσομοιωτών οι πιο κατάλληλοι για τον σκοπό της διπλωματικής εργασίας κρίθηκαν ο Carla και ο LGSVL προσομοιωτές, στην συνέχεια έγινε σύγκριση των χαρακτηριστικών τους, κάποια από τα οποία παρουσιάζονται στην συνέχεια στο πίνακα 2.2, και επιλέχθηκε τελικά ως καταλληλότερος για χρήση ο Carla προσομοιωτής 2.15.

Carla	LGSVL
<p><b>Weather:</b> Ο καιρός αλλάζει σε συγκεκριμένες προεπιλεγμένες καταστάσεις, μπορεί να πάρει τιμές από τον χρήστη ή και να αλλάζει δυναμικά κατά την διάρκεια εκτέλεσης του simulation. Εμφανίζει κάποια σφάλματα όπως βροχή κάτω από γέφυρα. Μεταβλητές συννεφιά, βροχή, θέση του ήλιου και άνεμος.</p> <p><b>Code languages:</b> Υποστηρίζει προγραμματισμό με C++ και με python.</p> <p><b>Game engine:</b> Unreal Engine framework.</p> <p><b>Create new map:</b> Για κατασκευή νέου χάρτη χρησιμοποιούνται τα προγράμματα VectorZero RoadRunner(εμπορικό πρόγραμμα) και Unreal engine.</p> <p><b>Scenarios:</b> Μπορεί να χρησιμοποιηθεί το Python API για τον σχεδιασμό συγκεκριμένων σεναρίων οδήγησης.</p> <p><b>Sensors:</b> Λίστα με τους αισθητήρες που διαθέτει το carla είναι: RGB camera, RGB camera with distortion, RGB camera with extra attributes, Depth camera, Semantic segmentation camera with 12 objects, Lidar sensor, Collision sensor, Lane invasion, GNSS sensor, Obstacle sensor, IMU sensor, Radar sensor. Carla διαθέτει επιπλέον αισθητήρες που μπορούν να δίνουν ειδοποίηση για διάφορα γεγονότα όπως safety-distance sensors, cross line sensor, collision sensors, lane departure, sidewalk invasion, traffic light or stop line ignore.</p>	<p><b>Weather:</b> Παρόμοιο με το carla όσον αφορά τις δυνατότητες του χρήστη, οι μεταβλητές που μπορούν να αλλάξουν είναι η βροχή, οικίχλη, ώρα της ημέρας, υγρασία σου δρόμου.</p> <p><b>Code languages:</b> Υποστηρίζει προγραμματισμό μόνο με python.</p> <p><b>Game engine:</b> Unity framework.</p> <p><b>Create new map:</b> Για κατασκευή νέου χάρτη χρησιμοποιείται το περιβάλλον του Unity. Στο μέλλον θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το VectorZero RoadRunner πρόγραμμα για την δημιουργία χάρτη.</p> <p><b>Scenarios:</b> Περιορισμένο.</p> <p><b>Sensors:</b> Οι αισθητήρες που διαθέτει το LGSVL είναι: RGB camera, Depth camera, Semantic segmentation camera with 11 objects, Lidar sensor, 3D Ground Truth, Can-bus, GNSS sensor, IMU sensor, 2D Ground Truth, Radar sensor. Σε μορφή αισθητήρα δίνονται κάποιες επιπλέον λειτουργίες του simulator που δεν είναι στην πραγματικότητα όμως αισθητήρες και έχουν σχέση με την λειτουργία του προσομοιωτή, αυτοί είναι: Control Calibration, Clock, Cruise Control, Wheel Control, Keyboard Control, Vehicle Control.</p>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

**Determinism:** Το carla επιτρέπει να εκτελεστεί ξανά ακριβός το ίδιο σενάριο πολλές φορές δινοντας ακριβώς τα ίδια δεδομένα από τους αισθητήρες και τις καταστάσεις των οχημάτων και των φαναριών του simulator. Ντετερμινιστικές δεν είναι οι κινήσεις των πεζών και ο χρόνος φόρτωσης των υφών του προσομοιωτή.

**Static objects::** Διαθέτει 90 στατικά αντικείμενα, 26 οχήματα, 14 πεζούς.

**Vehicle physics:** Η φυσική του οχήματος είναι αρκετά ρεαλιστική, όπως στην σύγκρουση των οχημάτων και κατά την ολισθηση του οχήματος σε βρεγμένο δρόμο. Διαθέτει την δυνατότητα για έλεγχο των φυσικών χαρακτηριστικών του οχήματος όπως το βάρος του οχήματος, η μέγιστη ταχύτητα, οι τριβές με το οδόστρωμα κλπ.

**Actors:** Μεγάλη ποικιλία από οχήματα και actors όπως ποδήλατα, μηχανάκια, φορτηγά και πεζοί όλων των ηλικιών, επίσης ο χρήστης μπορεί να ελέγχει τους πεζούς.

**World Snapshot:** Μπορεί να γίνει λήψη στιγμιότυπου από το simulator. Έτσι μπορούμε να ξέρουμε την θέση και την κατάσταση για κάθε actor.

**Logging, playback and events query system:** Αυτή η λειτουργία δίνει τη δυνατότητα να καταγραφούν όλες τις καταστάσεις μιας περιόδου προσομοίωσης και να εκτελεστεί αργότερα, υπό τις ίδιες ή διαφορετικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να αποκλειστούν γεγονότα που συνέβησαν κατά την αρχική συνεδρία και να δοκιμαστούν εναλλακτικές επιλογές. Επίσης μπορούμε να τρέξουμε το αποθηκευμένο κομμάτι της προσομοίωσης σε fast forward ή slow motions. Ιδιαίτερα γεγονότα κατά την διάρκεια της προσομοίωσης αποθηκεύονται από μόνο τους και ο χρήστης μπορεί να ξανά παίξει τα στιγμιότυπα για να δει τι συνέβη. Τέτοια γεγονότα είναι συγκρούσεις των οχημάτων μεταξύ τους αλλά και με άλλα αντικείμενα, αυτοκίνητα που είναι μπλοκαρισμένα και δεν μπορούν να κινηθούν για κάποιο λόγο.

**Friction triggers:** Ο χρήστης μπορεί να προσθέσει στο χάρτη σημεία που αλλάζει η τριβή του αυτοκινήτου με το οδόστρωμα επιτρέποντας την προσομοίωση γιατρόματος του αμαξιού.

**Map and waypoints:** Σημεία του χάρτη από τα οποία μπορεί να ξεκινήσει ένα όχημα προς την σωστή κατεύθυνση και θέση για οδήγηση.

**Synchronous mode:** Όταν ενεργοποιηθεί αυτή η λειτουργία ο simulator περιμένει μέχρι να του δώσει ο χρήστης άδεια για να συνεχίσει καλώντας την tick() συνάρτηση. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που ο χρήστης τρέχει απαιτητικά προγράμματα και ο simulator πρέπει να περιμένει.

**Running CARLA without Display and Selecting GPUs:** Ο simulator μπορεί να τρέξει στο παρασκήνιο και να επιλεχθεί ποια κάρτα γραφικών θα χρησιμοποιηθεί, αυτό δίνει την δυνατότητα για καλύτερη κατανομή των εργασιών σε ένα σύστημα με πολλές κάρτες γραφικών.

**Non-sticky vehicle control:** Όταν είναι false σε κάθε frame το control για κάθε actor θα τίθεται στις προκαθορισμένες τιμές, εκτός και αν ο actor δέχεται εντολές κίνησης, αυτό σημαίνει πρακτικά ότι με το που σταματάει να λαμβάνει εντολές το αυτοκίνητο θα ακινητοποιείται.

**Determinism:** Δεν υποστηρίζεται.

**Collecting data in KITTI format:** Τα δεδομένα από τις κάμερες μπορούν να αποθηκευτούν σε αυτή την μορφή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη αλγορίθμων αναγνώρισης αντικειμένων.

**Actors:** Αρκετά πιο περιορισμένη λίστα από οχήματα, επίσης περιορισμένη είναι και η δυνατότητα ελέγχου τους.

**World Snapshot:** Δεν υποστηρίζεται.

**Logging, playback and events query system:** Δεν υποστηρίζεται.

**Synchronous mode:** Το lgsvl δεν προσφέρει παρόμοιο χαρακτηριστικό για τον έλεγχο της ροής της προσομοίωσης. Παρόλα αυτά υποστηρίζονται καποιες callback συναρτήσεις οι οποίες καλούνται και σταματούν την προσομοίωση όταν συμβούν κάποια γεγονότα όπως μια σύγκρουση οχημάτων.

**Running CARLA without Display and Selecting GPUs:** Μπορεί να τρέξει σε headless mode χωρίς γραφικό περιβάλλον. Δεν υπάρχει επιλογή για προκαθορισμένη χρήση gpu.

**Non-sticky vehicle control:** Το ίδιο χαρακτηριστικό προσφέρεται μόνο μέσα από το python API στην μέθοδο ελέγχου του οχήματος.

## 2.3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

**Traffic Manager:** Δίνει την δυνατότητα για έλεγχο των κανόνων κυκλοφορίας και έτσι μπορούμε να καθαρίσουμε την συμπεριφορά των υπόλοιπων οχημάτων, για παράδειγμα μπορούμε να ελέγξουμε την πιθανότητα κάποια οχήματα να περνάνε με κόκκινο, να κάνουν προσπεράσεις, να ξεπερνούν την ανώτατη επιτρεπτή ταχύτητα.

**Traffic scenarios simulation:** Επιτρέπει στους χρήστες να καθορίζουν και να εκτελούν διαφορετικές καταστάσεις κυκλοφορίας βασισμένες σε δομημένες συμπεριφορές.

**ROS integration:** CARLA παρέχεται με την ενσωμάτωση του ROS μέσω της γέφυρας ROS.

**Graphics Quality:** Υποστηρίζει Vulkan είτε OpenGL γραφικά και έχει δύο επιλογές για την ποιότητα των γραφικών είτε Low είτε Epic.

**No-rendering mode:** Είναι δυνατόν να ενεργοποιηθεί πλήρως το rendering και να εκτελεστεί το simulation σε υψηλή συχνότητα, παρόλο αυτά αισθητήρες όπως κάμερες και lidar επιστρέφουν κενά δεδομένα.

**Fixed time-step:** Μπορεί να τρέχει σε μη πραγματικό χρόνο δίνοντας την δυνατότητα να τρέξει όσο πιο γρήγορα μπορεί από το πραγματικό χρόνο.

**Traffic Manager:** Δεν υποστηρίζεται.

**ROS integration:** Υποστηρίζεται αλλά με αρκετά πιο περιορισμένες δυνατότητες.

**No-rendering mode:** Δεν υποστηρίζεται.

**Fixed time-step:** Δεν υποστηρίζεται.

Πίνακας 2.2: Σύγχριση των χαρακτηριστικών των προσομοιωτών Carla και LGSVL



Σχήμα 2.15: Carla Simulator<sup>14</sup>

### 2.3.4 Robot Operating System (ROS)

Το Robot Operating System είναι το πιο διαδεδομένο μεσολειτουργικό σύστημα με εφαρμογή στην ρομποτική και αποτελεί ένα ευέλικτο πλαίσιο για τη σύνταξη λογισμικού ρομπότ. Παρέχει υπηρεσίες παρόμοιες με ένα λειτουργικό σύστημα όπως για παράδειγμα αυτή της διαχείρισης του υλικού, της χρήσης βιβλιοθηκών για την εφαρμογή κοινών λειτουργιών, του ελέγχου συστημάτων χαμηλού επιπέδου, της μετάδοσης μηνυμάτων μεταξύ των εφαρμογών και της διαχείρισης δεδομένων. Αποτελείται από ένα σύνολο βιβλιοθηκών και εργαλείων με στόχο την απλοποίηση της διαδικασίας κατασκευής πολύπλοκων εφαρμογών που εντάσσονται χυρίως στο τομέα της ρομποτικής.

Το ROS διαθέτει μια υβριδική κατανεμημένη αρχιτεκτονική κατά την οποία πρέπει να είναι γνωστός ένας κύριος κόμβος (κόμβος master). Ο κύριος κόμβος χειρίζεται την υπηρεσία ονοματοδοσίας και την υπηρεσία αναζήτησης. Κατά την εκτέλεση της εφαρμογής του ROS παράλληλα με τον κύριο κόμβο κατασκευάζονται επιπλέον κόμβοι για την εξυπηρέτηση επιμέρους λειτουργιών της εφαρμογής. Οι κόμβοι επικοινωνούν είτε ασύγχρονα μέσω topics που αποτελούν δομές επικοινωνία στις οποίες κάποιος κόμβος μπορεί να γράψει (publish) ή να διαβάσει δεδομένα (subscribe), είτε σύγχρονα μέσω υπηρεσιών (services) όπου ένας κόμβος ζητάει άμεσα δεδομένα από έναν άλλο κόμβο. Ένα ακόμη είδος επικοινωνίας για εργασίες μεγαλύτερης διάρκειας είναι τα actions, κατά την εφαρμογή τους ένας κόμβος ζητάει δεδομένα από έναν άλλο αλλά δεν περιμένει για την λήψη τους, συνεχίζει την εκτέλεση των λειτουργιών του και ανά τακτά χρονικά διαστήματα ενημερώνεται για την κατάσταση των δεδομένων που έχει ζητήσει. Εκτός από την ανταλλαγή μηνυμάτων, το ROS υποστηρίζει την εγγραφή και την αναπαραγωγή δεδομένων με χρήση των rosbag αρχείων.

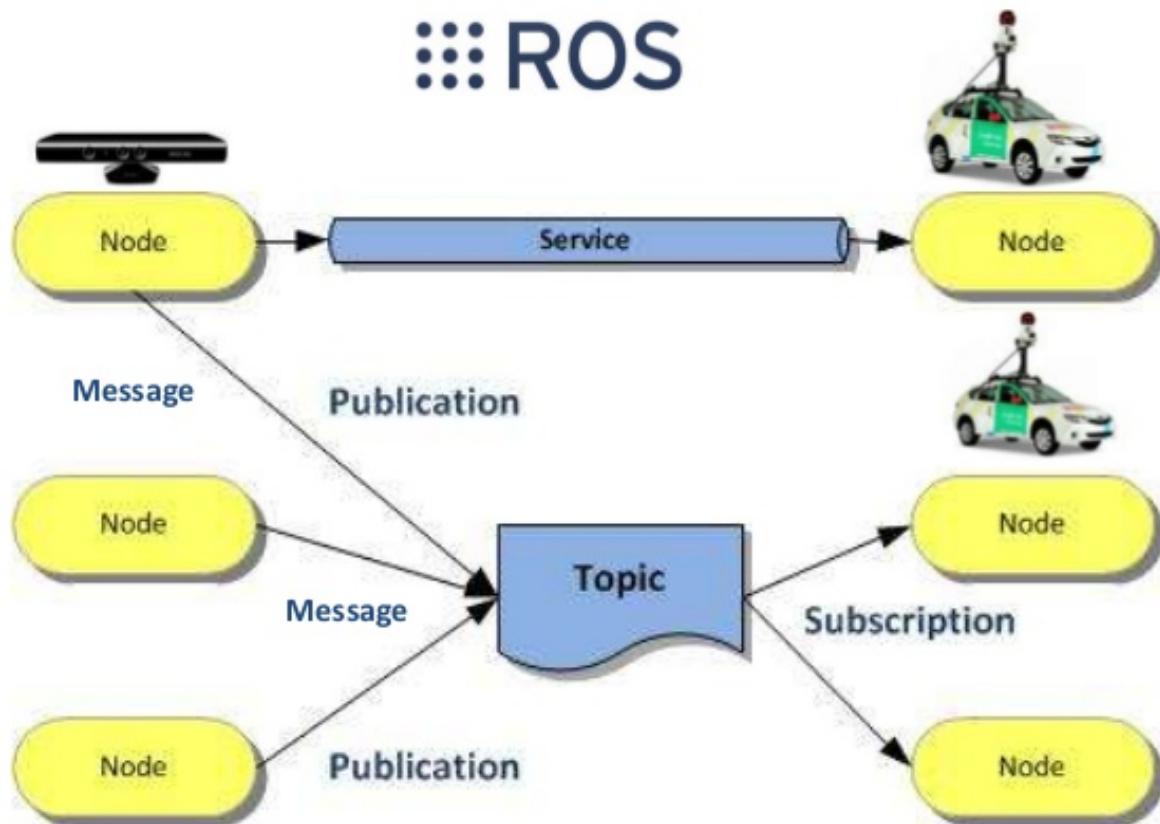
Οι κύριες γλώσσες που χρησιμοποιούνται στο ROS είναι η C++ και η Python. Άλλες δευτερεύουσες γλώσσες περιλαμβάνουν Java, LISP, Octave και LabView. Το ROS εστιάζεται σε συστήματα που βασίζονται σε Unix (Linux, OSX, κλπ.). Έχει επίσης υλοποιηθεί μια μικρή βιβλιοθήκη ROS ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται σε μικροελεγκτές (π.χ. AVR). Το ROS υλοποιεί το μοντέλο πολλαπλών διαδικασιών (multi-process) και πολλαπλών νημάτων (multi-thread).

Ένα από τα ισχυρότερα σημεία του ROS είναι ο μεγάλος αριθμός ρομποτικών πακέτων λογισμικού με drivers και οι αλγόριθμοι ρομποτικής που παρέχει. Για παράδειγμα, πακέτα χαμηλού επιπέδου που παρέχουν κινηματικά μοντέλα, σχεδιασμό κίνησης, Bayesian φιλτράρισμα, μηχανική μάθηση, επεξεργασία εικόνας, αντίληψη τριών διαστάσεων( 3D perception) και πακέτα υψηλού επιπέδου όπως πλοιήγηση, αναγνώριση και χειρισμός αντικειμένων κλπ. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του ROS είναι τα εργαλεία ανάπτυξης ρομποτικών συστημάτων που διαθέτει. Τα εργαλεία αυτά προσφέρουν την δυνατότητα εποπτείας και αποσφαλμάτωση του συστήματος καθώς και γραφική παράσταση και οπτικοποίηση των μεταβλητών και των διαδικασιών του συστήματος. Τα κυριότερα εργαλεία του ROS είναι το rviz για την οπτικοποίηση των πειραμάτων, το rqt για την οπτικοποίηση των δεδομένων και την γραφική απεικόνιση της δομής του συστήματος.

Μια αρκετά απλή μορφή για το σύστημα αντίληψης ενός αυτόνομου οχήματος με χρήση του ROS φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.16. Για κάθε ένα από

### 2.3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

τους αισθητήρες έχουν δημιουργηθεί κόμβοι, οι κόμβοι αυτοί καταγράφουν συνεχώς δεδομένα στα αντίστοιχα topic που έχουν δημιουργηθεί. Στην συνέχεια, για κάθε ένα από τα υποσυστήματα του αυτόνομου οχήματος έχει δημιουργηθεί επίσης ένας κόμβος, αν ένα υποσύστημα χρειάζεται δεδομένα από έναν αισθητήρα τότε ο κόμβος του κάνει εγγραφή στο αντίστοιχο topic και λαμβάνει τα δεδομένα που καταγράφονται από τον αισθητήρα στο topic.



Σχήμα 2.16: Αρχιτεκτονική μεσολογισμικού ROS<sup>15</sup>



# 3

## Γλοποιήσεις

Στην διπλωματική που παρουσιάζεται έχει αναπτυχθεί με χρήση της γλώσσα προγραμματισμού Python ένα σύστημα οδήγησης για αυτόνομο όχημα. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το σύστημα και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του. Για την κατανόηση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν θα διθούν και παραδείγματα.

### 3.1 ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

---

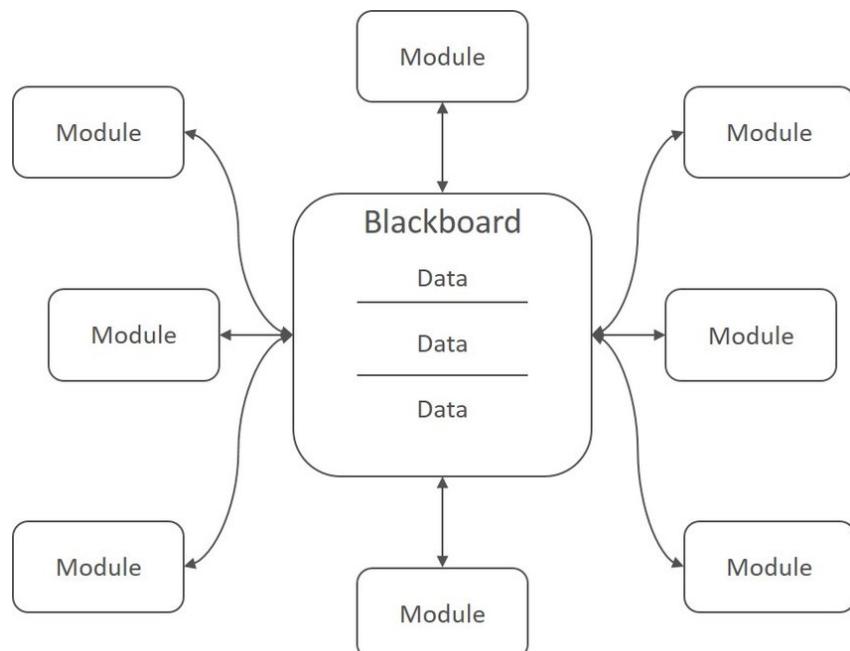
Το όχημα κινείται σε περιβάλλον οδικού δικτύου, οι δρόμοι περιέχουν λωρίδες κυκλοφορίας και μπορεί να είναι μονής ή διπλής κατεύθυνσης. Επίσης, οι δρόμοι περιέχουν σήμανση για υποχρεωτική διακοπή κυκλοφορίας (stop), σήμανση για το όριο ταχύτητας και φωτεινούς σηματοδότες. Τα δυναμικά εμπόδια του περιβάλλοντος είναι οχήματα ή πεζοί. Στην λίστα των οχημάτων περιλαμβάνονται επιβατηγά οχήματα, φορτηγά, μοτοσυκλέτες και ποδήλατα. Τα οχήματα κινούνται σύμφωνα με τους κανόνες οδικής κυκλοφορίας αλλά δεν αποκλείεται το γεγονός ότι μπορεί να τους παραβιάσουν. Επιπλέον, τα οχήματα θεωρείται ότι δεν εκτελούν προσπεράσεις, επίσης, δεν διαθέτουν κάποιου είδους νοημοσύνης η οποία να τους επιτρέπει να κινηθούν λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση του αυτόνομου οχήματος, δημοσίες για παράδειγμα να προσπεράσουν ένα σταματημένο όχημα. Η μόνη κίνηση που μπορούν να εκτελέσουν, η οποία επηρεάζεται από το αυτόνομο όχημα, είναι να σταματήσουν μόνο αν το αυτόνομο όχημα βρίσκεται ακριβώς μπροστά τους. Το αυτόνομο όχημα θεωρείται ότι λαμβάνει δεδομένα που σχετίζονται με πληροφορίες για το δρόμο από φηφιακό προκατασκευασμένο χάρτη. Πληροφορίες που σχετίζονται με τα αντικείμενα στο περιβάλλον όπως είναι οι θέσεις των οχημάτων, η κατάσταση των φωτεινών σηματοδοτών κλπ, το αυτόνομο όχημα τις λαμβάνει από το Carla API αλλά μόνο για τα αντικείμενα που βρίσκονται εντός ενός κύκλου ακτίνας 120 μέτρων, ο κύκλος αυτός αντιστοιχεί στο πεδίο ορατότητας του οχήματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Τα στατικά εμπόδια που βρίσκονται εκτός του δρόμου δεν λαμβάνονται υπόψη και επομένως το σύστημα αντίληψης του οχήματος δεν τα αντιλαμβάνεται παρά μόνο τα δυναμικά εμπόδια.

### 3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

Το σύστημα του αυτόνομου οχήματος έχει κατασκευαστεί με χρήση της αρχιτεκτονικής Blackboard. Στην αρχιτεκτονική Blackboard εξειδικευμένα υποσυστήματα συγκεντρώνουν τις γνώσεις τους για να χτίσουν μια ενδεχομένως, μερική ή κατά προσέγγιση λύση. Χρησιμοποιείται σε συστήματα που η λύση ενός προβλήματος δεν είναι ντετερμινιστική, δηλαδή η σύνδεση μεταξύ του προβλήματος και της λύσεις του δεν είναι πλήρως κατανοητή και υπάρχουν παράγοντες μη εκ των προτέρων γνωστή που επηρεάζουν την λύση του προβλήματος. Το πρόβλημα της αυτόνομης οδήγησης αποτελεί ένα πρόβλημα οδήγησης σε δυναμικό περιβάλλον, επομένως, πολλές παράμετροι δεν είναι δυνατόν να καθοριστούν πλήρως ή να προβλεφθούν. Για αυτό τον λόγο, οι στρατηγικές επίλυσης του προβλήματος είναι αρκετά γενικές και κατανέμονται σε διαφορετικά υποσυστήματα τα οποία είναι υπεύθυνα για την παραγωγή πληροφορίας που θα βοηθήσει στην επίλυση του προβλήματος. Στην αρχιτεκτονική Blackboard, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1, θεωρείται ότι υπάρχουν υποσυστήματα τα οποία μπορούν να εκτελούνται ταυτόχρονα και όλα να γράφουν και να διαβάζουν πληροφορίες από μια κοινή βάση η οποία αναφέρεται ως Blackboard.



Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική Blackboard<sup>16</sup>

### 3.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

#### 3.3.1 Υποσύστημα αντίληψης (Perception subsystem)

Το σύστημα "αντίληψης" είναι υπεύθυνο για την καταγραφή των δεδομένων του περιβάλλοντος του οχήματος, δηλαδή όλης της απαραίτητης πληροφορίας που χρειάζεται το αυτόνομο όχημα για την λειτουργία του όπως πληροφορίες για την δομή του δρόμου, των κανόνων κυκλοφορίας, της κατάστασης των πεζών, των οχημάτων, των φωτεινών σηματοδοτών, της θέσης του οχήματος σε σχέση με τις λωρίδες του δρόμου και τα όρια του δρόμου. Επίσης, το υποσύστημα είναι υπεύθυνο για την διασύνδεση του Carla simulator με το υπόλοιπο σύστημα αυτόνομου οχήματος, δηλαδή λειτουργεί σαν γέφυρα μεταξύ του λογισμικού της αυτόνομης οδήγησης που δημιουργήθηκε στην παρούσα διπλωματική με το Carla simulator. Το σύστημα "αντίληψης" λειτουργεί θεωρώντας ότι λαμβάνεται όλη η απαραίτητη πληροφορία που σχετίζεται με τον δρόμο και τους κανόνες κυκλοφορίες από έναν προκατασκευασμένο χάρτη που περιέχει την εν λόγω πληροφορία όπως είναι η γεωμετρία των δρόμων και οι θέσεις των σηματοδοτών.

#### 3.3.2 Υποσύστημα πρόβλεψης (Prediction subsystem)

Η διαδικασία οδήγησης απαιτεί την πρόβλεψη της κατάστασης των πεζών και των οχημάτων. Το υποσύστημα "πρόβλεψης" του συστήματος της αυτόνομης οδήγησης χρησιμοποιεί την πληροφορία που λαμβάνεται από το σύστημα αντίληψης και παράγει πληροφορία για την μελλοντική κίνηση ή κατάσταση των πεζών και των οχημάτων. Τα δεδομένα που παράγονται από το υποσύστημα πρόβλεψης χρησιμοποιούνται από τα υποσυστήματα "επιλογής συμπεριφοράς" και "σχεδίασης τοπικών διαδρομών" τα οποία παρουσιάζονται στην συνέχεια.

#### 3.3.3 Υποσύστημα επιλογής συμπεριφοράς (Maneuver generator subsystem)

Αυτό το υποσύστημα έχει στην ουσία τον ρόλο του εγκεφάλου του συστήματος αυτόνομης οδήγησης, αποτελεί τη βασικότερη υπομονάδα ολόκληρου του συστήματος. Το εν λόγω υποσύστημα παράγει την συμπεριφορά του οχήματος, δεδομένου της κατάστασης του οχήματος και του περιβάλλοντος χώρου, το υποσύστημα "επιλογής συμπεριφοράς" θα πρέπει να παράσχει την κατάλληλη συμπεριφορά ή αλλιώς τον ελιγμό που θα πρέπει να εκτελέσει το όχημα. Μέσα από μια λίστα συμπεριφορών ή διαφορετικά ελιγμών, η μονάδα επιλογής συμπεριφοράς πρέπει να αξιολογήσει την κατάσταση και να επιλέξει την πιο κατάλληλη συμπεριφορά για το όχημα. Στην συνέχεια, η επιλεγμένη συμπεριφορά πρέπει να εκτελεστεί για να παράσχει την πληροφορία που χρησιμοποιείται από το υποσύστημα "σχεδίασης τοπικών διαδρομών" για την κατασκευή τοπικών εναλλακτικών διαδρομών. Με το όρο εκτέλεση εννοείται η παραγωγή πληροφορίας σχετικά με τα χαρακτηριστικά των εναλλακτικών διαδρομών και της κίνησης του οχήματος.

### 3.3.4 Ύποσύστημα σχεδίασης τοπικών διαδρομών (Local path planning subsystem)

Το όχημα κατά την κίνηση του πρέπει να έχει την δυνατότητα της επιλογής εναλλακτικών διαδρομών. Το συγκεκριμένο υποσύστημα παράγει ένα σύνολο από τοπικά εναλλακτικά μονοπάτια τα οποία διαφοροποιούνται μεταξύ τους, κατά κύριο λόγο ως προς την κατεύθυνση και την ταχύτητα του οχήματος. Μετά την κατασκευή των μονοπατιών τα μονοπάτια αξιολογούνται με κριτήρια που σχετίζονται με την γεωμετρία τους και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος και στην συνέχεια επιλέγεται τελικά το καταλληλότερο μονοπάτι. Οι πληροφορίες, που χρειάζονται για την κατασκευή και την αξιολόγηση των μονοπατιών, παράγονται κυρίως από το υποσύστημα "επιλογής συμπεριφοράς". Στην συνέχεια, το μονοπάτι που θα επιλεχθεί χρησιμοποιείται από το υποσύστημα "ελέγχου".

### 3.3.5 Ύποσύστημα ελέγχου (Control subsystem)

Το υποσύστημα "ελέγχου" είναι υποσύστημα χαμηλού επιπέδου και χρησιμοποιείται για να ελέγξει τη κίνηση του οχήματος. Δεδομένου της επιθυμητής ταχύτητας και της επιθυμητής διαδρομής, το υποσύστημα παράγει τις κατάλληλες τιμές για τα πεντάλ (γκάζι, φρένο) του οχήματος και για την γωνία περιστροφής του τιμονιού, ώστε το όχημα να έχει την επιθυμητή ταχύτητα και κατεύθυνση. Το υποσύστημα "ελέγχου" χρησιμοποιεί την πληροφορία που παράχθηκε από το υποσύστημα "σχεδίασης τοπικών διαδρομών" για να υπολογίσει τις απαραίτητες τιμές ελέγχου για το όχημα, οι τιμές αυτές εφαρμόζονται στην συνέχεια στο όχημα μέσω του Carla προσομοιωτή.

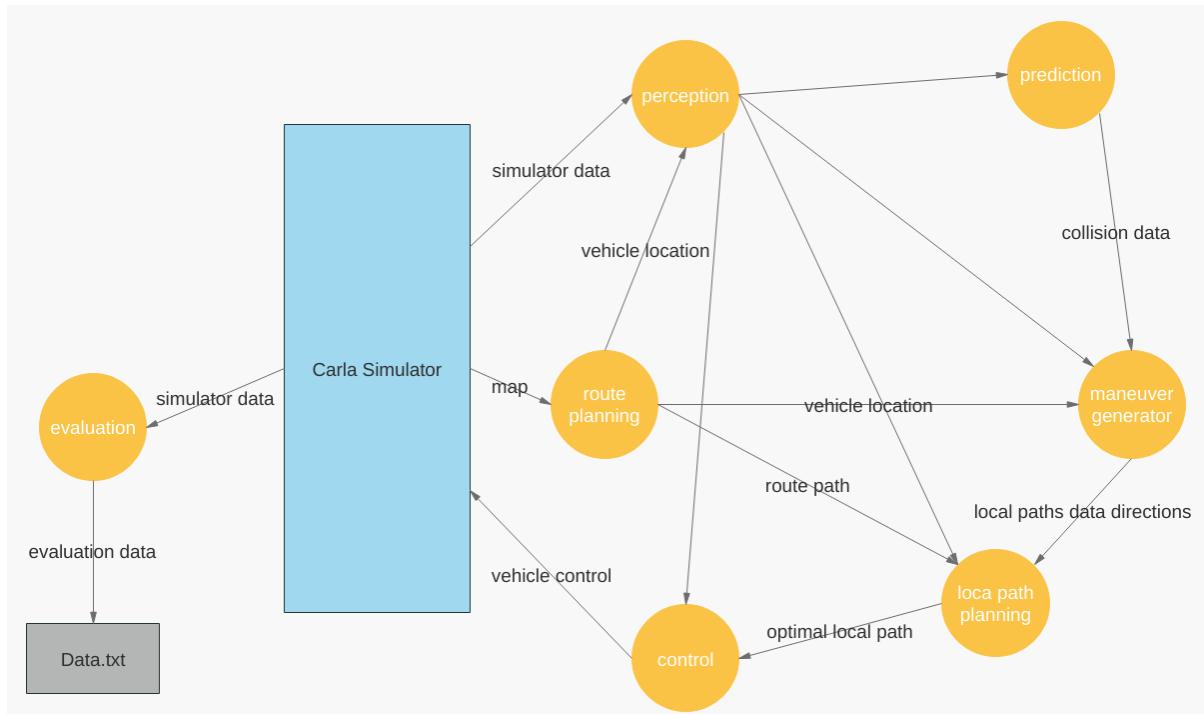
### 3.3.6 Ύποσύστημα κατασκευής βασικού μονοπατιού (Route planning subsystem)

Το υποσύστημα "κατασκευής βασικού μονοπατιού" χρησιμοποιεί τον χάρτη του Carla προσομοιωτή και ένα σημείο στόχο για να παράσχει την βασική διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει το όχημα, επίσης, είναι υπεύθυνο για τον εντοπισμό του οχήματος μέσα στο μονοπάτι που παράχθηκε. Η βασική διαδρομή χρησιμοποιείται από το υποσύστημα "σχεδίασης τοπικών διαδρομών" για την κατασκευή των τοπικών εναλλακτικών διαδρομών.

### 3.3.7 Ύποσύστημα αξιολόγησης αυτόνομου οχήματος (Evaluation subsystem)

Το συγκεκριμένο υποσύστημα δεν είναι κοινά με το συστήματος οδήγησης του αυτόνομου οχήματος, χρησιμοποιείται στο στάδιο της αξιολόγησης του οχήματος. Το υποσύστημα καταγράφει πληροφορίες για το όχημα και το περιβάλλον και αξιολογεί την απόδοση του συστήματος αυτόνομης οδήγησης. Τα δεδομένα αξιολόγησης αποθηκεύονται σε ένα αρχείο ώστε στην συνέχεια να αναλυθούν.

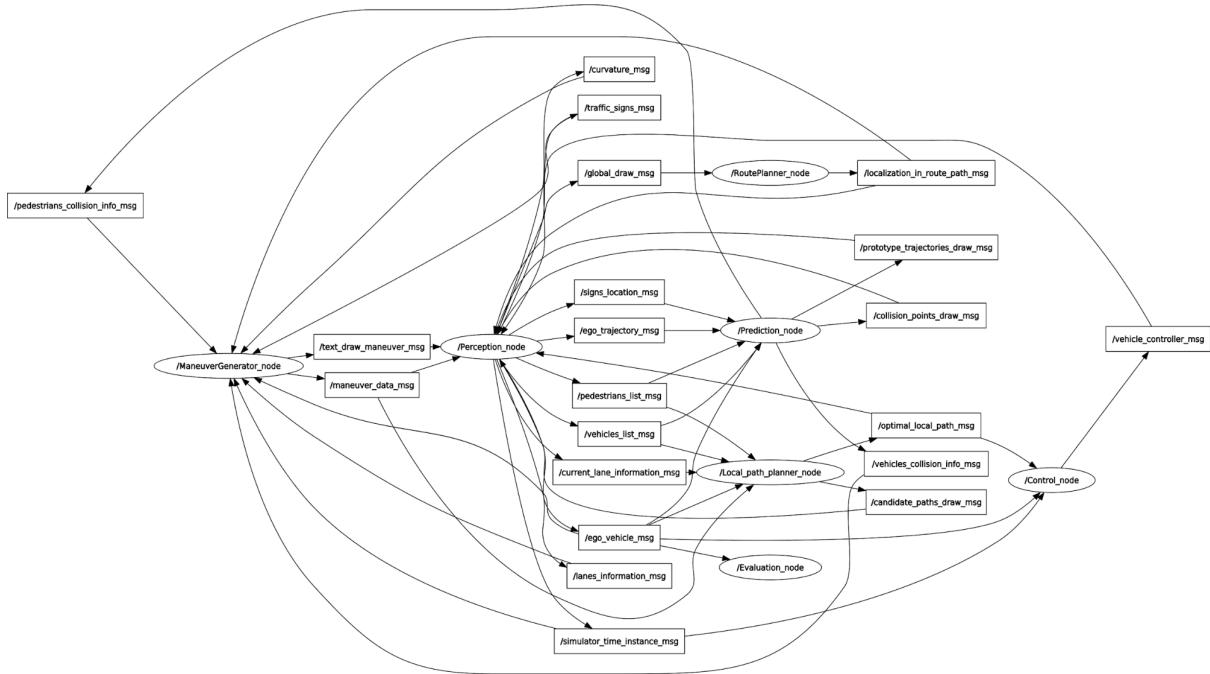
Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται μια γενική περιγραφή των υποσυστημάτων και των βασικών πληροφοριών που ανταλλάσσονται.



Σχήμα 3.2: Υποσυστήματα του συστήματος αυτόνομης οδήγησης

### 3.3.8 Χρήση του ROS

Με χρήση του μεσολογισμικού ROS το κάθε υποσύστημα εκτελείται ως κόμβος (nodes), με αυτό τον τρόπο τα υποσυστήματα εκτελούνται παράλληλα και καταγράφουν (publish) τις πληροφορίες που παράγουν σε topics. Τα υποσυστήματα διαβάζουν (subscribe) τις πληροφορίες που χρειάζονται από τα αντίστοιχα topics των υπόλοιπων υποσυστημάτων. Τα topics έχουν τον ρόλο του Blackboard στον οποίο γράφονται και διαβάζονται οι πληροφορίες που παράγονται από τα υποσυστήματα. Με χρήση του `rqt_graph` εργαλείου του ROS, κατασκευάζεται το παρακάτω διάγραμμα 3.3 στο οποίο αναπαρίστανται τα υποσυστήματα σε μορφή κόμβων (nodes) με τα ελλειφοειδή πλαίσια και τα topics με τα ορθογώνια πλαίσια. Επίσης, παρουσιάζονται και οι μεταξύ τους διασυνδέσεις επικοινωνίας για την εγγραφή και την ανάγνωση των δεδομένων.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα διασύνδεσης των nodes και των topics του συστήματος

## 3.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΛΗΨΗΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

---

### 3.4.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία της αντίληψης σε ένα αυτόνομο όχημα χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό αισθητήρων και καμερών υψηλής τεχνολογίας, σε συνδυασμό με σύγχρονο λογισμικό για την επεξεργασία και την κατανόηση του περιβάλλοντος γύρω από το όχημα σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα αντίληψης (perception system) ενός αυτόνομου οχήματος παρατηρεί το περιβάλλον και την αλληλεπίδρασή του με το όχημα. Συνήθως, καλύπτει λειτουργίες όπως η αίσθηση (sensing), τη συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρων (sensor fusion), τον εντοπισμό (localization) αντικειμένων στο περιβάλλον και γενικότερα λειτουργιών που είναι παρόμοιες με την αντίστοιχη διαδικασία αντίληψης του ανθρώπου. Με την ενσωμάτωση όλων αυτών των εργασιών, γίνεται κατανοητή η κατάσταση του εξωτερικού κόσμου με βάσει τα δεδομένα των αισθητήρων. Δεδομένου των πληροφορίες από το σύστημα αντίληψης, ένα σύστημα αυτόνομης οδήγησης πρέπει να λαμβάνει τις κατάλληλες αποφάσεις για τον έλεγχο του οχήματος. Ο στόχος είναι το όχημα να πλοηγηθεί ακολουθώντας μια προγραμματισμένη διαδρομή προς τον προορισμό, αποφεύγοντας τις συγκρούσεις με οποιοδήποτε στατικό ή δυναμικό εμπόδιο. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, οι αποφάσεις και οι λειτουργίες ελέγχου που προέρχονται από τα αντίστοιχα υποσυστήματα υπολογίζουν την καθολική διαδρομή με βάσει έναν αποθηκευμένο χάρτη στην βάση δεδομένων, σχεδιάζουν συνεχώς τη σωστή κίνηση του οχήματος και δημιουργούν τοπικές τροχιές για την αποφυγή εμποδίων.

Το σύστημα αντίληψης λειτουργεί ως διασύνδεση μεταξύ του πραγματικού κόσμου και του οχήματος, ένα ακριβές σύστημα αντίληψης είναι εξαιρετικά αριστικό.

### 3.4. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΛΗΨΗΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

---

Εάν χρησιμοποιούνται ανακριβείς πληροφορίες αντίληψης για την καθοδήγηση του συστήματος αποφάσεων και ελέγχου του οχήματος, ένα αυτόνομο όχημα μπορεί να λάβει λανθασμένες αποφάσεις, με αποτέλεσμα την κακή απόδοση οδήγησης ή ακόμα χειρότερα ένα ατύχημα. Για παράδειγμα, εάν το σύστημα ανίχνευσης σημάτων κυκλοφορίας αποτύχει στο να αναγνωρίσει ένα σήμα STOP, το σύστημα ελέγχου ενδέχεται να μην λάβει τη σωστή απόφαση και το όχημα να μην σταματήσει, οδηγώντας με αυτό το τρόπο το όχημα προς ένα πιθανό ατύχημα.

#### 3.4.2 Περιγραφή υλοποίησης

Για την απόκτηση πληροφορίας από το περιβάλλον σχετιζόμενη με τα αντικείμενα και τον χώρο χρησιμοποιήθηκε το API του Carla. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από το API επεξεργάζονται κατάλληλα και μετατρέπονται σε πληροφορία ρεαλιστική για το αυτόνομο όχημα, δηλαδή δεδομένα που θα μπορούσε πραγματικά να έχει ένα όχημα από το αντίστοιχο σύστημα αντίληψης και τα αισθητήρια όργανα. Το πεδίο αντίληψης του οχήματος βρίσκεται εντός ενός κύκλου των 120 μέτρων γύρω από το όχημα. Τα δεδομένα του δρόμου είναι ίδια με αυτά που μπορεί να λάβει ένα όχημα από ένα προκατασκευασμένο χάρτη. Τα βασικότερα δεδομένα που λαμβάνονται από το API είναι:

- Η θέση και η ταχύτητα των οχημάτων και τον πεζών.
- Η θέση επερχόμενου stop μπροστά από το όχημα.
- Η θέση και η τιμή επερχόμενου ορίου ταχύτητας.
- Η κατάσταση και η θέση των φωτεινών σηματοδοτών.
- Η θέση των σημείων του μέσου των λωρίδων κυκλοφορίας.
- Η κατεύθυνση της λωρίδας.

Το σύστημα αντίληψης που κατασκευάστηκε στην παρούσα διπλωματική περιέχει όλες τις κατάλληλες αλγορίθμικές διαδικασίες ώστε να μετατρέψει τα παραπάνω δεδομένα που λαμβάνονται από το API σε χρήσιμη πληροφορία για το όχημα. Για παράδειγμα, γνωρίζοντας την θέση των οχημάτων μπροστά από το αυτόνομο όχημα και τις θέσεις των λωρίδων του δρόμου, το σύστημα αντίληψης υπολογίζει την απόσταση από το μπροστινό όχημα και τις θέσεις των οχημάτων σε σχέση με τις λωρίδες. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να ελέγξουμε αν υπάρχει όχημα στην αριστερή λωρίδα του αυτόνομου οχήματος με σκοπό να γίνει έλεγχος για το αν είναι δυνατόν το αυτόνομο όχημα να εκτελέσει μία μανούβρα προσπέρασης ή μεταφοράς στην αριστερή λωρίδα. Ένα ακόμα παράδειγμα του τρόπου χρήση του συστήματος αντίληψης είναι ο υπολογισμός για επερχόμενη στροφή. Το αυτόνομο όχημα λαμβάνει την πληροφορία για τα σημεία του μέσου της λωρίδας στην οποία κινείται και εφαρμόζοντας κατάλληλη γεωμετρική ανάλυση υπολογίζεται η καμπυλότητα του δρόμου. Επομένως, το όχημα μπορεί να χρησιμοποιήσει την συγκεκριμένη, για παράδειγμα να μειώσει την ταχύτητα του σε περίπτωση που πλησιάζει κάποια απότομη στροφή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

### 3.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

#### 3.5.1 Εισαγωγή

Ένα αυτόνομο δίχημα λειτουργεί μέσα σε ένα περιβάλλον με δυναμικά αντικείμενα αλλά και στατικά αντικείμενα όπως είναι για παράδειγμα τα υπόλοιπα οχήματα του δρόμου, οι πεζοί ή ένας κώνος σήμανσης. Το δίχημα επίσης ταυτόχρονα με την αποφυγή των δυναμικών και των στατικών εμποδίων θα πρέπει να ακολουθεί τους κανόνες οδικής κυκλοφορίας, να προσαρμόζει την ταχύτητα του σύμφωνα με το ανώτατο όριο ταχύτητας, τα σταματάει σε διασταυρώσεις και σε σημεία υποχρεωτικής διακοπής πορείας και να προσαρμόζει την κίνηση του σύμφωνα με τους σηματοδότες. Έτσι, προκύπτει στο συμπέρασμα ότι το αυτόνομο δίχημα θα πρέπει κάθε στιγμή να έχει μία συμπεριφορά που θα καθοδηγεί το αυτόνομο δίχημα με ασφάλεια και με σεβασμό στους κανόνες κυκλοφορίας. Οι συμπεριφορές του αυτόνομου οχήματος μπορεί να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το δίχημα, ένα σύνολο πιθανών συμπεριφορών που μπορεί να έχει ένα αυτόνομο δίχημα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3.4.

	Urban Mode	Highway Mode	Vehicle Follower	Stop&Go	Crossroad Selection	Parking
LKS + ACC	*	*				
Offroad Driving	*					
Ditch Keeping	*	*				
Wall Following	*					
GPS Follower	*					
Freespace driving	*	*	*	*	*	*
Overtake	*	*	*			
Lane Changer		*	*			
Vehicle Following				*		
Roundabout Intersection						*
T Intersection						*
Highway Entrance/Exit						*
Traffic Light	*					*
Angled Parking						*
Parallel Parking						*

Σχήμα 3.4: Πιθανές συμπεριφορές ανά περιβάλλον λειτουργίας του οχήματος [18]

Με τον όρο συμπεριφορά εννοείται ένα σύνολο παραμέτρων που είναι απαραίτητες για να καθοδηγήσουν το δίχημα με ασφάλεια. Αυτοί οι παράμετροι θα μπορούσαν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, σε αυτές που δίνουν πληροφορίες για την κατεύθυνση του οχήματος και σε αυτές που δίνουν πληροφορίες για την ταχύτητα του οχήματος. Οι συμπεριφορές που έχουν επιλεχθεί έχουν χωρίστει σε 3 κατηγορίες, μια κατηγορία για αυτές που ελέγχουν μόνο την κατεύθυνση, άλλη μια κατηγορία για αυτές που ελέγχουν μόνο την ταχύτητα και η τελευταία κατηγορία για αυτές τις συμπεριφορές που ελέγχουν την ταχύτητα και την κατεύθυνση ταυτόχρονα. Η αξιολόγηση των συμπεριφορών παρόλα αυτά χωρίζεται σε δύο ομάδες, η μία ομάδα αποτελείται από αυτές τις συμπεριφορές που ελέγχουν μόνο ταχύτητα και η δεύτερη ομάδα από όλες τις υπόλοιπες συμπεριφορές. Από κάθε ομάδα επιλέγετε σε κάθε κύκλο αξιολόγησης η πιο κατάληγη συμπεριφορά.

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιαστούν οι συμπεριφορές που έχουν υλοποιηθεί στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας και η μέθοδος με την οποία γίνεται η αξιολόγηση και η επιλογή των συμπεριφορών του αυτόνομου οχήματος.

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

#### 3.5.2 Ανάλυση απόφασης πολλαπλών κριτηρίων

Η ανάλυση απόφασης πολλαπλών κριτηρίων (Multi-Criteria Decision Analysis ή MCDA), είναι ένα πολύτιμο εργαλείο που μπορεί να εφαρμοστεί σε σύνθετες αποφάσεις για την επιλογή της καλύτερης απόφασης. Είναι πιο κατάλληλο για την επίλυση προβλημάτων που πρέπει να γίνει επιλογή μιας λύσης μεταξύ εναλλακτικών λύσεων. Η μέθοδος συγχρίνει όλες τις δυνατές επιλογές για την λύση ενός προβλήματος με τη χρήση πολλαπλών και πολλές φορές συγκρουόμενων κριτηρίων αξιολόγησης. Τα κριτήρια αξιολόγησης αντιστοιχούν σε μετρικές του προβλήματος που υποδεικνύουν την καταλληλότητα της λύσης. Ένα κριτήριο αξιολόγησης συνοδεύεται από μια συνάρτηση αξιολόγησης ή αλλιώς αντικειμενική συνάρτηση, η οποία αξιολογεί κάθε λύση ή επιλογή για το πρόβλημα, λαμβάνοντας υπόψη το συγκεκριμένο κριτήριο, και παράγει μια τιμή για την κάθε λύση ή επιλογή. Συνυπολογίζοντας όλες τις συναρτήσεις αξιολόγησης για κάθε επιλογή, παράγεται μια τιμή για κάθε λύση που δείχνει κατά πόσο ικανοποιεί τα κριτήρια που έχουν οριστεί και άρα προκύπτει και η καλύτερη λύση για το πρόβλημα.

Μαθηματικά το μοντέλο μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$q_i = f_i : \text{Όπου } f_i \text{ η συνάρτηση αξιολόγησης για το } i \text{ κριτήριο και } q_i \text{ η τιμή της στην τρέχουσα κατάσταση.}$

$g_j = W(q_1, q_2, \dots, q_n)$ , για την  $j$  λύση του προβλήματος: Συνάρτηση συνυπολογισμού όλων των αξιολογήσεων για κάθε λύση  $j$ . Συνήθως, είναι συνάρτηση βαρών όπου προσδίδει διαφορετικό βάρος σε κάθε κριτήριο για την τρέχουσα λύση.

$W(q_1, q_2, \dots, q_n) = \sum_{i=1}^n w_i q_i : \text{Συνάρτηση βαρών σταθμισμένων μεταβλητών.}$

$\max(q_j)$ ,  $j$  οι εναλλακτικές λύσεις : Η καλύτερη λύση για του προβλήματος.

#### 3.5.3 Μέθοδος επιλογής συμπεριφοράς

Για την επιλογή της κατάλληλης συμπεριφοράς από το όχημα θα χρησιμοποιηθεί η ανάλυση απόφασης πολλαπλών κριτηρίων (MCDA). Παρόμοια τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί και στο [12]. Στην παρούσα διπλωματική η τεχνική που έχει χρησιμοποιηθεί έχει εστιάσει στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η επιλογή και η αξιολόγηση των συμπεριφορών. Επιπλέον, κατά την ανάλυση απόφασης πολλαπλών κριτηρίων έχουν εισαχθεί οι έννοιες των περιορισμών, των ενεργών επιλογών και ενεργών κριτηρίων. Με αυτό το τρόπο δεν συνυπολογίζονται όλα τα κριτήρια κάθε στιγμή για την αξιολόγηση της καλύτερης συμπεριφοράς και επίσης δεν είναι διαθέσιμες πάντα όλες οι συμπεριφορές.

Αρχικά ορίζουμε μια λίστα από συμπεριφορές που επιθυμούμε για το όχημα. Οι συμπεριφορές που θα διαλέξουμε μπορεί να είναι εξαρτημένες ή ανεξαρτητες μεταξύ τους. Ανεξαρτητες ορίζονται οι συμπεριφορές που μπορεί να είναι ταυτόχρονα ενεργές, για παράδειγμα συμπεριφορές που επηρεάζουν μόνο την κατεύθυνση του οχήματος μπορεί να συνδυαστούν με συμπεριφορές που επηρεάζουν μόνο την ταχύτητα του οχήματος. Συγκεκριμένα, μια συμπεριφορά που κατευθύνει το όχημα

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

ώστε να στηρίξει αριστερά μπορεί να συνδυαστεί με μια συμπεριφορά που δίνει στο όχημα εντολή για να επιβραδύνει. Εξαρτημένες συμπεριφορές ορίζονται αυτές που ελέγχουν τον ίδιο παράγοντα κίνησης ταυτόχρονα, όπως συμπεριφορές που ελέγχουν ταυτόχρονα την κατεύθυνση του οχήματος. Για παράδειγμα, μια συμπεριφορά που δίνει εντολή στο όχημα να επιταχύνει δεν μπορεί να συνδυαστεί με μια συμπεριφορά που του δίνει εντολή να σταματήσει.

Οι συμπεριφορές έχουν χωριστεί σε ομάδες ανάλογα με την εξάρτηση τους, έτσι έχουμε χωρίσει 3 ομάδες συμπεριφορών οι οποίες φαίνονται και στον πίνακα 3.1. Στην πρώτη ομάδα έχουμε συμπεριφορές που ελέγχουν μόνο την κατεύθυνση του οχήματος, στην δεύτερη μόνο την ταχύτητα ενώ στην τρίτη οι συμπεριφορές ελέγχουν και την ταχύτητα και την κατεύθυνση του οχήματος. Επομένως, οι συμπεριφορές που ανήκουν στην ίδια ομάδα είναι εξαρτημένες μεταξύ τους. Οι συμπεριφορές της ομάδας 1 και 2 είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και μπορούν να είναι ενεργές μια από κάθε ομάδα ταυτόχρονα, τέλος οι συμπεριφορές της ομάδας 3 που ελέγχουν ταχύτητα και κατεύθυνση δεν μπορούν να είναι ενεργές ταυτόχρονα με κάποια άλλη συμπεριφορά.

Ομάδα 1 (Κατεύθυνση)	Ομάδα 2 (Ταχύτητα)	Ομάδα 3 (Κατεύθυνση και ταχύτητα)
Left Lane Change	Accelerate	Overtake
Right Lane Change	Decelerate	Vehicle Follow
Free Travel Straight	Steady State	
	Stop And Wait	

Πίνακας 3.1: Λίστα συμπεριφορών και κατηγορίες συμπεριφορών ανάλογα με εξάρτηση τους.

#### 3.5.4 Μέθοδος καταγραφής κριτηρίων αξιολόγησης

Αφού γίνει η επιλογή των επιθυμητών συμπεριφορών στην συνέχεια για κάθε συμπεριφορά βρίσκουμε τα κριτήρια που πρέπει λάβουμε υπόψη για την επιλογή της εν λόγω συμπεριφοράς. Τα κριτήρια δείχνουν την ανάγκη για την επιλογή της συμπεριφοράς δεδομένου της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το όχημα. Όσο περισσότερα κριτήρια συμπεριλαβουμε στην ανάλυση τόσα περισσότερα σενάρια μπορούν να καλυφθούν. Για την επιλογή των κριτηρίων έχει ακολουθηθεί η εξής μέθοδος.

1. Σημειώνουμε την κάθε συμπεριφορά.

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

---

2. Για κάθε συμπεριφορά συμπληρώνουμε μια λίστα με τους λόγους για τους οποίους δεν θα έπρεπε να είναι ενεργεί η συμπεριφορά, η λίστα αντιστοιχεί στα κριτήρια που περιορίζουν την συμπεριφορά (Constraints).
3. Συμπληρώνουμε επιπλέον μια λίστα με τους λόγους για του οποίους θα πρέπει να εκτελεστεί η συμπεριφορά, αυτή η λίστα αντιστοιχεί στα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται για να είναι ενεργή η συμπεριφορά (Dependencies).
4. Τέλος, συμπληρώνουμε μια λίστα με του παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν στο να γίνει επιλογή της συμπεριφοράς ή να αποθαρρύνουν την επιλογή της. Για κάθε παράγοντα καταγράφονται αναλυτικά τα κριτήρια που μπορεί συνεισφέρουν στην αξιολόγηση του.

Ένα παραδειγμα από την παραπάνω διαδικασία είναι:

#### Right Lane Change

Περιορισμοί:

1. Υπάρχει δεξιά λωρίδα για οδήγηση με ίδια κατεύθυνση.
  - (α') Δεν είναι μονόδρομος.
  - (β') Η δεξιά λωρίδα δεν είναι αντίθετης κατεύθυνσης.

Εξαρτήσεις:

1. Υπάρχει εμπόδιο όπως όχημα ή πεζός μπροστά από το αυτόνομο όχημα με το οποίο μπορεί να συγκρουστεί.
  - (α') Η σχετική τους ταχύτητα είναι μικρότερη του μηδενός.
  - (β') Το προβλεπόμενο μονοπάτι των οχημάτων συναντάτε την ίδια χρονική στιγμή.
2. Το όχημα ενδέχεται να στρίψει δεξιά αλλά δεν βρίσκεται στην πιο δεξιά λωρίδα.

Παράγοντες αξιολόγησης:

1. Αν υπάρχει διασταύρωση στα δεξιά την οποία πρέπει να ακολουθήσει το όχημα, το όχημα θα πρέπει να κινηθεί προς την πιο δεξιά λωρίδα.
  - (α') Υπολογίζουμε την απόσταση από την διασταύρωση.
  - (β') Υπολογίζουμε τον χρόνο για να φτάσουμε στην διασταύρωση.
  - (γ') Υπολογισμός καμπυλότητας του μονοπατιού αναφοράς για να βρούμε ότι υπάρχει διασταύρωση.
2. Για την δεξιά λωρίδα θα πρέπει να αποφευχθεί σύγκρουση με τα διερχόμενα όχημα που έρχονται από πίσω.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

---

- (α') Το πίσω όχημα θα πρέπει να απέχει κάποια απόσταση ασφαλείας και η ταχύτητα του να είναι σχετικά μικρή σε σχέση με το αυτόνομο όχημα.
  - (β') Τα οχήματα με την ίδια κατεύθυνση τα οποία βρίσκονται πιο μπροστά από το αυτόνομο όχημα θα πρέπει να κινούνται αρκετά γρήγορα για να αφήσουν το χώρο ελεύθερο για το όχημα.
  - (γ') Υπολογίζουμε το χρόνο σύγχρουσης με τα διερχόμενα οχήματα.
3. Το όχημα μου βρίσκεται πίσω από εμάς δε θα πρέπει να βρίσκεται σε διαδικασία προσπέρασης, το πίσω όχημα δεν θα πρέπει να είναι μετατοπισμένο προς την αριστερή πλευρά της λωρίδας.
- (α') Η απόσταση του από το μέσο της λωρίδας προς τα αριστερά να είναι μικρότερο ενός ορίου.
  - (β') Η κάθετη στην φορά της λωρίδας ταχύτητα του προς τα δεξιά να μην είναι μεγάλη.
4. Η κυκλοφορία στην δεξιά λωρίδα είναι μικρότερη σε σύγκριση με την τρέχουσα λωρίδα.
- (α') Καταμέτρηση αριθμού οχημάτων στις λωρίδες.

Αφού εκτελεστεί η συγκεκριμένη διαδικασία καταγράφονται όλα τα κριτήρια που μπορεί να συμμετέχουν στην διαδικασία αξιολόγησης των συμπεριφορών. Κατά την διαδικασία της καταγραφής τα κριτήρια θα πρέπει να είναι διατυπωμένα όσο πιο ξεκάθαρα γίνεται. Προτιμάται λεξιλόγιο που να περιέχει λέξεις όπως “μικρή”, “μεγάλη”, “κοντά”, “μακριά” ώστε να κάνουν το κανόνα μετρήσιμο.

Κάποια από τα κριτήρια κατά την παραπάνω διαδικασία καταγραφής μπορεί να επηρεάζουν πολλές συμπεριφορές, κάποιες τις επηρεάζουν ενθαρρυντικά και κάποιες αποθαρρυντικά. Για την διαχείριση των εξαρτήσεων και των σχέσεων μεταξύ συμπεριφορών και κριτηρίων αξιολόγησης κατασκευάζονται δύο πίνακες. Στους πίνακες σημειώνουμε στις στήλες τις συμπεριφορές και στις γραμμές τα κριτήρια αξιολόγησης, στον πρώτο καταγράφουμε τους περιορισμούς και τις εξαρτήσεις των συμπεριφορών και στον δεύτερο την επιρροή των κριτηρίων στις συμπεριφορές, συγκεκριμένα στον πίνακα με τους περιορισμούς και τις εξαρτήσεις σημειώνουμε :

**M** : Δηλώνει την αναγκαιότητα του περιορισμού για να είναι ενεργή η συμπεριφορά, την εξάρτησή δηλαδή της συμπεριφοράς από τον κανόνα. Για να ενεργοποιηθεί μία συμπεριφορά θα πρέπει να αληθεύει ένα από τα κριτήρια που είναι σημειωμένο με M, για παράδειγμα για να μπορεί να εκτελεστεί η συμπεριφορά “Overtake” θα πρέπει να υπάρχει κάποιο όχημα ή πεζός μπροστά από το αυτόνομο όχημα, όπως σημειώνεται και στον παρακάτω πίνακα.

**E** : Δηλώνει τον αποκλεισμό της συμπεριφοράς όταν το αντίστοιχο κριτήριο είναι ενεργό, για παράδειγμα όταν υπάρχει όχημα μπροστά το αυτόνομο όχημα δεν μπορεί να εκτελέσει την συμπεριφορά “Free Travel Straight”. Αποτελεί και αυτό μια εξάρτηση.

**C** : Δηλώνει τον περιορισμό για την συμπεριφορά από το κριτήριο αξιολόγησης. Η ενεργοποίηση του κανόνα που δηλώνει προορισμό δεν υποδηλώνει και

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

---

την ενεργοποίηση της αντίστοιχης συμπεριφοράς, αλλά όταν μια συμπεριφορά είναι ενεργεί θα πρέπει να πληρούνται οι περιορισμοί της. Για παράδειγμα, όταν θέλουμε να εκτελεστεί η συμπεριφορά “Right Lane Change” θα πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη δεξιά λωρίδα κυκλοφορίας, η ύπαρξή όμως δεξιάς λωρίδας δεν δηλώνει ότι θα πρέπει να εκτελεστεί η συμπεριφορά.

- : Δηλώνει αδιαφορία της συμπεριφοράς για το κριτήριο. Το κριτήριο δεν επηρεάζει με κάποιο τρόπο την συμπεριφορά.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για να ενεργοποιηθεί μια συμπεριφορά θα πρέπει να είναι ενεργός ένας κανόνας εξάρτησης με συμβολισμό M. Η ενεργοποίηση ενός κανόνα που έχει σημειωθεί με M δεν δηλώνει ότι θα εκτελεστεί η αντίστοιχη συμπεριφορά αλλά το ότι η συμπεριφορά θα είναι διαθέσιμη για να αξιολογηθεί και αν μετά την αξιολόγηση κριθεί ως η καταλληλότερη τότε να εκτελεστεί. Αφού λοιπόν ενεργοποιηθεί ένας κανόνας M, στην συνέχεια θα πρέπει να ελεγχθούν οι περιορισμοί που είναι σημειωμένοι με C και αν πληρούνται όλοι, τότε και μόνο τότε ενεργοποιείται η συμπεριφορά και εισάγεται στην λίστα ενεργών συμπεριφορών.

**Λίστα ενεργών συμπεριφορών:** Σε κάθε κύκλο αξιολόγησης ανάλογα με την ενεργοποίηση των αντίστοιχων κανόνων κάποιες συμπεριφορές μπορούν να εκτελεστούν και κάποιες άλλες δεν πληρούν τα απαραίτητα κριτήρια. Οι συμπεριφορές που έχουν την δυνατότητα να εκτελεστούν προστίθενται στην λίστα των ενεργών συμπεριφορών για να αξιολογηθούν και η καλύτερη που θα προκύψει από την αξιολόγηση θα εκτελεστεί.

Στον πίνακα με τα κριτήρια αξιολόγησης σημειώνουμε :

**P** : Την θετική εξάρτηση (positive) της συμπεριφοράς από το αντίστοιχο κριτήριο. Σημαίνει ότι το συγκεκριμένο κριτήριο ενθαρρύνει την συμπεριφορά.

**N** : Αρνητική εξάρτηση (negative) από τον κανόνα για την συμπεριφορά. Ο κανόνας αποθαρρύνει την επιλογή της συμπεριφοράς.

**Aριθμός** : Ο αριθμός μπροστά από την θετική ή την αρνητική εξάρτηση δηλώνει το μέγεθος της εξάρτησης από το κανόνα, δηλαδή το πόσο θα επηρεάσει ο κανόνας την συμπεριφορά.

**Cn** : Δηλώνει τον περιορισμό ενός κτιρίου αξιολόγησης από τα κριτήρια του πίνακα περιορισμών. Ένα κριτήριο αξιολόγησης δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη κατά την αξιολόγηση των συμπεριφορών αν ο αντίστοιχος περιορισμός του δεν ικανοποιείται.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται όλοι οι κανόνες και οι σχέσεις τους με τις συμπεριφορές που έχουν χρησιμοποιηθεί στην υλοποίηση του λογισμικού οδήγησης του αυτόνομου οχήματος της παρούσας διπλωματικής.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Περιορισμοί και εξαρτήσεις συμπεριφορών											Stop And Wait	
	Συμβόλουσμα	Overtake	Vehicle Follow	Left Lane Change	Right Lane Change	Free Travel Straight	Accelerate	Decelerate	Steady State	-	-	
Τηπάρχει όχημα μπροστά	C0	M	M	M	M	E	-	-	-	-	-	
Τηπάρχει λωρίδα αριστερά ίδιας ή αντίθετης κατεύθυνσης	C1	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Τηπάρχει λωρίδα αριστερά ίδιας κατεύθυνσης	C2	-	-	C	-	-	-	-	-	-	-	
Τηπάρχει λωρίδα δεξιά ίδιας κατεύθυνσης	C3	-	-	-	C	-	-	-	-	-	-	
Ταχύτητα οχήματος μικρότερη από το όριο ταχύτητας	C4	C	-	-	-	-	-	M	-	-	-	
Τηπάρχει όχημα από πίσω	C5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Τηπάρχει πεζός μπροστά	C6	M	-	M	M	-	-	-	-	-	-	
Τηπάρχουν οχήματα στο περιβάλλον χώρο	C7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Το όχημα βρίσκεται εκτός δρόμου	C8	-	-	M	M	-	-	-	-	-	-	
Το οχημα δεν βρίσκεται σε λωρίδα αντίθετης κατεύθυνσης	C9	-	C	-	-	-	-	-	-	-	-	
Κριτήρια αξιολόγησης												
Μεγαλύτερη ταχύτητα από το μπροστινό όχημα/εμπόδιο	F0	C0	4P	3N	2P	2P	2N	-	1N	8P	1N	5P
Μεγάλη κάλυψη αριστερής λωρίδας από οχήματα αντίθετης κατεύθυνσης	F1	C1	6N	7P	5N	2P	4P	-	-	-	-	-
Μεγάλη κάλυψη αριστερής λωρίδας από οχήματα ίδιας κατεύθυνσης	F2	C1	5N	6P	4N	-	4P	-	-	-	-	-
Μεγάλη απόσταση του πίσω οχήματος από το μέσο της λωρίδας πρός τα αριστερά	F3	C5	1N	3P	1N	1P	2P	-	-	-	-	-
Μεγάλος χώρος μπροστά από το μπροστινό όχημα	F4	C0	3P	20N	-	-	-	-	-	-	-	-
Μεγάλη καμπυλότητα του δρόμου	F5	-	2N	4P	2N	2N	2P	1N	5P	4P	2P	-
Μικρός χρόνος σύγκρουσης με το μπροστινό όχημα/εμπόδιο	F6	C0	12P	6N	7P	7P	4N	1N	9P	1N	9P	-
Μικρή απόσταση από το μπροστινό όχημα	F7	C0	7P	3N	5P	5P	2N	1N	8P	8N	6P	-
Το όχημα έχει πολύ μικρή ταχύτητα για μεγάλο χρονικό διάστημα	F8	-	1P	2N	2P	2P	-	1P	-	-	1N	-
Μικρή απόσταση από διασταύρωση στα αριστερά	F9	-	2N	6N	4P	1N	5N	1N	7P	2N	5P	-
Μικρή απόσταση από διασταύρωση στα δεξιά	F10	-	2N	6N	1N	4P	5N	1N	7P	2N	5P	-
Μεγάλη κάλυψη δεξιάς λωρίδας από οχήματα ίδιας κατεύθυνσης	F11	C3	1P	4P	2P	7N	3P	-	-	-	-	-
Μεγάλη απόσταση του πίσω οχήματος από το μέσο της λωρίδας πρός τα δεξιά	F12	C5	1P	3P	1P	4N	2P	-	-	-	-	-

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

	F13	-	1N	9P	2N	2N	7P		1N	6P	6N	9P
Μικρή απόσταση από φωνάρι, διασταύρωση, ταμπελα stop.	F14	-	2P	5P	2P	2P	4P		5P	7N	4P	3N
Ταχύτητα οχήματος μεχρέτερη από το όριο ταχύτητας	F15	-	1P	3P	1P	1P	2P		1P	1P	9P	-
Ταχύτητα οχήματος κοντά στην επιθυμητή	F16	-	1P	3P	1P	1P	2P		1N	9P	4N	1P
Λιγότερα οχήματα στην δεξιά λωρίδα	F17	C3	1N	3N	1N	4P	2N		-	-	-	-
Λιγότερα οχήματα στην αριστερή λωρίδα	F18	C2	2P	3N	4P	1N	2N		-	-	-	-
Μικρός χρόνος σύγκρουσης με όχημα από την πονάδα πρόβλεψης ποσείας	F19	C7	5P	5N	10P	10P	10N		5N	10P	10N	10P
Μικρή σιγουρία για την πρόβλεψη σύγκρουσης με όχημα	F20	C7	1P	8P	1P	1P	10P		1P	10P	5P	10P
Μεγάλη πιθανότητα σύγκρουσης με πεζό	F21	C6	5P	1N	5P	5P	10P		5N	5P	10N	10P
Πολύ ώρα εκτός δρόμου	F22	C8	1P	1N	10P	10P	1N		-	-	-	-

Πίνακας 3.2: Περιορισμοί, εξαρτήσεις συμπεριφορών και κριτήρια αξιολόγησης.

#### 3.5.5 Συναρτήσεις αξιολόγησης

Οι περιορισμοί και οι εξαρτήσεις στον πίνακα των περιορισμών είναι απλές μεταβλητές αληθείας που μπορούν να πάρουν την τιμή “αληθής” ή “ψευδής” ανάλογα με το αν αληθεύει ή όχι ο κανόνας.

Στην περίπτωση του πίνακα κριτηρίων αξιολόγησης θα πρέπει να μετατρέψουμε τα κριτήρια αξιολόγησης σε μετρήσιμες ποσότητες. Για κάθε κριτήριο έχει κατασκευαστεί μία συνάρτηση αξιολόγησης που δηλώνει το ποσοστό ενεργοποίησης του κανόνα. Για κάθε κανόνα η συνάρτηση είναι μια και δεν αλλάζει για διαφορετικές συμπεριφορές. Η συνάρτηση δηλώνεται με ενα σύμβολο  $F_i$ , όπου  $i$  ο κατά σειρά αριθμός του κανόνα και ισχύει:

$$F_1 \in [0, 1], i \in 0, 1, 2, \dots N - 1 \quad (3.1)$$

όπου  $N$  ο αριθμός των κριτηρίων αξιολόγησης.

Η επιρροή της κάθε συνάρτησης στις συμπεριφορές καθορίζεται από την σχέση που έχει οριστεί στον πίνακα σχετικά με την θετική ή αρνητική εξάρτηση και το βαθμό εξάρτησης, ετσι έχουμε:

Για θετική εξάρτηση η επιρροή είναι :

$$w_{ij} = a_{ij}^* F_i, i \in 0, 1, 2, \dots N - 1 \text{ για } \forall i \in Q, j \in 0, 1, 2, \dots K - 1 \forall i \in Z \quad (3.2)$$

Όπου  $N$  ο αριθμός των κριτηρίων αξιολόγησης,  $K$  ο αριθμός των συμπεριφορών για κάθε ομάδα,  $Q$  το σύνολο των ενεργών κριτηρίων αξιολόγησης για την

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

---

συμπεριφορά, οι ενεργές συμπεριφορές και  $a_{ij}$  ο βαθμός ενεργοποίησης του  $i$  κανόνα για την  $j$  συμπεριφορά. Αν υπάρχει αδιαφορία ανάμεσα στη συμπεριφορά  $j$  και τον κανόνα  $i$  τότε  $a_{ij} = 0$ .

Για αρνητική εξάρτηση η επιρροή είναι :

$$w_{ij} = a_{ij}^* (1 - F_i) \quad i \in 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad \text{για } \forall i \in Q, j \in 0, 1, 2, \dots, K-1 \quad \forall i \in Z \quad (3.3)$$

Για κάθε ενεργή συμπεριφορά  $z_j$ , όπου  $j \in Z$ , υπολογίζεται η τιμή αξιολόγησης της συμπεριφοράς από τον τύπο:

$$W_j = \sum_i w_{ij}, \quad \forall i \in Q \quad (3.4)$$

Τα σύνολα  $Q$  και  $Z$  είναι κοινά για όλες τις συμπεριφορές και τα κριτήρια αξιολόγησης για κάθε κύκλο αξιολόγησης. Πιο αναλυτικά, η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται ως εξής, αφού γίνει έλεγχος για των περιορισμών δημιουργείται η λίστα ενεργών συμπεριφορών, από την οποία προκύπτει και το σύνολο  $Z$ . Στην συνέχεια ελέγχονται οι περιορισμοί για τα κριτήρια και δημιουργείται η λίστα των ενεργών κριτηρίων, από την λίστα των ενεργών κριτηρίων κρατάμε μόνο τα κριτήρια που επηρεάζουν όλους τους κανόνες, για παράδειγμα αν ένα κριτήριο έχει αδιαφορία για κάποια συμπεριφορά τότε αφαιρείται από την λίστα ενεργών κριτηρίων. Αυτό γίνεται ώστε η σύγκριση μεταξύ των συμπεριφορών να γίνεται με βάσει κριτήρια που επηρεάζουν τις συμπεριφορές όταν το όχημα βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση και να μην λαμβάνονται υπόψη κριτήρια που παίζουν ρόλο στην αξιολόγηση όταν το όχημα βρίσκεται υπό άλλες συνθήκες.

Για παράδειγμα, όταν το όχημα δεν έχει εμπόδια μπροστά ενθαρρύνεται να ακολουθήσει ευθεία πορεια, μπορεί όμως για κάποιο άλλο λόγο να πρέπει να αλλάξει λωρίδα, το κριτήριο της μη ύπαρξης οχημάτων θα επηρεάσει την αξιολόγηση χωρίς να υπάρχει όμως λόγος γιατί στο υπό εξέταση σενάριο το κριτήριο για την υπαρξη οχημάτων δεν είναι σημαντικό. Αφού λοιπόν μείνουν τα κοινά κριτήρια για όλες τις συμπεριφορές προκύπτει το σύνολο  $Q$ . Σημειώνεται ότι η κάθε ομάδα συμπεριφορών ορίζει το δικό της σύνολο και άρα το δικό της σύνολο ενεργών συμπεριφορών. Στην υλοποίηση του αλγόριθμου, επειδή οι ομάδες συμπεριφορών 1 και 3 ελέγχουν την κατεύθυνση του οχήματος, εχουν μπει στην ίδια λίστα ενεργών συμπεριφορών και συγκρίνονται μεταξύ τους, άρα έχουμε 2 σύνολα και 2 λίστες ενεργών συμπεριφορών. Οι συμπεριφορές των ομάδων 1 και 3 αξιολογούνται όλες μεταξύ τους ενώ οι συμπεριφορές της ομάδας αξιολογούνται μόνο με τις συμπεριφορές εντός της ομάδας. Αν ενεργοποιηθεί συμπεριφορά από την ομάδα 3 τότε οι άλλες συμπεριφορές δεν λαμβάνονται υπόψη, αν όμως ενεργοποιηθεί κάποια συμπεριφορά από την ομάδα 1 τότε εκτελείται ταυτόχρονο με μια συμπεριφορά από την ομάδα 2.

#### 3.5.6 Αξιολόγηση και επιλογή συμπεριφοράς

Η αξιολόγηση των συμπεριφορών γίνεται σε κύκλους αξιολόγησης, σε κάθε κύκλο γίνεται αξιολόγηση των συμπεριφορών με χρήση των κοινών κριτηρίων και

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

αφαιρείται η χειρότερη συμπεριφορά από την λίστα ενεργών συμπεριφορών. Στον επόμενο κύκλο υπολογίζεται ξανά το σύνολο των ενεργών κανόνων για τις εναπομείναντες συμπεριφορές, η συμπεριφορά που αφαιρέθηκε μπορεί να περιέχει αδιαφορία για ενα κριτήριο αλλά για τις συμπεριφορές που έμειναν το κριτήριο να τις επηρεάζει. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να μείνει μία συμπεριφορά για κάθε λίστα ενεργών συμπεριφορών η οποία είναι και η καλύτερη συμπεριφορά της ομάδας. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιείται η τιμή αξιολόγησης  $W_j$  που υπολογίζεται σε κάθε κύκλο αξιολόγησης λαμβάνοντας υπόψη τους ενεργους κανόνες, η συμπεριφορά με την μικρότερη τιμή αξιολόγησης διαγράφεται από την λίστα.

$$\min (W_1, W_2, \dots, W_j) \text{ για } \forall j \in Q \quad (3.5)$$

#### 3.5.7 Αλγόριθμοι διαδικασίας

Παρακάτω παρουσιάζεται ο φευδοκάδικας και την επιλογή της καλύτερης συμπεριφοράς. Αρχικά ελέγχουμε ποιοί περιορισμού ικανοποιούνται (γραμμή 1) και δημιουργούμε τις λίστες των ενεργών συμπεριφορών και των ενεργών κανόνων λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς (γραμμές 2 και 3). Επιπλέον, υπολογίζουμε την τιμή των συναρτήσεων αξιολόγησης των κανόνων. Στη συνέχεια για κάθε ομάδα συμπεριφορών θα υπολογίσουμε την καλύτερη συμπεριφορά. Όπως έχει αναφερθεί, έχουμε ορίσει στο κώδικα 2 γενικότερες ομάδες που αποτελούνται από την ομάδα 1 και 3 που ελέγχουν την κατεύθυνσης, και μια δεύτερη που αποτελείται από την ομάδα 2 που ελέγχει μόνο την ταχύτητα. Για κάθε ομάδα, σε κάθε κύκλο αξιολόγησης αφαιρούμε την χειρότερη συμπεριφορά μέχρι να μείνει μόνο μια συμπεριφορά στην λίστα ενεργών συμπεριφορών που αντιστοιχεί και στην καλύτερη συμπεριφορά.

---

##### **Algorithm 1:** Select best maneuver

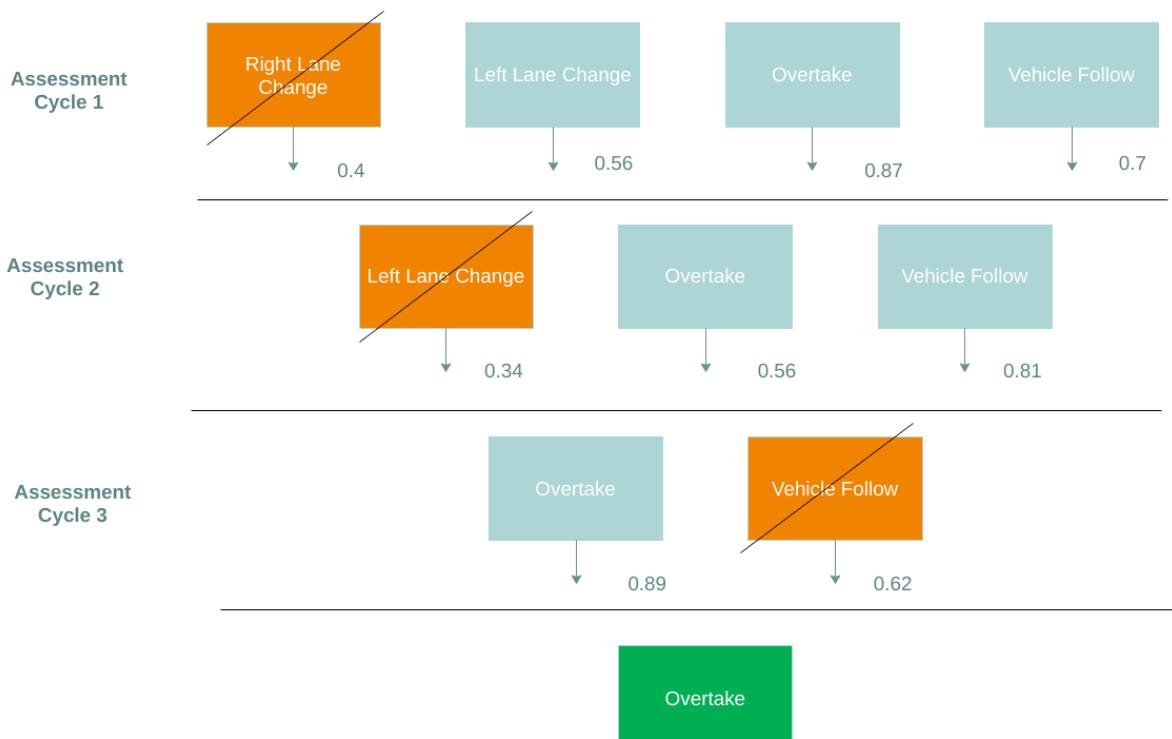
```

Result: Best maneuver for each group
1 criteria_constraints : Check which constraints are satisfied
2 maneuvers_list ← find_active_maneuvers(criteria_constraints)
3 rules_list ← find_active_rules(criteria_constraints)
4 rules_value ← rules_assessment(rules_list)
5 best_maneuver : List with length of the number of groups
6 for each group of maneuvers do
7   while length(maneuvers_list) > 1 do
8     for each maneuver in maneuvers_list do
9       | add maneuvers_assessment_value(rules_value) in assessment_values_list
10      end
11      worse_maneuver = find_worse_maneuver(assessment_values_list)
12      remove worse_maneuver from maneuvers_list
13    end
14    best_maneuver[group] ← maneuvers_list
15 end
```

---

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Ένα παράδειγμα για τον τρόπο με τον οποίο αφαιρούνται οι συμπεριφορές από την λίστα και προκύπτει η τελική συμπεριφορά φαίνεται στο σχήμα 3.5. Οι αριθμοί που σημειώνονται στο σχήμα αντιστοιχούν στην τιμή αξιολόγησης της κάθε συμπεριφοράς. Σε κάθε κύκλο παρατηρείται ότι οι τιμές αξιολόγησης μπορεί να αλλάζουν διότι, κατά την αφαίρεση κάποιας συμπεριφοράς μπορεί να προστεθούν νέοι κανόνες αξιολόγησης που επηρεάζουν τις συμπεριφορές που έχουν μείνει.



Σχήμα 3.5: Διαδικασία αξιολόγησης και επιλογής συμπεριφοράς

Για την εύρεση των ενεργών συμπεριφορών ελέγχουμε ποιοί περιορισμοί αληθεύουν δεδομένου της κατάστασης του οχήματος (γραμμή 1). Αρχικοποιούμε τις λίστες που θα περιέχουν τις ενεργές και τις μη ενεργές συμπεριφορές. Για κάθε συμπεριφορά από την λίστα όλων των συμπεριφορών ελέγχουμε τις εξαρτήσεις Μ, Ε, τους περιορισμούς Σ και αν έρχονται σε συμφωνία με τον πίνακα περιορισμών και εξαρτήσεων που έχει οριστεί τότε προσθέτουμε την συμπεριφορά στην λίστα ενεργών συμπεριφορών.

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

---

**Algorithm 2:** find\_active\_maneuvers

---

**Result:** active\_maneuvers

```
1 criteria_constraints : The state of the constraints for the current assessment cycle
2 excepted_maneuver_list: A list with the maneuvers which do not satisfy the constraints
3 active_maneuver_list: A list with the maneuvers which satisfy the constraints
4 for each maneuver of all maneuvers do
5   maneuvers_constraints : Predefined constraints for the maneuver, take them from the
    constraints table
6   constraints_met ← constraints from criteria_constraints which are True
7   constraints_mandatory ← constraints from maneuvers_constraints with tag M
8   constraints_needed ← constraints from maneuvers_constraints with tag C
9   constraints_excepted ← constraints from maneuvers_constraints with tag E
10  not_any_mandatory_const_met
    ← NOT ANY constraints_mandatory IN constraints_met
11  not_all_needed_const_met ← NOT ALL constraints_needed IN constraints_met
12  maneuver_direct_excepted ← ANY constraints_excepted IN constraints_met
13  if there_are_constraints AND (not_any_mandatory_const_met OR
    not_all_needed_const_met) OR maneuver_direct_excepted then
14    | ADD maneuver IN excepted_maneuver_list
15  else
16    | ADD maneuver IN active_maneuver_list
17  end
18 end
```

---

Για τον υπολογισμό των τιμών αξιολόγησης των συμπεριφορών αρχικά διαβάζουμε τις εξαρτήσεις από τον πίνακα κριτηρίων αξιολόγησης. Στην συνέχεια κρατάμε μόνο τους κανόνες οι οποίοι επηρεάζουν όλες τις συμπεριφορές, δηλαδή κανόνες που είναι αδιάφοροι για κάποια συμπεριφορά διαγράφονται από την λίστα. Έπειτα, διαβάζουμε τα βάρη από τον πίνακα κριτηρίων αξιολόγησης. Στις γραμμές 10-19 ελέγχουμε αν η εξάρτηση από τον κάθε κανόνα για την τρέχουσα συμπεριφορά είναι θετική, αρνητική ή ουδέτερη και ανάλογα την περίπτωση υπολογίζουμε την επιρροή του κανόνα στη συμπεριφορά από τους τύπους που αναφέρθηκαν προηγουμένως και φαίνονται παρακάτω, στην συνέχεια προσθέτουμε το αποτέλεσμα στην τιμή assessment\_value που αντιστοιχεί στην συνολική τιμή αξιολόγησης της συμπεριφοράς.

**Algorithm 3:** maneuvers\_assessment\_value

---

```

Result: assessment_value
1 influence : Take rule's influence(Positive,Negative,Zero) from the rules table for the
   current maneuver
2 rules_value : Take values from the rules assessment process
3 for each maneuver in active maneuvers do
4   active_maneuver_influence : Take rule's influence(Positive,Negative,Zero) from the
      rules table
5   influence[i] ← 0 if active_maneuver_influence has tag Z in i – th position,
      consider the rules which are the same for all the active maneuvers
6 end
7 weights ← from rules table
8 weights[i] ← 0 if influence == 0 in i – th position
9 assessment_value ← 0
10 for every i-th rules_value do
11   if influence[i] == P (positive) then
12     assessment_value += weights[i]*rules_value[i]
13   else if influence[i] == N (negative) then
14     assessment_value += weights[i]*(1 - rules_value[i])
15   else
16     There is no influence(influence[i] == Z (zero) )
17     assessment_value += 0
18   end
19 end

```

---

### 3.5.8 Παράδειγμα της διαδικασίας αξιολόγησης και επιλογής συμπεριφοράς

Έστω ότι το αυτόνομο όχημα (άσπρο όχημα) βρίσκεται στο παρακάτω σενάριο, πλησιάζει μια διασταύρωση με φανάρι το οποίο είναι σε κατάσταση “κόκκινο” όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 3.6. Μπροστά από το αυτόνομο όχημα βρίσκεται ένα άλλο όχημα, αριστερά υπάρχει λωρίδα στην οποία μπορεί να κινηθεί το όχημα αλλά είναι αντίθετης κατεύθυνσης ενώ δεξιά δεν υπάρχει λωρίδα δρόμου αλλά πεζοδρόμιο. Θα παρουσιαστεί ένα υποσύνολο από τους κανόνες για την επίδειξη της τεχνικής.

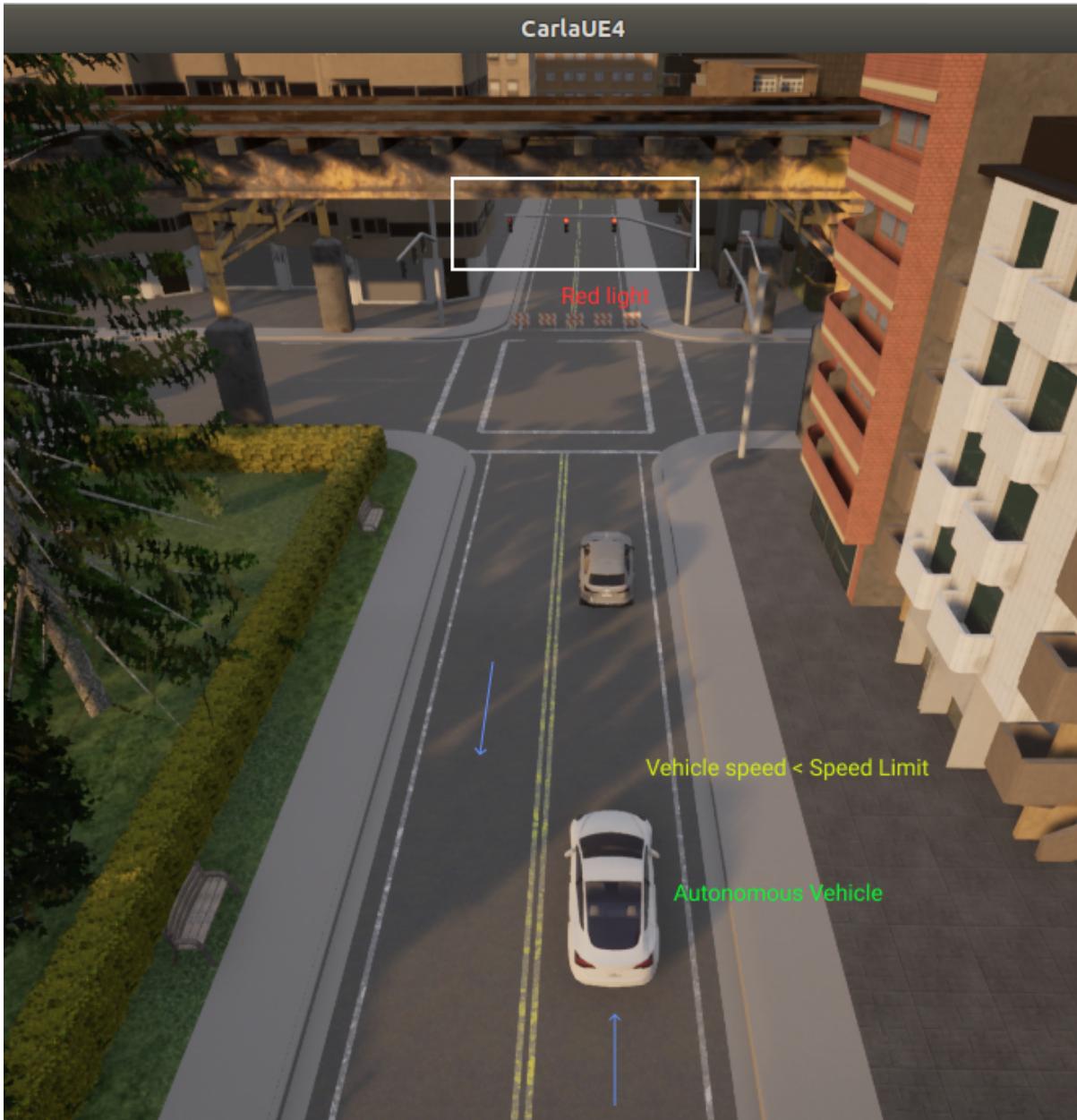
#### Περιορισμοί και εξαρτήσεις

Δεδομένου της κατάστασης του οχήματος οι περιορισμοί και οι εξαρτήσεις έχουν τις τιμές που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 3.3.

#### Λίστα ενεργών συμπεριφορών

Από τον πίνακα 3.2 εξαρτήσεων και περιορισμών προκύπτει η λίστα ενεργών συμπεριφορών. Λόγω του κανόνα C0 και των εξαρτήσεων M και E προκύπτει ότι η συμπεριφορά “Free Travel Straight” αφαιρείται από την λίστα των ενεργών συμπεριφορών ενώ για τις υπόλοιπες συμπεριφορές ελέγχονται οι περιορισμοί C. Έτσι, για την συμπεριφορά “Overtake” επειδή οι περιορισμοί C1 και C4 ικανοποιούνται η συμπεριφορά “Overtake” προστίθεται στην λίστα ενεργών συμπεριφορών. Για την συμπεριφορά “Vehicle Follow” επειδή ικανοποιείται ο περιορισμός C9 προστίθεται

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.



Σχήμα 3.6: Στιγμιότυπο από ένα πιθανό σενάριο του οχήματος για την επίδειξη της διαδικασίας της αξιολόγησης και επιλογής συμπεριφοράς.

και αυτή στην λίστα ενεργών συμπεριφορών. Τέλος, για τις συμπεριφορές “Right Lane Change” και “Left Lane Change” επειδή το οι περιορισμοί C2 και C4 δεν πληρούνται οι συμπεριφορές δεν μπορούν να ενεργοποιηθούν και άρα δεν προστίθενται στην λίστα. Για τις υπόλοιπες συμπεριφορές μόνο η συμπεριφορά “Accelerate” εχει περιορισμό για το όριο ταχύτητας ο οποίος πληρείται (C4). Επομένως, όλες οι συμπεριφορές για τον έλεγχο ταχύτητας προστίθεται στην λίστα συμπεριφορών. Οι κάθε ομάδα συμπεριφορών προστίθεται σε ξεχωριστή λίστα, επομένως έχουμε δύο λίστες ενεργών συμπεριφορών οι οποίες σύμφωνα με τα παραπάνω είναι.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Υπάρχει όχημα μπροστά	Υπάρχει λωρίδα αριστερά ίδιας ή αντίθετης κατεύθυνσης	Υπάρχει λωρίδα αριστερά ίδιας κατεύθυνσης	Υπάρχει λωρίδα δεξιά ίδιας κατεύθυνσης	Ταχύτητα οχήματος μικρότερη από το όριο ταχύτητας	Υπάρχει όχημα από πίσω	Υπάρχει πεζός μπροστά	Υπάρχουν οχήματα στο περιβάλλον χώρο	Το όχημα βρίσκεται εκτός δρόμου	Το οχημα δεν βρίσκεται λωρίδα αντίθετης κατεύθυνσης
C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
True	True	False	False	True	False	False	True	False	True

Πίνακας 3.3: Τιμές για περιορισμούς και εξαρτήσεις, παράδειγμα.

Λίστα ενεργών συμπεριφορών ομάδας A:  
[“Overtake”, “Vehicle Follow”]

Λίστα ενεργών συμπεριφορών ομάδας B:  
[“Accelerate”, “Decelerate”, “Steady State”, “Stop And Wait”]

#### Βαθμός ενεργοποίησης κανόνων

Στην συνέχεια της μεθόδου υπολογίζονται οι τιμές αξιολόγησης για κάθε κανόνα. Για την καλύτερη κατανόηση και για χάρη του παραδείγματος δεν θα χρησιμοποιήσουμε όλους τους κανόνες αλλά ένα υποσύνολο αυτών, έστω λοιπόν ότι έχουμε τους πρώτους δέκα κανόνες. Στον παρακάτω πίνακα 3.4 παρατίθενται στην πρώτη στήλη η περιγραφή των κανόνων, στην δεύτερη ο συμβολισμός του κανόνα, στην τρίτη στήλη οι περιορισμοί που θα πρέπει να πληρούνται για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο κανόνας και στην τελευταία στήλη η τιμή ενεργοποίησης του κανόνα. Για κάθε κανόνα υπάρχει μία συνάρτηση αξιολόγησης που υπολογίζει τον ποσοστό ενεργοποίησης τους κανόνα, χρησιμοποιεί την πληροφορία από το περιβάλλον που σχετίζεται με τον κανόνα και υπολογίζει τη τιμή ενεργοποίησης του κανόνα. Για παράδειγμα, για τον κανόνα F0 η τιμή ενεργοποίησης προκύπτει από τον παρακάτω αλγόριθμος.

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

---

**Algorithm 4:** F0\_rule\_assessment

---

**Result:** assessment\_value

```

1 ego_vehicle: The object instance of the autonomous vehicle.
2 front_vehicle: The object instance of the front vehicle.
3 max_vel_diff: The maximum safe difference in velocity from front vehicle in Km/h
4 rel_vel_x ← front_vehicle.vel_x – ego_vehicle.vel_x
5 rel_vel_y ← front_vehicle.vel_y – ego_vehicle.vel_y
6 abs_value ←  $\sqrt{rel\_vel\_x^2 + rel\_vel\_y^2}$ 
7 theta ← degrees(arctan  $\frac{rel\_vel\_y}{rel\_vel\_x}$ )
8 theta ← theta – ego_vehicle.yaw
9 theta ← theta ( mod 360)
10 theta ← radians(theta)
11 relative_longitude_velocity ← abs_value * cos(theta)
12 if ||relative_longitude_velocity|| < 0.1 then
13   | k ← 0
14 else
15   | k ←  $\frac{relative\_longitude\_velocity}{max\_vel\_diff}$ 
16 if k > 1 then
17   | k ← 1
18 else if k < 0 then
19   | k ← 0
20 assessment_value ← k
21 return assessment_value

```

Έστω λοιπόν ότι μετά την εκτέλεση των συναρτήσεων αξιολόγησης οι βαθμοί ενεργοποίησης των κανόνων είναι αυτοί που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4.

#### Λίστα ενεργών κανόνων

Ο κανόνας F3 έχει περιορισμό τον C5 ο οποίο δεν αληθεύει, επομένως, ο κανόνας F3 δεν θα συμπεριληφθεί στην αξιολόγηση.

Από τα παραπάνω δεδομένα και των πίνακα κανόνων υπολογίζουμε τις τιμές αξιολόγησης για κάθε συμπεριφορά. Για τις συμπεριφορές “Overtake” και “Vehicle Follow” το βάρος των κανόνων και οι εξαρτήσεις από τους κανόνες (θετική, αρνητική, ουδέτερη) θεωρούνται για χάρη του παραδείγματος ότι είναι όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 3.5. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται δεν είναι οι πραγματικές που χρησιμοποιούνται και στον κώδικα αλλά χρησιμοποιούνται αυτές οι τιμές για την πλήρη παρουσίαση της μεθόδου.

Από τον παραπάνω πίνακα οι κανόνες F8 και F9 δεν επηρεάζουν ταυτόχρονα και τις δύο συμπεριφορές άρα δεν θα χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση. Υπενθυμίζεται ότι ο κανόνας F3 δεν είναι ενεργοποιημένος άρα δεν χρησιμοποιείται ούτε αυτός. Οι κανόνες που θα χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση είναι.

#### Λίστα ενεργών κανόνων:

[F0, F1, F2, F4, F5, F6, F7]

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

---

Κανόνες	Συμβολισμός	Περιορισμοί	Βαθμός ενεργοποίησης
Μεγαλύτερη ταχύτητα από το μπροστινό όχημα/εμπόδιο	F0	C0	0.2
Μεγάλη κάλυψη αριστερής λωρίδας από οχήματα αντίθετης κατεύθυνσης	F1	C1	0
Μεγάλη κάλυψη αριστερής λωρίδας από οχήματα ίδιας κατεύθυνσης	F2	C1	0
Μεγάλη απόσταση του πίσω οχήματος από το μέσο της λωρίδας πρός τα αριστερά	F3	C5	-
Μεγάλος χώρος μπροστά από το μπροστινό όχημα	F4	C0	0
Μεγάλη καμπυλότητα του δρόμου	F5	-	0.8
Μικρός χρόνος σύγκρουσης με το μπροστινό όχημα/εμπόδιο	F6	C0	0.1
Μικρή απόσταση από το μπροστινό όχημα	F7	C0	0.5
Το όχημα έχει πολύ μικρή ταχύτητα για μεγάλο χρονικό διάστημα	F8	-	0
Μικρή απόσταση από διασταύρωση στα αριστερά	F9	-	1

Πίνακας 3.4: Ενεργοί κανόνες και βαθμός ενεργοποίησης

	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
<b>Overtake</b>	4P	6N	5N	1N	3P	2N	12P	7P	-	2N
<b>Vehicle Follow</b>	3N	7P	6P	3P	20N	4P	6N	3N	2N	-

Πίνακας 3.5: Βάρη και εξαρτήσεις κανόνων για τις συμπεριφορές “Overtake” και “Vehicle Follow”

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

---

**Αξιολόγηση συμπεριφορών και αφαίρεση της χειρότερης συμπεριφοράς από την λίστα**

Για την συμπεριφορά “**Overtake**” η τιμή αξιολόγησης της υπολογίζεται ως εξής.

$$W_1 = 4 * 0.2 + 6 * (1 - 0) + 5 * (1 - 0) + 3 * 0 + 2 * (1 - 0.8) + 12 * 0.1 + 7 * 0.5 = 16.9$$

Για την συμπεριφορά “**Vehicle Follow**” η τιμή αξιολόγησης της υπολογίζεται ως εξής.

$$W_2 = 3 * (1 - 0.2) + 7 * 0 + 6 * 0 + 20 * (1 - 0) + 4 * 0.8 + 6 * (1 - 0.1) + 3 * (1 - 0.5) = 32.5$$

Στην συνέχεια διαγράφουμε την συμπεριφορά με την χειρότερη τιμή αξιολόγησης.

$$w_{worst} = \min(W_1, W_2) = 16.9$$

Με τον ίδιο τρόπο γίνεται αξιολόγηση και για την ομάδα συμπεριφορών B που σχετίζονται με την ταχύτητα.

#### **Επιλογή καλύτερης συμπεριφοράς**

Στην συνέχεια επαναλαμβάνεται η διαδικασία ξανά από το στάδιο “Λίστα ενεργών κανόνων” καθώς οι κανόνες που μένουν μπορεί να έχουν κοινούς κανόνες που πριν την αφαίρεση της τελευταίας συμπεριφοράς να μην ήταν κοινοί για ολές τις συμπεριφορές. Έτσι, η λίστα ενεργών κανόνων ανανεώνεται προσθέτοντας επιπλέον κανόνες.

Όταν μείνει μόνο μία συμπεριφορά στην λίστα η διαδικασία σταματάει και η συμπεριφορά αυτή αντιστοιχεί στην καλύτερη συμπεριφορά που θα πρέπει να επιλέξει το όχημα. Στο παράδειγμα έχει μείνει μόνο η συμπεριφορά “**Vehicle Follow**” η οποία είναι και η καλύτερη συμπεριφορά για την ομάδα A. Με τον ίδιο τρόπο γίνεται επιλογή της καλύτερης συμπεριφοράς και για την ομάδα συμπεριφορών B.

#### **Σχόλια παραδείγματος**

Παρατηρείται ότι για την επιλογή της συμπεριφοράς “**Vehicle Follow**” ο πιο καθοριστικός κανόνας που οδήγησε σε αυτή την επιλογή συμπεριφοράς ήταν ο F4 που αντιστοιχεί στο κριτήριο για το κενό χώρο μπροστά από το μπροστινό όχημα. Λόγω του ότι μπροστά από το μπροστινό όχημα υπάρχει διασταύρωση με ενεργό το κόκκινο φανάρι δεν υπάρχει κενός χώρος για το αυτόνομο όχημα και επομένως δεν μπορεί να γίνει προσπέραση. Από τα παραπάνω φαίνεται πόσο εύκολο είναι να υπάρξει επιρροή από κάποιο κριτήριο αξιολόγησης για την επιλογή κάποιας συμπεριφοράς, αρκεί να αυξήσουμε ή να μειώσουμε το βάρος του αντίστοιχου κανόνα για την επιθυμητή συμπεριφορά.

#### **Δεδομένα που παράγονται από τις συμπεριφορές.**

Η κάθε συμπεριφορά περιγράφεται με ένα σύνολο μεταβλητών που θα υπολογιστούν από την συμπεριφορά και θα χρησιμοποιηθούν από το υπόλοιπο σύστημα.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

---

Στην παρούσα διπλωματική τα δεδομένα που υπολογίζονται από την μονάδα επιλογής συμπεριφοράς τροφοδοτούνται προς την μονάδα σχεδίασης τοπικών εναλλακτικών διαδρομών και χρησιμοποιούνται οι απαραίτητες πληροφορίες για την σχεδίαση των εναλλακτικών διαδρομών. Αφού επιλεχθεί η καλύτερη συμπεριφορά στην συνέχεια θα πρέπει με δεδομένο την κατάσταση του οχήματος και του περιβάλλοντος να υπολογιστούν οι παρακάτω μεταβλητές:

1. Το σύνολο των χρονικών στιγμών για την διάσχιση των μονοπατιών. Αντιστοιχεί σε ένα σύνολο με χρόνους που χρειάζεται το όχημα για να διασχίσει ένα μονοπάτι. Μια συμπεριφορά μπορεί να καθορίσει το χρόνο που πρέπει να κάνει το όχημα για να βρεθεί σε ένα σημείο.
2. Το εύρος της πλευρικής απόσταση των μονοπατιών από το βασικό μονοπάτι. Όσο μεγαλύτερο το εύρος τόσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η πλευρική απόσταση των μονοπατιών από το βασικό μονοπάτι, τα μονοπάτια μπορεί να εκτείνονται σε διπλανές λωρίδες ακόμα και εκτός δρόμου.
3. Τον αριθμό των εναλλακτικών διαδρομών.
4. Τη πλευρική απόσταση του σημείου στόχου από το βασικό μονοπάτι. Η πλευρική απόσταση χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση και την επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής διαδρομής. Σκοπός αυτής της μεταβλητής είναι να κατευθυνθεί το όχημα πρός μια συγκεκριμένη κατεύθυνση.
5. Την επιθυμητή ταχύτητα του οχήματος. Αντιστοιχεί στην ταχύτητα του οχήματος στο τέλος του μονοπατιού. Με το να ορίζεται η επιθυμητή ταχύτητα ως η ταχύτητα του οχήματος στο τέλος του μονοπατιού το όχημα θα μεταβάλει την ταχύτητα του με ομαλό τρόπο.
6. Το εύρος και το βήμα για την δειγματοληψία ενός δείγματος ταχυτήτων γύρω από την επιθυμητή. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό μονοπατιών με ταχύτητα κοντά στην επιθυμητή ταχύτητα αλλά όχι ακριβώς ίση με την επιθυμητή.
7. Μεταβλητή άμεσης επιβολής ταχύτητας. Όταν αυτή η μεταβλητή έχει αληθής τιμή τότε η παραπάνω επιθυμητή ταχύτητα αντιστοιχεί στην ταχύτητα του οχήματος που πρέπει επιληφθεί άμεσα στο όχημα. Τα μονοπάτια έχουν σε κάθε θέση τους τιμή ταχύτητας ίση με την επιθυμητή.

Μετά την επιλογή των συμπεριφορών από κάθε ομάδα οι δύο συμπεριφορες που προκύπτουν συνδυάζονται για να προκύψουν οι παραπάνω μεταβλητές, οι συμπεριφορά που αντιστοιχεί στην ομάδα που ελέγχει την ταχύτητα χρησιμοποιείται για να καθορίσει τις μεταβλητές που σχετίζονται με την ταχύτητα ενώ οι συμπεριφορά που αντιστοιχεί στην ομάδα που καθορίζει την κατεύθυνση χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν οι παράμετροι κατεύθυνσης. Στην περίπτωση των συμπεριφορών [“Overtake”, “Vehicle Follow”] που ελεγχουν ταυτόχρονα την κατεύθυνση και την ταχύτητα του οχήματος χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον υπολογισμό όλων των μεταβλητών. Οι μεταβλητές που περιγράφουν τον τρόπο που θα κατασκευαστούν τα μονοπάτια όπως ο αριθμός των μονοπατιών, ο αριθμός και η

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

---

απόσταση των δειγμάτων για τις ταχύτητες και τους χρόνους διάσχισης του μονοπατιού και το πλάτος εξάπλωσης των μονοπατιών λαμβάνουν προκαθορισμένες τιμές για κάθε συμπεριφορά ανάλογα με τις απαιτήσεις της συμπεριφοράς για το δείγμα των τοπικών εναλλακτικών διαδρομών. Οι συμπεριφορές κατά κύριο λόγω κατά τον υπολογισμό τους υπολογίζουν δύο μεταβλητές, την πλευρική απόσταση και την ταχύτητα του οχήματος ανάλογα την ομάδα στην οποία βρίσκεται η κάθε συμπεριφορά.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι μεταβλητές που υπολογίζονται στο πρόγραμμα σε μορφή ψευδοκώδικα.

---

**Algorithm 5:** Maneuver\_Data

---

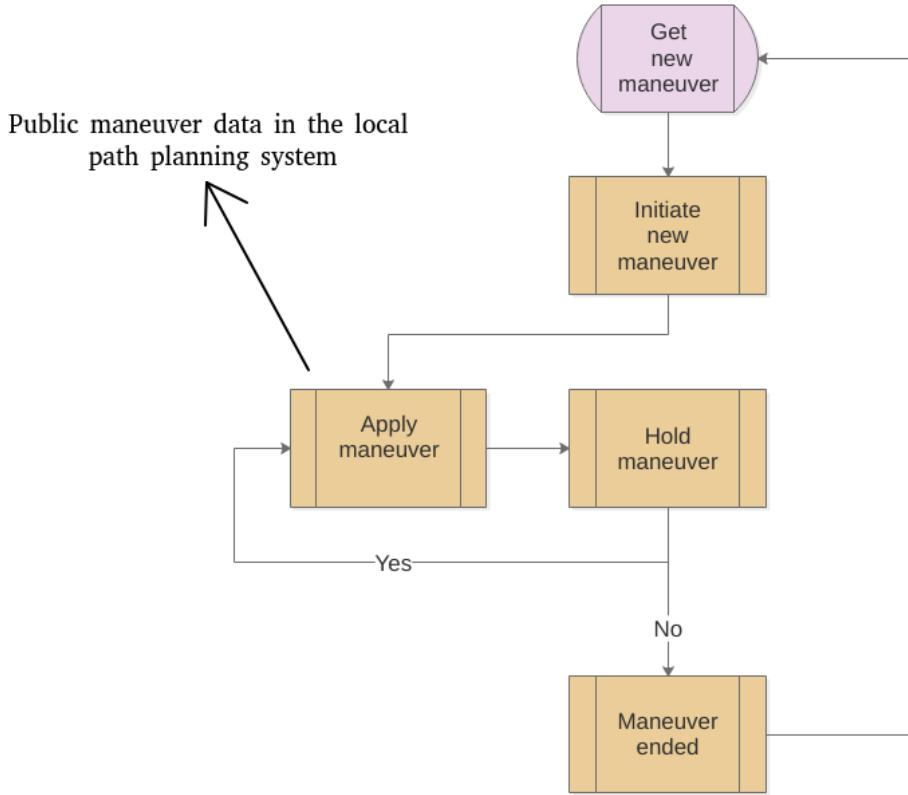
```
Result: maneuver_data
1 maneuver_data ←
    Class Object with class parameters: right_width, left_width, lateral_offset,
2         speed, path_number, from_time, to_time, time_step, dt,
3         maneuver_type, direct_control
4 # Description
5 right_width: The right boarder of the candidate paths for the local path module.
6 left_width: The left boarder of the candidate paths for the local path module.
7 lateral_offset : The distance of the target goal from the base path.
8 speed: The target speed of the vehicle.
9 path_number : The numbers of the candidate path.
10 from_time: The minimum time for the vehicle to travel along the candidate path.
11 to_time: The maximum time for the vehicle to travel along the candidate path.
12 time_step : Time between the samples of the interval from_time-to_time, the number of
    the samples is defined by this variable. For each sample is calculated a list of candidate
    paths that complete the paths for this time duration.
13 dt : The time between samples point of each path.
14 maneuver_type : The maneuver's name.
15 direct_control: Commands the control system to use directly the target speed.
16 return maneuver_data
```

---

#### Υλοποίηση συμπεριφορών

Για την υλοποίηση των συμπεριφορών ακολουθείται η λογική που παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής [??](#). Το διάγραμμα περιγράφει την γενική περίπτωση της λογικής υλοποίησης και την υπακούουν όλες οι συμπεριφορές, παρόλα αυτά δεν διατηρούνται όλες οι συμπεριφορές όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Κάποιες συμπεριφορές τερματίζονται αμέσως μετά την εκτέλεση τους και στον επόμενο κύκλο υπολογισμών μπορεί να εκτελεστεί άλλη συμπεριφορά ή και η ίδια με την προηγούμενη αν αυτό είναι απαραίτητο.

Αφού γίνει επιλογή μιας συμπεριφοράς, στην συνέχεια γίνεται η αρχικοποίηση των απαραίτητων μεταβλητών της συμπεριφοράς. Έπειτα, γίνεται εφαρμογή της συμπεριφοράς. Με τον όρο εφαρμογή εννοείται ότι γίνεται ο υπολογισμός των μεταβλητών που θα παράσχει η συμπεριφορά και που θα χρησιμοποιηθούν από το υπόλοιπο σύστημα για την κατασκευή των μονοπατιών και για τον έλεγχο του οχήματος, δηλαδή κατά την εφαρμογή γίνονται οι υπολογισμοί των μεταβλητών



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα ροής της εφαρμογής μιας συμπεριφοράς

εξόδου της συμπεριφοράς και τροφοδοτούνται στο υπόλοιπο σύστημα. Στην συνέχεια ελέγχεται αν η συμπεριφορά τερματίστηκε ή πρέπει να διατηρηθεί η ίδια συμπεριφορά και στον επόμενο κύκλο υπολογισμών. Το αν θα τερματιστεί μία συμπεριφορά καθορίζεται από το στάδιο εφαρμογής της συμπεριφοράς που υπολογίζονται οι μεταβλητές εξόδου. Για παράδειγμα η συμπεριφορά “Overtake” έχει αρκετά στάδια εκτέλεσης, το όχημα θα πρέπει να φτάσει σε κατάλληλη απόσταση με την κατάλληλη ταχύτητα και όταν είναι έτοιμο θα προσπεράσει μέχρι να βρεθεί ξανά μπροστά από το μπροστινό όχημα και τότε είναι η στιγμή που τελειώνει και απελευθερώνεται η συμπεριφορά. Επίσης, υπάρχουν και άλλες συνθήκες που μπορεί να σταματήσουν μία συμπεριφορά εκτός από την ίδια την συμπεριφορά ή επισης να διατηρησουν την εκτέλεση μιας συμπεριφοράς. Η συμπεριφορές που δεν διατηρούνται υποχρεωτικά από κάποια συνθήκη μετά την εκτέλεση τους είναι:

[“Vehicle Follow”, “Free Travel Straight”, “Accelerate”, “Decelerate”, “Steady State” ]

Οι συμπεριφορές που διατηρούνται από κάποια συνθήκη ή μέχρι κάποια συνθήκη να αληθεύει είναι:

[“Overtake”, “Left Lane Change”, “Right Lane Change”, “Stop And Wait”]

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας συνθηκών για τον τερματισμό των συμπεριφορών, ο πίνακας αντιστοιχεί στις συνθήκες που τερματίζουν μία συμπεριφορά.

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

Overtake	Left Lane Change	Right Lane Change	Stop And Wait
Το αυτόνομο όχημα βρέθηκε μπροστά από από το μπροστινό όχημα.	Ο χρόνος για τον οποίο διατηρείται η συμπεριφορά είναι μεγαλύτερος από ένα προκαθορισμένο όριο.	Ο χρόνος για τον διατηρείται η συμπεριφορά είναι μεγαλύτερος από ένα προκαθορισμένο όριο.	Αν το όχημα έχει σταματήσει λόγω φαναριού το φανάρι έγινε πράσινο.
Το μπροστινό όχημα αύξησε την απόσταση του πάνω από ένα όριο.	Πρέπει να εκτελεστεί η συμπεριφορά “Vehicle Follow”.	Πρέπει να εκτελεστεί η συμπεριφορά “Vehicle Follow”.	Αν το όχημα έχει σταματήσει λόγω stop και δεν υπάρχει μπροστά του όχημα με το οποίο μπορεί να συγκρουστεί.
Ο χρόνος για τον οποίο διατηρείται η συμπεριφορά είναι μεγαλύτερος από ένα προκαθορισμένο όριο.			Αν το όχημα έχει σταματήσει λόγω εμποδίου και δεν υπάρχει πλέον εμπόδιο μπροστά του.
Πρέπει να εκτελεστεί η συμπεριφορά “Vehicle Follow”.			

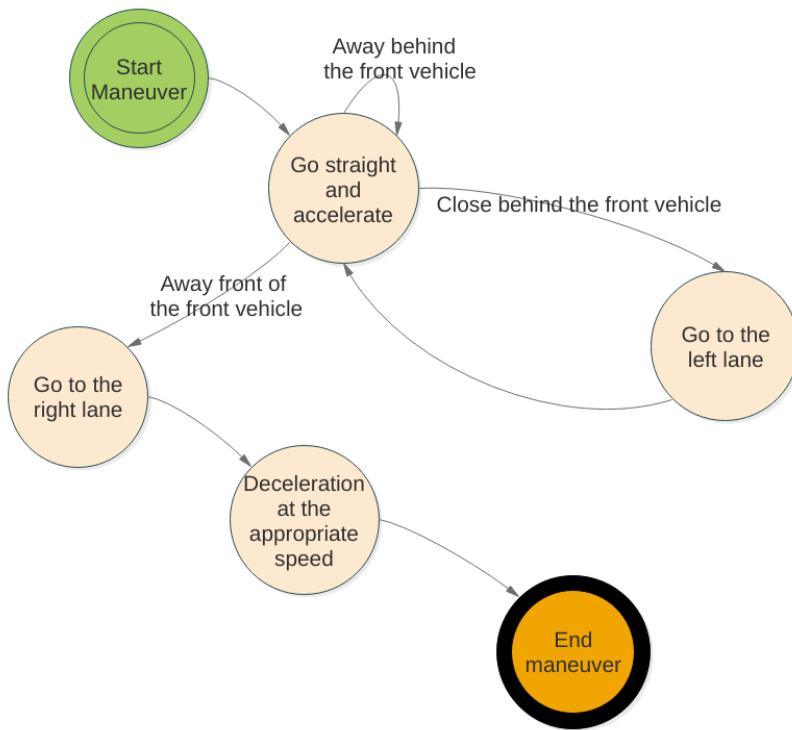
Πίνακας 3.6: Πίνακας συνθηκών τερματισμού συμπεριφοράς ανά συμπεριφορά(συνθήκες τερματισμού για το στάδιο Hold Maneuver).

#### 3.5.9 Περιγραφή των επιλεγμένων συμπεριφορών του οχήματος

Σε αυτή την υποενότητα γίνεται αναφορά των συμπεριφορών που επιλέχθηκαν για τον έλεγχο του οχήματος. Θα παρουσιαστούν σύντομα οι συμπεριφορές του οχήματος και ο τρόπος λειτουργία τους.

##### Overtake

Η συμπεριφορά χρησιμοποιείται για το προσπέρασμα από αριστερά ενός οχήματος και τοποθέτηση του αυτόνομου οχήματος μπροστά από αυτό. Το αυτόνομο όχημα θα πρέπει να πλησιάσει το μπροστινό όχημα σε κατάλληλη απόσταση τα περάσει στην αριστερή λωρίδα και όταν έχει απομακρυνθεί αρκετά μπροστά από το όχημα να περάσει ξανά στην δεξιά λωρίδα μπροστά από το όχημα. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα FSM 3.8.



Σχήμα 3.8: Περιγραφή της συμπεριφοράς Overtake με χρήση FSM.

Αλγορίθμικά η συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί ώς εξής.

---

**Algorithm 6:** Apply Overtake maneuver

**Result:** maneuver\_data , maneuver\_ends

- 1 maneuver\_ends  $\leftarrow$  False
- 2 front\_vehicle: The front vehicle of the autonomous vehicle.
- 3 relative\_speed  $\leftarrow$   
Calculate the relative speed between the front vehicle and the autonomous vehicle.
- 4 angle  $\leftarrow$   
Calculate the angle between the front vehicle and the autonomous vehicle
- 5 relative\_distance  $\leftarrow$   
Calculate the relative distance between the front vehicle and the autonomous vehicle.
- 6 current\_offset : The offset of the autonomous vehicle from the base path.
- 7 if autonomous vehicle close to front vehicle then
- 8 | lateral\_offset  $\leftarrow$  current\_offset - 3.5
- 9 | target\_speed  $\leftarrow$  higher than the speed of the front vehicle.
- 10 end
- 11 if autonomous vehicle is front of the front vehicle then
- 12 | maneuver\_ends  $\leftarrow$  True
- 13 | lateral\_offset  $\leftarrow$  current\_offset
- 14 end
- 15 maneuver\_data : Calculate the maneuver data. Are used standard values for the maneuver data variables depended on the current maneuver except the variables "lateral\_offset" and "target\_speed" that are calculated analytically by the maneuver.
- 16 return maneuver\_data, maneuver\_ends

---

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

---

#### Vehicle Follow

Η συμπεριφορά χρησιμοποιείται για να καθιδηγήσει κατάλληλα το αυτόνομο όχημα σύμφωνα με την κίνηση του μπροστινού οχήματος. Η απόσταση μεταξύ του αυτόνομου οχήματος και το μπροστινού του οχήματος πρέπει να διατηρείται σταθερή μέσα σε κάποια όρια και η ταχύτητα του αυτόνομου οχήματος να προσαρμόζεται στις μεταβολές της ταχύτητας του μπροστινού οχήματος. Για το σκοπό αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω ελεγκτής [21]. Υπολογίζει την ταχύτητα του αυτόνομου οχήματος με χρήση της απόστασης του από μπροστινό όχημα και την διαφορά στην ταχύτητα τους. Η μεταβλητή  $\Delta d$  αντιστοιχεί στην διαφορά μεταξύ της απόστασης των δύο οχημάτων από την επιθυμητή απόσταση και η μεταβλητή  $\Delta v$  στην διαφορά των ταχυτήτων των δύο οχημάτων. Η παράμετρος  $acc_{cmd}$  αναπαριστά τον ρυθμό μεταβολής ταχύτητας που υπολογίζεται από τις δύο προηγούμενες μεταβλητές και οι μεταβλητές  $k_d$  και  $k_v$  είναι σταθερές αναλογίας που χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση του ελεγκτή. Τέλος, η παράμετρος  $\Delta t_{ACC}$  αντιστοιχεί στο χρόνο για τον υπολογισμό μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών ταχύτητας από τον ελεγκτή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αυτή η μεταβλητή για την ρύθμιση του ελεγκτή.

$$\begin{aligned}\Delta d &= d_{lead} - d_{desired} \\ \Delta v &= v_{lead} - v_{host} \\ acc_{cmd} &= k_d \Delta d + k_v \Delta v \\ v_{cmd}(t) &= v_{cmd}(t - \Delta t_{ACC}) + a_{cmd} \Delta t_{ACC}\end{aligned}\tag{3.6}$$

Η κατεύθυνση του οχήματος παραμένει σταθερή προς την κατεύθυνση της λωρίδας κίνησης του. Σε μορφή ψευδοκώδικα η συμπεριφορά περιγράφεται ως εξής:

#### Left Lane Change, Right Lane Change

Αυτές οι δύο συμπεριφορές είναι αρκετά απλές στην υλοποιηση τους και έχουν παρόμοια υλοποίηση, το μόνο που πρέπει να υπολογιστεί είναι η τρέχουσα απόσταση από το βασικό μονοπάτι και μετά τίθεται η μεταβλητή της πλευρικής απόστασης του σημείου στόχου (lateral\_offset από τα δεδομένα εξόδου maneuver\_data) για την συμπεριφορά Left Lane Change ίση με  $lateral\_offset = current\_offset - lane\_width$  ενώ για την συμπεριφορά Right Lane Change ίση με  $lateral\_offset = current\_offset + lane\_width$  όπου  $lane\_width$  το πλάτος της λωρίδας. Με αυτό τον τρόπο τοποθετώντας το σημείο στόχο την δεξιά ή την αριστερή λωρίδα το όχημα κατευθύνεται στην αριστερή ή στην δεξιά λωρίδα κυκλοφορίας αντίστοιχα.

#### Free Travel Straight

Η συμπεριφορά αυτή κρατάει σταθερή την πλευρική μετατόπιση του οχήματος ώστε να κινείται σταθερά εντός της τρέχουσας λωρίδας κυκλοφορίας.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

---

---

**Algorithm 7:** Apply Vehicle Follow maneuver

---

**Result:** maneuver\_data

1 front\_vehicle : The vehicle front of the autonomous vehicle.  
2 ego\_vehicle : The autonomous vehicle.  
3 reaction\_time  $\leftarrow 2.0$   
4 min\_safety\_distance  $\leftarrow 4.0$   
5 margin\_on\_the\_edges  $\leftarrow 2.0$   
6 desired\_distance  $\leftarrow \text{min\_safety\_distance} + \text{reaction\_time} * \text{ego\_vehicle.speed}$   
7 kd  $\leftarrow 0.12$   
8 ku  $\leftarrow 0.2$   
9 delay\_t  $\leftarrow 3.0$   
10 relative\_distance : The distance between the autonomous vehicle and the front vehicle.  
11 relative\_speed : The speed between the autonomous vehicle and the front vehicle.  
12 delta\_d  $\leftarrow \text{relative\_distance} - \text{desired\_distance}$   
13 delta\_u  $\leftarrow \text{relative\_velocity}$   
14 acc\_cmd  $\leftarrow \text{kd} * \text{delta\_d} + \text{ku} * \text{delta\_u}$   
15 target\_speed  $\leftarrow \text{ego\_vehicle.speed} + \text{acc\_cmd} * \text{delay\_t}$   
16 direct\_control  $\leftarrow \text{True}$   
17 maneuver\_data : Calculate the maneuver data. Are used standard values for the maneuver  
data variables depended on the current maneuver except the variables "direct\_control",  
"lateral\_offset" and "target\_speed" that are calculated analytically by the maneuver.  
18 **return** maneuver\_data

---

### Acceleration

Η συμπεριφορά παράγει μία τιμή ταχύτητας ώστε το όχημα να επιταχύνει. Η τιμή της επιτάχυνσης εξαρτάται από την διαφορά της τρέχουσας ταχύτητας του οχήματος από την μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα και την βεβαιότητα για την επιλογή της συγκεκριμένης συμπεριφοράς, όσο μεγαλύτερη η βεβαιότητα ότι πρέπει να εκτελεστεί επιτάχυνση τόσο μεγαλύτερη και η τιμή της επιτάχυνσης. Η τιμή της βεβαιότητας αντιστοιχεί στην τιμή που προκύπτει από την αξιολόγηση της συμπεριφοράς. Τέλος, στον υπολογισμό εισάγεται και ένα παράγοντας ρύθμισης της επιτάχυνσης.

---

**Algorithm 8:** Apply Acceleration

---

**Result:** target\_speed

1 ego\_vehicle : The autonomous vehicle.  
2 speed\_limit: The road speed limit.  
3 normalization\_factor: A variable to tune the acceleration.  
4 acceleration\_probability : The probability or certainty of the maneuver. The assessment  
value of the assessment process is used.  
5 d\_u  $\leftarrow \text{speed\_limit} - \text{ego\_vehicle\_speed}$   
6 target\_speed =  $\text{ego\_vehicle\_speed} + \text{d}_u * \text{acceleration\_probability} * \text{normalization\_factor}$   
7 **return** target\_speed

---

### 3.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΟΧΗΜΑ.

---

#### Deceleration

Όπως και στην περίπτωση της επιτάχυνσης η τιμή της επιβράδυνσης εξαρτάται από την βεβαιότητα για την επιλογή της συμπεριφοράς. Επίσης, η τιμής της επιβράδυνσης εξαρτάται από την τιμή της ταχύτητας και από έναν παράγοντα ρύθμισης της.

---

#### Algorithm 9: Apply Deceleration

---

**Result:** target\_speed

1 ego\_vehicle : The autonomous vehicle.  
2 normalization\_factor: A variable to tune the acceleration.  
3 acceleration\_probability : The probability or certainty of the maneuver. The assessment value of the assessment process is used.  
4 d\_u  $\leftarrow$  ego\_vehicle\_speed  
5 target\_speed = ego\_vehicle\_speed - d\_u\*acceleration\_probability\*normalization\_factor  
6 **return** target\_speed

---

#### Steady State

Η συγκεκριμένη συμπεριφορά διατηρεί σταθερή την ταχύτητα του οχήματος, δεν γίνονται κάποιοι υπολογισμοί απλά τίθεται ως επιθυμητή ταχύτητα η τρέχουσα ταχύτητα του οχήματος.

#### Stop And Wait

Το αυτόνομο όχημα θα πρέπει να σταματήσει πριν από κόκκινο ή πορτοκαλί φανάρι, σε σημείο υποχρεωτικής διακοπής (stop) ή λόγω κάποιου πεζού που μπλοκάρει το δρόμο του. Ανάλογα την περίπτωση θα πρέπει να προσαρμοστεί η ταχύτητα του οχήματος ώστε να πλησιάσει το εκάστοτε εμπόδιο σε κάποια συγκεκριμένη απόσταση και να σταματήσει. Έπειτα, θα πρέπει να περιμένει για κάποιο χρονικό διάστημα το οποίο καθορίζεται ανά περίπτωση και στην συνέχεια να συνεχίσει την πορεία του. Στην περίπτωση που το όχημα πρέπει να σταματάει σε stop θα πρέπει ακινητοποιηθεί και αν δεν έρχεται κάποιο άλλο όχημα από μπροστά τότε να συνεχίσει την πορεία του. Στην περίπτωση που σταματήσει σε φανάρι θα πρέπει να περιμένει μέχρι να γίνει πράσινο για να συνεχίσει ενώ, αν σταματήσει λόγω πεζού θα πρέπει να περιμένει μέχρι ο πεζός να φύγει από μπροστά από το όχημα. Όταν κάποια από αυτές τις συνθήκες πάρει αληθής τιμή η συμπεριφορά μπλοκάρεται και δεν μπορεί να αντικατασταθεί από κάποια άλλη συμπεριφορά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

---

---

### Algorithm 10: Apply Stop And Wait

---

**Result:** target\_speed, end\_maneuver

```
1 direct_control ← True
2 end_maneuver ← False
3 desired_distance ← The distance from the stop sign.
4 delay_factor ← The time between maneuver calculations.Tuning variable.
5 kd ← Tuning variable
6 ku ← Tuning variable
7 if Stop because of stop sign then
8   | stop_dist ← Distance from the stop sign.
9 else
10  | if Stop because of traffic light then
11    |   | stop_dist ← Distance from the traffic light.
12  | else
13    |   | if Stop because of pedestrian then
14    |   |   | stop_dist ← Distance from the pedestrian.
15    |   | end
16  | end
17 end
18 delta_d ← stop_dist – desired_distance
19 delta_u ← –ego_vehicle.speed
20 acc_cmd ← kd * delta_d + ku * delta_u
21 target_speed ← ego_vehicle.speed + acc_cmd * delay_factor
22 if Stop because of stop sign then
23  | if there is no vehicle ahead of autonomous vehicle then
24    |   | end_maneuver ← True
25  | end
26 else
27  | if Stop because of traffic light then
28    |   | if Traffic light is green then
29    |   |   | end_maneuver ← True
30    |   | end
31  | else
32    |   | if Stop because of pedestrian then
33    |   |   | if There is no pedestrian ahead of the autonomous vehicle then
34    |   |   |   | end_maneuver ← True
35    |   |   | end
36    |   | end
37  | end
38 end
39 return target_speed, end_maneuver
```

---

## 3.6 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΖΩΝ

---

### 3.6.1 Εισαγωγή

Η πρόβλεψη για κάποια πιθανή σύγκρουση με ένα δυναμικό εμπόδιο, όπως είναι οι πεζοί και τα οχήματα, μπορεί να βελτιώσει την ασφάλεια της οδήγησης σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό. Το σύστημα πλοιήγησης του οχήματος χρησιμοποιώντας

τις κατάλληλες μεθόδους μπορεί να κάνει πρόβλεψη για τις μελλοντικές θέσεις των οχημάτων και να αποτρέψει κάποια πιθανή σύγκρουση. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη σύγκρουσης με πεζούς και οχήματα.

### 3.6.2 Πρόβλεψη σύγκρουσης με πεζό

Για να γίνει πρόβλεψη της κίνησης των πεζών γίνεται η παραδοχή ότι τόσο η κίνηση του αυτόνομου οχήματος όσο και η κίνηση των πεζών περιγράφεται από γραμμικό κινηματικό μοντέλο κίνησης. Σύμφωνα με το μοντέλο, θεωρείται ότι είναι γνωστή η ταχύτητα και η θέση των πεζών σε σχέση με το αυτόνομο όχημα. Ο πεζός και το όχημα είναι σφαιρικά αντικείμενα ακτίνας  $R_1$  και  $R_2$ , τα αντικείμενα έχουν σταθερή ταχύτητα και επίσης, γίνεται η παραδοχή ότι το όχημα και ο πεζός κινούνται πάνω σε ευθείες τροχιές. Το μοντέλο υπολογίζει τον χρόνο και την απόσταση όπου τα δύο αντικείμενα θα βρεθούν στην ελάχιστη απόσταση. Όταν η απόσταση είναι μηδενική αυτό σημαίνει ότι τα αντικείμενα συγκρούονται.

Αρχικά θα πρέπει να γράψουμε τις συναρτήσεις που περιγράφουν την κίνηση του κάθε οχήματος. Αν θεωρήσουμε ότι οι αρχικές θέσεις του οχήματος και του πεζού είναι  $P_a$  και  $P_b$  και οι ταχύτητες τους είναι  $V_a$  και  $V_b$  τότε οι θέσεις τους κάθε χρονική στιγμή είναι οι παραμετροποιημένες συναρτήσεις χρόνου (βλ. σχήμα 3.9).

$$\begin{aligned} A(t) &= P_a + tV_a \\ B(t) &= P_b + tV_b \end{aligned} \quad (3.7)$$

Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε την ευκλείδεια απόσταση για να περιγράψουμε την απόσταση των αντικειμένων.

$$d(t) = |A(t) - B(t)| - (R_a + R_b) \quad (3.8)$$

Στόχος είναι να βρεθεί η χρονική στιγμή για την οποία ισχύει ότι  $d(t) = 0$ . Για την επίλυση του προβλήματος αρκεί να βρούμε την ρίζα του  $d(t)$ . Άρα θέτοντας  $d(t) = 0$  πρέπει να λύσουμε την παρακάτω εξίσωση.

$$0 = \sqrt{(A(t) - B(t))^2} - (R_a + R_b) \quad (3.9)$$

Στην συνέχεια μετασχηματίζουμε την παραπάνω εξίσωση για να την φέρουμε σε τετραγωνική μορφή και αντικαθιστούμε τις εξισώσεις κίνησης  $A(t)$  και  $B(t)$ , ετσι έχουμε.

$$\begin{aligned} (R_a + R_b)^2 &= (A(t) - B(t))^2 \\ (R_a + R_b)^2 &= (P_a + tV_a - P_b - tV_b)^2 \\ (R_a + R_b)^2 &= ((P_a - P_b) + t(V_a - V_b))^2 \\ P_{ab} &= P_a - P_b \quad V_{ab} = V_a - V_b \\ (R_a + R_b)^2 &= (P_{ab} + tV_{ab})^2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

---

Έπειτα εκτελούνται οι πράξεις για την επέκταση της τετραγωνικής μορφής, σημειώνεται ότι οι μεταβλητές  $P_{ab}$  και  $V_{ab}$  είναι διανύσματα άρα η πράξη του πολλαπλασιασμού αντιστοιχεί στο εσωτερικό γινόμενο.

$$0 = t^2 (V_{ab} \cdot V_{ab}) + 2t (P_{ab} \cdot V_{ab}) + (P_{ab} \cdot P_{ab}) - (R_a + R_b)^2 \quad (3.11)$$

Η λύση της παραπάνω τετραγωνικής εξίσωσης είναι:

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.12)$$

όπου

$$a = V_{ab} \cdot V_{ab} \quad b = 2(P_{ab} \cdot V_{ab}) \quad c = P_{ab} \cdot P_{ab} - (R_a + R_b)^2$$

Από τα παραπάνω υπάρχουν τρεις περιπτώσεις για τις λύσεις, στην πρώτη περίπτωση έχουμε μία πραγματική λύση, στην δεύτερη δύο πραγματικές λύσεις και στην τελευταία περίπτωση δεν υπάρχουν καθόλου πραγματικές λύσεις. Οι περιπτώσεις καθορίζονται από την τιμή της διακρίνουσας.

$$\Delta = b^2 - 4ac \quad (3.13)$$

Ανάλογα με τις περιπτώσεις των ριζών καθορίζονται και οι περιπτώσει για τα σενάρια σύγκρουσης μεταξύ οχήματος και πεζού.

1. Η διακρίνουσα είναι αρνητική, τότε δεν γίνεται σύγκρουση μεταξύ οχήματος και πεζού.
2. Η διακρίνουσα είναι μηδέν, τότε συμβαίνει σύγκρουση αλλά τα σώματα ίσα που ακουμπάνε σε ένα σημείο.
3. Η διακρίνουσα είναι θετική, τότε τα σώματα συγκρούονται.

Στην περίπτωση 1 και 2 η χρονική στιγμή που τα σώματα φτάνουν στην ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους δίνεται από την εξίσωση.

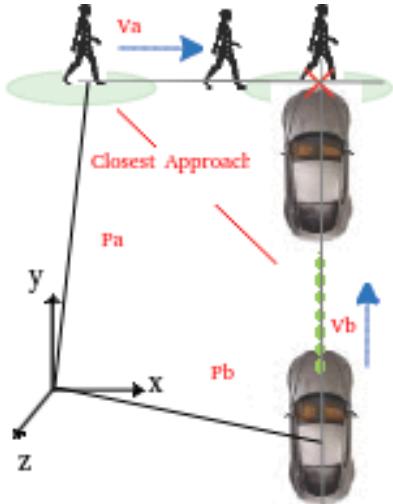
$$t = -\frac{b}{2a} \quad (3.14)$$

Για την περίπτωση 1 ο χρόνος αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή που τα σώματα φτάνουν όσο πιο κοντά γίνεται αλλά χωρίς να συγκρουστούν, ενώ στην περίπτωση 2 αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή της σύγκρουσης. Για την περίπτωση 3 ο χρόνος σύγκρουσης δίνεται από τις σχέσεις.

$$t_0 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad t_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.15)$$

$$t = \min(t_0, t_1)$$

Για τον υπολογισμό της απόστασης σε κάθε περίπτωση μπορεί να αντικατασταθεί η τιμή του  $t$  στην εξίσωση  $d(t)$ . Άρα για να βρεθεί η ελάχιστη απόσταση αρκεί να λυθεί η εξίσωση του  $d(t)$  για  $t = -\frac{b}{2a}$ .



Σχήμα 3.9: Κινηματικό μοντέλο πρόβλεψης σύγκρουσης οχήματος και πεζού<sup>17</sup>

### Περιγραφή αλγορίθμου

Αρχικά θα πρέπει να ληφθούν υπόψη μόνο οι πεζοί που είναι δυνατόν να συγκρουστούν με το όχημα, για αυτό το λόγω θα οριστεί ένας χώρος μπροστά από το όχημα και μόνο οι πεζοί που εισέρχονται μέσα σε αυτόν θα λαμβάνονται υπόψη. Ο χώρος μεταβάλλεται δυναμικά ανάλογα με την ταχύτητα του οχήματος και έχει την μορφή κυκλικού τομέα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10. Ο χώρος καθορίζεται από δύο γωνίες που ορίζουν την γωνία του τόξου και μια απόσταση που αντιστοιχεί στην ακτίνα το κύκλου. Οι μεταβλητές αυτές αλλάζουμε με την ταχύτητα, έτσι για μεγάλες ταχύτητες ο χώρος γίνεται πιο στενός αλλά με μεγαλύτερο μήκος προς τα μπροστά, ενώ για μικρές ταχύτητες συμβαίνει το αντίθετο. Η λογική για αυτή την επιλογή είναι ότι όσο μεγαλώνει η ταχύτητα οι πεζοί που βρίσκονται σχετικά κοντά στο όχημα δεν θα προλάβουν να μπουν μπροστά από το όχημα λόγω της μικρής ταχύτητας τους, επομένως, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη κυρίως τους πεζούς που βρίσκονται πιο μακριά από το όχημα. Όπως φαίνεται στον παρακάτω αλγόριθμο που περιγράφει την λογική, έχει επιλεχθεί η γωνία του τόξου του κύκλου του χώρου για μικρές ταχύτητες να έχει τιμή  $2 * \text{min\_angle}$  αφού ορίζεται από  $[-\text{min\_angle}, +\text{min\_angle}]$  και μήκος  $\text{min\_radius}$ . Οι τιμές των γωνιών μικραίνουν με την αύξηση της ταχύτητας ενώ το μήκος της ακτίνας μεγαλώνει.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

---

### Algorithm 11: get\_pedestrians

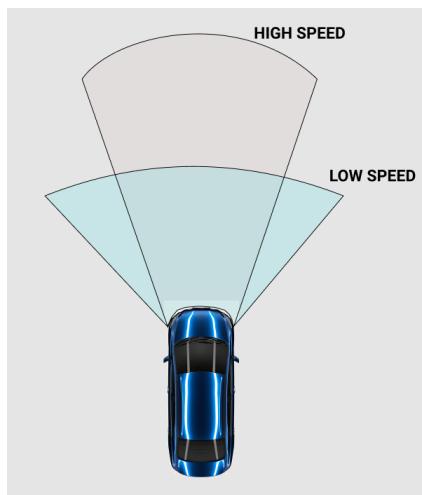
---

**Result:** pedestrians

```
1 speed_threshold : The recommended speed for safe driving, can be equal to speed limit.  
2 t_stop : The time needed for the vehicle to stop.  
3 min_radius : Distance ahead in which pedestrians can be detected.  
4 min_angle : A minimum angle for the search area.  
5 if ego_vehicle_speed < speed_threshold then  
6   | to_angle = min_angle - ego_vehicle_speed  
7 else  
8   | to_angle = min_angle  
9 end  
10 from_angle = - to_angle  
11 radius = min_radius + ego_vehicle_speed * t_stop  
12 pedestrians = get_all_pedestrians(from_angle, to_angle, radius)
```

---

Στο παρακάτω σχήμα 3.10 παρουσιάζεται η μορφή του χώρου για τον οποίο λαμβάνονται υπόψη οι πεζοί, το κυανό μπλε τμήμα αντιστοιχεί στο χώρο για μικρές ταχύτητες του οχήματος ενώ το ανοιχτό γκρι τμήμα αντιστοιχεί στο χώρο για μεγάλες ταχύτητες του οχήματος.



Σχήμα 3.10: Ο χώρος για τον οποίο λαμβάνονται υπόψη οι πεζοί και ο οποίος μεταβάλλεται με την ταχύτητα.

Αφού καθοριστεί ο χώρος για τον οποίο θα ληφθούν υπόψη οι πεζοί, στην συνέχεια θα γίνει η πρόβλεψη της σύγκρουσης. Για την πρόβλεψη θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος που περιγράφηκε προηγουμένως. Ο αλγόριθμος της διαδικασίας παρουσιάζεται παρακάτω.

### 3.6.3 Πρόβλεψη σύγκρουσης με όχημα

Η μέθοδος για την πρόβλεψη σύγκρουσης με ερχόμενο όχημα είναι πιο πολύπλοκη από την πρόβλεψη σύγκρουσης με πεζό και αποτελείται από πολλά στάδια.

### 3.6. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΖΩΝ

---

**Algorithm 12:** predict\_collision\_with\_pedestrian

---

```

Result: collision_time , closest_distance
1 ego_vehicle : The ego vehicle object
2 pedestrians : The pedestrians objects
3 radius_sum : The sum of both vehicle's and pedestrian's radius
4 for each pedestrian do
5   relative_speed_x: Vehicle's x-axis speed relative to pedestrian
6   relative_speed_y: Vehicle's y-axis speed relative to pedestrian
7   relative_distance_x: Vehicle's x-axis speed relative to pedestrian
8   relative_distance_y: Vehicle's y-axis speed relative to pedestrian
9   a  $\leftarrow$  relative_speed_x2 + relative_speed_y2
10  b  $\leftarrow$  2 * (relative_speed_x * relative_distance_x +
11      relative_speed_y * relative_distance_y)
12  c  $\leftarrow$  relative_distance_x2 + relative_distance_y2 - radius_sum2
13  discriminant = b2 - 4 * a * c
14  if discriminant > 0 then
15    # Collision happens
16    t0  $\leftarrow$  (-b -  $\sqrt{discriminant}$ )/(2.0 * a)
17    t1  $\leftarrow$  (-b +  $\sqrt{discriminant}$ )/(2.0 * a)
18    if min(t0, t1)  $\geq$  0.0 then
19      | t  $\leftarrow$  min(t0, t1)
20    else
21      | t  $\leftarrow$  max(t0, t1)
22    end
23    min_dist  $\leftarrow$  0.0
24  else
25    # There is no collision
26    t  $\leftarrow$  -b/(2 * a)
27    min_dist  $\leftarrow$  a * (t2) + t * b + c
28  end
29 end
30 collision_time  $\leftarrow$  minimum time of all the above time values
31 closest_distance  $\leftarrow$  the distance of minimum time of all the above values

```

---

Αρχικά, κατά την εκτέλεση της μεθόδου χρησιμοποιείται η τεχνική των πρωτότυπων τροχιών για την εκτίμηση των πιθανών τροχιών που πρόκειται να ακολουθήσει το ερχόμενο όχημα. Στην συνέχεια, γίνεται εκτίμηση της κίνησης του ερχόμενου οχήματος, για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιείται η πρωτότυπη τροχιά που έχει επιλεγεί από το προηγούμενο στάδιο. Με χρήση ενός κρυφού μαρκοβιανού μοντέλου γίνεται πρόβλεψη του μοντέλου κίνησης του οχήματος και εκτιμάται η πορεία του πάνω στην πρωτότυπη τροχιά. Τελικά, υπολογίζεται η πιθανότητα σύγκρουσης του οχήματος με το αυτόνομο όχημα και γίνεται εκτίμηση για τον χρόνο σύγκρουσης και το σημείο σύγκρουσης των δύο οχημάτων. Τα στάδια της διαδικασίας συνοπτικά παρουσιάζονται παρακάτω.

1. Εκτίμηση της τροχιάς που θα ακολουθήσει ένα γειτονικό όχημα με χρήση της μεθόδου των πρωτότυπων τροχιών.
2. Εκτίμηση της πρόθεσης/κίνησης του οχήματος με χρήση του κρυφού μαρκοβιανού μοντέλου (HMM) .
3. Εκτίμηση της τροχιάς του αυτόνομου οχήματος.

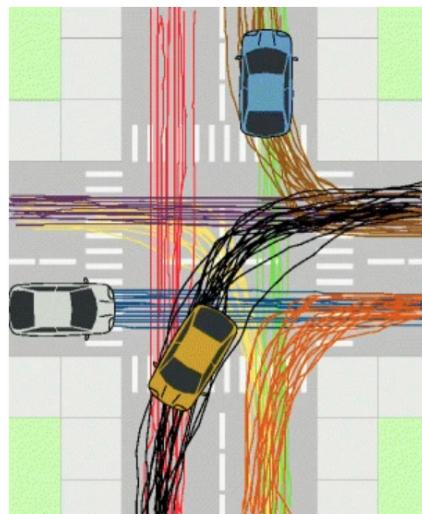
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

4. Με χρήση των τροχιών και των κινηματικών μοντέλων που υπολογίστηκαν προηγουμένως υπολογίζεται η πιθανότητα, ο χρόνος και το σημείο σύγκρουσης των οχημάτων.

### Πρωτότυπες τροχιές

#### Ομαδοποίηση σε συστάδες

Η τεχνική των πρωτότυπων τροχιών στηρίζεται στην ιδέα ότι οι τροχιές των οχημάτων στο οδικό δίκτυο μπορούν να ομαδοποιηθούν σε ένα πεπερασμένο σύνολο συστάδων όπου κάθε συστάδα αντιστοιχεί σε ένα τυπικό μοτίβο κίνησης. Το κάθε μοτίβο κίνησης αναπαρίστανται χρησιμοποιώντας πρωτότυπες τροχιές οι οποίες αποκτώνται κατά την διαδικασία μάθησης. Στην φάση της μάθησης γίνεται καταγραφή των τροχιών των οχημάτων και στην συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της ομαδοποίησης όπου οι τροχιές ομαδοποιούνται σε συστάδες και η κάθε συστάδα αντιστοιχεί σε ένα μοτίβο κίνησης. Η ομαδοποίηση μπορεί να γίνει με κριτήρια όπως, την απόσταση των τροχιών, την καμπυλότητα τους, το αρχικό και το τελικό σημείο τους και γενικότερα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Λόγω του ότι το οδικό δίκτυο είναι δομημένο περιβάλλον η εκπαίδευση και η κατασκευή των πρωτότυπων τροχιών είναι μια διαδικασία που μπορεί να γίνει εκ των προτέρων, επομένως οι πρωτότυπες τροχιές μπορούν να αποθηκευτούν σε έναν φηφιακό χάρτη και να εξαχθούν από εκεί όταν χρειαστεί. Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζονται οι συστάδες των τροχιών, η κάθε μια αντιστοιχεί σε ένα μοτίβο κίνησης. Από κάθε συστάδα θα προκύψει η αντίστοιχη πρωτότυπη τροχιά που περιγράφει ένα συγκεκριμένο μοτίβο κίνησης.



Σχήμα 3.11: Συστάδες τροχιών, η κάθε συστάδα αντιστοιχεί σε ένα μοτίβο κίνησης [13]

Στη παρούσα διπλωματική έχει επιλεχθεί να χρησιμοποιηθεί ο χάρτης του οδικού δικτύου που προκύπτει από τον προσωμοιωτή Carla και να εξαχθούν από εκεί οι πρωτότυπες τροχιές. Έτσι, για κάθε όχημα εξάγουμε από τον χάρτη τις τροχιές που ξεκινάνε από το όχημα και φτάνουν κάποια απόσταση μπροστά από αυτό, η κάθε τροχιά αντιστοιχεί σε μια συστάδα.

### Αναπαράσταση συστάδας

Αφού γίνει η ομαδοποίηση των πρωτότυπων τροχιών σε συστάδες θα πρέπει να γίνει επιλογή για τον τρόπο με τον οποίο θα αναπαρίσταται η κάθε συστάδα. Μία επιλογή είναι να αναπαρασταθεί η κάθε συστάδα από μια τροχιά η οποία θα προκύψει μετά από κάποια αλγορίθμική διαδικασία κατά την οποία συνυπολογίζονται όλες οι τροχιές της συστάδας. Για παράδειγμα, μια στοχαστική αναπαράσταση μπορεί να προκύψει από τον υπολογισμό του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης όλων των τροχιών της συστάδας [14]. Μια άλλη επιλογή είναι, να χρησιμοποιηθεί ένα υποσύνολο των τροχιών της συστάδας για την αναπαράσταση της κάθε συστάδας [15].

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην παρούσα διπλωματική οι συστάδες εξάγονται απευθείας από γνωστό χάρτη σε μορφή τροχιών, δεν γίνεται περαιτέρω κάποια επιπλέον διαδικασία για την επεξεργασία τους και τον μετασχηματισμό τους σε άλλη μορφή, επομένως η αναπαράσταση τους γίνεται με τροχιές που αντιστοιχούν στο μέσο των λωρίδων κυκλοφορίας και ακολουθούν την γεωμετρία του δρόμου.

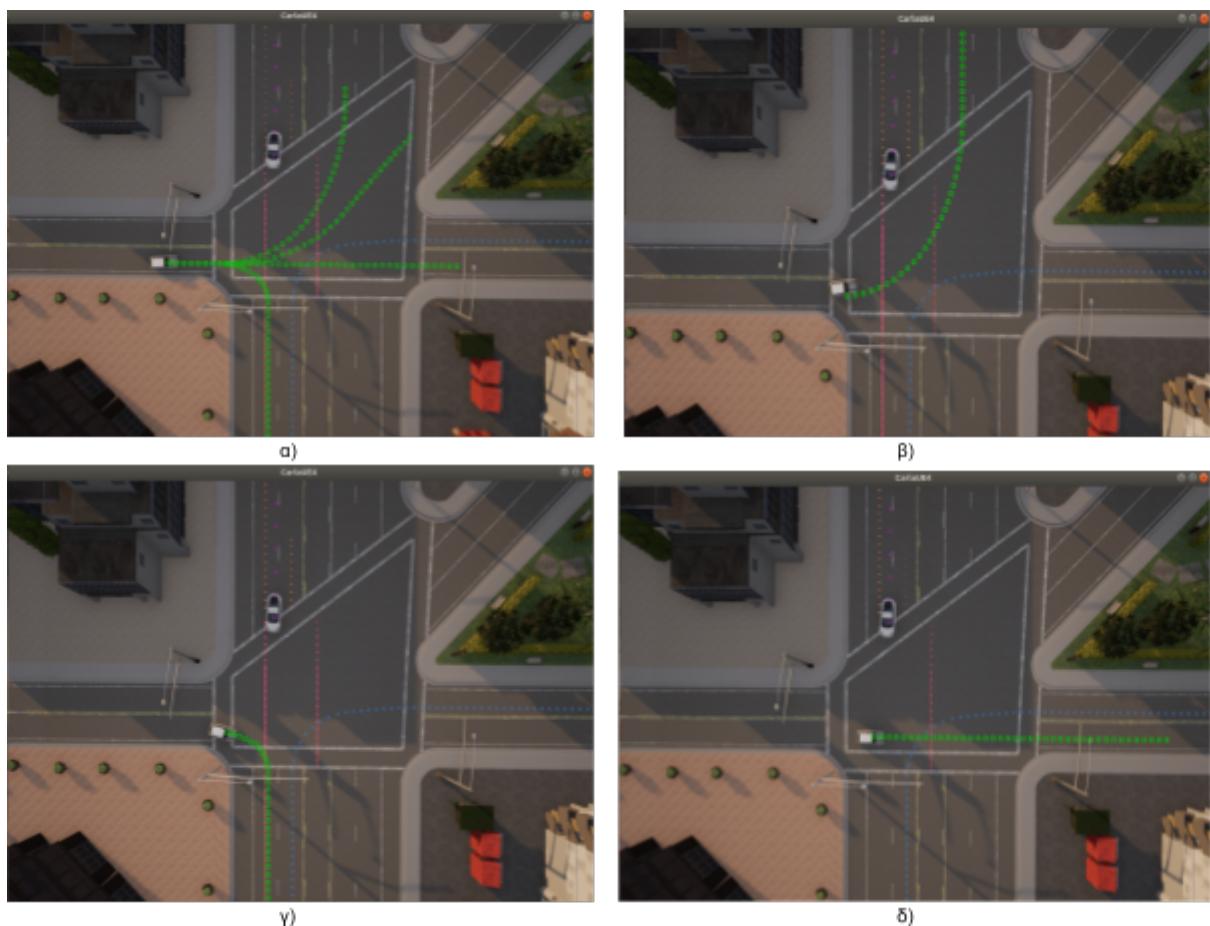
### Επιλογή συστάδας

Το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας είναι η επιλογή της συστάδας που θα ακολουθήσει το όχημα. Στο στάδιο αυτό γίνεται εκτίμηση της πιο πιθανής συστάδας με χρήση κάποιον μεταβλητών. Για την εκτίμηση της πιο πιθανής τροχιάς χρησιμοποιούνται μετρικές που αξιολογούν την κίνηση του οχήματος, την θέση του οχήματος στο οδόστρωμα, την ταχύτητα και τον προσανατολισμό αλλά και άλλα χαρακτηριστικά όπως τις κινήσεις του οδηγού και τα φλας του οχήματος. Επίσης, μπορεί να γίνει επιλογή περισσότερων συστάδων και για κάθε συστάδα να αποδοθεί η πιθανότητα του οχήματος να την ακολουθήσει ή να χρησιμοποιηθούν μαζί με τις πιθανότητες για την κατασκευή ενός νέου μοτίβου κίνησης που προκύπτει από το συνδυασμό των συστάδων και των πιθανοτήτων τους.

Για τον υπολογισμό της πιο πιθανής τροχιάς στην παρούσα διπλωματική έχουν χρησιμοποιηθεί δύο κριτήρια, το πρώτο είναι η απόσταση του οχήματος από τις πρωτότυπες τροχιές και το δεύτερο είναι ο προσανατολισμός του οχήματος. Στο σχήμα 3.12 φαίνεται ένα παράδειγμα από την πρόβλεψη της πιο πιθανής τροχιάς ενός οχήματος για διαφορετικές θέσεις και προσανατολισμούς του οχήματος πάνω στο οδόστρωμα. Στην εικόνα α φαίνονται όλες οι συστάδες, από την θέση του οχήματος και τον προσανατολισμό του είναι νωρίς για να βγει ακόμα κάποιο συμπέρασμα για την κίνηση του και επομένως όλες οι συστάδες είναι πιθανές τροχιές με την ίδια πιθανότητα. Στην εικόνες β ως δ παρουσιάζονται οι τροχιές που έχουν προβλεφθεί ως οι πιο πιθανές για να ακολουθήσει το όχημα με βάσει την απόσταση και τον προσανατολισμό του.

Για κάθε όχημα αποθηκεύεται ένα σύνολο από παρελθοντικά στιγμιότυπα του οχήματος, έχοντας λοιπόν ένα σύνολο από τις θέσεις και τους προσανατολισμούς του οχήματος από την τωρινή κατάσταση του μέχρι κάποια στιγμή στο παρελθόν συγκρίνομε τα δεδομένα αυτά με τις πρωτότυπες τροχιές και υπολογίζουμε την πιο πιθανή τροχιά που πρόκειται να ακολουθήσει το όχημα. Η αλγορίθμική διαδικασία για την πρόβλεψη της τροχιάς του οχήματος παρουσιάζεται στο παρακάτω φευδοκώδικα. Αρχικά, παίρνουμε τις πρωτότυπες τροχιές από τον χάρτη του Carla

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ



Σχήμα 3.12: Μέθοδος πρωτότυπων τροχιών. α) Όλες οι συστάδες των πρωτότυπων τροχιών (μονοπάτια πράσινου χρώματος). β), γ), δ) Επιλογή της πιο πιθανής τροχιάς σύμφωνα με την θέση και την κατεύθυνση του οχήματος.

που αντιστοιχούν σε όλες τις τροχιές που ξεκινούν από το οχημα και ακολουθούν την γεωμετρία του δρόμου προς κάθε πιθανή κατεύθυνση. Στις γραμμές 2-4 ορίζονται κάποιες παράμετροι για τα όρια των πιθανοτήτων που χρησιμοποιούνται στις γραμμές 23-28 για την επιλογή των πιθανών τροχιών. Στην συνέχεια, από τα παρελθοντικά στιγμιότυπα του οχήματος και τις πρωτότυπες τροχιές υπολογίζεται η ελάχιστη απόσταση για κάθε στιγμιότυπο από τις τροχιές καθώς και το συνημίτονο της σχετικής γωνίας μεταξύ της κατεύθυνσης του μονοπατιού και του οχήματος. Αφού υπολογιστούν οι παράμετροι της απόστασης και της κατεύθυνσης του οχήματος σε σχέση με τροχιές, στην συνέχεια στις γραμμές 12-16 υπολογίζονται οι μέγιστες τιμές των παραμέτρων για κάθε τροχιά. Στις γραμμές 18-21 γίνεται ο υπολογισμός των πιθανοτήτων για την επιλογή της κάθε τροχιάς. Τέλος, στις γραμμές 22-29 επιλέγονται οι τροχιές οι οποίες έχουν πιθανότητα πολύ κοντά στην μεγαλύτερη πιθανότητα (γραμμή 23) ή η μέγιστη πιθανότητα είναι μικρότερη από ένα όριο (γραμμή 24) ή η πιθανότητα της τροχιάς είναι μεγαλύτερη από ένα ανώτατο όριο (γραμμή 25).

**Algorithm 13:** prototype\_trajectories\_probabilities

---

**Result:** possible\_trajectories\_list, probabilities

```

1 prototype_trajectories : Get prototype trajectories from the digital map
2 e_threshold : Error threshold in order for a trajectory to be taken
3 min_probability : A min probability to reject trajectories
4 max_probability : A max probability to include trajectories
5 for each saved past vehicle state do
6   x-y ← vehicle past positions
7   for each trajectory do
8     min_dist_list[] : A list with the minimum distance for every vehicle position from
      every trajectory.
9     directions_cos_list[] : A list of cosines of every yaw value of the point of the
      trajectory with the minimum distance.
10    end
11  end
12 for each trajectory do
13   max_yaws[]: The maximum yaw value of every vehicle position, is taken from the
      directions_cos_list.
14   max_dists[]: The maximum dist from all trajectories, is taken from the min_dist_list.
15   max_values[] ← max_dist + max_yaw2.
16
17 end
18 sum_max_values ← Sum of all max_values
19 for each max_value do
20   probabilities[] ←  $\frac{\max\_value}{\sum \max\_values}$ .
21 end
22 max_probability ← max(probabilities)
23 for each probability do
24   if ||max_probability - probability|| < e_threshold or
25     max_probability < min_probability or
26     probability > max_probability then
27     possible_trajectories_list[] ← The trajectory that
      corresponds to the probability.
28     probabilities[] ← The probability.
29   end
30 end
31 return possible_trajectories_list, probabilities

```

---

Εκτίμηση της πρόθεσης του οχήματος.

#### Μαρκοβιανό μοντέλο κρυφών καταστάσεων

Μετά την εκτίμηση της τροχιάς του οχήματος θα πρέπει να γίνει και εκτίμηση της κίνησης που θα ακολουθήσει το όχημα καθώς θα διασχίζει τη τροχιά, στην ουσία θα πρέπει να εκτιμηθεί η ταχύτητα του οχήματος. Για αυτό τον σκοπό, έχει χρησιμοποιηθεί ένα μαρκοβιανό μοντέλο κρυφών καταστάσεων, οι κρυφές καταστάσεις αντιστοιχούν στην εκτιμώμενη κατάσταση της ταχύτητας του οχήματος και αυτές οι καταστάσεις μπορεί να είναι μία από τις “Accelerate”, “Decelerate”, “Steady” και “Stop”. Οι καταστάσεις, όπως φαίνεται και από την ονομασία τους, δίνουν πληρο-

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

---

φορία για το αν το όχημα θα επιταχύνει, επιβραδύνει, κρατήσει σταθερή ταχύτητα ή θα σταματήσει. Οι κρυφές καταστάσεις θα εκτιμηθούν από τις παρατηρήσιμες καταστάσεις. Η εκτίμηση για την κίνηση γίνεται κυρίως για τα οχήματα που βρίσκονται σε διασταύρωσεις, πριν από φανάρια ή σημεία υποχρεωτικής διακοπής πορείας. Οι παρατηρήσιμες καταστάσεις έχουν κατασκευαστεί με την εξής λογική, θεωρείται ότι έχουμε τρεις παράγοντες που μπορούν να δώσουν πληροφορία για την κίνηση που θα εκτελέσει το όχημα, ο πρώτος είναι η απόσταση του οχήματος από την διασταύρωση, φανάρι, stop, ο δεύτερος είναι η τρέχουσα ταχύτητα του οχήματος και τέλος η απόσταση του οχήματος από το αυτόνομο όχημα. Αν για παράδειγμα, ένα όχημα πλησιάζει μια διασταύρωση και είναι πολύ κοντά σε αυτή και έχει μεγάλη ταχύτητα τότε είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι το όχημα δεν θα σταματήσει στην διασταύρωση. Κάθε ένα από τα τρία κριτήρια θεωρούμε ότι μπορεί να έχει δύο τιμές οι οποίες είναι "S" και "B" που προκύπτουν από τις λέξεις small και big, δηλαδή μικρός και μεγάλος αντίστοιχα. Έτσι, έχουμε τρία κριτήρια και δύο καταστάσεις για κάθε ένα κριτήριο.

Κριτήρια για την πρόβλεψη των κρυφών καταστάσεων:

1. Απόσταση οχήματος από διασταύρωση, φανάρι, stop.
2. Τρέχουσα ταχύτητα οχήματος.
3. Απόσταση του οχήματος από το αυτόνομο όχημα.

Για κάθε κριτήριο έχουμε δύο καταστάσεις:

1. S: (small) που σημαίνει μικρή τιμή για το κριτήριο.
2. B: (big) που σημαίνει μεγάλη τιμή για το κριτήριο.

Από τα παραπάνω οι παρατηρήσιμες καταστάσεις είναι  $2^3 = 8$  και προκύπτουν από τους πιθανούς συνδυασμούς των παραπάνω καταστάσεων των κριτηρίων.

Παρατηρήσιμες καταστάσεις:

[SSS, SSB, SBS, SBB, BSS, BSB, BBS, BBB]

Το μαρκοβιτιανό μοντέλο κρυφών καταστάσεων που προκύπτει φαίνεται στο παρακάτω γράφημα 3.13. Στο σχήμα παρουσιάζονται οι κρυφές καταστάσεις, οι παρατηρούμενες καταστάσεις και οι συνδέσεις μεταξύ του που αντιστοιχούν σε μια πιθανότητα μετάβασης ή παρατήρησης. Τα αποσιωπητικά στο σχήμα δηλώνουν ότι οι συνδέσεις είναι παρόμοιες για όλες τις παρατηρήσιμες καταστάσεις αλλά για χάρη ευκολίας και καλύτερη κατανόησης έχουν παραληφθεί.

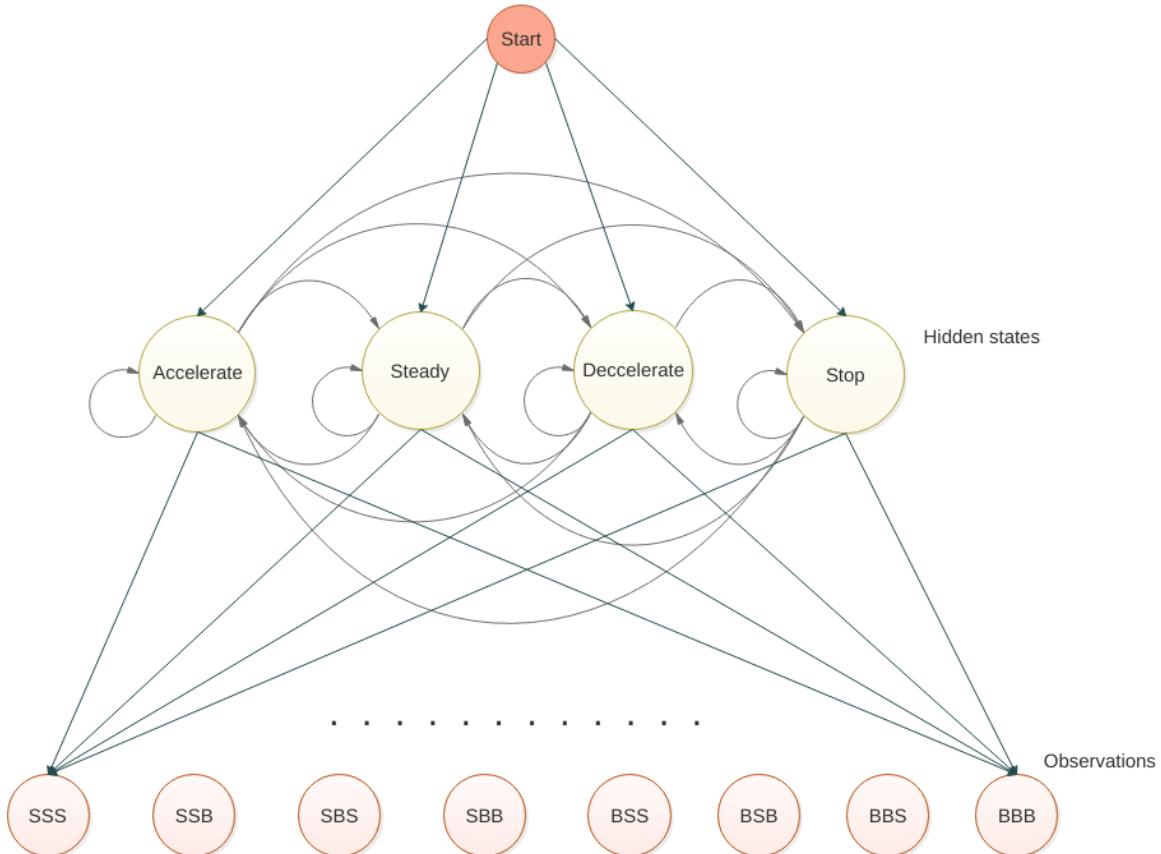
Ένα παράδειγμα της παραπάνω διαδικασίας είναι το εξής, έστω ότι ένα όχημα πλησιάζει με μεγάλη ταχύτητα ένα φανάρι από το οποίο απέχει μικρή απόσταση και το αυτόνομο όχημα βρίσκεται μπροστά από το όχημα και κοντά σε αυτό. Άρα τα κριτήρια θα πάρουν τις εξής τιμές.

1. Απόσταση οχήματος από διασταύρωση, φανάρι, stop → S
2. Τρέχουσα ταχύτητα οχήματος. → B

### 3.6. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΖΩΝ

3. Απόσταση του οχήματος από το αυτόνομο όχημα. → S

Άρα η παρατηρήσιμη κατάσταση του οχήματος είναι η SBS. Δεδομένου επομένως της παρατήρησης και του μοντέλου θα προκύψει η πιο πιθανή κατάσταση στην οποία θα βρεθεί το όχημα στο μέλλον. Το λογικό θα είναι με βάσει την περιγραφή του παραδείγματος το μοντέλο να προβλέψει ως πιο πιθανή κατάσταση την “Decelerate” ή “Stop” έτσι ώστε να αποφευχθεί μία πιθανή σύγκρουση των οχημάτων.



Σχήμα 3.13: Το μαρκοβιανό μοντέλο κρυφών καταστάσεων του συστήματος εκτίμησης της ταχύτητας

#### Εκπαίδευση μοντέλου

Πριν γίνει χρήση του μοντέλου θα πρέπει πρώτα να εκπαιδευτεί συλλέγοντας δεδομένα από πραγματικά παραδείγματα κίνησης. Για το σκοπό αυτὸ Χρησιμοποιείται ο Carla προσομοιωτής και εκτελούνται επαναλαμβανόμενα σενάρια κατά τα οποία καταγράφονται οι παρατηρούμενες καταστάσεις και οι κρυφές καταστάσεις του οχήματος και υπολογίζονται ο πίνακας πιθανοτήτων μετάβασης και οι πιθανότητες εκπομπής. Για τον υπολογισμό των τιμών των πιθανοτήτων η λογική είναι η εξής, για τις πιθανότητες μετάβασης κατασκευάζεται ο παρακάτω πίνακας μεταβάσεων όπου οι γραμμές αντιστοιχούν στην προηγούμενη κατάσταση του οχήματος και οι στήλες στην τωρινή κατάσταση του οχήματος. Κάθε στιγμή καταγράφουμε τις καταστάσεις και αυξάνουμε την τιμή στο αντίστοιχο κελί του πίνακα

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

---

	“Accelerate”	“Decelerate”	“Steady”	“Stop”
“Accelerate”	100	200	400	40
“Decelerate”	100	300	150	600
“Steady”	400	390	800	100
“Stop”	300	0	60	500

Πίνακας 3.7: Στιγμιότυπο πίνακα μεταβάσεων καταστάσεων μετά την εκπαίδευση.

	SSS	SSB	SBS	SBB	BSS	BSB	BBS	BBB
“Accelerate”	100	200	400	40	200	200	400	40
“Decelerate”	100	300	150	600	300	300	150	600
“Steady”	400	390	800	100	390	390	800	100
“Stop”	300	0	60	500	0	0	60	500

Πίνακας 3.8: Στιγμιότυπο πίνακα εκπομπής

κατά ένα, έστω το στιγμιότυπο του πίνακα 3.7 μεταβάσεων καταστάσεων μετά την εκπαίδευση.

Αν για παράδειγμα η προηγούμενη κατάσταση είναι η “Accelerate” και η τωρινή κατάσταση το “Decelerate” η τιμή 200 στο παραπάνω πίνακα θα γίνει 201.

Στο τέλος της διαδικασίας διαιρούμε την κάθε τιμή με το άθροισμα των τιμών ανά γραμμή για να υπολογίσουμε την πιθανότητα μετάβασης δεδομένου μιας κατάστασης σε μία άλλη. Για παράδειγμα για την πρώτη γραμμή έχουμε  $100+200+400+40 = 740$  άρα η πιθανότητα δεδομένου ότι βρισκόμαστε στην κατάσταση “Accelerate” το όχημα να μεταβεί στην κατάσταση “Decelerate” είναι  $200/740 = 0.2703$ .

Με την ίδια λογική κατασκευάζεται και ο πίνακας εκπομπής ή αλλιώς ο πίνακας των πιθανοτήτων το όχημα να βρίσκεται σε μία κατάσταση δεδομένου της παρατήρησης. Ένα στιγμιότυπο του πίνακα εκπομπής παρουσιάζεται στο πίνακα 3.8.

Αν για παράδειγμα η παρατήρηση είναι SSS και το όχημα βρίσκεται σε κατάσταση “Accelerate” τότε η τιμή 100 στο πρώτο πάνω αριστερά κελί θα γίνει 101.

Στο τέλος της διαδικασίας διαιρούμε την κάθε τιμή με το άθροισμα των τιμών ανά στήλη αυτή την φορά, σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση που διαιρούσαμε ανά γραμμή, για να υπολογίσουμε την πιθανότητα το όχημα να βρίσκεται σε μία κατάσταση δεδομένου της παρατήρησης. Για παράδειγμα, για την πρώτη γραμμή έχουμε  $100+100+400+300 = 900$  άρα η πιθανότητα το όχημα να βρίσκεται σε κατάσταση “Accelerate” δεδομένου της παρατήρησης SSS είναι  $100/900 = 0.111$ .

Συνοψίζοντας, στο τέλος της διαδικασίας της εκπαίδευσης θα έχουν υπολογιστεί ο πίνακας μεταβάσεων και ο πίνακας εκπομπής.

### Διαδικασία Fitting

Κατά την διαδικασία του fitting μετασχηματίζονται οι παραπάνω πίνακες κατάλληλα ώστε να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα μετάβασης καταστάσεων δεδομένου μιας αλληλουχίας παρατηρήσεων, δηλαδή, δεδομένου ότι έχουμε μια αλληλουχία

### 3.6. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΖΩΝ

	“Accelerate”	“Decelerate”	“Steady”	“Stop”
“Accelerate”	0.773	0.000	0.0093	0.210
“Decelerate”	0.1206	0.388	0.2746	0.215
“Steady”	0.0029	0.111	0.686	0.199
“Stop”	0.0064	0.0615	0.221	0.710

Πίνακας 3.9: Πίνακας πιθανοτήτων μεταβάσεων πριν το fitting

	“Accelerate”	“Decelerate”	“Steady”	“Stop”
“Accelerate”	0.718	0.020	0.124	0.135
“Decelerate”	0.113	0.574	0.125	0.186
“Steady”	0.062	0.195	0.388	0.354
“Stop”	0.063	0.259	0.303	0.374

Πίνακας 3.10: Πίνακας πιθανοτήτων μεταβάσεων μετά το fitting

παρατηρήσεων φάχνουμε την πιο πιθανή αλληλουχία καταστάσεων όπου η πιθανότητα της συγκεκριμένης αλληλουχίας μεγιστοποιείται. Στην ουσία δεν φάχνουμε μόνο την αλληλουχία με τη μέγιστη πιθανότητα αλλά θέλουμε επιπλέον αυτή η πιθανότητα να μεγιστοποιείται. Υπάρχουν αρκετά γνωστή αλγόριθμοι για την διαδικασία του fitting όπως ο Expectation-Maximization (EM) αλγόριθμος [16] ή ο Baum-Welch αλγόριθμος [17] που είναι ειδική περίπτωση του EM αλγόριθμου. Στην παρούσα διπλωματική έχει χρησιμοποιηθεί για την διαδικασία του fitting ο Baum-Welch αλγόριθμος κατά τον οποίο τροφοδοτούμε στο μοντέλο μια αλληλουχία από καταστάσεις και το μοντέλο προσαρμόζει με χρήση του αλγόριθμου Baum-Welch τιμές των πιθανοτήτων των δύο πινάκων.

Ένα παράδειγμα για την πρόβλεψη των καταστάσεων πριν και μετά την διαδικασία του fitting παρουσιάζεται στους πίνακες 3.9 και 3.10 αντίστοιχα. Οι τιμές και τα δεδομένα είναι πραγματικά και έχουν εξαχθεί από το μοντέλο πρίν και μετά την διαδικασία του fitting.

Για την αλληλουχία των παρατηρήσεων [BBB, SBB, SBS, SSB] έχουμε.

- Πριν την διαδικασία του fitting.
  - Πρόβλεψη για τις καταστάσεις του συστήματος: [‘Accelerate’, ‘Accelerate’, ‘Accelerate’, ‘Accelerate’]
  - Πιθανότητα αλληλουχίας: 0.000247
- Μετά την διαδικασία του fitting.
  - Πρόβλεψη για τις καταστάσεις του συστήματος: [‘Steady’, ‘Decelerate’, ‘Stop’, ‘Stop’]
  - Πιθανότητα αλληλουχίας: 0.00188

Από την αλληλουχία των παρατηρήσεων [BBB, SBB, SBS, SSB] φαίνεται πως το όχημα προσεγγίζει μια διασταύρωση και ελαττώνει ταυτόχρονα την ταχύτητα του.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Η πρόβλεψη για τις καταστάσεις του συστήματος μετά την διαδικασία του fitting φαίνεται ότι έχουν περισσότερη λογική σε σχέση με την πρόβλεψη πριν την διαδικασία του fitting, δείχνουν ότι το όχημα έχει αρχικά σταθερή ταχύτητα και καθώς φτάνει στην διασταύρωση ελαττώνει ταχύτητα και σταματάει. Οι πιθανότητες που παρουσιάζονται παραπάνω αντιστοιχούν στις πιθανότητες να παρατηρηθούν οι συγκεκριμένες αλληλουχίες καταστάσεων.

#### Κινηματικό μοντέλο των καταστάσεων ενδός οχήματος.

Από την παραπάνω αλληλουχία καταστάσεων θεωρούμε την τελευταία κατάσταση ώς την εκτιμώμενη κατάσταση του οχήματος. Για κάθε κατάσταση αντιστοιχίζεται και ένα κινηματικό μοντέλο που περιγράφει την κίνηση του οχήματος όταν βρεθεί στην συγκεκριμένη κατάσταση. Με χρήση του κινηματικού μοντέλου γίνεται εκτίμηση της μελλοντικής ταχύτητας του οχήματος. Για κάθε μια από τις καταστάσεις το μοντέλο κίνησης περιγράφεται από την σχέση.

$$U_{t+1} = U_t + a * p * t_{tick} \quad (3.16)$$

Όπου  $U_t$  η τρέχουσα ταχύτητα του οχήματος,  $U_{t+1}$  η εκτιμώμενη ταχύτητα,  $a$  η επιτάχυνση του οχήματος και  $p$  η πιθανότητα της εκτιμώμενης κατάστασης και  $t_{tick}$  η χρονική διάρκεια για την οποίο γίνεται η εκτίμηση της κίνησης. Η τιμή  $a$  αρχικοποιείται σε μια σταθερή τιμή ανά περίπτωση, για την περίπτωση της επιτάχυνσης στην τιμή  $3(m/s^2)$ , για την περίπτωση της επιβράδυνσης στην τιμή  $-4(m/s^2)$  και για την περίπτωση της στάσης (stop) στην τιμή  $-6(m/s^2)$ . Η πιθανότητα  $p$  καθορίζει το ποσοστό της επιτάχυνσης που θα χρησιμοποιηθεί, ουσιαστικά ο όρος  $a * p$  συναθροιστικά αντιστοιχεί στην τιμή της επιτάχυνσης/επιβράδυνσης. Όσο μεγαλύτερη η πιθανότητα  $p$  της εκτιμώμενης κατάστασης τόσο μεγαλύτερη και η τιμή  $a * p$  άρα και πιο μεγάλη η μεταβολή της ταχύτητας. Τέλος, ο όρος  $t_{tick}$  ορίζεται ίσος με την τιμή 1 (sec), δηλαδή γίνεται εκτίμηση της ταχύτητας σε χρονικό ορίζοντα 1 second.

#### Παράδειγμα εφαρμογής μοντέλου για την εκτίμηση της ταχύτητας

Θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα από την εφαρμογή του μοντέλου, παρακάτω στο σχήμα 3.14 φαίνεται το σενάριο όπου ένα όχημα πλησιάζει μια γραμμή υποχρεωτικής διακοπής πορείας (stop) και το αυτόνομο όχημα βρίσκεται ακριβώς μπροστά και του διακόπτει την πορεία.



Σχήμα 3.14: Σενάριο στο οποίο ένα ερχόμενο όχημα πλησιάζει ένα stop πάνω στο οποίο βρίσκεται το αυτόνομο όχημα.

### 3.6. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΖΩΝ

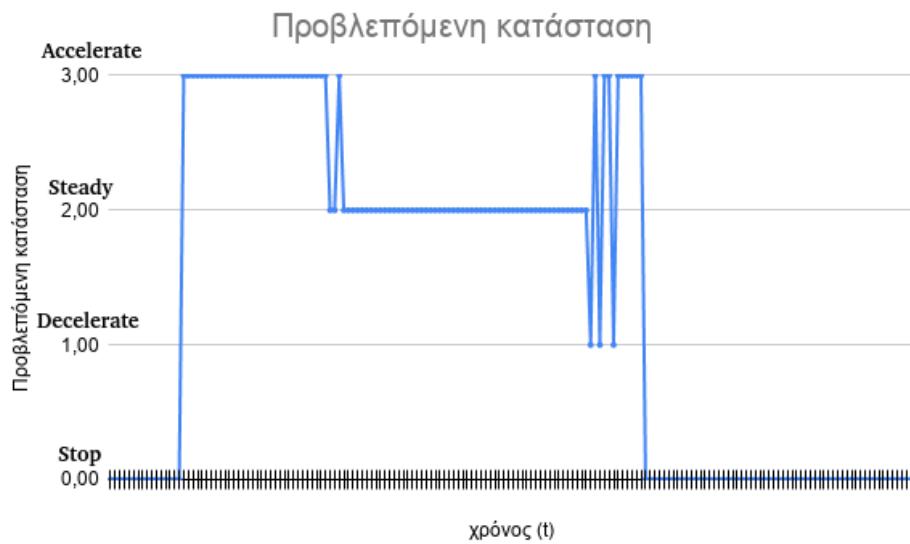
Για το παραπάνω σενάριο γίνεται καταγραφή των παρατηρήσεων, των καταστάσεων, των προβλεπόμενων καταστάσεων, της προβλεπόμενης ταχύτητας, της πιθανότητας εκτίμησης και της τρέχουσας κατάστασης του οχήματος. Σε όλα τα παρακάτω γραφήματα ο οριζόντιος άξονας είναι ο άξονας του χρόνου και κάθε σημείο του διαγράμματος αντιστοιχεί στο νιοστό δείγμα της διαδικασίας πρόβλεψης.

Η ταχύτητα του οχήματος κατά την εκτέλεση του σεναρίου παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.15. Το όχημα από την κατάσταση ακινητοποίησης ξεκινάει και αυξάνει ταχύτητα μέχρι περίπου η ταχύτητα να φτάσει στα 5.8 m/s και έπειτα συνεχίζει την πορεία του με σταθερή ταχύτητα. Καθώς πλησιάζει το αυτόνομο όχημα ξεκινάει να μειώνει ταχύτητα και αφού εκτελεστούν κάποιες ταλαντώσεις στην ταχύτητα του τελικά σταματάει πριν να συγκρουστεί με το αυτόνομο όχημα. Σημειώνεται ότι για την εκτέλεση του σεναρίου έχει χρησιμοποιηθεί ο αυτόνομος πιλότος του Carla προσομοιωτή. Καθώς το όχημα είναι σταματημένο ξεκινάει να γίνεται καταγραφή των δεδομένων και ενεργοποιείται ο αυτόνομος πιλότος. Η συμπεριφορά που παρουσιάζεται στο παράδειγμα είναι η ίδια με την συμπεριφορά που θα παρουσιάζει οποιοδήποτε όχημα κατά την οδήγηση του αυτόνομου οχήματος στο περιβάλλον του Carla προσομοιωτή.



Σχήμα 3.15: Η πραγματική ταχύτητα του οχήματος κατά την εκτέλεση του σεναρίου

Στο σχήμα 3.16 απεικονίζεται το διάγραμμα πρόβλεψης της επόμενης κατάστασης που προκύπτει από το μοντέλο. Αρχικά παρατηρείται πώς το όχημα προβλέπεται ότι θα επιταχύνει, μετά θα κρατήσει σταθερή ταχύτητα και στην συνέχεια αφού γίνουν κάποιες ταλαντώσεις στην ταχύτητα του τελικά θα σταματήσει. Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του οχήματος αντιστοιχεί στο σενάριο κίνησης που είδαμε και από τις τιμές της ταχύτητας του οχήματος στο διάγραμμα 3.15.



Σχήμα 3.16: Εκτίμηση της μελλοντικής κατάσταση του οχήματος

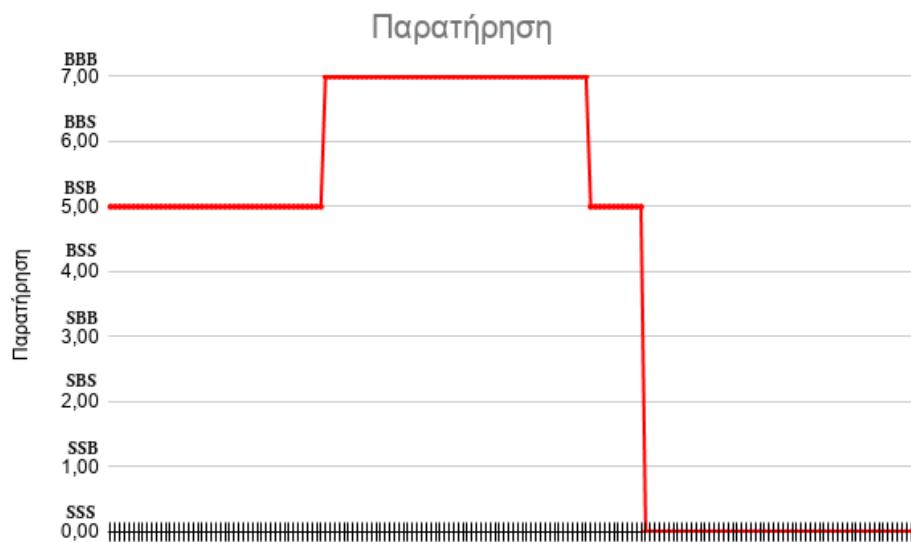
Το μοντέλο για να προβλέψει την μελλοντική κατάσταση του οχήματος χρησιμοποιεί την τρέχουσα κατάσταση του οχήματος 3.17. Η τρέχουσα κατάσταση υπολογίζεται από την σύγκριση της παρελθοντικής με την τωρινή ταχύτητα του οχήματος και ανάλογα το μέγεθος της διαφοράς είναι δυνατόν να εξαχθεί συμπέρασμα για την κατάσταση που βρίσκεται αυτή την στιγμή το όχημα. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η προηγούμενη πρόβλεψη του μοντέλου ως η τρέχουσα κατάσταση αλλά κάτι τέτοιο θα μπορούσε να δημιουργήσει σφάλμα συσσώρευσης για τις περιπτώσεις που γίνεται λάθος εκτίμηση για τη μελλοντική κατάσταση του οχήματος.



Σχήμα 3.17: Η Τρέχουσα κατάσταση του οχήματος

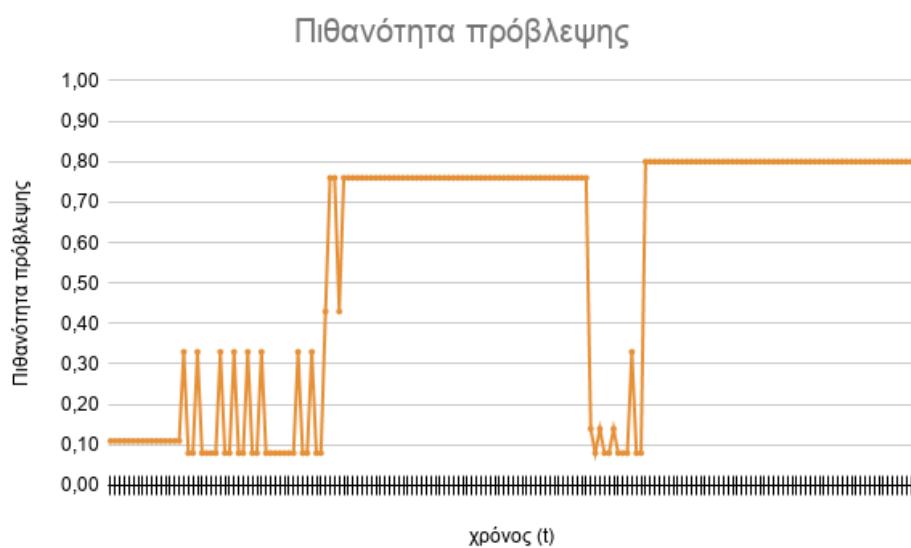
### 3.6. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΖΩΝ

Η τιμή της παρατήρησης κατά την εκτέλεση του σεναρίου μεταβάλλεται όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα 3.18, ξεκινώντας από το BSB όπου σημαίνει ότι μόνο η ταχύτητα είναι μικρή ενώ οι αποστάσεις μεγάλες, περνάει στην τιμή BBB που δηλώνει ότι οι αποστάσεις και η ταχύτητα είναι μεγάλες και καταλήγει στην τιμή SSS που σημαίνει ότι όλες οι μεταβλητές έχουν μικρή τιμή όπως είναι λογικό αφού το όχημα πλησιάζει την διάβαση και σταματάει.



Σχήμα 3.18: Παρατηρήσεις μαρκοβιανού μοντέλου κρυφών καταστάσεων

Οι πιθανότητες πρόβλεψης που προκύπτουν από το μοντέλο παρουσιάζονται παρακάτω 3.19, οι πιο σίγουρη εκτίμηση έγινε για την σταθερή κατάσταση και την κατάσταση που το όχημα θα πρέπει να σταματήσει.



Σχήμα 3.19: Πιθανότητες της εκτίμησης της μελλοντικής κατάστασης του οχήματος

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

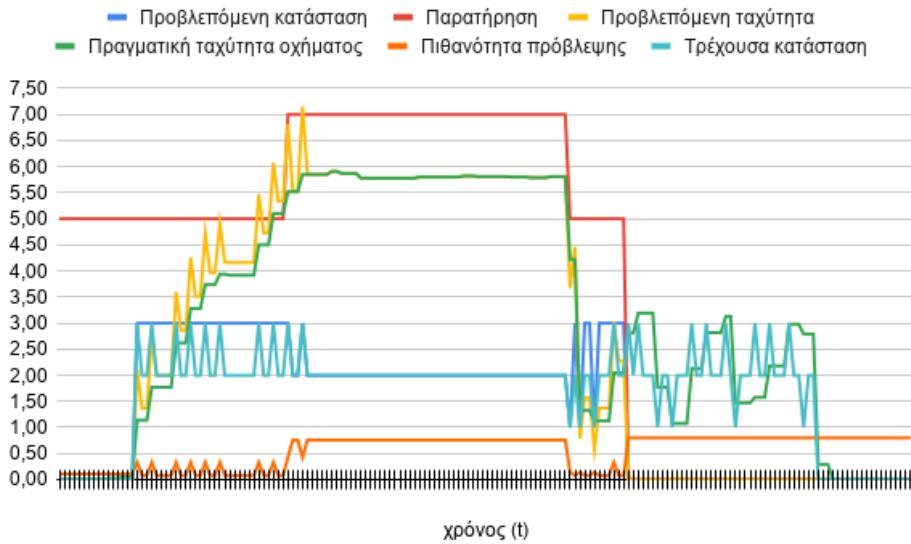
Τέλος, από τα παραπάνω, αφού γίνεται η πρόβλεψη των καταστάσεων με την χρήση των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως γίνεται η εκτίμηση της μελλοντικής ταχύτητας του οχήματος. Στο διάγραμμα 3.20 φαίνεται ότι αρχικά ενώ το όχημα είναι σταματημένο η πρόβλεψη δίνει μηδενική τιμή για την ταχύτητα, καθώς το όχημα ξεκινάει να κινείται με βάσει την παρατήρηση και τη τρέχουσα κατάσταση γίνεται εκτίμηση ότι το όχημα θα επιταχύνει. Η τάση του οχήματος προς την επιτάχυνση φαίνεται στο διάγραμμα από τις τις απότομες κορυφές προς τα πάνω που εμφανίζονται στην αρχή του διαγράμματος. Στην συνέχεια, στην μέση περίπου της εκτέλεσης του σεναρίου η ταχύτητα προβλέπεται να μείνει σταθερή, πρός το τέλος του σεναρίου όσο το όχημα πλησιάζει το stop και το αυτόνομο όχημα η ταχύτητα προβλέπεται να μειώνεται και τέλος να μηδενίζεται. Οι κορυφές στο τέλος του διαγράμματος έχουν προκύψει από την ταλαντωση που εκτέλεσε το όχημα στο τέλος της κίνησης του, η ταλαντωση φαίνεται από το διάγραμμα της πραγματικής ταχύτητας το οχήματος 3.15, ετσι η εκτίμηση για την ταχύτητα του οχήματος έχει και αυτή ταλαντώσεις.



Σχήμα 3.20: Η εκτίμηση της μελλοντικής ταχύτητας από το μοντέλο.

Για λόγους καλύτερης εποπτείας των παραπάνω μεταβλητών παρουσιάζεται ένα διάγραμμα 3.21 με όλες τις γραφικές παραστάσεις.

Συνοψίζοντας, από τα διαγράμματα βλέπουμε το τρόπο με το οποίο χρησιμοποιείται το μοντέλο για να γίνει η πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης του οχήματος και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η εκτίμηση της ταχύτητας. Οι προβλέψεις ακολουθούν την μελλοντική πορεία του παραπάνω σεναρίου και φαίνεται ότι το μαρκοβιανό μοντέλο κρυφών καταστάσεων λειτουργεί σωστά.

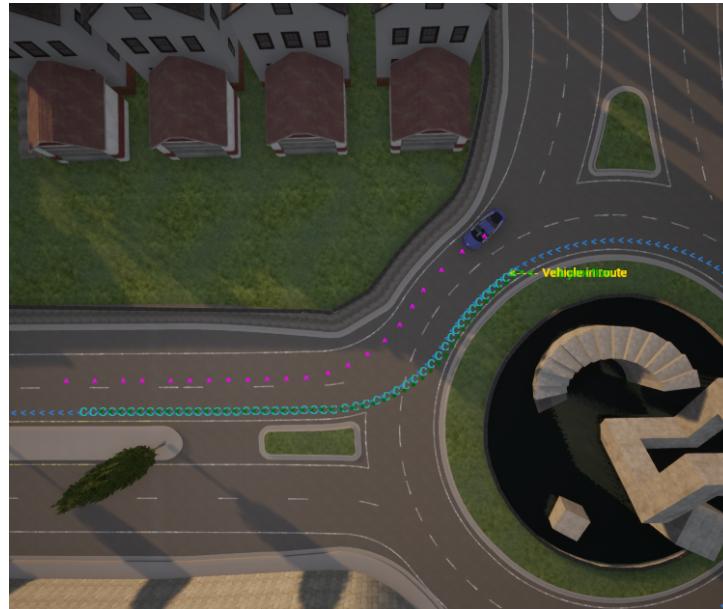


Σχήμα 3.21: Η εκτίμηση της μελλοντικής ταχύτητας από το μοντέλο.

#### 3.6.4 Εκτίμηση της τροχιάς του αυτόνομου οχήματος

Η τροχιά του αυτόνομου οχήματος μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας το βασικό μονοπάτι (route path) καθώς αυτό καθορίζει την πορεία του αυτόνομου οχήματος. Θεωρείτε ότι το όχημα θα κινηθεί προς την πορεία του βασικού μονοπατιού, έτσι η τροχιά του ξεκινάει από το σημείο που βρίσκεται το αυτόνομο όχημα και εκτείνεται παράλληλα ως πρός το βασικό μονοπάτι. Ένα παράδειγμα από το εκτιμώμενο μονοπάτι που θα ακολουθήσει το αυτόνομο όχημα φαίνεται στο σχήμα 3.22 όπου το βασικό μονοπάτι αντιστοιχεί στα μπλε σημεία ενώ το εκτιμώμενο στα μωβ σημεία του σχήματος.

Ο αλγόριθμος για την εύρεση του εκτιμώμενου μονοπατιού έχει υλοποιηθεί με την λογική ότι παίρνουμε ένα κομμάτι του βασικού μονοπατιού και του μετατοπίζουμε κάθετα ως πρός το βασικό μονοπάτι. Πιο αναλυτικά, βρίσκουμε τα σημεία του βασικού μονοπατιού για κάποια απόσταση μπροστά από το όχημα και για κάθε σημείο αυτού του κομματιού ξεκινώντας από το σημείο που βρίσκεται το όχημα βρίσκουμε το αμέσως επόμενο σημείο το οποίο έχει απόσταση από το προηγούμενο σημείο ίση με αυτή που απέχουν και τα σημεία του κομματιού του βασικού μονοπατιού και επίσης έχει ίδια κατεύθυνση με αυτή του σημείου του κομματιού. Με λίγα λογία, βρίσκουμε ένα κομμάτι που είναι παράλληλο στο βασικό μονοπάτι και ξεκινάει από το σημείο που βρίσκεται το όχημα.



Σχήμα 3.22: Παρουσίαση της εκτιμώμενης τροχιάς του αυτόνομου οχήματος (μωβ σημεία), βασικό μονοπάτι (μπλε σημεία)

---

**Algorithm 14:** autonomous\_vehicle\_predicted\_trajectory

---

**Result:** predicted\_trajectory

```

1 route_path_index : The position of the autonomous vehicle in the route path.
2 route_path[] : The route path for the vehicle to follow.
3 path_length : The length of the trajectory.
4 route_piece[] : A piece of the route of "path_length" length ahead of the vehicle.
5 current_vehicle_position : The vehicle position in the coordinate system
6 while True do
7   route_path_index += 1
8   if the end of the route path then
9     | break
10  end
11  w ← route_path[route_path_index]
12  next_w ← route_path[route_path_index + 1]
13  dist_trajectory += distance(w, next_w)
14  if dist_trajectory > path_length then
15    | break
16  else
17    | route_piece ← append w
18  end
19 end
20 predicted_trajectory ← append current_vehicle_position
21 for each point of the route_piece do
22   dist = distance(route_piece[i], route_piece[i+1])
23   theta ← point.yaw
24   b_x = predicted_trajectory[last_point].x + dist*cos(theta)
25   b_y = predicted_trajectory[last_point].y + dist*sin(theta)
26   point ← Waypoint(b_x, b_y)
27   predicted_trajectory ← append point
28 end
29 return predicted_trajectory

```

---

### 3.6.5 Υπολογισμός της πιθανότητας, του χρόνου και του σημείου σύγκρουσης.

Για την πρόβλεψη πιθανής σύγκρουσης με ένα διερχόμενο όχημα θα χρησιμοποιηθούν η τροχιά του αυτόνομου οχήματος και η τροχιά του διερχόμενου οχήματος για το οποίο επιθυμούμε να ελέγξουμε το ενδεχόμενο για σύγκρουση. Με χρήση των κινηματικών μοντέλων των οχημάτων μπορεί να γίνει πρόβλεψη της θέση των οχημάτων συνάρτηση του χρόνου πάνω στις τροχιές τους. Και για τα δύο οχήματα χρησιμοποιείται μοντέλο σταθερής ταχύτητα, για το αυτόνομο όχημα χρησιμοποιείται η τρέχουσα ταχύτητα, για το ερχόμενο όχημα όμως χρησιμοποιείται η ταχύτητα που προβλέφθηκε από το μαρκοβιανό μοντέλο κρυφών καταστάσεων. Με την χρήση του μοντέλου σταθερής ταχύτητας στην ουσία υπολογίζεται η κίνηση με μέση ταχύτητα που προκύπτει από την πρόβλεψη. Αφού υπολογίσουμε την θέση των οχημάτων συνάρτηση του χρόνου, στην συνέχεια, αυτό που επιθυμούμε να βρούμε είναι αν υπάρχει κάποια χρονική στιγμή όπου τα οχήματα μπορεί να έρθουν σε απόσταση μικρότερη από την απόσταση ασφαλείας.

Η μέθοδος για τον υπολογισμό του σημείου σύγκρουσης ξεκινάει λαμβάνοντας υπόψη τα σημεία της μιας από τις δύο τροχιές, σε κάθε σημείο αντιστοιχίζεται η χρονική στιγμή στην οποία φτάνει σε αυτό το σημείο το όχημα του οποίου ανήκει η τροχιά. Για την άλλη τροχιά φάχνουμε να βρούμε το σημείο του οποίου η χρονική στιγμή είναι πιο κοντά στην χρονική στιγμή του σημείου της πρώτης τροχιάς. Αφού βρούμε τα σημεία τα οποία απέχουν την ελάχιστη χρονική απόσταση υπολογίζουμε την χωρική απόσταση αυτών των σημείων. Αν η απόσταση των σημείων είναι μικρότερη από την ελάχιστη απόσταση ασφαλείας τότε σημαίνει ότι τα οχήματα θα βρεθούν σε αυτά τα σημεία την ίδια χρονική στιγμή και αφού η απόσταση τους θα είναι μικρότερη από την απόσταση ασφαλείας αυτό σημαίνει ότι τα οχήματα θα συγκρουστούν. Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται ο ψευδοκώδικας της διαδικασίας.

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας δίνει το σημείο συνάντησης των οχημάτων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.23. Η τροχιά που αποτελείται από τα πράσινα σημεία αντιστοιχεί στην τροχιά του διερχόμενου οχήματος, η τροχιά με τα μωβ σημεία σε αυτή του αυτόνομου οχήματος και το σημείο συνάντησης σημειώνεται με το ροζ βέλος. Το σημείο συνάντησης αντιστοιχεί στο σημείο στο οποίο μπορούν να συναντηθούν τα οχήματα δεδομένων των ταχυτήτων τους, ο χρόνος μπορεί να κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι και λεπτά ανάλογα με την ταχύτητα των οχημάτων. Το σημείο δεν αντιστοιχεί αναγκαστικά σε σημείο στο οποίο θα γίνει σύγκρουση αλλά σε σημείο συνάντησης, η πραγματοποίηση σύγκρουσης θα εξαρτηθεί από τις επιλογές των οχημάτων για την μελλοντική τους κατάσταση. Η σύγκρουση εκτιμάται μετά από των έλεγχο του χρόνου συνάντησης, της πιθανότητας σύγκρουσης και της απόστασης των οχημάτων.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

---

**Algorithm 15:** predict\_vehicles\_collision

---

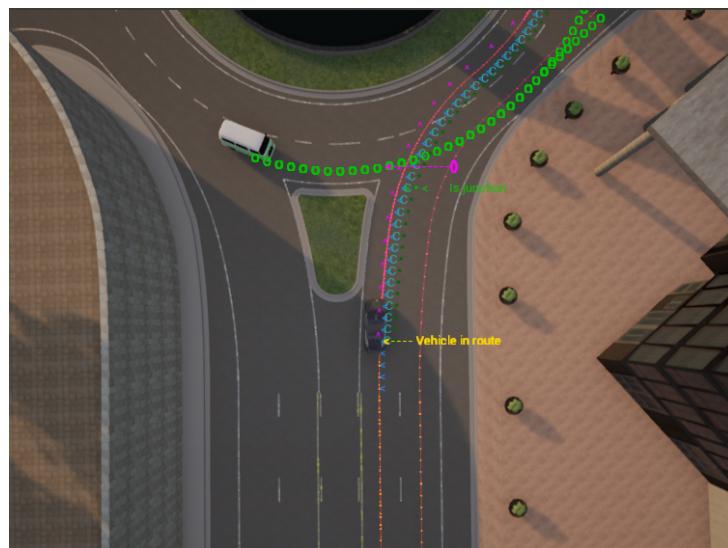
**Result:** collision\_position, collision\_time

```

1 ego_vehicle.trajectory : The predicted trajectory of the ego vehicle.
2 coming_vehicle.trajectory : The predicted trajectory of the coming vehicle.
3 coming_vehicle_speed : The predicted speed from the Hidden Markov Model.
4 ego_vehicle_speed : The current speed of the ego vehicle.
5 ego_dist ← 0
6 # For each point calculate the time of the vehicle reaches them.
7 for each point of the ego_vehicle_trajectory do
8   ego_dist += distance(point, previous_point)
9   t_ego ← append  $\frac{ego\_dist}{ego\_vehicle\_speed}$ 
10 end
11 coming_dist ← 0
12 # Do the same for the coming vehicle.
13 for each point of the coming_vehicle_trajectory do
14   coming_dist += distance(point, previous_point)
15   t_coming ← append  $\frac{coming\_dist}{coming\_vehicle\_speed}$ 
16 end
17 for each  $t_i$  in t_ego do
18   t_closest ← Find the closest to  $t_i$  that belongs in t_coming
19   point1 ← The point of the ego trajectory that corresponds to  $t_i$ 
20   point2 ←
21     The point of the coming vehicle trajectory that corresponds to  $t_{closest}$ 
22   collision_dist ← distance(point1, point2)
23   if collision_dist < safe_distance then
24     collision_position ← point1
25     collision_time ←  $t_i$ 
26   end
27 end

```

---



Σχήμα 3.23: Πρόβλεψη σημείου σύγκρουσης διερχόμενου οχήματος με το αυτόνομο όχημα

## 3.7. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΤΟΥ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

### 3.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΤΟΥ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

#### 3.7.1 Εισαγωγή

Πρωταρχικός στόχος ενός αυτόνομου οχήματος είναι η μεταφορά του από το σημείο το οποίο βρίσκεται σε ένα τελικό σημείο στόχο. Αυτή η διαδικασία απαιτεί την σχεδίαση μιας διαδρομής από το αρχικό στο τελικό σημείο. Το μονοπάτι που σχεδιάζεται ονομάζεται βασικό μονοπάτι ή βασική διαδρομή (route path). Η μέθοδος για την κατασκευή του βασικού μονοπατιού μπορεί να στηρίζεται σε πολλά κριτήρια όπως είναι το μήκος του μονοπατιού, η κυκλοφοριακή συμφόρηση των δρόμων, ο χρόνος διάσχισης του μονοπατιού και η άνεση των επιβατών κατά την διάσχιση της διαδρομής. Επιπροσθέτως, η μέθοδος της κατασκευής του βασικού μονοπατιού θα πρέπει να σέβεται του κανόνες κυκλοφορίας, για παράδειγμα το μονοπάτι δεν θα πρέπει να βγαίνει εκτός δρόμου ή να διασχίζει κάποιο δρόμο αντίθετα από την κανονική κατεύθυνση του δρόμου.

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί ο τρόπος και τα κριτήρια σχεδιασμού του βασικού μονοπατιού. Το κριτήριο για την σχεδίαση του βασικού μονοπατιού έχει επιλεχθεί να είναι το μήκος του μονοπατιού. Για την εύρεση και την σχεδίαση του μονοπατιού έχει χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος A\*. Ο A\* είναι ένας από τους πιο γνωστούς αλγορίθμους στο τομέα της ρομποτικής για την εύρεση μονοπατιών, στα πλεονεκτήματα του περιλαμβάνεται ο χρόνος εκτέλεσης και επίσης το ότι η λύση είναι κοντά στην βέλτιστη, ενώ το πιο βασικό μειονέκτημα είναι ότι δεν βρίσκει την βέλτιστη διαδρομή. Στην περίπτωση μας η επιλογή του A\* είναι πολύ καλή, η χρήση κάποιου άλλου αλγορίθμου που μπορεί να δώσει την βέλτιστη λύση όπως για παράδειγμα ο Dijkstra αλγόριθμος θα έκανε το χρόνο εκτέλεσης απαγορευτικά μεγάλο λόγω της πολύπλοκης δομής του δυναμικού χώρου και των κριτηρίων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την σχεδίαση.

### 3.8 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΒΑΣΙΚΟΥ ΜΟΝΟΠΑΤΙΟΥ

Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου δημιουργούνται δύο λίστες, η “κλειστή” λίστα και η “ανοιχτή” λίστα. Κάθε νέο σημείο που πρέπει να ελεγχθεί προστίθεται στην ανοιχτή λίστα ενώ τα σημεία που έχουν ελεγχθεί προστίθενται στην κλειστή λίστα. Ο αλγόριθμος A\* έχει δύο συναρτήσεις αξιολόγησης, η πρώτη (G) μετράει την απόσταση του μονοπατιού που έχει κατασκευαστεί μέχρι το σημείο που εξετάζεται και η δεύτερη (H) αξιολογεί την απόσταση του σημείου που εξετάζεται από το τελικό σημείο στόχος, σε κάθε σημείο που ελέγχεται αποδίδεται μια τιμή για κάθε μια τις συναρτήσεις G και H. Επίσης για κάθε σημείο επίσης αποδίδεται και ένα σημείο “γονέα”, δηλαδή το σημείο από το οποίο φτάσαμε στο σημείο που ελέγχεται. Έτσι, η μετάβαση από τα σημεία γονέα πρός τα σημεία παιδιά δίνουν το μονοπάτι που ορίζουν τα σημεία. Σε κάθε βήμα του αλγορίθμου λαμβάνεται από την ανοιχτή λίστα το σημείο με την μικρότερη τιμή του αθροίσματος G+H, το σημείο αντιστοιχεί στο σημείο γονέα και ελέγχονται τα γειτονικά (παιδιά) σημεία. Για την λήψη του γειτονικού σημείου χρησιμοποιείται η γεωμετρία του Carla προσομοιωτή.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Ο Carla προσομοιωτής διαθέτει την κατάλληλη μέθοδο έτσι ώστε δεδομένου του τρέχοντος σημείου να ληφθεί το επόμενο σημείο σε κάποια απόσταση μπροστά από το τρέχον, με φορά την κατεύθυνση κυκλοφορίας το δρόμου στον οποίο βρίσκεται το τρέχον σημείο. Στους κόμβους και στις διασταυρώσεις τα γειτονικά σημεία που επιστρέφονται είναι περισσότερα του ενός. Κάθε γειτονικό σημείο ελέγχεται αν είναι στην κλειστή λίστα και αν είναι τότε σημαίνει ότι το έχουμε εξετάσει και δεν χρειάζεται να το ξανά ελέγξουμε οπότε συνεχίζουμε με τα επόμενα σημεία. Αν δεν είναι στην κλειστή λίστα τότε ελέγχεται αν είναι στην ανοιχτή λίστα και αν είναι τότε ελέγχεται η τιμή της  $G$  για το σημείο. Αν είναι μικρότερη από αυτή του σημείου που βρίσκεται στην λίστα τότε το σημείο αντικαθίσταται αυτό που βρίσκεται στην λίστα, κατά επέκταση αντικαθίσταται και το σημείο γονέας και οι τιμές των  $G$  και  $H$  που αντιστοιχούν στο σημείο που ελέγχεται, αυτό σημαίνει ότι στο σημείο αυτό μπορούμε να φτάσουμε από καλύτερο μονοπάτι. Ο αλγόριθμος σταματάει όταν φτάσουμε στο σημείο στόχου ή όταν το η ανοιχτή λίστα μείνει κενή.



Σχήμα 3.24: Διαδικασία εύρεσης βασικού μονοπατιού με τον αλγόριθμο  $A^*$

Στο σχήμα 3.24 παρουσιάζεται η διαδικασία της εξερεύνησης του χώρου από τον  $A^*$  για την εύρεση και τον σχεδιασμό του βασικού μονοπατιού (route path). Ορίζεται το αρχικό και το τελικό σημείο του μονοπατιού, ο  $A^*$  ξεκινάει την εξερεύνηση από το αρχικό σημείο και απλώνεται στα γειτονικά σημεία που λαμβάνονται από το Carla προσομοιωτή για την ίδια λωρίδα και για κατεύθυνση ίδια με αυτή της λωρίδας. Στις διασταυρώσεις λαμβάνονται τα γειτονικά σημεία προς όλες τις δυνατές κατευθύνσεις. Στα σχήματα φαίνονται τα διαδοχικά μονοπάτια που σχηματίζονται κατά την αναζήτηση, τα σημεία απλώνονται σε διάφορες κατευθύνσεις σχηματίζοντας πιθανά μονοπάτια που μπορεί να οδηγούν στο τελικό στόχο. Σημειώνεται ότι τα σημεία έχουν ένα χρόνο ζωής για την καλύτερη παρουσίαση τους στο παρακάτω σχήμα, έτσι τα σημεία που σχεδιάστηκαν στην αρχή φαίνεται ότι προς τις τελευταίες εικόνες εξαφανίζονται.

### 3.8. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΒΑΣΙΚΟΥ ΜΟΝΟΠΑΤΙΟΥ

---

**Algorithm 16:** A\* for route path planning

---

```
Result: route_path
1 Node ← Class Object with class parameters: parent, position, g, h, f
2 # parent: The parent Node of the current node.
3 # position: A position of the current node in the map.
4 # g : The assessment value of the distance from the start position.
5 # h : The assessment value of the distance from the final position.
6 # f = g + h
7 start_position : The position of the vehicle.
8 final_position: The goal position.
9 closed_list ← An empty list
10 open_list ← An empty list
11 open_list ← append start_position
12 while open_list is not empty do
13     current_node ← The Node in the open_list with the minimum f value.
14     # Remove the current_node from the open_list and add it in the closed_list.
15     if current_node reaches the goal node then
16         parent_node ← get the parent node from the current_node
17         while parent_node exists do
18             | route_path ← append the position of parent_node
19         end
20         route_path ← reversed(route_path)
21     end
22     # Get the neighbors nodes
23     children_nodes ← Get the neighbors nodes from the current_nodes.
24     children_nodes ← Remove the children_nodes that are not accepted.
25     for each child do
26         if current child is in closed_list then
27             | continue
28         else
29             # Calculate the g,h,f values of the child.
30             child.g ← Distance from start
31             child.h ← Distance from goal
32             child.f ← g + h
33             if current child is in open_list then
34                 if the f value of the current child smaller than the f value of the child in the
35                     | open_list then
36                     | | # Replace the child in the open_list with the current child
37                 end
38             end
39         end
40         open_list ← append children_nodes
41     end
42 return route_path
```

---

## 3.9 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ

---

### 3.9.1 Εισαγωγή

Για να φτάσει το όχημα στο τελικό σημείο στόχο χρησιμοποιείτε το βασικό μονοπάτι το οποίο δείχνει την διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει το όχημα για να φτάσει στο προορισμό του. Το βασικό μονοπάτι, παρόλα αυτά, μπορεί να διέρχεται από στατικά εμπόδια ή δυναμικά αντικείμενα, πεζοί και οχήματα μπορεί να διέρχονται από το βασικό μονοπάτι εμποδίζοντας την κίνηση του αυτόνομου οχήματος. Σε αυτή την περίπτωση, το όχημα δεν μπορεί να ακολουθήσει την πορεία του βασικού μονοπατιού, θα πρέπει να εκτελέσει κάποιον ελιγμό για να αποφύγει μία πιθανή σύγκρουση ή να κινηθεί γύρω από ένα σταματημένο όχημα ή ένα στατικό αντικείμενο που βρίσκεται στον δρόμο του και να συνεχίσει την πορεία του. Για την επίλυση του προαναφερθέντος προβλήματος είναι απαραίτητη η χρήση εναλλακτικών διαδρομών. Από το σημείο που βρίσκεται το όχημα πρέπει να κατασκευαστούν πιθανά μονοπάτια μέσα από τα οποία επιλέγεται το πιο κατάλληλο για να ακολουθηθεί από το αυτόνομο όχημα.

Για την κατασκευή των εναλλακτικών μονοπατιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές όπως είναι η τεχνική Dynamic window based approach που παρουσιάζεται στο [19] και σύμφωνα με την οποία οι εναλλακτικές διαδρομές κατασκευάζονται από τον δυνατό συνδυασμό των γωνιών κατεύθυνσης και των ταχυτήτων του οχήματος. Ο συνδυασμός αυτός αναπαρίσταται από μια περιοχή χώρου στο επίπεδο ταχύτητας και γωνίας κατεύθυνσης. Μια ακόμα μέθοδος για την κατασκευή εναλλακτικών τοπικών διαδρομών είναι η μέθοδος State Lattice όπου η κατασκευή των μονοπατιών γίνεται με την χρήση ενός πλέγματος σημείων για κάποια απόσταση μπροστά από το όχημα.

Στην συνέχεια, αφού κατασκευαστούν τα εναλλακτικά μονοπάτια χρησιμοποιούνται διάφορα κριτήρια για την επιλογή ενός μονοπατιού. Τα κριτήρια μπορεί να έχουν σχέση με την γεωμετρία των μονοπατιών, τον χρόνο διάσχισης, την άνεση των επιβατών κατά την κίνηση πάνω στο μονοπάτι, την αποφυγή εμποδίων, τους καινότερους κυκλοφορίας και την γεωμετρία του δρόμου.

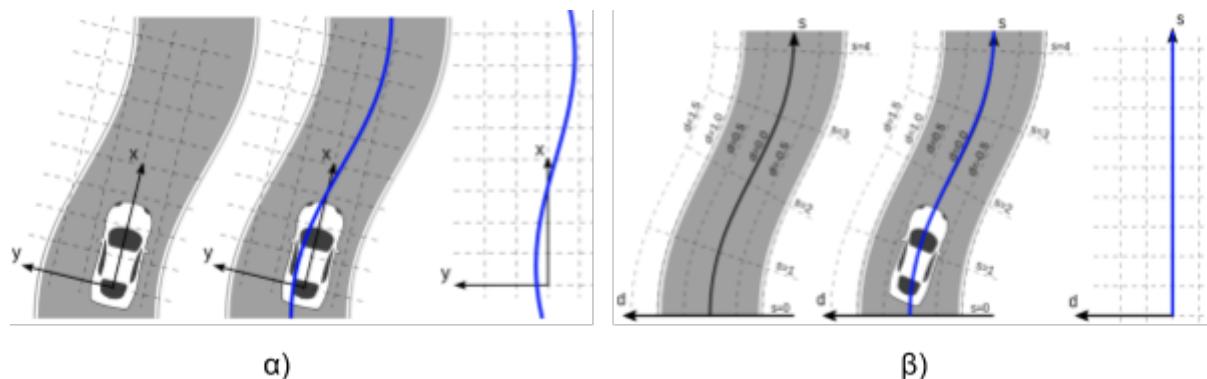
Στην παρούσα διπλωματική τα εναλλακτικά μονοπάτια κατασκευάζονται με την χρήση της μεθόδου των Frenet μονοπατιών. Η κατασκευή των μονοπατιών γίνεται με την χρήση πολυωνυμικών συναρτήσεων παραμετροποιημένες ως πρός το χρόνος αλλά και ως προς το μήκος το βασικού μονοπατιού ή άλλιως του μονοπατιού αναφοράς. Για την κατασκευή των εναλλακτικών διαδρομών είναι απαραίτητη η χρήση του μονοπατιού αναφοράς (βασικό μονοπάτι). Η μέθοδος θα περιγραφεί αναλυτικά στην επόμενη ενότητα όπως επίσης και τα κριτήρια αξιολόγησης των μονοπατιών.

### 3.9.2 Πολυώνυμο 5ης τάξης σε καμπυλόγραμμες συντεταγμένες (Frenet μονοπάτια)

Για την κατασκευή υποφηφίων τοπικών εναλλακτικών διαδρομών χρησιμοποιείται ένα πολυώνυμο 5ης τάξης ως προς το χρόνο, ο τρόπος χρήσης και κατασκευής αναλύεται σε αυτή την ενότητα. Οι πιθανές διαδρομές του οχήματος θα

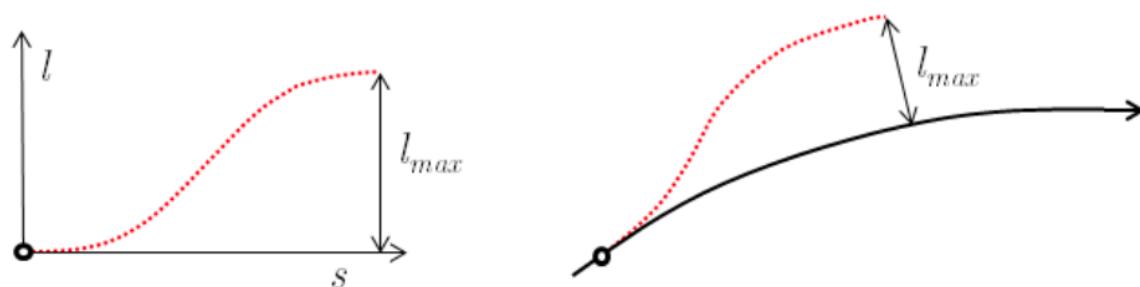
### 3.9. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ

μπορούσαν να κατασκευαστούν σε καρτεσιανές συντεταγμένες, για να εισάγουμε όμως στην σχεδίαση την παράμετρο της καμπύλητης του δρόμου επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί το καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων για την σχεδίαση των μονοπατιών. Στο καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων κατά την κίνηση του οχήματος κατά μήκος μιας καμπύλης θεωρείται ότι ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο μήκος τόξου της καμπύλης  $s$  και ο κατακόρυφος άξονας στην πλευρική απόσταση  $d$  του οχήματος από την καμπύλη. Πολλές φορές στην βιβλιογραφία [6] [7] ο όρος καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων (curvilinear coordinates system) και ο όρος Frenet σύστημα συντεταγμένων (frenet coordinate system) χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το ίδιο σύστημα. Στο σχήμα 3.25 φαίνεται αριστερά (α) η περιγραφή μιας καμπύλης στο καρτεσιανό σύστημα και δεξιά (β) η ίδια καμπύλη στο καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 3.25: α) Μια καμπύλη εκφρασμένη σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, β) η ίδια καμπύλη στο καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων<sup>18</sup>

Ένα μονοπάτι εκφρασμένο σε καμπυλόγραμμες συντεταγμένες μπορεί να τοποθετηθεί γύρω από οποιοδήποτε μονοπάτι αναφοράς. Στο παρακάτω σχήμα 3.26 βλέπουμε αριστερά ένα μονοπάτι σε καμπυλόγραμμες συντεταγμένες και δεξιά το ίδιο μονοπάτι τοποθετημένο παράλληλα σε ένα μονοπάτι αναφοράς που όπως φαίνεται το μήκος τόξου και η πλευρική απόσταση είναι σε συμφωνία με το αρχικό μονοπάτι.

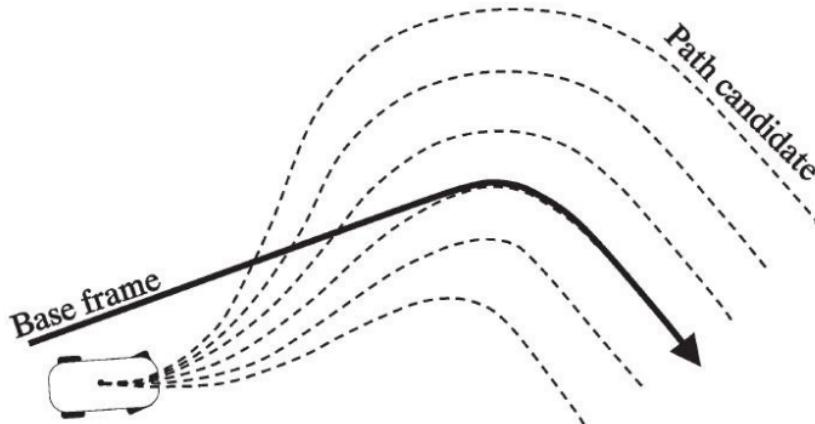


Σχήμα 3.26: Αριστερά: Μονοπάτι σε καμπυλόγραμμες συντεταγμένες. Δεξιά: Το ίδιο μονοπάτι τοποθετημένο κατά μήκος του μονοπατιού αναφοράς [8]

Συνήθως το μονοπάτι αναφοράς αντιστοιχεί στο μονοπάτι της βασικής διαδρομής που θα πρέπει να ακολουθήσει το όχημα και ξεκινάει από το αρχικό σημείο

του οχήματος μέχρι το τελικό σημείο το οποίο επιθυμεί να βρεθεί το όχημα (route planning).

Πολλές φορές η διαδικασία στην βιβλιογραφία αναφέρεται ως σχεδίαση frenet μονοπατιών. Το αποτέλεσμα από την κατασκευή εναλλακτικών μονοπατιών με βάση την προαναφερθέντα τεχνική παρουσιάζεται στο σχήμα 3.27.



Σχήμα 3.27: Το μονοπάτι αναφοράς και οι εναλλακτικές frenet διαδρομές [9]

### 3.9.3 Ελαχιστοποίηση της μεταβολής της επιτάχυνσης (jerk)

Για την σχεδίαση μονοπατιού σε καμπυλόγραμμες συντεταγμένες χρησιμοποιείται πολυώνυμο 5ης τάξης και οι παράμετροι του μήκους τόξου  $s$  και της πλευρικής απόστασης  $d$  παραμετροποιούνται ως προς το χρόνο  $(s(t), d(t))$ . Η χρήση πολυωνύμου 5ης τάξης δεν είναι τυχαία αλλά στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του ρυθμού μεταβολής της επιτάχυνσης του οχήματος (jerk). Η απόδειξη του παραπάνω ισχυρισμού έχεις ως εξής [5], ορίζεται η συνάρτηση κόστους  $C$  ως το ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο του τετράγωνο του jerk καθώς το όχημα κινείται μεταξύ των δύο θέσεων εντός του χρονικού διαστήματος  $T$ .

$$C = \frac{1}{2} \int_0^T L dt \quad (3.17)$$

όπου  $L$  ο ρυθμός μεταβολής της επιτάχυνσης (jerk).

$$L = \left( \frac{d^3x}{dt^3} \right)^2 + \left( \frac{d^3y}{dt^3} \right)^2 \quad (3.18)$$

$x, y$  οι καρτεσιανές συντεταγμένες του οχήματος.

Για κάθε διαφορίσιμη συνάρτηση των  $x, y$  στο διάστημα  $0 \leq t \leq T$ , η συνάρτηση  $C$  θεωρείται ότι παίρνει την ελάχιστη τιμή της όταν τα  $x, y$  είναι λύσεις των παρακάτω εξισώσεων Euler.

### 3.9. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ

---

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) \cdots + (-1)^n \frac{d^n}{dt^n} \frac{\partial L}{\partial (x^{(n)})} &= 0 \\ \frac{\partial L}{\partial y} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) \cdots + (-1)^n \frac{d^n}{dt^n} \frac{\partial L}{\partial (y^{(n)})} &= 0\end{aligned}\quad (3.19)$$

Αντικαθιστώντας την παράμετρο  $L$  παιρούνουμε τις εξισώσεις στην μορφή:

$$\begin{aligned}\frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial(\ddot{x}^2)}{\partial(\dot{x})} &= 0 \\ \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial(\ddot{y}^2)}{\partial(\dot{y})} &= 0\end{aligned}\quad (3.20)$$

και τελικά:

$$\begin{aligned}\frac{d^6 x}{dt^6} &= 0 \\ \frac{d^6 y}{dt^6} &= 0\end{aligned}\quad (3.21)$$

#### 3.9.4 Υλοποίηση της μεθόδου και κατασκευή τοπικών εναλλακτικών διαδρομών.

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι οι μεταβλητές  $x, y$  πρέπει να περιγράφονται από ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού ως προς το χρόνο.

$$\begin{aligned}x(t) &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \\ y(t) &= b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5\end{aligned}\quad (3.22)$$

Αν αντικαταστήσουμε τις μεταβλητές  $x$  και  $y$  με  $s$  και  $d$ , τότε ακριβώς η ίδια ανάλυση θα ισχύει και στις καμπυλόγραμμες συντεταγμένες [6].

$$\begin{aligned}s(t) &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \\ d(t) &= b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5\end{aligned}\quad (3.23)$$

Για την εύρεση των παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$  γίνεται χρήση των αρχικών και τελικών συνθηκών της θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης του οχήματος για την κατά μήκος και κατά πλάτος κίνηση του οχήματος σε σχέση με την καμπύλη. Για παράδειγμα, για την εξίσωση του  $d(t)$  έχουμε 6 αγνώστους και γνωρίζουμε την αρχική πλευρική απόσταση  $d(0)$ , την αρχική ταχύτητα  $d'(0)$ , και την αρχική επιτάχυνση  $d''(0)$  του οχήματος. Από τις παρακάτω εξισώσεις και τις αρχικές συνθήκες για  $t = 0$  υπολογίζουμε τις παραμέτρους  $b_0, b_1, b_2$ :

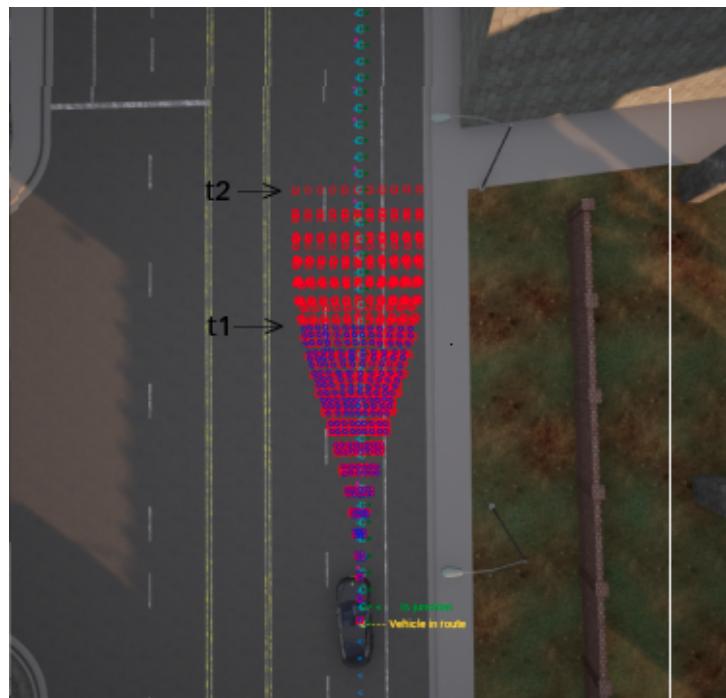
$$\begin{aligned}d(t) &= b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5 \\ d'(t) &= b_1 + 2b_2 t + 3b_3 t^2 + 4b_4 t^3 + 5b_5 t^4 \\ d''(t) &= 2b_2 + 6b_3 t + 12b_4 t^2 + 20b_5 t^3\end{aligned}\quad (3.24)$$

Οι υπόλοιπες 3 παράμετροι  $b_3, b_4, b_5$  υπολογίζονται από τις τελικές συνθήκες της θέσης, ταχύτητα για επιτάχυνσης που θα οριστούν για το δχημα για  $t = T$  χρησιμοποιώντας ξανά τις παραπάνω εξισώσεις.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Η κατασκευή των μονοπατιών γίνεται με δεδομένα το χρόνο που επιθυμείτε για το όχημα για να διασχίσει το μονοπάτι, την επιθυμητή ταχύτητα του οχήματος στο τέλος του μονοπατιού και την πλευρική απόσταση το μονοπατιού από το βασικό μονοπάτι. Μεταβάλλοντας από τις παραπάνω τις δύο πρώτες μεταβλητές μπορούν να κατασκευαστούν μονοπάτια διαφορετικού μήκους. Για κάθε σημείο του κάθε μονοπατιού υπολογίζονται παράμετροι που έχουν σχέση με την κίνηση του οχήματος όπως είναι ο χρόνος στο οποίο θα βρεθεί το όχημα στο συγκεκριμένο σημείο, η ταχύτητα του οχήματος, η επιτάχυνση, το μήκος του μονοπατιού μέχρι εκείνο το σημείο αλλά και η πλευρική του απόσταση από το βασικό μονοπάτι. Επίσης, υπολογίζονται και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως είναι οι συντεταγμένες του κάθε σημείου και ο προσανατολισμός, που είναι σε συμφωνία με την κατεύθυνση του μονοπατιού. Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται στην συνέχεια στην διαδικασία αξιολόγησης των μονοπατιών αλλά και για την καθοδήγηση του οχήματος από το σύστημα ελέγχου (control system).

Στην εικόνα 3.28 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα από την κατασκευή δύο ομάδων μονοπατιών για διαφορετικούς χρόνους διάσχισης, με ίδια ταχύτητα για το όχημα και για τις δύο περιπτώσεις και για τις ίδιες πλευρικές μετατοπίσεις. Τα μπλε μονοπάτια έχουν κατασκευαστεί για χρόνο διάσχισης ίσο με  $t_1$  μικρότερο από το χρόνο διάσχισης  $t_2$  των κόκκινων μονοπατιών. Όπως φαίνεται από το σχήμα, με την ίδια ταχύτητα σε μικρότερο χρόνο τα μπλε μονοπάτια που προκύπτουν έχουν μικρότερο μήκος από τα κόκκινα. Το ίδιο αποτέλεσμα θα προέκυπτε και στην περίπτωση όπου ο χρόνος ήταν ίδιος αλλά οι τελική ταχύτητα του οχήματος διαφορετική.



Σχήμα 3.28: Παράδειγμα μονοπατιών για διαφορετικό χρόνο ή διαφορετική ταχύτητα

Συμπερασματικά, με βάσει την παραπάνω ανάλυση έχοντας ως δεδομένα την

### 3.9. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ

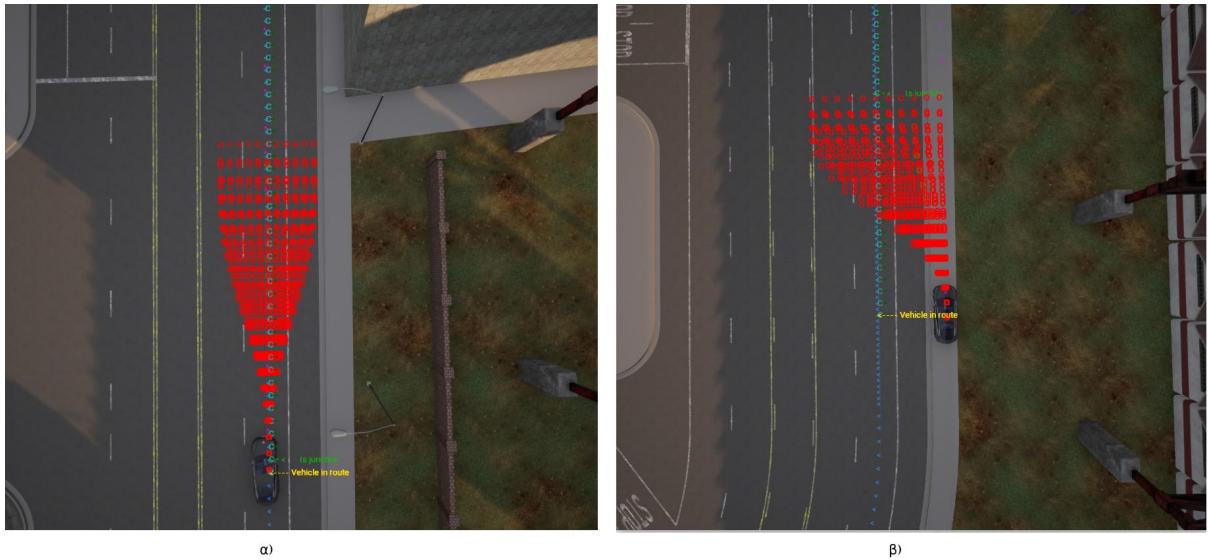
αρχική κατάσταση και την επιθυμητή τελική κατάσταση του οχήματος όσον αφορά την θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση του οχήματος, με χρήση δυναμικών πολυωνύμων 5ου βαθμού μπορούμε να κατασκευάσουμε μονοπάτια που να ξεκινούν από την θέση του οχήματος και να καταλήγουν σε διάφορες θέσης για τις επιθυμητές πλευρικές μετατοπίσεις του οχήματος σε σχέση με το βασικό μονοπάτι. Οι εναλλακτικές διαδρομές που κατασκευάζονται ακολουθούν την γεωμετρία του βασικού μονοπατιού (route path).

#### 3.9.5 Παράδειγμα εναλλακτικών μονοπατιών

Η σχεδίαση με την μέθοδο Frenet μονοπατιών εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα για την κατασκευή μονοπατιών σε ένα δομημένο περιβάλλον όπως είναι ένα αστικό κέντρο ή ένας αυτοκινητόδρομος καθώς το όχημα δεν απαιτείται να ακολουθήσει μονοπάτι με πολύπλοκη γεωμετρία. Συνήθως, το όχημα θα πρέπει να ακολουθήσει μονοπάτια με μικρή καμπυλότητα που συμφωνούν με την γεωμετρία του δρόμου. Ο σχεδιασμός με χρήση της πλευρικής και κατα μήκος απόστασης διευκολύνει τον σχεδιασμό μονοπατιών που επιτυγχάνουν το συγκεκριμένο στόχο. Η παραμετροποίηση ως προς το χρόνο δίνει επιπλέον έλεγχο για την ταχύτητα και την επιτάχυνση του οχήματος σε κάθε θέση του μονοπατιού. Δεδομένου του μονοπατιού αναφοράς μπορεί να κατασκευαστεί μονοπάτι που να ξεκινάει από οποιοδήποτε αρχικό σημείο και να ακολουθεί την γεωμετρία του μονοπατιού αναφοράς. Αυτό επιλύει προβλήματα όπως είναι, η ομαλή είσοδος του οχήματος από ένα σημείο εξωτερικά το δρόμου στο οποίο το όχημα είναι παρκαρισμένο πρός την γραμμή κυκλοφορίας που βρίσκεται το μονοπάτι αναφοράς (βλ. 3.29 (β)). Επίσης, μπορεί να κατασκευαστεί μονοπάτι που να ακολουθεί παράλληλα το μονοπάτι αναφοράς (βλ. 3.29 (α)), έτσι το όχημα μπορεί να κινείται παράλληλα στο μονοπάτι αναφοράς αλλάζοντας λωρίδες κυκλοφορίας χωρίς να πρέπει να ξανά κατασκευαστεί το μονοπάτι αναφοράς, με αυτό το τρόπο δίνεται επιπλέον ελευθερία κινήσεων στο όχημα. Τέλος, στα μειονεκτήματα της Frenet μεθόδου συμπεριλαμβάνεται η πολυπλοκότητα της και η ευαισθησία σε λάθη του μονοπατιού αναφοράς. Επειδή η μέθοδος ακολουθεί τη γεωμετρία του μονοπατιού αναφοράς αν το μονοπάτι αναφοράς περιέχει κατασκευαστικά λάθη τότε αυτά θα περάσουν και στα Frenet μονοπάτια.

Στην παρακάτω εικόνα 3.29 απεικονίζονται δύο περιπτώσεις που παρουσιάζουν τον τρόπο κατασκευής των Frenet μονοπατιών. Στην πρώτη περίπτωση (εικόνα α), το όχημα βρίσκεται σε κανονική πορεία στην μέση της λωρίδας κυκλοφορίας του, τα μονοπάτια κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ακολουθούν την πορεία του βασικού μονοπατιού και έχουν μεταξύ τους κάποια πλευρική απόσταση αλλά και διαφορά στο μήκος τους δημιουργώντας ένα σύνολο από εναλλακτικές πορείες για το όχημα. Οι εναλλακτικές διαδρομές που κατασκευάζονται βρίσκονται εντός του δρόμου και ακολουθούν την κατεύθυνση του βασικού μονοπατιού. Στην περίπτωση της εικόνας β το όχημα είναι σταματημένο εκτός δρόμου και εισέρχεται εντός του δρόμου. Οι διαδρομές που κατασκευάζονται είναι κατάλληλες για να οδηγήσουν το όχημα ομαλά εντός της κυκλοφορίας με φορά την κατεύθυνση του δρόμου.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ



Σχήμα 3.29: Εναλλακτικά Frenet μονοπάτια για την περίπτωση που α) το όχημα βρίσκεται σε κανονική πορεία κοντά στο μονοπάτι αναφοράς, β) το όχημα βρίσκεται εκτός δρόμου και ετοιμάζεται για την είσοδο του στο δρόμο

#### 3.9.6 Αξιολόγηση τοπικών εναλλακτικών διαδρομών

##### Εισαγωγή

Αφού κατασκευαστούν τα εναλλακτικά μονοπάτια στην συνέχεια της ανάλυσης θα πρέπει καθοριστούν τα κριτήρια με τα οποία θα γίνει η επιλογή του καταλληλότερου μονοπατιού που θα ακολουθηθεί από το αυτόνομο όχημα. Για την επιλογή μπορούν να ληφθούν υπόψη κριτήρια που βελτιστοποιούν παράγοντες της κίνησης του οχήματος για την εξασφάλιση της ομαλής χωρίς απότομες μεταβολές κίνησης. Στην παραπάνω παράγραφο είδαμε την ελαχιστοποίηση του ρυθμού μεταβολής της επιτάχυνσης (jerk). Επιπλέον κριτήρια μπορεί να είναι η καμπυλότητα του μονοπατιού, η μέγιστη ταχύτητα που πρέπει να αναπτύξει το όχημα για να ακολουθήσει το μονοπάτι, η μέγιστη επιτάχυνση καθώς και το μήκος του μονοπατιού. Κριτήρια υψηλότερου επιπέδου σχετίζονται με την γεωμετρία του δρόμου και τα αντικείμενα που βρίσκονται στην διαδρομή του οχήματος, τέτοια κριτήρια ελαχιστοποιούν την πιθανότητα σύγκρουσης με κάποιο αντικείμενο ή ενθαρρύνουν την επιλογή μονοπατιού που να ελαχιστοποιεί το κίνδυνο για την εκτροπή του οχήματος εκτός δρόμου. Για την αξιολόγηση του κατάλληλου μονοπατιού με τα παραπάνω κριτήρια χρησιμοποιείται μια συνάρτηση αξιολόγησης που συνυπολογίζει όλα τα επιθυμητά κριτήρια αξιολόγησης. Μια καλή περιγραφή της μεθόδου αξιολόγησης έχει γίνει στην δημοσίευση [10] όπου χρησιμοποιείται η η συνάρτηση αξιολόγησης:

$$f_j = J_{\text{dynamics}} + J_{\text{static}} + J_{\text{collision}} + J_{\text{goal}} \quad (3.25)$$

Το  $f_j$  υπολογίζεται για κάθε μονοπάτι, η παράμετρος  $J_{\text{dynamics}}$  αναφέρεται στην ταχύτητα του οχήματος και την καμπυλότητα του μονοπατιού,  $J_{\text{static}}$  στην

### 3.9. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ

---

σύγκρουση με στατικά εμπόδια,  $J_{collision}$  στην σύγκρουση με δυναμικά εμπόδια και  $J_{goal}$  στην εγγύτητα του μονοπατιού με από τον στόχο.

#### Μέθοδος αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση των εναλλακτικών μονοπατιών έχουν χρησιμοποιηθεί δύο κατηγορίες παραμέτρων. Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται στην γεωμετρία των μονοπατιών και των περιορισμών που εισάγει το κινηματικό μοντέλο του οχήματος στη κίνηση του, τα κριτήρια αξιολόγησης είναι:

1. Η μέγιστη καμπυλότητα του μονοπατιού.
2. Η μέγιστη επιτάχυνση που μπορεί να αναπτύξει το όχημα πάνω στο μονοπάτι.
3. Η μέγιστη ταχύτητα του οχήματος πάνω στο μονοπάτι.

Με χρήση του Frenet μοντέλου για κάθε σημείο κάθε μονοπατιού έχει υπολογιστεί για το σημείο αυτό η καμπυλότητα, η ταχύτητα του οχήματος και η επιτάχυνση του οχήματος για την διάσχιση του μονοπατιού και επομένως για κάθε μονοπάτι ελέγχεται αν αυτές οι μεταβλητές ξεπερνούν τις ανώτατες επιθυμητές τιμές. Υπενθυμίζεται ότι η κατασκευή των μονοπατιών γίνεται με παραμετροποίηση ως προς το χρόνο και με χρήση αρχικών και τελικών συνθηκών που σχετίζονται με την ταχύτητα και την επιτάχυνση του οχήματος, επομένως, οι μεταβλητές της ταχύτητας και της επιτάχυνσης του οχήματος μπορούν να υπολογιστούν για κάθε σημείο του μονοπατιού. Οι ανώτατες επιτρεπτές τιμές των κριτηρίων μπορούν να επιλεχθούν από το κινηματικό μοντέλο, την δυναμική του οχήματος ή την κατάσταση του περιβάλλοντος οδήγησης. Αν υπάρχει έστω και ένα σημείο που να υπερβαίνει τα όρια τότε το μονοπάτι αποκλείεται από την λίστα των τοπικών εναλλακτικών διαδρομών.

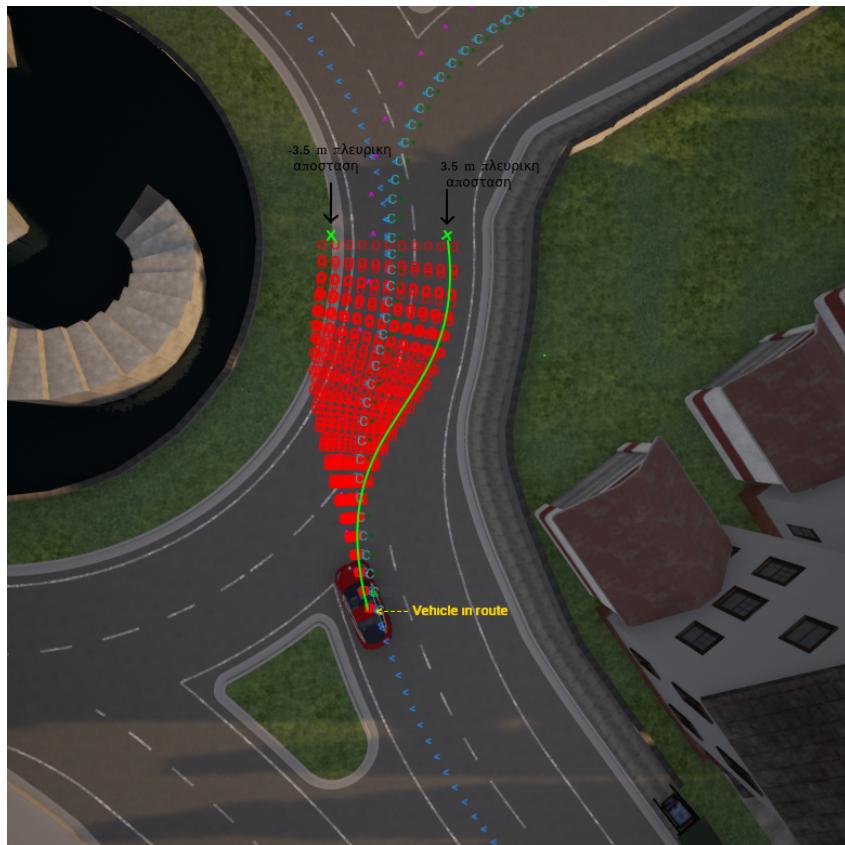
Στην συνέχεια, αφού επιλεχθούν τα μονοπάτια που υπακούουν στους δυναμικούς και κινητικούς περιορισμούς του οχήματος, γίνεται αξιολόγηση των μονοπατιών για την επιλογή του καταλληλότερου μονοπατιού. Τα κριτήρια αξιολόγησης για την δεύτερη κατηγορία αξιολόγησης είναι:

1. Η απόσταση των μονοπατιών από ένα σημείο στόχο που καθορίζεται από την απόσταση από το βασικό μονοπάτι.
2. Η απόσταση των μονοπατιών από το προηγούμενο καλύτερο επιλεγμένο μονοπάτι.
3. Η απόσταση των μονοπατιών από τα δυναμικά εμπόδια.

Το σημείο στόχος προς το οποίο πρέπει να κινηθεί το όχημα αντιστοιχεί σε μία τιμή πλευρικής απόστασης από το βασικό μονοπάτι και παράγεται από το την μονάδα πρόβλεψης συμπεριφοράς για να κατευθύνει την πορεία του οχήματος. Για παράδειγμα, αν το όχημα κινείται εντός μιας λωρίδας κατεύθυνσης πάνω στο βασικό μονοπάτι και το όχημα πρέπει να μεταφερθεί στην δεξιά λωρίδα τότε δεδομένου ότι η κάθε λωρίδα έχει μήκος περίπου 3.5m τότε θα πρέπει να επιλεχθούν τα μονοπάτια με πλευρική απόσταση κοντά στα 3.5m από το βασικό μονοπάτι. Αν

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

ήταν επιθυμητή η μεταφορά του οχήματος στην αριστερή λωρίδα τότε θα έπρεπε να επιλεχθούν με την ίδια λογική μονοπάτια με απόσταση κοντά στα  $-3.5m$ . Στο σχήμα 3.30 φαίνεται η επιλογή ενός μονοπατιού που βρίσκεται κοντά στο σημείο στόχου με πλευρική απόσταση  $3.5m$ .

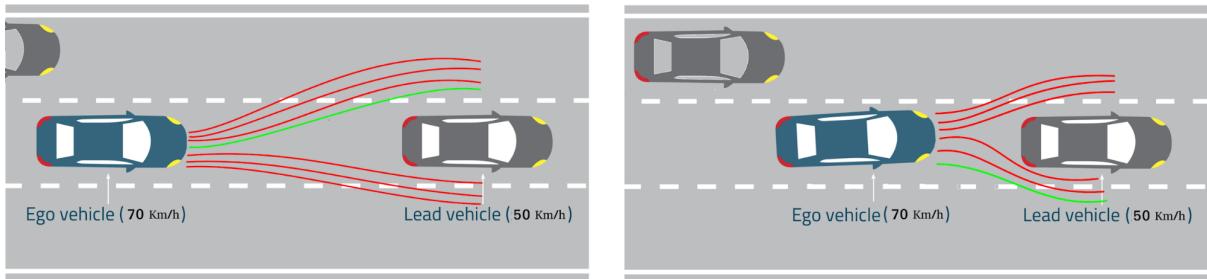


Σχήμα 3.30: Μονοπάτι(πράσινο) που βρίσκεται κοντά στο σημείο στόχο με πλευρική απόσταση  $3.5 m$  από το βασικό μονοπάτι

Το δεύτερο κριτήριο το οποίο αναφέρεται στο προηγούμενο μονοπάτι στοχεύει στην απόρριψη απότομων μεταβολών στην κατεύθυνση του οχήματος. Στην περίπτωση που το όχημα έχει επιλέξει να ακολουθήσει κάποιο μονοπάτι και ξαφνικά αλλάζει απότομα το μονοπάτι και η κατεύθυνση του οχήματος το όχημα κινδυνεύει να συγκρουστεί με κάποιο αντικείμενο. Στην παρακάτω εικόνα 3.31 βλέπουμε την περίπτωση στην οποία το αρχικό μονοπάτι που έχει επιλεγεί περνάει αριστερά από το μπροστινό όχημα, ενώ το αυτόνομο όχημα έχει πλησιάσει το μπροστινό όχημα και έχει πάρει την κατάλληλη θέση για να περάσει αριστερά από το μπροστινό ξαφνικά επιλέγεται ένα μονοπάτι από την δεξιά πλευρά. Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας αλλαγής είναι η σύγκρουση των δύο οχημάτων.

Το τελευταίο κριτήριο αξιολόγησης είναι η απόσταση των μονοπατιών από τα δυναμικά εμπόδια. Η απόσταση από τα εμπόδια και η αποφυγή σύγκρουσης είναι μια διαδικασία που διαχειρίζεται η μονάδα επιλογής συμπεριφοράς και επομένως τα μονοπάτια δεν ελέγχονται με κριτήριο την εγγύτητα από τα εμπόδια. Η αξιολόγηση γίνεται με στόχο την αποφυγή σύγκρουσης, γίνεται έλεγχος μόνο για το αν κάποιο μονοπάτι διέρχεται πάνω από κάποιο εμπόδια και αν αυτό συμβαίνει

### 3.9. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ



Σχήμα 3.31: Απότομη αλλαγή της κατεύθυνσης του οχήματος λόγω αλλαγής του βέλτιστου τοπικού μονοπατιού

τότε αφαιρείται από την λίστα των τοπικών μονοπατιών. Αν όλα τα μονοπάτια διέρχονται από εμπόδιο τότε επιλέγεται το τελευταίο μονοπάτι που έχει μείνει στην λίστα και ορίζεται για κάθε σημείο του μονοπατιού η ταχύτητα του οχήματος ίση με το μηδέν για να ακινητοποιηθεί το όχημα. Για τον έλεγχο της σύγκρουσης με όχημα χρησιμοποιείται ως όριο γύρω από τα οχήματα η γεωμετρία του παρακάτω σχήματος της εικόνας 3.32. Το αυτόνομο όχημα τοποθετείται σε κάθε σημείο του μονοπατιού με κατεύθυνση που ακολουθεί την γεωμετρία του μονοπατιού και ελέγχεται αν υπάρχει σημείο για το μονοπάτι που τα όρια γύρω από τα οχήματα συγκαλύπτονται, αυτό σημαίνει ότι σε αυτό το σημείο τα οχήματα θα συγκρουστούν και επομένως το μονοπάτι αφαιρείται από την λίστα των εναλλακτικών μονοπατιών.

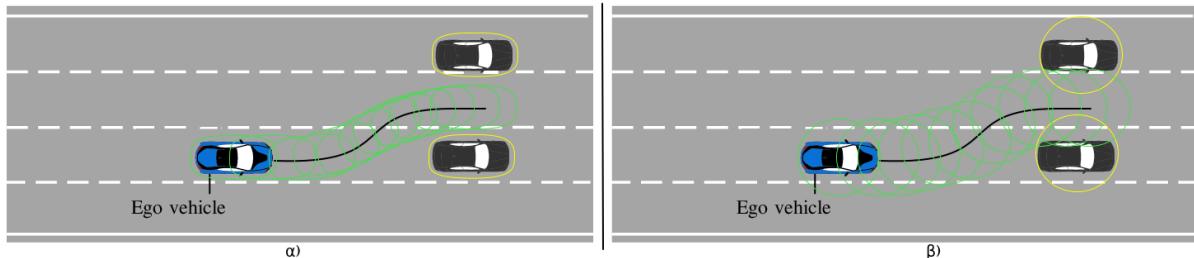


Σχήμα 3.32: Γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε για τα όρια γύρω από τα οχήματα για τον έλεγχο σύγκρουσης τους κατά την επιλογή των εναλλακτικών διαδρομών

Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε έναντι για παράδειγμα μιας γεωμετρίας κύκλου δίνει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει την επιλογή ενός μονοπατιού στο οποίο τα οχήματα μπορεί να περάσουν το ένα δίπλα στο άλλο χωρίς να συγκρουστούν. Τέ-

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

τοιου είδους κινήσεις συναντώνται συστηματικά σε περιβάλλοντα με πυκνή κίνηση όπως είναι τα αστικά κέντρα. Στο σχήμα 3.33 φαίνεται στην πρώτη περίπτωση η χρήση της ελλειψοειδούς μορφής ορίου για την εκτίμηση σύγκρουσης. Σε αυτή την περίπτωση το μονοπάτι είναι αποδεκτό καθώς δεν υπάρχει επικάλυψη των ορίων των οχημάτων. Στην εικόνα β γίνεται χρήση κυκλικών ορίων και σε αυτή την περίπτωση λόγω της επικάλυψης το μονοπάτι απορρίπτεται.



Σχήμα 3.33: Παράδειγμα χρήσης ελλειψοειδούς μορφής ορίου (α) έναντι χρήσης κυκλικής μορφής ορίου (β)

**Algorithm 17:** Local candidate trajectories(frenet path planning)

---

```

Result: best_path, stop_vehicle_flag
1 base_path : The route path that the vehicle has to follow.
2 frenet_paths1[] : Use the base_path and create the candidate trajectories with the frenet
   method.
3 frenet_paths2[] : Choose the paths from the frenet_paths1 which satisfy the kinematics
   and dynamics constraints.// 
4 target_lateral_offset : The lateral distance of the target point from the route path/
5 objects: The dynamics object around the vehicle.
6 for each path of frenet_paths2 do
7   | d1[i] ← distance from target_lateral_offset
8   | d2[i] ← distance from previous best_path
9 end
10 w[i] ← d1[i] + d2[i]
11 w_best ← min(w[])
12 best_path ← frenet_paths2[index(w_best)]
13 stop_vehicle_flag ← False
14 while (length of w) > 0 do
15   | d3 ← check collision with object for the best_path
16   | if d3 == 0 then
17     |   | w[] ← w[].delete(w_best)
18     |   | w_best ← min(w[])
19     |   | best_path ← frenet_paths2[index(w_best)]
20   | else
21   |   | break
22   | end
23 end
24 if (length of w) == 1 then
25   | best_path ← best_path.set( vehicle speed == 0 for each path's point)
26   | stop_vehicle_flag ← True
27 end
28 return route_path, stop_vehicle_flag

```

---

## 3.10. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

---

### 3.10 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

---

#### 3.10.1 Εισαγωγή

Το σύστημα ελέγχου ταχύτητα και κατεύθυνσης είναι από τα σημαντικότερα σε ένα μη επανδρωμένο αυτόνομο όχημα, καθώς από αυτό εξαρτάται η σταθερότητα και η ασφάλεια του αυτόνομου οχήματος. Ένα αυτόνομο όχημα μπορεί να συλλέξει πληροφορίες για την κατάσταση του δρόμου και των αντικειμένων που συναντά, να αναλύσει τα δεδομένα και να εξάγει συμπεράσματα για την ταχύτητα και την κατεύθυνση που θα πρέπει να ακολουθήσει, παρόλα αυτά, αυτές οι πληροφορίες μόνες τους δεν είναι αρκετές για την κίνηση του αυτόνομου οχήματος. Αφού υπολογιστούν η απαραίτητη ταχύτητα και την κατεύθυνση του αυτόνομου οχήματος στην συνέχεια θα πρέπει με χρήση αυτών των μεταβλητών να ελεγχθούν το γκάζι, το φρένο και η γωνία του τιμονιού. Το όχημα θα πρέπει να κινείται ταυτόχρονα με ασφάλεια αλλά και με άνεση για τους επιβάτες, το σύστημα πρέπει να ακολουθεί όσο πιο γρήγορα γίνεται τις εντολές εισόδου για την ταχύτητα και την κατεύθυνση αλλά παράλληλα το όχημα θα πρέπει να κινείται με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο θα το έκανε και ένας άνθρωπος. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί η τεχνική με την οποία ελέγχεται η ταχύτητα και η κατεύθυνση του οχήματος στην διπλωματική εργασία.

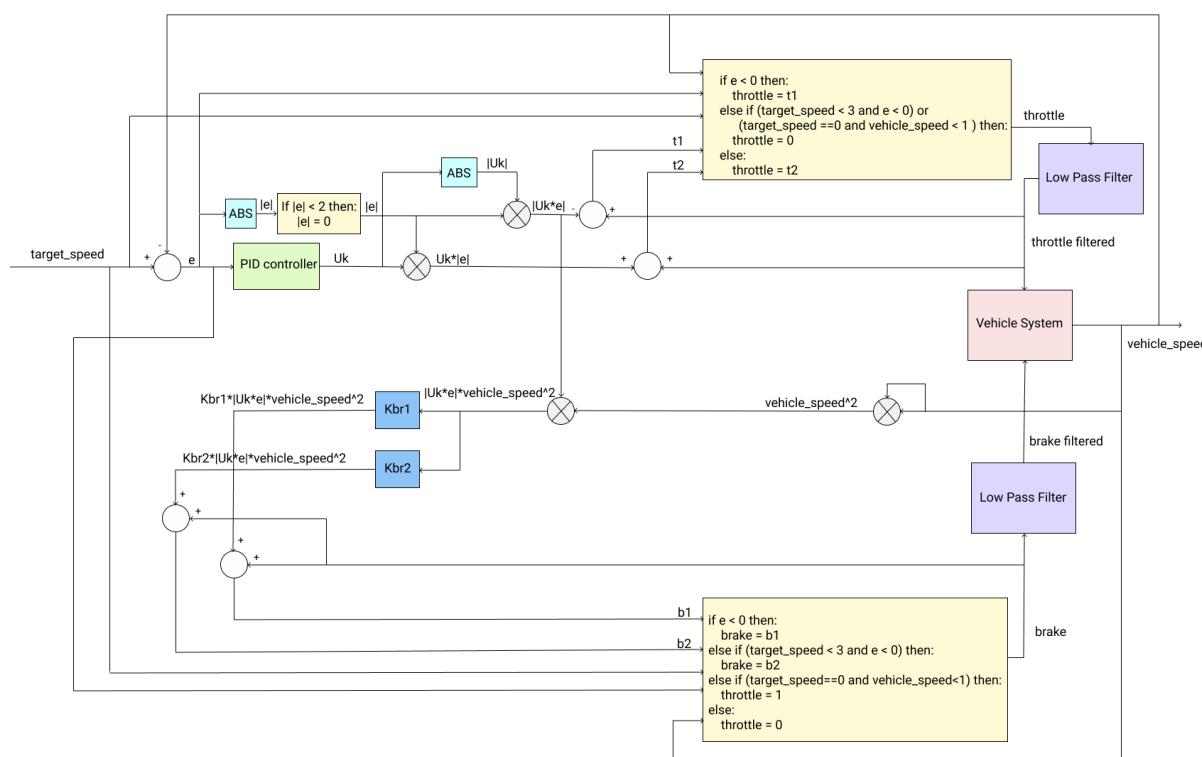
#### 3.10.2 Έλεγχος ταχύτητας

Ο έλεγχος της ταχύτητας επηρεάζει άμεσα την ασφάλεια αλλά και την άνεση των επιβατών. Το όχημα θα πρέπει να ανταποκρίνεται άμεσα στις μεταβολές της ταχύτητας που απαιτούνται στις εκάστοτε συνθήκες οδήγησης αλλά επιπλέον δεν θα πρέπει να κινείται με μη συνηθισμένο τρόπο για τον άνθρωπο. Για τον έλεγχο του οχήματος θεωρείται ότι τα πεντάλ του οχήματος μπορούν να ελεγχθούν ηλεκτρονικά και οι τιμές που μπορούν να λάβουν είναι στο διάστημα  $[0, 1]$  με το 0 να δηλώνει την αδράνεια του πεντάλ ενώ το 1 την πλήρη ενεργοποίηση του. Στο σύστημα ελέγχου αρχικά υπολογίζεται το σφάλμα ε της ταχύτητας από την επιθυμητή ταχύτητα του οχήματος και τροφοδοτείται σε έναν PID ελεγκτή. Στην συνέχεια με βάσει το σφάλμα του συστήματος και την τιμή της εξόδου του PID ελεγκτή υπολογίζονται σήματα ελέγχου για τις τιμές του φρένου και του γκαζιού. Τα σήματα επιλέγονται ανά περίπτωση σύμφωνα με τις τιμές της ταχύτητας του οχήματος, του σφάλματος ε και τις τιμή της επιθυμητής ταχύτητας. Οι υποπεριπτώσεις για τα σήματα περιγράφουν καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το όχημα στις οποίες απαιτείται διαφορετικός έλεγχος στα πεντάλ του οχήματος.

Για παράδειγμα στην περίπτωση που η ταχύτητα του οχήματος είναι πολύ μεγάλη και το σφάλμα ε πολύ μεγάλο και το όχημα πρέπει να ελαττώσει ταχύτητα τότε θα πρέπει να απενεργοποιηθεί το γκάζι και να ενεργοποιηθεί το φρένο αναλογικά με την τιμή του σφάλματος ε, στην περίπτωση όμως που το όχημα κινείται με μεγάλη ταχύτητα και το σφάλμα είναι μικρό τότε αρκεί να αδρανοποιηθεί λίγο το γκάζι χωρίς να ενεργοποιηθεί το φρένο και το όχημα επιβραδύνει από μόνο του.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Στην συνέχεια αφού υπολογιστούν οι τιμές των πεντάλ φιλτράρουνται χρησιμοποιώντας χαμηλοδιαβατά φίλτρα. Ο σκοπός των φίλτρων είναι να απορριφθούν απότομες μεταβολές στις τιμές των πεντάλ που θα μπορούσαν να προκαλέσουν στο όχημα απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του και επομένως μη ομαλή κίνηση για το όχημα. Τέλος, οι τιμές των πεντάλ τροφοδοτούνται στο σύστημα του οχήματος για τον έλεγχο της ταχύτητας του. Η ρύθμιση και η λειτουργία του συστήματος ελέγχου ταχύτητας εξαρτάται από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος, επομένως, για κάθε όχημα η ρύθμιση του συστήματος είναι διαφορετική. Στο σχήμα 3.34 φαίνεται σε μορφή block diagram το σύστημα ελέγχου της ταχύτητας του οχήματος.



Σχήμα 3.34: Διάγραμμα του συστήματος ελέγχου της ταχύτητας του οχήματος με χρήση του γκαζιού και του φρένου

### Παράδειγμα

Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα 3.35 για την επίδειξη του συστήματος ελέγχου της ταχύτητας. Το όχημα θα κινηθεί πάνω στην διαδρομή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, δεν θα εκτελέσει ολόκληρη την διαδρομή του σχήματος, θα ξεκινήσει από την αρχική του θέση και θα σταματήσει στο σημείο που είναι σημειωμένο με κόκκινο το κύκλο. Κατά την διάσχιση του συγκεκριμένου μονοπατιού θα περάσει και θα σταματήσει σε δύο σημεία με φανάρια και ένα σημείο υποχρεωτικής διακοπής πορείας (stop) τα οποία είναι σημειωμένα στο σχήμα. Επίσης, θα πρέπει στις στροφές το όχημα θα προσαρμόσει κατάλληλα την ταχύτητα του για την ασφαλή και ομαλή οδήγηση του. Κατά την εκτέλεση του σεναρίου γί-

### 3.10. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

νεται καταγραφή της επιθυμητής ταχύτητας εισόδου που χρησιμοποιεί το σύστημα ελέγχου ταχύτητας, επίσης, καταγράφεται η ταχύτητα του οχήματος και οι τιμές ενεργοποίησης των πεντάλ (φρένο, γκάζι).

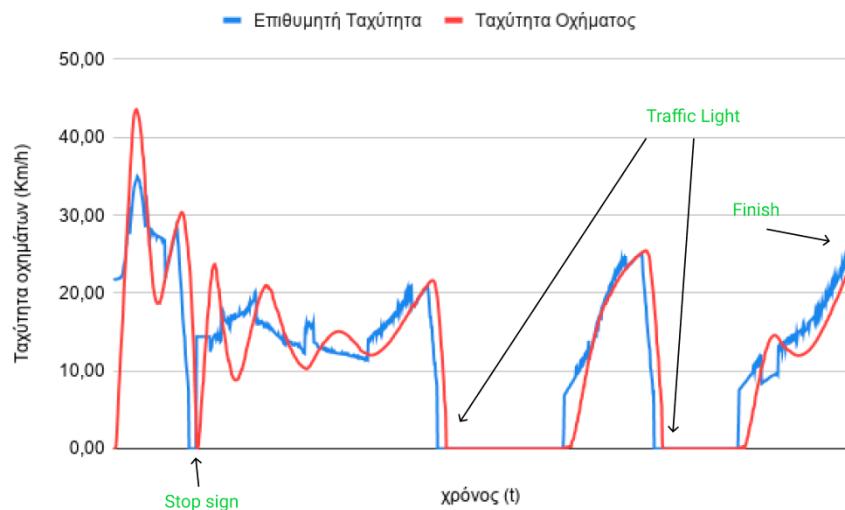


Σχήμα 3.35: Διαδρομή οχήματος για την παρουσίαση του ελέγχου ταχύτητας

Στο διάγραμμα 3.36 συγκρίνονται οι τιμές της επιθυμητής ταχύτητας με τις τιμές της πραγματικής ταχύτητας του οχήματος. Φαίνεται ότι το επιθυμητή ταχύτητα εισόδου εμφανίζει απότομες μεταβολές, το σύστημα ελέγχου ταχύτητας παρόλα αυτά είναι ικανό να ακολουθήσει την ταχύτητα εισόδου απορρίπτοντας τις απότομες μεταβολές και εξασφαλίζοντας την ομαλή κίνηση του οχήματος. Στο διάγραμμα έχουν επιπλέον σημειωθεί οι χρονικές στιγμές που σταματάει το όχημα στα φανάρια και στο stop. Επίσης, παρατηρώντας το διάγραμμα και με σημεία αναφοράς τις στιγμές που σταματάει το όχημα στα φανάρια και στο stop μπορεί να παρατηρηθεί η προσαρμογή της ταχύτητας του οχήματος στην γεωμετρία του δρόμου. Για παράδειγμα, στα διαστήματα που το όχημα βρίσκεται σε ευθεία πορεία φαίνεται ότι η ταχύτητα του οχήματος φτάνει τα 25km/h ενώ όταν πλησιάζει στροφές η ταχύτητα του πέφτει κάτω από τα 15km/h.

Στο σχήμα 3.37 παρουσιάζεται το διάγραμμα των σημάτων του συστήματος ελέγχου στα πεντάλ του οχήματος. Το 0 σημαίνει ότι το αντίστοιχο πεντάλ δεν

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ



Σχήμα 3.36: Διάγραμμα επιθυμητής ταχύτητας και πραγματικής ταχύτητας οχήματος που επιτυγχάνεται από το σύστημα ελέγχου ταχύτητας

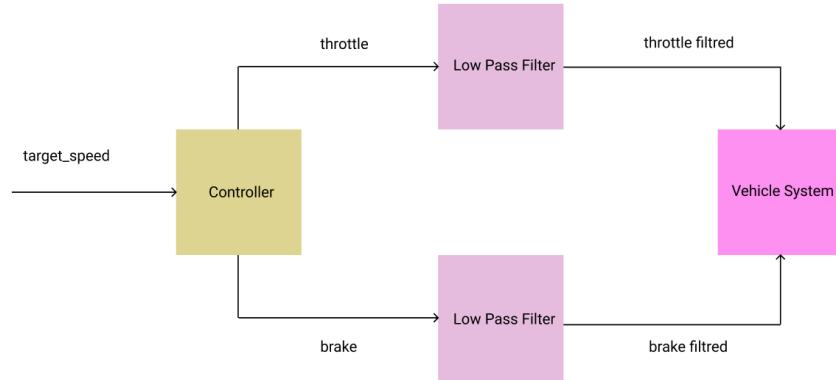
ενεργοποιείται ενώ η τιμή 1 σημαίνει ότι το πεντάλ έχει πάρει την μέγιστη τιμή του. Όπως και πριν στο προηγούμενο διάγραμμα, έτσι και σε αυτό έχουν σημειωθεί τα σημεία στα οποία σταματάει το όχημα. Φαίνεται ότι όταν χρησιμοποιείται το γκάζι το φρένο είναι απενεργοποιημένο και το αντίστροφο, που είναι ο συνηθισμένος τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται τα πεντάλ και από τον άνθρωπο. Στα σημεία που σταματάει το όχημα το πεντάλ του φρένου είναι πλήρως ενεργοποιημένο.



Σχήμα 3.37: Τιμές ενεργοποίησης των πεντάλ(φρένο, γκάζι) από το σύστημα ελέγχου ταχύτητας

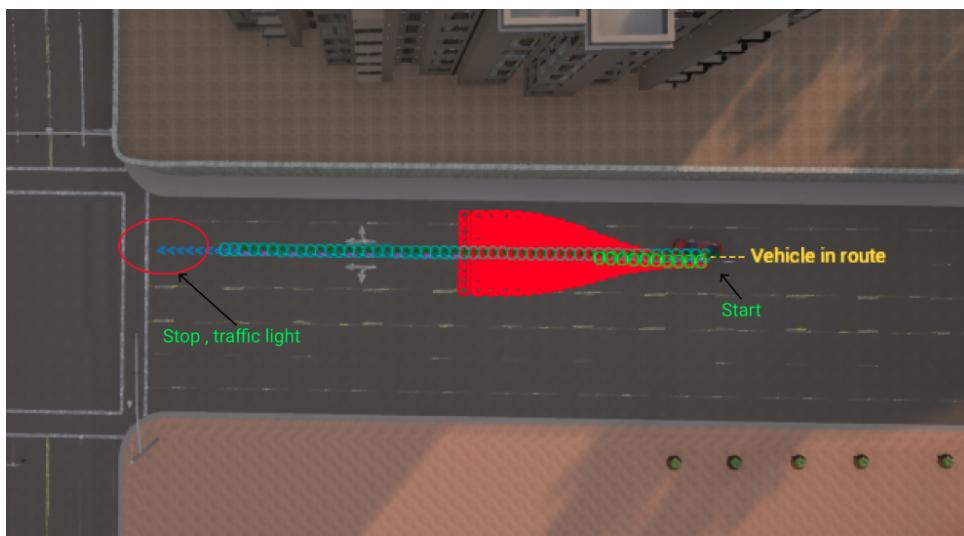
### 3.10. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

#### 3.10.3 Χρήση χαμηλοδιαβατού φίλτρου στο σύστημα ελέγχου ταχύτητας



Σχήμα 3.38: Εισαγωγή χαμηλοδιαβατού φίλτρου στο σύστημα

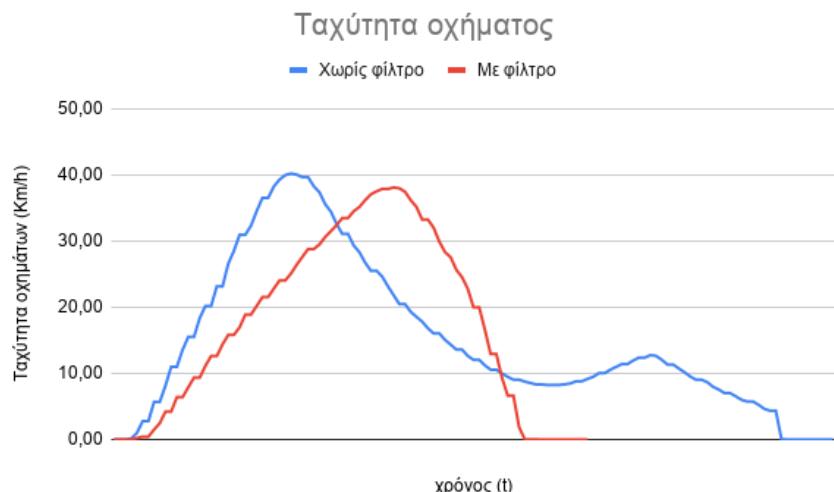
Το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί δύο χαμηλοδιαβατά φίλτρα για το φιλτράρισμα των σημάτων ελέγχου των πεντάλ. Η χρήση των φίλτρων είναι καθοριστική για την ομαλή κίνηση του οχήματος, στην περίπτωση που δεν γίνει χρήση των φίλτρων τότε οι απότομες μεταβολές της επιθυμητής ταχύτητα εισόδου θα περάσουν στην έξοδο δημιουργώντας απότομες μεταβολές στις τιμές των σημάτων ελέγχου των πεντάλ και κατ' επέκταση απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του οχήματος. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ελέγχου της ταχύτητας με χρήση φίλτρου και χωρίς την χρήση φίλτρου. Στο σενάριο που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.39 το όχημα πρέπει να ξεκινήσει από κατάσταση ηρεμίας και να κινηθεί πάνω στην ευθεία που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και να σταματήσει στο φανάρι στο σημείο που βρίσκεται ο κόκκινος κύκλος.



Σχήμα 3.39: Σενάριο κίνησης για την παρουσίασή της χρήσης χαμηλοδιαβατού φίλτρου

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Στο διάγραμμα 3.40 που ακολουθεί παρουσιάζεται η ταχύτητα του οχήματος με την χρήση και χωρίς την χρήση φίλτρου. Στην περίπτωση της χρήσης φίλτρου φαίνεται ότι το όχημα αυξάνει με πιό αργό ρυθμό την ταχύτητα του σε σχέση με την περίπτωση που δεν γίνεται χρήση φίλτρου. Επίσης, η κίνηση του οχήματος είναι αρκετά πιο ομαλή με την χρήση φίλτρου. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το όχημα επιταχύνει ομαλά και όταν πλησιάσει το φανάρι σταματά μειώνοντας την ταχύτητα του ξανά ομαλά. Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται φίλτρο το όχημα επιταχύνει, στην συνέχεια μειώνει ταχύτητα, μετά ξανά επιταχύνει και τέλος επιβραδύνει και σταματάει στο φανάρι. Στη δεύτερη περίπτωση η κίνηση του οχήματος περιέχει περισσότερες μεταβολές στην ταχύτητα του. Τέλος, στην περίπτωση που γίνεται χρήση φίλτρου βλέπουμε ότι το όχημα φτάνει αρκετά πιο γρήγορα στο φανάρι, σχεδόν στο μισό χρόνο από αυτόν που χρειάζεται το σύστημα χωρίς φίλτρο.



Σχήμα 3.40: Ταχύτητα του οχήματος με την χρήση και χωρίς την χρήση φίλτρου

Στα παρακάτω διαγράμματα 3.41 και 3.42 παρουσιάζονται οι τιμές των πεντάλ με χρήση χαμηλοδιαβατού φίλτρου και χωρίς την χρήση του. Στην περίπτωση που γίνεται χρήση φίλτρου τα πεντάλ ενεργοποιούνται με πιό ομαλό τρόπο χωρίς απότομες μεταβολές.

### 3.10. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

---



Σχήμα 3.41: Ενεργοποίηση γκαζιού με και χωρίς χρήση χαμηλοδιαβατού φίλτρου για το ίδιο σενάριο



Σχήμα 3.42: Ενεργοποίηση φρένου με και χωρίς χρήση χαμηλοδιαβατού φίλτρου για το ίδιο σενάριο

#### 3.10.4 Έλεγχος κατεύθυνσης οχήματος

Για τον έλεγχο της κατεύθυνσης του οχήματος το σύστημα ελέγχου κατεύθυνσης θα πρέπει κάθε στιγμή να προσαρμόζει την γωνία στροφής του τιμονιού ώστε το οχηματα να ακολουθεί το βασικό μονοπάτι. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος ελέγχου κατεύθυνσης είναι κρίσιμη για ένα αυτόνομο όχημα καθώς ο λάθος χειρισμός της πορείας του οχήματος μπορεί να το οδηγήσει το αυτόνομο όχημα εκτός δρόμου ή πάνω σε αντικείμενα. Επομένως, η σωστή λειτουργία του συστήματος ελέγχου ταχύτητας εξασφαλίζει την ασφάλεια και την ομαλή κίνηση του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα το σύστημα ελέγχου κατεύθυνσης λαμβάνει στην είσοδο του το επιθυμητό μονοπάτι που πρέπει να ακολουθήσει το αυτόνομο όχημα και ορίζει κα-

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

τάλληλα την γωνία του τιμονιού ώστε το όχημα να κινείται πάνω στο μονοπάτι. Στην παρούσα διπλωματική έχει επιλεχθεί να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος Pure Pursuit για τον έλεγχο της κατεύθυνσης λόγω της απλότητας και την αποτελεσματικότητας του σε κινηματικά μοντέλα όπως είναι αυτό ενός αυτοκινήτου.

#### Αλγόριθμος Pure Pursuit

Η πορεία που θα πρέπει να ακολουθήσει το αυτόνομο όχημα περιγράφεται με την μορφή ενός μονοπατιού. Ένας ελεγκτής πρέπει συνέχεια να δίνει τις απαραίτητες εντολές ταχύτητα και κατεύθυνσης στο αυτόνομο όχημα έτσι ώστε να ακολουθεί το μονοπάτι, ελαχιστοποιώντας την πλευρική του απόσταση και την γωνία κατεύθυνσης του οχήματος σε σχέση με το μονοπάτι. Ο αλγόριθμος Pure Pursuit και οι παραλλαγές του είναι από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές για την διαδικασία προσδιορισμού της κατεύθυνσης των μπροστινών τροχών ώστε το όχημα να ακολουθήσει το μονοπάτι. Η μεθόδος Pure Pursuit αποτελείται από γεωμετρικούς υπολογισμούς για τον προσδιορισμό ενός τόξου κύκλου που ενώνει το κέντρο του άξονα των πίσω τροχών του οχήματος ή στην περίπτωση που χρησιμοποιείτε το μοντέλο ποδηλάτου (βλ. ενότητα 2.3.1) ενώνει τον πίσω τροχό, με ένα σημείο στόχο του μονοπατιού που βρίσκεται σε μία καθορισμένη απόσταση μπροστά από το όχημα.

Το σημείο στόχος ( $g_x, g_y$ ) φαίνεται στο σχήμα 3.43. Η γωνία κατεύθυνσης δ των μπροστινών τροχών μπορεί να υπολογιστεί με με χρήση μόνο του σημείο στόχου του μονοπατιού και την γωνία α μεταξύ του διανύσματος κατεύθυνσης του οχήματος και του διανύσματος που ενώνει το πίσω τροχό με τον σημείο στόχο. Εφαρμόζοντας τον γόμο των συνημιτόνων στο παρακάτω σχήμα προκύπτουν οι εξισώσεις [4].

$$\begin{aligned} \frac{\ell_d}{\sin(2\alpha)} &= \frac{R}{\sin(\frac{\pi}{2}-\alpha)} \\ \frac{\ell_d}{2\sin(\alpha)\cos(\alpha)} &= \frac{R}{\cos(\alpha)} \\ \frac{\ell_d}{\sin(\alpha)} &= 2R \end{aligned} \tag{3.26}$$

Αν συμβολίσουμε με κ την καμπυλότητα του τόξου του κύκλου ( $\kappa = 1/R$ ) που κινείται το όχημα τότε έχουμε:

$$\kappa = \frac{2 \sin(\alpha)}{\ell_d} \tag{3.27}$$

Η γωνία κατεύθυνσης των τροχών σύμφωνα με το μοντέλο ποδηλάτου δίνεται από την σχέση :

$$\delta = \tan^{-1}(\kappa L) \tag{3.28}$$

Συνδυάζοντας τις προηγούμενες εξισώσεις η γωνία κατεύθυνσης του μπροστινού τροχού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση που αντιστοιχεί στον κανόνα ελέγχου της τεχνικής του Pure Pursuit:

$$\delta(t) = \tan^{-1} \left( \frac{2L \sin(\alpha(t))}{\ell_d} \right) \tag{3.29}$$

### 3.10. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

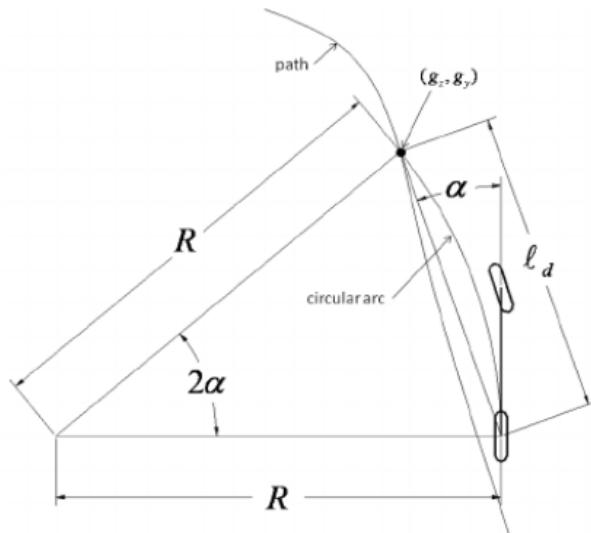
Καλύτερη κατανόηση για τον τρόπο λειτουργίας του παραπάνω ελεγκτή μπορεί να γίνει αν θεωρήσουμε την μεταβλητή  $e_{ld}$  ως την απόκλιση του διανύσματος κατεύθυνσης του οχήματος από το σημείο στόχο του μονοπατιού καταλήγοντας στην εξίσωση:

$$\sin(\alpha) = \frac{e_{\ell_d}}{\ell_d} \quad (3.30)$$

Η καμπυλότητα τότε είναι:

$$\kappa = \frac{2}{\ell_d^2} e_{\ell_d} \quad (3.31)$$

Η τελευταία εξίσωση παρουσιάζει ότι ο pure pursuit είναι ένας αναλογικός ελεγκτής της γωνίας κατεύθυνσης του οχήματος με σφάλμα που δίνεται από το μέγεθος  $e_{ld}$  και το κέρδος του είναι  $\frac{2}{\ell_d^2}$ .



Σχήμα 3.43: Γεωμετρία του αλγόριθμου Pure Pursuit

#### Παρουσίαση παραδείγματος για το σύστημα ελέγχου κατεύθυνσης

Για την επίδειξη της λειτουργίας του συστήματος ελέγχου κατεύθυνσης χρησιμοποιήθηκε το μονοπάτι που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.44. Η δοκιμή έχει πραγματοποιηθεί στο χάρτη 2 του Carla προσομοιωτή σε περιβάλλον χωρίς δυναμικά εμπόδια, δηλαδή χωρίς να υπάρχουν αυτοκίνητα. Ισχύουν μόνο οι κανόνες οδικής κυκλοφορίας, τα φανάρια και τα stop. Κατά την οδήγηση του οχήματος καταγράφεται η θέση του οχήματος και κατασκευάζεται το μονοπάτι που δημιουργείται από το όχημα κατά την εκτέλεση του πειράματος. Το μονοπάτι που ακολουθησε πραγματικά μαζί με το βασικό μονοπάτι παρουσιάζονται στην εικόνα 3.45.

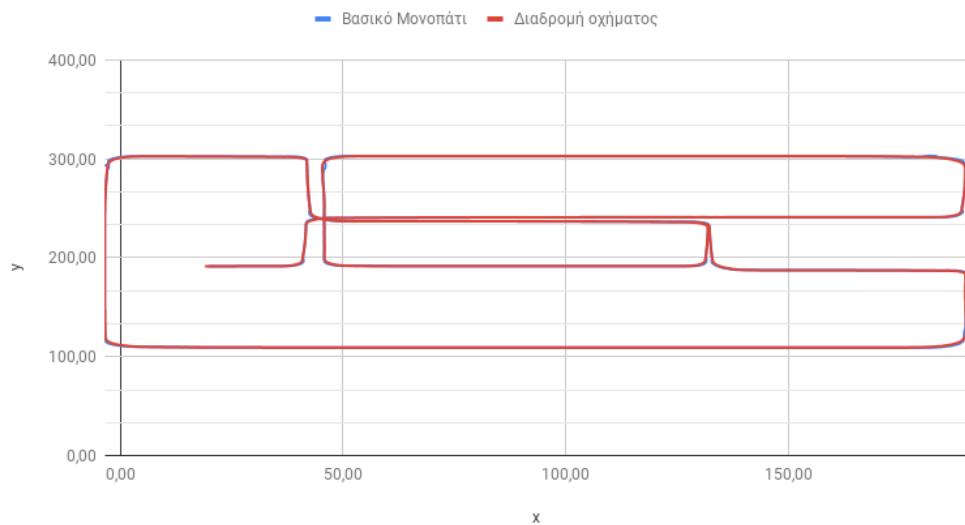
### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ



Σχήμα 3.44: Μονοπάτι για την επίδειξη του συστήματος ελέγχου κατεύθυνσης

Τα δύο μονοπάτια φαίνεται ότι είναι σχεδόν πανομοιότυπα εκτός από τα σημεία που υπάρχουν στροφές, σε αυτά τα σημεία υπάρχει μια μικρή απόκλιση του οχήματος από το βασικό μονοπάτι.

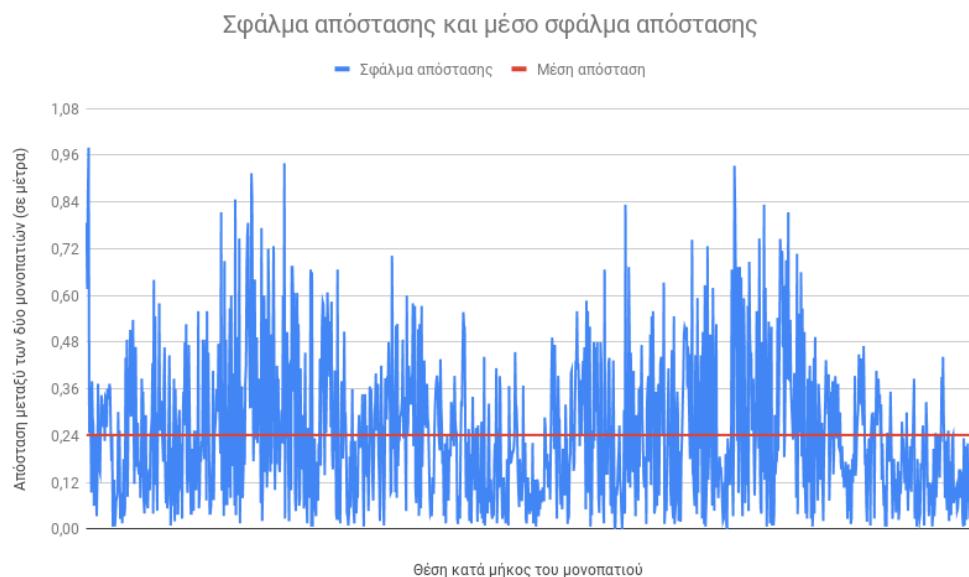
Σύγκριση του βασικού μονοπατιού και της πραγματικής διαδρομής του οχήματος



Σχήμα 3.45: Διάγραμμα σύγκρισης διαδρομής του οχήματος με το βασικό μονοπάτι

### 3.10. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Για κάθε σημείο του μονοπατιού του οχήματος υπολογίζεται η απόσταση του από το βασικό μονοπάτι. Η απόσταση ή αλλιώς το σφάλμα μεταξύ των δύο μονοπατιών κατά μήκος του μονοπατιού παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.46. Το μέσο σφάλμα σημειώνεται με την κόκκινη γραμμή και είναι ίσο με  $0.24m$ . Το πλάτος της κάθε λωρίδας του δρόμου στο Carla προσομοιωτή είναι περίπου στα  $3.5m$  και το πλάτος του οχήματος περίπου  $1.5m$  άρα για να βγεί το όχημα εκτός λωρίδας χρειάζεται πλάγια μετατόπιση στα  $(3.5 - 1.5)/2m = 1m$ . Επομένως, το όχημα είναι εντός των λωρίδων του δρόμου με περιθώριο μέσης τιμής  $(1 - 0.24)m = 0.76m$ . Η μέγιστη τιμή του σφάλματος είναι περίπου  $1 m$ . Σε αυτή την περίπτωση το όχημα ξεκινάει να ακουμπάει τα όρια της λωρίδας. Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται κατά κύριο λόγω σε στροφές, εκεί όμως ο δρόμος είναι πιο πλατύς από  $3.5m$  και υπάρχει περιθώριο για το όχημα ώστε να μην πατήσει σε πλαϊνές λωρίδες. Σε κάθε περίπτωση βλέπουμε ότι ο έλεγχος του οχήματος από το Pure Pursuit είναι αρκετά καλός με μέση απόκλιση  $0.24m$ , ακόμα και στο χειρότερο σενάριο το όχημα παραμένει εντός της λωρίδας κυκλοφορίας του.



Σχήμα 3.46: Η απόσταση της πραγματικής διαδρομής που ακολούθησε το όχημα από το βασικό μονοπάτι



# 4

## Πειράματα - Αποτελέσματα

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση του συστήματος αυτόνομης οδήγησης οχήματος που αναπτύχθηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά θα παρουσιαστούν οι μετρικές σύμφωνα με τις οποίες θα γίνει η εκτίμηση για την ποιότητα και την απόδοση του συστήματος. Τα κριτήρια αξιολόγησης στηρίζονται χυρίως στην μέτρηση της απόδοσης του συστήματος ως προς την αποφυγή συγκρούσεων, την οδήγηση σύμφωνα με τους κανόνες κυκλοφορίας και ως πρός την ικανότητα του οχήματος να ολοκληρώσει την διαδρομή του. Τα πειράματα θα εκτελεστούν σε όλες τις πόλης του Carla προσομοιωτή. Τέλος, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων και θα εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα.

### 4.2 Η ΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΗΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

---

Η αξιολόγηση της αυτονομία του οχήματος μπορεί να γίνει με χρήση παραμέτρων που αξιολογούν τον αριθμό αλλά και τον βαθμό των σφαλμάτων κατά την οδήγηση του αυτόνομου οχήματος. Οι παράμετροι σχετίζονται με τις συγκρούσεις του οχήματος με δυναμικά αλλά και στατικά εμπόδια, την παραβίαση των κανόνων οδικής κυκλοφορίας όπως την παραβίαση κάποιου φωτεινού σηματοδότη ή την έξοδο του οχήματος εκτός του δρόμου. Η έξοδος του οχήματος εκτός δρόμου υπολογίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που το όχημα βρίσκεται εκτός δρόμου σε σχέση με τον συνολικό χρόνο που χρειάστηκε το όχημα για να ολοκληρώσει την πλήρη διαδρομή του. Τέλος, αν το αυτόνομο όχημα κολλήσει για κάποιο διάστημα τότε η διαδρομή τερματίζεται και επιβάλλεται η αντίστοιχη ποινή στο όχημα. Η αξιολόγηση της οδήγησης του αυτόνομου οχήματος θα γίνει σύμφωνα με τις μετρι-

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

κες από το [Carla Leaderboard](#) [22]. Οι μετρικές για την αξιολόγηση της οδήγησης του αυτόνομου οχήματος παρουσιάζονται στην συνέχεια.

### Βαθμολογία οδήγησης

Αποτελεί τη κύρια μετρική για την αξιολόγηση του αυτόνομου οχήματος και εκφράζεται ως άθροισμα της μέσης ολοκλήρωσης της διαδρομής και του αριθμού των παραβάσεων της κυκλοφορίας.

$$\frac{1}{N} \sum_i^N R_i P_i \quad (4.1)$$

$N$  είναι ο αριθμός των διαδρομών για τις οποίες έγινε δοκιμή του οχήματος,  $R_i$  το ποσοστό ολοκλήρωσης της  $i$ -οστης διαδρομής,  $P_i$  η ποινή παραβίασης της  $i$ -οστης διαδρομής. Η ποινή παραβίασης  $P_i$  ορίζεται ως το γινόμενο όλων των παραβιάσεων που γίνονται κατά την εκτέλεση της  $i$ -οστης διαδρομής και δίνεται από τον τύπο.

$$P_i = \prod_j^{\text{ped., ..., stop}} (p_i^j)^{\text{infractions}_j} \quad (4.2)$$

### Ολοκλήρωση διαδρομής

Αυτή η μέτρηση εστιάζει στο ποσοστό της απόστασης της διαδρομής που ολοκληρώνεται από το αυτόνομο όχημα, κατά μέσο όρο για  $N$  διαδρομές.

$$\frac{1}{N} \sum_i^N R_i \quad (4.3)$$

### Ποινή παραβάσεων

Αυτή η μέτρηση συγκεντρώνει τον αριθμό των παραβιάσεων που ενεργοποιούνται από το αυτόνομο όχημα ως γεωμετρική σειρά. Ένα ιδανικό αυτόνομο όχημα θα λάβει την τιμή 1, δείχνοντας τέλεια αυτόνομη οδήγηση στις διαδρομές που εκτελέστηκαν.

$$\frac{1}{N} \sum_i^N \prod_j^{\text{ped., ..., stop}} (p_i^j)^{\text{infractions}_j} \quad (4.4)$$

Οι ποινές για τις παραβιάσεις ορίζονται στον παρακάτω πίνακα 4.1 με φθίνουσα σειρά σοβαρότητας για την παράβαση.

## 4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.

---

Η δοκιμή του αυτόνομου οχήματος και ο υπολογισμός των παραπάνω μετρικών έχει γίνει για διαδρομές των 2km για κάθε πόλη από τις 5 πόλεις που διαθέτει

#### 4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.

Παράβαση	Τιμή παράβασης
Σύγκρουση με πεζό.	0.5
Σύγκρουση με όχημα.	0.6
Σύγκρουση με στατικό εμπόδιο.	0.65
Παραβίαση φωτεινού σηματοδότη.	0.7
Το όχημα έχει κολλήσει σε κάποιο σημείο λόγω αποτυχίας του συστήματος οδήγησης.	0.7
Παραβίαση stop.	0.8
Παραβίαση ορίου ταχύτητας.	0.9
Ποσοστό χρόνου σε σχέση με τον συνολικό χρόνο για τον οποίο το όχημα βρίσκεται εκτός δρόμου.	Ορίζεται ως το αντίστοιχο ποσοστό του χρόνου.

Πίνακας 4.1: Οι τιμές των παραβάσεων για την αξιολόγηση, μικρότερη τιμή σημαίνει και πιο σοβαρή παράβαση

ο Carla προσομοιωτής και για 10 διαδρομές για κάθε πόλη. Το όχημα που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές είναι το Ford Mustang. Η απόσταση των 2km είναι περίπου όσο 2 φορές η περίμετρος που περικλείει τις πόλεις. Επομένως, στις δοκιμές κατασκευάζονται τυχαίες διαδρομές για το όχημα και η απόσταση των δύο 2km είναι αρκετή ώστε το όχημα να εκτελέσει τουλάχιστον μια πλήρη περιφορά στους δρόμους της κάθε πόλης. Συνολικά το όχημα εκτελεί 50 διαδρομές και επομένως συνολικά 100km για διάφορες συνθήκες οδήγησης όπως είναι η οδήγηση σε αστικό περιβάλλον, σε αυτοκινητόδρομο, σε στενούς δρόμους μονής κατεύθυνσης, σε δρόμους πολλαπλών λωρίδων με την δυνατότητα ελιγμών αλλά και σε επαρχιακούς δρόμους. Επίσης, οι πόλεις που χρησιμοποιήθηκαν περιέχουν ποικιλία σεναρίων που δημιουργούνται από τους κανόνες οδικής κυκλοφορίας, δηλαδή παράδειγμα φωτεινούς σηματοδότες, διαβάσεις, σημεία υποχρεωτικής διακοπής πορείας (stop), σήμανση ορίου ταχύτητας, όλα τοποθετημένα σε στρατηγικές θέσεις που δημιουργούν σε κάθε περίπτωση διαφορετικά σενάρια οδήγησης.

Όσον αφορά τα οχήματα και τους πεζούς έχουν εξεταστεί οι περιπτώσεις όπου ο αριθμός των πεζών και των οχημάτων αντίστοιχα είναι 0, 30, 50, 80, 110, δηλαδή έχουμε για παράδειγμα 50 οχήματα και 50 πεζούς. Ο αριθμός των οχημάτων και των πεζών δημιουργεί διαφορετικές συνθήκες κίνησης για κάθε πόλη και επομένως και διαφορετικά σενάρια. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των οχημάτων και των πεζών τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα για απροσδόκητα γεγονότα όπως για παράδειγμα η διάσχιση του δρόμου από πεζούς σε τυχαία σημεία του δρόμου με αποτέλεσμα το αιμάξι να πρέπει να σταματήσει ή να επιβραδύνει για να αποφύγει μια πιθανή σύγκρουση. Ένα επιπλέον παράδειγμα τέτοιων τυχαίων σεναρίων είναι η ύπαρξη πεζών στην διάβαση ενώ ο σηματοδότης έχει μεταβεί από την κατάσταση “κόκκινο” στην κατάσταση “πράσινο”, το όχημα σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει πρώτα να περιμένει να διασχίσουν το δρόμο οι πεζοί και στην συνέχεια να ξεκινήσει.

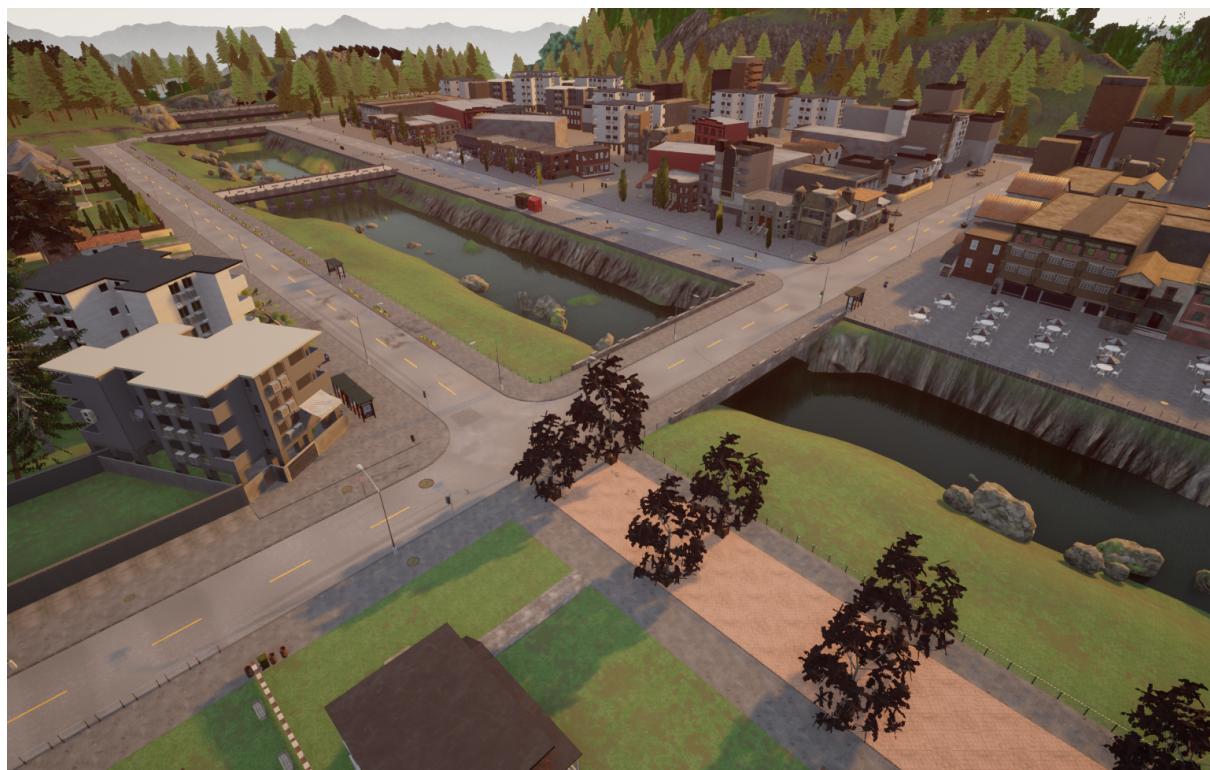
#### 4.3.1 Παρουσίαση των χαρτών των πόλεων

##### Πόλη 1

Μια βασική διάταξη πόλης με όλες τις διασταυρώσεις σε μορφή "διασταυρώσεις T". Θα μπορούσε να αντιστοιχεί στη δομή μιας επαρχιακής πόλης.



Σχήμα 4.1: Χάρτης πόλης 1



Σχήμα 4.2: Παρουσίαση πόλης 1

#### 4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.

##### Πόλη 2

Παρόμοια με την πόλη 1 αλλά μικρότερη.



Σχήμα 4.3: Χάρτης πόλης 2



Σχήμα 4.4: Παρουσίαση πόλης 2

##### Πόλη 3

Η πιο περίπλοκη πόλη, με διασταύρωση 5 λωρίδων, κυκλικό κόμβο, ανομοιογένεια στους δρόμους, σήραγγα και πολλά άλλα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Σχήμα 4.5: Χάρτης πόλης 3

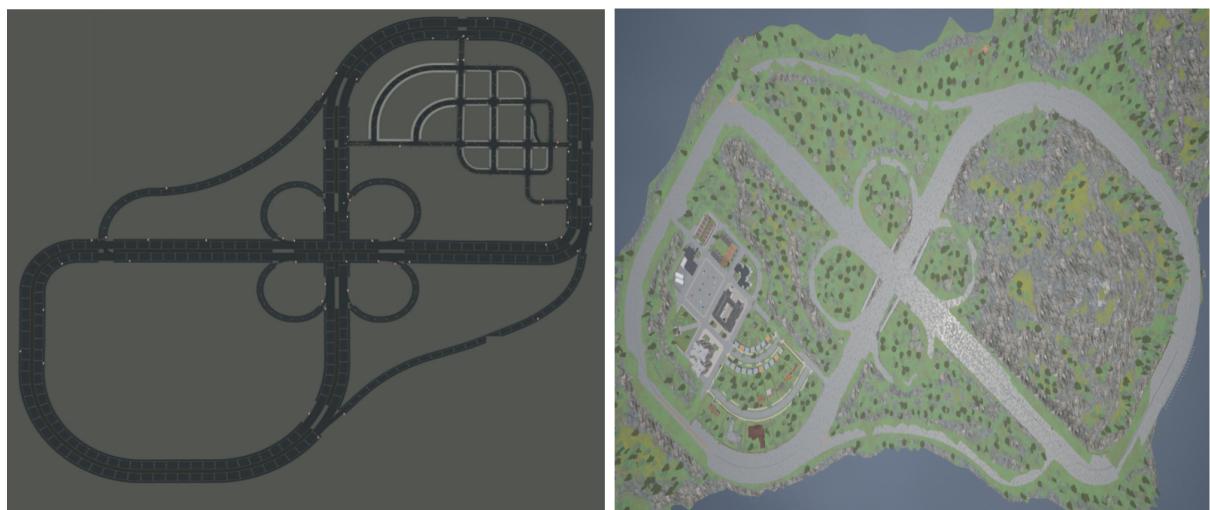


Σχήμα 4.6: Παρουσίαση πόλης 3

### Πόλη 4

Περιέχει ένας άπειρος βρόχος με έναν αυτοκινητόδρομο και μια μικρή πόλη.

#### 4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.



Σχήμα 4.7: Χάρτης πόλης 4



Σχήμα 4.8: Παρουσίαση πόλης 4

#### Πόλη 5

Πόλη με τετράγωνο πλέγμα με διασταυρώσεις και γέφυρα. Περιέχει δρόμους με πολλαπλές λωρίδες ανά κατεύθυνση και είναι ιδανική για την εκτέλεση αλλαγών λωρίδας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Σχήμα 4.9: Χάρτης πόλης 5



Σχήμα 4.10: Παρουσίαση πόλης 5

### 4.3.2 Αποτελέσματα πειραμάτων

Στην συνέχεια πραγματοποιείται πλοιόγγηση του οχήματος μέσα σε κάθε μία από τις πόλεις με χρήση του συστήματος που αναπτύχθηκε. Για κάθε πόλη το όχημα εκτελεί δέκα διαδρομές (δέκα επαναλήψεις) με μεταβλητό αριθμό πεζών και οχημάτων.

### 4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.

**Για 10 διαδρομές για τη κάθε πόλη με κανένα πεζό και κανένα όχημα.**

Πόλη	Βαθμολογία οδήγησης	Ολοκλήρωση διαδρομής	Ποινή παραβάσεων
1	0.999	1.0	0.999
2	0.961	1.0	0.961
3	0.956	1.0	0.956
4	0.989	1.0	0.989
5	0.960	1.0	0.960
<b>Συνολικά</b>	<b>0.971</b>	<b>1.0</b>	<b>0.971</b>

Πίνακας 4.2: Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη

Πόλη	Σύγκρουση με όχημα	Σύγκρουση με πεζό	Σύγκρουση με στατικό εμπόδιο	Παραβίαση stop	Παραβίαση φωτεινού σηματοδότη	Παραβίαση ορίου ταχύτητας	Το όχημα “κόλλησε”	Ποσοστό χρόνου εντός δρόμου
1	0	0	0	0	0	1	0	1
2	0	0	0	0	0	4	0	1
3	0	0	0	2	0	0	0	0.996
4	0	0	0	0	0	1	0	0.999
5	0	0	0	2	0	0	0	1
<b>Συνολικά</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>0.998</b>

Πίνακας 4.3: Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη

**Για 10 διαδρομές για τη κάθε πόλη με 30 πεζούς και 30 οχήματα.**

Πόλη	Βαθμολογία οδήγησης	Ολοκλήρωση διαδρομής	Ποινή παραβάσεων
1	0.982	0.978	0.989
2	0.941	1.0	0.941
3	0.985	1.0	0.985
4	0.923	1.0	0.923
5	0.952	1.0	0.952
<b>Συνολικά</b>	<b>0.967</b>	<b>0.995</b>	<b>0.967</b>

Πίνακας 4.4: Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Πόλη	Σύγκρουση με όχημα	Σύγκρουση με πεζό	Σύγκρουση με στατικό εμπόδιο	Παραβίαση stop	Παραβίαση φωτεινού σηματοδότη	Παραβίαση ορίου ταχύτητας	Το όχημα “κόλλησε”	Ποσοστό χρόνου εντός δρόμου
1	0	0	1	0	0	1	0	0.926
2	0	0	0	0	0	6	0	1
3	0	0	0	0	0	1	0	0.994
4	0	0	0	0	0	8	0	0.999
5	0	0	0	0	0	5	0	1
Συνολικά	0	0	1	0	0	20	0	0.965

Πίνακας 4.5: Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη

Για 10 διαδρομές για τη κάθε πόλη με 50 πεζούς και 50 οχήματα.

Πόλη	Βαθμολογία οδήγησης	Ολοκλήρωση διαδρομής	Ποινή παραβάσεων
1	0.970	1.0	0.970
2	0.920	1.0	0.920
3	0.962	1.0	0.962
4	0.972	1.0	0.972
5	0.989	1.0	0.989
Συνολικά	0.979	1.0	0.979

Πίνακας 4.6: Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη

Πόλη	Σύγκρουση με όχημα	Σύγκρουση με πεζό	Σύγκρουση με στατικό εμπόδιο	Παραβίαση stop	Παραβίαση φωτεινού σηματοδότη	Παραβίαση ορίου ταχύτητας	Το όχημα “κόλλησε”	Ποσοστό χρόνου εντός δρόμου
1	0	0	0	0	0	3	0	1
2	0	1	0	0	0	3	0	1
3	0	0	0	1	0	2	0	1
4	0	0	0	0	0	3	0	1
5	0	0	0	0	0	1	0	0.998
Συνολικά	0	1	0	1	0	12	0	0.999

Πίνακας 4.7: Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη

### 4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.

**Για 10 διαδρομές για τη κάθε πόλη με 80 πεζούς και 80 οχήματα.**

Πόλη	Βαθμολογία οδήγησης	Ολοκλήρωση διαδρομής	Ποινή παραβάσεων
1	0.960	1.0	0.960
2	0.851	0.984	0.851
3	0.968	1.0	0.968
4	0.862	1.0	0.862
5	0.743	1.0	0.743
Συνολικά	0.886	0.996	0.886

Πίνακας 4.8: Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη

Πόλη	Σύγκρουση με όχημα	Σύγκρουση με πεζό	Σύγκρουση με στατικό εμπόδιο	Παραβίαση stop	Παραβίαση φωτεινού σηματοδότη	Παραβίαση ορίου ταχύτητας	Το όχημα “κόλλησε”	Ποσοστό χρόνου εντός δρόμου
1	0	0	0	0	0	4	0	1
2	11	0	20	0	0	5	1	1
3	0	0	0	1	0	2	0	0.987
4	0	1	0	1	0	5	0	0.969
5	9	0	0	0	0	8	0	0.998
Συνολικά	20	1	20	1	0	24	1	0.991

Πίνακας 4.9: Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη

**Για 10 διαδρομές για τη κάθε πόλη με 110 πεζούς και 110 οχήματα.**

Πόλη	Βαθμολογία οδήγησης	Ολοκλήρωση διαδρομής	Ποινή παραβάσεων
1	0.970	1.0	0.970
2	0.882	1.0	0.882
3	0.741	0.934	0.741
4	0.895	1.0	0.895
5	0.894	1.0	0.894
Συνολικά	0.876	0.987	0.876

Πίνακας 4.10: Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη

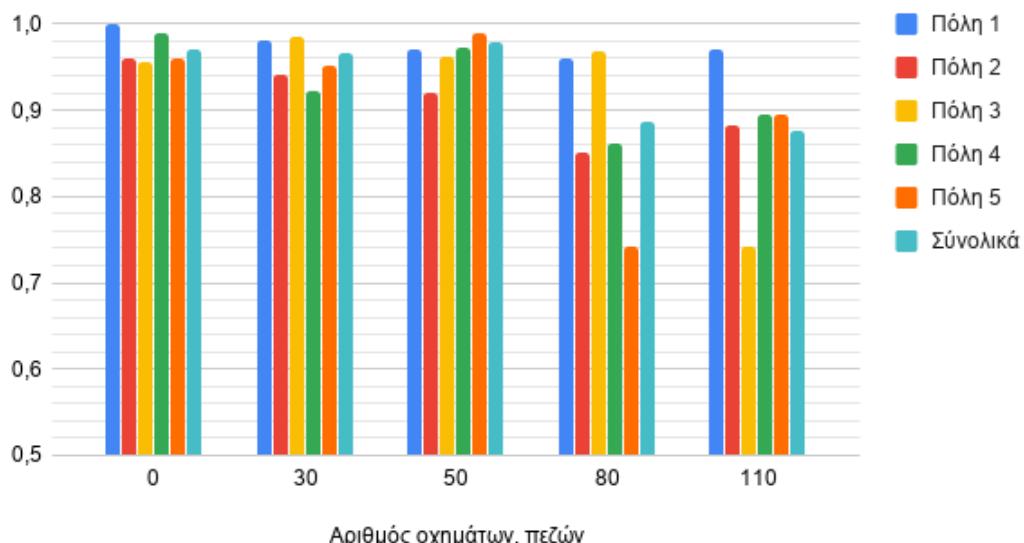
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Πόλη	Σύγκρουση με όχημα	Σύγκρουση με πεζό	Σύγκρουση με στατικό εμπόδιο	Παραβίαση stop	Παραβίαση φωτεινού σηματοδότη	Παραβίαση ορίου ταχύτητας	Το όχημα “κόλλησε”	Ποσοστό χρόνου εντός δρόμου
1	0	0	0	0	0	3	0	1
2	5	0	2	0	0	3	0	1
3	13	0	0	0	0	2	0	0.899
4	1	0	0	0	0	4	0	0.974
5	1	0	0	1	0	6	0	1
Συνολικά	20	0	2	1	0	18	0	0.974

Πίνακας 4.11: Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη

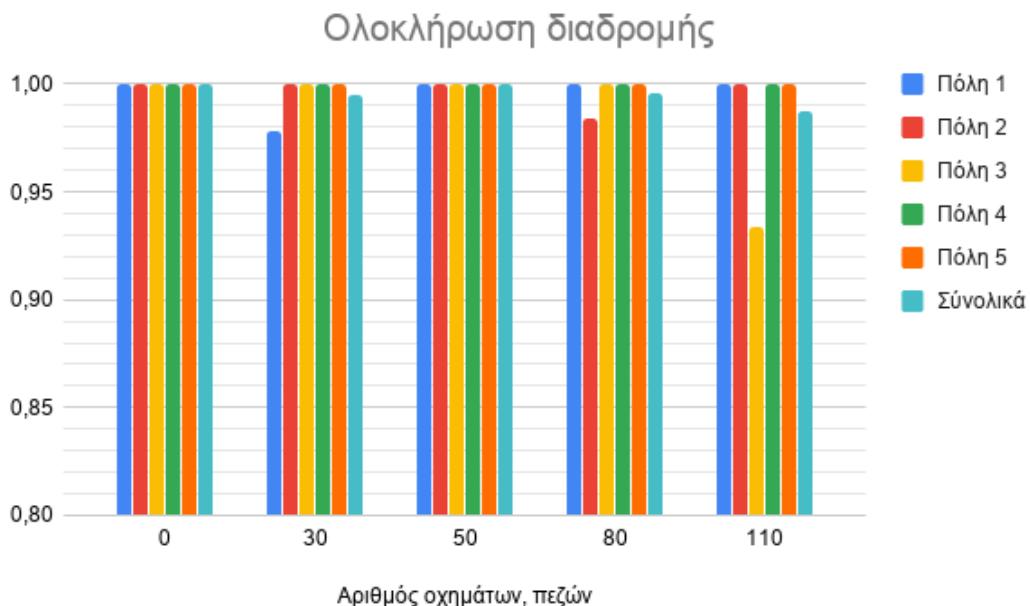
Τα αποτελέσματα από κάθε πόλη και για κάθε περίπτωση αριθμού οχημάτων και πεζών παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα 4.11, 4.12, 4.13 συγκεντρωτικά σε μορφή ραβδογραμμάτων (barcharts).

Βαθμολογία οδήγησης



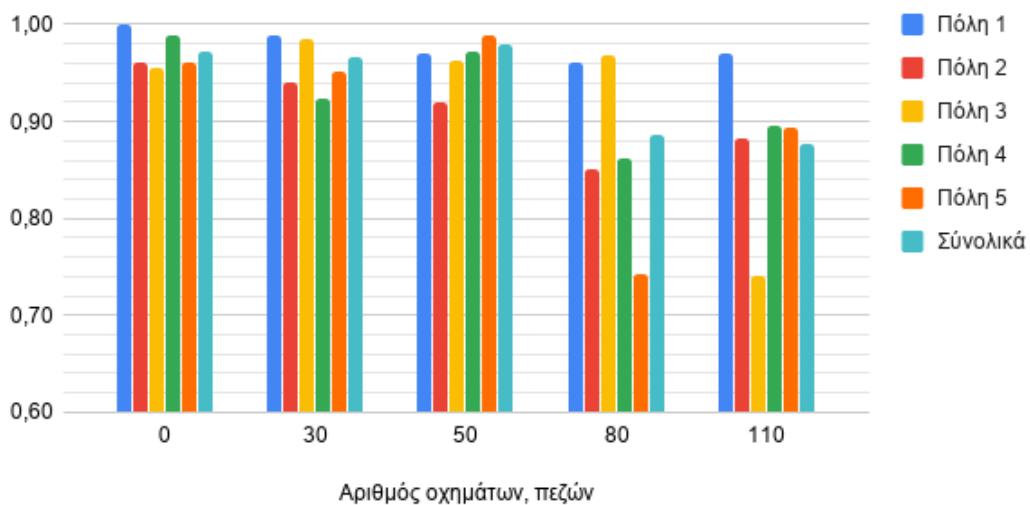
Σχήμα 4.11: Ραβδογράμμα για την μετρική "Βαθμολογία Οδήγησης"

#### 4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.



Σχήμα 4.12: Ραβδόγραμμα για την μετρική "Ολοκλήρωση Διαδρομής"

**Ποινή παραβάσεων (μικρότερη τιμή περισσότερες παραβάσεις)**



Σχήμα 4.13: Ραβδόγραμμα για την μετρική "Ποινή Παραβάσεων". Όσο μεγαλύτερη η τιμή τόσο λιγότερες παραβάσεις.

#### Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Μετά την εκτέλεση 10 διαδρομών απόστασης 2 Km για κάθε πόλη και την καταγραφή των σφαλμάτων για κάθε διαδρομή και του ποσοστού ολοκλήρωσης της διαδρομής, στην συνέχεια, υπολογίζονται οι μετρικές αξιολόγησης της αυτόνο-

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

μης οδήγησης του οχήματος και καταγράφονται στους παραπάνω πίνακες. Αρχικά, παρατηρείται ότι το ποσοστό ολοκλήρωσης των διαδρομών για κάθε πόλη είναι σχεδόν ίσο με τη μονάδα, αυτό αποδεικνύει την ικανότητα του οχήματος να μπορεί να ολοκληρώνει μια διαδρομή χωρίς να κολλήσει σε κάποιο σημείο ή να προκληθεί κάποιο σφάλμα τόσο σοβαρό που να διακόψει εντελώς την πορεία του οχήματος.

Για όλες σχεδόν τις πόλεις η μετρική αξιολόγησης “Ολοκλήρωση διαδρομής” είναι ίση με την μονάδα και η μικρότερη τιμή εμφανίζεται για την πόλη 3 στην περίπτωση των 110 οχημάτων και πεζών και είναι ίση με 0.934. Μια ακόμη σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι μετρικές “Βαθμολογία οδήγησης” και “Ποινή παραβάσεων” είναι ίσες για όλες τις περιπτώσεις, αυτό συμβαίνει λόγω του ότι όλες σχεδόν οι διαδρομές ολοκληρώθηκαν με επιτυχία και επομένως ο συντελεστής  $R_i$  που αντιστοιχεί στο ποσοστό ολοκλήρωσης της διαδρομής είναι μονάδα και έτσι σε αυτή την περίπτωση οι μετρικές “Βαθμολογία οδήγησης” και “Ποινή παραβάσεων” γίνονται ίσες. Επομένως, η απόδοση του οχήματος εξαρτάται μόνο από τις παραβάσεις που μπορεί να διαπράξει αφού η ολοκλήρωση μιας διαδρομής είναι σχεδόν σίγουρη.

Η πιο σημαντική μετρική της αξιολόγησης είναι η μετρική “Βαθμολογία οδήγησης”, με τιμή ίση με 1 περιγράφει ένα πλήρως αυτόνομο όχημα. Παρατηρείτε ότι για τις 3 πρώτες περιπτώσεις, δηλαδή για αριθμό οχημάτων και πεζών 0, 30, 50, ότι για όλες τις πόλεις η τιμή της μετρικής “Βαθμολογία οδήγησης” είναι σχεδόν ιδανική με κατά μέσο όρο τιμή ίση με 0.97. Παρατηρώντας τις παραβάσεις που έγιναν στην πλειοψηφία τους αποτελούν παραβάσεις του ορίου ταχύτητα και κάποιες παραβάσεις υποχρεωτικής διακοπής πορείας (stop). Στις τελευταίες δύο περιπτώσεις για 80, 110 αριθμό οχημάτων και πεζών οι τιμές της μετρικής πέφτουν και έχουν τιμή κατά μέσο όρο ίση με 0.87. Η παραπάνω μείωση οφείλεται στην αύξηση των συγκρούσεων του οχήματος με οχήματα και πεζούς δύο παρατηρείται από τον πίνακα παραβάσεων. Με την αύξηση του αριθμού των οχημάτων και των πεζών αυξάνεται η πολυπλοκότητα και ο αριθμός των σεναρίων που καλείται να διαχειριστεί το όχημα. Ειδικά για τις πιό μικρές πόλεις ο συγκεκριμένος αριθμός οχημάτων και πεζών δημιουργεί τεράστια συμφόρηση.

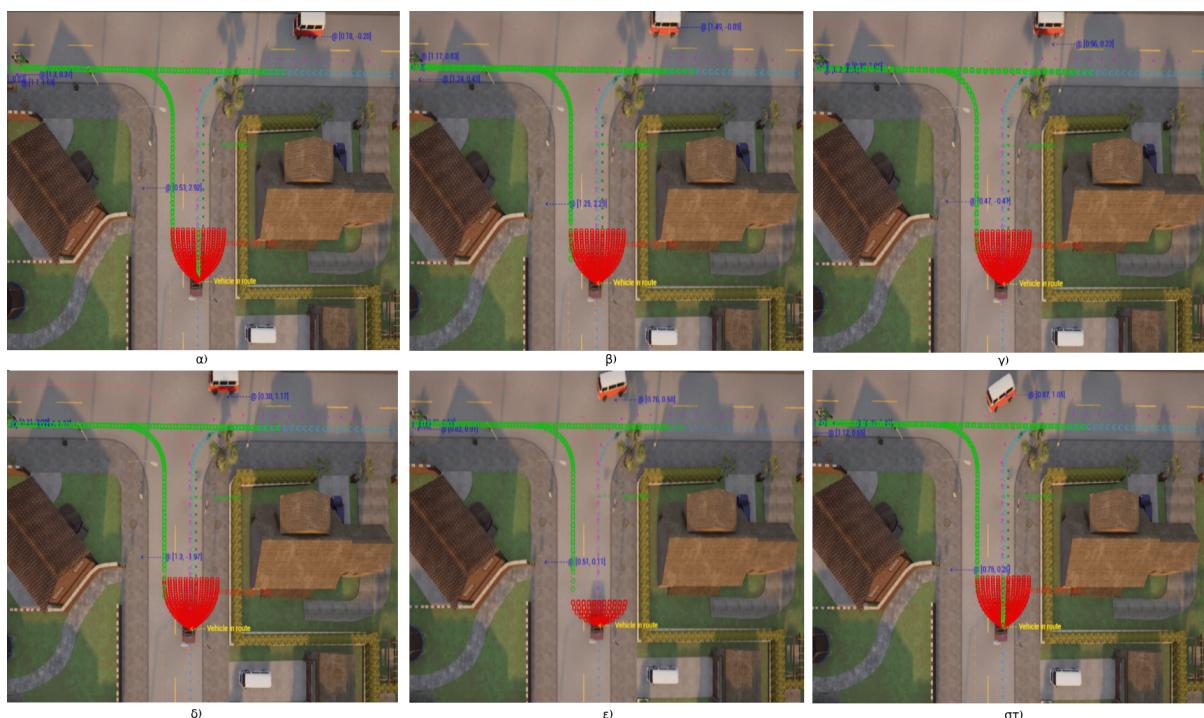
Οι συγκρούσεις που καταγράφονται δεν αποδεικνύουν ότι το όχημα οφείλεται για την σύγκρουση, έτσι η σύγκρουση μπορεί να οφείλεται σε λάθος κάποιου άλλου οχήματος που λόγω της συμφόρησης έπεσε πάνω στο αυτόνομο όχημα ακόμα και αν αυτό ήταν σταματημένο. Επίσης, η σύγκρουση με τους πεζούς μπορεί να οφείλεται σε εντελώς αντικανονική κίνηση του πεζού που θα μπορούσε να προκαλέσει ατύχημα ακόμα και με οδηγό στο όχημα. Σε κάθε περίπτωση η απόδοση του οχήματος είναι αρκετά ικανοποιητική και έχει δοκιμαστεί σε διάφορα είδη περιβαλλόντων οδήγησης και για διάφορα σενάρια οδήγησης.

### 4.3.3 Πειράματα με θόρυβο στην ταχύτητα και στην θέση των οχημάτων και των πεζών

Στην συνέχεια για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του συστήματος αυτόνομης οδήγησης εισάγεται γκαουσιανός θόρυβος στις μετρήσεις της θέσης και της ταχύτητας των οχημάτων και των πεζών. Ο θόρυβος που χρησιμοποιήθηκε για την θέση έχει μέση τιμή ίση με μηδέν  $m = 0m$  και τυπική απόκλιση ίση με  $s = 1m$  ενώ για την ταχύτητα ο θόρυβος έχει μέση τιμή ίση με μηδέν  $m = 0km/h$  και τυ-

### 4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.

πική απόκλιση ίση με  $s = 3 \text{ km/h}$ . Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν δημιουργούν ένα αρκετά θορυβώδη σύστημα καθώς η απόκλιση από τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών μπορεί να είναι μέχρι και  $3 * s$ , δηλαδή μέχρι και 3π για την θέση των οχημάτων και μέχρι  $9 \text{ Km/h}$  για την ταχύτητα τους. Δεδομένου ότι το πλάτος μιας λωρίδας κίνησης είναι σχεδόν  $3.5 \text{ m}$  το σφάλμα θέσης ενός οχήματος λόγω του θορύβου είναι ικανό να μεταφέρει το όχημα σε διπλανές λωρίδες κίνησης. Οι αποκλίσεις είναι στιγμιαίες και υπολογίζονται σε κάθε κύκλο υπολογισμών του συστήματος αντίληψης. Επομένως, τα οχήματα φαίνεται σαν να μεταφέρονται από σημείο σε σημείο και οι ταχύτητες τους να αλλάζουν στιγμιαία τιμές. Στην παρακάτω σειρά εικόνων 4.14 παρουσιάζονται με τα μπλε βέλη οι θέσεις των οχημάτων και των πεζών. Εντός των παρενθέσεων ο πρώτος αριθμός αντιστοιχεί στην απόλυτη διαφορά της θέσης του οχήματος από την πραγματική του θέση και ο δεύτερος αριθμός στην διαφορά από την πραγματική του ταχύτητα. Για παράδειγμα για το όχημα στην γ) εικόνα βλέπουμε απόκλιση από την πραγματική του θέση περίπου ίση με 1 m μεταφέροντας εικονικά το όχημα σχεδόν στην αντίθετη λωρίδα κίνησης.



Σχήμα 4.14: Σειρά εικόνων από τις θέσεις και τις ταχύτητες οχημάτων και πεζών με εισαγωγή θορύβου στο σύστημα.

Στην συνέχεια επανεξετάζονται οι μετρικές της αυτόνομης οδήγησης για το σύστημα με θόρυβο για τις περιπτώσεις των 50, 80 και 110 οχημάτων και πεζών που αποτελούν τις πιο απαιτητικές περιπτώσεις οδήγησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

Για 10 διαδρομές για τη κάθε πόλη με 50 πεζούς και 50 οχήματα.

Πόλη	Βαθμολογία οδήγησης	Ολοκλήρωση διαδρομής	Ποινή παραβάσεων
1	0.906	1.0	0.906
2	0.868	0.984	0.871
3	0.819	0.980	0.833
4	0.861	1.0	0.861
5	0.722	0.97	0.741
Συνολικά	0.835	0.986	0.842

Πίνακας 4.12: Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη

Πόλη	Σύγκρουση με όχημα	Σύγκρουση με πεζό	Σύγκρουση με στατικό εμπόδιο	Παραβίαση stop	Παραβίαση φωτεινού σηματοδότη	Παραβίαση ορίου ταχύτητας	Το όχημα “κόλλησε”	Ποσοστό χρόνου εντός δρόμου
1	0	0	0	0	0	10	0	1
2	0	0	3	0	0	5	1	1
3	0	1	0	0	0	10	1	1
4	0	0	0	0	0	15	0	1
5	2	0	0	3	0	15	1	0.999
Συνολικά	2	1	3	3	0	55	3	0.999

Πίνακας 4.13: Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη

### 4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.

Για 10 διαδρομές για τη κάθε πόλη με 80 πεζούς και 80 οχήματα.

Πόλη	Βαθμολογία οδήγησης	Ολοκλήρωση διαδρομής	Ποινή παραβάσεων
1	0.884	1.0	0.884
2	0.854	1.0	0.854
3	0.838	0.958	0.862
4	0.805	0.982	0.811
5	0.804	1.0	0.804
Συνολικά	0.832	0.988	0.841

Πίνακας 4.14: Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη

Πόλη	Σύγκρουση με όχημα	Σύγκρουση με πεζό	Σύγκρουση με στατικό εμπόδιο	Παραβίαση stop	Παραβίαση φωτεινού σηματοδότη	Παραβίαση ορίου ταχύτητας	Το όχημα “κόλλησε”	Ποσοστό χρόνου εντός δρόμου
1	0	0	0	0	0	12	0	1
2	7	0	0	0	0	1	0	1
3	0	0	0	0	0	11	1	0.99
4	2	0	1	0	0	7	1	1
5	7	0	0	0	0	8	0	1
Συνολικά	16	0	1	0	0	39	2	0.99

Πίνακας 4.15: Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για 10 διαδρομές για τη κάθε πόλη με 110 πεζούς και 110 οχήματα.

Πόλη	Βαθμολογία οδήγησης	Ολοκλήρωση διαδρομής	Ποινή παραβάσεων
1	0.856	0.99	0.859
2	0.847	1.0	0.847
3	0.862	0.97	0.872
4	0.772	1.0	0.772
5	0.729	1.0	0.729
Συνολικά	0.813	0.991	0.816

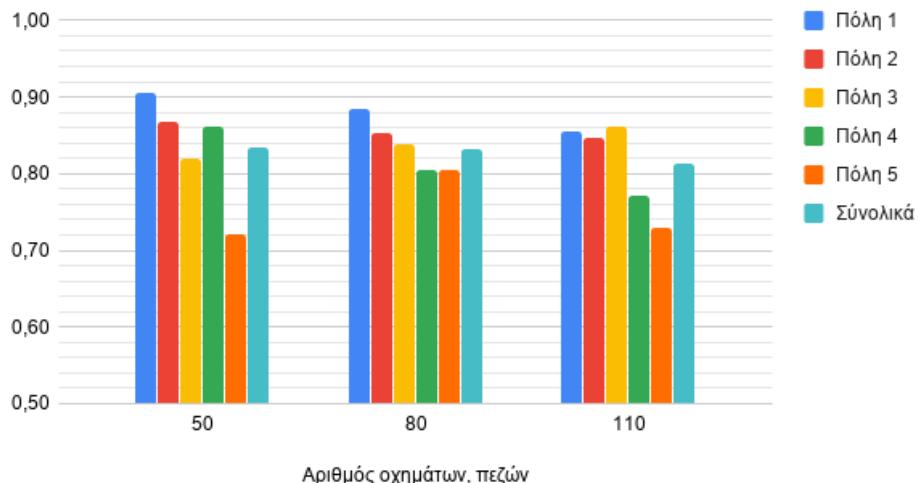
Πίνακας 4.16: Μετρικές αξιολόγησης αυτονομίας οδήγησης για κάθε πόλη

Πόλη	Σύγκρουση με όχημα	Σύγκρουση με πεζό	Σύγκρουση με στατικό εμπόδιο	Παραβίαση stop	Παραβίαση φωτεινού σηματοδότη	Παραβίαση ορίου ταχύτητας	Το όχημα “κόλλησε”	Ποσοστό χρόνου εντός δρόμου
1	1	0	1	0	0	7	1	1
2	2	0	0	0	0	9	0	1
3	0	0	1	1	0	6	1	0.988
4	9	0	0	0	0	14	0	0.998
5	5	0	0	1	0	13	0	1
Συνολικά	17	0	2	2	0	49	2	0.997

Πίνακας 4.17: Συνολικές παραβάσεις για κάθε πόλη

Τα αποτελέσματα από κάθε πόλη και για κάθε περίπτωση αριθμού οχημάτων και πεζών που εξετάστηκε παρουσιάζονται στα διαγράμματα 4.15, 4.16, 4.17 συγκεντρωτικά σε μορφή ραβδογραμμάτων (barcharts).

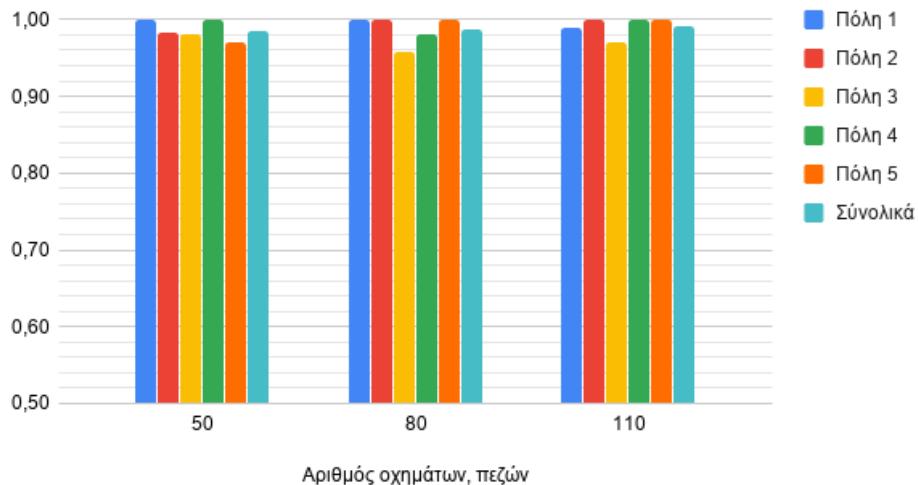
Βαθμολογία οδήγησης (περίπτωση με θόρυβο)



Σχήμα 4.15: Ραβδογράμμα για την μετρική "Βαθμολογία Οδήγησης"

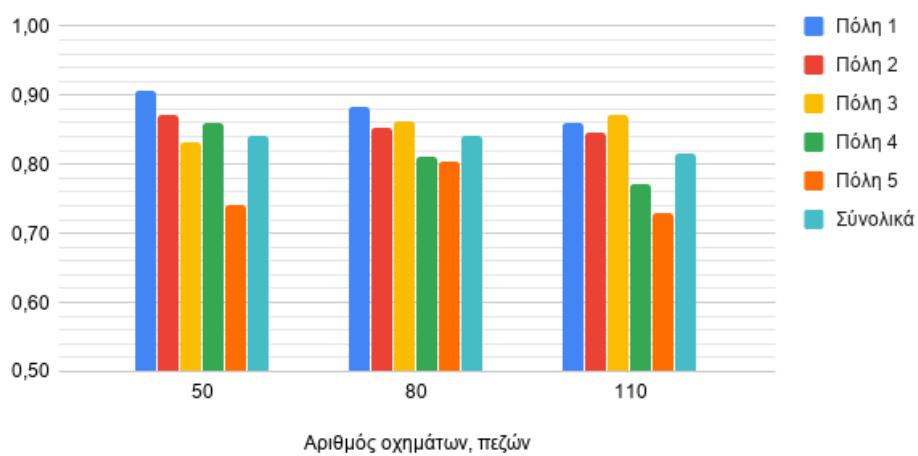
### 4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.

Ολοκλήρωση διαδρομής (περίπτωση με θόρυβο)



Σχήμα 4.16: Ραβδόγραμμα για την μετρική "Ολοκλήρωση Διαδρομής"

Ποινή παραβάσεων (μικρότερη τιμή περισσότερες παραβάσεις) (περίπτωση με θόρυβο)



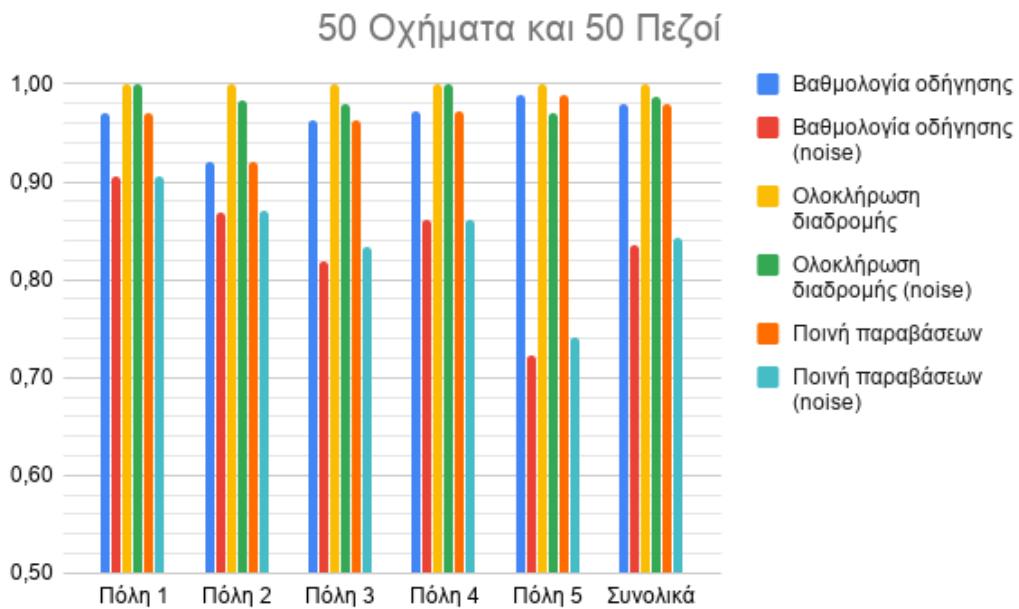
Σχήμα 4.17: Ραβδόγραμμα για την μετρική "Ποινή Παραβάσεων". Όσο μεγαλύτερη η τιμή τόσο λιγότερες παραβάσεις.

#### 4.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων των πειραμάτων με και χωρίς θόρυβο

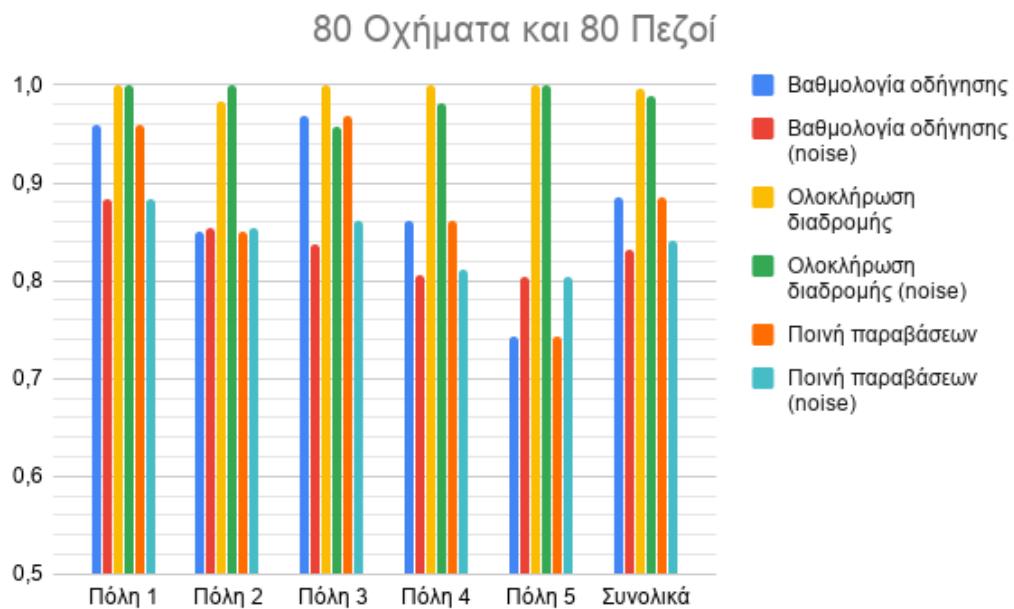
Στα παρακάτω διαγράμματα 4.18, 4.19, 4.20 παρουσιάζονται οι μετρικές για τις περιπτώσεις με και χωρίς θόρυβο, με σκοπό την σύγκριση τους. Στα διαγράμματα έχουν συμπεριληφθεί οι περιπτώσεις για 50, 80 και 110 οχήματα και πεζούς αντίστοιχα, οι οποίες αποτελούν τις πιο απαιτητικές περιπτώσεις.

Η απόδοση του συστήματος, ακόμα και στην περίπτωση που περιέχεται τόσο υψηλός θόρυβος στις μετρήσεις της θέσης και της ταχύτητας των οχημάτων και των

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



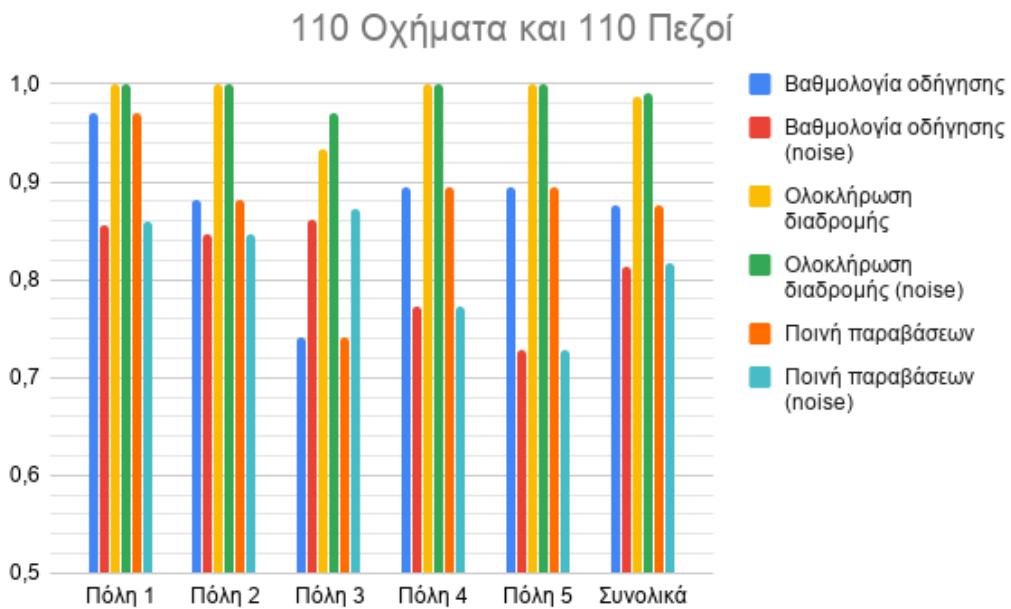
Σχήμα 4.18: Ραβδόγραμμα για την περίπτωση 50 οχημάτων, πεζών με και χωρίς θόρυβο



Σχήμα 4.19: Ραβδόγραμμα για την περίπτωση 80 οχημάτων, πεζών με και χωρίς θόρυβο

πεζών παραμένει αρκετά υψηλή. Οι περισσότερες παραβάσεις που γίνονται σχετίζονται με το όριο ταχύτητας, αυτό είναι πιθανό να συμβαίνει λόγω της προσπάθειας του οχήματος να προσαρμοστεί στις απότομες μεταβολές της ταχύτητας των γειτονικών οχημάτων, με αποτέλεσμα να ξεπερνάει το όριο ταχύτητας του δρόμου.

#### 4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.



Σχήμα 4.20: Ραβδόγραμμα για την περίπτωση 110 οχημάτων, πεζών με και χωρίς θόρυβο

Οι συγκρούσεις του οχήματος δεν έχουν αυξηθεί και παραμένουν σχεδόν ίδιες σε αριθμό με αυτές του συστήματος χωρίς θόρυβο, αυτό αποδεικνύει την ικανότητα του οχήματος να αποφεύγει τις συγκρούσεις με τα εμπόδια του χώρου. Ελάχιστα έχουν αυξηθεί οι περιπτώσεις που το όχημα έχει "κολλήσει" σε κάποιο σημείο, κάτιο το οποίο μπορεί να είναι λογικό καθώς λόγω του θορύβου τα οχήματα εμφανίζονται σε λάθος θέσεις με αποτέλεσμα το όχημα να σταματήσει και να κολλήσει σε κάποιο σημείο, παρόλα αυτά, ο αριθμός αυτών των περιπτώσεων είναι αρκετά μικρός. Το ποσοστό ολοκλήρωσης των διαδρομών είναι και σε αυτή την περίπτωση παρόμοιο με αυτό του συστήματος χωρίς θόρυβο. Αυτό υποδηλώνει ότι το σύστημα αυτόνομης οδήγησης παρόλο τον θόρυβο είναι ικανό να ολοκληρώσει την διαδρομή.

Οι μετρικές αξιολόγησης για το σύστημα με θόρυβο έχουν κατά μέσο όρο τιμή ίση με 0.82 για την μετρική "Βαθμολογία οδήγησης", 0.99 για την μετρική "Ολοκλήρωση διαδρομής" και 0.83 για την μετρική "Ποινή παραβάσεων", σε σύγκριση με τις μετρικές του συστήματος χωρίς θόρυβο με τιμές κατά μέσο όρο 0.92, 0.99, 0.92 για τις αντίστοιχες μετρικές παρατηρείται μια μικρή πτώση στην απόδοση του συστήματος όσον αφορά τις μετρικές "Βαθμολογία οδήγησης" και "Ποινή παραβάσεων" ενώ η μετρική "Ολοκλήρωση διαδρομής" παραμένει ίδια και σχεδόν τέλεια ίση με 0.99. Η πτώση της απόδοσης του οχήματος οφείλεται κατά κυρίως στις παραβιάσεις του ορίου ταχύτητας ενώ όσον αφορά τα σφάλματα που σχετίζονται με την ασφάλεια του οχήματος όπως είναι οι συγκρούσεις δεν αυξάνονται.

Η απόδοση του συστήματος θα μπορούσε να βελτιωθεί τροποποιώντας κατάλληλα το σύστημα ελέγχου ταχύτητας του οχήματος ή κάνοντας τις απαραίτητες αλλαγές στο σύστημα συμπεριφορών ώστε το σύστημα να διαχειρίζεται με πιο κατάλληλο τρόπο τις απότομες μεταβολές της κίνησης των γειτονικών οχημάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

Συμπερασματικά, το σύστημα οδήγησης του αυτόνομου οχήματος που κατασκευάστηκε στην παρούσα διπλωματική λειτουργεί με μεγάλη απόδοση ακόμα και στην περίπτωση που οι μετρήσεις του περιβάλλοντος λειτουργίας του οχήματος είναι αρκετά θορυβώδη. Μπορεί η σιγουριά για την θέση και την ταχύτητα των γειτονικών οχημάτων και των πεζών να είναι αρκετά μειωμένη και οι μετρήσεις που γίνονται από το σύστημα αντίληψης να απέχουν αρκετά από τις πραγματικές τιμές, όμως, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση το σύστημα είναι εξίσου αποτελεσματικό στην αυτόνομη οδήγηση του οχήματος.





# 5

## Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά η υλοποίηση του συστήματος αυτόνομης οδήγησης που αναπτύχθηκε και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έκβαση των πειραμάτων. Για την αξιολόγηση του συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν μετρικές που δείχνουν την ικανότητα το οχήματος να πλοηγείται χωρίς να παραβιάζει τους κανόνες κυκλοφορίας και χωρίς να δημιουργεί ατυχήματα με τα υπόλοιπα οχήματα και πεζούς. Συγκεκριμένα, οι μετρικές που χρησιμοποιήθηκαν σχετίζονται με την καταμέτρηση των συγκρούσεων του οχήματος με άλλα οχήματα, πεζούς, στατικά εμπόδια. Επίσης, οι μετρικές αναφέρονται στην καταμέτρηση των περιπτώσεων που το όχημα παραβιάζει stop, φωτεινό σηματοδότη και το όριο ταχύτητας. Τέλος, έγινε καταμέτρηση των περιπτώσεων που το όχημα μπλοκάρει σε κάποιο σημείο και ακινητοποιείται, και καταμέτρηση του ποσοστού χρόνου που το όχημα βρίσκεται εντός του δρόμου. Με χρήση των μετρικών αυτών προέκυψαν τα συμπεράσματα για την απόδοση του συστήματος αυτόνομης οδήγησης που αναπτύχθηκε. Στην συνέχεια αναφέρονται τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την διάρκεια των υλοποιήσεων και των πειραμάτων.

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, υλοποιήθηκε ένα σύστημα αυτόνομης οδήγησης οχήματος για οδήγηση σε οδικό δίκτυο διαφόρων περιβαλλόντων, όπως για παράδειγμα είναι η οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο, σε αστικό περιβάλλον, σε περιβάλλον με μικρή αλλά και με μεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση. Το σύστημα αναπτύχθηκε σε μορφή μεμονωμένου συστήματος, δηλαδή οι αλγόριθμοι και ο απαραίτητος εξοπλισμός μεταφέρονται μόνο από το αυτόνομο όχημα και δεν υπάρχουν συστήματα εξωτερικά του οχήματος που να υποβοηθούν την διαδικασία. Επίσης, το σύστημα έχει αρθρωτή μορφή, αυτό σημαίνει ότι αποτελείται από υποσυστήματα αποκλειστικού σκοπού, τα οποία είναι κατασκευασμένα για

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

να εκτελέσουν συγκεκριμένες διαδικασίες, και με τον συνδυασμό όλων να επιτευχθεί η αυτόνομη οδήγηση. Ο σκοπός ήταν η ανάπτυξη ενός συστήματος επιπέδου 5 (βλ. [κεφάλαιο 1](#)), η υλοποίηση των υποσύστημάτων παρουσιάζεται αναλυτικά στο [κεφάλαιο 3](#).

Με βάσει τα αποτελέσματα των πειραμάτων (βλ. [κεφάλαιο 4](#)) που αφορούν την ικανότητα του οχήματος να οδηγείται αυτόνομα παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Το όχημα πλοιηγείται με την μεγαλύτερη επιτυχία σε περιβάλλοντα που η ελευθερία κίνησης είναι σχετικά μικρή, όπως για παράδειγμα μικρές πόλης με ένα ή το πολύ δύο λωρίδες κίνησης. Η παραπάνω παρατήρηση είναι λογική, διότι σε ένα τέτοιο περιβάλλον η κίνηση των οχημάτων είναι αρκετά πιο ελεγχόμενη, τα σενάρια κίνησης δεν είναι πολύπλοκα και το όχημα το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης του περιορίζεται στο να ακολουθεί απλά το μπροστινό όχημα και να σταματάει όταν το ορίζουν οι κανόνες κυκλοφορίας.
- Επίσης, σε περιβάλλον χωρίς δυναμικά εμπόδια παρατηρήθηκε ότι το όχημα λειτουργεί σχεδόν αυτόνομα. Το όχημα, στην περίπτωση που δεν υπάρχουν εμπόδια στην διαδρομή του, είναι ικανό να ακολουθήσει τους κανόνες οδικής κυκλοφορίας σχεδόν με απόλυτη επιτυχία και να φτάσει στον προορισμό του.
- Το πιο σημαντικό υποσύστημα του συστήματος που αναπτύχθηκε φαίνεται να είναι το υποσύστημα για την αξιολόγηση και την επιλογή της βέλτιστης συμπεριφοράς του αυτόνομου οχήματος. Η επιλογή μη κατάλληλης συμπεριφοράς μπορεί να οδηγήσει το όχημα σε σύγκρουση ή σε κατάσταση μπλοκαρίσματος.
- Τα περισσότερα σφάλματα κατά την πλοιήγηση του οχήματος ήταν οι συγκρούσεις με άλλα οχήματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα σφάλματα δεν προκύπτουν μόνο υπό την ευθύνη του αυτόνομου οχήματος, πολλές φορές και τα υπόλοιπα οχήματα προκαλούν συγκρούσεις τις οποίες το αυτόνομο όχημα δεν είναι δυνατόν να αποφύγει. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι ο αυτόνομος πιλότος του προσομοιωτή Carla που χρησιμοποιούν τα οχήματα για την κίνηση τους δεν είναι ιδανικός, δεν περιέχει κανένα σύστημα τεχνητής νοημοσύνης που θα μπορούσε να βοηθήσει στην αποφυγή τέτοιων προβλημάτων.

Οι μέθοδοι του συστήματος αυτόνομης οδήγησης που αναπτύχθηκαν φαίνεται να είναι αρκετά αποτελεσματικοί. Το σύστημα με τις απαραίτητες τροποποιήσεις και βελτιώσεις θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ένα πραγματικό όχημα. Οι τροποποιήσεις που θα έπρεπε να γίνουν αφορούν αρχικά το σύστημα αντίληψης. Το όχημα θα πρέπει να εξοπλιστεί με τους κατάλληλους αισθητήρες και αντλεί τις απαραίτητες πληροφορίες από αυτούς. Το σύστημα που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί την προγραμματιστική διεπαφή του Carla για να λάβει τις απαραίτητες πληροφορίες, παρόλα αυτά, μεριμνήθηκε κατά την ανάπτυξη του συστήματος οι πληροφορίες που λαμβάνονται από το Carla να είναι ρεαλιστικές, να αντιστοιχούν σε πληροφορίες που μπορούν όντως να ληφθούν από ένα πραγματικό μοντέλο αυτόνομου οχήματος.

Η δεύτερη αλλαγή αφορά την κατάλληλη ρύθμιση των βαρών των κανόνων στην διαδικασία επιλογής συμπεριφοράς. Το σύστημα έχει ρυθμιστεί κατάλληλα για το περιβάλλον του προσομοιωτή, επομένως για την χρήση του στο πραγματικό

κόσμο τα βάρη θα έπρεπε να αλλάξουν και να προσαρμοστούν στις αντίστοιχες απαιτήσεις.

Τέλος, θα έπρεπε να γίνουν και οι κατάλληλες προσαρμογές και στα υπόλοιπα συστήματα ώστε να έρχονται σε συμφωνία με τις απαιτήσεις του μοντέλου του οχήματος. Η διαφορά είναι ότι οι αλλαγές αυτές δεν σχετίζονται με την αυτόνομη οδήγηση αλλά είναι οι λογικές προσαρμογές που θα πρέπει να γίνουν λόγω της αλλαγής του οχήματος. Για παράδειγμα, το σύστημα ελέγχου του οχήματος θα έπρεπε να αλλάξει ώστε ο έλεγχος του οχήματος να προσαρμοστεί στην δυναμική συμπεριφορά του εν λόγω οχήματος.

## 5.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Ένα από τα αρχικά προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, ήταν η δυσκολία στην εύρεση ενδεδειγμένων τεχνικών, που να υποδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο θα έπρεπε να συνδυαστούν οι μέθοδοι που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία για την επίτευξη της αυτόνομης οδήγησης. Πιο συγκεκριμένα, στην βιβλιογραφία υπάρχουν ποικίλες μέθοδοι που παρουσιάζουν κάποιο μέρος από την διαδικασία της αυτόνομης οδήγησης, όπως για παράδειγμα, τον τρόπο με τον οποίο το όχημα θα κάνει εντοπισμό της θέσης του στο περιβάλλον, ή το πώς θα εντοπίζει τα οχήματα γύρω του, όμως δεν υπάρχουν τεχνικές που να περιγράφουν τον τρόπο με το οποίο θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια αυτές οι πληροφορίες, το πως θα συνδυαστούν δηλαδή με τα υπόλοιπα συστήματα του οχήματος. Το παραπάνω πρόβλημα είναι αποτέλεσμα της μη επαρκής διερεύνησης του τομέα της αυτόνομης οδήγησης. Οι προσπάθειες και η μελέτη της αυτόνομης οδήγησης πραγματοποιούνται τα τελευταία χρόνια, επομένως, το παραπάνω πρόβλημα είναι και αυτό υπό διερεύνηση και ίσως ο μεγαλύτερος φραγμός στην επίτευξη της αυτόνομης οδήγησης. Το πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί ήταν αρχικά η κατάλληλη επιλογή των απαραίτητων υποσυστημάτων, και στην συνέχεια να αναπτυχθεί η μεθοδολογία με την οποία θα γινόταν ο συνδυασμός τους.

Μια ακόμα σημαντική δυσκολία παρουσιάστηκε στην ανάπτυξη της μεθόδου για την επιλογή της συμπεριφοράς του οχήματος. Η διαδικασία εμπεριέχει ρύθμιση των βαρών για τους κανόνες που ορίζονται, η ρύθμιση αυτή πραγματοποιήθηκε εμπειρικά μετά από δοκιμές. Το όχημα υπό συγκεκριμένες συνθήκες παρουσιάζει κάποια συμπεριφορά, η συμπεριφορά αυτή αν προκαλούσε πρόβλημα για να αλλάξει έπρεπε να γίνει κατάλληλη ρύθμιση των βαρών, η ρύθμιση αυτή όμως μπορεί να άλλαξε την συμπεριφορά του οχήματος υπό κάποιες άλλες συνθήκες, προκαλώντας με αυτό τον τρόπο μια αλυσιδωτή διαδικασία αλλαγών. Λόγω του προβλήματος αυτού, το όχημα έπρεπε να δοκιμαστεί σε διαφορετικά σενάρια και στην περίπτωση προβλήματος να εντοπιστεί η αιτία του, μια διαδικασία η οποία ήταν αρκετά χρονοβόρα.

Το σύστημα αυτόνομης οδήγησης δεν έχει πολύ υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις. Παρόλα αυτά, σε συνδυασμό με τον προσομοιωτή Carla, οι απαιτήσεις για υπολογιστικούς πόρους ήταν υψηλές. Για την εκτέλεση των προγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε επεξεργαστής Intel® Core™ i7-8750H CPU @ 2.20GHz × 12 με 6 πυρήνες και 12 νήματα, κάρτα γραφικών GeForce GTX 1050 Ti με 768 πυρήνες

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

και 4GB RAM, και επίσης μνήμη RAM 16GB. Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων στην περίπτωση των 110 οχημάτων και 110 πεζών, χρησιμοποιούνται σχεδόν όλοι οι πόροι του συστήματος, φτάνοντας το προσομοιωτή να λειτουργεί σχεδόν κοντά στα 10 FPS. Το όριο αυτό αποτελεί ένα ελάχιστο όριο για την ομαλή λειτουργία του προσομοιωτή. Επομένως, ο αριθμός των οχημάτων και των πεζών με τον οποίο έγιναν δοκιμές στην περίπτωση των μικρότερων πόλεων ήταν παραπάνω από αρκετός για την δημιουργία κυκλοφοριακής συμφόρησης, όμως, για τις μεγαλύτερες πόλεις με αυτοκινητόδρομους, θα μπορούσαν να γίνουν δοκιμές και με περισσότερα οχήματα.





# 6

## Μελλοντικές επεκτάσεις

Μια βελτίωση που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική είναι στο σύστημα αντίληψης του αυτόνομου οχήματος. Το σύστημα που κατασκευάστηκε χρησιμοποιεί το προγραμματιστικό περιβάλλον του Carla προσομοιωτή για να λάβει τις απαραίτητες πληροφορίες για το περιβάλλον γύρω από το όχημα. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν οι αισθητήρες που προσφέρει ο προσομοιωτής και να αναπτυχθεί ένα σύστημα τεχνητής νοημοσύνης με σκοπό οι πληροφορίες να ληφθούν από τους αισθητήρες του οχήματος. Αυτή η προσέγγιση θα ήταν πιο ρεαλιστική για την λήψη της πληροφορίας από το περιβάλλον.

Μια επιπρόσθετη βελτίωση για το σύστημα θα ήταν μελέτη και η χρήση μιας αναλυτικής μεθόδου για τον καθορισμό των βαρών των κανόνων αξιολόγησης κατά την διαδικασία αξιολόγησης και επιλογής συμπεριφοράς. Κατά την διαδικασία της επιλογής της συμπεριφοράς, χρησιμοποιείται ένας προκατασκευασμένος πίνακας που αντικατοπτρίζει την αξία κάθε κανόνα για κάθε συμπεριφορά, ένας κανόνας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό κάποια συμπεριφορά θα έχει μεγάλο βάρος για την συγκεκριμένη συμπεριφορά στον αντίστοιχο πίνακα. Η επιλογή των βαρών έχει γίνει εμπειρικά μετά από δοκιμές και με βάσει την λογική σημασία κάθε κανόνα για κάθε συμπεριφορά. Επομένως, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια μεθοδολογία για την επιλογή των βαρών ή την βελτίωση τους μετά την εμπειρική επιλογή. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια τεχνική ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) και καθώς το όχημα πλοηγείται παράλληλα να αξιολογείται η συμπεριφορά του και να προσαρμόζονται τα βάρη των κανόνων.

Στο σύστημα κατασκευής τοπικών μονοπατιών θα μπορούσαν γίνουν επίσης κάποιες βελτιστοποίησης για την επίτευξη καλύτερου χρόνου κατασκευής των μονοπατιών αλλά και για την δημιουργία περισσότερων εναλλακτικών διαδρομών. Κατά την κατασκευή των μονοπατιών θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη η γεωμετρία του δρόμου για κάποια απόσταση μπροστά από το όχημα και έτσι αν η γεωμετρία δεν αλλάζει να ξανά χρησιμοποιηθούν τα μονοπάτια από τον προηγούμενο κύκλο υπολογισμών. Για παράδειγμα, σε μία ευθεία δεν χρειάζεται να ξανά κατα-

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

---

σκευαστούν τα μονοπάτια αφού η γεωμετρία παραμένει η ίδια. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια διαφορετική μέθοδος κατασκευής μονοπατιών η οποία να λαμβάνει υπόψη και την θέση των αντικειμένων στο χώρο και όχι μόνο την γεωμετρία του χώρου.

Επιπροσθέτως, στο σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς γίνεται χρήση ενός κρυφού Μαρκοβιανού μοντέλου. Το μοντέλο αρχικά εκπαιδεύεται μέσω της παρατήρησης των συμπεριφορών των οχημάτων και στη συνέχεια χρησιμοποιείται στο σύστημα. Η εκπαίδευση του μοντέλο θα μπορούσε να γίνεται συνεχώς σε πραγματικό χρόνο και να βελτιώνεται ή να προσαρμόζεται ανάλογα με τις συνθήκες. Πρόσθετα με τα υπόλοιπα, θα μπορούσε να γίνεται επιλογή συγκεκριμένου μαρκοβιανού μοντέλου εκπαίδευμένο ανάλογα με το περιβάλλον οδήγησης, όπως για παράδειγμα οδηγήσει σε πόλη ή σε αυτοκινητόδρομο.

Τέλος, στην διπλωματική δεν έχει δοθεί μεγάλο βάρος στην δυναμική του οχήματος, μελλοντικά θα μπορούσε να γίνει μελέτη και προσαρμογή του συστήματος ελέγχου του οχήματος με σκοπό την ομαλή και άνετη οδήγηση για τον άνθρωπο.

# Βιβλιογραφία

- [1] Nikolett Madarász Péter Szikora Ph.D. “*Self-driving cars — The human side*“. Conference Paper, 2017.
- [2] International Transport Forum. “*Automated and Autonomous Driving Regulation under uncertainty*“. OECD/ITF, 2015.
- [3] Sze Zheng Yong Dmitry Yershov Brian Paden, Michal Čáp and Emilio Frazzoli. “*A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-driving Urban Vehicles*“. May, 2016.
- [4] Jarrod M. Snider. “*Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking*“. 2009.
- [5] Yoshilci Ninomiya Gunji Sugimoto Arata Talcahashi, Taltero Hongo. “*Local path planning and motion control for AGV in positioning*“. International Workshop on Intelligent Robots, 1989.
- [6] Sōren Kammel Moritz Werling, Julius Ziegler and Sebastian Thrun. “*Optimal Trajectory Generation for Dynamic Street Scenarios in a Frenet Frame*“. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010.
- [7] ZEXU WANG. “*Trajectory Planning for Four Wheel Steering Autonomous Vehicle*“. Degree project in vehicle engineering,, 2018.
- [8] Reza Sadeghi Tabar Robert Hult. ““*Path Planning for Highly Automated Vehicles*”, *Master’s Thesis in Systems*“. Control and Mechatronics, 2013.
- [9] John Ball Matthew Doude Xingyu Li, Bo Tang and Daniel W. Carruth. “*Rollover-Free Path Planning for Off-Road Autonomous Driving*“. Journal electronics, 2019.
- [10] Mark Campbell Jason Hardy. ““*Contingency Planning Over Probabilistic Obstacle Predictions for Autonomous Road Vehicles*“. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, AUGUST 2013.
- [11] Daniel Jurafsky James H. Martin. “*Book “Speech and Language Processing”*“. Book, 2019.
- [12] Ljubo Vlacic Andrei Furda. “*Enabling Safe Autonomous Driving in Real-World City Traffic Using Multiple Criteria Decision Making*“. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine ( Volume: 3 , Issue: 1 , Spring), 2011.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [13] Dizan Vasquez Christian Laugier Stéphanie Lefèvre. “*A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles*“. July 2014.
- [14] Fraichard T Vasquez D. “*Motion prediction for moving objects: a statistical approach*“. IEEE international conference on robotics and automation, vol. 4, 3931–3936., 2004.
- [15] Schenk K Kummert Hermes C, Wohler C. “*Long-term vehicle motion prediction*“. IEEE intelligent vehicles symposium, 652–657., 2019.
- [16] Jeff A. Bilmes. “*A Gentle Tutorial of the EM Algorithm and its Application to Parameter Estimation for Gaussian Mixture and Hidden Markov Models*“. April 1998.
- [17] Martin J. Wainwrigth Fanny Yang, Sivaraman Balakrishnan. “*Statistical and Computational Guarantees for the Baum-Welch Algorithm*“. Journal of Machine Learning Research 18, 2017.
- [18] Matteo Panciroli Alberto Broggi, Stefano Debattisti and Pier Paolo Porta. “*Moving from analog to digital driving*“. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, July 2013.
- [19] Marija Seder and Ivan Petrovic. “*Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles*“. IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2007.
- [20] Shuiying Wang. “*State Lattice-based Motion Planning for Autonomous On-Road Driving*“. Dissertation Berlin 2015.
- [21] Tianyu Gu John M. Dolan Junqing Wei, Jarrod M. Snider and Bakhtiar Litkouhi. “*A Behavioral Planning Framework for Autonomous Driving*“. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, July 2014.
- [22] “*CARLA Autonomous Driving Leaderboard*“, 2020. URL <https://leaderboard.carla.org/>.
- [23] Alexander Carballo ans Kazuya Takeda Ekim Yurtsever, Jacob Lambert. “*A Survey of Autonomous Driving, Common Practices and Emerging Technologies*“. March 22, 2020.
- [24] K. Katsaros M. Dianati F. McCullough S. Kuutti, S. Fallah and A. Mouzakitis. “*A survey of the state-of-the-art localization techniques and their potentials for autonomous vehicle applications*“. IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 2, pp. 829–846, 2018.
- [25] D. Bagnell C. Baker R. Bittner M. Clark J. Dolan-D. Duggins T. Galatali C. Geyer et al C. Urmson, J. Anhalt. “*Autonomous driving in urban environments: Boss and the urban challenge*“. Journal of Field Robotics, vol. 25, no. 8, pp. 425–466, 2008.

- [26] G. Pau M. Gerla, E.-K. Lee and U. Lee. “*Internet of vehicles: From intelligent grid to autonomous cars and vehicular clouds*“. IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT). IEEE, pp. 241–246, 2014.
- [27] G. Pau U. Lee E.-K. Lee, M. Gerla and J.-H. Lim. “*Internet of vehicles: From intelligent grid to autonomous cars and vehicular fogs*“. International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 12, no. 9, 2016.
- [28] C. Campolo M. Amadeo and A. Molinaro. “*Information-centric networking for connected vehicles: a survey and future perspectives*“. IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 2, pp. 98–104, 2016.
- [29] J. Kim J. M. Dolan R. Rajkumar J. Wei, J. M. Snider and B. Litkouhi. “*Towards a viable autonomous driving research platform*“. Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE pp. 763–770, 2013.
- [30] S. Debattisti P. Grisleri M. C. Laghi P. Medici A. Broggi, M. Buzzoni and P. Versari. “*Extensive tests of autonomous driving technologies*“. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 14, no. 3, pp. 1403–1415,, 2013.
- [31] C. Linegar W. Maddern, G. Pascoe and P. Newman. “*1 year, 1000 km: The oxford robotcar dataset*“. The International Journal of Robotics Research, vol. 36, no. 1, pp. 3–15, 2017.
- [32] T. Yamaguchi E. Takeuchi Y. Yoshihara H. Okuda T. Suzuki N. Akai, L. Y. Morales and Y. Ninomiya. “*Autonomous driving based on accurate localization using multilayer lidar and dead reckoning*“. IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE,pp. 1–6., 2017.
- [33] E. Guizzo. “*How google’s self-driving car works*“. IEEE Spectrum Online, vol. 18, no. 7, pp. 1132–1141, 2011.
- [34] P. Lienert H. Somerville and A. Sage. “*Uber’s use of fewer safety sensors prompts questions after arizona crash*“. Business news, Reuters, March 2018., [Retrieved December 16, 2018.]
- [35] M. Schreiber H. Lategahn T. Strauss C. Stiller T. Dang U. Franke N. Appenrodt C. G. Keller et al J. Ziegler, P. Bender. “*Making Bertha drive – an autonomous journey on a historic route*“. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 6, no. 2, pp. 8–20, 2014.
- [36] “*Baidu. Apollo auto*“. <https://github.com/ApolloAuto/apollo>, 2019.
- [37] A. Kornhauser C. Chen, A. Seff and J. Xiao. “*Deepdriving: Learning affordance for direct perception in autonomous driving*“. IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 2722–2730, 2015.
- [38] D. A. Pomerleau. “*Alvinn: An autonomous land vehicle in a neural network*“. Advances in neural information processing systems, pp. 305–313, 1989.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [39] E. Cosatto B. Flepp U. Muller, J. Ben and Y. L. Cun. “*Off-road obstacle avoidance through end-to-end learning*“. Advances in neural information processing systems, pp. 739–746, 2006.
- [40] D. Dworakowski B. Firner B. Flepp P. Goyal L. D. Jackel M. Monfort U. Muller J. Zhang M. Bojarski, D. Del Testa. “*End to end learning for self-driving cars*“. arXiv preprint arXiv:1604.07316, 2016.
- [41] F. Yu H. Xu, Y. Gao and T. Darrell. “*End-to-end learning of driving models from large-scale video datasets*“. arXiv preprint, 2017.
- [42] E. Perot A. E. Sallab, M. Abdou and S. Yogamani. “*Deep reinforcement learning framework for autonomous driving*“. Electronic Imaging, vol. 2017, no. 19, pp. 70–76, 2017.
- [43] D. Janz P. Mazur D. Reda J.-M. Allen V.-D. Lam A. Bewley A. Kendall, J. Hawke and A. Shah. “*Learning to drive in a day*“. arXiv preprint arXiv:1807.00412, 2018.
- [44] J. Schmidhuber J. Koutník, G. Cuccu and F. Gomez. “*Evolving large scale neural networks for vision-based reinforcement learning*“. Proceedings of the 15th annual conference on Genetic and evolutionary computation. ACM, pp. 1061–1068, 2013.
- [45] L. Chi and Y. Mu. “*Deep steering: Learning end-to-end driving model from spatial and temporal visual cues*“. 2017.
- [46] S. Baluja. “*Evolution of an artificial neural network based autonomous land vehicle controller*“. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, vol. 26, no. 3, pp. 450–463, 1996.

# Images' Sources

1. [https://cyberlaw.stanford.edu/files/publication/files/15CPB\\_AutonomousDriving.pdf](https://cyberlaw.stanford.edu/files/publication/files/15CPB_AutonomousDriving.pdf)
2. <https://trends.google.com/trends/explore?date=all&q=Autonomous%20driving>
3.
  - <https://www.eenewsautomotive.com/content/electronic-control-system-partitioning-autonomous-vehicle>
  - <https://phys.org/news/2018-06-demystifying-future-autonomous-vehicles.html>
4. <https://pythonawesome.com/end-to-end-simulation-for-self-driving-cars/>
5. <https://www.independent.co.uk/life-style/gadgets-and-tech/news/self-driving-car-crash-racial-bias-black-people-study-a8810031.html>
6.
  - <https://www.fool.com/investing/2018/12/09/3-under-the-radar-driverless-car-companies.aspx>
  - <https://www.autobeatonline.com/news/hella-readies-next-gen-adas-radar>
7.
  - <https://medium.com/@swaritd/perception-how-self-driving-cars-see-the-world-ae630636f4c>
  - <https://m.futurecar.com/3914/Volvo-is-Partnering-with-Silicon-Valley-Startup-Luminar-on-Lidar-for-its-Self-Driving-Vehicles>
8. [https://www.researchgate.net/figure/Ultrasonic-sensors-using-in-car\\_fig2\\_333001953](https://www.researchgate.net/figure/Ultrasonic-sensors-using-in-car_fig2_333001953)
9. <https://support.google.com/waymo/answer/9190838?hl=en>
10. <https://www.unitedlex.com/news/from-google-to-tesla-its-a-war-of-lidar-or-radar>
11. <https://www.businessinsider.com/how-does-googles-waymo-self-driving-car-work-graphic-2017-1>
12. <https://www.eetasia.com/teslas-hardware-retrofits-for-model-3/>
13. <https://medium.com/@kangeugine/hidden-markov-model-7681c22f5b9>
14. <https://carla.org/>
15. <https://www.slideshare.net/hvcoup/intro-to-ros>
16. [https://www.researchgate.net/figure/Blackboard-architectural-style-example-based-on-Houliston-et-al-2016\\_fig3\\_332448175](https://www.researchgate.net/figure/Blackboard-architectural-style-example-based-on-Houliston-et-al-2016_fig3_332448175)
17. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6957658>
18. <https://fjp.at/posts/optimal-frenet/>