

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ:** Ηλεκτρονικής και Υπολογιστών (Η.Υ.)

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ:** Διαδραστικών Τεχνολογιών

**«Σχεδίαση εξωτερικού ελεγκτή για τον έλεγχο περιβάλλοντος μικτής πραγματικότητας»**

**«Design of external controller for interaction with mixed reality environments»**

**Διπλωματική Εργασία**

του

Παπαδούλη Γεωργίου

Αριθμός Μητρώου: 1020865

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας: (1020865 / 2022)

Επιβλέπων : Νικόλαος Αβούρης

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2022

**ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ**

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με θέμα

**«Σχεδίαση εξωτερικού ελεγκτή για τον έλεγχο περιβάλλοντος μικτής πραγματικότητας»**

**«Design of external controller for interaction with mixed reality environments»**

Του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Παπαδούλη Γεωργίου

Αριθμός Μητρώου: 1020865

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών στις

…….. / …….. / ……..

Ο Επιβλέπων Ο φοιτητής Ο Διευθυντής του Τομέα

Αβούρης Νικόλαος Παπαδούλης Γεώργιος Παλιουράς Βασίλειος

Καθηγητής Καθηγητής

# Ευχαριστίες

# Περίληψη

# Abstract

# Περιεχόμενα

[Ευχαριστίες I](#_Toc114853128)

[Περίληψη II](#_Toc114853129)

[Abstract III](#_Toc114853130)

[Περιεχόμενα IV](#_Toc114853131)

[Κατάλογος Σχημάτων V](#_Toc114853132)

[Πρόλογος - 1 -](#_Toc114853133)

[Κεφάλαιο 1 – Θεωρητικό & Τεχνολογικό Υπόβαθρο - 2 -](#_Toc114853134)

[1.1 Εκτεταμένη Πραγματικότητα - 2 -](#_Toc114853135)

[1.1.1 Εικονική Πραγματικότητα (*VR*) - 3 -](#_Toc114853136)

[1.1.2 Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) - 3 -](#_Toc114853137)

[1.1.3 Μικτή Πραγματικότητα (MR) - 4 -](#_Toc114853138)

[1.2 Γραφικά και αναπαράσταση στο χώρο[20], [21] - 5 -](#_Toc114853139)

[1.2.1 Γραφικά και τρισδιάστατος χώρος [20], [21] - 5 -](#_Toc114853140)

[1.2.2 Μεταφορά (*Translation*) - 5 -](#_Toc114853141)

[1.2.3 Περιστροφή γύρω από άξονα (*Rotation*) - 6 -](#_Toc114853142)

[1.2.4 Γενικευμένη Περιστροφή - 7 -](#_Toc114853143)

[1.2.5 Αλλαγή μεγέθους (*Scale*) - 7 -](#_Toc114853144)

[1.2.6 Συνδυασμός μεταφοράς, περιστροφής και αλλαγής μεγέθους - 8 -](#_Toc114853145)

[1.2.7 Τετραδόνιο (*Quaternion)* [22], [23] - 10 -](#_Toc114853146)

[1.3 Επεξεργασία εικόνας [24] - 12 -](#_Toc114853147)

[1.3.1 Ορισμός-σύντομη περιγραφή - 13 -](#_Toc114853148)

[1.3.2 Ανίχνευση ακμών [25] - 13 -](#_Toc114853149)

[1.3.3 Υπολογιστική Όραση - 14 -](#_Toc114853150)

[1.4 Οπτική Αδρανειακή Οδομετρία – Ταυτόχρονος Εντοπισμός και Χαρτογράφηση - 16 -](#_Toc114853151)

[1.4.1 Οδομετρία (*Odometry*) - 16 -](#_Toc114853152)

[1.4.2 Οπτική Οδομετρία (*Visual Odometry*) [27]–[29] - 16 -](#_Toc114853153)

[1.4.3 Αδρανειακή Οδομετρία (Inertial Odometry) [31], [32] - 17 -](#_Toc114853154)

[1.4.4 Οπτική Αδρανειακή Οδομετρία (*Visual Inertial Odometry*) [27] - 19 -](#_Toc114853155)

[1.4.5 Ταυτόχρονος Εντοπισμός και Χαρτογράφηση (*Simultaneous Localization and Mapping*) – *SLAM* [33], [34] - 19 -](#_Toc114853156)

[Βιβλιογραφία - 20 -](#_Toc114853157)

# Κατάλογος Σχημάτων

[ΕΙΚΟΝΑ 1 Πραγματικό - εικονικο συνεχες - milgram et al.'s continuum - 2 -](#_Toc114853158)

[ΕΙΚΟΝΑ 2 Περιστροφη κατα τον αξονα Z - 6 -](#_Toc114853159)

[ΕΙΚΟΝΑ 3 Διάγραμμα Ροήσ Ενός Γενικού Συστήματος Επεξεργασίας Εικόνας - 12 -](#_Toc114853160)

[ΕΙΚΟΝΑ 4 Πρωτότυπη Εικόνα - 14 -](file:///C:\Users\salok\Documents\GitHub\Hololens-Development\Hololens\Dev%20Log\Thesis\Thesis_Papadoulis.docx#_Toc114853161)

[ΕΙΚΟΝΑ 5 Αποτέλεσμα Ανίχνευσης - 14 -](file:///C:\Users\salok\Documents\GitHub\Hololens-Development\Hololens\Dev%20Log\Thesis\Thesis_Papadoulis.docx#_Toc114853162)

[ΕΙΚΟΝΑ 6 To Πλεγμα που Δημιουργειται μετα τη σαρωση του περιβαλλοντοσ [26] - 15 -](#_Toc114853163)

[ΕΙΚΟΝΑ 7 Stable Platform IMU [31] - 18 -](file:///C:\Users\salok\Documents\GitHub\Hololens-Development\Hololens\Dev%20Log\Thesis\Thesis_Papadoulis.docx#_Toc114853164)

[ΕΙΚΟΝΑ 8 Σύστημα Αδρανειακής Πλοήγησής [32] - 19 -](#_Toc114853165)

# Πρόλογος

Η εικονική, επαυξημένη και εκτεταμένη πραγματικότητα είναι πεδία τα οποία τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται με γοργούς ρυθμούς. Έχουν σχεδιασθεί και αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες που υλοποιούν τα παραπάνω πεδία, από *HMDs* που τοποθετούνται στο κεφάλι στα πιο απλά καθημερινά έξυπνα κινητά και τάμπλετ. Μάλιστα, η βελτίωση είναι εμφανής και από τη μεριά της προσβασιμότητας και της ταχύτητας, καθώς συνεχώς γίνεται φθηνότερη η παραγωγή καλύτερου υλικού και αναπτύσσονται περισσότερο αποδοτικοί αλγόριθμοι και λογισμικό.

Παρατηρούμε λοιπόν τη χρήση αυτών των τεχνολογιών σε διάφορους τομείς. Εφαρμογές εκπαίδευσης, προσομοίωσης, περιήγησης σε περιβάλλοντα ενδιαφέροντος – λόγου χάριν, πολιτισμικά – καθώς και βιντεοπαιχνίδια είναι κάποια παραδείγματα όπου η εικονική, επαυξημένη και εκτεταμένη πραγματικότητα προσφέρουν μια πιο ολοκληρωμένη, πιο κοντά στον άνθρωπο εμπειρία.

Συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική ασχολείται περισσότερο με το πεδίο της εκτεταμένης πραγματικότητας, όπου ο χρήστης καλείται να περιηγηθεί και αλληλεπιδράσει με ένα εικονικό περιβάλλον το οποίο όμως συνυπάρχει με τον πραγματικό κόσμο.

Ένα εύλογο ερώτημα που προκύπτει είναι το εξής: «Τι τρόπους / μηχανισμούς αλληλεπίδρασης θα προσφέρω στο χρήστη μίας συσκευής εκτεταμένης πραγματικότητας;» Συνηθέστερα, η αλληλεπίδραση γίνεται είτε με κάποιον ενσωματωμένο ελεγκτή – φωνητική εντολή, αναγνώριση χειρονομιών, εντοπισμός χεριού, εντοπισμός βλέμματος, εντοπισμός κεφαλής – είτε με κάποιο εξωτερικό ελεγκτή / χειριστήριο. Η πρώτη περίπτωση έχει το πλεονέκτημα λιγότερου υλικού, άρα και φθηνότερης υλοποίησης, με περιορισμούς το πεδίο όρασης της συσκευής και την υπολογιστική της ισχύ. Η δεύτερη περίπτωση αυξάνει το κόστος, αλλά προσφέρει έναν επιπλέον μηχανισμό ο οποίος επεκτείνει τις δυνατότητες αλληλεπίδρασης του χρήστη, καθώς και τη συνολική ευρωστία του συστήματος.

Ως μια λύση του υψηλότερου κόστους της χρήσης εξωτερικού ελεγκτή, καθώς και μία συσκευή πειραματισμού για διάφορους τρόπους ελέγχου της εκτεταμένης πραγματικότητας, προτείνεται το κινητό τηλέφωνο που χρησιμοποιούμε καθημερινά. Πλέον, τα κινητά ή έξυπνα τηλέφωνα αποτελούν ισχυρούς υπολογιστές και προσφέρουν πολλές δυνατότητες επέκτασης της αλληλεπίδρασης με ένα εξωτερικό σύστημα.

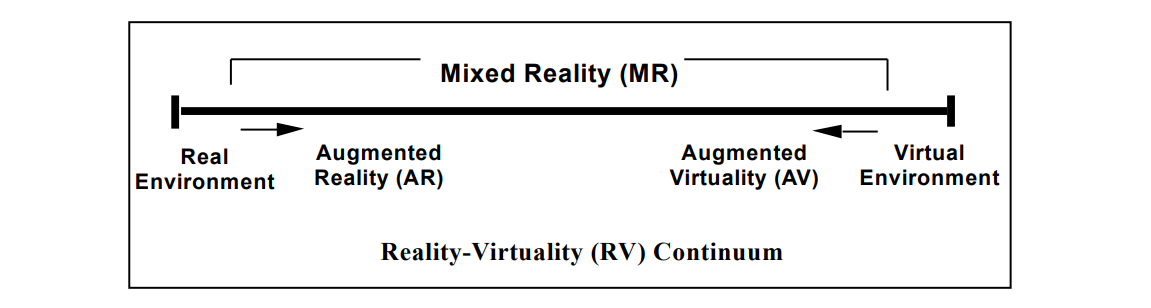
Αυτός είναι και ο σκοπός αυτής της διπλωματικής. Το *HMD* που χρησιμοποιείται στη διπλωματική είναι το *Microsoft Hololens 2* · αν και ο κώδικας επί το πλείστον λειτουργεί και στο *Hololens 1*. Παρουσιάζεται λοιπόν μία προσπάθεια επέκτασης του χειρισμού και της αλληλεπίδρασης που προσφέρει το *Hololens* χρησιμοποιώντας ως εξωτερικό χειριστήριο ένα καθημερινό έξυπνο τηλέφωνο. Επιπλεόν, θα εξετάσουμε κατά πόσο είναι δυνατή η μετατροπή του κινητού σε ένα *6DOF Controller*, καθώς και τι άλλες δυνατότητες μπορεί να προσφέρει το κινητό μέσω της οθόνης αφής.

Τέλος, μέσω ενός απλού πειράματος θα συγκρίνουμε μία αλληλεπίδραση που εισαγάγαμε χρησιμοποιώντας την αναπτυχθείσα βιβλιοθήκη (*framework*) με τον εσωτερικό (*native*) τρόπο αλληλεπίδρασης.

# Κεφάλαιο 1 – Θεωρητικό & Τεχνολογικό Υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα διάφορα θεωρητικά και τεχνολογικά εργαλεία που απαιτούνται για την κατανόηση και ολοκλήρωση του σκοπού της διπλωματικής εργασίας. Καταρχάς, γίνεται μια αναφορά στα πεδία της εικονικής, επαυξημένης και εκτεταμένης πραγματικότητας, καθώς και συσκευές που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση τους. Ακολουθεί συνοπτική ανάπτυξη χρήσιμων μαθηματικών περιγραφής τρισδιάστατου χώρου, μία εποπτική περιήγηση στην Επεξεργασία Εικόνας καθώς και επεξηγούνται οι όροι *Visual Inertial Odometry* – *Simultaneous Localization and Mapping*, βασικοί όροι για την κατανόηση της εσωτερικής λειτουργίας μιας εκ των αναφερθέντων συσκευών. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το *Hololens 2* και καταγράφονται τα διάφορα είδη ελεγκτών / χειριστηρίων για τη συσκευή αυτή και ο τρόπος αλληλεπίδρασης που προσφέρουν. Τέλος, αναφέρονται τα διάφορα περιβάλλοντα ανάπτυξης της λύσης που προτείνεται στη διπλωματική ·To (Η) Unity και το Visual Studio.

## Εκτεταμένη Πραγματικότητα



ΕΙΚΟΝΑ 1 Πραγματικό - εικονικο συνεχες - milgram et al.'s continuum

Η εκτεταμένη πραγματικότητα αποτελεί μία έννοια που περικλείει την εικονική, την επαυξημένη και τη μικτή πραγματικότητα, καθώς και των ενδιάμεσων αυτών περιοχών. Εντούτοις, αποτελεί ένα υπερσύνολο των παραπάνω, με όρια από το «πλήρως αληθινό» στο «πλήρως εικονικό», όπως προτάθηκε από τον Paul Milgram κατά τα πλαίσια του «πραγματικού-εικονικού συνεχούς» (*Reality-Virtuality Continuum*) [1], [2] (Εικ. 1).

Η ενότητα αυτή εστιάζει στα υποσύνολα της εκτεταμένης πραγματικότητας – εικονική, επαυξημένη και μικτή - καθώς και στην καλύτερη αποσαφήνιση μεταξύ της επαυξημένης και μικτής πραγματικότητας, έννοιες που πολλές φορές χρησιμοποιούνται ως συνώνυμα.

### Εικονική Πραγματικότητα (*VR*)

Η εικονική πραγματικότητα , σε αντίθεση με την επαυξημένη και τη μικτή είναι καλώς ορισμένη. Ως εικονική πραγματικότητα ορίζουμε «μία προσομοιωμένη εμπειρία ή οποία μπορεί να είναι παρόμοια ή τελείως διαφορετική σε σύγκριση με τον πραγματικό κόσμο» [3]. Χαρακτηριστικά της, μεταξύ άλλων, είναι η πλήρης εμβύθιση στον εικονικό κόσμο καθώς και η περιήγηση απομακρυσμένων περιοχών σε σχέση πάντα με την τοποθεσία του χρήστη. Επιπλέον, πολλοί υποστηρίζουν πως η χρήση ενός *HMD* είναι αναγκαία ώστε να θεωρηθεί η εμπειρία εικονική, έναντι ενός απλού τρισδιάστατου βίντεο [4]. Μία συσκευή *VR* είναι το *Oculus Rift*.

Η εικονική πραγματικότητα έχει εφαρμογή σε διάφορους τομείς:

* Στην εκπαίδευση ιατρικού προσωπικού και τη βοήθεια επανένταξης ασθενών, μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων προσομοιώσεων. Επιπλέον, στην επέκταση της διαδικασίας της διάγνωσης ενός ασθενούς. [5], [6]
* Στη διασκέδαση και στην ψυχαγωγία, μέσω διάφορων βιντεοπαιχνιδιών. [7], [8]
* Στην εκπαίδευση ως εναλλακτική τεχνική εκμάθησης ή βελτίωση υπαρχόντων τεχνικών. [9]

### Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR)

Η επαυξημένη πραγματικότητα διαφέρει αισθητά από την εικονική. Ο χρήστης πλέον δεν είναι πλήρως εμβυθισμένος σε μια εικονική εμπειρία. Στα μάτια του συνεχίζει να αποτυπώνεται ο πραγματικός κόσμος, στον οποίο όμως ταυτόχρονα υπερτίθενται εικονικά αντικείμενα που διατηρούν τη θέση και τον προσανατολισμό τους στο χώρο. [4], [10] Τα αντικείμενα αυτά, όμως, δεν αλληλοεπιδρούν με τον πραγματικό κόσμο, απλά προβάλλονται πάνω σε αυτόν. Βέβαια, όπως προαναφέρθηκε, άλλες πηγές θεωρούν αναγκαία την αλληλεπίδρασή των αντικειμένων με τον πραγματικό κόσμο, γεγονός που προκαλεί σύγχυση μεταξύ των εννοιών της επαυξημένης και μικτής πραγματικότητας. [4] Μια AR συσκευή πλέον είναι οποιοδήποτε σύγχρονο έξυπνο κινητό.

Η επαυξημένη πραγματικότητα με τη σειρά της βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς:

* Στον κόσμο των βιντεοπαιχνιδιών και της ψυχαγωγίας. Μία πολύ γνωστή εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας είναι το παιχνίδι Pokemon Go. [11]
* Στον τομέα της αρχιτεκτονικής, του εσωτερικού σχεδιασμού και της διακόσμησης, όπου οι χρήστες μπορούν να προβάλλουν εικονικά αντικείμενα στο χώρο τους για να εκτιμήσουν καλύτερα μια πιθανή αγορά. [12], [13]
* Στον τομέα της πολιτισμικής κληρονομιάς, όπου συνεχώς αναζητούνται νέοι τρόποι προσέγγισης και βελτίωσης της εμπειρίας ενός επισκέπτη. [14]

### 1.1.3 Μικτή Πραγματικότητα (MR)

Η μικτή πραγματικότητα δεν είναι καλώς ορισμένη, γεγονός που γίνεται εύκολα αντιληπτό αν παρατηρήσουμε διαφορετικούς ορισμούς που έχουν δώσει ειδικοί όταν ερωτήθηκαν για αυτό. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται 4 διαφορετικοί ορισμοί [4]:

* Η μικτή πραγματικότητα βάσει του *RV Continuum* των *Milgram et al.,* όπως αυτό παρουσιάζεται στην Εικ. 1. Σε αυτήν την περίπτωση, η μεικτή πραγματικότητα δεν είναι αναγκαίο να περιλαμβάνει την εικονική.
* Η μικτή πραγματικότητα ως συνδυασμός της εικονικής και της επαυξημένης. Η δυνατότητα δηλαδή συνδυασμού των δύο αυτών τεχνολογιών σε μία εφαρμογή ή συσκευή.
* Η μικτή πραγματικότητα ως επέκταση της επαυξημένης. Εδώ ορίζουμε τη μικτή ως μια ικανότερη εκδοχή της επαυξημένης · Λόγου χάρη, καλύτερη κατανόηση του φυσικού περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται ο χρήστης.
* Η μικτή και η επαυξημένη πραγματικότητα ως συνώνυμα.

Λόγω αυτής της έλλειψης ενός καθολικά αποδεκτού ορισμού, πολλές εφαρμογές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και ως *AR* και ως *MR*. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής θα αντιμετωπίσουμε τη μικτή πραγματικότητα ως την καλύτερη δυνατή ανίχνευση του περιβάλλοντος με σκοπό την προβολή ενός εικονικού κόσμου ο οποίος αλληλοεπιδρά με τον πραγματικό με μεγάλη ακρίβεια και σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, θεωρείται αναγκαία η εμβύθιση του χρήστη στον κόσμο, μέσω παραδείγματος χάριν ενός *HMD*, έναντι μίας συσκευής *AR*, όπως τα έξυπνα κινητά.

Παραδείγματα συσκευών μικτής πραγματικότητας είναι τα Microsoft Hololens (1, 2), Magic Leap (1, 2)

Με βάση τα παραπάνω, έχουμε διάφορες εφαρμογές της μικτής πραγματικότητας. Παρακάτω αναφέρονται μερικές από αυτές, οι οποίες επιλέχθηκαν ώστε να ικανοποιούν τον παραπάνω ορισμό:

* Η χρήση της μικτής πραγματικότητας στον τομέα της ιατρικής (τηλε-ιατρική) για παροχή διάγνωσης και περίθαλψης ασθενών όταν χρειάζεται ομάδα ανθρώπων. Η εφαρμογή αυτή βρήκε χρήση ειδικά κατά την περίοδο του COVID-19, όπου ο επιβαλλόταν η αποφυγή του συνωστισμού ατόμων σε ένα μικρό χώρο αλλά ταυτόχρονα ήταν απαραίτητη η συνεργασία του ιατρικού προσωπικού [15]
* Στην αρχιτεκτονική και στην κατασκευαστική βιομηχανία, ειδικότερα σε περιπτώσεις συνεργασίας. Μια ομάδα ανθρώπων μπορεί μέσω διαφορετικών *HMDs* να συζητήσει / αναπτύξει / σχεδιάσει μία κατασκευή μέσω ενός εικονικού μοντέλου που τοποθετούν στον πραγματικό κόσμο. Επιπλέον, η μικτή πραγματικότητα είναι χρήσιμη στην εκπαίδευση νέου εργατικού δυναμικού. [16], [17]
* Σε πολιτισμικά θέματα. Η μικτή πραγματικότητα αποτελεί ένα πολύ δυνατό εργαλείο ώστε να βελτιωθεί και επαυξηθεί η εμπειρία περιήγησης ενός μουσείο ή γενικότερα πολιτισμικών εκθεμάτων. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διεγείρεις το ενδιαφέρον τόσο των μικρών όσο και των μεγάλων σε πολιτισμικά θέματα. Μια καλοστημένη εφαρμογή σε περιβάλλον μικτής πραγματικότητας ίσως είναι μια πολύ καλή λύση. [18], [19]

## Γραφικά και αναπαράσταση στο χώρο[20], [21]

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες σημαντικές έννοιες από την Προβολική Γεωμετρία και πως χρησιμοποιείται στα Γραφικά. Τα μαθηματικά που χρησιμοποιούνται στην Προβολική Γεωμετρία είναι αρκετά σημαντικά για οποιονδήποτε σχεδιαστή μιας τρισδιάστατης εφαρμογής, ανεξαρτήτως αν η εφαρμογή αυτή είναι σχεδιασμένη για εκτεταμένη πραγματικότητα ή απλά για προβολή σε μία τυπική οθόνη. Ειδικά για την υλοποίηση του ελεγκτή στη συγκεκριμένη διπλωματική, η παρούσα ενότητα είναι εξαιρετικά σημαντική.

Αν και κάποιος στις μέρες μας μπορεί να τα αντιμετωπίσει ως ένα «μαύρο κουτί» - δε χρειάζεται και ιδιαίτερη γνώση για να φτιάξεις μια απλή εφαρμογή – η κατανόηση τους εντούτοις μπορεί να κάνει πολύ ευκολότερη την ανάπτυξη της εφαρμογής και να λύσει αρκετά προβλήματα.

### Γραφικά και τρισδιάστατος χώρος [20], [21]

Το κυριότερο πρόβλημα που πρέπει να λυθεί στα γραφικά είναι η ρεαλιστική απεικόνιση ενός τρισδιάστατου αντικειμένου, είτε αυτό αφορά το πεδίο της εκτεταμένης πραγματικότητας ή μία τυπική οθόνη. Ταυτόχρονα απαιτείται η δυνατότητα μεταφοράς (*translation*), περιστροφής (*rotation*) γύρω από έναν άξονα, αλλαγής του μεγέθους (*scale*) ενός αντικειμένου, αλλά και συνδυασμού των 3 παραπάνω πράξεων.

Ορίζουμε λοιπόν έναν τρισδιάστατο χώρο, όπου περιγράφουμε ένα σημείο του με τις συντεταγμένες . Αρχή του χώρο αποτελεί το σημείο

### Μεταφορά (*Translation*)

Η μεταφορά ενός σημείο στο χώρο είναι από τις πιο απλές πράξεις. Ουσιαστικά, αν έχουμε ένα σημείο στο χώρο, μία οποιαδήποτε μεταφορά εκφράζεται ως η αλγεβρική πρόσθεση των συντεταγμένων του σημείου αυτού με το ποσό κατά το οποίο επιθυμούμε να μετακινηθεί. Αυτό επεκτείνεται σε ένα σύνολο από σημεία, ώστε μπορούμε να πούμε πως η πρόσθεση αυτού του ποσού στις συντεταγμένες του κάθε σημείου προκαλεί ομοιόμορφη μεταφορά των σημείων στον τρισδιάστατο χώρο.

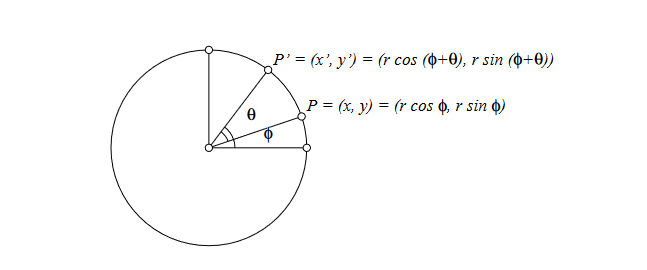
Ορίζουμε ένα γενικό τελεστή μεταφοράς ώστε:

,

όπου το ποσό κατά το οποίο μεταφέρεται ένα σημείο στο χώρο.

### Περιστροφή γύρω από άξονα (*Rotation*)

Θα ξεκινήσουμε περιγράφοντας την περιστροφή ενός σημείου στο επίπεδο -κατά γωνία με βάση το σημείο αναφοράς μας. Το σημείο μπορεί να γραφτεί με πολικές συντεταγμένες ως . Μία μετατόπιση κατά γωνία περιγράφεται καλύτερα στο παρακάτω σχήμα.



ΕΙΚΟΝΑ 2 Περιστροφη κατα τον αξονα Z

Χρησιμοποιώντας την ταυτότητα για την πρόσθεση ημίτονων-συνημίτονων, καταλήγουμε πως

ορίζοντας έτσι τους τελεστές περιστροφής γύρω από τους άξονες ως

Είναι σημαντικό να τονίσουμε εδώ πως τα διάφορα πρόσημα προκύπτουν έτσι επειδή το σύστημα συντεταγμένων μας είναι σύστημα «δεξιού χεριού». Τα συστήματα δεξιού-χεριού και αριστερού-χεριού έχουν να κάνουν με την κατεύθυνση του άξονα που αναφέρεται στο ύψος. Στην προκειμένη περίπτωση, έχουμε ορίσει αυτόν τον άξονα να είναι ο . Αν τα ορίζουν ένα επίπεδο σε ένα τραπέζι, τότε σε ένα σύστημα δεξιού-χεριού η θετική φορά του δείχνει πάνω από το τραπέζι, ενώ σε ένα σύστημα αριστερού-χεριού δείχνει κάτω από το τραπέζι.

### Γενικευμένη Περιστροφή

Στην προηγούμενη υπο-ενότητα ορίσαμε 3 διαφορετικούς τελεστές περιστροφής, έναν για κάθε διαφορετικό άξονα, οι οποίοι περιγράφουν την περιστροφή ενός σημείου με βάση την αναφορά μας (την αρχή των αξόνων). Συνεχίζοντας, θέλουμε να γενικεύσουμε την περιστροφή αυτή ώστε να γίνεται με βάση ένα αυθαίρετο άξονα.

Για να το πετύχουμε αυτό θα ακολουθήσουμε μια απλή τακτική. Επιλέγουμε έναν άξονα, έστω τον . Θα περιστρέψουμε το σημείο μας ώστε ο άξονας περιστροφής που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε - ο οποίος περνάει από την αρχή των αξόνων - να είναι παράλληλος με τον άξονα . Αυτό το πετυχαίνουμε εκτελώντας το πολύ δύο περιστροφές, έστω κατά γωνίες στους άξονες αντίστοιχα. Έπειτα περιστρέφουμε κατά την επιθυμητή γωνία στον άξονα και τέλος αντιστρέφουμε τις αρχικές περιστροφές που εκτελέσαμε. Η διαδικασία περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση

Θεωρώντας πλέον τον τελεστή ως έναν γενικευμένο τελεστή περιστροφής γύρω από οποιονδήποτε άξονα περνάει από το σημείο αναφοράς, μπορούμε με τον τελεστή μεταφοράς να γράψουμε μία τελική εξίσωση η οποία περιγράφει περιστροφή γύρω από ένα αυθαίρετο άξονα:

Η διαδικασία που περιγράφει η εξίσωση είναι απλή. Μεταφέρουμε το κέντρο της περιστροφής στην αρχή των αξόνων, εκτελούμε την περιστροφή και αντιστρέφουμε τη μεταφορά.

### Αλλαγή μεγέθους (*Scale*)

Η αλλαγή του μεγέθους ενός αντικειμένου είναι απλή. Αν έχουμε ένα αντικείμενο που περιγράφεται από ένα σύνολο σημείων στο χώρο, τότε για να μικρύνουμε ή να μεγαλώσουμε το αντικείμενο αυτό, αρκεί να πολλαπλασιάσουμε τις συντεταγμένες του με ένα βαθμωτό αριθμό. Έτσι επιτυγχάνουμε οποιαδήποτε αλλαγή στο μέγεθος, πάντα με βάση τους τρεις άξονες. Παραμένει όμως το πρόβλημα που είχαμε και πριν. Ένας πολλαπλασιασμός των συντεταγμένων θα άλλαζε το μέγεθος του αντικειμένου αλλά βάσει του σημείου αναφοράς, της αρχής δηλαδή των αξόνων. Αν είχαμε για παράδειγμα ένα αμάξι και θέλαμε να το μικρύνουμε κατά ένα συντελεστή 0.1, τότε ναι μεν θα το αμάξι θα ήταν το 1/10 σε μέγεθος, αλλά θα κατέληγε και περίπου κατά το 1/10 από την αρχή των αξόνων, σε σχέση με το σημείο που βρισκόταν αρχικά.

Η λύση σε αυτό το πρόβλημα έχει ήδη προταθεί στην υπο-ενότητα για τη γενική περιστροφή. Αρκεί να μεταφέρουμε το αντικείμενο στην αρχή των αξόνων, να εκτελέσουμε την αλλαγή μεγέθους και να το μεταφέρουμε ξανά πίσω στην αρχική του θέση.

Έτσι, μία γενική εξίσωση για την αλλαγή μεγέθους ενός συνόλου σημείων με βάση την αρχή των αξόνων είναι:

,

όπου ο κάθε συντελεστής αφορά τον κάθε άξονα, ώστε το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να είναι και ανομοιόμορφο. Στην περίπτωση μάλιστα που κάποιος συντελεστής είναι αρνητικός αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την «αντανάκλαση» του αντικειμένου κατά επίπεδο το οποίο είναι κάθετο στον εκάστοτε άξονα.

### Συνδυασμός μεταφοράς, περιστροφής και αλλαγής μεγέθους

Συνήθως, αν όχι πάντα, συμφέρει να συνδυάσουμε τους διάφορους αυτούς μετασχηματισμούς ώστε να δημιουργήσουμε ένα πιο σύνθετο μετασχηματισμό ο οποίος περιγράφει ακριβώς αυτό που θέλουμε να κάνουμε. Φαίνεται όμως από την περιγραφή και τον ορισμό των τελεστών πως μια τέτοια διαδικασία θα γινόταν γρήγορα πολύπλοκη, όπως ήδη φαίνεται από τη γενικευμένη περιστροφή.

Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα είναι η περιγραφή των 3 αυτών πράξεων με χρήση πινάκων. Η χρήση πινάκων, πέραν του ότι καθιστά πιο ευανάγνωστο και εύχρηστο το μετασχηματισμό, είναι βελτιστοποιημένη, αφού οι υπολογιστές σήμερα έρχονται με λογισμικό και υλικό το οποίο επιταχύνει τις πράξεις σε πίνακες.

Έστω λοιπόν πως τα σημεία αποτελούν διανύσματα στήλες. Μία οποιαδήποτε περιστροφή είναι απλά ένας πολλαπλασιασμός ενός πίνακα περιστροφής με το διάνυσμα στήλη. Έτσι, για τους 3 άξονες έχουμε

,

και

Από αυτήν την περιγραφή προκύπτει κάτι πολύ χρήσιμο και όμορφο. Συνεχόμενες περιστροφές δεν είναι τίποτα άλλο πέραν πολλαπλασιασμοί μεταξύ πινάκων. Αν δηλαδή για οποιοδήποτε λόγο χρειαστεί να περιστρέψουμε το αντικείμενο κατά 5 διαφορετικούς τρόπους, τότε δεν έχουμε παρά να πολλαπλασιάσουμε 5 διαφορετικούς πίνακες περιστροφής και εν τέλη να πολλαπλασιάσουμε το αποτέλεσμα με τα σημεία του αντικειμένου.

Η αλλαγή μεγέθους είναι ακόμα ευκολότερη. Η μετατροπή του τελεστή σε μορφή πινάκων είναι η εξής:

Όπως και πριν, πολλαπλασιασμός διαδοχικών πινάκων ισοδυναμεί με συνεχόμενους μετασχηματισμούς αλλαγής μεγέθους.

Προκύπτει, όμως, ένα πρόβλημα με αυτόν τον τρόπο περιγραφής των ανωτέρω μετασχηματισμών. Η περιγραφή της μεταφοράς με χρήση πινάκων, τουλάχιστον 3 x 3, είναι αδύνατη. Αυτό προκύπτει εύκολα αν εξετάσουμε τον πολλαπλασιασμό του σημείου με οποιονδήποτε 3 x 3 πίνακα. Το αποτέλεσμα πάντα θα είναι . Αυτό αναστατώνει τον τρόπο περιγραφής που έχει αναπτυχθεί, διότι πλέον δε καθίσταται δυνατός ο συνδυασμός και της μεταφοράς με συνεχόμενους πολλαπλασιασμούς πινάκων.

Η λύση προέρχεται από την επέκταση των παραπάνω πινάκων ώστε να έχουν μία παραπάνω στήλη και γραμμή, ή καλύτερα, ένα επιπλέον διάνυσμα στήλη του οποίου ο τελευταίο στοιχείο ισοδυναμεί με 1. Πλέον, ο μετασχηματισμός, παραδείγματος χάρη της περιστροφής γύρω από τον άξονα παίρνει τη μορφή:

,

Πλέον, με αυτήν την σύνθετη συντεταγμένη, ακόμα και ο μετασχηματισμός της μεταφοράς μπορεί να γραφεί με τον εξής τρόπο:

Συνεπώς, οποιοσδήποτε συνδυασμός της μεταφοράς, περιστροφής και αλλαγής μεγέθους δεν είναι τίποτα άλλο παρά συνεχόμενοι πολλαπλασιασμοί πινάκων. Μάλιστα, οι ανωτέρω συντεταγμένες με αυτή την επιπλέον συνιστώσα λέγονται ομοιογενείς. Χρησιμοποιούνται στην Προβολική Γεωμετρία όπως οι καρτεσιανές χρησιμοποιούνται στην Ευκλείδεια.

Η τελευταία συντεταγμένη δε χρειάζεται να είναι 1. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι γνωστή και ως , εφόσον και η κυριότερη χρήση των ομοιογενών συντεταγμένων είναι για μονοδιάστατους, δισδιάστατους και τρισδιάστατους Ευκλείδειους χώρους, Είναι ευνόητο πως η τιμή της δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα των μετασχηματισμών.

### Τετραδόνιο (*Quaternion)* [22], [23]

Μία άλλη χρήσιμη έννοια στο πως λειτουργούν τα περιβάλλοντα ανάπτυξης τρισδιάστατων εφαρμογών είναι το τετραδόνιο. Αποτελεί μία σχετικά δυσνόητη έννοια η οποία όμως χρησιμοποιείται αρκετά στα γραφικά. Στο πλαίσιο της διπλωματικής θα τα αντιμετωπίσουμε ως ένα «μαύρο κουτί», περιγράφοντας κάποιες σημαντικές ιδιότητες και τη χρησιμότητά τους.

Το τετραδόνιο στα γραφικά χρησιμοποιείται ως ένας εναλλακτικός τρόπος περιγραφής μιας περιστροφής στον τρισδιάστατο χώρο, έναντι των ευκλείδειων γωνιών τις οποίες περιγράψαμε στις προηγούμενες ενότητες. Οι Euler γωνίες είναι ευάλωτες στο φαινόμενο *gimbal lock*. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν δύο από τους άξονες περιστροφές ευθυγραμμίζονται και έτσι χάνεται ένας βαθμός ελευθερίας. Επιπλέον καθιστούν δυσκολότερη και αυθαίρετη την παρεμβολή (*interpolation*) μεταξύ δύο διαφορετικών περιστροφών / προσανατολισμών. Τα προβλήματα αυτά λύνονται με τη χρήση των τετραδόνιων αριθμών.

Το τετραδόνιο ουσιαστικά είναι μία μη-αντιμεταθετική επέκταση της θεωρίας των μιγαδικών αριθμών. Βασικά στοιχεία αποτελούν τα ώστε να ισχύει:

Ο αριθμός λοιπόν αυτός είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των παραπάνω στοιχείων, των βασικών δηλαδή τετραδονίων . Έτσι μπορεί να εκφρασθεί με μοναδικό τρόπο ως:

Όπου πραγματικοί αριθμοί.

Χωρίς να επεκτείνουμε παραπάνω λόγω της πολυπλοκότητας των αριθμών αυτών, μπορούμε να ορίσουμε κάποιες σημαντικές ιδιότητες και κάποιους τελεστές που θα φανούν χρήσιμοι. Οι ορισμοί αυτοί δεν είναι μαθηματικά αυστηροί, αποτελούν απλώς μία προσπάθεια επεξήγησης της χρήσης και χρησιμότητας του τετραδόνιου.

1. Εάν έχουμε ένα τετραδόνιο , τότε ορίζουμε ως αντίστροφό του το

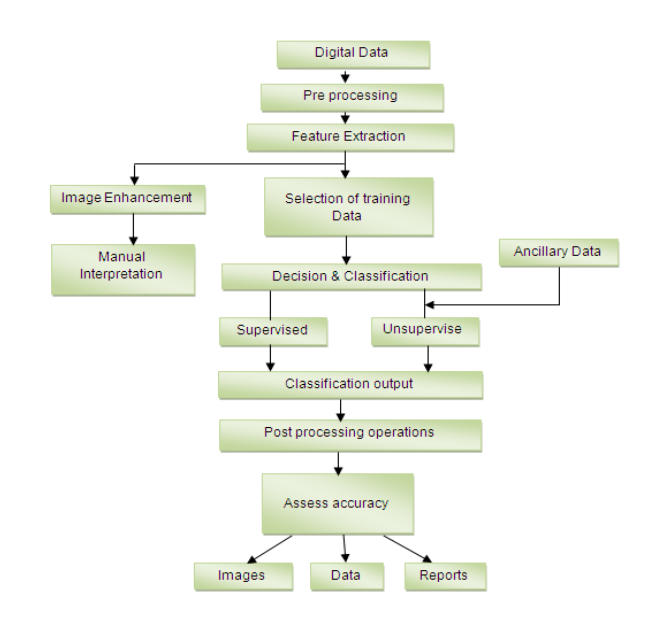
έτσι ώστε . Το δεν είναι τίποτα άλλο παρά ο μιγαδικός συζυγής του .

1. Ορίζουμε τελεστή περιστροφών, όπως ακριβώς εξηγήθηκε για τους διαδοχικούς πολλαπλασιασμούς σε προηγούμενη ενότητα. Για χάριν συντομίας και ευκολίας, ταυτίζουμε τον τελεστή , ώστε να μπορούμε να περιγράψουμε διαδοχικές περιστροφές ως
2. Ορίζουμε τελεστή όπου τετραδόνιο και ένα διάνυσμα τριών στοιχείων, ώστε το αποτέλεσμα να είναι ένα καινούριο διάνυσμα το οποίο έχει περιστραφεί κατά την περιστροφή που περιγράφει το τετραδόνιο. Για χάριν συντομίας και ευκολίας, ταυτίζουμε τον τελεστή , ώστε να είναι ένα διάνυσμα θέσης που προέκυψε από την περιστροφή του αρχικού διανύσματος κατά το τετραδόνιο.
3. Ορίζουμε τελεστή , όπου διάνυσμα στήλη το οποίο περιγράφει μία περιστροφή κατά γωνίες Euler. Επιπλέον, ισχύει και ο αντίθετος του, ώστε

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ένα τετραδόνιο μπορεί να περιγράψει οποιουδήποτε είδους γενική περιστροφή, κατά οποιονδήποτε δηλαδή αυθαίρετο άξονα.

## Επεξεργασία εικόνας [24]

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο τομέας της Επεξεργασίας Εικόνας. Συγκεκριμένα δίνεται ένας ορισμός, ο σκοπός της ύπαρξης αυτού του επιστημονικού πεδίου και η σημασία του στην υπολογιστική όραση, καθώς και η χρήση της σε περιβάλλοντα εκτεταμένης πραγματικότητας.



ΕΙΚΟΝΑ 3 Διάγραμμα Ροήσ Ενός Γενικού Συστήματος Επεξεργασίας Εικόνας

### Ορισμός-σύντομη περιγραφή

Η επεξεργασία εικόνας είναι μία μέθοδος κατά την οποία μία εικόνα μετατρέπεται σε ψηφιακή μορφή και έπειτα επεξεργάζεται ώστε να προκύψει μία βελτιωμένη εκδοχή της ή να εξαχθεί χρήσιμη πληροφορία από αυτή. Ως εκ τούτων, ορίζουμε ένα σύστημα επεξεργασίας εικόνας το οποίο έχει ως είσοδο μία εικόνα – όπως λόγου χάρη μία φωτογραφία ή ένα στιγμιότυπο από ένα βίντεο – και ως έξοδο δύναται να έχει πάλι εικόνα ή χαρακτηριστικά που έχουν εξαχθεί από την αρχική εικόνα. Συνηθέστερα ένα τέτοιο σύστημα δέχεται την εικόνα ως ένα δισδιάστατο σήμα και την επεξεργάζεται με διάφορες μεθόδους.

Παρότι υπάρχουν και οι έννοιες της οπτικής και αναλογικής επεξεργασίας εικόνας, εδώ αναφερόμαστε εξ ολοκλήρου στην ψηφιακή.

Τα διάφορα συστήματα του πεδίου αυτού μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

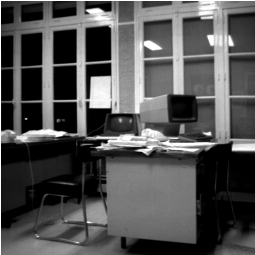
* Επεξεργασία Εικόνας (είσοδος εικόνα => έξοδος εικόνα)
* Ανάλυση Εικόνας (είσοδος εικόνα => εξαγωγή μετρικών)
* Κατανόηση εικόνας (είσοδος εικόνα => σημασιολογική ερμηνεία)

Από την άλλη, ο σκοπός των συστημάτων αυτών μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε 5 διαφορετικές ομάδες

1. Απεικόνιση - Η δυνατότητα παρατήρησης αντικειμένων τα οποία δεν είναι ορατά
2. Βελτίωση και αποκατάσταση εικόνας – η δημιουργία μίας καλύτερης από την αρχική εικόνας
3. Ανάκτηση εικόνας - Η εύρεση μιας εικόνας υψηλού ενδιαφέροντος
4. Αναγνώριση προτύπων
5. Αναγνώριση Εικόνας – Κατηγοριοποίηση και αναγνώριση διάφορων αντικειμένων μέσα σε μία εικόνα.

### Ανίχνευση ακμών [25]

Ένα από τα πολύ αναπτυγμένα πεδία της Επεξεργασίας Εικόνας είναι η ανίχνευση ακμών. Με τον όρο ανίχνευση ακμών εννοούμε τον εντοπισμό σημαντικών παραλλαγών σε μια ασπρόμαυρη εικόνα και η κατηγοριοποίηση των φυσικών φαινομένων που προκάλεσαν τις παραλλαγές αυτές. Η πληροφορία αυτή είναι πολλή σημαντική σε ποικίλα συστήματα, όπως τρισδιάστατη ανακατασκευή, κίνηση, αναγνώριση, βελτίωση, αποκατάσταση κ.ο.κ

Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της διπλωματικής θα δούμε πως οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν διάφορα συστήματα επαυξημένης – μικτής πραγματικότητας βασίζονται εσωτερικά σε κάποιου είδους ανίχνευσης σημείων ενδιαφέροντος για να προσδιορίσουν τη θέση της συσκευής στο χώρο.



ΕΙΚΟΝΑ 4 Πρωτότυπη Εικόνα

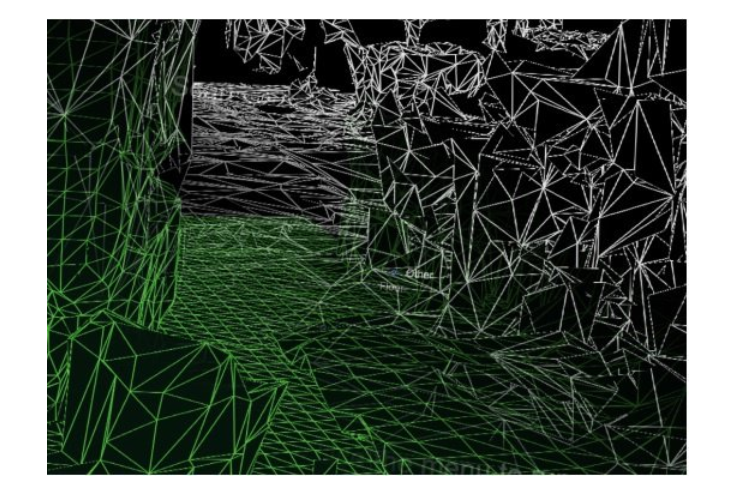
ΕΙΚΟΝΑ 5 Αποτέλεσμα Ανίχνευσης

### Υπολογιστική Όραση

Αποτελεί υψηλού επιπέδου επεξεργασία εικόνας κατά την οποία ένα μηχάνημα / υπολογιστής / λογισμικού προσπαθεί να αποκρυπτογραφήσει τα φυσικά περιεχόμενα μιας εικόνα. (παραδείγματος χάρη βίντεο ή τρισδιάστατες μαγνητικές τομογραφίες)

Είναι πλέον σημαντικός όρος για τα περιβάλλοντα μικτής πραγματικότητας, όπου η συσκευή πρέπει να αναγνωρίσει φυσικά στοιχεία του περιβάλλοντος ώστε ο εικονικός κόσμος να μπορεί να αλληλοεπιδρά με το φυσικό. Ουσιαστικά, μία συσκευή μικτής πραγματικότητας πρέπει:

1. Να σαρώνει συνεχώς το περιβάλλον με σκοπό τη δημιουργία ενός σύννεφου σημείων (*point cloud*) ή αλλιώς πλέγματος (*mesh*) το οποίο είναι η εικονική αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου στο περιβάλλον της συσκευής.
2. Εκτός από τη εικονική αναπαράσταση του περιβάλλοντος, πρέπει να γίνεται σάρωση και αναγνώριση κινήσεων των χεριών του χρήστη, καθώς και χειρονομιών, ώστε να είναι ικανός να αλληλοεπιδράσει με το περιβάλλον.



ΕΙΚΟΝΑ 6 To Πλεγμα που Δημιουργειται μετα τη σαρωση του περιβαλλοντοσ [26]

## 1.4 Οπτική Αδρανειακή Οδομετρία – Ταυτόχρονος Εντοπισμός και Χαρτογράφηση

(*Visual Inertial Odometry [VIO] – Simultaneous Localization and Mapping [SLAM]*)

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τις έννοιεςΟπτική Αδρανειακή Οδομετρία (*VIO*) και Ταυτόχρονος Εντοπισμός και Χαρτογράφηση (*SLAM).* Είναι ιδιαίτερα σημαντικές έννοιες όσον αφορά την επαυξημένη και μικτή πραγματικότητα, διότι χωρίς αυτές, η συσκευή δε θα είχε τρόπο να αναγνωρίσει τη θέση της και τον προσανατολισμό της σε σχέση με τον εικονικό – μικτό κόσμο που δημιουργείται. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εκτός της ίδιας της συσκευής, στον εξωτερικό ελεγκτή για την ανάπτυξη ενός συστήματος που παρέχει 6 βαθμούς ελευθερίας στο χρήστη.

Λόγω του ότι είναι ταχέα αναπτυσσόμενα πεδία και υπάρχουν πολλές και διαφορετικές τεχνικές, θα εστιάσουμε περισσότερο σε μια γενική εποπτεία των όρων αυτών, ώστε να γίνει αντιληπτή περισσότερο η φιλοσοφία των τεχνικών αυτών, παρά η υλοποίηση καθαυτή.

### Οδομετρία (*Odometry*)

Ως οδομετρία ορίζεται η χρήση δεδομένων τα οποία έχουν συλλεχθεί από αισθητήρες κίνησης ώστε να γίνει μία πρόβλεψη στη μεταβολή της θέσης ενός αντικειμένου. Ένα απλό οδόμετρο υπάρχει σε κάθε αμάξι, το οποίο μετρά τα συνολικά χιλιόμετρα που έχει διανύσει. Επιπλέον, βρίσκει χρήση στη ρομποτική σε δίποδα ή τροχοφόρα ρομπότ ώστε να γίνεται μία εκτίμηση της θέσης του ρομπότ σε σχέση με ένα αρχικό σημείο αναφοράς.

Μάλιστα, όσον φορά τη ρομποτική, η μέθοδος είναι ευαίσθητη στα σφάλματα λόγω της ολοκλήρωσης που απαιτείται από μετρήσεις τις επιτάχυνσης ή της ταχύτητας, που λόγω θορύβου δε δίνει σωστά αποτελέσματα. Μία καλή υλοποίηση της οδομετρίας απαιτεί τη συλλογή των μετρήσεων των αισθητήρων με ακρίβεια, τη σωστή βαθμονόμηση των οργάνων και την καλή επεξεργασία των δεδομένων.

Η εκτίμηση της θέσης και του προσανατολισμού μιας συσκευής στο χώρο με βάση κάποιο σημείο αναφοράς ονομάζεται ***ego-motion***.

### Οπτική Οδομετρία (*Visual Odometry*) [27]–[29]

Με τον όρο **οπτική οδομετρία** αναφερόμαστε σε διάφορες τεχνικές οδομετρίας οι οποίες ως βάση έχουν την εξαγωγή στοιχείων μέσα από βίντεο (με μία ή περισσότερες κάμερες), ούτως ώστε με τη χρήση διάφορων τεχνικών επεξεργασίας εικόνας και υπολογιστικής όρασης, να προκύψει μία καλή εκτίμηση της θέσης και του προσανατολισμού - που τυπικά ονομάζουμε **στάση, πόζα** (**pose**) - του συστήματος με βάση ένα αρχικό σημείο αναφοράς.

Τέτοιες τεχνικές φέρουν πολύ καλά αποτελέσματα όσον αφορά την ακρίβεια, αλλά δεν είναι πάντα εύρωστες, διότι εξαρτώνται σημαντικά από τον εντοπισμό σημείων ενδιαφέροντος (*feature points*) στην εικόνα-βίντεο. Αν λοιπόν τέτοια σημεία δε μπορούν να εντοπιστούν στο βίντεο - λόγου χάρη η κάμερα να κοιτάει έναν άσπρο τοίχο χωρίς ιδιαίτερα χαρακτηριστικά - τότε οι μέθοδοι αυτοί αδυνατούν να δώσουν ένα καλό αποτέλεσμα.

H οπτική οδομετρία χωρίζεται *κυρίως* σε 2 διαφορετικούς τύπους:

* ***Monocular***, όπου το σύστημα περιέχει μόνο μία κάμερα.
* **Stereo**, όπου το σύστημα έχει δύο κάμερες.

Επιπλέον, υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες τεχνικών:

* **Βάσει σημείων ενδιαφέροντος (*Feature-Based*)**, όπου τα σημεία ενδιαφέροντος εξάγονται από το βίντεο και έπειτα εντοπίζονται μέσα στο βίντεο.
* **Άμεση μέθοδος (*Direct method*)**, όπου χρησιμοποιείται ή ένταση του κάθε εικονοστοιχείου (*pixel*) ως είσοδος στον αλγόριθμο.

Υπάρχουν και υβριδικές μέθοδοι που συνδυάζουν τους δύο τρόπους.

Ένας γενικός αλγόριθμος οπτικής οδομετρίας βάσει σημείων ενδιαφέροντος παρουσιάζεται παρακάτω. Είναι σημαντικό όμως να τονίσουμε πως το πεδίο είναι ραγδαία εξελισσόμενο και είναι αρκετά δύσκολη η κατηγοριοποίηση και παρουσίαση όλων των αλγορίθμων:

1. Εξαγωγή εικόνων εισόδου μέσω μονής κάμερας, *stereo* κάμερας ή παγκατευθυντικής (*omnidirectional*) κάμερας
2. Διόρθωση εικόνας: επεξεργασία της εικόνας ώστε να αφαιρεθούν διάφορες παραμορφώσεις, όπως η παραμόρφωση από το φακό
3. Ανίχνευση σημείων ενδιαφέροντος: Ορισμός τελεστών ενδιαφέροντος, η συσχέτιση των σημείων ενδιαφέροντος μεταξύ των διαφορετικών εικόνων (*frames*) στο βίντεο και η δημιουργία του πεδίου οπτικής ροής (*optical flow, Lucas-Kanade* [30]*)*
4. Ανίχνευση σφαλμάτων και διόρθωση με χρήση του πεδίου οπτικής ροής
5. Εκτίμηση της κίνησης της κάμερας από την οπτική ροή
6. Είτε με φίλτρο Κάλμαν
7. Είτε με την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους με σκοπό να βρεθούν οι γεωμετρικές και τρισδιάστατες ιδιότητες των σημείων ενδιαφέροντος.
8. Περιοδική ανασύσταση των εντοπισμένων σημείων ώστε να διατηρηθεί η ανίχνευση σε όλη την εικόνα.

Figure 1 Monocular Vio Flow Chart Example[31]

### Αδρανειακή Οδομετρία (Inertial Odometry) [32], [33]

Αδρανειακή Πλοήγηση (*Inertial Navigation*)

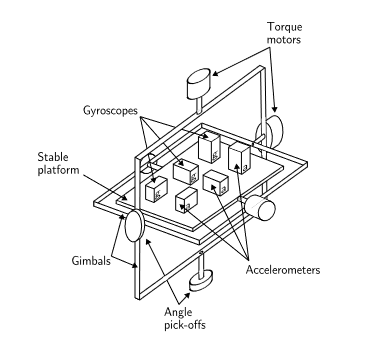
Με τον όρο **αδρανειακή οδομετρία** αναφερόμαστε στις τεχνικές οι οποίες ως βάση έχουν την επεξεργασία δεδομένων από διάφορους αισθητήρες αδράνειας (επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο, μαγνητόμετρο) ούτως ώστε να πάλι να προκύψει μία εκτίμηση της θέσης και του προσανατολισμού της συσκευής στο χώρο με βάση ένα αρχικό σημείο αναφοράς.

Τέτοιες τεχνικές είναι εύρωστες, διότι οι αισθητήρες παρέχουν συνεχώς δεδομένα, αλλά έχουν συνήθως μικρή ακρίβεια λόγω του θορύβου των μετρήσεων. Ένα κλασικό και εύκολο παράδειγμα για να καταλάβουμε τη σημασία του θορύβου και την ανάγκη αφαίρεσής του -όσο το δυνατόν γίνεται-είναι το εξής:

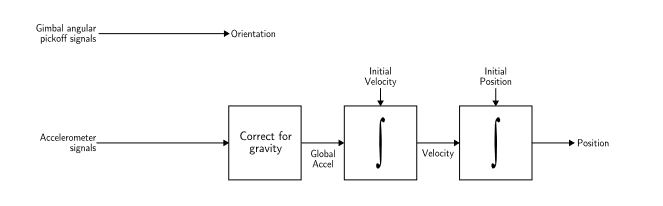
*Έχοντας κάποιες μετρήσεις από ένα επιταχυνσιόμετρο και μία αρχική θέση θέλω να βρω τη θέση της συσκευής στο χώρο.*

Μία άμεση λύση είναι η αριθμητική ολοκλήρωση της επιτάχυνσης ώστε να βρούμε την ταχύτητα και η αριθμητική ολοκλήρωση της ταχύτητας ώστε να βρούμε τη θέση. Ενώ η λύση θεωρητικά είναι άρτια, δε λαμβάνει υπόψιν τον θόρυβο που εισάγει στο σύστημα ένα επιταχυνσιόμετρο. Ένα τέτοιο όργανο, όσο καλό και να είναι, πάντα θα παρουσιάζει κάποιο θόρυβο στις μετρήσεις του. Αποτέλεσμα είναι να ολοκληρώνεται και ο θόρυβος - και μάλιστα στο τετράγωνο - και να έχουμε τη λεγόμενη **ολίσθηση** (*drift*), όπου η θέση στην αρχή φαίνεται να υπολογίζεται σωστά, αλλά μετά μετακινείται προς κάποια κατεύθυνση επιταχύνοντας ολοένα και περισσότερο. Εν ολίγης, ένα τέτοιο σύστημα δεν είναι ευσταθές και χρειάζεται επεξεργασία των μετρήσεων, φιλτράρισμα και καλή βαθμονόμηση ώστε να προκύψουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Τα συστήματα αυτά υλοποιούνται με τη χρήση μίας **Μονάδας Αδρανειακής Μέτρησης** (***IMU***). Μία τέτοια μονάδα αποτελείται τυπικά από διάφορους αδρανειακούς αισθητήρες οι οποίο βασίζονται στην τεχνολογία *MEMS.* Παρακάτω απεικονίζεται σε σχεδιάγραμμα ένα τυπικό *IMU* καθώς και ένας απλουστευμένος αλγόριθμος της αδρανειακής οδομετρίας.



ΕΙΚΟΝΑ 7 Stable Platform IMU [31]

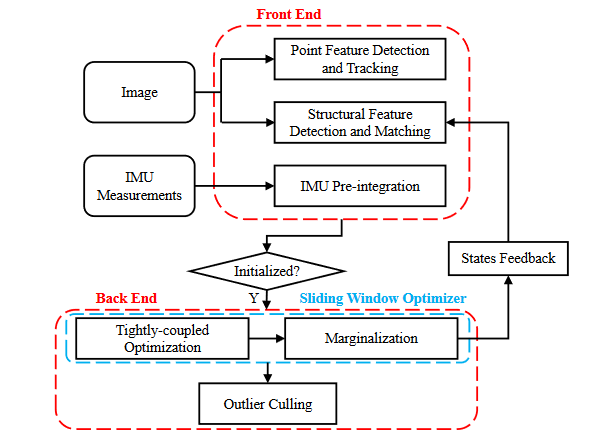


ΕΙΚΟΝΑ 8 Σύστημα Αδρανειακής Πλοήγησής [33]

### Οπτική Αδρανειακή Οδομετρία (*Visual Inertial Odometry*) [27]

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από το όνομα, η οπτική αδρανειακή οδομετρία συνδυάζει την οπτική οδομετρία με την αδρανειακή πλοήγηση σε μια προσπάθεια εξάλειψης των αδυναμιών των δύο αυτών τεχνικών.

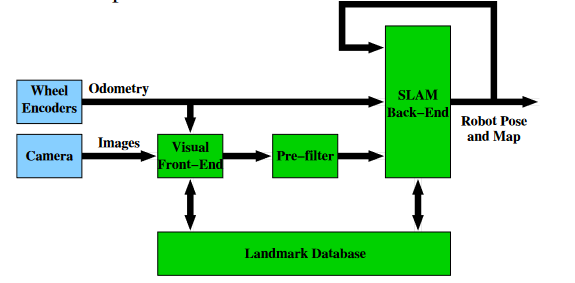
Με χρήση και των 2, το σύστημα γίνεται πιο εύρωστο και πιο ακριβές.



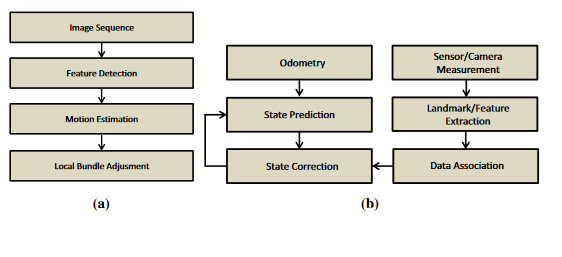
### 1.4.5 Ταυτόχρονος Εντοπισμός και Χαρτογράφηση (*Simultaneous Localization and Mapping*) – *SLAM* [34], [35]

Οι παραπάνω τεχνικές είναι αρκετά επιτυχείς στο να προσδιορίσουν τη θέση και τον προσανατολισμό μέσω κυρίως της μεταβολής διάφορων ποσοτήτων, είτε αυτές είναι θέσεις των σημείων ενδιαφέροντος είτε η θέση που προέκυψε από την επεξεργασία των μετρήσεων του επιταχυνσιόμετρου. Οι τεχνικές αυτές περισσότερο πετυχαίνουν μια τοπική συνέχεια στη διαδρομή που φαίνεται να ακολουθεί η συσκευή.

Σκοπός του **SLAM** είναι η χαρτογράφηση του χώρου. Για να αποκτήσει πλήρη αυτονομία ένα ρομπότ πρέπει να έχει την ικανότητα να εξερευνά το χώρο χωρίς εξωτερική παρέμβαση από κάποιον χρήστη. Για να επιτευχθεί αυτό, το ρομπότ δημιουργεί έναν αξιόπιστο χάρτη και εντοπίζει τον εαυτό του στον χάρτη.

Η έννοια του ***vSLAM*** (*visual SLAM*) συνδέεται άμεσα με το *VO-VIO*. Αυτό συμβαίνει διότι οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν για την οδομετρία ενός ρομπότ ή μιας οποιασδήποτε συσκευής μπορούν να επεκταθούν ώστε να χαρτογραφήσουν το χώρο. Ταυτόχρονα όμως, αυτή η χαρτογράφηση βοηθά και το υπόλοιπο σύστημα να διορθώσει τυχόν σφάλματα που προέκυψαν από την οδομετρία. Ούτως ή άλλως, τα σημεία ενδιαφέροντος τα οποία εντοπίζει το *VIO* σύστημα αποτελούν σημεία ενδιαφέροντος που μπορεί να αποθηκεύσει το *vSLAM*σύστημα.

ΕΙΚΟΝΑ 9 Block Διάγραμμα Ενόσ Συστηματοσ vSLAM [35]



ΕΙΚΟΝΑ 10 Block Διάγραμμα για (α) Vo kai (B) SLAM

### Εφαρμογές

Τα παραπάνω χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές. Μερικές από αυτές είναι:

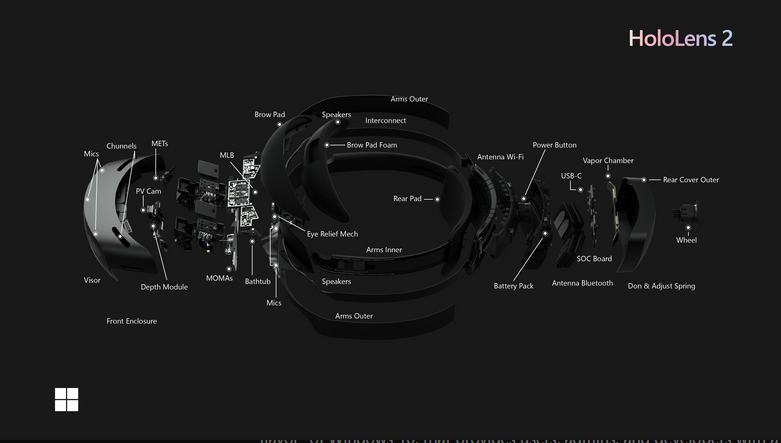
1. Στο *Mars Rovers*, όπου το αυτοκινούμενο όχημα χρησιμοποιεί τους αλγορίθμους ώστε να εξερευνήσει τον Άρη αυτόνομα. [29]
2. Στην εύρεση της τοποθεσίας μίας συσκευής σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει καλό σήμα GPS. [36]
3. Στα έξυπνα κινητά με σκοπό τις εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας.
4. Στα *HMDs* μικτής πραγματικότητας ώστε να γνωρίζουν τη θέση και τον προσανατολισμό τους στο χώρο. Ένα από αυτά τα *HMDs* είναι και το *Hololens.*

## Microsoft Hololens 2 [37]

Τα *Hololens* είναι μια σειρά έξυπνων γυαλιών μικτής πραγματικότητας, τα οποία και παράγει η *Microsoft*. Ξεκίνησαν με τα *Hololens 1* το 2016 και το 2019 εξέδωσαν μία νέα έκδοση, τα *Hololens 2,* τα οποία χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα. Δυστυχώς τα *Hololens 1* πλέον δεν έχουν ιδιαίτερη υποστήριξη από τη *Microsoft* ως προς το λογισμικό ανάπτυξης εφαρμογών.

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μία σύντομη περιγραφή των σημαντικότερων εξαρτημάτων της συσκευής καθώς και των εξαρτημάτων τα οποία είναι ιδιαίτερης σημασίας λόγω του θέματος της διπλωματικής. Επιπλέον, καταγράφονται οι διάφοροι τρόποι αλληλεπίδρασης τους οποίους προσφέρει η συσκευή στο χρήστη.

### Περιγραφή συσκευής



ΕΙΚΟΝΑ 11 Αποδόμηση της Συσκευής

To *Microsoft Hololens 2* είναι ένα *HMD* το οποίο λειτουργεί ως ολογραφικός υπολογιστής. Είναι η εξέλιξη του *Hololens 1*, με σκοπό να κάνει την εμπειρία πιο άνετη και πιο συναρπαστική, ώστε ο χρήστης να πιστεύει πως όντως βρίσκεται σε έναν εκτεταμένο κόσμο. Το λειτουργικό του είναι τα *Windows Holographic OS*, το οποίο βασίζεται στα *Windows 10*, δίνοντάς έτσι στον σχεδιαστή μια πλατφόρμα εύρωστη, ασφαλή και αποδοτική.

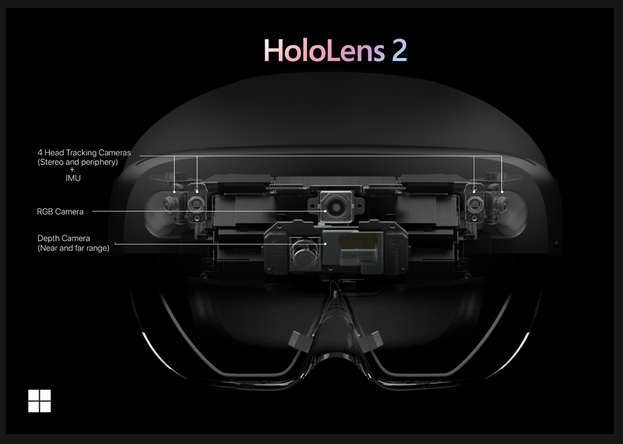
### Βασικά εξαρτήματα

* ***Visor*:** Η λεγόμενη προσωπίδα. Περιέχει τους αισθητήρες και τις οθόνες. Δίνεται η δυνατότητα περιστροφής της ακόμα και όταν φοράει κάποιος χρήστης τη συσκευή.
* ***Headband:* Μία ζώνη που περιβάλλει το κεφάλι και χρησιμοποιείται για να στηρίζεται η συσκευή πάνω σε αυτό. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει μία ροδέλα που βρίσκεται στο πίσω μέρος της ώστε να σφίξει ή χαλαρώσει τη ζώνη αυτή, ώστε να τη νιώθει άνετα.**
* ***Brightness buttons*: Όταν ο χρήστης φοράει τη συσκευή, τα κουμπιά που ρυθμίζουν τη φωτεινότητα βρίσκονται στην αριστερή μεριά του *headband* κοντά στον κρόταφό του.**
* ***Volume buttons*: Με τη σειρά τους, τα κουμπιά που ρυθμίζουν την ένταση του ήχου βρίσκονται στη δεξιά μεριά του headband, κοντά στον κρόταφό του.**
* ***Power button*: Το κουμπί που ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τη συσκευή βρίσκεται στη δεξιά πλευρά του πίσω εξωτερικού καλύμματος.**
* ***USB-C port*: Μία θύρα *USB type C* βρίσκεται κάτω από το *power button*. Μέσω αυτής ο σχεδιαστής μπορεί να συνδέσει τη συσκευή στον υπολογιστή του εάν θέλει να ανεβάσει την εφαρμογή του.**

### Αισθητήρες

Οι αισθητήρες που βρίσκονται πάνω στη συσκευή αποτελούν πολύ σημαντικό κομμάτι της, γιατί όπως θα δούμε, είναι τα εξαρτήματα τα οποία υλοποιούν τους διάφορους αλγορίθμους επεξεργασίας εικόνας, υπολογιστικής όρασης και οπτικής οδομετρίας των οποίων η περιγραφή έγινε σε προηγούμενες ενότητες.

* ***Head tracking*:** Για τον εντοπισμό της κεφαλής, χρησιμοποιούνται 4 κάμερες ορατού φωτός. Αυτές οι κάμερες είναι που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του *VIO-SLAM* ώστε η συσκευή να ξέρει τη θέση της και τον προσανατολισμός της στο χώρο.
* ***Eye tracking:*** 2 κάμερες υπέρυθρου φωτός χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό του βλέμματος του χρήστη.
* ***Depth:*** Ένας αισθητήρας βάθους, o οποίος χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση του χώρου.
* ***IMU*:** Μία μονάδα μέτρησης της αδράνειας, η οποία περιλαμβάνει επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο και μαγνητόμετρο. Όπως είδαμε παραπάνω, χρησιμοποιείται στην οπτική οδομετρία για τη βελτίωση της εκτίμησης της θέσης και του προσανατολισμού της συσκευής.
* ***Camera*:** Μία κάμερα με χαρακτηριστικά 8-MP, 1080p30 βίντεο.



ΕΙΚΟΝΑ 12 Κύριοι Αισθητήρες του Hololens 2

Επιπλέον, αναφέρεται πως τα ηχεία εφαρμόζουν τεχνολογία χωρικού ήχου, προσφέροντας έτσι μια πιο ρεαλιστική ακουστική εμπειρία, αφού ο ήχος δίνει την εντύπωση πως έρχεται από διάφορα σημεία στο χώρο, ακριβώς όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα.

Τέλος, για τη χωρική χαρτογράφηση του χώρου τα *Hololens* χρησιμοποιούν τον αισθητήρα βάθους και τις υπέρυθρες κάμερες. Ο αισθητήρας βάθους στέλνει ακτίνες στο χώρο, στις υπέρυθρες συχνότητες, οι οποίες και αντανακλώνται πάνω στα αντικείμενα. Έπειτα επιστρέφουν στα γυαλιά και συλλέγονται από τις υπέρυθρες κάμερες. Μέσω του χρόνου που έκανε να επιστρέψει μία ακτίνα, τα γυαλιά μπορούν να εκτιμήσουν την απόσταση των αντικειμένων από τον χρήστη και εν τέλει να δημιουργήσουν τον εικονικό χάρτη του περιβάλλοντος. Η διαδικασία αυτή είναι επαναληπτική.

### Τρόποι αλληλεπίδρασης – ελέγχου του *Hololens 2* [38]

Το *Hololens 2* προσφέρει διάφορους τρόπους αλληλεπίδρασης με το μικτό περιβάλλον που δημιουργεί. Σε γενικές γραμμές, η χρήση μοιάζει περισσότερο με τη χρήση ενός κινητού τηλεφώνου, όπου ο χρήστης χρησιμοποιεί περισσότερο τα χέρια του και λιγότερο εξωτερικές συσκευές, όπως ένα ποντίκι ή ένα πληκτρολόγιο.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία που έπειτα συνδέονται για τους διαφορετικούς τρόπους αλληλεπίδρασης.

* ***Gaze*-Βλέμμα** [39], [40]**:** Το «βλέμμα» του χρήστη. Το εικονικό βλέμμα του χρήστη είναι ουσιαστικά μια εικονική κουκίδα η οποία αναγράφεται στο οπτικό του πεδίο. Η κουκίδα αυτή ελέγχεται με 2 διαφορετικούς τρόπους, και τυπικά μπορεί να θεωρηθεί πως είναι το αντίστοιχο του κέρσορα του υπολογιστή:

1. Η κουκίδα μετακινείται με βάση την κίνηση του κεφαλιού.
2. Η κουκίδα μετακινείται με βάση το που βλέπει ο χρήστης. Βέβαια σε αυτήν την περίπτωση η *Microsoft* προτείνει να μην είναι ορατή η κουκίδα, διότι η κίνησή της βάσει του βλέμματος καθιστά κουραστικό στο χρήστη το γραφικό που βλέπει.

* ***Hand tracking*:** Τα *Hololens 2* προσφέρουν τη δυνατότητα ανίχνευσης και των 2 χεριών μέσω διάφορων τεχνικών υπολογιστικής όρασης και μηχανικής εκμάθησης. Ουσιαστικά ο χρήστης τοποθετεί τα χέρια του μπροστά από τις κάμερες της συσκευής ενώ η ίδια η συσκευή τρέχει συνεχώς έναν αλγόριθμο ανίχνευσης των χεριών. Όποτε εντοπιστεί ένα χέρι, το *Hololens* δημιουργεί ένα πλέγμα – σύνολο σημείων στο χώρο τα οποία και αποτελούν το εικονικό χέρι. Παρότι η ανίχνευση είναι αρκετά εύρωστη, παρατηρείται ελάχιστη καθυστέρηση στην απόκριση των κινήσεων του χρήστη.

# Βιβλιογραφία

[1] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, and F. Kishino, “Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum,” *Telemanipulator Telepresence Technol.*, vol. 2351, Jan. 1994, https://doi.org/10.1117/12.197321

[2] “Extended reality,” *Wikipedia*. Sep. 18, 2022. Accessed: Sep. 21, 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Extended\_reality&oldid=1110892164

[3] “Virtual reality,” *Wikipedia*. Sep. 13, 2022. Accessed: Sep. 21, 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Virtual\_reality&oldid=1110016947

[4] M. Speicher, B. Hall, and M. Nebeling, “What is Mixed Reality?,” May 2019. https://doi.org/10.1145/3290605.3300767

[5] M. Javaid and A. Haleem, “Virtual Reality applications toward medical field,” *Clin. Epidemiol. Glob. Health*, vol. 8, Dec. 2019, https://doi.org/10.1016/j.cegh.2019.12.010

[6] H. O. Barros, M. M. Soares, E. L. R. Filho, W. Correia, and F. Campos, “Virtual Reality Immersion: An Important Tool for Diagnostic Analysis and Rehabilitation of People with Disabilities,” *Lect. Notes Comput. Sci.*, pp. 337–344, 2013.

[7] “Half-Life: Alyx,” *Half-Life*. https://www.half-life.com/en/alyx (accessed Sep. 21, 2022).

[8] L. digital studio, “Beat Saber - VR rhythm game.” https://www.beatsaber.com/ (accessed Sep. 21, 2022).

[9] H. Luo, G. Li, Q. Feng, Y. Yang, and M. Zuo, “Virtual reality in K-12 and higher education: A systematic review of the literature from 2000 to 2019,” *J. Comput. Assist. Learn.*, vol. 37, no. 3, pp. 887–901, 2021, https://doi.org/10.1111/jcal.12538

[10] “Augmented reality,” *Wikipedia*. Sep. 20, 2022. Accessed: Sep. 21, 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Augmented\_reality&oldid=1111308728

[11] “Pokémon GO,” *Pokémon GO*. https://pokemongolive.com/ (accessed Sep. 21, 2022).

[12] H. Soneria, “AR Decor: Decoration using markerless Augmented Reality,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 5, p. 2145, 2020.

[13] “Houzz - Home Design & Remodel - Εφαρμογές στο Google Play.” https://play.google.com/store/apps/details?id=com.houzz.app&hl=el&gl=GR (accessed Sep. 21, 2022).

[14] F. Tscheu and D. Buhalis, “Augmented Reality at Cultural Heritage sites,” 2016, pp. 607–619. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28231-2\_44

[15] G. Martin *et al.*, “Use of the HoloLens2 Mixed Reality Headset for Protecting Health Care Workers During the COVID-19 Pandemic: Prospective, Observational Evaluation,” *J. Med. Internet Res.*, vol. 22, no. 8, p. e21486, Aug. 2020, https://doi.org/10.2196/21486

[16] D. F. Bosché, D. M. Abdel-Wahab, and D. L. Carozza, “Towards a Mixed Reality System for Construction Trade 1 Training 2,” 2015. https://www.semanticscholar.org/paper/Towards-a-Mixed-Reality-System-for-Construction-1-2-Bosch%C3%A9-Abdel-Wahab/f3de52d5e7f998fce95cbe7be9c73c2c0ed04607 (accessed Sep. 21, 2022).

[17] Yilei Huang, Samjhana Shakya, and Temitope Odeleye, “Comparing the Functionality between Virtual Reality and Mixed Reality for Architecture and Construction Uses,” *J. Civ. Eng. Archit.*, vol. 13, no. 7, Jul. 2019, https://doi.org/10.17265/1934-7359/2019.07.001

[18] A. Muñoz and A. Martí Testón, “HOLOMUSEUM: A HOLOLENS APPLICATION FOR CREATING EXTENSIBLE AND CUSTOMIZABLE HOLOGRAPHIC EXHIBITIONS,” Jul. 2018, pp. 2303–2310. https://doi.org/10.21125/edulearn.2018.0625

[19] W. Hou, “Augmented Reality Museum Visiting Application based on the Microsoft HoloLens,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1237, p. 052018, Jun. 2019, https://doi.org/10.1088/1742-6596/1237/5/052018

[20] T. Davis, “Homogeneous coordinates and computer graphics,” Dec. 2001.

[21] “Homogeneous coordinates,” *Wikipedia*. May 26, 2022. Accessed: Sep. 21, 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Homogeneous\_coordinates&oldid=1089902994

[22] Y.-B. Jia, “Quaternions and Rotations,” p. 12.

[23] G. S. and B. Eater, “Visualizing quaternions, an explorable video series.” https://eater.net/quaternions (accessed Sep. 22, 2022).

[24] R. Saroha, R. Bala, and S. Siwach, “Review paper on Overview of Image Processing and Image Segmentation,” p. 13, 2013.

[25] D. Ziou and S. Tabbone, “Edge Detection Techniques - An Overview,” vol. 8, Jun. 2000.

[26] “How does the Microsoft HoloLens work?,” *Quora*. https://www.quora.com/How-does-the-Microsoft-HoloLens-work (accessed Sep. 22, 2022).

[27] N. A. Ismail, T. C. Wen, S. Salam, A. M. Nawi, and S. E. N. Mohamed, “A Review Of Visual Inertial Odometry For Object Tracking And Measurement,” vol. 9, no. 02, p. 7, 2020.

[28] “Visual odometry,” *Wikipedia*. Jul. 23, 2022. Accessed: Sep. 23, 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Visual\_odometry&oldid=1100024244

[29] M. Maimone, Y. Cheng, and L. Matthies, “Two years of Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers,” *J. Field Robot.*, vol. 24, no. 3, pp. 169–186, Mar. 2007, https://doi.org/10.1002/rob.20184

[30] “OpenCV: Optical Flow.” https://docs.opencv.org/3.4/db/d7f/tutorial\_js\_lucas\_kanade.html (accessed Sep. 23, 2022).

[31] Y. Wang, L. Chen, P. Wei, and X. Lu, “Visual-Inertial Odometry of Smartphone under Manhattan World,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 22, p. 3818, Nov. 2020, https://doi.org/10.3390/rs12223818

[32] D. Ksentini, A. R. Elhadi, and N. Lasla, “Inertial Measurement Unit: Evaluation for Indoor Positioning,” in *2014 International Conference on Advanced Networking Distributed Systems and Applications*, Bejaia, Algeria, Jun. 2014, pp. 25–30. https://doi.org/10.1109/INDS.2014.12

[33] O. J. Woodman, “An introduction to inertial navigation,” p. 37.

[34] K. Yousif, A. Bab-Hadiashar, and R. Hoseinnezhad, “An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM: Applications to Mobile Robotics,” *Intell. Ind. Syst.*, vol. 1, no. 4, pp. 289–311, Dec. 2015, https://doi.org/10.1007/s40903-015-0032-7

[35] N. Karlsson, E. di Bernardo, J. Ostrowski, L. Goncalves, P. Pirjanian, and M. E. Munich, “The vSLAM Algorithm for Robust Localization and Mapping,” in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 24–29. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570091

[36] D. Dornellas, F. Rosa, A. Bernardino, R. Ribeiro, and J. Santos-Victor, “GPS emulation via visual-inertial odometry for inspection drones,” Dec. 2019, pp. 755–760. https://doi.org/10.1109/ICAR46387.2019.8981597

[37] scooley, “HoloLens 2 hardware.” https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/hololens2-hardware (accessed Sep. 24, 2022).

[38] Mamaylya, “HoloLens 2 gestures (for example, gaze and air tap) for navigating a guide in Dynamics 365 Guides - Dynamics 365 Mixed Reality.” https://learn.microsoft.com/en-us/dynamics365/mixed-reality/guides/operator-gestures-hl2 (accessed Sep. 24, 2022).

[39] sostel, “Eye tracking overview - Mixed Reality.” https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/eye-tracking (accessed Sep. 24, 2022).

[40] sostel, “Eye-gaze-based interaction - Mixed Reality.” https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/eye-gaze-interaction (accessed Sep. 24, 2022).