

**ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΕΝΑΕΡΙΩΝ
ΟΧΗΜΑΤΩΝ (UAVs) ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

ΚΑΡΒΕΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

1059748

ACO	Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης μιμούμενος τη λειτουργία της Αποικίας Μυρμηγκιών
AI	Τεχνητή Νοημοσύνη
ANN	Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο
BSs	Σταθμοί Βάσης
CAD	Σχεδίαση με Υπολογιστή
CAS	Σύστημα Αποφυγής Συγκρούσεων
CMOMMT	Συνεργατική Παρατήρηση Πολλών Κινούμενων Στόχων από Πολλαπλά Ρομπότ.
C-Space	Χώρος Διαμόρφωσης
DL	Βαθιά Μάθηση
GPS	Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης
GUI	Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη
HMD	Κράνος Επικοινωνίας Μικτής Πραγματικότητας
IIoT	Βιομηχανικό Διαδίκτυο Πραγμάτων
LoS	Οπτική Επαφή
ML	Μηχανική Μάθηση
MR	Μικτή Πραγματικότητα
MUFT	Πρώτα Αυτά που δεν έχουν Εξερευνηθεί
PFM	Μοντέλο Πιθανοτικών Πεδίων
PRM	Πιθανοτικός Χάρτης Διαδρομής
RRT	Ταχύ Εξερευνητικό Τυχαίο Δέντρο

UAV	Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα
VD	Διάγραμμα Voronoi

Τα Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs) είναι μικρά και ευέλικτα εναέρια ρομποτικά συστήματα που βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Λόγω των πλεονεκτημάτων της εύκολης χρήσης, της οικονομικής συντήρησης και της ικανότητάς τους να αιωρούνται, μπορούν να είναι χρήσιμα σε πολλές εφαρμογές της κοινωνίας. Εκτός όμως από αυτές τις εφαρμογές, τα ντρόουνς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εναέρια παρακολούθηση, παρακολούθηση της παραγωγής και επιθεωρήσεις για την ασφάλεια των μηχανημάτων και των εργατών, γι' η ενσωμάτωσή τους στην παραγωγή και τη βιομηχανία μπορεί να προσφέρει πολλά οφέλη, αν και μέχρι στιγμής βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο. Η τεχνολογία που εφαρμόζεται στα UAVs προσφέρει νέες ευκαιρίες και επιτρέπει καινοτόμα επιχειρηματικά μοντέλα στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0. Ωστόσο, η ένταξη τους στη βιομηχανία παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις. Μία από αυτές είναι η κίνηση των ρομποτικών βραχιόνων και των μηχανημάτων, που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην πλοήγησή του μέσα σε ένα εργοστάσιο. Ένα άλλο πρόβλημα που πρέπει να ξεπεραστεί είναι η χαμηλή ακρίβεια των συμβατικών συστημάτων GPS σε εσωτερικούς χώρους. Οι παραγωγικές διαδικασίες πραγματοποιούνται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους, με αποτέλεσμα τα ντρόουνς σε τέτοιες συνθήκες να απαιτούν πιο προηγμένες τεχνολογίες, όπως ανιχνευτές λέιζερ για ταυτόχρονη χαρτογράφηση του χώρου και εντοπισμό αντικειμένων, ραδιοσήματα εξαιρετικά ευρείας ζώνης ή πιο ακριβές λύσεις, όπως συστήματα καταγραφής κίνησης. Η ενσωμάτωση των ντρόουνς στη βιομηχανία είναι χρήσιμη στη διαχείριση αποθεμάτων, στη μεταφορά υλικών και ανταλλακτικών και στην επιθεώρηση και συντήρηση εξαρτημάτων. Επίσης μπορούν να λειτουργήσουν και ως συσκευές συλλογής δεδομένων, συγκεντρώνοντας πληροφορίες από διάφορες πηγές για την υποστήριξη της προληπτικής συντήρησης των μηχανών ενός εργοστασίου. Επιπλέον, ενισχύουν την επικοινωνία μεταξύ των μηχανικών παρέχοντας ασύρματα δίκτυα ως κινητούς σταθμούς βάσης (BSs). Επιπλέον μπορούν να κινηθούν για να διατηρήσουν την οπτική επαφή (LoS) με τους επίγειους κόμβους, βελτιώνοντας σημαντικά την απόδοση του δικτύου σε σύγκριση με τις επίγειες επικοινωνίες.

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση δύο συστημάτων που βασίζονται στο Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IIoT) για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και τη συλλογή δεδομένων σε στρατηγικά σημεία της παραγωγής. Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση. Το κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει τις αρχιτεκτονικές των συστημάτων και τις προτεινόμενες μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη τους. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα μέσα που θα χρησιμοποιηθούν κατά την εφαρμογή των συστημάτων. Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται και συγκρίνονται τα δύο αυτά συστήματα για ένα συγκεκριμένο βιομηχανικό περιβάλλον. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έγινε με βάση τομείς όπως η ενσωμάτωση των UAVs στη βιομηχανία, ο σχεδιασμός πορείας των UAVs και η αποφυγή συγκρούσεων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν αναγνωρισμένες επιστημονικές βάσεις δεδομένων, όπως το Google Scholar, το ScienceDirect, το IEEE Xplore και το Scopus με βάση το οποίο δημιουργήθηκε και ένα διάγραμμα VOS.

Ο όρος Βιομηχανία 4.0 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 2011 στην έκθεση Hannover Messe στη Γερμανία και αναφέρεται στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση. Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση βασίζεται στις προηγούμενες (1η, 2η και 3η βιομηχανική επανάσταση), αξιοποιώντας την ευρεία διαθεσιμότητα των ψηφιακών τεχνολογιών που αναπτύχθηκαν στην Ψηφιακή Επανάσταση, οι οποίες μειώνουν την απόσταση μεταξύ των ψηφιακών, φυσικών και βιολογικών κόσμων και επιταχύνουν τον ρυθμό της τεχνολογικής αλλαγής. Ο κύριος στόχος της Βιομηχανίας 4.0 είναι να τοποθετήσει τον άνθρωπο στο επίκεντρο του συστήματος εργασίας. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει συνεργασία μεταξύ αυτοματοποιημένων διαδικασιών και χειροκίνητων εργασιών σε υβριδικά συστήματα. Επίσης, αλλάζει ο τρόπος παραγωγής των προϊόντων, δίνοντας έμφαση στη μείωση του κόστους και την αύξηση της αποδοτικότητας. Πρόκειται για έναν συνδυασμό του εικονικού και φυσικού κόσμου της παραγωγής, των μηχανών, των συστημάτων και των αισθητήρων, ώστε να επικοινωνούν μεταξύ τους, να μοιράζονται πληροφορίες και να ελέγχουν ο ένας τον άλλον αυτόνομα.

Η ενσωμάτωση των UAVs στη βιομηχανία έχει κερδίσει έδαφος τα τελευταία χρόνια. Οι εφαρμογές τους επεκτείνονται στις διαδικασίες συναρμολόγησης και παραγωγής,

στις λειτουργίες επισκευής και συντήρησης, στην παράδοση, στην επιτήρηση αλλά και άλλες. Εκτός από αυτές τις εφαρμογές, μπορούν επίσης να συμβάλλουν στη βελτίωση και βελτιστοποίηση των βιομηχανικών διαδικασιών, καθώς και στην ενίσχυση της αποδοτικότητας της παραγωγής. Το χαρακτηριστικό της αυτόματης πλοήγησης των ντρόουν ενισχύει τις δυνατότητές τους στη συλλογή και ανάλυση δεδομένων. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κινητοί αισθητήρες, καθώς μπορούν να αιωρούνται και να πλοηγούνται αυτόνομα σε αποθηκευτικούς χώρους, συλλέγοντας και μεταδίδοντας δεδομένα σχετικά με τις διαδικασίες που μπορεί να συμβαίνουν εκείνη τη στιγμή. Η αυτόνομη πτήση επιτυγχάνεται αν έχουν αίσθηση τη θέσης τους στο χώρο καθώς και με τη χρήση χαρτογράφησης για να ακολουθούνται με ακρίβεια προκαθορισμένες διαδρομές μέσα στο χώρο όπου θα γίνει η πτήση. Επίσης, θα πρέπει να χρησιμοποιούν έξυπνους αισθητήρες που ελέγχουν και παρακολουθούν την πτήση, ενώ η καθοδήγηση γίνεται μέσω συστημάτων υπολογιστικής όρασης σε συνδυασμό με προγράμματα ανίχνευσης αντικειμένων και αποφυγής συγκρούσεων. Η προσαρμοστικότητα της αυτόνομης πτήσης μπορεί να βελτιωθεί μέσω της χρήσης της τεχνητής νοημοσύνης ή αλγορίθμων.

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) αναφέρεται στην ευφυΐα που παρουσιάζουν οι μηχανές. Οι μηχανές είναι ικανές να εκτελούν εργασίες που προσομοιάζουν τη λειτουργία του ανθρώπινου νου. Ορισμένες από αυτές περιλαμβάνουν τη μάθηση, την επίλυση προβλημάτων, την κατανόηση της ανθρώπινης ομιλίας, τον ανταγωνισμό σε στρατηγικά παιχνίδια υψηλού επιπέδου, τα αυτοοδηγούμενα οχήματα, την έξυπνη δρομολόγηση στα δίκτυα παράδοσης περιεχομένου, τις στρατιωτικές προσομοιώσεις και την ερμηνεία σύνθετων δεδομένων. Ορισμένοι από τους τομείς στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί η AI είναι η πληροφορική, τα μαθηματικά, η ψυχολογία, η γλωσσολογία, η φιλοσοφία, η νευροεπιστήμη και η τεχνητή ψυχολογία. Η μηχανική μάθηση (ML) και η βαθιά μάθηση (DL) αποτελούν υποπεδία της τεχνητής νοημοσύνης. Η ML επιτρέπει στους υπολογιστές να δημιουργούν μοντέλα βασισμένα σε εμπειρίες και να κάνουν ακριβείς προβλέψεις για μελλοντικά γεγονότα, χωρίς να είναι πλήρως προγραμματισμένοι. Οι κύριες κατηγορίες της ML διακρίνονται σε επιβλεπόμενη, μη επιβλεπόμενη και ενισχυτική μάθηση. Η επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση χρησιμοποιεί ένα σύνολο δεδομένων που περιλαμβάνει ζεύγη εισόδου-εξόδου. Σε αυτό το πλαίσιο, τα δεδομένα εισόδου συνδέονται με γνωστές, επιθυμητές εξόδους. Ο στόχος του μοντέλου είναι να μάθει τη συσχέτιση μεταξύ εισόδων και εξόδων έτσι

ώστε να μπορεί να προβλέπει τις εξόδους για νέες, αθέατες εισόδους. Η μη επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση χρησιμοποιεί ένα μοντέλο, το οποίο εκπαιδεύεται χωρίς να έχει συγκεκριμένες ετικέτες ή γνωστές απαντήσεις στα δεδομένα. Δηλαδή, τα δεδομένα δεν έχουν προκαθορισμένες εξόδους και το μοντέλο καλείται να βρει μοτίβα ή δομές μέσα σε αυτά χωρίς καθοδήγηση. Στην ενισχυτική μάθηση, το μοντέλο μαθαίνει να παίρνει αποφάσεις αλληλοεπιδρώντας με ένα περιβάλλον για να μεγιστοποιήσει κάποιο αποτέλεσμα. Σε αντίθεση με την επιβλεπόμενη μάθηση, όπου το μοντέλο μαθαίνει από δεδομένα με προκαθορισμένες σωστές απαντήσεις, στην ενισχυτική μάθηση μαθαίνει μέσω δοκιμής και σφάλματος.

Η Βαθιά Μάθηση (DL) αποτελεί υποσύνολο της Μηχανικής Μάθησης (ML) και χαρακτηρίζεται από τη χρήση πολλαπλών μη γραμμικών επιπέδων επεξεργασίας, που βασίζεται στη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN). Ένα απλό νευρωνικό δίκτυο μπορεί να έχει δύο σύνολα νευρώνων: ένα που λαμβάνει σήματα εισόδου και ένα άλλο που στέλνει σήματα εξόδου. Ωστόσο, η Βαθιά Μάθηση συνήθως χρησιμοποιεί μια σειρά από πολλαπλά επίπεδα μη γραμμικών μονάδων επεξεργασίας για την εξαγωγή και τη μετατροπή χαρακτηριστικών. Η DL παράγει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από τις παραδοσιακές μεθόδους ML. Παρόλα αυτά, μια πρόκληση στην κατασκευή δικτύων DL είναι ο καθορισμός του μεγέθους των κρυφών επιπέδων των νευρωνικών δικτύων. Η υποεκτίμηση του αριθμού των κρυφών επιπέδων μπορεί να οδηγήσει σε κακή προσέγγιση, ενώ η υπερεκτίμηση μπορεί να προκαλέσει υπερπροσαρμογή και σφάλματα γενίκευσης. Η Βαθιά Μάθηση, σε αντίθεση με την παραδοσιακή Μηχανική Μάθηση, απαιτεί μεγάλο όγκο δεδομένων για την εκπαίδευση του δικτύου. Πολλοί τομείς, όπως η αναγνώριση εικόνας, η αναγνώριση ομιλίας και η επεξεργασία φυσικής γλώσσας, έχουν επωφεληθεί σημαντικά από τα μοντέλα DL.

Ο σχεδιασμός διαδρομής είναι η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης ή πιο αποτελεσματικής διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσει ένα UAV, για να φτάσει από μια αρχική θέση σε έναν τελικό στόχο. Η διαδρομή δημιουργείται συνδέοντας διαφορετικές τοποθεσίες σε ένα περιβάλλον, όπως γράφημα, λαβύρινθος ή δρόμος, και πρέπει να είναι απαλλαγμένη από συγκρούσεις με τα γύρω εμπόδια. Ο τρόπος για το σχεδιασμό διαδρομής για τα UAVs εξαρτάται από τον τύπο του περιβάλλοντος και τον αλγόριθμο. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν αν το περιβάλλον είναι στατικό ή δυναμικό, τοπικό ή παγκόσμιο, και πλήρες ή ευριστικό. Όταν το περιβάλλον είναι στατικό δεν περιλαμβάνει κινούμενα αντικείμενα ή εμπόδια εκτός από το ντρόουν, ενώ

στο δυναμικό σχεδιασμό πορείας, το περιβάλλον περιλαμβάνει κινούμενα και μεταβαλλόμενα αντικείμενα, όπως κινούμενα εμπόδια. Η διαφορά μεταξύ τοπικού και παγκόσμιου σχεδιασμού πορείας έγκειται στο αν το περιβάλλον είναι πλήρως γνωστό στον αλγόριθμο ή όχι. Στον παγκόσμιο σχεδιασμό πορείας, το ντρόουν αρχίζει να κινείται όταν η διαδρομή από το αρχικό σημείο μέχρι τον στόχο έχει πλήρως σχεδιαστεί. Αντίθετα, στον τοπικό σχεδιασμό πορείας, το περιβάλλον είναι άγνωστο και η πλοήγηση γίνεται ενώ το ρομπότ κινείται, λαμβάνοντας δεδομένα από τοπικούς αισθητήρες.

Το πρόβλημα του σχεδιασμού πορείας για UAVs μπορεί να θεωρηθεί πρόβλημα βελτιστοποίησης και πρέπει να πληροί ορισμένα κριτήρια. Αρχικά, το μήκος της διαδρομής πρέπει να είναι η απόσταση από το σημείο εκκίνησης έως το τελικό σημείο του στόχου. Επιπλέον, το UAV πρέπει να είναι βέλτιστο, δηλαδή αποδοτικό από άποψη κόστους, χρόνου και ενέργειας. Κατά τον σχεδιασμό πορείας, το UAV πρέπει να είναι αποδοτικό σε κόστος. Το συνολικό κόστος περιλαμβάνει το κόστος μεταξύ δύο κόμβων, το κόστος καυσίμου, το κόστος φόρτισης μπαταρίας, το κόστος μνήμης, καθώς και το κόστος λογισμικού και υλικού των UAVs. Εκτός από την αποδοτικότητα κόστους, σημαντική είναι και η αποδοτικότητα χρόνου, δηλαδή το UAV να μπορεί να καλύψει την επιχείρηση από το αρχικό σημείο έως τον στόχο με τα εμπόδια στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη χρήση της βέλτιστης και συντομότερης διαδρομής. Επιπλέον, ο βέλτιστος σχεδιασμός πορείας πρέπει να προσφέρει ενεργειακή αποδοτικότητα, που σημαίνει την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας από τα UAVs, τόσο σε καύσιμο και μπαταρία, όσο και στην ενέργεια που απαιτείται για την εξομάλυνση της τροχιάς κατά τις επιχειρήσεις. Μια ακόμη πρόκληση είναι η ανθεκτικότητα. Κατά τον σχεδιασμό πορείας, το UAV δεν πρέπει να επηρεάζεται από σφάλματα που μπορεί να υπάρξουν από αισθητήρες θέσης, σφάλματα περιστροφικής κίνησης και σφάλματα γραμμικής κίνησης. Επίσης, το UAV κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού πορείας πρέπει να μπορεί να ανιχνεύει συγκρούσεις ώστε να αποφεύγονται οι φυσικές ζημιές.

Η διαδικασία σχεδιασμού διαδρομής βασίζεται σε δύο σημαντικά βήματα: την αναπαράσταση/οπτικοποίηση του UAV σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον για τον προσδιορισμό αντικειμένων και εμποδίων και την ανάπτυξη ενός χάρτη λαμβάνοντας υπόψη τη διαμόρφωση και τις απαιτήσεις του UAV σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον. Οι τεχνικές σχεδιασμού πορείας UAV χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη

κατηγορία, που βασίζεται στο χώρο διαμορφώσεων (C-Space), περιλαμβάνει μεθόδους όπως η διάσπαση σε κυψέλες, οι χάρτες δρόμων, τα δυναμικά πεδία και τα διαγράμματα Voronoi. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τεχνικές συντεταγμένων και μη συντεταγμένων, οι οποίες περιλαμβάνουν αλγόριθμους όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, τα εξελικτικά μοντέλα, η προσομοίωση αναθέρμανσης και η βελτιστοποίηση με αποικίες μυρμηγκιών (ACO), μεταξύ άλλων. Σε οποιαδήποτε κατηγορία και εάν ανήκει ένας αλγόριθμος, για να είναι αποτελεσματικός πρέπει να πληροί τέσσερις προϋποθέσεις. Πρώτον, είναι απαραίτητο να υπάρχει μια τεχνική σχεδιασμού κίνησης που να μπορεί πάντα να βρίσκει τη βέλτιστη διαδρομή σε ρεαλιστικά στατικά περιβάλλοντα. Δεύτερον, πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δυναμικά περιβάλλοντα με κάποιες αλλαγές. Τρίτον, πρέπει να είναι συμβατός με την επιλεγμένη προσέγγιση που χρησιμοποιείται κάθε φορά για να υπολογιστεί και να σχεδιαστεί η διαδρομή που θα ακολουθηθεί. Τέταρτον, με τη χρήση αυτού του αλγορίθμου πρέπει να ελαχιστοποιείται η πολυπλοκότητα, η αποθήκευση δεδομένων και ο χρόνος υπολογισμού.

Οι τεχνικές αναπαράστασης περιλαμβάνουν τις τεχνικές βασισμένες στη δειγματοληψία και τις τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης. Η πρώτη κατηγορία απαιτεί ως προϋπόθεση την ύπαρξη μαθηματικής αναπαράστασης που περιγράφει τον χώρο εργασίας. Η τεχνική του γραφήματος διάσπασης κυψελών χωρίζει τον ελεύθερο χώρο διαμορφώσεων (c-space) σε διαφορετικά σύνολα κυψελών ή περιοχών, ώστε να υπολογίζεται εύκολα μια ασφαλής διαδρομή μεταξύ δύο σημείων εντός της ίδιας κυψέλης ή μεταξύ γειτονικών κυψελών. Μετά από αυτό, οι κυψέλες οργανώνονται διαδοχικά. Ο κατακερματισμός των κυψελών μπορεί να γίνει με τη χρήση δύο αλγορίθμων: του ακριβούς κατακερματισμού κυψελών και του τροποποιημένου προσαρμοστικού κατακερματισμού κυψελών. Η μέθοδος των roadmaps περιλαμβάνει την κατασκευή και την αναζήτηση. Στην πρώτη φάση, την κατασκευή, καθορίζονται οι καμπύλες του δικτύου στο τρισδιάστατο περιβάλλον για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας του ελεύθερου χώρου διαμορφώσεων. Το γράφημα της συνδεσιμότητας του ελεύθερου χώρου θα δημιουργηθεί πριν οι αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομών εργαστούν για να βρουν τη διαδρομή. Μετά την κατασκευή των roadmaps, επιλύονται τα αρχικά και τελικά σημεία διαμόρφωσης στη δεύτερη φάση. Οι απαντήσεις στις αναζητήσεις διαδρομής UAV (μη επανδρωμένων αεροσκαφών) μεταξύ των αρχικών και τελικών σημείων μπορούν να δοθούν με τη συγχώνευση

καμπυλών. Η τεχνική των οδικών χαρτών (roadmap) επιλύει τα ερωτήματα σχεδιασμού διαδρομών UAV σε ένα στατικό περιβάλλον. Η εξομάλυνση της τελικής διαδρομής των UAV μπορεί να γίνει με αλγόριθμους roadmaps, όπως οι RRT (Ταχύ Τυχαίο Δέντρο Εξερεύνησης), A*, RRT*. Ο αλγόριθμος PRM (Πιθανοτικός Οδικός Χάρτης) είναι χρήσιμος για το σχεδιασμό κίνησης και περιλαμβάνει φάσεις εκμάθησης και αναζήτησης. Στη φάση εκμάθησης, δημιουργείται ένα γράφημα roadmap με τυχαία δειγματοληψία σημείων, που ονομάζονται κόμβοι, από τον ελεύθερο χώρο του περιβάλλοντος και συνδέονται με γειτονικούς κόμβους εάν υπάρχει διαδρομή χωρίς σύγκρουση μεταξύ τους. Κατά τη φάση αναζήτησης, καθορίζονται οι αρχικοί και τελικοί κόμβοι και χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του Dijkstra για να βρει τη συντομότερη διαδρομή. Ο αλγόριθμος PRM θεωρείται πιθανοτικά πλήρης όταν η πιθανότητα μη εύρεσης διαδρομής όταν αυτή υπάρχει πλησιάζει το μηδέν.

Ο αλγόριθμος του Dijkstra χρησιμοποιείται για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής από ένα αρχικό έως ένα στόχο κόμβο σε ένα γράφημα με βάρη. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται ξεκινώντας με τον αρχικό κόμβο και αναπτύσσει μια υπολογισμένη απόσταση (ή κόστος) για κάθε κόμβο που αρχικά είναι άπειρη (ή πολύ μεγάλη). Ενημερώνει σταδιακά την απόσταση για τους γειτονικούς κόμβους, επιλέγοντας πάντα τον κόμβο με τη μικρότερη γνωστή απόσταση που δεν έχει ακόμη επεξεργαστεί πλήρως. Ο αλγόριθμος συνεχίζει μέχρι να βρει τις συντομότερες διαδρομές για όλους τους κόμβους ή να έχει επεξεργαστεί όλους τους κόμβους, υπολογίζοντας τη συντομότερη διαδρομή από την πηγή στους κόμβους που είναι πιο κοντά στην πηγή. Στη συνέχεια, βρίσκει τον επόμενο κοντινότερο κόμβο διατηρώντας τους νέους κόμβους σε μια σειρά προτεραιότητας με ελάχιστο κόστος και αποθηκεύει μόνο έναν ενδιάμεσο κόμβο ώστε να βρεθεί μόνο μία συντομότερη διαδρομή. Ο αλγόριθμος του Dijkstra ανήκει στους αλγορίθμους βασισμένους σε κόμβους και χρησιμοποιεί έναν κατακερματισμένο γράφημα. Ξεκινά να αναλύει από την προοπτική της μηχανής αναζήτησης και μοιράζεται την ίδια ιδιότητα με άλλους αλγορίθμους, καθώς εξερευνά ένα σύνολο κόμβων (κυψελών) στον χάρτη, όπου οι διαδικασίες ανίχνευσης και επεξεργασίας πληροφοριών έχουν ήδη εκτελεστεί.

Στους αλγορίθμους βασισμένους σε κόμβους ανήκει επίσης ο αλγόριθμος A*, ο οποίος χρησιμοποιείται για σχεδιασμό πορείας ενός ρομπότ. Χρησιμοποιείται κυρίως σε στατικά περιβάλλοντα. Χρησιμοποιεί το δέντρο διαδρομών με το χαμηλότερο κόστος από το αρχικό σημείο μέχρι το τελικό στόχο. Η διαδρομή που δημιουργείται θα είναι η

βέλτιστη και συντομότερη με τη χρήση ενός χάρτη πλέγματος και θα είναι επίσης απαλλαγμένη από συγκρούσεις υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες ανέμου και απόδοσης πτήσης. Η συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος A^* είναι:

$$f(n)=g(n)+h(n)$$

όπου, $g(n)$ είναι το πραγματικό κόστος από τον κόμβο n έως τον αρχικό κόμβο και $h(n)$ είναι το κόστος της βέλτιστης διαδρομής από τον τελικό κόμβο έως τον n . Ανήκει στους αλγόριθμους που χρησιμοποιούν ευριστική συνάρτηση για τον υπολογισμό της συντομότερης διαδρομής. Οι ευριστικές συναρτήσεις που μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτός ο αλγόριθμος είναι η Ευκλείδεια απόσταση, η απόσταση Μανχάταν και η Διαγώνια απόσταση. Μια παραλλαγή του αλγορίθμου A^* είναι ο αλγόριθμος Θ^* , ο οποίος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε στατικούς περιβάλλοντα και έχει την ίδια συνάρτηση κόστους με διαφορετική ευριστική συνάρτηση. Η διαφορά μεταξύ του Θ^* και του A^* είναι η συνάρτηση γραμμής οράματος που εκτελεί ο αλγόριθμος Θ^* .

Η μέθοδος πεδίου δυναμικού (PFM) είναι μία από τις πιο χρησιμοποιούμενες τεχνικές τοπικού σχεδιασμού διαδρομών στην κατηγορία των πεδίων δυναμικού και εφαρμόζεται σε δυναμικά περιβάλλοντα. Στη διάρκεια αυτής της μεθόδου, το ρομπότ θεωρείται ως ένα σωματίδιο που κινείται υπό την επίδραση ενός τεχνητού δυναμικού που παράγεται από τη διαμόρφωση του στόχου και τα εμπόδια. Η διαμόρφωση του στόχου έχει ελκυστικό δυναμικό, ενώ τα εμπόδια έχουν αποτρεπτικό δυναμικό. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, ένα αντικείμενο μπορεί να παρουσιαστεί ως σωματίδιο που είναι ικανό να κινείται υπό τον έλεγχο των πεδίων δυναμικού γύρω από τον χώρο διαμόρφωσης (c-space). Το μειονέκτημα της συμβατικής μεθόδου PFM είναι ότι το UAV μπορεί να κολλήσει πριν φτάσει στον στόχο. Για αυτόν τον λόγο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ιεραρχική μέθοδος PFM, στην οποία έχει προστεθεί κάποια περιστροφική δύναμη μεταξύ των UAVs που μειώνει τα τοπικά ελάχιστα και τα προβλήματα σύγκρουσης μεταξύ των UAVs.

Η δεύτερη κατηγορία για την αναπαράσταση του UAV σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον είναι οι τεχνικές Τεχνητής Νοημοσύνης (AI). Υπάρχουν τρεις τύποι τεχνικών AI που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό διαδρομών UAV. Ο πρώτος είναι η τεχνική ευρετικής αναζήτησης (Heuristic-search). Αυτή χρησιμοποιεί τη μέθοδο εκτίμησης κόστους από το αρχικό σημείο προς το στόχο για έναν βέλτιστο

σχεδιασμό διαδρομής UAV. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει έναν απληστικό αλγόριθμο (greedy) και έναν γενετικό αλγόριθμο (genetic). Ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με λειτουργίες όπως η διασταύρωση και η επιλογή διαδρομών. Ο δεύτερος τύπος τεχνικών ΑΙ είναι οι τεχνικές άμεσης δυνάμεως (Brute-force). Αυτές είναι αποτελεσματικές, δεν απαιτούν ειδικές γνώσεις για το πρόβλημα και λειτουργούν σε μικρό αριθμό πιθανών καταστάσεων. Οι απαιτήσεις περιλαμβάνουν μια αρχική κατάσταση, την περιγραφή μιας επιθυμητής κατάστασης και έγκυρους τελεστές. Οι τεχνικές τοπικής αναζήτησης είναι ο τρίτος τύπος τεχνικών ΑΙ για τον σχεδιασμό διαδρομών UAV. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται για την εύρεση μιας ακριβούς και βέλτιστης λύσης εφαρμόζοντας τοπικές αλλαγές. Εξασφαλίζουν πάντα μια λύση ακόμα και όταν η διαδρομή διακόπτεται από πολλά εμπόδια κατά τη διάρκεια της αναζήτησης.

Εκτός από τον σχεδιασμό διαδρομής, το UAV πρέπει να είναι ικανό να αποφεύγει οποιοδήποτε στατικό ή δυναμικό εμπόδιο που υπάρχει ή μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια της πτήσης του. Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητο ένα σύστημα αποφυγής συγκρούσεων. Ένα σύστημα αποφυγής συγκρούσεων (CAS) περιλαμβάνει την παρατήρηση, την ανίχνευση και την αποφυγή συγκρούσεων. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την παρατήρηση, κατά την οποία το σύστημα παρακολουθεί το περιβάλλον του. Όταν ένα εμπόδιο, εισέλθει στη διαδρομή του, η φάση ανίχνευσης αξιολογεί τον σχετικό κίνδυνο. Μετά από αυτή την αξιολόγηση, η μονάδα αποφυγής συγκρούσεων εκτελεί υπολογισμούς για να προσδιορίσει την απαραίτητη εκτροπή από την αρχική διαδρομή για να αποτρέψει μια ενδεχόμενη σύγκρουση. Μόλις ολοκληρωθούν αυτοί οι υπολογισμοί, το σύστημα εκτελεί τη σχετική ενέργεια για να αποφύγει επιτυχώς το εμπόδιο. Υπάρχουν περισσότερες από μία μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποφυγή συγκρούσεων και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν.

Η πρώτη κατηγοριοποίηση βασίζεται στην αντίληψη και την δράση. Η κατηγοριοποίηση ξεκινά από την αντίληψη και συνεχίζει με τη δράση. Η αντίληψη αναφέρεται στην ανίχνευση των εμποδίων, βασίζεται στη χρήση αισθητήρων και αποτελεί την αρχή κάθε συστήματος αποφυγής συγκρούσεων. Για αυτό το βήμα, χρησιμοποιούνται αισθητήρες για την αντίληψη του περιβάλλοντος και την ανίχνευση των εμποδίων. Οι αισθητήρες μπορούν να είναι είτε ενεργοί είτε παθητικοί. Οι ενεργοί αισθητήρες διαθέτουν τη δική τους πηγή που μεταδίδει φως ή εκπέμπει κύμα και

διαβάζουν την ανακλώμενη διασπορά. Αντίθετα, οι παθητικοί αισθητήρες απλώς διαβάζουν την ενέργεια που εκπέμπεται από το αντικείμενο, από μια άλλη πηγή, όπως το ηλιακό φως, που αντανακλάται από το αντικείμενο. Μια δράση για την αποφυγή συγκρούσεων ανήκει σε μία από τις τέσσερις κατηγορίες: γεωμετρική, η οποία βασίζεται στη χρήση δεδομένων θέσης και ταχύτητας τόσο του UAV όσο και των εμποδίων. Στρατηγική πεδίων δυνάμεων, στην οποία χρησιμοποιούνται οι ελκυστικές και απωθητικές ηλεκτρικές δυνάμεις μεταξύ φορτισμένων αντικειμένων για την πρόληψη συγκρούσεων. Η Τρίτη μέθοδος είναι η βελτιστοποιημένη προσέγγιση που περιλαμβάνει τη χρήση προϋπάρχουσων πληροφοριών σχετικά με τις παραμέτρους των εμποδίων για την βελτιστοποίηση της διαδρομής του UAV. Χρησιμοποιείται για την εύρεση των καλύτερων ή σχεδόν βέλτιστων λύσεων για τον σχεδιασμό διαδρομών και τα χαρακτηριστικά κίνησης κάθε drone σε σχέση με άλλα drones και εμπόδια. Τέλος είναι οι μέθοδοι αντίληψης και αποφυγής, οι οποίες στοχεύουν στη μείωση του υπολογιστικού κόστους διασφαλίζοντας γρήγορες αντιδράσεις. Απλοποιούν τη διαδικασία αποφυγής συγκρούσεων εστιάζοντας στην ατομική ανίχνευση και αποφυγή εμποδίων για κάθε ντρόουν.

Η δεύτερη κατηγοριοποίηση των τεχνικών αποφυγής συγκρούσεων βασίζεται στην κατανομή τους σε ολοκληρωτική σχεδίαση διαδρομής και τοπική σχεδίαση διαδρομής. Για το σχεδιασμό της ολοκληρωτικής διαδρομής, ο φορέας συνεχώς αντιλαμβάνεται και τροποποιεί τον χάρτη του περιβάλλοντος. Μετά την ενημέρωση του χάρτη, δημιουργείται μια ιδανική διαδρομή χωρίς συγκρούσεις, χρησιμοποιώντας τον αρχικό στόχο ως σημείο αναφοράς. Στη συνέχεια, αυτή η προγραμματισμένη διαδρομή τίθεται σε εφαρμογή. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η επιτυχής εκτέλεση εξαρτάται από την ύπαρξη ενός εξαιρετικά ακριβούς χάρτη του περιβάλλοντος, κάτι που απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους για τους απαραίτητους υπολογισμούς. Στον τοπικό σχεδιασμό, το ρομπότ χρησιμοποιεί αισθητήρες για να συλλέγει πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον του και να αντιδρά άμεσα σε αυτές. Αυτή η προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα της γρήγορης αντίδρασης σε ξαφνικές αλλαγές του περιβάλλοντος.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι αρχιτεκτονικές των συστημάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την πλοήγηση ενός UAV σε εσωτερικό περιβάλλον. Οι αρχιτεκτονικές των συστημάτων έχουν την ίδια δομή, με την διαφορά να βρίσκεται στη χρήση των δύο διαφορετικών αλγορίθμων. Το πρώτο βήμα είναι η δημιουργία ενός

τοπικού συστήματος καθοδήγησης για την πλοήγηση του drone. Αυτή η προσέγγιση προήλθε από τη χαμηλή ακρίβεια του GPS σε εσωτερικά περιβάλλοντα, όπως το εργοστάσιο. Ως αποτέλεσμα, θα χρησιμοποιηθούν και στις δύο περιπτώσεις 3D εικονικές αναπαραστάσεις του εργοστασίου. Για τη δημιουργία των σημείων αναφοράς και την χαρτογράφηση του χώρου για την πλοήγηση του ντρόουν, πρέπει να γίνει πρώτα με τη χρήση ενός αλγόριθμου το voxelization του εργοστασίου. Αυτή η διαδικασία είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Η επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων και του drone θα επιτευχθεί μέσω Wi-Fi. Το ντρόουν, το οποίο είναι επίσης το ίδιο και για τα δύο συστήματα, πρέπει να θα συνδεθεί με το ίδιο τοπικό δίκτυο με τον υπολογιστή που δημιουργεί τη διαδρομή. Μόλις η σύνδεση εγκατασταθεί, οι διαδρομές που θα έχουν δημιουργηθεί θα αναπαρίστανται ως σημεία. Κάθε σημείο αποτελείται από τις συντεταγμένες του στους τρεις άξονες. Η μεταφορά των σημείων στο drone θα γίνει με τη μορφή αρχείου txt.

Το πρώτο βήμα και για τις δύο προσομοιώσεις είναι η δημιουργία του εικονικού εργοστασίου, που έχει μεγάλη σημασία, καθώς θα χρησιμοποιηθεί ως ο 3D χάρτης για την πλοήγηση του UAV. Ο χάρτης είναι ο ίδιος και για τις δύο περιπτώσεις. Μετά τη δημιουργία του περιβάλλοντος του ντρόουν με τη χρήση λογισμικού 3D CAD όπως το Dassault CATIA, το δεύτερο βήμα είναι το voxelization του χάρτη. Το voxelization αναφέρεται στη διαδικασία που εκφράζουν έναν 3D όγκο χρησιμοποιώντας voxels. Τα voxels, ή volumetric pixels, είναι 3D pixels με κυβική μορφή. Αυτή η διαδικασία διακρίνει τον χώρο σε ελεύθερο, στον οποίο το ντρόουν μπορεί να πετάξει, και κατειλημμένο, που πρέπει να αποκλείεται από την πλοήγηση του UAV. Η διαδικασία του voxelization επιτρέπει στις αλγόριθμους σχεδιασμού διαδρομής να εφαρμόσουν μια μέθοδο αναζήτησης, υπολογίζοντας έτσι την βέλτιστη διαδρομή για το ντρόουν. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ο ίδιος το μέγεθος των voxels. Ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι το μέγεθος των voxels έρχεται σε αντίθεση με το επίπεδο λεπτομέρειας και το χρόνο επεξεργασίας που θα χρειαστεί για την προσομοίωση. Η διαδικασία του voxelization περιγράφεται μέσα στη διπλωματική με τη χρήση ενός ψευδοκώδικα. Μετά το voxelization, εφαρμόζεται μια ζώνη ασφαλείας γύρω από τους τεχνικούς του εργοστασίου και το UAV για να εξασφαλιστεί η ασφάλειά τους.

Για τη σχεδίαση των δύο διαδρομών θα χρησιμοποιηθούν οι αλγόριθμοι A^* και Θ^* . Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι βρίσκουν συνεχώς τη βέλτιστη διαδρομή. Η βέλτιστη διαδρομή προσδιορίζεται μέσω μιας ευρετικής συνάρτησης που

χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του κόστους ή της απόστασης από έναν αρχικό κόμβο μέχρι τον τελικό κόμβο. Ο αλγόριθμος A^* επιλέχθηκε λόγω της ευκολίας υλοποίησης, της επαρκούς ακρίβειας στη δημιουργία διαδρομών και του λογικού χρόνου δημιουργίας διαδρομών. Ο αλγόριθμος Theta* (Theta star), ο οποίος είναι μια παραλλαγή του A^* και έχει τα ίδια πλεονεκτήματα με τον A^* , αλλά είναι πιο άμεσος ως προς τη διαδρομή που δημιουργεί. Στον αλγόριθμο A^* χρησιμοποιείται η ευρετική συνάρτηση Octile Distance, η οποία θεωρεί ότι το κόστος κίνησης διαγώνια είναι υψηλότερο από αυτό της ορθογώνιας κίνησης σε ένα πλέγμα. Στην περίπτωση του Theta*, η ευρετική συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι η Ευκλείδεια απόσταση, καθώς παρέχει την ακριβή ευθεία απόσταση μεταξύ δύο σημείων, η οποία ευθυγραμμίζεται με τον στόχο του Theta* να βρει διαδρομές όσο το δυνατόν πιο άμεσες. Επίσης μια σημαντική λειτουργία του Theta* είναι η γραμμή ορατότητας που χρησιμοποιεί, δίνοντας τη δυνατότητα για δημιουργία πιο σύντομων διαδρομών εάν δεν υπάρχουν εμπόδια και είναι απρόσκοπτη η πορεία μεταξύ δύο κόμβων. Οι μέθοδοι λειτουργίας αυτών των δύο αλγορίθμων περιγράφονται επίσης με τη χρήση ψευδοκώδικα στη διπλωματική.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση των δύο συστημάτων. Το κύριο εργαλείο που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και των δύο πλαισίων είναι η μηχανή παιχνιδιών Unity 3D. Στο περιβάλλον της Unity 3D φορτώνεται ο τρισδιάστατος χάρτης του εργαστηρίου, πράγμα που σημαίνει τη δημιουργία του εικονικού εργαστηρίου με τη χρήση εργαλείων σχεδίασης 3D και τη χρήση αρχείων FBX για την αναπαράσταση των μηχανών και του ντρόουν που θα χρησιμοποιηθούν. Για τη δημιουργία των αλγορίθμων σχεδίασης πορείας χρησιμοποιείται το IDE Microsoft Visual Studio. Οι απαραίτητοι κώδικες για τους αλγορίθμους είναι γραμμένοι σε γλώσσα C#.

Μετά τη δημιουργία του τρισδιάστατου χάρτη, γίνεται το voxelization των 3D χαρτών, μετατρέποντας και στις δύο περιπτώσεις τα εργοστάσια σε ένα πλέγμα κελιών καθορισμένων από τον χρήστη. Τα πλέγματα μετατρέπονται στη συνέχεια σε δυαδικούς σειριακούς πίνακες για να αναπαραστήσουν ποια voxels είναι κατειλημμένα και ποια ελεύθερα. Ο χρήστης καλείται να επιλέξει τα σημεία διαδρομής του drone, επιλέγοντας τουλάχιστον ένα σημείο εκκίνησης και ένα σημείο τερματισμού για τη δημιουργία της διαδρομής. Στη συνέχεια στην πρώτη περίπτωση ο A^* και στη δεύτερη περίπτωση ο Theta* δημιουργούν τη βέλτιστη διαδρομή για το ντρόουν. Με την

ολοκλήρωση της διαδικασίας, οι διαδρομές εμφανίζονται στα εικονικά εργαστήρια. Ο χρήστης μπορεί να κινήσει το ντρόουν κατά μήκος των διαδρομών για να διασφαλίσει ότι αποφεύγει τα εμπόδια. Εάν το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό, οι συντεταγμένες των σημείων διαδρομής συσχετίζονται με τις πραγματικές διαστάσεις και εξάγονται σε αρχείο TXT, το οποίο αποστέλλεται στο ντρόουν για την εκτέλεση της αποστολής. Το ντρόουν που χρησιμοποιείται στις δοκιμές είναι ένα DJI Mavic Pro.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται εφαρμογή των προτεινόμενων πλαισίων. Ως αποτέλεσμα, και τα δύο συστήματα περιλαμβάνουν την πλοήγηση ενός ντρόουν σε ένα εργοστάσιο για την παρακολούθηση των εργασιών που συμβαίνουν μέσα στο χώρο του εργοστασίου. Τα εικονικά περιβάλλοντα είναι τα ίδια, μια τρισδιάστατη αναπαράσταση ενός πραγματικού εργαστηρίου, το οποίο αποτελείται από δύο επίπεδα: το άνω επίπεδο όπου βρίσκονται τα γραφεία των μηχανικών και το κάτω επίπεδο, το οποίο περιλαμβάνει τις εργαλειομηχανές και τους τεχνικούς της παραγωγής. Συγκεκριμένα, το ντρόουν πλοηγείται κοντά σε κάθε εργαλειομηχανή για να συλλέξει δεδομένα σχετικά με τις προόδους των εργασιών. Ο υπεύθυνος μηχανικός δημιουργεί μια αποστολή για το drone επιλέγοντας τα σημεία που θέλει να περιέχει η διαδρομή, υπολογίζοντας στη συνέχεια τις βέλτιστες διαδρομές και επικοινωνώντας τα τελικά αποτελέσματα στο drone ασύρματα. Η βάση του drone βρίσκεται επίσης στο δεύτερο όροφο, λειτουργώντας ως σημείο αναφοράς για την έναρξη της αποστολής του.

Οι διαδικασίες σχεδίασης πορείας ξεκινούν με την εισαγωγή των τρισδιάστατων χαρτών. Ένας έξυπνος αλγόριθμος ανιχνεύει αυτόματα τα όρια και τα εμπόδια, όπως τα εργαλεία μηχανών, μέσα στον τρισδιάστατο χάρτη. Για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια των τεχνικών στο χώρο εργασίας, ο αλγόριθμος σαρώνει το χάρτη για ανθρώπους και εφαρμόζει μια προκαθορισμένη ακτίνα ασφαλείας. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ο τρισδιάστατος χάρτης μετατρέπεται σε πλέγμα με τη χρήση των voxels, με το μέγεθος των voxels να καθορίζεται από τον χρήστη για την προσαρμογή του επιπέδου λεπτομέρειας του αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος, που είναι ο ίδιος και στις δύο περιπτώσεις, κατηγοριοποιεί τα voxels ως διαθέσιμα ή κατειλημμένα. Τα κατειλημμένα voxels εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα και εξαιρούνται από τον υπολογισμό των βέλτιστων διαδρομών και τα διαθέσιμα voxels με πράσινο. Ο αλγόριθμος δημιουργεί επίσης πλέγματα voxel για το ντρόουν και τους τεχνικούς. Όταν ολοκληρωθούν αυτά τα βήματα, ο μηχανικός καλείται να εισάγει τα επιθυμητά σημεία διαδρομής, σχηματίζοντας την αποστολή του ντρόουν. Απαιτείται τουλάχιστον ένα

σημείο εκκίνησης και ένα σημείο τερματισμού. Τα πρόσθετα σημεία σχετίζονται με το σκοπό της πλοήγησης.

Μετά την περιγραφή και την απεικόνιση των δύο διαδρομών, γίνεται σύγκριση μεταξύ των δύο αλγορίθμων με βάση την πληρότητα, δηλαδή εάν μπορεί ή όχι να δημιουργηθεί η διαδρομή, το χρόνο που απαιτείται για τη δημιουργία της διαδρομής, και το ποια διαδρομή είναι πιο σύντομη. Τα συμπεράσματα είναι ότι τόσο ο αλγόριθμος A* όσο και Theta* μπορούν να δημιουργήσουν μια διαδρομή για την πλοήγηση του drone, αλλά με την εφαρμογή του Theta* η διαδρομή δημιουργείται 57% πιο γρήγορα και είναι 10% πιο σύντομη σε σύγκριση με αυτήν που δημιουργείται με τη χρήση του A*.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, το Κεφάλαιο 6, αναφέρεται ότι αυτά τα δύο πλαίσια μπορούν να επεκταθούν εάν συνδυαστούν με συσκευές Μικτής Πραγματικότητας (MR) όπως τα Head Mounted Displays (HMD) της Microsoft HoloLens, τα οποία είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες χωρικής αναγνώρισης. Η υλοποίηση των πλαισίων σε τέτοιες συσκευές θα διευκολύνει μια πιο διαισθητική αλληλεπίδραση με τον χρήστη. Μελλοντικές έρευνες θα πρέπει επίσης να επικεντρωθούν στον προγραμματισμό εργασιών για πολλαπλά UAVs. Επομένως, η απόκτηση δεδομένων από τα drones, όπως η κατάσταση, οι εργασίες, το επίπεδο μπαταρίας και η θέση, είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου που στοχεύει στην πλήρη αυτοματοποίηση και ψηφιοποίηση των βιομηχανικών συστημάτων μέσω της χρήσης UAVs.