ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΓΡΑΦΗΣ ΑΠΟΘΗΚΗΣ

«Inventory Scanner»

Φαινέκος Ορέστης

ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΓΡΑΦΗΣ ΑΠΟΘΗΚΗΣ
«Inventory Scanner»

Διπλωματική Εργασία

Φλεβάρης 2010

Φαινέκος Ορέστης

Α.Μ: 2001010077 | Email: ofainekos@gmail.com

Εξεταστική επιτροπή:

Βλάσσης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης (Επιβλέπων)

Νικολός Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

Ρόβας Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΓΡΑΦΗΣ ΑΠΟΘΗΚΗΣ
«Inventory Scanner»

Περίληψη

Το Σύστημα Αυτόματης Απογραφής Αποθήκης «Inventory Scanner» (INVSCAN) είναι ένα αυτοκαθοδηγούμενο καταγραφικό ρομποτικό όχημα τύπου AGV (Automated Guidance Vehicle), εξοπλισμένο με αυτοκινούμενο κατακόρυφο φωτογραφικό εξοπλισμό. Το σύστημα είναι ικανό να αναγνωρίζει πρότυπες πινακίδες σήμανσης (barcode) που φέρονται από υλικά (προϊόντα) τα οποία είναι τοποθετημένα στις ραφιέρες του αποθηκευτικού χώρου. Το σύστημα επίσης προγραμματίζεται να εκτελεί εντολές απογραφής και είναι ικανό να λειτουργεί αυτόνομα χωρίς την ανθρώπινη επίβλεψη.

Abstract

“Inventory Scanner” is an automated warehouse inventory system based on an automated guidance vehicle (AGV) equipped with a vertical motioned photographic camera unit. The system is able to recognize barcodes on materials that are located at the warehouse shelves. “Inventory Scanner” can be scheduled to execute inventory commands and it is able to operate autonomously without human surveillance.

Περιεχόμενα

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η σχεδίαση και η μελέτη ενός αυτόματου συστήματος απογραφής αποθήκης. Στη μελέτη αυτή διερευνώνται τα κυριότερα θεωρητικά και πρακτικά ζητήματα που αφορούν την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος απογραφής.

Εισαγωγικά γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των αποθηκευτικών διατάξεων, όπου παρουσιάζονται οι σύγχρονες τάσεις, καθώς και ο ρόλος των ρομποτικών οχημάτων σε αυτές, αλλά και γενικότερα στα ευέλικτα συστήματα παραγωγής. Στη συνέχεια αναλύεται το σύστημα INVSCAN σε λειτουργικά μέρη (modules) για την περαιτέρω μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση αυτού.

Ακολουθεί η μελέτη του προσδιορισμού της μορφής του οχήματος, της αντοχής του και των κυριότερων μηχανολογικών παραμέτρων του. Παρουσιάζεται εκτενώς η σχεδίαση του οχήματος και η επιλογή των εξαρτημάτων του. Υπολογίζεται η απαραίτητη ισχύς κίνησης και εκτιμάται η αυτονομία του οχήματος. Αφετέρου αναλύεται η απαραίτητη θεωρία φωτογραμμετρίας για την αποτύπωση των αποθηκευτικών περιοχών με τη χρήση της φωτογραφικής κάμερας του οχήματος. Περιγράφεται μία μέθοδος αναγνώρισης barcode, η οποία δοκιμάζεται σε πειραματική διάταξη.

Στη συνέχεια μοντελοποιείται η δρομολόγηση του οχήματος και παρουσιάζεται η μεθοδολογία εύρεσης της συντομότερης διαδρομής (ενεργειακά) για την εκτέλεση μιας απογραφής αλλά και γενικότερα μιας διαδρομής. Τέλος αναλύεται η σχεδίαση του κινηματικού ελεγκτή του οχήματος και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υλοποιημένης προσομοίωσης αυτού.

Ολοκληρώνοντας τον πρόλογο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Ν. Βλάσση για την συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

1 Εισαγωγή

1.1 Περί αυτοματισμού

Η αυτοματοποίηση της εργασίας είτε αναφερόμαστε σε χειρωνακτική είτε σε πνευματική διαφαίνεται ότι είναι το κύριο χαρακτηριστικό της εποχής που διανύουμε. Η εξάρτηση της ανθρώπινης παρέμβασης από την προηγούμενη εργασία, από τη συσσωρευμένη εργασία, είναι ευθέως ανάλογη του επιπέδου της ανάπτυξης της τεχνολογίας, την οποία κάθε γενεά κληρονομεί [1]. Το κύριο χαρακτηριστικό της τεχνολογικής επανάστασης είναι η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης στις αυτόματες μηχανές [2], όπου από τις καθαρά μηχανικές διατάξεις του παρελθόντος, που προϋπόθεταν την ανθρώπινη διαμεσολάβηση, αναπτύχθηκαν μηχανοτρονικές διατάξεις ικανές για την πραγματοποίηση εργασιών, οι οποίες στο παρελθόν ήταν επίπονες και καταπιεστικές για τον άνθρωπο.

Στις αποθηκευτικές μονάδες και στην παραγωγή γενικότερα, τις τελευταίες δύο δεκαετίες παρατηρείται ραγδαία μετάβαση σε πιο ευέλικτα και προσαρμοστικά συστήματα. Όταν κάποιος αναφέρεται στη σχεδίαση ενός αυτόματου συστήματος απογραφής αποθήκης τρία ερωτήματα δημιουργούνται. Πρώτον ποια η διάταξη μίας αποθήκης, δεύτερον ποια η διαδικασία της απογραφής, και τρίτον ποια η μορφή του συστήματος. Σε αυτό το σημείο θα ήταν εύστοχο να δοθεί μία πολύ περιεκτική περιγραφή του συστήματος «Inventory Scanner» (INVSCAN).

Inventory Scanner

" Το Σύστημα Αυτόματης Απογραφής Αποθήκης «Inventory Scanner» (INVSCAN) είναι ένα αυτοκαθοδηγούμενο καταγραφικό ρομποτικό όχημα τύπου AGV (Automated Guidance Vehicle), εξοπλισμένο με αυτοκινούμενο κατακόρυφο φωτογραφικό εξοπλισμό. Το σύστημα είναι ικανό να αναγνωρίζει πρότυπες πινακίδες σήμανσης (barcode) που φέρονται από υλικά (προϊόντα) τα οποία είναι τοποθετημένα στις ραφιέρες του αποθηκευτικού χώρου."

Σκόπιμο είναι επομένως να γίνει μία επιγραμματική αναφορά στις αποθηκευτικές διατάξεις (warehouse) και στην συμβολή των ρομποτικών οχημάτων AGV, τόσο στα ευέλικτα συστήματα παραγωγής (FMS: Flexible Manufacturing System), αλλά και γενικότερα.

1.2 Αποθήκες εμπορευμάτων

Οι αποθήκες εμπορευμάτων (warehouse) αποτελούν βασικό συστατικό της βιομηχανικής παραγωγής. Από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης παρατηρείται η ύπαρξη τους σε όλα τα επίπεδα της παραγωγής και των μεταφορικών υπηρεσιών. Η αποθήκη εμπορευμάτων ορίζεται ως ένα κτήριο το οποίο χρησιμοποιείται για την αποθήκευση αγαθών, ενώ διεκπεραιώνει το ρόλο αυτό από την αρχαιότητα. Οι αποθήκες χρησιμοποιούνται από κατασκευαστές, εισαγωγείς, εξαγωγείς, αντιπροσώπους, μεταφορικές εταιρίες και εν γένει από κάθε δραστηριότητα που απαιτεί προσωρινή αποθήκευση μεγάλου πλήθους αντικειμένων [3]. Συνήθως είναι απλές κτηριακές κατασκευές μεγάλων διαστάσεων που βρίσκονται εγκατεστημένες σε βιομηχανικές περιοχές ή σε πόλεις.

Ο ανεφοδιασμός των αποθηκών πραγματοποιείται από μεταφορικά μέσα όπως φορτηγά, τρένα, πλοία και αεροπλάνα αναλόγως την τοποθεσία [3], όπως αυτή καθορίζεται από την θέση της δραστηριότητας στην εφοδιαστική αλυσίδα (supply chain). Οι αποθήκες συνήθως είναι εξοπλισμένες με ειδικούς σταθμούς ανατροφοδότησης για φορτηγά ή άλλα μεταφορικά μέσα. Η μεταφορά των αγαθών στο εσωτερικό της αποθήκης πραγματοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις με περονοφόρους ανυψωτές (forklifts) ή ανυψωτικούς γερανούς (stacker cranes), ενώ έχει επικρατήσει τα αγαθά να μεταφέρονται σε τυποποιημένες παλέτες (ISO pallets) που τοποθετούνται σε ράφια παλετών (pallet racks).


Εικόνα 1.1 Άποψη αποθηκευτικών διατάξεων. Αριστερά αποθήκη με αυτόματο συστήματα αποθήκευσης και ανάκτησης (ASRS). Δεξιά παλετοφόρα ράφια.

1.2.1 Διάταξη και τύποι αποθηκευτικών χώρων

Αγαθά προς αποθήκευση μπορεί να αποτελούν πρώτες ύλες, εξαρτήματα, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικά προϊόντα [3]. Το προϊόν είναι αυτό που καθορίζει τον τύπο της αποθήκης, καθώς και των συστημάτων που αυτή είναι εξοπλισμένη. Μερικές από τις πιο καθιερωμένες μορφές συστημάτων αποθήκευσης είναι:

- Τα παλετοφόρα ράφια (pallet rack) (Εικόνα 1.1),
- Ημιώροφοι (mezzanine) ή όροφοι με ράφιερες,
- Πρόβολοι (cantilever), για μακρόστενα αντικείμενα,
- Βιομηχανικά ράφια βαρέου τύπου για αντικείμενα μεγάλου βάρους,
- Αυτόματα συστήματα αποθήκευσης και ανάκτησης (ASRS: Automated Storage and Retrieval Systems), που είναι σχεδιασμένα με αρχιτεκτονική προσανατολισμένη αποκλειστικά στην αυτόματη λειτουργία (Εικόνα 1.1).

Με τον όρο αυτόματες αποθήκες ορίζονται οι αποθηκευτικές διατάξεις που αποτελούν μέρος ή το σύνολο της αποθήκης και είναι εξοπλισμένες με συστήματα αποθήκευσης και ανάκτησης, τα οποία λειτουργούν επικουρικά ή αυτοτελώς για την πραγματοποίηση των λειτουργικών διαδικασιών της αποθήκης. Στην περίπτωση των πλήρως αυτοματοποιημένων αποθηκών δεν απαιτούνται εργαζόμενοι (ή απαιτούνται ελάχιστοι), ενώ οι παλέτες και τα διάφορα προϊόντα μετακινούνται από ταινιόδρομους ή/και μηχανές διαλογής ή/και μέσα μεταφοράς τα οποία καθοδηγούνται σε χαμηλό επίπεδο από ελεγκτές και καθολικά από υπολογιστές που εκτελούν κατάλληλο λογισμικό. Τέτοια συστήματα συνηθίζεται να εγκαθίστανται σε αποθήκες με αντίξοες συνθήκες, όπως καταψύκτες ή αποθήκες που φιλοξενούν υλικά τα οποία είναι επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία. Είναι γεγονός πως τα συστήματα αυτά είναι απολύτως αξιόπιστα, μειώνουν το λειτουργικό κόστος και απελευθερώνουν εν γένει την εργασία από καταπιεστικές, αντίξοες και επαναλαμβανόμενες διαδικασίες.

1.2.2 Λειτουργικές διαδικασίες

Ανάμεσα στις λειτουργικές διαδικασίες (operations) [3] που συνήθως πραγματοποιούνται σε μία αποθήκη περιλαμβάνονται:

- Παραλαβή (receiving),
- Προώθηση (put away),
- Προετοιμασία παραγγελίας (order preparation) και Διαλογή (picking),
- Αποστολή (shipping),
- Απογραφής αποθήκης, πχ. κυκλική καταμέτρηση (cycle count) ,
- Εμπορική συσκευασία (co-packing),
- Συναρμολόγηση (kitting).

Η παραλαβή και η προώθηση πραγματοποιείται στους σταθμούς ανατροφοδότησης, όπου τα προϊόντα μεταφέρονται από ή προς τους αποθηκευτικούς χώρους. Η προετοιμασία της παραγγελίας και η διαλογή γίνεται συνήθως σε σταθμούς εργασίας όταν πρόκειται για μετακινούμενα προϊόντα ή μετακινούμενα καλάθια παραγγελιών. Η αποστολή συνήθως αναφέρεται σε περιπτώσεις που η αποθήκη αναλαμβάνει την παράδοση των προϊόντων στον προορισμό τους, αφού συσκευαστούν πρώτα καταλλήλως. Οι συμβατικές αποθήκες που δεν έχουν αυτόματα συστήματα διαλογής και μεταφοράς ώστε να γνωρίζουν την πραγματική κατάσταση του αποθέματος ανά πάσα στιγμή, προβλέπουν διαδικασίες απογραφής όπως η κυκλική καταμέτρηση (cycle counting) [4], κατά την οποία δεν αναστέλλεται η λειτουργία της αποθήκης, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει τακτική ενημέρωση του αποθεματικού. Το σύστημα INVSCAN καλείται να λύσει τέτοια προβλήματα απογραφής, υπό περιορισμούς βεβαίως, όπως άλλωστε προϋποθέτει κάθε αυτόματο σύστημα με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα.

1.2.3 Σύγχρονες τάσεις

Οι συμβατικές αποθήκες απαξιώθηκαν τις δύο τελευταίες δεκαετίες [3] γεγονός που οφείλεται και στην σταδιακή ανάπτυξη της παραγωγής η οποία βασίζεται κυρίως σε συστήματα έγκαιρης παράδοσης (JIT: Just In Time). Τα JIT συστήματα προωθούν τα προϊόντα απευθείας από τους προμηθευτές στους καταναλωτές χωρίς την μεσολάβηση ενδιάμεσων εμπορευματικών αποθηκών. Ταυτόχρονα όμως η ανάπτυξη των offshore επιχειρήσεων, η κατασκευή των παραγωγικών μονάδων σε τρίτες χώρες και η παγκοσμιοποίηση της αγοράς, οδήγησε στην ανάγκη για ύπαρξη αποθήκης σε κάθε χώρα ή τουλάχιστον σε κάθε ήπειρο (εάν ληφθεί υπόψη μια τυπική εφοδιαστική αλυσίδα με ένα συνηθισμένο εύρος προϊόντων).

Συναντάμε επίσης πολλές περιπτώσεις δραστηριοτήτων που συνδυάζουν την αποθήκευση με την λιανική πώληση (Εικόνα 1.2), όπου στα ανώτερα ράφια βαρέου τύπου τοποθετούνται οι αποθεματικές παλέτες, ενώ στα προσβάσιμα κάτω ράφια, τα ίδια προϊόντα ως μονάδες όμως προς λιανική πώληση.

Το internet έχει επηρεάσει σε τεράστιο βαθμό την εξέλιξη των αποθηκών και της εφοδιαστικής. Τα ηλεκτρονικά καταστήματα δημιούργησαν την ανάγκη για αποθήκες που εξυπηρετούνται μικρές παραγγελίες. Παγκόσμια καταστήματα επιλέγουν την διατήρηση ίσως και μόνο μίας κεντρικής αποθήκης σε γεωστρατηγικό σημείο, όπου τα μεταφορικά και κόστος παραγωγής είναι μειωμένα. Παράλληλα όμως με τις αλλαγές αυτές στην φύση της αγοράς και της παραγωγής, άρχισε να αναπτύσσεται μία άλλη αντίληψη στην αρχιτεκτονική της αποθήκης η οποία κυρίως έχει πεδίο εφαρμογής τις αποθήκες στις οποίες απαιτείται διαλογή και προετοιμασία παραγγελίας (Εικόνα 1.2, Εικόνα 1.3).

Εικόνα 1.2 Αριστερά συνδυασμός αποθήκευσης και λιανικής πώλησης. Δεξιά διαδικασία διαλογής (picking) σε αποθήκη συμβατικής αυτοματοποίησης με ταινιόδρομους (ο διαλογέας προσεγγίζει τα προϊόντα).

1.2.4 Αποθήκες με πολλαπλούς πράκτορες

Η νέα τάση στις αυτόματες αποθήκες είναι οι ρομποτικές αποθήκες πολλαπλών πρακτόρων (Multiagent ASRS), όπου τα ράφια με τα προϊόντα μετακινούνται αυτόματα στους διαλογείς [5]. Πρώτη υλοποίησε αυτή τη σχεδίαση η KIVA SYSTEMS το 2005 και αποτελεί την πιο αποδοτική μέθοδο αποθήκευσης και ανάκτησης προϊόντων (για υλικά μέγιστων διαστάσεων τυποποιημένης παλέτας ή/και για διαδικασίες διαλογής). Πρόκειται για ένα σύνολο ρομποτικών οχημάτων – πολλαπλών πρακτόρων που κινούνται ταυτόχρονα στον χώρο (Εικόνα 1.3). Μπορούν να διέρχονται κάτω από φορητές ραφιέρες ορθογώνιας διατομής και διαστάσεων περίπου $0.85 \times 0.85 \times 1.8\ \mathrm{m}$, ενώ παράλληλα μπορούν να διαχειρίζονται παλέτες αντικαθιστώντας το περονοφόρο forklift.

Όταν τα ρομποτικά οχήματα προσεγγίσουν την ραφιέρα στόχο την ανυψώνουν και την μεταφέρουν στους σταθμούς εργασίας, όπου πραγματοποιείται διαλογή με την χρήση βοηθητικών συστημάτων όπως η καθοδήγηση με laser (pick to light). Η όλη αποθηκευτική διάταξη πρόκειται για ένα υπόστεγο, με φορητές ραφιέρες και ρομποτικά οχήματα - αναβατόρια, που συνθέτουν μία «ζωντανή» αποθήκη[1]. Τεράστιο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι απαιτήσεις της εφαρμογής αυτής σε αποδοτικούς αλγορίθμους θεωρίας αυτόνομων και πολλαπλών πρακτόρων πραγματικού χρόνου, καθώς και τα συστήματα διόρθωσης θέσης.

Εικόνα 1.3 Εγκατάσταση συστήματος αυτόματης αποθήκευσης και ανάκτησης με το ρομποτικό σύστημα πολλαπλών πρακτόρων της KIVA. Στα αριστερά διακρίνονται τα ρομποτικά οχήματα σε αναμονή, ενώ στα δεξιά σε λειτουργία.

1.3 Ρομποτικά οχήματα AGV σε ευέλικτα συστήματα

Αναμφίβολα τα αυτοκαθοδηγούμενα ρομποτικά οχήματα διαφοροποίησαν το τοπίο της παραγωγής τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Είναι γεγονός ότι τα AGV σήμερα είναι άρρηκτα δεμένα με την έννοια των ευέλικτων συστημάτων παραγωγής (FMS), χωρίς να απαξιώνεται όμως το ευρύτατο πεδίο εφαρμογής τους, αφού διατελούν από καθημερινές υπηρεσίες καθαριότητας μέχρι μη επανδρωμένες ερευνητικές αποστολές στον Άρη. Τα AGVs αυξάνουν την αποδοτικότητα και μειώνουν το κόστος, συμβάλλοντας στην αυτοματοποίηση της βιομηχανικής παραγωγής, καθώς και στην διαχείριση των αποθηκευτικών διατάξεων.

1.3.1 Γενικά

Τα AGVs είναι ικανά να φορτώνουν αντικείμενα ή να ρυμουλκούν καρότσια στα οποία προσδένονται αυτόματα [6]. Φορτία των AGV μπορεί να αποτελούν πρώτες ύλες, ενδιάμεσα ή τελικά προϊόντα. Κάποια AGV διαθέτουν περονοφόρα ανυψωτικά για να σηκώνουν αντικείμενα ή παλέτες προς τοποθέτηση. Τα AGV τα συναντάμε σχεδόν σε κάθε βιομηχανία όπως στην μεταλλουργία και στη βιομηχανία χάρτου. Επίσης χρησιμοποιούνται για την μεταφορά τροφίμων ή φαρμάκων, για παράδειγμα σε νοσοκομεία ή ακόμη και ως ξεναγοί.

Το πρώτο AGV βγήκε στην αγορά το 1950 από την Barret Electronics [6], το οποίο ήταν ένα απλό ρυμουλκό φορτηγό που ακολουθούσε ένα καλώδιο στο πάτωμα αντί να κινείται σε ράγες. Διαχρονικά η σχεδίαση τους έγινε πιο εξελιγμένη τεχνολογικά, ενώ σήμερα καθοδηγούνται κυρίως από laser

[1] Αν αποτυπωθεί η κάτοψη μιας τέτοιας αποθήκης σε πραγματικό χρόνο, μας παραπέμπει στο διαχρονικό παιχνίδι «Pac-Man».

(LGV). Τα AGV είναι προγραμματισμένα να επικοινωνούν με τον σταθερό κεντρικό διακομιστή (C2S: Client To Server) αλλά και μεταξύ τους (P2P: Peer To Peer) έτσι ώστε να συντονίζονται και να διασφαλίζουν την ομαλή μεταφορά των υλικών. Στα τέλη του $20^{ου}$ αιώνα τα AGVs ανέλαβαν ένα νέο ρόλο, καθώς τα λιμάνια στραφήκαν στην συγκεκριμένη τεχνολογία για να μετακινούν τα τυποποιημένα κατά ISO containers, ενώ χαρακτηριστικά το λιμάνι του Ρότερνταμ σήμερα απασχολεί πάνω από 100 AGVs. Οι εφαρμογές των AGV είναι αμέτρητες αφού πέρα από την προσαρμοστικότητα της σχεδίασης τους ανά περίπτωση έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν φορτίο από μερικά κιλά μέχρι εκατοντάδες τόνους.

Τα AGV δεν χρησιμοποιούνται μόνο για την μεταφορά φορτίων. Εάν σε ένα AGV προσαρμοστεί κάποιο σύστημα όπως για παράδειγμα ένα ρομποτικός βραχίονας ή ένας φωτογραφικός εξοπλισμός, το καθιστά πλέον ικανό για εργασίες που ξεπερνούν κατά πολύ την απλή περίπτωση μεταφοράς ενός υλικού. Έτσι πολλά AGVs σχεδιάζονται να πραγματοποιούν διάφορες εργασίες, όπως άλλωστε και το καταγραφικό ρομποτικό όχημα INVSCAN που μελετάται στη παρούσα διπλωματική εργασία. Σκόπιμο είναι να εξεταστεί το περιβάλλον που αναπτύσσονται οι περισσότερες εφαρμογές των AGVs στην παραγωγή.

Εικόνα 1.4 AGVs στην παραγωγή. Αριστερά: μεταφορά κουλούρας ελάσματος. Δεξιά: γραμμή συναρμολόγησης κινητήρα αυτοκινήτου όπου το μπλοκ αυτού εδράζεται πάνω στο AGV.

1.3.2 Ευελιξία συστημάτων (System Flexibility)

Ένα ευέλικτο σύστημα [7] είναι ικανό:

- Να μεταχειρίζεται ταυτόχρονα μη ομοειδή κομμάτια,
- Να επιτρέπει παραλλαγές στην συναρμολόγηση κομματιών,
- Να μεταβάλει τη σειρά των διαδικασιών κατεργασίας,
- Να μεταβάλει το ρυθμό παραγωγής,
- Να λειτουργεί με αξιοπιστία ακόμη και αν κάποιες μηχανές ή συστήματα έχουν υποστεί βλάβη,
- Να προσαρμόζεται σχετικά γρήγορα και με μικρό κόστος στη παραγωγή νέων προϊόντων ή σε αλλαγές της σχεδίασης των υπάρχοντων.

Η φιλοσοφία των ευέλικτων συστημάτων έχει εφαρμοστεί στις αυτόματες αποθήκες με πολλαπλούς πράκτορες (κεφ. 1.2.4) όπου η αρχιτεκτονική της σχεδίασης τους δίνει τη δυνατότητα να μεταφέρονται ταυτόχρονα μη ομοειδή προϊόντα, να μεταβάλλεται η σειρά παραλαβής τους ανάλογα με την κατάσταση, να προσαρμόζεται ο ρυθμός διαλογής με την ρύθμιση του ρομποτικού στόλου, να λειτουργεί με απόλυτη αξιοπιστία χάρη στα διαθέσιμα εφεδρικά οχήματα, και τέλος να αναπροσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο με κάποια κριτήρια βελτιστοποίησης αυτόματα από το σύστημα, η αποθηκευτική διάταξη και ο συνδυασμός των προϊόντων στις ραφιέρες.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα στην βιομηχανία αποτελεί η γραμμή συναρμολόγησης κινητήρων αυτοκινήτου (Εικόνα 1.4). Ο άκαμπτος ατέρμονας μεταφορέας που απαιτεί κοστοβόρα και χρονοβόρα εγκατάσταση αντικαθίσταται από οχήματα AGV, πάνω στα οποία εδράζεται το μπλοκ του κινητήρα. Τα ρομποτικά οχήματα μετακινούνται από σταθμό εργασίας σε σταθμό εργασίας χωρίς κανένα ουσιαστικό περιορισμό. Ο ανασχεδιασμός της παραγωγής ενδεχομένως μπορεί να γίνει πολύ απλά με την διαδικασία παραμετροποίησης ενός λογισμικού.

1.3.3 Ευέλικτα συστήματα παραγωγής FMS

Ένα ευέλικτο σύστημα παραγωγής (FMS) ορίζεται ως ένα σύστημα παραγωγής το οποίο χαρακτηρίζεται από ένα μη αμελητέο βαθμό ευελιξίας που επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζεται σε αλλαγές ακόμη και αν αυτές δεν προβλέπονται [8]. Το FMS αποτελεί περισσότερο μία φιλοσοφία παρά μία συγκεκριμένη μεθοδολογία. Την ευελιξία μπορούμε να την χωρίσουμε σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι η ευελιξία κατεργασιών (machine flexibility), η οποία εκφράζει την ικανότητα του συστήματος να προσαρμόζεται στην παραγωγή νέων προϊόντων και την ικανότητα να μεταβάλει την σειρά των κατεργασιών που πραγματοποιούνται στη γραμμή παραγωγής ενός προϊόντος. Η δεύτερη κατηγορία καλείται ευελιξία δρομολόγησης (routing flexibility), η οποία εκφράζει την ικανότητα του συστήματος να μπορεί να χρησιμοποιεί πολλαπλές μηχανές για την εκτέλεση των ίδιων διαδικασιών όσο αφορά ένα παραγόμενο κομμάτι.

Τα περισσότερα FMS αποτελούνται από τρία κύρια συστήματα [8]. Τις μηχανές κατεργασίας (work machines) οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με ένα σύστημα διαχείρισης υλικών (MHS: Material Handling System), το οποίο αναλαμβάνει την ροή των κομματιών, και τέλος μία υπολογιστική μονάδα για τον έλεγχο του συστήματος.

Ένα βιομηχανικό FMS μπορεί να αποτελείται από ρομποτικούς βραχίονες (manipulators), μηχανές και εργαλειομηχανές ελεγχόμενες από ηλεκτρονικό υπολογιστή (CNC: Computer Numerical Control), μετρητικές διατάξεις συλλογής δεδομένων (data acquisition), αισθητήρες (sensors) και άλλα αυτόνομα συστήματα τα οποία επιτηρούν τις μηχανές του συστήματος. Ρομποτικοί βραχίονες βρίσκονται συνήθως τοποθετημένοι σε κόμβους κατά μήκος του συστήματος μεταχείρισης υλικών (MHS), που λειτουργεί συνήθως με ατέρμονους μεταφορείς (conveyors, πχ. ταινιόδρομους) ή ρομποτικά οχήματα (AGV). Κάθε είδος προϊόντος που παράγεται απαιτεί κατεργασίες που βρίσκονται σε διαφορετικούς κόμβους στην γραμμή παραγωγής. Η μετακίνηση των κομματιών από τον ένα κόμβο στον άλλο, υλοποιείται από το MHS και είναι σημαντικό να είναι ικανό να εξυπηρετεί την γραμμή παραγωγής σε τυχόν αλλαγές ή προσθήκες μηχανών κατεργασίας.

Συνήθως το κόστος για την εισαγωγή ενός ολοκληρωμένου συστήματος FMS σε μία βιομηχανία κυμαίνεται στα μερικά εκατομμύρια δολάρια [8]. Έτσι αντί της εγκατάστασης ενός ολοκληρωμένου FMS κάποιες βιομηχανίες χρησιμοποιούν ένα μέρος του FMS που ονομάζεται ευέλικτο κελί παραγωγής (FMC: Flexible Manufacturing Cell). Έτσι χρησιμοποιείται το FMC για την παραγωγή ενός μέρους του προϊόντος από αυτόματες μηχανές και ίσως το υπόλοιπο μέρος από άλλες μεθόδους, ενώ συχνά ένα η περισσότερα AGV συνδέουν τα κελιά αυτά μεταξύ τους.

1.3.4 Τύποι τροχοφόρων οχημάτων AGV

Οι τροχοί στα ρομποτικά οχήματα αποτελούν τον πιο συνηθισμένο μηχανισμό μετακίνησης, ενώ παράλληλα ο συντελεστής απόδοσης τους κυμαίνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Στα τροχοφόρα ρομποτικά οχήματα (WMR: Wheeled Mobile Robots) το ζήτημα της ισορροπίας δεν αποτελεί ιδιαίτερο ερευνητικό αντικείμενο σε αντίθεση με τα ρομποτικά οχήματα με άκρα (Legged Mobile Robots) [9]. Τα WMR σχεδιάζονται έτσι ώστε οι κινητήριοι τροχοί να έχουν πάντοτε επαφή με το έδαφος. Στα WMR άνω των τριών τροχών, δηλαδή άνω των τριών σημείων επαφής με το έδαφος, απαιτείται κάποια στοιχειώδης ανάρτηση, ώστε να εξασφαλίζεται η επαφή όλων των τροχών με το έδαφος μέσα σε ένα αποδεκτό εύρος ανωμαλίας του εδάφους. Ζητήματα που αποτελούν κύριο ερευνητικό πεδίο [9] στα WMR είναι η πρόσφυση, η ευστάθεια, ο ελιγμός και γενικότερα ο έλεγχος. Η σχεδίαση ενός τέτοιου οχήματος θα πρέπει να γίνεται με βάση το εξής ερώτημα: οι τροχοί του οχήματος προσφέρουν ικανή πρόσφρηση και ευστάθεια στο ρομποτικό, έτσι ώστε να ελιχθεί στην επιθυμητή επιφάνεια, ενώ παράλληλα η διάταξη των τροχών επιτρέπει ικανό έλεγχο, σύμφωνα με την επιθυμητή ταχύτητα και επιτάχυνση του ρομποτικού οχήματος;

1.3.5 Πλοήγηση οχημάτων AGV (Navigation)

Τα AGVs καλούνται να ακολουθήσουν μία προκαθορισμένη ή δυναμική τροχιά ανάλογα με την εφαρμογή, και για να το επιτύχουν αυτό ο ελεγκτής που τα καθοδηγεί θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με διάφορα συστήματα ανάκτησης θέσης.

Στα συστήματα προκαθορισμένης τροχιάς [6] συγκαταλέγεται το <u>ενσύρματο (Wired)</u> σύστημα καθοδήγησης, στο οποίο ένας αισθητήρας ραδιοκυμάτων τοποθετείται στο κάτω μέρος του οχήματος προσανατολισμένος προς το έδαφος και μία καλωδίωση τοποθετείται κατά μήκος της επιθυμητής τροχιάς σε μία αυλάκωση περίπου 2.5 cm βάθους. Ο αισθητήρας αναγνωρίζει τη ράδιο συχνότητα που εκπέμπεται από την καλωδίωση και την ακολουθεί. Στην ίδια κατηγορία συναντάται και η <u>καθοδήγηση με ταινιόδρομο (Guide Tape)</u> που πρόκειται για μία διάταξη με μαγνητικές ή χρωματιστές ταινίες τοποθετημένες στο δάπεδο, τις οποίες τα AGVs που είναι εξοπλισμένα με τον κατάλληλο ηλεκτρομαγνητικό ή οπτικό αισθητήρα διαβάζουν την τροχιά τους. Η καθοδήγηση με ταινιόδρομο έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί με ευκολία να αφαιρεθεί και να επανατοποθετηθεί, εάν απαιτείται αλλαγή στη διαδρομή του οχήματος. Θεωρείται επίσης παθητικό σύστημα αφού δεν απαιτείται τροφοδοσία όπως απαιτείται πχ. για το Wired σύστημα.

Από τα συστήματα δυναμικής τροχιάς [6] το πιο διαδεδομένο είναι η καθοδήγηση με <u>Laser (LTN: Laser Target Navigation)</u> το οποίο πρόκειται για ένα ασύρματο σύστημα ανάγνωσης της θέσης και του προσανατολισμού μέσω ενός περιστρεφόμενου laser πομποδέκτη που εκπέμπει στο περιβάλλον χώρο του. Τα AGVs διαθέτουν χάρτη στη μνήμη τους και είναι ικανά να διορθώνουν τη θέση τους από τα υπολογιζόμενα σφάλματα μεταξύ της αναμενόμενης και της μετρούμενης κατάστασης, ενώ η ακρίβεια τους κυμαίνεται στα 0.1 mrad με 3.5 mrad αντίστοιχα. Η καθοδήγηση με γυροσκόπιο (Gyroscopic Navigation) είναι μία τεχνολογία που στηρίζεται στα αδρανειακά χαρακτηριστικά, κατά την οποία ένας αισθητήρας διαβάζει τις στιγμιαίες μεταβολές της γραμμικής και γωνιακής επιτάχυνσης και με μία διαδικασία ολοκλήρωσης υπολογίζει τη θέση και τον προσανατολισμό του οχήματος. Τέλος η καθοδήγηση με οροθέσια (Landmarks Navigation) πρόκειται συνήθως για μία οπτική ή ηλεκτρομαγνητική μέθοδο αναγνώρισης πινακίδων σήμανσης που τοποθετούνται στο έδαφος, σε διάταξη πλέγματος είτε σε κομβικά σημεία τροχιάς και αναγνωρίζονται από τους αισθητήρες, τροφοδοτώντας στον ελεγκτή τη θέση και τον προσανατολισμό του AGV στο γενικό σύστημα συντεταγμένων.

1.4 Συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι γεγονός ότι την τελευταία δεκαετία τα ρομποτικά οχήματα έχουν συμβάλει καθοριστικά στην εξέλιξη της παραγωγικής διαδικασίας και στην περαιτέρω αύξηση της ευελιξίας αυτής. Το σύστημα απογραφής που μελετάται στην παρούσα εργασία θα μπορούσε να τοποθετηθεί στη γενικότερη αυτή τάση, αν και η εξέλιξη των αποθηκευτικών διατάξεων εστιάζεται κυρίως στα αυτόματα συστήματα αποθήκευσης και ανάκτησης (ASRS). Η αναγκαιότητα για το σύστημα αυτόματης απογραφής αποθήκης (INVSCAN) από την πλευρά της παραγωγής, θα εκδηλώνεται όσο θα υπάρχουν παραγωγικές μονάδες – αποθηκευτικές διατάξεις που στηρίζονται κυρίως στην ανθρώπινη εργασία. Το εν λόγο σύστημα προορίζεται για ανθρωποκεντρικές αποθήκες όπου τα ράφια που αποθηκεύονται τα υλικά, είναι ύψους μέχρι 2 m περίπου, προσβάσιμα δηλαδή από εργαζόμενους χωρίς χρήση ανυψωτικού. Προορίζεται επίσης για αποθήκες με διαδρόμους μεγαλύτερους από 0.9 m, που άλλωστε το ελάχιστο πλάτος διαδρομών που συναντάται συνήθως στις αποθήκες είναι το 1 m.

Η εισαγωγή ολοκληρώνεται σε αυτό το σημείο. Το κεφάλαιο που ακολουθεί ασχολείται με την μοντελοποίηση του συστήματος INVSCAN και τις βασικές αρχές και έννοιες που αφορούν αυτή. Ζητήματα που αναπτύχθηκαν στην εισαγωγή, όπως οι διάφοροι τύποι των ρομποτικών οχημάτων και τα συστήματα καθοδήγησης, συναντώνται σε επόμενα κεφάλαια, στα οποία αναλύονται διεξοδικότερα.

2 Μοντελοποίηση συστήματος

2.1 Γενικά

Για την σχεδίαση, μελέτη και υλοποίηση του INVSCAN είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση του συστήματος σε μέρη (modules). Με τον όρο module θεωρείται ένα σύνολο από υλικό (hardware) και λογισμικό (software) ικανό για την επίτευξη συγκεκριμένων λειτουργιών. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα μέρη είναι αυτοτελή χωρίς όμως να αποτελεί προϋπόθεση. Το απαραίτητο software ή hardware για την εκτέλεση μίας διαδικασίας ενός module πιθανόν να ανήκει σε άλλα modules. Ο έλεγχος της τροχιάς (interpolation) της κίνησης του οχήματος για παράδειγμα ανήκει οργανικά στο Vehicle Motion module (A2) η διαδικασία αυτή όμως εκτελείται στον επεξεργαστή του Client Control Unit (A8). Δεν υπάρχει επομένως αυστηρή σχέση μεταξύ hardware και software ενός module αλλά και μεταξύ περισσοτέρων modules. Ιεραρχικά (Εικόνα 2.1) στο πρώτο επίπεδο τα τρία κύρια modules που αποτελείται το σύστημα είναι:

- Το καταγραφικό ρομποτικό όχημα (A: AGV Scanner),
- Η αποθήκη εμπορευμάτων (W: Warehouse),
- Ο σταθμός ελέγχου και φόρτισης (S: Control & Charge Station),

ενώ σε χαμηλότερα επίπεδα αναλύονται σε περισσότερα μέρη.

Κάθε module περιλαμβάνει διαδικασίες (Operations) και δεδομένα (Data) που στον συνδυασμό τους με το hardware γίνονται ικανά να επιτελούν συγκεκριμένες λειτουργικές διαδικασίες. Για να γίνει εφικτή η περιγραφή των λειτουργικών διαδικασιών με αλγορίθμους ή διαγράμματα ροής πρέπει να οριστούν οι δομές δεδομένων (Data Types). Σημαντικό επίσης είναι να καθοριστεί το προγραμματιστικό περιβάλλον στο οποίο θα αναπτυχθεί η εφαρμογή.

2.2 Προγραμματιστικό περιβάλλον

Η υλοποίηση του λογισμικού που εκτελείται στις δύο κεντρικές μονάδες ελέγχου προβλέπεται σε γλώσσα προγραμματισμού C++, η οποία συνίσταται για εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις σε ταχύτητα. Επίσης η ικανότητα χαμηλού επιπέδου επικοινωνίας με τις συσκευές του συστήματος ώστε η ανάγνωση – καταχώριση των καταχωρητών (register) της μνήμης να γίνεται απευθείας, θεωρείται απαραίτητη. Η C++ χαρακτηρίζεται για την πληθώρα των πλούσιων επιστημονικών βιβλιοθηκών που είναι διαθέσιμες στην παγκόσμια κοινότητα. Οι βιβλιοθήκες αυτές με κατάλληλη προσαρμογή μπορούν να μειώσουν σημαντικά το χρόνο ανάπτυξης (πχ. η Boost C++ Libraries περιέχει αλγόριθμους βελτιστοποίησης ενώ η OpenCV αλγορίθμους μηχανικής όρασης).

Η ανάπτυξη της εφαρμογής σε Multi Core processing πλατφόρμα και η αξιοποίηση των 64 bit της αρχιτεκτονικής του επεξεργαστή ως φυσικό (native) περιβάλλον δημιουργεί υπολογιστικές συνθήκες με σημαντικά προτερήματα. Στην περίπτωση διπύρηνου επεξεργαστή στη εφαρμογή INVSCAN, στον ένα πυρήνα μπορεί να εκτελείται το interpolation του motion control και στον άλλο να ελέγχονται επιτελικά οι διαδικασίες του συστήματος ή να επιλύονται προβλήματα όπως το path planning και το barcode recognition. Η ταχύτητα και η ακρίβεια των υπολογισμών στους 64 bit επεξεργαστές αυξάνεται σημαντικά αφού οι πράξεις για τους αριθμούς διπλής ακριβείας γίνονται φυσικά.

Ένα άλλο ζήτημα είναι η συμβατότητα των συσκευών με το λειτουργικό σύστημα. Πολλές συσκευές του εμπορίου έχει επικρατήσει να συνοδεύονται από οδηγούς (drivers) αποκλειστικά για τα MS Windows. Στην περίπτωση αυτή συγκαταλέγεται και η φωτογραφική κάμερα Canon Eos 500D που έχει επιλεχθεί για το σύστημα. Το συνοδευόμενο SDK για τον έλεγχο και την επικοινωνία μαζί της, λειτουργεί αποκλειστικά σε λειτουργικό Windows XP. Με βάση τα παραπάνω και σε συνδυασμό με τις πλούσιες βιβλιοθήκες του .NET framework ως περιβάλλον ανάπτυξης προτείνεται το MS Visual Studio σε γλώσσα C++ και OS Windows XP. Μία εναλλακτική είναι η ανάπτυξη του λογισμικού στο GodeGear RAD Studio C++ με αντίστοιχες δυνατότητες (δεν υποστηρίζει native 64bit development). Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας έγινε υλοποίηση προσομοίωσης των επιμέρους διαδικασιών που αναπτύσσονται στην έκταση της εργασίας (στο GodeGear RAD Studio C++).

2.3 Modules

Στην (Εικόνα 2.1) παρουσιάζεται η ιεραρχική δομή των modules του συστήματος. Για το κάθε module αποτυπώνονται τα βασικά λειτουργικά εξαρτήματα (parts) από τα οποία αποτελείται. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή[2] της λειτουργίας κάθε module στο σύστημα απογραφής.

AGV Scanner (A):$\{R\}$

A1: <u>Structure Frame</u>: Το δομικό πλαίσιο του οχήματος κατασκευασμένο από συναρμολογούμενα τυποποιημένα δοκάρια αλουμινίου χαμηλού βάρους και υψηλής αντοχής (A1:1).

A2: <u>Vehicle Motion</u>: Το module κίνησης του ρομποτικού οχήματος που αποτελείται από δύο οπίσθιες ανεξάρτητες κινητήριες μονάδες (A2:1) με τροχούς ροπής (A2:1:4), καθώς και από ένα εμπρόσθιο αυτοευθυγραμμιζόμενο ελεύθερο τροχό (A2:2).

A3: <u>Camera Motion</u>: Το module κατακόρυφης κίνησης κάμερας (A6:1) για την λήψη του πίνακα φωτογραφιών που αποτυπώνει τα προϊόντα στις ραφιέρες της αποθήκης. Πρόκειται για ένα γραμμικό σύστημα οδήγησης (A3:3) με βαγονέτο (A3:3:2), ενώ η ροπή μεταφέρεται μέσω του συστήματος οδοντωτού ιμάντα – τροχών (A:3:4)(A:3:3).

A4: <u>Power Supply</u>: Το module τροφοδοσίας, με όμοιες μπαταρίες, μία για την τροφοδοσία των ηλεκτρονικών (A4:2) και δύο εν σειρά για την τροφοδοσία των κινητήρων (A4:1). Ένας ψηφιακός ελεγκτής (A4:4) ενημερώνει το σύστημα με την ενεργειακή στάθμη των συσσωρευτών. Η φόρτιση γίνεται με αυτόματη προσέγγιση του οχήματος και σύνδεση με ακροδέκτες πείρων (A4:5).

A5: <u>Landmarks Recognition</u>: Το module που με τη κάμερα αποτύπωσης του δαπέδου (A5:1) αναγνωρίζει επιδαπέδιες πινακίδες σήμανσης (landmark barcode) και ενημερώνει το σύστημα με την θέση και τον προσανατολισμό στο γενικό σύστημα συντεταγμένων.

[2] Δεξιά των παρενθέσεων αναφοράς της αρίθμησης του module ή του part ενδέχεται να συνοδεύεται από το σύστημα συντεταγμένων της αντίστοιχης δομικής ενότητας οριοθετημένη σε άγκιστρα πχ. (A6:1):$\{C\}$.

A6: Barcodes Recognition: Το module που αποτυπώνει τα προϊόντα μέσω της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής (A6:1):$\{C\}$. Αναγνωρίζει τον κωδικό της πινακίδας σήμανσης (barcode) του προϊόντος και τη θέση του στο σύστημα συντεταγμένων της αποθήκης. Η φωτογραφική μηχανή είναι τύπου DSLR ενώ ο φωτισμός επιτυγχάνεται με το ενσωματωμένο ή εξωτερικό φλας (A6:2).

A7: Collision Avoidance: Το module της αποφυγής σύγκρουσης με περιμετρικά τοποθετημένους αισθητήρες εκτίμησης απόστασης τεχνολογίας υπερήχων ή/και υπερύθρων (A7:1): $\{U_i\}$.

A8: Client Control Unit: Το module της κεντρικής μονάδας ελέγχου του οχήματος. Βρίσκεται σε ασύγχρονη επικοινωνία μέσω ασύρματου προσαρμογέα δικτύου (A8:3) με την σταθερή κεντρική μονάδα ελέγχου του συστήματος (S1). Ελέγχει και συντονίζει όλα τα module του AGV Scanner. Η αλληλεπίδραση με το χρήστη γίνεται μέσω του Server Control Unit (S1) ή σε περιορισμένες δυνατότητες μέσω της LCD dot οθόνης με control buttons (A8:4). Σε περίπτωση άμεσου κινδύνου με τη χρήση ενσύρματου ή ασύρματου κομβίου έκτατης ακινητοποίησης (A8:5) το όχημα ακινητοποιείται ακαριαία.

Warehouse

W1: Floor & Storage Plan: Η κάτοψη της αποθήκης με τις επιφάνειες αποθηκευτικών περιοχών δεδομένου ύψους. Το AGV Scanner κινείται σε διαδρομές προκαθορισμένων τροχιών.

W2: Landmarks: Οι πινακίδες σήμανσης που τοποθετούνται επί του δαπέδου σε κομβικά σημεία των τροχιών ή σε διάταξη πλέγματος. Παραλλαγή του τυποποιημένου barcode δύο διαστάσεων με επικέντρωση στην ακρίβεια της θέσης και της γωνίας προσανατολισμού. Η αναγνώριση γίνεται από το Landmarks Recognition module (A5).

W3: Wireless Network: Το ασύρματο δίκτυο της αποθήκης. Κατανεμημένα access points και repeaters (W2:1) ανάλογα με τις διαστάσεις της αποθήκης.

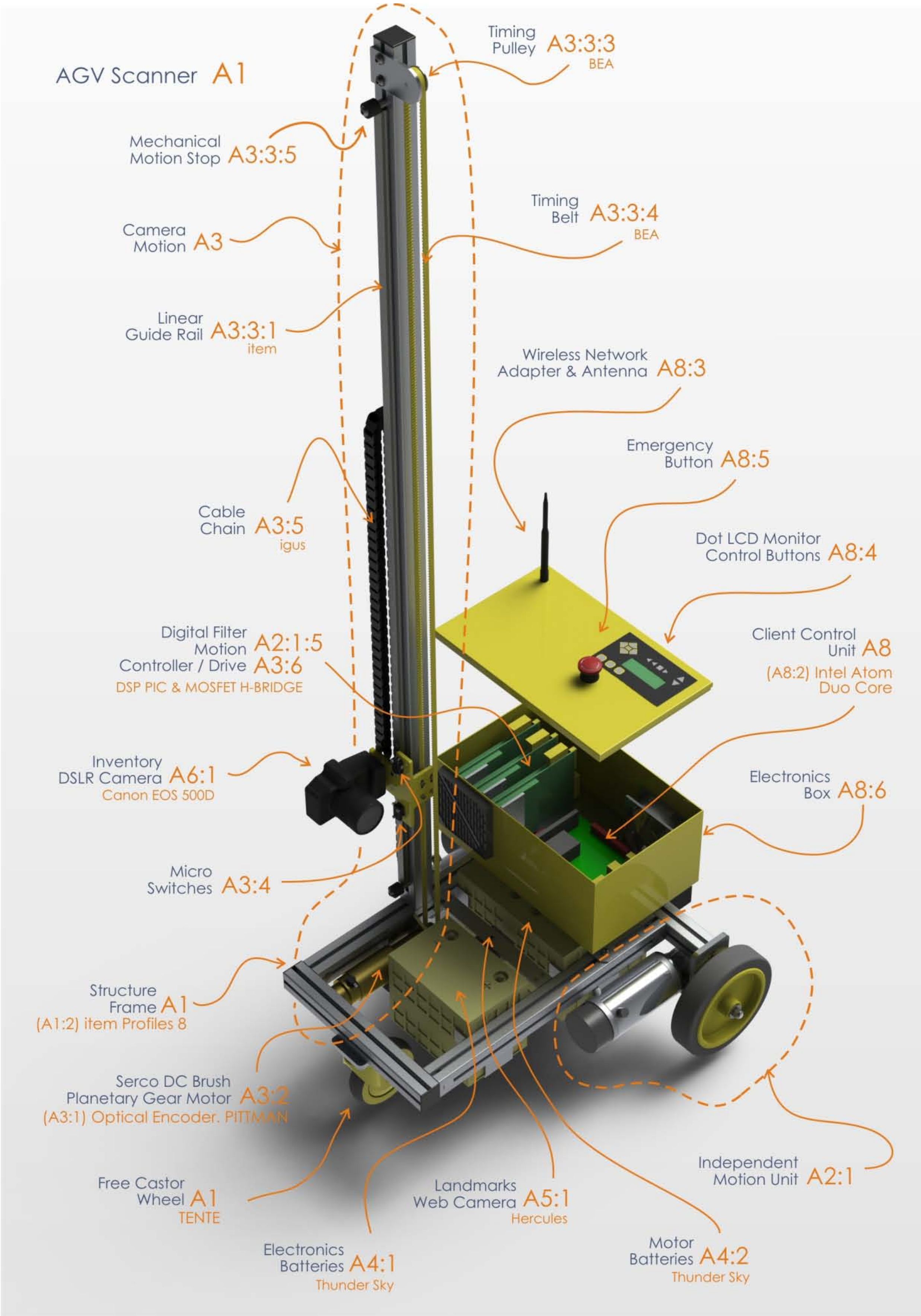
Control & Charge Station

S1: Server Control Unit: Το module της κεντρικής μονάδας ελέγχου (S1) του συστήματος απογραφής. Επιτηρεί και δίνει εντολές στο AGV Scanner. Μεσολαβεί στην επικοινωνία με το χρήστη για τη διαχείριση του συστήματος. Συμβάλει επικουρικά στην επίλυση πολύπλοκων υπολογιστικών προβλημάτων αποδεσμεύοντας το Client Control Unit.

S2: Local Area Network: Το τοπικό δίκτυο του συστήματος. Συνδεόμενο στο ευρύτερο δίκτυο της αποθήκης και στο internet δύνεται η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου.

S3: Charging: Το module της φόρτισης του οχήματος. Μέσω κατάλληλου αρσενικού βύσματος (S3:1) ειδικής κατασκευής επιτυγχάνεται αυτόματη σύνδεση με το όχημα. Δύο ανεξάρτητες μονάδες τροφοδοσίας (S3:1) με ενσωματωμένο κατάλληλο ελεγκτή φορτίζουν τις μπαταρίες των κινητήρων (A4:1) και των ηλεκτρονικών (A4:2).

Εικόνα 2.1 Ιεραρχική παρουσίαση των modules του INVSCAN με το hardware τους.
Ιεραρχικά τα χρώματα: INVSCAN System >> Main modules >> Sub modules >> Εξαρτήματα (Parts)



Εικόνα 2.2 Παρουσίαση μέρους των modules και μέρους των parts σε φωτορεαλιστική σχεδίαση.

2.4 Χωρικές περιγραφές

Για κάθε δομική ενότητα του συστήματος ορίζεται ένα σύστημα συντεταγμένων [10] έτσι ώστε να μπορεί να περιγραφεί χωρικά η θέση και ο προσανατολισμός αλλά και να πραγματοποιηθούν χωρικοί μετασχηματισμοί αναγκαίοι για την μοντελοποίηση της κίνησης.

Ορίζεται επομένως σύστημα συντεταγμένων $\{M\}$:

$$\{M\} \equiv \{O_M; \boldsymbol{x}_M, \boldsymbol{y}_M, \boldsymbol{z}_M\} \ , \tag{E2-1}$$

όπου M η κάθε δομική ενότητα που ταυτίζεται με το αντίστοιχο module ή part και $\boldsymbol{x}_M, \boldsymbol{y}_M, \boldsymbol{z}_M$ τα μοναδιαία διανύσματα των αξόνων. Σε κάθε δομική ενότητα προσαρτείται ένα σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων.

Τέλος ορίζονται τα παρακάτω συστήματα συντεταγμένων:

$$\text{Warehouse} \quad \{W\} \equiv \{O_W; \boldsymbol{x}_W, \boldsymbol{y}_W, \boldsymbol{z}_W\} \tag{E2-2}$$

$$\text{Robotic AGV Scanner} \quad \{R\} \equiv \{O_R; \boldsymbol{x}_R, \boldsymbol{y}_R, \boldsymbol{z}_R\} \tag{E2-3}$$

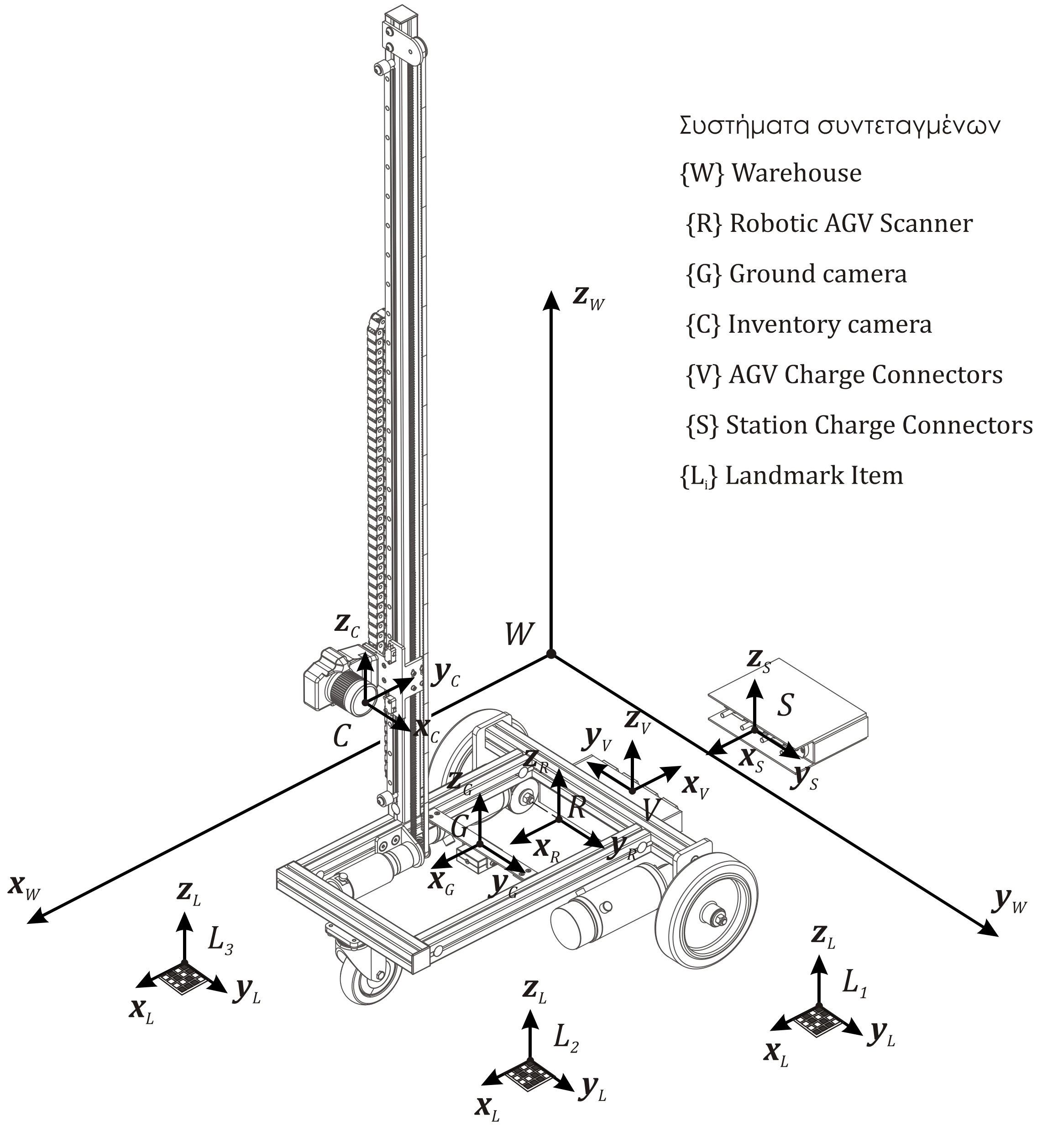
$$\text{Ground Camera} \quad \{G\} \equiv \{O_G; \boldsymbol{x}_G, \boldsymbol{y}_G, \boldsymbol{z}_G\} \tag{E2-4}$$

$$\text{Inventory Camera} \quad \{C\} \equiv \{O_C; \boldsymbol{x}_C, \boldsymbol{y}_C, \boldsymbol{z}_C\} \tag{E2-5}$$

$$\text{AGV Charge Connectors} \quad \{V\} \equiv \{O_V; \boldsymbol{x}_V, \boldsymbol{y}_V, \boldsymbol{z}_V\} \tag{E2-6}$$

$$\text{Station Charge Connectors} \quad \{S\} \equiv \{O_S; \boldsymbol{x}_S, \boldsymbol{y}_S, \boldsymbol{z}_S\} \tag{E2-7}$$

$$\text{Landmark Item} \quad \{L_i\} \equiv \{O_{L_i}; \boldsymbol{x}_{L_i}, \boldsymbol{y}_{L_i}, \boldsymbol{z}_{L_i}\} \tag{E2-8}$$



Εικόνα 2.3 Τα συστήματα συντεταγμένων των λειτουργικά σημαντικών module, απαραίτητα για την έκφραση των χωρικών περιγραφών και μετασχηματισμών.

2.5 Συμπεράσματα

Έχοντας περιγράψει τις συνθήκες και το περιβάλλον ανάπτυξης της εφαρμογής, καθώς επίσης έχοντας αναλύσει την ιεραρχική δομή και τα μέρη του συστήματος, είναι δυνατόν πλέον σύμφωνα με τις προδιαγραφές να σχεδιαστεί το ρομποτικό όχημα. Η σχεδίαση του ρομποτικού οχήματος παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο όπου και μελετούνται οι πιο σημαντικές πτυχές αυτής.

3 Μηχανολογική σχεδίαση

3.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές πτυχές της μηχανολογικής σχεδίασης και της μελέτης του καταγραφικού ρομποτικού οχήματος (A: AGV Scanner) καθώς και του σταθμού ελέγχου και φόρτισης (S: Control & Charge Station). Η σχεδίαση προορίζεται για υλοποίηση πρωτοτύπου και όχι για μαζική παραγωγή, αν και στη μορφή που έχει σχεδιαστεί θα μπορούσε να υλοποιηθεί με υψηλούς ρυθμούς παραγωγής από ειδικευμένο προσωπικό, σίγουρα όμως όχι από αυτόματες διατάξεις. Με την υλοποίηση του πρωτότυπου οχήματος ο κατασκευαστής θα είναι σε θέση να πειραματιστεί και να δοκιμάσει το σύστημα σε πραγματικές συνθήκες. Μετά από μία διαδικασία βελτιστοποίησης θα είναι σε θέση να το επανασχεδιάσει, ενδεχομένως με προδιαγραφές προσαρμοσμένες στην μαζική παραγωγή.

Εικόνα 3.1 Άποψη του ρομποτικού οχήματος AGV Scanner. Η σχεδίαση έγινε στο SolidWorks και το render των φωτορεαλιστικών στο PhotoView 360. Διακρίνονται το κατακόρυφο σύστημα κίνησης, η φωτογραφική κάμερα και τα χειριστήρια άμεσου ελέγχου. Διαστάσεις οχήματος: $\text{Μ} \times \Pi \times \Upsilon$ (σε mm): $716 \times 666 \times 1743$.

3.1.1 Προδιαγραφές πρωτοτύπου (A: AGV Scanner)

Για τον προσδιορισμό του τύπου του AGV και των παραμέτρων σχεδιασμού αυτού ακολουθούνται οι παρακάτω γενικές προδιαγραφές.

Η κατασκευή:

- Λογικού κόστους.
- Στιβαρή και ελαφριά.
- Αξιόπιστη.
- Όσο το δυνατόν απλούστερη.
- Εύκολη και γρήγορη συναρμολόγηση.

Τα εξαρτήματα:

- Λογικού κόστους.
- Τυποποιημένα (όπου είναι εφικτό).
- Βιομηχανικών προδιαγραφών.
- Λογικής διαθεσιμότητας.

Η κινηματική και δυναμική συμπεριφορά:

- Ικανοποιητικός έλεγχος και ευστάθεια.
- Δυνατότητα επιτόπιας αλλαγής κατεύθυνσης.
- Μικρό πλάτος ταλαντώσεων της κατακόρυφου δοκού (ταλάντωση της κάμερας).
- Κίνηση σε δάπεδα μικρής κλίσης ($< 4\%$) και μικρών ανωμαλιών ($< 5\mathrm{mm}$).
- Μέγιστη επιτρόχια ταχύτητα $1\ \mathrm{m/s}$, έτσι ώστε να διανύει μία απόσταση $10\ \mathrm{m}$ σε περίπου $10\ \mathrm{sec}$.
- Μέγιστη επιτάχυνση $1\ {}^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}^2}$, έτσι ώστε να φθάνει στη μέγιστη ταχύτητα σε $1\ \mathrm{sec}$.
- Ικανότητα κίνησης σε διαδρόμους πλάτους μεγαλύτερου του ενός μέτρου.

Ικανότητες σάρωσης:

- Κατακόρυφη επιφάνεια ύψους 0.3 μέχρι $2\ \mathrm{m}$.
- Μετακίνηση στην επόμενη θέση λήψης σε λιγότερο από $1\ \mathrm{sec}$.

3.2 Γεωμετρία ρομποτικού οχήματος

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι το INVSCAN δεν προορίζεται για αποθήκες με πολύ αυστηρές προδιαγραφές διότι διαφορετικά θα περιοριζόταν αρκετά το πεδίο εφαρμογής του συστήματος.

3.2.1 Τύπος ρομποτικού οχήματος

Όπως τονίζεται στις προδιαγραφές, μια σημαντική παράμετρος είναι η απλότητα της σχεδίασης του οχήματος. Είναι σημαντικό να αποφευχθούν πολύπλοκοι μηχανισμοί όπως για παράδειγμα ένα σύστημα αλλαγής διεύθυνσης (steering). Αποκλείονται επομένως τα Car-like type mobile robots που περιλαμβάνουν τέτοιους μηχανισμούς. Η πιο απλή κατασκευαστικά περίπτωση, η οποία συνδυάζει την αλλαγή διεύθυνσης του οχήματος ταυτόχρονα με την γραμμική μετατόπιση του, είναι το όχημα με δύο ανεξάρτητους κινητήριους τροχούς και έναν ή περισσότερους ελεύθερους αυτοευθυγραμμιζόμενους τροχούς. Τα οχήματα αυτά κατηγοριοποιούνται στα Hilare type mobile robots [11].

3.2.2 Διάταξη τροχών

Το πλήθος και η διάταξη των τροχών πρέπει να εξασφαλίζει στατική και δυναμική ευστάθεια [9]. Μία περίπτωση είναι το ζευγάρι των ανεξάρτητων κινητήριων τροχών να τοποθετηθεί στο κέντρο του οχήματος, όπου σε αυτή την θέση δίνει την δυνατότητα περιστροφής γύρω από το μέσο του μετατροχίου του με την ελάχιστη ακτίνα. Το μειονέκτημα βέβαια που παρουσιάζει αυτή ή λύση είναι ότι επιβαρύνεται η πολυπλοκότητα της σχεδίασης του οχήματος, αφού απαιτείται η τοποθέτηση τουλάχιστον δύο ελεύθερων αυτοευθυγραμμιζόμενων τροχών εκατέρωθεν του άξονα του μετατροχίου (μπρος – πίσω), ενώ ταυτόχρονα εξαιτίας της υπερστατικής φύσης της γεωμετρίας επιβάλλεται η χρήση ενός στοιχειώδους συστήματος ανάρτησης.

Η πιο απλή κατασκευαστικά περίπτωση είναι αυτή που το πλήθος των τροχών περιορίζεται στους τρεις, εξασφαλίζοντας έτσι χωρίς σύστημα ανάρτησης, απόλυτη στατική ευστάθεια και ικανοποιητική δυναμική ευστάθεια (για τις προβλεπόμενες ταχύτητες και επιταχύνσεις). Το μειονέκτημα βέβαια που παρουσιάζει αυτή ή λύση είναι ότι η περιστροφή γύρω από το μέσο του μετατροχίου του, απαιτεί μεγαλύτερη ακτίνα που ισούται με την απόσταση μεταξύ του άξονα του μετατροχίου και του μπροστινού μέρους του οχήματος. Εάν βέβαια κατά τον έλεγχο εφαρμοστεί κάποιος αποδοτικός αλγόριθμος ελιγμού αλλαγής κατεύθυνσης, η ακτίνα αυτή περιορίζεται κοντά στην ελάχιστη κατασκευαστικά. Έτσι ένα ζεύγος ανεξάρτητων κινητήριων τροχών τοποθετείται στο οπίσθιο μέρος του οχήματος και ένας ελεύθερος αυτοευθυγραμμιζόμενος τροχός στο εμπρόσθιο.

3.2.3 Σύστημα συντεταγμένων

Το σημείο αναφοράς O_R του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων $\{R\}$ του οχήματος ορίζεται στο μέσο του μετατροχίου και επάνω στον άξονα περιστροφής των κινητήριων τροχών. Ορίζεται το 3-διάστατο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων του οχήματος (τοπικό σύστημα αναφοράς):

$$\{R\} \equiv \{O_R; \boldsymbol{x}_R, \boldsymbol{y}_R, \boldsymbol{z}_R\} \ , \tag{E3-1}$$

με μοναδιαία διανύσματα αξόνων $\boldsymbol{x}_R$ κατά τη διαμήκη διεύθυνση με φορά προς τα εμπρός, $\boldsymbol{y}_R$ κατά την εγκάρσια διεύθυνση και τέλος, $\boldsymbol{z}_R$ κατά την κατακόρυφη διεύθυνση με φορά προς τα πάνω.

3.2.4 Κέντρο βάρους

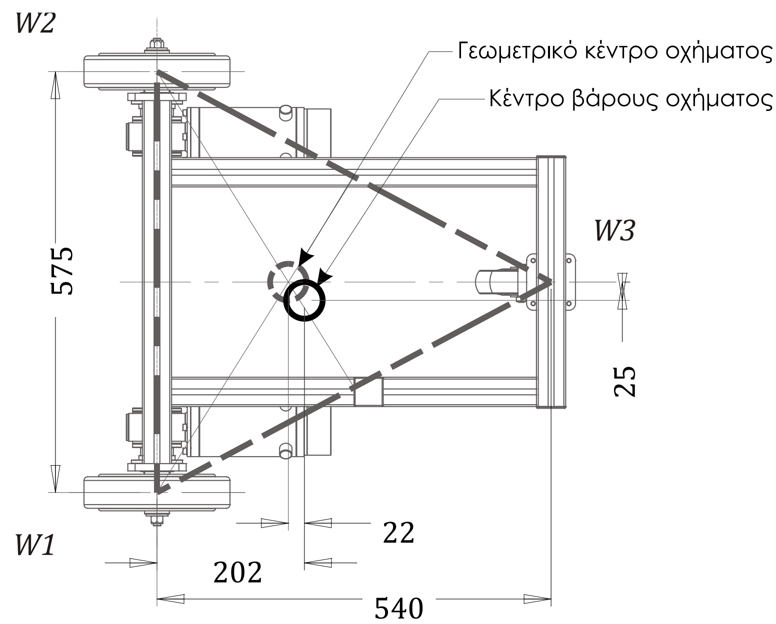
Προϋπόθεση για στατική ευστάθεια, στην περίπτωση του 3 wheels Hilare type mobile robot είναι το κέντρο βάρους του οχήματος να βρίσκεται μέσα στο τρίγωνο που ορίζουν οι τρείς τροχοί του [8]. Επίσης το φορτίο θα πρέπει να είναι σχετικά ισοκατανεμημένο στους τροχούς με μεγαλύτερη όμως επιφόρτιση στους κινητήριους, για δύο κυρίως λόγους. Ο πρώτος σχετίζεται με την γεωμετρία των τροχών ενώ ο δεύτερος με την ικανότητα πρόσφυσης.

Οι κινητήριοι τροχοί που έχουν επιλεχθεί, είναι σχεδιασμένοι για την παραλαβή μεγάλων φορτίων, κάτι που οφείλεται πέρα από τα υλικά και στη γεωμετρία τους, στους οποίους τα φορτία ασκούνται εγκάρσια στον άξονα περιστροφής του τροχού, σε αντίθεση με τους αυτοευθυγραμμιζόμενους που τα φορτία είναι μετατοπισμένα κατά μία ακτίνα σε σχέση με τον άξονα αλλαγής διεύθυνσης. Επίσης όσο μεγαλύτερο φορτίο παραλαμβάνουν οι κινητήριοι τροχοί τόσο πιο εγγυημένη πρόσφυση έχει το όχημα αποφεύγοντας τις ανεπιθύμητες ολισθήσεις που επιφέρουν σφάλματα ολοκλήρωσης κατά την καθοδήγηση του οχήματος. Επίσης η δυναμική ευστάθεια του οχήματος έναντι ανατροπής, εξαρτάται από το ύψος του κέντρου βάρους. Όσο πιο χαμηλά βρίσκεται αυτό, τόσο πιο ευσταθές είναι το όχημα στους ελιγμούς και στις μεταβολές της ταχύτητας.

Το κέντρο βάρους του οχήματος (Εικόνα 3.2) ως προς το σύστημα αναφοράς $\{R\}$ είναι:

$$\boldsymbol{P}_W = [202 \quad 25 \quad 179]^T \, mm \qquad \text{(Ε3-2)}$$

Για να εξασφαλιστεί ότι το όχημα έχει στατική και δυναμική ευστάθεια, πρέπει το κέντρο βάρους του οχήματος να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο γεωμετρικό κέντρο του τριγώνου που ορίζουν οι τροχοί του οχήματος και ισούται με $\boldsymbol{P}_C = [180 \quad 0 \quad 0]^T$ mm. Η απόσταση μεταξύ του γεωμετρικού κέντρου του τριγώνου και του κέντρου βάρους ισούται με το μέτρο του διανύσματος $\boldsymbol{\Delta P} = [22 \quad -25 \quad 179]^T$ mm. Η μετατόπιση του κέντρου βάρους από την ιδανική θέση μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική αφού οι σχετικές αποκλίσεις επί των διαστάσεων του οχήματος είναι της τάξης των $[8.6\% \quad 8.2\% \quad 20.6\%]^T$.



Εικόνα 3.2 Γραφική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της βάσης του οχήματος AGV.

Το βάρος του οχήματος όπως έχει σχεδιαστεί είναι 58 kg, ενώ θεωρώντας κάποιες μικρές αποκλίσεις λαμβάνεται κατά τον σχεδιασμό ένα βάρος:

$$m = 60 \, kg \qquad \text{(Ε3-3)}$$

Τα διανύσματα θέσης[3] των τροχών ως προς το $\{R\}$ στο επίπεδο του οχήματος είναι:

$$\boldsymbol{P}_{W,Wh} = [\boldsymbol{P}_{W1} \quad \boldsymbol{P}_{W2} \quad \boldsymbol{P}_{W3}] = \\ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 540 \\ -287.5 & 287.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} mm \ , \qquad \text{(E3-4)}$$

και το στατικό κατακόρυφο φορτίο σε κάθε τροχό[4], υπολογίζεται σε:

$$\boldsymbol{m}_{Wh} = [21.39 \quad 16.17 \quad 22.44] \, kg \ , \qquad \text{(E3-5)}$$

για τον τροχό $W1$, $W2$ και $W3$ αντίστοιχα όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2.

3.3 Δομικός σκελετός (Α1)

Ο δομικός σκελετός του οχήματος αποτελείται από αλουμινένιες δοκούς τυποποιημένου προφίλ της item. H item παράγει τυποποιημένα συστήματα αλουμινίου για μηχανολογικές εφαρμογές, ενώ το εύρος των προϊόντων της δίνει τη δυνατότητα υλοποίησης μεγάλου εύρους κατασκευών. Πρόκειται για δοκούς αλουμινίου παραγόμενους με εξέλαση, που το προφίλ τους είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να προσφέρουν την μέγιστη δυνατή αντοχή για το χρησιμοποιούμενο υλικό. Επιπλέον είναι ιδικά επεξεργασμένοι ώστε να διαθέτουν αντιχαρακτικές και αντιδιαβρωτικές ιδιότητες, προσφέροντας αντοχή στο χρόνο και σε βιομηχανικές συνθήκες. Όλα τα δοκάρια διαθέτουν αυλακώσεις (grooves) και οπές (holes) ώστε να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με συνδετικά στοιχεία και να παρέχουν ένα μεγάλο εύρος πρόσθετων λειτουργιών.

Δοκοί(Α1:1)

Τα προφίλ των δοκών της σειράς item Construction Profiles χαρακτηρίζονται από το πλάτος της αυλάκωσης (groove width), τις διαστάσεις του προφίλ και τέλος την τάξη φόρτισης (πχ. για χαμηλές φορτίσεις υπάρχουν τα "light duty" profiles). Επιλέχθηκαν δοκοί υψηλής αντοχής (Εικόνα 3.3), αυλάκωσης 8 χιλιοστών, με προφίλ διαστάσεων 40×40 mm ώστε να εξασφαλιστεί απαραμόρφωτο πλαίσιο και μικρό πλάτος ταλάντωσης από τις στατικές και δυναμικές φορτίσεις. Τη σημαντικότερη καταπόνηση από τις αδρανειακές δυνάμεις κατά την επιτάχυνση και την επιβράδυνση δέχεται η κατακόρυφη δοκός. Το συνολικό βάρος του δομικού σκελετού κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα παρά την επιλογή δοκών υψηλής αντοχής που η σχεδίαση της διατομής τους έχει μεγαλύτερη επιφάνεια.

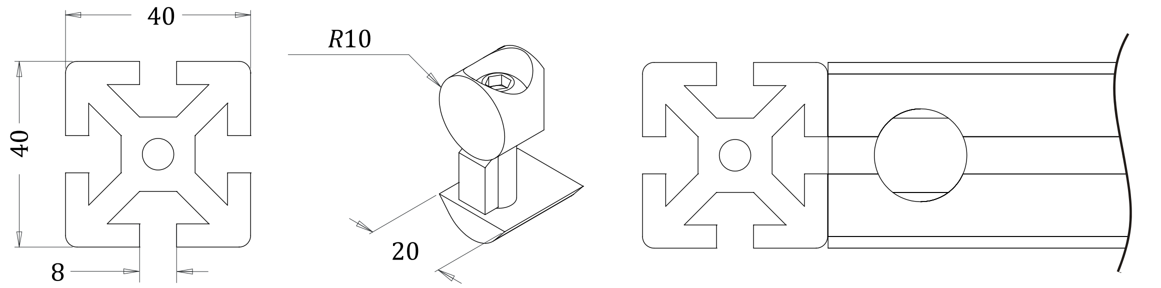
Συναρμολόγηση (Α1:2)

Η σύνδεση των δοκών επιτυγχάνεται με τα Universal-Fastening Set 8 της item (Εικόνα 3.3) τα οποία προσφέρουν μεγάλης προέντασης συναρμογή. Τέσσερα δοκάρια συνδέονται εγκάρσια και σχηματίζουν ένα πλαίσιο, στο οποίο προσαρμόζονται οι κινητήριοι και ελεύθεροι τροχοί με τις κα-

[3] Για λόγους απλοποίησης θεωρούμε ότι ο άξονας κύλισης του εμπρόσθιου τροχού βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με τους οπίσθιους.

[4] Ο συμβολισμός Wh υποδεικνύει το διάνυσμα των τροχών, ενώ σε αντίθεση στη γενική περίπτωση θεωρείται διάνυσμα χωρικής περιγραφής.

τάλληλες βάσεις. Μία κατακόρυφη δοκός προσαρμόζεται εγκάρσια στο πλαίσιο (σχεδόν στο μέσο της διαμήκους δοκού) για την τοποθέτηση των μηχανισμών κίνησης της κάμερας.



Εικόνα 3.3 Αριστερά η διατομή της δοκού item Construction Profile 8 40x40. Στη μέση άποψη των Universal Fastening Set 8 της item. Δεξιά διάταξη συναρμογής δύο δοκών όπου στον δεξιό έχει γίνει οπή για την προσαρμογή του μηχανισμού σύνδεσης.

Αντοχή

Τα δοκάρια και οι σύνδεσμοι που έχουν επιλεχθεί προβλέπονται για πολύ μεγαλύτερες φορτίσεις σε σύγκριση με αυτές της συγκεκριμένης εφαρμογής. Τα δοκάρια του δομικού πλαισίου καταπονούνται κυρίως σε καμπτικές και στρεπτικές ροπές. Χαρακτηριστικά εάν εκτιμηθεί το απαισιόδοξο σενάριο μίας εγκάρσιας σημειακής καμπτικής φόρτισης των $30\ \mathrm{kg}$ (η μέγιστη εγκάρσια φόρτιση δεν ξεπερνά τα $23\ \mathrm{kg}$) στο μέσο της διαμήκης δοκού των $500\ \mathrm{mm}$, η παραμόρφωση από τα προσεγγιστικά διαγράμματα της item στην περίπτωση της εγκάρσιας καμπτικής φόρτισης [12] (Load3) υπολογίζεται σε $0.08\ \mathrm{mm}$ ή διαφορετικά 0.2% που θεωρείται αμελητέα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη μελέτη δεν αποσκοπεί σε μία διεξοδική θεωρητική εκτίμηση της καταπόνησης των στοιχείων του οχήματος, αφενός διότι η κατασκευή είναι ελαφρού τύπου, οι ταχύτητες μικρές και τα επιλεγμένα υλικά ανωτέρων προδιαγραφών, αφετέρου διότι θα απόκλινε από το σκοπό της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

3.4 Κίνηση οχήματος (Α2)

Το σύστημα κίνησης του ρομποτικού οχήματος αποτελείται από δύο όμοιες ανεξάρτητες κινητήριες μονάδες με σταθερούς τροχούς ροπής και μία μη κινητήρια μονάδα με αυτοευθυγραμμιζόμενο ελεύθερο τροχό.

3.4.1 Τροχοί

Εμπρόσθιος τροχός (Α2:2)

Επιλέχθηκε εμπρόσθιος αυτοευθυγραμμιζόμενος τροχός διαμέτρου $125\ \mathrm{mm}$ της TENTE με κωδικό 2470PJP125P50 (Πίνακας 3.1). Πρόκειται για έναν τροχό κύλισης μεταβλητής διεύθυνσης, όπου η βάση του είναι χαλύβδινη, επιψευδαργυρωμένη, με διπλά ένσφαιρα έδρανα κυλίσεως στη κεφαλή περιστροφής. Ο δίσκος του τροχού είναι κατασκευασμένος από πολυπροπυλένιο ενώ το πέλμα από θερμοπλαστικό λάστιχο TENTEprene (χρώματος γκρι που δεν αφήνει ίχνη), ενώ ή έδραση γίνεται σε ένσφαιρα ρουλεμάν ακριβείας. Η κεφαλή της βάσης του τροχού προσαρμόζεται συμμετρικά στην εμπρόσθια δοκό με μία αλουμινένια βάση ειδικής κατασκευής (ώστε να μην ασκούνται επιπλέον έκκεντρα φορτία).

Οπίσθιοι τροχοί (A2:1:4)

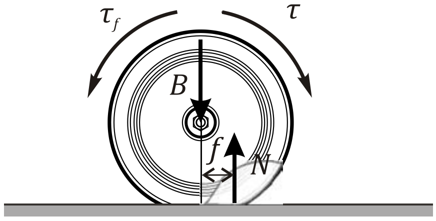
Επιλέχθηκαν οπίσθιοι κινητήριοι τροχοί διαμέτρου $200\ \mathrm{mm}$ της TELLURE ROTA με κωδικό σειράς 73 (Πίνακας 3.1). Ο δίσκος του τροχού είναι κατασκευασμένος από πολυαμίδιο 6, ενώ το πέλμα από Sigma elastic rubber. Η σύσφιξη του τροχού με τον άξονα για την μετάδοση της ροπής του κινητήρα γίνεται με συναρμογή εγκάρσιου ελατηριωτού πείρου διαμέτρου $6\ \mathrm{mm}$ που τοποθετείται σε οπή κατάλληλης διαμόρφωσης, διαμπερώς στον τροχό και στον άξονα.

Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά τροχών Συστήματος κίνησης AGV.

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Εμπρόσθιος TENTE 2470PJP125P50	Οπίσθιος TELLURE ROTA S73 200
Διάμετρος τροχού	$125\ \mathrm{mm}$	$200\ \mathrm{mm}$
Πλάτος πέλματος	$32\ \mathrm{mm}$	$50\ \mathrm{mm}$
Μετάθεση	$41\ \mathrm{mm}$	$0\ \mathrm{mm}$
Ύψος	$166\ \mathrm{mm}$	$200\ \mathrm{mm}$
Βάρος	$0.75\ \mathrm{kg}$	$1.04\ \mathrm{kg}$
Ικανότητα δυναμικής φόρτισης	$100\ \mathrm{kg}$	$220\ \mathrm{kg}$
Ικανότητα στατικής φόρτισης	$200\ \mathrm{kg}$	$350\ \mathrm{kg}$
Ακτίνα περιστροφής	$103.5\ \mathrm{mm}$	$0\ \mathrm{mm}$
Σκληρότητα πέλματος	Shore A 87	Shore A 70 ± 3

Συντελεστής τριβής κύλισης

Η Τριβή κύλισης [13] είναι αποτέλεσμα στη γενική περίπτωση, της παραμόρφωσης κυλιόμενου σώματος και δαπέδου. Όταν ασκείται ροπή κύλισης στον άξονα ενός κυλίνδρου, εμφανίζεται μία κατανομή τάσεων στην επιφάνεια επαφής η οποία προηγείται του άξονα περιστροφής και έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση μίας ροπής που ανθίσταται στη περιστροφή του κυλίνδρου (Εικόνα 3.4). Η κατανομή των τάσεων οφείλεται στην ελαστική παραμόρφωση των επιφανειών ταυτόχρονα με την υστέρηση επαναφοράς των παραμορφωμένων υλικών όταν αυτά απελευθερωθούν από την επίδραση των τάσεων. Η τριβή κύλισης θεωρείται γενικά πολύ μικρότερη από την τριβή ολίσθησης ενώ λαμβάνεται περισσότερο υπόψη κατά την εκκίνηση από στάση ή στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής.



Εικόνα 3.4 Σχηματική απεικόνιση του συντελεστή τριβής κύλισης f και των δυνάμεων – ροπών που σχετίζονται με αυτόν.

Η ανθιστάμενη δύναμη F (σε N) της τριβής κύλισης ενός τροχού στη διεύθυνση της κίνησης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$F = \frac{Bf}{R} \,, \tag{E3-6}$$

όπου B (σε N) η κάθετη δύναμη που ασκείται επί του τροχού εκ μέρους του δαπέδου, R (σε m) η ακτίνα του τροχού, και f (σε m) ο συντελεστής τριβής κύλισης που έχει διαστάσεις μήκους και εκφράζει την μετατόπιση της κάθετης δύναμης. Τυπικές τιμές για τον συντελεστή f παρατίθενται (Πίνακας 3.2) και οι τιμές αυτές πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο για κατά προσέγγιση υπολογισμούς [14].

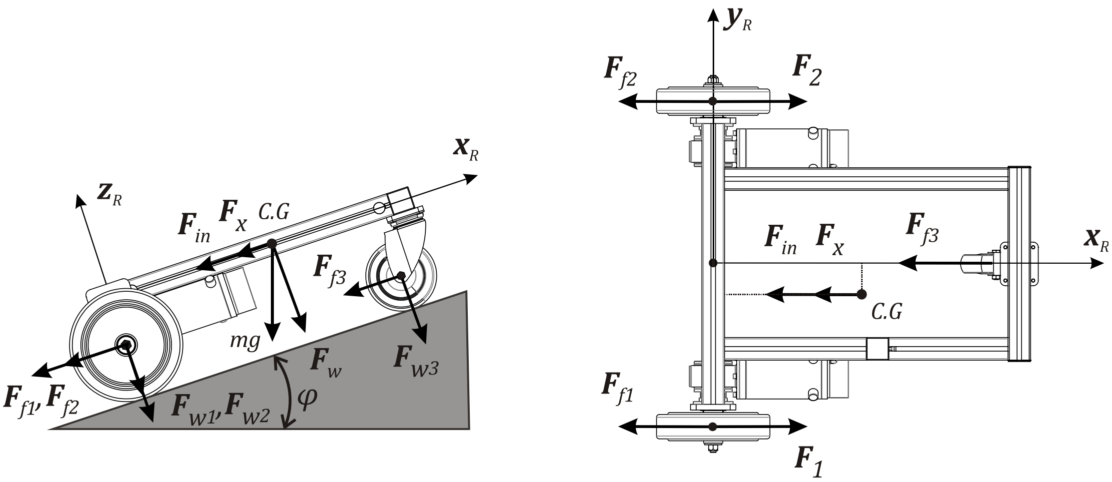
Πίνακας 3.2 Τυπικές τιμές συντελεστή τριβής κύλισης f μεταξύ πλαστικών και διαφόρων υλικών.

Υλικό σε υλικό	Συντελεστής τριβής κύλισης f (m)
Πολυμερές στο ατσάλι	0.002
Σκληρό καουτσούκ στο ατσάλι	0.0077
Σκληρό καουτσούκ στο σκυρόδεμα	0.01 – 0.02
Μαλακό καουτσούκ στο σκυρόδεμα	0.015 – 0.035

3.4.2 Ισχύς κίνησης

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος του συστήματος κίνησης αναλύουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα (Εικόνα 3.5). Η απαιτούμενη ισχύς για τη κίνηση του οχήματος θα πρέπει να υπερισχύει από τις ανθιστάμενες δυνάμεις:

- Μεταβολής της δυναμικής ενέργειας.
- Αδράνειας κατά την επιτάχυνση του οχήματος.
- Τριβής κύλισης.



Εικόνα 3.5 Οι δυνάμεις που ασκούνται στο κινούμενο όχημα AGV και αναλύονται παρακάτω.

Μεταβολή δυναμικής ενέργειας

Στην γενική περίπτωση του κεκλιμένου επιπέδου (Εικόνα 3.5) με τον άξονα των κινητήριων τροχών $\boldsymbol{y}_R$ οριζόντιο, η δύναμη του βάρους αναλύεται στην κάθετη F_W (σε N) και στην οριζόντια συνιστώσα F_X (σε N) στη διεύθυνση $\boldsymbol{z}_R$ και $\boldsymbol{x}_R$ αντίστοιχα. Επομένως εάν m (σε kg) είναι η μάζα του οχήματος τότε:

$$F_W = mg\cos\varphi \tag{E3-7}$$

$$F_X = mg\sin\varphi \tag{E3-8}$$

Αδρανειακές δυνάμεις

Από το δεύτερο νόμο του Newton είναι γνωστό ότι η δύναμη $\boldsymbol{F}$ (σε N) που απαιτείται να ασκηθεί σε ένα σώμα μάζας m (σε kg) έτσι ώστε να μεταβληθεί η κινητική κατάσταση του σώματος με μία επιτάχυνση $\boldsymbol{a}$ (σε m/s^2) δίδεται από την εξίσωση:

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a} \tag{E3-9}$$

Επομένως στη διεύθυνση κίνησης του οχήματος εάν a είναι η μέγιστη επιθυμητή επιτάχυνση (κεφ. 3.1.1) και F_{in} (σε N) το μέτρο της αδρανειακής συνιστώσας της απαιτούμενης δύναμης θα ισχύει:

$$F_{in} = ma \tag{E3-10}$$

Δυνάμεις τριβής κύλισης

Η δύναμη της τριβής κύλισης που ασκείται σε κάθε τροχό του οχήματος εξαρτάται από το συντελεστή τριβής κύλισης f και από την κατανομή του συνολικού βάρους στον κάθε τροχό. Για τον υπολογισμό της δύναμης της κατανομής του συνολικού βάρους που αντιστοιχεί σε κάθε τροχό, εφαρμόζεται διάγραμμα ελευθέρου σώματος και κάθε τροχός αντικαθιστάται με μία δύναμη αντιστήριξης κάθετη στο επίπεδο του οχήματος. Στη γενική περίπτωση του κεκλιμένου επιπέδου θεωρείται ως δύναμη του συνολικού βάρους του οχήματος η συνιστώσα F_W (E3-7). Είναι γνωστό ότι ένα μηχανικό σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία [15], όταν το άθροισμα των δυνάμεων και των ροπών που ασκούνται σε αυτό, είναι μηδέν:

$$\sum \boldsymbol{F} = \boldsymbol{0} \Rightarrow \sum_{i=1}^{\boldsymbol{3}} \boldsymbol{F}_{Wi} + \boldsymbol{F}_W = \boldsymbol{0} \Rightarrow \sum_{i=1}^{\boldsymbol{3}} F_{Wi} = F_W \tag{E3-11}$$

$$\begin{aligned} \sum \boldsymbol{M} = \boldsymbol{0} \Rightarrow \sum_{i=1}^{\boldsymbol{3}} \boldsymbol{P}_{Wi} \times \boldsymbol{F}_{Wi} + \boldsymbol{P}_W \times \boldsymbol{F}_W \\ = \boldsymbol{0} \Rightarrow \sum_{i=1}^{\boldsymbol{3}} \boldsymbol{P}_{Wi} F_{Wi} = \boldsymbol{P}_W F_W \end{aligned} \tag{E3-12}$$

Από τις εξισώσεις αυτές υπολογίζονται οι φορτίσεις στους τροχούς F_{W1}, F_{W2} και F_{W3}. Τέλος από την (E3-6) με $B = F_W$ υπολογίζεται η ζητούμενη τριβή κύλισης $\boldsymbol{F_{fi}}$ $(\boldsymbol{\sigma\varepsilon}\ \boldsymbol{N})$ σε κάθε τροχό:

$$F_{fi} = \frac{F_{Wi} f_i}{R_i} \tag{E3-13}$$

Απαιτούμενη δύναμη

Από τις σχέσεις (Ε3-11)(Ε3-12) προκύπτει η απαιτούμενη δύναμη F_k (σε N) που πρέπει να ασκηθεί σε κάθε κινητήριο τροχό για την μετακίνηση του οχήματος:

$$F_k = \left(\frac{(P_{Wy}/P_{Wky})(F_X + F_{in}) + F_{f3}}{2} + F_{fk}\right) \; , \quad για\; k = 1{,}2 \; \in \{δεξιός\; 1, αριστερός\; 2\} \tag{Ε3-14}$$

όπου k είναι η αρίθμηση της κινητήριας μονάδας και P_{WY}, P_{Wky} οι συνιστώσες των διανυσμάτων θέσης $\boldsymbol{P}_{Wk}$ και $\boldsymbol{P}_W$ στον άξονα $\boldsymbol{y}_R$.

Απαιτούμενη ισχύς

Η σχέση της γραμμικής ταχύτητας με τη γωνιακή ταχύτητα είναι:

$$v = \omega R = \frac{2\pi R n}{60} \; , \tag{Ε3-15}$$

όπου v (σε $\mathrm{m/s}$) η γραμμική ταχύτητα, ω (σε $\mathrm{rad/s}$) η γωνιακή ταχύτητα, R (σε m) η ακτίνα του τροχού και n (σε min^{-1} $η\; σε$ rpm) οι περιστροφές του τροχού ανά μονάδα χρόνου (σε min).

Η σχέση της ροπής με την απαιτούμενη δύναμη είναι:

$$T = RF \; , \tag{Ε3-16}$$

όπου T (σε Nm) η ασκούμενη ροπή στον άξονα του τροχού, R (σε m) η ακτίνα του τροχού και F (σε N) η περιφερειακή δύναμη που ασκείται από το δάπεδο.

Η απαιτούμενη ισχύς στον άξονα του τροχού k, από τις (Ε3-15)(Ε3-16) είναι:

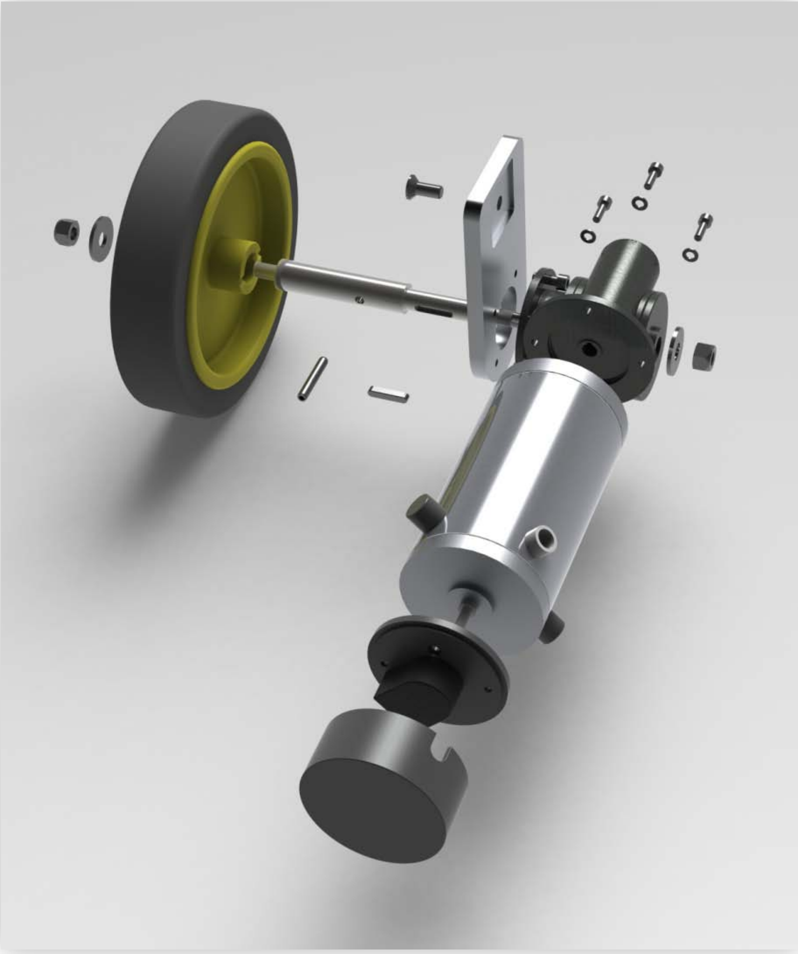
$$P = Fv = F\omega R = T\omega = \frac{2\pi R n F}{60} = \frac{2\pi n T}{60} \tag{Ε3-17}$$

3.4.3 Ανεξάρτητη κινητήρια μονάδα (Α2:1)

Η κινητήρια μονάδα εδράζεται μέσω της αλουμινένιας βάσης ειδικής κατασκευής (κατεργασίας CNC φρέζας) η οποία προσαρμόζεται και συσφίγγεται στα δύο άκρα της οπίσθιας δοκού στο δομικό πλαίσιο του AGV. Πρόκειται για μία διάταξη:

- Τροχού (Α2:1:4) (Torque Wheel) (TELLURE ROTA S73 200),
- Άξονα ειδικής κατασκευής (Shaft) (κατεργασίας τόρνευσης),
- Γωνιακού μειωτήρα ατέρμονα – οδοντωτού (Α2:1:3) (Gearbox) (STM RI 28FL ir: 20),
- Κινητήρα brush servo dc motor (Α2:1:4) (BCS 30 @ $48\ \mathrm{V}, 3000\ \mathrm{rpm}, 0.68\ \mathrm{Nm}$) και,
- Παλμογεννήτριας (Α2:1:2) (Optical Encoder),

ενώ τον ρόλο της έδρασης του κινητήριου άξονα τον επιτελεί ο γωνιακός μειωτήρας στροφών (Εικόνα 3.6). Η χρήση μειωτήρα στροφών κρίνεται απαραίτητη αφού οι brush servo dc κινητήρες είναι σχετικά υψηλόστροφοι με συνήθη ταχύτητα περιστροφής τις $3000\ \mathrm{rpm}$. Αν ο άξονας του τροχού συνδεόταν απευθείας με τον άξονα του κινητήρα η μέγιστη ταχύτητα του οχήματος θα κυμαινόταν στα $10\ ^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}}$ που πρακτικά είναι τεράστια ταχύτητα για την συγκεκριμένη εφαρμογή, ενώ ταυτόχρονα η ροπή ενός λογικού κινητήρα δε θα επαρκούσε για την κίνηση του οχήματος.



Εικόνα 3.6 Φωτορεαλιστική απεικόνιση, αποσυναρμολογημένη άποψη της κινητήριας μονάδας.

Κριτήρια και πεδίο επιλογής

Η επιλογή του κινητήρα γίνεται από την σειρά BCS 30 της BONFIGLIOLI COMPONENTS που διαθέτει μία γκάμα από brush servo dc κινητήρες σε διάφορους συνδυασμούς ονομαστικών μεγεθών ταχύτητας περιστροφής, ηλεκτρικής τάσης και συνεχόμενης ροπής. Η σειρά BCS χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρές διαστάσεις και υψηλές ροπές, ενώ συνίσταται για εφαρμογές που απαιτείται πολύ καλή ομαλότητα και ακρίβεια της κίνησης στις χαμηλές ταχύτητες.

Η επιλογή του μειωτήρα στροφών γίνεται από την σειρά γωνιακών gearbox, RI 28FL της STM [16]. Η συγκεκριμένη σειρά διαθέτει ένα αρκετά μεγάλο εύρος σχέσεων μείωσης στροφών με ανεκτή ταχύτητα περιστροφής στην είσοδο τους αρκετά μεγαλύτερη από τις $3000\ \mathrm{rpm}$. Τα Gearbox της STM είναι κατασκευασμένα από υλικά υψηλής ποιότητας και σύγχρονης σχεδίασης διασφαλίζοντας τη μέγιστη αξιοπιστία και διάρκεια ζωής.

Η γεωμετρία των γωνιακών μειωτήρων της σειράς RI 28FL είναι εγκάρσιας διάταξης ατέρμονα κοχλία – οδοντωτού τροχού, ενώ η έδραση τους στο αλουμινένιο κέλυφος τους γίνεται με ένσφαιρα ρουλεμάν κλειστού τύπου. Οι γωνιακοί μειωτήρες έχουν χαμηλότερους συντελεστές απόδοσης από τους πλανητικούς[5] (planetary), επιλέγονται όμως λόγω της εξαιρετικής τους κατασκευαστικής στιβαρότητας και της μεγάλης αντοχής έδρασης με αμφίπλευρα ρουλεμάν στον άξονα εξόδου. Συνδυάζεται έτσι η έδραση της κινητήριας ατράκτου του τροχού παράλληλα με τον υποβιβασμό της σχέσης μετάδοσης με αποτέλεσμα την αισθητή απλοποίηση της σχεδίαση του οχήματος.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό στους μειωτήρες στροφών είναι η σχέση μετάδοσης i η οποία προκύπτει από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μειωτήρα και ορίζεται ως το πηλίκο της ταχύτητας εξόδου n_{out} (σε rpm) προς την ταχύτητα εισόδου n_{in} (σε rpm) οπότε:

$$i = \frac{n_{out}}{n_{in}} = \frac{T_{in}}{T_{out}} = \frac{1}{ir}\ , \qquad \text{(E3-18)}$$

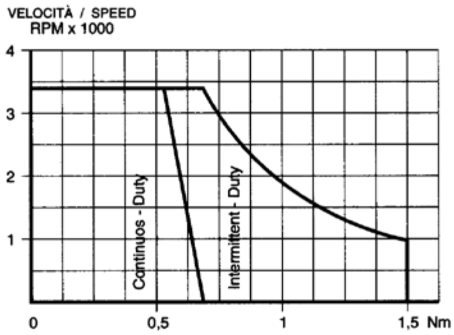
όπου T_{in} και T_{out} (σε Nm) η ροπή εισόδου και εξόδου αντίστοιχα και ir η σχέση μείωσης[6] (reduction ratio) στροφών.

Στη σειρά κινητήρων BCS 30 [17] παρατηρείται ότι οι διαθέσιμες τάσεις λειτουργίας είναι 24 και 48 volt, με την τάση των 48 volt να απαιτεί πολυπληθή συστοιχία συσσωρευτών εν σειρά (για λειτουργία στη μέγιστη ταχύτητα). Οι διαθέσιμες ταχύτητες περιστροφής για τις παραπάνω τάσεις είναι στις 2000 και 3000 rpm. Λαμβάνοντας υπόψη την μείωση του συντελεστή απόδοσης η με την αύξηση της σχέσης μείωσης ir, είναι σημαντικό να γίνει επιλογή όσο το δυνατόν μικρότερης σχέσης μείωσης που συνεπάγεται χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής στην είσοδο του μειωτήρα. Στους servo dc κινητήρες η σχέση μεταξύ τάσης (σε volt) και ταχύτητας (σε rpm) του κινητήρα είναι γραμμική, ενώ η σχέση της ροπής συνεχούς λειτουργίας (σε Nm) και της ταχύτητας (σε rpm) είναι σχεδόν σταθερή, με μία κλίση ελάττωσης ροπής με την αύξηση της ταχύτητας της τάξεως του 20%.

Σύμφωνα με τα παραπάνω επιλέγεται ο τύπος των 48 volt στις 3000 rpm. O κινητήρας τροφοδοτείται με μέγιστη τάση λειτουργίας από 24 έως 34 volt αναλόγως της στάθμης φόρτισης των ηλεκτρικών συσσωρευτών. Το εύρος της τάσης τροφοδοσίας έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των μέγιστων στροφών στις 1500 με 2125 rpm, με πλεονέκτημα την αύξηση του συντελεστή απόδοσης διατηρώντας την διαθέσιμη ροπή.

Πίνακας 3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά επιλεγμένου κινητήρα BCS 30 48-2000-0.68, δεξιά το διάγραμμα ροπής – ταχύτητας στη συνεχόμενη και διακεκομμένη λειτουργία.

BCS 30 48 V, 3000 rpm, 0.68 Nm	
Μέγιστη ροπή συνεχόμενης λειτουργίας	0.68 Nm
Ροπή αδράνειας	$3.8\ 10^{-4}$ kg m^2
Σταθερά ροπής	0.12 Nm/A
Αντίσταση	1.4 ohm
Ροπή αιχμής (peak)	0.85 Nm
Φορτίο αιχμής	7.1 A
Βάρος	3.83 kg



[5] Στους πλανητικούς μειωτήρες συναντούμε αντίστοιχες σχέσεις μείωσης με τους γωνιακούς ατέρμονα – οδοντωτού αλλά οι πρώτοι είναι πλέον αποδοτικότεροι (μο $\eta \cong 0.95$) σε αντίθεση με τους δεύτερους (μο. $\eta \cong 0.65$).

[6] Αποτελεί σύνηθες τεχνικό χαρακτηριστικό που δίδεται από τους κατασκευαστές για μεγαλύτερη ευκολία με τη μορφή ακεραίου και όχι κλάσματος (20 αντί 1/20).

Επιλογή κινητήρα και μειωτήρα

Η επιλογή του κινητήρα και του μειωτήρα καθορίζεται από τον συνδυασμό της σχέσης μείωσης ir και της απαραίτητης ροπής T_{app} που υπολογίζονται από την εφαρμογή του αλγορίθμου *Μεθοδολογία επιλογής κινητήρα και μειωτήρα του συστήματος κίνησης AGV* (Αλγόριθμος 3.1). Τα δεδομένα του αλγορίθμου είναι το κέντρο βάρους και η θέση των τροχών στο $\{R\}$ που προκύπτουν από τη σχεδίαση του οχήματος. Συντελεστής τριβής κύλισης επιλέγεται μία απαισιόδοξη προσεγγιστική τιμή, αυτή της μικρότερης τιμής του μαλακού καουτσούκ στο σκυρόδεμα (Πίνακας 3.2), παρόλο που το υλικό του πέλματος θεωρείται αρκετά σκληρό.

Με την εφαρμογή της μεθόδου τεκμηριώνεται η επιλογή του κινητήρα BCS 30 @ $48\ \mathrm{V}, 3000\ \mathrm{rpm}, 0.68\ \mathrm{Nm}$ και του μειωτήρα STM RI 28FL ir: 20. Η ισχύς του οχήματος σε μεταβατικές καταστάσεις μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερες κλίσεις ανάβασης καθώς και επιταχύνσεις διότι αυτές που υπολογίστηκαν είναι για συνεχόμενη λειτουργία (Continues - Duty). Οι servo dc κινητήρες μπορούν να λειτουργούν με κατάλληλη διαμόρφωση PWM σε μεγαλύτερες ροπές από την ονομαστική, υποβιβάζοντας αναγκαστικά όμως την ταχύτητα τους (Πίνακας 3.3).

Το όχημα επομένως διαθέτει ικανή ροπή για τα παρακάτω κινηματικά χαρακτηριστικά σε συνεχόμενη λειτουργία και με ταυτόχρονη επίδραση όλων των παραγόντων που καθορίζουν την ισχύ κίνησης όπως αναλύθηκαν προηγουμένως:

- Μέγιστη ταχύτητα 1.1 με $1.4\ m/s$
- Εγγυημένη επιτάχυνση $0.785\ \mathrm{m/s^2}$
- Εγγυημένη κλίση ανάβασης 4°
- Μέγιστη ροπή $1.36\ \mathrm{Nm}$
- Μέγιστη απαιτούμενη ισχύς $300\ \mathrm{W}$

Πίνακας 3.4 Ορισμοί και αποτελέσματα (Αλγόριθμος 3.1). Δεδομένα εισόδου (με γκρι υπογράμμιση) από τη σχεδίαση και τις προδιαγραφές του οχήματος AGV. Οι υπολογισμοί έγινα με το MS Excel.

Μέγεθος και τιμή	Μονάδα	Περιγραφή
$\{7,81 \mid 10,79 \mid 15,75 \mid 20,72 \mid \ldots\}$	$ir, RD\%$	Gearboxes of STM RI 28FL
$\{0.44 \mid 0.68 \mid 0.89\}$	Nm	Motors of BCS 30 @ $48\ \mathrm{V}, 3000\ \mathrm{rpm}$
$\upsilon_{req,max} = 1.417, \upsilon_{req,min} = 1, \upsilon_{max} = 1.113, \upsilon_{min} = 0.785$	m/s	Γραμμική ταχύτητα οχήματος
$n_{req,max} = 135.282, n_{req,min} = 95.493, n_{max} = 106.25, n_{min} = 75$	rpm	Γωνιακή ταχύτητα στον τροχό
$t_{\upsilon,max} = 1$	sec	Χρόνος επιτάχυνσης στην υ_{max}
$a = 0.785$	m/s^2	Γραμμική επιτάχυνση οχήματος
$\varphi = 4^{\circ} = 0.07$	rad	Μέγιστη κλίση δαπέδου
$D_1 = 0.2, D_2 = 0.2, D_3 = 0.125, R_1 = 0.1, R_2 = 0.1, R_3 = 0.0635$	m	Διάμετρος και ακτίνα τροχών (BR, BL, FC)
$f = 0.015$	m	Συντελεστής τριβής κύλισης
$m = 60$	kg	Μάζα οχήματος
$V_{bat,max} = 34, V_{bat,min} = 24, V_{servo} = 48$	volt	Τάση τροφοδοσίας (πλήρης, εξαντλημένη) Ονομαστική τάση κινητήρα
$n_{servo,max} = 2125, n_{servo,min} = 1500, n_{servo} = 3000$	rpm	Γωνιακή ταχύτητα στον κινητήρα

		Ονομαστική ταχύτητα κινητήρα
$ir_{req} = 15.708, ir = 20$	$-$	Απαιτούμενη σχέση μείωσης, επιλεγμένη
$RD = 0.72$	$-$	Συντελεστής απόδοσης μειωτήρα
$F_W = 587.166, F_X = 41.059$	N	Συνιστώσες του βάρους στο $\{R\}$
$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{W1} & \boldsymbol{P}_{W2} & \boldsymbol{P}_{W3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.540 \\ -0.2875 & 0.2875 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	m	Πίνακας διανυσμάτων θέσης τροχών (XY)
$\boldsymbol{b} = [\boldsymbol{P}_W \quad 1]^T F_W = [0.202 \quad -0.025 \quad 1]^T \; 587.166$	Nm	Διάνυσμα ροπών κέντρου βάρους
$\boldsymbol{x} \equiv \boldsymbol{F}_{wi} = [209.290 \quad 158.232 \quad 219.644]^T$	N	Διάνυσμα στατικής φόρτισης τροχών
$F_{f1} = 31.394, F_{f2} = 23.735, F_{f3} = 52.714$	N	Δύναμη τριβής κύλισης σε κάθε τροχό
$F_{in} = 47.124$	N	Αδρανειακή δύναμη επιτάχυνσης
$F_1 = 105.676, F_2 = 90.349$	N	Απαιτούμενη δύναμη σε κάθε τροχό
$T_1 = 10.568, T_2 = 9.035, T_{app} = 0.734$	Nm	Απαιτούμενη ροπή σε κάθε τροχό, κινητήρα

Αλγόριθμος 3.1 Μεθοδολογία επιλογής κινητήρα και μειωτήρα του συστήματος κίνησης AGV

Βήμα 1. Επιλογή ή επαναπροσδιορισμός διαθέσιμων μειωτήρων και κινητήρων.

Βήμα 2. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές (κεφ. 3.1.1) εκχωρούνται οι επιθυμητές τιμές $\upsilon_{reqmax}, \upsilon_{reqmin}, \varphi, t_{\upsilon,max}$ και υπολογίζονται μέσω της (Ε3-15) οι n_{reqmax}, n_{reqmin}ενώ η επιτάχυνση a υπολογίζεται από την σχέση:

$$a = \frac{\upsilon_{req,min}}{t_{\upsilon,max}} \qquad \text{(Ε3-19)}$$

Βήμα 3. Υπολογίζεται η μέγιστη $n_{servo,max}$ και η ελάχιστη $n_{servo,min}$ γωνιακή ταχύτητα στον κινητήρα που εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας:

$$n_{servo,state} = \frac{V_{bat,state}}{V_{servo}} n_{servo}\,, \qquad state \in \{max, min\} \qquad \text{(Ε3-20)}$$

Βήμα 4. Υπολογίζεται η σχέση μείωσης ir_{req}:

$$ir_{req} = \frac{n_{servo,min}}{n_{req,min}} \qquad \text{(Ε3-21)}$$

και εκχωρείται στην ir η αμέσως επόμενη μεγαλύτερη τιμή στη σειρά των μειωτήρων ή η ίδια αν η απόκλιση είναι σχετικά μικρή, διαφορετικά γίνεται μετάβαση στο Βήμα 1.

Βήμα 5. Υπολογίζονται οι τρέχουσες γωνιακές ταχύτητες n_{max}, n_{min}:

$$n_{state} = \frac{n_{servo,state}}{ir} \qquad \text{(Ε3-22)}$$

και στη συνέχεια οι τρέχουσες γραμμικές ταχύτητες $\upsilon_{max}, \upsilon_{min}$ μέσω της (Ε3-15).

Βήμα 6. Υπολογίζονται οι βαρυτικές συνιστώσες F_W και F_X(E3-8), η αδρανειακή δύναμη F_{in} και οι δυνάμεις τριβής κύλισης σε κάθε τροχό F_{f1}, F_{f2}, F_{f3} (E3-13) αφού πρώτα επιλυθεί το σύστημα $\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$ $(\sigma\varepsilon\ \mathrm{N})$.

Βήμα 7. Υπολογίζεται η απαιτούμενη δύναμη εφαρμογής σε κάθε κινητήριο τροχό F_1, F_2 (E3-14) και οι αντίστοιχες ροπές T_1, T_2 (E3-16).

Βήμα 8. Ορίζεται ως απαιτούμενη ροπή κινητήριας μονάδας (E3-18):

$$T_{app} = \frac{max\,\{T_1, T_2\}}{ir\ RD} \tag{E3-23}$$

Εάν η T_{app} είναι μεγαλύτερη από κάθε δυνατή επιλογή ανάμεσα στη σειρά των διαθέσιμων κινητήρων γίνεται μετάβαση στο Βήμα 1, διαφορετικά η διαδικασία ολοκληρώνεται.

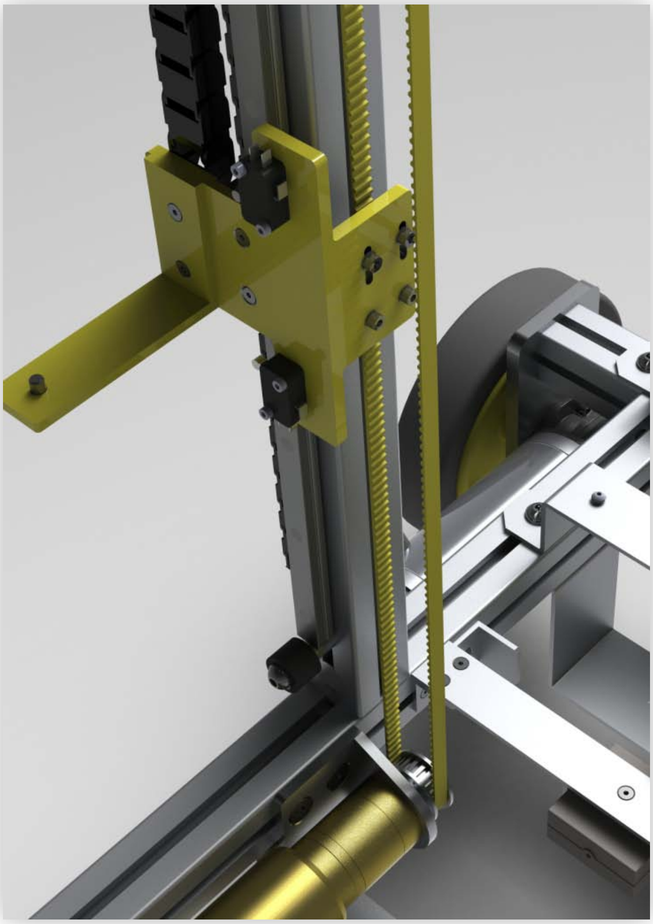
3.5 Κίνηση κάμερας (A3)

3.5.1 Γενικά

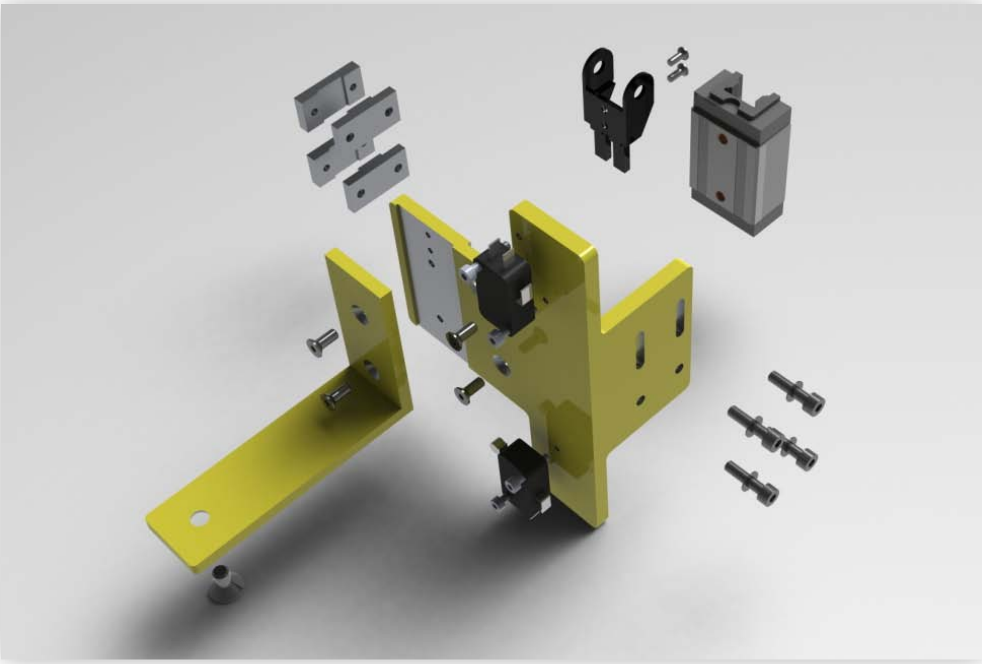
Στην κατακόρυφη δοκό του δομικού πλαισίου του AGV προσαρμόζεται κατά μήκος αυτού σύστημα γραμμικής οδήγησης, αποτελούμενο από οδηγό (ράγα) και βαγονέτο. Στα άκρα της ράγας τοποθετούνται μηχανικά στοπ ειδικής σχεδίασης για την αποφυγή πιθανής αποσυναρμολόγησης του βαγονέτου. Τα στοπ περιβάλλονται από μαλακό υλικό τεφλόν για την απόσβεση της πρόσκρουσης και την αποφυγή πλαστικών παραμορφώσεων. Με τη χρήση αλουμινένιων βάσεων ειδικής κατασκευής (κατεργασίας CNC φρέζας) γίνεται η στήριξη και η συναρμολόγηση του συστήματος κίνησης. Το γραμμικό σύστημα οδήγησης αποτελείται από:

- Φωτογραφική κάμερα (A6:1) (δεν ανήκει στο module) (EOS CANON 500D),
- Κινητήρα brush servo dc (A3:2) (PITTMAN 14205 @ $30.3\ \mathrm{V}, 2920\ \mathrm{rpm}, 0.22\ \mathrm{Nm}$),
- Πλανητικό μειωτήρα (A3:2) (PITTMAN G42A ir: 3.7),
- Κινητήρια (κάτω) οδοντωτή τροχαλία συνδεδεμένη στον άξονα του κινητήρα (A3:3:3) (BEA-20XL037-2F),
- Ακόλουθη (άνω) οδοντωτή τροχαλία προέντασης και αντιστήριξης (A3:3:3) (BEA-20XL037-2F),
- Οδοντωτό ιμάντα μεταφοράς κίνησης (A3:3:4) (BEA-BELTING-XL037),
- Έδρανο κύλισης βαγονέτο (A3:3:2) (item Bearing Carriage PS 4-15),
- Οδηγό ράγα (A3:3:1) (item Linear Guide Rail PS 4-15),
- Ερπύστρια καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας – σημάτων (A3:3:5) (igus Series 06 E2 micro 06-16-018-2),
- 2 μικροδιακόπτες ακραίας θέσης (A3:4) (HIGH ELECTRIC-VS10N051C) .

Ειδικά διαμορφωμένα άκρα στην γωνιακή βάση του βαγονέτου σχεδιάστηκαν για την εγκατάσταση μικροδιακοπτών ακραίας θέσης που ενεργοποιούνται κατά την επαφή τους με τα μηχανικά στοπ. Η ωφέλιμη διαδρομή της κάμερας είναι ($1408\ \mathrm{mm}$), ενώ το κατώτερο σημείο της κάμερας σε ύψος είναι ($258\ \mathrm{mm}$) και το ανώτερο ($1666\ \mathrm{mm}$).



Εικόνα 3.7 Φωτορεαλιστική απεικόνιση, άποψη του συστήματος κατακόρυφης κίνησης.



Εικόνα 3.8 Φωτορεαλιστική απεικόνιση, αποσυναρμολογημένη διάταξη του γραμμικά οδηγούμενου συστήματος (γωνιακή βάση που εδράζεται σε βαγονέτο).

3.5.2 Επιλογή κινητήρα και μειωτήρα

Η επιλογή του κινητήρα γίνεται από τη σειρά 14200 DC SERVO MOTORS της PITTMAN με ενσωματωμένο πλανητικό μειωτήρα G42A PLANETARY GEARBOX που εμπορεύονται σε κοινή κωδική ονομασία PG14000 [18]. Οι brush servo dc κινητήρες της σειράς 14200 παρέχουν μεγάλο εύρος ροπών και τάσεων λειτουργίας με ονομαστική ταχύτητα περιστροφής περίπου στις 3600 rpm, ενώ οι μειωτήρες της σειράς G42A δίνουν δυνατότητα επιλογής σχέσης μείωσης από 3.7 έως 308 με συντελεστές απόδοσης της τάξεως 70 με 80%. Η κινητήρια μονάδα παρέχεται προαιρετικά από τον κατασκευαστή με παλμογεννήτρια (encoder) της σειράς E30A.

Με δεδομένο ότι η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα είναι μεταξύ 24 και 34 volt πρέπει να επιλεγεί μία τάση λειτουργίας πιο κοντά στο άνω όριο της τροφοδοσίας. Επομένως από το πεδίο των διαθέσιμων τάσεων επιλέγεται αυτή των 30.3 volt ονομαστικής τάσης διότι επιθυμείται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ταχύτητα, με την υπέρταση όμως να βρίσκεται μέσα στα λειτουργικά όρια του κινητήρα. Αρχικά θεωρείται μία μέση ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα $n_{servo} = 3000 \text{ rpm}$ διότι για τις διάφορες τάσεις και ροπές παρατηρείται μία μέγιστη απόκλιση $\pm 300 \text{ rpm}$. Στις προδιαγραφές έχει οριστεί ότι απαιτείται μετάβαση από μία τυχαία θέση φωτογράφισης στην επόμενη σε λιγότερο από $t_{s,max} = 1 \text{ sec}$. Εάν εκτιμηθεί η μέγιστη απόσταση μετατόπισης τότε είναι δυνατόν να υπολογιστεί η απαραίτητη επιτάχυνση του συστήματος κίνησης της κάμερας. Η απόσταση αυτή εκτιμάται σε $s_{max} = 0.517 \text{ m}$ (κεφ. 4.2.1) συμπεριλαμβανόμενης της ελάχιστης δυνατής επικάλυψης O_l και αντιστοιχεί στην υποδιαίρεση λήψης 4[ων] κάδρων για το μήκος της διαδρομής. Η επιτάχυνση a (σε m/s^2) που πρέπει το σύστημα κίνησης να επιτυγχάνει δίδεται από τη σχέση:

$$a = \frac{v_{min}^2}{v_{min} t_{s,max} - s_{max}} \,, \qquad \text{(E3-24)}$$

όπου v_{min} (σε m/s) η μέγιστη ταχύτητα στην χαμηλότερη τάση, $t_{s,max}$ (σε sec) ο χρόνος μετάβασης στο s_{max} (σε m). Η παραπάνω σχέση προκύπτει από την κινηματική ανάλυση σε τραπεζοειδές προφίλ ταχύτητας.

Η μάζα των κινούμενων τμημάτων λαμβάνεται $m = 2.5 \text{ kg}$ (συμπεριλαμβανομένου της φωτογραφικής μηχανής). Στη μάζα m έχει προβλεφτεί $1{,}5 \text{ kg}$ επιπλέον της παρούσας σχεδίασης για τυχόν μεταγενέστερες διαφοροποιήσεις του module (πχ. φωτογραφική μηχανή μεγαλύτερου βάρους). Στη διάταξη οδοντωτής τροχαλίας και ιμάντα θεωρείται ότι οι απώλειες τριβής στα ρουλεμάν και στις επαφές είναι αμελητέες. Η διάμετρος της τροχαλίας ισούται με $D_p = 0.032 \text{ m}$. Το βαγονέτο σύμφωνα με τον κατασκευαστή ασκεί μία σταθερή δύναμη αντίστασης F_T (σε N) ανεξάρτητη της ταχύτητας, ενώ εξαιτίας της κατακόρυφης κίνησης της κάμερας λαμβάνεται υπόψη η συνιστώσα του βάρους F_W (σε N) οπότε:

$$F_T = 10\,N \ , \quad F_W = mg \qquad \text{(E3-25)}$$

Με την εφαρμογή της μεθόδου (Αλγόριθμος 3.2) τεκμηριώνεται η επιλογή του κινητήρα PITTMAN 14205 @ $30.3 \text{ V}, 2920 \text{ rpm}, 0.22 \text{ Nm}$ και του μειωτήρα PITTMAN G42A ir: 3.7. Το σύστημα κίνησης κάμερας διαθέτει επομένως ικανή ροπή για τα παρακάτω κινηματικά χαρακτηριστικά σε συνεχόμενη λειτουργία και με ταυτόχρονη επίδραση όλων των παραγόντων που καθορίζουν την ισχύ κίνησης όπως αναλύθηκαν προηγουμένως:

- Μέγιστη ταχύτητα 1,1 με $1.5\ m/s$
- Εγγυημένη επιτάχυνση $2.5\ \mathrm{m/s^2}$
- Μέγιστη ροπή $0{,}22\ \mathrm{Nm}$
- Μέγιστη απαιτούμενη ισχύς $75\ \mathrm{W}$

Πίνακας 3.5 Ορισμοί και αποτελέσματα (Αλγόριθμος 3.2). Δεδομένα εισόδου (με γκρι υπογράμμιση)από τη σχεδίαση και τις προδιαγραφές. Οι υπολογισμοί έγινα με το MS Excel.

Μέγεθος	Μονάδα	Περιγραφή
$\{ 3.7, 80 \mid 5{,}80 \mid 7{,}80 \mid 14{,}75 \mid 19, 75 \mid 25{,}75 \mid 35{,}70 \mid \dots \}$	$ir, RD\%$	Gearboxes of PITTMAN G42A
$\{ 0.071 \mid 0.099 \mid 0.15 \mid 0.18 \mid 0.22 \mid 0.26 \mid 0.35 \}$	Nm	Motors of PITTMAN 14200 @ $30.3\ \mathrm{V}, 3000\ \mathrm{rpm}$
$\upsilon_{req,max} = 1.417, \upsilon_{req,min} = 1, \upsilon_{max} = 1.5, \upsilon_{min} = 1.058$	m/s	Γραμμική ταχύτητα βαγονέτου
$n_{req,max} = 836.6, n_{req,min} = 590.5, n_{max} = 885.6, n_{min} = 625.1$	rpm	Γωνιακή ταχύτητα στην τροχαλία
$t_{s,max} = 1$	sec	Χρόνος μετάβασης στη μέγιστη διαδρομή $s_{max} = 0.517\ \mathrm{m}$
$a = 2.509$	m/s^2	Γραμμική επιτάχυνση βαγονέτου
$m = 2.5$	kg	Μάζα μέγιστου μετακινούμενου φορτίου
$V_{bat,max} = 34, V_{bat,min} = 24, V_{servo} = 30.3$	volt	Τάση τροφοδοσίας (πλήρης, εξαντλημένη) Ονομαστική τάση κινητήρα
$n_{servo,max} = 3276.6, n_{servo,min} = 2312.9, n_{servo} = 2920$	rpm	Γωνιακή ταχύτητα στον κινητήρα Ονομαστική ταχύτητα κινητήρα
$ir_{req} = 3.916, ir = 3.7$	$-$	Απαιτούμενη σχέση μείωσης, επιλεγμένη
$RD = 0.80$	$-$	Συντελεστής απόδοσης μειωτήρα
$F_W = 24.575$	N	Δύναμη βάρους μάζας m
$F_T = 10$	N	Δύναμη τριβής βαγονέτου
$F_{in} = 6.25$	N	Αδρανειακή δύναμη επιτάχυνσης
$F = 40.775$	N	Απαιτούμενη δύναμη στο βαγονέτο
$T = 0.659, T_{app} = 0.222$	Nm	Απαιτούμενη ροπή στο βαγονέτο, κινητήρα

Αλγόριθμος 3.2 Μεθοδολογία επιλογής κινητήρα και μειωτήρα του συστήματος κατακόρυφης κίνησης

Βήμα 1. Επιλογή ή επαναπροσδιορισμός διαθέσιμων μειωτήρων και κινητήρων.

Βήμα 2. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές (κεφ. 3.1.1) εκχωρούνται οι επιθυμητές τιμές $\upsilon_{reqmax}, \upsilon_{reqmin}, t_{s,max}, s_{max}, D_p$ και υπολογίζονται μέσω της (Ε3-15) οι n_{reqmax}, n_{reqmin}, ενώ η επιτάχυνση a υπολογίζεται από την (Ε3-24).

Βήμα 3. Υπολογίζεται η μέγιστη $n_{servo,max}$ και ελάχιστη $n_{servo,min}$ γωνιακή ταχύτητα στον κινητήρα που εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας (Ε3-20). Υπολογίζεται η σχέση μείωσης ir_{req} μέσω της (Ε3-21) και εκχωρείται στην ir η αμέσως επόμενη μεγαλύτερη στη σειρά των μειωτήρων ή η ίδια αν η απόκλιση είναι σχετικά μικρή, διαφορετικά γίνεται μετάβαση στο Βήμα 1.

Βήμα 4. Υπολογίζονται οι τρέχουσες γωνιακές ταχύτητες n_{max}, n_{min} μέσω της (Ε3-22) και στη συνέχεια οι τρέχουσες γραμμικές ταχύτητες $\upsilon_{max}, \upsilon_{min}$ μέσω της (Ε3-15). Υπολογίζεται η απαιτούμενη δύναμη εφαρμογής $F = F_w + F_T + F_{in}$ και ροπής $T = FD_p/2$ από τις (Ε3-25).

Βήμα 5. Ορίζεται η απαιτούμενη ροπή της κινητήριας μονάδας:

$$T_{app} = \frac{T}{ir\ RD} \quad \text{(E3-26)}$$

Εάν η T_{app} είναι μεγαλύτερη από κάθε δυνατή επιλογή ανάμεσα στη σειρά των διαθέσιμων κινητήρων γίνεται μετάβαση στο Βήμα 1, διαφορετικά η διαδικασία ολοκληρώνεται.

3.6 Λοιπές διατάξεις

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των υπόλοιπων μηχανολογικών και ηλεκτρικών παραμέτρων της σχεδίασης.

Διάταξη τροφοδοσίας (Α4)

Η τροφοδοσία του ρομποτικού οχήματος AGV Scanner γίνεται από δύο ανεξάρτητες ενεργειακές διατάξεις. Έχουν επιλεχθεί ηλεκτρικοί συσσωρευτές της Thunder Sky τύπου ιόντων λιθίου (LI-ION) και συγκεκριμένα το μοντέλο TS-LP12V40AH. Ο συσσωρευτής έχει ενεργειακή χωρητικότητα 40Ah και ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης αποδίδει τάση 12 με 17 volt. Γίνεται χρήση δύο όμοιων συσσωρευτών εν σειρά για την τροφοδοσία των κινητήρων ($24 - 34$ volt) και ενός συσσωρευτή για την τροφοδοσία των ηλεκτρονικών ($12 - 17$ volt). Το βάρος των συσσωρευτών είναι μόλις 6 kg όταν αντίστοιχες lead-acid έχουν διπλάσιο βάρος, με μικρότερη διάρκεια ζωής (cycle count) και πολλαπλάσιο χρόνο φόρτισης. Η στήριξη των συσσωρευτών (Εικόνα 3.9) γίνεται σε βάσεις ειδικής κατασκευής (στρατζαριστή λάμα αλουμινίου) που προσαρμόζονται με κοχλίες σύσφιξης των 8 mm.

Μία πρώτη εκτίμηση της αυτονομίας έγινε με βάση τις καταναλώσεις αιχμής (pick consumption) που είναι μεγαλύτερες από τις πραγματικές συνθήκες, αφού δεν λειτουργούν όλα τα συστήματα του AGV Scanner ταυτόχρονα, καθώς και στη μέγιστη δυνατή κατανάλωση. Στην παράγραφο 3.4.3 και 3.5 έγινε εκτίμηση της μέγιστης κατανάλωσης – απαιτούμενης ισχύος των κινητήριων μονάδων και του μηχανισμού κίνησης της κάμερας η οποία εκτιμήθηκε στα 370 W. Η μέγιστη κατανάλωση των ηλεκτρονικών εκτιμάται στα 100 W (Η/Υ, controllers, drives, camera, περιφερειακά). Ο χρόνος επομένως της συνεχόμενης λειτουργίας αιχμής κατά προσέγγιση, σύμφωνα με τη μέση τάση λειτουργίας υπολογίζεται στις 3 ώρες για την τροφοδοσία των κινητήρων και στις 8 ώρες για τα ηλεκτρονικά.

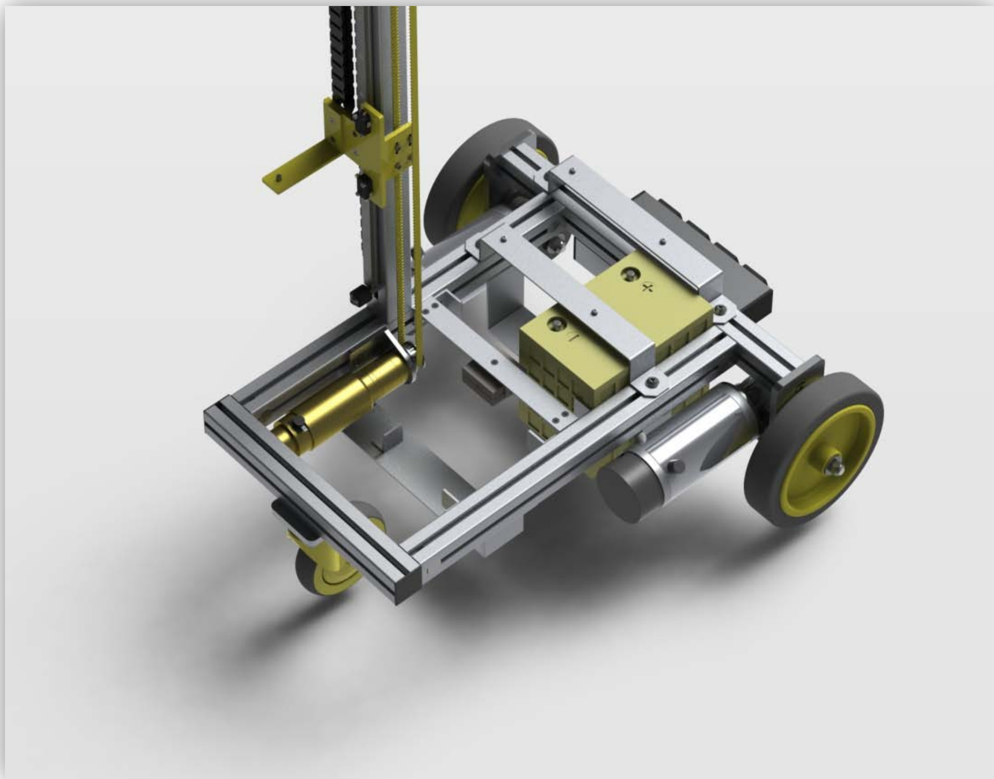
Η απογραφή μίας τυπικής αποθήκης κανονικής διατάξεως $1100\ \mathrm{m}^2$ με 720 ραφιέρες $(1 \times 0.5\ \mathrm{m})$ απαιτεί:

- 7200 φωτογραφικές λήψεις.
- 29 GB δεδομένων προς επεξεργασία.
- Μέσο διάστημα μετακίνησης οριζοντίως από στήλη σε στήλη $0.5\ \mathrm{m}$.
- Μέσο διάστημα μετακίνησης κατακόρυφα από λήψη σε λήψη $0.3\ \mathrm{m}$.
- Χρόνος μετακίνησης οριζοντίως από στήλη σε στήλη 3 sec.
- Χρόνος μετακίνησης κατακόρυφα από λήψη σε λήψη 1 sec.
- Συνολικός χρόνος σάρωσης 3.2 hours.
- Συνολικός χρόνος μετακινήσεων 20 min.
- Χρόνος απογραφής 3.5 ώρες

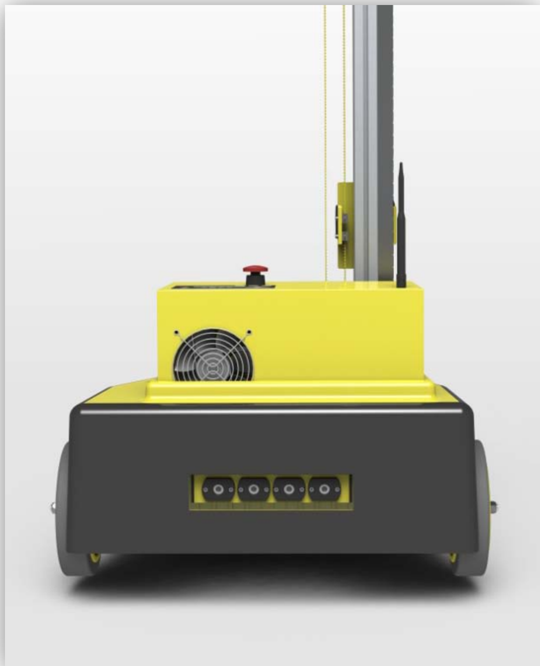
Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το σύστημα γενικά λειτουργεί σε κατάσταση μη αιχμής, με το παραπάνω προφίλ λειτουργίας η αυτονομία πιθανόν να αγγίζει και τις 6 ώρες. Ακριβής ενεργειακός υπολογισμός με διαδικασία διακεκριμένης ολοκλήρωσης μπορεί να γίνει με προσομοίωση.

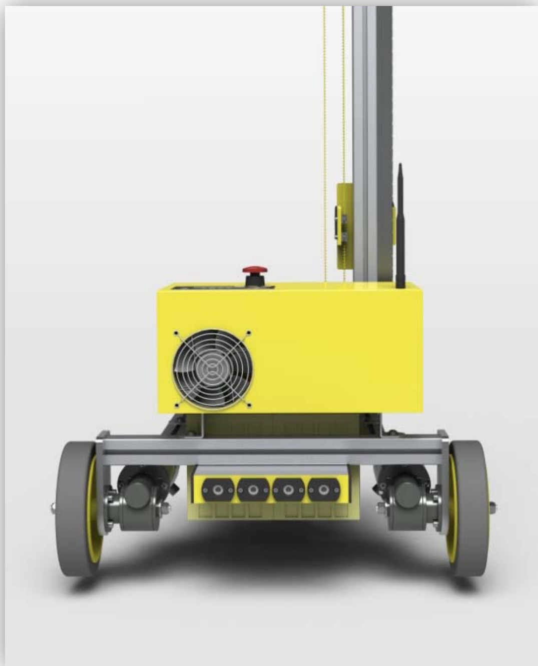
Διαδικασία φόρτισης (A4:5)

Έχει σχεδιαστεί διάταξη αυτόματης σύνδεσης με τον σταθμό φόρτισης. Η διάταξη αυτή αποτελείται από 4 θηλυκά βύσματα (MULTI CONTACT EBB8-V0) στο πίσω μέρος του οχήματος (Εικόνα 3.10). Το όχημα προσεγγίζει τα αντίστοιχα αρσενικά βύσματα που βρίσκονται προσαρμοσμένα σε βάση επί του τοίχου και συνδέεται αυτόματα. Με το που γίνεται η σύνδεση ένας μικροδιακόπτης στη βάση ενημερώνει την σταθερή μονάδα ελέγχου (S1: Server Control Unit) να ενεργοποιήσει μέσω του κατάλληλου ρελέ τα δύο ανεξάρτητα τροφοδοτικά με ενσωματωμένο κύκλωμα ελέγχου φόρτισης. Κατά αντίστοιχό τρόπο ένας ρελές αποκόπτει την τροφοδοσία του κυκλώματος των κινητήρων, ενώ η κατανάλωση του Intel atom επεξεργαστή θεωρείται αμελητέα χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία του ιδίου, αφού παρεμβάλλεται voltage regulator.



Εικόνα 3.9 Άποψη μερικής αποσυναρμολόγησης του οχήματος. Ξεχωρίζουν η βάση του κινητήρα του κατακόρυφου συστήματος κίνησης, οι βάσεις στήριξης του κουτιού των ηλεκτρονικών καθώς και οι βάσεις των ηλεκτρικών συσσωρευτών.





Εικόνα 3.10 Φωτορεαλιστική απεικόνιση της πίσω όψης της σχεδίασης του οχήματος. Ξεχωρίζει η διάταξη αυτόματης σύνδεσης (βύσματα), το κουτί των ηλεκτρονικών (σύστημα ψύξης) και τα gearboxes των κινητήριων μονάδων.

Το όχημα υπολογίζει σε πραγματικό χρόνο την απαιτούμενη ενέργεια για τις εργασίες που πρέπει να πραγματοποιήσει, ενώ ταυτόχρονα γνωρίζει μέσω του ελεγκτή φόρτισης (on board) το επίπεδο στάθμης των συσσωρευτών. Με βάση κάποια κριτήρια επιλέγει την στιγμή που θα δώσει εντολή για προσέγγιση της βάσης φόρτισης (αναβάλλοντας τη διαδικασία απογραφής) ή αντίστροφα εντολή για συνέχιση – έναρξη της απογραφής.

Κάλυμμα και Κουτί ηλεκτρονικών(A8:6)

Το κουτί των ηλεκτρονικών στηρίζεται σε αλουμινένιες βάσεις ειδικής κατασκευής (στρατζαριστή λάμα αλουμινίου), ενώ το κουτί είναι πλαστικό ειδικής κατασκευής ή αντίστοιχο του εμπορίου. Στο κουτί των ηλεκτρονικών είναι τοποθετημένες όλες οι ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος και επεξεργασίας του AGV Scanner. Ανάμεσα σε αυτές ξεχωρίζουν:

- Οι 3 DSP (PIC) controllers – drives (A2.1:5, A3:6) (6.4) ειδικής κατασκευής (USB to RS485),
- Η μητρική της Intel D945GCLF2D (A8:2) με επεξεργαστή Intel atom duo core στα 1.3 Mh,
- Το σύστημα ψύξης (ανεμιστήρας 12 mm με φίλτρο σκόνης),
- Ο διακόπτης έκτακτης ακινητοποίησης (emergency stop) (A8:5),
- O wireless network adapter b/g High Power TL-WN422G και η κεραία TL-ANT2408C, της TPLINK (A8:3),
- Οι ρελέδες για χειρισμό των ρευμάτων ισχύος (A8:7),
- Τέλος το χειριστήριο με ενσωματωμένη LCD οθόνη (A8:5) της MATRIX ORBITAL (BLK204A-USB), για τον άμεσο έλεγχο των βασικών λειτουργιών του AGV Scanner από τον χρήστη.

3.7 Συμπεράσματα

Σε αυτό εδώ το σημείο ολοκληρώνεται η μηχανολογική σχεδίαση του ρομποτικού οχήματος AGV Scanner. Η παρούσα μελέτη είναι ικανή και επαρκής για την ενδεχόμενη κατασκευή του οχήματος χωρίς περαιτέρω προεργασία. Κάθε εξάρτημα που χρησιμοποιήθηκε στην σχεδίαση είναι τυποποιημένο και άμεσης διαθεσιμότητας, όπως απαιτήθηκε και από τις προδιαγραφές, όσο για τα εξαρτήματα ειδικής κατασκευής, είναι αρκετά απλά και κατασκευάζονται σε μικρό χρονικό διάστημα.

Το κόστος κατασκευής του ρομποτικού οχήματος κυμαίνεται στα 3416 € (κεφ. 8). Το χρηματικό ποσό αυτό μπορεί να θεωρηθεί πολύ προσιτό για το πεδίο εφαρμογής του συγκεκριμένου συστήματος, αφού αντιστοιχεί περίπου στο 1/3 του ετήσιου κόστους εργασίας (ενός μη ειδικευμένου εργαζόμενου). Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της φωτογραφικής αποτύπωσης των αποθηκευτικών περιοχών και της μεθόδου της οπτικής αναγνώρισης των πρότυπων σημάνσεων (barcodes) που φέρουν τα υλικά.

4 Φωτογραφική απογραφή αποθήκης

Τα υλικά που βρίσκονται στις ραφιέρες φέρουν επικολλημένο barcode με το οποίο η κάμερα (A6:1) του AGV Scanner θεωρείται ότι έχει οπτική επαφή κινούμενο παράλληλα στις ραφιέρες. Κάθε κατακόρυφη επίπεδη επιφάνεια A πίσω από τα όρια της οποίας αποθηκεύονται τα προϊόντα χωρίζεται σε ένα δισδιάστατο πίνακα $\boldsymbol{M}$ φωτογραφικών λήψεων. Το επίπεδο του barcode θεωρείται σχεδόν παράλληλο ως προς το επίπεδο της επιφάνειας A ενώ δεν υφίσταται ουσιαστικός περιορισμός της περιστροφής του barcode (σε περίπτωση μεγάλης απόκλισης γωνιών από αυτές των τεταρτημορίων απαιτείται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς κατά την επεξεργασία).

Όλες οι διαστάσεις μήκους θεωρούνται σε mm εκτός αν διευκρινίζεται άλλη μονάδα. Για δεδομένο φωτογραφικό εξοπλισμό το πρόβλημα της ευκρινούς αποτύπωσης της επιφάνειας A συνίσταται στον καθορισμό των φωτογραφικών παραμέτρων:

- Εστιακή απόσταση φακού f.
- Απόσταση εστίασης F_d.
- Αριθμός διαφράγματος N.
- Ταχύτητα κλείστρου (χρόνου έκθεσης) S.
- Ένταση I_f του αστραπιαίου φωτισμού (flash).
- Ευαισθησία ISO του αισθητήρα CCD.
- Ανάλυση του ψηφιακού αισθητήρα $CCDP_w$ και $CCDP_h$.

4.1 Φωτογραμμετρία

4.1.1 Γενικές αρχές

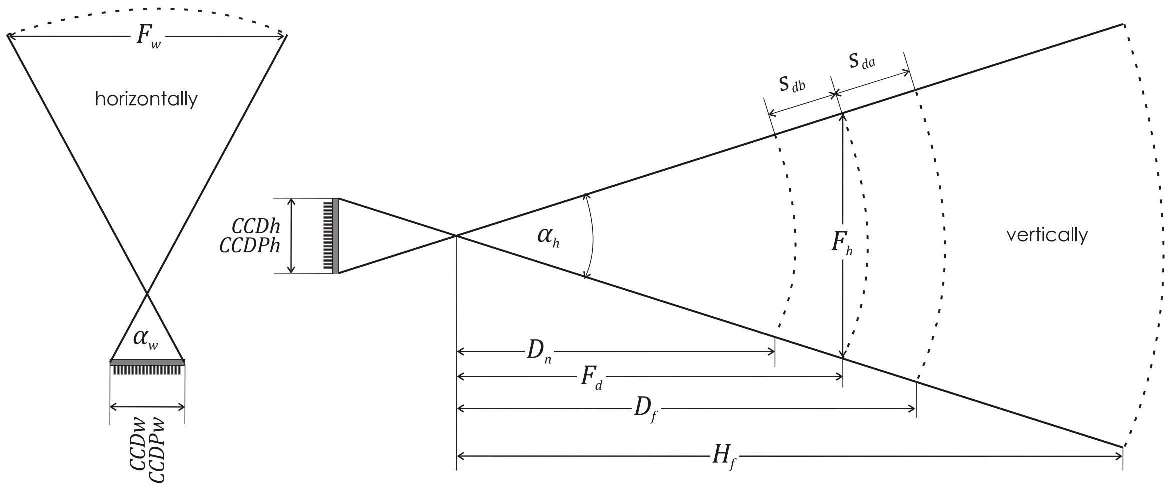
Ο αριθμός διαφράγματος N ορίζεται ως ο λόγος της εστιακής απόστασης του φακού προς την διάμετρό του διαφράγματος και συνηθίζεται να εκφράζεται ως f/N [19]. Οι δυνατές τιμές του N καθορίζονται από τη σχέση:

$$N = 2^{i/2} \quad \text{ή} \quad i = 2\,log_2 N \;, i = 0,1, \dots \;, \tag{E4-1}$$

όπου ο φακός της φωτογραφικής μηχανής μπορεί να ορισθεί σε μία από αυτές τις τιμές.

Όταν ο φακός είναι εστιασμένος στην υπερεστιακή απόσταση H_f (hyperhfocal distance) τότε το βάθος πεδίου (depth of field) εκτείνεται από το μέσο της εστιακής απόστασης μέχρι το άπειρο [20]. Εάν c ο κύκλος σύγχυσης [21] τότε η υπερεστιακή απόσταση H_f υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_f = \frac{f^2}{Nc} + f \tag{E4-2}$$



Εικόνα 4.1 Σχηματική απεικόνιση των βασικών μεγεθών που σχετίζονται άμεσα με την τις γενικές αρχές της φωτογραμμετρίας και της φωτογραφικής τεχνολογίας.

Η πλησιέστερη και η μακρινότερη απόσταση αποδεκτής ευκρίνειας (sharpness), D_n και D_f υπολογίζονται [22] από τις σχέσεις:

$$D_n = \frac{F_d(H_f - f)}{H_f + F_d - 2f} \quad και \quad D_f = \frac{F_d(H_f - f)}{H_f - F_d} \qquad \text{(E4-3)}$$

Η οπτική γωνία (angle of view) σε οριζόντια και σε κατακόρυφη διεύθυνση, α_w και α_h αντίστοιχα υπολογίζονται [23] από τις σχέσεις:

$$\alpha_w = 2arctan\frac{CCD_w}{2f} \quad και \quad \alpha_h = 2arctan\frac{CCD_h}{2f}\ , \qquad \text{(E4-4)}$$

ενώ το πλάτος F_w και το ύψος F_h του αποτυπώμενου κάδρου (Frame) δίδεται από τις σχέσεις:

$$F_w = 2F_d\, tan\left(\frac{\alpha_w}{2}\right) \quad και \quad F_h = 2F_d\, tan\left(\frac{\alpha_h}{2}\right) \qquad \text{(E4-5)}$$

Πίνακας 4.1 Ορισμοί παραμέτρων φωτογραφικού εξοπλισμού.

Μέγεθος	Μονάδα	Αρκτικόλεξο	Περιγραφή
PPI	PPI	Pixels Per Inch	Ελάχιστη ικανή ανάλυση αποτυπωμένου barcode
CCD_w, CCD_h	mm	Charge Coupled Device	Διαστάσεις του αισθητήρα της κάμερας
$CCDP_w, CCDP_h$	pixel	CCD Pixels	Ανάλυση του αισθητήρα της κάμερας
F_w, F_h	mm	Frame	Πλάτος και ύψος κάδρου
N		F number (Aperture)	Αριθμός διαφράγματος
f	mm	Focal length	Εστιακή απόσταση
c	mm	Circle of confusion	Κύκλος σύγχυσης

4.1.2 Υπολογισμός παραμέτρων για δεδομένο βάθος πεδίου

Το βάθος πεδίου εξαρτάται από την τιμή του αριθμού διαφράγματος N και από την εστιακή απόσταση f του φακού. Το βάθος πεδίου αυξάνεται με την αύξηση του N (μικρότερη οπή) ενώ ελαττώνεται με την αύξηση του f.

Η κάθετη απόσταση της κάμερας από το κατακόρυφο επίπεδο A των ραφιών θεωρείται δεδομένη από την αποθήκη (W1) και αντιστοιχεί στην απόσταση εστίασης F_d. Ορίζεται ως διάστημα ευκρίνειας μετά και πριν την απόσταση εστίασης, S_{da}(Sharpness distance after) και S_{db}(before):

$$S_{da} = D_f - F_d \quad \kappa\alpha\iota \quad S_{db} = F_d - D_n \tag{E4-6}$$

Το ζητούμενο για το πρόβλημα της ευκρινούς φωτογράφισης είναι ο προσδιορισμός της τιμής του διαφράγματος F_n για δεδομένη απόσταση εστίασης F_d και διάστημα ευκρίνειας S_{da}. Το διάφραγμα αυτό δίδεται από τη σχέση:

$$N = \frac{f^2}{c(H_f - f)} \ , \qquad \acute{o}\pi o\upsilon \ H_f = \frac{F_d\left(D_f - f\right)}{D_f - F_d} \tag{E4-7}$$

4.1.3 Ικανή απόσταση αναγνώρισης

Η μέγιστη ικανή απόσταση αναγνώρισης barcode V_{rd} (valid resolution distance) εξαρτάται από την ανάλυση του αισθητήρα της κάμερας $CCDP_w$, την οριζόντια οπτική γωνία α_w και την ελάχιστη ικανή ανάλυση αποτυπωμένου barcode PPI. Η απόσταση V_{rd} δίδεται από τη σχέση:

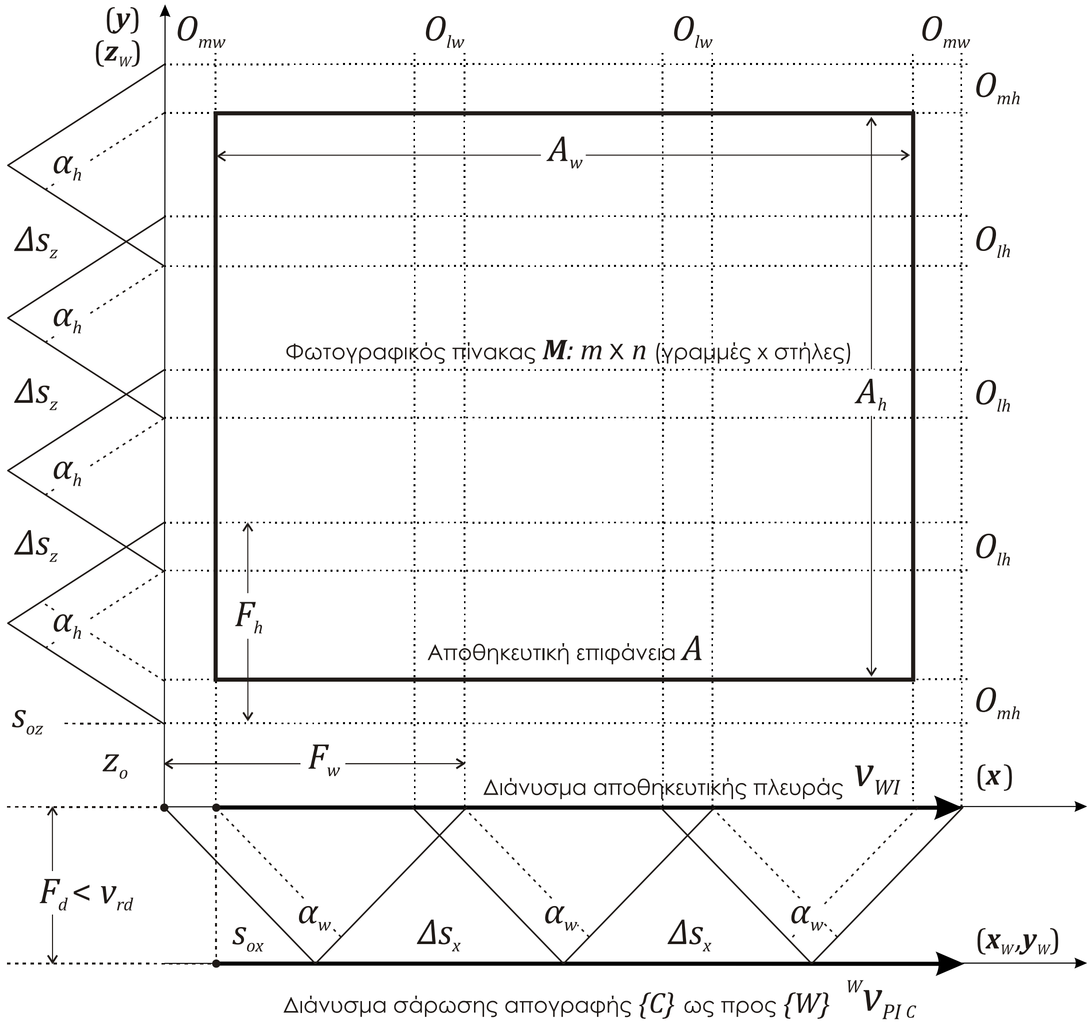
$$V_{rd} = \frac{25.4\ CCDP_w}{2\ tan\left(\frac{\alpha_w}{2}\right) PPI} \tag{E4-8}$$

4.2 Αποτύπωση αποθηκευτικής επιφάνειας

4.2.1 Πίνακας φωτογραφικών λήψεων

Κάθε κατακόρυφη επίπεδη επιφάνεια A πίσω από τα όρια της οποίας αποθηκεύονται υλικά (προϊόντα) χωρίζεται σε ένα δισδιάστατο πίνακα $\boldsymbol{M}$ φωτογραφικών λήψεων με ένα μήκος επικάλυψης O_l και μήκος περιθωρίου O_m. Ορίζονται ως διαστάσεις barcode τα B_w, B_h και μήκος επικάλυψης[7] $O_l \ > \mathrm{b}\max(B_w, B_h)$ όπου $b > 1$ ο συντελεστής ασφαλείας επικάλυψης. Ο φωτογραφικός πίνακας $\boldsymbol{M}$ έχει διαστάσεις $m \times n$. Κάθε διάσταση του $\boldsymbol{M}$ εξαρτάται από τις διαστάσεις της επιφάνειας A, τις διαστάσεις του κάδρου, το μήκος επικάλυψης O_l και το μήκος περιθωρίου O_m.

[7] Μερική επικάλυψη O_l εκ του overlap.



Εικόνα 4.2 Σχηματική απεικόνιση της μορφής του πίνακα φωτογραφικών λήψεων.

Έστω διεύθυνση $\boldsymbol{k}$ που εκφράζει μία από τις δύο διευθύνσεις κατακόρυφα (h) ή οριζόντια (w) και K το ζητούμενο πλήθος των κάδρων στη διεύθυνση $\boldsymbol{k}$. Η μοντελοποίηση του πίνακα φωτογραφικής λήψης $\boldsymbol{M}$ σε κάθε διεύθυνση $\boldsymbol{k}$ εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$A_k + 2O_{mk} = (K-1)(F_k - O_{lk}) + F_k \ , \qquad \text{(E4-9)}$$

όπου A_k το μήκος της επιφάνειας κατά τη διεύθυνση $\boldsymbol{k}$, F_k το μήκος του κάδρου και O_{mk} το μήκος του περιθωρίου περιμετρικά της επιφάνειας A.

Για τον υπολογισμό του πλήθους των κάδρων k θεωρείται ως τιμή έναρξης της επικάλυψης $O_{lk}{}' = O_{lk}$ και το K δίδεται από τη σχέση:

$$K' = \frac{A_k + 2O_{mk} - F_k}{F_k - O_{lk}{}'} \ , \varepsilon\alpha\nu\ K\ \delta\varepsilon\kappa\alpha\delta\iota\kappa\acute{o}\varsigma\ \tau\acute{o}\tau\varepsilon$$
$$K \longleftarrow int(k) + 1, \alpha\lambda\lambda\iota\acute{\omega}\varsigma\ K = K' \qquad \text{(E4-10)}$$

ενώ η νέα τιμή της επικάλυψης O_l θα είναι ίση με:

$$O_{lk} = F_k - \frac{A_k + 2O_{mk} - F_k}{K-1} \qquad \text{(E4-11)}$$

Τέλος η τμηματική μετατόπιση Δs της κάμερας μετά από τη λήψη κάθε κάδρου στη διεύθυνση $\boldsymbol{k}$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta s_k = F_k - O_{lk} \ , \tag{E4-12}$$

ενώ η μετατόπιση S_o του πίνακα φωτογράφισης από την αρχή του διανύσματος σάρωσης ισούται με:

$$S_{ox} = {}^{F_w}/_2 - O_{mx} \ , \tag{E4-13}$$

και κατά ύψος στον άξονα $\boldsymbol{z}_W$ ισούται με:

$$S_{oy} = {}^{F_h}/_2 + z_o \tag{E4-14}$$

4.2.2 Ψηφιακή φωτογραφική κάμερα (A6:1)

Η κάμερα που έχει επιλεχθεί είναι η Canon EOS 500D [24] η οποία κατηγοριοποιείται στις ερασιτεχνικές φωτογραφικές μηχανές υψηλής αξιοπιστίας αφού ο κύκλος ζωής της εκτιμάται τουλάχιστον σε $200{,}000$ λήψεις [25]. Ο έλεγχος της κάμερας γίνεται μέσω σύνδεσης USB με την χρήση του Canon EOS Digital SDK (EDSDK). Κάθε λειτουργία της κάμερας μπορεί να πραγματοποιηθεί απομακρυσμένα (remotely) μέσω του λογισμικού του INVSCAN. Η επικοινωνία με την κάμερα γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου PTP (Picture Transfer Protocol) ενώ το λογισμικό του INVSCAN χρησιμοποιεί τις βιβλιοθήκες του EDSDK για τον έλεγχο της κάμερας.

Σημειώνεται ότι για την αποφυγή της οπτικής παραμόρφωσης επιλέγεται φακός εστιακής απόστασης μεγαλύτερης από $f = 21{,}8\ \mathrm{mm}$. Στο χαμηλότερο αυτό όριο αντιστοιχεί ο προτεινόμενος normal wide φακός με τον οποίο μειώνεται ο χρόνος απογραφής (σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο κανονικό φακό – προς τηλεφακό) διότι μεγαλώνει το οπτικό πεδίο, που συνεπάγεται λιγότερες λήψεις για την ίδια αποθηκευτική επιφάνεια. Για τον έλεγχο των συνθηκών φωτισμού γίνεται χρήση εξωτερικού flash (A6:2) που προσαρμόζεται επί της κάμερας. Σημαντική παράμετρος για την ομοιόμορφη κατανομή του φωτός στην προσπίπτουσα επιφάνεια είναι η χρήση διαχύτη. Η ένταση του flash ρυθμίζεται από το SDK σύμφωνα με κάποια κριτήρια. Τέλος ένα ζήτημα που σχετίζεται με την εστιακή απόσταση και την επιλογή φακού είναι η προοπτική. Όσο πιο ευρυγώνιος είναι ο φακός (αύξηση της προοπτικής) τόσο πιο πιθανές είναι οι «επισκιάσεις» των υλικών που βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη.

Πίνακας 4.2 Μερικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της EOS 500D 18-55mm IS Kit

Μεγέθος	Τιμή
Διαστάσεις του αισθητήρα της κάμερας	$CCD_w = 22.3\ \mathrm{mm}, CCD_h = 14.9\ \mathrm{mm}$
Ανάλυση του αισθητήρα της κάμερας	$CCDP_w = 4752\ \mathrm{pixels}, CCDP_h = 3168\ \mathrm{pixels}$
Εστιακή απόσταση φακού	$f = 18 - 55\ \mathrm{mm}$ (προτεινόμενη normal wide: 21,8 mm)
Κύκλος σύγχυσης	$c = 0.019\ \mathrm{mm}$

4.3 Μέθοδος αναγνώρισης υλικών που φέρουν barcode (A6)

4.3.1 Γενικά

Σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση της λειτουργίας ενός συστήματος αναγνώρισης barcode που έχει την δυνατότητα σύνθεσης διαδοχικών φωτογραφιών. Αναλύεται συνοπτικά επίσης και η μέθοδος του αλγορίθμου αναγνώρισης barcode. Οι εικόνες που συνοδεύεται το υποκεφάλαιο αυτό, προέκυψαν από ένα εξειδικευμένο λογισμικό «BCReader», στο οποίο πραγματοποιήθηκε ρύθμιση των παραμέτρων για τους σκοπούς της μελέτης. Προηγήθηκε φωτογράφιση μιας «αποθηκευτικής επιφάνειας A» για την δημιουργία του πίνακα $\boldsymbol{M}$ διαστάσεων 3×2 σε αποθήκη παπουτσιών, έτσι ώστε το περιβάλλον και τα υλικά να αντιστοιχούν στις προδιαγραφές του συστήματος INVSCAN. Σε ενδεχόμενη υλοποίηση του INVSCAN θα γινόταν ενσωμάτωση και προσαρμογή του πηγαίου κώδικα του λογισμικού αυτού στις ιδιαίτερες συνθήκες. Η όλη διαδικασία της φωτογραφικής απογραφής περιλαμβάνει τα ακόλουθα κύρια βήματα.

Επεξεργασία φωτογραφίας

Υλοποίηση στον κεντρικό Η/Υ (S1: Server Control Unit) μετά από την λήψη της φωτογραφίας.

Βήμα 1. Εντοπισμός πιθανών θέσεων barcode επί κάθε φωτογραφίας, με προσεγγιστική μέθοδο μεγάλης ταχύτητας.

Βήμα 2. Για κάθε τέτοια θέση γίνεται αναγνωρίση του barcode ή απόρριψη της θέσης αν δεν διαβαστεί έγκυρο barcode.

Βήμα 3. Σχηματισμός λίστας υλικών για κάθε φωτογραφία που περιλαμβάνει τη θέση (σε pixel) του κέντρου του barcode, τον προσανατολισμό (σε rad) στο επίπεδο της φωτογραφίας, και τον κωδικό αριθμό του barcode.

Βήμα 4. Αποθήκευση της λίστας υλικών για περαιτέρω επεξεργασία.

Σύνθεση φωτογραφιών

Υλοποίηση στον κεντρικό Η/Υ (Server Control Unit) μετά από την ολοκλήρωση του πίνακα φωτογραφικών λήψεων $\boldsymbol{M}$.

Βήμα 1. Μετασχηματισμός της θέσης των barcode κάθε φωτογραφίας στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε αποθηκευτικής επιφάνειας A (στο διάνυσμα απογραφής $\in \mathcal{V}_{WI}$) (E4-15) βάση των συντεταγμένων της κάμερας κατά τη λήψη της φωτογραφίας και τις συνθήκες φωτογράφισης (διαστάσεις κάδρου κτλ).

Βήμα 2. Δημιουργία λίστας υλικών για κάθε αποθηκευτική επιφάνεια A με σύνθεση των στοιχείων που υπολογίστηκαν σε κάθε φωτογραφία.

Βήμα 3. Διαγραφή των υλικών που περιλαμβάνονται στην λίστα περισσότερο από μία φορά με την ίδια περίπου θέση (μικρότερη από μία ακρίβεια) και με τον ίδιο κωδικό αριθμό.

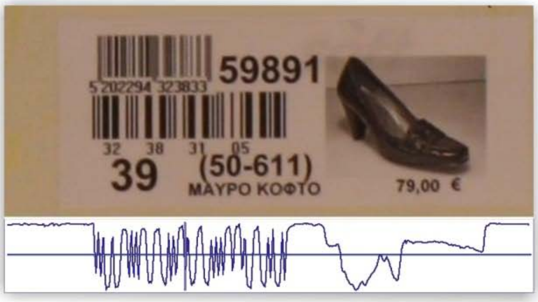
Βήμα 4. Δημιουργία συνολικής λίστας (τοπική βάση δεδομένων) και ταξινόμηση των υλικών στη λίστα αυτή βάσει προκαθορισμένων κριτηρίων (Πίνακας 4.3).

Βήμα 5. Ενημέρωση μέσω γέφυρας (bridge application) της βάσης δεδομένων του συστήματος ERP του οργανισμού όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα απογραφής.

4.3.2 Εντοπισμός θέσης barcode

Για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό των θέσεων στην φωτογραφία στις οποίες πιθανόν υπάρχουν barcode, γίνεται σάρωση της φωτογραφίας κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση με βήμα (σε pixel) που να εγγυάται ότι τουλάχιστον 3-σαρώσεις θα τέμνουν κάθε barcode κατά το ύψος του. Η τεχνική εντοπισμού βασίζεται στις έντονες μεταβολές της χρωματικής αντίθεσης στις περιοχές των barcode. Για το σκοπό αυτό η φωτογραφία διαιρείται σε ορθογώνια τμήματα διαστάσεων (σε pixel) $\Delta X, \Delta Y$ και για κάθε τέτοιο τμήμα υπολογίζεται μία «πυκνότητα» ανάλογα με τη μεταβολή της χρωματικής αντίθεσης. Η διαδικασία παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.3 με επιλογή της αντίθεσης του κόκκινου χρώματος.

(α) Αρχική φωτογραφία (Τμήμα)



(β) Μεταβολή της αντίθεσης στη θέση Y=82 pixel στη περιοχή A

(γ) Θέσεις υψηλής πυκνότητας

(β) Πιθανές θέσεις barcode

Εικόνα 4.3 Απεικόνιση της διαδικασίας του εντοπισμού της θέσης των barcode που περιέχονται σε ένα κάδρο.

4.3.3 Αναγνώριση barcode

Κάθε περιοχή της φωτογραφίας που εντοπίστηκε σαν πιθανή θέση barcode, απομονώνεται για να αναγνωριστεί το barcode. Σε περίπτωση που δεν προκύψει έγκυρος κωδικός αριθμός (string) τότε η θέση αυτή διαγράφεται από τη λίστα των πιθανών θέσεων. Η τεχνική αναγνώρισης βασίζεται και σε αυτή την περίπτωση στην χρωματική αντίθεση. Η διαδικασία περιλαμβάνει σάρωση ανά pixel της περιοχής οριζόντια ή/και κατακόρυφα ή/και σε γωνίες $\pm 10^{\circ}$ από την οριζόντια ή την κατακόρυφη διεύθυνση για να αναγνωριστούν τα barcode που δεν είναι τοποθετημένα ακριβώς στην οριζόντια ή στην κατακόρυφη διεύθυνση. Για την μείωση του υπολογιστικού χρόνου η κατακόρυφη και η υπό γωνία σαρώσεις πραγματοποιούνται μόνο αν κατά την προηγούμενη διεύθυνση σάρωσης δεν προέκυψε κωδικός αριθμός barcode. Βάση της χρωματικής αντίθεσης δημιουργείται η δυαδική μορφή του barcode, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4 και αν από αυτή προκύπτει εγγυημένος αριθμός σύμφωνα με τα πρότυπα (πχ. ISO 16390 για Interleaved 2 of 5, ISO 15420 για EAN/UPC, ISO 16388 για Code 39 κτλ), τότε τα στοιχεία του barcode καταγράφονται μαζί με τη θέση και τον προσανατολισμό αυτού.

Εικόνα 4.4 Απεικόνιση της διαδικασίας αναγνώρισης barcode αφού έχει προηγηθεί ο εντοπισμός της θέσεως αυτού.

4.3.4 Σύνθεση φωτογραφιών

Για κάθε φωτογραφικό κάδρο ανάλογα με τις συνθήκες φωτογράφησης (πχ. απόσταση εστίασης F_d κτλ.) υπολογίζεται η κλίμακα (σε $\mathrm{m/pixel}$) και μετατρέπονται οι συντεταγμένες θέσης του κέντρου κάθε barcode από το «επίπεδο» της φωτογραφίας (σε pixel) στο «επίπεδο» της αποθηκευτικής επιφάνειας A (σε m) με αρχή συντεταγμένων τη θέση της κάμερας. Οι κοινές θέσεις που εμφανίζονται σε περισσότερες από μία φωτογραφίες διαγράφονται και διατηρείται μόνο μία, όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.3.1. Στη συνέχεια μετασχηματίζονται οι συντεταγμένες αυτές στο σύστημα αναφοράς της αποθήκης σύμφωνα με τις χωρικές περιγραφές που έχουν οριστεί στο κεφ. 2.4. Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται μία τέτοια εικόνα από τη σύνθεση 6 διαδοχικών φωτογραφιών (3 – κατά ύψος και 2 – κατά μήκος των ραφιών) με ορατές τις περιοχές επικάλυψης μήκους O_l διαφορετικού μήκους για κάθε διεύθυνση (κεφ. 4.2.1). Τα σταυρονήματα δείχνουν το κέντρο κάθε φωτογραφίας. Στον πίνακα ενδεικτικά αποτελέσματα από τη σύνθεση αυτή (Πίνακας 4.3).

$PPI \cong 100$
$m = 3$
$n = 2$
$f = 25\text{ mm}$
$S = \frac{1}{4}\text{sec}$
$N = 12.9$
$ISO = 100$
$A_w \cong 2033\text{ mm}$
$A_h \cong 2140\text{ mm}$
$F_w \cong 1123\text{ mm}$
$F_h \cong 794\text{ mm}$
$O_m \cong 60\text{ mm}$
$O_{lw} \cong 223\text{ mm}$
$O_{lh} \cong 121\text{ mm}$
$F_d \cong 1258\text{ mm}$
$\alpha_w \cong 48^\circ$
$\alpha_h \cong 37^\circ$
$CAM: Canon\ 450D$
$CCDPw = 4272\text{ pixel}$
$CCDPh = 2848\text{ pixel}$

Εικόνα 4.5 Απεικόνιση της σύνθεσης 6 διαδοχικών φωτογραφιών (3 – κατά ύψος και 2 – κατά μήκος των ραφιών) με ορατές τις περιοχές επικάλυψης (πορτοκαλί) και τις περιοχές περιθωρίου (πράσινο).

Πίνακας 4.3 Άποψη μέρους της λίστας υλικών της αναγνώρισης του πίνακα φωτογράφισης στην (Εικόνα 4.5), ενώ η θέση των υλικών είναι ως προς το κέντρο της αποθηκευτικής επιφάνειας A.

Κωδικός αριθμός	Θέση X (mm)	Θέση Y (mm)	Ποσοστό αναγνώρισης (%)	Μήκος barcode σε pixel
32346105	−808	−249	56.8	161
32346107	−795	795	78.4	158
32346105	−811	−437	29.7	161
32346105	−811	40	27.0	162
32346105	−814	−902	16.2	162
32346105	−822	227	64.9	160
32346107	−785	698	29.7	161
32346105	−814	−531	27.0	162

4.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκε η μέθοδος φωτογράφισης και αναγνώρισης των barcodes. Επίσης προσδιορίστηκε η μέγιστη ικανή απόσταση αναγνώρισης V_{rd} ή οποία είναι απαραίτητη για την δρομολόγηση του οχήματος που μελετάται στο επόμενο κεφάλαιο.

5 Δρομολόγηση οχήματος (Path planning)

5.1 Αποθήκη (W)

Η αποθήκη (W) αποτελεί τον φυσικό χώρο κίνησης του ρομποτικού οχήματος AGV Scanner (A) στην οποία το καταγραφικό όχημα πραγματοποιεί τις ζητούμενες εντολές απογραφής. Η μονάδα ελέγχου του AGV Scanner πρέπει να γνωρίζει τις τροχιές που χρειάζεται να διανύσει ώστε να σαρώσει τις επιθυμητές επιφάνειες, καθώς και τον χάρτη δυνατών μεταβάσεων προς αυτές.

Γεωμετρικό γράφημα

Η δρομολόγηση του οχήματος στηρίζεται στη μοντελοποίηση της διαδικασίας με γραφήματα που οι κόμβοι τους αναπαριστούν σημεία στο χώρο και τα τόξα τους διανύσματα που ορίζονται από τους κόμβους. Ορίζεται ως γεωμετρικό γράφημα $\mathcal{G}_k = (\mathcal{N}_k, \mathcal{V}_k)$ το υπερσύνολο του διατεταγμένου γραφήματος [26], όπου $\mathcal{N}_k$ είναι το σύνολο των γεωμετρικών κόμβων στο σύστημα αναφοράς $\{W\}$ της αποθήκης (W) και $\mathcal{V}_k$ το σύνολο των γεωμετρικών διανυσμάτων $\boldsymbol{v}_{ij}$ που ορίζουν οι κόμβοι $\boldsymbol{n}_i^v, \boldsymbol{n}_j^v \in \mathcal{N}_k$ για $\forall\, i = 1, \dots, N_k$ και $j = 1, \dots, N_k$ για τις εφικτές μεταβάσεις στο $\mathcal{G}_k$. Ο όρος τόξο στην προκειμένη ταυτίζεται με τον όρο διάνυσμα εμπεριέχοντας την προαναφερόμενη γεωμετρική απεικόνιση. Σημειώνεται ότι στο γράφημα εμπεριέχεται η πληροφορία των μεταβάσεων $\boldsymbol{v}_{ij}$ στη μορφή ενός δυαδικού πίνακα δύο διαστάσεων $\boldsymbol{A}(\mathcal{V}_k)$ όπου $\boldsymbol{A}[i][j] = 1$ αν $\boldsymbol{v}_{ij}$ εφικτή μετάβαση αλλιώς $\boldsymbol{A}[i][j] = 0$ για $\forall\, i, j$.

5.1.1 Κάτοψη αποθήκης (W1)

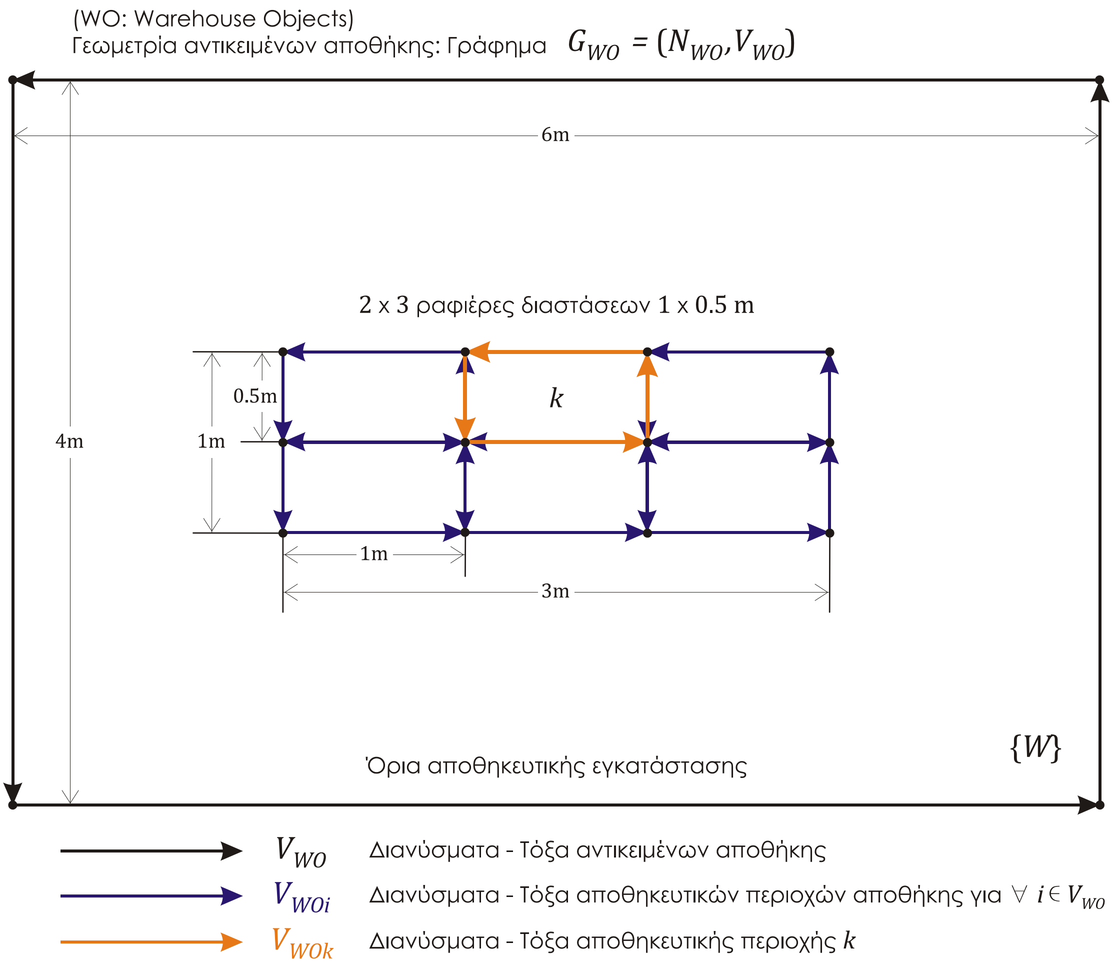
Η αποθήκη θεωρείται ότι έχει δεδομένη γεωμετρία η οποία εισάγεται στο σύστημα από τον διαχειριστή μέσω της διαδικασίας Αρχικοποίησης αποθήκης.

Γεωμετρία Αντικειμένων αποθήκης

$$\mathcal{G}_{WO} = (\mathcal{N}_{WO}, \mathcal{V}_{WO})\ , (WO\!: Warehouse\ Objects) \qquad \text{(E5-1)}$$

Η Κάτοψη της αποθήκης μοντελοποιείται σε κλειστές περιοχές όπου αναπαριστάται οποιοδήποτε αντικείμενο (τοίχοι, έπιπλα, μηχανές κτλ.) αποτελεί προβλεπόμενο εμπόδιο για την μετακίνηση του AGV Scanner. Έστω τα διανύσματα $\mathcal{V}_{WOi} \subseteq \mathcal{V}_{WO}$ που ορίζουν την αποθηκευτική περιοχή[8] i και περιλαμβάνονται σε ένα γράφημα $\mathcal{G}_{WO} = (\mathcal{N}_{WO}, \mathcal{V}_{WO})$ όπου N_{WO} οι κόμβοι του γραφήματος. Η φορά των $\mathcal{V}_{WOi}$ διανυσμάτων σχηματίζει αριστερόστροφο κλειστό κύκλωμα (Εικόνα 5.1) ώστε η κάμερα του οχήματος να έχει οπτική επαφή με τις πλευρές των αποθηκευτικών περιοχών.

[8] Μία ραφιέρα για παράδειγμα μοντελοποιείται με τέσσερα διανύσματα που τα βέλη τους σχηματίζουν στο επίπεδο ένα αριστερόστροφο ορθογώνιο.



Εικόνα 5.1 Αναπαράσταση της αποθηκευτικής διάταξης με γεωμετρικά γραφήματα (διανυσματικά).

Γράφημα Απογραφής αποθήκης

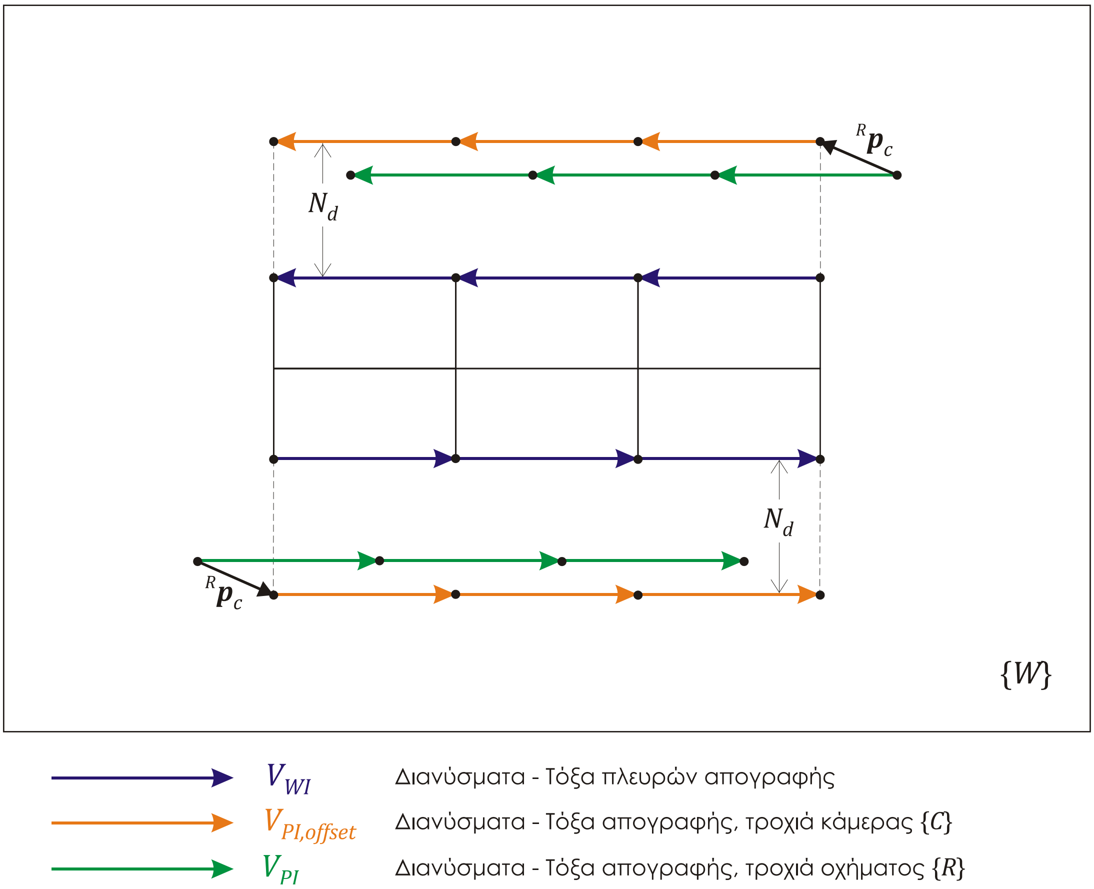
$$\mathcal{G}_{WI} = (\mathcal{N}_{WI}, \mathcal{V}_{WI}) \subseteq \mathcal{G}_{WO}\ , (WI\!: Warehouse\ Inventory) \quad \text{(E5-2)}$$

Οι πλευρές των αποθηκευτικών περιοχών που προβλέπονται προς απογραφή αντιστοιχούν σε ένα γράφημα $\mathcal{G}_{WI} = (\mathcal{N}_{WI}, \mathcal{V}_{WI})$ όπου $\mathcal{V}_{WI}$ είναι τα διανύσματα απογραφής της κάθε αποθηκευτικής πλευράς (Εικόνα 5.1), ενώ ορίζεται κατώτατο και ανώτατο ύψος σάρωσης h_{ij}^{L} και h_{ij}^{H} αντίστοιχα.

Γράφημα δικτύου απογραφής

$$\mathcal{G}_{PI} = (\mathcal{N}_{PI}, \mathcal{V}_{PI})\ , (PI\!: Paths\ Inventory) \quad \text{(E5-3)}$$

Τα διανύσματα $\mathcal{V}_{PI}$ που πρέπει να ακολουθήσει το AGV Scanner ώστε να φωτογραφίσει τις πλευρές των περιοχών αποθήκευσης ορίζονται στο γράφημα $\mathcal{G}_{PI} = (\mathcal{N}_{PI}, \mathcal{V}_{PI})$, όπου $\mathcal{V}_{PI}$ είναι τα διανύσματα απογραφής της κάθε αποθηκευτικής πλευράς, με κατώτατο και ανώτατο ύψος σάρωσης h_{ij}^{L} και h_{ij}^{H} αντίστοιχα. Ο υπολογισμός των $\mathcal{V}_{PI}$ στηρίζεται σε σχέσεις οι οποίες σχετίζονται με την θεωρία φωτογραμμετρίας και με τη μέθοδο αναγνώρισης barcode (κεφ. 4).



Εικόνα 5.2 Σχηματική απεικόνιση των διανυσμάτων απογραφής και των σχετικών περιορισμών.

Για κάθε διάνυσμα $\boldsymbol{v}_{ij} \in V_{WI}$ υπολογίζεται το δεξιό ως προς το $\boldsymbol{v}_{ij}$ offset διάνυσμα $\boldsymbol{u}_{ij} \in \mathcal{V}_{PI}$ με μέτρο $|\boldsymbol{u}_{ij}| = |\boldsymbol{v}_{ij}|$ σε διεύθυνση ίση με το $\boldsymbol{v}_{ij}$ και με διάνυσμα θέσης $\boldsymbol{n}_i^{\boldsymbol{u}} \in \mathcal{N}_{PI}$ (Εικόνα 5.2). Η κάθετη απόσταση μεταξύ των $\boldsymbol{u}_{ij}$ και $\boldsymbol{v}_{ij}$ είναι N_d. Το διάνυσμα $\boldsymbol{u}_{ij}$ μετασχηματίζεται (κεφ. 2.4) από το ${}^{W}\boldsymbol{u}_{ij_C}$ στο ${}^{W}\boldsymbol{u}_{ij_R}$ ώστε να εκφράζει την τροχιά του οχήματος $\{R\}$ αντί της τροχιάς της κάμερας $\{C\}$. Το σύστημα αναφοράς της κάμερας $\{C\}$ θεωρείται στην αρχή του $\boldsymbol{u}_{ij}$ με το $\boldsymbol{x}_c$ κάθετο στο $\boldsymbol{u}_{ij}$, το $\boldsymbol{y}_c$ σε αντίθετη διεύθυνση με το $\boldsymbol{u}_{ij}$, και το $\boldsymbol{z}_c$ εγκάρσια στο επίπεδο της αποθήκης προς τα επάνω. Εάν κάποια από τα διανύσματα $\boldsymbol{u}_{ij}$ τέμνονται μεταξύ τους τότε τα προεξέχοντα τμήματα ψαλιδίζονται. Η τομή οφείλεται στη σχετικά μεγάλη γωνία και τη μικρή απόσταση μεταξύ των μητρικών διανυσμάτων απογραφής $\boldsymbol{v}_{ij}$.

Η κάθετη απόσταση φωτογράφισης N_d πρέπει να είναι σύμφωνη με τους ακόλουθους περιορισμούς:

- Ικανή για την αναγνώριση του barcode (E4-8): $N_d < V_{rd}$
- Αποδεκτής ευκρίνειας (E4-3): $D_n < N_d < D_f$
- Επιτρεπτής διέλευσης του οχήματος: Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της περιμέτρου του χώρου εργασίας του AGV Scanner όταν διανύονται τα $\mathcal{V}_{PI}$ και της περιμέτρου των κλειστών περιοχών των αντικειμένων $\mathcal{V}_{WO}$ να είναι μεγαλύτερη από μία απόσταση ασφαλείας S_d.

5.1.2 Δρομολόγηση οχήματος

Η κάτοψη της αποθήκης θεωρείται χρονικά μη μεταβαλλόμενη ενώ η μόνη προβλεπόμενη περίπτωση μεταβολής της είναι μέσω της επεξεργασίας αποθήκης από τον διαχειριστή. Το πρόβλημα επομένως του προσδιορισμού του γραφήματος των δυνατών καταστάσεων μετάβασης θεωρείται στατικό και ο υπολογισμός του στηρίζεται στην έμμεση σύνδεση (μερικό γράφημα) όλων των διανυσμάτων απογραφής $\mathcal{V}_{PI} \in \mathcal{G}_{PI}$.

Γράφημα Δικτύου δρομολόγησης

$$\mathcal{G}_{PP} = (\mathcal{N}_{PP}, \mathcal{V}_{PP}) \supseteq \mathcal{G}_{PI}\,, (PP{:}\, Path\, Planning) \qquad \text{(E5-4)}$$

Ορίζεται το γράφημα των διανυσμάτων δικτύου δρομολόγησης $\mathcal{G}_{PP} = (\mathcal{N}_{PP}, \mathcal{V}_{PP})$, όπου $\mathcal{N}_{PP}$ οι κόμβοι των διανυσμάτων $\mathcal{V}_{PP}$. Το γράφημα $\mathcal{G}_{PP}$ προκύπτει από την τοπική ένωση με εφικτές τροχιές $\mathcal{G}_{PF} = (\mathcal{N}_{PF}, \mathcal{V}_{PF})$ μεταξύ των διανυσμάτων σάρωσης $\mathcal{V}_{PI}$ και περιλαμβάνει:

- Τα αμφίδρομα διανύσματα $\mathcal{V}_{PF}$ και τους κόμβους $\mathcal{N}_{PF}$ των εφικτών τροχιών.
- Τα αμφίδρομα διανύσματα $\mathcal{V}_{PI}$ και τους κόμβους $\mathcal{N}_{PI}$ των διανυσμάτων απογραφής.

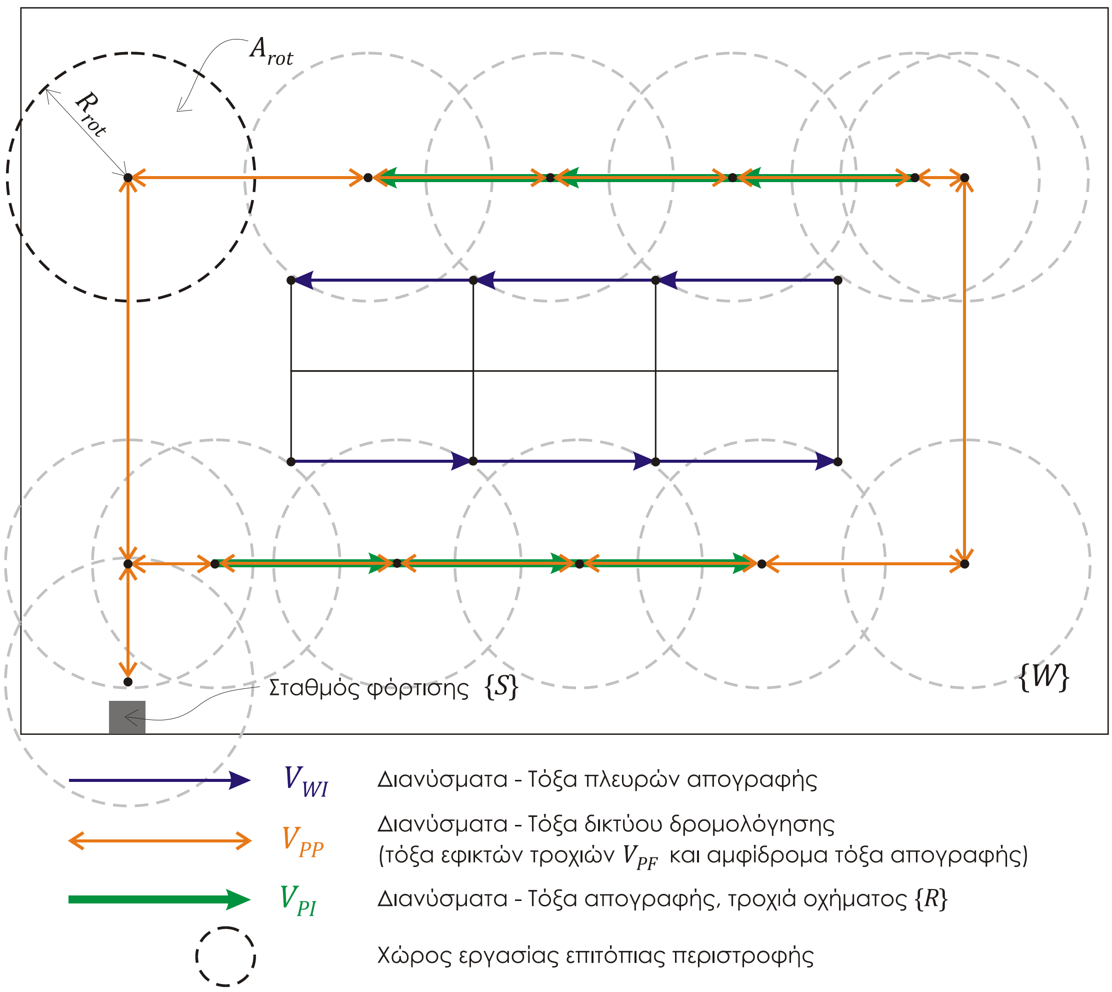
Για τα μονόδρομα διανύσματα $\mathcal{V}_{PI} \subseteq \mathcal{V}_{PP}$ ορίζεται το κατώτατο και ανώτατο ύψος σάρωσης h_{ij}^{L} και h_{ij}^{H} αντίστοιχα.

Γράφημα Εφικτών τροχιών

$$\mathcal{G}_{PF} = (\mathcal{N}_{PF}, \mathcal{V}_{PF})\,, (PF{:}\, Path\, Feasible) \qquad \text{(E5-5)}$$

Η πιο απλή περίπτωση δημιουργίας των εφικτών τροχιών είναι η σχεδίαση τους από τον διαχειριστή του συστήματος. Η διαδικασία της σχεδίασης έγκειται στην ένωση των διανυσμάτων απογραφής $\mathcal{V}_{PI}$ που απεικονίζονται στην οθόνη του σχεδιαστικού περιβάλλοντος μαζί με την κάτοψη της αποθήκης. Ο διαχειριστής σχεδιάζει τοπικά και σε κεντρικές αρτηρίες όσα αμφίδρομα τόξα (διανύσματα) εκτιμάει ότι απαιτούνται για την έμμεση σύνδεση όλων των αρχικών και τελικών κόμβων των διανυσμάτων $\mathcal{V}_{PI}$.

Για λόγους απλοποίησης θεωρείται ότι το όχημα αλλάζει κατεύθυνση περιστρεφόμενο γύρω από το σημείο αναφοράς του O_R (E2-3) με επιτόπια στροφή αποκλειστικά στους κόμβους $\mathcal{N}_{PP}$. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της περιμέτρου του χώρου εργασίας του AGV Scanner, όταν διανύονται τα διανύσματα $\boldsymbol{v}_{ij} \in \mathcal{V}_{PP}$ των τροχιών του δικτύου δρομολόγησης και της απόστασης της περιμέτρου των κλειστών περιοχών των αντικειμένων $\mathcal{V}_{WO}$, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μία απόσταση ασφαλείας S_d (Εικόνα 5.4). Ο χώρος εργασίας στην γραμμική κίνηση ορίζεται από ένα ορθογώνιο μήκους $|\boldsymbol{v}_{ij}|$ και πλάτους T_p, όπου T_p το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος που ορίζει η περίμετρος του οχήματος στο $\boldsymbol{y}_R$. Προβλέπεται επίσης η απαραίτητη επιφάνεια A_{rot} επιτόπιας στροφής (rotation) για κάθε κόμβο που επιθυμείται αλλαγή διεύθυνσης. Η επιφάνεια αυτή ορίζεται από κυκλικό τομέα με κέντρο $\boldsymbol{n}_i \in \mathcal{N}_{PP}$ και ακτίνα $R_{rot} = L_p + S_d$, όπου L_p το μήκος στο $\boldsymbol{x}_R$ από το O_R μέχρι την περίμετρο του οχήματος και S_d μία απόσταση ασφαλείας (Εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.3 Σχηματική απεικόνιση των γραφημάτων σχετικών με το δίκτυο απογραφής.

Γράφημα Καταστάσεων δρομολόγησης

$$\mathcal{G}_{PPS} = (\mathcal{V}_{PPS}, \mathcal{A}_{PPS})\,, (PPS\!: Path\ Planning\ States) \quad \text{(E5-6)}$$

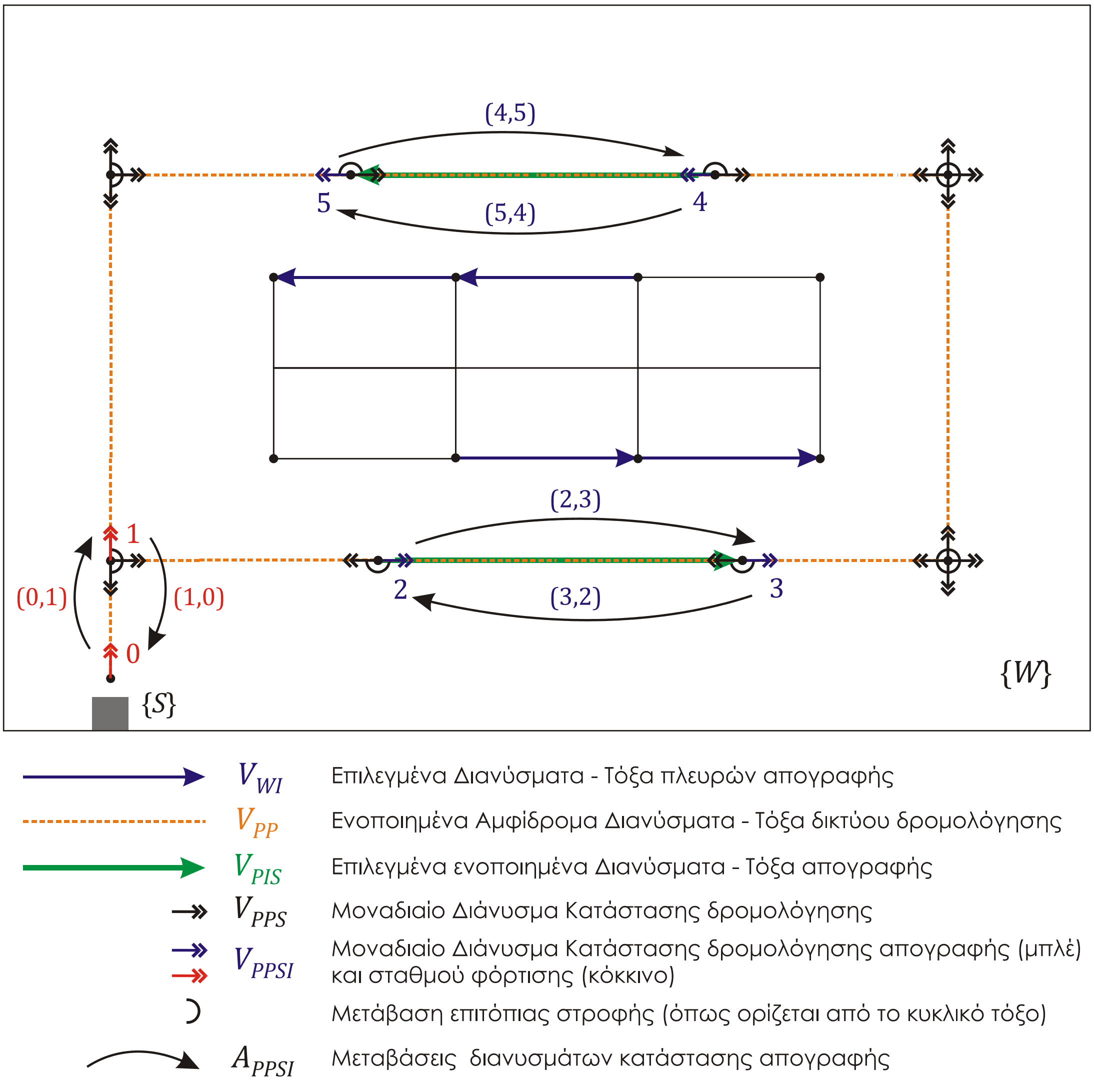
Ορίζεται το γράφημα των καταστάσεων δρομολόγησης $\mathcal{G}_{PPS} = (\mathcal{V}_{PPS}, \mathcal{A}_{PPS})$, όπου $\mathcal{N}_{PP}$ οι αρχικοί κόμβοι των διανυσμάτων $\mathcal{V}_{PPS}$ και $\mathcal{A}_{PPS}$ τα τόξα των εφικτών μεταβάσεων μεταξύ των διανυσμάτων κατάστασης του $\mathcal{V}_{PPS}$. Για κάθε κόμβο $\boldsymbol{n}_i \in \mathcal{N}_{PP}$ με $i \in \mathcal{N}_{PP}$ ορίζονται τα μοναδιαία διανύσματα κατάστασης $\boldsymbol{v}_{i,ij}$ και $\boldsymbol{v}_{i,ji}$ με διάνυσμα θέσης – αρχικό κόμβο $\boldsymbol{n}_i^v$ για $\forall (i,j) \in \mathcal{V}_{PP}$ (Εικόνα 5.4). Για οποιαδήποτε διανύσματα $\boldsymbol{u}_{ij_1,}\boldsymbol{u}_{ij_2} \in \mathcal{V}_{PP}, j_1 \neq j_2$ που έχουν την ίδια διεύθυνση $\left|\frac{\boldsymbol{u}_{ij_1}}{|\boldsymbol{u}_{ij_1}|}\right| = \left|\frac{\boldsymbol{u}_{ij_2}}{|\boldsymbol{u}_{ij_2}|}\right|$ τότε τα αντίστοιχα διανύσματα κατάστασης στο $\mathcal{V}_{PPS}$ αλληλεπικαλύπτονται με $\boldsymbol{v}_{i,ij_1} \equiv \boldsymbol{v}_{i,j_2 i}$ και $\boldsymbol{v}_{i,ij_2} \equiv \boldsymbol{v}_{i,j_1 i}$ ενώ τελικώς από αυτά περιέχονται στο $\mathcal{V}_{PPS}$ μόνο τα $\boldsymbol{v}_{i,ij_1}$ και $\boldsymbol{v}_{i,ij_2}$.

Ορίζονται δύο κατηγορίες τόξων μετάβασης στο σύνολο $\mathcal{A}_{PPS}$:

- <u>Μετάβαση επιτόπιας στροφής</u>: Για κάθε διάνυσμα κατάστασης $\boldsymbol{v}_{i,ij}$ και $\boldsymbol{v}_{i,ji} \in \mathcal{V}_{PPS}$ ορίζονται οι μεταβάσεις περιστροφής $a_{(i,ij),(i,ij_n),k}$ και $a_{(i,ji),(i,j_n i),k} \in \mathcal{A}_{PPS}$ αντίστοιχά, στα διανύσματα κατάστασης $\boldsymbol{v}_{i,ij_n}$ και $\boldsymbol{v}_{i,j_n i} \in \mathcal{V}_{PPS}$ αντίστοιχα (Εικόνα 5.4), για $j \neq j_n$, $\forall\ i, j, j_n \in \mathcal{V}_{PP}$ και $\forall\ k \in \{αριστερόστροφη\!: 1,\ δεξιόστροφη\!: -1\}$.

- <u>Μετάβαση μετατόπισης</u>: Για κάθε διάνυσμα $\boldsymbol{u}_{ij}$και $\boldsymbol{u}_{ji} \in \mathcal{V}_{PP}$ ορίζεται η μετάβαση μετατόπισης $a_{(i,ij),(j,ij)}, a_{(i,ji),(j,ji)}$ και $a_{(j,ij),(i,ij)}, a_{(j,ji),(i,ji)} \in \mathcal{A}_{PPS}$ αντίστοιχα, για τις μεταβάσεις από το διανύσματα κατάστασης $\boldsymbol{v}_{from}$ στο $\boldsymbol{v}_{to}$ για τα $a_{(from),(to)} \in \mathcal{A}_{PPS}$.

Σημειώνεται ότι τα διανύσματα κατάστασης και οι μεταβάσεις διανυσμάτων κατάστασης που δεν είναι εφικτές λόγω στατικών εμποδίων δεν περιέχονται στα σύνολα και κατά προέκταση στον πίνακα μεταβάσεων $\boldsymbol{A}(\mathcal{V}_{PPS})$ και $\boldsymbol{A}(\mathcal{A}_{PPS})$ αντίστοιχα. Για τα μονόδρομα διανύσματα $\mathcal{V}_{PI} \subseteq \mathcal{V}_{PP}$ (Ε5-3) ορίζεται το κατώτατο και ανώτατο ύψος σάρωσης h_{ij}^{L} και h_{ij}^{H} αντίστοιχα.



Εικόνα 5.4 Σχηματική απεικόνιση των γραφημάτων σχετικών με τη δρομολόγηση του οχήματος.

5.1.3 Εντολή απογραφής

Ο διαχειριστής δημιουργεί μία <u>εντολή απογραφής</u> επιλέγοντας ένα σύνολο από τις διαθέσιμες προς απογραφή αποθηκευτικές πλευρές. Οι αποθηκευτικές αυτές επιφάνειες όπως είναι γνωστό εκφράζονται με τα τόξα $\mathcal{V}_{WI}$ (Ε5-2), ενώ για την κίνηση του οχήματος στα τόξα αυτά αντιστοιχούν τα τόξα $\mathcal{V}_{PI} \subseteq \mathcal{V}_{PP}$ που ιχνηλατεί το όχημα ώστε να αποτυπώσει τις αποθηκευτικές επιφάνειες. Από το σύνολο $\mathcal{V}_{PI}$ επομένως προκύπτει ένα υποσύνολο $\mathcal{V}_{PIS}$ των τόξων απογραφής μιας εντολής απογραφής. Τα επιμέρους τόξα $\mathcal{V}_{PIS}$ ως διανύσματα στην περίπτωση που έχουν κοινούς κόμβους και ίση διεύθυνση – φορά ενοποιούνται σε ένα νέο διάνυσμα – τόξο που αντικαθιστά τα προηγούμενα. Αντίστοιχα όλα τα επιμέρους τόξα – διανύσματα του γραφήματος δικτύου δρομολόγησης $\mathcal{G}_{PP}$ που έχουν κοινούς κόμβους και ίση διεύθυνση – φορά ενοποιούνται σε ένα νέο διάνυσμα – τόξο που αντικαθιστά τα προηγούμενα. Πλέον το γραφήματα της δρομολόγησης του οχήματος $\mathcal{G}_{PPS}$ προσαρμόζεται στις νέες συνθήκες δημιουργώντας τα ισοδύναμα διανύσματα κατάστασης $\mathcal{V}_{PPS}$ και τα ισοδύναμα τόξα των εφικτών μεταβάσεων $\mathcal{A}_{PPS}$. Έστω $\mathcal{A}_{PPSI}$ το υποσύνολο των τόξων $a_{ij} \in \mathcal{A}_{PPSI} \subseteq \mathcal{A}_{PPS}$ που αντιστοιχούν στα διανύσματα κατάστασης στους κόμβους των τόξων $\mathcal{V}_{PIS}$. Στο σύνολο $\mathcal{A}_{PPSI}$ περιλαμβάνονται επίσης τα τόξα μετάβασης a_{S_0,S_1} και a_{S_1,S_0} με διανύσματα κατάστασης $\boldsymbol{v}_{S_0}$ και $\boldsymbol{v}_{S_1}$ (Εικόνα 5.4). Το τόξο a_{S_0,S_1} εκφράζει την τροχιά αποσύνδεσης του οχήματος από τη βάση φόρτισης, ενώ αντίστροφα το τόξο a_{S_1,S_0} την τροχιά προσέγγισης για τη σύνδεση του οχήματος στη βάση φόρτισης.

5.2 Μοντελοποίηση δρομολόγησης οχήματος

Το πρόβλημα της δρομολόγησης του οχήματος κατηγοριοποιείται στα τυποποιημένα προβλήματα μεταφορών και διανομής. Συγκεκριμένα μοντελοποιείται με το τυποποιημένο πρόβλημα του Ταχυδρόμου Αγροτικού Ταχυδρομείου (RPP: Rural Postman Problem) που ανήκει στην γενικότερη κατηγορία προβλημάτων δρομολόγησης τόξων (ARP: Arc Routing Problem) [27]. Στα ARP ο όρος δρομολόγηση τόξων αναφέρεται σε προβλήματα δρομολόγησης οχημάτων που οι βασικές δραστηριότητες εξυπηρέτησης βρίσκονται πάνω σε τόξα ενός γραφήματος. Στην εφαρμογή INVSCAN ζητούμενο είναι η δρομολόγηση του οχήματος σε ένα υποσύνολο των τόξων που αντιστοιχούν στις πλευρές αποθήκευσης που καθορίζονται από την εντολή απογραφής.

5.2.1 Το πρόβλημα του Ταχυδρόμου Αγροτικού Ταχυδρομείου (RPP)

Φεύγοντας από το ταχυδρομείο, ο ταχυδρόμος χρειάζεται να επισκεφτεί ορισμένους δρόμους στο χωριό ή στα χωριά, παραδίδοντας και συλλέγοντας γράμματα στα σπίτια των δρόμων αυτών και στη συνέχεια να επιστρέψει στο ταχυδρομείο. Ο ταχυδρόμος θα ήθελε να καλύψει αυτή τη διαδρομή ταξιδεύοντας την μικρότερη δυνατή απόσταση. Έστω ένα γράφημα $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ που περιλαμβάνει τα δυνατά τόξα που μπορεί να διανύσει ο ταχυδρόμος με κόστος c_{ij}. Το πρόβλημα του Ταχυδρόμου Αγροτικού Ταχυδρομείου (RPP) αφορά μόνο ένα υποσύνολο τόξων του δικτύου που πρέπει να καλυφθεί [27]. Οπότε η λύση του προβλήματος έγκειται στο να βρεθεί η συντομότερη διαδρομή του $\mathcal{G}$ που περιέχει όλα τα τόξα που περιλαμβάνονται στο $\mathcal{A}_1 \subseteq \mathcal{A}$. Εάν το $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}$ τότε το πρόβλημα είναι ισοδύναμο με το πρόβλημα του Κινέζου Ταχυδρόμου (CPP: Chinese Postman Problem) που ο ταχυδρόμος χρειάζεται να επισκεφτεί κάθε σπίτι στη διαδρομή του.

Το πρόβλημα έχει το ακόλουθο μαθηματικό πρότυπο:

$$min \sum_{(i,j)\in\mathcal{A}} c_{ij}x_{ij}, \qquad υπό \tag{E5-7}$$

$$\sum_{j\in S(i)} x_{ji} - \sum_{j\in T(i)} x_{ij} = 0, \qquad \forall i \in \mathcal{A} \tag{E5-8}$$

$$x_{ij} \geq 1, \qquad x_{ij} \in \mathbb{N}, \qquad \forall (i,j) \in \mathcal{A}_1 \tag{E5-9}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις c_{ij} είναι το κόστος μετάβασης και x_{ij} το συνολικό πλήθος προσπελάσεων του τόξου a_{ij}. Ο πρώτος περιορισμός σημαίνει ότι ο ταχυδρόμος εισέρχεται σε ένα κόμβο του δικτύου τον ίδιο αριθμό φορών όπου εξέρχεται και ο δεύτερος περιορισμός ότι ο ταχυδρόμος θα επισκεφτεί κάθε τόξο του υποσυνόλου των τόξων $\mathcal{A}_1$ του δικτύου τουλάχιστον μία φορά.

Το πρόβλημα της δρομολόγησης στην εφαρμογή του INVSCAN μοντελοποιείται ακολούθως. Δίκτυο ή αλλιώς γράφημα του RPP θεωρείται το $\mathcal{G}_{\text{PP}} = (\mathcal{N}_{PP}, \mathcal{V}_{PP})$ (E5-4) όπου $\mathcal{V}_{\text{PP}}$ τα τόξα του δικτύου. Έστω $\mathcal{V}_{PIS} \subseteq \mathcal{V}_{PP}$ (E5-3) το υποσύνολο των τόξων του δικτύου που περιλαμβάνει τα επιθυμητά διανύσματα απογραφής – τόξα που πρέπει να διανύσει το όχημα για να φωτογραφίσει τις επιθυμητές πλευρές. Τα τόξα του γραφήματος θεωρούνται διατεταγμένα και το όχημα τα ακολουθεί με το μοναδιαίο διάνυσμα του άξονα του οχήματος τοποθετημένο στην ίδια φορά και διεύθυνση με τα τόξα, δηλαδή ${}^{W}\boldsymbol{x}_R = \frac{\boldsymbol{v}_{ij}}{|\boldsymbol{v}_{ij}|}, \boldsymbol{v}_{ij} \in \mathcal{V}_{PP}$.

Η μοντελοποίηση βέβαια του προβλήματος σε αυτή τη μορφή δεν εμπεριέχει τον έλεγχο του προσανατολισμού του οχήματος σε σχέση με τη φορά της επιτρόχιας κίνησης. Για τον λόγο αυτό ορίστηκε προηγούμενα το γράφημα Καταστάσεων δρομολόγησης $\mathcal{G}_{PPS} = (\mathcal{V}_{PPS}, \mathcal{A}_{PPS})$. Το γράφημα $\mathcal{G}_{PPS}$ περιλαμβάνει τα διανύσματα κατάστασης $\mathcal{V}_{PPS}$ που εμπεριέχουν εκτός από την θέση και τον προσανατολισμό του οχήματος. Οπότε το πρόβλημα μετασχηματίζεται στην εύρεση της βέλτιστης ακολουθίας $\mathcal{S} = \langle (i_1, i_2), (i_2, i_3), \dots \rangle$ των διανυσμάτων κατάστασης $\boldsymbol{v}_i \in \mathcal{V}_{PPS}$ για $\forall i \in \mathcal{V}_{PPS}$ που ελαχιστοποιούν το ενεργειακό κόστος της απογραφής. Έτσι ως γράφημα του RPP θεωρείται το $\mathcal{G}_{PPS}$ με κόστος c_{ij} στα τόξα $a_{ij} \in \mathcal{A}_{PPS}$ για $\forall (i,j) \in \mathcal{A}_{PPS}$. Το υποσύνολο των τόξων $a_{ij} \in \mathcal{A}_{PPSI}$ προκύπτει από την αντιστοίχιση των διανυσμάτων απογραφής – τόξων $\mathcal{V}_{PIS} \subseteq \mathcal{V}_{PP}$ στα τόξα μετάβασης $\mathcal{A}_{PPSI} \subseteq \mathcal{A}_{PPS}$ (E5-6). Τέλος η έκφραση του τόξου απογραφής με αρχικό $\boldsymbol{v}_i$ και τελικό $\boldsymbol{v}_j$ διάνυσμα κατάστασης ως τόξο a_{ij} επιβάλει την μετατροπή του περιορισμού (E5-9) σε $\mathrm{x_{ij}} + \mathrm{x}_{ji} \geq 1,\ \forall (\mathrm{i}, \mathrm{j}) \in \mathcal{A}_1$, διότι διαφορετικά το όχημα θα διένυε το τόξο $\boldsymbol{v}_{ij} \in \mathcal{V}_{PIS}$ υποχρεωτικά δύο φορές με αντίθετη φορά επιτρόχιας κίνησης.

5.2.2 Μετασχηματισμός του RPP σε TSP και SPP

Το πρόβλημα της δρομολόγησης όπως ορίστηκε στο υποκεφάλαιο (5.2.1) μετασχηματίζεται σε δύο επιμέρους προτυποποιημένα προβλήματα. Η θεμελιώδης λογική του μετασχηματισμού είναι η εύρεση της ακολουθίας των τόξων μετάβασης $a_{ij} \in \mathcal{A}_{PPSI} \subseteq \mathcal{A}_{PPS} \in \mathcal{G}_{PPS}$ που το όχημα σε κάθε περίπτωση πρέπει να διανύσει με το ελάχιστο κόστος. Η εύρεση της συντομότερης (σε κόστος) ακολουθίας μοντελοποιείται με το πρόβλημα του Πλανόδιου πωλητή (TSP: Travelling Salesman

Problem). Το κόστος c_{ij} ισοδυναμεί στο ενεργειακό κόστος που απαιτείται για την επιτρόχια μετακίνηση του οχήματος ανάμεσα στα διανύσματα κατάστασης $\boldsymbol{v}_i, \boldsymbol{v}_j \in \mathcal{V}_{PPS}$. Το δεύτερο επιμέρους πρόβλημα επομένως είναι ο υπολογισμός της συντομότερης διαδρομής από το $\boldsymbol{v}_i$ στο $\boldsymbol{v}_j$ με το ελάχιστο ενεργειακά κόστος c_{ij}, που μοντελοποιείται με το πρόβλημα της Συντομότερης διαδρομής (SPP: Shortest Path Problem).

5.2.3 Το πρόβλημα του Πλανόδιου πωλητή (TSP)

Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή (TSP: Travelling Salesman Problem) αφορά την εύρεση της συντομότερης (σε κόστος) διαδρομής για ένα όχημα με αφετηρία κάποιο κόμβο και επιστροφή στο ίδιο σημείο αφού επισκεφθεί έναν σταθερό σύνολο κόμβων ακριβώς μία φορά τον καθένα [28]. Σχηματίζεται επομένως μία κυκλική διαδρομή που διέρχεται ακριβώς μία φορά από όλους τους κόμβους και καταλήγει στο σημείο αφετηρίας. Ζητούμενο επομένως είναι η ακολουθία $\mathcal{S} = \langle (i_1, j_2), (i_2, j_3), \dots \rangle$ των τόξων μετάβασης $a_{ij} \in \mathcal{A}_{PPSI}$ με κόστος c_{ij} που ελαχιστοποιεί το ενεργειακό κόστος απογραφής.

Για την διαμόρφωση του μαθηματικού προτύπου θεωρείται ότι οι κόμβοι ανήκουν σε ένα πλήρες διατεταγμένο γράφημα. Έστω ότι το γράφημα αυτό είναι το $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ όπου τα τόξα έχουν κόστος c_{ij}. Εάν οριστούν οι δυαδικές μεταβλητές:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & εάν\ το\ όχημα\ κάνει\ χρήση\ του\ συνδέσμου\ \{i,j\} \\ 0, & αλλιώς,\ \ \forall i, \forall j, i \neq j \end{cases}, \tag{E5-10}$$

τότε το πρότυπο διαμορφώνεται ως εξής:

$$min \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij}\ , \qquad υπό \tag{E5-11}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1, i = 1, \dots, n\ και \sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, j = 1, \dots, n \tag{E5-12}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{j \in \bar{\mathcal{C}}} x_{ij} \geq 1, \qquad \forall \mathcal{C} \in \{1, \dots, n\}, \mathcal{C} \neq \emptyset \tag{E5-13}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, \forall j, i \neq j \tag{E5-14}$$

Ο πρώτος περιορισμός στην (E5-12) εγγυάται ότι το όχημα εξέρχεται από τον κόμβο i χρησιμοποιώντας ένα ακριβώς τόξο προς κάποιον άλλο κόμβο j, ενώ ο δεύτερος εγγυάται ότι το όχημα εισέρχεται στον κόμβο j χρησιμοποιώντας ένα ακριβώς τόξο από κάποιον άλλο κόμβο i. Οι περιορισμοί (E5-13) αποβλέπουν στην εξάλειψη των κυκλικών διαδρομών.

Το παραπάνω πρόβλημα μετατρέπεται σε ισοδύναμο πρόβλημα δρομολόγησης τόξων με την αντικατάσταση κάθε κόμβου με ένα τόξο. Το γράφημα επομένως του TSP είναι πλέον το $\mathcal{G}_{PPS}$ με κόμβους τα διανύσματα κατάστασης $\boldsymbol{v}_i \in \mathcal{V}_{PPS}$ και προσανατολισμένα τόξα, τα τόξα μετάβασης απογραφής $a_{ij} \in \mathcal{A}_{PPSI}$. Ισχύει δηλαδή $\mathcal{N} = \mathcal{V}_{PPS}$ και $\mathcal{A} = \mathcal{A}_{PPSI}$ ενώ το κόστος c_{ij} ελαχιστοποιείται από το SPP. Τέλος το τόξο – κόμβος a_{ij} και a_{ji} ορίζει το ίδιο διάνυσμα απογραφής με αντίθετη φορά κίνησης από αυτή του διανύσματος. Το διάνυσμα αυτό πρέπει να απογραφεί μία φορά, ενώ με την παραπάνω μοντελοποίηση θα προσπελαστεί υποχρεωτικά δύο φορές. Η ιδιομορφία αυτή του προβλήματος απαιτεί διαφοροποίηση της προτυποποίησης, αφού αφορά στην ουσία ένα μη πλήρες γράφημα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται πολύ αποδοτικά κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με την υπό συνθήκη διαμόρφωση των μητρών εφικτών λύσεων (Αλγόριθμος 5.2).

5.2.4 Το πρόβλημα της Συντομότερης διαδρομής (SPP)

Ζητούμενο του προβλήματος είναι η εύρεση της συντομότερης (ενεργειακά) διαδρομής της επιτρόχιας μετακίνησης του οχήματος ανάμεσα στα διανύσματα κατάστασης $\boldsymbol{v}_{s_2}, \boldsymbol{v}_{t_1} \in \mathcal{V}_{PPS}$ που ορίζονται από την μετάβαση ανάμεσα στα τόξα $a_{s_1,s_2} \equiv a_s$ και $a_{t_1,t_2} \equiv a_t \in \mathcal{A}_{PPSI}$. Έστω C_{st} το ελάχιστο κόστος της διαδρομής $\mathcal{S}_{st} = \langle (i_s, j_2), (i_2, j_3), \dots, (i_n, j_t) \rangle$ από το a_s στο a_t δηλαδή από το διάνυσμα κατάστασης $\boldsymbol{v}_{s_2}$ στο $\boldsymbol{v}_{t_1}$. Έστω ένα γράφημα $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$ το οποίο είναι σταθμισμένο με βάρη c_{ij} στα τόξα $(i,j) \in \mathcal{A}$. Ο στόχος είναι να βρεθεί μια συμβατή, απλή διαδρομή $\mathcal{S}_{st}$ από τον κόμβο $s \in \mathcal{N}$ στον κόμβο $t \in \mathcal{N}, t \neq s$, με ελάχιστο κόστος C_{st} [26].

Εάν οι μεταβλητές $x_{ij}, (i,j) \in \mathcal{A}$, παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \varepsilon\acute{\alpha}\nu\ \tau o\ \tau\acute{o}\xi o\ (i,j)\ \beta\rho\acute{\iota}\sigma\kappa\varepsilon\tau\alpha\iota\ \sigma\tau\eta\ \delta\iota\alpha\delta\rho o\mu\acute{\eta}\ P_{st} \\ 0, & \alpha\lambda\lambda\iota\acute{\omega}\varsigma \end{cases}, \qquad \text{(E5-15)}$$

τότε το πρότυπο διαμορφώνεται ως εξής:

$$min \sum_{(i,j)\in\mathcal{A}} c_{ij} x_{ij}, \qquad \upsilon\pi\acute{o} \qquad \text{(E5-16)}$$

$$\sum_{j\in S(i)} x_{ji} - \sum_{j\in T(i)} x_{ij} = \begin{cases} -1, & i = s \\ 1, & i = t \\ 0, & \alpha\lambda\lambda\iota\acute{\omega}\varsigma \end{cases} \qquad \text{(E5-17)}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \qquad (i,j) \in \mathcal{A} \qquad \text{(E5-18)}$$

Το παραπάνω πρόβλημα μετατρέπεται σε ισοδύναμο πρόβλημα δρομολόγησης τόξων με την αντικατάσταση κάθε κόμβου με ένα τόξο. Το γράφημα επομένως του SPP είναι πλέον το $\mathcal{G}_{PPS}$ με κόμβους τα διανύσματα κατάστασης $\boldsymbol{v}_i \in \mathcal{V}_{PPS}$ και προσανατολισμένα τόξα, όλα τα τόξα μετάβασης $a_{ij} \in \mathcal{A}_{PPS}$. Ισχύει δηλαδή $\mathcal{N} = \mathcal{V}_{PPS}$ και $\mathcal{A} = \mathcal{A}_{PPS}$ ενώ το κόστος c_{ij} προκύπτει από ενεργειακό ισολογισμό.

5.3 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης δρομολόγησης οχήματος

Η επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης γίνεται με την ιεραρχική εφαρμογή των αλγορίθμων που βελτιστοποιούν τα επιμέρους προβλήματα SPP και TSP. Υπολογίζεται η διαδρομή $\mathcal{S}_{ij}$ που ελαχιστοποιεί το κόστος μετάβασης C_{ij} μεταξύ των τόξων a_i και $a_j \in \mathcal{A}_{PPSI}$, που πρέπει να προσπελαστούν για την απογραφή. Η βελτιστοποίηση του SPP υλοποιείται με τον ντετερμινιστικό αλγόριθμο εύρεσης συντομότερης διαδρομής Dijkstra. Στη συνέχεια με δεδομένο τον πίνακα του κόστους μετάβασης $A(C_{ij})$ υπολογίζεται η διαδρομή $\mathcal{S}$ ανάμεσα στα τόξα $a_{ij} \in \mathcal{A}_{PPSI}$ που ελαχιστοποιεί το κόστος C της συνολικής διαδρομής για την εκτέλεση της εντολής απογραφής. Η βελτιστοποίηση του ιδιόμορφου TSP υλοποιείται με τον ευρετικό αλγόριθμο νοημοσύνης σμήνους Βελτιστοποίησης Ζευγαρώματος Μελισσών (HBMO: Honey Bees Mating Optimization). Σημειώνεται ότι η μοντελοποίηση και η βελτιστοποίηση έγινε με κριτήριο την δυνατότητα του οχήματος να κινείται έμπροσθεν αλλά και όπισθεν.

5.3.1 Αλγόριθμος επίλυσης SPP με Dijkstra

Ο αλγόριθμος Dijkstra [26] [29] σχεδιάστηκε από τον Ολλανδό επιστήμονα πληροφορικής Edsger Dijkstra το 1959. Είναι ένας αλγόριθμος αναζήτησης που χρησιμοποιείται συχνά στη δρομολόγηση και επιλύει το πρόβλημα της συντομότερης διαδρομής σε γράφημα με μη αρνητικά κόστη. Ο αλγόριθμος παράγει ένα δέντρο της συντομότερης διαδρομής από τον κόμβο αφετηρίας προς όλους τους κόμβους του γραφήματος.

Στον ακόλουθο ψευδοκώδικα, η εντολή `u := vertex in Q with smallest dist[]`, αναζητά το τόξο *u* στη δομή συνόλου (set) διανυσμάτων *Q* με την ελάχιστη τιμή απόστασης `dist[u]`. Το τόξο αυτό αφαιρείται από το *Q* και επιστρέφεται στον χρήστη. Η `dist_between(u, v)` επιστρέφει την απόσταση μεταξύ των γειτονικών κόμβων *u* και *v*. Η μεταβλητή *alt* στην γραμμή 13 είναι το επιτρόχιο μήκος της διαδρομής από τον κόμβο αφετηρίας στον γειτονικό κόμβο *v* μέσω του κόμβου *u*. Εάν η διαδρομή αυτή είναι συντομότερη από την πιο σύντομη καταγεγραμμένη διαδρομή στον κόμβο *v*, τότε η διαδρομή αυτή αντικαθίσταται από τη διαδρομή *alt*. Ο μονοδιάστατος πίνακας *previous* περιέχει σε κάθε στοιχείο του, τον δείκτη του επόμενου κόμβου στο γράφημα ώστε να προκύψει η συντομότερη διαδρομή.

Αλγόριθμος 5.1 Ψευδοκώδικας επίλυσης SPP που υλοποιήθηκε σε C++ για την για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής μεταξύ όλων των τόξων του γραφήματος καταστάσεων δρομολόγησης $\mathcal{G}_{PPS}$.

```
 1  function Dijkstra(Graph, source):
 2    for each vertex v in Graph: // Αρχικοποίηση
 3      dist[v] := infinity  // Απόσταση από αφετηρία στον v
 4      previous[v] := undefined  // Προηγούμενος κόμβος στη βέλτιστη
                                     διαδρομή από την αφετηρία
 5    dist[source] := 0  // Απόσταση από τον αφετηρία
 6    Q := the set of all nodes in Graph

    // Όλοι οι κόμβοι στο γράφημα και στο Q είναι μη βελτιστοποιημένοι
 7    while Q is not empty:  // Η κύρια ρουτίνα
 8      u := vertex in Q with smallest dist[]
 9      if dist[u] = infinity:
10        break  // Εναπομείναντες κορυφές μη προσβάσιμες
11      remove u from Q
12      for each neighbor v of u:  // Για τα v που απομένουν στο Q
13        alt := dist[u] + dist_between(u, v)
14        if alt < dist[v]:  // Relax (u,v,a)
15          dist[v] := alt
16          previous[v] := u
17    return [dist[],previous[]]

18  function ShortestPath(previous[],u) // Συντομότερη διαδρομή στο u
19    S := empty sequence
20    while previous[u] is defined:
21      insert u at the beginning of S
```

```
22       u := previous[u]
23    return S

24  function SPP(Graph)
25    for each vertex v in Graph:
26       [C[v],previous[]] := Dijkstra(Graph, v)
27       for each vertex u in Graph:
28         S[v][u] := ShortestPath(previous[],u)
29    return [C[],S[]]
```

Η μεταβλητή *Graph* είναι το γράφημα $\mathcal{G}_{PPS}$ με κόμβους τα διανύσματα κατάστασης $\boldsymbol{v}_i \in \mathcal{V}_{PPS}$ και προσανατολισμένα τόξα μετάβασης $a_{ij} \in \mathcal{A}_{PPS}$. Ο αλγόριθμος εκτελείται μέσω της συνάρτησης Dijkstra (*Graph*, *source*) για κάθε κόμβο $\boldsymbol{v}_i$ έτσι ώστε να προκύψει ο πίνακας κόστους μετάβασης $A(C_{ij})$ και ο πίνακας συντομότερης διαδρομής $A(\mathcal{S}_{ij})$. Η διαδικασία αυτή υλοποιείται στη συνάρτηση SPP(*Graph*). Στην περίπτωση που επιθυμείται ο υπολογισμός της συντομότερης διαδρομής από τον κόμβο κατάστασης *source* στον *target* η γραμμή 11 αντικαθίσταται με τον κώδικα «**if** *u* = *target* **then** terminate()»

Το γράφημα $\mathcal{A}_{PPS}$ θεωρείται αραιό (Sparse) [26] διότι οι κόμβοι των διανυσμάτων κατάστασης είναι πάρα πολλοί, ενώ οι γειτονικοί κόμβοι για κάθε κόμβο είναι ελάχιστοι. Η δομή δεδομένων του *Graph* επομένως υλοποιείται με δύο ένθετες λίστες (nested list) σε συμμετρική μορφή (τριγωνική αποκοπή λόγω ισότητας των κοστών $c_{ij} = c_{ji}$), αντί για δυσδιάστατο πίνακα όπου το μεγαλύτερο ποσοστό των στοιχείων του θα ήταν απροσδιόριστο (undefined). Η υλοποίηση του αλγορίθμου έγινε σε C++ με δεκαδικούς αριθμούς μονής ακρίβειας (float).

5.3.2 Αλγόριθμος επίλυσης ιδιόμορφου TSP με HBMO

Ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Ζευγαρώματος Μελισσών (HBMO: Honey Bees Mating Optimization) [28] είναι ένας σχετικά πρόσφατος αλγόριθμος που στηρίζεται στην ευφυΐα σμήνους και πιο συγκεκριμένα στην προσομοίωση της διαδικασίας ζευγαρώματος της βασίλισσας μελισσών στην κυψέλη. Η διαδικασία ζευγαρώματος της βασίλισσας ξεκινάει όταν η βασίλισσα αποφασίζει να πετάξει μακριά από την φωλιά κάνοντας την πτήση ζευγαρώματος κατά την οποία οι κηφήνες την ακολουθούν και ζευγαρώνουν με αυτή στον αέρα. Στην παρούσα εργασία δεν είναι σκόπιμο να γίνει αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου.

Ο HBMO είναι ένας υβριδικός αλγόριθμος νοημοσύνης σμήνους που συνδυάζει αλγορίθμους βελτιστοποίησης από διάφορες περιοχές όπως τους γενετικούς αλγορίθμους και τους αλγορίθμους αναζήτησης. Παρακάτω γίνεται παρουσίαση του ψευδοκώδικα και της προσαρμογής των μεταβλητών του αλγορίθμου στο πρόβλημα της δρομολόγησης όπως περιγράφηκε στο (κεφ. 5.2.3). Πρέπει να σημειωθεί ότι είναι ένας αλγόριθμος γενικής εφαρμογής, που η διαμόρφωση της μήτρας των εφικτών λύσεων (σπέρμα) έγκειται στη κωδικοποίηση του μαθηματικού πρωτοτύπου. Το κύριο ζήτημα πριν από τον καθορισμό των παραμέτρων βελτιστοποίησης είναι η διαδικασία δημιουργίας της μήτρας που στην παρούσα εφαρμογή στηρίζεται στην ακολουθία της διαδρομής των κόμβων κατάστασης του γραφήματος. Ξεκινώντας από τον αρχικό κόμβο ο επόμενος κόμβος κάθε κόμβου στη διαδρομή $\mathcal{S}$ προκύπτει με τυχαία επιλογή από τους διαθέσιμους κόμβους εκτός διαδρομής που επιτρέπεται η μετάβαση.

Αλγόριθμος 5.2 Ψευδοκώδικας επίλυσης TSP που υλοποιήθηκε σε C++ για την για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής μεταξύ όλων των τόξων $a_{ij} \in \mathcal{A}_{PPSI}$.

```
Αρχικοποίηση
Δημιουργία αρχικού πληθυσμού
Επιλογή βέλτιστου μέλους του πληθυσμού για βασίλισσα
Επιλογή μέγιστου αριθμού από πτήσεις ζευγαρώματος (M)
do while i ≤ M
   Αρχικοποίηση της σπερματοθήκης, της ενέργειας και της ταχύτητας της βασίλισσας
   Επιλογή α και step
   do while energy > 0 και spermatotheca δεν είναι γεμάτη
     Επιλογή ενός κηφήνα
     if γίνει το ζευγάρωμα με τον κηφήνα
        Πρόσθεσε το σπέρμα του κηφήνα στην σπερματοθήκη
        Διαγραφή του κηφήνα από τον πληθυσμό
     endif
     Speed(t + 1) = α · Speed(t)
     Energy(t + 1) = Energy(t) − step
   enddo
   do j = 1, Size of Spermatotheca
      Επιλογή μιας ποσότητας σπέρματος από την σπερματοθήκη
      Δημιουργία ενός νεογνού με διασταύρωση του σπέρματος και της βασίλισσας
      Επιλογή μιας εργάτριας
      Βελτίωση της λύσης του νεογνού με την χρήση της εργάτριας
      if η λύση του νεογνού είναι καλύτερη από την βασίλισσα
         Αντικατέστησε την βασίλισσα με το νεογνό
         Διαγραφή της παλιάς βασίλισσας από τον πληθυσμό
      else
         Πρόσθεσε το νεογνό στον πληθυσμό με τους κηφήνες
      endif
   enddo
enddo
return βασίλισσα (Εύρεση βέλτιστης λύσης)
```

Η μεθοδολογία εξαγωγής της τυχαίας εφικτής λύσης (γέννηση) σε μητρική μορφή (generation of feasible solution) και η μεθοδολογία της γενετικής διασταύρωσης (γονιμοποίηση) μεταξύ δύο υπαρχουσών μητρών (genetic crossover of feasible solution), που υλοποιήθηκε σε αλγόριθμο σε C#, παρουσιάζεται στον παρακάτω ψευδοκώδικα. Έστω λίστα Q τα στοιχεία της αντιστοιχούν σε κάθε τόξο $a_{ij} \in \mathcal{A}_{PPSI}$, ενώ περιέχονται στη μορφή (i,j). Έστω για παράδειγμα (Εικόνα 5.4) ότι επιθυμείται να απογραφούν δύο αποθηκευτικές επιφάνειες στην αποθήκη που αντιστοιχούν σε δύο διανύσματα κατάστασης εντολής απογραφής $v \in \mathcal{V}_{PIS}$ (κεφ. 5.1.3). Έστω τότε $(0{,}1)$ η μετάβαση από το σταθμό φόρτισης στη θέση αφετηρίας απογραφής και $(1{,}0)$ η αντίστροφη μετάβαση. Οι μεταβάσεις σάρωσης των v με έμπροσθεν κίνηση θα είναι $(2{,}3)$ και $(4{,}5)$ για το πρώτο και το δεύτερο διάνυσμα v αντίστοιχα, ενώ με όπισθεν κίνηση $(3{,}2)$ και $(5{,}4)$. Τα στοιχεία της λίστας Q δεν περιέχουν τα $(0{,}1)$ και $(1{,}0)$, ενώ είναι ταξινομημένα με αύξουσα σειρά διανυσμάτων (πχ. $Q = \{(2{,}3), (3{,}2), (4{,}5), (5{,}4)\}$).

Αλγόριθμος 5.3 Ψευδοκώδικας διαδικασίας δημιουργίας της μήτρας για γέννηση και γονιμοποίηση.

```
function Γέννηση(λίστα Q)
  Ταξινόμησε τυχαία τα στοιχεία της Q
  do until Το πλήθος των στοιχείων της λίστας ίσο με το πλήθος των διανυσμάτων v
    Επιλογή του τελευταίου στοιχείου της Q ως q = (i, j)
    Διαγραφή του στοιχείου (j, i) από την Q
  enddo
```

```
  return Q

function Γονιμοποίηση(λίστα Q, λίστα B, λίστα K)
  Αντικατέστησε τα ζυγά στοιχεία της B με τα ζυγά της K
  Ταξινόμηση τυχαία των στοιχείων της Q
  for each προηγούμενο στοιχείο της B ξεκινώντας από το τελευταίο
    Επιλογή του τελευταίου στοιχείου της Q ως q = (i,j)
    Διαγραφή κάθε στοιχείου (j,i) και (i,j) από την B εκτός του q:(i,j)
    Διαγραφή του στοιχείου (j,i) και (i,j) από την Q
  enddo
  do while η Q έχει στοιχεία
    Επιλογή του πρώτου στοιχείου της Q ως q = (i,j)
    Πρόσθεσε στην αρχή της B το (i,j)
    Διαγραφή του στοιχείου (j,i) από την Q
  return A
```

5.4 Συμπεράσματα

Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται η προσέγγιση του προβλήματος της δρομολόγησης του οχήματος για την εκτέλεση της εντολής απογραφής. Η προσέγγιση αυτή, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στηρίζεται στην στατικότητα της αποθήκης, όπου δίνει την ικανότητα στο σύστημα να υπολογίζει την δρομολόγηση του οχήματος κατά την αποθήκευση της εντολής απογραφής, ανεξάρτητα από την κίνηση του οχήματος σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο οι αλγόριθμοι αυτοί κρίνονται αποδοτικοί ακόμη και σε περιπτώσεις υπολογισμού της διαδρομής σε πραγματικό χρόνο (πχ. εμπόδιο κατά την κίνηση του οχήματος που ανιχνεύεται από το σύστημα της αποφυγής συγκρούσεως). Για λογικές αποθήκες (μέχρι 1 στρέμμα) ο χρόνος αυτός εκτιμάται σε μερικά δευτερόλεπτα (κάτω από 15), χωρίς ιδιαίτερη βελτιστοποίηση και αξιοποίηση του hardware. Εάν ληφθεί υπόψη και ο προβλεπόμενος χρόνος (περίπου ενός λεπτού) της αναμονής του οχήματος για κάποιο τυχόν προσωρινό εμπόδιο, τότε ο χρόνος αυτός θεωρείται αμελητέος. Η ανάγκη για κατά περίπτωση επαναϋπολογισμό του προβλήματος συντομότερης διαδρομής έγκειται στο γεγονός ότι κάποιες βέλτιστες διαδρομές μπορεί να εμπεριέχουν την φραγμένη οδό. Από την άλλη μεριά το ιδιόμορφο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή, στην περίπτωση παρεμβολής εμποδίου, επαναϋπολογίζεται καθολικά για την απογραφή των αποθηκευτικών περιοχών που απομένουν.

Έχοντας λύσει το πρόβλημα της δρομολόγησης του οχήματος, μένει να εξεταστεί το πρόβλημα της μετακίνησης του οχήματος στις προβλεπόμενες διαδρομές που εξάγονται όπως περιγράφηκε στο παρών κεφάλαιο. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος του κινηματικού ελέγχου του οχήματος.

6 Έλεγχος κίνησης (A2)

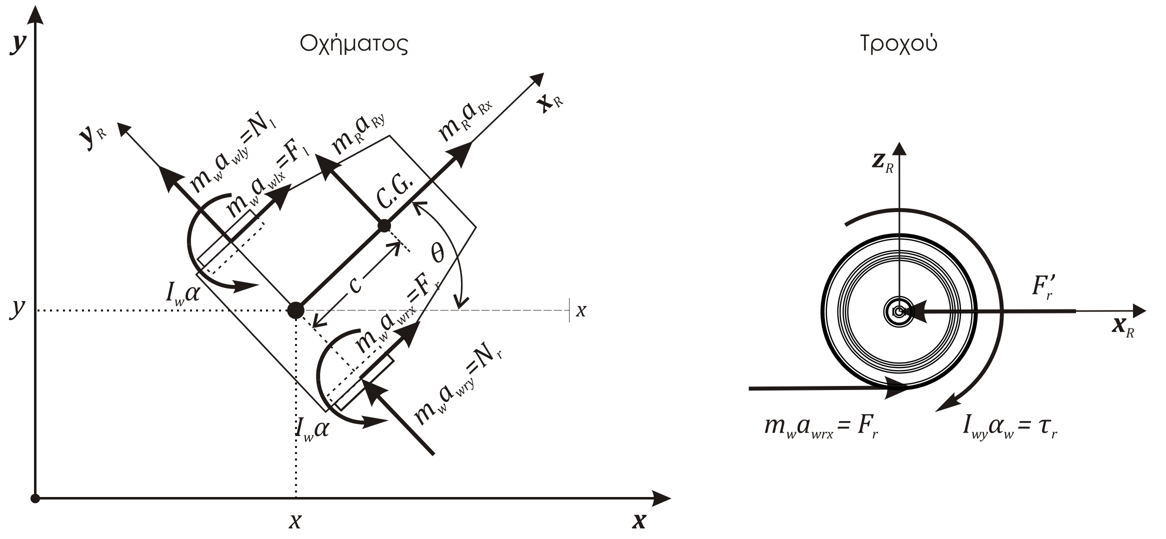
6.1 Γενικά

Ο έλεγχος της καθοδήγησης της κίνησης του οχήματος εκτελείται στον δεύτερο πυρήνα του Η/Υ της μονάδας ελέγχου του οχήματος (A8: Client Control Unit). Πρόκειται για έναν μη γραμμικό ελεγκτή με λογική καθοδήγησης που στηρίζεται στον έλεγχο της πλευρικής και επιτρόχιας επιτάχυνσης. Ο ελεγκτής αντισταθμίζεται με την χρήση δύο γραμμικών ελεγκτών προήγησης - καθυστέρησης φάσης οι οποίοι τροφοδοτούν σε διάταξη ανοιχτού βρόγχου τα λογικά των drives των κινητήρων. Η διόρθωση των σφαλμάτων της θέσης και της γωνίας προσανατολισμού γίνεται με την ανατροφοδότηση των encoders και του συστήματος αναγνώρισης των χαρτογραφημένων landmarks. Ακολουθεί μία περιγραφή του φυσικού συστήματος.

6.2 Κινηματικό και δυναμικό μοντέλο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το ρομποτικό όχημα AGV Scanner είναι όχημα τύπου Hilare Mobile Robot. Αποτελείται από δύο οπίσθιους ανεξάρτητους κινητήριους τροχούς και έναν εμπρόσθιο αυτοευθυγραμμιζόμενο ελεύθερο τροχό. Το φυσικό σύστημα του ρομποτικού οχήματος είναι μη ολονομικό (Non Holonomic). Στη ρομποτική ένα σύστημα θεωρείται μη ολονομικό εάν οι ελέγξιμοι βαθμοί ελευθερίας είναι λιγότεροι από τους συνολικούς βαθμούς ελευθερίας του συστήματος [30]. Το όχημα τύπου Hilare έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας – την θέση (x, y στο επίπεδο) και την γωνία προσανατολισμού. Μόνο δύο βαθμοί ελευθερίας όμως είναι ελέγξιμοι, και αντιστοιχούν στην ανεξάρτητη περιστροφή των δύο κινητήριων τροχών. Το όχημα κατά συνέπεια δεν είναι ικανό να πραγματοποιήσει μια οποιαδήποτε διαδρομή στο χώρο κίνησης του. Το φυσικό σύστημα επομένως επιδέχεται ένα σύνολο από περιορισμούς κίνησης. Η συνθήκη του δεσμού (περιορισμού) που συνδέει το διάνυσμα θέσης του συστήματος και το χρόνο, στην περίπτωση των μη ολονομικών συστημάτων, δεν είναι δυνατόν να εκφραστεί με μία συνάρτηση $\phi(\boldsymbol{r}, t)$, ενώ τα ολονομικά συστήματα σε αντίθετη περίπτωση εκφράζονται με μία τέτοια συνάρτηση [31].

Η ταχύτητα περιστροφής των δύο κινητήριων τροχών καθορίζει την επιτρόχια γραμμική ταχύτητα και την γωνιακή ταχύτητα ως προς τον κατακόρυφο άξονα του ρομποτικού οχήματος. Η ταχύτητα κίνησης του οχήματος σε όλη τη διαδρομή θεωρείται σχετικά «αργή», ώστε η διαμήκης πρόσφυση και η πλευρική δύναμη που ασκείται στους τροχούς να μην υπερβαίνουν την τριβή ολίσθησης ανάμεσα στο πέλμα των ελαστικών και το δάπεδο. Το σύστημα επομένως υπόκειται στη συνθήκη μη ολίσθησης μεταξύ των τροχών και του δαπέδου. Για την διεξαγωγή προσομοίωσης είναι απαραίτητο να εκφραστούν οι κινηματικές εξισώσεις του ρομποτικού οχήματος. Το απλοποιημένο κινηματικό και δυναμικό μοντέλο του ρομποτικού οχήματος αναλύεται στο κεφάλαιο ελέγχου επιτρόχιας ιχνηλασίας στην έκδοση [11] του Farbod Fahimi. Οι εξισώσεις αυτές έχουν προκύψει με την θεώρηση της συνθήκης μη ολίσθησης που μηδενίζει την πλευρική ταχύτητα ελαττώνοντας το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων.



Εικόνα 6.1 Αριστερά: Κινηματικό και δυναμικό διάγραμμα ελευθέρου σώματος του ρομποτικού οχήματος AGV Scanner ως ένα ενιαίο σύστημα. Δεξιά: Κινηματικό και δυναμικό διάγραμμα ελευθέρου σώματος του δεξιού κινητήριου τροχού (Torque Wheel).

6.2.1 Φυσικό σύστημα πρώτης τάξης

Ορίζεται η παρακάτω γενικευμένη μεταβλητή κατάστασης:

$$\boldsymbol{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \\ \dot{x_R} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, x \equiv x_W\ , y \equiv y_w\ , \theta \equiv \angle\left(x_W, {}^W x_R\right),\ \ (\text{κεφ.2.4}) \tag{E6-1}$$

Με το ακόλουθο σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$\dot{q_1} = q_4 \cos q_3 \tag{E6-2}$$

$$\dot{q_2} = q_4 \sin q_3 \tag{E6-3}$$

$$\dot{q_3} = q_5 \tag{E6-4}$$

$$\dot{q_4} = \frac{1}{m}\left(\frac{1}{R}(\tau_r + \tau_l) + m_R c q_5^2\right) \tag{E6-5}$$

$$\dot{q_5} = \frac{T}{2I}\frac{1}{R}(\tau_r - \tau_l) \tag{E6-6}$$

όπου:

$$m = m_R + 2\left(m_w + \frac{1}{R^2} I_{wy}\right) \tag{E6-7}$$

$$I = I_R + 2I_w + \left(m_w + \frac{1}{R^2} I_{wy}\right)\frac{T^2}{2} + m_R c \quad \text{(E6-8)}$$

Παρατηρήσεις: x, y είναι οι συντεταγμένες του οχήματος και θ η γωνία προσανατολισμού του οχήματος ως προς τον άξονα $\boldsymbol{x}$. Η $\dot{x}_R$ είναι η επιτρόχια γραμμική ταχύτητα και $\dot{\theta}$ η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του οχήματος. Η μάζα του τροχού είναι m_w, η ροπή αδράνειας του τροχού ως προς τον άξονα περιστροφής του οχήματος είναι I_w και η ροπή αδράνειας ως προς τον άξονα περιστροφής του τροχού είναι I_{wy}. Η ροπή αδράνειας του κινητήρα και όλων των ενδιάμεσων στοιχείων που εμπλέκονται στην κίνηση του τροχού εμπεριέχονται στην ροπή αδράνειας I_{wy}. Η μάζα του οχήματος είναι m_R, η διαμήκης μετατόπιση του κέντρου βάρους είναι c και η ροπή αδράνειας του οχήματος (χωρίς τους τροχούς) ως προς τον κατακόρυφο άξονα περιστροφής του οχήματος είναι I_R. Τέλος R είναι η ακτίνα των τροχών, τ_r, τ_l η ροπή που ασκείται σε κάθε τροχό και T η απόσταση του μετατροχίου.

6.3 Κινηματικός ελεγκτής

Το πρόβλημα του ελέγχου της ιχνηλάτησης τροχιάς (trajectory tracking) του ρομποτικού οχήματος μπορεί να προσεγγιστεί με δύο μεθόδους. Η πρώτη διαχωρίζει την καθοδήγηση του οχήματος από το πρόβλημα του ελέγχου των επενεργητών σε έναν εξωτερικό βρόγχο καθοδήγησης (outer loop) και σε έναν εσωτερικό βρόγχο ελέγχου (inner loop), αντίστοιχα. Ο εξωτερικός βρόγχος στηρίζεται συνήθως σε γεωμετρικές και κινηματικές ιδιότητες ενώ ο εσωτερικός σε απλούστερες και αποδοτικά καθιερωμένες μεθόδους. Η δεύτερη μέθοδος αφορά μία ενιαία προσέγγιση όπου ο εσωτερικός και εξωτερικός βρόγχος σχεδιάζεται ταυτόχρονα με εφαρμογή διαφόρων μεθόδων μεταξύ των οποίων και μεθόδων μη συμβατικού ελέγχου, όπως τα νευρωνικά δίκτυα και ο προσαρμοστικός έλεγχος [32]. Στην γενική περίπτωση που η τροχιά ιχνηλάτησης προσεγγίζει την ευθεία γραμμή, ένας αναλογικός και διαφορικός ελεγκτής (PD: Proportional Derivative) με ανατροφοδότηση της πλευρικής απόκλισης σε σχέση με την επιθυμητή τροχιά, είναι ικανός να καθοδηγήσει αποτελεσματικά το όχημα [32]. Ωστόσο όταν απαιτείται η ακριβής ιχνηλάτηση μίας πολύπλοκης επικαμπύλιας τροχιάς ο γραμμικός αυτός έλεγχος δεν προσφέρει ικανοποιητική εκτέλεση τροχιάς. Ο ελεγκτής που παρουσιάζεται παρακάτω αποτελεί μία παραλλαγή της μη γραμμικής λογικής καθοδήγησης στο άρθρο [32] που προορίζεται για ελεγκτές μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV: Unmanned Air Vehicle) , που το πρόβλημα καθοδήγησης είναι συναφές.

Ο κινηματικός ελεγκτής του οχήματος που υλοποιείται στην εφαρμογή INVSCAN επιλέγει ένα σημείο αναφοράς $\boldsymbol{r}_{\mathcal{C}}$ (reference point) στην επιθυμητή καμπύλη ιχνηλάτησης $\mathcal{C}[\boldsymbol{q}(t), t]$ (desired trajectory) και ένα επιτρόχιο μήκος προσέγγισης s_L και παράγει μία εντολή επιτρόχιας γραμμικής ταχύτητας v και μία εντολή γωνιακής ταχύτητας ω. Οι εντολές v και ω στη συνέχεια μετασχηματίζονται σε γωνιακή ταχύτητα ω_l, ω_r στους κινητήριους τροχούς. Στην περίπτωση επιπρόσθετων ελεγκτών κλειστού βρόγχου ταχύτητας (close loop of inner loop) οι εντολές ω_l, ω_r στέλνονται σε ${}^{\text{counts}}/_{\text{sec}}$ ως είσοδος στους δύο ελεγκτές. Στην περίπτωση ανοιχτού βρόγχου (open loop, inner και outer loop ενιαία) που δεν γίνεται χρήση ελεγκτών κλειστού βρόγχου στέλνονται οι εντολές απευθείας στο drive κάθε κινητήρα σε PWM. Ο κινηματικός ελεγκτής σε κάθε περίπτωση ανατροφοδοτείται με το μήκος διαδρομής από τους encoder, ενώ γίνεται διόρθωση σφάλματος (error correction) από την αναγνώριση της θέσης των landmarks.

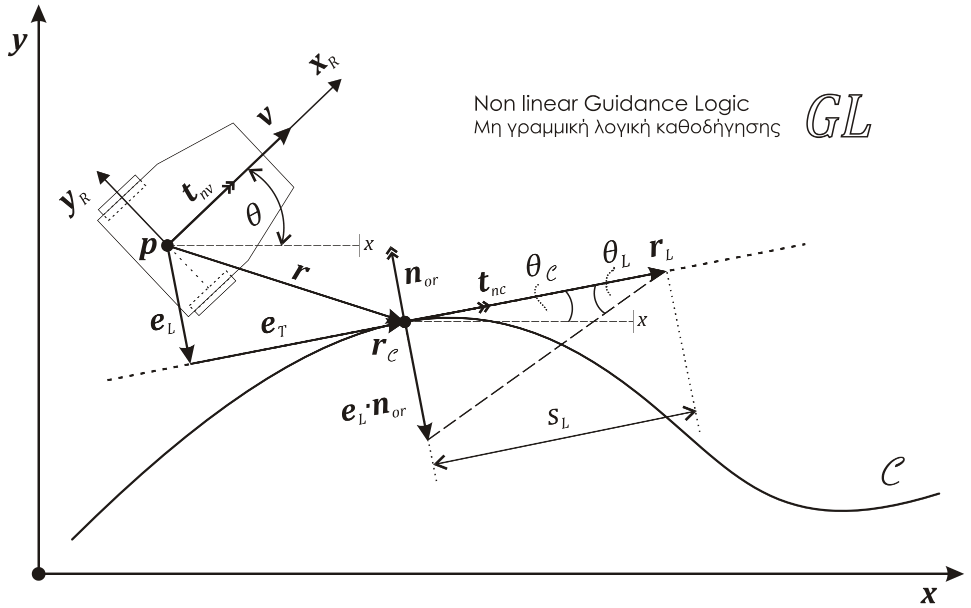
6.3.1 Λογική καθοδήγησης (Guidance Logic)

Παρατήρηση: Για την διόρθωση του πλευρικού σφάλματος $\boldsymbol{e}_L$ απαιτείται αλλαγή της διεύθυνσης θ.

Πρόταση 1: Όταν υπάρχει μεγάλο πλευρικό σφάλμα θέσης $\boldsymbol{e}_L$ το σφάλμα της γωνίας θ «αγνοεί-ται» και γίνεται μείωση στο σφάλμα $\boldsymbol{e}_L$ ακόμη και με αύξηση του σφάλματος της γωνίας θ.

Πρόταση 2: Το πλευρικό σφάλμα εκφράζεται με τη ισοδύναμη γωνία πλευρικού σφάλματος θ_L η οποία επιπροστίθεται στο σφάλμα της γωνίας θ.

Πρόταση 3: Το σημείο αναφοράς $\boldsymbol{r}_{\mathcal{C}}$ βρίσκεται επάνω στην επιθυμητή καμπύλη ιχνηλάτησης $\mathcal{C}[\boldsymbol{q}(t), t]$, όπου $\boldsymbol{q}(t)$ η γενικευμένη μεταβλητή κατάστασης.



Εικόνα 6.2 Σχηματική απεικόνιση της λογικής καθοδήγησης.

Περιγραφή: Υπολογισμός των κατάλληλων σφαλμάτων που αν τροφοδοτηθούν στους επιμέρους γραμμικού ελεγκτές θα οδηγήσουν το όχημα στην επιθυμητή θέση. Το υποσύνολο της γενικευμένης μεταβλητής κατάστασης $\{x, y, \theta\} \subseteq \boldsymbol{q}$ που ορίζει η καμπύλη $\mathcal{C}$ για κάθε χρονική στιγμή t αποτελεί την είσοδο του κινηματικού ελεγκτή. Η είσοδος του κινηματικού ελεγκτή τροφοδοτείται απευθείας στη λογική καθοδήγησης GL που υπολογίζει το επιτρόχιο σφάλμα e_T και το γωνιακό σφάλμα e_θ. Τα σφάλματα e_T και e_θ (έξοδος του GL) αποτελούν την είσοδο των επιμέρους γραμμικών ελεγκτών προήγησης – καθυστέρησης (lead – lag network) του κινηματικού ελεγκτή.

Αλγόριθμος 6.1 Μεθοδολογία υπολογισμού των σφαλμάτων (Εικόνα 2.3) του κινηματικού ελεγκτή στηριζόμενη στη μη γραμμική λογική καθοδήγησης *GL*.

Βήμα 1. Input: $\boldsymbol{r}_{\mathcal{C}}$: $(\theta\varepsilon\omega\rho\eta\tau\iota\kappa\acute{o}\ \{x, y, \theta\})$, $\boldsymbol{p}$: $(\pi\rho\alpha\gamma\mu\alpha\tau\iota\kappa\acute{o}\ \{x, y, \theta\})$.

Βήμα 2. Επιλέγεται η τιμή του μήκους επιτρόχιας προσέγγισης s_L (πειραματικά). Η s_L εκ-φράζει σε μονάδα μήκους την ευαισθησία της διόρθωσης του πλευρικού σφάλματος e_L. Η διόρθωση πραγματοποιείται μέσω της ισοδύναμης γωνίας πλευρικού σφάλματος θ_L, ενώ για δεδομένο s_L όσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα e_L τόσο μεγαλύτερη είναι γωνία προσέγγισης.

Βήμα 3. Στη συνέχεια υπολογίζεται Το <u>διάνυσμα απόκλισης</u> $\boldsymbol{r}$ που είναι απαραίτητο για τον γεωμετρικό προσδιορισμό των σφαλμάτων και ισούται με:

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_{\mathcal{C}} - \boldsymbol{p} \ , \qquad \text{(E6-9)}$$

όπου $\boldsymbol{r}_{\mathcal{C}}$ είναι το διάνυσμα θέσης (θεωρητική τιμή) του σημείου αναφοράς (target) που βρίσκεται επάνω στην επιθυμητή καμπύλη ιχνηλάτησης $\mathcal{C}$ και $\boldsymbol{p}$ είναι το διάνυσμα θέσης του σημείου αναφοράς της πραγματικής κατάστασης του οχήματος (μετρούμενη τιμή) που ανατροφοδοτείται από τους αισθητήρες διόρθωσης θέσης (πχ. encoders).

Υπολογίζεται Το διάνυσμα του <u>πλευρικού σφάλματος</u> $\boldsymbol{e}_L$ που ισούται με:

$$\boldsymbol{e}_L = \boldsymbol{r} - (\boldsymbol{r} \cdot \boldsymbol{t}_{nc})\, \boldsymbol{t}_{nc} \ , \qquad \text{(E6-10)}$$

όπου $\boldsymbol{t}_{nc}$ είναι το μοναδιαίο εφαπτόμενο επιτρόχιο διάνυσμα στο σημείο $\boldsymbol{r}_{\mathcal{C}}$.

Βήμα 4. Έτσι η <u>ισοδύναμη γωνία πλευρικού σφάλματος</u> θ_L ισούται με:

$$\begin{aligned} &\theta_L = tan^{-1}\left(\frac{\boldsymbol{e}_L \cdot \boldsymbol{n}_{or}}{|\boldsymbol{r}_L|}\right) \ \mu\varepsilon \\ &\boldsymbol{r}_L = s_L \boldsymbol{t}_{nc} \ , \qquad \boldsymbol{n}_{or} = \boldsymbol{v}_{er} \times \boldsymbol{t}_{nc} \ , \qquad \boldsymbol{v}_{er} = [0,0,1] \end{aligned} \qquad \text{(E6-11)}$$

όπου $\boldsymbol{r}_L$ είναι το διάνυσμα επιτρόχιας προσέγγισης, $\boldsymbol{n}_{or}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στη καμπύλη $\mathcal{C}$ και $\boldsymbol{v}_{er}$ είναι το κατακόρυφο μοναδιαίο διάνυσμα.

Βήμα 5. Το <u>γωνιακό σφάλμα</u> e_θ προκύπτει από την διαφορά μεταξύ της θεωρητικής γωνίας προσανατολισμού του οχήματος $\Theta_{\mathcal{C}}$ και της πραγματικής γωνίας του οχήματος θ προσαυξημένη κατά την προσημασμένη ισοδύναμη γωνία πλευρικού σφάλματος θ_L (θετική γωνία συνεπάγεται αριστερόστροφη εντολή διόρθωσης) και ισούται με:

$$e_\theta = \Theta_{\mathcal{C}} - \theta + \theta_L \qquad \text{(E6-12)}$$

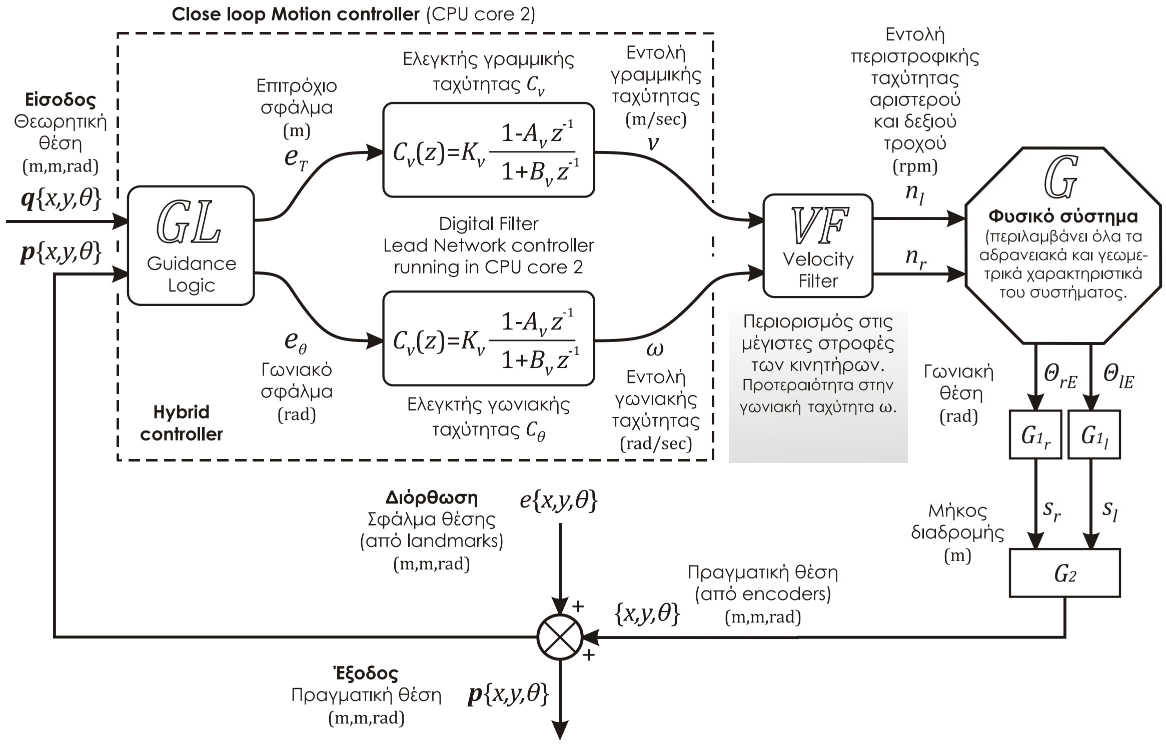
Βήμα 6. Το <u>επιτρόχιο σφάλμα</u> e_T προκύπτει από τη προβολή του διανύσματος απόκλισης $\boldsymbol{r}$ στο μοναδιαίο εφαπτόμενο επιτρόχιο διάνυσμα $\boldsymbol{t}_{nc}$ και ισούται με:

$$e_T = \boldsymbol{r} \cdot \boldsymbol{t}_{nc} \qquad \text{(E6-13)}$$

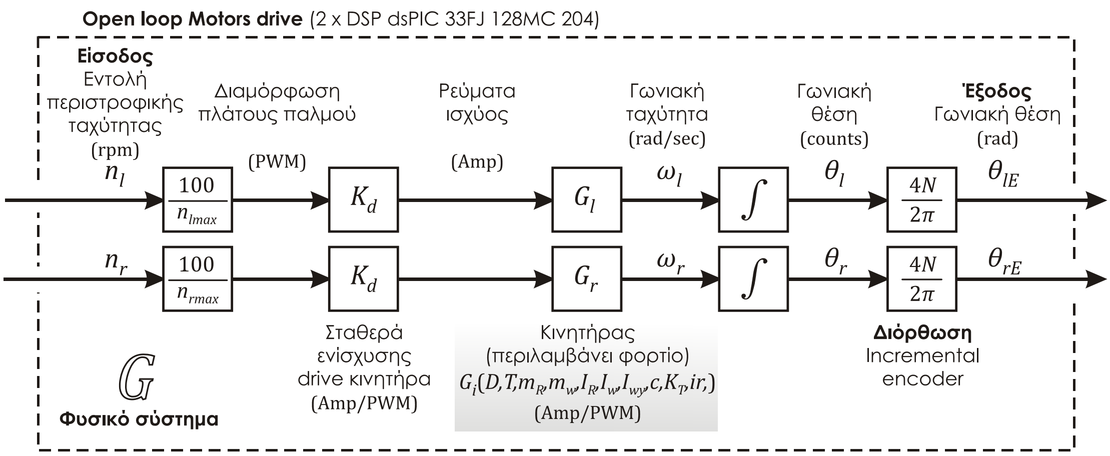
Βήμα 7. <u>Output</u>: $\{e_T, e_\theta\}$

6.4 Σχεδίαση ελεγκτή

Ο κινηματικός ελεγκτής καθοδήγησης του ρομποτικού οχήματος έχει σχεδιαστεί να εκτελείται στον δεύτερο πυρήνα του Η/Υ του AGV Scanner εξασφαλίζοντας έτσι την απαραίτητη και σταθερή δειγματοληψία που απαιτείται για την αποτελεσματική διαδικασία του ελέγχου. Στην παρούσα σχεδίαση ο ελεγκτής αποτελείται αποκλειστικά από έναν κλειστό βρόγχο τροφοδοτώντας τα drives (A2:1:5) των κινητήρων του συστήματος (open loop) του κάθε κινητήριου τροχού με την ταχύτητα περιστροφής τους σε PWM. Τα drives είναι ειδικής κατασκευής όπου το λογικό τους μέρος υλοποιείται σε ένα προγραμματιζόμενο DSP επεξεργαστή dsPIC 33FJ 128MC 204 της MICROCHIP, ενώ η ενίσχυση στη γέφυρα (bridge) του drive πραγματοποιείται με MOSFET τρανζίστορ IRFP150 της FAIRCHILD SEMICONDUCTORS. O DSP προγραμματίζεται με κατάλληλο compiler σε γλώσσα προγραμματισμού C. Ο ελεγκτής θα μπορούσε να σχεδιαστεί σε διάταξη inner – outer loop όπου πλέον θα γινόταν ο έλεγχος της θέσης του οχήματος στο outer loop και ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής των τροχών στο inner loop. Το σενάριο αυτό επιβαρύνει την υλοποίηση του συστήματος με τη διαδικασία προγραμματισμού και ρύθμισης δύο επιπλέων ελεγκτών, στο υπάρχον όμως hardware στους DSP επεξεργαστές των drives. Η διάταξη του συστήματος αυτομάτου ελέγχου παρουσιάζεται συνοπτικά στο δομικό διάγραμμα στην Εικόνα 6.3.



Εικόνα 6.3 Δομικό διάγραμμα του συστήματος αυτομάτου ελέγχου της κίνησης του ρομποτικού οχήματος AGV Scanner. Υλοποιήθηκε προσομοίωση του συστήματος σε C++.



Εικόνα 6.4 Δομικό διάγραμμα του φυσικού συστήματος (drive, κινητήρες, φορτίο, encoders).

6.4.1 Ελεγκτής προήγησης-καθυστέρησης φάσης

Ο κινηματικός ελεγκτής όπως αναφέρθηκε αποτελείται από δύο ελεγκτές προήγησης-καθυστέρησης φάσης (lead-lag network). Οι ελεγκτές προήγησης-καθυστέρησης φάσης είναι δομικά απλοί ελεγκτές με συνάρτηση μεταφοράς:

$$C(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = K\frac{s+A}{s+B} \,, \tag{E6-14}$$

στο πεδίο της συχνότητας (μετασχηματισμός Laplace) [33]. Η σχεδίαση του ελεγκτή έγκειται στον υπολογισμό των παραμέτρων του ελεγκτή. Η παράμετρος K είναι ο αναλογικός όρος της ενίσχυσης (proportional gain), ενώ τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του ελεγκτή τα καθορίζουν σε μεγαλύτερο βαθμό οι παράμετροι A και B.

6.4.2 Ψηφιακό φίλτρο

Η λογική καθοδήγησης GL τροφοδοτεί τους επιμέρους lead-lag network controllers C_v, C_ω με το επιτρόχιο και γωνιακό σφάλμα e_T, e_θ αντίστοιχα. Η σχεδίαση των ελεγκτών αυτών βασίζεται σε γραμμικό ψηφιακό φίλτρο πρώτης τάξεως [34] με συνάρτηση μεταφοράς:

$$C(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = K\frac{z-A}{z+B} = K\frac{1-Az^{-1}}{1+Bz^{-1}} \,, \tag{E6-15}$$

στο πεδίο της συχνότητας της διακεκριμένης δειγματοληπτικής περιόδου T με χρόνο δειγματοληπτικών γεγονότων $t = kT,\ k \in \mathbb{N}$. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός z [35] της συνάρτησης μεταφοράς $D(z)$ δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} &m(t) = K(e(t) - Ae(t-T) - Bm(t-T) \quad \text{ή} \\ &m_i = K(e_i - Ae_{i-1}) - Bm_{i-1} \,, \qquad \textit{αν } i \textit{ η τρέχουσα δειγματοληψία} \end{aligned} \tag{E6-16}$$

όπου m_i είναι η έξοδος (εντολή) και e_i η είσοδος (σφάλμα) του ελεγκτή στη δειγματοληψία i.

6.4.3 Χαρακτηριστικά παραμέτρων ψηφιακού φίλτρου

Το ψηφιακό φίλτρο αποτελείται από τρεις ρυθμιζόμενες παραμέτρους, το μηδενικό A (zero), τον πόλο B (pole), και το κέρδος K (gain). Μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων αυτών μεταβάλλεται η απόκριση (response) του συστήματος σύμφωνα με την είσοδο του συστήματος. Παρακάτω (Πίνακας 6.1) παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής κάθε παραμέτρου στην απόκριση του συστήματος σε είσοδο μοναδιαίας βαθμίδας.

Πίνακας 6.1 Επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων του ψηφιακού φίλτρου στην απόκριση του συστήματος σε είσοδο μοναδιαίας βαθμίδας.

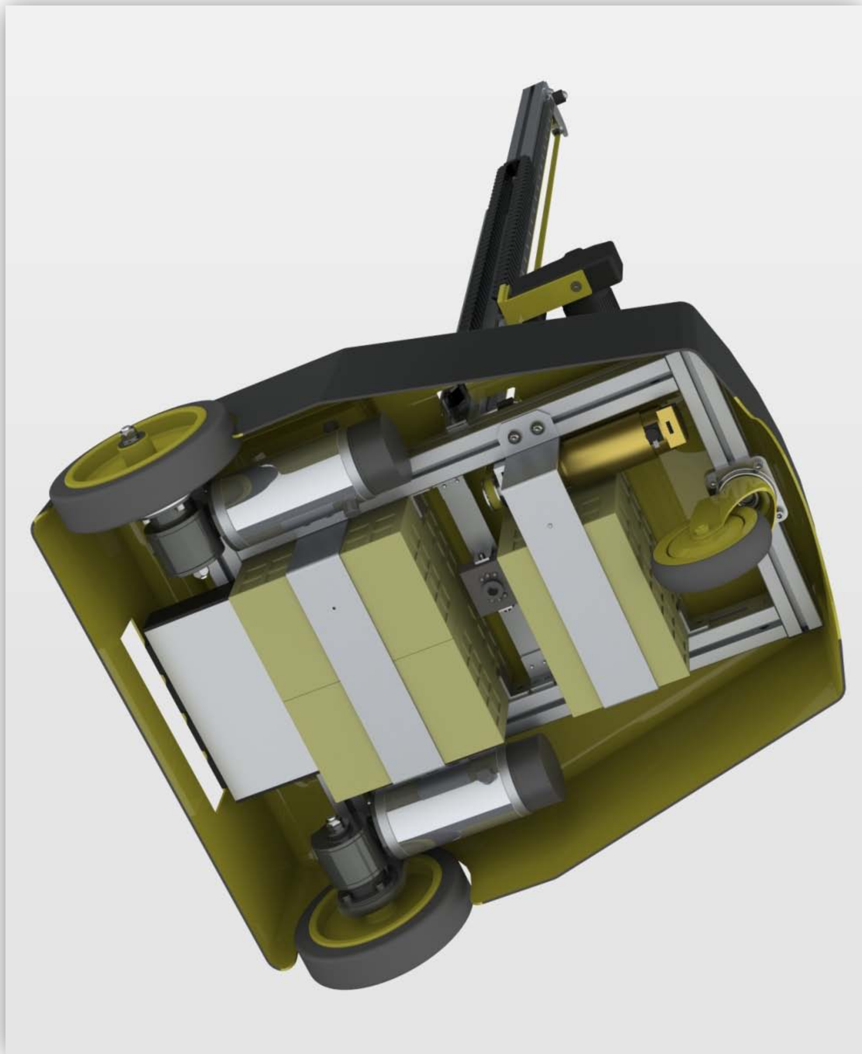
Αύξηση παραμέτρου	Ευστάθεια (Stability)	Απόκριση (Response)	Δυσκαμψία (Stiffness)
A	Βελτίωση	Ταχύτερη	Ελάττωση
B	Αμυδρή Βελτίωση	Ταχύτερη	Ελάττωση
K	Επιδείνωση	Ταχύτερη	Αύξηση

6.5 Διόρθωση σφαλμάτων θέσης με Landmarks (A5)

Τα οδόμετρα (παλμογεννήτριες) δεν αρκούν για την αποτελεσματική καθοδήγηση του οχήματος. Όταν έγινε η ανάλυση του φυσικού συστήματος (κεφ. 6.2) λήφθηκε υπόψη η παραδοχή της μη ολίσθησης των τροχών (no split assumption). Η παραδοχή αυτή όμως απέχει πολύ από την πραγματικότητα με αποτέλεσμα η ανατροφοδότηση της θέσης που γίνεται από τις παλμογεννήτριες να δημιουργεί σφάλματα ολοκλήρωσης στη διάρκεια του χρόνου. Στην εισαγωγή στη παράγραφο *Πλοήγηση οχημάτων AGV (Navigation)* (1.3.5) γίνεται μία σύντομη περιγραφή των συστημάτων διόρθωσης θέσης. Ανάμεσα σε αυτά είναι και η διόρθωση ή αλλιώς καθοδήγηση με οροθέσια (Landmarks Navigation). Στην περίπτωση της οπτικής μεθόδου αναγνώρισης των landmarks γίνεται χρήση μίας γρήγορης μικρό κάμερας τοποθετημένης στο κάτω μέρος του οχήματος με οπτικό πεδίο αυτής προς το δάπεδο. Τα landmarks επικολλούνται στο δάπεδο, ενώ η μορφή τους είναι παρόμοια ή πανομοιότυπη με τα 2D barcodes, ενδεχομένως με μεγαλύτερη επικέντρωση στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους (μεγαλύτερη ακρίβεια στην πληροφορία της θέσης και του προσανατολισμού).

6.5.1 Κάμερα αποτύπωσης δαπέδου

Η κάμερα (A5:1) που επιλέχθηκε για την διακεκριμένη αποτύπωση του δαπέδου σύμφωνα με την απαιτούμενη δειγματοληψία είναι η HERCULES WEBCAM CLASSIC. Η σύνδεση της κάμερας με την μονάδα ελέγχου του οχήματος (Client Control Unit) γίνεται ενσύρματα με USB. Η κάμερα έχει ενσωματωμένο 4LED φωτισμό που βοηθάει στην βελτίωση των συνθηκών αποτύπωσης του landmark, όπου το πρόβλημα του θορύβου (CCD noise) στις μικρό κάμερες είναι πολύ έντονο εξαιτίας του μικρού μεγέθους του αισθητήρα CCD (μικρότερη επιφάνεια αισθητήρα >> μεγαλύτερη πυκνότητα pixel >> μεγαλύτερος θόρυβος λόγω διάχυσης). Σημειώνεται ότι ο αισθητήρας της κάμερας είναι ανάλυσης VGA (640×480 pixel), η οποία μπορεί να θεωρηθεί σχετικά μικρή σε σχέση με τον ανταγωνισμό. Ωστόσο είναι αρκετά γρήγορη με ταχύτητα 30 fps. Η κάμερα τοποθετείται ανάμεσα στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές και εδράζεται σε αλουμινένια βάση ειδικής κατασκευής (κοπή δοκών γωνιακής διατομής και διατομής πι) που έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ρυθμίζονται όλες οι γωνίες (εκτός ως προς τον άξονα $\boldsymbol{x}_R$). Στο ύψος που βρίσκεται τοποθετημένη η κάμερα το κάδρο που αποτυπώνει στο επίπεδο του δαπέδου είναι διαστάσεων (146×109 mm). Στη σχεδίαση έχει προσεχθεί να μην επισκιάζεται το ωφέλιμο κάδρο από τους συσσωρευτές, καθώς επίσης και ο φωτισμός LED.



Εικόνα 6.5 Φωτορεαλιστική απεικόνιση του κάτω μέρους του AGV Scanner. Διακρίνεται η κάμερα αποτύπωσης δαπέδου ανάμεσα από τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές στο κέντρο του οχήματος.

6.5.2 Επιδαπέδιες ετικέτες

Τα landmarks τοποθετούνται σε διάφορα σημεία κατά μήκος του συνόλου των δυνατών διαδρομών που όπως έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο της δρομολόγησης (κεφ. 5.1.2) οι διαδρομές αυτές εκφράζονται από τα τόξα του γραφήματος $\mathcal{G}_{PP}$ (E5-4). Η τοποθέτηση των landmark στο δίκτυο γίνεται με δύο κριτήρια. Το πρώτο κριτήριο είναι το επιτρόχιο μήκος μεταξύ δύο διαδοχικών αναγνωρίσεων landmark για κάθε δυνατή διαδρομή να είναι μικρότερο από ένα επιθυμητό μήκος. Το δεύτερο κριτήριο είναι η τοποθέτηση των landmarks να γίνεται κοντά στους κόμβους περιστροφής. Επιλέχθηκαν επιδαπέδιες ετικέτες της SLOTLABEL μίας επιχείρησης με πολύ μεγάλη τεχνογνωσία στην ταυτοποίηση της θέσης σε αποθηκευτικές διατάξεις. Οι ετικέτες της SLOTLABEL τυπώνονται με μέθοδο προηγμένης τεχνολογίας (sub-surface printed) σε υλικό polycarbonate, ενώ επικολλούνται στο έδαφος με δύο μεθόδους είτε με εποξική κόλα (epoxy – heavy duty) είτε αυτοκόλλητες (adhesive – medium duty). Χαρακτηριστικά στην Εικόνα 6.6 παρουσιάζεται μία heavy duty ετικέτα μετά από 18 μήνες τοποθετημένη σε περιβάλλον υψηλή κίνησης (forklift κτλ).

Εικόνα 6.6 Αριστερά: Απεικόνιση της σχεδίασης του barcode. Δεξιά: Ετικέτα τυπωμένη από την SLOTLABEL για εφαρμογές βιομηχανικών προδιαγραφών.

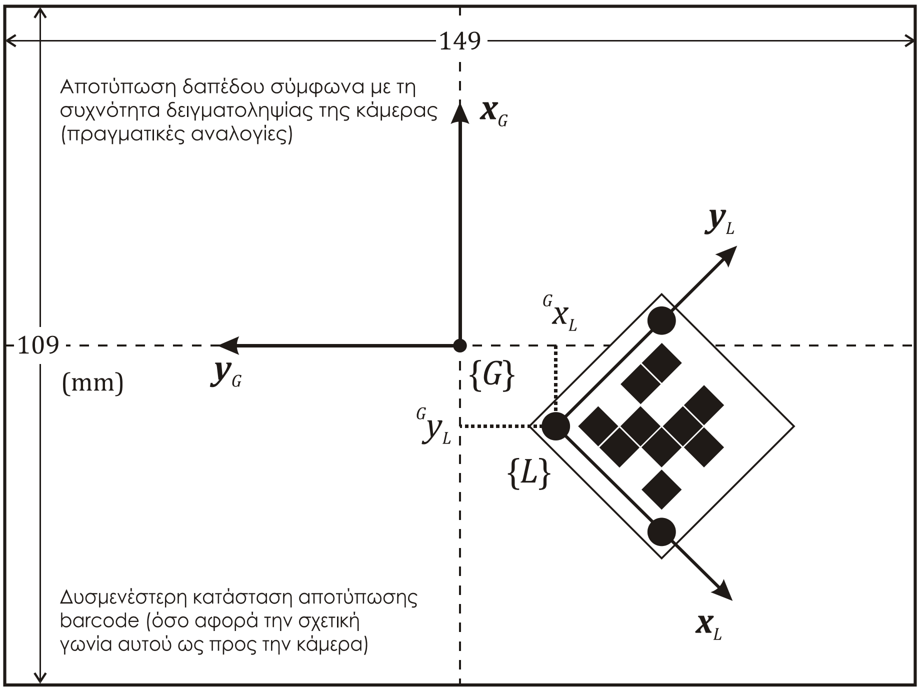
6.5.3 Γεωμετρία και αναγνώριση landmark

Η γεωμετρία του landmark που σχεδιάστηκε είναι παραπλήσια της μορφής των δισδιάστατων τυποποιημένων barcodes. Η μορφή του παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.6. Αποτελείται από ένα πλέγμα (4×4), δίχρωμων παραλληλογράμμων, όπου το λευκό συμβολίζει το bit: 0 και το μαύρο το bit: 1. Περιμετρικά στο δυαδικό πλέγμα σχεδιάστηκαν κυκλικά στοιχεία στις τρεις γωνίες του landmark για την οριοθέτηση του landmark, καθώς και για την εξαγωγή της θέσης αλλά και της γωνίας προσανατολισμού. Ο συνδυασμός των ψηφίων στο εσωτερικό του πλέγματος είναι 16 bit (4×4) και δίνει φυσικούς αριθμούς μέχρι και τον αριθμό 65535. Οι διαστάσεις του landmark καθορίζονται από τέσσερεις παράγοντες:

- Τις διαστάσεις του φωτογραφικού κάδρου,
- Την δειγματοληπτική ταχύτητα της κάμερας,
- Την μέγιστη ταχύτητα του οχήματος,
- Την ανάλυση του αισθητήρα της κάμερας.

Στην επόμενη παράγραφό σημειώνεται ότι κατά την προσομοίωση η μέγιστή ταχύτητα του οχήματος κυμαίνεται στα $0.8\ \mathrm{m/s}$. Εάν η κάμερα αποδίδει στην πράξη $25\ \mathrm{fps}$ (5 λιγότερα από αυτά που δίνει ο κατασκευαστής) τότε συνεπάγεται ότι μετατόπιση του κέντρου του κάδρου ανάμεσα σε δύο επακόλουθες δειγματοληψίες θα είναι $32\ \mathrm{mm}$.

Στη γενική περίπτωση το όχημα μπορεί να κινηθεί επί του landmark με οποιαδήποτε διεύθυνση. Το κάδρο της κάμερας είναι σχέσης διαστάσεων $4/3$. Η δυσμενέστερη περίπτωση αποτύπωσης, όσο αφορά τις διαστάσεις του landmark (τετραγωνικής διατομής) με δεδομένη την επιλεγμένη κάμερα, είναι η κίνηση της κάμερας με την πλατιά πλευρά του κάδρου κάθετα στη διαγώνιο του landmark. Στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται ότι αποτυπώνονται εγγυημένα τουλάχιστον δύο κάδρα, που περιέχουν ολόκληρο το landmark σε οποιαδήποτε σχετική διεύθυνση, αν η διάσταση της πλευράς της τετραγωνικής διατομής του landmark είναι μικρότερη από $32\ \mathrm{mm}$. Σχεδιάζεται επομένως landmark τετραγωνικής διατομής και πλευράς $30\ \mathrm{mm}$ με διαστάσεις του κάθε bit $5 \times 5\ \mathrm{mm}$ που αντιστοιχούν σε 22×22 pixel με ανάλυση 4.4 pixel/mm. Οι διαστάσεις (σε pixel^2) του κάθε bit κρίνεται απολύτως ικανοποιητική για αναγνώριση, με μέθοδο παρόμοια με αυτή που περιγράφεται στην παράγραφο *Αναγνώριση barcode* (4.3.3). Τέλος για την ακρίβεια εντοπισμού της θέσης, αν γίνει μία εκτίμηση των σφαλμάτων απεικόνισης (συχνότητα CCD, ταχύτητα διαφράγματος, οπτική παραμόρφωση) κατά προσέγγιση σε (2 pixel), τότε η ακρίβεια της θέσης εκτιμάται σε 0.5 mm και της γωνίας σε 0.015 rad ή 0.86°.



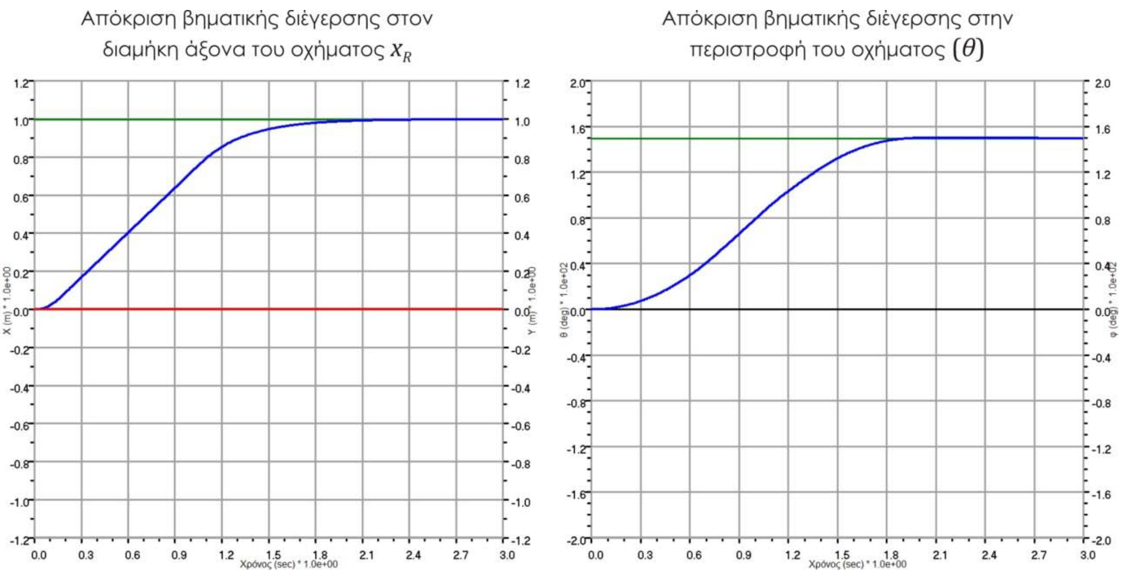
Εικόνα 6.7 Σχηματική αναπαράσταση της εικόνας λήψης της κάμερας δαπέδου.

6.5.4 Περαιτέρω βελτιώσεις

Μία καλύτερη εκτίμηση του προσανατολισμού μπορεί να γίνει μέσω της γωνίας που ορίζουν δύο διαδοχικές αναγνωρίσεις landmark, σε συνδυασμό με την χρήση επιταχυνσιόμετρου για τον ακριβέστερο υπολογισμό της μεταβολής της γωνίας σε αυτό το επιτρόχιο διάστημα. Απαραίτητη είναι επίσης μία λογική προσαρμοστικής διόρθωσης των διαταραχών. Η χαρτογράφηση των landmarks θεωρείται μη μεταβαλλόμενη στο χρόνο, ενώ σε αντίθεση η κατάσταση των ελαστικών ή των συστημάτων μεταφοράς της κίνησης μεταβάλλεται. Το αποτέλεσμα αυτών το μεταβολών είναι η δημιουργία διαταραχών στο μοντέλο του φυσικού συστήματος, που μπορούν να τροφοδοτηθούν με μία λογική στον ελεγκτή (πχ. τα μόνιμα σφάλματα θέσης κατά την αναγνώριση των landmarks να αντισταθμίζουν την ακτίνα του τροχού κτλ.) δίνοντας τη δυνατότητα για προσαρμοστικό έλεγχο (adaptive control).

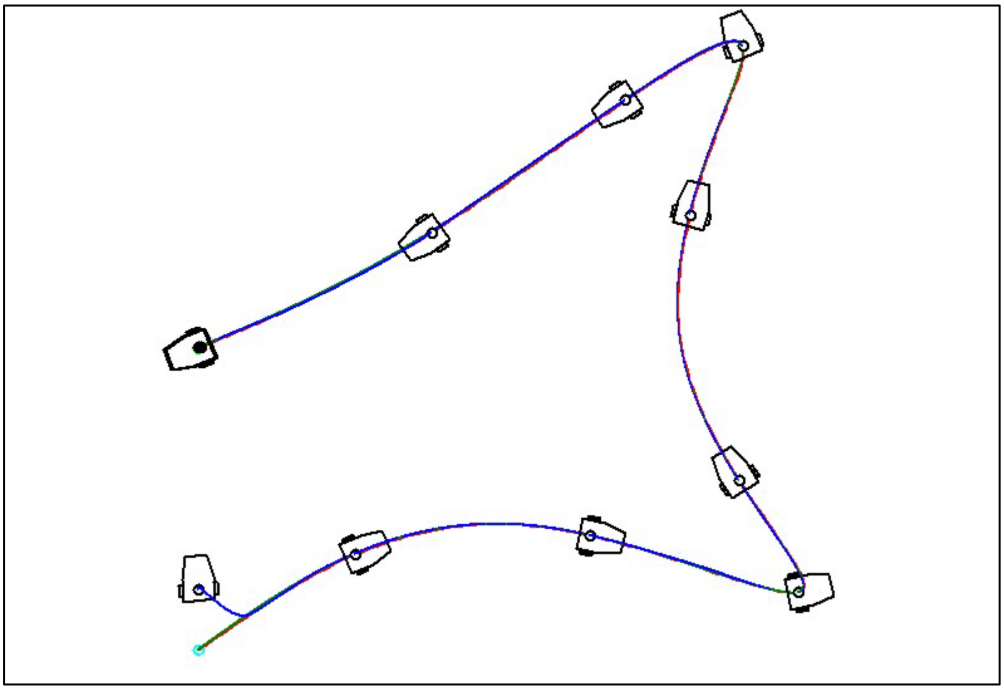
6.6 Υλοποίηση προσομοίωσης του συστήματος ελέγχου

Για την μελέτη και σχεδίαση του κινηματικού ελεγκτή του οχήματος υλοποιήθηκε προσομοίωση σε γλώσσα προγραμματισμού C++ σε προγραμματιστικό περιβάλλον IDE. Στην Εικόνα 6.8 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις σε βηματική διέγερση κατά τον διαμήκη άξονα του οχήματος και κατά την περιστροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα αυτού. Η διαδικασία αυτή έγινε για να προσδιοριστούν οι τιμές των παραμέτρων K, A, B των επιμέρους γραμμικών ελεγκτών επιτρόχιας ταχύτητας $\boldsymbol{v}$ και γωνιακής ταχύτητας ω. Οι τιμές που προέκυψαν κατά τη ρύθμιση παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 6.2). Οι ρυθμίσεις έγιναν ώστε οι αποκρίσεις να είναι κρίσιμες (χωρίς υπέρβαση) (critical) και ο χρόνος αποκατάστασης ο μικρότερος δυνατός, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που έχουν προσδιοριστεί στην παράγραφο (3.1.1).



Εικόνα 6.8 Απόκριση βηματικής διέγερσης κατά την διαδικασία ρύθμισης του κινηματικού ελεγκτή.

Στην Εικόνα 6.9 φαίνεται η προσομοίωση της τροχιάς του δυναμικού μοντέλου του οχήματος με τις ανωτέρω τιμές ρύθμισης του ελεγκτή σε μία διαδρομή καμπύλης spline μήκους $30\ \mathrm{m}$, με περιοχές πολύ μικρής ακτίνας καμπυλότητας. Τα σφάλματα επιτρόχιας και πλευρικής θέσης είναι μικρότερα από $\pm 10\ \mathrm{mm}$, καθώς επίσης και τα σφάλματα της γωνίας είναι μικρότερα από $\pm 0.2^{\circ}$, με μέγιστη επιτρόχια ταχύτητα $0.8\ \mathrm{m/sec}$. Το προφίλ ταχυτήτων κατά μήκος της καμπύλης δημιουργείται αυτόματα από το πρόγραμμα με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (προσαρμογή της επιτρόχιας ταχύτητας στην ακτίνα καμπυλότητας).



Εικόνα 6.9 Προσομοίωση της κίνησης του οχήματος σε μία διαδρομή καμπύλης spline μήκους $30\,\mathrm{m}$ περίπου, με σφάλμα εκκίνησης $(x, y, \theta) = (0\mathrm{m}, 1\mathrm{m}, 60^{\circ})$. Διακρίνονται οι αποτυπωμένες θέσεις του οχήματος ανά σταθερά χρονικά διαστήματα.

Πίνακας 6.2 Παράμετροι και χαρακτηριστικά της απόκρισης του κινηματικού ελεγκτή που προέκυψαν από την ρύθμιση μέσω προσομοίωσης.

Περιγραφή	Μέγεθος	Ελεγκτής επιτρόχιας ταχύτητας C_v	Ελεγκτής γωνιακής ταχύτητας C_ω	Μονάδα
Χρόνος δειγματοληψίας	Δt	6		ms
Αναλογικός όρος	K	100	160	–
Παράμετρος Α	A	0.983	0.985	–
Παράμετρος Β	B	0.810	0.861	–
Χρόνος ανύψωσης (10%-90%)	t_r	1.1	1.11	sec
Μέγιστη υπερύψωση	M_p	0	0	%
Χρόνος αποκατάστασης	t_s	1.45	1.5	sec

Πίνακας 6.3 Τιμές παραμέτρων φυσικού συστήματος και προσομοίωσης.

Περιγραφή	Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα
Μετατρόχιο	T	0.575	m
Διαμήκης απόσταση Κέντρου βάρους	c	0.198	m
Μάζα οχήματος εκτός τροχών	m_R	55.6	kg
Ροπή αδράνειας εγκάρσια εκτός τροχών	I_R	7.689	$\mathrm{kg\ m^2}$
Μάζα τροχών	m_w	1	kg
Ροπή αδράνειας στο άξονα περιστροφής	I_{wy}	0.188	$\mathrm{kg\ m^2}$
Ροπή αδράνειας εγκάρσια	I_w	0.003	$\mathrm{kg\ m^2}$
Διάμετρος τροχού	D	0.2	m
Σχέση μετάδοσης	ir	20	
Σταθερά ροπής κινητήρα	K_t	0.12	Nm/A
Κέρδος Drive	K_d	0.093	A/PWM
Μέγιστος αριθμός στροφών κινητήρα	$\bar{n}_{max}$	1500	rpm
Αριθμός Slot Encoder	N	500	
Μήκος προσέγγισης μη γραμμικής λογικής καθοδήγησης	s_L	0.150	m

6.7 Έλεγχος κίνησης κάμερας (A3)

Το σύστημα κίνησης της κάμερας αναλύεται στο κεφάλαιο 3.5 ενώ για την καθοδήγηση του α-νυψωτικού μηχανισμού γίνεται χρήση εξειδικευμένου hardware που αποτελείται από μία κάρτα ει-δικής κατασκευής (A3:6) με προγραμματιζόμενο DSP επεξεργαστή (PIC) και μονάδα ενίσχυσης. Το κομμάτι του hardware είναι ίδιο αυτό με του κινηματικού ελεγκτή του οχήματος και περιγράφεται στη παράγραφο 6.4, ενώ ο ελεγκτής που προγραμματίζεται στον DSP είναι επίσης lead-lag network controller (E6-15). Με τον ελεγκτή κλειστού βρόγχου γίνεται αντιστάθμιση του φυσικού συστήματος του γραμμικού συστήματος κίνησης με αντίστοιχες διαδικασίες που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 6.4. Ο ελεγκτής πραγματοποιεί έλεγχο της κίνησης του κατακόρυφου άξονα όπου δέχεται εντολές θέσης από τον γενικό έλεγχο. Οι θέσεις αυτές προσεγγίζονται με τραπεζοειδές προφίλ ταχύτητας σύμφωνα με την επιθυμητή επιτάχυνση και ταχύτητα. Ο ελεγκτής προπορείας – καθυστέρησης φά-σης έχει ως είσοδο και έξοδο την θέση σε counts, ενώ όλα τα κινηματικά, αδρανειακά και γεωμετρι-κά χαρακτηριστικά μετασχηματίζονται ως προς τον άξονα του κινητήρα – encoder.

7 Συμπεράσματα

Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται η σχεδίαση και η μελέτη του πρωτότυπου συστήματος απογραφής αποθήκης INVSCAN. Η όλη διαδικασία της πορείας από την σύλληψη της ιδέας μέχρι την ολοκλήρωση της μελέτης τελικώς ολοκληρώθηκε σε σημαντικό βαθμό πληρότητας. Η παρούσα εργασία αποτελεί μία προμελέτη που καλύπτει τα κύρια θεωρητικά και πρακτικά ζητήματα που εμπλέκονται στην υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος απογραφής.

Η σχεδίαση του οχήματος είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές που ορίστηκαν κάτι που επιβεβαιώνεται και από την διαδικασία της προσομοίωσης, όπου φαίνεται ότι η ισχύς των κινητήριων μονάδων είναι επαρκής. Η συναρμολόγηση της κατασκευής είναι αρκετά απλή και γρήγορη, τα υλικά είναι άμεσης διαθεσιμότητας, ενώ τα λιγοστά εξαρτήματα ειδικής κατασκευής είναι χαμηλού κόστους και κατασκευαστικά απλά. Η αντοχή και η αξιοπιστία των επιλεγμένων υλικών είναι εγγυημένη αφού τα υλικά που επιλέχθηκαν είναι ανώτερων προδιαγραφών, ενώ παράλληλα οι ταχύτητες και ο κύκλος εργασίας είναι πολύ περιορισμένοι.

Η ενεργειακή αυτονομία του οχήματος κρίνεται επαρκής για την απογραφή μια μέσης αποθήκης κανονικής διατάξεως, ενώ σε συνδυασμό με το σύστημα αυτόματης σύνδεσης για την φόρτιση του οχήματος το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα αυτόνομο για προγραμματισμένες διαδικασίες. Το κόστος συντήρησης περιορίζεται στην περιοδική αντικατάσταση των ηλεκτρικών συσσωρευτών, που εκτιμάται σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 2 ετών για καθημερινή εκτέλεση απογραφής με επακόλουθη 75% αποφόρτιση ανά απογραφή.

Το κόστος της εκτύπωσης αλλά και της επικόλλησης των landmarks είναι λογικό σε σχέση με το συνολικό κόστος της υλοποίησης του συστήματος. Η διαδικασία της τοποθέτησης των landmarks κατά την εγκατάσταση του συστήματος INVSCAN την πρώτη φορά με την χρήση κατάλληλων μετρητικών απόστασης laser, πιθανόν να διευκολύνει αισθητά την διαδικασία της ακριβούς παραμετροποίησης του χάρτη των landmarks. Ωστόσο ακόμη και σε μη ακριβείς τιμές θέσεων στο χάρτη, το σύστημα καθοδήγησης μπορεί να υλοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιώσει τις τιμές αυτές με αυτόματο τρόπο κατά την περίοδο της ρύθμισης.

Η προσέγγιση της δρομολόγησης του οχήματος γενικότερα αλλά και για την εκτέλεση της απογραφής φαίνεται αποδοτική και λειτουργική. Απαλλάσσει τον σχεδιαστή – κατασκευαστή από πιο επίπονες προγραμματιστικά μεθόδους χωρίς να περιορίζεται η ευχρηστία του συστήματος. Ωστόσο στο πρόβλημα της δρομολόγησης μπορούν να γίνουν πολλές βελτιώσεις ή άλλες προσεγγίσεις, όπως για παράδειγμα η χρήση μεθόδων αυτόματης χαρτογράφησης ή δρομολόγησης (πχ. με μέθοδο τριγωνοποίησης και αυτόματο υπολογισμό εφικτών τροχιών). Η σχεδιαστική λύση βέβαια που επιλέχθηκε, όσο αφορά το περιβάλλον κίνησης του οχήματος, φαίνεται να ταιριάζει καλύτερα στη στατικότητα του προβλήματος της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Η μέθοδος αναγνώρισης των barcode και της σύνθεσης των φωτογραφικών κάδρων είναι υλοποιημένη και δοκιμασμένη. Σημαντική παράμετρος για την ποιοτική και ευκρινή λήψη της αποτύπωσης των αποθηκευτικών επιφανειών αποτελεί ο φωτισμός, και πιο συγκεκριμένα η σωστή ποσότητα μη συγκεντρωμένου – ομοιόμορφα διάχυτου φωτισμού.

Ο κινηματικός ελεγκτής που υλοποιήθηκε στην προσομοίωση φαίνεται να συμπεριφέρεται πάρα πολύ ικανοποιητικά, με σφάλματα σχεδόν αμελητέα για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Η απόκλιση της συμπεριφοράς του οχήματος στην προσομοίωση σε σχέση με την υλοποίηση στο πραγματικό σύστημα, έγκειται στην ανατροφοδότηση της πραγματικής θέσης. Εάν τα συστήματα διόρθωσης, εκτός από τα landmarks, όπως ένα ενδεχόμενο επιταχυνσιόμετρο ή γυροσκόπιο τροφοδοτούν τον ελεγκτή με ικανοποιητικές μετρήσεις, τότε ο ακριβής έλεγχος του οχήματος φαίνεται να είναι εγγυημένος. Ωστόσο το σύστημα αυτομάτου ελέγχου της καθοδήγησης του οχήματος όπως παρουσιάστηκε στην παρούσα μελέτη, για σχετικά πυκνή διάταξη landmarks, φαίνεται να είναι αποδοτικό αφού τα αθροιστικά σφάλματα ολίσθησης μηδενίζονται ανά τακτά επιτρόχια διαστήματα.

Η κάμερα του δαπέδου για την αποτύπωση των landmarks δεν έχει δοκιμαστεί στην πράξη, με πιθανότητα παρόλο τις όποιες εκτιμήσεις να μην ανταποκρίνεται στην απαιτούμενη ευκρίνεια για την αναγνώριση αυτών. Βέβαια το σενάριο αυτό φαίνεται αρκετά απαισιόδοξο αφού οι διαστάσεις του landmark είναι αρκετά μεγάλες, σίγουρα όμως πριν από την υλοποίηση του πρωτοτύπου είναι απαραίτητη η δοκιμή σε ανάλογες συνθήκες με τις πραγματικές.

Όσο αφορά το στάδιο πριν από την ολοκληρωμένη υλοποίηση, μερικά ζητήματα περαιτέρω ανάπτυξης και βελτίωσης μεταξύ άλλων είναι τα ακόλουθα:

- Περαιτέρω υπολογισμός των στοιχείων μηχανών (πχ. φορτίσεις αξόνων σε κόπωση κτλ.)
- Εκτίμηση των ταλαντώσεων στην κατακόρυφη δοκό. Υπολογισμό των μέγιστων επιταχύνσεων - επιβραδύνσεων σε οριζόντια αλλά και σε κατακόρυφη κίνηση, για την ευκρινή αποτύπωση σύμφωνα με την απαραίτητη ταχύτητα φωτογράφισης.
- Υλοποίηση ολοκληρωμένης προσομοίωσης με δυνατότητες, αρχικοποίησης αποθήκης, διαχείρισης εντολών απογραφής, εξομοίωση του συστήματος με ενεργειακό ισολογισμό, μοντέλο εικονικών συσσωρευτών, μοντέλο εικονικών landmarks, μοντέλο εικονικών ολισθήσεων των τροχών σύμφωνα με τυχαία κατανομή με ευαισθησία ανάλογη των επιταχύνσεων. Ακριβέστερη προσέγγιση της ενεργειακής εκτίμησης. Πλήρης ανάπτυξη του αλγορίθμου γενικού ελέγχου και της διαδικασίας εικονικής απογραφής αποθήκης (χωρίς αναγνώριση barcode).
- Προγραμματιστική βελτιστοποίηση των αλγορίθμων δρομολόγησης αξιοποιώντας και διαχειρίζοντας αποδοτικότερα τους πόρους του συστήματος ή και περαιτέρω μελέτη του προβλήματος της δρομολόγησης με επιλογή καταλληλότερων μη ντετερμινιστικών αλγορίθμων.

Τέλος το κόστος του συστήματος όπως έχει ήδη αναφερθεί συμπεριλαμβανομένου του σταθμού εργασίας, του ρομποτικού οχήματος και των landmarks κυμαίνεται στα 5000 €. Το χρηματικό ποσό αυτό είναι απολύτως προσιτό για την εγκατάσταση και αξιοποίηση ενός τέτοιου συστήματος. Τα πλεονεκτήματα δεν περιορίζονται στην μείωση των λειτουργικού κόστους (τουλάχιστον ένας εργαζόμενος) αλλά εστιάζονται ωστόσο στην αξιοπιστία , στη συχνότητα και στην ταχύτατα απογραφής.

8 Παράρτημα

Τεμάχια ή μέτρα	Περιγραφή	Τιμή	Συνολική τιμή	Κατασκευαστής	Μοντέλο
2	AGV motion Motor	130	260	BONFIGLIOLI GROUP	BCS30 24-3000-0,68-b
1	Camera motion Motor	220	220	PITTMAN	PG14000 30,3V 3.7:1, 500 slots encoder
2	AGV motion Encoder 500 slots	32	64	Agilent	HEDS-5120-A12
2	AGV motion Gearbox	55	110	STM	STM-RI-28FL 20:1
2	Camera motion Pulley	10	20	BEA	BEA-20XL037-2F
3	Camera motion Timing belt	10	30	BEA	BEA-BELTING-XL037
4	AGV structure Profile	25	100	item	Profile 8 40x40
2	Camera motion Groove Profile for rail	36	72	item	Groove Profile 8 Al M4-60
2	Camera motion Guide Rail	183	366	item	Linear Guide Rail PS 4-15
16	item Profiles 8 M4 Nuts	0,54	8,64	item	T-Slot Nut 8 Zn M4 Bzp
18	item Profiles 8 M8 Nuts	0,7	12,6	item	T-Slot Nut 8 St M8 Bzp
10	item Profiles 8 Universal Fastening Set (90)	3,25	32,5	item	Unicersal Fastening Set 8 St Bzp
15	Camera motion Groove Profile Screws	0,25	3,75	item	Hexagon Socket Head Cap Screw DIN 912 M4x16
1	Camera motion Cariage	125	125	item	Bearing Carriage PS 4-15
120	Battery for motors and electronics	3	360	Thunder Sky	TS-LP12V40AH
2	Motion wheels	15	30	Tellure Rota	SERIES 73 200
1	Free wheel	25	25	TENTE	2470PJP125P50
2	Chain for Camera motion cables	40	80	igus	Series 06 E2 micro 06-16-018-2
2	Start/end parts for Energy Chain	2	4	igus	Series 06 E2 micro 060-16-12-2 PZ
2	Camera motion Micro switchs	2	4	HIGHLY ELECTRIC	VS10N051C
3	Drive	150	450		
1	Intel atom m/b	80	80	Intel	D945GCLF2D
1	LCD & control buttons	60	60	MATRIX ORBITAL	BLK204A-USB
1	Wireless	40	40	TPLINK	TL-WN422G & TL-ANT2408C
80	Various Screws & nuts	0,25	20		
13	Custom part manufacturing	8	104		
10	Profile holes	0,95	9,5		
1	Emergency stop	5	5		
1	AGV Case	200	200		
8	Charge contact parts	5	40	MULTI CONTACT	EBB8-V0
1	Landmarks Web Camera	30	30	HERCULES	WEBCAM CLASSIC
1	Inventory Camera	450	450	Canon	EOS 500D 18-55mm IS Kit
			3415,99		

9 Βιβλιογραφία

1. **Πατέλης, Δημήτριος.** Αυτοματοποίηση της παραγωγής και χαρακτήρας της εργασίας (σελ.2). 2001.

2. **Ασπράγκαθος, Νίκος.** Μηχατρονικός σχεδιασμός. Εξέλιξη και προοπτικές της τεχνολογίας του μηχανικού. 2003.

3. Warehouse. *Wikipedia.* [Online] 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Warehouse.

4. Cycle count. *Wikipedia.* [Ηλεκτρονικό] 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Cycle_count.

5. Warehouse Kiva Robot System. *Robotics Youngester.* [Ηλεκτρονικό] September 2009. http://robotics.youngester.com/2009/09/warehouse-kiva-robot-system.html.

6. Automated guided vehicle. *Wikipedia.* [Ηλεκτρονικό] 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Automated_guided_vehicle.

7. **TONI, A. DE και TONCHIA, S.** Manufacturing flexibility: A literature review. (σελ. 1598-1601). *INT. J. PROD. RES., 1998, VOL. 36,.* 1998.

8. Flexible manufacturing system. *Wikipedia.* [Ηλεκτρονικό] 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_manufacturing_system.

9. **SIEGWART, ROLAND και NOURBAKHSH, ILLAH R.** *Introduction to Autonomous Mobile Robots (σελ. 30-45).* 2004.

10. **Βλάσσης, Νίκος.** *Χωρικές Περιγραφές και Μετασχηματισμοί.* s.l. : Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείο Κρήτης, 2007.

11. **Fahimi, Farbod.** *Autonomous Robots: Modeling, Path Planning, and Control. (σελ. 6, 163, 197-201).* 2008.

12. **item.** *item Catalog July 2003 Edition (σελ. 61) .*

13. Rolling resistance. *Wikipedia.* [Online] 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance.

14. Friction Factors. *RoyMech.* [Online] 2009. http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm.

15. Μηχανική ισορροπία. *Βικιπαίδεια.* [Ηλεκτρονικό] 2010. http://el.wikipedia.org/Μηχανική_ισορροπία.

16. STM RI SERIES (σελ. 2-36). *STM RIDUTTORI Catalog REV.0 06/97.* 1997.

17. DC SERVO MOTORS PERMAMENT MAGNET. *BONFIGNIOLI COMPONENTS BCS Catalog.* 2006.

18. 14200 SERIES DC SERVO MOTOR (σελ. 68-74), G42A PLANETARY GEARBOX (σελ.85-86), E30 INCREMENTAL OPTICAL ENCODER (σελ. 93-94). *PITTMAN MOTORS Catalog.* 2009.

19. Aperture. *Wikipedia.* [Online] 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Aperture.

20. **Shaw, John.** *John Shaw's Landscape Photography.* 1994.

21. Circles of Confusion for Digital Cameras. *DOFMaster.* [Ηλεκτρονικό] 2010. http://www.dofmaster.com/digital_coc.html.

22. **Greenleaf, Allen R.** *Photographic Optics (σελ. 25-27).* New York : The MacMillan Company, 1950.

23. Angle of view. *Wikipedia.* [Online] 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_view.

24. Canon EOS 500D (Digital Rebel T1i) specifications. *Digital Photography Review.* [Online] 2009. http://www.dpreview.com/reviews/canoneos500d/page2.asp.

25. Canon unveils EOS-1D Mark II. *RobGalbraith.* [Online] 2009. http://www.robgalbraith.com/bins/multi_page.asp?cid=7-6451-6636-6641.

26. **Μυγδαλάς, Αθανάσιος και Μαρινάκης, Ιωάννης.** *ΣΥΝΔΙΑΣΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ (σελ. 49-59, 87, 177-193).* ΧΑΝΙΑ : s.n., 2005.

27. **Μαρινάκης, Ιωάννης και Αθανάσιος, Μυγδαλάς.** Το πρόβλημα του Ταχυδρόμου Αγροτικού Ταχυδρομείου (κεφ. 6.13.2 σελ. 170). *Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας.* 2008.

28. **Μαρινάκης, Ιωάννης και Μυγδαλάς, Αθανάσιος.** *ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ (σελ. 87, 135-138, 177-193).* 2009.

29. Dijkstra's algorithm. *Wikipedia.* [Online] 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra%27s_algorithm.

30. Nonholonomic system. *Wikipedia.* [Ηλεκτρονικό] 2010. http://en.wikipedia.org/wiki/Nonholonomic_system.

31. **Spiegel, Murray R.** *Θεωρητική Μηχανικη (σελ. 170).* 1967.

32. **Park, Sanghyuk, Deyst, John and How, Jonathan P.** *A New Nonlinear Guidance Logic for Trajectory Tracking.* Cambridge, MA, 02139, USA : Massachusetts Institute of Technology, 2004.

33. **Πουλιέζος, Α.** *Περι αυτοματισμού: Συστήματα μιας εισόδου μιας εξόδου. Εκδοχή 3.2 (σελ. 89-93).* 2002.

34. **Avago, Technologies.** *Design of the HCTL-1000's Digital Filter Parameters by the Combination Method.* 2007.

35. **VIRK, G. S.** *Digital ComputerControl Systems.* 1991.