

# ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΣ ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Φρέντζος Ηλίας<sup>1\*</sup>, Τουρνάς Ελευθέριος<sup>2</sup>, Σκαρλάτος Δημήτριος<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geonoesis Ltd, Δοσιθέου 7, 1071, Λευκωσία, Κύπρος, efrentzo@geonoesis.com

<sup>2</sup> Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Γεωπληροφορικής, Αρχ. Κυπριανού 30, 3036, Λεμεσός, Κύπρος, (eleftherios.tournas, dimitrios.skarlatos)@cut.ac.cy

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση ενός συστήματος κινητής χαρτογράφησης (Mobile Mapping System - MMS) χαμηλού κόστους με την ολοκλήρωση δεδομένων πλοήγησης από GPS / INS και στερεοσκοπικών εικόνων που λαμβάνονται κατά μήκος των διαδρομών ενός κινούμενου οχήματος. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια πλακέτα GPS/GNSS διπλής συχνότητας σε συνδυασμό με μια μονάδα INS χαμηλού κόστους και δύο κάμερες όρασης που συλλέγουν δεδομένα έγχρωμων εικόνων κατά μήκος ενός δρόμου. Τα δεδομένα πλοήγησης και οι αντίστοιχες εικόνες συγχρονίζονται σωστά ώστε να υπολογίζεται η θέση της κάθε στερεοσκοπικής εικόνας που έχει καταγράφεται από το σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο, οι απόλυτες γεωγραφικές συντεταγμένες των ρικελ των αντικειμένων που εμφανίζονται στα αντίστοιχα καρέ μπορούν να εξαχθούν χρησιμοποιώντας τυπικές φωτογραμμετρικές μεθόδους. Πριν από τη λειτουργία του συστήματος εφαρμόζονται αρκετά βήματα βαθμονόμησης: βαθμονόμηση κάμερας, σχετικός προσανατολισμός μεταξύ των καμερών και προσδιορισμός των γωνιών στροφής και της μετάθεσης μεταξύ των πλαισίων αναφοράς του οχήματος και των καμερών, διαδικασίες που διευκολύνονται από ένα κατάλληλο εργαλείο λογισμικού που έχει αναπτυχθεί για αυτό το σκοπό. Άλλα εργαλεία λογισμικού που έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια του παρόντος συστήματος υποστηρίζουν τόσο την υποβοήθηση της διαδικασίας συλλογής δεδομένων στο πεδίο, όσο και την ταχύτερη ψηφιοποίηση στο γραφείο, όπου, υποστηρίζεται η εύκολη – μονοσκοπική – σκόπευση και εξαγωγή συντεταγμένων αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας τεχνικές συσχέτισης εικόνας στο κάθε ζεύγος εικόνων. Αρκετά πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί για την πιστοποίηση και τον έλεγχο της ακρίβειας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων προκύπτει ότι το σύστημα είναι αποτελεσματικό για τη συλλογή παρόδιων χωρικών δεδομένων, όπως όρια δρόμων, φανάρια, πινακίδες, στύλοι φωτισμού κ.λπ., πιο γρήγορα, με μεγαλύτερη ακρίβεια, και λιγότερο δαπανηρά σε σχέση με υπάρχουσες μεθόδους. Η απόλυτη ακρίβεια θέσης που λαμβάνεται είναι πάντα καλύτερη από 0,5 μέτρο, ενώ ποικίλει ανάλογα με τη διαθεσιμότητα, την ποιότητα του σήματος GPS και την απόσταση του αντικειμένου από τις κάμερες.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Σύστημα κινητής χαρτογράφησης, χαμηλό κόστος, φωτογραμμετρία, GIS

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συντήρηση και παρακολούθηση ενός οδικού δικτύου απαιτεί ακριβή χωρικά δεδομένα τα οποία πρέπει να επικαιροποιούνται σε τακτική βάση. Η συλλογή τέτοιων πληροφοριών είναι χρονοβόρα εργασία που συνεπάγεται σημαντικό κόστος. Για τη μείωση του χρόνου και του κόστους που συνεπάγεται η συλλογή τέτοιων δεδομένων, χρησιμοποιούνται συχνά Συστήματα Κινητής Χαρτογράφησης (Mobile Mapping Systems - MMS) εξοπλισμένα με κάμερες και σαρωτές λέιζερ. Από την άλλη Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των φωτογραφικών μηχανών, των δεκτών GNSS / GPS και των INS, των υπολογιστών και των αλγορίθμων για την τρισδιάστατη ανακατασκευή αντικειμένων από εικόνες, αύξησαν το ενδιαφέρον για MMS χαμηλού κόστους. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το πρωτότυπο ενός τέτοιου MMS, που αποτελείται από τρία υποσυστήματα: δύο κάμερες μηχανικής όρασης (υποσύστημα απεικόνισης), ένα δέκτη GNSS διπλής συχνότητας ικανό να παρέχει λύσεις RTK και μια συσκευή INS (υποσύστημα εντοπισμού θέσης), και έναν απλό φορητό υπολογιστή υπολογιστής με εξειδικευμένο λογισμικό (υποσύστημα εγγραφής), συγχρονισμένα κατάλληλα για την απόκτηση στερεοσκοπικών εικόνων με γεωαναφορά.

Σε γενικές γραμμές, το προτεινόμενο στην παρούσα εργασία MMS χαμηλού κόστους, αποτελείται από τρία υποσυστήματα: α) το υποσύστημα απεικόνισης, δηλαδή κάμερες μηχανικής όρασης υψηλής τεχνολογίας, β) το υποσύστημα εντοπισμού θέσης που αποτελείται από χαμηλού κόστους πλακέτες RTK GPS / GNSS και INS, συνοδευόμενες από τις κεραίες τους, και γ) το υποσύστημα καταγραφής δεδομένων που αποτελείται από έναν τυπικό φορητό υπολογιστή μαζί με το λογισμικό που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό. Η παρούσα εργασία βασίζεται επάνω στην Frentzos et al, 2020 την οποία ενημερώνει και επεκτείνει.

### **1.1 Σύντομη περιγραφή**

Πιο συγκεκριμένα, το υποσύστημα απεικόνισης αποτελείται από δύο κάμερες μηχανικής όρασης FLIR Blackfly, που σχηματίζουν μία στερεοσκοπική κάμερα (stereo rig). Οι κάμερες τοποθετούνται σε ένα σταθερό πλαίσιο αλουμινίου με τέτοιο τρόπο ώστε οι οπτικοί τους άξονες να είναι περίπου παράλληλοι και σταθεροί. Η βάση του στερεοσκοπικού συστήματος είναι περίπου 65 cm. Οι κάμερες συνδέονται στο φορητό υπολογιστή μέσω θύρας USB 3.0 και οι εικόνες που λαμβάνονται αποθηκεύονται σε μορφή βίντεο. Η λήψη κάθε εικόνας ενεργοποιείται εξωτερικά από ένα παλμό (pulse per second – PPS) που δημιουργείται από τον δέκτη GPS, ο οποίος μπορεί να παράγεται και αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η τέλεια ταυτόχρονη λήψη των καρέ των δύο καμερών και ο ακριβής συγχρονισμός τους με το χρόνο GPS έως την ακρίβεια των νανοδευτερολέπτων.

Το υποσύστημα πλοήγησης - εντοπισμού θέσης αποτελείται από έναν δέκτη GPS/GNSS χαμηλού κόστους, ένα INS και την αντίστοιχη κεραία. Ο δέκτης GPS/GNSS τροφοδοτείται επίσης με διορθώσεις δεδομένων RTCM κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συλλογής παρέχοντας έτσι λύσεις σε πραγματικό χρόνο προς το υποσύστημα εγγραφής. Τα πρωτογενή δεδομένα του GPS / GNSS καταγράφονται επίσης προκειμένου να παρέχουν λύσεις μετεπεξεργασίας, χρησιμοποιώντας διάφορες βιβλιοθήκες ανοιχτού κώδικα (π.χ. RTK Lib). Για τη βελτίωση της συχνότητας των θέσεων εγγραφής χρησιμοποιείται μια επιπλέον πλακέτα GNSS/INS που βελτιώνει τη συχνότητα των θέσεων εγγραφής μέχρι και σε 100 Hz. Η ολοκληρωμένη λύση πλοήγησης, που παρέχεται από όλα τα παραπάνω υποσυστήματα,

περιλαμβάνει τη θέση καθώς και τον προσανατολισμό του οχήματος (X, Y, Z, Roll, Pitch, Yaw).

Τέλος, το υποσύστημα καταγραφής δεδομένων υλοποιείται σένα τυπικό φορητό υπολογιστή με ένα λογισμικό που έχει αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό. Αυτό το λογισμικό έχει τη δυνατότητα ροής NMEA και ακατέργαστων δεδομένων από τον δέκτη GNSS, μεταδίδει διορθώσεις RTCM σε αυτόν, και επιπλέον λαμβάνει δεδομένα πλοήγησης από το INS και δεδομένα εικόνων από το υποσύστημα λήψης εικόνων. Ταυτόχρονα, εμφανίζει όλα τα συγκεντρωμένα δεδομένα (εικόνες και θέση σε χάρτη) στον τελικό χρήστη, με ασύγχρονο τρόπο, για να βοηθήσει στη διαχείριση της διαδικασίας συλλογής δεδομένων και να διευκολύνει την πλοήγηση του οχήματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ελεύθερα διαθέσιμοι διαδικτυακοί χάρτες με σκοπό την εμφάνιση της τρέχουσας και της προηγούμενης θέσης του οχήματος, ενώ είναι επίσης εφικτή η συμπερίληψη επιπλέον διαθέσιμων διανυσματικών ή ψηφιδωτών δεδομένων.

Η βαθμονόμηση του MMS μας επιτυγχάνεται με μια διαδικασία τριών βημάτων: ξεχωριστή βαθμονόμηση κάθε κάμερας (εσωτερικός προσανατολισμός), βαθμονόμηση της στερεοσκοπικής κάμερας (σχετικός προσανατολισμός) και εκτίμηση της σχέσης μεταξύ του πλαισίου αναφοράς της στερεοσκοπικής κάμερας και της ολοκληρωμένης λύσης του υποσυστήματος πλοήγησης GPS/GNSS/INS (εξωτερικός προσανατολισμός). Ο εσωτερικός και ο σχετικός προσανατολισμός πραγματοποιούνται σε εργαστηριακές συνθήκες λαμβάνοντας φωτογραφίες ενός κανονικού κανάβου από διαφορετικές γωνίες, χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη OpenCV, ενώ ο εξωτερικός προσανατολισμός παρέχεται από ένα αρχικό βήμα οπισθοτομίας με παράλληλη λειτουργία του υποσυστήματος παροχής θέσης. Μετά τη βαθμονόμηση του συστήματος είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι συντεταγμένες ενός σημείου που είναι ορατό και σε δύο εικόνες του στερεοσκοπικού ζεύγους στο γεωγραφικό σύστημα αναφοράς, καθώς και σε σημεία που είναι ορατά σε διαδοχικές, εικόνες, κατάλληλης γεωμετρίας.

Πολλά στοιχεία λογισμικού (software components) περιλαμβάνονται στο πρωτότυπο. Εκτός από το λογισμικό συλλογής δεδομένων που εμφανίζει δεδομένα συλλογής και πλοήγησης σε πραγματικό χρόνο, έχουμε αναπτύξει εργαλεία βαθμονόμησης, καθώς και λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση μετρήσεων και την αποθήκευση των δεδομένων που συλλέγονται από τον χρήστη. Αυτά τα στοιχεία λογισμικού βασίζονται κυρίως σε βιβλιοθήκες ανοιχτού κώδικα όπως η OpenCV για τη βαθμονόμηση κάμερας και τη φωτογραμμετρική επεξεργασία, και η FFmpeg για τον χειρισμό δεδομένων βίντεο.

## **2 ΥΠΟΒΑΘΡΟ**

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες αρκετά ερευνητικά MMS έχουν αναπτυχθεί. Σήμερα υπάρχουν ήδη εμπορικά συστήματα υψηλού επιπέδου, τα οποία αναπτύχθηκαν από γνωστές εταιρείες του τομέα (Riegl, Arplanix, Topcon κ.λπ.). Τα MMS χρησιμοποιούνται κυρίως για την εξαγωγή λεπτομερών δεδομένων 3D σε υψηλή ανάλυση και ακρίβεια σε διάφορους τομείς, όπως ο πολεοδομικός σχεδιασμός, η μοντελοποίηση κτιρίων 3D, η πολιτιστική κληρονομιά, η επαυξημένη πραγματικότητα, οι μεταφορές και η δασοκομία (Byungyun Y., 2019). Στον τομέα της παρακολούθησης οδικού δικτύου, το σύγχρονα MMS παρέχουν υψηλής ποιότητας πληροφορίες με σημαντική ταχύτητα και βελτιωμένη μοντελοποίηση αντικειμένων. Ωστόσο, αυτά τα

συστήματα είναι αρκετά ακριβά, ενώ είναι συνήθως περίπλοκα ως προς την εγκατάσταση και το χειρισμό τους.


Τα τελευταία χρόνια, με την πρόοδο της τεχνολογίας και των υπολογιστών, έχουν προταθεί αρκετά φθηνότερα και ευκολότερα στη χρήση συστήματα. Αυτά τα MMS βασίζονται συνήθως σε βιντεοκάμερες και χαμηλού κόστους πλακέτες GPS μίας συχνότητας που διατίθενται από την U-Blox από το 2009. Ωστόσο, στα περισσότερα από αυτά η ακρίβεια θέσης περιορίζεται από το GPS μίας συχνότητας. Από την άλλη, κατά το 2019, η U-Blox κυκλοφόρησε ένα νέο τσιπ GNSS διπλής συχνότητας στην αγορά, ικανό να παρέχει ακρίβεια επιπέδου εκατοστών με κόστος 150 € (U-Blox, 2020), ενώ τα αντίστοιχα πακέτα / κιτ ανάπτυξης στην αγορά που βασίζονται σε αυτό το τσιπ δεν υπερβαίνουν τα 300 €. Πρόκειται για μια σημαντική τεχνολογική βελτίωση που ενσωματώνεται στο υπό παρουσίαση σύστημα, προκειμένου να παρέχει υψηλή ακρίβεια θέσης χωρίς τη χρήση ακριβού γεωδαιτικού GPS.

### 3 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα κύρια συστατικά του ανεπτυγμένου συστήματος είναι ένα σύστημα λήψης εικόνων με δύο κάμερες υψηλής ανάλυσης, ένα σύστημα πλοήγησης GPS / INS για την άμεση γεωαναφορά των εικόνων και ένα υποσύστημα καταγραφής δεδομένων για αποθήκευση και μετά-επεξεργασία. Οι λεπτομέρειες των επιλεγμένων στοιχείων και της αντίστοιχης εφαρμογής δίνονται στις ακόλουθες ενότητες

#### 3.1 Υποσύστημα Εικόνας

Το υποσύστημα λήψης εικόνων του MMS μας αποτελείται από δύο κάμερες Blackfly S USB3 που διατίθενται από τη FLIR (<https://www.flir.com>). Οι κάμερες Blackfly S αξιοποιούν τους πιο προηγμένους αισθητήρες της βιομηχανίας σε πολύ μικρό μέγεθος και ισχυρά εργαλεία λογισμικού που επιτρέπουν την λήψη εικόνων υψηλής ανάλυσης και διευκολύνουν την ανάπτυξη εφαρμογών. Αυτά περιλαμβάνουν τόσο τον αυτόματο όσο και τον ακριβή μη αυτόματο έλεγχο της λήψης εικόνας και της προεπεξεργασίας της στην κάμερα. Το επιλεγμένο μοντέλο Blackfly S έχει τις ακόλουθες τεχνικές προδιαγραφές:

			
MODEL: BFS-U3-50S5C-C: 5.0 MP, 35 FPS, SONY IMX264, COLOR			
Frame Rate	35 FPS	Sensor Format	2/3"
Lens Mount	C-mount	ADC	12-bit
Pixel Size	3.45 μm	Megapixels	5.0 MP
Resolution	2448 × 2048 pixels	Readout Method	Global shutter
Sensor Type	CMOS	Sensor Name	Sony IMX264
		Interface	USB 3.1 Gen 1

Οι δύο κάμερες είναι τοποθετημένες σε σταθερή απόσταση για να σχηματίσουν μια στεροσκοπική κάμερα, ικανή να συλλάβει εικόνες με μεγαλύτερη του 80%

αλληλεπικάλυψη κατά μήκος της τροχιάς του οχήματος. Λαμβάνοντας ως παράδειγμα ένα όχημα που κινείται σε αστική περιοχή με ταχύτητα 80 km/h και το μέγιστο ρυθμό καρέ της κάμερας, μπορούν να ληφθούν αποτελεσματικά στερεοσκοπικές εικόνες σε διάστημα 0,64 μέτρων χρησιμοποιώντας αυτόν τον εξοπλισμό.

Η λήψη εικόνων που αποκτήθηκαν «ταυτόχρονα» και από τις δύο κάμερες, είναι υψίστης σημασίας για το σύστημά μας. Διαφορετικά, θα παρατηρηθούν σημαντικά σφάλματα θέσης στις μετρήσεις συντεταγμένων. Αυτά τα σφάλματα αυξάνονται με την ταχύτητα του οχήματος και πρέπει να ελαχιστοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο. Στον ορισμό μας «η ίδια ώρα» είναι ότι οι κάμερες πρέπει να αρχίσουν να εκθέτουν κάθε εικόνα μέσα σε μικροδευτερόλεπτα η μία από την άλλη. Μια προσέγγιση για την επίτευξη μιας τέτοιας συγχρονισμένης λήψης, είναι η χρήση της π.χ. αριστερής κάμερα ως «πρωτεύουσας»: οι δύο κάμερες συνδέονται με κατάλληλο καλώδιο GPIO που στέλνει ένα παλμό από την πρωτεύουσα στη δευτερεύουσα κάμερα για να λαμβάνει ταυτόχρονα εικόνες. Από την άλλη πλευρά, ενώ αυτή η προσέγγιση είναι αποτελεσματική σε συνθήκες εργαστηρίου, θα πρέπει να αναθεωρηθεί όταν ενσωματωθεί στο υποσύστημα εντοπισμού θέσης, ακολουθώντας τη μεθοδολογία που παρέχεται στις παρακάτω ενότητες.

### 3.2 Υποσύστημα εντοπισμού θέσης

Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των δεκτών και των τσιπ GNSS, μας κατεύθυναν προς την χρήση μίας πλακέτας RTK χαμηλού κόστους, έναντι των περισσότερων εμπορικών δεκτών GNSS / GPS που κοστίζουν ακόμη αρκετές χιλιάδες ευρώ. Έτσι, επιλέξαμε τον επεξεργαστή της U-blox F9P ενσωματωμένο σε μια πλακέτα Sparkfun GPS-RTK2. Πρόκειται για μια προσιτή λύση, καθώς το κόστος της δεν υπερβαίνει τα 300 €. Χρησιμοποιήσαμε επίσης μια κεραία ικανή να λαμβάνει σήματα L1 / L2 από GPS, GLONASS και Galileo L5. Το κύριο πλεονέκτημα της πλακέτας GPS-RTK2 είναι ότι μπορεί να δεχτεί μηνύματα RTCM και έτσι να επιτύχει σταθερές (fixed) κινηματικές λύσεις με ακρίβεια 0,01 m + 1 ppm CEP οριζόντια και 0,01 m +1 ppm CEP κατακόρυφα, και επίσης έναν τυπικό χρόνο σύγκλισης, στη λειτουργία RTK, λιγότερο από 10 δευτερόλεπτα. Χρησιμοποιήσαμε επίσης την συσκευή INS XSENS MTI-7-DK που παρέχει δεδομένα στροφών με RMS 0,5° Roll / pitch (στατικό - δυναμικό) και 1,5° Yaw (δυναμικό).

Έχουμε αναπτύξει περαιτέρω ένα στοιχείο λογισμικού (software component) που επικοινωνεί απευθείας με την πλακέτα GPS-RTK2 μέσω μιας διεπαφής (σειριακή θύρα) που χρησιμεύει τόσο ως δέκτης όσο και ως πάροχος δεδομένων. Το αναπτυγμένο στοιχείο λογισμικού εκτελεί τις ακόλουθες εργασίες:

- Διαμόρφωση της συσκευής: Το λογισμικό διαμορφώνει αρχικά τη συσκευή ώστε να λαμβάνει μηνύματα RTCM3 και να μεταδίδει τις αντίστοιχες λύσεις (προτάσεις NMEA), καθώς και τα πρωτογενή δεδομένα μέτρησης και πλοήγησης GNSS.
- Λήψη και ανάλυση δεδομένων NMEA: Η χρησιμοποιούμενη πλακέτα μεταδίδει δεδομένα θέσης πίσω στο λογισμικό μας σύμφωνα με τις προδιαγραφές NMEA. Επομένως, αναπτύξαμε ένα στοιχείο που αναλύει τις αντίστοιχες προτάσεις και τις μετατρέπει σε πληροφορίες που εμφανίζονται στην αντίστοιχη διεπαφή χρήστη.
- Αποστολή διορθώσεων RTCM: Οι διορθώσεις RTCM συλλέγονται από παρόχους NTRIP (CYPOS, ATLAS, URANUS, HEPOS κ.λπ.) και μεταδίδονται στον παραλήπτη.

Έχουμε δοκιμάσει την προσέγγισή μας και βρήκαμε ότι ο χρόνος που απαιτείται για παροχή fixed λύσης κυμαίνεται από 20 δευτερόλεπτα έως 1 λεπτό υπό συνήθεις συνθήκες και διατηρείται υπό καλές συνθήκες (ατμοσφαιρικές συνθήκες, μήκος βάσης, κεραία GNSS, συνθήκες πολλαπλών διαδρομών, δορυφορική ορατότητα και γεωμετρία σύμφωνα και με το δελτίο δεδομένων του προϊόντος).

Τέλος, έχουμε αναπτύξει ένα στοιχείο λογισμικού που επικοινωνεί με το INS MTI-7, χρησιμοποιώντας το παρεχόμενο kit ανάπτυξης λογισμικού (SDK).

## 4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η βαθμονόμηση είναι η διαδικασία προσδιορισμού του εσωτερικού, σχετικού και εξωτερικού προσανατολισμού του υποσυστήματος εικόνων, καθώς και η διόρθωση του σφάλματος ευθυγράμμισης μεταξύ των καμερών και του υποσυστήματος εντοπισμού (GPS / GNSS / INS), η οποία περιλαμβάνει στοιχεία μετάθεσης και στροφής μεταξύ των καμερών και του γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς.

### 4.1 Βαθμονόμηση κάμερας

Η βαθμονόμηση κάμερας είναι ένα απαραίτητο βήμα στις εργασίες τρισδιάστατης μηχανικής όρασης για την εξαγωγή μετρικών πληροφοριών από δισδιάστατες εικόνες. Η διαδικασία βαθμονόμησης της κάμερας περιλαμβάνει την εκτίμηση πολλών παραμέτρων:

- η εσωτερική γεωμετρία κάθε κάμερας (εσωτερικός προσανατολισμός)
- τη σχετική θέση μεταξύ των δύο καμερών (σχετικός προσανατολισμός)

Ο εσωτερικός προσανατολισμός είναι ένα μέρος της βαθμονόμησης της κάμερας όπου προσδιορίζονται οι μετρήσεις που σχετίζονται με την κάμερα, όπως το οπτικό κέντρο και το εστιακό βάθος (OpenCV, 2019). Περιλαμβάνει επίσης την εύρεση της κλίμακας, και των διαστροφών του φακού. Ο εσωτερικός προσανατολισμός πραγματοποιείται σε εργαστηριακές συνθήκες λαμβάνοντας φωτογραφίες από ένα κανονικό κάρναβο από διαφορετικές γωνίες (Εικόνα 1).

Το μοντέλο κάμερας που έχει υιοθετηθεί είναι αυτό της προβολής σημείου (pinhole) (**Error! Unknown switch argument.**). Σε αυτό το μοντέλο κάθε εικόνα δημιουργείται προβάλλοντας τα τρισδιάστατα σημεία στο επίπεδο της εικόνας χρησιμοποιώντας τον προβολικό μετασχηματισμό:

$$sM m' = A[R|t]' \quad (1)$$

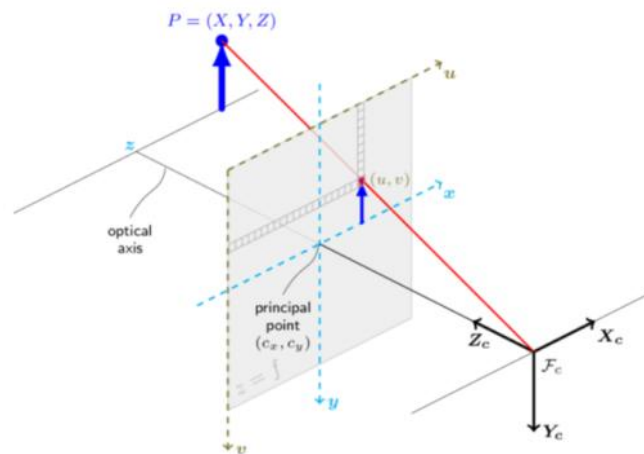
ή

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

όπου:

- $(X, Y, Z)$ : Οι συντεταγμένες σε μέτρα ενός 3D σημείου στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς
- $(u, v)$  : Οι συντεταγμένες του προβαλλόμενου σημείου στο σύστημα της εικόνας σε pixels
- $A$ : ο πίνακας της κάμερας που αποτελείται από έναν πίνακα στροφής και ένα διάνυσμα μετάθεσης

- $(c_x, c_y)$ : το πρωτεύων σημείο της κάμερας που είναι συνήθως το κέντρο της εικόνας.
- $f_x, f_y$ : η εστιακή απόσταση σε pixels



Εικόνα 1: Μοντέλο κάμερας (OpenCV online documentation)\_



Εικόνα 2: Σκακιέρα και διαδικασία βαθμονόμησης

Ο σχετικός προσανατολισμός (OpenCV, 2019) περιλαμβάνει την εκτίμηση του μετασχηματισμού μεταξύ δύο καμερών, ήτοι της σχετικής μετάθεσης και στροφής μεταξύ τους. Έτσι, εφόσον η σχετική θέση και ο προσανατολισμός των δύο καμερών μένουν σταθερά, γνωρίζοντας την στροφή  $R$  και τη μετάθεση  $T$  ενός αντικειμένου σε σχέση με την πρώτη  $(R1, T1)$  και τη δεύτερη  $(R2, T2)$  κάμερα, τότε αυτές οι εικόνες συσχετίζονται μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι, δεδομένου ενός προσανατολισμού  $(R1, T1)$ , θα πρέπει να είναι δυνατό να υπολογιστεί ο προσανατολισμός  $(R2, T2)$  εάν είναι γνωστή η θέση και ο προσανατολισμός της δεύτερης κάμερας σε σχέση με την πρώτη κάμερα. Αυτό ακριβώς κάνει ο σχετικός προσανατολισμός. Υπολογίζει τα  $(R, T)$  έτσι ώστε:

$$R2 = R * R1 \quad (3)$$

$$T2 = R * T1 + T \quad (4)$$

Ο εσωτερικός προσανατολισμός και οι παράμετροι σχετικού προσανατολισμού υπολογίζονται σε ένα βήμα χρησιμοποιώντας την βιβλιοθήκη OpenCV. Για τη βαθμονόμηση, χρησιμοποιούνται πολλές εικόνες μίας σκακιέρας με σταθερό μέγεθος, της οποίας τα γωνιακά σημεία ανιχνεύονται αυτόματα σε κάθε εικόνα (Εικόνα 2: Σκακιέρα και διαδικασία βαθμονόμησης). Αυτά τα γωνιακά σημεία στην εικόνα αντιστοιχούν σε κάποιο σημείο 3D στο πραγματικό κόσμο, το οποίο είναι εύκολο να υπολογιστεί, καθώς η σκακιέρα έχει μια πολύ καλά καθορισμένη γεωμετρία. Αυτές τα ζεύγη σημείων είναι τα δεδομένα εισόδου στην OpenCV για την εκτίμηση των παραμέτρων βαθμονόμησης.

#### 4.2 Διόρθωση σφάλματος ευθυγράμμισης

Δεδομένου ότι το σύστημα συλλογής δεδομένων αποτελείται από δύο ξεχωριστά υποσυστήματα, κάμερες και συσκευές GPS / INS, αυτά καταγράφουν τιμές στο ξεχωριστό σύστημα συντεταγμένων τους (σύστημα εικόνων / γεωδαιτικό σύστημα). Μόλις τα υποσυστήματα αυτά ολοκληρωθούν, θα πρέπει να βαθμονομηθούν προτού χρησιμοποιηθούν για συλλογή δεδομένων. Υπό αυτήν την οπτική, η βαθμονόμηση είναι ο υπολογισμός του σφάλματος ευθυγράμμισης μεταξύ διαφορετικών αισθητήρων που ανήκουν στο ίδιο σύστημα (Mostafa, 2001). Γενικά, το σφάλμα ευθυγράμμισης περιλαμβάνει στοιχεία μετάθεσης και στροφής μεταξύ του υποσυστήματος λήψης εικόνων και του υποσυστήματος πλοήγησης (GPS / INS).

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι τιμές μετάθεσης και στροφής που απαιτούνται για τη μετατροπή των δεδομένων από το σύστημα αναφοράς των εικόνων στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ των φυσικών θέσεων των καμερών και του GPS / GNSS / INS. Αυτό επιτυγχάνεται με μια αρχική οπισθοτομία σε ένα μικρό πεδίο ελέγχου με προσημασμένα σημεία στόχους, συλλέγοντας ταυτόχρονα μετρήσεις που παρέχονται από το INS και το GPS/GNSS. Με αυτό τον τρόπο συλλέγονται στοιχεία των εξωτερικών προσανατολισμών: των δύο υποσυστημάτων, και υπολογίζεται η διαφορά τους, η οποία στη συνέχεια «προστίθεται» σε κάθε μία από τις θέσεις / στροφές που καταγράφονται κατά την επιχειρησιακή λειτουργία του συστήματος.

#### 4.3 Συγχρονισμός

Ο συγχρονισμός μεταξύ των υποσυστημάτων παροχής θέσης και λήψης εικόνων είναι καθοριστικής σημασίας για το MMS, καθώς η μικρή χρονική διαφορά μεταξύ τους μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα στις υπολογισμένες θέσεις της τάξης των αρκετών μέτρων. Για παράδειγμα, μια ταχύτητα π.χ., 80 km / h, μεταφράζεται σε περίπου 22,2 m / sec, και ένα σφάλμα στο συγχρονισμό π.χ. 50 χιλιοστά του δευτερολέπτου οδηγεί σε 1 m μόνο από αυτήν την πηγή.

Από την άλλη, οι υπάρχουσες πλακέτες GPS / GNSS, όπως (U-blox, 2020) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διευκόλυνση της επίλυσης τέτοιου είδους προβλημάτων. Συγκεκριμένα, μια τέτοια πλακέτα μπορεί να μεταδώσει έναν παλμό ανά όσον χρόνο απαιτείται, ο οποίος δημιουργείται από τον δέκτη GPS και χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό άλλων συσκευών με το χρόνο του GPS.

Συγκεκριμένα, ο παλμός ανά δευτερόλεπτο (PPS ή 1PPS) είναι ένα ηλεκτρικό σήμα με πλάτος μικρότερο από ένα δευτερόλεπτο και μια απότομη άνοδο ή απότομη πτώση



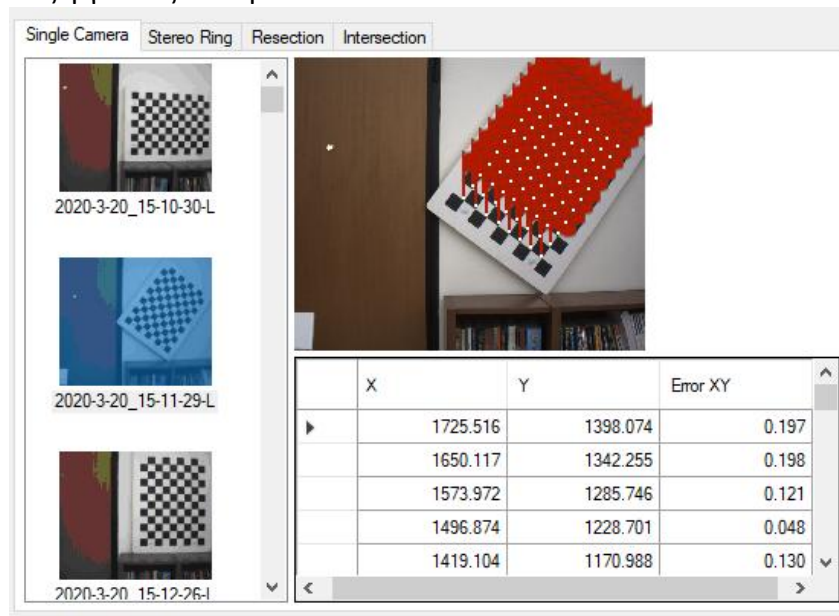
του άκρου που επαναλαμβάνεται με ακρίβεια μία φορά ανά δευτερόλεπτο και χρησιμοποιείται σε π.χ. ρολόγια ακριβείας. Τα σήματα PPS έχουν ακρίβεια που κυμαίνεται από 12 picoseconds έως μερικά microseconds ανά δευτερόλεπτο, ή 2,0 nanoseconds έως μερικά milliseconds την ημέρα με βάση την ανάλυση και την ακρίβεια της συσκευής που παράγει το σήμα.

Στην περίπτωση μας, το σήμα PPS που μεταδίδεται από την πλακέτα GPS RTK2 από την αντίστοιχη διεπαφή PPS, μπορεί να συλληφθεί από το υποσύστημα λήψης εικόνων για και να τους δώσει έναυσμα για τη λήψη εικόνων. Συγκεκριμένα, οι χρησιμοποιούμενες κάμερες παρέχουν μια διασύνδεση GPIO που μπορεί να τις συνδέσει με το σήμα PPS που παρέχεται από το GPS, ώστε να το χρησιμοποιεί για να δώσει το έναυσμα (trigger) για τη λήψη φωτογραφιών. Χρησιμοποιούμε αυτήν τη διεπαφή για να συνδέσουμε το ίδιο σήμα PPS και στις δύο κάμερες με ένα μόνο φυσικό καλώδιο που διακλαδίζεται και στις δύο κάμερες. Ως εκ τούτου, το σύστημα παρέχει συγχρονισμένη λήψη εικόνων και από τις δύο κάμερες, η οποία συγχρονίζεται επίσης με το σήμα PPS που παρέχει τον χρόνο GPS.

Έχουμε δοκιμάσει εκτενώς την προσέγγισή μας και έχουμε ανακαλύψει ότι λειτουργεί απρόσκοπτα παρέχοντας ακριβές συγχρονισμό μεταξύ GPS και εικόνων και σωστή χρονική σήμανση της κάθε εικόνας που συλλέγεται, με ακρίβεια καλύτερη από 1 millisecond.

## 5 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Διάφορα στοιχεία λογισμικού (components) έχουν αναπτυχθεί για την υποστήριξη του συστήματός μας. Στις ακόλουθες ενότητες, παρουσιάζονται τα τρία βασικά εργαλεία, ήτοι, το εργαλείο βαθμονόμησης, το εργαλείο συλλογής δεδομένων και το λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων.

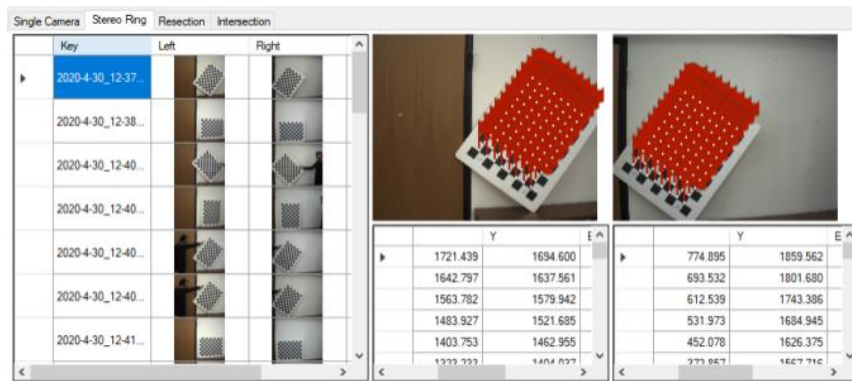


Εικόνα 3: Υπόδειγμα οθόνης βαθμονόμησης μεμονωμένης κάμερας

### 5.1 Εργαλείο βαθμονόμησης

Το εργαλείο βαθμονόμησης μπορεί να υλοποιήσει όλες τις εργασίες βαθμονόμησης, δηλαδή εσωτερικό και σχετικό προσανατολισμό, διόρθωση σφάλματος ευθυγράμμισης (μέσω οπισθοτομίας) και βασικές εργασίες δοκιμών μέσω φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένα τυπικό μοτίβο σκακιέρας και φωτογραφίζεται υπό διάφορες θέσεις / γωνίες. Το εργαλείο

αρχικά αναγνωρίζει αυτόματα τα σημεία της σκακιάρας και όλες οι θέσεις εμφανίζονται στον χρήστη, έτσι ώστε να είναι σε θέση να επιθεωρεί ή / και να διορθώνει ή / και να αποκλείει τα αυτόματα αναγνωρισμένα σημεία. Στη συνέχεια εκτελείται η διαδικασία βαθμονόμησης και εμφανίζονται στον χρήστη τα αντίστοιχα υπολειπόμενα σφάλματα (σε pixel) για κάθε παρατήρηση και συνολικά. Τέλος, το αποτέλεσμα της διαδικασίας αποθηκεύεται στο υπολογιστή. Ένα στιγμιότυπο οθόνης αυτής της διαδικασίας εμφανίζεται στην ακόλουθη Εικόνα 3 σχετικά με την εργασία εσωτερικού προσανατολισμού και στην Εικόνα 4 σχετικά με την εργασία σχετικού προσανατολισμού. Συστήνεται η βαθμονόμηση πριν από κάθε συλλογή δεδομένων, ειδικά εάν μεσολαβήσει πολλές μέρες από την τελευταία χρήση του.



Εικόνα 4: Υπόδειγμα οθόνης βαθμονόμησης στερεοσκοπικής σύνθεσης

## 5.2 Λογισμικό συλλογής δεδομένων

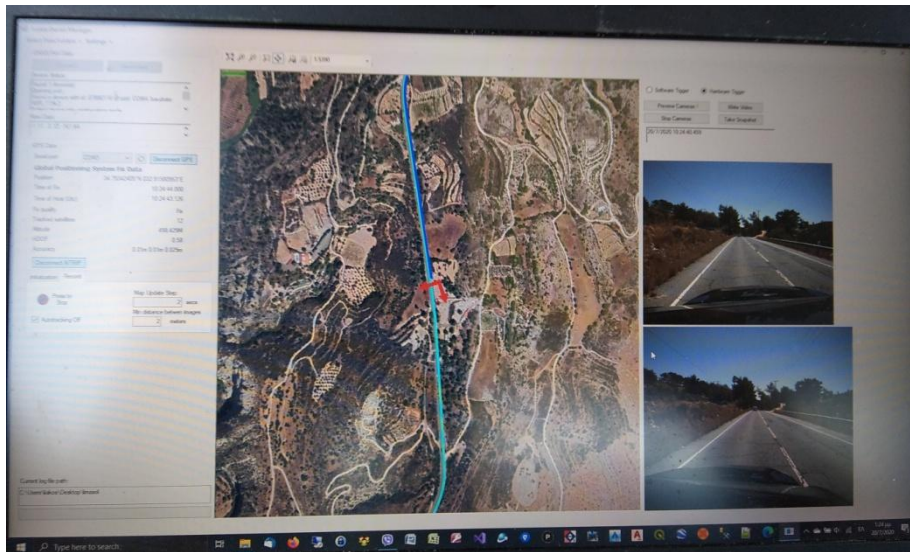
Το λογισμικό συλλογής δεδομένων χρησιμοποιεί όλα τα παραπάνω εξαρτήματα συνδεδεμένα σε φορητό υπολογιστή με Windows και ασύρματη σύνδεση στο Διαδίκτυο. Το λογισμικό διασφαλίζει το συγχρονισμό μεταξύ όλων των συνδεδεμένων μονάδων, δηλαδή των πλακετών GPS-RTK2, MTi-7 INS / GNSS και των καμερών μηχανικής όρασης, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στις προηγούμενες ενότητες της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, δεδομένης της τρέχουσας θέσης των αισθητήρων, το λογισμικό μας είναι σε θέση να εμφανίζει τη θέση του συστήματος στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, καθώς και όλη τη μέχρι τώρα καταγεγραμμένη πορεία του αντίστοιχου οχήματος. Το λογισμικό εμφανίζει επίσης διαδοχικά καρέ των δεδομένων βίντεο που συγκεντρώνονται, ώστε να δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα να ελέγχει εάν όλα τα στοιχεία λειτουργούν κανονικά. Συνοψίζοντας, στο περιβάλλον του λογισμικού εμφανίζονται οι ακόλουθες ενδείξεις:

- Κατάσταση GPS (fixed / float / autonomous / λήψη δεδομένων NTRIP / χρονική σήμανση)
- Κατάσταση σύνδεσης MTi-7 (σύνδεση / χρονική σήμανση)
- Κατάσταση κάμερας (τα συγκεντρωμένα καρέ εμφανίζονται κάθε, π.χ. 5 δευτερόλεπτα)

Όσον αφορά τον χάρτη που χρησιμοποιείται υπόβαθρο, το λογισμικό μπορεί να εμφανίσει χάρτες ράστερ, καθώς και διαδικτυακούς χάρτες με πλακίδια XYZ, όπως Esri Maps, OpenStreetMap κ.λπ. Ως εκ τούτου, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα σε διάφορα υπόβαθρα κατάλληλα για τις ανάγκες του. Το λογισμικό υποστηρίζει επίσης διάφορα συστήματα προβολής για τα δεδομένα, συμπεριλαμβανομένων των WGS84, UTM, LTM, ΕΓΣΑ'87 κ.λπ. Από την άλλη πλευρά,

όλα τα δεδομένα που συλλέγονται αποθηκεύονται στο φάκελο δεδομένων της εφαρμογής στο υποκείμενο σύστημα στο οποίο συλλέγονται δεδομένα, δηλαδή το WGS84 .



**Εικόνα 5:** Παράδειγμα οθόνης λογισμικού συλλογής δεδομένων

Όλες οι λήψεις δεδομένων πραγματοποιούνται με ασύγχρονο τρόπο, έτσι ώστε το κύριο στοιχείο διεπαφής να ανανεώνεται τακτικά, ενώ ο χρήστης δεν αντιμετωπίζει καθυστερήσεις στις εργασίες που ζητούνται, δηλαδή ζουμ - μετακίνηση του χάρτη κ.λπ. Ένα παράδειγμα οθόνης του περιβάλλοντος εργασίας χρήστη που βοηθά στη συλλογή βίντεο η διαδικασία εμφανίζεται στην Εικόνα 5.

Ταυτόχρονα υπό ανάπτυξη βρίσκεται ένας αλγόριθμος πλοήγησης ο οποίος παρέχει βέλτιστες διαδρομές για την πλήρη διάσχιση ενός μέρους του οδικού δικτύου: δεδομένου του γράφου του οδικού δικτύου που επιθυμούμε να καλύψουμε, και της τρέχουσας θέσης του συστήματος συλλογής, ο αλγόριθμος καθορίζει την βέλτιστη διαδρομή για τη πλήρη διάσχιση ενός τμήματος του οδικού δικτύου, έτσι ώστε το σύστημα κινητής χαρτογράφησης να συλλέξει δεδομένα σε όλη την περιοχή μελέτης με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Αν και η πλοήγηση σε ένα οδικό δίκτυο είναι μία συνηθισμένη λειτουργία για τα περισσότερα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών και για κινητές συσκευές με ενσωματωμένο GPS, η λειτουργικότητα που απαιτείται από την εφαρμογή μας δεν καλύπτεται από τέτοια εμπορικά συστήματα, ειδικά για κάλυψη πυκνού οδικού δικτύου πόλης. Πιο συγκεκριμένα, οι συνηθισμένοι αλγόριθμοι πλοήγησης παρέχουν βέλτιστες διαδρομές από ένα σημείο εκκίνησης προς ένα σημείο προορισμού. Από την άλλη, η λειτουργία που παρέχεται με το σύστημά μας έχει σαν στόχο την *πλήρη διάσχιση* ενός τμήματος του οδικού δικτύου. Ο αλγόριθμος που υποστηρίζει αυτή τη λειτουργικότητα βασίζεται σε μία υλοποίηση της λύσης του προβλήματος του κινέζου πωλητή (Chinese Salesman Problem), διαιρώντας το οδικό δίκτυο σε υποτμήματα που θα καλυφθούν στο αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα, και παρέχει δυναμικά προσαρμοζόμενη λύση η οποία υποστηρίζει τις ενδεχόμενες αλλαγές που κάνει το όχημα κατά την κίνησή του

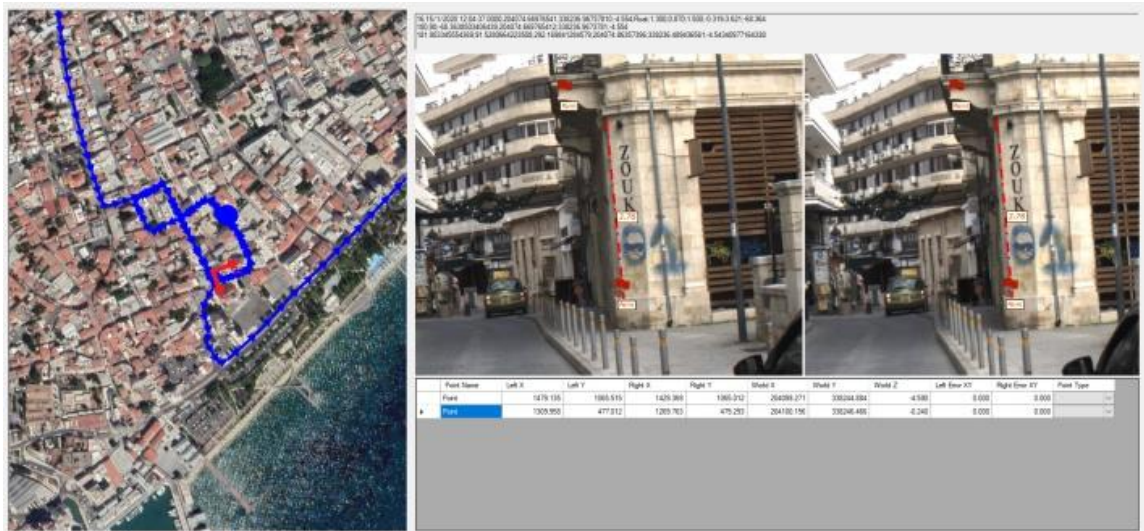
Έχουμε δοκιμάσει την απόδοση του λογισμικού μας σε διάφορες διαμορφώσεις. Μεταξύ των τριών διαδικασιών συλλογής προφανώς η πιο απαιτητική όσον αφορά τη χρήση της CPU, τη μνήμη RAM και την αποθήκευση, είναι η διαδικασία που καταγράφει δεδομένα εικόνων με τη μορφή αρχείων βίντεο. Έχουμε διαπιστώσει ότι ένας αρκετά παλιός φορητός υπολογιστής i7-4510U @ 2GHz, με τουλάχιστον τρεις



ενσωματωμένες διασυνδέσεις USB, είναι ικανός να εξυπηρετεί την εφαρμογή μας και να λειτουργεί ομαλά κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας συλλογής δεδομένων αρκετών ωρών.

### 5.3 Λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων

Επίσης αναπτύχθηκε λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων ικανό να εκτελεί βασικές λειτουργίες συλλογής δεδομένων, όπως ο υπολογισμός της θέσης τρισδιάστατου αντικειμένου, μέτρηση αποστάσεων, ψηφιοποίηση γραμμών και πολυγώνων κ.λπ., ενώ ταυτόχρονα προβάλλει την τρέχουσα θέση του συστήματος και των ψηφιοποιημένων αντικειμένων σε χάρτη. Διάφορα υπόβαθρα μπορούν να επιλεγθούν από μια ποικιλία διαδικτυακών χαρτών (πλακίδια XYZ) και άλλων πηγών διανυσματικών δεδομένων ή / και ράστερ, που εμφανίζονται στο σύστημα αναφοράς προτίμησης του χρήστη. Ένα παράδειγμα στιγμιότυπου οθόνης του λογισμικού επεξεργασίας δεδομένων βρίσκεται παρακάτω στην Εικόνα 6: *Παράδειγμα οθόνης λογισμικού επεξεργασίας δεδομένων και Εικόνα 7.*



Εικόνα 6: Παράδειγμα οθόνης λογισμικού επεξεργασίας δεδομένων

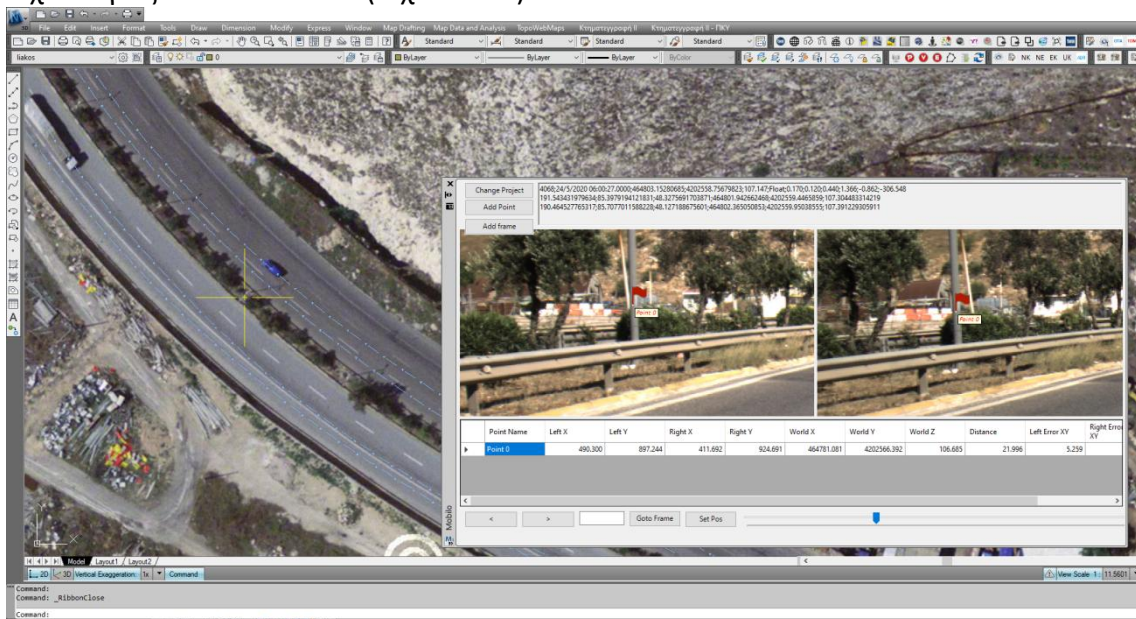


Εικόνα 7: Παράδειγμα οθόνης λογισμικού επεξεργασίας δεδομένων

Όλες οι λειτουργίες του χρήστη εκτελούνται μονοσκοπικά στη μία από τις δύο εικόνες, ενώ στο παρασκήνιο πραγματοποιείται αυτόματη συσχέτιση μεταξύ της εικόνας που

χρησιμοποιείται και του ζεύγους της. Ως εκ τούτου, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει την εικόνα της προτίμησής του (αριστερά ή δεξιά) για τη μέτρηση σημείων, ή / και διαστάσεων ή την ψηφιοποίηση γραμμών και πολυγώνων. Σε περίπτωση αποτυχίας του αλγορίθμου αντιστοίχισης, ο χρήστης ενημερώνεται ώστε να τοποθετήσει χειροκίνητα το σημείο στην άλλη εικόνα ή / και να διορθώσει την αποτυχημένη συσχέτιση. Η αυτόματη συσχέτιση χρησιμοποιείται επίσης για λειτουργίες zoom / panning εντός των εικόνων προκειμένου να εμφανιστεί ταυτόχρονα το ίδιο τμήμα εικόνας και στα δύο καρτέ, έτσι ώστε ο χρήστης / ψηφιοποιητής να βιώνει ένα πολύ ελκυστικό περιβάλλον εργασίας χρήστη που απαιτεί ψηφιοποίηση αντικειμένων σε μία μόνο εικόνα.

Επιπλέον, ένας επεξεργαστής περιγραφικών δεδομένων (attribute editor) έχει ενσωματωθεί για να διευκολύνει την εξαγωγή δεδομένων GIS με τη μορφή διανυσματικών δεδομένων με περιγραφικά χαρακτηριστικά και εικόνες με γεωαναφορά. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποθηκεύονται στα αρχεία του συστήματος, ενώ στη συνέχεια μπορούν να εξαχθούν σε shapfile ή άλλες μορφές διανυσματικών δεδομένων. Όλο το περιβάλλον διεπαφής έχει δομηθεί με αρθρωτό (modular) τρόπο με τεχνολογίες Microsoft .NET, ώστε διαφορετικά τμήματά του να είναι εύκολο να ολοκληρωθούν μέσα από άλλα συστήματα. Για παράδειγμα, το περιβάλλον διεπαφής μπορεί να λειτουργήσει μέσα από το Autocad Map (Εικόνα 8) χρησιμοποιώντας ακριβώς τα ίδια αρχεία έργου, γεγονός που μπορεί να διευκολύνει τον χρήστη στην εργασία του. Τέλος, με λίγες προσαρμογές το περιβάλλον διεπαφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιοδήποτε άλλο λογισμικό υποστηρίζει τις τεχνολογίες Microsoft .NET (π.χ. ArcGIS).



**Εικόνα 8:** Παράδειγμα οθόνης λογισμικού επεξεργασίας δεδομένων στο Autocad Map

#### 5.4 Πειράματα

Για να ελεγχθεί η ποιότητα των λύσεων που παρέχει το σύστημά μας, αρχικά προσδιορίστηκε ο εσωτερικός χώρος της κάθε κάμερας και ο σχετικός προσανατολισμός της στερεοσκοπικής κάμερας. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας βαθμονόμησης συνοψίζονται παρακάτω (Πίνακας 1). Τα αντίστοιχα αποτελέσματα βαθμονόμησης δείχνουν ότι η ακρίβεια είναι τυπική των αντίστοιχων φωτογραμμετρικών διεργασιών (δηλ. 0,5 pixel για εσωτερικό και 1 pixel για σχετική).

Επομένως, μπορούμε να υποθέσουμε ότι τόσο ο εξοπλισμός και οι μεθοδολογίες που ακολουθούν είναι κατάλληλες και αποτελέσματα εντός των αναμενόμενων ορίων.

	Εσωτερικός		Σχετικός*
	αριστερή κάμερα	δεξιά κάμερα	
Πλήθος εικόνων	95	103	47
Πλήθος παρατηρήσεων	8360	9060	4136
Υπολειπόμενα σφάλματα (pixel)	0.504	0.524	0.94

\*ζεύγη εικόνων

**Πίνακας 1:** Αποτελέσματα εσωτερικού και σχετικού προσανατολισμού

Επιπλέον, μετρήθηκαν δύο επιμήκη πεδία ελέγχου με φυσικούς στόχους χρησιμοποιώντας RTK GPS / GNSS σε δύο αστικές οδούς, με μήκος αρκετών εκατοντάδων μέτρων, και συνολικά 40 σημεία ελέγχου. Το σύστημα αρχικοποιήθηκε στο επάνω μέρος του αυτοκινήτου και στη συνέχεια πραγματοποίησε τουλάχιστον δύο διελεύσεις σε καθένα από τα πεδία ελέγχου ακολουθώντας την ίδια κατεύθυνση. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε επεξεργασία από τον ίδιο χρήστη ο οποίος σκόπευσε τα προκαθορισμένα σημεία, για να συγκριθούν οι υπολογισμένες συντεταγμένες τους με αυτές του πεδίου ελέγχου. Όλα τα σκοπευθέντα σημεία ήταν σε απόσταση από τις κάμερες μικρότερη των 20 μέτρων. Αυτή είναι μια λογική υπόθεση δεδομένου ότι διαδοχικά ζεύγη εικόνων δεν αναμένεται να απέχουν μεταξύ τους περισσότερο από 22 m, ακόμη και σε ταχύτητα εργασίας 80 km/h και ρυθμό καρέ 1 δευτερόλεπτο. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ σημείων ελέγχου και των υπολογισμένων συντεταγμένων συνοψίζονται παρακάτω (Πίνακας 2).

	XY (m)	Z (m)	Διαστάσεις (%)
Μέσο σφάλμα	0.38	0.30	10.9
Τυπική απόκλιση	0.26	0.33	4.8

**Πίνακας 2:** Υπολειπόμενα σφάλματα μετρήσεων

Όπως είναι σαφές από το παραπάνω πίνακα, το σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης είναι μικρότερο από 0.5 m οριζοντιογραφικά και υψομετρικά. Επιπλέον, το οριζοντιογραφικό σφάλμα συγκεντρώνεται κυρίως κατά μήκος του άξονα κίνησης του οχήματος (παράλληλα με τον άξονα της κάμερας), με το μέγιστο σφάλμα κατά μήκος του άξονα X στερεοσκοπικής κάμερας να μην υπερβαίνει τα 0,30 m στη χειρότερη περίπτωση. Αυτό είναι ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα, δεδομένου ότι η φωτογραμμετρία υποφέρει από σφάλματα σε υπολογισμό βάθους και η σχετικά μικρή βάση του συστήματος δεν μπορεί να υποστηρίξει καλύτερα αποτελέσματα.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζεται ένα σύστημα κινητής χαρτογράφησης χαμηλού κόστους (MMS) όπου το κόστος των τμημάτων που το αποτελούν, χωρίς εμπορικό κέρδος και κόστος ανάπτυξης εργαλείων, είναι λιγότερο των 3.000 €. Το σύστημα βαθμονομείται μέσω λογισμικού ανοιχτού κώδικα (OpenCV) το οποίο έχει ενσωματωθεί σε μία φιλική διεπαφή χρήστη. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα στοιχεία λογισμικού για να διευκολύνουν και να επιταχύνουν τις διαδικασίες βαθμονόμησης,



συλλογής δεδομένων και εξαγωγής πληροφορίας από αυτά. Η εύκολη εξαγωγή συντεταγμένων αντικειμένων υποστηρίζεται μονοσκοπικά, όπου οι συντεταγμένες του σημείου που σκοπεύεται στη συζευγμένη εικόνα λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας τεχνικές αυτόματης συσχέτισης. Πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα για την πιστοποίηση και τον έλεγχο της ακρίβειας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος. Από τα επιτευχθέντα αποτελέσματα, το ανεπτυγμένο σύστημα είναι αποτελεσματικό για τη συλλογή και τοποθέτηση χωρικών παρόδιων αντικειμένων, όπως όρια δρόμου, φανάρια, οδικές πινακίδες, στύλους φωτισμού κ.λπ., γρήγορα και με μικρό κόστος. Η απόλυτη ακρίβεια θέσης που λαμβάνεται είναι μικρότερη από 0,5 μέτρα, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα του σήματος GPS.

Προς το παρόν εργαζόμαστε στη διαδικασία βελτίωσης των συλλεχθέντων δεδομένων ακρίβειας ακολουθώντας πολλαπλές εμπροσθοτομίες (απέναντι και κατά μήκος των στερεοσκοπικών εικόνων), αυξάνοντας τη σταθερότητα της βάσης, βελτιώνοντας τη βαθμονόμηση του συστήματος και, ενδεχομένως, αντικαθιστώντας το INS με φωτογραμμετρικές τεχνικές που ορίζουν οριζόντια επίπεδα σε πολλά καρέ. Η μελλοντική εργασία περιλαμβάνει επίσης τη βελτίωση της διεπαφής χρήστη, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης των δυνατοτήτων αυτόματης αναγνώρισης σηματοδότησης κίνησης κ.λπ.

#### **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα εργασία υποστηρίζεται από το πρόγραμμα MOBILO ENTERPRISES/0916 του Ιδρύματος Έρευνας και Καινοτομίας Κύπρου, κάτω από το συμβόλαιο ENTERPRISES/0916/0055

#### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Frentzos E., Tournas E., Skarlatos D., 2020, *Developing an Image Based Low-Cost Mobile Mapping System For GIS Data Acquisition*, ISPRS-ASCHIVES-XLIII-B1-2020-235-2020

Byungyun Y., 2019. *Developing a Mobile Mapping System for 3D GIS and Smart City Planning*.

U-Blox, 2020. ZED-F9P module, F9 high precision GNSS module, Documentation and resources. <https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module>, accessed (16 Oct 2020).

Mostafa, M.M.R., 2001. *Boresight calibration of integrated inertial/camera systems. In Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS 2001), Banff, AB, Canada, 5–8 June 2001*.

OpenCV software library, 2020. [Online]. Available: [1] <https://opencv.org/>. (16 Oct 2020).

FFmpeg Developers, 2016. ffmpeg tool (Version be1d324) [Online]. Available: <http://ffmpeg.org/> (9 Oct 2020)