



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

## ***ΚΙΝΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ – ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ***



**Διπλωματική Εργασία της:**

Κοραλίας-Ζωής Μπαντά,  
Αγρονόμου & Τοπογράφου Μηχανικού  
Α.Μ.: 60052119

**Επιβλέπων Καθηγητής:**

κ. Χαράλαμπος Ιωαννίδης

**Αθήνα, Μάρτιος 2008**

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού προγράμματος «Γεωπληροφορική» της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Επ. Καθηγητή κ. Χαράλαμπου Ιωαννίδη του Τομέα Φωτογραμμετρίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Κινητή Χαρτογράφηση (mobile mapping) αποτέλεσε αντικείμενο σημαντικής έρευνας και ανάπτυξης από αρκετές ερευνητικές ομάδες κατά τη διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας. Ένα Κινητό Σύστημα Χαρτογράφησης αποτελείται βασικά από μια κινούμενη πλατφόρμα, από δέκτες πλοήγησης, όπως οι δέκτες GPS (Global Positioning System) και το INS (Inertial Navigation System - Αδρανειακό Σύστημα), και δέκτες απεικόνισης, όπως ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές με CCD αισθητήρες, laser και αισθητήρες radar. Τα Κινητά Συστήματα Χαρτογράφησης έχουν εξελιχθεί σε τέτοιο σημείο, που με την εφαρμογή τους επιτυγχάνεται υψηλή ευελιξία στην απόκτηση δεδομένων, ταχύτερη παραγωγή, μικρότερο κόστος και υψηλή παραγωγικότητα.

Η παρούσα εργασία παρέχει μια συστηματική περιγραφή των βασικών αρχών λειτουργίας των Κινητών Συστημάτων Χαρτογράφησης και των εφαρμογών τους. Συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 2 αναλύεται ο σκοπός και τα συστατικά τους μέρη και πραγματοποιείται ειδική αναφορά στα λειτουργούντα συστήματα και τις αναμενόμενες ακρίβειές τους. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ένα γενικευμένο μοντέλο γεωαναφοράς των δεδομένων των αισθητήρων χαρτογράφησης με τη χρήση δεδομένων *GPS/INS* και στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία της βαθμονόμησης του συστήματος. Οι πηγές των σφαλμάτων του συστήματος αναλύονται στο κεφάλαιο 5, ενώ στο κεφάλαιο που ακολουθεί αναφέρεται το πεδίο εφαρμογών τους στο διεθνή και στον ελλαδικό χώρο. Τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα της εργασίας με τις προοπτικές στο συγκεκριμένο τομέα των Κινητών Συστημάτων Χαρτογράφησης και τις ερευνητικές του προεκτάσεις.

## **ABSTRACT**

Mobile Mapping has been the subject of significant research and development by several research teams over the past decade. A Mobile Mapping System consists mainly of a moving platform, navigation sensors, such as GPS (Global Positioning System) receivers, and INS (Inertial Navigation System), and mapping sensors CCD (Charge Coupled Device) cameras, lasers, and radar sensors. Mobile Mapping Systems have evolved to a stage which allows obtaining high flexibility in data acquisition, more information with less time and effort, and high productivity.

The present paper provides a systematic introduction to the basic concepts of Mobile Mapping Systems and their applications. More specifically, in chapter 2, the use of such systems and their constitutive parts are analyzed as well as the existing systems and their expected accuracies. In chapter 3, a general model for georeferencing of mapping sensor data using GPS/INS data is presented and chapter 4 describes the system calibration process. The error sources of the system are analyzed in chapter 5, while the following chapter deals with the area of applications of Mobile Mapping Systems, both universally and in Greece. Finally, the conclusions and perspective of the mobile mapping technology is discussed.

## Πίνακας περιεχομένων

1.....	3
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</i>	<i>3</i>
2.....	6
<i>ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΚΙΝΗΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ .....</i>	<i>6</i>
2.1 Κινητά Συστήματα Χαρτογράφησης .....	6
2.1.1 Ορισμοί .....	6
2.2 Συστατικά μέρη του συστήματος.....	8
2.2.1 Το σύστημα πλοήγησης .....	10
2.2.2 Το σύστημα απεικόνισης .....	13
2.3.2 ARAN 4300 AUTOMATIC Road Analyzer .....	20
2.3.3 GPS/INS/CCD Integrated Survey System (GISS).....	25
2.3.4. Σύγκριση συστημάτων .....	28
3.....	29
<i>ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΔΕΚΤΩΝ.....</i>	<i>29</i>
3.1 Γενικά .....	29
3.2 Γεωαναφορά εικόνων .....	30
3.3 Σχεδιασμός και ανάλυση συστημάτων πολλών δεκτών .....	32
3.4 Κινηματική μοντελοποίηση ( <i>Kinematic Modeling</i> ) .....	37
3.5 Επίλυση με τη βοήθεια του φίλτρου <i>Kalman</i> .....	40
3.6 Ενιαία προσέγγιση της γεωαναφοράς δεδομένων πολλών δεκτών με τη χρήση GPS/INS .....	43
3.7 Βελτιστοποίηση ροής δεδομένων και αυτοματοποίηση .....	47
4.....	50
<i>ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....</i>	<i>50</i>
4.1 Βαθμονόμηση φωτομηχανής.....	50
4.2 Βαθμονόμηση διανύσματος εκκεντρότητας .....	54
4.3 Βαθμονόμηση αδρανειακού συστήματος.....	59
4.4 Φωτοτριγωνισμός με δεδομένα προσανατολισμού του αδρανειακού συστήματος .....	59
5.....	62
<i>ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....</i>	<i>62</i>
5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια.....	62
5.1.1 Σφάλματα συστήματος <i>GPS/INS</i> .....	63
5.1.2 Σφάλματα βαθμονόμησης.....	66
5.1.3 Σφάλματα συγχρονισμού .....	68
5.1.4 Συνολικό σφάλμα .....	68

6.....	70
<b>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ</b> .....	<b>70</b>
6.1 Οδικές εφαρμογές .....	70
6.1.1 Αυτόματη εξαγωγή ορθογώνιων οδικών σημάνσεων.....	71
6.1.2 Άλλες εφαρμογές .....	76
6.2 Εφαρμογές στον ελλαδικό χώρο .....	76
6.2.1. Μητρώο οδών.....	76
6.2.2. Άλλες εφαρμογές .....	83
7.....	85
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ</b> .....	<b>85</b>
7.1 Προκλήσεις .....	85
7.2 Επίλογος .....	87
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>88</b>

# 1

## ***ΕΙΣΑΓΩΓΗ***

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες με τη συνεχόμενη ανάπτυξη των αστικών κέντρων σε παγκόσμια κλίμακα, η απαίτηση για γεωχωρικά δεδομένα έχει σημειώσει ραγδαία αύξηση. Η απαίτηση αυτή προέρχεται από πολυάριθμες πηγές και λαμβάνει πολλές μορφές, ωστόσο το τελικό ζητούμενο είναι η συνεχής ανάγκη για δεδομένα περισσότερο ακριβή, με μεγαλύτερη πυκνότητα, με ταχύτερη παραγωγή και με πιο οικονομικό κόστος απόκτησής τους.

Δυστυχώς, οι παραδοσιακές τεχνικές συλλογής χωρικών δεδομένων, όπως είναι οι κλασικές τοπογραφικές μέθοδοι, η δορυφορική τηλεπισκόπηση και η εναέρια φωτογραμμετρία, δε μπορούν εύκολα να ικανοποιήσουν τις νέες απαιτήσεις συλλογής δεδομένων. Έτσι, για παράδειγμα, οι συμβατικές τοπογραφικές μέθοδοι ίσως δεν ενδείκνυνται για σημεία μεγάλης πυκνότητας και η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με τη δορυφορική τηλεπισκόπηση δεν είναι επαρκής για ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Η παραδοσιακή εναέρια φωτογραμμετρία, από την άλλη πλευρά, μειονεκτεί εξαιτίας της ανάγκης ίδρυσης σχετικά πυκνού και ακριβούς δικτύου σημείων ελέγχου και επίσης, το σχεδόν κατακόρυφο οπτικό πεδίο που δημιουργείται παρέχει ένα μόνο μέρος από την πληροφορία που απαιτείται.

Επιπλέον, η ποιότητα και το είδος πληροφοριών που απαιτούνται από το χρήστη μεταβάλλονται. Αρκετά συχνά ο χρήστης προτιμά ένα χαρτογραφικά υποδεέστερο προϊόν, που περιέχει πιο πρόσφατη πληροφορία παρά ένα προϊόν υψηλών χαρτογραφικών προδιαγραφών αλλά με μη ενημερωμένο περιεχόμενο. Επίσης, οι απαιτήσεις των χρηστών για συγκεκριμένους χάρτες ή δεδομένα, και για μη-χαρτογραφικά προϊόντα όπως εκθέσεις,

εικόνες, γραφικές παραστάσεις και απαντήσεις σε συγκεκριμένα ερωτήματα αυξάνονται σταθερά. Επομένως, οι χαρτογραφικοί οργανισμοί οφείλουν να είναι περισσότερο ευέλικτοι στις ανάγκες των χρηστών και να θέτουν σε εφαρμογή πιο εύκαμπτες διαδικασίες αναθεώρησης πληροφοριών.

Με την πρόοδο που πραγματοποιείται στις δορυφορικές και τις αδρανειακές τεχνικές γεωαναφοράς και τη διαθεσιμότητα των ψηφιακών αισθητήρων απεικόνισης, ένα σημαντικό ποσοστό των *GIS* δεδομένων, μπορεί εν δυνάμει να αποκτηθεί από κινούμενα οχήματα. Το πλεονέκτημα της συλλογής δεδομένων με κινηματικές τεχνικές είναι ότι η αποτύπωση μπορεί να εκτελεστεί πολύ γρηγορότερα και επομένως πιο οικονομικά. Η αύξηση του αριθμού των δορυφόρων του συστήματος δορυφορικού εντοπισμού και ο πληρέστερος γεωμετρικός σχηματισμός τους, αλλά και η ανάπτυξη και τεχνολογική βελτίωση μιας ιδιαίτερης κατηγορίας αδρανειακών συστημάτων (προσκολλημένα αδρανειακά συστήματα - *strapdown inertial systems*) έχει εισάγει ένα εκτεταμένο πεδίο κινηματικών γεωδαιτικών εφαρμογών με χαμηλό κόστος και υψηλές ακρίβειες απόδοσης.

Τα τελευταία 10-15 χρόνια έχει αναπτυχθεί μία μέθοδος προσδιορισμού θέσης, που πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '60. Η μέθοδος αυτή είναι δυναμική ή κινηματική, δηλαδή οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια κάποιας κίνησης του μετρητικού οργάνου, είτε στη γη είτε στον αέρα. Στη μέθοδο αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα *GPS* αυτοτελώς μέσω ενός ή περισσότερων δεκτών, αλλά κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με κάποιο άλλο όργανο, το οποίο μπορεί να είναι ένα αδρανειακό σύστημα (*Inertial System - INS*), ή ένα ραδιοσύστημα. Ο συνδυασμός ενός δέκτη *GPS* και ενός αδρανειακού συστήματος συνιστά ένα ολοκληρωμένο σύστημα υψηλής αξιοπιστίας, κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα γεωδαιτικών και τοπογραφικών εφαρμογών στην ξηρά, τον αέρα και τη θάλασσα.

Η χρήση συστημάτων πολλών δεκτών, που ενοποιούν τεχνολογίες πλοήγησης και τηλεπισκόπησης σε μία κινητή, εναέρια ή επίγεια, πλατφόρμα, αποτέλεσε μία σημαντική εναλλακτική στις παραδοσιακές μεθόδους συλλογής δεδομένων. Αυτά τα Κινητά Συστήματα Χαρτογράφησης (*Mobile Mapping Systems-MMS*) επωφελούνται των ξεχωριστών τεχνολογιών που ενσωματώνουν, με σκοπό την βελτίωση της αποδοτικότητας της συλλογής δεδομένων. Το διαφορικό *GPS*, το *INS*, οι ψηφιακές κάμερες υψηλής ανάλυσης σε συνδυασμό με ένα εξειδικευμένο λογισμικό καθιστούν ένα Κινητό Σύστημα Χαρτογράφησης ένα εξαιρετικά ακριβές και επαρκές σύστημα αποτύπωσης.



Στην αγορά είναι διαθέσιμα διάφορων ειδών συστήματα *MMS* για διαφορετικές εφαρμογές και υπάρχουν ακόμα περισσότερα εξεζητημένα συστήματα σε ανάπτυξη. Αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε ομάδες: Αυτόνομα, Διαχείρισης στόλου, Συμβουλευτικά, Απογραφικά και Χαρτογραφικά, και Φορητά, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί.

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Αυτόνομο	Όχημα με συσκευή καθορισμού θέσης και χαρτογραφική βάση δεδομένων	Χρήση σε ιδιωτικά οχήματα για on-line καθοδήγηση
Διαχείρισης Στόλου	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Στόλος οχημάτων που συνδέονται με ένα κέντρο ελέγχου μέσω επικοινωνιακού συνδέσμου</li> <li>• Το κέντρο ελέγχου είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση των απαραίτητων πληροφοριών στο όχημα</li> </ul>	Αστικές εφαρμογές όπως σε αστυνομία, πυροσβεστική, ασθενοφόρα, deliveries
Συμβουλευτικό	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μείξη αρχιτεκτονικής αυτόνομου συστήματος και συστήματος Διαχείρισης Στόλου</li> <li>• Μη ελεγχόμενο από ένα κέντρο αποστολέα, αλλά μέρος ενός στόλου που εξυπηρετείται από ένα κέντρο ελέγχου κυκλοφορίας</li> <li>• Τα οχήματα λαμβάνουν τις ενημερωμένες πληροφορίες σχετικά με την κυκλοφορία και τις καιρικές συνθήκες χωρίς το κέντρο ελέγχου να είναι σε θέση να τους αναγνωρίσει</li> </ul>	Χρήση για παροχή σε πραγματικό χρόνο πληροφοριών κυκλοφορίας, μονοδρομήσεων, απαγορεύσεων και σε κάποια συστήματα καιρικών συνθηκών.
Απογραφικό και Χαρτογραφικό	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Οχήματα που εξοπλίζονται αυτόνομα με δέκτες πλοήγησης και απεικόνισης</li> <li>• Ενδεχομένως συνδέονται με ένα κέντρο ελέγχου μέσω επικοινωνιακού συνδέσμου</li> </ul>	Χρήση στην απογραφική οδικών συνθηκών και γενικών GIS εφαρμογών
Φορητό	Αυτόνομα συστήματα που δεν είναι μόνιμα εγκατεστημένα στο όχημα	Χρήση από τουρίστες, πρακτορεία εκτίμησης ακινήτων, ταξιδιώτες επαγγελματικής φύσεως κ.α.

**Πίνακας 1.1:** Παραδείγματα διαφόρων κατηγοριών *MMS*

# 2

## **ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΚΙΝΗΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ**

### **2.1 Κινητά Συστήματα Χαρτογράφησης**

#### **2.1.1 Ορισμοί**

Ένας περιεκτικός ορισμός των *Mobile Mapping Systems (MMS)* είναι ο ακόλουθος: ένα κινητό σύστημα πολλών δεκτών, που χρησιμοποιείται για την ταχεία συλλογή απευθείας γεωαναφερμένων τηλεπισκοπικών δεδομένων. Κλειδί αυτού του ορισμού είναι η έννοια της γεωαναφοράς, που αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία προσδιορίζονται η θέση και ο προσανατολισμός απομακρυσμένων δεκτών, όπως φωτομηχανές ή σαρωτές *laser*, σε ένα σύστημα χαρτογραφικών συντεταγμένων (*mapping coordinate frame*). Μετά τη γεωαναφορά των δεκτών, μπορεί να εξαχθεί πρόσθετη πληροφορία, για οντότητες που είναι ορατές στα τηλεπισκοπικά δεδομένα.

Το Κέντρο Χαρτογραφίας των Η.Π.Α. και το Πανεπιστήμιο του Calgary, Καναδά, προσδιορίζουν τα *MMS* ως μία κινούμενη πλατφόρμα, πάνω στην οποία έχουν ενοποιηθεί πολλαπλά συστήματα δεκτών/μετρητικά συστήματα, που παρέχουν τρισδιάστατο, σχεδόν συνεχόμενο, προσδιορισμό θέσης τόσο για την πλατφόρμα όσο και για τα ταυτοχρόνως συλλεχθέντα γεωχωρικά δεδομένα.

Επίσης, σύμφωνα με έναν άλλο ορισμό, Κινητό Σύστημα Χαρτογράφησης είναι το σύστημα που χρησιμοποιεί έναν αριθμό δεκτών προσδιορισμού θέσης, προσανατολισμού, και κίνησης, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι πάνω σε μία κοινή πλατφόρμα, όπου όλοι οι δέκτες είναι συγχρονισμένοι προκειμένου για την ενοποίηση και την επεξεργασία των μετρήσεων των δεκτών.

Οι παραπάνω ορισμοί υποδεικνύουν σαφώς και τα συστατικά μέρη ενός *MMS*. Καταρχήν, ένα τέτοιο σύστημα πρέπει να βρίσκεται σε κίνηση. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα πρέπει να είναι τοποθετημένο σε μία κινούμενη πλατφόρμα, όπως σε ένα αεροσκάφος, σε ένα αυτοκίνητο ή σε έναν άνθρωπο. Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η περίπτωση που η πλατφόρμα κινείται επί του εδάφους. Επίσης, το σύστημα πρέπει να έχει έναν ή περισσότερους **απομακρυσμένους δέκτες**. Οι πιο συνηθισμένοι δέκτες, σε αυτήν την περίπτωση, είναι:

- Οπτικοί δέκτες (*frame imaging sensors*), αναλογικοί ή ψηφιακοί, που μπορεί να είναι φωτο-μηχανές ή video
- Σαρωτές Laser (*LIDAR*)
- Δέκτες γραμμικής απεικόνισης (*Line-imaging sensors*)
- Υπερφασματικοί και πολυφασματικοί σαρωτές (*Hyper and multi-spectral scanners*)
- RADAR συνθετικού ανοίγματος (*Synthetic aperture RADAR-SAR*)
- Υπέρυθρες φωτο-μηχανές

Τέλος, για την απευθείας γεωαναφορά αυτών των δεκτών, στην πλατφόρμα πρέπει, επίσης, να είναι εγκατεστημένοι και **δέκτες πλοήγησης** (*navigation sensors*). Τα δεδομένα αυτών των δεκτών, μαζί με τις βαθμονομημένες ή μετρημένες εκκεντρότητες ως προς τους απομακρυσμένους δέκτες, χρησιμοποιούνται στον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού των κέντρων των απομακρυσμένων δεκτών. Οι δέκτες πλοήγησης ποικίλλουν και οι πιο συνηθισμένοι είναι οι ακόλουθοι:

- Δέκτες *GPS*
- Μονάδες αδρανειακού συστήματος (*Inertial measurement units*)
- Κλισίμετρα (*Tilt sensors*)
- Ταχύμετρα/Οδόμετρα (*Speedometers/odometers*)
- Μαγνητόμετρα (*Magnetometers*)

Τα σημαντικότερα **πλεονεκτήματα** των *MMS* είναι ο περιορισμός του χρόνου και του κόστους συλλογής δεδομένων. Διαθέτουν, ακόμα, ένα πλήθος άλλων πλεονεκτημάτων, όπως για παράδειγμα η δυνατότητα εξαγωγής, τόσο χωρικής (*spatial*) πληροφορίας όσο και πληροφορίας ιδιοτήτων (*attribute information*), από τα τηλεπισκοπικά δεδομένα. Επίσης, τα δεδομένα έχουν την δυνατότητα να αρχειοθετηθούν και να επαναπροσπελαστούν, επιτρέποντας τη συλλογή πρόσθετης πληροφορίας χωρίς την ανάγκη επιπρόσθετων εργασιών πεδίου.

Τα όρια των εφαρμογών των *MMS* εκτείνονται πιο μακριά από τις αυστηρά χαρτογραφικές εφαρμογές. Έτσι, εξαιτίας της ταχείας κάλυψης μεγάλων περιοχών από τέτοια συστήματα, διευκολύνεται σημαντικά η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων μεγάλης κλίμακας, που είναι χρήσιμα σε εφαρμογές στρατιωτικές, τουριστικές κ.ά. Άλλες εφαρμογές των παραπάνω συστημάτων είναι η ενημέρωση και καταγραφή στοιχείων οδών, που αφορούν την κυκλοφορία και την ασφάλεια, ο περιβαλλοντικός έλεγχος, η αντιμετώπιση καταστροφών, η διερεύνηση ατυχημάτων.

## 2.2 Συστατικά μέρη του συστήματος

Ο σχεδιασμός των σύγχρονων Κινητών Συστημάτων Χαρτογράφησης επιτρέπει την απόκτηση δεδομένων με ταχύτητα λειτουργίας 50-100 km/h, ανάλογα με την εφαρμογή και τις εκάστοτε συνθήκες.

**Απαραίτητα συστατικά** για τη λειτουργία του συστήματος είναι:

- A. Ένα **σύστημα θέσης και προσανατολισμού** (*Positioning and Orientation System - POS*) ενσωματωμένο στο όχημα με το οποίο επιτυγχάνεται η γεωαναφορά των δεδομένων και που, συνήθως, απαρτίζεται από:
  - Έναν ή δύο δέκτες διαφορικού GPS, διπλής συχνότητας L1/L2, που υπολογίζουν τη θέση του κορμού του συστήματος ως προς ένα σύστημα αναφοράς και τον προσανατολισμό του ως προς ένα τοπικό σύστημα
  - Ένα προσκολλημένο αδρανειακό σύστημα (*strapdown INS*)
- B. Ένα **σύστημα απεικόνισης**, που περιλαμβάνει, συνήθως:
  - Μία ή περισσότερες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές με CCD αισθητήρες, με γεωμετρική ακρίβεια που εξαρτάται από την ανάλυση του αισθητήρα
  - Βίντεο-κάμερες (BW, RGB, IR)

- Πανοραμικές φωτο-μηχανές

Στα **πρόσθετα (προαιρετικά) συστατικά** του συστήματος ανήκουν τα παρακάτω:

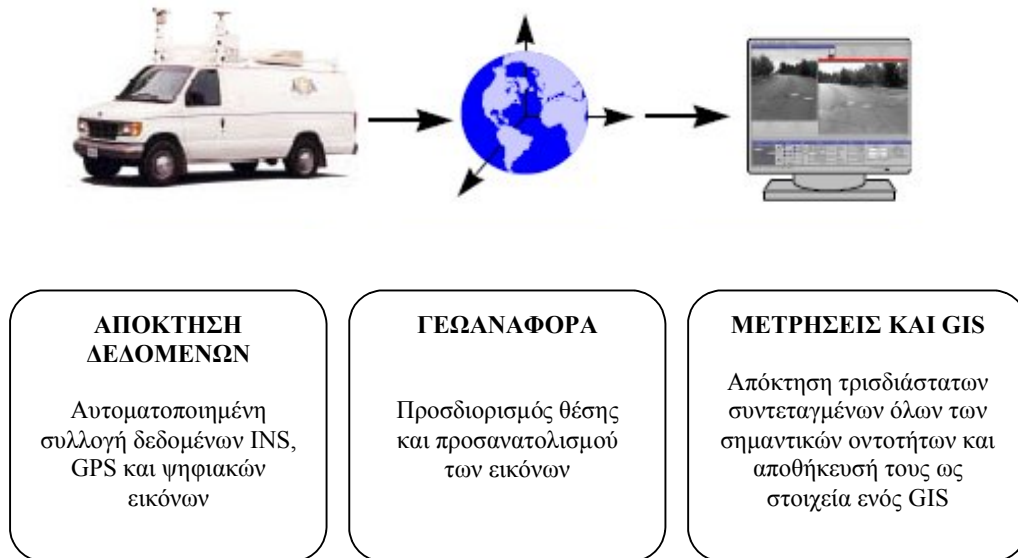
- Αποστασιόμετρο (*Distance Measuring Instrument - DMI*), που ενσωματώνεται στις περισσότερες περιπτώσεις είτε για την υποστήριξη της πλοήγησης, είτε για λειτουργικούς σκοπούς, για την χοντρική γεωαναφορά γραμμικών αποστάσεων κατά μήκος του δρόμου
- Antilock-Braking-System (*ABS*), τα δεδομένα του οποίου χρησιμοποιούνται στην ενημέρωση του *INS*
- Σαρωτές LASER
- Προφιλόμετρα, για την αποτύπωση των περιβαλλουσών, του οχήματος, επιφανειών, σε εφαρμογές καταγραφής της ποιότητας του οδοστρώματος και σε μελέτες διασποράς του θορύβου κίνησης ή υποστηρικτικά, στη δημιουργία τρισδιάστατων αστικών μοντέλων με τη μέτρηση αποστάσεων γειτονικών κτιρίων ή την παραγωγή λεπτομερών ψηφιακών μοντέλων εδάφους.

Καθένα από τα τμήματα που προαναφέρθηκαν, διαθέτει πρωτεύουσες και δευτερεύουσες λειτουργίες. Στις **πρωτεύουσες λειτουργίες** ανήκει και ο τρισδιάστατος προσδιορισμός θέσης (*3-D positioning*) της ομάδας των φωτο-μηχανών με αναφορά το προβολικό κέντρο μίας από τις μηχανές. Ο προσδιορισμός θέσης αυτής της αναφοράς γίνεται με τεχνικές διαφορικού *GPS* (*differential GPS techniques*), ενώ ο προσανατολισμός της μηχανής στον τρισδιάστατο χώρο γίνεται με τη βοήθεια του *INS*.

Σχετικά με τις **δευτερεύουσες λειτουργίες**, η δέσμη των μηχανών, συνήθως, παρέχει πλεονάζουσα πληροφορία (περισσότερες από δύο εικόνες για το ίδιο αντικείμενο), το *GPS* ελέγχει τη διασπορά σφάλματος του *INS*, ενώ το τελευταίο, βοηθάει σε περιπτώσεις διακοπής του δορυφορικού σήματος, διορθώνει την ολίσθηση των κύκλων φάσης του *GPS* και λύνει το πρόβλημα της παρεμβολής ανάμεσα σε διαδοχικούς προσδιορισμούς θέσης.

Η αποτύπωση με τη χρήση ενός Κινητού Συστήματος Χαρτογράφησης αποτελείται, βασικά, από τρία μέρη: την απόκτηση δεδομένων, τη γεωαναφορά και τον προσδιορισμό θέσης (Εικόνα 2.1). Η απόκτηση των συγχρονισμένων δεδομένων *GPS*, *INS*, και των δεδομένων απεικόνισης είναι πλήρως αυτοματοποιημένη για την μείωση του χρόνου στο πεδίο, ενώ διατηρείται η ποιότητα των δεδομένων.

Η θέση και ο προσανατολισμός της κινούμενης αναφοράς του οχήματος αποκτάται με τη διαδικασία της γεωαναφοράς, που απαιτεί την προσθήκη δεδομένων *GPS/INS* και πραγματοποιείται σε μεταγενέστερη φάση. Ο προσδιορισμός θέσης αντικειμένων ως προς το σύστημα αναφοράς του οχήματος, πραγματοποιείται εκ των υστέρων με τη χρήση δύο ή περισσότερων προσανατολισμένων εικόνων. Τα αποτελέσματα αυτών των διαδικασιών χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση ή τη δημιουργία βάσεων δεδομένων και επιπέδων πληροφορίας σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΠΓ - *GIS*). Στα επόμενα κεφάλαια ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή των επιμέρους τμημάτων του συστήματος.



Εικόνα 2.1 Το διάγραμμα ροής των δεδομένων (Naser El-Sheimy, 1996)

### 2.2.1 Το σύστημα πλοήγησης

Ο προσδιορισμός της πορείας (θέση και προσανατολισμός) του συστήματος στον τρισδιάστατο χώρο αποτελεί ουσιαστικά ένα πρόβλημα καθορισμού τροχιάς. Η κίνηση κάθε μηχανής στο χώρο περιγράφεται από έξι παραμέτρους, τρεις για τη θέση και τρεις για τον προσανατολισμό, οπότε τα αντίστοιχα μετρητικά συστήματα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα υπολογισμού αυτών των παραμέτρων.

Μία εννοιολογικά απλή εφαρμογή της παραπάνω λογικής αποτελεί η **μονάδα του προσκολλημένου αδρανειακού συστήματος** (*strapdown inertial measuring unit*). Αποτελείται από τρία γυροσκόπια, που χρησιμεύουν στην μέτρηση της γωνιακής

ταχύτητας και τρία επιταχυνσιόμετρα, που χρησιμεύουν στην μέτρηση της αδρανειακής επιτάχυνσης. Η πρώτη ομάδα μετρήσεων ολοκληρώνεται ως προς το χρόνο, ώστε να παρέχει μεταβολές στον προσανατολισμό του οχήματος σχετικές με τον αρχικό του προσανατολισμό. Από τη δεύτερη ομάδα μετρήσεων εξάγεται η επιτάχυνση ως προς τους τρεις ορθογώνιους άξονες και μετά από διπλή ολοκλήρωση ως προς το χρόνο προκύπτουν οι διαφορές των διανυσμάτων θέσης ως προς μια αρχική θέση.

Είναι σαφές ότι ένα αδρανειακό σύστημα είναι αυτόνομο και μπορεί αφ' ενός μεν να δώσει πληροφορία για το διάνυσμα θέσης από δικές του παρατηρήσεις, αφ' ετέρου δε να ενσωματώσει και τις παρατηρήσεις από το GPS σε έναν ενιαίο αλγόριθμο τόσο για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα όσο και για μεγαλύτερη αξιοπιστία του τελικού υπολογισμού. Το πρόβλημα είναι ότι τα (χρονικά μεταβαλλόμενα) **σφάλματα μιας αδρανειακής μονάδας** αυξάνονται κατά δραματικό τρόπο μετά από έναν ορισμένο χρόνο λειτουργίας. Οι κύριες πηγές των σφαλμάτων αυτών είναι το (άγνωστο) ανώμαλο γήινο πεδίο βαρύτητας και τα διάφορα μηχανικά τμήματα του συστήματος.

Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι οι περιοδικές ενημερώσεις του αδρανειακού σε ορισμένα σημεία ελέγχου της πορείας του, τα οποία είναι κατά κανόνα σημεία μηδενικών ταχυτήτων (*Zero Velocity Update - ZUPT*) με σωστές πληροφορίες (εκ νέου αρχικές συντεταγμένες θέσης, έλεγχος γυροσκοπίων και επιταχυνσιομέτρων). Τα μειονεκτήματα αυτών των ενημερώσεων μηδενικών ταχυτήτων είναι ότι:

- το σύστημα περιορίζεται σε ημικινηματικές μεθόδους
- σε λεωφόρους και δρόμους ταχείας κυκλοφορίας δεν είναι δυνατό το σταμάτημα του οχήματος χωρίς τη διακοπή της κυκλοφορίας
- ο ρυθμός παραγωγής, που είναι κρίσιμος σε πολλές εργασίες, μειώνεται

Η ασφαλέστερη πηγή για την εξωτερική ενημέρωση είναι το **GPS**, το οποίο προσφέρει υψηλή αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα όσο περνάει ο χρόνος παρατήρησης, ενώ ταυτοχρόνως δεν είναι ευαίσθητο στο πεδίο βαρύτητας. Εξάλλου, η πληροφορία βαρύτητας μπορεί να αγνοηθεί από ένα τέτοιο ολοκληρωμένο "υβριδικό" σύστημα όταν η ταχύτητα και η θέση του οχήματος είναι γνωστά. Εάν είναι απαραίτητη και η μέτρηση του διανύσματος της βαρύτητας, το ίδιο το σύστημα έχει τη δυνατότητα να διαχωρίσει την επιτάχυνση έλξης (κατά μέγεθος και διεύθυνση) από την πληροφορία για τη θέση και να την χρησιμοποιήσει στη συνέχεια

για τη μέτρηση της βαρύτητας.

Για να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια, το *GPS* πρέπει να είναι διαφορετικό, δηλαδή με τον ένα δέκτη σταθερό σε κάποιο γνωστό σημείο και τον άλλο δέκτη στο κινούμενο όχημα. Σε αυτή την περίπτωση, το αποτέλεσμα είναι οι αποστάσεις μεταξύ δέκτη και δορυφόρου, που προέρχονται από τα δεδομένα της φέρουσας φάσης. Αυτές οι μετρήσεις χρησιμεύουν στον καθορισμό θέσης και ταχύτητας του οχήματος ως προς το αρχικό σημείο. Και τα δύο αυτά διανύσματα δίνονται σε ένα γήινο σύστημα συντεταγμένων, ώστε να είναι δυνατός ο προσδιορισμός των μεταβολών του προσανατολισμού με διαφορετικές τεχνικές.

Τα **μειονεκτήματα του *GPS*** μπορεί να σκιαγραφηθούν ως εξής:

- (α) Ορισμένες φορές και σε περιοχές με πυκνή δόμηση (κέντρα μεγάλων πόλεων) οι παρατηρήσεις είναι προβληματικές, επειδή το δορυφορικό σήμα δεν φθάνει άμεσα από το δορυφόρο στο δέκτη (υψηλά κτίρια, διάφορα εμπόδια, κλπ.). Ο κατάλληλος προγραμματισμός των μετρήσεων και η βέλτιστη επιλογή των σταθμών μπορεί να δώσουν λύση στο πρόβλημα.
- (β) Το πρόβλημα της ολίσθησης ακέραιων κύκλων (*cycle slips*), που εμφανίζονται στις μετρήσεις φάσεων (για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού έχουν αναπτυχθεί ειδικές τεχνικές, που ελαχιστοποιούν την επίδρασή του στα τελικά αποτελέσματα) και που αποτελούν χονδροειδή λάθη, που οδηγούν σε ασυνέχειες στην πορεία.
- (γ) Οι μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ δέκτη και δορυφόρου δεν είναι πραγματικά ανεξάρτητες, και η υπάρχουσα πυκνότητα δεδομένων και η ακρίβεια δεν επαρκούν για την ικανοποίηση των απαιτήσεων της ακρίβειας του προσανατολισμού.

**Η χρήση ενός ολοκληρωμένου συστήματος *GPS/INS***, τελικά, προσθέτει τα ακόλουθα **πλεονεκτήματα** σε σύγκριση με μία λύση μόνο με *GPS* (Schwarz 1990):

- (α) Λύνει το πρόβλημα της ολίσθησης ακεραίων κύκλων (*cycle slips*) με την πληροφορία προσανατολισμού από τον δέκτη του αδρανειακού και με την ακριβή θέση και ταχύτητα ανά τακτά χρονικά διαστήματα.
- (β) Λύνει το πρόβλημα της παρεμβολής ανάμεσα σε διαδοχικούς προσδιορισμούς θέσης.
- (γ) Ανάγει στο ελάχιστο τα τυχαία σφάλματα του συστήματος *GPS*, επειδή η λογική του *INS* είναι η μέτρηση σε κάποιες κορυφές όδευσης και ο έλεγχος (κλείσιμο) σε κάποιες γνωστές κορυφές (σημεία ελέγχου).
- (δ) Παρέχει πληροφορία με ικανοποιητική ακρίβεια για τις τρεις γωνίες στροφής της



αδρανειακής βάσης ως προς ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων (*attitude determination*) σε τακτά χρονικά διαστήματα, κάτι που έχει βαρύνουσα σημασία για πολλές γεωδαιτικές εφαρμογές.

- (ε) Επιπλέον, στην περίπτωση που υπάρχει και *Antilock-Braking-System (ABS)*, τα δεδομένα του χρησιμοποιούνται στην ενημέρωση του *INS*, όταν το σήμα του *GPS* είναι ασθενές για περιόδους μεγαλύτερες από εκείνες που απαιτούνται από το *INS* για να ανακτήσει τα δεδομένα του *GPS*.

Γενικά, το γεγονός ότι, για τον προσδιορισμό των έξι απαιτούμενων παραμέτρων τροχιάς, είναι διαθέσιμη πλεονάζουσα πληροφορία, ενισχύει σημαντικά την αξιοπιστία του συστήματος.

### 2.2.2 Το σύστημα απεικόνισης

Το σύστημα απεικόνισης ενός συστήματος *mobile mapping* αποτελείται συνήθως από 6-12 ψηφιακές φωτο-μηχανές, με ανάλυση που κυμαίνεται από 1600x1200 ως 2048x2048 pixels. Οι φωτο-μηχανές φυλάσσονται σε θήκες που βρίσκονται υπό πίεση και τοποθετούνται μέσα σε πύργους με σταθερή βάση, περιορίζοντας με αυτό τον τρόπο τις πιθανότητες μετακίνησής τους κατά τη διάρκεια της αποτύπωσης. Το οριζόντιο πεδίο λήψης των φωτο-μηχανών φτάνει μέχρι και 330 μοίρες και το κατακόρυφο πεδίο λήψης κυμαίνεται στις 37 μοίρες. Η διάταξη των φωτο-μηχανών ποικίλλει ανάλογα με το σύστημα και παραδείγματα τέτοιων διατάξεων ακολουθούν στο κεφάλαιο 2.3, όπου περιγράφονται λειτουργούντα συστήματα.

Τα **προβλήματα**, που μπορούν να προκύψουν κατά τη συνδυασμένη χρήση των ψηφιακών *CCD* μηχανών με το σύστημα *INS/GPS*, οφείλονται στους ακόλουθους περιορισμούς (Naser El-Sheimy, 1996):

- Τα περισσότερα *frame grabbers* της αγοράς μπορούν να δεσμεύσουν το πολύ 3-4 εικόνες. Η χρονική καθυστέρηση μεταξύ εικόνων διαφορετικών μηχανών είναι της τάξης του 0.1 sec, κατά τη διάρκεια της οποίας το όχημα μετακινείται τουλάχιστον 1-1.5 m, επομένως το πλεονέκτημα της σταθερής βάσης μεταξύ των μηχανών χάνεται. Αυτό επηρεάζει την τελική ακρίβεια, καθότι οποιοδήποτε μικρό σφάλμα στο *INS/GPS* οξύνεται, εξαιτίας της μικρής βάσης μεταξύ των φωτο-μηχανών
- Τα υπάρχοντα συστήματα επεξεργασίας εικόνας, που δεσμεύουν μέχρι και έξι εικόνες ταυτόχρονα, απαιτούν το συγχρονισμό όλων των φωτο-μηχανών. Ο συγχρονισμός πολλών φωτο-μηχανών απαιτεί εξειδικευμένα όργανα και λογισμικό

- Για τη δέσμευση και την καταγραφή έξι εικόνων ταυτόχρονα κάθε 5-6 μέτρα (0.4 sec στα 60 km/h), ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων μεταξύ του *frame grabber* και του συστήματος πρέπει να είναι σχετικά μεγάλος, της τάξης των 3-4 MB/sec
- Ο περιορισμένος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων των περισσότερων σκληρών δίσκων καταναλώνει το μεγαλύτερο μέρος του *logging time* της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (*CPU*), κυρίως κατά τη μεταφορά εικόνων

Ο συγχρονισμός των φωτο-μηχανών μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν **ελεγκτή βίντεο-σήματος** (*video signal controller*), που μπορεί να χειριστεί μέχρι δεκαέξι φωτο-μηχανές και να ανακατευθύνει οκτώ από αυτές σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις (*configurations*) του χρήστη. Αυτό επιτρέπει την προσθήκη, στο μέλλον, περισσότερων φωτο-μηχανών. Ο ελεγκτής εκτελεί τα ακόλουθα:

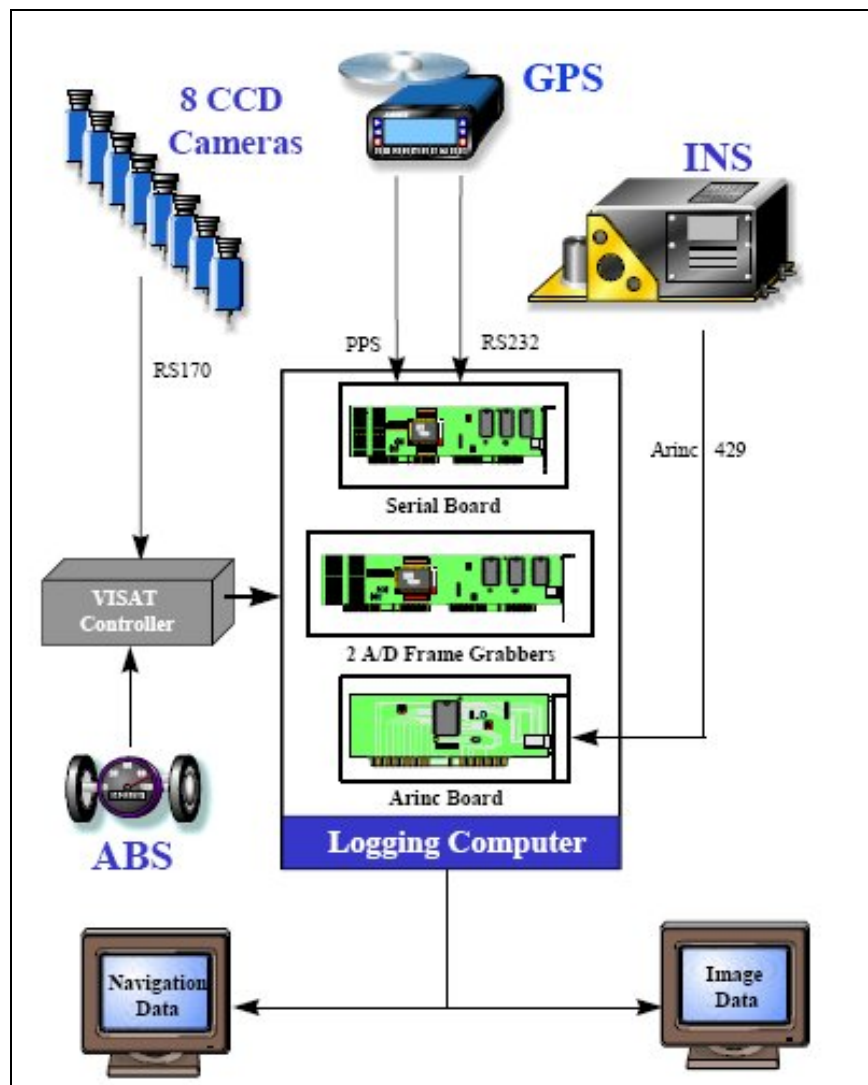
- Λαμβάνει τα δεδομένα *ABS* και τις διακοπές και μετράει τον αριθμό των παλμών μεταξύ δύο διαδοχικών *GPS PPS*
- Οπλίζει τις φωτο-μηχανές σε συγκεκριμένες προκαθορισμένες αποστάσεις, ώστε όλες οι εικόνες να ισαπέχουν χρονικά
- Σβήνει/ανάβει τις φωτο-μηχανές όταν το όχημα σταματάει στους φωτεινούς σηματοδότες
- Σφραγίζει αυτόματα κάθε γεγονός εξαρτώμενο από την απόσταση, με τον αντίστοιχο χρόνο *GPS (ZUPT, αρχή/τέλος στατικών περιόδων GPS)*
- Παρέχει το σήμα που απαιτείται για το συγχρονισμό των εικόνων
- Στέλνει προειδοποιητικό σήμα στον οδηγό να σταματήσει για ενημέρωση *ZUPT*, σε περιπτώσεις συχνών διακοπών του σήματος του *GPS*

Όλες οι φωτο-μηχανές είναι εξωτερικά συγχρονισμένες, ώστε κάθε καταγραφή εικόνας να σχετίζεται με μία θέση του οχήματος. Οι εικόνες, που λαμβάνονται από αυτές τις φωτο-μηχανές, συμπίεζονται σε πραγματικό χρόνο με κάποιο συγκεκριμένο *format* και αποθηκεύονται σε κάποιο μέσο. Κάθε καταγραφή εικόνας σφραγίζεται με το χρόνο *GPS*, που αντιπροσωπεύει το χρόνο της καταγραφής της εικόνας και χρησιμεύει στη μετέπειτα γεωαναφορά των βίντεο-εικόνων (βλ. κεφ. 3).

Το σύστημα απεικόνισης περιλαμβάνει, συνήθως, και μία βίντεο-κάμερα *S-VHS*, που μπορεί να εστιάζει και να περιστρέφεται σε οποιαδήποτε κατεύθυνση και σε πραγματικό

χρόνο με τη βοήθεια μίας μονάδας ελέγχου μέσα στο όχημα. Οι εικόνες κωδικοποιούνται με το χρόνο *GPS* στο ακουστικό τμήμα της βιντεοκασέτας.

Η ολοκλήρωση του όλου συστήματος (*System Integration*) πραγματοποιείται από όργανα και λογισμικό, που μπορεί να διαχειρίζεται τα διαφορετικά τμήματα και τις διαδικασίες του συστήματος και να παρέχει στον χειριστή ένα φιλικό περιβάλλον διάθεσης και διαχείρισης των δεδομένων (Εικόνα 2.2). Αναλυτικά, τρία χαρακτηριστικά παραδείγματα λειτουργούντων συστημάτων, μαζί με τα προγράμματα και τα λογισμικά που τα συνοδεύουν, περιγράφονται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.



Εικόνα 2.2 Ένα σύστημα διαχείρισης των διαφορετικών τμημάτων ενός MMS (Naser El-Sheimy, 1996)

## 2.3 Λειτουργούντα συστήματα

### 2.3.1 VISAT™ Van 2006

Το σύστημα VISAT™ Van 2006 (Εικόνα 2.3) αναπτύχθηκε ως τμήμα έρευνας του Πανεπιστημίου του Calgary, Καναδά, που σχετίζεται με ακριβή συστήματα χαρτογράφησης πολλών δεκτών για γενικές χαρτογραφήσεις και GIS εφαρμογές. Η ονομασία VISAT προκύπτει από το γεγονός ότι το σύστημα ενσωματώνει βίντεο-κάμερες (Video cameras), ένα αδρανειακό σύστημα (Inertial system) και δορυφορικούς δέκτες GPS (SATellite GPS receivers).



Εικόνα 2.3 Το σύστημα VISAT™ Van 2006

Το σύστημα VISAT™ περιλαμβάνει μία ομάδα ψηφιακών φωτο-μηχανών, ένα δέκτη GPS, ένα αδρανειακό σύστημα (INS) και ένα αποστασιόμετρο για τη συλλογή πανοραμικών όψεων κατά μήκος του οδοστρώματος της περιοχής μελέτης. Υλοποιεί την ιδέα της αποθήκευσης γεωαναφερμένων ψηφιακών εικόνων ως τη βασική μονάδα και το συνδυασμό ενός αυθαίρετου αριθμού τέτοιων εικόνων (που μπορεί να προέρχονται από διαφορετικές χρονικές περιόδους) για την απόκτηση της συγκεκριμένης πληροφορίας που απαιτείται. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλεκτική ενημέρωση βάσεων δεδομένων GIS, με ακρίβεια, ταχύτητα και οικονομία.

Η ταχύτητα λειτουργίας του συστήματος κινείται στα συνηθισμένα πλαίσια και φτάνει στα 110 km/h, ενώ εύκολα επιτυγχάνεται ακρίβεια μισού μέτρου για τις οντότητες που απεικονίζονται.

#### **2.3.1.1 Το σύστημα πλοήγησης τουVISAT™**

Τα συστατικά μέρη του συστήματος, που αφορούν στην απόκτηση δεδομένων, περιλαμβάνουν ένα **προσκολλημένο αδρανειακό σύστημα**, δύο **δέκτες διαφορικού GPS**, διπλής συχνότητας L1/L2, **6 έως 12 ψηφιακές μηχανές**, ένα **αποστασιόμετρο** προσαρτημένο στο δέκτη ταχύτητας του οχήματος, και τον ελεγκτή του συστήματος VISAT™. Η λειτουργία κάθε συστατικού μέρους του συστήματος υποδιαιρείται σε πρωτεύουσες και δευτερεύουσες λειτουργίες. Έτσι, αναφορικά με τις πρωτεύουσες λειτουργίες, η ομάδα των φωτο-μηχανών παρέχει οπτικό πεδίο μέχρι 330 μοίρες, με αναφορά το προβολικό κέντρο μίας εκ των φωτο-μηχανών. Η θέση αυτού προσδιορίζεται από το διαφορικό *GPS*, ενώ το *INS* παρέχει τον προσανατολισμό της φωτο-μηχανής στον τρισδιάστατο χώρο. Το αποστασιόμετρο παρέχει την διανυόμενη απόσταση του οχήματος και οπλίζει τις φωτο-μηχανές σε προκαθορισμένα διαστήματα. Το πρόγραμμα *VISAT™ Log* επιτρέπει διαφορετικές ρυθμίσεις φωτο-μηχανών και καταγραφή διαφορετικών αποστάσεων εικόνων ή οπλισμό της φωτο-μηχανής με το χρόνο αν είναι απαραίτητο. Αναφορικά με τις δευτερεύουσες λειτουργίες, η ομάδα των φωτο-μηχανών παρέχει πλεονάζουσα πληροφορία, για παράδειγμα περισσότερες από δύο εικόνες για το ίδιο αντικείμενο.

Το VISAT™ μπορεί να επιτύχει **ακρίβειες** της τάξης των 0.1 - 0.3 m σε αστικό περιβάλλον, με ταχύτητες λειτουργίας μέχρι 110 km/h.

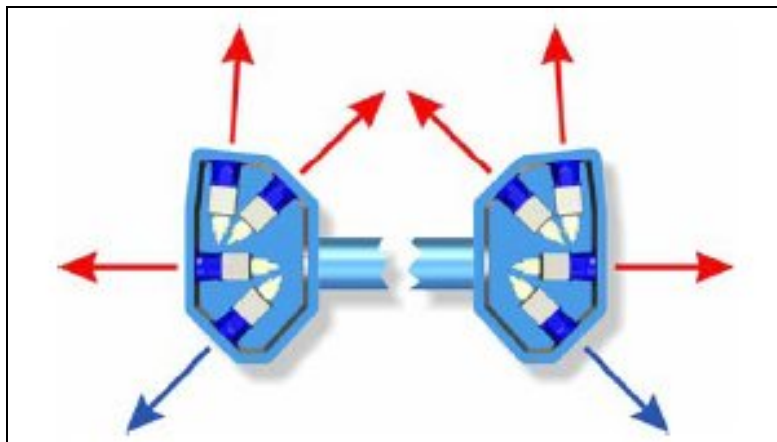
#### **2.3.1.2 Το σύστημα απεικόνισης τουVISAT™**

Το φορτηγάκι του VISAT™, στη συνηθισμένη διάταξη περιλαμβάνει 6-12 φωτο-μηχανές, που δίνουν μια πανοραμική όψη της περιοχής που χαρτογραφείται. Οι φωτο-μηχανές μπορούν να τοποθετηθούν σε διαφορετικό σχηματισμό για την εξασφάλιση όλων των απαραίτητων οπτικών γωνιών για συγκεκριμένες εφαρμογές. Ο σταθερός σχηματισμός των έξι φωτο-μηχανών βοηθάει στην εξαγωγή οποιονδήποτε οδικών χαρακτηριστικών, όπως οδικά σήματα, φωτεινοί σηματοδότες, υπόνομοι, πυροσβεστικοί κρουνοί, εμπορικά σήματα (βλ. Εικόνα 2.4).



**Εικόνα 2.6** Παράδειγμα εικόνων που καταγράφονται από το VISAT™ (Η πρώτη εικόνα θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει στην καταγραφή των νησίδων κυκλοφορίας, η δεύτερη στην καταγραφή οδικής διαγράμμισης και η τελευταία εικόνα στην αυτόματη εξαγωγή οδικού σήματος)

Οι εικόνες λαμβάνονται σε προκαθορισμένα διαστήματα για τη δημιουργία επικαλυπτόμενων ομάδων εικόνων. Το σύνηθες διάστημα είναι πέντε μέτρα, έτσι ώστε τα ίδια αντικείμενα να βρίσκονται σε τρεις ή περισσότερες επικαλυπτόμενες εικόνες. Οι φωτο-μηχανές έχουν ταχύτητες φωτοφράκτη από 60μs έως 5 sec, ενώ οι φακοί τους έχουν διάφραγμα που ρυθμίζεται εξ αποστάσεως από την logging εφαρμογή, η οποία αναλύει κάθε εικόνα και ρυθμίζει το διάφραγμα για τη μεγιστοποίηση του επιπέδου saturation για καλύτερη οπτική ποιότητα. Οι φωτο-μηχανές τοποθετούνται σε σφραγισμένο περίβλημα με υψηλής ποιότητας και μικρής παραμόρφωσης γυαλί για την προστασία τους από το περιβάλλον (βλ. Εικόνα 2.5).



**Εικόνα 2.5** Το αριστερό και το δεξί περίβλημα με βέλη τις κατευθύνσεις των οπτικών αξόνων των φωτο-μηχανών. (Τα μπλε βέλη αντιστοιχούν σε προαιρετικές φωτο-μηχανές) (Naser El-Sheimy, 1996)

### 2.3.1.3 Ο ελεγκτής του συστήματος VISAT™

Ο ελεγκτής (*VISAT™ controller*) είναι η καρδιά του συστήματος. Πρόκειται για ένα πανίσχυρο υπολογιστή με υψηλό *bandwidth bus* που εκμεταλλεύεται τις, 64 bits διεπαφές του PCI-X, για υψηλή κυκλοφορία (Εικόνα 2.6). Τα τμήματα που τον απαρτίζουν είναι:

- ένας πολυκάναλος πίνακας ρολογιού πραγματικού χρόνου (real-time clock board-*RTC*), που καταχωρεί την πληροφορία συγχρονισμού από όλους τους δέκτες για την αποδοτική ενοποίηση όλων των δεδομένων
- ένας frame grabber που λαμβάνει εικόνες από όλες τις φωτο-μηχανές σε υψηλή ταχύτητα
- ένας δικάναλος προσαρμογέας (dual channel adapter) RAID SCSI ικανός να αποθηκεύει εικόνες κατά τη σύλληψή τους
- ένας αναλογικός πίνακας 32 καναλιών για τη διασύνδεση με τους φακούς,
- καθώς και όλα τα άλλα τμήματα που συναντώνται σε έναν ΗΥ.

Η αποθηκευτική ικανότητα του ελεγκτή υπολογίζεται μεγαλύτερη από 150Gbytes και κυμαίνεται ανάλογα με τον αριθμό των φωτο-μηχανών και των σχετικών ρυθμίσεων που επιλέγονται. Έτσι, για παράδειγμα, για συχνότητα λήψης 1 εικόνα/5m, μέση ταχύτητα οχήματος 70km/h και για μία διάταξη που περιλαμβάνει 2 φωτο-μηχανές, λαμβάνονται συνολικά 196,000 εικόνες σε μία περίοδο μετρήσεων 7 ωρών. Για μέγεθος εικόνας 1Mbyte, λοιπόν, αυτό σημαίνει για το σύστημα, σε επίπεδο αποθηκευτικής ικανότητας, ότι απαιτούνται τουλάχιστον 196Gbytes ανά περίοδο.

Ο πίνακας ελέγχου του ρεύματος παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα σε όλους τους δέκτες, που μπορούν να τεθούν σε λειτουργία κατ' επιλογήν, ανάλογα με την εργασία, ενώ φωτεινοί διακόπτες δηλώνουν ποιες συσκευές λειτουργούν.



Εικόνα 2.6 Ο VISAT™ controller

### 2.3.1.4 VISAT™ Log

Το *VISAT™ Log* είναι ο εγκέφαλος του συστήματος, που ελέγχει τις λειτουργίες της συγκεκριμένης εργασίας και καθοδηγεί το εκάστοτε προσωπικό να επιτύχει το ευμενέστερο αποτέλεσμα. Κάθε δέκτης και συσκευή αποτελεί έναν αυτόνομο server, που ελέγχεται και συντονίζεται από το πλούσιο περιβάλλον γραφικής απεικόνισης της κύριας εφαρμογής του VISAT™ Log.

Το *VISAT™ Log* δεν είναι ένα κοινός, παθητικός, καταγραφέας δεδομένων, που σώζει τα δεδομένα που προέρχονται από τους δέκτες, αλλά διαδραματίζει ενεργό ρόλο στη διαδικασία δημιουργίας γεωαναφερμένης πληροφορίας, στη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας και της ποιότητας των τελικών αποτελεσμάτων. Ένα παράδειγμα αυτού, αποτελεί το *Navigation Monitor*, το οποίο αναλύει σε πραγματικό χρόνο την εισερχόμενη πληροφορία των δεκτών πλοήγησης, κάνει μία εκτίμηση της κατάστασης και της ποιότητας των δεδομένων και στη συνέχεια, παρέχει οπτικές ενδείξεις και υποδείξεις στο χειριστή.

Όλα τα δεδομένα, κατά τη διάρκεια της εργασίας, καταγράφονται στη φυσική τους μορφή, χωρίς κανένα φιλτράρισμα ή μετατροπή, έτσι ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν εκ των υστέρων με τη χρήση της εφαρμογής του κατασκευαστή ή με τη χρήση του προγράμματος *GeoPROC™*, για έναν πλήρη κύκλο δημιουργίας γεωαναφερμένων εικόνων. Η πληροφορία που εμφανίζεται στο χρήστη, ομαδοποιείται έτσι ώστε να επιτρέπει την επιλογή μίας συγκεκριμένης σελίδας ενδιαφέροντος.

### 2.3.2 ARAN 4300 AUTOMATIC Road Analyzer

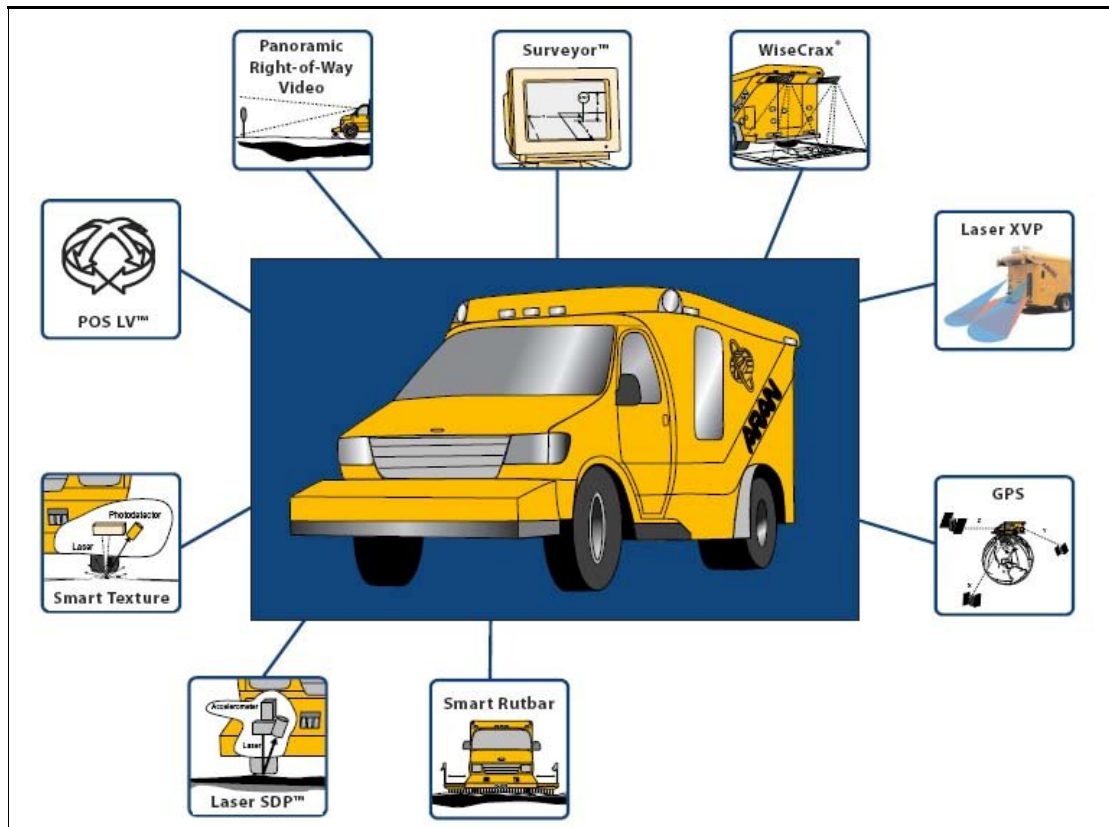
Η *Roadware Group Inc.* με έδρα το Οντάριο του Καναδά, είναι υπεύθυνη για την κατασκευή και την υποστήριξη των *ARAN (Automatic Road Analyzers)* παγκοσμίως. Το *ARAN* (Εικόνα 2.7) είναι μία κινούμενη πλατφόρμα συλλογής πληροφορίας, που έχει τη δυνατότητα να συλλέγει με επάρκεια και ακρίβεια ένα πλήθος διαφορετικών τύπων πληροφοριών υποδομής, σε ένα μόνο πέρασμα, σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας.

Το *ARAN* είναι ένα δίκτυο αυστηρά ενοποιημένων υποσυστημάτων, που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή ακριβούς και αξιόπιστης πληροφορίας και γεωαναφερμένων εικόνων για εφαρμογές διαχείρισης οδικών υποδομών. Αποτελεί μία



λύση, που είναι εύκολα αναβαθμίσιμη και που μπορεί να ανασχηματιστεί ώστε να πληροί τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του χρήστη.

Η χρήση του *ARAN* χρησιμεύει σε εφαρμογές: διαχείρισης οδοστρωμάτων και πεζοδρομίων (εκτίμηση επιφανειακών φθορών, λακκούβες, ρωγμές κλπ.), γεωμετρίας της οδού (κατά μήκος κλίση, ακτίνα καμπυλότητας, κλπ.), διαχείριση πόρων.



Εικόνα 2.7 Το σύστημα ARAN 4300 Automatic Road Analyzer (<http://www.roadware.com/>)

### 2.3.2.1 Τα συστατικά μέρη του βασικού εξοπλισμού του *ARAN*

Τα τμήματα, που περιγράφονται στη συνέχεια, αποτελούν το **βασικό εξοπλισμό** για όλα τα οχήματα *ARAN*:

Το **αποστασιόμετρο** (*DMI*), που παρέχει χρονικούς παλμούς στα αυτόματα υποσυστήματα των δεκτών και μεταφράζει τις περιστροφές των τροχών σε μετρήσεις ταχύτητας και διανυόμενων γραμμικών αποστάσεων. Οι μετρήσεις γραμμικών αποστάσεων συλλέγονται με τη βοήθεια οπτικού αποκωδικοποιητή, που βρίσκεται στον

πίσω τροχό από τη μεριά του οδηγού (Εικόνα 2.8). Αυτή η μέθοδος μέτρησης αποστάσεων δεν είναι επιρρεπής στις απώλειες και δεν έχει ελάχιστους περιορισμούς ταχύτητας.



Εικόνα 2.8 Ο οπτικός αποκωδικοποιητής (<http://www.roadware.com/>)

Την καρδιά του συστήματος αποτελεί ο **CDAC** (*Central Data Acquisition Computer*), που συνδέει όλους τους υπολογιστές που σχετίζονται με τα υπόλοιπα υποσυστήματα του *ARAN* και οι προδιαγραφές του είναι τέτοιες ώστε να περιορίζονται πιθανές βλάβες εξαιτίας της καθημερινής χρήσης.

Το λογισμικό **ARAN Real-time Operating Software**, λειτουργεί με τη χρήση ενός συνδυασμού των λειτουργικών συστημάτων *Windows* και *QNX* και παρέχει πολλές δυνατότητες, όπως η δυνατότητα εισαγωγής προκαθορισμένων παραμέτρων, όπως φίλτρα και ονόματα αρχείων, η δυνατότητα επισήμανσης γεγονότων, όπως διασταύρωση γεφυρών, κατάσταση πεζοδρομίων με τη χρήση ειδικά προγραμματισμένων πλήκτρων, η εκτέλεση διαγνωστικών για την απομόνωση βλαβών του συστήματος, η δυνατότητα βαθμονόμησης του αποστασιόμετρου κ.α.

Επίσης, μαζί με το *ARAN*, διατίθεται και το λογισμικό **VIEW**, που είναι πλήρως συμβατό με τα *Windows* και προσφέρεται για την εκ των υστέρων επεξεργασία, με διεπαφή φιλική στο χρήστη και με πλήθος δυνατοτήτων (όπως διακρίβωση, αποθήκευση, διαχείριση των δεδομένων βάσει κριτηρίων, πολλαπλές διαδρομές για το ίδιο τμήμα δρόμου και σύγκριση των αποτελεσμάτων, λεπτομερείς στατιστικές αναλύσεις).

Τέλος, σχετικά με την κονσόλα λειτουργίας, υπάρχουν δύο σταθμοί για το χειρισμό του συστήματος, μία στη μπροστινή θέση του επιβάτη και μία στο πίσω μέρος του οχήματος, μπροστά από τον υπολογιστή από τον οποίο διενεργούνται οι έλεγχοι ποιότητας και οι άλλες επεξεργασίες.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η περιγραφή των συστατικών μερών των δύο βασικών υποσυστημάτων του συστήματος *ARAN*, του συστήματος πλοήγησης και του συστήματος απεικόνισης.

### 2.3.2.2 Το σύστημα πλοήγησης του ARAN

Η εταιρεία *Roadware* προσφέρει πολλές επιλογές παρέχοντας δεδομένα θέσης και γεωμετρίας του οδοστρώματος. Ο δωδεκακάναλος δέκτης διαφορικού *GPS* της *Trimble, AgGPS 332*, καταγράφει ακριβή δεδομένα γεωγραφικού πλάτους, μήκους και υψομετρίας σε πραγματικό χρόνο. Στα χαρακτηριστικά του συμπεριλαμβάνονται: ακρίβεια διαφορικής ταχύτητας 0.6km/h και βαθμός ενημέρωσης 1-10Hz με λανθάνοντα χρόνο λιγότερο από 100ms.

Το σύστημα *POS LV (Position Orientation System for LandVehicles)* είναι ένα υψηλής ακρίβειας αδρανειακό σύστημα, που μετριάζει, επιτυχώς, τις επιπτώσεις των διακοπών του *GPS*, τις παρεμβολές σήματος, το φαινόμενο πολλαπλών διαδρομών (*multipath*), παρέχοντας ακριβή προσδιορισμό θέσης, σε περιπτώσεις που το *GPS* μόνο του δε μπορεί να προσφέρει αξιόπιστα δεδομένα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια.

Άλλα υποσυστήματα του *ARAN* είναι:

- το *Longitudinal Profile*, που παράγει ένα διαμήκες σχεδιάγραμμα της επιφάνειας του δρόμου και προσδιορίζει την τραχύτητά του,
- το *Laser XVP (Laser Transverse Profiler)*, που χρησιμοποιεί διπλά λέιζερ σάρωσης για την ακριβή μέτρηση του εγκάρσιου προφίλ του δρόμου,
- το *WiseCrax*, που αποτελεί ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα ανίχνευσης ρωγμών για την εκτίμηση της κατάστασης των πεζοδρομίων

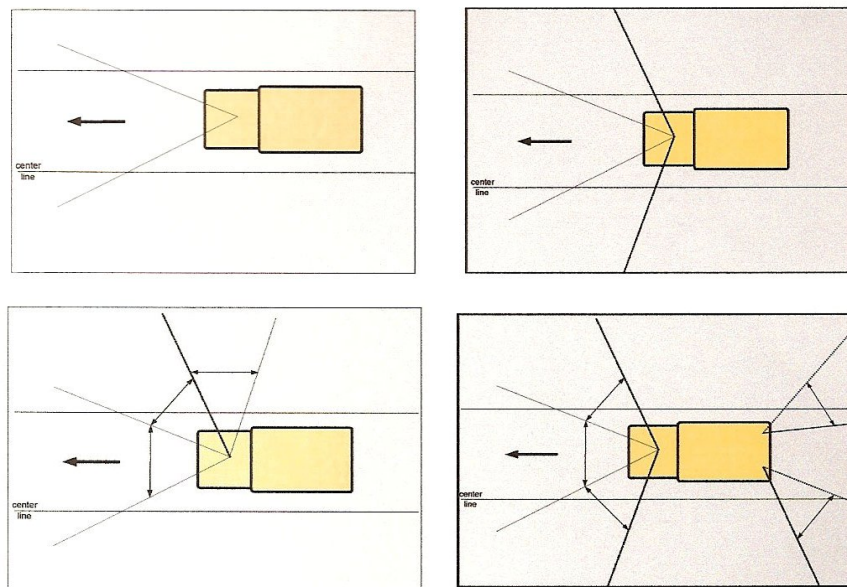
Με τη χρήση των συμπληρωματικών τεχνολογιών του *GPS* και της αδρανειακής μονάδας, επιτυγχάνονται **ακρίβειες** μισού μέτρου (RMS γεωγραφικού πλάτους και μήκους) με πιθανότητα 67% (1σ).

### 2.3.2.3 Το σύστημα απεικόνισης του ARAN

Το *ARAN* είναι εξοπλισμένο με δυνατότητες ψηφιακής καταγραφής εικόνων Right-Of-Way (ROW), ανάλυσης 1380 x 1030 pixels και αναλογίας 4:3. Στα χαρακτηριστικά του συστήματος περιλαμβάνονται διαδοχικές εικόνες *true color*, ένας αισθητήρας CCD 2/3'', οριζόντιο πεδίο λήψης 47° και ταχύτητα διαφράγματος 1/1000sec. Ο **συνήθης σχηματισμός** είναι έξι ανεξάρτητες φωτο-μηχανές, διαφορετικών αναλύσεων, που

στερεώνονται στο μπροστινό τζάμι του οχήματος ή μέσα σε ένα στρεφόμενο κουβούκλιο πάνω από το όχημα (βλ. εικόνα 2.9).

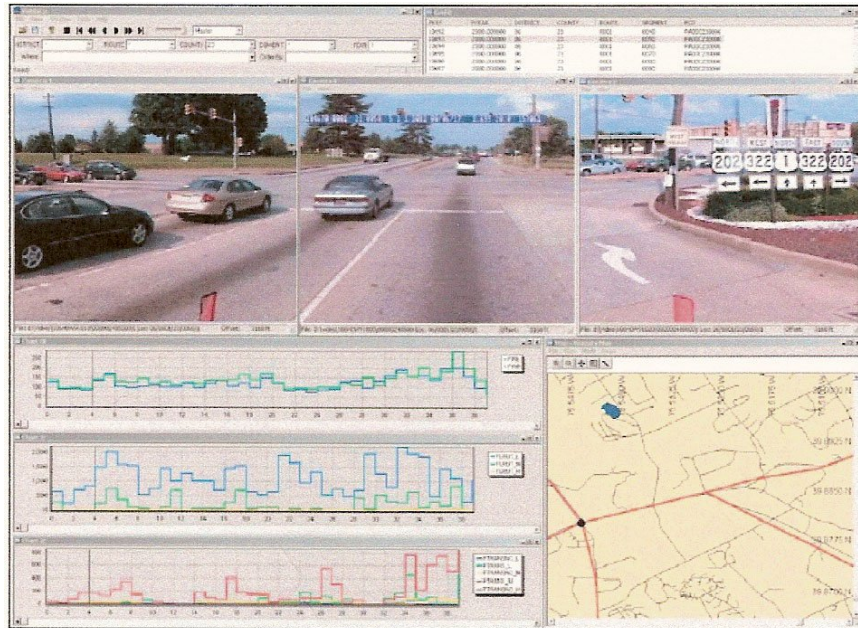
Για τη συλλογή και αποθήκευση των εικόνων χρησιμοποιούνται υπολογιστές υψηλής τεχνολογίας με αποσπώμενους σκληρούς δίσκους μεγάλης χωρητικότητας (250GB ο καθένας). Οι εικόνες συλλέγονται σε καθορισμένα διαστήματα των 3-3,5 m, ενώ η ποιότητά τους ελέγχεται σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια της συλλογής των δεδομένων, με δυνατότητα τροποποιήσεων της αντίθεσης, της φωτεινότητας, των συνθηκών φωτισμού.



Εικόνα 2.9 Οι συνήθεις σχηματισμοί των φωτο-μηχανών του ARAN (<http://www.roadware.com/>)

Με το λογισμικό *VisiData* παρέχεται η δυνατότητα ανασκόπησης των επεξεργασμένων δεδομένων και των συγχρονισμένων βίντεο-εικόνων και επιτρέπεται η εμφάνιση πολλαπλών παραθύρων, που περιέχουν ένα συνδυασμό γραφικών δεδομένων και πινάκων (Εικόνα 2.10). Πληροφορίες όπως τραχύτητα, αυλακώσεις, κλίσεις κλπ. σε διάφορα σημεία μπορούν να απεικονιστούν με λεπτομέρεια ή σε γενικό επίπεδο με τον καθορισμό σημείων αναφοράς.

Τέλος, το λογισμικό Surveyor είναι μια εφαρμογή που επιτρέπει στους χειριστές τον εντοπισμό της θέσης και την καταγραφή και μέτρηση πληροφοριών και στοιχείων (assets), που βρίσκονται στην άκρη του δρόμου, με τη χρήση βαθμονομημένων, γεωαναφερμένων εικόνων που συλλέγονται με το ARAN.



Εικόνα 2.10 Η διεπαφή του προγράμματος *VisiData* (<http://www.roadware.com/>)

### 2.3.3 GPS/INS/CCD Integrated Survey System (GISS)

Το σύστημα GISS αναπτύχθηκε το καλοκαίρι του 2003 στο Πανεπιστήμιο του Οχάιο (*The Ohio State University*) από τον τομέα μεταφορών, για έλεγχο οδικών αξόνων (*centerline monitoring*) (Dorota A. et al., 2004). Οι τοπογραφήσεις των οδικών αξόνων πραγματοποιούνταν, μέχρι τότε, με τις παραδοσιακές μεθόδους και παρόλο το υψηλό επίπεδο ακρίβειάς τους, παρέμενε το πρόβλημα της ασφάλειας του προσωπικού, των συχνών διακοπών λόγω κυκλοφοριακής κίνησης, όπως επίσης και το σημαντικό κόστος των εργασιών. Το γεγονός αυτό, ώθησε τον τομέα μεταφορών του Οχάιο να αντικαταστήσει τις συμβατικές μεθόδους με ένα αυτόματο, αυτοκινούμενο σύστημα χαρτογράφησης, που θα συλλέγει δεδομένα εν κινήσει, σε ταχύτητες κυκλοφοριακού φόρτου, εξασφαλίζοντας συγχρόνως την ασφάλεια του προσωπικού.

#### 2.3.3.1 Τα συστατικά μέρη του συστήματος

Το σύστημα αυτό (όπως και τα δύο προηγούμενα που αναπτύχθηκαν) αποτελείται από δύο ξεχωριστά υποσυστήματα: **το σύστημα απεικόνισης και το σύστημα προσδιορισμού θέσης**. Το πρώτο, ως γνωστόν, χρησιμοποιεί τα δεδομένα *GPS* και *INS*



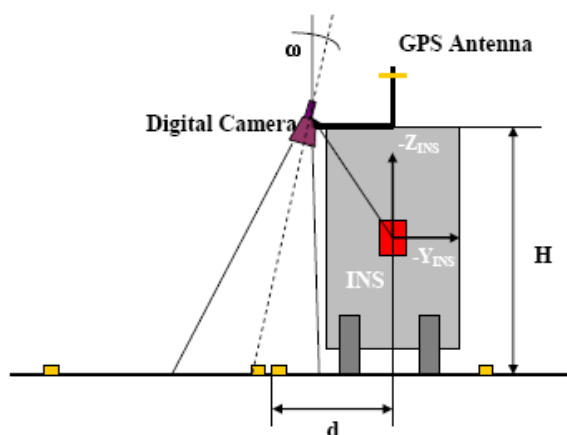
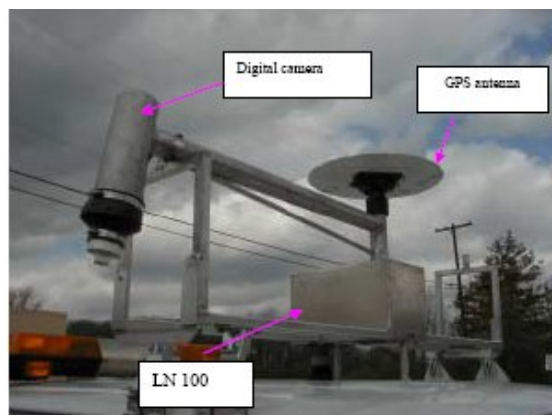
για τον καθορισμό θέσης και προσανατολισμού της πλατφόρμας και συνεπώς και του συστήματος απεικόνισης.

Το πρωτότυπο σύστημα προσδιορισμού θέσης, βασίζεται σε ένα αυστηρά ενοποιημένο *GPS/INS* (*Trimble 4000SSI, Litton LN100*), ενώ το τμήμα της απεικόνισης αποτελείται από μία γρήγορη κατακόρυφη, έγχρωμη, ψηφιακή φωτο-μηχανή της Pulnix (*TMC-6700*), με ανάλυση 644 x 482 pixels και ρυθμό απόκτησης δεδομένων μέχρι 30 Hz (βλ. Εικόνα 2.13, 2.14). Ο υψηλός ρυθμός συλλογής εικόνων συντελεί στην ικανοποιητική επικάλυψη των διαδοχικών εικόνων στις υψηλές ταχύτητες, ώστε η στέρεο-επεξεργασία των δεδομένων να μπορεί να πραγματοποιηθεί σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, με την υποστήριξη μίας μόνο φωτο-μηχανής και τη γρήγορη επίλυση πλοήγησης (*on-the-fly navigation solution*).



Εικόνα 2.11 Η πλατφόρμα **GISS** (Dorota A. et al., 2004)

Τα δεδομένα *GPS* συλλέγονται και αποθηκεύονται στο δέκτη *GPS*, ενώ χρησιμοποιείται τουλάχιστον ένας σταθμός βάσης (*base station*) *GPS*. Οι σταθμοί βάσης πρέπει να τοποθετούνται σε γνωστά σημεία ελέγχου σύμφωνα με αποδεκτές τοπογραφικές πρακτικές και συστήνεται το όχημα χαρτογράφησης να ξεκινά την εργασία από τη γειτονική περιοχή του σταθμού βάσης. Η απόσταση *base-rover* δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 5-10 km για την ομαλή επαναφορά του συστήματος μετά από συνεχείς διακοπές του *GPS*, που μπορεί να συμβούν στο οδικό περιβάλλον. Ο *rover GPS* δέκτης τοποθετείται στην πλατφόρμα με την κεραία σταθερά στερεωμένη πάνω της και δίπλα τοποθετείται, εξίσου σταθερά, το *INS*.



Εικόνα 2.13 Ο σχηματισμός των δεκτών του συστήματος (Dorota A. et al., 2004)

Camera CCD pixel size	9 micron
Camera focal length	8.5 mm
Camera height above road surface	3 m
Image scale	$3/0.0085=461$
Ground pixel size at nadir (no tilt)	4.1 mm
Ground coverage along vehicle	2.68 m
Ground coverage across vehicle	2 m
Maximum speed without overlap at 10 FPS	$2.68/0.1=26.8$ m/s (96 km/h or 60 MPH)
Maximum speed to maintain 50% overlap	$26.8/2$ m/s (48 km/h or 30 MPH)

Εικόνα 2.14 Τα χαρακτηριστικά του δέκτη απεικόνισης (Dorota A. et al., 2004)

Ένας ειδικά διαμορφωμένος υπολογιστής, που αποτελεί το κεντρικό τμήμα του *GISS*, είναι εξοπλισμένος με ειδική διεπαφή για την επικοινωνία με το *INS* και με μία, υψηλής, ακριβείας κάρτα χρόνου, που συνδέεται με τη χρονική αναφορά του *GPS*, και επίσης, συνδέεται σειριακά με τον *rover GPS* δέκτη.

Η εκ των υστέρων επεξεργασία όλων αυτών των δεδομένων περιλαμβάνει τη μεταφορά τους σε ένα μόνο υπολογιστή και την εκτέλεση διάφορων βημάτων επεξεργασίας. Τα πρωτογενή δεδομένα *INS* υπόκεινται σε μετατροπή του format τους και συνδέονται με τη χρονική αναφορά του *GPS*. Κατά δεύτερο, οι ασάφειες των δεδομένων του *GPS* επιλύονται με τη βοήθεια κινηματικής επεξεργασίας (*kinematic GPS processing*) και τελικά τα δεδομένα *GPS* και *INS* επεξεργάζονται μαζί με τα αρχεία απεικόνισης, με τη βοήθεια ενός φίλτρου *Kalman*.

Μετά από πολυάριθμες δοκιμές και μετρήσεις, προέκυψε ότι το παραπάνω σύστημα, μπορεί να παρέχει **ακρίβεια θέσης** για την πλατφόρμα 2-4 cm, με έναν καλό σχηματισμό δορυφόρων *GPS* και ακρίβεια εντοπισμού οδικού άξονα 4-10 cm, ανάλογα με την ποιότητα του *GPS*, την ποιότητα των εικόνων και την ακρίβεια επεξεργασίας τους.

#### **2.3.4. Σύγκριση συστημάτων**

Το σύστημα *GISS* διαφέρει από τα κλασικά *MMS* συστήματα όπως είναι τα δύο πρώτα που περιγράφηκαν, στο ότι αποτελείται από μία κατακόρυφη, έγχρωμη, ψηφιακή φωτο-μηχανή υψηλής ανάλυσης και όχι από φωτο-μηχανές με οριζόντια ή πλάγια λήψη. Αυτή είναι βασική διαφορά και κάνει την επεξεργασία των εικόνων ευκολότερη. Ο δέκτης απεικόνισης είναι σχεδόν παράλληλος με την επιφάνεια του δρόμου και έτσι η κλίμακα της εικόνας μεταβάλλεται ελάχιστα και η κλίμακα κατά τη διάρκεια της πορείας του οχήματος είναι σχεδόν σταθερή. Έτσι, οι οντότητες που περιέχονται στις εικόνες είναι ευκολότερο να επεξεργαστούν.

Οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται με τα παραπάνω λειτουργούντα συστήματα, για το σύστημα *VISAT* και το *ARAN* είναι της τάξης του μισού μέτρου περίπου, ενώ για το σύστημα *GISS*, πολυάριθμα πειράματα έδειξαν ακρίβεια θέσης 4-7 cm, υπό κανονικές συνθήκες.



# 3

## ***ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΔΕΚΤΩΝ***

Το κεφάλαιο που ακολουθεί, εισάγει την έννοια της ενοποίησης δεδομένων πολλών δεκτών για χαρτογραφικές εφαρμογές, που γενικά εμπλέκει διαφορετικά μαθηματικά και φυσικά μοντέλα, ανάλογα με τους δέκτες που χρησιμοποιούνται. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα γενικευμένο μοντέλο γεωαναφοράς των δεδομένων των αισθητήρων χαρτογράφησης με τη χρήση δεδομένων *GPS/INS*.

### **3.1 Γενικά**

Η φωτογραμμετρία στην κλασική της μορφή, των βασισμένων σε φιλμ οπτικών αισθητήρων, έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη αποτύπωση υψηλής ακριβείας για όλες τις κλίμακες. Ακόμα και μετά τις μεγάλες μεταβολές στη φωτογραμμετρία, από την αναλογική στην αναλυτική και μετά στην ψηφιακή, τα φωτοσταθερά σημεία (*Ground Control Points - GCPs*) ήταν η μόνη πηγή για την παροχή αξιόπιστης πληροφορίας γεωαναφοράς. Έτσι, οι εξωτερικές πληροφορίες γεωαναφοράς χρησιμοποιήθηκαν ως βοηθητικά δεδομένα και για περιορισμό του αριθμού των φωτοσταθερών.

Το **μειονέκτημα** της έμμεσης γεωαναφοράς (*indirect georeferencing*) είναι το σημαντικό κόστος, που σχετίζεται με την ίδρυση των φωτοσταθερών (φ/σ) και την εκτέλεση διαδικασίας φωτοτριγωνισμού (για περιορισμό του αναγκαίου αριθμού φ/σ), που

σε πολλές περιπτώσεις είναι αποτρεπτικό, ιδίως όταν η απόκτηση και γεωαναφορά των εικόνων πραγματοποιείται σε απομακρυσμένες περιοχές.

Η χρήση βοηθητικών δεδομένων θέσης και προσανατολισμού (που προέρχονται π.χ. από δέκτες όπως *radar profile recorders-APR*, γυροσκόπια, στατοσκόπια) κατά τη διαδικασία της γεωαναφοράς, μελετήθηκε ευρέως τις τελευταίες δεκαετίες. Τα δεδομένα τέτοιων δεκτών χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των έξι παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού, είτε ολικώς είτε μερικώς και έτσι περιορίζεται η ανάγκη για ένα πυκνό δίκτυο φωτοσταθερών. Τα τελευταία χρόνια, όμως, η χρήση τέτοιων δεδομένων σχεδόν εξαφανίστηκε από τη φωτογραμμετρία και η κατάσταση άλλαξε ριζικά με την εισαγωγή των δεδομένων *GPS* σε διαδικασία φωτοτριγωνισμού με συνόρθωση κατά δέσμες.

Αρχικά, **η χρήση των δεδομένων *GPS*** κατέστησε τον αεροτριγωνισμό (επικαλυπτόμενων εικόνων) εντελώς ανεξάρτητο των φωτοσταθερών και για πρώτη φορά η διαδικασία της γεωαναφοράς έγινε αυτόνομη. Σε πολλές περιπτώσεις, όμως, η χρήση μόνο του *GPS* αποδεικνύεται ανεπαρκής (π.χ. σε αστικά κέντρα, όπου υπάρχει συχνή διακοπή του σήματος) και δε μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις ακρίβειας των εκάστοτε εφαρμογών.

Έτσι, σχετικά πρόσφατα, η απευθείας γεωαναφορά (*direct georeferencing*) κατέστη δυνατή με την ολοκλήρωση δεδομένων *GPS* και *INS* και ο εξωτερικός προσανατολισμός έγινε διαθέσιμος με ικανοποιητική ακρίβεια σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Με αυτό τον τρόπο, η γεωαναφορά φωτογραμμετρικών δεδομένων τοποθετήθηκε σε καινούρια βάση, απελευθερώθηκε από λειτουργικούς περιορισμούς και έτσι ξεκίνησε η εποχή των συστημάτων πολλών δεκτών (Naser El-Sheimy, 1996).

### **3.2 Γεωαναφορά εικόνων**

Τα συστήματα πολλών δεκτών αποτέλεσαν μία ανερχόμενη τάση στις χαρτογραφικές εφαρμογές και παραδείγματά τους συναντώνται στην τηλεπισκόπηση, στη βαρυτημετρία, στις σαρώσεις *laser* και στα Κινητά Συστήματα Χαρτογράφησης. Όλα αυτά τα συστήματα έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι, οι απαραίτητοι για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος δέκτες, βρίσκονται πάνω σε μία κοινή πλατφόρμα. Με τον ακριβή συγχρονισμό των δεδομένων, η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος είναι εφικτή με τη χρήση δεδομένων από μία μόνο ενοποιημένη διαδικασία μέτρησης. Αυτό οδηγεί σε

μεγαλύτερη εννοιολογική σαφήνεια, στη βελτιστοποίηση της ροής δεδομένων και, επίσης, σε πολλές περιπτώσεις, προσφέρει τη δυνατότητα για μία λύση σε πραγματικό χρόνο, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό για πολλές εφαρμογές.

Η τάση προς τα συστήματα πολλών δεκτών ενισχύεται από την απαίτηση για γρήγορη και οικονομικά αποδοτική απόκτηση δεδομένων και ενισχύεται από τις τεχνολογικές εξελίξεις που ικανοποιούν αυτή την απαίτηση. Δύο είναι οι ιδιαίτερα σημαντικές εξελίξεις:

- **Οι ψηφιακές απεικονίσεις (*digital imaging*).** Με τους αισθητήρες ψηφιακής απεικόνισης μειώνεται σημαντικά ο φόρτος της επεξεργασίας, με την απαλοιφή του σταδίου της ψηφιοποίησης και ανοίγεται ο δρόμος για νέους και ευέλικτους σχεδιασμούς της αλυσίδας της επεξεργασίας, με την ευρεία χρήση μαθηματικών εργαλείων λογισμικού.
- **Η ακριβής πλοήγηση (*precise navigation*).** Αναπτύχθηκε έτσι ώστε να είναι δυνατή η λύση του προβλήματος του εξωτερικού προσανατολισμού χωρίς τη χρήση φωτοσταθερών ή την εφαρμογή διαδικασιών φωτοτριγωνισμού με συνόρθωση δέσμης (Schwarz, 1984). Ο συνδυασμός δεδομένων πλοήγησης με τα δεδομένα απεικόνισης γίνεται εύκολα και οι εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο είναι θεωρητικά δυνατές, εφόσον τα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα σε ψηφιακή μορφή. Η λειτουργική ευελιξία ενισχύεται και το κόστος μειώνεται σημαντικά, ειδικά σε περιοχές που δεν υπάρχει καθόλου ή υπάρχει σε μικρό βαθμό, επίγειος έλεγχος.

Με τον συνδυασμό αυτών των δύο εξελίξεων, έρχεται στο προσκήνιο η έννοια της γεωαναφερμένης εικόνας, ως η βασική φωτογραμμετρική μονάδα. Έτσι, κάθε εικόνα σημειώνεται με τις παραμέτρους γεωαναφοράς της, δηλαδή τις τρεις παραμέτρους θέσης και τις τρεις παραμέτρους προσανατολισμού και μπορεί να συνδυαστεί με κάθε άλλη γεωαναφερμένη εικόνα της ίδιας σκηνής χρησιμοποιώντας γεωμετρικές δεσμεύσεις, όπως η επιπολική γεωμετρία ή η συνταύτιση στο χώρο του αντικειμένου (*object-space matching*). Αυτό, ποιοτικά, είναι ένα καινούριο βήμα, γιατί οι παράμετροι γεωαναφοράς για κάθε εικόνα αποκτώνται με άμεσο τρόπο με ανεξάρτητες μετρήσεις. Εννοιολογικά, αυτό διαφέρει από την αντίληψη ότι για την επίλυση του προβλήματος της γεωαναφοράς είναι απαραίτητα ένα μπλοκ συνδεδεμένων εικόνων και επαρκής αριθμός επίγειων φωτοσταθερών σημείων. Αντιθέτως, η απευθείας μέθοδος δεν απαιτεί πληροφορία

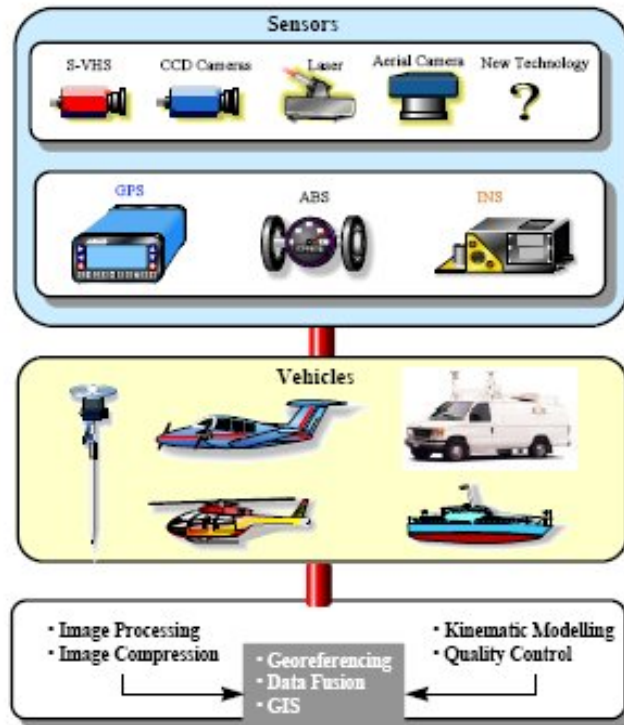
σύνδεσης ενός μπλοκ εικόνων, μεταξύ τους και με τον χώρο του αντικειμένου, για τη γεωαναφορά, και έτσι προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία.

### **3.3 Σχεδιασμός και ανάλυση συστημάτων πολλών δεκτών**

Ο σχεδιασμός και η ανάλυση συστημάτων πολλών δεκτών (*multi-sensor systems*) αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα (Schwarz, El-Sheimy, 1996):

- Απόκτηση δεδομένων (*Data acquisition*)
- Κινηματική μοντελοποίηση (*Kinematic Modeling*)
- Συγχρονισμός των δεκτών (*Synchronization*)
- Βαθμονόμηση (*Calibration*)
- Γεωαναφορά (*Georeferencing*)
- Ολοκλήρωση και συγχώνευση δεδομένων (*Integration and data fusion*)
- Έλεγχος ποιότητας (*Quality control*)
- Βελτιστοποίηση ροής δεδομένων και αυτοματοποίηση (*Data flow optimization and automation*)

Η επιλογή των δεκτών για ένα σύστημα εφαρμογών αποτύπωσης εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συστήματος, όπως είναι η ακρίβεια, η αξιοπιστία, η λειτουργική ευελιξία και το εύρος των εφαρμογών (βλ. Εικόνα 3.1).



**Εικόνα 3.1:** Ενοποίηση συστημάτων πολλών δεκτών για σκοπούς αποτύπωσης (Naser El-Sheimy, 1996)

Η μονάδα που αφορά στην **απόκτηση δεδομένων**, περιλαμβάνει δέκτες πλοήγησης (*navigation sensors*) και δέκτες απεικόνισης (*imaging sensors*). Οι δέκτες πλοήγησης χρησιμοποιούνται για τη λύση του προβλήματος της γεωαναφοράς. Παρόλο που για την πλοήγηση χρησιμοποιείται γενικά, ένας αριθμός διαφορετικών συστημάτων, οι σχετικά αυστηρές απαιτήσεις ακρίβειας, καθιστούν την ενοποίηση δεκτών *GPS* και *INS* ως τη βάση για κάθε συνδυασμό δεκτών σε ένα ακριβές Κινητό Σύστημα Χαρτογράφησης για εφαρμογές σε περιορισμένη έκταση. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός δεκτών είναι γενικά επαρκής και καθιστά περιττή τη χρήση πρόσθετων δεκτών για την αύξηση της αξιοπιστίας.

Οι δέκτες απεικόνισης διακρίνονται σε αυτούς που παρέχουν περιγραφική πληροφορία, όπως οι διαβαθμίσεις του γκρι, και γεωμετρική πληροφορία, όπως κατεύθυνση ή απόσταση μεταξύ κάμερας και αντικειμένου. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζεται η συνεισφορά των δεκτών που, συνήθως, χρησιμοποιούνται στα *MMS* για χαρτογραφικές εφαρμογές.

ΤΥΠΟΣ ΔΕΚΤΗ	ΕΙΔΟΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
Αναλογικές κάμερες	Περιγραφική/Γεωμετρική	Φωτογραφίες, υψηλή γεωμετρική ακρίβεια
Πολυφασματικοί γραμμικοί σαρωτές	Περιγραφική/Γεωμετρική	Πολυφασματικές εικόνες, γεωμετρική ακρίβεια που εξαρτάται από την ανάλυση του δέκτη
Ψηφιακές μηχανές	Περιγραφική/Γεωμετρική	Εικόνες, γεωμετρική ακρίβεια που εξαρτάται από την ανάλυση του δέκτη
Laser απεικόνιση	Περιγραφική/Γεωμετρική	Εικόνες και αποστάσεις μεταξύ αντικειμένου και δέκτη
Laser Profiles, Σαρωτές Laser	Περιγραφική/Γεωμετρική	Αποστάσεις μεταξύ αντικειμένου και δέκτη, γωνίες σάρωσης
GPS θέσης και προσανατολισμού	Γεωμετρική	Υψηλής ακρίβειας προσδιορισμός θέσης και μεσαίας ακρίβειας προσδιορισμός προσανατολισμού, παγκόσμια αναφορά
Αδρανειακοί δέκτες	Γεωμετρική	Χαμηλή προς υψηλή ακρίβεια σχετικής θέσης και προσανατολισμού
Οδόμετρα	Γεωμετρική	Αποστάσεις

**Πίνακας 3.1:** Παραδείγματα δεκτών που χρησιμοποιούνται σε χαρτογραφικές εφαρμογές

Η επιλεγμένη διάταξη δεκτών απαιτεί μία συγκεκριμένη ακολουθία επεξεργασίας των δεδομένων. Ένα τμήμα της επεξεργασίας, όπως είναι η συμπίεση δεδομένων εικόνας και η αρχική επεξεργασία ελέγχου ποιότητας για τα δεδομένα πλοήγησης πρέπει να πραγματοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο. Τα περισσότερα δεδομένα πάντως, αποθηκεύονται για μετέπειτα χρήση. Η ιεραρχία της επεξεργασίας των δεδομένων μετά την εκάστοτε αποστολή, καθορίζεται από το γεγονός ότι όλα τα δεδομένα αποτύπωσης πρέπει πρώτα να γεωαναφερθούν πριν χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία ενοποίησης.

Σε εφαρμογές αποτύπωσης, η σπουδαιότητα των φωτογραμμετρικών μεθόδων μεγαλώνει, εξαιτίας της χρήσης ψηφιακών μηχανών με αισθητήρες *CCD*. Οι αισθητήρες *CCD* κατάφεραν να ξεπεράσουν δύο βασικά μειονεκτήματα των βασισμένων σε φιλμ παραδοσιακών φωτογραφικών μηχανών: τις αναλογικές φωτογραφίες που παίρνονται με χαμηλή ταχύτητα (μία-μία / *single-frame*) και τον εξειδικευμένο εξοπλισμό σάρωσης. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία *CCD* χαρακτηρίζονται από την υψηλή ανάλυση, την έγχρωμη εικόνα, τη βελτιωμένη ραδιομετρική ποιότητα και την ταχεία μετατροπή από αναλογική σε ψηφιακή (*analogue-to digital conversion - ADC*).

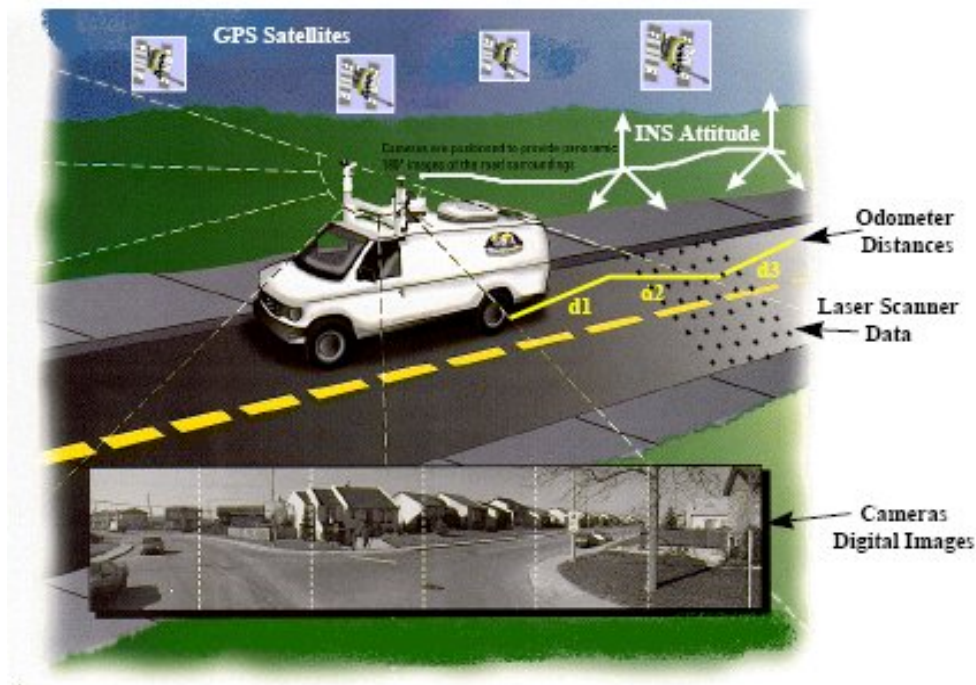
Για τον καθορισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων των αντικειμένων που είναι ορατά σε ψηφιακές εικόνες, απαιτούνται, για ένα ζεύγος εικόνων, οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού (οι τρεις παράμετροι της θέσης του προβολικού κέντρου της μηχανής τη στιγμή της έκθεσης και οι τρεις παράμετροι του προσανατολισμού της μηχανής) και οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού (εσωτερική γεωμετρία του αισθητήρα της μηχανής και παράμετροι της παραμόρφωσης των φακών).

Οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού καθορίζονται από ένα συνδυασμό *GPS* και *INS*, ενώ οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού με τη βοήθεια εργαστηριακής **βαθμονόμησης** ή βαθμονόμησης στο πεδίο. Με άλλα λόγια, ο εξωτερικός προσανατολισμός εξαρτάται από μία διαδικασία μέτρησης σε πραγματικό χρόνο και οι παράμετροί του μεταβάλλονται γρήγορα. Αντιθέτως, ο εσωτερικός προσανατολισμός αποκτάται μέσα από μια στατική διαδικασία βαθμονόμησης πεδίου και θεωρείται σταθερός για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, είναι δε δυνατό να πραγματοποιηθεί πριν ή μετά την εργασία και γενικά είναι ανεπηρέαστος από τη διαδικασία απόκτησης δεδομένων. Πιο αναλυτικά η βαθμονόμηση περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.

Η ακρίβεια της γεωαναφοράς εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία επιτυγχάνεται ο **συγχρονισμός** (*synchronization*) των διαφορετικών δεδομένων. Η ακρίβεια του συγχρονισμού εξαρτάται από την απαιτούμενη απόδοση του συστήματος και από την ταχύτητα του οχήματος χαρτογράφησης. Το *GPS*, ευτυχώς, παρέχει ένα καλώς ορισμένο χρονικό σήμα, στο οποίο μπορούν να εξαρτηθούν οι υπόλοιποι δέκτες, αλλά παρόλα αυτά ο συγχρονισμός των δεκτών δεν είναι μία ασήμαντη διαδικασία (βλ. Κεφ. 5).

Η **ολοκλήρωση** του συστήματος και η **συγχώνευση δεδομένων** περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα βήματα για την εξαγωγή του επιθυμητού αποτελέσματος από τις γεωαναφερμένες εικόνες. Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται το παράδειγμα ενός *MMS*, που χρησιμοποιεί ψηφιακές εικόνες και δεδομένα *laser* για την απεικόνιση και *GPS*, *INS*, και

ABS δεδομένα για την γεωαναφορά των δύο άλλων τύπων δεδομένων. Η συγχώνευση δεδομένων, γενικά, αναφέρεται στην συγχώνευση δεδομένων διαφορετικής φύσης (κλίμακα, γεωμετρία, ραδιομετρικά χαρακτηριστικά) και διαφορετικών πηγών με σκοπό την παροχή μιας ευέλικτης πηγής χαρτογραφικών εφαρμογών. Η ολοκλήρωση του συστήματος και η συγχώνευση δεδομένων συνδέονται στενά με τον έλεγχο ποιότητας και η αξιοπιστία και η οικονομία αποτελούν εξίσου σημαντικές θεωρήσεις σε ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα.



Εικόνα 3.2: Παράδειγμα συγχώνευσης δεδομένων σε εφαρμογές κοντινής απόστασης (Naser El-Sheimy, 1996)

**Ο έλεγχος ποιότητας**, συνήθως, αποτελείται από ένα τμήμα, που εκτυλίσσεται σε πραγματικό χρόνο (*real-time component*) και ένα τμήμα, που πραγματοποιείται μετά την συγκεκριμένη εργασία (*post-mission component*). Σε πραγματικό χρόνο, ενδιαφέρει το κατά πόσο μία συγκεκριμένη ομάδα δεδομένων επαρκεί για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ακρίβειας με ένα συγκεκριμένο επίπεδο πιθανότητας. Μετά την εργασία ενδιαφέρει το ποσοστό των μετρήσεων για τις οποίες έχει επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια. Αν τα αποτελέσματα της *real-time* πρόβλεψης διαφέρουν σημαντικά από την εκ των υστέρων ανάλυση, τότε το σύστημα χρειάζεται βελτίωση με τη λήψη νέων δεδομένων. Αυτό μπορεί να προκύψει από την ανάλυση μεγάλων ασυμφωνιών μεταξύ προβλέψεων



και τελικών αποτελεσμάτων. Έτσι, κάθε μοντέλο ελέγχου ποιότητας σε πραγματικό χρόνο συμπεριλαμβάνει ένα συγκεκριμένο ποσοστό εξειδικευμένης γνώσης (*expert knowledge*), που έχει προκύψει από την εκ των υστέρων ανάλυση. Ουσία του ελέγχου ποιότητας είναι ο συνδυασμός αυτής της εξειδικευμένης γνώσης με την ελάχιστη πληροφορία, για τη διαδικασία της μέτρησης και η επίτευξη αξιόπιστων προβλέψεων. Τέτοιες προβλέψεις συνήθως περιλαμβάνουν ένα αποδεκτό επίπεδο χαμηλής ποιότητας δεδομένων χωρίς να απαιτείται μεγάλος αριθμός επαναληπτικών εργασιών. Ο έλεγχος ποιότητας αναλύεται περαιτέρω στο κεφάλαιο 5.

**Η βελτιστοποίηση της ροής των δεδομένων και η αυτοματοποίηση**, βασίζεται στη χρήση γνωστών μαθηματικών μοντέλων και επεξεργασιών, αλλά η διαδικασία απόκτησης των αποτελεσμάτων είναι αρκετά αργή και απαιτεί, σε μεγάλο ποσοστό, ανθρώπινη παρέμβαση. Πρέπει να δοθεί έμφαση στην επιτάχυνση της διαδικασίας επίτευξης του επιθυμητού αποτελέσματος, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις απαραίτητες παραμέτρους ποιότητας, καθώς και στην αυτοματοποίηση όλων των διαδικασιών, που απαιτούν εξειδικευμένη γνώση και ανθρώπινη αλληλεπίδραση.

### **3.4 Κινηματική μοντελοποίηση (*Kinematic Modeling*)**

Η κινηματική μοντελοποίηση αναφέρεται στον προσδιορισμό της τροχιάς ενός στερεού σώματος από μετρήσεις που αναφέρονται σε κάποιο σύστημα συντεταγμένων. Έτσι, συνδυάζονται στοιχεία μοντελοποίησης, εκτίμησης και παρεμβολής. Η μοντελοποίηση συσχετίζει την παρατήρηση με την τροχιά. Η εκτίμηση χρησιμοποιεί πραγματικές παρατηρήσεις, για παράδειγμα προσθέτει μία διαδικασία σφάλματος στο μοντέλο και επιλύει το προκύπτον πρόβλημα εκτίμησης με τη βέλτιστη λύση. Η παρεμβολή συνδέει τα διακριτά σημεία, που προκύπτουν από τη διαδικασία της εκτίμησης και δημιουργεί την τροχιά διατυπώνοντας κάποια κατάλληλη συνθήκη εξομάλυνσης (Schwarz, 1993).

Ένα στερεό σώμα είναι ένα σώμα με πεπερασμένες διαστάσεις, που διατηρεί την ιδιότητα ότι οι σχετικές θέσεις όλων των σημείων, που ορίζονται σε ένα πλαίσιο συντεταγμένων μέσα στο σώμα, παραμένουν ίδιες ύστερα από περιστροφή και μετασχηματισμό. Η γενική κίνηση ενός στερεού σώματος στο χώρο περιγράφεται από έξι παραμέτρους, τρεις για τη θέση και τρεις για τον προσανατολισμό. **Το μοντέλο της**

**κίνησης του σώματος στον τρισδιάστατο χώρο**, μπορεί να περιγραφεί από μία εξίσωση της μορφής:

$$\boxed{r_i^m = r_b^m(t) + R_b^m(t) \cdot a^b} \quad (\text{Εξ. 3.4.1})$$

όπου

$r_i^m$  είναι οι συντεταγμένες του σημείου (i) στο m-σύστημα (*m-frame*),

$r_b^m(t)$  είναι οι συντεταγμένες του κέντρου της μάζας (b) του στερεού σώματος στο m-σύστημα, τη χρονική στιγμή (t),

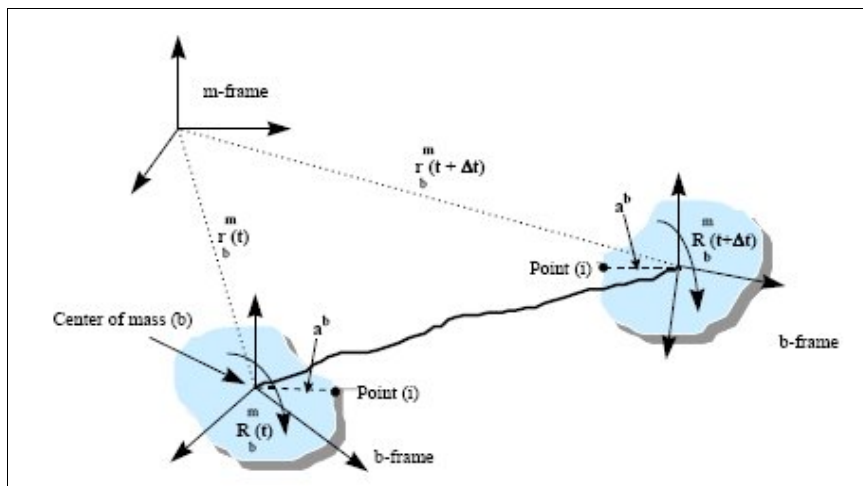
$R_b^m(t)$  είναι ο πίνακας στροφής μεταξύ του b-συστήματος (*b-frame*) και του m-συστήματος, τη χρονική στιγμή (t),

$a^b$  είναι η σταθερή απόσταση μεταξύ του σημείου (i) και του κέντρου της μάζας (b) του στερεού σώματος.

Το δεξί σκέλος της εξίσωσης 3.4.1 αποτελείται από ένα διάνυσμα μετασχηματισμού  $r_b^m(t)$  και μία συνιστώσα στροφής  $R_b^m(t) \cdot a^b$ . Το διάνυσμα  $a^b$  μπορεί να είναι οποιοδήποτε διάνυσμα σταθερό στο στερεό σώμα με την αρχή του στο κέντρο της μάζας του στερεού σώματος και η στροφή του αντιστοιχεί στη στροφή γύρω από το κέντρο της μάζας του στερεού σώματος.

Στο σχήμα 3.3 απεικονίζεται η βασική ιδέα, δηλαδή ότι το *b-σύστημα* είναι σταθερό στο σώμα και περιστρέφεται στο χρόνο ως προς το *m-σύστημα*, στο οποίο αναφέρεται το διάνυσμα μετασχηματισμού  $r_i^m$ . Το *m-σύστημα* είναι εξ ορισμού αυθαίρετο και επιλέγεται για την απλοποίηση της διατύπωσης του προβλήματος. Το *m-σύστημα* μπορεί να είναι ένα σύστημα γεωδαιτικών συντεταγμένων (γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος, ύψος), ένα σύστημα συντεταγμένων *UTM* ή *3TM* ή οποιοδήποτε άλλο σύστημα συντεταγμένων.

Τα γυροσκόπια, που περιλαμβάνονται στο *INS* του συστήματος, χρησιμεύουν στη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας  $\omega_{ib}^b$ , που περιγράφει τη στροφή του *b-συστήματος* ως προς το *i-σύστημα*. Το *i-σύστημα* είναι ένα καλά ορισμένο, με την Νευτώνια λογική, αδρανειακό σύστημα αναφοράς και έτσι μπορεί να θεωρηθεί μη επιταχυνόμενο και μη περιστρεφόμενο.



Εικόνα 3.3: Η μοντελοποίηση της κίνησης του στερεού σώματος στο χώρο (Naser El-Sheimy, 1996)

Τα επιταχυνσιόμετρα, που επίσης περιλαμβάνονται στο INS, χρησιμεύουν στη μέτρηση της ειδικής ισχύος (*specific force*)  $f^b$  στο  $b$ -σύστημα. Η πρώτη ομάδα μετρήσεων, οι γωνιακές ταχύτητες, ολοκληρώνονται ως προς το χρόνο και παρέχουν τις μεταβολές του προσανατολισμού του σώματος ως προς τον αρχικό του προσανατολισμό. Η δεύτερη ομάδα μετρήσεων, οι μετρήσεις των  $f^b$ , χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της επιτάχυνσης του σώματος, που, μετά από διπλή ολοκλήρωση ως προς το χρόνο, δίνουν διαφορές αποστάσεων ως προς μία αρχική θέση. Η ειδική ισχύς και η γωνιακή ταχύτητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον καθορισμό της τροχιάς με την επίλυση του ακόλουθου συστήματος διαφορικών εξισώσεων (Schwarz -Wei, 1990b):

$$\begin{pmatrix} \dot{r}^m \\ \dot{v}^m \\ \dot{R}_b^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D^{-1}v^m \\ R_b^m f^b - (2\Omega_{ie}^m + \Omega_{em}^m)v^m + g^m \\ R_b^m (\Omega_{ib}^b + \Omega_{im}^b) \end{pmatrix} \quad (\text{Εξ. 3.4.2})$$

Για την επίλυση του συστήματος είναι απαραίτητες οι παρατηρήσεις  $f^b$  και  $\omega_{ib}^b$ , όπως και ο πίνακας  $D^{-1}$ , το διάνυσμα βαρύτητας  $g^m$ , η στροφή της γης  $\omega_{ie}^m$  και οι παράμετροι του ελλειψοειδούς αναφοράς. Το διάνυσμα βαρύτητας φυσιολογικά προσεγγίζεται από το σύνηθες πεδίο βαρύτητας, ενώ η στροφή της γης θεωρείται γνωστή με ικανοποιητική ακρίβεια και ο πίνακας  $D^{-1}$  αποκτάται στη διαδικασία ολοκλήρωσης με τη χρήση του ελλειψοειδούς αναφοράς.

Το **GPS** είναι ένα άλλο σύστημα μέτρησης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον καθορισμό της τροχιάς. Σε αυτή την περίπτωση, τα παράγωγα του συστήματος είναι αποστάσεις μεταξύ δέκτη και δορυφόρου, προερχόμενα από τα δεδομένα της φέρουσας φάσης. Τα μοντέλα, που σχετίζουν τη θέση και τη ταχύτητα με τις μετρήσεις είναι γνωστά (Wells, 1986 και Lachapelle, 1995). Σε κατάσταση λειτουργίας μόνο του *GPS*, χρησιμοποιείται ένα σύστημα με πολλές κεραίες για τον καθορισμό θέσης και προσανατολισμού. Όπως και στην περίπτωση του *INS*, η εξίσωση της τροχιάς για την περίπτωση του *GPS* μπορεί να γραφεί ως:

$$\begin{pmatrix} \dot{j}^m \\ \dot{v}^m \\ \dot{R}_b^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v^m \\ 0 \\ R_b^m \Omega_{mb}^b \end{pmatrix} \quad (\text{Εξ. 3.4.3})$$

Ο συνδυασμός αυτών των δύο μετρητικών συστημάτων, επομένως, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Στην απουσία ακέραιων κύκλων, η εξαιρετική ακρίβεια θέσης του διαφορικού GPS, μπορεί να χρησιμεύσει στις συχνές ενημερώσεις του αδρανειακού συστήματος. Η πληροφορία προσανατολισμού των δεκτών του αδρανειακού και η ακριβής θέση και ταχύτητα μπορούν να χρησιμεύσουν στην ανίχνευση και διόρθωση ολίσθησης ακέραιων κύκλων. Γενικά, το γεγονός ότι υπάρχουν διαθέσιμες ενδιά ανεξάρτητες μετρήσεις για τον καθορισμό των έξι απαραίτητων παραμέτρων τροχιάς, αυξάνει σημαντικά την αξιοπιστία του συστήματος.

Για τον καταλληλότερο συνδυασμό της πλεονάζουσας πληροφορίας, χρησιμοποιείται η ιδέα του φίλτρου *Kalman*, με το οποίο το αδρανειακό διάνυσμα κατάστασης ενημερώνεται συχνά από μετρήσεις *GPS*. Ενώ είναι σημαντικά τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης σε επίπεδο ακεραιότητας δεδομένων και ταχύτητας, αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία σε επίπεδο προγραμματισμού και επίλυσης. Αναλυτικά το φίλτρο *Kalman* παρουσιάζεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

### 3.5 Επίλυση με τη βοήθεια του φίλτρου *Kalman*

Ο αλγόριθμος με το φίλτρο του *Kalman*, που συνήθως χρησιμοποιείται για την κοινή επεξεργασία των δεδομένων των δύο συστημάτων *GPS* και *INS*, είναι αρκετά ευέλικτος και προσφέρει ένα κατάλληλο μοντέλο για τον έλεγχο των σφαλμάτων. Τα

βασικά δεδομένα που έρχονται στην αδρανειακή μονάδα είναι ψευδοαποστάσεις ή μετρήσεις φάσεως από το GPS.

Στην αδρανειακή μονάδα σχεδιάζεται και εφαρμόζεται ένα κατάλληλο φίλτρο Kalman, που ελέγχει τα σφάλματα ανά πάσα στιγμή και με τις εξισώσεις ενημέρωσης και πρόβλεψης μπορεί να δώσει το διάνυσμα θέσης του "υβριδικού" συστήματος τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Ταυτόχρονα το αδρανειακό σύστημα μπορεί να δώσει τις γωνίες στροφής του συστήματος (ως προς το σύστημα αναφοράς) και την ταχύτητα σε μία συνεχή μορφή και σε πολύ πυκνά διαστήματα. Για όλα αυτά είναι απαραίτητα ως επιπλέον δεδομένα οι επιταχύνσεις και ο προσανατολισμός της αδρανειακής μονάδας.

Το **πλεονέκτημα** αυτής της μεθόδου είναι ότι παρέχει ένα αποτέλεσμα σε πραγματικό χρόνο, που επιτρέπει στον χρήστη να αποκτήσει μία πρώτη ιδέα για την ποιότητα της λύσης κατά τη διάρκεια της εργασίας και επίσης επιτυγχάνει μία περιοδικά επαναλαμβανόμενη εκτίμηση των παραμέτρων ενδιαφέροντος.

Έστω ότι  $x_k$  είναι η κατάσταση του  $m$ -διάστατου συστήματος τη χρονική στιγμή  $k$ . Αυτό είναι το διάνυσμα των παραμέτρων που υποτίθεται ότι περιγράφουν πλήρως το σύστημα. Θεωρείται ότι αυτό το σύστημα είναι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο διακριτό δυναμικό σύστημα, που εξελίσσεται στο χρόνο μέσω ενός γραμμικού μοντέλου του τύπου:

$$x_k = F_{k,k-1} x_{k-1} + \varepsilon_k \quad (\text{Εξ. 3.5.1})$$

$F_{k,k-1}$  είναι ο πίνακας μετάβασης από τη χρονική στιγμή  $k-1$  στην  $k$  και  $\varepsilon_k$  είναι ο θόρυβος, που συνυπολογίζει τα σφάλματα του μοντέλου και τις μη στοχαστικές συνιστώσες, που επηρεάζουν την εξέλιξη του συστήματος. Τέτοιο σφάλμα πληροί τη μηδενική υπόθεση, ακολουθεί κανονική κατανομή, είναι χρονικά ανεξάρτητο και έχει γνωστό πίνακα συμμεταβλητοτήτων  $C_{\varepsilon\varepsilon}$ , οπότε:

$$E[\varepsilon_k] = 0 \quad \forall k$$

$$C_{\varepsilon_k \varepsilon_j} = \delta_{kj} \Sigma_k^\varepsilon$$

Η εξίσωση (3.5.1) είναι η **εξίσωση σταθερής κατάστασης** και αντιπροσωπεύει το μαθηματικό μοντέλο.

Είναι απαραίτητο να οριστούν αρχικές τιμές στην κατάσταση του συστήματος, ορίζοντας  $x_{k=0} = x_0$ , με την υπόθεση ότι το  $x_0$  ακολουθεί κανονική κατανομή και είναι ασυσχέτιστο με το  $\varepsilon$ :  $x_0 \sim N(\mu_0, C_0)$

$$C_{x_0 \varepsilon_k} = 0$$

Έστω ότι  $y_1, y_2, \dots, y_{nk}$  είναι οι  $n_k$  μετρήσεις, που σχετίζονται με γραμμική σχέση με κάποιες από τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν το δυναμικό σύστημα:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{A}_{k,k-1} \mathbf{x}_k + \mathbf{e}_k \quad (\text{Εξ. 3.5.2})$$

Ο  $\mathbf{A}_{k,k-1}$  είναι ο πίνακας σχεδιασμού,  $\mathbf{e}_k$  είναι το σφάλμα μέτρησης που πληρεί τη μηδενική υπόθεση, ακολουθεί Gaussian κατανομή και έχει γνωστό πίνακα συμμεταβλητοτήτων  $C_{ee}$ . Αυτή είναι η **εξίσωση των μετρήσεων**.

Το φίλτρο *Kalman* επιτρέπει τον καθορισμό της βέλτιστης γραμμικής εκτίμησης της κατάστασης του συστήματος  $\mathbf{x}_k \forall k$ , μέσω μίας διαδικασίας δύο βημάτων: του **φιλτραρίσματος** (*filtering*) *Kalman*, για αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο και της **εξομάλυνσης** (*smoothing*) *Kalman*, που ακολουθεί, και συνήθως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που η επεξεργασία γίνεται μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων, όπως οι *mobile mapping* αποτυπώσεις.

Το πρώτο βήμα αποτελείται από δύο στάδια: την **πρόβλεψη** (*prediction*) και την **ενημέρωση** (*update*). Η πρόβλεψη παρέχει την εκτιμώμενη τιμή των παραμέτρων τη χρονική στιγμή  $k$ , με δεδομένες τις τιμές τους τη χρονική στιγμή  $k-1$  και την ακρίβειά τους:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} &= F_{k,k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1/k-1} \\ C_{k/k-1} &= F_{k,k-1} C_{k-1/k-1} F_{k,k-1}^T + C_{e,k} \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 3.5.3})$$

Ενώ οι εξισώσεις ενημέρωσης δίνουν την εκτιμώμενη τιμή της κατάστασης τη χρονική στιγμή  $k$ , με δεδομένες τις μετρήσεις την ίδια χρονική στιγμή:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k/k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + K_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{A}_{k,k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}) \\ C_{k/k} &= (I - K_k \mathbf{A}_k) C_{k/k-1}, \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 3.5.4})$$

όπου  $K_k$  είναι ο πίνακας κέρδους:

$$K_k = C_{k/k-1} \mathbf{A}_{k,k-1} (\mathbf{A}_{k,k-1} C_{k/k-1} \mathbf{A}_{k,k-1}^T + C_{e,k})^{-1}$$

Το **στάδιο της εξομάλυνσης** επιτρέπει τον καθορισμό της βέλτιστης γραμμικής εκτίμησης της κατάστασης του συστήματος τη χρονική στιγμή  $k$ , λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τις μετρήσεις που αποκτώνται μέχρι αυτή την χρονική στιγμή, αλλά επίσης και εκείνες που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των διαδοχικών στιγμών  $k+1, k+2, \dots, T$ , όπου  $T$  είναι η τελευταία χρονική στιγμή (περίοδος) της εργασίας. Αυτή η διαδικασία εκτελείται αντίστροφα: αρχίζοντας από την τελευταία περίοδο των μετρήσεων και ενημερώνοντας

διαδοχικά όλες τις εκτιμήσεις κατάστασης, από την περίοδο  $T-1$  μέχρι την αρχική στιγμή. Οι σχετικές σχέσεις είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} B_k &= C_{k/k} F_k^T + C_{k+1/k}^{-1} \\ \hat{x}_{k/T} &= \hat{x}_{k/k} + B_k (\hat{x}_{k+1/T} - \hat{x}_{k+1/k}) \\ C_{k/T} &= C_{k/k} + B_k (C_{k+1/T} - C_{k+1/k}) B_k^T \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 3.5.5})$$

Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει το  $\hat{x}_{k/T}$  και ο πίνακας συμμεταβλητοτήτων του  $C_{k/T} \forall k$ .

Αυτοί οι εκτιμητές (*estimators*) του φίλτρου *Kalman* είναι βέλτιστοι (σύμφωνα με τη λογική Wiener –Kolmogorov), έχουν ελάχιστη μεταβλητότητα και κανονική κατανομή. Το βέλτιστο της υπόθεσης, βέβαια, ικανοποιείται εφόσον οι υποθέσεις των μαθηματικών και στατιστικών μοντέλων του φίλτρου είναι σωστές. Αλλά αυτό δεν συμβαίνει πάντα, για παράδειγμα όταν για το πραγματικό σύστημα πλοήγησης εισάγεται μοντέλο μειωμένης τάξης. Για την εξασφάλιση της σταθερότητας του φίλτρου *Kalman*, απαιτείται η εφαρμογή συνθηκών παρατήρησης και ελέγχου.

Γενικά, για τη μοντελοποίηση των σφαλμάτων του *INS* και του *GPS* χρησιμοποιείται ένα διάνυσμα κανονικής κατάστασης. Με αυτό τον τρόπο, οι μετρήσεις *INS* χρησιμεύουν στον καθορισμό της πορείας αναφοράς και οι μετρήσεις *GPS* στην ενημέρωση της επίλυσης και την εκτίμηση των συνιστωσών του διανύσματος κατάστασης. Τα δύο φίλτρα τρέχουν ταυτόχρονα και αλληλεπιδρούν μόνο περιστασιακά. Τα δεδομένα *GPS* φιλτράρονται κατά *Kalman* για την απόκτηση εκτιμήσεων της θέσης και της ταχύτητας, που χρησιμοποιούνται μετά ως ψευδο-παρατηρήσεις για την ενημέρωση του *INS*. Την ίδια χρονική στιγμή τα δεδομένα *GPS* ελέγχονται συνεχώς για ολισθήσεις κύκλων.

Οι παραπάνω διαδικασίες εκτελούνται μέσω εξειδικευμένου λογισμικού και τελικά τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της γεωαναφοράς.

### 3.6 Ενιαία προσέγγιση της γεωαναφοράς δεδομένων πολλών δεκτών με τη χρήση GPS/INS

Η ενοποίηση δεδομένων πολλών δεκτών απαιτεί ένα ενιαίο μοντέλο για τη γεωαναφορά τους, με την έννοια ότι το μοντέλο μπορεί να προσαρμοστεί στα περισσότερα - αν όχι σε όλα - δεδομένα δεκτών χωρίς την ανάγκη υπολογισμού διαφορετικών

παραμέτρων για κάθε δέκτη. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι ιδιαίτερης σημασίας για τη συγχώνευση δεδομένων διαφορετικών δεκτών.

Η γεωαναφορά των εικόνων μπορεί να οριστεί ως το πρόβλημα μετασχηματισμού του διάνυσματος τρισδιάστατων συντεταγμένων  $r^c$ , του συστήματος της κάμερας ( $c$ -σύστημα ή  $c$ -frame), στο διάνυσμα τρισδιάστατων συντεταγμένων  $r^m$ , του συστήματος αποτύπωσης ( $m$ -σύστημα ή  $m$ -frame) στο οποίο ζητούνται τα αποτελέσματα. Το  $m$ -σύστημα, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να είναι ένα σύστημα γεωδαιτικών συντεταγμένων.

Η θέση και ο προσανατολισμός του συστήματος συντεταγμένων ( $c$ -σύστημα) της κάμερας, μεταβάλλεται ως προς το  $m$ -σύστημα. Η γεωαναφορά είναι δυνατή αν για κάθε χρονική στιγμή ( $t$ ), η θέση των προβολικών κέντρων ( $p.c$ ) της κάμερας στο  $m$ -σύστημα ( $r_{pc}^m(t)$ ) και ο πίνακας στροφής μεταξύ του  $c$ -συστήματος και του  $m$ -συστήματος, είναι γνωστά. Η εξίσωση γεωαναφοράς, μπορεί, τότε, να γραφεί για κάθε σημείο ( $i$ ) ως:

$$\boxed{r_i^m = r_{pc}^m(t) + s^i \cdot R_c^m(t) \cdot r^c} \quad (\text{Εξ. 3.6.1})$$

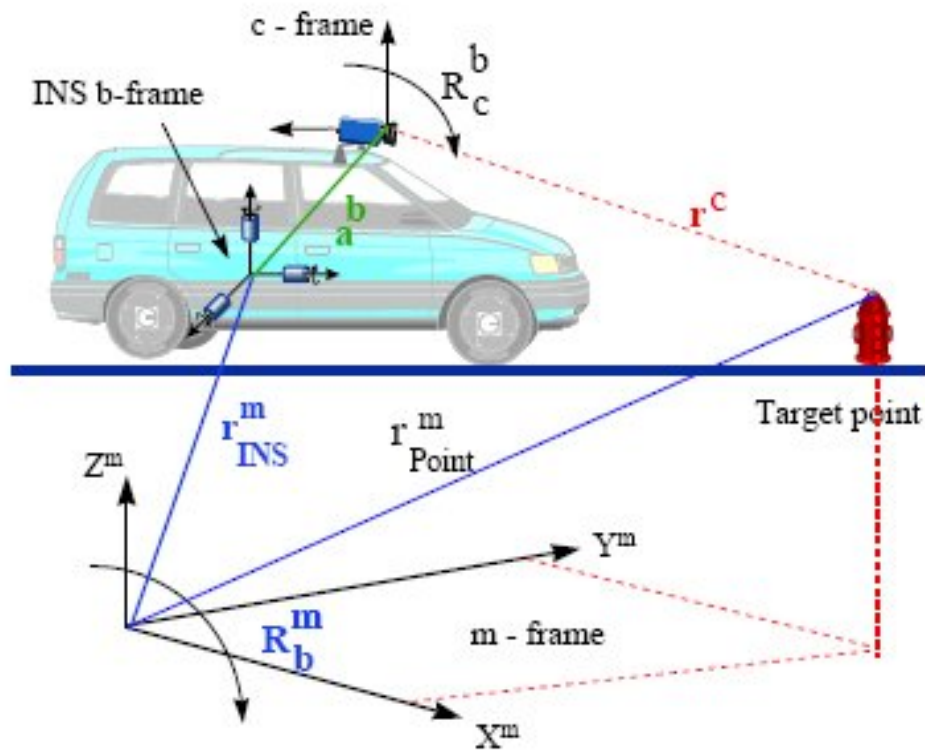
όπου

- $r_i^m$  είναι το διάνυσμα θέσης του αντικειμένου ( $i$ ) στο επιλεγμένο σύστημα αποτύπωσης
- $r_{pc}^m$  είναι το διάνυσμα συντεταγμένων, από την αρχή του συστήματος αποτύπωσης στο κέντρο του αισθητήρα θέσης (*position sensor*), πάνω στο κινούμενο όχημα
- $R_c^m$  είναι ο τρισδιάστατος πίνακας μετασχηματισμού, που στρέφει το  $c$ -σύστημα στο  $m$ -σύστημα
- ( $t$ ) είναι η χρονική στιγμή (περίοδος) των μετρήσεων, δηλαδή η χρονική στιγμή της λήψης των εικόνων
- $r^c$  είναι το διάνυσμα των συντεταγμένων της εικόνας στο  $c$ -σύστημα
- $s^i$  είναι ένας συντελεστής κλίμακας, που συσχετίζει τις συντεταγμένες της εικόνας με τις συντεταγμένες του αντικειμένου.

Η εξίσωση 3.6.1 είναι, πάντως, η πρώτη προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης και υπονοεί ότι οι συντεταγμένες του προβολικού κέντρου της κάμερας μπορούν να υπολογιστούν άμεσα. Αυτό, όμως, δεν συμβαίνει συνήθως, καθώς οι δέκτες πλοήγησης -



κεραία *GPS* /κέντρο *INS* - δεν μπορούν να μοιραστούν την ίδια θέση στο χώρο με τους δέκτες απεικόνισης και, επομένως, χρειάζεται ο συνυπολογισμός μικρών μετασχηματισμών και στροφών μεταξύ των διαφορετικών κέντρων. Η πραγματική κατάσταση για την περίπτωση επίγειων εφαρμογών απεικονίζεται στην εικόνα 3.4. Θεωρείται ότι η φωτομηχανή και η κεραία *GPS*, βρίσκονται στην οροφή του οχήματος και η αδρανειακή μονάδα μέτρησης (*IMU*) βρίσκεται στο εσωτερικό του, κοντά στη μηχανή. Σε αυτή την περίπτωση, η θέση και η συμπεριφορά του οχήματος καθορίζονται από το κέντρο του *INS* και από τους εσωτερικούς άξονες της αδρανειακή μονάδας μέτρησης (*b*-σύστημα).



Εικόνα 3.4: Αναλυτικό διάγραμμα των συνιστωσών της γεωαναφοράς

Αν το διάνυσμα μεταξύ της αρχής του κορμού του συστήματος *INS* (*b*-σύστημα) και της κάμερας δίνεται στο *b*-σύστημα ως  $a^b$ , τότε το διάνυσμα  $r_{pc}^m$  μπορεί να γραφεί ως:

$$r_{pc}^m(t) = r_{INS}^m(t) + R_b^m(t) \cdot a^b \quad (\text{Εξ. 3.6.2})$$

όπου

$r_{INS}^m(t)$  είναι το διάνυσμα των συντεταγμένων INS στο  $m$ -σύστημα τη χρονική στιγμή (t), μετά από παρεμβολή, και

$a^b$  είναι το σταθερό διάνυσμα μεταξύ του προβολικού κέντρου της κάμερας και του κέντρου του  $b$ -συστήματος του INS, που συνήθως υπολογίζεται εκ των προτέρων, μέσω της βαθμονόμησης

Η θέση  $r_{INS}^m$  του INS προκύπτει από την ενοποίηση INS/GPS. Στην περίπτωση συνεχούς απώλειας σήματος του GPS, το INS χρησιμοποιείται σε λειτουργία *stand-alone* για την επιμήκυνση της εργασίας.

Εκτός από τους μετασχηματισμούς μεταξύ των δεκτών, πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι στροφές μεταξύ σκηνών (*frames*) διαφορετικών δεκτών. Το  $b$ -σύστημα του INS δεν μπορεί να ευθυγραμμιστεί με το  $c$ -σύστημα της μηχανής και η σταθερή στροφή  $R_c^b$  μεταξύ δύο σκηνών αποκτάται και πάλι με βαθμονόμηση. Σε αυτή την περίπτωση, ο πίνακας  $R_c^m(t)$  γράφεται ως:

$$R_c^m(t) = R_b^m(t) R_c^b(t) \quad (\text{Εξ. 3.6.3})$$

Από το συνδυασμό των εξισώσεων 3.6.2, 3.6.3 και 3.6.1, ο τελικός τύπος της γεωαναφοράς μπορεί να γραφεί ως:

$$r_i^m = r_{INS/GPS}^m(t) + R_b^m(t) \cdot [s^i R_c^b r^c + a^b] \quad (\text{Εξ. 3.6.4})$$

όπου:

ο πίνακας  $R_c^b$  μετασχηματίζει το διάνυσμα  $r^c$  από το  $c$ -σύστημα στο  $b$ -σύστημα και

ο πίνακας  $R_b^m(t)$  μετασχηματίζει το διάνυσμα  $[s^i R_c^b r^c + a^b]$  από το  $b$ -σύστημα στο  $m$ -σύστημα της αποτύπωσης (Schwarz, 1993b και El Sheimy-Schwarz, 1994).

Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι διάφορες μεταβλητές της εξίσωσης 3.6.4 και ο τρόπος που, συνήθως, αποκτώνται. Πρέπει να σημειωθεί ότι το διάνυσμα  $r_{INS/GPS}^m(t)$  και ο πίνακας στροφής  $R_b^m(t)$  είναι χρονικά μεταβαλλόμενες μεταβλητές, ενώ τα διανύσματα  $r^c$  και  $a^b$  και ο πίνακας  $R_c^b$  δεν είναι. Αυτό σημαίνει, εμμέσως, ότι η δυναμική των στροφών και των μετασχηματισμών συντεταγμένων στις θέσεις των τριών δεκτών είναι αμετάβλητη

και ότι η αρχή του συστήματος συντεταγμένων και ο προσανατολισμός μεταξύ των τριών συστημάτων δεκτών μπορεί να θεωρηθούν σταθερά κατά τη διάρκεια της εργασίας. Αυτές οι υποθέσεις είναι βάσιμες στις περισσότερες περιπτώσεις αλλά δεν ισχύουν πάντα.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ	ΤΡΟΠΟΣ ΑΠΟΚΤΗΣΗΣ
$r_i^m$	Άγνωστη μεταβλητή
$r_{INS/GPS}^m(t)$	Παρεμβολή από τις θέσεις <i>INS/GPS</i> τη χρονική στιγμή της έκθεσης
$R_b^m(t)$	Παρεμβολή από τα εξαγόμενα των γυροσκοπίων τη χρονική στιγμή της έκθεσης
$s^i$	Προσδιορίζεται μέσω σαρώσεων με laser ή από εξαγωγή DTM
$R_c^b$	Μέσω διαδικασίας βαθμονόμησης
$r^c$	Μετρήσεις εικονοσυντεταγμένων
$a^b$	Μέσω διαδικασίας βαθμονόμησης

Πίνακας 3.2: Οι μεταβλητές της εξίσωσης γεωαναφοράς

### 3.7 Βελτιστοποίηση ροής δεδομένων και αυτοματοποίηση

Οι απαιτήσεις του χρήστη, που περιλαμβάνουν τον τύπο της χαρτογράφησης, την ακρίβεια, την αξιοπιστία, την παρουσίαση των αποτελεσμάτων (π.χ. χάρτες, εκθέσεις, ψηφιακά προϊόντα) κλπ., καθορίζουν την πορεία της εκάστοτε εργασίας χαρτογράφησης ανάλογα με παραμέτρους όπως είναι η διαθεσιμότητα δορυφόρων, η διεύθυνση του ήλιου, ο τύπος του δρόμου, η δεντροκάλυψη, τα κτίρια, τα όρια ταχύτητας, η πυκνότητα της κυκλοφορίας, η έκταση της εργασίας και το χρονοδιάγραμμα. Για τη διευκόλυνση του σχεδιασμού μιας εύκολα προσβάσιμης βάσης δεδομένων, η πορεία της χαρτογράφησης χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα, που ακολουθούν τα ίχνη του δρόμου ή άλλα ευδιάκριτα χαρακτηριστικά. Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης αυτών των παραγόντων εκφράζεται μέσα από ένα αρχείο, που καθορίζει την πορεία της εργασίας και τους λειτουργικούς περιορισμούς (Schwarz και El-Sheimy, 1996).

Το αρχείο αυτό χρησιμοποιείται για την αυτοματοποίηση, κατά το δυνατόν, του σταδίου της απόκτησης δεδομένων. Έτσι, ο οδηγός καθοδηγείται σε συγκεκριμένες

διαδρομές, που βασίζονται σε πληροφορίες αξιμούθιου και απόστασης που περιέχονται στο αρχείο. Οι φωτομηχανές ανοιγοκλείνουν αυτόματα ανάλογα με την πληροφορία του αρχείου και προειδοποιητικά μηνύματα διασφαλίζουν την απαιτούμενη ακρίβεια για τα συλλεχθέντα δεδομένα. Κρίσιμες πληροφορίες, όπως η διάταξη της φωτομηχανής που είναι σε λειτουργία, ο αριθμός των δορυφόρων που εντοπίζονται, το αξιμούθιο και η απόσταση μέχρι το επόμενο προγραμματισμένο σημείο, εμφανίζονται μέσω της μονάδας ελέγχου πλοήγησης. Αυτές οι πληροφορίες παρέχονται σε κρίσιμες καταστάσεις, όπως είναι προειδοποιήσεις ή αλλαγές πορείας, με ηχογραφημένα μηνύματα.

Οι εικόνες συμπιέζονται και φορτώνονται με κατάλληλη κωδικοποίηση, που επιτρέπει την εύκολη αναγνώριση όλων των εικόνων της ίδιας περιοχής που λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, ενώ τα δεδομένα πλοήγησης φορτώνονται, αφού περάσουν τον έλεγχο ποιότητας σε πραγματικό χρόνο. Μετά την εργασία γίνεται επεξεργασία των δεδομένων GPS/INS και αφού περάσουν τον έλεγχο ποιότητας μετά από τη βασική επεξεργασία, χρησιμοποιούνται στη γεωαναφορά των εικονιστικών δεδομένων. Τα δεδομένα, που δεν περνούν τον έλεγχο ποιότητας, υποβάλλονται απευθείας σε ένα πιο λεπτομερές δεύτερο στάδιο επεξεργασίας. Σε αυτή την πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία, τυπικά προβλήματα, όπως αυτά που προκαλούνται από την έλλειψη σήματος, επιλύονται αυτόματα. Μετά από αυτό το στάδιο, το μεγαλύτερο ποσοστό δεδομένων, πρέπει να είναι διαθέσιμα για γεωαναφορά. Τα δεδομένα που δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις ελέγχου ποιότητας, είτε δεν χρησιμοποιούνται στη διαδικασία γεωαναφοράς είτε υποβάλλονται σε διερεύνηση, ώστε να αποφασιστεί αν η περαιτέρω επεξεργασία πρόκειται να αποφέρει μεγαλύτερα ποσοστά αξιοποιήσιμων δεδομένων.

Μετά τη γεωαναφορά και την αποθήκευση, οι εικόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του προϊόντος που ζητείται από τον εκάστοτε χρήστη. Για τη διαχείριση τεράστιου όγκου δεδομένων και την κάλυψη ενός μεγάλου πεδίου διαφορετικών εφαρμογών, είναι απολύτως απαραίτητη η ύπαρξη ενός δομημένου συστήματος διαχείρισης βάσεων δεδομένων *DBMS* καθώς και προγραμμάτων γενικής χρήσης για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Για πολλές εφαρμογές η αυτοματοποίηση της διαδικασίας, όπως είναι η αυτόματη μέτρηση σημείων με τη χρήση επιπολικών γραμμών ή η αυτόματη αναγνώριση και μέτρηση καλώς ορισμένων, γεωμετρικά, αντικειμένων είναι απολύτως επιθυμητή.

Πολλές από αυτές τις εξελίξεις είναι σε αρχικά στάδια και θα συνεισφέρουν σημαντικά στην ποιότητα των προϊόντων που αναμένονται από τα Κινητά Συστήματα Χαρτογράφησης.

# 4

## ***ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ***

Απαραίτητη προϋπόθεση για τον ακριβή τρισδιάστατο προσδιορισμό θέσης είναι η ακριβής βαθμονόμηση όλων των δεκτών. Η βαθμονόμηση του συστήματος περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των αποκλίσεων των επιταχυνσιόμετρων και των κινήσεων του γυροσκοπίου του αδρανειακού συστήματος, όπως και των παραμέτρων που καθορίζουν την εσωτερική γεωμετρία της μηχανής. Αυτή η διαδικασία απαιτεί ειδικό σχεδιασμό, καλά κατανοημένα και με ακρίβεια προσδιορισμένα φωτοσταθερά σημεία, και πρέπει να εκτελείται περιοδικά ή όποτε μεταβάλλεται η σχέση μεταξύ των δεκτών.

Επίσης, πρέπει να προσδιοριστούν η σχετική θέση και ο προσανατολισμός μεταξύ της ομάδας των φωτομηχανών και των δεκτών πλοήγησης (*GPS και INS*), που συνολικά ονομάζονται παράμετροι προσανατολισμού του διανύσματος εκκεντρότητας και χρησιμοποιούνται στο μετασχηματισμό των δισδιάστατων εικονοσυντεταγμένων σε τρισδιάστατες γεωδαιτικές συντεταγμένες, μέσα από τη διαδικασία της γεωαναφοράς. Η βαθμονόμηση του συστήματος, λοιπόν, περιλαμβάνει:

- τη βαθμονόμηση των δεκτών και
- τη βαθμονόμηση του διανύσματος εκκεντρότητας.

### **4.1 Βαθμονόμηση φωτομηχανής**

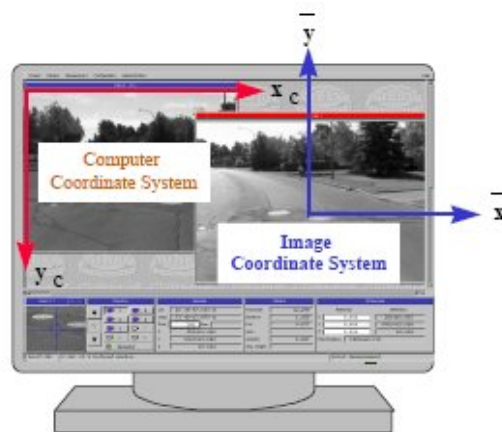
Η βαθμονόμηση φωτομηχανής είναι μία τυπική διαδικασία, που πρέπει να εκτελείται πριν τη χρήση οποιασδήποτε μετρικής ή ερασιτεχνικής (αναλογικής ή ψηφιακής) μηχανής

σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Καθορίζει την εσωτερική γεωμετρία, δηλαδή τις παραμέτρους εσωτερικού προσανατολισμού, της φωτομηχανής. Συνήθως, στις εφαρμογές MMS, χρησιμοποιείται μία **διαδικασία αυτο-βαθμονόμησης** (ταυτόχρονος προσδιορισμός πρόσθετων παραμέτρων κατά τον φωτοτριγωνισμό με τη μέθοδο των δεσμών), όπου προσδιορίζονται:

- οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου ( $x_p, y_p$ ),
- η σταθερά της φωτομηχανής ( $c$ ),
- ο λόγος της κλίμακα του άξονα  $y$  ως προς την κλίμακα του άξονα  $x$ , για τις ψηφιακές μηχανές και
- οι παράμετροι (συνήθως 5) που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των διαστροφών των φακών.

Επίσης, προσδιορίζονται και οι παράμετροι θέσης ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) και προσανατολισμού ( $\Omega, \Phi, K$ ) για κάθε φωτομηχανή για κάθε λήψη. Οι παραπάνω παράμετροι χρησιμοποιούνται για τη συσχέτιση των φωτομηχανών με τους δέκτες πλοήγησης.

Οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου και ο παράγοντας κλίμακας του άξονα  $y$  συσχετίζουν το σύστημα συντεταγμένων του υπολογιστή με το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας. Το πρώτο είναι ένα αριστερόστροφο σύστημα με αρχή του την πάνω αριστερή ψηφίδα της οθόνης, τον άξονα  $x$  παράλληλο στις γραμμές της εικόνας και τον άξονα  $y$  παράλληλο στις στήλες της εικόνας, ενώ το δεύτερο είναι ένα δεξιόστροφο σύστημα με αρχή του το πρωτεύον σημείο. Στην εικόνα 4.1 φαίνεται η σχέση των δύο αυτών συστημάτων.



**Εικόνα 4.1:** Τα συστήματα συντεταγμένων της εικόνας και του υπολογιστή

Ο μετασχηματισμός από τις συντεταγμένες του υπολογιστή στις συντεταγμένες της εικόνας καθορίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= x_c - x_p \\ \bar{y} &= (y_c - y_p) / k_y\end{aligned}\tag{Εξ. 4.1}$$

όπου

$\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  είναι οι συντεταγμένες της εικόνας  
 $x_c, y_c$  είναι οι συντεταγμένες του υπολογιστή  
 $k_y$  ο παράγοντας κλίμακας του άξονα  $y$

Το μαθηματικό μοντέλο του φωτοτριγωνισμού με τη μέθοδο των δεσμών με αυτο-βαθμονόμηση βασίζεται στη συνθήκη συγγραμμικότητας, οι εξισώσεις της οποίας διατυπώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= -c \frac{U}{V} + \Delta x \\ \bar{y} &= -c \frac{U}{V} + \Delta y\end{aligned}\tag{Εξ. 4.2}$$

Με τη χρήση των βοηθητικών παραμέτρων:

$$\begin{aligned}U &= m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0) \\ V &= m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0) \\ W &= m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)\end{aligned}\tag{Εξ. 4.3}$$

όπου

$\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  είναι οι συντεταγμένες της εικόνας,  
 $c$  είναι η σταθερά της φωτομηχανής, και  
 $m_{ij}$  είναι τα στοιχεία του ορθογώνιου πίνακα  $R_m^c$ , που καθορίζει τη στροφή μεταξύ του  $m$ -συστήματος ( $m$ -frame) του αντικειμένου με το σύστημα συντεταγμένων της φωτομηχανής ( $c$ -frame).



Η διαστροφή των φακών μπορεί να θεωρηθεί ως η απόκλιση της οπτικής ακτίνας από την ιδανική συγγραμμικότητα και οφείλεται στην ατελή κατασκευή των φακών. Στην ιδανική περίπτωση φακών, το αντικείμενο, το προβολικό κέντρο των φακών και το σημείο στην εικόνα βρίσκονται πάνω στη ίδια ευθεία. Επειδή, όμως, δεν υπάρχουν φακοί που να παρουσιάζουν ιδανική συγγραμμικότητα, πάντα θα υπάρχουν αποκλίσεις στην εικόνα. Η διαστροφή των φακών, συνήθως, διακρίνεται σε δύο είδη: ακτινική και εφαπτομενική. Με την ακτινική παραμόρφωση η θέση του σημείου της εικόνας σε μια ευθεία γραμμή μετατοπίζεται ακτινωτά από το πρωτεύον σημείο. Το μέγεθος της εφαπτομενικής παραμόρφωσης εξαρτάται από την ακτινική απόσταση του σημείου στην εικόνα από το πρωτεύον σημείο και από τον προσανατολισμό ως προς μία διεύθυνση αναφοράς. Οι τρεις συντελεστές ακτινικής παραμόρφωσης των φακών ( $k_1$ ,  $k_2$ , και  $k_3$ ) και οι δύο συντελεστές εφαπτομενικής παραμόρφωσης ( $p_1$  και  $p_2$ ) μοντελοποιούνται ως εξής (Brown, 1966):

$$\begin{aligned}\Delta x &= \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y} \\ \Delta y &= \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 \bar{x}\bar{y} + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2)\end{aligned}\quad (\text{Εξ. 4.4})$$

όπου

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$

Η βαθμονόμηση των φωτομηχανών απαιτεί ένα πεδίο ελέγχου με στόχους γνωστών συντεταγμένων σε ένα αυθαίρετο σύστημα. Για την επίτευξη ακρίβειας μισού *pixel* στα αποτελέσματα της βαθμονόμησης χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές για τη μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων των στόχων. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούν κυκλικούς στόχους, μαύρους κύκλους σε άσπρο φόντο, φτιαγμένους από οπισθοανακλαστικό φιλμ. Αυτό το υλικό έχει την πολύ σπουδαία ιδιότητα ότι ανακλά το φως απευθείας πίσω στην πηγή του και επομένως, για να υπάρχει καλή αντίθεση μεταξύ των στόχων και του φόντου, τοποθετείται μία πηγή φωτός πολύ κοντά στις φωτομηχανές. Ο αλγόριθμος αναζήτησης του κεντροειδούς καθορίζει τις συντεταγμένες των στόχων. Αρχικά δημιουργεί ένα δυαδικό παράθυρο γύρω από το στόχο με τη χρήση κατωφλιού (*thresholding*) και μετά υπολογίζει το κέντρο της βαρύτητας των στόχων στο σύστημα του υπολογιστή με τη βοήθεια των σχέσεων:

$$\bar{x}_{cg} = \frac{\sum \sum \bar{x} \cdot g(\bar{x}, \bar{y})}{\sum \sum g(\bar{x}, \bar{y})}$$

$$\bar{y}_{cg} = \frac{\sum \sum \bar{y} \cdot g(\bar{x}, \bar{y})}{\sum \sum g(\bar{x}, \bar{y})} \quad (\text{Εξ. 4.5})$$

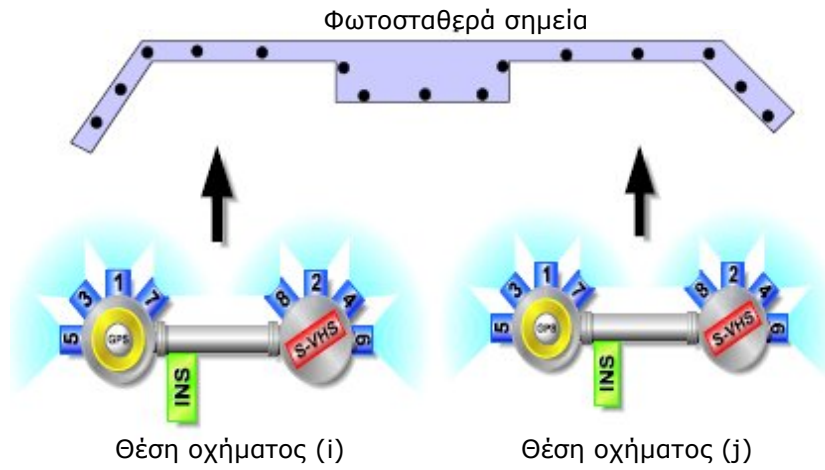
όπου

$x_{cg}, y_{cg}$  είναι οι συντεταγμένες του κέντρου βαρύτητας των στόχων

$g(\bar{x}, \bar{y})$  είναι οι τιμές του επιπέδου του γκρι της ψηφίδας στη θέση  $(\bar{x}, \bar{y})$ .

## 4.2 Βαθμονόμηση διανύσματος εκκεντρότητας

Οι παράμετροι του διανύσματος εκκεντρότητας διακρίνονται σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα περιέχει τις παραμέτρους που καθορίζουν τη σχετική θέση και τον προσανατολισμό μεταξύ διαφορετικών στερεοζευγών. Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από τις παραμέτρους που καθορίζουν τη σχετική θέση και τον προσανατολισμό μεταξύ των φωτομηχανών και των δεκτών πλοήγησης και είναι απαραίτητοι για τη διαδικασία της γεωαναφοράς. Για τον υπολογισμό αυτών των δύο ομάδων παραμέτρων πρέπει να προστεθούν κάποιες δεσμεύσεις στο πρόγραμμα του φωτοτριγωνισμού (El-Sheimy και Schwarz 1993). Οι εξισώσεις των δεσμεύσεων αυτών στηρίζονται στο γεγονός ότι τόσο οι φωτομηχανές όσο και το INS είναι σταθερά στερεωμένα κατά τη διάρκεια της εργασίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη λήψη εικόνων από διαφορετικές θέσεις και αποστάσεις ενός πεδίου ελέγχου με φωτοσταθερά σημεία (Εικόνα 4.2).



**Εικόνα 4.2:** Πάνω: Όψη του πύργου όπου βρίσκονται οι φωτομηχανές και η βίντεο-κάμερα  
 Κάτω: Κάτοψη του πεδίου ελέγχου για τη βαθμονόμηση του διανύσματος εκκεντρότητας (Naser El-Sheimy, 1996)

Οι εξισώσεις που εκφράζουν τις παραπάνω δεσμεύσεις, για δύο θέσεις οχήματος (i) και (j) και για δύο φωτομηχανές (c1) και (c2), έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned}
 b^i &= b^j \\
 \Delta R_b^{c1}(i) &= \Delta R_b^{c1}(j), \Delta R_b^{c2}(i) = \Delta R_b^{c2}(j), \\
 \Delta R_{c1}^{c2}(i) &= \Delta R_{c1}^{c2}(j)
 \end{aligned}
 \tag{Εξ. 4.6}$$

Για το στερεοζεύγος (i):

$$\begin{aligned}
 B^i &= \sqrt{(X^{c1} - X^{c2})^2 + (Y^{c1} - Y^{c2})^2 + (Z^{c1} - Z^{c2})^2} \\
 \Delta R_b^c(i) &= R_m^c(i) \cdot R_b^m(i) \\
 \Delta R_{c1}^{c2}(i) &= R_m^{c2}(i) \cdot R_{c1}^m(i)
 \end{aligned}
 \tag{Εξ. 4.7}$$

όπου

- $b$  το διάνυσμα βάσης του στερεοζεύγους των (c1) και (c2),
- $R_m^c$  ο πίνακας στροφής μεταξύ του  $c$ -συστήματος ( $c$ -frame) και του  $m$ -συστήματος ( $m$ -frame), που είναι το σύστημα στο οποίο αναφέρονται οι συντεταγμένες των σημείων στο πεδίο ελέγχου,
- $R_b^m$  ο πίνακας προσανατολισμού μεταξύ του συστήματος του INS ( $b$ -frame) και του  $m$ -συστήματος,
- $\Delta R_b^c$  ο πίνακας στροφής μεταξύ του  $c$ -συστήματος και του συστήματος του INS ( $b$ -frame),
- $\Delta R_{c1}^{c2}$  ο πίνακας στροφής μεταξύ της φωτομηχανής (c1) και της (c2), και
- $X^{ci}, Y^{ci}, Z^{ci}$  οι συντεταγμένες του προβολικού κέντρου της φωτομηχανής (ci) στο  $m$ -σύστημα.

Η εισαγωγή των παραπάνω εξισώσεων απαιτεί τη γνώση των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού ( $X_o, Y_o, Z_o, \omega, \varphi, \kappa$ ) των φωτομηχανών, όπως και την πληροφορία προσανατολισμού (*attitude information*) του INS. Αυτή η πληροφορία εκτιμάται μετά την επεξεργασία των δεδομένων του INS και μπορεί να συμπεριληφθεί στον φωτοτριγωνισμό ως ξεχωριστή εξίσωση (ψευδο-)παρατήρησης, με τα κατάλληλο βάρος. Οι **παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού** εκτιμώνται απευθείας από τη συνόρθωση του φωτοτριγωνισμού και **με γνωστές αυτές τις παραμέτρους**, για κάθε φωτομηχανή, οι εξισώσεις διαμορφώνονται ως εξής:

1. Οι δεσμεύσεις βάσης: κάθε φωτομηχανή συνθέτει μία λωρίδα (*strip*). Το διάνυσμα βάσης ( $b_x$   $b_y$   $b_z$ ) μεταξύ κάθε στερεοζεύγους εκφράζεται, σε κάποιο από τα συστήματα των φωτομηχανών, ως εξής:

$$B_{i,j} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}_{i,j} = R_m^c(i,j) \left[ \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{i+1} - \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_i \right] \quad (\text{Εξ. 4.8})$$

όπου

$i$  είναι ο αριθμός των λωρίδων, δηλαδή ο αριθμός των φωτομηχανών, και  
 $j$  είναι ο αριθμός των τοποθετήσεων του οχήματος, δηλαδή ο αριθμός των εικόνων σε κάθε λωρίδα.

2. Οι δεσμεύσεις του πίνακα σχετικής στροφής: Η αναλυτική διατύπωση των σχετικών εξισώσεων βασίζεται στους πίνακες σχετικής στροφής  $\Delta R$  μεταξύ οποιονδήποτε δύο φωτομηχανών ή οποιασδήποτε φωτομηχανής και του  $b$ -συστήματος του INS. Αυτό επιτυγχάνεται **διατηρώντας σταθερές τις σχετικές γωνίες στροφής** ( $\Delta\omega$ ,  $\Delta\phi$ ,  $\Delta\kappa$ ) στον φωτοτριγωνισμό. Η μορφή του πίνακα στροφής που χρησιμοποιείται έχει ως εξής:

$$\Delta R = \begin{pmatrix} \cos \Delta\phi \cos \Delta\kappa & \cos \Delta\phi \sin \Delta\kappa & -\sin \Delta\phi \\ \sin \Delta\omega \sin \Delta\phi \cos \Delta\kappa - \cos \Delta\omega \sin \Delta\kappa & \sin \Delta\omega \sin \Delta\phi \sin \Delta\kappa + \cos \Delta\omega \cos \Delta\kappa & \sin \Delta\omega \cos \Delta\phi \\ \cos \Delta\omega \sin \Delta\phi \cos \Delta\kappa + \sin \Delta\omega \sin \Delta\kappa & \cos \Delta\omega \sin \Delta\phi \sin \Delta\kappa - \sin \Delta\omega \cos \Delta\kappa & \cos \Delta\omega \cos \Delta\phi \end{pmatrix}$$

(Εξ. 4.9)

Στον πίνακα  $\Delta R$  υπάρχουν μόνο τρεις ανεξάρτητες παράμετροι, των οποίων οι συναρτησιακές σχέσεις με τα στοιχεία του πίνακα έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} \tan \Delta\omega &= \frac{\Delta R_{23}}{\Delta R_{33}} \\ \sin \Delta\phi &= -\Delta R_{13} \\ \tan \Delta\kappa &= \frac{\Delta R_{12}}{\Delta R_{11}} \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 4.10})$$

Μετά την πρώτη επανάληψη της συνόρθωσης, **αφού γίνουν γνωστές οι παράμετροι εσωτερικού προσανατολισμού**, οι εξισώσεις μπορούν να διαμορφωθούν ως εξής:

$$\begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}_{i,j} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}_{i,j+1} \quad (\text{Εξ. 4.11})$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\Delta R_{23}}{\Delta R_{33}} \\ -\Delta R_{13} \\ \frac{\Delta R_{12}}{\Delta R_{11}} \end{pmatrix}_{i,j} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta R_{23}}{\Delta R_{33}} \\ -\Delta R_{13} \\ \frac{\Delta R_{12}}{\Delta R_{11}} \end{pmatrix}_{i,j+1} \quad (\text{Εξ. 4.12})$$

Ο αριθμός των δεσμεύσεων, που προστίθενται στο πρόγραμμα του φωτοτριγωνισμού, μπορούν να υπολογιστούν με τη βοήθεια του ακόλουθου τύπου:

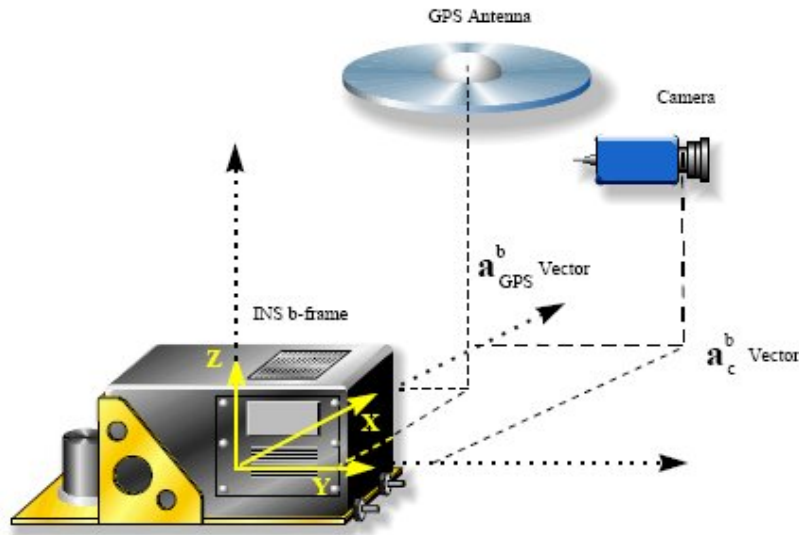
$$\text{Αριθμός των δεσμεύσεων} = (i-1)! (j-1)! \quad (\text{Εξ. 4.13})$$

όπου (i) είναι ο αριθμός των φωτομηχανών και (j) είναι ο αριθμός των θέσεων του οχήματος κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης.

Μετά τη βαθμονόμηση, μπορεί να υπολογιστεί το διάνυσμα μετατόπισης μεταξύ του *INS* και των φωτομηχανών, εκφρασμένο στο *b-σύστημα* του *INS*. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό δεν είναι δυνατό πριν τη βαθμονόμηση, εφόσον τα προβολικά κέντρα των φωτομηχανών δεν μπορούν να παρατηρηθούν φυσικά. Αυτά τα διανύσματα χρησιμοποιούνται στην εξίσωση γεωαναφοράς (Εξ. 3.6.4) που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3. Τα διανύσματα μετατόπισης υπολογίζονται ως εξής:

$$\mathbf{a}_{ci}^b = R_m^b \cdot \begin{pmatrix} X_{INS}^m - X_{ci}^m \\ Y_{INS}^m - Y_{ci}^m \\ Z_{INS}^m - Z_{ci}^m \end{pmatrix} \quad (\text{Εξ. 4.14})$$

$$\mathbf{a}_{GPS}^b = R_m^b \cdot \begin{pmatrix} X_{INS}^m - X_{GPS}^m \\ Y_{INS}^m - Y_{GPS}^m \\ Z_{INS}^m - Z_{GPS}^m \end{pmatrix} \quad (\text{Εξ. 4.15})$$



**Εικόνα 4.3:** Οι συντεταγμένες των φωτομηχανών και της κεραίας του GPS στο *b-σύστημα* του *INS* (Naser El-Sheimy, 1996)

### 4.3 Βαθμονόμηση αδρανειακού συστήματος

Η βαθμονόμηση του αδρανειακού συστήματος αποτελείται από μία εργαστηριακή βαθμονόμηση και έναν έλεγχο πεδίου. Οι γωνίες *pitch* και *roll* μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές, εφόσον το INS βρίσκεται σε επίπεδη επιφάνεια κατά τη διάρκεια του εργαστηριακού ελέγχου. **Οι αποκλίσεις των επιταχυνσιόμετρων (*b*) και οι κινήσεις του γυροσκοπίου (*d*)** μπορούν να υπολογιστούν με τις ακόλουθες σχέσεις (Wong, 1988 και Savage, 1978):

$$d = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 (\omega_{ie}^b - R_l^b \omega_{ie}^l)^j$$
$$b = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 (f^b - R_l^b g)^j \quad (\text{Εξ. 4.16})$$

όπου

$$R_l^b = \begin{pmatrix} \cos(A) & -\sin(A) & 0 \\ \sin(A) & \cos(A) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\omega_{ei}^l = \omega_e \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix}$$

όπου (*j*) είναι ο αριθμός του δείγματος, (*A*) είναι το αζιμούθιο του δείγματος και φ είναι το γεωγραφικό πλάτος.

Οι παράμετροι, που εκτιμώνται στην εργαστηριακή βαθμονόμηση χρησιμοποιούνται σαν προσεγγιστικές τιμές στις αποκλίσεις των επιταχυνσιόμετρων και στις κινήσεις του γυροσκοπίου και βελτιώνονται περαιτέρω με τον έλεγχο πεδίου.

### 4.4 Φωτοτριγωνισμός με δεδομένα προσανατολισμού του αδρανειακού συστήματος

Κατά την συνδυασμένη επίλυση φωτοτριγωνισμού με δέσμες και δεδομένων προσανατολισμού του αδρανειακού συστήματος, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα δεδομένα προσανατολισμού του *INS* συνήθως αναφέρονται σε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς (*local*

*level frame, LL-frame*). Ο προσανατολισμός του συστήματος των μετρήσεων του *INS* (*b-frame*) ως προς το τοπικό σύστημα αναφοράς μπορεί να οριστεί με τις τρεις γωνίες στροφής *Euler*, γνωστές ως *roll* ( $r$ ) γύρω από τον άξονα  $x$  του γυροσκοπίου, *pitch* ( $p$ ) γύρω από τον άξονα  $y$  του γυροσκοπίου, και *yaw* ( $y$ ) γύρω από τον άξονα  $z$  του γυροσκοπίου. Οι γωνίες προσανατολισμού προκύπτουν από τον πίνακα  $R_b^{LL}$ , που συνδέει το  $b$ -σύστημα και το τοπικό σύστημα αναφοράς (Wei and Schwarz, 1990b) :

$$R_b^{LL} = R_b^m = R_3(y) \cdot R_1(p) \cdot R_2(r)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(y)\cos(r) - \sin(y)\sin(p)\sin(r) & -\sin(y)\cos(p) & \cos(y)\sin(r) + \sin(y)\sin(p)\cos(r) \\ \sin(y)\cos(r) + \cos(y)\sin(p)\sin(r) & \cos(y)\cos(p) & \sin(y)\sin(r) - \cos(y)\sin(p)\cos(r) \\ -\cos(p)\sin(r) & \sin(p) & \cos(p)\cos(r) \end{pmatrix}$$

(Εξ. 4.17)

Με τη χρήση της εξίσωσης 4.17 οι γωνίες προσανατολισμού ( $r, p, y$ ) δίνονται από τις σχέσεις:

$$r = \tan^{-1} \left[ -\frac{R_b^{LL}(3,1)}{R_b^{LL}(3,3)} \right]$$

$$p = \sin^{-1} [R_b^{LL}(3,2)] \quad (\text{Εξ. 4.18})$$

$$y = \tan^{-1} \left[ -\frac{R_b^{LL}(1,2)}{R_b^{LL}(2,2)} \right]$$

Ο πίνακας προσανατολισμού της φωτομηχανής ορίζεται, παγίως στη Φωτογραμμετρία, ως η στροφή από το χαρτογραφικό σύστημα (*m-frame*) στο σύστημα της φωτομηχανής (*c-frame*):

$$R_m^c = R_3(\kappa) \cdot R_2(\phi) \cdot R_1(\omega) \quad (\text{Εξ. 4.19})$$

όπου  $\omega, \phi, \kappa$  είναι οι γωνίες στροφής γύρω από τους άξονες  $x, y$  και  $z$  αντίστοιχα.

Η συνδυασμένη επίλυση φωτοτριγωνισμού με δέσμες και δεδομένων προσανατολισμού του αδρανειακού συστήματος, απαιτεί τα παρακάτω βήματα:



1. Το σύστημα συντεταγμένων του πεδίου ελέγχου της βαθμονόμησης πρέπει να βασιστεί σε ένα χαρτογραφικό σύστημα συντεταγμένων, για παράδειγμα το UTM ή το 3TM, που αντιπροσωπεύουν ένα τοπικό σύστημα αναφοράς. Στην περίπτωση αυτή, το αξιμούθιο του INS που προκύπτει, σχετίζεται άμεσα με το τοπικό σύστημα αναφοράς. Αν χρησιμοποιηθεί διαφορετικό σύστημα αναφοράς για το πεδίο ελέγχου, θα προκύψουν διαφορετικές τιμές για τις γωνίες ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ) και, επομένως, θα προκύψει ένας διαφορετικός σχετικός προσανατολισμός μεταξύ των μηχανών και του αδρανειακού συστήματος. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να δημιουργηθεί ένα σταθερό αξιμούθιο σε όλους τους χάρτες που παράγονται από ένα σύστημα GPS/INS. Το αξιμούθιο του δικτύου μπορεί να καθοριστεί με τη χρήση μίας στατικής μεθόδου GPS με βάσεις μήκους 1-2 km.
2. Η εκτίμηση των παραμέτρων του σχετικού προσανατολισμού ( $\Delta\omega$ ,  $\Delta\phi$ ,  $\Delta\kappa$ ) μεταξύ του b-συστήματος του INS και του c-συστήματος των μηχανών απαιτεί τους πίνακες στροφής  $R_b^m$  και  $R_m^c$ . Προκειμένου να διατηρήσουν τιμές οι οποίες να έχουν νόημα, και οι δύο αυτοί πίνακες πρέπει να έχουν την ίδια σειρά στροφών (*rotation sequence*) γύρω από τους άξονες x, y και z. Από τις εξισώσεις 4.17 και 4.19 είναι σαφές ότι οι δύο πίνακες ακολουθούν διαφορετική σειρά στροφών ως προς το χαρτογραφικό σύστημα (*m-frame*). Έτσι, κατά την εφαρμογή των δεσμεύσεων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4.2, και οι δύο πίνακες πρέπει να ακολουθούν την ίδια σειρά στροφών. Εφόσον οι δεσμεύσεις εφαρμόζονται στον φωτοτριγωνισμό με δέσμες, είναι πιο βολικό να ακολουθηθεί η σειρά στροφών της φωτομηχανής. Έτσι, η υλοποίηση της αντίστοιχης δέσμευσης λαμβάνει τη μορφή:

$$R_b^c = R_m^c \cdot R_b^m = [R_3(\kappa) \cdot R_2(\phi) \cdot R_1(\omega)] \bullet [R_3(y) \cdot R_2(r) \cdot R_1(p)] \quad (\text{Εξ. 4.20})$$

Η υλοποίηση της παραπάνω εξίσωσης απαιτεί τα ακόλουθα βήματα:

- Εξαγωγή των γωνιών προσανατολισμού ( $r$ ,  $p$ ,  $y$ ) με τη χρήση της εξίσωσης 4.18.
- Επαναπροσδιορισμός του πίνακα προσανατολισμού του INS με τη χρήση της σειράς στροφών της εξίσωσης 4.20.
- Επανάληψη των δύο προηγούμενων βημάτων κατά την εφαρμογή του πίνακα προσανατολισμού του INS στη διαδικασία της γεωαναφοράς.

# 5

## **ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Η τελική ακρίβεια των τρισδιάστατων συντεταγμένων σημείων, που προσδιορίζονται από ένα Κινητό Σύστημα Χαρτογράφησης, αποτελεί συνάρτηση της συνολικής αλυσίδας επεξεργασίας, που περιλαμβάνει τη θέση του GPS, τη θέση/προσανατολισμό του *INS*, το συγχρονισμό του συστήματος, τη βαθμονόμηση του συστήματος, το μέγεθος του *pixel* των εικόνων που λαμβάνονται, την ταχύτητα του οχήματος. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια του συστήματος.

### **5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια**

Το μοντέλο της γεωαναφοράς, που αναπτύχθηκε στο Κεφ. 3, περιλαμβάνει τα αποκτηθέντα δεδομένα εικόνας, αλλά και όλα τα βήματα της αλυσίδας της επεξεργασίας. Τα τελευταία αναφέρονται στον προσδιορισμό θέσης του *GPS*, στον καθορισμό θέσης/προσανατολισμού του *INS*, στη βαθμονόμηση του συστήματος, στην ακρίβεια των καμερών και στην επίδραση της γεωμετρίας της εικόνας. Έτσι, το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση της συνεισφοράς των μετρητικών σφαλμάτων και των σφαλμάτων του συστήματος στην ακρίβεια του τρισδιάστατου προσδιορισμού θέσης. Στη συνέχεια, ακολουθεί η περιγραφή ενός απλοποιημένου **μοντέλου ανάλυσης των σφαλμάτων στη διαδικασία της γεωαναφοράς**. Παρόλο που οι παράμετροί του μεταβάλλονται από τη μία εφαρμογή στην άλλη, η δομή του μοντέλου παραμένει ίδια.

Με τη χρήση μιας ανάλυσης σφάλματος πρώτου βαθμού της εξίσωσης 3.6.4:  
$$r_i^m = r_{INS/GPS}^m(t) + R_b^m(t) \cdot [s^i R_c^b r^c + a^b]$$
 και με την προσθήκη του όρου  $(V+\omega) \delta T$  για την

απεικόνιση του σφάλματος συγχρονισμού, προκύπτει ο ακόλουθος τύπος (Schwarz, El-Sheimy, 1996):

$$\begin{aligned} \delta r_i^m &= \delta r_{INS}^m(t) + \\ &\delta R_b^m(t) \cdot (s^i \cdot R_s^m \cdot r^s + a^b) + \\ &R_b^m(t) \cdot (s^i \cdot \delta R_s^m \cdot r^s + \delta a^b) + \\ &R_b^m(t) \cdot (\delta s^i \cdot R_s^m \cdot r^s + s^i \cdot R_s^m \cdot \delta r^s) + \\ &(V+\omega) \delta T \end{aligned} \tag{Εξ. 5.1}$$

όπου

$V$  είναι η τιμή της ταχύτητας του οχήματος και  $\omega$  το γωνιακό άνοιγμα (*angular rate*) της φωτομηχανής.

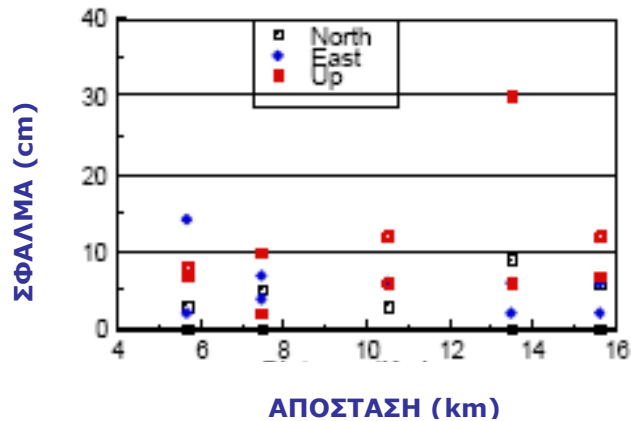
Η εξίσωση 5.1 περιλαμβάνει πέντε ομάδες σφαλμάτων, που συνεισφέρουν στην τελική ακρίβεια των τρισδιάστατων συντεταγμένων. Πρόκειται για τα

- σφάλματα θέσης των *INS/GPS*,
- τα σφάλματα προσανατολισμού του *INS*,
- τα σφάλματα βαθμονόμησης,
- τα σφάλματα εντοπισμού και μέτρησης στόχου και
- και τα σφάλματα συγχρονισμού.

Το μοναδικό πιθανό σφάλμα, που δεν έχει συμπεριληφθεί στην εξίσωση 5.1 είναι η αστάθεια των καμερών ως προς τους δέκτες πλοήγησης. Αυτή η αστάθεια αυξάνει το επίπεδο του σφάλματος των  $\delta a^b$  και  $\delta R_s^b$ , τα οποία όμως δεν επηρεάζουν πολύ το μέσο επίπεδο θορύβου.

### 5.1.1 Σφάλματα συστήματος *GPS/INS*

Η ακρίβεια των *GPS/INS* εξαρτάται από τη συγκέντρωση των σφαλμάτων σε κάθε υποσύστημα και από την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας περιορισμού αυτών των σφαλμάτων. Τα τυπικά σφάλματα θέσης του *GPS/INS*, για μία εργασία αποτύπωσης σε μήκος 20 km, παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.1.



Εικόνα 5.1 Διάγραμμα σφαλμάτων θέσης του GPS/INS (Naser El-Sheimy, 1996)

Ο αριθμός των διαθέσιμων δορυφόρων κατά τη διάρκεια της εργασίας ήταν πέντε. Το διάγραμμα επιβεβαιώνει ότι το σφάλμα θέσης είναι της τάξεως των 10 cm με  $rms = 7$  cm. Η μεγαλύτερη συσσώρευση σφαλμάτων εμφανίζεται κατά τη διάρκεια των περιόδων που το INS λειτουργεί χωρίς υποστήριξη, δηλαδή κατά την απώλεια δορυφόρων ή κατά την έλλειψη ενημερώσεων μηδενικών ταχυτήτων (ZUPT). Κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, το INS χρησιμοποιείται ως αυτόνομο σύστημα προσδιορισμού θέσης και οποιαδήποτε σφάλματα προκύψουν πρέπει να βρίσκονται κάτω από μία κατώτατη τιμή, ώστε να αποτραπούν αποκλίσεις στους υπολογισμούς GPS, που ακολουθούν την ανάκτηση των δορυφόρων. Μετά από την ανάκτηση των δορυφόρων, τα αποτελέσματά του INS χρησιμοποιούνται για την διόρθωση των ασαφειών φάσης.

Στην αυτόνομη λειτουργία, τα αποτελέσματα του INS επηρεάζονται κυρίως από:

- το αρχικό σφάλμα θέσης,
- το αρχικό σφάλμα ταχύτητας,
- την αρχική μη σωστή ευθυγράμμιση,
- τα σφάλματα του γυροσκοπίου συναρτήσει του χρόνου και
- τα συστηματικά σφάλματα του επιταχυνσιόμετρου.

Σύμφωνα με αυτές τις πηγές σφάλματος, τα αποτελέσματα του INS παρουσιάζουν μια μακροπρόθεσμη συμπεριφορά σφάλματος, που επηρεάζεται από τις αποκαλούμενες ταλαντώσεις *Schuler*, η περίοδος των οποίων είναι περίπου 84.4 minutes. Για μικρές χρονικές περιόδους, το σφάλμα θέσης του INS μπορεί να προσεγγιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\delta P_{t_2} = \delta P_{t_1} + \delta V_{t_1} \cdot (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} \delta a_{t_1} \cdot (t_2 - t_1)^2 + \delta \varepsilon \quad (\text{Εξ. 5.2})$$

όπου

$\delta P_{t_1}$  είναι το σφάλμα θέσης τη χρονική στιγμή  $t_1$ ,

$\delta P_{t_2}$  είναι το σφάλμα θέσης τη χρονική στιγμή  $t_2$ ,

$\delta V_{t_1}$  είναι το σφάλμα ταχύτητας τη χρονική στιγμή  $t_1$ ,

$\delta a_{t_1}$  είναι τα συστηματικά σφάλματα του επιταχυνσιομέτρου τη χρονική στιγμή  $t_1$ , και

$\delta \epsilon$  είναι η επίδραση των σφαλμάτων ευθυγράμμισης .

Αν θεωρηθεί ότι τα χαρακτηριστικά σφάλματα θέσης του GPS/INS είναι της τάξης των 5cm (σταθερές ασάφειες), τα σφάλματα ταχύτητας του GPS/INS είναι της τάξης των 2cm/sec, τα συστηματικά σφάλματα των επιταχυνσιομέτρων μπορεί να φθάσουν τα 10-20mGal, και τα μη μοντελοποιημένα σφάλματα ευθυγράμμισης μπορεί να φθάσουν τα 10arcsec, τότε το σφάλμα θέσης για μια περίοδο 20sec μπορεί φθάσει τα 57cm. Η συνεισφορά κάθε παράγοντα της Εξίσωσης 5.3, φανερώνει ξεκάθαρα ότι το αρχικό σφάλμα ταχύτητας είναι το κυρίαρχο σφάλμα:

$$\begin{aligned}\delta P_{t_2} &= 0.05\text{m} + (0.02\text{m/sec})(20\text{sec}) + \frac{1}{2} (10 \times 10^{-5}\text{m/sec}^2)(20\text{sec})^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} (10 \times 5 \times 10^{-5}\text{m/sec}^2)(20\text{sec})^2 \\ \delta P_{t_2} &= 0.05\text{m} + 0.4\text{m} + 0.02\text{m} + 0.1\text{m} = 0.57\text{m} \quad (\text{Εξ. 5.3})\end{aligned}$$

Συνεπώς, η αξιοπιστία της συμβολής του *INS* στις διακοπές λειτουργίας του *GPS* εξαρτάται από ένα αξιόπιστο μοντέλο σφάλματος για μικρές χρονικές περιόδους λειτουργίας και μια μακροπρόθεσμη εκτίμηση σφάλματος του *INS*, κατά τη διάρκεια των περιόδων όπου είναι διαθέσιμες η υψηλή ακρίβεια θέσης και η πληροφορία ταχύτητας από το *GPS*. Τα σφάλματα του *GPS* αντικατοπτρίζονται στη συμπεριφορά του *INS* λόγω της διαδικασίας ενημέρωσης, αλλά δεν είναι τόσο σοβαρά όσο εκείνα που περιγράφονται παραπάνω, δεδομένου ότι δεν είναι χρονικά μεταβαλλόμενα.

Η επίδραση των σφαλμάτων θέσης του *GPS/INS* στις παραγόμενες τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων εξαρτάται από την ακολουθία των εικόνων που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό. Εάν χρησιμοποιούνται στερεοζεύγη σταθερής βάσης τότε και οι δύο φωτομηχανές λαμβάνουν την ίδια θέση στο σύστημα *GPS/INS*, συν μια

σταθερή μετατόπιση (όπως καθορίζεται στη βαθμονόμηση). Επομένως, τα σφάλματα στη θέση του *GPS/INS* εισάγουν μια σταθερή μετατόπιση για όλα τα σημεία που προσδιορίζονται από αυτό το στερεοζεύγος. Από την άλλη πλευρά, εάν χρησιμοποιούνται διαδοχικές εικόνες και η μεταξύ τους βάση λαμβάνεται από τον εντοπισμό θέσης και προσανατολισμού του *INS/GPS*, το σφάλμα θέσης των στόχων εξαρτάται από το μέγεθος και την κατεύθυνση του σφάλματος των βάσεων και από το μήκος τους.

### 5.1.2 Σφάλματα βαθμονόμησης

Οι διορθώσεις των μοχλοβραχιόνων (*lever arm*), δηλαδή οι διορθώσεις για τη μετατόπιση μεταξύ του κέντρου του *INS* και αμφότερων του κέντρου της κεραίας του *GPS* και των προβολικών κέντρων των φωτομηχανών, έχουν επιπτώσεις τόσο στην ακρίβεια του εντοπισμού και της διόρθωσης της ολίσθησης κύκλων όσο και στις συντεταγμένες των προβολικών κέντρων των φωτομηχανών και στη βάση μεταξύ των φωτομηχανών. Αυτές οι διορθώσεις αποτελούνται από μια σταθερή συστηματική απόκλιση και έναν χρονικά μεταβαλλόμενο όρο.

Η **σταθερή συστηματική απόκλιση** είναι το αποτέλεσμα των σφαλμάτων στην αρχική εργασία αποτύπωσης, που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης του συστήματος. Όταν το σύστημα *GPS/INS*/κάμερα είναι προσαρμοσμένο πάνω σε κάποιο όχημα, τότε αρκεί μόνο μία εργασία αποτύπωσης για τον υπολογισμό των συνιστωσών μετατόπισης μεταξύ της κεραίας του *GPS*, των προβολικών κέντρων των καμερών και του κέντρου του συστήματος του *INS*. Το μέγεθος των μεταθέσεων υπολογίζεται από αποτύπωση με επίγεια τοπογραφική αποτύπωση (*total station*) και φωτοτριγωνισμό κατά δέσμες, ενώ η περιστροφή αζιμουθίου υπολογίζεται με τον καθορισμό της διαφοράς μεταξύ ενός αστρονομικού αζιμουθίου μερικών επιλεγμένων γραμμών στο δοκιμαστικό πεδίο και του αζιμουθίου του *INS*, που καθορίζεται κατά τη διάρκεια των διαδικασιών ευθυγράμμισης.

Δεδομένου ότι μια τυπική στατική ευθυγράμμιση μπορεί να εκτελεστεί με μία ακρίβεια αζιμουθίου περίπου 2-4 arc minutes, το εναπομείναν σφάλμα είναι της τάξης  $\pm 0.25\text{cm}$  για ένα μοχλοβραχίονα 2m (*Liu, 1994*). Ας σημειωθεί ότι ένα σφάλμα 2 arc minutes στο αζιμούθιο της βάσης εισάγει κατά πλάτος σφάλμα 2cm για όλα τα αντικείμενα που βρίσκονται 35m μακριά από το όχημα, ενώ μια σταθερή συστηματική απόκλιση 0.2cm στη σταθερή βάση μεταξύ των φωτομηχανών, ειδικά αυτών που

βρίσκονται στο εμπρός μέρος του οχήματος, μπορεί να εισάγει ένα σφάλμα 4cm, κατά μήκος της διαδρομής, για ένα αντικείμενο που απέχει 35m από τις φωτομηχανές. Το **σφάλμα** υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$Y = \frac{f}{P} B$$

$$\delta Y = \frac{f}{P} \delta B = \frac{Y}{B} \delta B$$

(Εξ. 5.4)

όπου:

- B το μήκος της βάσης μεταξύ των φωτομηχανών
- Y η απόσταση μεταξύ αντικειμένου και φωτομηχανών
- P η φωτογραμμετρική παράλλαξη, και
- f η σταθερά της μηχανής.

Ένας **χρονικά μεταβαλλόμενος όρος**, που πρέπει να εξεταστεί στον υπολογισμό *lever arm* είναι η γωνιακή μετατόπιση, που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της αποτύπωσης, εκφρασμένη σε γωνίες *roll*, *pitch*, και *αζιμούθιο*, που το μέγεθός της μπορεί να φθάσει σε αρκετά *arc minutes* την ώρα, ανάλογα με ακρίβεια του *INS*. Το συνολικό σφάλμα περιστροφής μπορεί να φθάσει τα 5-10 *arc minutes* σε μια πολύωρη εργασία. Η επίδραση αυτού του σφάλματος εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των φωτομηχανών και του αντικειμένου. Για αντικείμενα που βρίσκονται 35m μακριά από τις φωτομηχανές, το σφάλμα περιστροφής εισάγει ένα σφάλμα θέσης περίπου 5cm.

Τα σφάλματα των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού είναι άλλη μια σημαντική πηγή σφαλμάτων, που μπορεί να συμβάλλει στο συνολικό σφάλμα προσδιορισμού της τρισδιάστατης θέσης. Η κρίσιμότερη παράμετρος είναι η συντεταγμένη  $x_p$  του πρωτεύοντος σημείου. Ένα σφάλμα μισού *pixel* στο  $x_p$  μπορεί να εισάγει κατά μήκος (*along track*) σφάλμα 28cm για σημεία που βρίσκονται σε απόσταση 35m (Naser El-Sheimy 1996). Αυτό επισημαίνει τη σημασία της χρήσης ακρίβειας μισού *pixel* στις μετρήσεις βαθμονόμησης. Ένα μέρος αυτού του προβλήματος είναι η σταθερότητα του αισθητήρα *CCD* στα διαφορετικά λειτουργικά περιβάλλοντα. Η βασική πηγή σφάλματος είναι η διακύμανση της θερμοκρασίας.

### 5.1.3 Σφάλματα συγχρονισμού

Τα σφάλματα χρονικού συγχρονισμού μεταξύ του *GPS*, του *INS*, και των δεδομένων καμερών - βίντεο είναι μια άλλη πιθανή πηγή σφαλμάτων. Η επίδραση συγχρονισμού εμφανίζεται και στο (προσδιοριζόμενο με παρεμβολή) διάνυσμα  $r_{INS}^m(t)$  και στον πίνακα περιστροφής  $R_C^m(t)$ . Προκειμένου να επιτευχθεί η ακρίβεια, που απαιτείται για το σύστημα και η συσχέτιση των ομόλογων ακτίνων όταν πρόκειται για στερεοσκοπικές λήψεις, ο συγχρονισμός πρέπει να είναι ακριβής με μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου (το ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου είναι ισοδύναμο με σφάλμα θέσης 1.6cm, για μια ταχύτητα 60km/h). Ο συγχρονισμός του συστήματος εκτελείται χρησιμοποιώντας τα σήματα του *PPS* (*Pulse Per Second*) του *GPS* δέκτη.

### 5.1.4 Συνολικό σφάλμα

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η συνεισφορά κάθε όρου της εξίσωσης 5.1 στην τελική ακρίβεια των τρισδιάστατων συντεταγμένων με εφαρμογή για το σύστημα *VISAT* (*Naser El-Sheimy 1996*). Ο πίνακας δείχνει ότι όλες, εκτός από μια, οι πηγές σφάλματος συμβάλλουν λιγότερο από 10cm και οι περισσότερες από αυτές μόνο μερικά εκατοστά. Μια σημαντική εξαίρεση είναι ο παράγοντας σφάλματος της κλίμακας  $\delta S^i$  στην κατά μήκος διεύθυνση, ο οποίος οφείλεται στην κακή γεωμετρία σε αυτή την διεύθυνση και εξαρτάται προφανώς από την απόσταση μεταξύ φωτομηχανής και στόχου. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει κανένα εξαρτώμενο από την απόσταση γενικό σφάλμα αυτού του μεγέθους, αλλά σφάλμα εμφανίζεται μόνο όταν ο στόχος βρίσκεται σε αυτήν την διεύθυνση. Υπό κανονική λειτουργία, ένας στόχος εμφανίζεται σε έναν μεγάλο αριθμό εικόνων και έτσι μπορεί να διορθωθεί η κακή γεωμετρία.



Σφάλμα	Αναμενόμενο μέγεθος	Συνεισφορά στο $\delta r_i^m$	Χαρακτηριστικά σφάλματος
Θέσης INS/GPS: $\delta r_{INS}^m$	5-10 cm	5-10 cm	Σταθερό για όλα τα σημεία στην ίδια εικόνα.
Θέσης και προσαν/σμού INS: $\delta R_b^m(t)$	1-5 arc minutes	1-4 cm στα 30 m	Εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ φωτομηχανής και αντικειμένου.
Βαθμονόμησης: 1. $\delta R_s^b$  2. $\delta a^b$	1 – 3 arc minutes  0.1 - 0.3 cm	1-2.5 cm στα 30 m  2-6 cm στα 30 m (σταθερή βάση)	1.Σταθερό σε όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η επίδραση στις τρισδιάστατες συντεταγμένες εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ της φωτομηχανής και των αντικειμένων. 2.Εξαρτάται από τις ρυθμίσεις της φωτομηχανής που χρησιμοποιούνται στον τρισδιάστατο υπολογισμό. Κρίσιμο για φωτομηχανές σταθερών βάσεων.
Εντοπισμού στόχου και γεωμετρίας 1. $\delta r^s$  2. $\delta S^i$	0.5 pixel  0.5 pixel	0.5 cm στα 7 m 2.5 cm στα 30 m  2.5 cm στα 7 m 16 cm στα 30 m	1.Εξαρτάται από τις ρυθμίσεις της φωτομηχανής που χρησιμοποιούνται στον τρισδιάστατο υπολογισμό. Εισάγει το εγκάρσιο σφάλμα. 2.Εξαρτάται από τις ρυθμίσεις της φωτομηχανής που χρησιμοποιούνται στον τρισδιάστατο υπολογισμό. Εισάγει το κατά μήκος σφάλμα. Κρίσιμο για φωτομηχανές σταθερών βάσεων.
5° όρο (Συγχρονισμός) 1. $V \delta T$  2. $\omega \delta T$	1 - 2 msec  1 - 2 msec	1.8 - 3.6 cm για V= 60 km/h  1.8 - 3.6 arcmin για $\omega = 30\text{deg/sec}$ (1.5 - 3 cm στα 30 m)	1.Εισάγει το κατά μήκος σφάλμα. Μπορεί να μειωθεί με τη χρησιμοποίηση ειδικών πινάκων συγχρονισμού. 2.Εισάγει το εγκάρσιο σφάλμα. Λειτουργία μεγέθους σφάλματος της απόστασης μεταξύ φωτομηχανής και αντικειμένων. Μέγιστο κατά μήκος καμπύλων.

**Πίνακας 5.1** Πηγές και μέγεθος σφαλμάτων του συστήματος VISAT

# 6

## ***ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ***

Η συλλογή *GIS* δεδομένων, ενδεχομένως, αποτέλεσε το βασικό υποκινητή της ανάπτυξης των Κινητών Συστημάτων Χαρτογράφησης. Δυνητικές εφαρμογές των παραπάνω συστημάτων μπορούν να αποτελέσουν:

- η ενημέρωση και καταγραφή στοιχείων οδών, που αφορούν στην κυκλοφορία και στην ασφάλεια,
- ο περιβαλλοντικός έλεγχος,
- η αντιμετώπιση καταστροφών,
- η διερεύνηση ατυχημάτων.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται αναλυτική περιγραφή τέτοιων εφαρμογών, που παρουσιάζουν τόσο γενικό ενδιαφέρον όσο και πιο ειδικό για τη χώρα μας.

### **6.1 Οδικές εφαρμογές**

Τα Κινητά Συστήματα Χαρτογράφησης, καθότι αφορούν σε δυναμική απόκτηση δεδομένων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε οδικές εφαρμογές, όπως είναι (Rongxing Li, 1996):

- η απογραφή οδικών πινακίδων και οδικών σημάνσεων,
- η καταγραφή παραβιάσεων ορίων ταχύτητας και στάθμευσης,
- η παραγωγή βάσεων δεδομένων οδικών δικτύων,

- ο έλεγχος της κατάστασης της επιφάνειας του οδοστρώματος με τη βοήθεια της τεχνολογίας των *laser* κ.ά.

Η χρήση της τεχνολογίας των Κινητών Συστημάτων Χαρτογράφησης σε οδικές εφαρμογές παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Η απόκτηση των δεδομένων πραγματοποιείται χωρίς την ανάγκη διακοπής της κυκλοφορίας για κανονικές ταχύτητες, για παράδειγμα της τάξης, των 70 km/h. Επίσης, εφόσον τα δεδομένα συλλέγονται και επεξεργάζονται σε μικρό χρονικό διάστημα, είναι εφικτές οι συχνές και επαναλαμβανόμενες οδικές χαρτογραφήσεις. Αντικείμενα όπως οδικά σήματα, κολώνες φωτισμού, γέφυρες, οδικές διαγραμμίσεις, κλπ., συνήθως αναπαρίστανται ως σαφείς οντότητες στις ακολουθίες των εικόνων και επομένως διακρίνονται εύκολα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη δόμηση μίας χωρικής βάσης δεδομένων.

### **6.1.1 Αυτόματη εξαγωγή ορθογώνιων οδικών σημάνσεων**

Η εργασία που παρουσιάζεται ως παράδειγμα στη συνέχεια, αναφέρεται σε έναν αυτόματο αλγόριθμο επανακατασκευής διαφορετικών τύπων ορθογώνιων οδικών σημάνσεων από στερεοζεύγη ενός Κινητού Συστήματος Χαρτογράφησης (B. Soheilian et al, 2007).

Οι οδικές σημάνσεις αποτελούν χρήσιμα χαρακτηριστικά για την πλειονότητα των αστικών δρόμων, το δε μέγεθος και το σχήμα τους υπόκεινται σε αυστηρές προδιαγραφές. Στην αναφερόμενη εργασία, η **επανακατασκευή οδικών σημάνσεων** πραγματοποιείται με τη **συνταύτιση** οδικών σημάνσεων, που προέρχονται από επίγειες εικόνες ενός *MMS*, με τις ίδιες σημάνσεις που προέρχονται από αεροφωτογραφίες.

Οι οδικές σημάνσεις αποτελούν, εκτός από τα όρια των δρόμων, τα μοναδικά χαρακτηριστικά που μπορούν να προσδιορίσουν έναν δρόμο με ακρίβεια μερικών εκατοστών και να προσφέρουν χρήσιμη πληροφορία για τον αριθμό των λωρίδων κυκλοφορίας και το πλάτος τους. Επιπλέον, υπάρχει μία αυξανόμενη ανάγκη για βάσεις δεδομένων που να περιέχουν τέτοια στοιχεία, για χρήσεις σε εφαρμογές αυτόνομης πλοήγησης και συστήματα οδηγικής αρωγής.

### 6.1.1.1 Συστατικά του χρησιμοποιούμενου Κινητού Συστήματος Χαρτογράφησης

Το χρησιμοποιηθέν Κινητό Σύστημα Χαρτογράφησης ονομάζεται *Stereopolis* και αναπτύχθηκε στο εργαστήριο *MATIS* του *Institut Geographique National*. Περιλαμβάνει τρία στερεοσκοπικά ζεύγη ψηφιακών μηχανών ανάλυσης 4000×4000 pixels. Οι δύο οπίσθιες κάμερες σχηματίζουν μία οριζόντια στερεοσκοπική βάση (1.5 m), επιτρέποντας την στερεο-απόδοση αστικών χαρακτηριστικών (στύλων φωτισμού, φωτεινών σηματοδοτών, οδικών σημάτων, δέντρων, κλπ.), ενώ οι δύο κατακόρυφες βάσεις (1 m), μία σε κάθε πλευρά του οχήματος, παρέχουν λήψεις των προσόψεων των κτιρίων και στις δύο πλευρές του δρόμου. Οι έξι φωτομηχανές είναι συγχρονισμένες με ακρίβεια 10μs και παρέχουν πολύ υψηλή ποιότητα εικόνων (SNR=300) με δυναμική ταχύτητα 12 bits, που είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αντιμετώπιση των αστικών μεταβολών του φωτισμού και των σκιάσεων. Το σύστημα είναι επιπλέον εξοπλισμένο με δύο κεραίες GPS. Τα εισαγόμενα στον αλγόριθμο επανακατασκευής οδικών σημάνσεων είναι τα στερεοζεύγη, που παρέχονται από την οριζόντια βάση του *Stereopolis*, στην πλήρη τους ανάλυση (Εικόνα 6.1 (b)). Η βαθμονόμηση των φωτομηχανών (εστιακή απόσταση, πρωτεύον σημείο και πολωνυμικοί συντελεστές ακτινικής διαστρόφης) και του διανύσματος εκκεντρότητας των βάσεων υπολογίζονται *a priori* και θεωρούνται σταθερά.

Στο σύστημα *Stereopolis* η εικόνα είναι το βασικό υποσύστημα για την εκτίμηση της σχετικής και απόλυτης θέσης, ενώ το *GPS* παρέχει μία πολύ προσεγγιστική αρχική επίλυση. Η γεωαναφορά παρέχεται μέσω ενός φωτοτριγωνισμού με δέσμες, που συνδυάζει μετρήσεις από εικόνες (σημεία σύνδεσης), μετρήσεις *GPS* με τις αβεβαιότητές τους και γεωμετρικές σχέσεις σε αντικείμενα επίγειου ελέγχου: σημεία τομής οριζόντιων και κάθετων γραμμών και ακριβείς οδικές γραμμές (π.χ. διαβάσεις πεζών), που προέρχονται από μία εξωτερική βάση δεδομένων. Ο σκοπός είναι η επίτευξη μιας ποιότητας γεωαναφοράς, που να επιτρέπει μετρήσεις εικόνων στις τρεις διαστάσεις με σχετική και απόλυτη ακρίβεια εκατοστού.



Εικόνα 6.1 (α) Το MMS Stereopolis (β) Οι εικόνες που αποκτώνται από τις κατακόρυφες (πάνω) και τις οριζόντιες (κάτω) βάσεις (N. Paparoditis et al, 2005)

#### 6.1.1.2 Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας

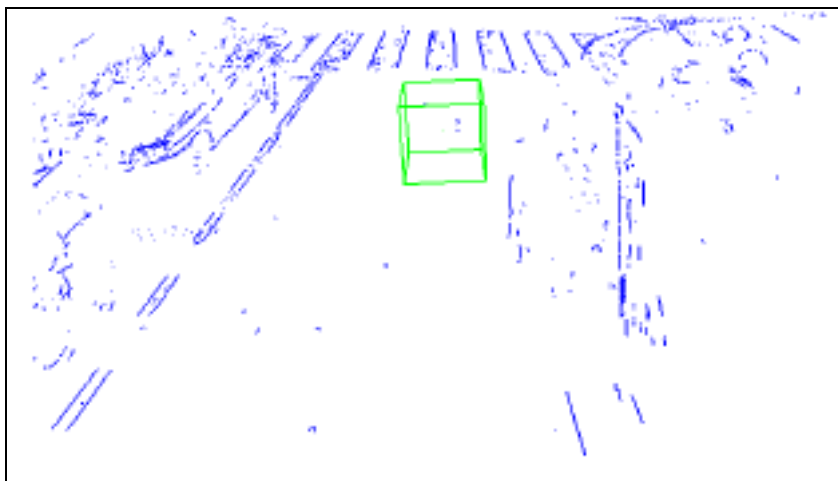
Η διαδικασία, που ακολουθείται στην περιγραφόμενη εφαρμογή, αποτελείται από **τρία βήματα**:

- (α) αρχικά πραγματοποιείται **επανακατασκευή** των αλυσίδων των τρισδιάστατων ακμών (*3D edge chain reconstruction*) μέσω ενός δυναμικού προγράμματος βελτιστοποίησης της συνταύτισης ομόλογων επιπολικών γραμμών (*matching conjugate epipolar lines*),
- (β) στη συνέχεια μέσω ενός βήματος **εντοπισμού** (*roadmark detection*) αναγνωρίζεται μία υπογραφή διακεκομμένων γραμμών (*dashed-line signature*) και παρέχεται ένα σύνολο υποψηφίων ευθύγραμμων τμημάτων και
- (γ) τέλος, μέσω ενός βήματος **μοντελοποίησης** (*strip modelling*) αναδομείται κατάλληλα κάθε λωρίδα των εντοπιζόμενων διακεκομμένων γραμμών.

Το βήμα της **επανακατασκευής**, που βασίζεται στην συνταύτιση των ακμών μεταξύ των στερεο-εικόνων συνοψίζεται στα εξής:

- Εντοπισμός ακμών σε κάθε εικόνα
- Περιορισμός του παραθύρου συνταύτισης σε μία περιοχή γύρω από το δρόμο
- Χρήση του βαθμού συσχέτισης για τον υπολογισμό της αρχικής τιμής συνταύτισης
- Τελική τιμή συνταύτισης, που υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη δομική συνέχεια

- Συνταύτιση με ελαχιστοποίηση της συνολικής τιμής με τη χρήση δυναμικού προγραμματισμού
- Τελικά, προσδιορισμός μίας ομάδας αλυσίδων τρισδιάστατων ακμών (Εικόνα 6.2), από την οποία με μία διαδικασία πολυγωνοποίησης εκτιμώνται τα γραμμικά τμήματα.

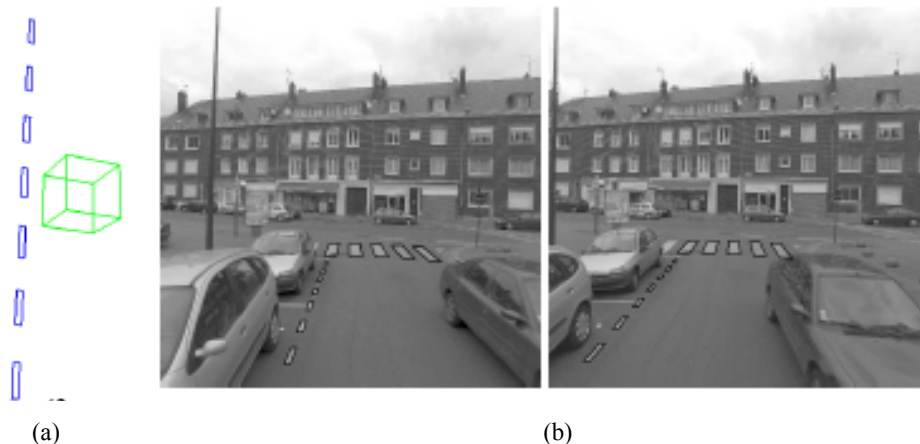


Εικόνα 6.2 Οι ανακατασκευασμένες τρισδιάστατες ακμές (Soheilian et al, 2007)

Κατά το βήμα του **εντοπισμού** των οδικών σημάνσεων γίνεται προσπάθεια για τον εντοπισμό των τεσσάρων γωνιών κάθε λωρίδας. Επίσης, αν μία μη λωρίδα εμποδίζεται μερικώς από αυτοκίνητα ή πεζούς, ο εντοπισμός αποτυγχάνει και τότε η λύση είναι η εύρεση κάθε ζεύγους παράλληλων πλευρών και η ανακατασκευή των γωνιών με τη διασταύρωση των πλευρών των ακμών. Προκειμένου να περιοριστεί η πολυπλοκότητα, όλα τα ανακατασκευασμένα γραμμικά τμήματα προβάλλονται σε έναν περίπου επίπεδο δρόμο και το βήμα του εντοπισμού πραγματοποιείται στο διδιάστατο χώρο. Το αποτέλεσμα είναι υποψήφια ομάδες γραμμικών τμημάτων.

Το βήμα της **μοντελοποίησης** αποτελείται από δύο βασικές εργασίες:

- τη μοντελοποίηση των δύο μεγάλων πλευρών μίας λωρίδας σχήματος παραλληλόγραμμου, εφόσον οι υποψήφια λωρίδες ικανοποιούν το γνωστό μέγεθος και
- τη βελτίωση του μοντέλου με την αναζήτηση μη ανακατασκευασμένων εγκάρσιων πλευρών (Εικόνα 6.3).



**Εικόνα 6.3** (α) Το τελικό τρισδιάστατο ανακατασκευασμένο μοντέλο των οδικών σημάνσεων (β) Η προβολή του στερεοζεύγους εικόνων του μοντέλου (Soheilian et al, 2007)

### 6.1.1.3 Εκτίμηση αποτελεσμάτων

Για την εκτίμηση της ορθότητας και της ακρίβειας του αλγορίθμου πραγματοποιούνται δύο ειδών έλεγχοι:

- (α) **εκτίμηση της γεωμετρικής ακρίβειας** με τοπογραφικές μεθόδους, ακρίβειας μισού εκατοστού, με τον υπολογισμό της τιμής του *RMS* για τις ανασκευασμένες συντεταγμένες των οδικών σημάνσεων και
- (β) **εκτίμηση πληρότητας**, όπου συνυπολογίζονται οι επιτευχθέντες εντοπισμοί, η ποιότητά τους και οι λάθος εντοπισμοί (*false alarm rates*).

Η γεωμετρική ακρίβεια της μεθόδου, για όλες τις ανακατασκευασμένες λωρίδες διακεκομμένων γραμμών, αντιστοιχεί περίπου σε 2 cm. Για την εκτίμηση πληρότητας, ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε μία ομάδα 150 διαδοχικών στερεοζευγών ανάλυσης 4000×4000 *pixels* και παρέχει ευοίωνα αποτελέσματα, με ένα βαθμό εντοπισμού μεγαλύτερο του 86%.

Ο αλγόριθμος και η διαδικασία, που περιγράφηκε, είναι αρκετά γενικός και μπορεί να εφαρμοστεί στην επανακατασκευή και άλλων επίπεδων παραλληλογράμμων (π.χ. παραθύρων) και να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή μιας πλήρους βάσης δεδομένων οδικών σημάνσεων για χρήσεις ακριβούς γεωαναφοράς *MMS* και αυτόνομων εργασιών πλοήγησης.

### 6.1.2 Άλλες εφαρμογές

Οι εφαρμογές των *MMS* εκτείνονται και σε άλλους τομείς εκτός από τις αυστηρά χαρτογραφικές εφαρμογές. Έτσι, λόγω του ότι μπορούν να καλύψουν ταχύτατα μεγάλες περιοχές, διευκολύνουν την παραγωγή **μεγάλης κλίμακας τρισδιάστατων μοντέλων**, που είναι χρήσιμα σε εφαρμογές στρατιωτικές, τουριστικές κλπ. Αυτή η εργασία γίνεται περισσότερο αποδοτική όταν το *MMS* συνδυάζει σαρωτές *laser* με μηχανές λήψης εικόνων (*frame imagers*). Αξίζει να αναφερθεί ότι το σύστημα *Stereopolis* παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές για την **ανακατασκευή** πολύ λεπτομερούς **γεωμετρίας προσόψεων** και υψής κτιρίων.

Οι γεωαναφερμένες εικόνες ενός *MMS* μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και αυτόνομα, ακόμα και χωρίς την εξαγωγή επιπρόσθετης χωρικής πληροφορίας από αυτές. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές διαδικτύου, όταν κατά την διαδικασία αναζήτησης κάποιας επιχείρησης από το χρήστη, παρέχεται και η όψη του κτιρίου της επιχείρησης.

## 6.2 Εφαρμογές στον ελλαδικό χώρο

Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται αναφορά σε εφαρμογές των Κινητών Συστημάτων Χαρτογράφησης, που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον ελλαδικό χώρο.

### 6.2.1. Μητρώο οδών

Το Μητρώο Οδών είναι μια ηλεκτρονική Βάση Δεδομένων των πραγματικών (υλοποιημένων) στοιχείων των οδών, που, σε συνδυασμό με την οπτική τους απεικόνιση, αποτελεί πλήρη πηγή πληροφοριών των στοιχείων των υφισταμένων οδικών χαράξεων.

Μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές του Μητρώου Οδών είναι η **πρόληψη των ατυχημάτων** διότι, με συνδυασμούς των στοιχείων που περιέχονται στο Μητρώο, είναι δυνατός ο εντοπισμός οδικών τμημάτων και περιοχών όπου είναι πιθανό να συμβούν ατυχήματα (Βανιάτου & Καρακαϊδού & Ματσούκης, 2005). Οι συνδυασμοί αυτοί γίνονται μέσω ειδικού προγράμματος H/Y, που συσχετίζει τα χαρακτηριστικά που «γεννούν» ατυχήματα. Παραδείγματα τέτοιων συσχετισμών είναι η συνύπαρξη:



- α) Ακτίνας καμπυλότητας (σε οριζοντιογραφία) μικρότερης από 180 μ. με λανθασμένη επίκλιση και μεγάλη κατά μήκος κλίση.
- β) Διαφορετικών ακτίνων καμπυλότητας μέσα στην ίδια στροφή με λανθασμένη επίκλιση και έλλειψη ορατότητας.
- γ) Μικρής ακτίνας κυρτής κατακόρυφης καμπύλης σε μηκοτομή με καμπύλη σε οριζοντιογραφία και έλλειψη ορατότητας.
- δ) Ισόπεδης διασταύρωσης με καμπύλη σε οριζοντιογραφία ή σε μηκοτομή.
- ε) Ευθύγραμμου τμήματος μεγάλου μήκους πριν από είσοδο σε οικισμό ή πριν από κλειστή στροφή.

Επίσης, το Μητρώο Οδών αποτελεί απαραίτητο εργαλείο για τον προγραμματισμό και την παρακολούθηση της συντήρησης των οδικών έργων, καθώς και για την ιεράρχηση προτεραιοτήτων, την κατανομή των πιστώσεων και την στήριξη αποφάσεων υλοποίησης και χρηματοδότησης οδικών έργων.

Η χώρα μας στερείται ενός τέτοιου μητρώου και η σύστασή του είναι προϋπόθεση για κάθε περαιτέρω αναπτυξιακή πορεία των χερσαίων μεταφορών και ειδικότερα των οδικών. Για τον λόγο αυτό έχει αποφασιστεί και ενταχθεί στο ισχύον και επόμενο αναπτυξιακό πρόγραμμα η σύσταση του Μητρώου Οδών. Ήδη, στα πλαίσια του προγράμματος «Κοινωνία της Πληροφορίας», έχει προκηρυχθεί ένα πιλοτικό πρόγραμμα εφαρμογής ενός Μητρώου Οδών προϋπολογισμού 1 εκατ. Ευρώ, καθώς και ένα πρόγραμμα *GIS*, ενώ για τα επόμενα έτη προβλέπονται διαδοχικές προκηρύξεις για διάφορα τμήματα του Εθνικού Οδικού Δικτύου.

### **6.2.1.1 Περιεχόμενα Μητρώου Οδών**

Το Μητρώο Οδών περιέχει σε συνεχή απεικόνιση τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (Βανιώτου & Καρακαϊδού & Ματσούκης, 2005):

- Οριζοντιογραφία
- Μηκοτομή
- Στοιχεία διατομών :
  - Πλάτος οδού
  - Εγκάρσιες κλίσεις – επικλίσεις
  - Ερείσματα
  - Τάφρους

- Ορύγματα – επιχώματα
- Νησίδες
- Διασταυρώσεις (ισόπεδες και ανισόπεδες)
- Μεγάλα τεχνικά έργα (γέφυρες, σήραγγες)
- Κατακόρυφη σήμανση
- Οριζόντια σήμανση (διαγραμμίσεις)
- Εξοπλισμό ασφαλείας (στηθαία ασφάλεια, οριοδείκτες κλπ.)
- Άμεσο οδικό περιβάλλον (οικισμούς, καλλιέργειες κλπ.)

Για την περαιτέρω επεξεργασία τόσο των στοιχείων μελέτης της οδού και των τεχνικών της όσο και του σχετικού εξοπλισμού, το Μητρώο Οδών μπορεί και πρέπει να συνδυάζεται με Βάσεις Δεδομένων και με αρχεία πληροφοριών που περιέχουν στοιχεία όπως:

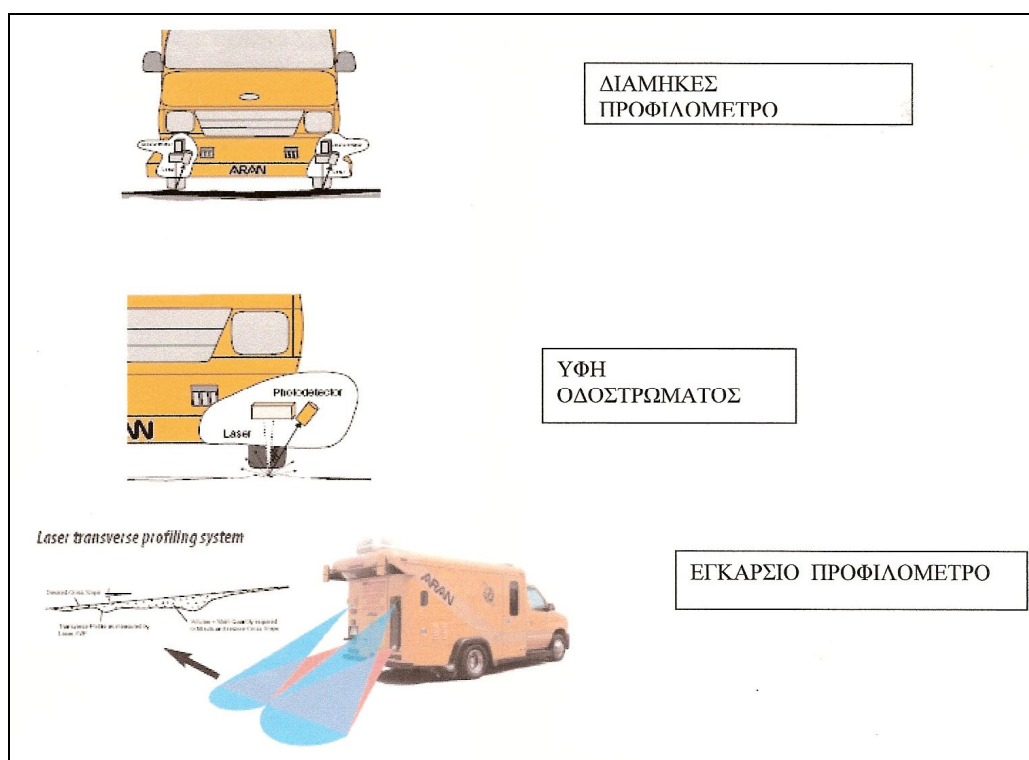
- Επιφανειακή κατάσταση των οδοστρωμάτων των οδών
- Κατασκευαστικά στοιχεία των οδοστρωμάτων
- Αρχείο μικρών τεχνικών έργων
- Αρχείο υλοποιηθεισών επεμβάσεων και συντηρήσεων
- Βάση Δεδομένων οδικών Τροχαίων Ατυχημάτων (της Ε.Σ.Υ.Ε. και του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.)
- Στοιχεία και πληροφορίες των Περιφερειακών Υπηρεσιών σχετικά με τα τροχαία ατυχήματα της περιοχής τους
- Στοιχεία της Τροχαίας, του Ε.Κ.Α.Β., της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας
- Κυκλοφοριακές Μετρήσεις

#### **6.2.1.2 Σύστημα Καταγραφής Στοιχείων Οδών - Απαιτήσεις του Συστήματος**

Το Σύστημα Καταγραφής πρέπει να διασφαλίζει την απαιτούμενη ακρίβεια ενός Μητρώου Οδών και να είναι παράλληλα αξιόπιστο στην πληρότητα των στοιχείων. Η σύσταση της Βάσης Δεδομένων της οδού επιτυγχάνεται με την **συνέργεια των παρακάτω μετρητικών συστημάτων**:

1. Σύστημα εντοπισμού θέσης, που αποτελείται από ένα δορυφορικό σύστημα (GNSS) σε συνδυασμό με ένα αδρανειακό σύστημα, καθώς και ένα σύστημα χιλιομέτρησης.
2. Φωτογραμμετρικό - Φωτοερμηνευτικό σύστημα ποιοτικής και ποσοτικής καταγραφής στοιχείων διατομής και εξοπλισμού οδού.

3. Κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας στοιχείων καταγραφής των παραπάνω συστημάτων.
4. Πλατφόρμα μεταφοράς των παραπάνω συστημάτων (κατάλληλα διασκευασμένο και εξοπλισμένο όχημα τύπου VAN).
5. Για τη συλλογή στοιχείων του οδοστρώματος απαιτείται η χρήση διαμηκών και εγκάρσιων προφίλομετρων, υψής οδοστρώματος σε συνδυασμό με φωτογραμμετρική - φωτοερμηνευτική καταγραφή ρηγματώσεων και λοιπών φθορών οδοστρώματος (Εικόνα 6.4).



**Εικόνα 6.4** Συλλογή στοιχείων οδοστρώματος(<http://www.roadware.com/>)

Για την καταγραφή του οδικού χώρου το σύστημα οφείλει να περιλαμβάνει έναν αριθμό από ψηφιακές κάμερες (π.χ. 6) προσανατολισμένες προς την κίνηση του οχήματος, καθώς και πλάγιες και οπίσθιες ψηφιακές κάμερες με τις οποίες καταγράφεται ο πλάγιος οδικός χώρος του οχήματος, που δεν περιλαμβάνεται στο οπτικό πεδίο των προς τα εμπρός προσανατολισμένων καμερών. Η καταγραφή των καμερών οφείλει να είναι ρυθμιζόμενη ανάλογα με τα στοιχεία και τις περιπτώσεις καταγραφής, ώστε να μην καταγράφονται και καταχωρούνται άχρηστα στοιχεία, που θα επιβαρύνουν άνευ λόγου την βάση δεδομένων

(π.χ. πλάγια κάμερα κατά μήκος ακτογραμμής, που καταγράφει θαλάσσιο περιβάλλον κλπ.).

Η καταγραφή πρέπει να είναι επίσης άμεσα συνδεδεμένη με διάφορα λογισμικά για την επεξεργασία, αναγνώριση, καταγραφή και καταχώρηση των διαφόρων θεματικών ενοτήτων, καθώς και με το πολλαπλό σύστημα εντοπισμού θέσης του οχήματος για τον άμεσο προσδιορισμό της θέσης της οποιαδήποτε θεματικής ενότητας με την προδιαγεγραμμένη ακρίβεια. Ειδικότερα, για την καταγραφή των ποικίλων φθορών του οδοστρώματος με δυνατότητα μετρητικής καταγραφής διαφόρων τύπων ρωγμών του οδοστρώματος, χρησιμοποιούνται και κατακόρυφες ψηφιακές κάμερες υπερυψηλής ανάλυσης για την αναγνώριση και μέτρηση ρωγμών πλάτους 1 mm.

Για τη φάση της συλλογής των στοιχείων τίθενται οι παρακάτω **απαιτήσεις**:

- Συνδυασμός τριών υποσυστημάτων, όπως έχουν προαναφερθεί:
  - (α) δορυφορικός εντοπισμός (θέση, ταχύτητα, κατεύθυνση),
  - (β) αδρανειακό σύστημα με 6 βαθμούς ελευθερίας και
  - (γ) σύστημα χιλιομέτρησης
- Διορθώσεις δορυφορικού σήματος με μέθοδο διαφορικού εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο
- Σύστημα αφομοίωσης και απόσβεσης σφαλμάτων λόγω κινηματικών ατελειών ή ανεπιθύμητων μετατοπίσεων του αμαξώματος του οχήματος
- Εξάλειψη χρόνου γωνιακής επιτάχυνσης αδρανειακού συστήματος (spin-up time)
- Αρχικός προσανατολισμός και προσαρμογή στη χάραξη της οδού εν κινήσει
- Αυτοβαθμονόμηση του υποσυστήματος χιλιομέτρησης
- Υστέρηση σημάτων μικρότερη από μερικά msec
- Συνδέσεις γραμμικές, ψηφιακές και Ethernet
- Καταγραφή παλμών χιλιομέτρησης, για παράδειγμα με ρυθμό 2000 ανά περιστροφή τροχού
- Ελάχιστη συχνότητα δορυφορικού σήματος 1 Hz
- Ελάχιστη συχνότητα λήψης δεδομένων αδρανειακού συστήματος 100 Hz
- Ελάχιστη ακρίβεια κλίσεων οριζόντιων και κατακόρυφων αξόνων οχήματος, της τάξεως π.χ. των 0.020 σε πραγματικό χρόνο διαφορικού εντοπισμού
- Ακρίβεια αζιμουθίου καλύτερη από 0.020g ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος και τα δυναμικά δεδομένα

- Ακρίβεια εκ των υστέρων (post-processing) προσδιορισμού της θέσης σημείων καλύτερη από 15 cm, ενώ η ακρίβεια προσδιορισμού του σημείου σε πραγματικό χρόνο να μην είναι χειρότερη από λίγα μέτρα (π.χ. 1.5 m) με διακοπή δορυφορικού σήματος για μερικά δευτερόλεπτα (π.χ. 60 sec)
- Αυτοδιαγνωστικό Σύστημα Ποιοτικού Ελέγχου πριν τις εργασίες πεδίου, τα αποτελέσματα του οποίου καταγράφονται σε ειδικό αρχείο για να ληφθούν ενδεχομένως υπόψη σε διαδικασία υπολογισμών εκ των υστέρων
- Μονο- ή πολυ- εικονική ψηφιακή απόδοση εικόνων βίντεο
- Υπερυψηλή διακριτική ικανότητα εικόνας (ανάλυσης τουλάχιστον 1920x1080 *pixels*)
- Συντονισμός μετρητικής καταγραφής εικόνας με τα λοιπά στοιχεία και υποσυστήματα θέσης (γεωαναφορά)

### 6.2.1.3 Λογισμικό

Το σύστημα συλλογής στοιχείων θα πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο λογισμικό με βάση το οποίο θα γίνεται η επεξεργασία των στοιχείων και θα πραγματοποιείται η γεωαναφορά τους. Με βάση αυτό το λογισμικό θα μπορούν:

- να εξάγονται οι συντεταγμένες X, Y, Z οποιουδήποτε σημείου της καταγραφόμενης εικόνας (θεματικές οντότητες/ενότητες)
- να αναγνωρίζονται αυτόματα χαρακτηριστικά στοιχεία του εξοπλισμού της οδού και κυρίως η μορφή και ο τύπος της οριζόντιας και κατακόρυφης σήμανσης, τύπος σηματοδότη, κράσπεδα κλπ.

Τα στοιχεία εξόδου μπορούν εύκολα να καταχωρηθούν σε αρχεία που αναγνωρίζονται από τα τρέχοντα GIS λογισμικά, προκειμένου να γίνεται άμεση καταχώρηση σε αυτά και η υπηρεσία να είναι σε θέση να προβαίνει σε άμεση επεξεργασία των δεδομένων του GIS. Στην Εικόνα 6.5 φαίνονται χαρακτηριστικά οι δυνατότητες που πρέπει να έχει ένα τέτοιο λογισμικό, με βάση το οποίο προκύπτουν τα μετρητικά δεδομένα θέσης της οποιαδήποτε θεματικής οντότητας (X.Θ. και συντεταγμένες X, Y, Z), τα χαρακτηριστικά της (μορφή, τύπος, χρώμα, διαστάσεις), καθώς και η ενδοεπικοινωνία και η συσχέτιση με άλλα υποσυστήματα συλλογής στοιχείων, αλλά και με άλλα λογισμικά διαχείρισης ενός μητρώου οδών (π.χ. με ένα GIS).



## 6.2.2. Άλλες εφαρμογές

Προς την ίδια κατεύθυνση, της πρόληψης δυστυχημάτων, προβλέπεται να συμβάλλει και η μελλοντική λειτουργία του **ευρωπαϊκού συστήματος δορυφορικής πλοήγησης Galileo**. Το *Galileo*, αναμένεται να ξεπεράσει σε αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία το αμερικανικό παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης GPS (Global Positioning System). Από το 2012 το Galileo θα παρέχει υπηρεσίες εντοπισμού θέσης, ραδιοπλοήγησης και χρονικού προσδιορισμού στην παγκόσμια αγορά, οι οποίες προβλέπεται να ανοίξουν νέες προοπτικές στους διάφορους εμπορικούς τομείς και να βελτιώσουν την καθημερινή ζωή των πολιτών σ' όλο τον πλανήτη.

Μεταξύ, λοιπόν, των τομέων στους οποίους θα επικεντρωθεί το **Galileo** είναι και η **ασφάλεια στις οδικές μεταφορές**, στα πλαίσια των παραμέτρων που τέθηκαν από την πρωτοβουλία *eSafety*, η οποία εγκαινιάστηκε το 2002 από την Κομισιόν (E.E.) και την αυτοκινητοβιομηχανία, και αποβλέπει στην ανάληψη ορισμένων δράσεων σε κοινοτικό επίπεδο για μείωση των οδικών θανάτων. Προς αυτή την κατεύθυνση, η Κομισιόν βγήκε προς αναζήτηση νέων ιδεών για τη βελτιστοποίηση της ακρίβειας και πιστότητας των ψηφιακών οδικών χαρτών πλοήγησης που θα προσφέρονται από το Galileo (<http://www.sdtv.gr/news-1177.html>). Μια ελληνική εταιρεία που εδρεύει στα Γιάννενα, η "**NIKI ΜΕΠΕ**" υπέγραψε τα συμβόλαια με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) και έχει ξεκινήσει την υλοποίηση της πρώτης φάσης του έργου *ROADSCANNER*. Το έργο αφορά την μελέτη σκοπιμότητας για την δημιουργία ειδικού οχήματος δημιουργίας οδικών χαρτών υψηλής ακριβείας και πιστότητας με την αξιοποίηση του *EGNOS* (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) ([http://www.nikitec.gr/News/news\\_gr.htm](http://www.nikitec.gr/News/news_gr.htm)).

Το **ειδικό όχημα χαρτογράφησης ROADSCANNER** («*a Galileo enabled probe vehicle for generation of precise digital maps*»), εφοδιασμένο με ειδικές συστάδες σαρωτών *laser*, κάμερα, αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας και με δυνατότητα καταγραφής σημείων αναφοράς, θα καταγράφει όλα τα απαραίτητα στοιχεία, τα οποία θα επεξεργάζονται με τη βοήθεια λογισμικού, εξάγοντας τη γεωμετρική υφή του οδοστρώματος. Παράλληλα, μια μεθοδολογία επεξεργασίας σημάτων δορυφορικής και αδρανειακής πλοήγησης (που αξιοποιεί για τα μεν πρώτα το ευρωπαϊκό σύστημα δορυφορικής πλοήγησης, Galileo, και τα *GPS/EGNOS*, ενώ για τα δεύτερα αισθητήρες εδάφους), σε συνδυασμό με έναν ειδικό αλγόριθμο που βελτιστοποιεί επαναληπτικά τη διαδρομή, καταγράφοντας τη διαφορεική τροχιά ως προς τα αρχικά σημεία αναφοράς, δίνει

τη δυνατότητα της μέγιστης ακρίβειας καταγραφής (εκατοστού) του οδικού δικτύου. Και όλα αυτά, ενώ το όχημα κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη των 60 χλμ./ώρα, προκαλώντας ελάχιστη διαταραχή της κυκλοφορίας και χωρίς, φυσικά, να είναι αναγκαία η διακοπή της (<http://library.techlink.gr/4t/article-main.asp?mag=1&issue=580&article=12105>).

Είναι προφανή τα **οφέλη** της καινοτόμου αυτής μεθοδολογίας δημιουργίας της νέας γενιάς ψηφιακών χαρτών, που θα κατασκευαστούν με οδηγό το όχημα και θα καλύψουν το κενό των σημερινών συστημάτων. Με κατάλληλη επεξεργασία των γεωμετρικών δεδομένων και της υψής και των χαρακτηριστικών, εν γένει, του οδοστρώματος, μπορούν να δημιουργηθούν ψηφιακοί, τρισδιάστατοι χάρτες που θα αξιοποιηθούν από τα τμήματα έρευνας και εξέλιξης των αυτοκινητοβιομηχανιών σε πλήθος «έξυπνων» συστημάτων ασφαλείας, όπως τα νέας γενιάς συστήματα οδηγικής αρωγής *ADAS (Advanced Driver Assistance Systems)*, σε εφαρμογές έρευνας και διάσωσης, στην ανάλυση και στην κατανόηση των αιτιών πρόκλησης ατυχημάτων σε συγκεκριμένα σημεία του οδικού δικτύου, σε συστήματα διαχείρισης κυκλοφορίας, ακόμα και στη μείωση της κατανάλωσης φορτηγών και βαρέων οχημάτων.

Ειδικά στον τομέα των κατασκευαστών αυτοκινήτων, πέραν των διαδραστικών συστημάτων ενεργητικής ασφάλειας, σε συνδυασμό με εφαρμογές ψηφιακής μηχανικής, όπως της δυναμικής πολλαπλών σωμάτων ή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, προκύπτουν δυνατότητες προσομοίωσης της οδικής συμπεριφοράς των αυτοκινήτων υπό διάφορες συνθήκες, πάντα βασισμένες σε πραγματικά μοντέλα δρόμων. Βάσει αυτών, μπορούν, για παράδειγμα, να προκύψουν λεπτές, αλλά σημαντικές εθνικές διαφοροποιήσεις, μεταξύ άλλων, στο στήσιμο των αναρτήσεων, στις σχέσεις μετάδοσης και στη χαρτογράφηση του κινητήρα, ανάλογα με τη χώρα πώλησης κάθε μοντέλου. Και εδώ, βέβαια, η ακρίβεια των εξαγόμενων στοιχείων εξαρτάται απόλυτα από την ποιότητα των αρχικών δεδομένων, γεγονός που επιβάλλει την ύπαρξη όσο το δυνατόν αναλυτικότερων και, κατά συνέπεια, ρεαλιστικότερων ψηφιακών χαρτών (<http://library.techlink.gr/4t/article-main.asp?mag=1&issue=580&article=12105>).



# 7

## ***ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ***

Στην εργασία αυτή επιχειρήθηκε μία συνολική προσέγγιση των Κινητών Συστημάτων Χαρτογράφησης και συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των αρχών λειτουργίας τους, των λειτουργούντων συστημάτων και των αναμενόμενων ακριβειών τους, των πηγών των σφαλμάτων του συστήματος και η αναφορά του πεδίου εφαρμογών τους στο διεθνή και στον ελλαδικό χώρο. Η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων κρίνεται σημαντική, καθώς οι υπάρχουσες κλασικές μέθοδοι απόκτησης γεωχωρικών δεδομένων δεν ικανοποιούν πλέον τις τρέχουσες ανάγκες, είτε επειδή είναι πάρα πολύ χρονοβόρες, ή απαιτούν μεγάλο αριθμό ανθρώπινου δυναμικού και συχνά δεν παρέχουν τις πληροφορίες που απαιτούνται.

### **7.1 Προκλήσεις**

Παρά τις αποδεδειγμένες δυνατότητες και την όλο και περισσότερο διαδεδομένη υιοθέτηση των Κινητών Συστημάτων Χαρτογράφησης, υπάρχουν τομείς όπου μπορούν ακόμα να γίνουν σημαντικές **βελτιώσεις**.

Ένας από αυτούς τους τομείς είναι η **αυτοματοποιημένη εξαγωγή χαρακτηριστικών γνωρισμάτων** από τηλεπισκοπικά δεδομένα, που αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους ερευνητικούς τομείς στην τεχνολογία κινητής χαρτογράφησης. Εντούτοις, οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα, αποτελούν, σχεδόν όλες, ειδικές λύσεις, που λειτουργούν μόνο με δεδομένα από έναν ενιαίο τηλεπισκοπικό δέκτη και για

έναν περιορισμένο αριθμό χαρακτηριστικών γνωρισμάτων, που συλλαμβάνονται σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα και από συγκεκριμένες γεωμετρικές δεκτών.

Οι περισσότερες τεχνικές, συνήθως, απαιτούν κάποιο ποσοστό **ανθρώπινου ελέγχου**. Οι πιο προηγμένες τεχνικές εξαγωγής χαρακτηριστικών γνωρισμάτων, που απαιτούν από τους χρήστες μικρότερο ποσοστό παρέμβασης και αλληλεπίδρασης, δημιουργούν ακόμα περισσότερα πεδία εφαρμογών για τις τεχνολογίες κινητής χαρτογράφησης. Πολλές από τις εξελίξεις σε αυτήν την περιοχή απαιτούν τη συμμετοχή ερευνητών στα πεδία της ρομποτικής, της τεχνητής νοημοσύνης και τους υπολογιστές, γεγονός που ωφελεί αναμφισβήτητα τα Κινητά Συστήματα Χαρτογράφησης.

Μια άλλη περιοχή των *MMS*, όπου υπάρχει περιθώριο για βελτίωση, αφορά τη **διανομή** των δεδομένων (*sharing of data*) μεταξύ του σταδίου επεξεργασίας των δεδομένων πλοήγησης και εκείνου της επεξεργασίας των τηλεπισκοπικών δεδομένων. Κατά την παρούσα περίοδο, η διανομή των δεδομένων κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας γίνεται σε μάλλον επιφανειακό επίπεδο: τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων πλοήγησης χρησιμοποιούνται στη γεωαναφορά των τηλεπισκοπικών δεδομένων και στη συνέχεια οι χαρτογραφικές πληροφορίες που ενδιαφέρουν εξάγονται από τα τηλεπισκοπικά δεδομένα. Πιο προηγμένες στρατηγικές κατά τις οποίες η διανομή των δεδομένων θα πραγματοποιούνταν στο στάδιο των μετρήσεων θα μπορούσαν να παρέχουν βελτιωμένη ακρίβεια και αξιοπιστία.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι το **κόστος** και η μείωσή του πρέπει να αναζητηθεί μέσα από τις τεχνολογίες νέων δεκτών. Ένα εξαιρετικά ακριβές αδρανειακό σύστημα αποτελεί το δαπανηρότερο τμήμα του συστήματος και το υψηλό του κόστος καθιστά ολόκληρο το σύστημα σχετικά ακριβό. Εάν, όμως, η υψηλή ακρίβεια δεν είναι απαραίτητη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαμηλότερου επιπέδου *INS* και γυροσκόπια, προκειμένου να καταστεί το σύστημα πιο προσιτό. Οι φωτομηχανές υψηλής ανάλυσης είναι διαθέσιμες, αλλά είναι μάλλον ακριβές. Επιπλέον, οι εικόνες που αποκτώνται από τις φωτομηχανές υψηλής ανάλυσης καταλαμβάνουν ένα μεγάλο τμήμα μνήμης και αποθηκευτικού χώρου.

Ένας άλλος περιορισμός των Κινητών Συστημάτων Χαρτογράφησης σχετίζεται με την **αποκλειστικότητά** τους. Με εξαίρεση μερικά εναέρια συστήματα απεικόνισης, τα περισσότερα συστήματα αποτελούν δημιουργίες επί παραγγελία, που τα διαχειρίζονται οι εταιρείες ή τα ιδρύματα που τα δημιούργησαν. Δεν υπάρχει κανένα «ετοιμοπαράδοτο» *MMS* που μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα σε μια αυθαίρετη πλατφόρμα. Εάν ήταν

διαθέσιμο ένα οικονομικά προσιτό Κινητό Σύστημα Χαρτογράφησης, είναι πιθανό να υλοποιούνταν νέες εφαρμογές που ακόμα δεν έχουν ανακαλυφθεί. Στην ιδανική περίπτωση, ένα σύστημα αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα και δέχεται διαφορετικούς δέκτες πλοήγησης και αποκρυσμένους δέκτες σύμφωνα με τις απαιτήσεις των πελατών. Αυτό το έτοιμο προς χρήση (*plug and play*) πλαίσιο εργασίας θα μπορούσε να επεκταθεί και στο λογισμικό, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει με βέλτιστο τρόπο τα δεδομένα από όλους τους διαθέσιμους δέκτες.

## 7.2 Επίλογος

Σε αντίθεση με την έντονη ερευνητική περίοδο της δεκαετίας του '90, κατά τη διάρκεια της οποίας δημιουργήθηκαν πολλά συστήματα πρώτης γενιάς, η ανάπτυξη των Κινητών Συστημάτων Χαρτογράφησης συνεχίστηκε με έναν κάπως μειωμένο ρυθμό. Εντούτοις, έχουν σημειωθεί σημαντικές πρόοδοι και ήδη έχουν αρχίσει να εμφανίζονται τα συστήματα δεύτερης γενιάς, που επωφελούνται από τις προόδους που γίνονται στα συστατικά τους μέρη. Έτσι, για παράδειγμα, στα εναέρια συστήματα, οι ψηφιακοί δέκτες αντικαθιστούν τις κλασικές, με φίλμ, φωτομηχανές, και στα επίγεια συστήματα, οι ασπρόμαυρες φωτομηχανές αντικαθίστανται από έγχρωμες υψηλής ανάλυσης.

Οι πρόοδοι στις τεχνολογίες των δεκτών πλοήγησης, για παράδειγμα ο εκσυγχρονισμός των *GPS*, το σύστημα *GALILEO*, το ελληνικό σύστημα εντοπισμού *HEPOS*, και οι αδρανειακοί δέκτες οι βασισμένοι σε τεχνολογίες *MEMs* (*micro-electromechanical systems*), αποτελούν επίσης σημαντικές εξελίξεις για τα νέα συστήματα. Η καθιέρωση ενός ολοκληρωμένου, ευρέως αποδεκτού, οικονομικά αποδοτικού, πραγματικά ασύρματου συστήματος αποτελεί μία ενδιαφέρουσα προοπτική και ένα ενδιαφέρον πεδίο επιστημονικής έρευνας.

Η ανάπτυξη, λοιπόν, των Κινητών Συστημάτων Χαρτογράφησης βρίσκεται σε διαρκή πρόοδο και η εμπορική βιωσιμότητα των επιχειρήσεων που παρέχουν τις σχετικές υπηρεσίες είναι προφανής. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για γεωχωρικά δεδομένα, είναι ασφαλές να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα Κινητά Συστήματα Χαρτογράφησης θα συνεχίσουν να είναι εμπορικά επιτυχή και το μέλλον τους αναμένεται ευόιο.

## ***ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ***

**Βανιώτου Μαρία, Καρακαϊδού Ιωάννα, Ματσούκης Ευάγγελος (2005)**, *Επιθεωρήσεις Οδικής Ασφάλειας και Μητρώο Οδών*, 3ο Πανελλήνιο συνέδριο οδικής ασφάλειας, Οκτ. 2005, Πάτρα, pp. 7-11

**Δερμάνης Αθανάσιος (1999)**, *Διαστημική Γεωδαισία και Γεωδυναμική GPS*, 1999

**Τζιαβός Ν. Ηλίας (1998)**, *Το δορυφορικό σύστημα προσδιορισμού θέσης GPS σε εφαρμογές Υδρογραφίας*, Διδακτικές Σημειώσεις, Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 1998

**Brown, Duane C. (1966)**, *Decentering Distortion of Lenses*, Photogrammetric Engineering, Vol. XXXII, No. 3, 1966

**Cazzaniga N.E., Forlani G., R. Roncella (2007)**, *Improving the reliability of a GPS/INS navigation solution for MM vehicles by Photogrammetry*, Mobile Mapping Technologies Symposium 2007, Padua – Italy

**Chaplin B.A., Chapman M. A. (1998)**, *A procedure for 3D motion estimation from stereo image sequences for a mobile mapping system*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32(3W1), 1998.

**Cheng Wang, Taher Hassan, Naser El-Sheimy, Martin Lavigne (2007)**, *ARVEE: Automatic road geometry extraction system for mobile mapping*, Mobile Mapping Technologies Symposium 2007, Padua – Italy

**Dorota A. Grejner-Brzezinska, Toth Charles (2004)**, *High Accuracy Dynamic Highway Mapping Using a GPS/INS/CCD System with On-The-Fly GPS Ambiguity Resolution*, September 2004

**Dorota A. Grejner-Brzezinska (2000)**, *Precision mapping of highway linear features* Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science The Ohio State

University, Geoinformation for All, Proceedings, XIXth ISPRS Congress, July 16-23  
Amsterdam, Netherlands, pp. 233-240

**Naser El-Sheimy (1996)**, *The Development of VISAT - A Mobile Survey System For GIS Applications*, Dissertation for PhD., Department of Geomatics Engineering, Calgary, Canada, 198p., September 1996

**Kefei Zhanf, Benlin Xiao (2003)**, *Current status of low-cost GPS and mobile mapping systems*, Department of Geospatial Science, RMIT University, Melbourne, Australia, 2003

**Lachapelle G. (1995)**, *GPS Theory and Applications*, ENGO 625 Lecture Notes, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada, 1995

**Liu Z. (1994)**, *Comparison of Statistical Methods for the Alignment of Strapdown Inertial Systems*, M.Sc Thesis, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada, Report No. 20047.

**Paparoditis N., Bentrach O., Pénard L., Tournaire O., Soheilian B., Deveau M. (2005)**, *Automatic 3D Recording and Modeling of Large Scale Cities: the ARCHIPOLIS Project*, Laboratoire MATIS, Institut Géographique National, Saint-Mandé, France, 2005

**Roadware GRP (2006)**, *Rental of ARAN 4300 AUTOMATIC Road Analyzer*, October 2006

**Roncella R., Remondino F., Forlani G. (2005)**, *Photogrammetric bridging of GPS outages in Mobile Mapping*. Videometrics VIII, Beraldin, El-Hakim, Gruen, Walton (eds). Proceedings SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE vol. 5665, 308-319, 2005

**Rongxing Li (1996)**, *Mobile Mapping - An Emerging Technology For Spatial Data Acquisition*, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, p.12-16, 1996

**Savage P.G. (1978)**, *Strapdown Inertial Sensors-Theory and Applications-Introduction and Review*, AGARD Lecture Series, No. 95.

**Schwarz K.P., Fraser C.S., and Gustafon P.C. (1984)**, *Aerotriangulation Without Ground Control*, Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, 25 (Part A1), 1984, Rio de Janeiro, Brazil

**Schwarz K.P., Lapucha D., Cannon M.E., Martell H. (1990)**, *The Use of GPS/INS in a Highway Inventory System*, Proc. FIG XIX Congress, Helsinki, Finland, Vol. 5, paper 508.4, p. 238-249, May 1990

**Schwarz K.P., Martell H., El-Sheimy N., Li R., Chapman M., Cosandier D. (1993a)**, *VISAT- A Mobile Highway Survey System of High Accuracy*, VNIS Conference '93 Conference, Ottawa, pp. 476-481, October 1993

**Schwarz, K.P., Chapman, M.A, Cannon, M. W., and Gong, P. (1993b)**, *An Integrated INS/GPS Approach to the Georeferencing of Remotely Sensed Data*, PE&RS Vol. 59, No. 11, pp. 1667-1674, November 1993

**Schwarz, K.P., Chapman, M., Cannon, M., Gong P. and Cosandier D. (1994)**, *A Precise Positioning/Attitude System in Support of Airborne Remote Sensing*, ISPRS94, Ottawa, Canada, pp. 241-248, June 1994

**Schwarz, K.P (1995)**, *Integrated Airborne Navigation Systems for Photogrammetry*, The Wichmann Verlag, ISBN 3-87907-277-9, Photogrammetric week'95, Stuttgart, Oberkochen, Germany, pp. 139-153, 1995

**Schwarz, K.P., El-Sheimy, N. (1996)**, *Kinematic Multi-sensor Systems For Close Range Digital Mapping*, ISPRS 1996, Commission V, Working Group III, Vienna, Austria, July 9-19, 1996, Invited Paper

**Schwarz, K.P., El-Sheimy, N. (2004)**, *Mobile Mapping Systems - State of the art and future trends*, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary,

Canada, International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, VOL 35, PART 5, pp. 759-768, 2004

**B. Soheilian, N. Papparoditis, D. Boldo, P. Rudant (2007)**, *Automatic 3D extraction of rectangular roadmarks with centimeter accuracy from stereo-pairs of a ground-based mobile mapping system*, Mobile Mapping Technologies Symposium 2007, Padua – Italy

**J.Talaya, E.Bosch, R.Alamus, A.Serra, A.Baron (2003)**, *GEOVAN: the mobile mapping system from the ICC*, 2003

**Wei M., Schwarz K.P. (1990b)**, *A Strapdown Inertial Algorithm Using an Earth-Fixed Cartesian Frame*, Navigation, Vol. 37, No. 2, pp.153-167, (1990b)

**Wells D.N., Beck N., Delikaraoglu D., Kleusberg A., Krakiwsky E., Lachapell G., Langely R., Nakiboglu M., Schwarz K.P., Tranquilla, J. and Vanicek P. (1986)**, *Guide to GPS Positioning*, The University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, December 1986

**Wong, R.V.C. (1988)**, *Development of a RLG Strapdown Inertial Survey System*, Ph.D. Thesis, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada, Report Number 20027.

**Διαδίκτυο:**

<http://www.roadware.com/>

<http://www.sdtv.gr/news-1177.html>

[http://www.nikitec.gr/News/news\\_gr.htm](http://www.nikitec.gr/News/news_gr.htm)

<http://library.techlink.gr/4t/article-main.asp?mag=1&issue=580&article=12105>

<http://www.mycoordinates.org/>