

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ρομποτική όραση, αναπαράσταση και
δημιουργία τροχιάς. Υλοποίηση σε
προγραμματιστικό περιβάλλον

Διπλωματική Εργασία

της

Ελευθερίας Πουλιανίτη

Επιβλέπων:
Φραγκούλης Γεώργιος
Καθηγητής

Τρίκαλα / Φεβρουάριος / 2024



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
& COMPUTER ENGINEERING

Robotic Vision and Path Following: A Review of Recent Developments and Implementation

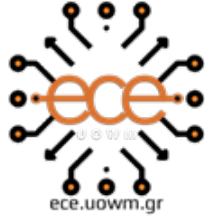
Thesis

by

Eleftheria Poulianiti

Supervisor:
Fragoulis Georgios
Professor

Trikala / February / 2024



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο “ Ρομποτική όραση , αναπαράσταση και δημιουργία τροχιάς. Υλοποίηση σε προγραμματιστικό περιβάλλον (Robotic Vision and Path Following: A Review of Recent Developments and Implementation)” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Φραγκούλη Γεώργιου αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν την συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Πουλιανίτη Ελευθερία & Φραγκούλης Γεώργιος, 2024, Τρίκαλα

Υπογραφή Φοιτητή:

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη διερεύνηση των πρόσφατων εξελίξεων στις τεχνολογίες ρομποτικής όρασης και παρακολούθησης διαδρομής (τροχιάς). Η προτεινόμενη μελέτη θα επικεντρωθεί στη διερεύνηση των τελευταίων εξελίξεων στα συστήματα ρομποτικής όρασης, συμπεριλαμβανομένης της ανίχνευσης και της παρακολούθησης αντικειμένων, καθώς και της ενσωμάτωσής τους σε αλγορίθμους παρακολούθησης διαδρομής. Η έρευνα θα εξετάσει επίσης τον τρόπο με τον οποίο αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως τα αυτόνομα οχήματα και τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Θα γίνει εφαρμογή αναπαράστασεων στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

Λέξεις Κλειδιά

Ρομποτική όραση
Παρακολούθηση διαδρομής
Ρομποτικοί βραχίονες
Αυτόνομο ρομπότ
Εφαρμογές
Βιομηχανίες
Πρόσφατες εξελίξεις
Μελλοντική έρευνα

Abstract

This thesis aims to investigate the recent developments in robotic vision and tracking technologies. The proposed study will focus on investigating the latest developments in robotic vision systems, including object detection and tracking, and their integration into path tracking algorithms. The research will also look at how these technologies are used in various applications, such as autonomous vehicles and drones. Representations will be implemented in the MATLAB programming environment.

Keywords

Robotic vision

Path following

Robotic arm

Autonomous Robot

Applications

Industries

Recent advancements

Future research

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
2	Ρομποτική όραση	3
2.1	Ρομποτική όραση για ρομποτικούς βραχίονες	8
2.2	Ρομποτική όραση για αυτόνομα ρομπότ	12
3	Παρακολούθηση διαδρομής	16
3.1	Παρακολούθηση διαδρομής για ρομποτικά χέρια	22
3.2	Παρακολούθηση διαδρομής για αυτόνομα ρομπότ	28
4	Ενσωμάτωση της ρομποτικής όρασης και της παρακολούθησης διαδρομής	38
5	Υλοποιήσεις σε MATLAB	48
6	Προκλήσεις και περιορισμοί	57
7	Συμπεράσματα	63
	Βιβλιογραφία	66

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η ρομποτική τεχνολογία της σημερινής εποχής χαρακτηρίζεται από τον συνδυασμό αλγορίθμων ακριβούς εντοπισμού διαδρομής και πολύπλοκων συστημάτων όρασης. Αυτός ο συνδυασμός αναδύεται ως απαραίτητος παράγοντας στον ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα της ρομποτικής, συμβάλλοντας στη βελτίωση των αυτόνομων συστημάτων. Στόχος της παρούσας επιστημονικής μελέτης με τίτλο "Ρομποτική όραση, αναπαράσταση και δημιουργία τροχιάς" είναι να εστιάσει στις πρόσφατες εξελίξεις των τεχνολογιών ρομποτικής όρασης, δίνοντας βάση στον τρόπο ενσωμάτωσής τους με αλγορίθμους παρακολούθησης διαδρομής που αποσκοπούν στην αναγνώριση και παρακολούθηση αντικειμένων. Αυτές οι τεχνολογίες είναι απαραίτητες για την ικανότητα ενός ρομπότ να αντιλαμβάνεται και να κατανοεί μόνο του το περιβάλλον του, γεγονός που ανοίγει νέες δυνατότητες στον κλάδο της βιομηχανίας. Με την χρήση ισχυρών συστημάτων όρασης επιτυγχάνεται ο έλεγχος σε διάφορα σενάρια, από χώρους βιομηχανικών εγκαταστάσεων έως το διαρκώς μεταβαλλόμενο έδαφος που αντιμετωπίζουν τα αυτόνομα οχήματα και τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα. Τα μελλοντικά αυτόνομα συστήματα θα διαδραματίζουν ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στην καθημερινή μας ζωή, καθιστώντας τη διασύνδεση μεταξύ ρομποτικής όρασης και παρακολούθησης διαδρομής τόσο αναγκαία όσο και σκόπιμη. Η παρούσα μελέτη επιδιώκει να παράσχει σημαντικές νέες γνώσεις που θα προάγουν τον τομέα και θα ανοίξουν το δρόμο για την ανάπτυξη ολοένα πιο εξελιγμένων και αποδοτικών αυτόνομων συστημάτων, αναλύοντας την πολυπλοκότητα αυτών των τεχνολογιών. Αρχικά, παρατίθεται μια διεξοδική έρευνα των πρόσφατων εξελίξεων στη ρομποτική όραση και την παρακολούθηση διαδρομών, αξιολογώντας τη σημασία των διάφορων εφαρμογών και αποκαλύπτοντας τις

πιο πρόσφατες ανακαλύψεις που διαμορφώνουν αυτούς τους τομείς. Συνολικά, η συνεργασία μεταξύ της ρομποτικής όρασης και της παρακολούθησης διαδρομής αποδίδουν σημαντικά στοιχεία σε πολλές διαφορετικές βιομηχανίες, ανοίγοντας νέους δρόμους για αυτοματοποίηση και την αύξηση της παραγωγικότητας. Οι εφαρμογές αυτών των τεχνολογιών εξαπλώνονται σε πολλούς κλάδους και τομείς, από τις μεταφορές και την υγειονομική περίθαλψη έως τη βιομηχανία και τη γεωργία, προσφέροντας μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, ασφάλεια και προσαρμοστικότητα, διευκρινίζοντας τη βαρύτητα αυτών των τομέων μέσω ενός εύρους εφαρμογών [1].

Κεφάλαιο 2

Ρομποτική όραση

Η ρομποτική όραση επιτρέπει στα ρομπότ να αντιλαμβάνονται, να ερμηνεύουν και να πλοηγούνται στο περιβάλλον τους. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ρομποτικής όρασης, ο καθένας με μοναδικά χαρακτηριστικά και εφαρμογές.

Επεξήγηση των διαφόρων τύπων ρομποτικής όρασης

1. Παθητική όραση

Η παθητική όραση περιλαμβάνει τη χρήση καμερών για τη λήψη εικόνων ή βίντεο από το περιβάλλον του ρομπότ. Συγκρίνοντας τις διαφορές μεταξύ των εικόνων, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η πληροφορία βάθους της σκηνής και να δημιουργηθεί μια τρισδιάστατη αναπαράστασή της. Οι εικόνες που λαμβάνονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της αναγνώρισης αντικειμένων, για την εκτίμηση της απόστασης και της θέσης των εμποδίων σε σχέση με το όχημα καθώς και της πλοήγησης [2]. Η παθητική όραση χρησιμοποιείται συνήθως σε βιομηχανικά ρομπότ, μη επανδρωμένα αεροσκάφη και αυτόνομα οχήματα.

Μπορεί να κατηγοριοποιηθεί περαιτέρω σε δύο τύπους, τη μονόφθαλμη όραση και την όραση πολλαπλών καμερών. Η μονόφθαλμη όραση περιλαμβάνει τη χρήση μιας μόνο κάμερας ή ενός μόνο ματιού για την αντίληψη του περιβάλλοντος [3], ενώ η όραση πολλαπλών καμερών χρησιμοποιεί δύο ή περισσότερες κάμερες για τη λήψη εικόνων από διαφορετικές γωνίες. Η μονόφθαλμη όραση χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές που απαιτούν λύσεις χαμηλού κόστους και χαμηλής πολυπλοκότητας, ενώ η όραση

πολλαπλών καμερών χρησιμοποιείται σε πιο σύνθετες εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια.

2. Η ενεργητική όραση

Η ενεργητική όραση είναι μια έννοια της ρομποτικής που περιλαμβάνει τη χρήση αισθητήρων για την ενεργή σάρωση του περιβάλλοντος του ρομπότ και τη συλλογή πληροφοριών για την απόκτηση πολλαπλών όψεων ενός αντικειμένου ή περιβάλλοντος για την εκτέλεση μιας εργασίας που βασίζεται στην όραση. Περιλαμβάνει σχεδιασμό αισθητήρων για τον καθορισμό της θέσης και ρυθμίσεις των αισθητήρων όρασης για την εργασία που θα υλοποιήσει. Η ενεργητική όραση είναι σημαντική σε περιπτώσεις όπου μια μόνο όψη μπορεί να μην περιέχει επαρκή χαρακτηριστικά για την αδιαμφισβήτητη αναγνώριση ενός αντικειμένου [4].

Οι κατηγορίες της ενεργητικής όρασης βασίζονται σε δύο τεχνολογίες, του δομημένου φωτός και του χρόνου πτήσης. Η όραση δομημένου φωτός βασίζεται σε κάμερες και χρησιμοποιεί έναν υπέρυθρο προβολέα και έναν αισθητήρα λήψης για τη δημιουργία μιας τρισδιάστατης εικόνας ενός αντικειμένου ή μιας σκηνής. Ο προβολέας εκπέμπει ένα μοτίβο φωτός πάνω στο αντικείμενο ή τη σκηνή, το οποίο στη συνέχεια συλλαμβάνεται από τον αισθητήρα. Το μοτίβο που συλλαμβάνεται χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του βάθους του αντικειμένου ή της σκηνής, δημιουργώντας μια τρισδιάστατη εικόνα. Αυτή η τεχνολογία είναι παρόμοια με τις κάμερες στερεοσκοπίας, αλλά αντί να χρησιμοποιεί δύο αισθητήρες εικόνας, χρησιμοποιεί έναν προβολέα υπέρυθρων (IR) και έναν αισθητήρα λήψης [5].

Ο χρόνος πτήσης εξαρτάται από μία κάμερα που μετρά το χρόνο που χρειάζεται το φως για να ταξιδέψει από μια πηγή σε ένα αντικείμενο και πίσω στην κάμερα. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ της κάμερας και του αντικειμένου. Οι κάμερες TOF (Time-of-flight) χρησιμοποιούνται συχνά στη ρομποτική, τα αυτόνομα οχήματα και τις εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας [5].

3. Στερεοσκοπική όραση

Η στερεοσκοπική όραση είναι ένα τμήμα της όρασης υπολογιστών που ασχολείται με την ανακατασκευή τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων για την εκτίμηση του βάθους. Περιλαμβάνει τη χρήση δύο ή περισσότερων καμερών για τη λήψη εικόνων της ίδιας σκηνής από διαφορετικά σημεία

θέασης. Συγκρίνοντας τις διαφορές μεταξύ αυτών των εικόνων, μπορεί να δημιουργηθεί ένας χάρτης ανομοιότητας, ο οποίος παρέχει πληροφορίες σχετικά με το βάθος των αντικειμένων στη σκηνή [6]. Στερεοφωνικό σύστημα πολλαπλών περιβαλλόντων, ονομάζεται η ικανότητα ενός συστήματος στερεοσκοπικής όρασης να λειτουργεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα με διαφορετικές συνθήκες φωτισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με τη λήψη στερεοσκοπικών ζευγών σε διαφορετικές εκθέσεις και το συνδυασμό τους για τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου χάρτη κατάληψης [7].

4. Θερμική όραση

Η θερμική όραση είναι ένας τύπος συστήματος όρασης που χρησιμοποιεί θερμικές κάμερες για τη σύλληψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από οποιοδήποτε αντικείμενο με θερμοκρασία μεγαλύτερη του μηδενός. Αυτός ο τύπος κάμερας χρησιμοποιείται για την ανίχνευση θερμικών υπογραφών και μπορεί να είναι χρήσιμος σε εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση και η ανίχνευση επικίνδυνων καταστάσεων [8].

5. Ανίχνευση βάθους

Η ανίχνευση βάθους είναι η διαδικασία καταγραφής της απόστασης μεταξύ ενός αντικειμένου και μιας κάμερας ή ενός αισθητήρα. Χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές όπως η ρομποτική, τα αυτόνομα οχήματα και η εικονική πραγματικότητα. Το σφάλμα αυτό σχετίζεται με τη γραμμή βάσης της κάμερας, την απόσταση εστίασης και το πλάτος των εικονοστοιχείων. Μπορούν να υπάρξουν διαφορετικές προσεγγίσεις για την ανίχνευση βάθους, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων Time-of-Flight (ToF) και της στερεοσκοπικής όρασης [9].

Συμπερασματικά, η ρομποτική όραση έχει αποκτήσει κρίσιμο ρόλο στην ικανότητα των ρομπότ να αντιλαμβάνονται και να πλοηγούνται στο περιβάλλον τους. Οι διάφοροι τύποι ρομποτικής όρασης έχουν ο καθένας μοναδικά χαρακτηριστικά και εφαρμογές, επιτρέποντας στα ρομπότ να εκτελούν ένα ευρύ φάσμα εργασιών με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα.

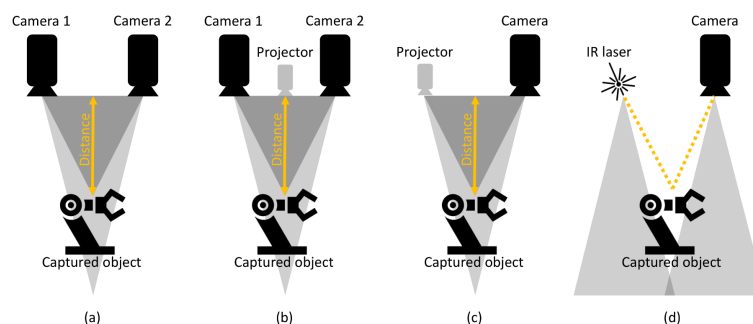


Figure 1: Παραλλαγές της κάμερας βάθους. (α) Παθητική στερεοσκοπική όραση. (β) Ενεργή στερεοσκοπική όραση. (γ) Δομημένο φως. (δ) Χρόνος πτήσης [5].

Πρόσφατες εξελίξεις στη ρομποτική όραση

Οι προσεγγίσεις που βασίζονται στη βαθιά μάθηση έχουν φέρει επανάσταση σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της ρομποτικής όρασης. Οι τεχνικές βαθιάς μάθησης, όπως τα συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα (CNN), τα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα (RNN), η σημασιολογική κατάτμηση με πλήρως συνελικτικά δίκτυα (FCNs) έχουν επιδείξει αξιοσημείωτη επιτυχία με άμεση εφαρμογή σε διάφορες εργασίες ρομποτικής όρασης.

Τα συνεπτυγμένα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από συνελικτικά στρώματα, στρώματα συγκέντρωσης και πλήρως συνδεδεμένα στρώματα τα οποία αναλύουν φυσικά σήματα χρησιμοποιώντας τοπικές συνδέσεις, κοινά βάρη, συγκέντρωση και πολλαπλά επίπεδα. Διαφορετικές αρχιτεκτονικές CNN, όπως οι AlexNet, VGG, GoogleNet, ResNet και DenseNet, υλοποιούν διάφορες τοπολογίες και λειτουργίες δικτύου. Για την αναγνώριση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι όπως το R-CNN, το Fast R-CNN και το Faster R-CNN.

Τα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά χρησιμοποιούνται συνήθως στην επεξεργασία φυσικής γλώσσας, στην αναγνώριση ομιλίας και στην ανάλυση χρονοσειρών. Είναι δίκτυα που διαθέτουν τουλάχιστον μία σύνδεση ανατροφοδότησης και μπορούν να τη χρησιμοποιήσουν για την εσωτερική αποθήκευση δεδομένων. Τα RNNs είναι χρήσιμα για την εκμάθηση πληροφοριών από χρονικές ή χωρικές ακολουθίες με μεταβλητό μήκος, οι οποίες δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν σωστά από τα παραδοσιακά νευρωνικά δίκτυα με συνελικτικό τρόπο (CNNs) [10].

Στην ευρύτερη κατηγορία της μηχανικής και της βαθιάς μάθησης ανήκουν και οι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι που μπορούν να προσαρμόζονται

και να μαθαίνουν από το περιβάλλον τους ή την εργασία που πραγματοποιούν, βελτιώνοντας την απόδοσή τους με την πάροδο του χρόνου.

Οι αλγόριθμοι ενισχυτικής μάθησης **Reinforcement Learning** χρησιμοποιούνται σε εργασίες όπως η ρομποτική πλοήγηση, ο χειρισμός και ο έλεγχος ενώ ασχολούνται με τη μάθηση του τρόπου καλύτερης διαχείρισης ενός συστήματος για την επίτευξη ενός μακροπρόθεσμου στόχου. Επιτρέπουν στα ρομπότ να μαθαίνουν από δοκιμές και λάθη αλληλεπιδρώντας με το περιβάλλον τους. Το ρομπότ αποστέλλει στον ελεγκτή του τη κατάσταση του συστήματος με τη μορφή ανταμοιβών ή ποινών με βάση τις ενέργειές του, επιτρέποντάς του να προσαρμόζει τη συμπεριφορά του στην κατάσταση στην οποία βρίσκεται, ώστε να επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα σε μελλοντικές ενέργειες [11].

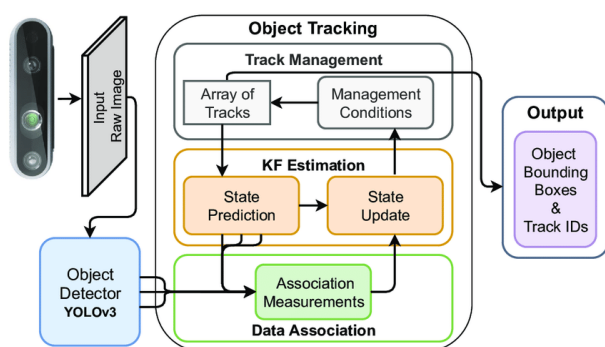


Figure 2: Επισκόπηση των αλγορίθμων εντοπισμού αντικειμένων με βάση το φίλτρο Kalman [12].

προσαρμόζουν δυναμικά τις παραμέτρους τους με βάση τα εξελισσόμενα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, οδηγώντας σε βελτιωμένη ακρίβεια.

Τα **φίλτρα Kalman** έχουν πολλές εφαρμογές στην αντίληψη της ρομποτικής όρασης, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου ρομπότ, της παρακολούθησης αντικειμένων, της παρακολούθησης διαδρομής, της εκτίμησης και πρόβλεψης δεδομένων καθώς και την αυτόματη ανίχνευση. Επίσης μπορούν να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές εντοπισμού, όπως η παρακολούθηση πυραύλων, τα συστήματα ασφαλείας, του ρομποτικού χειρισμού, του SLAM, της τρισδιάστατης μοντελοποίησης, της οπτικής σερβοκίνησης και της οπτικής πλοήγησης. Οι κοινά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την επίλυση προβλημάτων ρομποτικής όρασης περιλαμβάνουν τη χρήση φίλτρων Kalman [13].

Οι τεχνικές προσαρμοστικού φιλτραρίσματος, όπως τα φίλτρα Kalman ή οι αναδρομικοί αλγόριθμοι ελαχίστων τετραγώνων, χρησιμοποιούνται συνήθως στην ρομποτική όραση για τη συγχώνευση και την εκτίμηση αισθητήρων. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να

Εφαρμογές της ρομποτικής όρασης σε διάφορες βιομηχανίες

Η χρήση της ρομποτικής όρασης και της επεξεργασίας εικόνας σε συνδυασμό με ρομποτικά συστήματα, έχει βρει εφαρμογές σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους όπως ο κατασκευαστικός, ο γεωργικός και κλάδους που αφορούν την υγειονομική περίθαλψη.

Η ρομποτική όραση χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευαστική βιομηχανία για εργασίες όπως η μηχανική συναρμολόγηση, ο ποιοτικός έλεγχος και η επιθεώρηση εξαρτημάτων, γεγονός που συμβάλλει στη βελτίωση της παραγωγικότητας και στη μείωση της παραγωγής απορριμμάτων. Στη γεωργική βιομηχανία, τα συστήματα μηχανικής όρασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εργασίες όπως η παρακολούθηση των καλλιεργειών, η ανίχνευση ασθενειών των φυτών και η εκτίμηση της απόδοσης, οδηγώντας σε βελτιωμένη αποδοτικότητα και παραγωγικότητα. Στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, η ρομποτική όραση μπορεί να εφαρμοστεί στη χειρουργική ρομποτική, στην ανάλυση ιατρικών εικόνων αλλά και την παρακολούθηση ασθενών, επιτρέποντας ακριβείς διαδικασίες και διαγνώσεις [14].

2.1 Ρομποτική όραση για ρομποτικούς βραχίονες

Επισκόπηση των τεχνολογιών ρομποτικής όρασης για ρομποτικούς βραχίονες

Οι τεχνολογίες ρομποτικής όρασης έχουν καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση των δυνατοτήτων των ρομποτικών βραχιόνων, επιτρέποντάς τους να αντιλαμβάνονται και να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους πιο αποτελεσματικά.

Για την ανάπτυξη ενός συστήματος υπολογιστικής όρασης αξιοποιούνται δύο ενσωματωμένες κάμερες για την ανίχνευση και τον αυτόνομο χειρισμό αντικειμένου ή στόχου. Αφού τοποθετηθεί τυχαία σε μια επιφάνεια, πραγματοποιείται ο έλεγχος ενός εκπαιδευτικού ρομποτικού βραχίονα για να το σηκώσει και να το μετακινήσει σε έναν προκαθορισμένο προορισμό. Η όραση υπολογιστή χρησιμοποιείται αρχικά, για την αναγνώριση του χρώματος και του σχήματος του αντικειμένου, έπειτα εφαρμόζεται αλγόριθμος

υπολογισμού με βάση το κέντρο μάζας και τέλος φιλτράρει και κατανέμει τα χρώματα για τον εντοπισμό του στόχου και τη σωστή τοποθέτηση του ρομποτικού βραχίονα [15]. Η μελέτη για την κίνηση ενός ρομποτικού βραχίονα γίνεται με τη βοήθεια τεχνολογιών όπως η επεξεργασία εικόνας, της όρασης υπολογιστών καθώς και με την εφαρμογή και επικύρωση προηγμένων αλγορίθμων για χειρισμό και σύλληψη αντικειμένων όπως η δημιουργία τροχιάς ή ο σχεδιασμός διαδρομής. Η παραπάνω διαδικασία ενσωματωμένων καμερών μπορεί να επιτευχθεί είτε με τη χρήση 2D-καμερών, είτε με 3D-καμερών.

Διαφορετικές προσεγγίσεις στη ρομποτική όραση

Οι **κάμερες 2D** παρέχουν οπτική αντίληψη και ανατροφοδότηση στο ρομπότ, βοηθώντας σε εργασίες όπως η ανίχνευση αντικειμένων, η παρακολούθηση και ο χειρισμός του σχεδιασμού και του ελέγχου της κίνησης, της δημιουργία τροχιάς και της προσομοίωσης. Στον τομέα της επαυξημένης πραγματικότητας (AR) για τη ρομποτική, οι κάμερες 2D διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη σύλληψη της ακολουθίας εικόνων του πραγματικού κόσμου, η οποία επαυξάνεται με την προσθήκη εικονικών αντικειμένων. Η ενσωμάτωση καμερών 2D με τεχνολογία AR σε εφαρμογές ρομποτικής οδηγεί στην αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και τη χρηστικότητα κατά τη διάρκεια εργασιών, αποτελώντας βασικό στοιχείο στον κλάδο της επαυξημένης πραγματικότητας για τη ρομποτική και επιτρέποντας βελτιωμένες δυνατότητες αντίληψης και αλληλεπίδρασης για τους ρομποτικούς βραχίονες [16]. Επιπλέον, οι κάμερες 2D χρησιμοποιούνται σε σενάρια αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ (HRI), επιτρέποντας τηλεχειρισμό, συνεργατικές διεπαφές και απτικές διεπαφές.



Figure 3: Ρομποτική κάμερα Zivid 2 τρισδιάστατης όρασης τοποθετημένη σε ρομπότ [17].

Οι **τρειςδιάστατες κάμερες** χρησιμοποιούνται σε ρομποτικούς βραχίονες, για τη λήψη πληροφοριών βάθους και τη δημιουργία μιας τρισδιάστατης αναπαράστασης του περιβάλλοντος γι' αυτό παρέχουν πιο λεπτομερή αντίληψη σε σύγκριση με τις κάμερες 2D . Οι τρισδιάστατες κάμερες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της επαυξημένης πραγματικότητας (AR)

βελτιώνοντας την αντίληψη του πραγματικού κόσμου με τη σύλληψη πληροφοριών βάθους και τη δυνατότητα ακριβέστερης καταγραφής εικονικών αντικειμένων . Επιπλέον, οι τρισδιάστατες κάμερες μπορούν και αυτές να βελτιώσουν την αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ (HRI) επιτρέποντας την αναγνώριση χειρονομιών και διαισθητικές διεπαφές ελέγχου [18].

Οι παραδοσιακές μέθοδοι ανίχνευσης που βασίζονται στην 2D όραση έχουν περιορισμούς στη σύλληψη πληροφοριών βάθους και είναι λιγότερο ανθεκτικές σε πολύπλοκα περιβάλλοντα με απόκρυψη . Οι αισθητήρες που βασίζονται στην τρισδιάστατη όραση είναι πιο ανθεκτικοί στο θόρυβο και μπορούν να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες βάθους, επιτρέποντας στους ρομποτικούς βραχίονες να πιάνουν αντικείμενα σε πιο σύνθετα περιβάλλοντα με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Διαφορετικές κατηγορίες της ρομποτικής όρασης εφαρμόζονται επίσης σε ένα ρομποτικό βραχίονα, συμπεριλαμβανομένης της στερεοσκοπικής όρασης, της μονοφθαλμικής όρασης, την ανίχνευση βάθους καθώς και τρισδιάστατες κάμερες.

Πρόσφατες εξελίξεις στη ρομποτική όραση για ρομποτικούς βραχίονες

Η βαθιά μάθηση με εφαρμογή στη ρομποτική όραση των βραχίωνων, συμμετέχει στην εκμάθηση αναπαραστάσεων, χαρακτηριστικών και ταξινομητών με βάση τα δεδομένα αναγνώρισης αντικειμένων και εξαγωγής χαρακτηριστικών. Διάφορα νευρωνικά μοντέλα, όπως το AlexNet, τα πλήρως συνελικτικά δίκτυα (FCN) και τα συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα (CNN), έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την αναγνώριση αντικειμένων και την εξαγωγή χαρακτηριστικών στη ρομποτική όραση [10].



Figure 4: Κιτ ρομποτικού βραχίονα ρομπότ Raspberry Pi AI Hand Building με κάμερα 6-DOF [19].

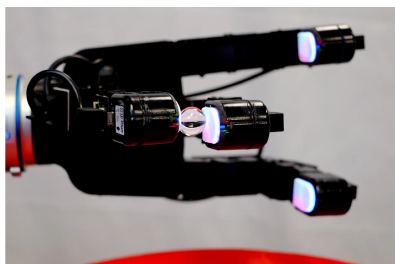


Figure 5: DIGITs τοποθετημένα σε ένα χέρι πολλαπλών δακτύλων Allegro. Η επικύρωση του σχεδιασμού του αισθητήρα, εφαρμόζεται με γυάλινες μπίλιες μεταξύ δύο δακτύλων [20].

Η εξερεύνηση του περιβάλλοντος μπορεί να πραγματοποιηθεί επιπλέον και με χρήση αισθητήρων τεχνητής αφής ώστε να βοηθήσει τα ρομποτικά χέρια να προσαρμοστούν σε απροσδόκητα γεγονότα όπως την αποφυγή συγκρούσεων, την εξερεύνηση των ιδιοτήτων της επιφάνειας και την εκτέλεση λειτουργικών εργασιών. Οι αισθητήρες περιλαμβάνουν σειρές ανίχνευσης κατανομής πίεσης, αισθητήρες ροπής δύναμης και δυναμικούς αισθητήρες αφής [21].

Οι πρόσφατες καινοτομίες στη ρομποτική όραση έχουν συμβάλει στην αύξηση της αναγνώρισης και της αλληλεπίδρασης τους με αντικείμενα διαφορετικών σχημάτων, μεγεθών και υφών. Συνδυάζοντας προηγμένους υπολογιστές με εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης και τεχνολογίες μηχανικής μάθησης, οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν πλέον, να εντοπίζουν και να αναγνωρίζουν με ακρίβεια αντικείμενα στο περιβάλλον τους, οδηγώντας σε νέες εφαρμογές όπως ταξινόμηση, τοποθέτηση και συναρμολόγηση με επιλογή.

Εφαρμογές της ρομποτικής όρασης σε διάφορες βιομηχανίες

Εκτός από την καλύτερη αναγνώριση και χειρισμό αντικειμένων, οι πρόσφατες εξελίξεις στη ρομποτική όραση έχουν επικεντρωθεί στην ενίσχυση της ασφάλειας των λειτουργιών των ρομποτικών βραχιόνων. Επί του παρόντος, τα συστήματα που βασίζονται στην όραση μπορούν να αναγνωρίζουν και να παρακολουθούν την παρουσία ανθρώπων ή αντικειμένων στο χώρο εργασίας ενός ρομπότ. Αυτό καθιστά το περιβάλλον εργασίας ασφαλέστερο, επιτρέποντας στο ρομποτικό βραχίονα να τροποποιεί τις κινήσεις του ή ακόμη και να αναστείλλει τη λειτουργία του, προκειμένου να αποφεύγονται ατυχήματα ή συγκρούσεις [4].

Οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν πλέον να αντιλαμβάνονται, να ερμηνεύουν και να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους με μεγαλύτερη ακρίβεια και ευελιξία, προσφέροντας έτσι νέες δυνατότητες για την εφαρμογή των ρομποτικών βραχιόνων σε διάφορους τομείς, όπως κατασκευαστικές εταιρείες, σε συστήματα εφοδιασμού και την υγειονομική περίθαλψη.

2.2 Ρομποτική όραση για αυτόνομα ρομπότ

Επισκόπηση της ρομποτικής όρασης για αυτόνομα ρομπότ

Η ρομποτική όραση παίζει βασικό ρόλο στο να μπορούν τα αυτόνομα ρομπότ να αντιλαμβάνονται και να κατανοούν τον κόσμο γύρω τους. Ενσωματώνοντας κάμερες, αισθητήρες και προηγμένους αλγόριθμους, τα συστήματα όρασης ρομπότ επιτρέπουν στα ρομπότ να αναλύουν οπτικά δεδομένα και να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο. Για την ανίχνευση και τον εντοπισμό αντικειμένων από αυτόνομα ρομπότ συνήθως χρησιμοποιείται το χρώμα. Ωστόσο, προκύπτουν προκλήσεις όταν αντιμετωπίζονται διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, πολλαπλές θέσεις της κάμερας ή ένα συγκεχυμένο φόντο. Η αντίληψη του χρώματος μιας επιφάνειας αντικειμένου μπορεί να επηρεαστεί από παράγοντες όπως η πηγή φωτισμού, η ανάκλαση της επιφάνειας, ο προσανατολισμός της επιφάνειας, η υφή και οι σκιές. Στα ρομπότ χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι καμερών, όπως κάμερες RGB, κάμερες βάθους (π.χ. κάμερες LiDAR ή κάμερες δομημένου φωτός) και κάμερες υπερύθρων. Οι κάμερες RGB καταγράφουν πληροφορίες χρώματος, ενώ οι κάμερες βάθους παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την απόσταση από τα αντικείμενα [22].

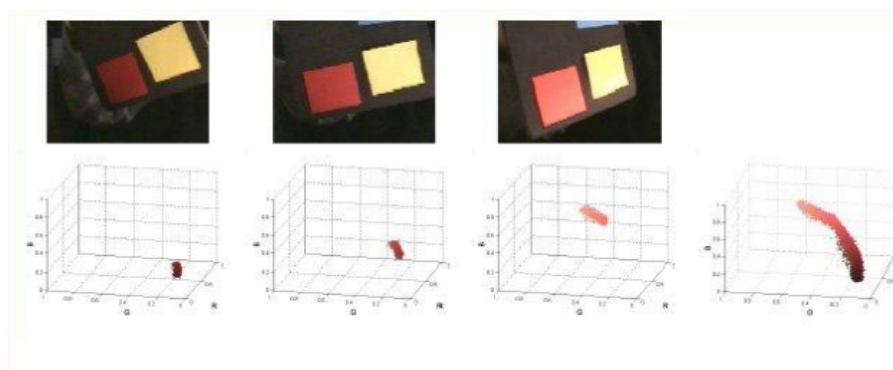


Figure 6: Τυπικά προβλήματα ανάκλασης μιας έγχρωμης (κόκκινης) επίπεδης επιφάνειας: (α) ακολουθία μιας κόκκινης επίπεδης επιφάνειας- (β) χάρτης RGB της χρωματικής κατανομής της ακολουθίας της επίπεδης επιφάνειας [22].

Τα αυτόνομα κινητά ρομπότ απαιτούν μια σειρά από περιβαλλοντικούς αισθητήρες για να ολοκληρώσουν εργασίες όπως η εκτίμηση και η παρακολούθηση. Το σύστημα κίνησης εξαρτάται από παράγοντες όπως η ικανότητα ελιγμών, οι συνθήκες εδάφους και η αποτελεσματικότητα. Τα αυτόνομα ρομπότ μπορούν να σχεδιαστούν για να περπατούν, να τρέχουν, να

πηδούν, να πετούν κ.λπ. Διατίθεται ως τροχοφόρο, πεζό ή υβριδικό. Τα ρομπότ με τροχούς είναι κατάλληλα για χρήση στο έδαφος, ενώ τα πόδια και τα αρθρωτά σώματα απαιτούν μεγαλύτερη μηχανική πολυπλοκότητα. Οι τροχοί είναι, ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος μηχανισμός κίνησης λόγω της αποτελεσματικότητάς τους, της απλότητας και της ευκολίας ελέγχου τους, αλλά παρουσιάζουν περιορισμούς όταν διασχίζουν εμπόδια [23].

Πρόσφατες εξελίξεις στη ρομποτική όραση για αυτόνομα ρομπότ

Τα αυτόνομα ρομπότ απαιτούν τεχνολογίες τρισδιάστατης αντίληψης προκειμένου να πλοηγούνται και να ελέγχουν αντικείμενα σε άγνωστα περιβάλλοντα. Προκειμένου να ολοκληρώσουν αυτόνομα τις εργασίες και να παρουσιάσουν μια ευανάγνωστη απεικόνιση του περιβάλλοντος, τα συστήματα όρασης για την καθοδήγηση των ρομπότ απαιτούν συνήθως τρισδιάστατες πληροφορίες. Η απόκτηση τρισδιάστατων πληροφοριών απαιτεί πρώτα τον καθορισμό της αντιστοίχισης μεταξύ τρισδιάστατων σημείων και συντεταγμένων εικόνας 2D, η οποία είναι γνωστή ως βαθμονόμηση της κάμερας. Ένα δημοφιλές μοντέλο για τη μοντελοποίηση της προοπτικής προβολής των παγκόσμιων συντεταγμένων στο επίπεδο εικόνας είναι το μοντέλο της κάμερας pinhole (κάμερα μικροσκοπικής οπής) [24].

Η πλοήγηση κινητών ρομπότ και η χαρτογράφηση πλέγματος κατάληψης, που απαιτούν επεξεργασία δεδομένων όρασης σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιούν στερεοσκοπική όραση. Υλοποιείται με επιτυχία από ένα ρομπότ που χρησιμοποιεί χαρτογράφηση πλέγματος κατάληψης και στερεοσκοπική όραση με βάση τη συσχέτιση για να διασχίζει και να εξερευνήσει νέες και δυναμικές εσωτερικές συνθήκες. Στη χαρτογράφηση στερεοσκοπικής όρασης μπορεί να προκύψουν σφάλματα, ιδίως κατά την αναγωγή τρισδιάστατων δεδομένων σε δισδιάστατα, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε αιχμές [25].

Τεχνικές εξελίξεις που έχουν προαναφερθεί όπως τα συνεπτυγμένα νευρωνικά δίκτυα (CNNs), οι τρισδιάστατες κάμερες, οι κάμερες ανίχνευσης βάθους, η αναγνώριση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο καθώς και η σημασιολογική κατάτμηση μπορούν να εξοπλίσουν το υπόβαθρο της ρομποτικής όρασης των αυτόνομων ρομπότ.

Εφαρμογές της ρομποτικής όρασης σε διάφορες βιομηχανίες

Για τα αυτόνομα ρομπότ που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές παραγωγής, η ρομποτική όραση είναι απαραίτητη. Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, τα συστήματα όρασης χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την αναγνώριση αντικειμένων, επιτρέποντας στα ρομπότ να εντοπίζουν και να αναγνωρίζουν λειτουργικά μέρη. Για ακριβή εντοπισμό θέσης και πλοήγηση, τα συστήματα καθοδήγησης ρομπότ χρησιμοποιούν τεχνικές όρασης όπως η φωτογραμμετρία, η στερεοσκοπική όραση, ο χρόνος πτήσης, το δομημένο φως και ο τριγωνισμός με λέιζερ. Οι τεχνικές μηχανικής όρασης χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες επιθεώρησης και ποιοτικού ελέγχου για τη διασφάλιση της ποιότητας των προϊόντων και την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων. Η βαθμονόμηση της θέσης του ρομπότ, η συλλογή κάδων, η ανακατασκευή αντικειμένων και η ανακατασκευή περιβάλλοντος είναι μεταξύ των εργασιών που χρησιμοποιούν τη ρομποτική όραση. Τα προγράμματα αυτά βελτιώνουν τις ικανότητες των ανεξάρτητων ρομπότ, επιτρέποντάς τους να συνεργάζονται με ανθρώπους και να απομακρύνουν εμπόδια στο χώρο εργασίας [24].

Η αυτοματοποίηση νέων αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη γεωργική παραγωγή. Οι έρευνες έχουν εστιάσει στη χρήση εικόνας για τον εντοπισμό των γραμμών της καλλιέργειας, αντί για την ακριβή GNSS(Global Navigation Satellite Systems) τεχνολογία. Οι περισσότερες μέθοδοι που βασίζονται στην εικόνα λειτουργούν με πράσινες σειρές και πιο σκούρο έδαφος, αλλά απαιτούνται μέθοδοι που να λειτουργούν σε οπτικά απαιτητικά χωράφια, όπου το άχυρο αποτελεί το μόνο στοιχείο πλοήγησης. Μια νέα τεχνική βασίζεται στη μονοφθαλμική όραση και εκτιμά την κυρίαρχη παράλληλη επίπεδη υφή σε μια προσομοιωμένη υπερυφή. Η τεχνική αυτή υποθέτει ότι οι καλλιέργειες σπέρνονται σε ευθείες σειρές, κάτι το οποίο είναι τυπικό στη γεωργία ευρείας έκτασης. Πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε αγρούς ευρείας έκτασης με τη χρήση ενός ρομποτικού συστήματος σχεδιασμένου για τον ψεκασμό ζιζανίων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την απόδοση της γεωργίας [26].

Η χρήση ρομποτικών συστημάτων έχει επιτρέψει την παρακολούθηση και μέτρηση περιβαλλοντικών διεργασιών σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως αέριους, χερσαίους και θαλάσσιους οικοτόπους. Αυτό έχει διευκολύνει τον εντοπισμό των πηγών ρύπανσης στον αέρα και τα ύδατα και έχει επιτρέψει τη χαρτογράφηση των περιβαλλοντικών συνθηκών. Υπάρχουν επίσης ρομπότ που χρησιμοποιούνται για την εντοπισμό χημικών πλουμίων και για τη συνεχιζόμενη παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Αυτές οι τεχνολογίες

έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για την καταγραφή φυσικών οικοτόπων και τη δημιουργία γεωγραφικών χαρτών με υψηλή ανάλυση, καθώς και για την παρακολούθηση των υδρόβιων ζωνών, την αξιολόγηση της υγείας της γεωργίας και τον έλεγχο του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν συμβάλει στην καλύτερη παρακολούθηση και προστασία του περιβάλλοντος [27].

Η ρομποτική όραση είναι απαραίτητη για αυτόνομα ρομπότ που χρησιμοποιούνται σε κατασκευαστικές εφαρμογές. Η αυτόνομη ρομποτική συναρμολόγηση με την καθοδήγηση από την όραση επιτρέπει την αναγνώριση και τη συλλογή οικοδομικών υλικών, όπως τούβλα και μπλοκ, τα οποία συνήθως είναι στοιβαγμένα τυχαία στον χώρο. Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν για αυτήν την ρομποτική συναρμολόγηση αναγνωρίζουν τα δομικά στοιχεία και δημιουργούν τοπικά πλαίσια αναφοράς, χρησιμοποιώντας οπτικούς δείκτες και μία μόνο κάμερα. Τα ρομποτικά συστήματα μπορούν επίσης να καταγράψουν την πρόοδο της κατασκευής ή να δημιουργούν μοντέλα πληροφοριών κτιρίου (BIM), χρησιμοποιώντας τρισδιάστατες κάμερες για να καταχωρίσουν τρισδιάστατα νέφη σημείων. Η ακρίβεια της εκτίμησης της στάσης αυξάνεται με την ενσωμάτωση της αντίληψης της κάμερας και τη σύντηξη αισθητήρων, ενώ η ασφάλεια του ρομποτικού συστήματος κατά την συνεργασία με τους ανθρώπινους εργάτες βελτιώνεται μέσω της τρισδιάστατης αντίληψης [28].

Τέλος, τα κινητά ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξελιγμένες συνεργατικές εργασίες και ως ρομπότ ασφαλείας, όπως το Mobile Detection Assessment and Response System (MDARS), το RoboGuard, το Airport Night Surveillance Expert Robot (ANSER) και το MARVIN [29].

Κεφάλαιο 3

Παρακολούθηση διαδρομής

Επεξήγηση τεχνικών παρακολούθησης διαδρομής

Η ρομποτική, η αυτόνομη οδήγηση και άλλες συναφείς βιομηχανίες χρησιμοποιούν αλγόριθμους παρακολούθησης διαδρομής για να κατευθύνουν τα συστήματα κατά μήκος μιας προκαθορισμένης διαδρομής. Αυτές οι μέθοδοι εγγυώνται ότι ένα ρομπότ ή όχημα μπορεί να κινηθεί μεταξύ δύο τοποθεσιών τηρώντας μια προκαθορισμένη διαδρομή. Ακολουθούν ορισμένες τυπικές προσεγγίσεις παρακολούθησης διαδρομής.

Χρησιμοποιώντας τεχνικές παρακολούθησης διαδρομής, ένα ρομπότ κινείται κατά μήκος μιας προκαθορισμένης διαδρομής. Ο ελεγκτής **PID (Proportional Integral Derivative)**, ένας ελεγκτής ανατροφοδότησης που χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορα συστήματα, συμπεριλαμβανομένης της ρομποτικής και του αυτοματισμού, είναι μια συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος. Ο ελεγκτής PID μειώνει το σφάλμα μεταξύ της προβλεπόμενης τροχιάς και της πραγματικής διαδρομής που ακολουθείται συνδυάζοντας αναλογικές, ολοκληρωτικές και παράγωγες λειτουργίες ελέγχου.

Σύμφωνα με το τρέχον σφάλμα, η αναλογική ενέργεια ελέγχου τροποποιεί την έξοδο και η παράγωγη ενέργειας ελέγχου προβλέπει τα επερχόμενα σφάλματα με βάση τον ρυθμό μεταβολής του σφάλματος. Ο ελεγκτής PID έχει απλή και αξιόπιστη κατασκευή και συχνά παράγει εξαιρετικά αποτελέσματα απόδοσης [30].

Η πιο δημοφιλής και αποτελεσματική γεωμετρική μέθοδος για την παρακολούθηση διαδρομής είναι ο αλγόριθμος **pure-pursuit**. Για τα κινητά

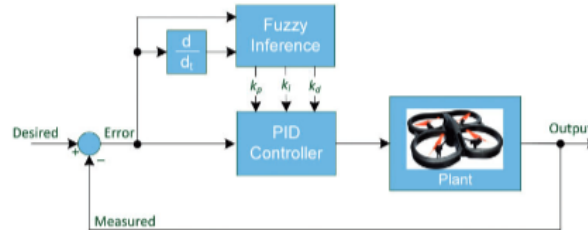


Figure 7: Βασική δομή του αλγορίθμου αυτορυθμιζόμενου ασαφούς ελέγχου PID, αναλογική ολοκληρωτική παράγωγος [31].

ρομπότ, υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες διαδρομών: οι ρητές και οι σιωπηρές. Ενώ οι σιωπηρές διαδρομές καθορίζονται από χαρακτηριστικά που είναι ορατά στο περιβάλλον, οι ρητές διαδρομές ορίζονται από συντεταγμένες σημείων διαδρομής ή παραμετρικές καμπύλες. Εξάγοντας κρίσιμες πληροφορίες από τα δεδομένα των αισθητήρων, η αντιδραστική πλοήγηση μειώνει την πολυπλοκότητα της επεξεργασίας. Το όχημα καθοδηγείται κατά μήκος της διαδρομής με εντολές ταχύτητας και διεύθυνσης που παράγονται από ελεγχτές παρακολούθησης διαδρομής.

Με βάση μια δεδομένη απόσταση look-ahead, το Pure-pursuit προσδιορίζει την τρέχουσα θέση του οχήματος και ένα σταθερό σημείο της διαδρομής. Η θέση και ο προσανατολισμός του σημείου look-ahead χρησιμοποιούνται στη διανυσματική καταδίωξη, η οποία βασίζεται στη θεωρία των βιδών. Στην CF-pursuit, αντί για κύκλους χρησιμοποιούνται καμπύλες clothoid C και χρησιμοποιείται μια ασαφής μέθοδος για να ληφθεί υπόψη η καμπυλότητα της διαδρομής κατά τον προσδιορισμό της απόστασης look-ahead [32].

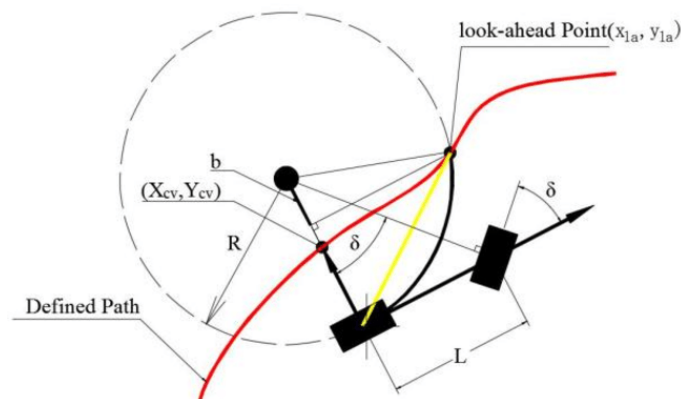


Figure 8: Γεωμετρική εξήγηση του Pure Pursuit[33].

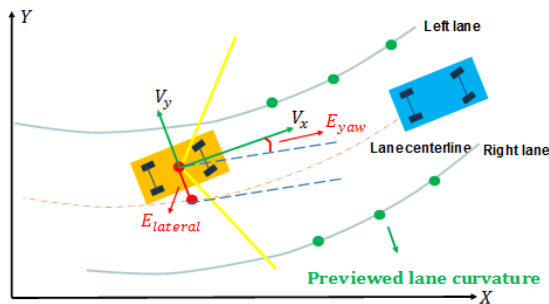


Figure 9: Προσομοίωση ελέγχου παρακολούθησης διαδρομής με τη χρήση προσαρμοστικού ελεγκτή πρόβλεψης μοντέλου - Simulink [34].

βάση την παρούσα κατάσταση του και τις εισροές ελέγχου. Στη συνέχεια, βελτιστοποιεί τις εισροές ελέγχου για την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους που αντικατοπτρίζει την απόκλιση από την επιθυμητή διαδρομή.

Για την ενίσχυση της παρακολούθησης διαδρομής σε δύσκολες εξωτερικές συνθήκες, η τεχνική Learning-based Nonlinear Model Predictive Control (LB-NMPC) συνδυάζει τον MPC με ένα μαθησιακό μοντέλο διαταραχών διαδρομών, στον αλγόριθμο χρησιμοποιείται ένα απλό μοντέλο οχήματος. Ο αλγόριθμος παρέχει παρεμβολή και παρέκταση των διαταραχών που μαθαίνονται με τη μοντελοποίηση των διαταραχών, επιτρέποντας στο ρομπότ να προσαρμόζεται και να μειώνει τα σφάλματα παρακολούθησης της διαδρομής με βάση την προηγούμενη εμπειρία [35].

Η ακριβής παρακολούθηση διαδρομής, η σταθερότητα στο σύστημα διεύθυνσης και η υπολογιστική αποτελεσματικότητα, επιτυγχάνεται μέσω της τεχνικής ελέγχου του γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή LQR. Στον LQR χρησιμοποιείται ένας διακριτός ελεγκτής με στοιχεία τροφοδότησης και ανατροφοδότησης και κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας το μοντέλο σφάλματος της πλευρικής δυναμικής του οχήματος. Μια μέθοδος ασαφούς ελέγχου που λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του οχήματος χρησιμοποιείται για την ενημέρωση των συντελεστών βάρους του LQR σε πραγματικό χρόνο, ενώ ένας μηχανισμός ενημέρωσης με βάση την ομοιότητα συνημίτονου τίθεται σε εφαρμογή για τη μείωση του υπολογιστικού φορτίου του ελεγκτή [36].

Η ρομποτική χρησιμοποιεί τον Έλεγχο Πρόβλεψης Μοντέλου (MPC), μια προσέγγιση ελέγχου που βελτιστοποιεί συνεχώς τις εισροές ελέγχου με βάση ένα μοντέλο πρόβλεψης του συστήματος, για την παρακολούθηση μιας επιθυμητής διαδρομής. Στο πλαίσιο της παρακολούθησης της διαδρομής του ρομπότ, ο MPC συνεπάγεται την πρόβλεψη των μελλοντικών καταστάσεων του ρομπότ με

Πρόσφατες εξελίξεις στην παρακολούθηση της διαδρομής

Προκειμένου να μεγιστοποιήσει ένα αθροιστικό σήμα ανταμοιβής, ένας πράκτορας μαθαίνει να λαμβάνει αποφάσεις και να εκτελεί ενέργειες σε ένα περιβάλλον χρησιμοποιώντας τη μέθοδο **ενισχυτικής μάθησης**. Ο πράκτορας αλληλεπιδρά με το περιβάλλον, λαμβάνει ανατροφοδότηση με τη μορφή ανταμοιβών ή ποινών και στη συνέχεια τροποποιεί τις δραστηριότητές του, ώστε να μεγιστοποιήσει την αναμενόμενη μακροπρόθεσμη αμοιβή. Πρόκειται για μια διαδικασία μάθησης, δοκιμής και σφάλματος. Η εξερεύνηση συνεπάγεται την απόπειρα διαφόρων συμπεριφορών για να μάθει περισσότερα για το περιβάλλον, ενώ η εκμετάλλευση συνεπάγεται την εφαρμογή της αποκτηθείσας γνώσης για να καταλήξει στις καλύτερες αποφάσεις και να μεγιστοποιήσει τη συνολική απόδοση. Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται συχνά ως μέσα προσέγγισης σε αλγόριθμους ενισχυτικής μάθησης, όπου μαθαίνουν να αντιστοιχίζουν καταστάσεις σε ενέργειες με βάση τις παρατηρούμενες ανταμοιβές και την ανατροφοδότηση του περιβάλλοντος. Ο συνδυασμός νευρωνικών δικτύων και ενισχυτικής μάθησης έχει επιτύχει σε διάφορους τομείς, όπως τα παιχνίδια, η ρομποτική και τα αυτόνομα συστήματα, όπου οι πράκτορες μπορούν να μάθουν να λαμβάνουν αποφάσεις και να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους με βάση τις ανταμοιβές και την ανατροφοδότηση του περιβάλλοντος [37].

Ένας αλγόριθμος ενισχυτικής μάθησης που ονομάζεται **Deep Q-Learning** χρησιμοποιεί βαθιά νευρωνικά δίκτυα για την προσομοίωση της συνάρτησης δράσης-αξίας ενός πράκτορα (συνάρτηση Q). Τα προβλεπόμενα μελλοντικά οφέλη για κάθε ενέργεια που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε μια συγκεκριμένη κατάσταση αναπαρίστανται από τη συνάρτηση Q. Η βαθιά Q-μάθηση μπορεί να χειριστεί χώρους καταστάσεων υψηλών διαστάσεων χρησιμοποιώντας ένα βαθύ νευρωνικό δίκτυο ως προσεγγιστή συνάρτησης. Ο πράκτορας μαθαίνει στη βαθιά Q-μάθηση αλληλεπιδρώντας με το περιβάλλον, εξετάζει την κατάσταση σε κάθε βήμα και επιλέγει μια ενέργεια με βάση την πιο πρόσφατη εκτίμηση της συνάρτησης Q. Μετά από αυτό, ο πράκτορας ανταμείβεται και μετακινείται σε μια νέα κατάσταση. Στόχος του πράκτορα είναι να ανακαλύψει την καλύτερη πορεία δράσης ή την πορεία δράσης που μεγιστοποιεί την προβλεπόμενη αθροιστική ανταμοιβή με την πάροδο του χρόνου [38].

Έχει παρουσιαστεί μια στρατηγική ελέγχου για τον έλεγχο παρακολούθησης της τροχιάς των βιομηχανικών ρομποτικών χειριστών που ονομάζεται έλεγχος ολίσθησης με οπισθοδρόμηση (backstepping global fast terminal sliding mode control). Για την ενίσχυση της δυναμικής απόδοσης,

της γρήγορης σύγκλισης και της σταθερότητας του συστήματος ελέγχου, ενσωματώνει τις ιδέες του ελέγχου ολίσθησης (SMC), του τερματικού SMC (TSMC), του ελέγχου backstepping και του ελέγχου ολισθαίνοντος τρόπου λειτουργίας υψηλής τάξης (HOSMC) [39].

Εφαρμογές της παρακολούθησης διαδρομής σε διάφορες βιομηχανίες

Η ικανότητα ενός συστήματος να πλοηγείται κατά μήκος μιας προκαθορισμένης διαδρομής και η παρακολούθηση διαδρομής, έχουν πολλές χρήσεις σε διάφορους κλάδους. Πρόκειται για μια πολύ χρήσιμη τεχνολογία για την εφοδιαστική και τις μεταφορές.

Ένα βασικό στοιχείο της τεχνολογίας **αυτόνομων οχημάτων** είναι η παρακολούθηση διαδρομής, η οποία συνεπάγεται τον προσδιορισμό της και την παρακολούθηση της καλύτερης διαδρομής για τα αυτόνομα οχήματα στα οδικά δίκτυα.

Η ακολουθία διαδρομής στα αυτόνομα οχήματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της συνολικής αποτελεσματικότητας και τη βελτιστοποίηση της ροής της κυκλοφορίας. Επίσης μπορούν να ακολουθηθούν πρότυπα κυκλοφορίας βέλτιστου συστήματος και ισορροπίας χρηστών με τη χρήση σχημάτων μικροπροσομοίωσης με βάση τους πράκτορες για την ενσωμάτωση αυτόνομων οχημάτων και μη. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί στον έλεγχο της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Τα αυτόνομα οχήματα έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τα έξοδα μεταφοράς και να βελτιώσουν την προσβασιμότητα για νοικοκυριά με χαμηλό εισόδημα και άτομα με προβλήματα κινητικότητας. Μπορούν επιπλέον να καλύψουν τις ανάγκες μεταφοράς ηλικιωμένων, ανάπηρων και εφήβων που δεν μπορούν να οδηγήσουν, προσφέροντάς τους κινητικότητα [40].



Figure 10: Παράδοση φαγητού με drone [41].

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη

(drones) χρησιμοποιούνται εκτενώς σε υλικοτεχνικές εργασίες για να μπορούν να προγραμματιστούν ώστε να ακολουθούν μια τροχιά ή ένα σύνολο οδηγιών ώστε να εκτελούν γρήγορα και με ακρίβεια διάφορες δραστηριότητες. Η

παρακολούθηση διαδρομής είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν πρόκειται για εμπορευματικές μεταφορές, καθώς τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παράδοση αντικειμένων και εξαρτημάτων που χρειάζονται επειγόντως. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα ακόμη και σε μέρη χωρίς οδικό ή σιδηροδρομικό δίκτυο, καθώς μπορούν να ακολουθούν μια προκαθορισμένη διαδρομή. Μπορούν να μετακινούνται αποτελεσματικά γύρω από αποθήκες ή κέντρα διανομής χρησιμοποιώντας την παρακολούθηση διαδρομής στην εσωτερική εφοδιαστική, αυτό τους επιτρέπει να ακολουθούν προσχεδιασμένες διαδρομές και να εκτελούν εργασίες όπως ο έλεγχος αποθεμάτων με την χρήση αισθητήρων και ετικετών RFID (Radio Frequency Identification), δηλαδή η ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνότητας. Έτσι μπορούν να ανακαλύψουν και να εντοπίσουν τα αποθηκευμένα εμπορεύματα σε εξωτερικές ρυθμίσεις διαχείρισης αποθεμάτων [42].

Οι αλγόριθμοι παρακολούθησης διαδρομής χρησιμοποιούνται από αυτόνομα πλοία για την πλοήγηση και την παρακολούθηση μιας προκαθορισμένης πορείας. Για να είναι οι θαλάσσιες μεταφορές ασφαλείς και αποτελεσματικές, οι αλγόριθμοι αυτοί είναι απαραίτητοι. Τα μη επανδρωμένα οχήματα επιφανείας (USV) στο στρατό, την ακτοφυλακή και την ωκεάνια έρευνα χρησιμοποιούν όλα την παρακολούθηση διαδρομής. Στις θαλάσσιες μεταφορές, η παρακολούθηση διαδρομής αποτελεί ζωτικής σημασίας παράγοντα για την αύξηση της ασφάλειας και τη μείωση των δαπανών. Τα πλοία που είναι αυτόνομα μπορούν να ελίσσονται με μεγαλύτερη ασφάλεια αποφεύγοντας συγκρούσεις και κάνοντας ακριβείς στροφές. Η αποτελεσματική παρακολούθηση της διαδρομής διευκολύνεται από τον προγραμματισμό της μετάδοσης δεδομένων, τον σχεδιασμό της δομής του λογισμικού, τον προγραμματισμό εργασιών και τον καθορισμό προτεραιοτήτων που απαιτούνται για την ανάπτυξη λογισμικού ελέγχου για αυτόνομα πλοία. Τα πλοία αυτά, χρησιμοποιούν επίσης αλγόριθμους παρακολούθησης

διαδρομής για τη λήψη αποφάσεων. Όταν έρχονται αντιμέτωποι με δύσκολες επιλογές, όπως το να πρέπει να αποφασίσουν μεταξύ της προσάραξης ή της σύγκρουσης με άλλο πλοίο, οι σχεδιαστές πρέπει να σκεφτούν πώς πρέπει να συμπεριφέρεται το πλοίο. Η διαδικασία ανάπτυξης αλγορίθμων για την αντιμετώπιση αυτών των δύσκολων ζητημάτων περιλαμβάνει την ανθρώπινη παρέμβαση [43].

Τα συστήματα αυτοματοποιημένων οδηγούμενων οχημάτων (AGV) χρησιμοποιούν συχνά αλγόριθμους παρακολούθησης διαδρομής για τη μεταφορά και την πλοήγηση. Στα συστήματα AGV, οι αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομής χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των συντομότερων διαδρομών και του σχετικού κόστους προκειμένου να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος στόχος. Για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ ενός σημείου εκκίνησης και ενός σημείου τερματισμού με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, όπως ο χρόνος ταξιδιού, η απόσταση ταξιδιού ή η κατανάλωση καυσίμων, χρησιμοποιείται η παρακολούθηση διαδρομής. Για τη σύνδεση των σημείων εκκίνησης και στόχου με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, χρησιμοποιούνται τεχνικές αναζήτησης γραφημάτων. Οι συγκρούσεις AGV με περιβαλλοντικά εμπόδια αποφεύγονται με τη χρήση αλγορίθμων αποφυγής συγκρούσεων, ανάλογα με τις ανάγκες πλοήγησης, χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι αποφυγής συγκρούσεων, όπως η μέθοδος ORCA και η μέθοδος Dynamic Windows [44].

3.1 Παρακολούθηση διαδρομής για ρομποτικά χέρια

Επεξήγηση της ακολουθίας διαδρομής για ρομποτικούς βραχίονες

Η ικανότητα ενός ρομπότ να παρακολουθεί και να ακολουθεί με ακρίβεια μια συγκεκριμένη τροχιά είναι γνωστή ως παρακολούθηση διαδρομής για ρομποτικούς βραχίονες. Για να λειτουργήσει αυτό, το ρομπότ πρέπει να κατανοεί τη μηχανική και την κινηματική του βραχίονα του, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο οι ροπές των αρθρώσεων μεταφράζονται σε κίνηση. Η αντίστροφη δυναμική είναι η διαδικασία μετάφρασης ενός προβλεπόμενου μοτίβου κίνησης στις εντολές ενεργοποιητών που απαιτούνται για την επίτευξη της κίνησης αυτής.

Η εξάσκηση και η παρατήρηση των δικών του λαθών θα βοηθήσει το ρομπότ να γίνει πιο ικανό στο να ακολουθεί τροχιές. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι παράγει τη σωστή εντολή μόνο για μια μοναδική τροχιά-ωστόσο, τώρα γίνονται εργασίες για την αλλαγή της εντολής για παρόμοιες τροχιές [45].

Παραδοσιακά, οι ρομποτικοί χειριστές έχουν κατασκευαστεί με έμφαση στη μεγιστοποίηση της ακαμψίας, η οποία μπορεί να περιορίσει την ταχύτητα και να αυξήσει την κατανάλωση ενέργειας, αλλά μπορεί επίσης να βοηθήσει στην επίτευξη καλύτερης ακρίβειας θέσης. Παρόλο που οι ευέλικτοι ρομποτικοί χειριστές έχουν πλεονεκτήματα, όπως μειωμένο κόστος, ταχύτερες λειτουργίες και λιγότερη κατανάλωση ενέργειας, έχουν επίσης προβλήματα κραδασμών λόγω της χαμηλής δυσκαμψίας τους. Διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση, τον έλεγχο και την πειραματική έρευνα στο πλαίσιο της δυναμικής ανάλυσης των εύκαμπτων χειριστών, η οποία περιλαμβάνει την εξέταση της συμπεριφοράς τόσο της ευκαμψίας των συνδέσμων όσο και των αρθρώσεων. Δυναμικά μοντέλα και συστήματα ελέγχου, έχουν αναπτυχθεί από ερευνητές, για εύκαμπτους χειριστές με διάφορους τύπους αρθρώσεων όπως περιστροφικές και πρισματικές αρθρώσεις. Για ρομποτικούς χειριστές πολλαπλών συνδέσμων, αξιοποιούνται δυναμικές εξισώσεις κίνησης που ενσωματώνουν μεταβλητές όπως η βαρύτητα με τη χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων ενέργειες παραμόρφωσης και φαινόμενα απόσβεσης [46].

Ο τελικός επενεργητής

είναι ένα είδος ρομποτικής συσκευής που χρησιμοποιείται στη φυσική ιατρική και την αποκατάσταση, ειδικά για των άνω και κάτω άκρων. Μαζί με τους εξωσκελετούς, αποτελεί μία από τις δύο κύριες κατηγορίες ρομποτικού εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται στην αποκατάσταση. Οι τρόποι λειτουργίας, ο βαθμός βοήθειας, οι βαθμοί ελευθερίας και οι κινήσεις που εκτελούνται από τα end-effectors είναι αυτά που τα καθορίζουν. Βελτιστοποιώντας τη συγγενή είσοδο από τις

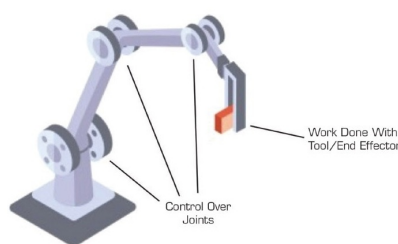


Figure 11: Οι τελικοί επενεργητές εκτελούν την εργασία, ενώ οι αρθρώσεις ελέγχονται, γεγονός που δημιουργεί μια εξαιρετικά πολύπλοκη σχέση μεταξύ των δύο [47].

περιφερειακές αρθρώσεις, μεγιστοποιούν τη λειτουργική αποκατάσταση διεγείροντας το κεντρικό νευρικό σύστημα με τρόπο που να ανταποκρίνεται στην εργασία. Όσον αφορά την αποκατάσταση της δύναμης, της ταχύτητας και της αντοχής, οι ασθενείς που χρησιμοποίησαν end-effectors σε αντίθεση με τους σταθερούς εξωσκελετούς είχαν μεγαλύτερα αποτελέσματα, σύμφωνα με πρόσφατες κλινικές μελέτες. Ωστόσο, οι μελέτες αυτές συχνά δεν λαμβάνουν υπόψη την ποιότητα της κίνησης [48].

Διαφορετικοί αλγόριθμοι παρακολούθησης διαδρομής

Πολλά συστήματα, ιδίως οι τελικοί τελεστές, χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο ελέγχου **PID** (proportional-integral-derivative) για τον συντονισμό και τον έλεγχο του βρόχου. Υπάρχουν τρεις θεμελιώδεις τρόποι σε αυτόν: παράγωγος, ολοκλήρωμα και αναλογικός. Η συγκεκριμένη εφαρμογή και η επιδιωκόμενη απόκριση ελέγχου καθορίζουν ποιος από τους τρεις τρόπους - P, I ή D - θα χρησιμοποιηθεί και ποιες παράμετροι θα ρυθμιστούν. Ο στόχος είναι η αντιστοίχιση ενός βέλτιστου προφίλ απόκρισης για το σύστημα κλειστού βρόχου κατά τη λεπτομερή ρύθμιση ενός αλγορίθμου PID. Μπορούν να επιτευχθούν διάφορα προφίλ απόκρισης με βάση τις ρυθμίσεις του ελεγκτή και τη δυναμική της διεργασίας. Μια μοναδιαία μεταβολή του σημείου ρύθμισης συνοδεύεται συνήθως από αποκρίσεις του συστήματος με υποαπόσβεση και υπεραπόσβεση. Μια μέθοδος ρύθμισης βάσει μοντέλου για τον έλεγχο του τελικού τελεστή είναι η άμεση σύνθεση. Συνεπάγεται την εφαρμογή ενός χαρακτηριστικού απόκρισης κλειστού βρόχου που καθορίζεται από τον χρήστη σε συνδυασμό με ένα αναγνωρισμένο μοντέλο διεργασίας. Αυτή η μέθοδος ρίχνει φως στη λειτουργία του μοντέλου στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου, ωστόσο μπορεί να απαιτήσει μια κατάλληλη μορφή μοντέλου προκειμένου να συντεθεί ο κανόνας ελέγχου. Η καθυστέρηση της διαδικασίας είναι μία από τις μεταβλητές που επηρεάζουν το πόσο καλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στρατηγικές συντονισμού του ελέγχου του τελικού φορέα. Θα μπορούσαν να αναμένονται μεγαλύτερα κέρδη ελεγκτών εάν η καθυστέρηση της διαδικασίας είναι ελάχιστη. Αλλά η τεχνική μπορεί να μην λειτουργεί σε συστήματα με πολύ μικρή ή καθόλου χρονική καθυστέρηση [49].

Η προσέγγιση για τη δημιουργία μιας **χρονικά βέλτιστης τροχιάς** για ρομποτικούς βραχίονες ακολουθεί μια καθορισμένη διαδρομή στο χώρο των αρθρώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τα όρια επιτάχυνσης και ταχύτητας των αρθρώσεων. Μια δεδομένη εξίσωση καθορίζει τη διαμόρφωση του ρομποτικού βραχίονα σε ένα συγκεκριμένο σημείο κατά μήκος της διαδρομής. Για τη βελτίωση των δυνατοτήτων παρακολούθησης της διαδρομής, προστίθενται

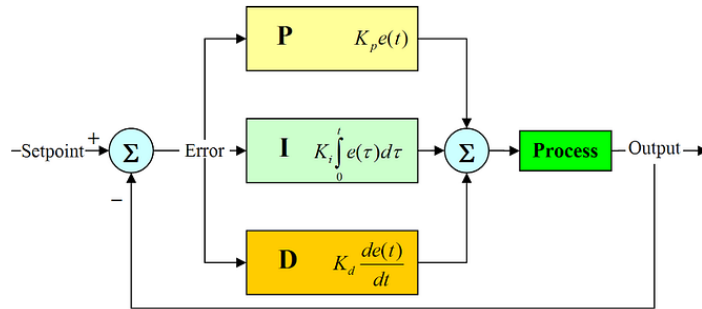


Figure 12: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου. Έλεγχος PID(Proportional-Integral-Derivative) [50].

κυκλικά μείγματα σε μη διαφοροποιήσιμες διαδρομές για να τις καταστήσουν διαφοροποιήσιμες [51].

Δεδομένης της καταλληλότητάς του για δύσκολα θέματα ελέγχου πολυμεταβλητών διεργασιών, ο **έλεγχος πρόβλεψης μοντέλου (MPC)** είναι μια δυνητικά χρήσιμη τεχνική για την παρακολούθηση της διαδρομής του ρομποτικού βραχίονα. Οι τεχνικές παρακολούθησης διαδρομής χρησιμοποιούν την ισοδύναμη αναπαράσταση του πίνακα μεταφοράς για μηδενικές αρχικές συνθήκες και η παρακολούθηση χωρίς μετατόπιση απαιτεί την ικανοποίηση ορισμένων απαιτήσεων. Ορισμένοι αλγόριθμοι παρακολούθησης διαδρομής χρησιμοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση 2-norm, η οποία καθιστά δυνατή τη ρητή δήλωση του νόμου ελέγχου για την ανάλυση της σταθερότητας, της ευρωστίας και των μετρήσεων απόδοσης [52].

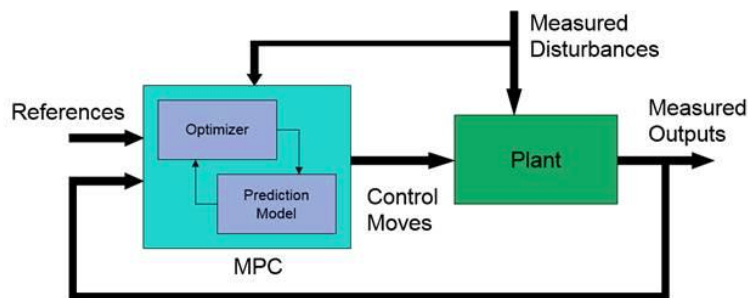


Figure 13: Βασικός βρόχος ελέγχου MPC[53].

Εφαρμογές της παρακολούθησης διαδρομής σε διάφορες βιομηχανίες

Σε κατασκευαστικές διαδικασίες όπως το φρεζάρισμα, η συγκόλληση και η μέτρηση υψηλής ακρίβειας, όπου είναι απαραίτητη η ακριβής τήρηση μιας προκαθορισμένης γεωμετρικής διαδρομής, χρησιμοποιούνται συχνά ρομποτικοί βραχίονες. Τα επαυξημένα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση προβλημάτων παρακολούθησης διαδρομής και πολυάριθμες μελέτες έχουν δείξει επιτυχείς υλοποιήσεις της παρακολούθησης διαδρομής σε πραγματικά συστήματα. Έχει καθιερωθεί προβλεπτικός έλεγχος ακολουθίας διαδρομής διακριτού χρόνου για την κίνηση των αξόνων x-y και έχουν εφαρμοστεί τεχνικές γεωμετρικής ακολουθίας διαδρομής σε ένα σύστημα μαγνητικής αιώρησης. Αν και έχουν δοθεί οι πρώτες μέθοδοι πρόβλεψης της ακολουθίας διαδρομής εξόδου, δεν έχουν ακόμη τεκμηριωθεί ελεγκτές πρόβλεψης ακολουθίας διαδρομής συνεχούς χρόνου [54].

Η αεροδιαστημική βιομηχανία χρησιμοποιεί ρομποτικούς βραχίονες που ακολουθούν τη διαδρομή για διάφορους σκοπούς, όπως η δοκιμή της τελικής συναρμολόγησης αεροσκαφών. Δημιουργήθηκε ένα ρομποτικό αυτοματοποιημένο κύτταρο τρισδιάστατης ανακατασκευής που επιτρέπει τον αυτόνομο σχεδιασμό της τροχιάς της ακραίας κάμερας του ρομπότ για την απόκτηση εικόνας και την τρισδιάστατη μοντελοποίηση της σκληρής λειτουργίας του πιλοτηρίου στο πλαίσιο της αυτόνομης τρισδιάστατης ανακατασκευής του πιλοτηρίου στις δοκιμές τελικής συναρμολόγησης αεροσκαφών. Για να εξασφαλιστεί η ασφαλής και αποτελεσματική κινητικότητα, ο αλγόριθμος σχεδιασμού τροχιάς βελτιστοποιεί τόσο την ποιότητα της διαδρομής του ρομπότ όσο και την ποιότητα της τρισδιάστατης ανακατασκευής [55].

Σε ιατρικές εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως η ενδοσκοπική καθοδήγηση με λέιζερ, ο μαγνητικός χειρισμός των μικροκαμπτήρων και η πλοήγηση χειρουργικών εργαλείων υπό ανατομικούς περιορισμούς, η παρακολούθηση της διαδρομής θεωρείται χρήσιμη τεχνική έλεγχου της κίνησης. Η παρακολούθηση διαδρομής επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο στη χειρουργική με λέιζερ διευκολύνοντας την αποσύνδεση της αλληλεπίδρασης των ιστών του λέιζερ από τους ανατομικούς περιορισμούς [56].

Πρόσφατες εξελίξεις στην παρακολούθηση διαδρομής για ρομποτικούς βραχίονες

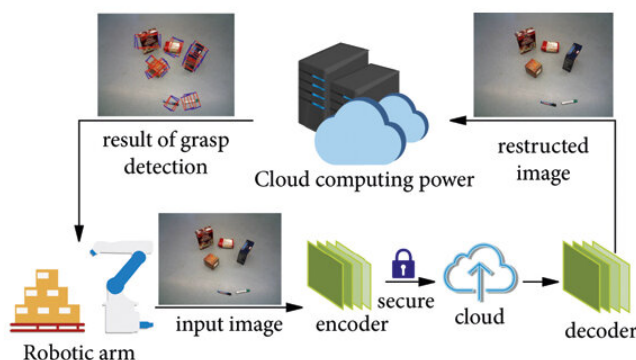


Figure 14: Ο ρομποτικός βραχίονας αποφορτίζει το έργο εντοπισμού τοπικής αρπαγής στο cloud. Το μοντέλο υλοποιεί ασφαλή και υψηλής πιστότητας μετάδοση μέσω αυτής της δομής κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή. Η εικόνα συλλέγεται τοπικά και μεταδίδεται στο cloud αφού συμπιεστεί. Η ανακατασκευασμένη εικόνα θα ληφθεί από τον αποκωδικοποιητή στο cloud. Αξιοποιείται η υπολογιστική νέφος ώστε να συμβάλλει στην ανίχνευση της σύλληψης και να αποδώσει αποτελέσματα στον ρομποτικό βραχίονα [57].

εξατομικευμένη θεραπεία χάρη στην ικανότητα των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης να αναλύουν δεδομένα και να κάνουν προβλέψεις. Μπορούν να επικοινωνούν, να συντονίζουν λειτουργίες και να προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα με τη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης, οι οποίες αποτελούν τον πυρήνα της ρομποτικής σμήνους, η οποία συντονίζει μεγάλες ομάδες ρομπότ [58].

Η χρήση υπολογιστικού νέφους για τον υπολογισμό διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων, βελτιώνει την ικανότητα των ρομποτικών βραχιόνων να ακολουθούν μια διαδρομή, επιτρέποντάς τους να έχουν απομακρυσμένη πρόσβαση και χρήση ισχυρών μοντέλων καθώς και αλγορίθμων. Τα ρομπότ μπορούν να μεταφέρουν λειτουργίες έντασης υπολογισμών στο νέφος χρησιμοποιώντας πλατφόρμες ρομποτικής νέφους όπως η Rapyuta, η οποία μπορεί να βελτιώσει τις ικανότητες παρακολούθησης διαδρομών. Η

Τα ρομπότ γίνονται όλο και πιο έξυπνα, αποτελεσματικά και ικανά να προσαρμόζονται σε μια ποικιλία απαιτητικών καθηκόντων και περιβαλλόντων λόγω των εξελίξεων στην τεχνητή νοημοσύνη, τη μηχανική μάθηση και τη βαθιά μάθηση. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εξελιγμένες εφαρμογές ρομποτικής, όπως η αυτόνομη πλοήγηση, ο χειρισμός και η αναγνώριση αντικειμένων.

Σε περιβάλλοντα υγειονομικής περίθαλψης, τα ρομπότ μπορούν πλέον να προσφέρουν πιο

συγκεκριμένη πλατφόρμα ρομποτικής νέφους ανοικτού κώδικα προσφέρει επίσης ένα παγκόσμιο αποθετήριο για μοντέλα αντικειμένων, χάρτες περιβάλλοντος και συνταγές δράσης που μπορούν να μοιραστούν και να αποθηκευτούν μεταξύ ρομποτικών πλατφορμών. Ένα δημοφιλές λειτουργικό σύστημα ανοικτού κώδικα που ονομάζεται Robot Operating System (ROS) διευκολύνει τη γρήγορη δημιουργία πρωτότυπων λογισμικού για ρομποτικές έρευνες.

Επιτρέποντας τη συνεργασία και την επικοινωνία μέσω ενός δικτύου, τα ρομπότ δικτύωσης μπορούν να ξεπεράσουν τα μειονεκτήματα των απομονωμένων ρομπότ. Για την ομαδική επικοινωνία μεταξύ των ρομπότ παρουσιάστηκε μια αρχιτεκτονική ανταλλαγής πληροφοριών που μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της επιβάρυνσης των μηνυμάτων και στην ενίσχυση των ικανοτήτων παρακολούθησης διαδρομής. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η παροχή ρομποτικών υπηρεσιών πολλαπλών τοποθεσιών για την υποστήριξη της ζωής, έχει δημιουργηθεί μια πρωτότυπη υποδομή για ρομποτική σε νέφος δικτύου [59].

3.2 Παρακολούθηση διαδρομής για αυτόνομα ρομπότ

Επισκόπηση των τεχνολογιών παρακολούθησης διαδρομής για αυτόνομα ρομπότ

Όταν ένα ρομπότ είναι αυτόνομο, η ικανότητά του να πλοηγείται και να ακολουθεί μια προκαθορισμένη πορεία χωρίς ανθρώπινη βοήθεια αναφέρεται ως αναπαράσταση διαδρομής. Ο προτεινόμενος έλεγχος παρακολούθησης διαδρομής συνδυάζει τη δημιουργία τροχιάς, την αποφυγή εμποδίων και τη βασική παρακολούθηση διαδρομής. Το ρομπότ χρησιμοποιεί τεχνικές ελέγχου ακολουθίας τοίχων και ασαφούς λογικής για την αποφυγή εμποδίων ενώ χρησιμοποιεί αισθητήρες υπερύθρων και υπερήχων για την ανίχνευσή τους. Με βάση τα χαρακτηριστικά ελιγμών ενός αυτοκινήτου, η δημιουργία τροχιάς επιδιώκει να παράγει την καταλληλότερη τροχιά προς την επιδιωκόμενη τελική θέση και πορεία. Μειώνοντας την τιμή σφάλματος των υποψήφιων τροχιών που παράγονται, βρίσκεται η καταλληλότερη διαδρομή. Ο προσανατολισμός του ρομπότ για το επόμενο βήμα καθορίζεται από αλγορίθμους αποφυγής εμποδίων με βάση την τοποθέτηση των εμποδίων, την παρούσα θέση του ρομπότ και την επιθυμητή τελική θέση. Οι αισθητήρες που είναι ελαφροί και

συμπαγείς είναι κατάλληλοι για μικροσκοπικά κινητά ρομπότ [60].

Η ικανότητα ενός ρομπότ να προσδιορίζει τη θέση και τον προσανατολισμό του μέσα στο περιβάλλον του είναι γνωστή ως "εντοπισμός" για τα αυτόνομα ρομπότ. Αποτελεί ουσιαστικό μέρος των αυτόνομων ρομπότ, καθώς τους επιτρέπει να κινούνται και να εμπλέκονται με το περιβάλλον τους. Για τον τοπικό σχεδιασμό διαδρομών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν γενετικοί αλγόριθμοι ώστε να πραγματοποιείται ο εντοπισμός των νόμιμων και ιδανικών διαδρομών του ρομπότ. Υπάρχουν δύο τύποι σχεδιασμού διαδρομής σε ένα έργο αυτόνομου κινητού ρομπότ: ο τοπικός σχεδιασμός διαδρομής και ο παγκόσμιος σχεδιασμός διαδρομής. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος σχεδιασμού διαδρομής τιμωρεί τις λύσεις που περιέχουν βήματα που δεν είναι δυνατά, χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση καταλληλότητας που εξετάζει τη σκοπιμότητα κάθε βήματος [61].

Διαφορετικές προσεγγίσεις για την παρακολούθηση της διαδρομής

1. Αλγόριθμοι

Για το σχεδιασμό της διαδρομής κινητών ρομπότ και την αποφυγή εμποδίων, έχει αναπτυχθεί η μέθοδος **Modified Vector Field Histogram (MVFH)** και ένα μοντέλο μάθησης Νευρωνικού Δικτύου. Επιτρέπει στο ρομπότ να κατευθύνεται προς τον προορισμό του και να αποφεύγει συγκρούσεις με την ανίχνευση άγνωστων εμποδίων. Το περιβάλλον εργασίας αναπαρίσταται από έναν τυπικό χάρτη πλέγματος, τον οποίο ο αλγόριθμος MVFH διαιρεί σε τομείς. Η πολική πυκνότητα εμποδίων (POD) είναι μια μοναδική τιμή που αποδίδεται σε κάθε τομέα και αντιπροσωπεύει το βαθμό εμπιστοσύνης στην παρουσία εμποδίων. Το Νευρωνικό Δίκτυο λαμβάνει τις τιμές POD ως εισόδους και εξάγει έναν δυαδικό δείκτη που δείχνει αν ένας τομέας είναι ελεύθερος ή όχι. Ένα ψηφιακό χαμηλοπερατό φίλτρο χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την ανθεκτικότητα της τροχιάς αποφυγής εμποδίων. Αυτό το φίλτρο, βοηθά στην εξομάλυνση της πορείας του ρομπότ μειώνοντας τον αποχρωματισμό που προκαλείται από θορυβώδη δεδομένα σόναρ. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε έδειξε ισχυρές δυνατότητες πλοήγησης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε απαιτητικά σενάρια του πραγματικού κόσμου, όπως περιβάλλοντα που μοιάζουν με λαβύρινθο. Ξεπερνά τους περιορισμούς των παραδοσιακών αλγορίθμων VFH, όπως οι περιορισμένοι διάδρομοι, οι μεγάλες υποψήφιες κοιλάδες και οι περιορισμοί απόστασης στόχου [62].

Ένας δημοφιλής αλγόριθμος σχεδιασμού διαδρομής με βάση τη δειγματοληψία για το σχεδιασμό κινήσεων ρομποτικής είναι ο αλγόριθμος **Rapidly Exploring Random Trees (RRT)**. Σκοπός του είναι η αποτελεσματική αναζήτηση του χώρου διαμόρφωσης και ο εντοπισμός βιώσιμων διαδρομών που θα μπορούσε να ακολουθήσει ένα ρομπότ. Προκειμένου να λειτουργήσει ο RRT, κατασκευάζεται σταδιακά μια δενδρική δομή, με κάθε κόμβο να αντιπροσωπεύει μια πιθανή διαμόρφωση του ρομπότ και τις ακμές να αντιπροσωπεύουν πιθανές κινήσεις μεταξύ των διαμορφώσεων. Ο χώρος αναζήτησης αυξάνεται σταδιακά, καθώς το πρόγραμμα λαμβάνει τυχαία δείγματα νέων διαμορφώσεων και προσπαθεί να τις συνδέσει με το τρέχον δέντρο. Το RRT είναι γνωστό για την ταχεία εξερεύνηση υψηλών διαστάσεων, περίπλοκων περιοχών, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εργασίες παρακολούθησης μονοπατιών [63].

Ακόμη ένας αλγόριθμος αφορά τη **δημιουργία τροχιών** για τροχοφόρα κινητά ρομπότ που μπορούν να χειριστούν το ανώμαλο έδαφος, τη δυναμική του οχήματος και τα μοντέλα αλληλεπίδρασης τροχού-εδάφους. Το πρόγραμμα παράγει τροχιές με αποτελεσματικότητα και γενικότητα χρησιμοποιώντας τεχνικές αριθμητικής γραμμικοποίησης και αντιστροφής. Μια αντικειμενική συνάρτηση με κριτήρια όπως η αποφυγή εμποδίων, το κόστος, ο κίνδυνος, ο χρόνος ή η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να βελτιστοποιηθεί από αυτό. Η προσέγγιση έχει αποδειχθεί για πλανητικά οχήματα και είναι αρκετά αποτελεσματική, ώστε να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Τρία επίπεδα συνθέτουν την αρχιτεκτονική του αλγορίθμου δημιουργίας τροχιάς, η οποία διαχωρίζει την πρόβλεψη κίνησης, τις τεχνικές προσομοίωσης οχήματος και την παραγωγή τροχιάς. Η προσέγγιση οχήματος είναι ανεξάρτητη, καθώς το μοντέλο του οχήματος ορίζεται εξωτερικά. Τα μοντέλα ολίσθησης των τροχών μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον αλγόριθμο για να ενισχύσουν τις τεχνικές εντοπισμού διαδρομής [64].

2. Σένσορες

Με τη δυνατότητα υπολογισμού του γεωγραφικού μήκους, του γεωγραφικού πλάτους, της ταχύτητας και της πορείας σε πραγματικό χρόνο για την αυτόνομη πλοήγηση αυτοκινήτων, τα συστήματα πλοήγησης με βάση το **GPS (Global Positioning System)** έχουν βρει ευρεία εφαρμογή στην πλοήγηση χερσαίων οχημάτων. Οι δέκτες GPS βοηθούν στην αυτόνομη πλοήγηση υπολογίζοντας τη θέση του ρομπότ στην επιφάνεια της Γης μέσω της λήψης σημάτων από ένα δίκτυο δορυφόρων GPS. Τα δεδομένα εντοπισμού θέσης για εξωτερικά περιβάλλοντα έχουν διορθωθεί μέσω της χρήσης

διαφορικών μετρήσεων GPS (DGPS) και οδομέτρων στην πλοήγηση βάσει χάρτη. Τα αυτόνομα συστήματα οχημάτων GPS είναι το αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης μονάδων GPS, πυξίδας, καταγραφικού δεδομένων, οθόνης υγρών κρυστάλλων LCD, κουμπιού και μικροελεγκτή Arduino. Στόχος της αυτόνομης πλοήγησης είναι η βελτίωση της ανθρώπινης άνεσης και της αποδοτικότητας των καυσίμων με τη βελτίωση του σχεδιασμού διαδρομής, της πρόβλεψης διαδρομής και της ευελιξίας σε δυναμικές συνθήκες [65].

Η προτεινόμενη τεχνολογία **LiDAR (Light Detection and Ranging)** μπορεί να δώσει στα αυτόνομα αυτοκίνητα καθαρές εικόνες μεγάλης εμβέλειας, ώστε να μπορούν να αναγνωρίζουν το περιβάλλον τους και να ακολουθούν μια διαδρομή. Τα συστήματα LiDAR, τα οποία αναγνωρίζουν τα πράγματα με τη χρήση τεχνολογίας λέιζερ, είναι απαραίτητα για την αντίληψη και τον εντοπισμό των αυτόνομων οχημάτων. Παράγοντες όπως το μήκος κύματος, η απόκλιση της δέσμης και η σκέδαση επηρεάζουν τη μέγιστη εμβέλεια και ανάλυση του LiDAR. Υπάρχουν παρεχόμενες εξισώσεις για τον προσδιορισμό της εμβέλειας, της μέγιστης εμβέλειας και της ανάλυσης εμβέλειας. Καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου επανάληψης των παλμών, το σύστημα LiDAR υπολογίζει συνεχώς την απόσταση με εξαιρετικά μικρό χρόνο αναμονής ακρόασης. Χρησιμοποιεί οπτική πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (OCDMA) για να κωδικοποιήσει έναν μοναδικό αριθμό αναγνώρισης σε κάθε παλμό λέιζερ που εκπέμπει, επιτρέποντάς του να εκπέμπει σε οποιαδήποτε γωνία παρατήρησης χωρίς να χρειάζεται να περιμένει παλμό επιστροφής [66].

Οι αλγόριθμοι που βασίζονται στο LiDAR μπορούν να προβλέψουν την πρόθεση ενός αντικειμένου καθώς και τα φυσικά και σημασιολογικά χαρακτηριστικά του. Η ακρίβεια στη μέτρηση της εμβέλειας, το καθαυτό ένα αξιόπιστο εργαλείο για τον προσδιορισμό των θέσεων, των προσανατολισμών και των μορφών των αντικειμένων. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής ανάλυσης και της έμφασης στη μέτρηση της απόστασης, είναι περιορισμένο ως προς την ικανότητά του να περιγράφει το σημασιολογικό περιεχόμενο. Αυτή η έλλειψη μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη συγχώνευση LiDAR και καμερών για τη βελτίωση της ανίχνευσης αντικειμένων. Διαδικασίες που περιλαμβάνουν την ανίχνευση αντικειμένων, την παρακολούθηση, την αναγνώριση και την πρόβλεψη κίνησης αποτελούν μέρος της επεξεργασίας δεδομένων LiDAR. Η συμβατική ροή επεξεργασίας των δεδομένων, μεταβάλλεται επίσης με την εφαρμογή της τεχνολογίας βαθιάς μάθησης [67].

Η προτεινόμενη μέθοδος για την παρακολούθηση της διαδρομής με βάση τα **συστήματα όρασης κάμερας** σε αυτόνομα ρομπότ κάνει χρήση μιας μόνο πρὸς τα εμπρός, έτοιμης κάμερας που δεν απαιτεί καμία βαθμονόμηση,

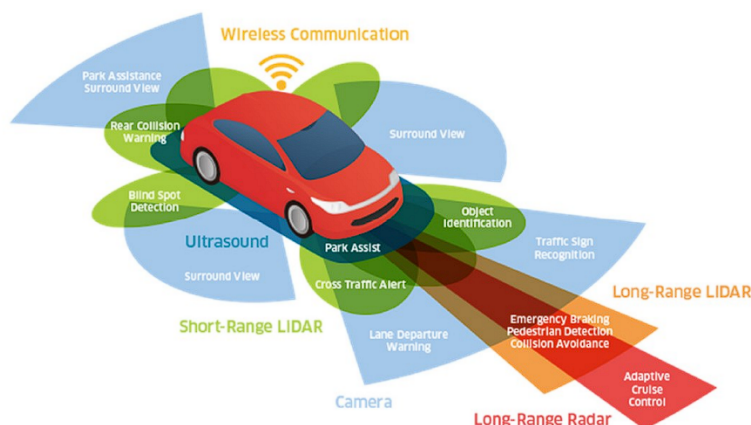


Figure 15: Διάγραμμα κάλυψης αισθητήρων για ένα αυτόνομο όχημα, που λήφθηκε με τη χρήση LiDAR-Based 3D Sensing [68].

ακόμη και για την παραμόρφωση του φακού. Ένα κέρδος ελεγκτή, ή η σιωπηρή βαθμονόμηση, είναι το μόνο που απαιτείται για το σύστημα. Συνδυάζοντας δεδομένα οδομετρίας με συντεταγμένες χαρακτηριστικών, αυξάνει την ισχύ. Ο αλγόριθμος έχει δοκιμαστεί με επιτυχία σε επίπεδο, επικλινές και βραχώδες έδαφος τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους, με δυναμικά αντικείμενα που εμποδίζουν αντικείμενα για εκατοντάδες μέτρα.

Με μερικές μικρές προσαρμογές, έχει επίσης αποδειχθεί ότι λειτουργεί με πανκατευθυντικές και ευρυγώνιες κάμερες. Οι συμβατικές μέθοδοι παρακολούθησης διαδρομής, όπως η οπτική σερβοποίηση, συχνά απαιτούν μείωση της παραμόρφωσης του φακού, βαθμονόμηση της κάμερας και υποθέσεις σχετικά με το περιβάλλον ή τον αισθητήρα. Αυτές οι μέθοδοι κάνουν χρήση της προσαρμογής δέσμης, της ομοιογραφίας, της Jacobian εικόνας και των τεχνικών θεμελιωδών πινάκων. Παρ' όλα αυτά, αυτές οι μέθοδοι ή τα τεκμήρια δεν χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο που δίνεται. Η ικανότητά του να ακολουθεί σωστά μια διαδρομή με διάφορες κάμερες, διατηρώντας τις ίδιες ρυθμίσεις από εκτέλεση σε εκτέλεση, δείχνει ότι δεν απαιτεί καμία βαθμονόμηση [69].

Πρόσφατες εξελίξεις στην παρακολούθηση διαδρομής για αυτόνομα ρομπότ

Τα αυτόνομα ρομπότ που χρησιμοποιούν αισθητήρες είναι σε θέση να εκτελούν πολύπλοκες, εξελιγμένες εργασίες λόγω της προσαρμοστικής συμπεριφοράς τους και της ευελιξίας τους να ανταποκρίνονται στις αλλαγές του περιβάλλοντός τους. Η βελτίωση των δυνατοτήτων ελέγχου της δύναμης

των αυτόνομων ρομπότ έχει μελετηθεί μέσω της ενσωμάτωσης αισθητήρων μέτρησης επιτάχυνσης και δύναμης. Παρουσιάστηκε μια στρατηγική παρατηρητή που βασίζεται σε μοντέλα για τον συνδυασμό δεδομένων από διαφορετικούς αισθητήρες, όπως είναι η δύναμη και τα επιταχυνσιόμετρα, όταν υπάρχει αλλαγή στην επαφή. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η βελτιωμένη απόδοση του ελέγχου δύναμης, προτάθηκε μια στρατηγική ελέγχου εμπέδησης. Με τον προσδιορισμό του συστήματος, οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε ένα ρομποτικό εργαλείο λείανσης με τους νέους αισθητήρες παρήγαγαν ένα μοντέλο του συστήματος [70].

Επειδή επιτρέπουν την ενσωμάτωση δεδομένων από πολυάριθμους αισθητήρες για τη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας στην πλοήγηση και τον εντοπισμό, οι τεχνικές σύντηξης αισθητήρων είναι απαραίτητες για την παρακολούθηση διαδρομής σε αυτόνομα ρομπότ. Οι τεχνικές σύντηξης αισθητήρων είναι χρήσιμες για την αντιμετώπιση προβλημάτων εντοπισμού, εκτίμησης και πλοήγησης κινητών ρομπότ. Οι αλγόριθμοι σύντηξης αισθητήρων μπορούν να προσφέρουν μια πιο εμπειριστατωμένη εικόνα του περιβάλλοντος του ρομπότ με τη συγχώνευση δεδομένων από πολλούς αισθητήρες, όπως κάμερες, LiDAR και αδρανειακούς αισθητήρες. Αυτό επιτρέπει βελτιωμένο σχεδιασμό διαδρομής και αποφυγή εμποδίων. Με την προεπεξεργασία των δεδομένων των αισθητήρων και την τυποποίηση της εισόδου στην εφαρμογή ελέγχου, οι αλγόριθμοι σύντηξης αισθητήρων μπορούν να καταστήσουν τη διαδικασία υλοποίησης απλούστερη και να επιτρέψουν αλλαγές στο σύστημα αισθητήρων χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στο λογισμικό της εφαρμογής [71].

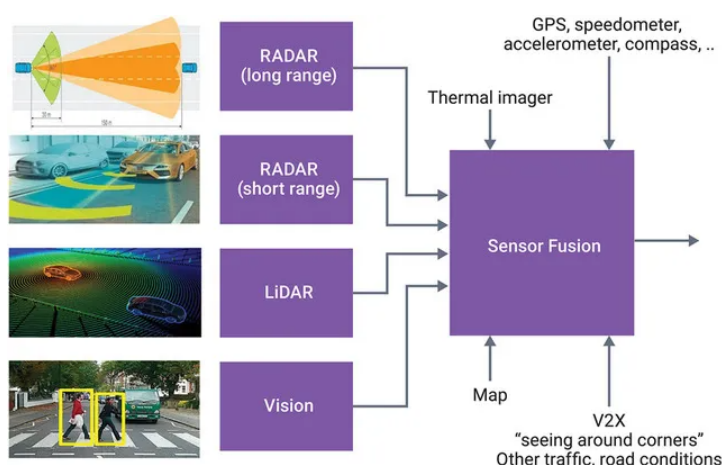


Figure 16: Πολλαπλοί διαφορετικοί αισθητήρες σε ένα σύστημα ADAS(Advanced driver-assistance system) [72].

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα των σύγχρονων ρομποτικών συστημάτων, όπως η παρακολούθηση διαδρομής για αυτόνομα ρομπότ, το **Robot Operating System (ROS) 2** έχει ανανεωθεί πλήρως. Το ROS 2 προσφέρει μια ποιότητα υπηρεσίας που προσαρμόζεται στους περιορισμούς ενός δικτύου με τη διαμόρφωση της ροής δεδομένων μέσω του συστήματος. Η παρακολούθηση διαδρομής σε διάφορες ρυθμίσεις δικτύωσης, όπως ενσύρματα LAN και δορυφορικές συνδέσεις πολλαπλών βημάτων, μπορεί να επωφεληθεί από αυτό. Μελέτες έχουν δείξει πως το ROS 2 έχει διευκολύνει την ανάπτυξη ρομπότ στο πεδίο σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως στον αέρα, τη θάλασσα, τη στεριά, ακόμη και το διάστημα. Αυτές οι μελέτες αναδεικνύουν τη μεγάλη ποικιλία ρυθμίσεων και εφαρμογών που χρησιμοποιούν την παρακολούθηση διαδρομής για αυτόνομα ρομπότ [73].

Η μέθοδος βασισμένη στην **ενισχυτική μάθηση** για αυτόνομα ρομπότ βρίσκει μια συνάρτηση που δίνει μια τιμή σε κάθε κατάσταση στο χώρο εργασίας μοντελοποιώντας το ζήτημα ως πρόβλημα κατάστασης-δράσης. Πλοηγώντας κατά μήκος της κλίσης αυτής της συνάρτησης, το ρομπότ μπορεί να φτάσει στην επιθυμητή κατάσταση. Σε αντίθεση με άλλες δημοφιλείς τεχνικές που συχνά παράγουν πολυγωνικές διαδρομές γραμμών, αυτή η μέθοδος παράγει πιο ομαλές τροχιές, καθιστώντας την ιδιαίτερα ιδανική για ρομπότ χωρίς περιορισμούς. Καλύπτεται επίσης η χρήση μεθόδων ενισχυτικής μάθησης για διάφορα μεγέθη του χώρου καταστάσεων, συμπεριλαμβανομένης της Q-Learning και του δυναμικού προγραμματισμού. Ο δυναμικός προγραμματισμός συνιστάται για χώρους καταστάσεων που είναι μικροσκοπικοί (λιγότερες από 8000 καταστάσεις), ενώ για μεσαίου μεγέθους χώρους καταστάσεων (μεταξύ 8000 και 60000 καταστάσεων) προτείνεται το Q-8000 και 60000 καταστάσεις), προτείνεται το Q-Learning [74].

Το P-Edge και άλλα συστήματα υπολογισμού ακμών δημιουργήθηκαν και αναπτύχθηκαν για αυτοκινούμενα και τη ρομποτική. Επιτρέπουν την προσιτή ενσωμάτωση πολλών λειτουργιών αυτόνομης οδήγησης, όπως οι εργασίες αντίληψης και εντοπισμού, σε ενσωματωμένα συστήματα. Η διαχείριση πολλών υπηρεσιών αυτόνομης οδήγησης και των επικοινωνιών τους με τη μικρότερη δυνατή επιβάρυνση, η μέγιστη αξιοποίηση των ετερογενών υπολογιστικών πόρων της συσκευής άκρης και η εκφόρτωση ορισμένων καθηκόντων στο νέφος για ενεργειακή αποδοτικότητα είναι οι προκλήσεις κατά την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων. Το λογισμικό αυτόνομης οδήγησης και το υλικό συνδέονται μέσω του στρώματος χρόνου εκτέλεσης των συστημάτων υπολογιστών άκρων.

Οι μελλοντικές προκλήσεις στη σχεδίαση αυτού του στρώματος για αυτόνομη οδήγηση περιλαμβάνουν τη δυναμική κατανομή των εισερχόμενων φορτίων εργασίας, την ευαισθητοποίηση στο υπολογιστικό νέφος και την προσφορά μιας καλής αφαίρεσης για την απόκρυψη υλοποιήσεων χαμηλού επιπέδου. Τα συστήματα για την αυτόνομη οδήγηση με υπολογιστές άκρων πρέπει να αναλύουν πολλά ετερογενή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, να επιτρέπουν αλληλεπιδράσεις χαμηλής επιβάρυνσης μεταξύ λειτουργικών μονάδων και να τηρούν αυστηρές οδηγίες κατανάλωσης ενέργειας [75].

Εφαρμογές της παρακολούθησης διαδρομής σε διάφορες βιομηχανίες

Στην παραγωγή και την εφοδιαστική, η ικανότητα των αυτόνομων ρομπότ να ακολουθούν μια διαδρομή είναι απαραίτητη. Τα αυτόνομα κινητά ρομπότ μπορούν να ακολουθούν αποτελεσματικά προκαθορισμένες πορείες, επειδή χρησιμοποιούν μια αποκεντρωμένη μέθοδο λήψης αποφάσεων για πλοήγηση χωρίς συγκρούσεις. Η παρακολούθηση διαδρομής στην κατασκευή διευκολύνει τη μετακίνηση εξαρτημάτων και υλικών μεταξύ διαφόρων σταθμών εργασίας από τα αυτόνομα ρομπότ, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα των παραγωγικών διαδικασιών. Στα πλαίσια της εφοδιαστικής βιομηχανίας, μπορούν να πλοηγηθούν μέσα σε αποθήκες, κέντρα διανομής και άλλες εγκαταστάσεις χρησιμοποιώντας την παρακολούθηση διαδρομής, εξασφαλίζοντας ακριβή και αποτελεσματική μεταφορά αγαθών. Μια άλλη συνεργατική λειτουργία που παρέχει η παρακολούθηση διαδρομής στα αυτόνομα κινητά ρομπότ είναι η ικανότητα να λειτουργούν σε συνδυασμό με άλλα ρομπότ ή ανθρώπινο προσωπικό για την εκτέλεση εργασιών. Συνολικά, η παρακολούθηση διαδρομής είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της ευελιξίας, της ασφάλειας και της παραγωγικότητας των αυτόνομων ρομπότ σε διαδικασίες εφοδιαστικής και παραγωγής [76].

Στη γεωργία, τα ρομπότ χρησιμοποιούνται για καθήκοντα όπως η φύτευση, η συγκομιδή, η παρακολούθηση του περιβάλλοντος, η επιθεώρηση και η επεξεργασία των καλλιεργειών και άλλα. Προτείνεται η αυτοματοποίηση αυτών των γεωργικών εργασιών με τη χρήση επίγειων οχημάτων και εναέριων ρομπότ. Οι γεωργικές εργασίες ακριβείας βρίσκονται στο επίκεντρο του σχεδιασμού και της κατασκευής κινητών επίγειων πλατφορμών πολλαπλών χρήσεων. Ένας στόλος εναέριων ρομπότ στη γεωργία χρησιμοποιεί αλγόριθμους σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης, συμπεριλαμβανομένου του αλγόριθμου Harmony Search (HS), για τον εντοπισμό πολύπλοκων τροχιών κάλυψης. Η γεωργία ακριβείας χρησιμοποιεί ένα χαμηλού κόστους σφαιρικό ρομπότ που ονομάζεται ROSPHERE για τη μέτρηση της υγρασίας και της

θερμοκρασίας του εδάφους. Κινητά ρομπότ που μοιάζουν με μη επανδρωμένα αυτοκίνητα κινούνται και χαρτογραφούν το γεωργικό τοπίο χρησιμοποιώντας αλγόριθμους SLAM [77].

Οι εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης μπορούν να καθαρίζονται και να απολυμαίνονται αυτόματα από αυτόνομα ρομπότ εξοπλισμένα με δυνατότητες παρακολούθησης διαδρομών, απαλλάσσοντας το προσωπικό υγειονομικής περίθαλψης από μέρος του φόρτου εργασίας του. Επιπλέον, μπορούν να βοηθήσουν στην εφοδιαστική και τη διακίνηση υλικών, ιδίως όταν πρόκειται για το χειρισμό βιολογικά μεταδοτικών αγαθών, τη διανομή φαρμάκων και μέσων ατομικής προστασίας και την αποστείρωση ιατρικού εξοπλισμού. Τα ρομπότ που ακολουθούν αυτόνομα μια διαδρομή μπορούν να βοηθήσουν το ιατρικό προσωπικό να αντιμετωπίσει αποτελεσματικότερα τους νοσηλευόμενους ασθενείς, ιδίως εκείνους που χρειάζονται κρίσιμη φροντίδα ή απομόνωση. Μπορούν να περπατούν μέσα στις εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους αλγόριθμους για να εκτελούν δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένης της ταξινόμησης, της αξιολόγησης, της παρακολούθησης και της θεραπείας των ασθενών από ασφαλή απόσταση. Αυτό μειώνει τον κίνδυνο μόλυνσης του προσωπικού υγειονομικής περίθαλψης πρώτης γραμμής από μεταδοτικές ασθένειες. Τα συνεργατικά ρομπότ μπορούν να αναπληρώνουν προσωρινά έναν εργαζόμενο που είναι άρρωστος ή απομονωμένος, προκειμένου να διατηρείται σταθερή παραγωγή. Η προσαρμοστικότητά τους και η δυνατότητα πρακτικής διδασκαλίας τα καθιστούν άριστα για την αυτοματοποίηση εργοστασίων, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής και της παραγωγής υγειονομικής περίθαλψης [78].

Τα αυτόνομα συστήματα που λειτουργούν σε δυναμικά, πολύπλοκα περιβάλλοντα πρέπει να αξιοποιούν γρήγορα την κρίση τους, με βάση την ακριβή κατανόηση του περιβάλλοντός τους. Για την ακριβή ανάλυση του περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται πολυάριθμοι αισθητήρες και μέθοδοι για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η αξιοπιστία αυτών των συστημάτων. Όσον αφορά την ασφάλεια, η συγχώνευση δεδομένων από διάφορους αισθητήρες και τρόπους είναι απαραίτητη για τις διαδικασίες αντίληψης των αυτόνομων συστημάτων. Η ανίχνευση καθόβουλης δραστηριότητας και η καταγραφή εικόνων είναι δύο εφαρμογές που μπορούν να επωφεληθούν από αυτή τη συγχώνευση δεδομένων. Είναι δυνατή η χρήση αλγόριθμων μηχανικής μάθησης για τον εντοπισμό ανώμαλων αιτημάτων, εισβολών στο δίκτυο και δραστηριότητας ιών. Τα προφίλ συμπεριφοράς των πιθανών επιτιθέμενων μπορούν να δημιουργηθούν με τη χρήση της συνεχιζόμενης συλλογής και ανάλυσης δεδομένων. Μια πιο αξιόπιστη και ασφαλής λύση μπορεί να

προσφέρει η τεχνολογία blockchain, επειδή είναι αποκεντρωμένη και αδιαπέραστη από αλλοιώσεις και μπορεί να παρέχει στους πράκτορες σμήνους ασφαλή και ιδιωτική επικοινωνία, ενώ παράλληλα αποχρούει απειλές και τρωτά σημεία [79].

Κεφάλαιο 4

Ενσωμάτωση της ρομποτικής όρασης και της παρακολούθησης διαδρομής

Επεξήγηση της σημασίας της ενσωμάτωσης της ρομποτικής όρασης και της παρακολούθησης της διαδρομής για ρομποτικά συστήματα

Για την καλή λειτουργία των ρομποτικών συστημάτων, η παρακολούθηση της διαδρομής και η ρομποτική όραση πρέπει να ενσωματωθούν συνδιαστικά. Τα ρομπότ με ρομποτική όραση είναι σε θέση να βλέπουν και να κατανοούν το περιβάλλον τους, γεγονός που τα βοηθά να αναγνωρίζουν και να διακρίνουν διάφορα αντικείμενα, εμπόδια και ορόσημα. Ενώ χρειάζονται αυτές τις οπτικές πληροφορίες, προκειμένου να πλοηγούνται σωστά στο περιβάλλον τους και να λαμβάνουν τεχνητά κινήματα αποφάσεις.

Η πανκατευθυντική εικόνα είναι ένα εργαλείο της πανκατευθυντικής όρασης, που προσφέρει απλές αναπαραστάσεις για διάφορους τρόπους πλοήγησης. Με την οπτική παρακολούθηση διαδρομής, μπορούμε να ελέγχουμε το ρομπότ σε μια προκαθορισμένη διαδρομή, ενώ με την τοπολογική πλοήγηση χρησιμοποιούμε εικόνες για την εκτίμηση της θέσης του ρομπότ. Οι εικόνες πανκατευθυντικής κατεύθυνσης επιτρέπουν την προβολή ορόσημων σε κάθε εικόνα, καθιστώντας την πλοήγηση πιο εύκολη. Η ρομποτική όραση επιτρέπει στο ρομπότ να αναγνωρίζει εμπόδια, αλλαγές στην τοπογραφία ή απροσδόκητα γεγονότα, επιτρέποντάς του να

προσαρμόζεται σε δυναμικές καταστάσεις. Αυτή η ευελιξία είναι ζωτικής σημασίας σε σενάρια όπου το περιβάλλον δεν είναι απολύτως γνωστό ή προβλέψιμο. Ο συνδυασμός της παρακολούθησης διαδρομής με τη ρομποτική όραση αυξάνει την ακρίβεια και τον έλεγχο του ρομπότ κατά την πλοήγηση [80].

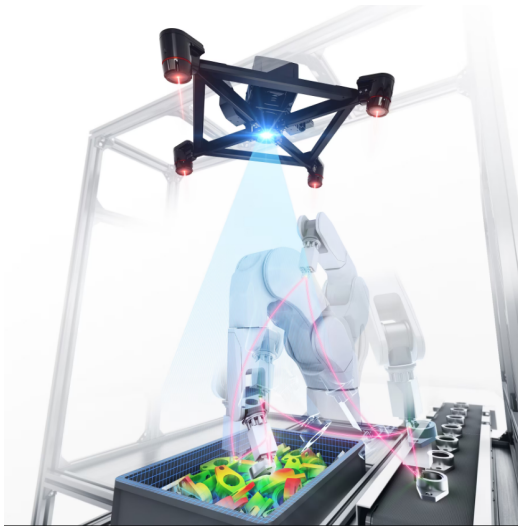


Figure 17: Ρομποτική καθοδηγούμενη από τρισδιάστατη όραση - σειρά 3D VGR [81]

Ακόμη και σε αχαρτογράφητη περιοχή, ο αλγόριθμος σχεδιασμού διαδρομών μπορεί να δώσει στα ανθρωποειδή ρομπότ διαδρομές σε πραγματικό χρόνο, χωρίς συγκρούσεις. Ο αποτελεσματικός έλεγχος συγκρούσεων καθίσταται δυνατός χάρη στον αλγόριθμο, ο οποίος λαμβάνει υπόψη το σχήμα του ρομπότ, τις διαθέσιμες ενέργειες και την ύπαρξη εμποδίων. Με τη χρήση ρομποτικής όρασης για την αναγνώριση και κατανόηση του περιβάλλοντος, όπως η διάκριση μεταξύ δαπέδου, ορίων, σκαλοπατιών και εμποδίων, ο αλγόριθμος μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω. Συνολικά, η αυτόνομη πλοήγηση και η λήψη αποφάσεων για ρομποτικά συστήματα, ιδίως για ανθρωποειδή

ρομπότ, καθίστανται κατάλληλες κατά την ενσωμάτωση αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομής σε πραγματικό χρόνο, ρομποτικής όρασης και στρατηγικών παρακολούθησης διαδρομής [82].

Ένας αλγόριθμος καταφέρνει να συνδυάζει τις συντεταγμένες των χαρακτηριστικών με τα δεδομένα οδομετρίας για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Ο αλγόριθμος είναι απλός και δεν βασίζεται σε υποθέσεις για το έδαφος ή την εικόνα. Οι πειραματικές δοκιμές έχουν δείξει ότι με αυτήν τη μέθοδο, οι ρομποτικοί πράκτορες μπορούν να αυτονομούνται και να πλοηγούνται σε ποικίλα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων εσωτερικών και εξωτερικών περιβάλλοντων με επίπεδο, επικλινές και βραχώδες έδαφος, ενώ συγκαταλέγονται και δυναμικά αντικείμενα. Όλα αυτά πετυχαίνονται χωρίς περίπλοκη βαθμονόμηση ή προηγούμενες υποθέσεις για το περιβάλλον. Τελικά, αυτή η μέθοδος βελτιώνει την ακρίβεια και την απόδοση της παρακολούθησης διαδρομής ρομποτικών συστημάτων [69].

Η εξωτερική όραση με την αποφυγή κινούμενων εμποδίων με χρήση λέιζερ διασφαλίζει την παρακολούθηση της διαδρομής, την παράκαμψη εμποδίων και την αποφυγή σύγκρουσης. Χρησιμοποιώντας έναν παρατηρητή με βάση τον Kalman, η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τις ταχύτητες των εμποδίων και προβλέπει πιθανές συγκρούσεις. Η μέθοδος επικυρώνεται μέσω δοκιμών και καταδεικνύει ότι η συνεκτίμηση των μετατοπίσεων των εμποδίων οδηγεί σε ασφαλέστερη συμπεριφορά του ρομπότ. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δύσκολα και ρεαλιστικά σενάρια με πραγματικά κινούμενα εμπόδια σε αχαρτογράφητα εδάφη [83].

Συστήματα ασφαλείας βασιζόμενα στην όραση είναι ολοένα και πιο δημοφιλή στη συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ, καθώς είναι φθηνά και εύκολα να αναπτυχθούν. Έχουν προταθεί πολλές τεχνικές και μέθοδοι για την αποτελεσματική ασφαλή συνεργασία, όπως η χρήση λειτουργιών ασφαλείας, η παρακολούθηση των ανθρώπινων χαρακτηριστικών και η ταξινόμηση των κινήσεων βάσει του βαθμού αλληλεπίδρασης. Με τη χρήση των συστημάτων όρασης, μπορούμε να παρακολουθούμε την ασφάλεια των χεριών και του σώματος, να ανιχνεύουμε την ανθρώπινη προθυμία για δράση και να εντοπίζουμε τις κινήσεις των χεριών κατά την επικοινωνία σε κοντινή απόσταση. Με αυτόν τον τρόπο, η ρομποτική όραση μπορεί να προάγει την ασφαλή συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ, παρέχοντας παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, ανίχνευση δραστηριοτήτων και επιβολή των κανονισμών ασφαλείας [84].

Τα αυτόνομα ρομποτικά συστήματα με αισθητήρες εμπέλειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επιχειρήσεις αντιμετώπισης και διάσωσης σε έκτακτες ανάγκες. Αυτά τα συστήματα μπορούν να εντοπίσουν και να πλοηγηθούν σε άγνωστα περιβάλλοντα, δημιουργώντας χάρτες του περιβάλλοντος που εξερευνούν. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας αλγορίθμους χαρτογράφησης περιβάλλοντος, όπως η τεχνική της μη ταλαντευόμενης παρεμβολής. Ομάδες αυτόνομων αυτοκινήτων μπορούν επίσης να εξερευνήσουν μη χαρτογραφημένες περιοχές και να δημιουργήσουν χάρτες των εν λόγω περιοχών χρησιμοποιώντας αλγορίθμους σχεδιασμού διαδρομών. Οι μέθοδοι παρεμβολής ορατότητας μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για περιβαλλοντική πλοήγηση και σχεδιασμό διαδρομών σε άγνωστες τοποθεσίες. Αυτές οι μέθοδοι εντοπίζουν ορατά τμήματα του χώρου από ένα συγκεκριμένο σημείο [85].

Οι αλγόριθμοι παρακολούθησης διαδρομής καθιστούν δυνατή τη μετακίνηση του ρομπότ από το αρχικό σημείο στον επιθυμητό προορισμό με ασφαλή τρόπο, αποφεύγοντας κινδύνους και επιλέγοντας τη βέλτιστη

διαδρομή. Οι αλγόριθμοι πλοήγησης και σχεδιασμού διαδρομής χρησιμοποιούν ντετερμινιστικούς και μη ντετερμινιστικούς αλγορίθμους, καθώς και εξελικτικούς αλγορίθμους. Ένας δημοφιλής εξελικτικός αλγόριθμος που βασίζεται στην κοινωνική συμπεριφορά των ζώων είναι ο αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO). Οι προτεινόμενες τεχνικές επιτυγχάνουν τους πολλαπλούς στόχους του ρομπότ, όπως η συντομότερη διαδρομή και η ομαλότητα, μέσω του συνδυασμού διαφορετικών αλγορίθμων και τη λήψη της ασφάλειας ως κρίσιμου στόχου δεδομένο. Τέλος, ο συνδυασμός αλγορίθμων παρακολούθησης διαδρομής με ρομποτική όραση μπορεί να βοηθήσει τα αυτόνομα συστήματα να πλοηγηθούν σε άγνωστες περιοχές και να αποκρίνονται σε έκτακτες ανάγκες [86].

Πρόσφατες εξελίξεις στην ενσωμάτωση της ρομποτικής όρασης και της παρακολούθησης διαδρομής

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην ενσωμάτωση της ρομποτικής όρασης με την παρακολούθηση της διαδρομής έχουν καταδείξει πολλά υποσχόμενα οφέλη στον τομέα αυτό. Οι ερευνητές πειραματίζονται με διάφορες μεθόδους για τη βελτίωση της αντίληψης των ρομπότ και την ακριβή πλοήγηση σε προ-προγραμματισμένες πορείες. Οι εξελίξεις αυτές περιλαμβάνουν βελτιωμένους αισθητήρες όρασης και αλγορίθμους αναγνώρισης, αισθητήρες αναγνώρισης αντικειμένων, καθώς και εξελιγμένους αλγορίθμους σχεδιασμού και ελέγχου διαδρομών. Τα αυτοματοποιημένα οχήματα, ο βιομηχανικός αυτοματισμός, η ρομποτική έρευνα και άλλοι τομείς μπορούν να επωφεληθούν από ρομπότ που μπορούν να πλοηγηθούν σε περίπλοκες καταστάσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα συνδυάζοντας τη ρομποτική όραση και την παρακολούθηση διαδρομής.

Η βαθιά μάθηση που χρησιμοποιείται στη ρομποτική όραση, μπορεί να αξιοποιηθεί και στη παρακολούθηση διαδρομής για την αντίληψη και κατανόηση του περιβάλλοντος από τα ρομπότ. Οι τεχνικές βαθιάς μάθησης, όπως τα συνεπαγωγικά νευρωνικά δίκτυα (CNN), οι βαθιές μηχανές Boltzmann (DBM), τα βαθιά δίκτυα πίστης (DBN) και οι αυτοκωδικοποιητές αποθορυβοποίησης (SdA) έχουν επιδείξει αξιοσημείωτα ποσοστά απόδοσης στην ανίχνευση αντικειμένων και την αναγνώριση προσώπων.

Ειδικότερα, η ανάκτηση εικόνων και η σημασιολογική κατάτμηση είναι δύο εργασίες που οι αλγόριθμοι βαθιάς μάθησης έχουν επιδείξει εξαιρετικά αποτελέσματα. Ωστόσο, η έρευνα στην περιοχή της βαθιάς μάθησης για τη ρομποτική όραση και παρακολούθηση διαδρομών αντιμετωπίζει ακόμη δυσκολίες στην καθοδήγηση της επιλογής του μοντέλου για την κάθε εργασία. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση της εφαρμογής των μοντέλων βαθιάς μάθησης στη ρομποτική όραση και παρακολούθηση διαδρομών [88].

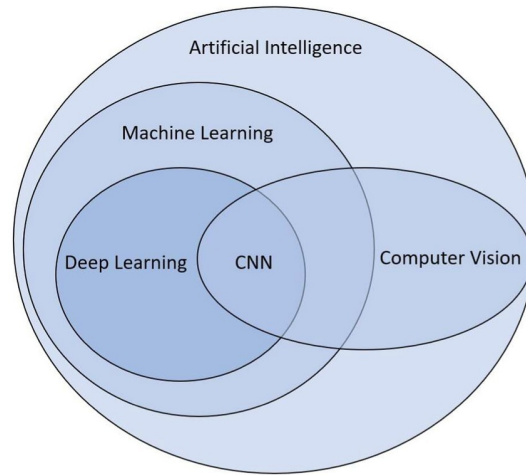


Figure 18: Διάγραμμα Euler τεχνητής νοημοσύνης και νευρωνικών δικτύων στην όραση υπολογιστών [87].

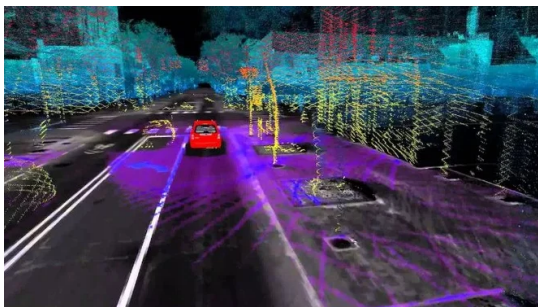


Figure 19: SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)[89].

Η τεχνική SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) περιλαμβάνει τη χαρτογράφηση του περιβάλλοντος και τον ταυτόχρονο εντοπισμό του ρομπότ σε αυτό. Αποτελεί απαραίτητη τεχνική για την ολοκλήρωση της ρομποτικής όρασης και την παρακολούθηση διαδρομής του ρομπότ. Έχει ως στόχο την αποτελεσματική κάλυψη της

περιοχής και την ισχυρή απόδοση πλοήγησης. Ο αλγόριθμος PDN είναι ένας ολοκληρωμένος αλγόριθμος πλοήγησης που βασίζεται στην αντίληψη. Χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό ανταμοιβής που λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα εντοπισμού SLAM, την απόδοση κάλυψης περιοχής και την ανακάλυψη ισχυρών υποψηφίων. Μέσω αυτού του μηχανισμού, επιτυγχάνεται μια ισορροπία μεταξύ της εξερεύνησης και της επανάληψης. Η SLAM και ο αλγόριθμος PDN συμβάλλουν στην επίτευξη ακριβούς τοποθέτησης του ρομπότ στο χάρτη και στην αποτελεσματική πλοήγηση του [90].

Η τεχνική SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) βελτιώνει την παρατηρησιμότητα των συστημάτων πολλαπλών UAV χωρίς GPS, με τη χρήση μονόφθαλμης κάμερας που τοποθετείται στα εναέρια οχήματα που πετούν σε σχηματισμό. Στη συνέχεια, προτείνεται η πρόσθεση μετρήσεων της σχετικής απόστασης μεταξύ των UAV με βάση οπτικά δεδομένα, χρησιμοποιώντας τις προβολές των ορόσημων στις φωτογραφίες που λαμβάνονται από τις κάμερες. Οι σχετικές αποστάσεις προσδιορίζονται με βάση τη φυσική δομή των εναέριων ρομπότ, χρησιμοποιώντας μια μέθοδο βασισμένη στην ομογραφία. Επιπλέον, ένα ψευδο-στερεοσκοπικό σύστημα με δύο κάμερες UAV που παρατηρούν παρόμοια ορόσημα επιτρέπει την εισαγωγή νέων χαρακτηριστικών στον χάρτη, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ακρίβεια της αρχικοποίησης. Αυτές οι εξελίξεις στο SLAM με βάση τη μονόφθαλμη κάμερα για πολλαπλά UAV βελτιώνουν την παρατηρησιμότητα και την ακρίβεια του εντοπισμού και της χαρτογράφησης σε ένα περιβάλλον χωρίς GPS [91].

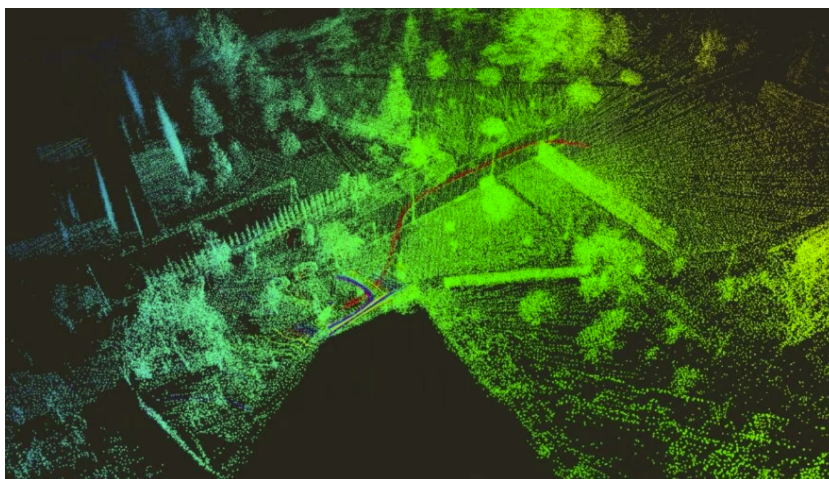


Figure 20: SLAM και LiDAR [89].

Η παρακολούθηση διαδρομής και η ρομποτική όραση πρέπει να ενσωματωθούν για τον οπτικό σερβοέλεγχο των ρομποτικών χειριστών. Η ταξινόμηση των συστημάτων οπτικού σερβοελέγχου παρέχεται από τη θέση και την εικόνα. Τα οπτικά συστήματα σερβομηχανισμού πρέπει να είναι σε θέση να παρακολουθούν τα χαρακτηριστικά της εικόνας σε μια σειρά φωτογραφιών, όπου μέσω της ακρίβειας του ακροδέκτη του ρομπότ και του οπτικού αισθητήρα καθορίζουν πόσο ακριβής είναι ο οπτικός σερβομηχανισμός. Ο οπτικός σερβομηχανισμός αναμένεται να αναδειχθεί ως ένας σημαντικός και δημοφιλής τρόπος ελέγχου για ρομποτικά συστήματα στο μέλλον, δεδομένου ότι είναι πρακτικός και εφικτός με την προσβάσιμη σήμερα τεχνολογία [92].

Οι ελεγκτές οπτικής σερβοκίνησης για κινητά ρομπότ με κάμερα pinhole, κατηγοριοποιούνται με βάση τη θέση και την εικόνα, ο ελεγκτής με βάση τη θέση απαιτεί λιγότερα χαρακτηριστικά διαδρομής, συγκριτικά με τον ελεγκτή βάση εικόνας, που όμως είναι πιο ακριβής και αξιόπιστος. Οι δύο ελεγκτές δοκιμάζονται με προσομοιώσεις και δοκιμές πεδίου σε ένα ρομπότ παρόμοιο με το αυτοκίνητο, και παρουσιάζουν ανάλυση σύγκλισης με τη χρήση συστημάτων κλειστού βρόχου. Η προσέγγιση με βάση τη θέση απαιτεί τρία χαρακτηριστικά διαδρομής, ενώ η προσέγγιση με βάση την εικόνα χρειάζεται μόνο δύο [93].

Στο πλαίσιο των ρομποτικών συστημάτων, έχει διερευνηθεί η συγχώνευση και ολοκλήρωση δεδομένων από πολλούς τύπους αισθητήρων, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων όρασης. Τα κινητά ρομπότ μπορούν πλέον να λειτουργούν σε απρόβλεπτες ή αχαρτογράφητες δυναμικές καταστάσεις χάρη στην εφαρμογή τεχνικών ολοκλήρωσης και συγχώνευσης πολλαπλών αισθητήρων. Σε ρομποτικούς σταθμούς συναρμολόγησης, έχουν χρησιμοποιηθεί αισθητήρες όρασης σε συνδυασμό με αισθητήρες ροπής και αφής. Αυτοί οι συνδυασμοί έχουν εφαρμοστεί σε εργασίες γραμμής συναρμολόγησης, όπως η τελική επιθεώρηση, η τοποθέτηση μπουλονιών και η αναγνώριση εξαρτημάτων. Γενικά, οι τεχνικές σύντηξης αισθητήρων έχουν χρησιμοποιηθεί για την αύξηση των δυνατοτήτων των ρομποτικών συστημάτων, ιδίως σε εργασίες όπως η παρακολούθηση διαδρομής και οι διαδικασίες συναρμολόγησης, με τη συγχώνευση δεδομένων από αισθητήρες όρασης με άλλα είδη αισθητήρων [94].

Η χρήση αισθητήρων όπως τα λέιζερ και οι κάμερες όρασης αξιοποιούνται πρακτικά στην έρευνα για την ευφυή ρομποτική. Για να αντιμετωπιστούν προβλήματα με την ανίχνευση κινούμενων αντικειμένων κατά τη διάρκεια μιας αποστολής πλοήγησης, χρησιμοποιούνται τεχνικές σύνθεσης πολλών αισθητήρων. Οι τεχνικές συγχώνευσης δεδομένων από διάφορους αισθητήρες

χρησιμοποιούνται για να παράγουν πιο ακριβή αποτελέσματα. Με τον συνδυασμό χρήσης δεδομένων, μπορεί να επιλυθεί το πρόβλημα της συνεπούς συσχέτισης κινούμενων αντικειμένων [95].

Μια νέα μέθοδος για τη ρύθμιση της ανατροφοδότησης της όρασης σε ρομποτικά συστήματα χρησιμοποιεί έναν βρόχο ελέγχου συνδιάζοντας τα σφάλματα, η νέα μέθοδος συνδυάζει τον έλεγχο με βάση την εικόνα και τον σχεδιασμό διαδρομής στον χώρο της εικόνας για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που παρουσιάζονται όταν υπάρχει απόσταση μεταξύ της προβλεπόμενης και της αρχικής θέσης του ρομπότ. Η μέθοδος αυτή εγγυάται σύγκλιση για οποιεσδήποτε αρχικές διαμορφώσεις και επιτρέπει την εφαρμογή περιορισμών στις υλοποιημένες τροχιές. Επιπλέον, η προτεινόμενη τεχνική χαρακτηρίζεται ως ανθεκτική και έγκυρη, αφού έχει επιβεβαιωθεί από πειραματικά ευρήματα. Στο μέλλον, αυτή η προσέγγιση μπορεί να επεκταθεί σε πιο περίπλοκα χαρακτηριστικά, καθώς η μέθοδος αποδίδει τροχιές με επιθυμητά χαρακτηριστικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικά σενάρια [96].

Εφαρμογές ολοκληρωμένης ρομποτικής όρασης και παρακολούθησης διαδρομής σε διάφορες βιομηχανίες

Τα ολοκληρωμένα συστήματα ρομποτικής όρασης και παρακολούθησης διαδρομής μπορούν να προσφέρουν υψηλά αμειβόμενες θέσεις εργασίας υψηλής εξειδίκευσης στον τομέα της μεταποίησης. Η χρήση αλγορίθμων μηχανικής όρασης επιτρέπει στα ρομπότ να προχωρούν μέσα σε περίπλοκα βιομηχανικά περιβάλλοντα, ανιχνεύοντας κινούμενα αντικείμενα και ανθρώπους. Η πλοήγηση ρομπότ μπορεί επίσης να γίνει μέσω αισθητήρων εμβέλειας δομημένου φωτός, οι οποίοι παρέχουν έναν χάρτη εμβέλειας του περιβάλλοντος. Οι ρομποτικές εφαρμογές συνεχίζουν να χρησιμοποιούν την τεχνολογία λείζερ για τον εντοπισμό και την ταυτοποίηση αντικειμένων.

Η μελλοντική έρευνα στον τομέα της ρομποτικής όρασης μπορεί να επικεντρωθεί σε συστήματα πολλαπλών καθηκόντων ή πολλαπλών χρήσεων που ενσωματώνουν διάφορες τεχνολογίες αισθητήρων. Τα ρομποτικά συστήματα όρασης και άλλες τεχνολογίες αισθητήρων μπορούν να συνεργαστούν με άλλα ρομπότ για να καλύψουν τις απαιτήσεις της Βιομηχανίας 4.0 που τείνει στην αυτοματοποίηση και την ανταλλαγή δεδομένων στις τεχνολογίες παραγωγής. Επιτρέπουν στα ρομπότ να πλοηγούνται και να εκτελούν εργασίες σε περίπλοκες βιομηχανικές καταστάσεις, παρέχοντάς τους οπτική ανατροφοδότηση. Σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται συχνά αισθητήρες δομημένου φωτός και

αισθητήρες που βασίζονται σε λέιζερ- η μελλοντική έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί στη δημιουργία πολυδύναμων συστημάτων όρασης που μπορούν να ενσωματωθούν με άλλα είδη αισθητήρων και συστημάτων [97].

Κάποιες τεχνικές περιλαμβάνουν τον προγραμματισμό σε απευθείας σύνδεση, εκτός σύνδεσης και επαυξημένης πραγματικότητας. Οι βιομηχανικές ρομποτικές διεργασίες που έχουν εξεταστεί περιλαμβάνουν τη συγκόλληση και την κατεργασία, με έμφαση στη συγκόλληση τόξου και την απογύμνωση. Οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες και οι κατασκευαστές αεροσκαφών χρησιμοποιούν γενικό λογισμικό OLP για την ενσωμάτωση ρομποτικών συστημάτων στις αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής τους. Η εικονική πραγματικότητα είναι ένα στοιχείο αυτών των λογισμικών που επιτρέπει στους χρήστες να βυθιστούν στον κόσμο της προσομοίωσης. Τεχνικές όπως, ο προγραμματισμός με καθοδήγηση και ο διαδικτυακός προγραμματισμός με καθοδήγηση από αισθητήρες έχουν αναπτυχθεί για την αποφυγή συγκρούσεων. Οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν εύκαμπτη και ευέλικτη αλληλεπίδραση του ρομπότ με το αντικείμενο εργασίας [98].

Ο γεωργικός τομέας χρησιμοποιεί εκτενώς τα συστήματα μηχανικής όρασης για την επιθεώρηση φρούτων και λαχανικών, καθώς αυτά παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τη φύση των αντικειμένων. Επιπλέον, οι εργασίες εφοδιαστικής αλυσίδας και αποθήκευσης μπορούν να επωφεληθούν από την εφαρμογή της μηχανικής όρασης για τον έλεγχο της ποιότητας και την κατηγοριοποίηση των αντικειμένων στις γραμμές επεξεργασίας. Τα συστήματα μηχανικής όρασης είναι χρήσιμα επίσης για την παρακολούθηση, τη διαλογή και τη διαχείριση αποθεμάτων στην εφοδιαστική αλυσίδα και στην αποθήκευση, καθώς μπορούν να αξιολογήσουν πτυχές όπως το χρώμα, το μέγεθος, η μορφή, η υφή και η παρουσία ζημιών. Αν και οι πηγές δεν παρέχουν συγκεκριμένες περιπτώσεις ή χρήσεις της μηχανικής όρασης στην αποθήκευση και την εφοδιαστική, οι δυνατότητες των συστημάτων υποδηλώνουν ότι οι τομείς αυτοί μπορούν να επωφεληθούν από την εφαρμογή τους για την αύξηση της παραγωγικότητας και της ακρίβειας [99].

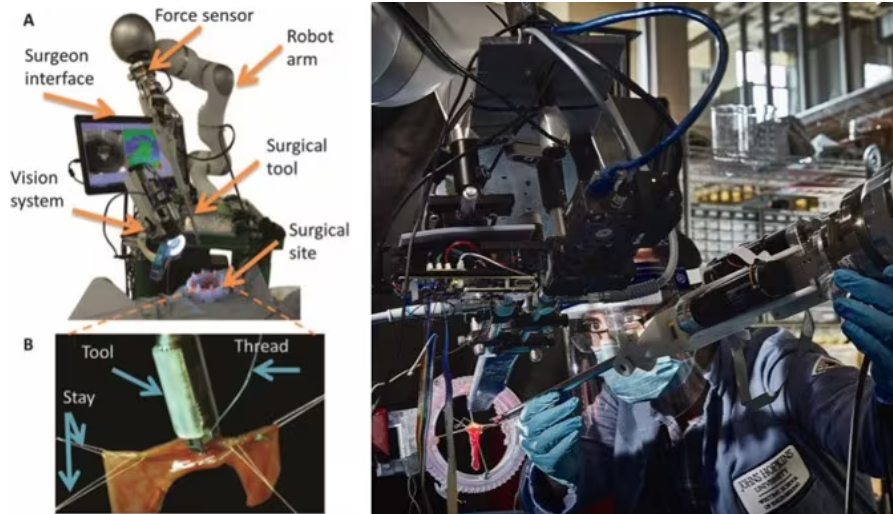


Figure 21: Αυτόνομα ρομπότ βασισμένα στην όραση: Δίνοντας μάτια στον ιατρικό αυτοματισμό με καινοτόμα συστήματα απεικόνισης [100].

Οι χειρουργικές θεραπείες μπορούν να επωφεληθούν από την εφαρμογή ρομποτικής όρασης και παρακολούθησης διαδρομής, η οποία επιτρέπει ακριβείς κινήσεις. Όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τεχνικές ιατρικής απεικόνισης, όπως η ερμηνεία μαγνητικής τομογραφίας ή ακτίνων Χ, τα ολοκληρωμένα συστήματα ρομποτικής όρασης μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της διάγνωσης. Η ρομποτική όραση και η παρακολούθηση διαδρομής μπορούν να βοηθήσουν στην καθοδήγηση των ασθενών κατά τη διάρκεια των ασκήσεων και στην παρακολούθηση της προόδου τους σε περιβάλλοντα αποκατάστασης, διατηρώντας την τέλεια φόρμα και μειώνοντας την πιθανότητα βλάβης. Στις εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη διανομή προμηθειών και φαρμάκων, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα και μειώνοντας την πιθανότητα ανθρώπινου λάθους. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία υποστηρικτικής τεχνολογίας που θα βελτιώσει την ποιότητα ζωής και την ανεξαρτησία των ατόμων με αναπηρία [101].

Κεφάλαιο 5

Υλοποιήσεις σε MATLAB

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει αξιοποίηση του βιβλίου του Peter Corke με τίτλο "Robotics, Vision and Control, Fundamental Algorithms in MATLAB" [102], για την υλοποίηση εφαρμογών στη ρομποτική όραση και την παρακολούθηση διαδρομής μέσω μίας εργαλειοθήκης μηχανικής όρασης. Η εργαλειοθήκη παρέχει χρήσιμες λειτουργίες για τη μελέτη και την προσομοίωση της κλασικής ρομποτικής τύπου βραχίονα, όπως για παράδειγμα η κινηματική, η δυναμική και η δημιουργία τροχιών [103].

Οπτικός έλεγχος βάσει εικόνας

Το πρόβλημα ελέγχου μπορεί να εκφραστεί με βάση τις συντεταγμένες της εικόνας και ο στόχος είναι η μετακίνηση των χαρακτηριστικών σημείων που υποδεικνύονται με σημεία. Τα σημεία μπορούν, αλλά δεν είναι απαραίτητο, να ακολουθούν τις ευθείες διαδρομές που υποδεικνύονται από τα βέλη. Η μετακίνηση των χαρακτηριστικών σημείων στην εικόνα αλλάζει τη θέση της κάμερας.

1. Κίνηση κάμερας και εικόνας

Τα διαγράμματα παρουσιάζουν διάφορες λειτουργίες που σχετίζονται με την προβολή και οπτικοποίηση της κάμερας, καθώς και με τον υπολογισμό Ιακωβιανών πινάκων, πίνακες δηλαδή μερικών παραγώγων, για χρήση σε υλοποιήσεις που αφορούν την υπολογιστική όραση.

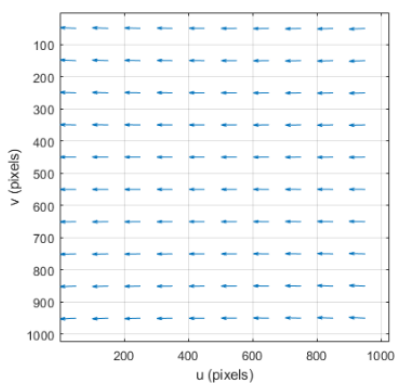


Figure 22: Μετατόπιση του άξονα x

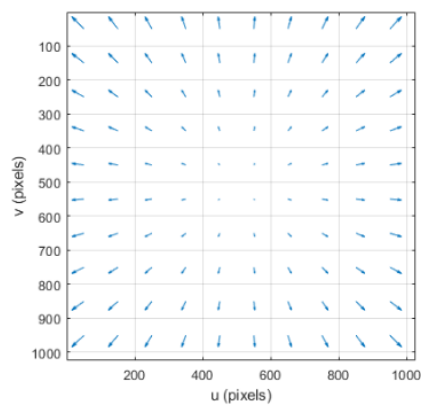


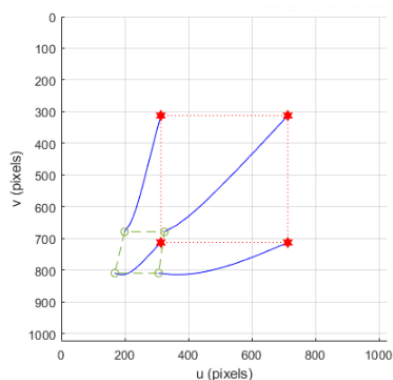
Figure 23: Μετατόπιση του άξονα z

Η μέθοδος flowfield, που χρησιμοποιείται μέσω της κλάσης CentralCamera χρησιμοποιεί διανύσματα της ταχύτητας του επιπέδου εικόνας για ένα πλέγμα παγκόσμιων σημείων που προβάλλονται σε ένα επίπεδο της εικόνας, μετωπικά παράλληλο, για μια συγκεκριμένη ταχύτητα κάμερας.

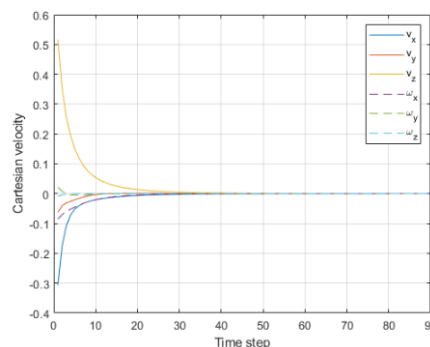
2. Έλεγχος της κίνησης των χαρακτηριστικών

Με την χρήση ελεγκτή ως υποκλάση της κλάσης VisualServo και χρησιμοποιώντας ένα αντικείμενο CentralCamera ως όρισμα, ο κατασκευαστής του αντικειμένου μετακινεί την κάμερα προκειμένου να επιτύχει την προβλεπόμενη θέση σε σχέση με τον αντικειμενικό. Η αρχική θέση και οι απαιτούμενες συντεταγμένες των χαρακτηριστικών του επιπέδου εικόνας εμφανίζονται μέσω της τεχνικής απεικόνισης. Η μέθοδος step, καλείται συχνά κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης για να αναπαράξει την κίνηση για ένα μόνο χρονικό βήμα. Εκτός από την παροχή μιας τρισδιάστατης απεικόνισης της κάμερας και των σημείων του κόσμου, η προσομοίωση κινεί το επίπεδο εικόνας της κάμερας.

Αποτελέσματα της προσομοίωσης οπτικού ελέγχου βάσει εικόνας



(a) Η κίνηση του χαρακτηριστικού στο επίπεδο της εικόνας



(b) Συνιστώσες χωρικής ταχύτητας σε συνάρτηση με τον χρόνο

Υλοποιείται ο σχεδιασμός τη διαδρομής των χαρακτηριστικών του στόχου στο επίπεδο της εικόνας, την καρτεσιανή ταχύτητα σε σχέση με το χρόνο ή την καρτεσιανή θέση σε σχέση με το χρόνο.

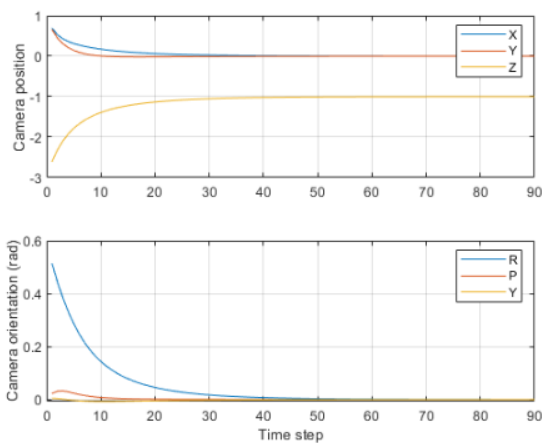


Figure 25: Στάση της κάμερας

Βλέπουμε ότι τα σημεία των χαρακτηριστικών έχουν ακολουθήσει μια σχεδόν ευθύγραμμη διαδρομή στην εικόνα και η καρτεσιανή θέση έχει μεταβληθεί ομαλά προς την τελική τιμή. Ο αριθμός κατάστασης της Ιακωβιανής της εικόνας μειώνεται κατά την κίνηση, υποδεικνύοντας ότι καθίσταται καλύτερα εξαρτόμενη, συνέπεια της απομάκρυνσης των χαρακτηριστικών μεταξύ τους.

3. Ζητήματα απόδοσης

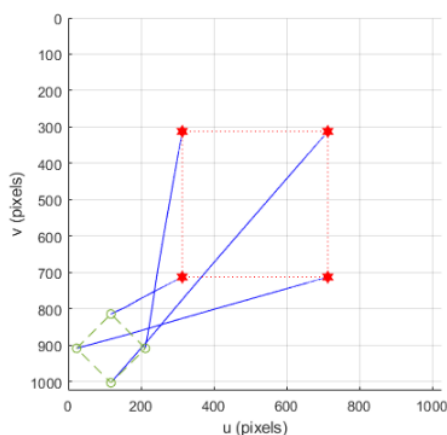


Figure 26: Διαδρομές χαρακτηριστικών του επιπέδου εικόνας για οπτικό σερβομηχανισμό με βάση την εικόνα.

Δεδομένου ότι ο έλεγχος οπτικού σερβομηχανισμού βάσει θέσης ορίζεται στον τρισδιάστατο χώρο, δεν υπάρχει άμεσος τρόπος ελέγχου της κινητικότητας των χαρακτηριστικών της εικόνας. Στο παράδειγμα, δεν υπάρχει άμεσος έλεγχος την καρτεσιανή κίνηση της κάμερας, γεγονός που οδηγεί σε μία αξιοσημείωτη κίνηση, ιδιαίτερα όταν ο στόχος περιστρέφεται γύρω από τον άξονα z.

απομακρυνόμενη από τον στόχο και επιστρέφοντας πάλι πίσω. Ονομάζουμε αυτό το φαινόμενο "υποχώρηση της κάμερας", θέτωντας την κίνηση που προκύπτει να απαιτεί σημαντική και ενδεχομένως ανέφικτη κίνηση της κάμερας, χωρίς χρονική βελτιστοποίηση.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρατηρείται, πως προφανώς η κάμερα πραγματοποίησε μια αχρείαστη μετατόπιση στον άξονα z,

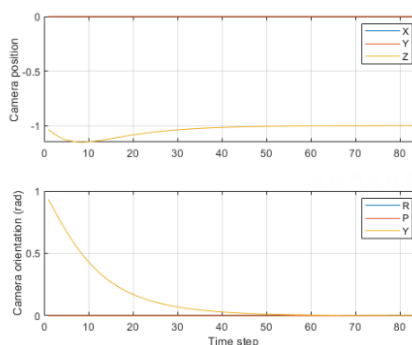
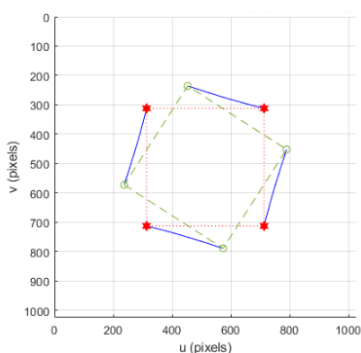


Figure 27: Οπτικός σερβομηχανισμός βάσει θέσης για καθαρή περιστροφή στόχου γύρω από τον οπτικό άξονα για περιστροφή 1 rad

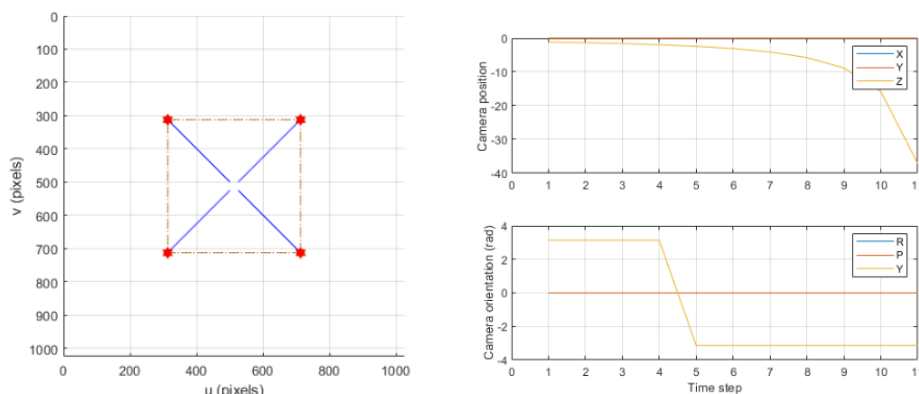


Figure 28: Οπτικός σερβομηχανισμός βάσει θέσης για καθαρή περιστροφή στόχου γύρω από τον οπτικό άξονα για περιστροφή π rad

Η Ιακωβιανή εικόνα είναι η γραμμικοποίηση ενός μη γραμμικού συστήματος, το οποίο αποτελεί το τελευταίο σημείο που πρέπει να εξεταστεί. Εάν η κίνηση σε κάθε χρονικό βήμα είναι υψηλή, η γραμμικοποίηση είναι άκυρη και τα χαρακτηριστικά στην εικόνα θα ακολουθούν καμπύλες αντί για γραμμικές τροχιές. Αυτό μπορεί να συμβεί αν το κέρδος είναι πολύ υψηλό ή αν οι προβλεπόμενες τοποθετήσεις των χαρακτηριστικών απέχουν πολύ από τις αρχικές θέσεις. Ο περιορισμός της μέγιστης νόρμας των διατασσόμενων ταχυτήτων είναι μια προσέγγιση.

Οι διαδρομές και τα χαρακτηριστικά δεν χρειάζεται να είναι ευθείες γραμμές ή να κινούνται με ασυμπτωτική ταχύτητα. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα θα μπορούσαν να ρυθμιστούν ώστε να ακολουθούν οποιαδήποτε αυθαίρετη τροχιά στην εικόνα με τη χρήση τεχνικών σχεδιασμού τροχιάς. Ενώ σε περίπτωση μαζικών περιστροφών κατά μήκος του οπτικού άξονα, μπορεί να παράγει λιγότερο από ιδανικές καρτεσιανές διαδρομές. Συνοψίζοντας, ο έλεγχος οπτικού σερβομηχανισμού βάσει εικόνας είναι μια εξαιρετικά αξιόπιστη μέθοδος, έχοντας αποδειχθεί η ανοχή της σε ανακρίβειες στο βάθος των σημείων.

4. Οπτικός σερβομηχανισμός βάσει εικόνας με κατανομή XY/Z

Τα υβριδικά συστήματα XY/Z θεωρούν τους άξονες x και y ως μία ομάδα και τους άξονες z ως άλλη ομάδα. Στον άξονα z, κατά την υποχώρηση της κάμερας, η περιστροφή του οδηγεί σε ανεπιθύμητη μετατόπιση του. Επιπλέον, η κίνηση του επιπέδου εικόνας κατά τους άξονες x και y, ως μετατόπιση και περιστροφή είναι αρκετά παρόμοιες, αλλά η οπτική ροή που οφείλεται στον

άξονα z είναι παρουσιάζει σημαντικές διαφορετικές.

Η θέση της κάμερας, το σφάλμα χαρακτηριστικών του επιπέδου εικόνας και η ταχύτητα της κάμερας κινούνται. Τα μπλοκ του πεδίου εφαρμογής σχεδιάζουν την ταχύτητα της κάμερας και το σφάλμα χαρακτηριστικών σε συνάρτηση με το χρόνο.

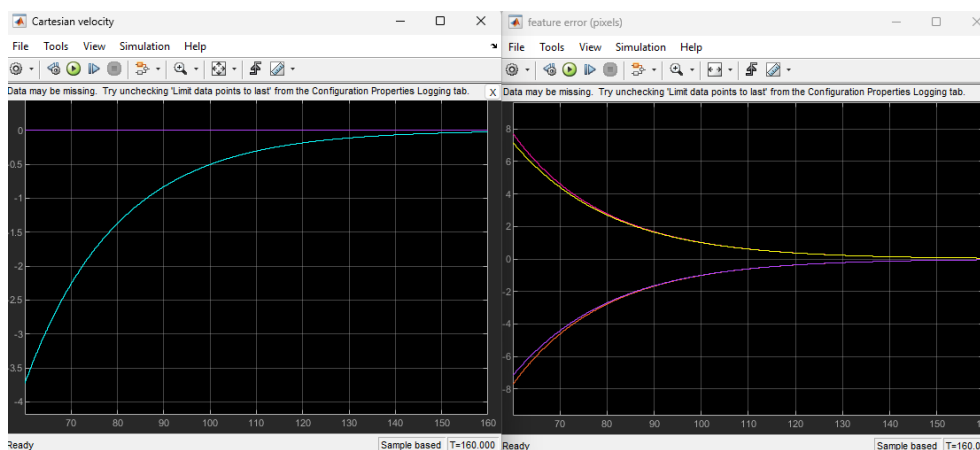
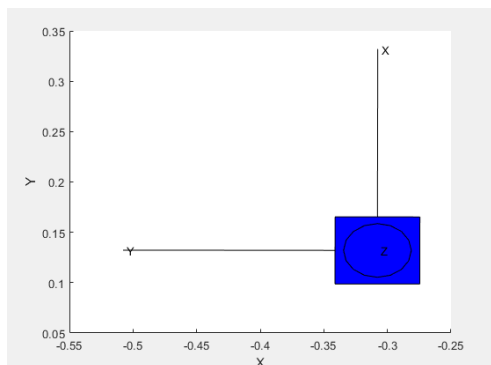


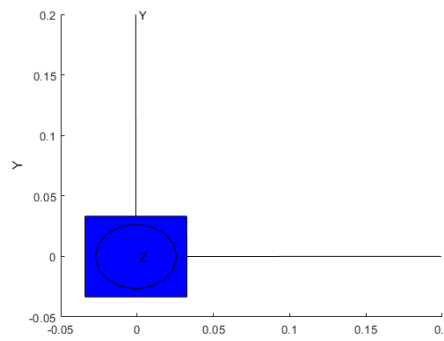
Figure 29: Καρτεσιανή ταχύτητα και σφάλμα χαρακτηριστικών

5. Οπτικός σερβομηχανισμός βάσει εικόνας χρησιμοποιώντας πολικές συντεταγμένες

Το στιγμιότυπο δείχνει την κίνηση του χαρακτηριστικού στην εικόνα, την θέση της κάμερας και τον κόσμο στον οποίο είναι το χαρακτηριστικό. Η κίνηση της κάμερας είναι αρκετά διαφορετική σε σύγκριση με το καρτεσιανό σύστημα οπτικού σερβομηχανισμού βάσει εικόνας που προαναφέρθηκε. Η απόδοση του πολικού οπτικού σερβομηχανισμού βάσει εικόνας είναι το συμπλήρωμα του καρτεσιανού οπτικού σερβομηχανισμού βάσει εικόνας, παράγει όμως καλή κίνηση της κάμερας για την περίπτωση μεγάλης περιστροφής, αλλά φτωχότερη κίνηση για την περίπτωση μεγάλης μετάθεσης.



(a) Αρχική θέση χαρακτηριστικού.



(b) Τελική θέση χαρακτηριστικού μετά την απεικόνιση κίνησης.

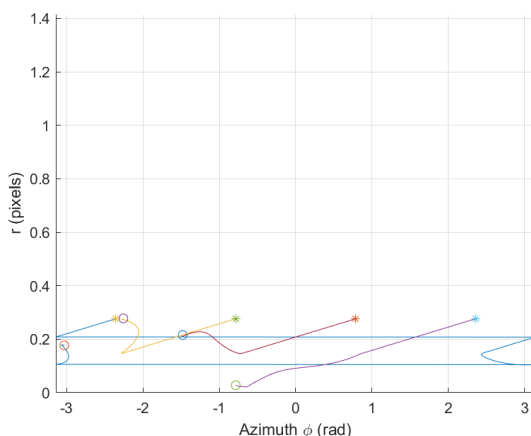


Figure 31: Οπτικός σερβομηχανισμός βάσει εικόνων με χρήση πολικών συντεταγμένων. Κίνηση χαρακτηριστικών στον πολικό φη-χώρο.

Τα δεδομένα που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μπορούν να προβληθούν χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις `ploterror`, `plotvel` και `plotcamera`. Μια πρόσθετη συνάρτηση που ονομάζεται `vs.plotfeatures()` απεικονίζει τη διαδρομή των χαρακτηριστικών στο χώρο $\varphi\psi$ και την κίνηση της κάμερας, η οποία δεν παρουσιάζει το φαινόμενο υποχώρησης της κάμερας.

6. Ρομπότ τύπου

βραχίονα

Σε αυτή την αναπαράσταση, ένα ρομπότ έξι (6) αξόνων που μπορεί να χειριστεί και τις έξι γωνίες της κάμερας μεταφέρει την κάμερα. Υποθέτοντας ότι το ρομπότ κινείται με την ακριβή ταχύτητα που του δόθηκε εντολή, οι αρθρώσεις του χρησιμεύουν ως τέλειες πηγές ταχύτητας. Αυτό το ιδανικό είναι εξαιρετικά κοντά στο να υλοποιηθεί σε ένα σύγχρονο ρομπότ, το οποίο συνήθως διαθέτει ελέγχους αρθρώσεων υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιούν ανατροφοδότηση θέσης και ταχύτητας από κωδικοποιητές αρθρώσεων. Η ανατροφοδότηση ταχύτητας των αρθρώσεων χρησιμοποιείται από τον εσωτερικό βρόχο ταχύτητας για να διασφαλιστεί ότι η άρθρωση κινείται με

τον προβλεπόμενο ρυθμό. Η ανατροφοδότηση θέσης της άρθρωσης χρησιμοποιείται από τον εξωτερικό βρόχο θέσης για τον υπολογισμό της ταχύτητας της άρθρωσης που απαιτείται για να ακολουθηθεί η τροχιά.

Πρόκειται για ένα περίπλοκο παράδειγμα που μιμείται όχι μόνο τον έλεγχο και την κάμερα του οπτικού σερβομηχανισμού βάσει εικόνας, αλλά και το ρομπότ Puma 560. Οι έξοδοι του ολοκληρωτή, οι οποίες δείχνουν τους βρόχους ταχύτητας του ρομπότ, είναι οι γωνίες των αρθρώσεων. Η θέση του τελικού φορέα εξάγεται από ένα μπλοκ εμπρόσθιας κινηματικής που λαμβάνει αυτές τις γωνίες ως είσοδο.

Στον τελικό φορέα του ρομπότ έχει εγκατασταθεί μια προοπτική κάμερα με προεπιλεγμένες ρυθμίσεις και οι άξονές της είναι προσανατολισμένοι ώστε να ταιριάζουν με το πλαίσιο συντεταγμένων του ακραίου φορέα. Οι συντεταγμένες των σημείων στόχου, οι γωνίες δηλαδή ενός τετραγώνου στο επίπεδο yz και η θέση της κάμερας είναι οι είσοδοι για το μπλοκ κάμερας, το οποίο έχει μόνο ως παράμετρο, ένα αντικείμενο CentralCamera. Το σφάλμα χαρακτηριστικών στο χώρο της εικόνας και μια Ιακωβιανή με μια τιμή z για κάθε σημείο υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά της εικόνας εξόδου. Η χωρική ταχύτητα της κάμερας υπολογίζεται με την αντιστροφή της Ιακωβιανής της εικόνας και την εφαρμογή ενός κέρδους. Αυτή αντιστοιχίζεται σε ταχύτητες αρθρώσεων μέσω της αντίστροφης Ιακωβιανής του χειριστή, η οποία στη συνέχεια ολοκληρώνεται για να δώσει γωνίες αρθρώσεων. Οι αρθρώσεις μοντελοποιούνται ως τέλειες ταχύτητες και το σύστημα όρασης μοντελοποιείται χωρίς καθυστέρηση. Αυτό το μοντέλο θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για πιο ρεαλιστικά μοντέλα συστημάτων που ενσωματώνουν φαινόμενα του πραγματικού κόσμου.

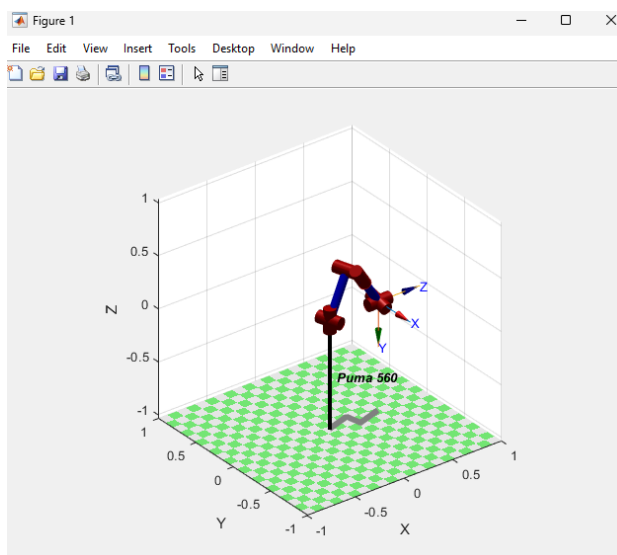
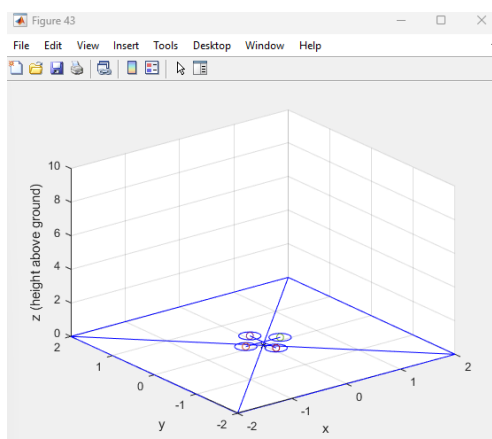


Figure 32: Ένας ρομποτικός βραχίονας Puma επανδρωμένος με κάμερα.

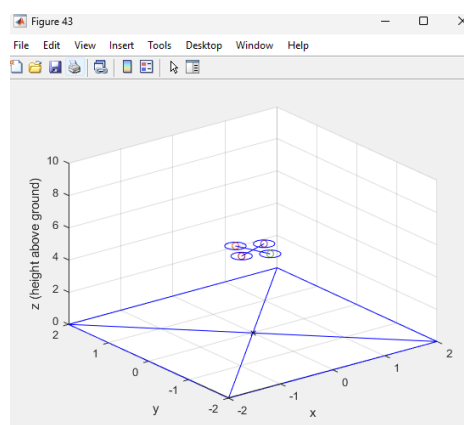
7. Εναέριο ρομπότ

Ένα τετρακίνητήριο με συνδεδεμένη σφαιρική κάμερα λειτουργεί με τη χρήση οπτικού σερβομηχανισμού βάσει εικόνας για να φτάσει σε μια συγκεκριμένη θέση σε σχέση με τέσσερα επίγεια σημεία-στόχους. Το όχημα επιδιώκει να διατηρήσει μια σταθερή σχετική θέση με τα σημεία-στόχους όταν αυτά μετακινούνται και χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό του υπο-ενεργοποιημένου συστήματος του οπτικού σερβομηχανισμού βάσει εικόνας και του ελεγκτή του τετρακίνητρου.

Ωστόσο, εντοπίζονται μερικές σημαντικές διαφορές. Η περίπτωση του οπτικού σερβομηχανισμού παρέχει το σφάλμα xy στο πλαίσιο του οχήματος ή της κάμερας, αντί για το παγκόσμιο πλαίσιο. Επίσης, ο ελεγκτής βασίζεται σε έξι ελευθερίες κίνησης εντός του χώρου εργασίας, αλλά μόνο οι γωνίες κύλισης και κλίσης πρέπει να είναι μηδενικές για να επιτευχθεί μετάθεση στο οριζόντιο επίπεδο. Επιπλέον, η Ιακωβιανή περιλαμβάνει μόνο τις στήλες που αντιστοιχούν στις (v_x, v_y, v_z, v_z) κίνησης. Τέλος, χρησιμοποιείται μια σφαιρική κάμερα και παρέχεται ένα αντικείμενο `SphericalCamera` στην οπτική Ιακωβιανή.



(a) Αρχική θέση εναέριου ρομπότ.



(b) Τελική θέση εναέριου ρομπότ μετά την απεικόνιση κίνησης

Κεφάλαιο 6

Προκλήσεις και περιορισμοί

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί στους τομείς της ρομποτικής όρασης και της παρακολούθησης διαδρομής, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές προκλήσεις και περιορισμοί που σχετίζονται με τις τρέχουσες προσεγγίσεις.

Συζήτηση για τις προκλήσεις και τους περιορισμούς των σημερινών προσεγγίσεων στη ρομποτική όραση και παρακολούθησης διαδρομής

Τα συστήματα αισθητήρων αφής υψηλής ανάλυσης που κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά περιορίζονται από ζητήματα όπως η χαμηλή ακρίβεια, τα ακριβά εξαρτήματα ή η μη επεκτασιμότητα. Οι περισσότεροι αισθητήρες αφής που βασίζονται στην όραση ανιχνεύουν μόνο δισδιάστατα σχήματα και είναι δαπανηροί και μεγάλοι. Το κιβώτιο ταχυτήτων απαιτεί μεγάλες διαμέτρους για αισθητήρες αφής που βασίζονται στην πίεση του αέρα. Μια δημοφιλής τεχνική για την ανακατασκευή του βάρθους από εικόνες είναι η χρήση της κανονικής επιφάνειας, αν και αυτή η προσέγγιση έχει περιορισμούς λόγω των διαστάσεων του πίνακα αναζήτησης και της παραδοχής μιας διάχυτης ανακλούσας επιφάνειας Lambertian. Ιδιαίτερα για εφαρμογές πολλαπλών δακτύλων, οι αισθητήρες αφής με τρισδιάστατο σχεδιασμό καμπύλης επιφάνειας είναι ακριβοί. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η διαδικασία κατασκευής αισθητήρων αφής, καθώς επηρεάζει το ρυθμό με τον οποίο υλοποιούνται εφαρμογές χειρισμού ρομπότ. Συνολικά, τα μειονεκτήματα των αισθητήρων αφής που βασίζονται στη ρομποτική όραση είναι το κόστος, το μέγεθος, η περιορισμένη σε σχήμα λειτουργικότητα και οι δυσκολίες με την ανακατασκευή βάρθους [104].

Για την εκτίμηση της κατάστασης, τον προγραμματισμό και τον έλεγχο σε ρομποτικά συστήματα, είναι απαραίτητη η ακριβής βαθμονόμηση των παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων των συντελεστών κλίμακας, των θέσεων των αισθητήρων και των μηκών σύνδεσης. Λανθασμένες τιμές παραμέτρων μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρά προβλήματα ασφάλειας ή ακόμη και σε υποβάθμιση της απόδοσης. Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, χρησιμοποιείται ένα πληροφοριοθεωρητικό μέτρο στην τεχνική αυτοβαθμονόμησης ρομποτικών συστημάτων που παρέχεται. Ο αλγόριθμος αυτός βρίσκει και αποθηκεύει αυτόματα νέες ακολουθίες μετρήσεων. Χρησιμοποιώντας δεδομένα που συλλέγονται σε διάφορα χρονικά διαστήματα, το πρόγραμμα δημιουργεί ένα αραιό αλλά πλήρες σύνολο δεδομένων βαθμονόμησης, εξαλείφοντας τις περιττές πληροφορίες για να διατηρούνται οι υπολογισμοί διαχειρίσιμοι [105].

Η μέθοδος χρησιμοποιεί rank-revealing QR και αναλύσεις singular value του πίνακα πληροφοριών Fisher για τον εντοπισμό και το κλείδωμα μη παρατηρήσιμων κατευθύνσεων στο χώρο των παραμέτρων, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η πιθανή έλλειψη πλήρους παρατηρησιμότητας των παραμέτρων βαθμονόμησης. Αυτός ο αλγόριθμος κλειδώνει τους άλλους αλγορίθμους στην πρώτη τους εικασία, ενώ ακούει μια εισερχόμενη ροή αισθητήρων, δημιουργεί ένα βασικό σύνολο δεδομένων για την εκτίμηση των παραμέτρων βαθμονόμησης και στη συνέχεια ενημερώνει τις παραμέτρους καθώς αυτές γίνονται παρατηρήσιμες. Έχουν διεξαχθεί εκτεταμένα πειράματα προσομοίωσης και πραγματικού κόσμου για την επικύρωση της τεχνικής, με εφαρμογές που περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων ψηφιακές κάμερες με μεταβλητούς φακούς, αισθητήρες οδομετρίας σε αυτοκίνητα και έναν αποστασιόμετρο λείζερ εγκατεστημένο σε ένα διαφορικό ρομπότ [105].

Τα ρομπότ αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην αναγνώριση σημαντικών εμποδίων, κυρίως λόγω των περιορισμένων αντιληπτικών τους ικανοτήτων, όπως η ανεπάρκεια στην αναγνώριση ημιδιαφανών αντικειμένων. Επίσης, αντιμετωπίζουν δυσκολίες σε δυναμικά περιβάλλοντα, καθώς οι άνθρωποι ζουν σε αυτά και το περιβάλλον αλλάζει συνεχώς. Τα υπάρχοντα συστήματα αποφυγής εμποδίων και σχεδιασμού διαδρομής μπορεί να μην λαμβάνουν επαρκώς υπόψη τις ανόρυβες πληροφορίες και τεχνικές που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι για πλοήγηση. Αυτές οι περιορισμένες δυνατότητες προκαλούν δυσκολίες στη ρομποτική όραση και παρακολούθηση διαδρομής, καθώς και στην ενσωμάτωση των ανόρυβων ανθρώπινων γνώσεων και στρατηγικών στους αλγορίθμους σχεδιασμού διαδρομής. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαία η ανάπτυξη αξιόπιστων και ισχυρών αλγορίθμων πλοήγησης για οικιακά ρομπότ που λειτουργούν σε περιοχές που κατοικούνται από ανθρώπους [106].

Η δυσκολία εξομάλυνσης της τροχιάς σε δυναμικά περιβάλλοντα οφείλεται στην ταχύτητα ανίχνευσης των δυναμικών οντοτήτων. Η αποσύνδεση της μονάδας εξομάλυνσης τροχιάς από τη διαδικασία SLAM εμποδίζει την παραγωγή ομαλών τροχιών σε πραγματικό χρόνο. Στην περίπτωση των τηλεχειριζόμενων ρομπότ και των αυτόνομων οχημάτων, η εισροή του χειριστή και η εμπειρία του χρήστη είναι σημαντικές για τη δημιουργία και τον έλεγχο της τροχιάς. Απαιτείται η ενσωμάτωση της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ και των ενεργών μηχανισμών ανατροφοδότησης. Σε περιπτώσεις όπως τα αυτόνομα αναπηρικά αμαξίδια ρομπότ, η ασφάλεια είναι κρίσιμη, καθώς ορισμένοι αλγόριθμοι μπορεί να παράγουν διαδρομές που φέρνουν το ρομπότ επικίνδυνα κοντά σε εμπόδια. Είναι δύσκολο να δημιουργηθούν ασφαλείς διαδρομές που να αποφεύγουν τα εμπόδια. Επίσης, απαιτείται ισορροπία μεταξύ της εμπειρίας του χρήστη και της μαθηματικής πληρότητας του συστήματος. Η ακριβής παρακολούθηση κινούμενων αντικειμένων απαιτεί την αντιμετώπιση προβλημάτων ανίχνευσης πεζών και δυσμενών συνθηκών [107].

Συζήτηση πιθανών λύσεων και μελλοντικών ερευνητικών κατευθύνσεων

Η σημασιολογία στη ρομποτική μπορεί να επηρεάσει τις επερχόμενες ρομποτικές εφαρμογές, ειδικά αυτές που απαιτούν στενή ανθρώπινη σύνδεση. Οι βελτιώσεις στα δεδομένα και τις τεχνολογίες μπορούν να βοηθήσουν στην ερμηνεία των σκηνών για εφαρμογές UAV, όπως έχει γίνει για τα οχήματα. Η σημασιολογική γνώση του περιβάλλοντος επιτρέπει στο ρομπότ να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου και είναι ένα πρώτο βήμα για να εκτελέσει ανεξάρτητα καθήκοντα σε μη δομημένες καταστάσεις. Οι άνθρωποι θα συνεχίσουν να καθοδηγούν την εφαρμογή της σημασιολογίας στα ρομπότ, ενώ οι βελτιώσεις στην τεχνολογία και τα δεδομένα θα συμβάλλουν σε μελλοντική έρευνα. Ένα από τα προβλήματα που παραμένουν αναπάντητα είναι, πώς να εφαρμοστούν αποτελεσματικά οι σημασιολογικές πληροφορίες σε νέες εργασίες και αντικείμενα [108].

Μελλοντικές μελέτες στον τομέα της ρομποτικής όρασης και της παρακολούθησης διαδρομής προτείνουν να επικεντρωθούν στην κατανόηση του εγκεφάλου, προκειμένου να δημιουργηθούν πράκτορες με τεχνητή νοημοσύνη που να μπορούν να αντιμετωπίσουν προβληματικά σενάρια στον πραγματικό κόσμο. Το νευρομορφικό υλικό έχει ήδη επανασχεδιάσει τον τομέα της όρασης και μπορεί να επηρεάσει τη ρομποτική, με παραδείγματα όπως οι νευρομορφικοί αισθητήρες όρασης που βασίζονται σε βιολογική όραση. Η νευρομορφική μηχανική θα μπορούσε να προσφέρει βάση για μια

εξηγήσιμη τεχνητή νοημοσύνη στη ρομποτική όραση, με τη χρήση αλγορίθμων που μιμούνται τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η μελλοντική έρευνα πρέπει να εξετάσει τον συνδυασμό τεχνικών εξηγήςσιμης τεχνητής νοημοσύνης και ενισχυτικής μάθησης στη ρομποτική όραση, προκειμένου να βελτιωθεί η ερμηνευσιμότητα και η επεξηγηματικότητα της συμπεριφοράς του συστήματος [109].

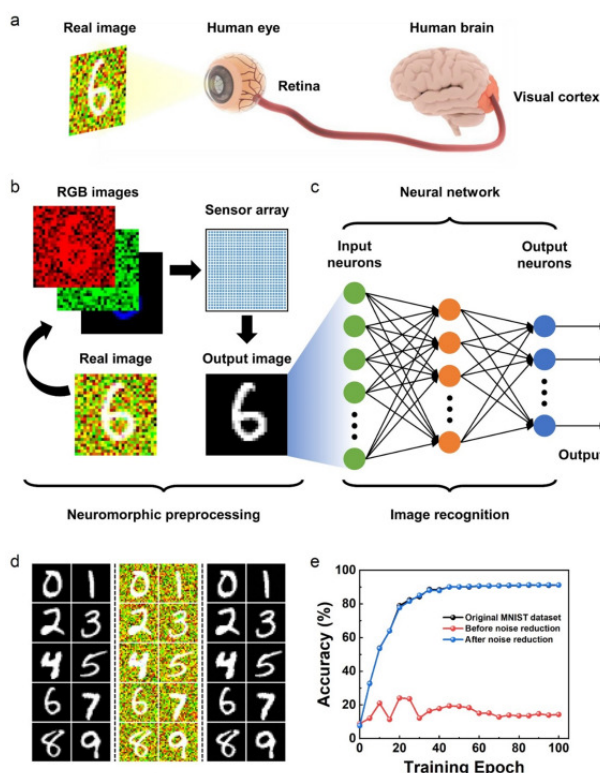


Figure 34: Αναγνώριση εικόνας οπτοηλεκτρονικών συνάψεων με βάση το νευρομορφικό οπτικό σύστημα.(a) Σχηματική αναπαράσταση του ανθρώπινου συστήματος οπτικής αναγνώρισης.(b) Η προεπεξεργασία της μείωσης του θορύβου της εικόνας με χρήση της συστοιχίας αισθητήρων.(c) Απεικόνιση της αναγνώρισης εικόνας με χρήση τεχνητού νευρωνικού δικτύου.(d) Τρεις τύποι προπαρασκευασμένων εικόνων, με αρχικές εικόνες δοκιμής MNIST (αριστερές στήλες), ειδικά επεξεργασμένες εικόνες με R & G Gaussian θόρυβο (μεσαίες στήλες) και των εικόνες μετά τη μείωση του θορύβου με τη συστοιχία αισθητήρων (δεξιές στήλες).(e) Συγκρίσεις της ακρίβειας αναγνώρισης των των προ-επεξεργασμένων εικόνων [110].

Τα ρομποτικά συστήματα όρασης μπορούν να βελτιώσουν τις επιδόσεις τους μέσω προσαρμοστικών μεθόδων αυτοβαθμονόμησης. Η χρήση τετραγωνικής ρίζας και προσαρμοστικού φιλτραρίσματος Kalman μπορεί να μετατρέψει κακοθεωρημένα, μη γραμμικά ή ασταθή προβλήματα σε καλάθεωρημένα, γραμμικά ή σταθερά. Η προσαρμοστική αυτοβαθμονόμηση μπορεί επίσης να βελτιώσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία της ρομποτικής όρασης και των δραστηριοτήτων παρακολούθησης διαδρομής. Μελέτες με πειράματα και προσομοιώσεις μπορούν να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα και τις προκλήσεις των προτεινόμενων στρατηγικών. Προσαρμοστικοί αλγόριθμοι μάθησης μπορούν να ενσωματωθούν στα ρομποτικά συστήματα όρασης για τη συνεχή προσαρμογή και βελτίωση της λειτουργικότητάς τους σε πραγματικό χρόνο και μεταβαλλόμενα περιβαλλοντικά παράγοντα. Ένας άλλος τομέας μελέτης είναι η ανάπτυξη εξελιγμένων αλγορίθμων και μεθόδων για την παρακολούθηση διαδρομής σε ρομποτικά συστήματα, ώστε να μπορούν να πλοηγούνται σε περίπλοκα και δυναμικά περιβάλλοντα [111].

Τα αυτόνομα οχήματα μπορούν να επωφεληθούν από τη ρομποτική όραση και την παρακολούθηση διαδρομής που προσφέρονται από τα συστήματα υπολογιστών άκρων. Τα συστήματα αυτού του είδους πρέπει να διαχειρίζονται αποδοτικά μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, να συνδέονται με άλλες λειτουργικές μονάδες και να χρησιμοποιούν ελάχιστη ενέργεια. Επίσης αναφέρεται ότι για την ασφάλεια των αυτόνομων οχημάτων, τα συστήματα υπολογισμού άκρων πρέπει να παρέχουν αρκετή ισχύ, πλεονασμό και ασφάλεια [75].

Ο νευρώνας LGMD(Lobula Giant Movement Detector), ένα σύστημα όρασης εμπνευσμένο από τη βιολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρορομπότ για αποφυγή εμποδίων. Άλλες τεχνικές αποφυγής συγκρούσεων και πλοήγησης, είναι οι τεχνικές βασισμένες στον στοιχειώδη ανιχνευτή κίνησης. Η ανάπτυξη και βελτίωση των βιοεμπνευσμένων συστημάτων όρασης μπορούν να συμβάλλουν στην εξέλιξη της ρομποτικής όρασης στην παρακολούθηση διαδρομής, καθώς και η δοκιμή διαφορετικών μοντέλων και αλγορίθμων αποζητάει στην αυξημένη απόδοση και προσαρμοστικότητα. Ο συνδυασμός διαφόρων μονάδων βιοεμπνευσμένης όρασης αντίστοιχα μπορεί να βελτιώσει τις ικανότητες των αυτόνομων ρομπότ. Με την υλοποίηση αυτών των βιοεμπνευσμένων συστημάτων, τα αυτόνομα ρομπότ θα μπορούν να έχουν αυξημένη επιτυχία στην πλοήγησή τους και την ακολουθία πορειών [112].

Η εφαρμογή της τεχνικής ρομποτικού σμήνους ερευνάται με τη δημιουργία ενός αποτελεσματικού σχεδιαστή διαδρομής για ένα αυτόνομο κινητό ρομπότ, χρησιμοποιώντας βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί μια συνάρτηση καταλληλότητας που λαμβάνει υπόψη τις αποστάσεις ανάμεσα στα σωματίδια του ρομπότ και τον στόχο, καθώς και το πλησιέστερο εμπόδιο. Έχει επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου μέσω προσομοιώσεων σε διάφορες ρυθμίσεις. Προκειμένου να γίνουν περαιτέρω έρευνες, μπορούν να εξεταστούν προσαρμόσιμες τεχνικές για τη δημιουργία πιο αποτελεσματικών ελεγκτών πλοήγησης σε πραγματικές συνθήκες. Οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος παράγει την συντομότερη διαδρομή για το ρομπότ σε άγνωστες ρυθμίσεις σε σύγκριση με προηγούμενες προσεγγίσεις. Μια άλλη μέθοδος βασισμένη στη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων έχει εισαχθεί για την πλοήγηση κινητών ρομπότ, αλλά απαιτεί περισσότερο χρόνο για να εντοπίσει τον στόχο [113].

Συμπερασματικά, ο τομέας της ρομποτικής όρασης και της παρακολούθησης διαδρομής εξελίσσεται συνεχώς, με τη συνεχή έρευνα να στοχεύει στη βελτίωση των αντιληπτικών ικανοτήτων και της αποτελεσματικότητας της πλοήγησης των αυτόνομων συστημάτων. Η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών, όπως η βαθιά μάθηση, η ενισχυτική μάθηση και η συγχώνευση αισθητήρων, σε συνδυασμό με την εστίαση στην προσαρμοστικότητα και την αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ, θα διαμορφώσουν πιθανότατα το μέλλον αυτών των τομέων.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Η παρούσα διατριβή έχει ως κύριο στόχο να μελετήσει τις τελευταίες εξελίξεις της ρομποτικής όρασης και της παρακολούθησης διαδρομής. Σε κάθε κεφάλαιο μελετούνται οι πρόσφατες εξελίξεις ρομποτικών βραχιόνων και αυτόνομων ρομπότ καθώς και η εφαρμογή τους στις σύγχρονες βιομηχανίες.

Συνέπειες για τη μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη και σημασία του θέματος για διάφορες βιομηχανίες και τομείς

Η κατάσταση του οχήματος επηρεάζεται από παράγοντες όπως το άγχος του επιβάτη, που επηρεάζει τον σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων. Αυτή η σύνδεση της κατάστασης του επιβάτη με την κατάσταση του οχήματος αποτελεί θέμα για περαιτέρω μελέτη ρομποτικής όρασης και παρακολούθησης διαδρομής. Η ανάπτυξη αυτόνομων αυτοκινήτων ανοίγει το δρόμο για τη διαχείριση και συντονισμό του στόλου, το οποίο μπορεί να εξεταστεί περαιτέρω στην ρομποτική όραση και παρακολούθηση διαδρομής. Τα αυτόνομα συστήματα στόλου έχουν ήδη αποδείξει την αποδοτικότητα στην κατανάλωση καυσίμων και στην εξοικονόμηση της κυκλοφορίας [114].

Για την καθοδήγηση βιομηχανικών ρομπότ, επισημαίνονται παράγοντες που επηρεάζουν τη βελτίωση αυτών των συστημάτων, όπως ο χρόνος επεξεργασίας, η ασφάλεια, η ακρίβεια, το εύρος και το βάρος των αισθητήρων και τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά. Εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές όρασης, όπως η φωτογραμμετρία, η στερεοσκοπική όραση, ο χρόνος πτήσης, το δομημένο φως και ο τριγωνισμός με λέιζερ. Προτείνεται η επικέντρωση στην τελειοποίηση και τον συνδυασμό αυτών των μεθόδων για την αποτελεσματική παρακολούθηση διαδρομών. Συμβουλεύεται επίσης η σκέψη

των αναγκών της εφαρμογής κατά την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου όρασης για τη ρομποτική παρακολούθηση διαδρομών στη βιομηχανία και τη μεταποίηση, μεταξύ άλλων, της ακρίβειας ευθυγράμμισης και ανάλυσης των σημείων [97].

Το σημερινό εμπόδιο για την ευρεία ανάπτυξη των ρομπότ στη γεωργία είναι η ανάγκη για τεχνολογική πρόοδο σε τομείς όπως η μηχανική όραση σε συνθήκες συνωστισμού, η αυτόνομη πλοήγηση, ο επιδέξιος χειρισμός και η τεχνολογία μπαταριών. Η απαιτητική φύση των γεωργικών συνθηκών και η πρόκληση της εγγύησης της ανθεκτικότητας σε πραγματικές συνθήκες έχουν οδηγήσει στην έλλειψη αυτόνομων κινητών ρομπότ ή ρομπότ "πεδίου" στη γεωργία. Τα αυτόνομα συστήματα στη γεωργία αντιμετωπίζουν δυσκολίες σε μη δομημένες καταστάσεις, γεγονός που καθιστά προκλητικές εργασίες όπως η όραση σε ακατάστατα περιβάλλοντα και η παρακολούθηση διαδρομών [115].

Τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να βοηθήσουν στην αποκατάσταση ανθρώπων που έχουν νευρομυϊκά προβλήματα ή έχουν υποστεί τραύματα ή επεισόδια εγκεφαλικού ή νωτιαίου μυελού. Τα ρομπότ μπορούν να καθοδηγούν τα άκρα των ασθενών σε διάφορες κινήσεις, εφαρμόζοντας μια συνεχή δύναμη κατά τη διάρκεια της κίνησης. Η έρευνα επικεντρώνεται επί του παρόντος στη δημιουργία ρομπότ που μοιάζουν με χέρια και χρησιμοποιούν υβριδικά συστήματα ελέγχου θέσης-δύναμης. Παράλληλα, μελέτες διερεύνησης της χρήσης ρομπότ με συστήματα όρασης μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια και την ακουράτεστα της αποκατάστασης. Επίσης, οι εξελίξεις στη μηχανική μάθηση και στους αλγόριθμους σχεδιασμού διαδρομής μπορούν να δώσουν τη δυνατότητα σε ρομπότ να κατευθύνουν τους ασθενείς κατά μήκος προκαθορισμένων διαδρομών και να διατηρήσουν καλό έλεγχο στη δύναμη που ασκούν [116].

Η NASA χρειάζεται να επενδύσει σε τεχνολογίες ρομποτικής όρασης και παρακολούθησης διαδρομών για τη μελλοντική εξερεύνηση του διαστήματος. Ο ρόλος των ρομποτικών εξερευνητών είναι να συλλέξουν επιστημονικά δεδομένα και να αξιολογήσουν κινδύνους πριν από την άφιξη των ανθρώπινων εξερευνητών, οι οποίοι θα επιβλέπουν και θα βελτιώνουν την τεχνολογία. Η χρήση ευφυών ρομπότ μειώνει τον φόρτο εργασίας και τους κινδύνους για τους ανθρώπους και αποτελεί σημαντικό στοιχείο στα σχέδια αποστολών. Τα ρομπότ θα χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά υλικών, την εγκατάσταση εξοπλισμού και την κατασκευή σε πλανητικές επιφάνειες και στο διάστημα. Η μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη της ρομποτικής όρασης και παρακολούθησης διαδρομών θα είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή εξερεύνηση και κατασκευή στο διάστημα [117].

Μια αποτελεσματική μέθοδος για τον σχεδιασμό πληροφοριακών διαδρομών για ρομποτικούς αισθητήρες σε μεγάλης κλίμακας περιβαλλοντικές εφαρμογές, ονομάζεται eSIP (efficient Single-robot Informative Path planning) και βελτιστοποιεί τις διαδρομές των ρομπότ χρησιμοποιώντας μια διαδικασία Gauss για τη μοντελοποίηση του υποκείμενου φαινομένου και την αμοιβαία πληροφορία για την ποσοτικοποίηση των πληροφοριών. Η αμοιβαία πληροφορία που συλλέγεται με αυτήν τη μέθοδο είναι σχεδόν ταυτόσημη με την πληροφορία που προκύπτει από μια βέλτιστη λύση και είναι μια τεχνική διαδοχικής κατανομής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιονδήποτε αλγόριθμο σχεδιασμού πολλαπλών ρομπότ. Η έρευνα αυτών των δυνατοτήτων αυτού του αλγορίθμου σε διάφορα πεδία εφαρμογών κατά την επέκταση τη μεθοδολογίας του μπορούν να οδηγήσουν στην online προσαρμογή του μοντέλου μελλοντικά [118].

Βιβλιογραφία

- [1] V Nandini et al. «A review on applications of machine vision systems in industries». In: *Indian Journal of Science and Technology* 9.48 (2016), pp. 1–5.
- [2] Thiago Rateke and Aldo von Wangenheim. «Passive vision road obstacle detection: a literature mapping». In: *International Journal of Computers and Applications* 44.4 (2022), pp. 376–395.
- [3] Eric Royer et al. «Outdoor autonomous navigation using monocular vision». In: *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2005, pp. 1253–1258.
- [4] Shengyong Chen, Youfu Li, and Ngai Ming Kwok. «Active vision in robotic systems: A survey of recent developments». In: *The International Journal of Robotics Research* 30.11 (2011), pp. 1343–1377.
- [5] Juraj Slovák et al. «Vision and RTLS safety implementation in an experimental human—robot collaboration scenario». In: *Sensors* 21.7 (2021), p. 2419.
- [6] Rostam Affendi Hamzah and Haidi Ibrahim. «Literature survey on stereo vision disparity map algorithms». In: *Journal of Sensors* 2016 (2016).
- [7] Stefan Hrabar, Peter Corke, and Michael Bosse. «High dynamic range stereo vision for outdoor mobile robotics». In: *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2009, pp. 430–435.
- [8] Jesus Martinez-Gomez et al. «A taxonomy of vision systems for ground mobile robots». In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11.7 (2014), p. 111.

-
- [9] Sebastian Schwarz, Roger Olsson, and Mårten Sjöström. «Depth sensing for 3DTV: a survey». In: *IEEE MultiMedia* 20.4 (2013), pp. 10–17.
- [10] Javier Ruiz-del-Solar, Patricio Loncomilla, and Naiomi Soto. «A survey on deep learning methods for robot vision». In: *arXiv preprint arXiv:1803.10862* (2018).
- [11] Csaba Szepesvári. *Algorithms for reinforcement learning*. Springer Nature, 2022.
- [12] *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-the-Kalman-Filter-based-object-tracking-algorithms-used-in-this-work_fig1_358134782.
- [13] SY Chen. «Kalman filter for robot vision: a survey». In: *IEEE Transactions on industrial electronics* 59.11 (2011), pp. 4409–4420.
- [14] Allashyam Charan, Chundu Karthik Chowdary, and Peddagowda Komal. «The Future of Machine Vision in Industries- A systematic review». In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1224.1 (2022), p. 012027. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1224/1/012027>.
- [15] Neerparaj Rai, Bijay Rai, and Pooja Rai. «Computer vision approach for controlling educational robotic arm based on object properties». In: *2014 2nd International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking*. IEEE, 2014, pp. 1–9.
- [16] Sandra Nope, Humberto Loaiza, and Eduardo F. Caicedo. «3D-2D Gesture reconstruction using monocular video information applied to a robotic arm». In: *Revista Facultad De Ingenieria-universidad De Antioquia* (2010), pp. 145–154. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:108924094>.
- [17] *zivid*. <https://shop.zivid.com>.
- [18] Huahua Lin. «Robotic manipulation based on 3d vision: A survey». In: *Proceedings of the 2020 International Conference on Pattern Recognition and Intelligent Systems*. 2020, pp. 1–5.
- [19] *Yahboom 6-DOF Robot Arm Building Kit for Jetson Nano - App Controlled, ROS Programmable, Open Source*. <https://www.ubuy.co.it/en/product/3MKZZ4O-yahboom-robot-arm-with-camera-6-dof-for-jetson-nano-visual-identity-ai-robotic-hand-building-kit-wit>.

-
- [20] *DIGITs mounted on an Allegro multi-finger hand*. https://www.researchgate.net/figure/DIGITs-mounted-on-an-Allegro-multi-finger-hand-To-validate-our-sensor-design-we-learn_fig1_339581111.
- [21] Zhanat Kappassov, Juan-Antonio Corrales, and Véronique Perdereau. «Tactile sensing in dexterous robot hands — Review». In: *Robotics and Autonomous Systems* 74 (2015), pp. 195–220. ISSN: 0921-8890. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889015001621>.
- [22] Alberto Sanfeliu. «Robot Vision for autonomous object learning and tracking». In: *Progress in Pattern Recognition, Speech and Image Analysis: 8th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, CIARP 2003, Havana, Cuba, November 26-29, 2003 Proceedings 8*. Springer. 2003, pp. 17–28.
- [23] Mary B Alatis and Gerhard P Hancke. «A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods». In: *IEEE Access* 8 (2020), pp. 39830–39846.
- [24] Luis Pérez et al. «Robot Guidance Using Machine Vision Techniques in Industrial Environments: A Comparative Review». In: *Sensors* 16.3 (2016). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s16030335. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/3/335>.
- [25] Don Ray Murray and J. Little. «Using Real-Time Stereo Vision for Mobile Robot Navigation». In: *Autonomous Robots* 8 (2000), pp. 161–171. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:1844195>.
- [26] Andrew English et al. «Vision based guidance for robot navigation in agriculture». In: *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2014), pp. 1693–1698. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18923570>.
- [27] Matthew David Dunbabin and Lino Marques. «Robots for Environmental Monitoring: Significant Advancements and Applications». In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19 (2012), pp. 24–39. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14884578>.
- [28] Chen Feng et al. «Vision guided autonomous robotic assembly and as-built scanning on unstructured construction sites». In: *Automation in Construction* 59 (2015), pp. 128–138. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14883851>.

-
- [29] Donato Di Paola et al. «An Autonomous Mobile Robotic System for Surveillance of Indoor Environments». In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 7 (2010). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15419507>.
- [30] Batıkan E Demir, Raif Bayir, and Fecir Duran. «Real-time trajectory tracking of an unmanned aerial vehicle using a self-tuning fuzzy proportional integral derivative controller». In: *International Journal of Micro Air Vehicles* 8.4 (2016), pp. 252–268.
- [31] *Basic structure of self-tuning fuzzy PID control algorithm. PID: proportional integral derivative.* Basicstructureofself-tuningfuzzyPIDcontrolalgorithm.PID:proportionalintegralderivative..
- [32] Moveh Samuel, Mohamed Hussein, and Maziah Binti Mohamad. «A review of some pure-pursuit based path tracking techniques for control of autonomous vehicle». In: *International Journal of Computer Applications* 135.1 (2016), pp. 35–38.
- [33] *Geometric explanation of pure-pursuit.* https://www.researchgate.net/figure/Geometric-explanation-of-pure-pursuit-From-figure-one-above-the-pure-pursuit-process-can_fig1_295257868.
- [34] *MPC Controller.* <https://www.mathworks.com/help/mpc/ug/lane-following-control-with-sensor-fusion-and-lane-detection.html>.
- [35] Chris J Ostafew, Angela P Schoellig, and Timothy D Barfoot. «Learning-based nonlinear model predictive control to improve vision-based mobile robot path-tracking in challenging outdoor environments». In: *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2014, pp. 4029–4036.
- [36] Zhaoqiang Wang et al. «Improved Linear Quadratic Regulator Lateral Path Tracking Approach Based on a Real-Time Updated Algorithm with Fuzzy Control and Cosine Similarity for Autonomous Vehicles». In: *Electronics* 11 (2022). URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/22/3703>.
- [37] Rongxin Cui et al. «Adaptive Neural Network Control of AUVs With Control Input Nonlinearities Using Reinforcement Learning». In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 47.6 (2017), pp. 1019–1029. DOI: 10.1109/TSMC.2016.2645699.

-
- [38] Todd Hester et al. «Deep q-learning from demonstrations». In: *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*. Vol. 32. 1. 2018.
- [39] Thanh Nguyen Truong, Anh Tuan Vo, and Hee-Jun Kang. «A Backstepping Global Fast Terminal Sliding Mode Control for Trajectory Tracking Control of Industrial Robotic Manipulators». In: *IEEE Access* 9 (2021), pp. 31921–31931. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3060115.
- [40] Saeed Asadi Bagloee et al. «Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies». In: *Journal of modern transportation* 24 (2016), pp. 284–303.
- [41] *Drone*. <https://www.technologyreview.com/2023/05/23/1073500/drone-food-delivery-shenzhen-meituan/>.
- [42] Daniela Rojas Vilorio et al. «Unmanned aerial vehicles/drones in vehicle routing problems: a literature review». In: *International Transactions in Operational Research* 28.4 (2021), pp. 1626–1657.
- [43] Sauli Ahvenjärvi. «The human element and autonomous ships». In: *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 10.3 (2016), pp. 517–521.
- [44] Matthias De Ryck, Mark Versteyhe, and Frederik Debrouwere. «Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques». In: *Journal of Manufacturing Systems* 54 (2020), pp. 152–173.
- [45] Christopher G Atkeson. «Learning arm kinematics and dynamics». In: *Annual review of neuroscience* 12.1 (1989), pp. 157–183.
- [46] Santosha Kumar Dwivedy and Peter Eberhard. «Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review». In: *Mechanism and machine theory* 41.7 (2006), pp. 749–777.
- [47] *end effectpr and joints*. <https://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/34808-robotics-motion-control-the-complex-relationship-between-movement-and-task>.
- [48] Franco Molteni et al. «Exoskeleton and end-effector robots for upper and lower limbs rehabilitation: narrative review». In: *PM&R* 10.9 (2018), S174–S188.

-
- [49] Mark J. Willis. «Proportional-Integral-Derivative Control». In: *Encyclopedia of Systems and Control* (2021). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15148519>.
- [50] *PID controller design*. https://www.researchgate.net/figure/PID-controller-design_fig4_360814070.
- [51] Tobias Kunz and Mike Stilman. «Time-Optimal Trajectory Generation for Path Following with Bounded Acceleration and Velocity». In: (July 2012). DOI: 10.15607/RSS.2012.VIII.027.
- [52] Carlos E Garcia, David M Prett, and Manfred Morari. «Model predictive control: Theory and practice—A survey». In: *Automatica* 25.3 (1989), pp. 335–348.
- [53] *MPC Basic Control Loop*. <https://www.mathworks.com/help/mpc/gs/what-is-mpc.html>.
- [54] Timm Faulwasser et al. «Predictive path-following control: Concept and implementation for an industrial robot». In: *2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)* (2013), pp. 128–133. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2053579>.
- [55] Yanzhe WANG et al. «Robot trajectory planning for autonomous 3D reconstruction of cockpit in aircraft final assembly testing». In: *Chinese Journal of Aeronautics* (2023). ISSN: 1000-9361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.06.004>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936123001905>.
- [56] Bassem Dahroug et al. «Some Examples of Path Following in Microrobotics». In: *2018 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)* (2018), pp. 1–6. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:52928181>.
- [57] *cloud*. https://www.researchgate.net/figure/The-figure-shows-how-the-robot-arm-unloads-the-local-grasp-detection-task-to-the-cloud_fig1_371233023.
- [58] Mohsen Soori, Behrooz Arezoo, and Roza Dastres. «Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review». In: *Cognitive Robotics* 3 (2023), pp. 54–70. ISSN: 2667-2413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667241323000113>.

-
- [59] Krishnan Saravanan. «Cloud Robotics». In: *Robotic Systems* (2020). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:241953734>.
- [60] Niramon Ruangpayoongsak and Hubert Roth. «Path following in unknown environment for a car-like mobile robot». In: *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. 2005. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:4682263>.
- [61] Kamran H. Sedighi et al. «Autonomous local path planning for a mobile robot using a genetic algorithm». In: *Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.04TH8753)* 2 (2004), 1338–1345 Vol.2. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:1904319>.
- [62] Bahaa I. Kazem, Ali H. Hamad, and Mustafa M. Mozael. «Modified Vector Field Histogram with a Neural Network Learning Model for Mobile Robot Path Planning and Obstacle Avoidance». In: *Int. J. Adv. Comp. Techn.* 2 (2010), pp. 166–173. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7466408>.
- [63] Sertac Karaman and Emilio Frazzoli. «Sampling-based algorithms for optimal motion planning». In: *The International Journal of Robotics Research* 30 (2011), pp. 846–894. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14876957>.
- [64] Thomas M Howard and Alonzo Kelly. «Optimal rough terrain trajectory generation for wheeled mobile robots». In: *The International Journal of Robotics Research* 26.2 (2007), pp. 141–166.
- [65] Wan Rahiman and Zafariq Zainal. «An overview of development GPS navigation for autonomous car». In: *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2013, pp. 1112–1118. DOI: 10.1109/ICIEA.2013.6566533.
- [66] Gunzung Kim et al. «Concurrent Firing Light Detection and Ranging System for Autonomous Vehicles». In: *Remote. Sens.* 13 (2021), p. 1767. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:235190205>.
- [67] You Li and Javier Ibanez-Guzman. «Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems». In: *IEEE Signal Processing Magazine* 37.4 (2020), pp. 50–61. DOI: 10.1109/MSP.2020.2973615.

- [68] *LIDAR-Based 3D Sensing*. https://www.researchgate.net/figure/Sensors-coverage-diagram-for-an-autonomous-vehicle-taken-from-6_fig1_351407935.
- [69] Zhichao Chen and Stan Birchfield. «Qualitative Vision-Based Path Following». In: *IEEE Transactions on Robotics* 25 (2009), pp. 749–754. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14104952>.
- [70] Javier Gámez García et al. «Sensor fusion of force and acceleration for robot force control». In: *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)* 3 (2004), 3009–3014 vol.3. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15628234>.
- [71] Mary B. Alatise and Gerhard P. Hancke. «A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods». In: *IEEE Access* 8 (2020), pp. 39830–39846. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2975643.
- [72] *ADAS(Advanced driver-assistance system)*. <https://www.eetimes.com/sensor-fusion-explores-ai-to-prep-for-adas-av-designs/>.
- [73] Steven Macenski et al. «Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild». In: *Science Robotics* 7.66 (2022), eabm6074.
- [74] Dennis Barrios Aranibar and Pablo Javier Alsina. «Reinforcement Learning-based Path Planning for Autonomous Robots *». In: URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18174527>.
- [75] Shaoshan Liu et al. «Edge computing for autonomous driving: Opportunities and challenges». In: *Proceedings of the IEEE* 107.8 (2019), pp. 1697–1716.
- [76] Giuseppe Fragapane et al. «Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda». In: *European Journal of Operational Research* 294.2 (2021), pp. 405–426. ISSN: 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.019>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221721000217>.
- [77] Juan Jesús Roldán et al. «Robots in Agriculture: State of Art and Practical Experiences». In: 2018. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115596075>.

-
- [78] Mahdi Tavakoli, Jay Carriere, and Ali Torabi. «Robotics, smart wearable technologies, and autonomous intelligent systems for healthcare during the COVID-19 pandemic: An analysis of the state of the art and future vision». In: *Advanced Intelligent Systems 2.7* (2020), p. 2000071.
- [79] Farha Jahan et al. «Security modeling of autonomous systems: A survey». In: *ACM Computing Surveys (CSUR) 52.5* (2019), pp. 1–34.
- [80] Niall Winters et al. «Omni-directional vision for robot navigation». In: *Proceedings IEEE Workshop on Omnidirectional Vision (Cat. No.PR00704)* (2000), pp. 21–28. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:8622383>.
- [81] *3D Vision-Guided Robotics*. https://www.keyence.com/products/vision/vision-sys/3d_vgr/.
- [82] Jens-Steffen Gutmann, Masaki Fukuchi, and Masahiro Fujita. «Real-Time Path Planning for Humanoid Robot Navigation». In: *International Joint Conference on Artificial Intelligence*. 2005. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:1331595>.
- [83] Andrea Cherubini, Fabien Spindler, and François Chaumette. «Autonomous Visual Navigation and Laser-Based Moving Obstacle Avoidance». In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 15* (2014), pp. 2101–2110. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:206740154>.
- [84] Roni-Jussi Halme et al. «Review of vision-based safety systems for human-robot collaboration». In: *Procedia CIRP 72* (2018). 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, pp. 111–116. ISSN: 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.043>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118301434>.
- [85] Yanina Landa et al. «Robotic Path Planning and Visibility with Limited Sensor Data». In: *2007 American Control Conference*. 2007, pp. 5425–5430. DOI: 10.1109/ACC.2007.4282381.
- [86] Faiza Gul, Wan Rahiman, and Syed Sahal Nazli Alhady. «A comprehensive study for robot navigation techniques». In: *Cogent Engineering 6.1* (2019), p. 1632046.

-
- [87] Benjamin Beltzung et al. «Deep learning for studying drawing behavior: A review». In: *Frontiers in Psychology* 14 (Feb. 2023), p. 992541. DOI: 10.3389/fpsyg.2023.992541.
- [88] Athanasios Voulodimos et al. «Deep Learning for Computer Vision: A Brief Review». In: *Computational Intelligence and Neuroscience* 2018 (2018). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3557281>.
- [89] <https://www.flyability.com/simultaneous-localization-and-mapping>.
- [90] Ayoung Kim and Ryan M. Eustice. «Active visual SLAM for robotic area coverage: Theory and experiment». In: *The International Journal of Robotics Research* 34 (2015), pp. 457–475. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:1253706>.
- [91] Juan-Carlos Trujillo et al. «Cooperative monocular-based SLAM for multi-UAV systems in GPS-denied environments». In: *Sensors* 18.5 (2018), p. 1351.
- [92] Seth Hutchinson, Gregory D Hager, and Peter I Corke. «A tutorial on visual servo control». In: *IEEE transactions on robotics and automation* 12.5 (1996), pp. 651–670.
- [93] Andrea Cherubini, François Chaumette, and Giuseppe Oriolo. «Visual servoing for path reaching with nonholonomic robots». In: *Robotica* 29.7 (2011), pp. 1037–1048.
- [94] R.C. Luo and M.G. Kay. «Multisensor integration and fusion in intelligent systems». In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 19.5 (1989), pp. 901–931. DOI: 10.1109/21.44007.
- [95] Ren C. Luo and Chun C. Lai. «Multisensor Fusion-Based Concurrent Environment Mapping and Moving Object Detection for Intelligent Service Robotics». In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61 (2014), pp. 4043–4051. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2804295>.
- [96] Youcef Mezouar and François Chaumette. «Path planning for robust image-based control». In: *IEEE Trans. Robotics Autom.* 18 (2002), pp. 534–549. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13961865>.
- [97] Luis Pérez et al. «Robot guidance using machine vision techniques in industrial environments: A comparative review». In: *Sensors* 16.3 (2016), p. 335.

-
- [98] Zengxi Pan et al. «Recent progress on programming methods for industrial robots». In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 28.2 (2012), pp. 87–94.
- [99] Sergio Cubero et al. «Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables». In: *Food and bioprocess technology* 4 (2011), pp. 487–504.
- [100] <https://www.arrow.com/it-it/research-and-events/articles/vision-based-autonomous-robots>.
- [101] Francisco Rubio, Francisco Valero, and Carlos Llopis-Albert. «A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications». In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 16.2 (2019), p. 1729881419839596.
- [102] Peter Corke. *Robotics, Vision and Control*. Vol. 118. Jan. 2017. ISBN: 978-3-319-54412-0. DOI: 10.1007/978-3-319-54413-7.
- [103] Corke Peter. *Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB*. 2011.
- [104] Won Kyung Do and Monroe Kennedy. «DenseTact: Optical Tactile Sensor for Dense Shape Reconstruction». In: *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2022, pp. 6188–6194. DOI: 10.1109/ICRA46639.2022.9811966.
- [105] Jérôme Maye et al. «Online Self-Calibration for Robotic Systems». In: *The International Journal of Robotics Research* 35 (Apr. 2016), pp. 357–380. DOI: 10.1177/0278364915596232.
- [106] Fang Yuan, Lukas Twardon, and Marc Hanheide. «Dynamic path planning adopting human navigation strategies for a domestic mobile robot». In: Nov. 2010, pp. 3275–3281. DOI: 10.1109/IR0S.2010.5650307.
- [107] Abhijeet A. Ravankar et al. «Path Smoothing Techniques in Robot Navigation: State-of-the-Art, Current and Future Challenges». In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 18 (2018). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:52312991>.
- [108] Sourav Garg et al. «Semantics for Robotic Mapping, Perception and Interaction: A Survey». In: *ArXiv abs/2101.00443* (2021). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:230433882>.

-
- [109] Bharat Singh, Rajesh Kumar, and Vinay Pratap Singh. «Reinforcement learning in robotic applications: a comprehensive survey». In: *Artificial Intelligence Review* 55 (2021), pp. 945–990. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234826156>.
- [110] Jianyu Du et al. «A robust neuromorphic vision sensor with optical control of ferroelectric switching». In: *Nano Energy* 89 (2021), p. 106439. ISSN: 2211-2855. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106439>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285521006947>.
- [111] P. Liang, Yuh-Lin Chang, and S. Hackwood. «Adaptive self-calibration of vision-based robot systems». In: *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 19 (1989), pp. 811–824. DOI: 10.1109/21.35344.
- [112] Cheng Hu et al. «Bio-Inspired Embedded Vision System for Autonomous Micro-Robots: The LGMD Case». In: *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems* 9 (2017), pp. 241–254. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2288142>.
- [113] B. B. V. L. Deepak et al. «Advance Particle Swarm Optimization-Based Navigational Controller For Mobile Robot». In: *Arabian Journal for Science and Engineering* 39 (2014), pp. 6477–6487. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:10708780>.
- [114] M. Elbanhawi, M. Simic, and R. Jazar. «In the Passenger Seat: Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous Cars». In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 7 (2015), pp. 4–17. DOI: 10.1109/MITS.2015.2405571.
- [115] R. Sparrow and Mark Howard. «Robots in agriculture: prospects, impacts, ethics, and policy». In: *Precision Agriculture* 22 (2020), pp. 818–833. DOI: 10.1007/s11119-020-09757-9.
- [116] Ming-Shaung Ju et al. «A rehabilitation robot with force-position hybrid fuzzy controller: hybrid fuzzy control of rehabilitation robot». In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 13 (2005), pp. 349–358. DOI: 10.1109/TNSRE.2005.847354.
- [117] T. Fong and I. Nourbakhsh. «Interaction challenges in human-robot space exploration». In: *Interactions* 12 (2005), pp. 42–45. DOI: 10.1145/1052438.1052462.

-
- [118] Amarjeet Singh et al. «Efficient Informative Sensing using Multiple Robots». In: *J. Artif. Intell. Res.* 34 (2014), pp. 707–755. DOI: 10.1613/jair.2674.