Πανεπιστήμιο Κρήτης
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

Εξαγωγή κριτηρίων ασφαλούς πλοήγησης ρομπότ με χρήση πανοραμικής κάμερας

Γιώργος Α. Ακουμιανάκης

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ηράκλειο, Σεπτέμβριος 2000

© Copyright 2000 by Giwrgos A. Akoumianakis
All Rights Reserved

Πανεπιστήμιο Κρήτης
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

Εξαγωγή κριτηρίων ασφαλούς πλοήγησης ρομπότ με χρήση πανοραμικής κάμερας

Εργασία που υποβλήθηκε από τον
Γιώργο Α. Ακουμιανάκη
ως μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για την απόκτηση
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Συγγραφέας:

Γιώργος Α. Ακουμιανάκης
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Εισηγητική Επιτροπή:

Στέλιος Ορφανουδάκης, Καθηγητής, Επόπτης

Πάνος Τραχανιάς, Αναπληρωτής Καθηγητής, Μέλος

Απόστολος Τραγανίτης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Μέλος

Αντώνης Αργυρός, Ερευνητής, Μέλος

Δεκτή:

Πάνος Κωνσταντόπουλος
Πρόεδρος Επιτροπής Μεταπτυχιακών Σπουδών

Σεπτέμβριος 2000

Αφιερώνεται στους γονείς μου, την αδερφή μου και τον σκύλο μου.

Εξαγωγή κριτηρίων ασφαλούς πλοήγησης ρομπότ με χρήση πανοραμικής κάμερας

Γιώργος Α. Ακουμιανάκης

Μεταπτυχιακή Εργασία

Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Περίληψη

Η αυτόνομη πλοήγηση ενός ρομπότ με βάση την οπτική πληροφορία που παρέχει μια κάμερα, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα στους τομείς της μηχανικής όρασης και ρομποτικής. Οι προτεινόμενες τεχνικές στηρίζονται συνήθως στον υπολογισμό της οπτικής ροής για την εξαγωγή κριτηρίων κίνησης. Επιπλέον, η πλειοψηφία των προσεγγίσεων βασίζονται στο μοντέλο της κάμερας προοπτικής προβολής. Το γεγονός οφείλεται στο ότι αυτού του είδους οι κάμερες είναι ευρέως διαδεδομένες.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται και οι λεγόμενες κεντρικές πανοραμικές κάμερες με εύρος οπτικού πεδίου έως 360 μοίρες. Το οπτικό πεδίο αυτών των καμερών διευκολύνει την επίλυση σημαντικών προβλημάτων σε σχέση με την αυτόνομη οπτική πλοήγηση ρομπότ.

Στην παρούσα εργασία, προτείνονται δυο μέθοδοι για τον υπολογισμό της ιδίας κίνησης της πανοραμικής κάμερας, αν είναι γνωστή η απόσταση της κάμερας από κάποιο σημείο του περιβάλλοντος. Επιπρόσθετα, αν είναι γνωστή η ταχύτητα με την οποία κινείται η κάμερα, οι δύο μέθοδοι δίνουν την δυνατότητα υπολογισμού της απόστασης ενός σημείου από την κάμερα. Οι δύο μέθοδοι διαφέρουν ως προς την προσέγγιση του προβλήματος. Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό ενός πυκνού πεδίου οπτικής ροής λόγω της κίνησης της πανοραμικής κάμερας, ενώ η δεύτερη βασίζεται στην αντιστοίχιση (correspondence) συγκεκριμένων χαρακτηριστικών μεταξύ δύο πανοραμικών εικόνων. Εάν τόσο η ιδία κίνηση όσο και η απόσταση της πανοραμικής κάμερας από κάποιο σημείο του περιβάλλοντος δεν είναι γνωστά, τότε προτείνεται ένας τρόπος υπολογισμού του λόγου τους για κάθε χαρακτηριστικό σημείο της σκηνής. Ο λόγος αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέτρο του χρόνου που απομένει για την σύγκρουση της κάμερας με κάθε σημείο του περιβάλλοντος, αν η κάμερα διατηρήσει σταθερή την ταχύτητα της.

Η κεντρική πανοραμική κάμερα προσομοιώθηκε με την χρήση του προγράμματος φωτοσκίασης *POV-Ray*. Η χρήση συνθετικών ακολουθιών εικόνων δίνει την δυνατότητα επαλήθευσης της ακρίβειας των προτεινόμενων μεθόδων. Για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών σημείων και την ιχνηλάτηση τους, χρησιμοποιήθηκε το πακέτο *KLT*.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα, αποδεικνύεται ότι η δεύτερη μέθοδος παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια μετρήσεων, ανεξάρτητα της ανάλυσης των χρησιμοποιούμενων εικόνων ή της ταχύτητας της κάμερας. Επιπλέον τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η πρώτη μέθοδος πλεονεκτεί της δεύτερης μόνο στο ότι παρέχει πληροφορία για όλα τα σημεία

της σκηνής και όχι μόνο για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει, είναι ότι ο αλγόριθμος ιχνηλάτησης είναι επιθυμητό να υποστηρίζει αφινικούς μετασχηματισμούς λόγω των οπτικών παραμορφώσεων που προκαλούνται από την πανοραμική κάμερα. Κλείνοντας, προτείνονται μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας για την βελτίωση της χρηστικότητας και αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων μεθόδων.

Επόπτες: Στέλιος Ορφανουδάκης
Καθηγητής
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης,
και
Αντώνης Αργυρός
Ερευνητής
Ινστιτούτο Πληροφορικής
Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας
Ηράκλειο - Κρήτης

Criterion estimation for safely navigating robots using a panoramic camera

Giwrgos A. Akoumianakis

Master of Science Thesis

Computer Science Department
University of Crete

Abstract

Autonomous robot navigation based on visual information provided by a camera, comprises a very important problem in the field of machine vision and robotics. Proposed methods usually depend on the computation of the optical flow to extract criteria for robot navigation. In addition, the majority of the approaches assume the perspective projection camera model. This is due to the fact that this type of cameras are commonly available.

In recent years, the so called central panoramic cameras with upto a 360 degree field of view are also being used. The wide field of view of these cameras facilitates the resolution of important problems regarding autonomous visual robot navigation.

In this thesis, two methods for calculating the egomotion of a panoramic camera are proposed, assuming that the distance of the camera from a point in the environment is known. Additionally, when the translational speed of the camera is known, the same two methods can be used to calculate the distance between a point and the camera. The two methods constitute different approaches to solving the problem. The first method is based on the calculation of a dense optical flow field due to the motion of the panoramic camera, while the second method is based on the correspondence of points between two panoramic images. If the egomotion and the distance of the panoramic camera from a point in the environment are not known, a method for calculating their ratio for every scene point is proposed. This ratio can be used as an estimation of time to contact between the camera and every scene point, assuming egomotion parameters are constant.

The central panoramic camera was simulated using a raytracer program called *POV-Ray*. The use of synthetic image sequences allows us to verify the accuracy of the proposed methods. The *KLT* software package was used for the extraction and tracking of suitable characteristic points between panoramic images.

The experimental results prove that the second method provides satisfactory accuracy, regardless of the image resolution or the speed of the camera. Additionally, it is shown that the first method is more useful only when time to contact information is required for all image points as opposed to a set of characteristic points. Another conclusion is that the tracking algorithm should support affine transformations due to the optical deformations caused by the panoramic camera. Finally, future directions for research are suggested in order to improve

the usability and effectiveness of the proposed methods.

Supervisors: Stelios Orphanoudakis
Professor
Computer Science Department
University of Crete,
and
Antonis Argyros
Researcher
Institute of Computer Science
Foundation for Research and Technology
Heraclion - Crete

Ευχαριστίες

Πρώτα απ'όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Αγάπιο και Άννα για την αμέριστη συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια.

Θέλω να ευχαριστήσω τον επόπτη καθηγητή μου κ. Στέλιο Ορφανουδάκη για την συνεργασία μας τα τελευταία χρόνια και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στις δυνατότητες μου. Ευχαριστώ το μέλος της κριτικής επιτροπής, και ακαδημαϊκό μου σύμβολο το πρώτο χρόνο, καθηγητή κ. Πάνο Τραχανιά καθώς και τον κ. Απόστολο Τραγανίτη για τις προτάσεις και παρατηρήσεις τους.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Αντώνη Αργυρό για την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε, αφού χωρίς την υποστήριξη του η εργασία αυτή δεν θα είχε ολοκληρωθεί εγκαίρως.

Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω όλους τους φίλους που απόκτησα τα χρόνια που έμεινα στο Ηράκλειο, καθώς και την θεία μου την Λιάνα.

Γιώργος Α. Ακουμιανάκης

Περιεχόμενα

Περίληψη **i**

Abstract **iii**

Ευχαριστίες **v**

Περιεχόμενα **vii**

Κατάλογος Σχημάτων **ix**

Κατάλογος Πινάκων **xiii**

1 Εισαγωγή **1**

1.1 Γενική Περιγραφή 1

1.2 Προηγούμενες προσεγγίσεις 2

1.2.1 Η οπτική ροή 2

1.2.2 Χρόνος Επαφής 2

1.2.3 Πανοραμικές κάμερες 3

1.3 Σκοπός της παρούσης εργασίας και κίνητρα 4

2 Βασικές έννοιες και υπολογιστικά εργαλεία **7**

2.1 Η οπτική ροή 7

2.2 Χρόνος επαφής 9

2.3 Η πανοραμική κάμερα 10

2.3.1 Το πρόγραμμα Povray 12

2.3.2 Εξομοίωση πανοραμικής κάμερας 12

2.4 Εξαγωγή χαρακτηριστικών και ιχνηλάτηση - Το πακέτο KLT 13

3 Οι προτεινόμενες μέθοδοι **17**

3.1 1η προσέγγιση - Χρησιμοποίηση οπτικής ροής 17

3.2 2η προσέγγιση - Χρησιμοποίηση αντιστοίχισης χαρακτηριστικών 22

4 Συγκρίσεις μεθόδων και πειραματικά αποτελέσματα **27**

4.1 Αποτελέσματα εφαρμογής σε απλές ακολουθίες εικόνων 27

4.1.1 Πειράματα με διαφορετικές ταχύτητες 28

4.1.2 Πειράματα με διαφορετικές αναλύσεις εικόνας 32

4.1.2.1 Σκηνικό 1 32

4.1.2.2 Σκηνικό 2 47

4.1.3 Πειραματικά αποτελέσματα για την πρώτη μέθοδο χρησιμοποιώντας την κατακόρυφη μετατόπιση 54

4.2 Εφαρμογή του κριτηρίου επικινδυνότητας σε σύνθετες ακολουθίες εικόνων 58

5 Επίλογος **71**

5.1 Γενικά συμπεράσματα 71

5.1.1 Πλεονεκτήματα 71

5.1.2 Μειονεκτήματα 72

5.2 Μελλοντικές Κατευθύνσεις 73

Βιβλιογραφία **74**

Κατάλογος Σχημάτων

2.1 Το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας 8

2.2 Εικόνα από την πανοραμική κάμερα του εργαστηρίου Μηχανικής Όρασης και Ρομποτικής του ITE. (a) η αρχική πανοραμική εικόνα, (b) μετασχηματισμός της εικόνας (a) σε κυλινδρική μορφή. 11

3.1 Το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας 17

3.2 Το οπτικό πεδίο της κάμερας και μία λωρίδα 18

3.3 Ένα αντικείμενο όπως απεικονίζεται στην κυλινδρική εικόνα που παίρνει η πανοραμική κάμερα 19

3.4 Πανοραμική κάμερα που κινείται με ταχύτητα S σε δύο διαδοχικές φάσεις της ακολουθίας 20

3.5 Κίνηση πανοραμικής κάμερας ως προς χαρακτηριστικό σημείο P 23

3.6 Κίνηση πανοραμικής κάμερας ως προς χαρακτηριστικό σημείο P στην περίπτωση που ϕ_k=$\pi/2$ και όπου S_d είναι η συνιστώσα της ταχύτητας S στην κατεύθυνση του σημείου P. 25

4.1 Το σκηνικό των πειραμάτων-δισδιάστατη άποψη (κάτοψη) 28

4.2 Οι εικόνες 0,3,6,9,12,15 και 18 της ακολουθίας των πειραμάτων, για IW=450, S=0.2, X_d=1 και Z_d=6. Οι κάθετες στήλες που αντιστοιχούν στα ίχνη των πλευρών είναι τονισμένες. 29

4.3 Οι εικόνες 21,24,27,29,31,33 και 35 της ακολουθίας των πειραμάτων, για IW=450, S=0.2, X_d=1 και Z_d=6. Οι κάθετες στήλες που αντιστοιχούν στα ίχνη των πλευρών είναι τονισμένες. 30

4.4 Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.1, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=2 και Z_d=5 33

4.5 Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.2, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=2 και Z_d=5 34

4.6 Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.4, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=2 και Z_d=5 35
4.7 Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=1.0, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=2 και Z_d=5 36
4.8 Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.4. 37
4.9 Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.5. 38
4.10 Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.6. 39
4.11 Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.7. 40
4.12 Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.2, οριζόντια ανάλυση IW=450 και αρχικές αποστάσεις X_d=1 και Z_d=6 41
4.13 Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.2, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=1 και Z_d=6 42
4.14 Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.2, οριζόντια ανάλυση IW=1800 και αρχικές αποστάσεις X_d=1 και Z_d=6 43
4.15 Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.12. 44
4.16 Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.13. 45
4.17 Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.14. 46
4.18 Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.4, οριζόντια ανάλυση IW=450 και αρχικές αποστάσεις X_d=0.2 και Z_d=8 48
4.19 Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.4, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=0.2 και Z_d=8 49
4.20 Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.4, οριζόντια ανάλυση IW=1800 και αρχικές αποστάσεις X_d=0.2 και Z_d=8 50
4.21 Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.18. 51
4.22 Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.19. 52
4.23 Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.20. 53
4.24 Το σκηνικό του πειράματος-δισδιάστατη άποψη (κάτοψη) 54
4.25 Οι εικόνες 1,4,8,10,12,14 και 16 της ακολουθίας του πειράματος, για IW=900, IH=450, S=0.6 και αρχική απόσταση ίση με 10. Οι οριζόντιες στήλες που αντιστοιχούν στα κάθετα ίχνη των πλευρών είναι τονισμένες. 56
4.26 Τα αποτελέσματα της πρώτης μεθόδου με την χρήση της κατακόρυφης μετατόπισης για ταχύτητα S=0.6, οριζόντια ανάλυση IW=900, κατακόρυφη ανάλυση IH=450 και αρχική απόσταση ίση με 10 57
4.27 Το σκηνικό του πειράματος - δισδιάστατη άποψη 58

4.28 Η εικόνα που δίνεται σαν είσοδος στο KLT 59
4.29 Οι εικόνες 17 και 33 της ακολουθίας για S=0.075 61
4.30 Οι εικόνες 49 και 65 της ακολουθίας για S=0.075 62
4.31 Οι εικόνες 81 και 89 της ακολουθίας για S=0.075 63
4.32 Οι εικόνες 97 και 113 της ακολουθίας για S=0.075 64
4.33 Οι εικόνες 129 και 145 της ακολουθίας για S=0.075 65
4.34 Οι εικόνες 5 (17) και 9 (33) της ακολουθίας για S=0.3 66
4.35 Οι εικόνες 13 (49) και 17 (65) της ακολουθίας για S=0.3 67
4.36 Οι εικόνες 21 (81) και 23 (89) της ακολουθίας για S=0.3 68
4.37 Οι εικόνες 25 (97) και 29 (113) της ακολουθίας για S=0.3 69
4.38 Οι εικόνες 33 (129) και 37 (145) της ακολουθίας για S=0.3 70

.

Κατάλογος Πινάκων

.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενική Περιγραφή

Η αυτόνομη πλοήγηση ενός ρομπότ με βάση την οπτική πληροφορία που παρέχει μια κάμερα, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα στους τομείς της μηχανικής όρασης και ρομποτικής. Οι προτεινόμενες τεχνικές στηρίζονται συνήθως, στον υπολογισμό της οπτικής ροής για την εξαγωγή κριτηρίων κίνησης.

Η πλειοψηφία των εργασιών που έχουν γίνει μέχρι σήμερα θεωρούν ότι χρησιμοποιείται η κλασσική κάμερα προοπτικής προβολής. Το γεγονός δικαιολογείται από το ότι, συνήθως, οι κάμερες που χρησιμοποιούνται τόσο για εμπορικές όσο και για επιστημονικές εφαρμογές ακολουθούν το μοντέλο της προοπτικής προβολής. Υπάρχουν όμως και οι λεγόμενες καταδιοπτρικές ή πανοραμικές κάμερες, με σημαντικά μεγαλύτερο εύρος οπτικού πεδίου [SPH97]. Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για την χρησιμοποίηση πανοραμικών καμερών είναι αυξημένο και έχει εμφανιστεί πλήθος εργασιών που ασχολούνται με το πρόβλημα του υπολογισμού των παραμέτρων κίνησης της κάμερας και της δομής της σκηνής, που αποτελούν χρήσιμες πληροφορίες για την οπτική πλοήγηση ρομπότ [CS96, CS97b].

Για την εξαγωγή κριτηρίων κίνησης, στην πλειοψηφία των εργασιών, υπολογίζεται το πεδίο της οπτικής ή της κάθετης ροής. Η διαδικασία αυτή είναι υπολογιστικά χρονοβόρα, καθιστώντας προβληματική την εφαρμογή της στην πλοήγηση ρομπότ σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η εργασία δεν ασχολείται άμεσα με την εφαρμογή των κλασσικών τρόπων υπολογισμού της οπτικής ροής και του χρόνου επαφής σε πανοραμικές κάμερες, αλλά προτείνονται διάφοροι μηχανισμοί για τον ταχύ υπολογισμό κριτηρίων εγγύτητας της κάμερας με σημεία του περιβάλλοντος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν

για την οπτική πλοήγηση ρομπότ.

1.2 Προηγούμενες προσεγγίσεις

1.2.1 Η οπτική ροή

Η μέτρηση της οπτικής ροής σε μια ακολουθία εικόνων είναι μια συνήθης πρακτική για την ανάλυση της κίνησης της κάμερας. Για τον υπολογισμό της οπτικής ροής απαιτούνται δύο υπολογιστικά βήματα τα οποία εκμεταλλεύονται δύο διαφορετικούς περιορισμούς. Αρχικά, υποθέτοντας ότι διατηρείται κάποιο είδος πληροφορίας μεταξύ των εικόνων, υπολογίζεται το διάνυσμα της ταχύτητας για κάθε σημείο της εικόνας. Σύμφωνα με τον Singh [Sin90], μπορούμε να ξεχωρίσουμε τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις:

- Αυτές που στηρίζονται στην κλίση (gradient based) και που θεωρούν ότι διατηρείται σταθερή η φωτεινότητα της εικόνας [HS81, Nag83],
- Αυτές που στηρίζονται σε τεχνικές συσχέτισης (correlation) και που θεωρούν ότι διατηρείται αναλλοίωτη η τοπική κατανομή της έντασης [Ana89].
- Αυτές που στηρίζονται σε χωροχρονικά φίλτρα και την διατήρηση της ενέργειας [Hee88, FJ90].

Το δεύτερο βήμα υπολογισμού στηρίζεται στην υπόθεση ότι η οπτική ροή μεταβάλλεται ομαλά στο μεγαλύτερο μέρος της εικόνας [HS81] και χρησιμοποιεί μια τεχνική regularization. Στην πραγματικότητα το πεδίο οπτικής ροής δεν είναι ομαλό για διάφορους λόγους [Lou98]. Οι Black και Anandan [BA93] προτείνουν ένα πλαίσιο για τον υπολογισμό της οπτικής ροής που εμφανίζει μικρότερη ευαισθησία σε διαφανή ή ανεξάρτητα κινούμενα αντικείμενα, σε ασυνέχειες βάθους, σκιές και αντανακλάσεις. Άλλοι απαιτούν να παραμένει σταθερή η κλίση της φωτεινότητας της εικόνας στο χρόνο [UGVT89] ή θέτουν περιορισμούς σχετικά με την γεωμετρία της σκηνής αντί για την ομαλότητα του πεδίου της οπτικής ροής [TM93, WKPS87].

Μια κριτική παρουσίαση των παραπάνω μεθόδων παρέχεται στο [BFB94].

1.2.2 Χρόνος Επαφής

Μια από τις σημαντικότερες ικανότητες ενός κινούμενου παρατηρητή είναι ο υπολογισμός του "χρόνου επαφής" (ή χρόνος σύγκρουσης, ή χρόνος πρόσκρουσης) με σημεία του περιβάλλοντος του, δηλαδή ο χρόνος που θα μεσολαβήσει μέχρι την σύγκρουση

εάν ο παρατηρητής διατηρήσει σταθερή την ταχύτητα [Lou98]. Έχουν γίνει διάφορες εργασίες για τον υπολογισμό του χρόνου επαφής. Οι Cipolla και Blake [CB92] προτείνουν τον υπολογισμό παραμέτρων του αφινικού μοντέλου του πεδίου κίνησης ενός παρακολουθούμενου αντικειμένου, έτσι ώστε να υπολογίσουν τον χρόνο επαφής. Οι Sandini, Gandolfo, Grosso και Tistarelli [SGGT93] έχουν παρουσιάσει ένα τρόπο υπολογισμού του χρόνου πρόσκρουσης χρησιμοποιώντας ένα οφθαλμικό αισθητήρα με λογαριθμικές-πολικές συντεταγμένες. Οι Nelson και Aloimonos [NA89] αναλύουν και πειραματίζονται με τον υπολογισμό του χρόνου επαφής χρησιμοποιώντας την απόκλιση (divergence) στο πεδίο της οπτικής ροής. Ο Subbarao [Sub90] έχει υπολογίσει περιορισμούς για τον χρόνο επαφής χρησιμοποιώντας παραγώγους πρώτης τάξης της οπτικής ροής. Ο Arnspang [Arn88] παρουσιάζει μερικούς απλούς εκτιμητές για τον χρόνο επαφής, χρησιμοποιώντας μεμονωμένα σημεία και καμπύλες, με βάση την οπτική ροή και την οπτική επιτάχυνση.

Το βασικότερο μειονέκτημα των περισσοτέρων προσεγγίσεων είναι ότι βασίζονται σε παραγώγιση του πεδίου οπτικής ροής με αποτέλεσμα να είναι υπολογιστικά χρονοβόρες και ιδιαίτερα ευαίσθητες στην ακρίβεια υπολογισμού της οπτικής ροής.

1.2.3 Πανοραμικές κάμερες

Μια από τις πρώτες εργασίες που έγιναν πάνω στις πανοραμικές κάμερες αφορούσε την αναγνώριση πορείας με την βοήθεια πανοραμικής αναπαράστασης (Zheng και Tsuji, [ZT92]). Με την χαρτογραφημένη πλοήγηση ενός ρομπότ εξοπλισμένου με τον κωνικό οπτικό αισθητήρα COPIS ασχολήθηκαν οι Yagi, Nishizawa και Yachida [YNY95]. Ο Nayar ασχολήθηκε με τις καταδιοπτρικές πολυκατευθυντικές κάμερες [Nay97], ενώ μαζί με τον Gluckman πρότειναν τρόπους υπολογισμού των παραμέτρων της ιδίας κίνησης (egomotion) [GN98]. Οι Svoboda, Pajdla και Hlavac έχουν παρουσιάσει τρόπους υπολογισμού κίνησης με την χρήση κεντρικής πανοραμικής κάμερας [SPH98], όπως αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Οι ίδιοι περιγράφουν πως κατασκευάζονται αυτές οι κάμερες έτσι ώστε να έχουν κάποια επιθυμητά χαρακτηριστικά [SPH97]. Οι Geyer και Δανιηλίδης έχουν προτείνει μέθοδο για την βαθμονόμηση (calibration) καταδιοπτρικής κάμερας [GD99]. Πρόσφατα (1999), έχουν γίνει εργασίες πάνω στην στερεοσκοπική όραση και με την χρήση πανοραμικών αισθητήρων [SS99, SKS99, OHS99]. Γενικά τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μια πληθώρα εργασιών σχετικά με την χρήση πανοραμικών καμερών στην πλοήγηση ρομπότ [EAH99, TA00, CS97a, WJ99, KD98, GV99, RS98].

1.3 Σκοπός της παρούσης εργασίας και κίνητρα

Η χρήση πανοραμικών εικόνων για τον υπολογισμό της κίνησης μας παρέχει δύο βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη χρήση κλασσικών καμερών.

Η ανάλυση της κίνησης βασίζεται στον υπολογισμό των μετατοπίσεων χαρακτηριστικών της εικόνας, όπως σημεία. Όταν χρησιμοποιείται μια κλασσική κάμερα προοπτικής προβολής, οι αντιστοιχίσεις ορισμένων σημείων εξαφανίζονται, αφού αυτά τα σημεία βγαίνουν έξω από το, περιορισμένο, οπτικό πεδίο αυτών των καμερών. Αντιθέτως, σε μια πανοραμική κάμερα με οπτικό πεδίο 360^o, οι αντιστοιχίσεις των σημείων δεν χάνονται από το οπτικό πεδίο, παρά μόνο αν καλυφθούν από άλλα αντικείμενα.

Μια άλλη περίπτωση στην οποία οι κλασσικές κάμερες μειονεκτούν, είναι στο ότι οι αλγόριθμοι υπολογισμού κίνησης δυσκολεύονται να ξεχωρίσουν συγκεκριμένους τύπους κινήσεων. Για παράδειγμα, ορισμένοι τύποι μεταφορικής και περιστροφικής κίνησης δημιουργούν παρόμοιο πεδίο οπτικής ροής, ειδικά όταν οι διαφορές βάθους στην σκηνή είναι μικρές και το οπτικό πεδίο στενό [DN90]. Ο Δανιηλίδης [DN93] έχει δείξει ότι το πρόβλημα λύνεται αν έχουμε ευρύ οπτικό πεδίο. Επίσης, οι Brodsky, Fermueller και Aloimonos [BFA98] έδειξαν ότι η εκτίμηση κίνησης δεν είναι σχεδόν ποτέ διφορούμενη αν θεωρήσουμε μια σφαιρική επιφάνεια απεικόνισης. Η πανοραμική κάμερα με το οπτικό πεδίο των 360^o αποτελεί μια πάρα πολύ καλή επιλογή για την επίλυση αυτού του προβλήματος.

Στην παρούσα εργασία θεωρούμε ένα ρομπότ το οποίο είναι εφοδιασμένο με μία πανοραμική κάμερα. Το ρομπότ μπορεί να κινείται πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια και η πανοραμική κάμερα είναι τοποθετημένη πάνω στο ρομπότ έτσι ώστε ο οπτικός της άξονας να είναι κάθετος στην επιφάνεια κίνησης. Στην γενική περίπτωση, το ρομπότ μπορεί να εκτελεί μεταφορική και περιστροφική κίνηση, όμως στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ότι το ρομπότ δεν εκτελεί συνδυασμένη κίνηση.

Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθόδων για τον χαρακτηρισμό όλων των σημείων του οπτικού πεδίου της πανοραμικής κάμερας ως προς τον χρόνο που απομένει μέχρι την σύγκρουση της κάμερας με αυτά, εάν το ρομπότ διατηρεί σταθερές τις παραμέτρους κίνησης του. Τα κριτήρια που εξάγονται δεν εξαρτώνται αμιγώς από την απόσταση της κάμερας από τα σημεία του περιβάλλοντος ή την ταχύτητα του ρομπότ, αλλά από ένα συνδυασμό τους. Για παράδειγμα, ένα σημείο του περιβάλλοντος που βρίσκεται πολύ κοντά στην κάμερα θα χαρακτηριστεί ως ακίνδυνο εάν η φορά της μεταφορικής κίνησης δεν είναι προς αυτό το σημείο. Έτσι, επιτυγχάνεται ένας πολύ

χρήσιμος χαρακτηρισμός των σημείων της σκηνής ως προς την ”επικινδυνότητα” τους, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αυτόνομη πλοήγηση του ρομπότ στο χώρο.

Κεφάλαιο 2

Βασικές έννοιες και υπολογιστικά εργαλεία

2.1 Η οπτική ροή

Θεωρούμε μία κάμερα τύπου προοπτικής προβολής και το σύστημα συντεταγμένων της όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.1. Το σύστημα αναφοράς της κάμερας, είναι το (X, Y, Z) με αρχή στο σημείο O, το οποίο είναι και το κέντρο προβολής. Το σύστημα συντεταγμένων της σκηνής θεωρείται ότι συμπίπτει με το σύστημα αναφοράς της κάμερας. Έστω ένα σημείο P=(X, Y, Z) του χώρου και έστω ότι η κάμερα κινείται με μεταφορική κίνηση T=(U, V, W) και περιστροφική κίνηση ω=(α, β, γ). Για την σχετική "στέρεη" (rigid) κίνηση του σημείου P ως προς την κάμερα ισχύει ότι [Fer93]:

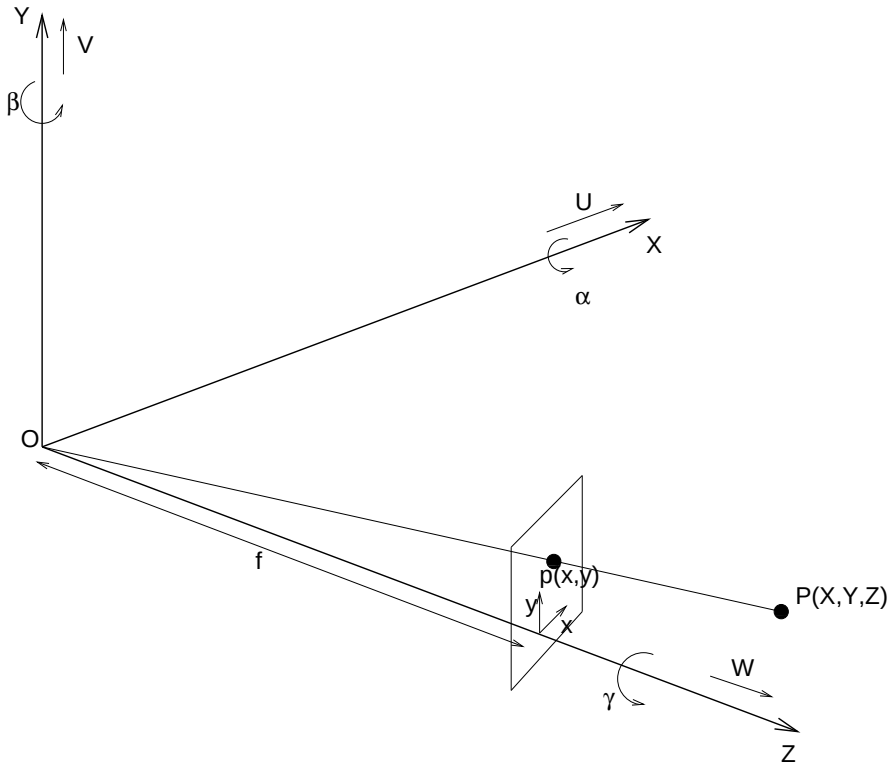
$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= -U - \beta Z + \gamma Y \\ \frac{dY}{dt} &= -V - \gamma Z + \alpha Y \\ \frac{dZ}{dt} &= -W - \alpha Z + \beta Y \end{aligned} \tag{2.1}$$

Με βάση το μοντέλο της προοπτικής προβολής, η προβολή ενός τρισδιάστατου σημείου $P(X, Y, Z)$ στην εικόνα $p(x, y)$ δίνεται από την σχέση:

$$(x, y) = (\frac{fX}{Z}, \frac{fY}{Z}) \tag{2.2}$$

Το f είναι η εστιακή απόσταση της κάμερας. Επομένως η ταχύτητα (u, v) του σημείου $p(x, y)$ στην εικόνα είναι:

$$u = \frac{dx}{dt}$$



Σχήμα 2.1: Το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας

$$v = \frac{dy}{dt} \tag{2.3}$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 2.1 και 2.2, οι εξισώσεις 2.3 γίνονται [LHP80]:

$$u = \frac{(-Uf + xW)}{Z} + \alpha\frac{xy}{f} - \beta(\frac{x^2}{f} + f) + \gamma y \tag{2.4}$$

$$v = \frac{(-Vf + yW)}{Z} - \beta\frac{xy}{f} + \alpha(\frac{y^2}{f} + f) - \gamma x \tag{2.5}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να χωριστούν σε δύο μέρη, όπου το ένα μέρος εξαρτάται μόνο από την μεταφορική κίνηση και το άλλο μόνο από την περιστροφική:

$$u = u_{trans} + u_{rot}$$

$$v = v_{trans} + v_{rot}$$

όπου

$$u_{trans} = \frac{(-Uf + xW)}{Z}$$
$$v_{trans} = \frac{(-Vf + yW)}{Z} \tag{2.6}$$

και

$$\begin{aligned} u_{rot} &= \alpha\frac{xy}{f} - \beta(\frac{x^2}{f} + f) + \gamma y \\ v_{rot} &= -\beta\frac{xy}{f} + \alpha(\frac{y^2}{f} + f) - \gamma x \end{aligned}$$

Είναι φανερό ότι μόνο το μεταφορικό μέρος της κίνησης εξαρτάται από το βάθος Z της σκηνής. Επιπλέον, από τις εξισώσεις συμπεραίνεται ότι η οπτική ροή παραμένει αμετάβλητη από την ταυτόχρονη κλιμάκωση του βάθους Z και της μεταφορικής ταχύτητας (U, V, W). Δηλαδή δεν είναι δυνατό να διαφοροποιήσουμε τις περιπτώσεις ενός σημείου που βρίσκεται μακριά αλλά κινείται με μεγάλη ταχύτητα και ενός σημείου που βρίσκεται κοντά αλλά κινείται με μικρή ταχύτητα. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική για την έννοια του χρόνου επαφής.

2.2 Χρόνος επαφής

Ο χρόνος επαφής t_c, μεταξύ της κάμερας και ενός σημείου της σκηνής, ορίζεται ως $t_c = \frac{Z}{W}$ όπου Z είναι το βάθος του σημείου και W η συνιστώσα της μεταφορικής κίνησης πάνω στον οπτικό άξονα της κάμερας προς αυτό το σημείο. Ο υπολογισμός του χρόνου επαφής είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την πλοήγηση. Θεωρώντας ότι η σχετική ταχύτητα παραμένει σταθερή στον χρόνο, τότε ο λόγος $\frac{Z}{W}$ δίνει τον χρόνο που απομένει μέχρι το σημείο να έρθει σε επαφή με την κάμερα ή να την προσπεράσει. Ο χρόνος επαφής, όπως ορίστηκε, δεν είναι ούτε η απόσταση από το σημείο ούτε η σχετική ταχύτητα της κάμερας, αλλά μια μέτρηση που σχετίζεται με τον χρόνο αντίδρασης του παρατηρητή.

Έστω μια κλασσική προοπτική κάμερα με το σύστημα συντεταγμένων της σκηνής και του πεδίου απεικόνισης, όπως φαίνονται στο σχήμα 2.1. Η κάμερα κινείται με μεταφορική κίνηση (U, V, W). Η σχέση που συνδέει τις συντεταγμένες (X, Y, Z) στον τρισδιάστατο χώρο με τις δισδιάστατες συντεταγμένες (x, y) του οπτικού πεδίου μιας κάμερας με εστιακή απόσταση f, είναι:

$$\left.\begin{array}{l} x = \frac{fX}{Z} \\ y = \frac{fY}{Z} \end{array}\right\} \Rightarrow \begin{array}{l} xZ - fX = 0 \\ yZ - fY = 0 \end{array} \tag{2.7}$$

Παραγωγίζοντας, το σύστημα 2.7 γίνεται:

$$\left.\begin{array}{l} \frac{dx}{dt}Z + x\frac{dZ}{dt} - f\frac{dX}{dt} = 0 \\ \frac{dy}{dt}Z + y\frac{dZ}{dt} - f\frac{dY}{dt} = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \begin{array}{l} uZ + xW - fU = 0 \\ vZ + yW - fV = 0 \end{array} \tag{2.8}$$

Παραγωγίζοντας ξανά το σύστημα 2.8 γίνεται:

$$\left.\begin{array}{l} \frac{du}{dt}Z + u\frac{dZ}{dt} + \frac{dx}{dt}W + x\frac{dW}{dt} - f\frac{dU}{dt}=0 \\ \frac{dv}{dt}Z + v\frac{dZ}{dt} + \frac{dy}{dt}W + y\frac{dW}{dt} - f\frac{dV}{dt}=0 \end{array}\right\} \Rightarrow \left.\begin{array}{l} \mathbf{a}Z + uW + uW + 0 - 0=0 \\ \mathbf{b}Z + vW + vW + 0 - 0=0 \end{array}\right\} \Rightarrow$$

$$\begin{array}{l} \mathbf{a}Z + 2uW=0 \\ \mathbf{b}Z + 2vW=0 \end{array} \tag{2.9}$$

όπου $\mathbf{a}=\frac{du}{dt}$ και $\mathbf{b}=\frac{dv}{dt}$ είναι οι συνιστώσες της οπτικής επιτάχυνσης, που υπολογίζονται παραγωγίζοντας τις συνιστώσες της οπτικής ροής. Λύνοντας το σύστημα εξισώσεων 2.9 προκύπτει για τον χρόνο επαφής ότι:

$$t_c=\frac{Z}{W} \overset{(2.9)}{\Rightarrow} t_c=\frac{2u}{\mathbf{a}}, t_c=\frac{2v}{\mathbf{b}} \tag{2.10}$$

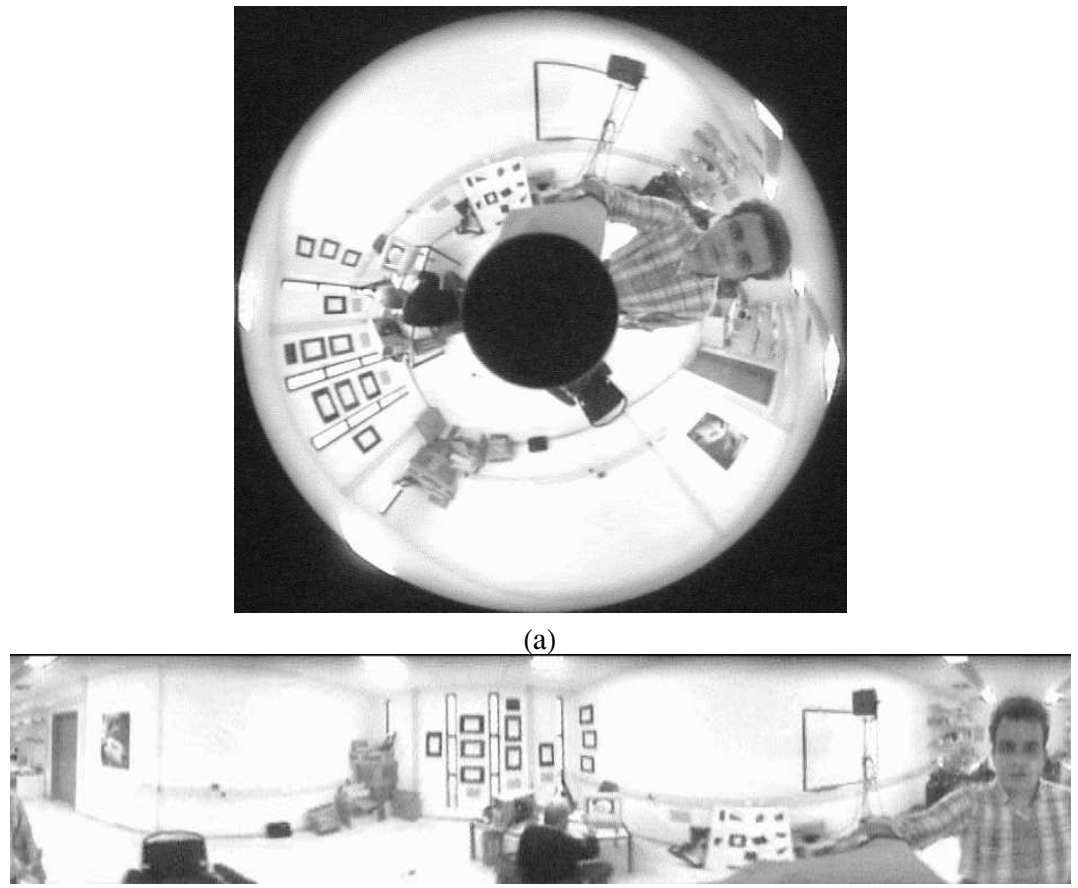
Η φυσική ερμηνεία της παραπάνω σχέσης είναι ότι ο χρόνος πρόσκρουσης είναι ανάλογος της οπτικής ροής και αντιστρόφως ανάλογος της οπτικής επιτάχυνσης. Επομένως, υπολογίζοντας την οπτική ροή που παράγει ένα αντικείμενο σε μια ακολουθία εικόνων και υπολογίζοντας την παράγωγο της, ο χρόνος επαφής με το αντικείμενο μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 2.10. Η μέθοδος αυτή μειονεκτεί γιατί είναι ευαίσθητη στα σφάλματα υπολογισμού της οπτικής ροής ([Lou98], Κεφ. 6). Γενικά, ο υπολογισμός της οπτικής ροής επηρεάζεται από τον θόρυβο και στην περίπτωση μας το πρόβλημα ενισχύεται από την χρήση της παραγώγου.

2.3 Η πανοραμική κάμερα

Στην εργασία αυτή θεωρείται ότι χρησιμοποιείται μια κεντρική πανοραμική κάμερα οπτικού πεδίου 360^o, αν και οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται δεν εξαρτιούνται άμεσα από το εύρος του οπτικού πεδίου. Λόγω του τρόπου με τον οποίο κατασκευάζονται αυτού του είδους οι κάμερες, οι εικόνες που δίνουν είναι αρχικά σε κυκλική μορφή (σχήμα 2.2(a)) αλλά με κατάλληλους μετασχηματισμούς μπορούν να μετατραπούν σε κυλινδρικές εικόνες (σχήμα 2.2(b)).

Οι Chahl και Srinivasan [CS97c] δείχνουν ότι αν οι συντεταγμένες είναι κανονικοποιημένες στο διάστημα [0,1] και σαν (0,0) θεωρηθεί το κέντρο της κυκλικής εικόνας, τότε οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x_p, y_p) ενός σημείου στην αρχική πανοραμική εικόνα συνδέονται με τις συντεταγμένες (x_c, y_c) του ίδιου σημείου στην κυλινδρική εικόνα με τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} x_p &= x_c \cos(2\pi x_c) \\ y_p &= y_c \sin(2\pi y_c) \end{aligned} \tag{2.11}$$



(a)

(b)

Σχήμα 2.2: Εικόνα από την πανοραμική κάμερα του εργαστηρίου Μηχανικής Όρασης και Ρομποτικής του ΙΤΕ. (a) η αρχική πανοραμική εικόνα, (b) μετασχηματισμός της εικόνας (a) σε κυλινδρική μορφή.

Η παρούσα εργασία δεν ασχολείται με τους μετασχηματισμούς που χρειάζονται για την εξαγωγή της κυλινδρικής μορφής. Οι συνθετικές εικόνες που χρησιμοποίηθηκαν δεν χρειάζονται αυτό το βήμα γιατί είναι κατευθείαν σε κυλινδρική μορφή. Για τους κατάλληλους μετασχηματισμούς που απαιτούνται για την εξαγωγή της κυλινδρικής μορφής από πραγματική εικόνα πανοραμικής κάμερας ασχολούνται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι Αργυρός και Τσακίρης [TA00].

Με την γεωμετρία των φακών των κεντρικών πανοραμικών καμερών, έχουν ασχοληθεί εκτενώς οι Svoboda, Pajdla και Hlavac [SPH97]. Στην δουλεία τους έχει στηριχθεί και η κατασκευή ορισμένων εμπορικών πανοραμικών καμερών.

Στην υπόλοιπη εργασία, με τον όρο πανοραμική εικόνα αναφερόμαστε στην αντίστοιχη κυλινδρική μορφή.

2.3.1 Το πρόγραμμα Povray

Δεδομένου ότι όταν άρχισε αυτή η εργασία δεν υπήρχε πρόσβαση σε πραγματική πανοραμική κάμερα, για την πειραματική επαλήθευση των προτεινόμενων μεθόδων, αποφασίστηκε η εξομοίωση της πανοραμικής κάμερας χρησιμοποιώντας έτοιμο λογισμικό, το οποίο επιτρέπει την δημιουργία συνθετικών ακολουθιών πανοραμικών εικόνων. Λόγω της προηγούμενης εμπειρίας που υπήρχε [Ako97] και των παρεχόμενων δυνατοτήτων, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα ελεύθερης χρήσης πρόγραμμα εξομοίωσης του τρισδιάστατου χώρου, το *POV-Ray* ή όπως είναι ο πλήρης τίτλος του, *Persistence Of Vision Raytracer* [tea99].

Το *POV-Ray* υποστηρίζει την εξομοίωση καμερών διαφόρων τύπων, μία από τις οποίες είναι και η πανοραμική, με μόνο μειονέκτημα ότι το εύρος του οπτικού πεδίου της είναι μέχρι 180^o. Ένα πλεονέκτημα του *POV-Ray* είναι η ιδιαίτερα πλούσια περιγραφική του γλώσσα, η οποία υποστηρίζει από απλά σχήματα (πολύγωνα, σφαίρες, κύβους, κώνους κλπ) μέχρι κοχλιοειδή αντικείμενα και δημιουργία σχημάτων με αλγεβρικές πράξεις, όπως ένωση ή διαφορά κώνου και σφαίρας. Επιπλέον, το *POV-Ray* μας δίνει την δυνατότητα δημιουργίας ακολουθιών εικόνων, εάν κανείς προσδιορίσει τον αριθμό των εικόνων της ακολουθίας και τον τρόπο με τον οποίο κινείται η κάμερα στον χώρο.

2.3.2 Εξομοίωση πανοραμικής κάμερας

Η πανοραμική κάμερα που υποστηρίζει το *POV-Ray* έχει σταθερό εύρος οπτικού πεδίου ίσο με 180^o. Προκειμένου να επιτευχθεί η εξομοίωση της κεντρικής πανοραμικής κάμερας των 360^o, για κάθε σκηνή που επεξεργάζεται το *POV-Ray* δημιουργείται και μια δεύτερη στην οποία έχει αντιστραφεί ο προσανατολισμός της κάμερας. Έτσι, για κάθε θέση της κάμερας το *POV-Ray* δημιουργεί δύο πανοραμικές εικόνες με οπτικό πεδίο εύρους 180^o. Η τελική πανοραμική εικόνα οπτικού πεδίου 360^o προκύπτει από την συνένωση των δύο επιμέρους εικόνων. Οι ορισμοί για την κάμερα που πρέπει να έχει κάθε αρχείο σκηνής για το *POV-Ray* πρέπει να είναι ως εξής:

```
//FRONT
camera {
    panoramic
    location <0, 0, 0>
    right x
    up y
```

```
    look_at z
}
```

για την μπροστινή θέα και

```
//BACK
camera {
    panoramic
    location <0, 0, 0>
    right x
    up y
    look_at -z
}
```

για την θέα προς τα πίσω.

Αποφασίστηκε οι εικόνες να είναι μεγέθους $900x200$, που δίνει λόγο πλάτους:ύψους ίσο με 4.5:1, ο οποίος είναι συνηθισμένος για εικόνες παρμένες από πανοραμική κάμερα, λόγω του ότι οι πανοραμικές κάμερες έχουν σχετικά μικρό οπτικό πεδίο στον κατακόρυφο άξονα. Επιπλέον, στα πειράματα που έγιναν χρησιμοποιήθηκαν εικόνες ανάλυσης $450x200$ καθώς και $1800x200$ [1] για να ερευνηθεί πως η ανάλυση του αισθητήρα της κάμερας επηρεάζει τα αποτελέσματα.

2.4 Εξαγωγή χαρακτηριστικών και ιχνηλάτηση - Το πακέτο KLT

Για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών σημείων και την ιχνηλάτηση τους σε διαδοχικές εικόνες της ακολουθίας, προτιμήθηκε η χρησιμοποίηση ενός έτοιμου πακέτου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το πακέτο *KLT* το οποίο αποτελεί μια υλοποίηση του ιχνηλάτη χαρακτηριστικών σημείων των Kanade, Lucas και Tomasi [LK81, TK91], από τον Birchfield Stan [Bir96]. Η δημιουργία του πακέτου έχει στηριχθεί και στην εργασία των Shi και Tomasi [TS94], οι οποίοι επεκτείνουν την μέθοδο που παρουσιάζεται στο [TK91]. Επιπλέον, εφαρμόζεται ιεραρχική ιχνηλάτηση πολλαπλών αναλύσεων που επιτρέπει την παρακολούθηση ακόμα μεγαλύτερων μετακινήσεων. Η ηλεκτρονική διεύθυνση μαζί με οδηγίες και την βιβλιοθήκη με τον κώδικα βρίσκεται στο *http://vision.stanford.edu/~birch/klt/*.

Πιο αναλυτικά, στην εργασία των Tomasi και Kanade [TK91] θεωρείται ότι η μετακίνηση του χαρακτηριστικού που ιχνηλατείται είναι μόνο μεταφορική: Έστω το

[1] Ενδιαφέρει μόνο η συντεταγμένη του πλάτους οπότε για λόγους οικονομίας χώρου δεν αυξήθηκε και η ανάλυση του ύψους των εικόνων

χαρακτηριστικό γνώρισμα μια εικόνας, το οποίο γράφεται συναρτήσει των χωροχρονικών μεταβλητών x, y, t ως $I(x, y, t)$. Έστω ότι το σημείο **x**=(x, y) μετακινείται κατά **d**=(ξ, η) μεταξύ δύο εικόνων. Τότε αν οι εικόνες είναι διαδοχικές με μια μικρή χρονική διαφορά τ, ισχύει:

$$I(x, y, t + \tau) = I(x - \xi, y - \eta, t) \tag{2.12}$$

Στην πραγματικότητα η σχέση 2.12 δεν ισχύει ακριβώς λόγω θορύβου. Οι Lucas και Kanade προτείνουν την ελαχιστοποίηση του πιθανού σφάλματος για να αντιστοιχήσουν μια μικρή περιοχή γύρω από το χαρακτηριστικό σημείο που ιχνηλατείται μεταξύ δύο διαδοχικών εικόνων. Ξαναορίζοντας $J(\mathbf{x}) = I(x, y, t + \tau)$ και $I(\mathbf{x} - \mathbf{d}) = I(x - \xi, y - \eta, t)$, τότε το μοντέλο για την περιοχή της εικόνας που ελέγχεται γίνεται:

$$J(\mathbf{x}) = I(\mathbf{x} - \mathbf{d}) + n(\mathbf{x}) \tag{2.13}$$

όπου $n(\mathbf{x})$ είναι ο θόρυβος. Κατόπιν, το διάνυσμα διαφοράς **d** επιλέγεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει το λάθος που ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση, για παράθυρο πλευράς W γύρω από το σημείο ενδιαφέροντος:

$$\epsilon = \int_W [I(\mathbf{x} - \mathbf{d}) - J(\mathbf{x})]^2 w(\mathbf{x})\, d\mathbf{x} \tag{2.14}$$

Το $w(\mathbf{x})$ είναι μια συνάρτηση βαρύτητας, η οποία μπορεί είτε να οριστεί σαν $w(\mathbf{x}) = 1$ στην απλούστερη περίπτωση ή να είναι κάποια συνάρτηση που δίνει μεγαλύτερο βάρος στο κέντρο του παραθύρου ή μια συνάρτηση που εξαρτάται από το είδος των χαρακτηριστικών που θέλουμε να ιχνηλατηθούν.

Υποθέτοντας μικρή μετατόπιση, η συνάρτηση έντασης της εικόνας I μπορεί να προσεγγιστεί με σειρές Taylor ως εξής:

$$I(\mathbf{x} - \mathbf{d}) = I(\mathbf{x}) - \mathbf{gd}, \tag{2.15}$$

όπου **g**=$(\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y})$ είναι το gradient της εικόνας για την συγκεκριμένη περιοχή. Τελικά ([TK91], σελ. 6-7) καταλήγουμε σε ένα σύστημα εξισώσεων, όπου άγνωστος είναι η μετατόπιση **d** :

$$G\mathbf{d} = \mathbf{e} \tag{2.16}$$

Ο πίνακας των συντελεστών G είναι ο συμμετρικός 2 x 2 πίνακας :

$$G = \int_W \mathbf{g}\mathbf{g}^{\mathbf{T}} w dA \tag{2.17}$$

και το **e** είναι ένα δισδιάστατο διάνυσμα που ορίζεται ως :

$$\mathbf{e} = \int_W (I - J)\, \mathbf{g} w dA \tag{2.18}$$

Ο πίνακας G μπορεί να υπολογιστεί από το gradient της μίας εικόνας και το διάνυσμα **e** από την διαφορά των δύο εικόνων, οπότε η μετατόπιση **d** υπολογίζεται λύνοντας το σύστημα 2.16.

Για την επιλογή των σημείων που είναι κατάλληλα για ιχνηλάτηση, για κάθε σημείο της εικόνας υπολογίζεται ο πίνακας G και οι ιδιοτιμές του. Κατόπιν γίνεται ταξινόμηση των σημείων ως προς την ελάχιστη ιδιοτιμή του G και επιλέγονται τα σημεία που αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες ιδιοτιμές. Η φυσική ερμηνεία αυτής της επιλογής είναι ότι πίνακες με μεγάλες ιδιοτιμές αντιστοιχούν σε περιοχές με έντονες διακυμάνσεις στην φωτεινότητα που είναι κατάλληλες για ιχνηλάτηση.

Για την ιχνηλάτηση, η εξίσωση 2.16 λύνεται επαναληπτικά μέχρι το σφάλμα ϵ όπως υπολογίζεται από την σχέση 2.14 να ελαχιστοποιηθεί. Τελικά ένα σημείο θεωρείται ότι ιχνηλατήθηκε σωστά εάν βρεθεί κάποια μετατόπιση **d** που να περιορίζει το σφάλμα ϵ κάτω από ένα προαποφασισμένο όριο. Εάν υπάρχουν περισσότερες από μία τέτοιες μετατοπίσεις, επιλέγεται εκείνη που δίνει το μικρότερο σφάλμα ϵ.

Οι Shi και Tomasi [TS94] επεκτείνουν το παραπάνω μοντέλο, επιτρέποντας οποιοδήποτε αφινικό μετασχηματισμό, δηλ. επιτρέπουν τον συνδυασμό γραμμικού μετασχηματισμού και μεταφοράς, δίνοντας την δυνατότητα ιχνηλάτησης χαρακτηριστικών που περιστρέφονται, μεγεθύνονται, μικραίνουν κλπ. Στο μοντέλο των Shi και Tomasi η μετατόπιση μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών ορίζεται ως $\delta = D\mathbf{x} + \mathbf{d}$ όπου

$$D = \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} \\ d_{yx} & d_{yy} \end{bmatrix}$$

είναι ο πίνακας παραμόρφωσης. Επομένως, αν $A = \mathbf{1} + D$ και το **x** μετριέται ως προς το κέντρο του παραθύρου, το μοντέλο της εικόνας γίνεται:

$$J(A\mathbf{x} + \mathbf{d}) = I(\mathbf{x}) + n(\mathbf{x}) \tag{2.19}$$

Το λάθος τώρα ορίζεται από την εξίσωση:

$$\epsilon = \int_W [I(\mathbf{x}) - J(A\mathbf{x} + \mathbf{d})]^2 w(\mathbf{x})\, d\mathbf{x} \tag{2.20}$$

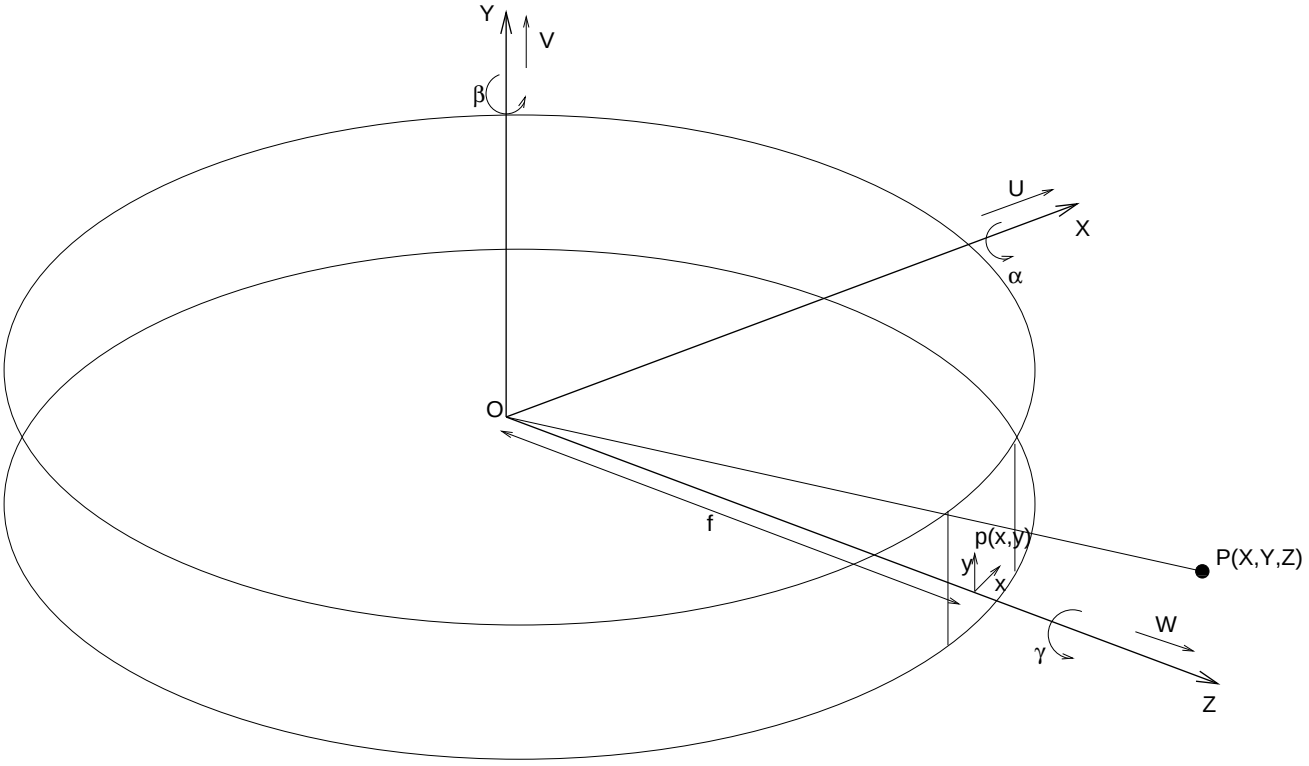
Στην τρέχουσα έκδοση του *KLT* η επέκταση των Shi και Tomasi δεν έχει υλοποιηθεί, οπότε χρησιμοποιείται μόνο η καθαρή μεταφορική κίνηση ως διαφορά μεταξύ δύο σημείων. Στην περίπτωση της παρούσης εργασίας, λόγω της παραμόρφωσης που εισάγεται από την πανοραμική κάμερα, η έλλειψη αυτής της δυνατότητας δημιουργεί προβλήματα στην σωστή ιχνηλάτηση σε διαδοχικές εικόνες όταν η μετατόπιση είναι μεγάλη.

Κεφάλαιο 3

Οι προτεινόμενες μέθοδοι

3.1 1η προσέγγιση - Χρησιμοποίηση οπτικής ροής

Υποθέτοντας ότι χρησιμοποιείται μια κεντρική πανοραμική κάμερα 360^o, με το σύστημα συντεταγμένων της όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1, τότε οι εξισώσεις που ισχύουν για τις συνιστώσες της οπτικής ροής (2.4,2.5) μπορεί να θεωρηθεί ότι συνεχίζουν να ισχύουν

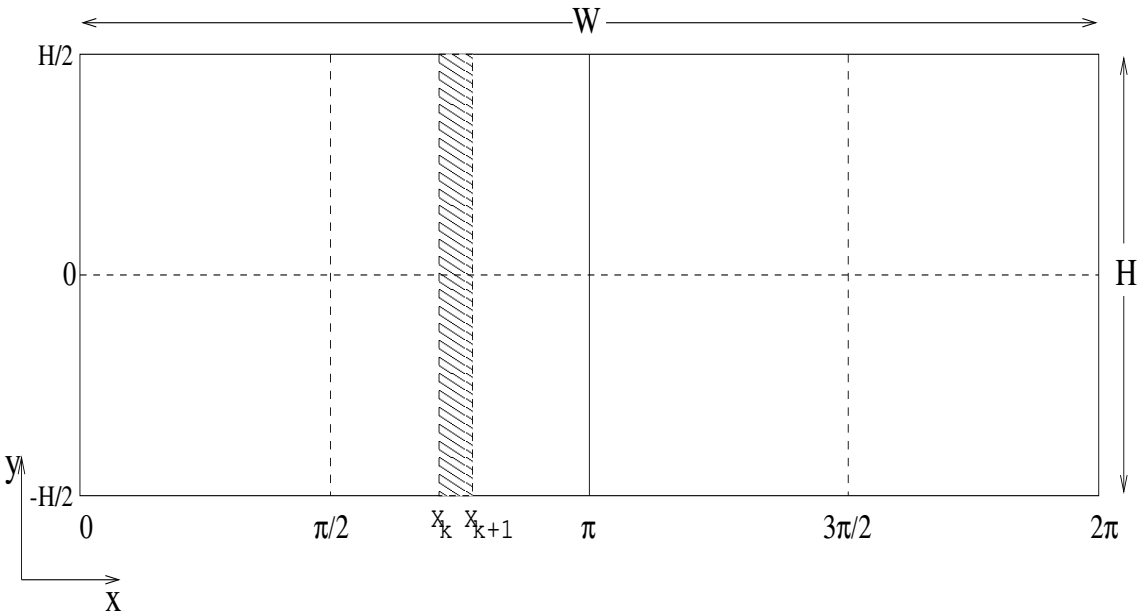


Σχήμα 3.1: Το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας

και στην περίπτωση της πανοραμικής κάμερας, αν υποτεθεί ότι το οπτικό πεδίο της

πανοραμικής μας κάμερας χωρίζεται σε κάθετες στενές λωρίδες (σχήμα 3.2). Σε κάθε μία από αυτές τις λωρίδες ισχύουν οι εξισώσεις (2.4) και (2.5) γιατί είναι σχεδόν επίπεδες. Κάθε φορά θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η γωνία που σχηματίζει η λωρίδα αυτή με την κατεύθυνση προς την οποία θεωρούμε ότι κινείται η πανοραμική κάμερα ώστε να επιλέγεται η σωστή συνιστώσα της κίνησης που αντιστοιχεί σε αυτή την λωρίδα.

Στην παρούσα περίπτωση η πανοραμική εικόνα χωρίστηκε σε τόσες λωρίδες όσες μας επιτρέπει ο αριθμός των εικονοστοιχείων στον οριζόντιο άξονα, δηλαδή κάθε λωρίδα έχει πάχος (στον άξονα των x) όσο ένα εικονοστοιχείο και είναι ουσιαστικά μια στήλη. Επιπλέον, σε κάθε στήλη της εικόνας αντιστοιχεί μια γωνία, η οποία υπολογίζεται διαιρώντας την συντεταγμένη κάθε στήλης στον άξονα των x με το 2π, εφόσον το πλάτος της εικόνας εκτείνεται από 0 έως 2π λόγω του εύρους του οπτικού πεδίου. Η φορά προς την οποία κινείται η πανοραμική κάμερα ορίζεται να είναι πάντα στο $\frac{\pi}{2}$.



Σχήμα 3.2: Το οπτικό πεδίο της κάμερας και μία λωρίδα

Υποθέτοντας ότι κάθε λωρίδα είναι τόσο στενή ώστε x=0 και δεδομένου ότι έχει οριστεί πως δεν υπάρχει περιστροφική κίνηση γύρω από τον άξονα Z και μεταφορική πάνω στον άξονα Y, δηλ. γ=0 και V=0 τότε οι εξισώσεις (2.4,2.5) γίνονται:

$$u = -\frac{Uf}{Z} - \beta f \tag{3.1}$$

$$v = \frac{yW}{Z} + \alpha(\frac{y^2}{f} + f) \tag{3.2}$$

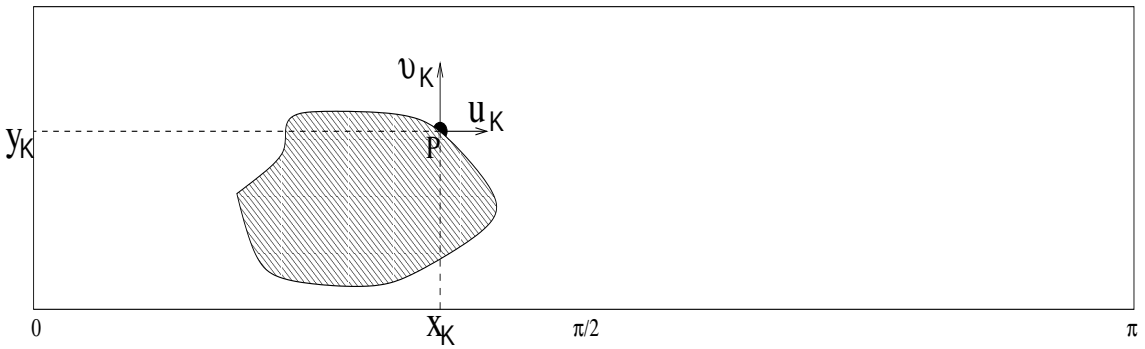
Επιπλέον, εάν η πανοραμική κάμερα δεν περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα

της, τότε για κάθε λωρίδα (στήλη) ισχύει ότι β=0, οπότε η εξίσωση 3.1, γίνεται:

$$u = -\frac{Uf}{Z} \tag{3.3}$$

Αντίστοιχα, εάν η πανοραμική κάμερα δεν περιστρέφεται γύρω από την φορά κίνησης, τότε για κάθε λωρίδα ισχύει ότι α=0, οπότε η εξίσωση 3.2, γίνεται:

$$v = \frac{yW}{Z} \tag{3.4}$$



Σχήμα 3.3: Ένα αντικείμενο όπως απεικονίζεται στην κυλινδρική εικόνα που παίρνει η πανοραμική κάμερα

Η υπόθεση (σχήμα 3.3) είναι ότι υπάρχει ένα σημείο P, με συντεταγμένη στον άξονα x την x_k και συντεταγμένη στον άξονα y την y_k με αντίστοιχες ταχύτητες μετατόπισης τις u_k και v_k. Η κάμερα κινείται με ταχύτητα $(U, V, W) = (0, 0, S)$, όπου η κατεύθυνση του μοναδιαίου $(0, 0, 1)$ αντιστοιχεί στην γωνία $\frac{\pi}{2}$, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.2.

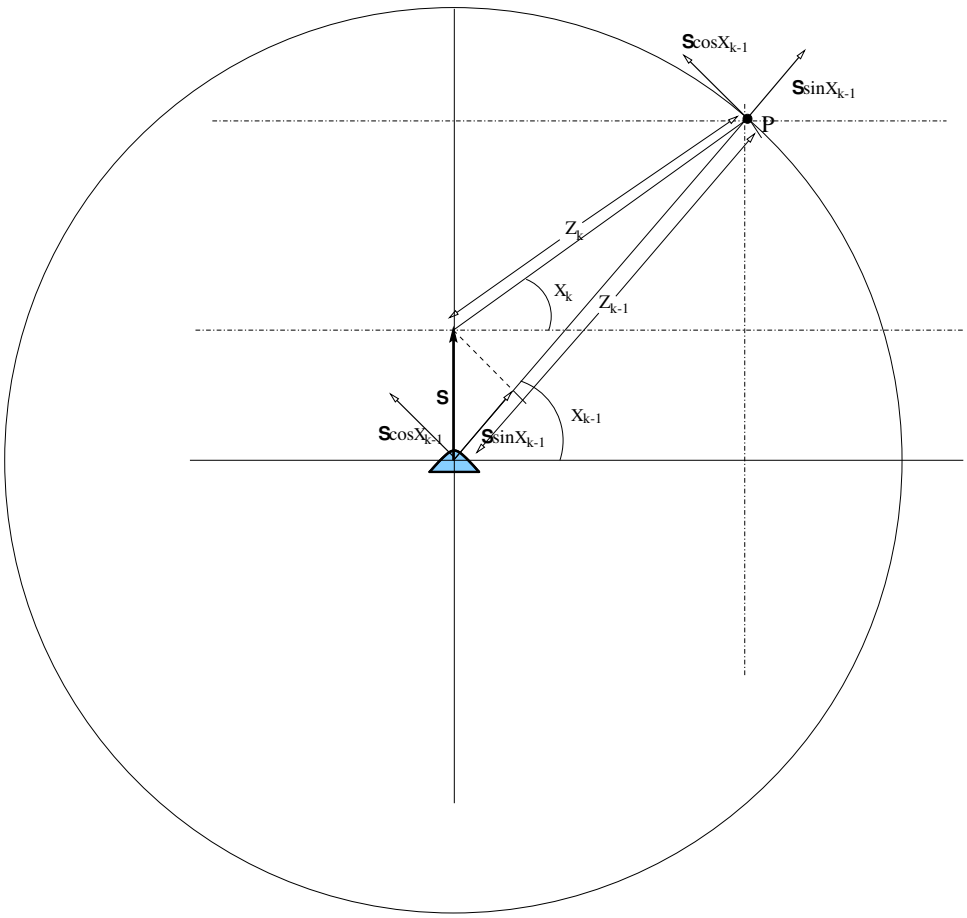
Τότε, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4, για την χρονική στιγμή k ισχύει ότι:

$$U_k = S\cos x_{k-1} \quad \Rightarrow \quad u_k = -fS\frac{\cos x_{k-1}}{Z_{k-1}} \tag{3.5}$$

$$W_k = S\sin x_{k-1} \quad \Rightarrow \quad v_k = S\frac{y_{k-1}\sin x_{k-1}}{Z_{k-1}} \tag{3.6}$$

Επειδή $u_k \equiv x_k - x_{k-1}$, μεταξύ διαδοχικών εικόνων της ακολουθίας ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} x_1 - x_0 &= -fS\frac{\cos x_0}{Z_0} \\ &\vdots \\ x_k - x_{k-1} &= -fS\frac{\cos x_{k-1}}{Z_{k-1}} \end{aligned} \tag{3.7}$$



Σχήμα 3.4: Πανοραμική κάμερα που κινείται με ταχύτητα S σε δύο διαδοχικές φάσεις της ακολουθίας

Αντίστοιχα για την κάθετη μετατόπιση, επειδή $v_k \equiv y_k - y_{k-1}$, μεταξύ διαδοχικών εικόνων της ακολουθίας ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} y_1 - y_0 &= S\frac{y_0 \sin x_0}{Z_0} \\ &\vdots \\ y_k - y_{k-1} &= S\frac{y_{k-1} \sin x_{k-1}}{Z_{k-1}} \end{aligned} \tag{3.8}$$

Για την απόσταση Z_k ενός σημείου P από την κάμερα (σχήμα 3.4) ισχύει:

$$\begin{aligned} Z_k^2 &= (Z_{k-1} - S\sin x_{k-1})^2 + (S\cos x_{k-1})^2 \Rightarrow \\ Z_k^2 &= Z_{k-1}^2 + S^2 \sin^2 x_{k-1} - 2SZ_{k-1}\sin x_{k-1} + S^2\cos^2 x_{k-1} \Rightarrow \\ Z_k^2 &= Z_{k-1}^2 + S^2 - 2SZ_{k-1}\sin x_{k-1} \Rightarrow \\ Z_k &= \sqrt{Z_{k-1}^2 + S^2 - 2SZ_{k-1}\sin x_{k-1}} \end{aligned} \tag{3.9}$$

Δηλαδή αναδρομικά μπορεί να υπολογιστεί το Z_k αρκεί να είναι γνωστή η αρχική απόσταση Z_0 και η ταχύτητα S της κάμερας:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{Z_0^2 + S^2 - 2SZ_0 \sin x_0} \\ &\vdots \\ Z_{k-1} &= \sqrt{Z_{k-2}^2 + S^2 - 2SZ_{k-2} \sin x_{k-2}} \\ Z_k &= \sqrt{Z_{k-1}^2 + S^2 - 2SZ_{k-1} \sin x_{k-1}} \end{aligned} \tag{3.10}$$

Στις πανοραμικές εικόνες, το οπτικό πεδίο κατά τον κατακόρυφο άξονα είναι αρκετά πιο στενό σε σχέση με το οπτικό πεδίο κατά τον οριζόντιο άξονα, για αυτό συμφέρει να χρησιμοποιηθεί το πλάτος ενός αντικειμένου που απεικονίζεται κατά μήκος του άξονα x της εικόνας, για τον υπολογισμό παραμέτρων όπως ο χρόνος επαφής. Αν γίνει τμηματοποίηση της εικόνας και αναγνώριση των αντικειμένων, τότε μπορεί να υπολογιστεί η ελάχιστη και μέγιστη οριζόντια συνιστώσα κάθε αντικειμένου (σχήμα 3.3) έτσι ώστε το πλάτος κάθε αντικειμένου να δίνεται από την εξίσωση:

$$\Delta x_{RL} = x_{R_k} - x_{L_k} = -fS\frac{\cos x_{R_{k-1}}}{Z_{R_{k-1}}} + fS\frac{\cos x_{L_{k-1}}}{Z_{L_{k-1}}} \tag{3.11}$$

Το πλεονέκτημα που έχει η χρησιμοποίηση της διαφοράς συντεταγμένων Δx_{RL} είναι ότι δεν είναι ανάγκη να ισχύει ο περιορισμός της μη ύπαρξης περιστροφικής κίνησης γύρω από τον κατακόρυφο άξονα της κάμερας, δηλαδή μπορεί το β να είναι διαφορετικό του μηδέν, γιατί κάθε σημείο του ίδιου αντικειμένου έχει την ίδια περιστροφική ταχύτητα, οπότε παίρνοντας διαφορά συντεταγμένων η περιστροφική κίνηση αλληλοαναιρείται. Παρόλο που το Δx_{RL} είναι μετρήσιμο και γνωστό απ'την εικόνα, συνεχίζει η ύπαρξη τριών βασικών αγνώστων, που είναι η ταχύτητα S της κάμερας και οι αρχικές αποστάσεις των δύο άκρων του αντικειμένου από την κάμερα Z_{R_0} και Z_{L_0}, οπότε η χρήση του πλάτους του αντικειμένου τελικά δεν βοηθάει στον υπολογισμό του χρόνου επαφής.

Επιστρέφοντας στην περίπτωση των συντεταγμένων ενός χαρακτηριστικού σημείου, αν η ταχύτητα S της κάμερας είναι γνωστή, είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης της κάμερας από το συγκεκριμένο σημείο, όπως ήταν την χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στην αμέσως προηγούμενη εικόνα της ακολουθίας, χρησιμοποιώντας είτε την μετατόπιση κατά τον οριζόντιο άξονα ή την μετατόπιση κατά τον κατακόρυφο άξονα:

$$(3.7) \Rightarrow Z_{k-1} = fS\frac{\cos x_{k-1}}{(x_{k-1} - x_k)} \tag{3.12}$$

$$(3.8) \Rightarrow Z_{k-1} = S\frac{y_{k-1} \sin x_{k-1}}{(y_k - y_{k-1})} \tag{3.13}$$

Αντίστοιχα, υποθέτοντας ότι για ένα σημείο είναι γνωστή η αρχική απόσταση του από την κάμερα, τότε μπορεί να υπολογιστεί αναδρομικά η ταχύτητα S με την οποία κινείται η κάμερα:

$$(3.7) \Rightarrow S = \frac{(x_{k-1} - x_k)\, Z_{k-1}}{f \cos x_{k-1}} \tag{3.14}$$

$$(3.8) \Rightarrow S = \frac{(y_k - y_{k-1})\, Z_{k-1}}{y_{k-1} \sin x_{k-1}} \tag{3.15}$$

Επομένως, αν μια κεντρική πανοραμική κάμερα οπτικού πεδίου 360^o κινείται πάντα με σταθερή ταχύτητα S και κοιτάει μόνο προς την κατεύθυνση προς την οποία κινείται, υπάρχει τρόπος υπολογισμού της απόστασης ενός χαρακτηριστικού σημείου από την κάμερα αν ξέρουμε την ταχύτητα της.

Αντιστρόφως, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας με την οποία κινείται η κάμερα αν υπάρχει ένα σημείο αναφοράς του οποίου η θέση ως προς την κάμερα είναι γνωστή.

Στην περίπτωση που τόσο η ταχύτητα της κάμερας όσο και η απόσταση ενός σημείου είναι άγνωστοι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο λόγος $\frac{Z_{k-1}}{S}$ που δίνει τον χρόνο επαφής, δηλ. την επικινδυνότητα σύγκρουσης της κάμερας με το επίπεδο του σημείου που είναι κάθετο στην φορά κίνησης:

$$(3.7) \Rightarrow \frac{Z_{k-1}}{S} = \frac{f \cos x_{k-1}}{(x_{k-1} - x_k)} \tag{3.16}$$

$$(3.8) \Rightarrow \frac{Z_{k-1}}{S} = \frac{y_{k-1} \sin x_{k-1}}{(y_k - y_{k-1})} \tag{3.17}$$

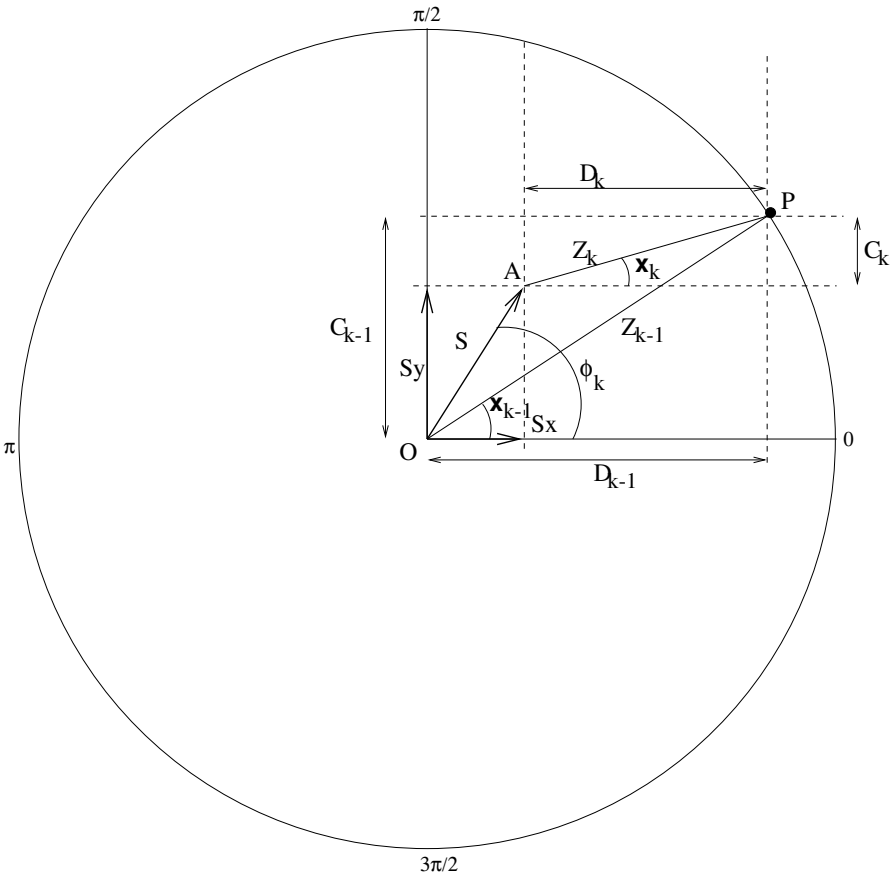
Όσο πιο κοντά στην μονάδα βρίσκεται ο λόγος $\frac{Z_{k-1}}{S}$ για ένα χαρακτηριστικό σημείο, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος σύγκρουσης του παρατηρητή με το συγκεκριμένο σημείο. Αντιστρόφως, αν ο λόγος $\frac{Z_{k-1}}{S}$ είναι σημαντικά μεγαλύτερος της μονάδας, δεν υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης.

3.2 2η προσέγγιση - Χρησιμοποίηση αντιστοίχισης χαρακτηριστικών

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε προσπάθεια υπολογισμού του χρόνου επαφής και της ταχύτητας κίνησης της κάμερας χρησιμοποιώντας ως αφετηρία τις εξισώσεις για την οπτική ροή που ισχύουν στις κλασσικές κάμερες προοπτικής προβολής και εφαρμόζοντας τις με τις κατάλληλες τροποποιήσεις στην περίπτωση των πανοραμικών καμερών. Εναλλακτικά, μπορεί να ακολουθηθεί μια διαφορετική προσέγγιση που να οδηγεί στον

υπολογισμό ενός "κριτηρίου επικινδυνότητας", δηλ. τον υπολογισμό ενός ορίου για τον χρόνο επαφής, που να είναι δυνατή η χρησιμοποίηση του για να αποφασίσουμε αν ένα σημείο που μας ενδιαφέρει είναι "επικίνδυνα" κοντά στην κάμερα, σε σχέση πάντα με την ταχύτητά της.

Έστω ένα σημείο P, με συντεταγμένες στον x άξονα τις x_k και x_{k-1} για δύο διαδοχικές εικόνες της ακολουθίας (σχήμα 3.5). Η γωνία ϕ_k, είναι η γωνία που σχηματίζει η κατεύθυνση της μεταφορικής κίνησης της κάμερας με την αρχή της εικόνας (που αντιστοιχεί στην γωνία των 0^o). Όπως φαίνεται και από το σχήμα, ισχύουν οι εξής



Σχήμα 3.5: Κίνηση πανοραμικής κάμερας ως προς χαρακτηριστικό σημείο P

εξισώσεις για τις εφαπτόμενες των γωνιών που αντιστοιχούν στα τόξα x_k και x_{k-1}:

$$\tan x_k = \frac{C_k}{D_k}$$

$$\tan x_{k-1} = \frac{C_{k-1}}{D_{k-1}}$$

Επιπλέον:

$$\left.\begin{array}{l} C_{k-1}=C_k + S_y=C_k + S\sin\phi_k \\ D_{k-1}=D_k + S_x=D_k + S\cos\phi_k \end{array}\right\} \Rightarrow \tan x_{k-1}=\frac{C_k + S\sin\phi_k}{D_k + S\cos\phi_k}$$

Επομένως, για την διαφορά των εφαπτομένων, ισχύει:

$$\begin{aligned} \Delta\tan &= \tan x_k - \tan x_{k-1}=\frac{C_k}{D_k} - \frac{C_k + S\sin\phi_k}{D_k + S\cos\phi_k}= \\ &= \frac{C_kD_k + C_kS\cos\phi_k - C_kD_k - D_kS\sin\phi_k}{D_k(D_k + S\cos\phi_k)}= \\ &= \frac{S}{D_k + S\cos\phi_k}(\tan x_k\cos\phi_k - \sin\phi_k) \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\left.\begin{array}{rcl} \Rightarrow \frac{D_k+S\cos\phi_k}{S} &=& \frac{\tan x_k\cos\phi_k-\sin\phi_k}{\tan x_k-\tan x_{k-1}} \\ D_k &=& Z_k\cos x_k \end{array}\right\} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{Z_k\cos x_k}{S} &= \frac{\tan x_k\cos\phi_k - \sin\phi_k - \tan x_k\cos\phi_k + \tan x_{k-1}\cos\phi_k}{\tan x_k - \tan x_{k-1}} \\ \Rightarrow \frac{Z_k}{S} &= \frac{\tan x_{k-1}\cos\phi_k - \sin\phi_k}{(\tan x_k - \tan x_{k-1})\cos x_k} \end{aligned} \tag{3.18}$$

Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, ισχύει ότι $\phi_k=\frac{\pi}{2}$ οπότε αντικαθιστώντας στην 3.18:

$$\frac{Z_k}{S} = \frac{1}{\tan x_{k-1}\cos x_k - \sin x_k} \tag{3.19}$$

$$\text{ή} \quad \frac{Z_k}{S} = \frac{1}{(\tan x_{k-1} - \tan x_k)\cos x_k} \tag{3.20}$$

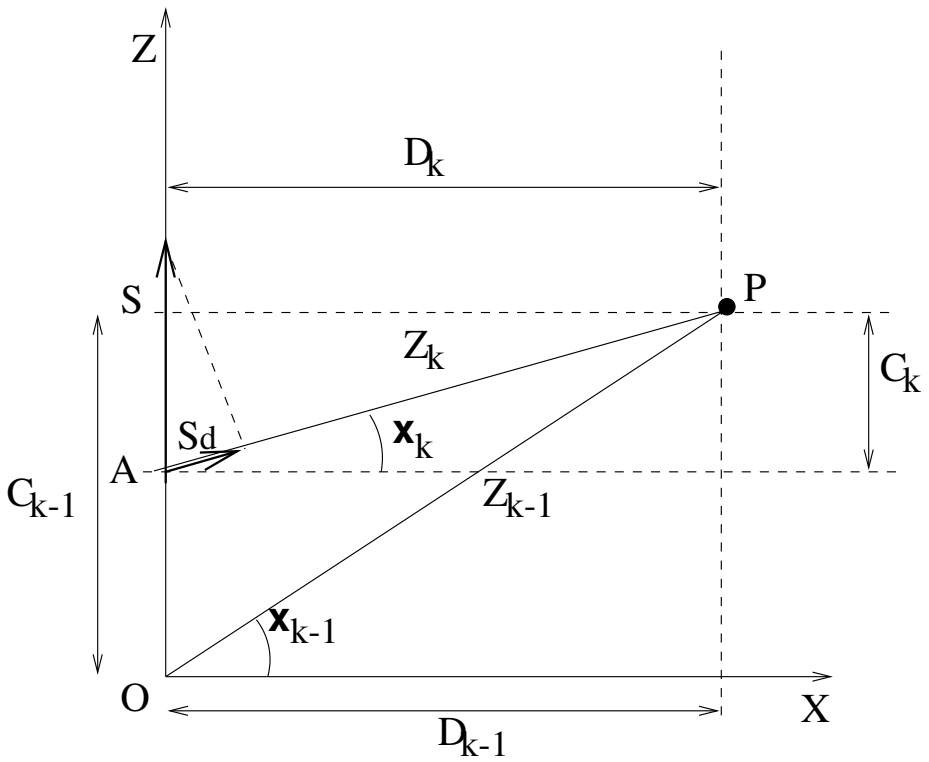
$$\text{ή} \quad \frac{Z_k}{S} = \frac{\cos x_{k-1}}{\sin(x_{k-1} - x_k)} \tag{3.21}$$

Οι τρεις εξισώσεις (3.19),(3.20) και (3.21) είναι ισοδύναμες, με πιο συμφέρουσα από άποψη υπολογιστικής πολυπλοκότητας την εξίσωση (3.21), με δύο τριγωνομετρικές πράξεις και μία διαίρεση. Οι εξισώσεις (3.19) και (3.20) αντιστοιχούν σε τρεις τριγωνομετρικές πράξεις, μια διαίρεση και ένα πολλαπλασιασμό. Για τον υπολογισμό των Z_k ή S, αρκεί η λύση της εξίσωσης (3.21) ως προς την μεταβλητή που είναι άγνωστη:

$$S = \frac{Z_k\sin(x_{k-1} - x_k)}{\cos x_{k-1}} \tag{3.22}$$

$$Z_k = \frac{S\cos x_{k-1}}{\sin(x_{k-1} - x_k)} \tag{3.23}$$

Αν τόσο η ταχύτητα της κάμερας, όσο και η αρχική απόσταση θεωρούνται άγνωστοι, ο λόγος $\frac{Z_k}{S}$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο επικινδυνότητας. Εάν είναι μικρότερος της μονάδας, σημαίνει ότι την επόμενη χρονική στιγμή η κάμερα θα έχει καλύψει απόσταση μεγαλύτερη από Z_k, οπότε μπορεί να συγκρουστεί με το σημείο P.



Σχήμα 3.6: Κίνηση πανοραμικής κάμερας ως προς χαρακτηριστικό σημείο P στην περίπτωση που ϕ_k=$\pi/2$ και όπου S_d είναι η συνιστώσα της ταχύτητας S στην κατεύθυνση του σημείου P.

Ο λόγος $\frac{Z_k}{S}$ δίνει την ίδια επικινδυνότητα σε όλα τα σημεία του οπτικού πεδίου τα οποία ισαπέχουν από την κάμερα. Θα ήταν ωστόσο επιθυμητό το μέτρο της επικινδυνότητας να εξαρτάται από το κατά πόσον ένα σημείο βρίσκεται κοντά στην κατεύθυνση της μεταφορικής κίνησης του ρομπότ. Για να επιτευχθεί αυτό αρκεί να υπολογιστεί ο λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ όπου S_d είναι η συνιστώσα της μεταφορικής κίνησης S στην κατεύθυνση του σημείου P (σχήμα 3.6). Για την συνιστώσα S_d ισχύει ότι

$$S_d \;=\; S\cos(\frac{\pi}{2} - x_k) = S\sin x_k,$$

οπότε η εξίσωση (3.21) γίνεται:

$$\frac{Z_k}{S_d} \;=\; \frac{\cos x_{k-1}}{\sin(x_{k-1} - x_k)\,\sin x_k} \tag{3.24}$$

Η εξίσωση (3.24) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του κινδύνου σύγκρουσης με το σημείο P στο επόμενο βήμα. Συγκεκριμένα εάν $\frac{Z_k}{S_d} < 1$ υπάρχει βεβαιότητα για σύγκρουση την επόμενη χρονική στιγμή. Θεωρητικά, για να μην υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης πρέπει $\frac{Z_k}{S_d} > 1$. Πρακτικά, λόγω της αδράνειας του ρομπότ, μπορεί να απαιτηθεί ο λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ να είναι σημαντικά μεγαλύτερος της μονάδας.

Κεφάλαιο 4

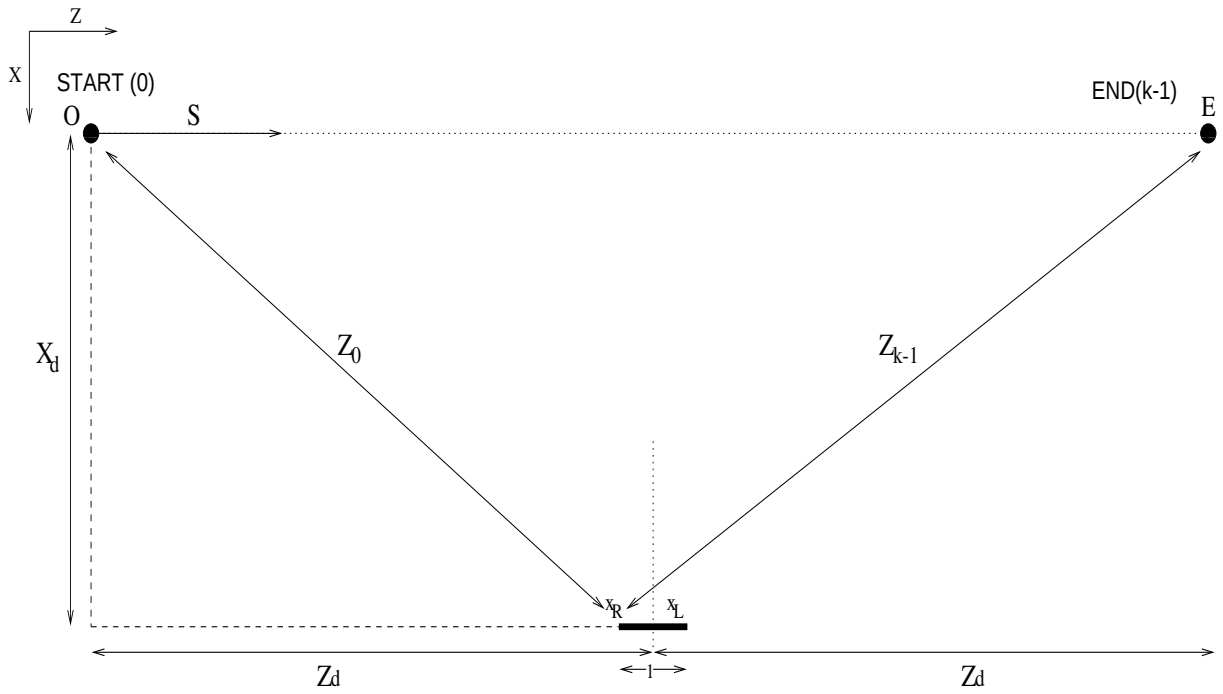
Συγκρίσεις μεθόδων και πειραματικά αποτελέσματα

Σκοπός των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν ήταν να μελετηθεί η ακρίβεια των προτεινόμενων μεθόδων και ο τρόπος που αυτή επηρεάζεται από τις διάφορες παραμέτρους, όπως την ταχύτητα κίνησης του ρομπότ και τις αποστάσεις των ιχνηλατούμενων σημείων από την κάμερα. Επιπλέον, στα πειράματα μελετήθηκε η επίδραση της διαφορετικής ανάλυσης της εικόνας στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Για τα προαναφερθέντα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένα απλό σκηνικό στο *POV-Ray* ώστε να είναι δυνατή η ιχνηλάτηση ενός σημείου από την αρχή της ακολουθίας έως στο τέλος της, για να μην επηρεαστούν οι μετρήσεις από αστοχία του ιχνηλάτη του *KLT*.

Για την εξομοίωση πολυπλοκότερων σκηνών όπως στον πραγματικό κόσμο, δημιουργήθηκε μια σύνθετη σκηνή με το *POV-Ray* και χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο επικινδυνότητας για την δημιουργία ενός χάρτη επικίνδυνων σημείων.

4.1 Αποτελέσματα εφαρμογής σε απλές ακολουθίες εικόνων

Στα πειράματα που αναφέρονται στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε σαν είσοδος για το *POV-Ray* ένα απλό σκηνικό η κάτοψη του οποίου απεικονίζεται στο σχήμα 4.1. Πρόκειται για ένα τετράγωνο πλευράς 1 του οποίου ιχνηλατείται η δεξιά άκρη X_R, όπως η κάμερα κινείται. Η κάμερα ξεκινάει από την θέση O με σταθερή ταχύτητα S και φορά κίνησης πάνω στον άξονα Z. Αρχικά, το κέντρο του τετραγώνου βρίσκεται σε απόσταση κατά τον Z άξονα Z_d και κατά τον X άξονα X_d από το κέντρο της κάμερας. Η κάμερα καλύπτει απόσταση ίση με $2 \times Z_d$ μέχρι το σημείο E. Η απευθείας απόσταση



Σχήμα 4.1: Το σκηνικό των πειραμάτων-δισδιάστατη άποψη (κάτοψη)

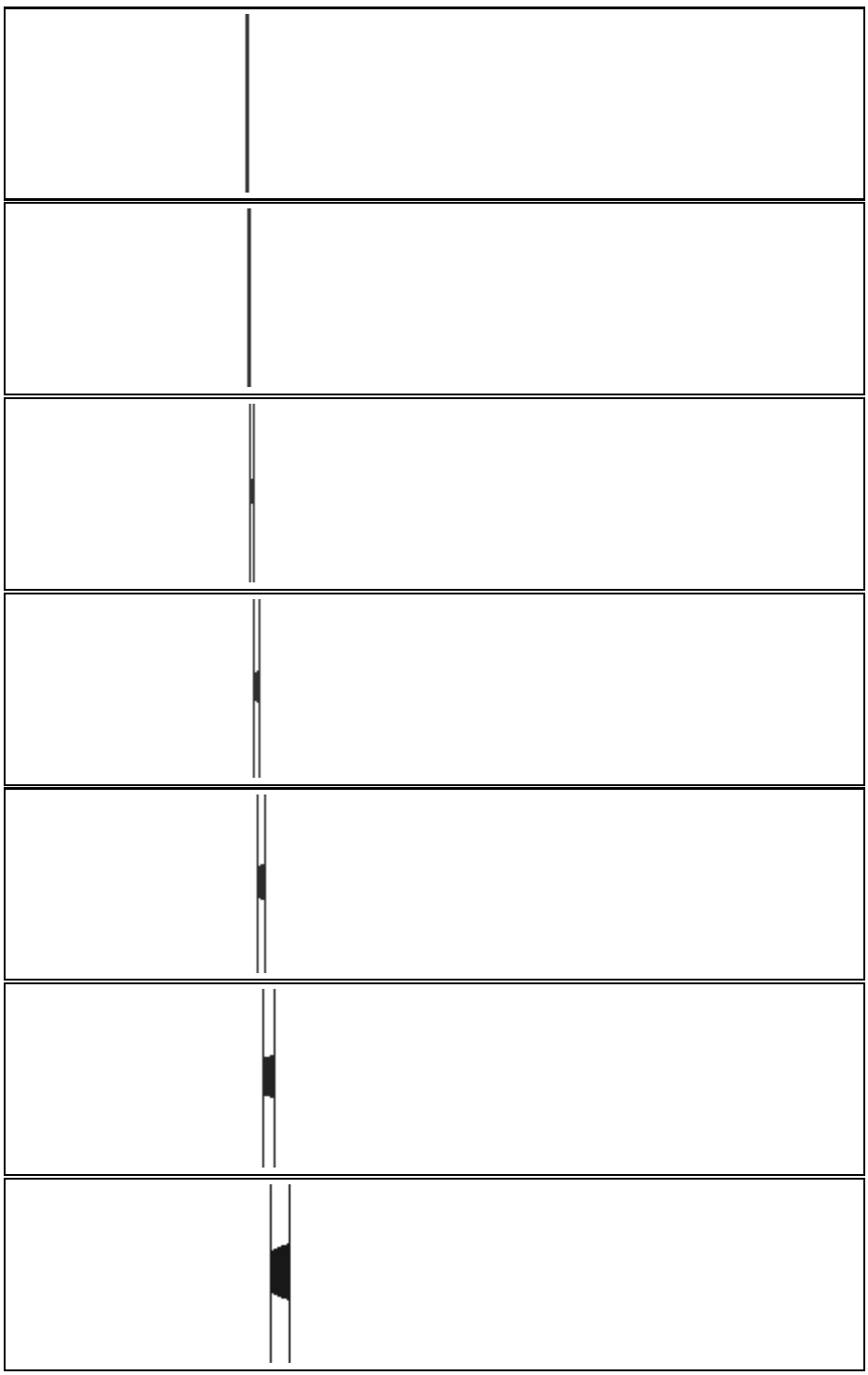
της κάμερας από την πλευρά X_R είναι Z_0 στην αρχή (θέση O) για να καταλήξει να είναι Z_{k-1} (θέση E) στην τελευταία εικόνα της ακολουθίας. Το σκηνικό είναι όσο το δυνατόν πιο απλό ώστε όποια διαφορά στις μετρήσεις να μην οφείλεται σε αποτυχία ιχνηλάτησης του σωστού σημείου. Να σημειωθεί, ότι όταν γίνεται αναφορά σε ιχνηλάτηση σημείου για τα συγκεκριμένα πειράματα, εννοείται η ιχνηλάτηση ενός σημείου που έχει ίδια οριζόντια συνιστώσα με την πλευρά X_R. Επιπλέον, για την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου χρησιμοποιήθηκε μόνο η οριζόντια μετατόπιση (εξισώσεις 3.12, 3.14 και 3.16).

Στα σχήματα 4.2 και 4.3 απεικονίζονται ορισμένες εικόνες της ακολουθίας για την σκηνή που περιγράφηκε, για οριζόντια ανάλυση της εικόνας ίση με 450 εικονοστοιχεία, ταχύτητα κάμερας S=0.2 και αρχικές αποστάσεις $(X_d, Z_d) = (1, 6)$.

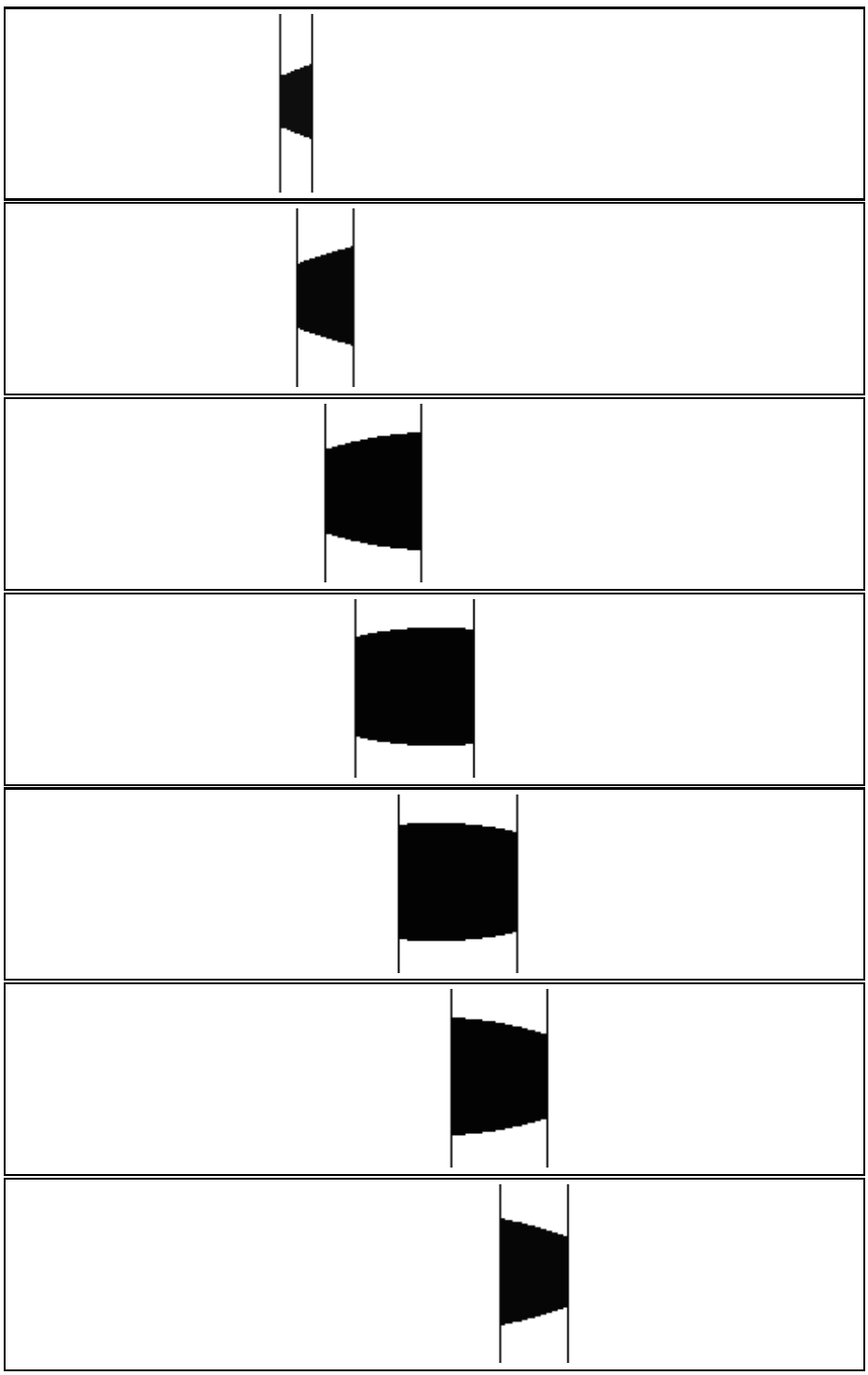
Στα πειράματα που ακολουθούν, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά, τα αποτελέσματα για τον πρώτο αλγόριθμο αφορούν μόνο την οριζόντια μετατόπιση.

4.1.1 Πειράματα με διαφορετικές ταχύτητες

Στην σειρά των πειραμάτων που ακολουθούν, έχει διατηρηθεί σταθερή η ανάλυση της εικόνας (900 $\times$ 200) και οι αρχικές αποστάσεις έχουν οριστεί να είναι X_d=2 και Z_d=5 για όλες τις περιπτώσεις. Μεταβάλλεται μόνο η ταχύτητα S με την οποία κινείται η κάμερα. Τα πειράματα επαναλήφθηκαν τέσσερις φορές με ταχύτητες S=0.1, S=0.2, S=0.4



Σχήμα 4.2: Οι εικόνες 0,3,6,9,12,15 και 18 της ακολουθίας των πειραμάτων, για IW=450, S=0.2, X_d=1 και Z_d=6. Οι κάθετες στήλες που αντιστοιχούν στα ίχνη των πλευρών είναι τονισμένες.



Σχήμα 4.3: Οι εικόνες 21,24,27,29,31,33 και 35 της ακολουθίας των πειραμάτων, για IW=450, S=0.2, X_d=1 και Z_d=6. Οι κάθετες στήλες που αντιστοιχούν στα ίχνη των πλευρών είναι τονισμένες.

και S=1.0.

Αρχικά η κάμερα κινείται με μικρή ταχύτητα S=0.1. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το σχήμα 4.4 τα αποτελέσματα από την εικοστή εικόνα της ακολουθίας, οπότε και αρχίζει να πλησιάζει το ιχνηλατούμενο σημείο, είναι αρκετά ικανοποιητικά και για τις δύο μεθόδους. Συγκεκριμένα, η εκτίμηση για την ταχύτητα είναι $S \pm 0.01$, που αντιστοιχεί σε σχετική διαφορά (δείτε σχήμα 4.8) από την πραγματική ταχύτητα $\pm 10\%$. Το ίδιο ισχύει και για την εκτίμηση του βάθους. Η κορυφή που εμφανίζεται στο διάγραμμα του λόγου Z_k / S_d οφείλεται στο ότι όταν περνάει το σημείο δίπλα ακριβώς από την κάμερα, τυχαίνει να γίνει x_k=$\frac{\pi}{2}$ οπότε εμφανίζεται 0 στον παρανομαστή της εξίσωσης (3.24).

Τα ίδια ισχύουν και για την περίπτωση που S=0.2 (σχήμα 4.5). Εφόσον η διαφορά κλίσης στο οπτικό πεδίο για δύο διαδοχικές εικόνες είναι μεγαλύτερη από 1 μοίρα, τα αποτελέσματα που δίνουν και οι δύο μέθοδοι είναι ικανοποιητικά (γράφημα (c) στα σχήματα 4.4, 4.5, 4.6 και 4.7).

Αυξάνοντας την ταχύτητα με την οποία κινείται η κάμερα παρατηρούμε ότι για S=0.4 (σχήμα 4.6) η πρώτη μέθοδος αρχίζει να δίνει χειρότερα αποτελέσματα στις εκτιμήσεις για την ταχύτητα και το βάθος σε σχέση με την δεύτερη. Η διαφορά είναι ιδιαίτερα εμφανής στην περίπτωση που η κάμερα κινείται με μεγάλη ταχύτητα S=1.0 (σχήμα 4.11, γραφήματα (a),(b)), οπότε η πρώτη μέθοδος έχει σχετικό σφάλμα $\approx 4\%$. Αντιθέτως η δεύτερη μέθοδος δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα με σχετικό σφάλμα $\leq 1\%$. Επίσης, η εκτίμηση που γίνεται για το κριτήριο επικινδυνότητας (γράφημα (d) των σχημάτων 4.4, 4.5, 4.6 και 4.7) είναι πιο αξιόπιστη όσο μεγαλώνει η ταχύτητα, όπως φαίνεται και από την μείωση του σχετικού σφάλματος (γράφημα (c) των σχημάτων 4.8, 4.9, 4.10 και 4.11).

Όσο η ταχύτητα αυξάνει και οι δύο μέθοδοι δίνουν καλύτερες εκτιμήσεις για το βάθος και την ταχύτητα, λόγω των σημαντικών διαφορών κλίσης μεταξύ κάθε εικόνας, δηλαδή λόγω της μεγαλύτερης μετατόπισης του ιχνηλατούμενου σημείου. Συγκρινόμενες, οι δύο μέθοδοι δίνουν πανομοιότυπα αποτελέσματα για μικρές ταχύτητες (S=$0.1, 0.2$), όμως όσο η ταχύτητα αυξάνεται ($S \geq 0.4$), η δεύτερη μέθοδος αρχίζει να πλεονεκτεί της πρώτης ως προς την ακρίβεια των υπολογισμών. Η διαφορά που εμφανίζεται μεταξύ των δύο μεθόδων όσο αυξάνει η μετατόπιση μεταξύ διαδοχικών εικόνων, οφείλεται στο ότι οι εξισώσεις της οπτικής ροής στις πανοραμικές κάμερες, που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό της πρώτης μεθόδου, ισχύουν μόνο για μικρές μετατοπίσεις.

4.1.2 Πειράματα με διαφορετικές αναλύσεις εικόνας

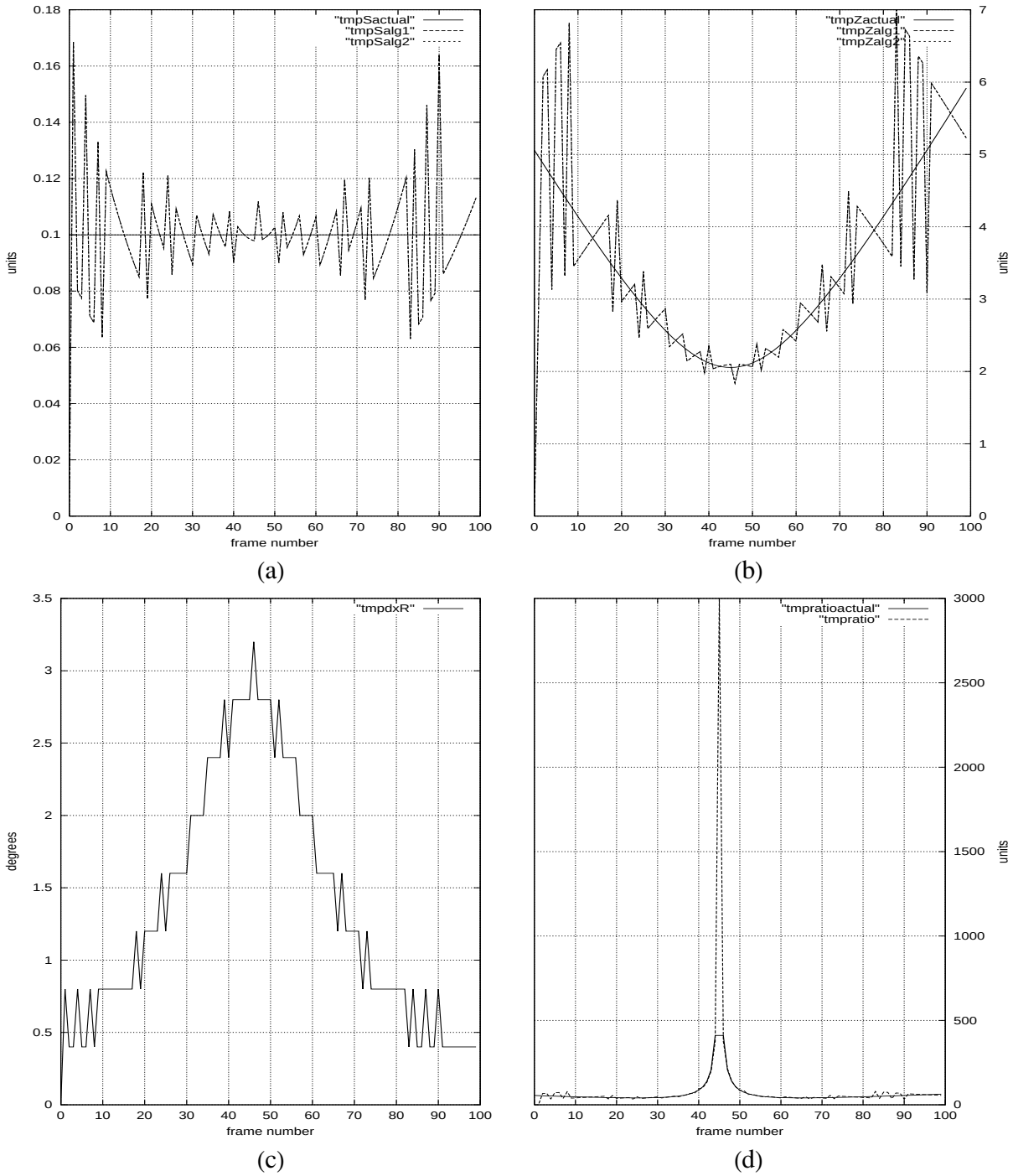
Τα πειράματα αυτά έγιναν για να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει η ανάλυση της εικόνας που χρησιμοποιείται την ακρίβεια των υπολογισμών. Χρησιμοποιήθηκε πάλι το πρωτότυπο σκηνικό του σχήματος 4.1, με τις παραμέτρους στην πρώτη περίπτωση να είναι $(S, X_d, Z_d) = (0.2, 1, 6)$ και στην δεύτερη περίπτωση να είναι $(S, X_d, Z_d) = (0.4, 0.2, 8)$. Σε κάθε περίπτωση τα πειράματα επαναλαμβάνονταν για τρεις διαφορετικές οριζόντιες αναλύσεις με IW=450, IW=900 και IW=1800 εικονοστοιχεία.

4.1.2.1 Σκηνικό 1

Χρησιμοποιήθηκε πάλι το σκηνικό του σχήματος 4.1, αλλά τώρα οι αρχικές αποστάσεις είναι X_d=1, Z_d=6 και η ταχύτητα είναι ίση με S=0.2. Κατόπιν υπάρχουν τρεις περιπτώσεις ανάλογα με την οριζόντια ανάλυση που χρησιμοποιείται. Να σημειωθεί ότι λόγω του τρόπου υπολογισμού των x_k, ενδιαφέρον έχει μόνο η οριζόντια ανάλυση, γι'αυτό δεν αναφέρεται η κάθετη ανάλυση, η οποία ήταν τέτοια ώστε να διατηρείται ο λόγος 9:2 των πλευρών.

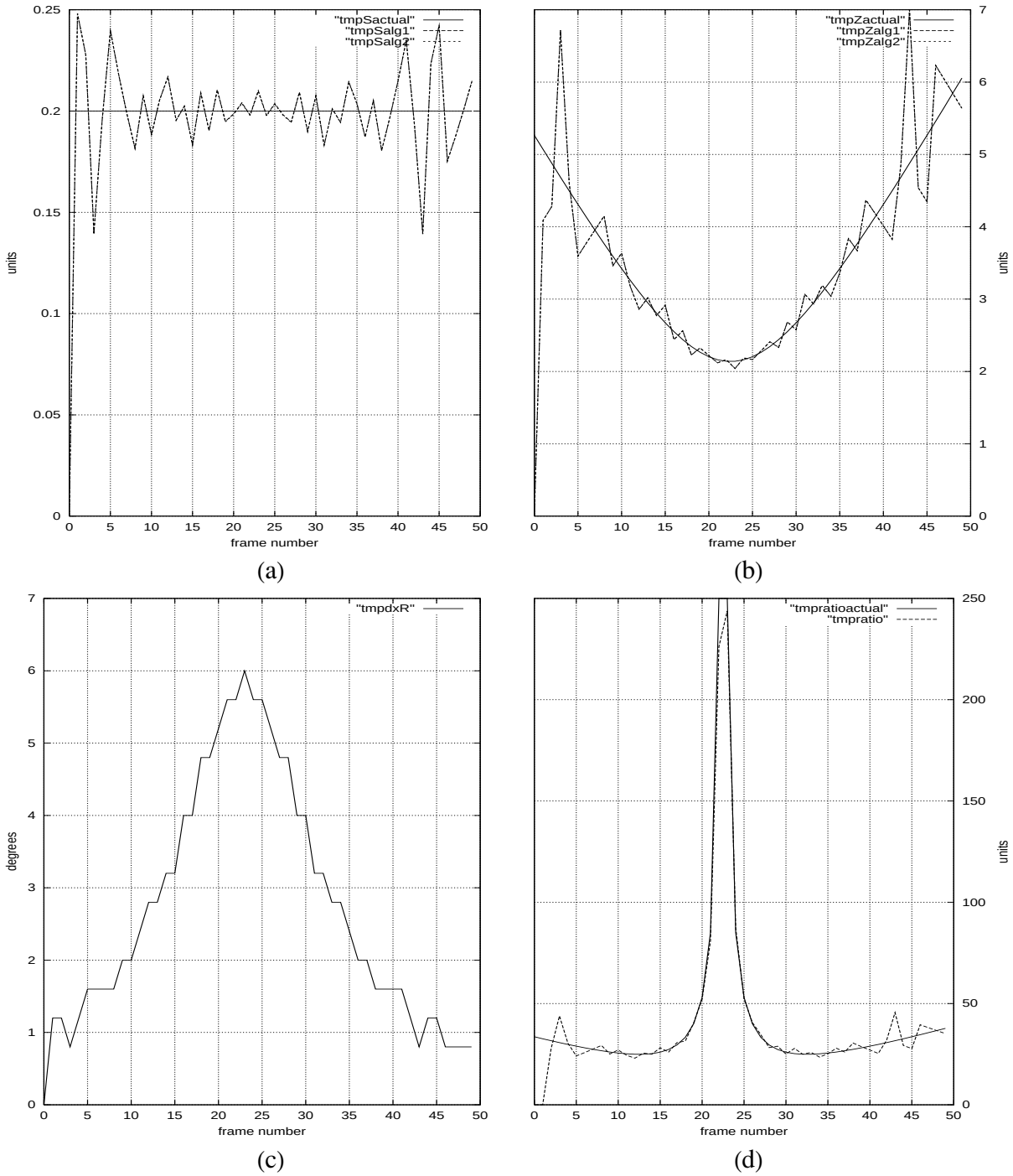
Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η σχετικά χαμηλή ανάλυση των 450 εικονοστοιχείων (σχήμα 4.12). Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά όταν η διαφορά μεταξύ κάθε εικόνας είναι μεγαλύτερη από 2^o στο οπτικό πεδίο της κάμερας. Οι δύο αλγόριθμοι εμφανίζονται ισοδύναμοι στον υπολογισμό της ταχύτητας (γράφημα 4.12 (a)) ενώ ο δεύτερος είναι καλύτερος στον υπολογισμό του βάθους (γράφημα 4.12 (b)). Στα άκρα των γραφημάτων οι αποκλίσεις είναι έντονες λόγω της χαμηλής ανάλυσης, επειδή το ιχνηλατούμενο άκρο του τετραγώνου δεν απεικονίζεται με ακρίβεια από το *POV-Ray*.

Αυξάνοντας την ανάλυση της εικόνας, οι αποκλίσεις μικραίνουν. Καλύτερα συμπεριφέρεται ο δεύτερος αλγόριθμος, ειδικά στην περίπτωση υπολογισμού του βάθους. Συγκεκριμένα, όταν IW=1800 (σχήμα 4.14) πετυχαίνει απόκλιση από τις πραγματικές τιμές μικρότερη από 10% τόσο για την ταχύτητα S όσο και για το βάθος Z, ακόμα και με διαφορά μόλις μίας μοίρας μεταξύ δύο διαδοχικών εικόνων (σχήματα 4.14(c) και 4.17(a),(b)). Με διαφορά στο οπτικό πεδίο πάνω από 4^o οι εκτιμήσεις που γίνονται έχουν σχετικό σφάλμα $\leq$ 4%. Αντιθέτως, ο πρώτος αλγόριθμος, δεν δίνει καλύτερα αποτελέσματα με την αύξηση της ανάλυσης, ειδικά στην εκτίμηση του βάθους, λόγω των περιορισμών που τίθενται από την απαίτηση μετρήσεων από τρεις διαδοχικές εικόνες.



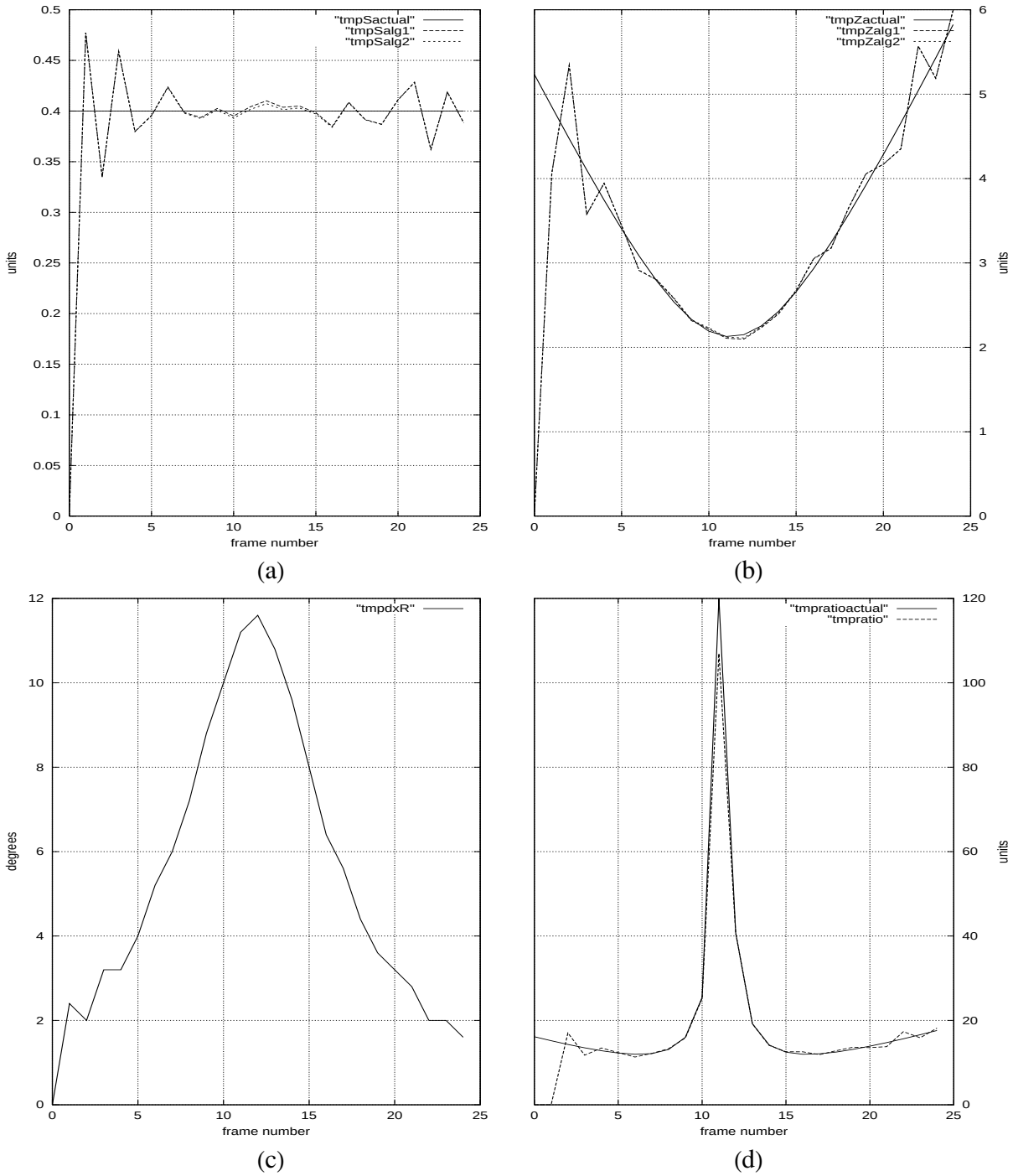
Σχήμα 4.4: Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.1, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=2 και Z_d=5

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η πραγματική ταχύτητα και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, όπου tmpSalg1 αντιστοιχεί στον πρώτο που παρουσιάστηκε στην εργασία και tmpSalg2 στον δεύτερο. Στο (b) απεικονίζεται το πραγματικό βάθος του σημείου και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, στο (c) απεικονίζεται το εύρος της κίνησης στο οπτικό πεδίο που κάνει το ιχνηλατούμενο σημείο σε μοίρες και στο (d) απεικονίζεται ο πραγματικός λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ και η εκτίμηση του προτεινόμενου αλγόριθμου. Οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα αφορούν τον αύξοντα αριθμό εικόνας της ακολουθίας.



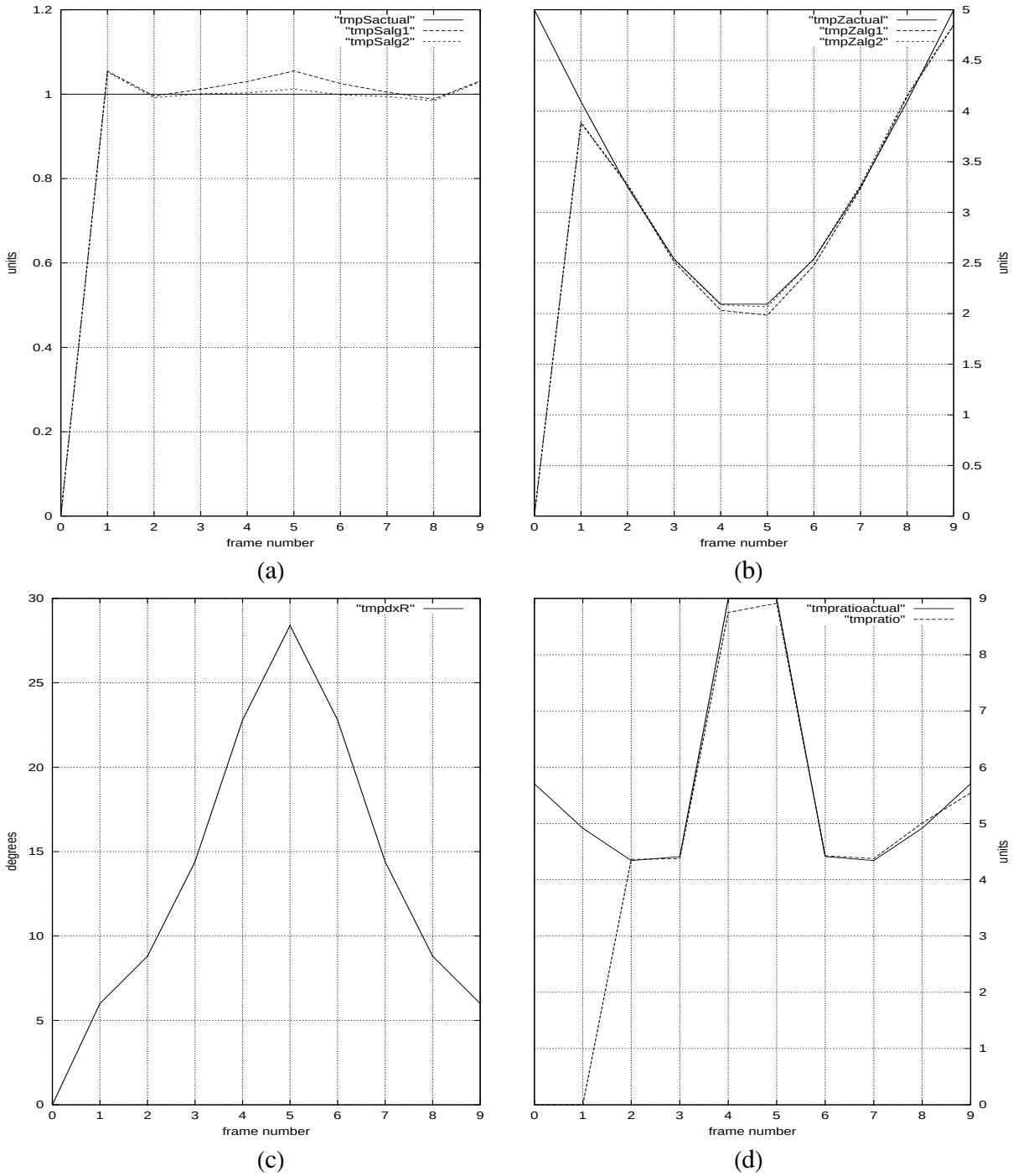
Σχήμα 4.5: Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.2, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=2 και Z_d=5

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η πραγματική ταχύτητα και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, όπου tmpSalg1 αντιστοιχεί στον πρώτο που παρουσιάστηκε στην εργασία και tmpSalg2 στον δεύτερο. Στο (b) απεικονίζεται το πραγματικό βάθος του σημείου και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, στο (c) απεικονίζεται το εύρος της κίνησης στο οπτικό πεδίο που κάνει το ιχνηλατούμενο σημείο σε μοίρες και στο (d) απεικονίζεται ο πραγματικός λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ και η εκτίμηση του προτεινόμενου αλγόριθμου. Οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα αφορούν τον αύξοντα αριθμό εικόνας της ακολουθίας.



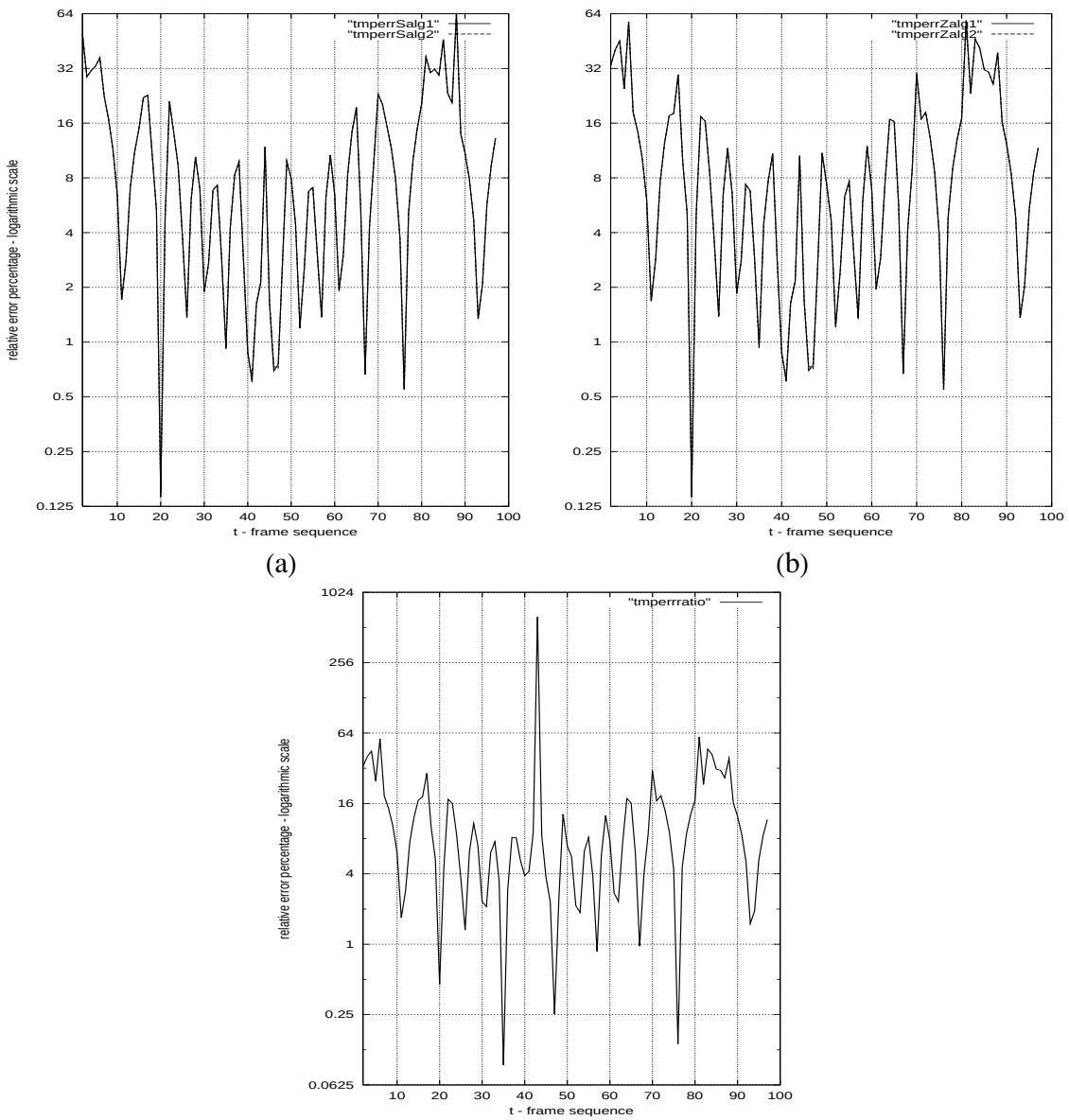
Σχήμα 4.6: Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.4, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=2 και Z_d=5

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η πραγματική ταχύτητα και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, όπου tmpSalg1 αντιστοιχεί στον πρώτο που παρουσιάστηκε στην εργασία και tmpSalg2 στον δεύτερο. Στο (b) απεικονίζεται το πραγματικό βάθος του σημείου και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, στο (c) απεικονίζεται το εύρος της κίνησης στο οπτικό πεδίο που κάνει το ιχνηλατούμενο σημείο σε μοίρες και στο (d) απεικονίζεται ο πραγματικός λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ και η εκτίμηση του προτεινόμενου αλγόριθμου. Οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα αφορούν τον αύξοντα αριθμό εικόνας της ακολουθίας.



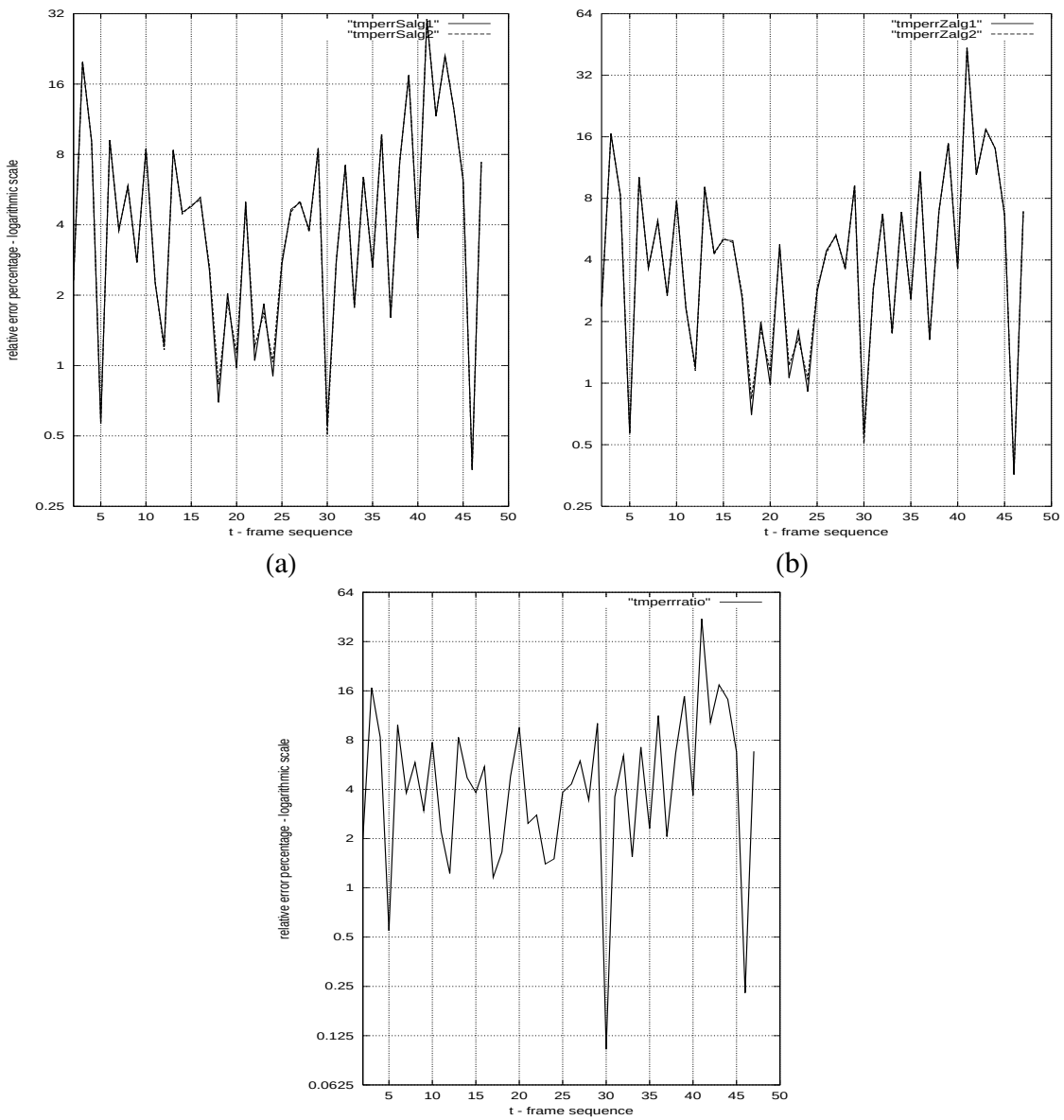
Σχήμα 4.7: Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=1.0, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=2 και Z_d=5

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η πραγματική ταχύτητα και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, όπου tmpSalg1 αντιστοιχεί στον πρώτο που παρουσιάστηκε στην εργασία και tmpSalg2 στον δεύτερο. Στο (b) απεικονίζεται το πραγματικό βάθος του σημείου και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, στο (c) απεικονίζεται το εύρος της κίνησης στο οπτικό πεδίο που κάνει το ιχνηλατούμενο σημείο σε μοίρες και στο (d) απεικονίζεται ο πραγματικός λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ και η εκτίμηση του προτεινόμενου αλγόριθμου. Οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα αφορούν τον αύξοντα αριθμό εικόνας της ακολουθίας.



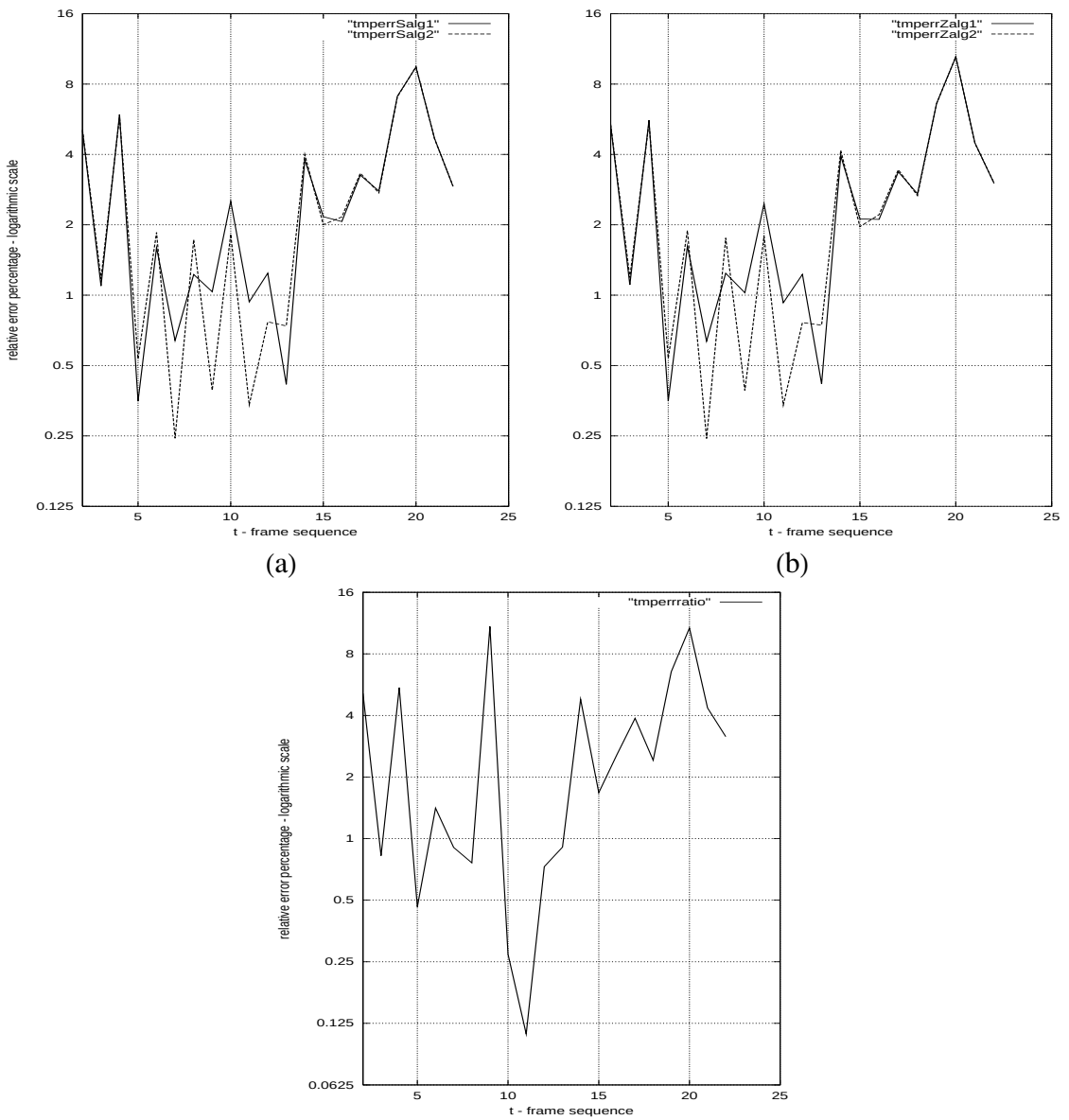
Σχήμα 4.8: Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.4.

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση της ταχύτητας που υπολογίζεται από τους δυο αλγόριθμους, από την πραγματική όταν S=0.1. Αντιστοίχως στο (b) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση του βάθους και στο (c) η επί της % απόκλιση του λόγου όπως υπολογίστηκε απ'τον πραγματικό. Χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα.



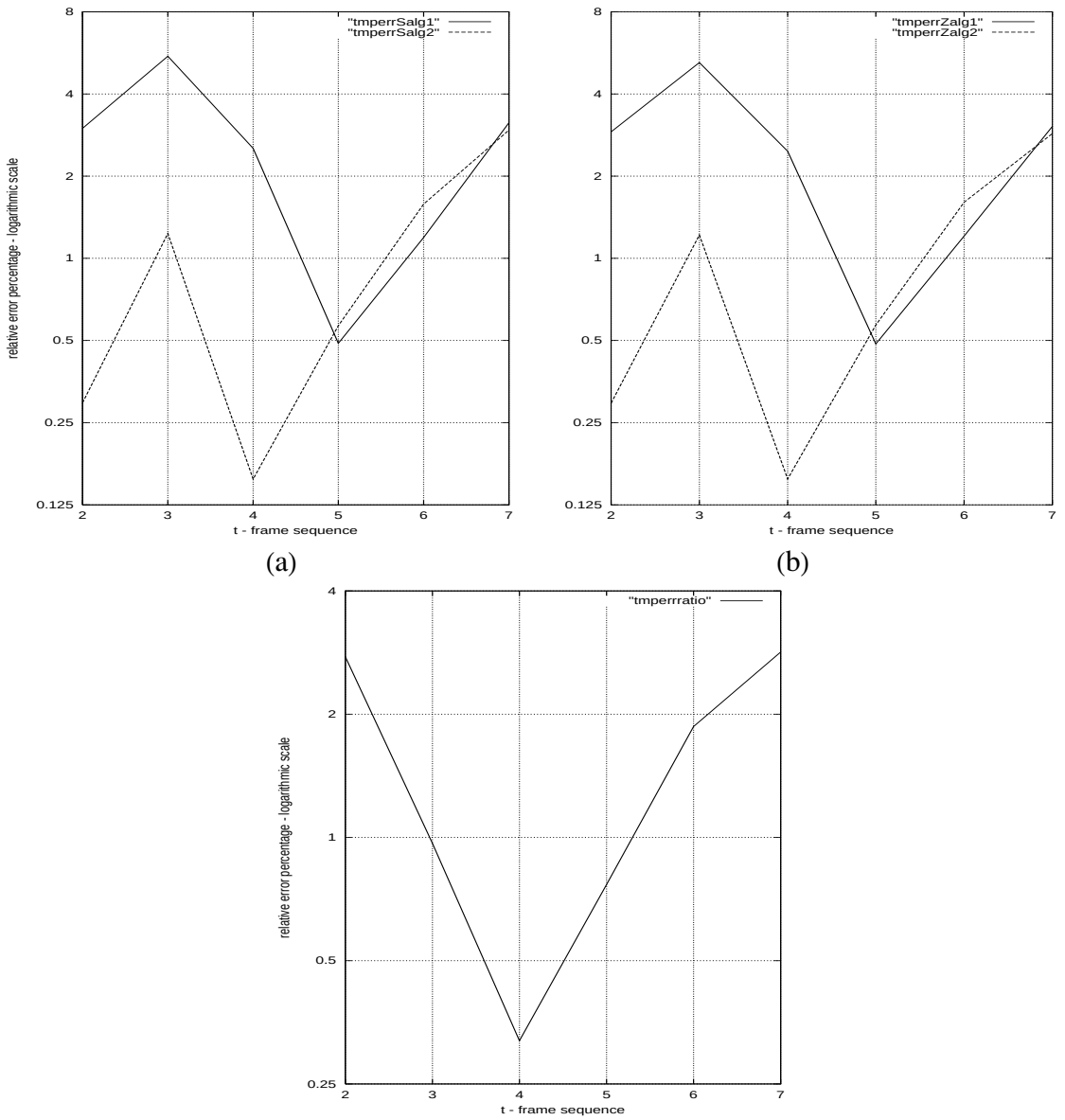
Σχήμα 4.9: Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.5.

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση της ταχύτητας που υπολογίζεται από τους δυο αλγόριθμους, από την πραγματική όταν S=0.2. Αντιστοίχως στο (b) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση του βάθους και στο (c) η επί της % απόκλιση του λόγου όπως υπολογίστηκε απ'τον πραγματικό. Χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα.



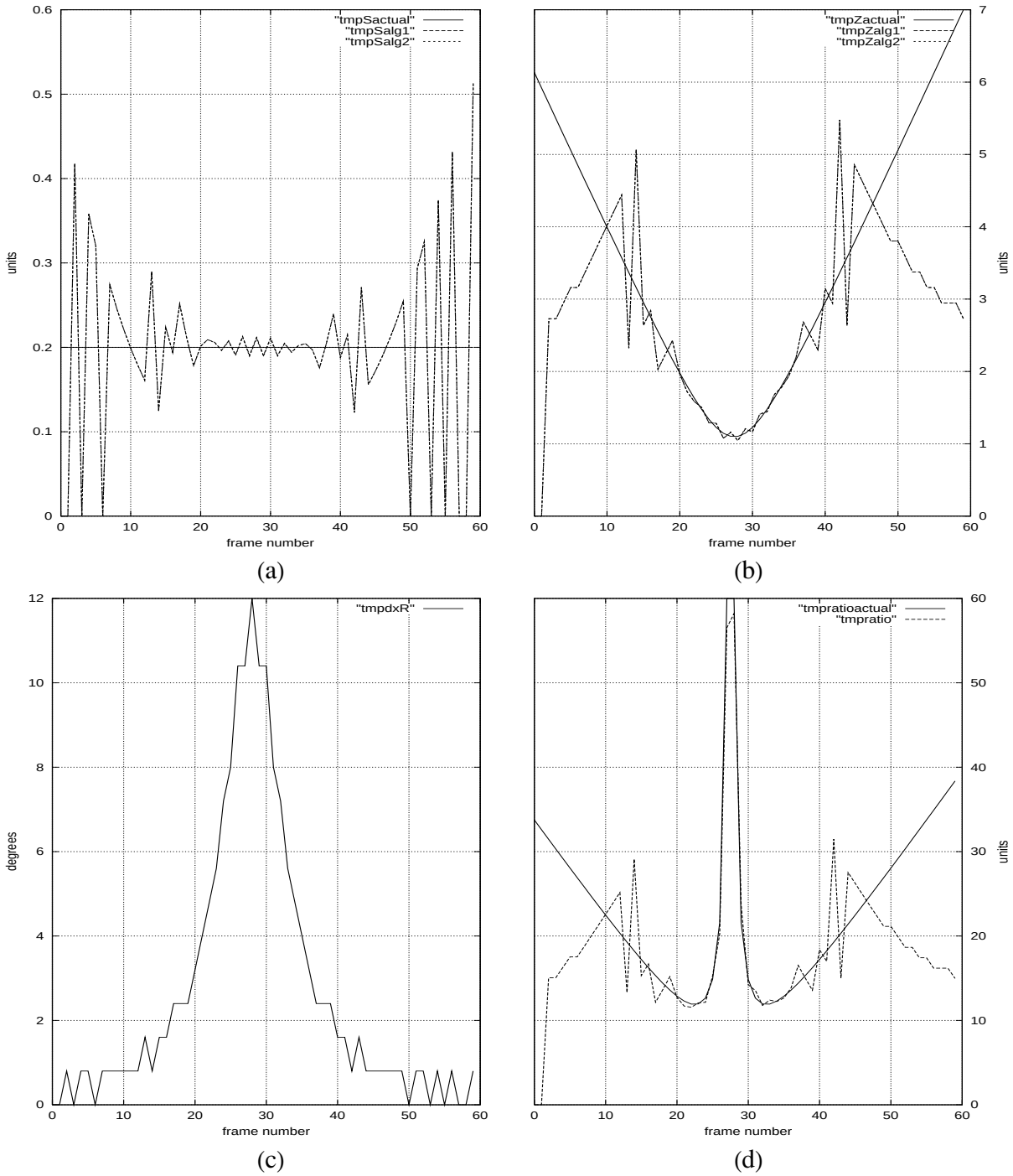
Σχήμα 4.10: Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.6.

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση της ταχύτητας που υπολογίζεται από τους δυο αλγόριθμους, από την πραγματική όταν S=0.4. Αντιστοίχως στο (b) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση του βάθους και στο (c) η επί της % απόκλιση του λόγου όπως υπολογίστηκε απ'τον πραγματικό. Χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα.



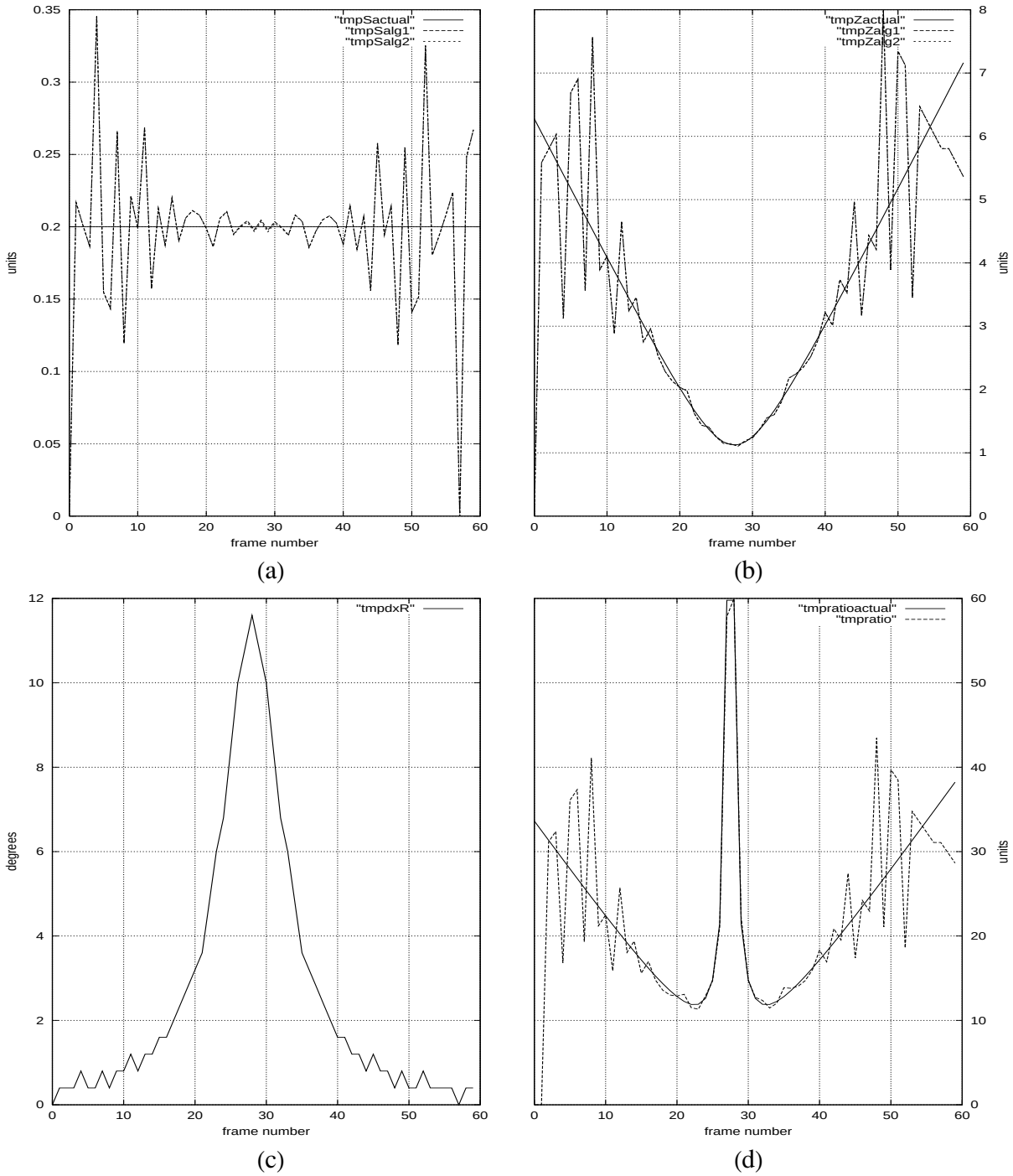
Σχήμα 4.11: Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.7.

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση της ταχύτητας που υπολογίζεται από τους δυο αλγόριθμους, από την πραγματική όταν S=1.0. Αντιστοίχως στο (b) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση του βάθους και στο (c) η επί της % απόκλιση του λόγου όπως υπολογίστηκε απ'τον πραγματικό. Χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα.



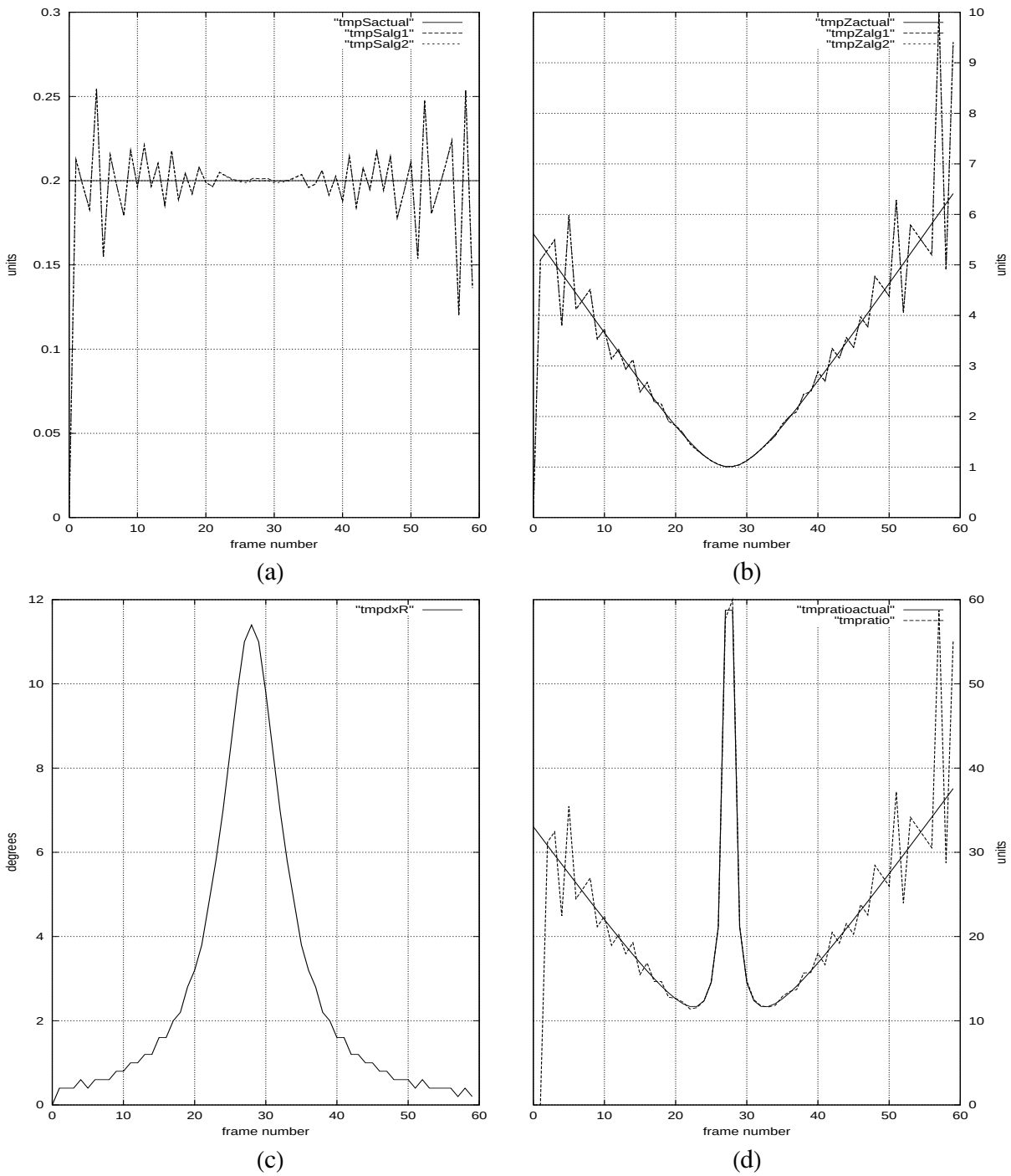
Σχήμα 4.12: Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.2, οριζόντια ανάλυση IW=450 και αρχικές αποστάσεις X_d=1 και Z_d=6

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η πραγματική ταχύτητα και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, όπου tmpSalg1 αντιστοιχεί στον πρώτο που παρουσιάστηκε στην εργασία και tmpSalg2 στον δεύτερο. Στο (b) απεικονίζεται το πραγματικό βάθος του σημείου και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, στο (c) απεικονίζεται το εύρος της κίνησης στο οπτικό πεδίο που κάνει το ιχνηλατούμενο σημείο σε μοίρες και στο (d) απεικονίζεται ο πραγματικός λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ και η εκτίμηση του προτεινόμενου αλγόριθμου. Οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα αφορούν τον αύξοντα αριθμό εικόνας της ακολουθίας.



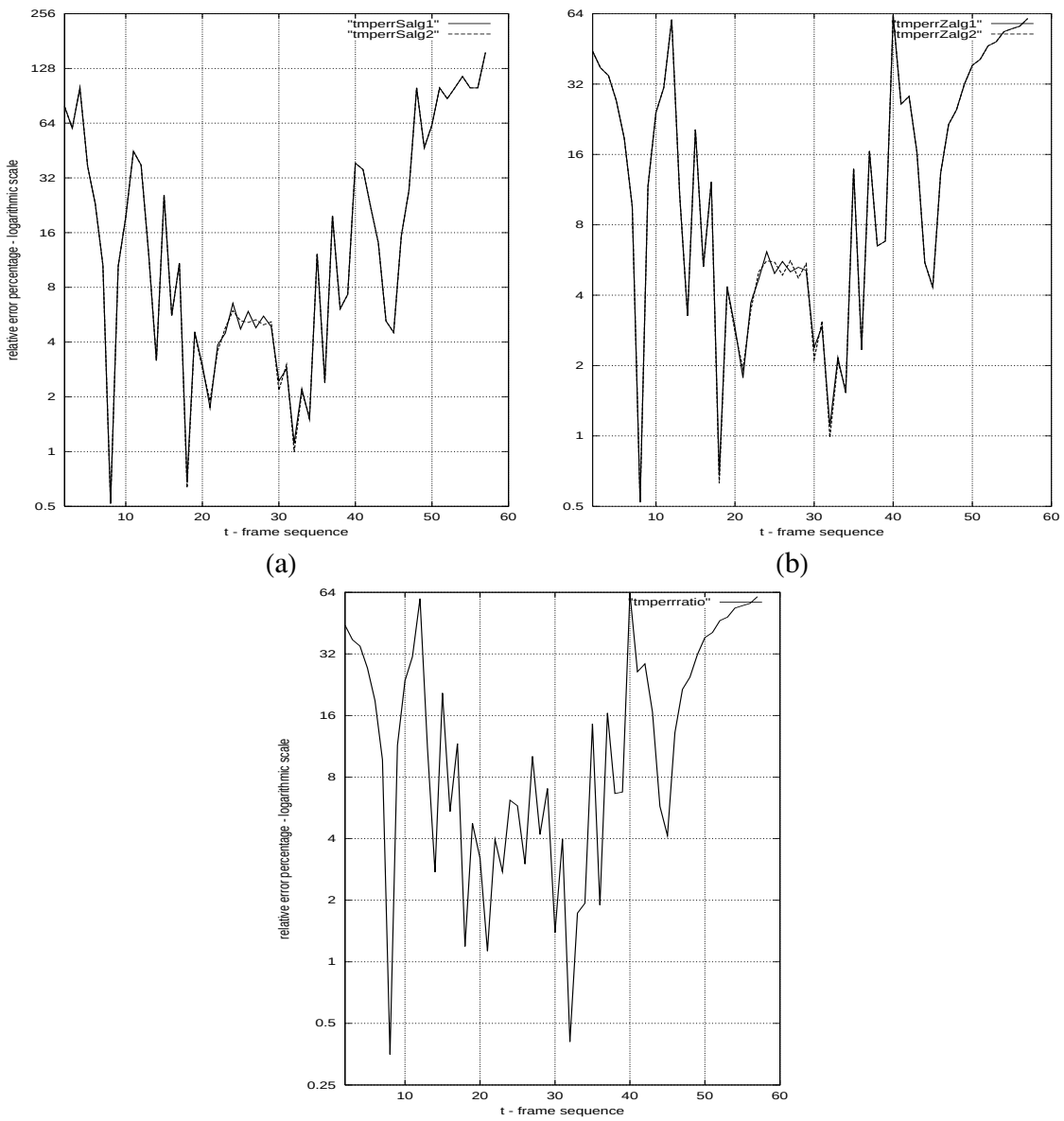
Σχήμα 4.13: Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.2, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=1 και Z_d=6

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η πραγματική ταχύτητα και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, όπου tmpSalg1 αντιστοιχεί στον πρώτο που παρουσιάστηκε στην εργασία και tmpSalg2 στον δεύτερο. Στο (b) απεικονίζεται το πραγματικό βάθος του σημείου και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, στο (c) απεικονίζεται το εύρος της κίνησης στο οπτικό πεδίο που κάνει το ιχνηλατούμενο σημείο σε μοίρες και στο (d) απεικονίζεται ο πραγματικός λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ και η εκτίμηση του προτεινόμενου αλγόριθμου. Οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα αφορούν τον αύξοντα αριθμό εικόνας της ακολουθίας.



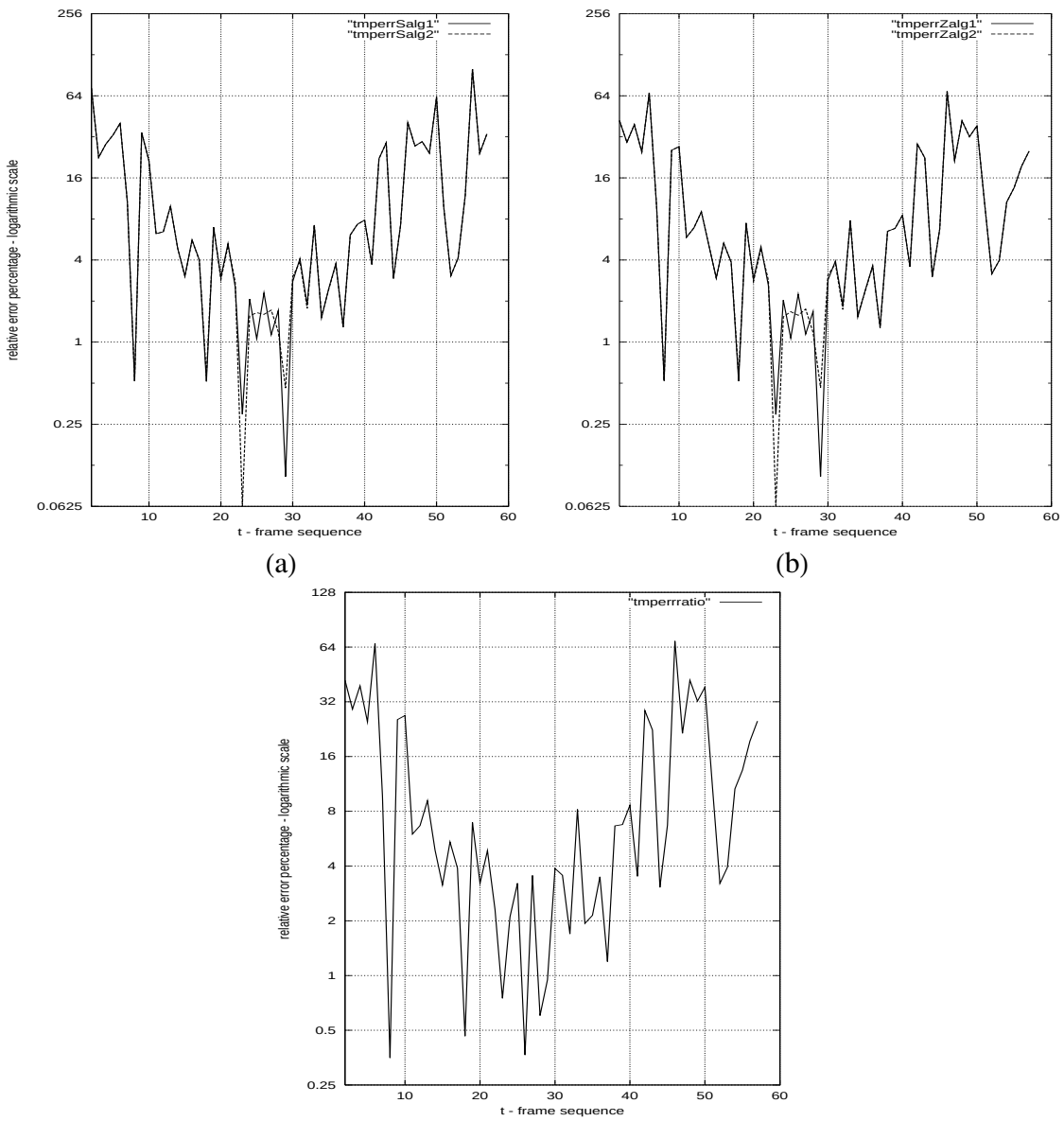
Σχήμα 4.14: Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.2, οριζόντια ανάλυση IW=1800 και αρχικές αποστάσεις X_d=1 και Z_d=6

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η πραγματική ταχύτητα και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, όπου tmpSalg1 αντιστοιχεί στον πρώτο που παρουσιάστηκε στην εργασία και tmpSalg2 στον δεύτερο. Στο (b) απεικονίζεται το πραγματικό βάθος του σημείου και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, στο (c) απεικονίζεται το εύρος της κίνησης στο οπτικό πεδίο που κάνει το ιχνηλατούμενο σημείο σε μοίρες και στο (d) απεικονίζεται ο πραγματικός λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ και η εκτίμηση του προτεινόμενου αλγόριθμου. Οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα αφορούν τον αύξοντα αριθμό εικόνας της ακολουθίας.



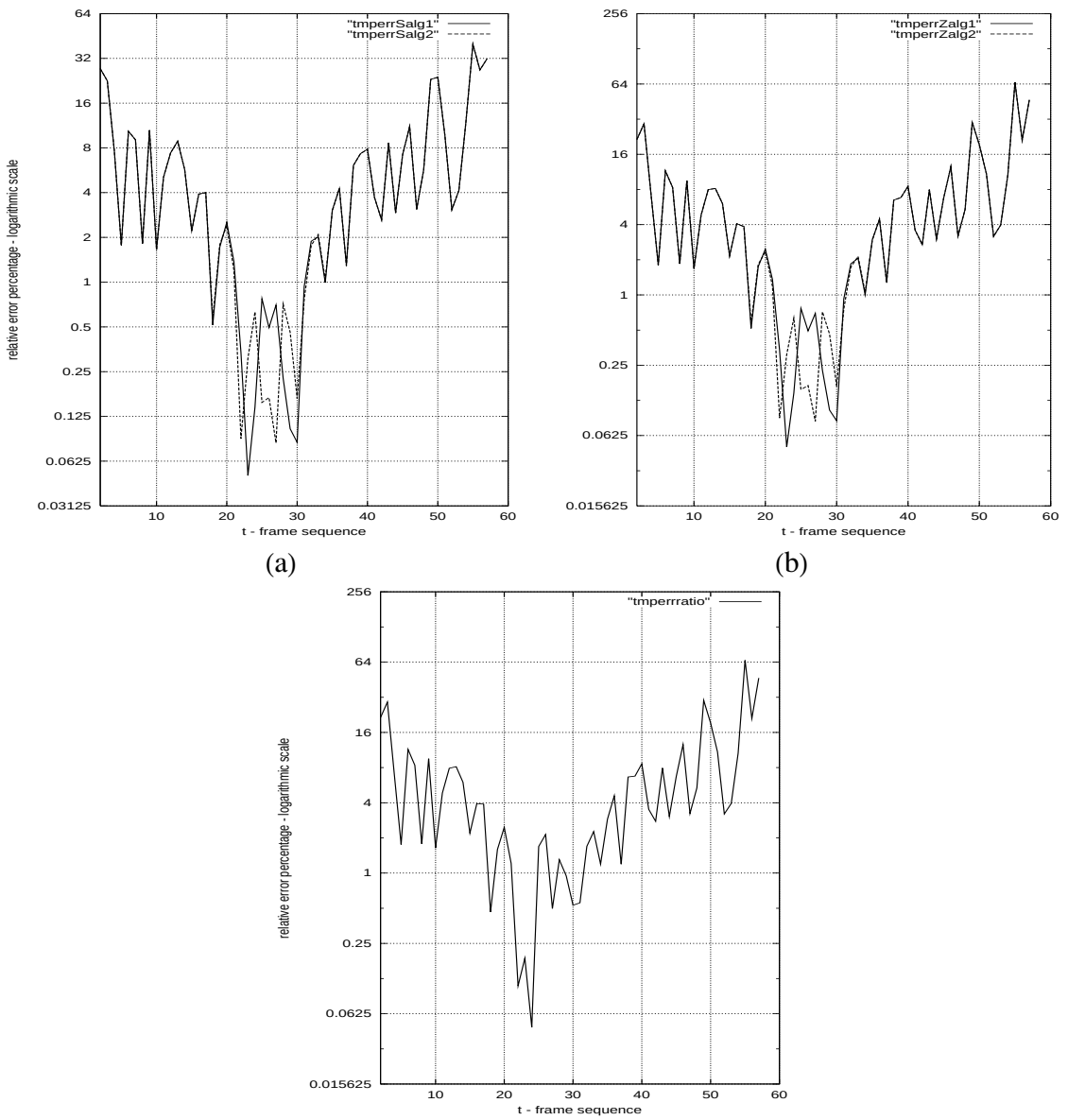
Σχήμα 4.15: Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.12.

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση της ταχύτητας που υπολογίζεται από τους δυο αλγόριθμους, από την πραγματική όταν IW=450. Αντιστοίχως στο (b) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση του βάθους και στο (c) η επί της % απόκλιση του λόγου όπως υπολογίστηκε απ'τον πραγματικό. Χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 4.16: Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.13.

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση της ταχύτητας που υπολογίζεται από τους δυο αλγόριθμους, από την πραγματική όταν IW=900. Αντιστοίχως στο (b) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση του βάθους και στο (c) η επί της % απόκλιση του λόγου όπως υπολογίστηκε απ'τον πραγματικό. Χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 4.17: Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.14.

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση της ταχύτητας που υπολογίζεται από τους δυο αλγόριθμους, από την πραγματική όταν IW=1800. Αντιστοίχως στο (b) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση του βάθους και στο (c) η επί της % απόκλιση του λόγου όπως υπολογίστηκε απ'τον πραγματικό. Χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα.

4.1.2.2 Σκηνικό 2

Το σκηνικό αυτό επιλέχτηκε έτσι ώστε να μελετηθεί η περίπτωση όπου ένας παρατηρητής ο οποίος αρχικά βρίσκεται μακριά από το ιχνηλατούμενο σημείο, κινείται με μεγάλη ταχύτητα και περνάει πολύ κοντά από το σημείο. Γι'αυτό, στο σκηνικό του σχήματος 4.1, οι αρχικές αποστάσεις ορίστηκαν να είναι X_d=0.2, Z_d=8 και η ταχύτητα ίση με S=0.4. Κατόπιν, όπως και προηγουμένως, το πείραμα επαναλαμβάνεται για τρεις διαφορετικές αναλύσεις IW=450, 900, 1800.

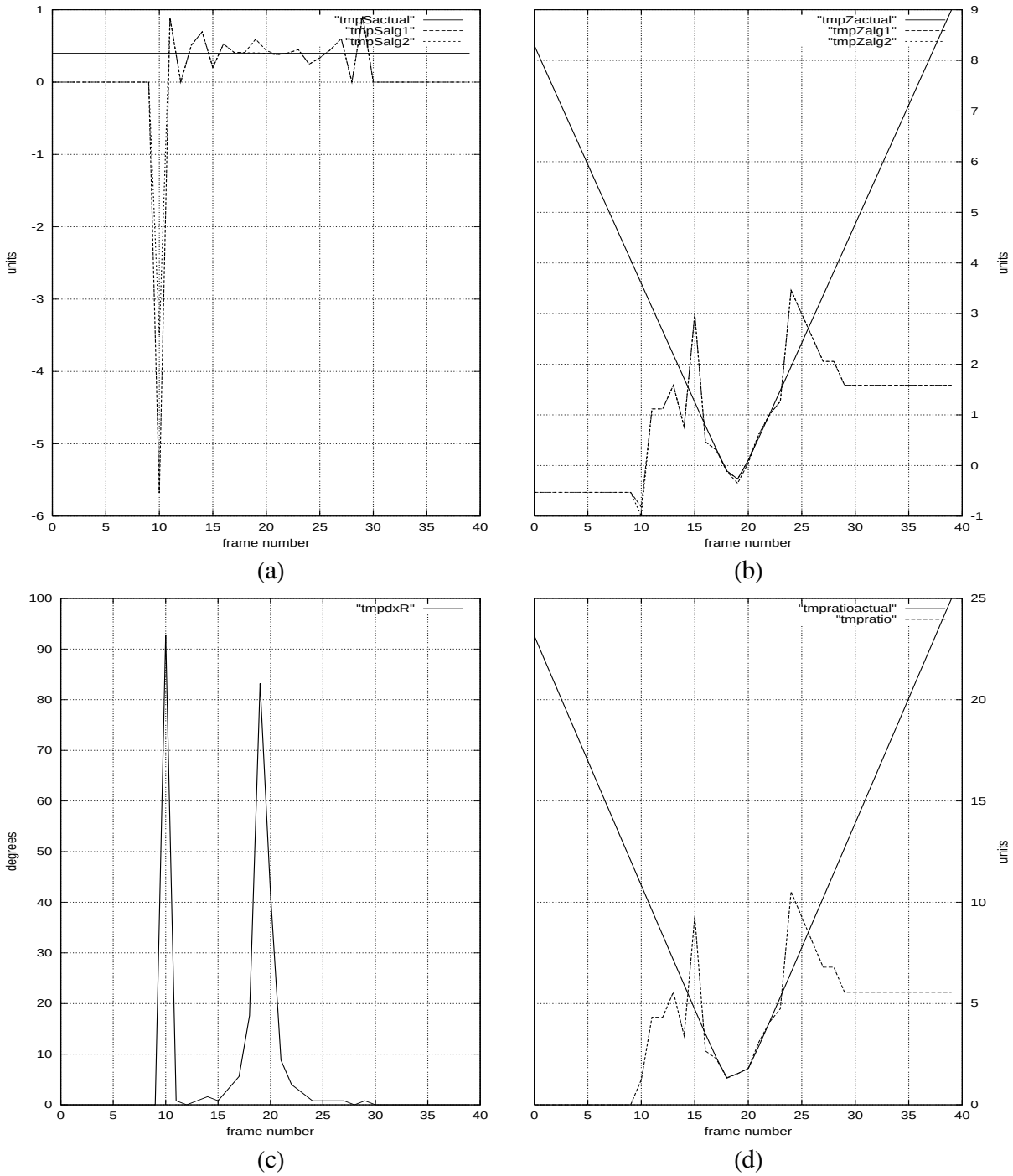
Το παρόν σκηνικό αποτελεί μια δύσκολη περίπτωση γιατί αρχικά, και για μεγάλο χρονικό διάστημα, το ίχνος στον οριζόντιο άξονα του σημείου που παρακολουθείται είναι πολύ κοντά στο $\frac{\pi}{2}$, δηλαδή κοντά στην κατεύθυνση κίνησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η μετακίνηση του ιχνηλατούμενου σημείου να είναι αρχικά σχεδόν μηδενική, ιδιαίτερα όταν η ανάλυση της εικόνας είναι χαμηλή.

Ειδικά στην περίπτωση της χαμηλής ανάλυσης (IW=450) οι δύο αλγόριθμοι καθυστερούν να δώσουν εκτίμηση για την ταχύτητα και το βάθος (σχήμα 4.18(a),(b)), ενώ όταν τελικά δίνουν, η απόκλιση από τις πραγματικές τιμές είναι σημαντική. Για ορισμένο αριθμό εικόνων στην αρχή της ακολουθίας και λόγω της χαμηλής ανάλυσης, το τετράγωνο του σκηνικού δεν απεικονίζεται καθόλου, για αυτό και εμφανίζεται αρχικά μια κορυφή στα γραφήματα (a), (c) των σχημάτων 4.18, 4.19 και 4.20 για την ταχύτητα και την διαφορά κλίσης.

Για ανάλυση IW=900 οι εκτιμήσεις που δίνει ο δεύτερος αλγόριθμος είναι ικανοποιητικές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ταχύτητας και του βάθους.

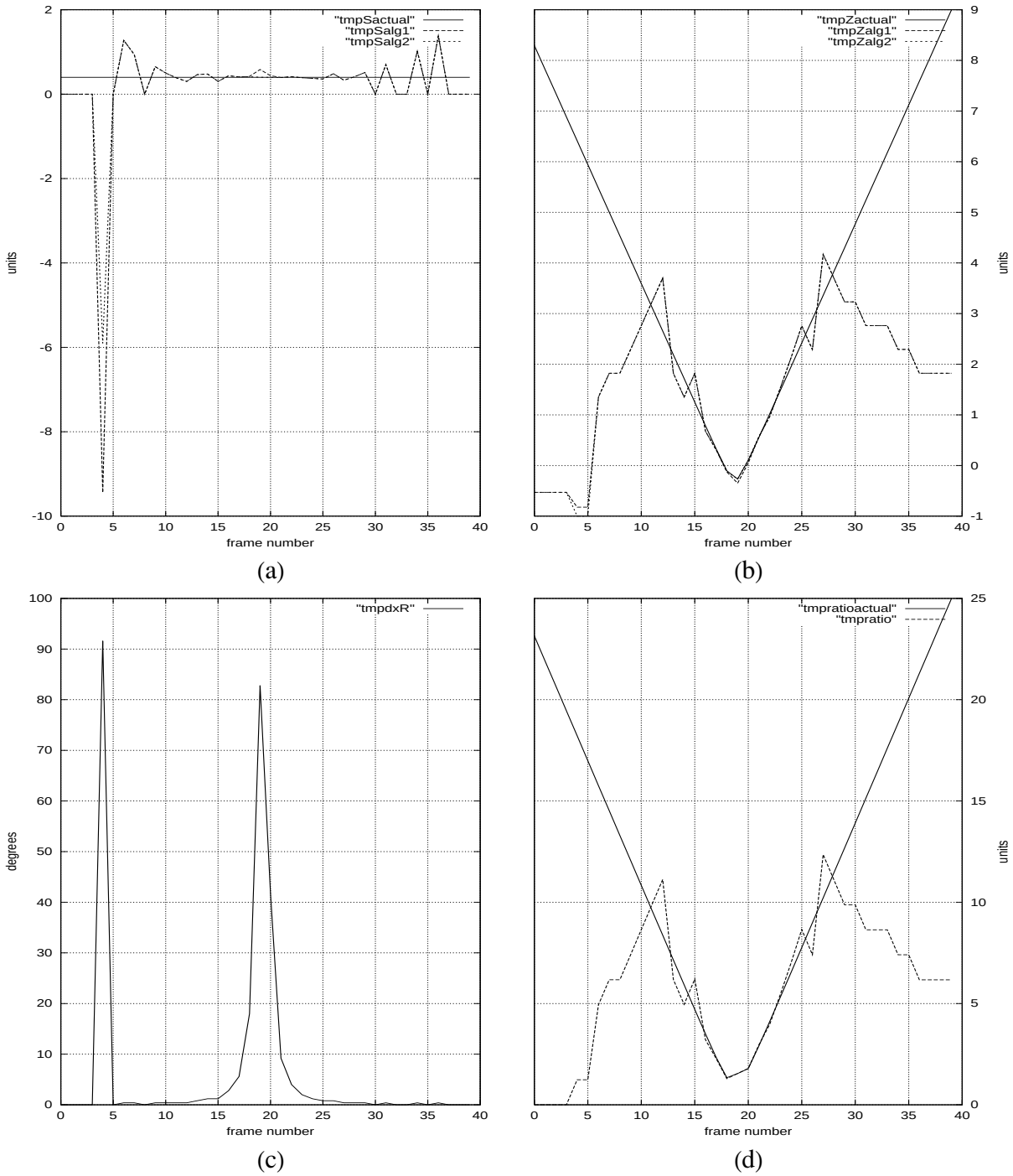
Στην περίπτωση της υψηλής ανάλυσης, όπου IW=1800 (σχήμα 4.20), ο πρώτος αλγόριθμος συνεχίζει να μην δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ αντιθέτως ο δεύτερος δίνει σχεδόν μηδενικό ποσοστό λάθους για την χρονική περίοδο που αντιστοιχεί στις εικόνες 15-20.

Το κριτήριο επικινδυνότητας (γράφημα (d) των σχημάτων 4.18,4.19 και 4.20), όπως παρατηρείται και στις τρεις περιπτώσεις, κατά την χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στην 15η εικόνα της ακολουθίας, πλησιάζει το 1, δίνοντας βεβαιότητα πρόσκρουσης του σημείου με την κάμερα. Στην πραγματικότητα το σημείο περνάει δίπλα από τον παρατηρητή κατά την 19η εικόνα. Ο συναγερμός είναι ψευδής και οφείλεται στο ότι το ιχνηλατούμενο σημείο πλησιάζει πολύ κοντά την κάμερα (X_d=0.2).



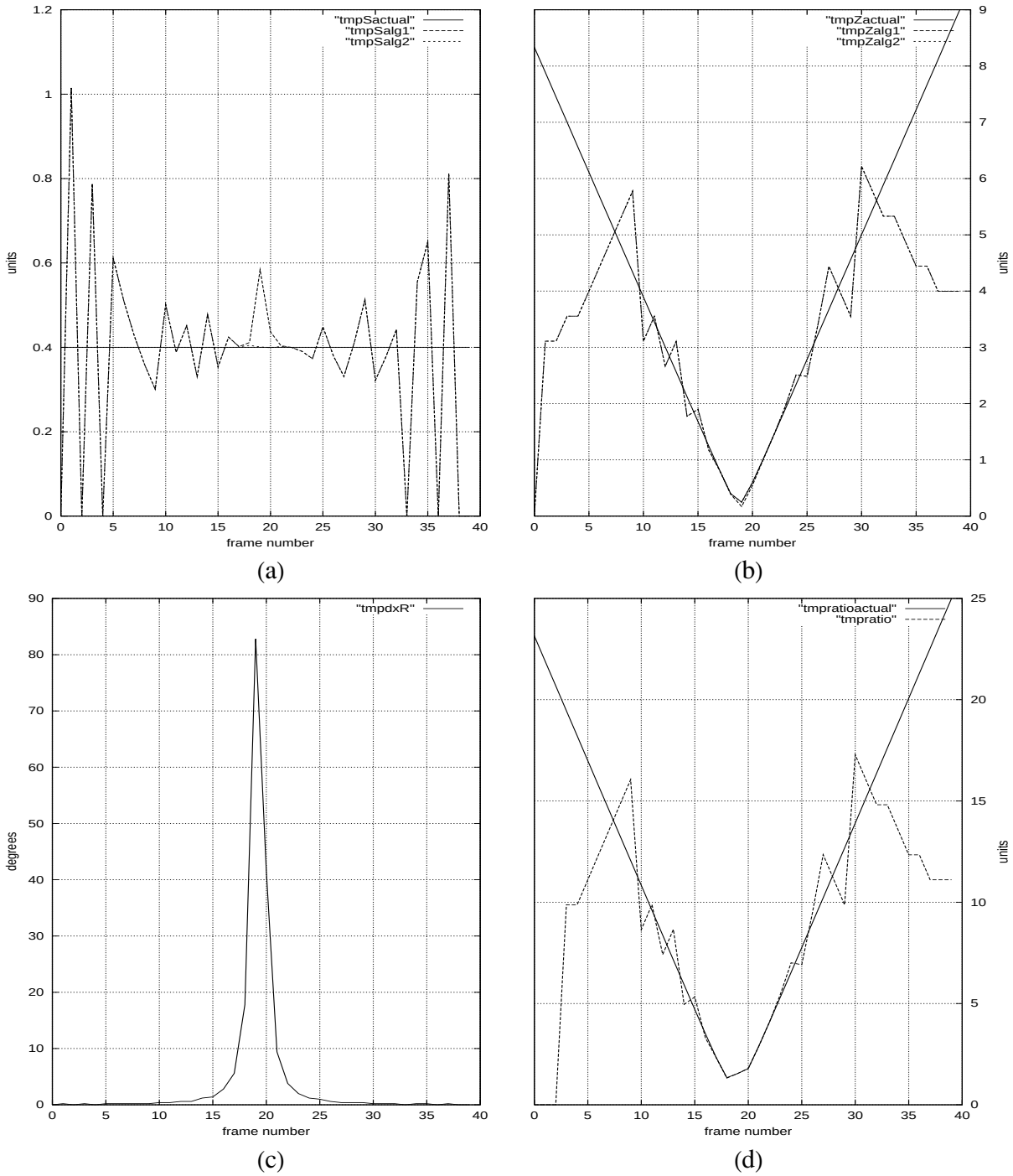
Σχήμα 4.18: Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.4, οριζόντια ανάλυση IW=450 και αρχικές αποστάσεις X_d=0.2 και Z_d=8

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η πραγματική ταχύτητα και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, όπου tmpSalg1 αντιστοιχεί στον πρώτο που παρουσιάστηκε στην εργασία και tmpSalg2 στον δεύτερο. Στο (b) απεικονίζεται το πραγματικό βάθος του σημείου και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, στο (c) απεικονίζεται το εύρος της κίνησης στο οπτικό πεδίο που κάνει το ιχνηλατούμενο σημείο σε μοίρες και στο (d) απεικονίζεται ο πραγματικός λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ και η εκτίμηση του προτεινόμενου αλγόριθμου. Οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα αφορούν τον αύξοντα αριθμό εικόνας της ακολουθίας.



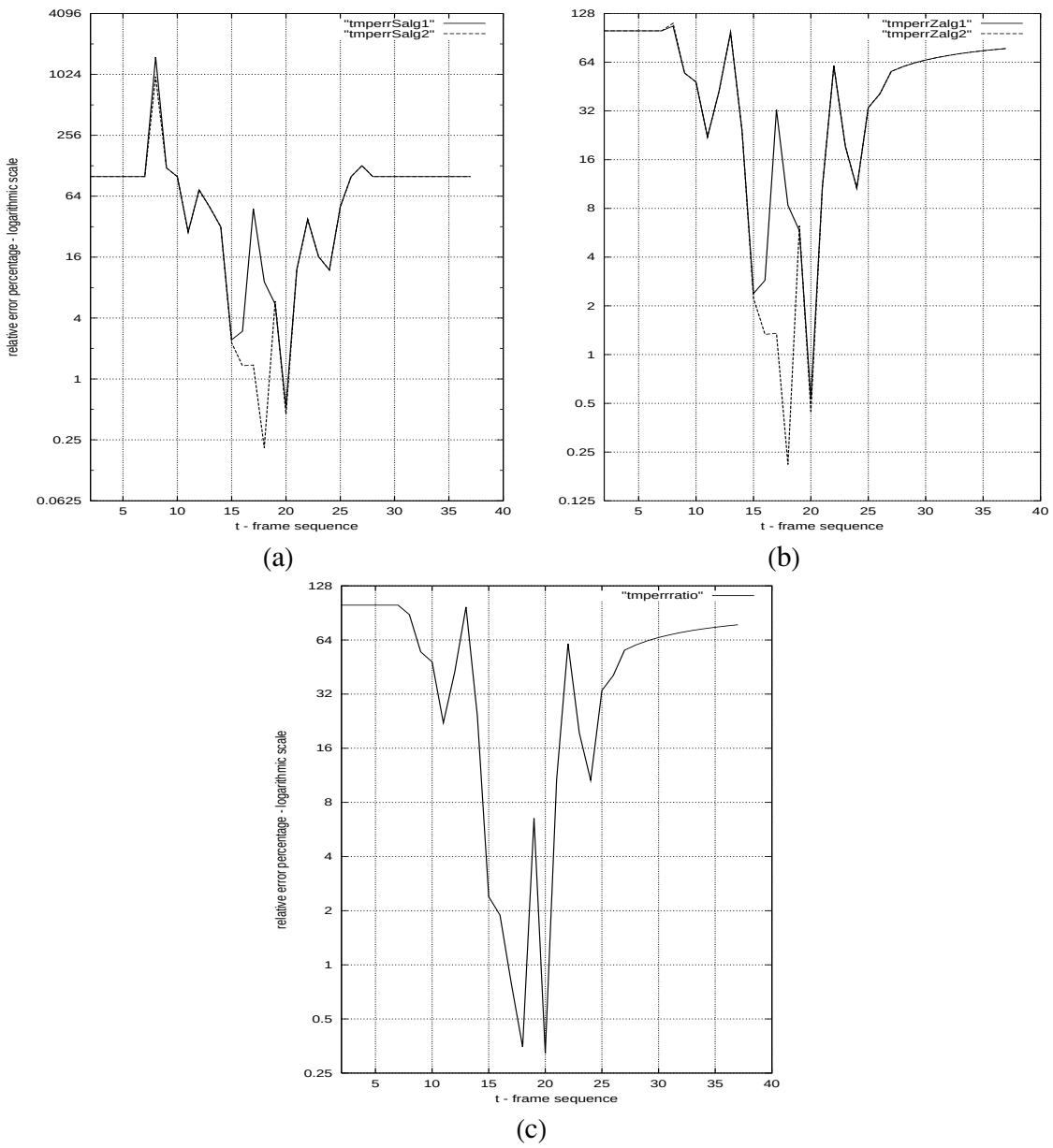
Σχήμα 4.19: Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.4, οριζόντια ανάλυση IW=900 και αρχικές αποστάσεις X_d=0.2 και Z_d=8

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η πραγματική ταχύτητα και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, όπου tmpSalg1 αντιστοιχεί στον πρώτο που παρουσιάστηκε στην εργασία και tmpSalg2 στον δεύτερο. Στο (b) απεικονίζεται το πραγματικό βάθος του σημείου και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, στο (c) απεικονίζεται το εύρος της κίνησης στο οπτικό πεδίο που κάνει το ιχνηλατούμενο σημείο σε μοίρες και στο (d) απεικονίζεται ο πραγματικός λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ και η εκτίμηση του προτεινόμενου αλγόριθμου. Οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα αφορούν τον αύξοντα αριθμό εικόνας της ακολουθίας.



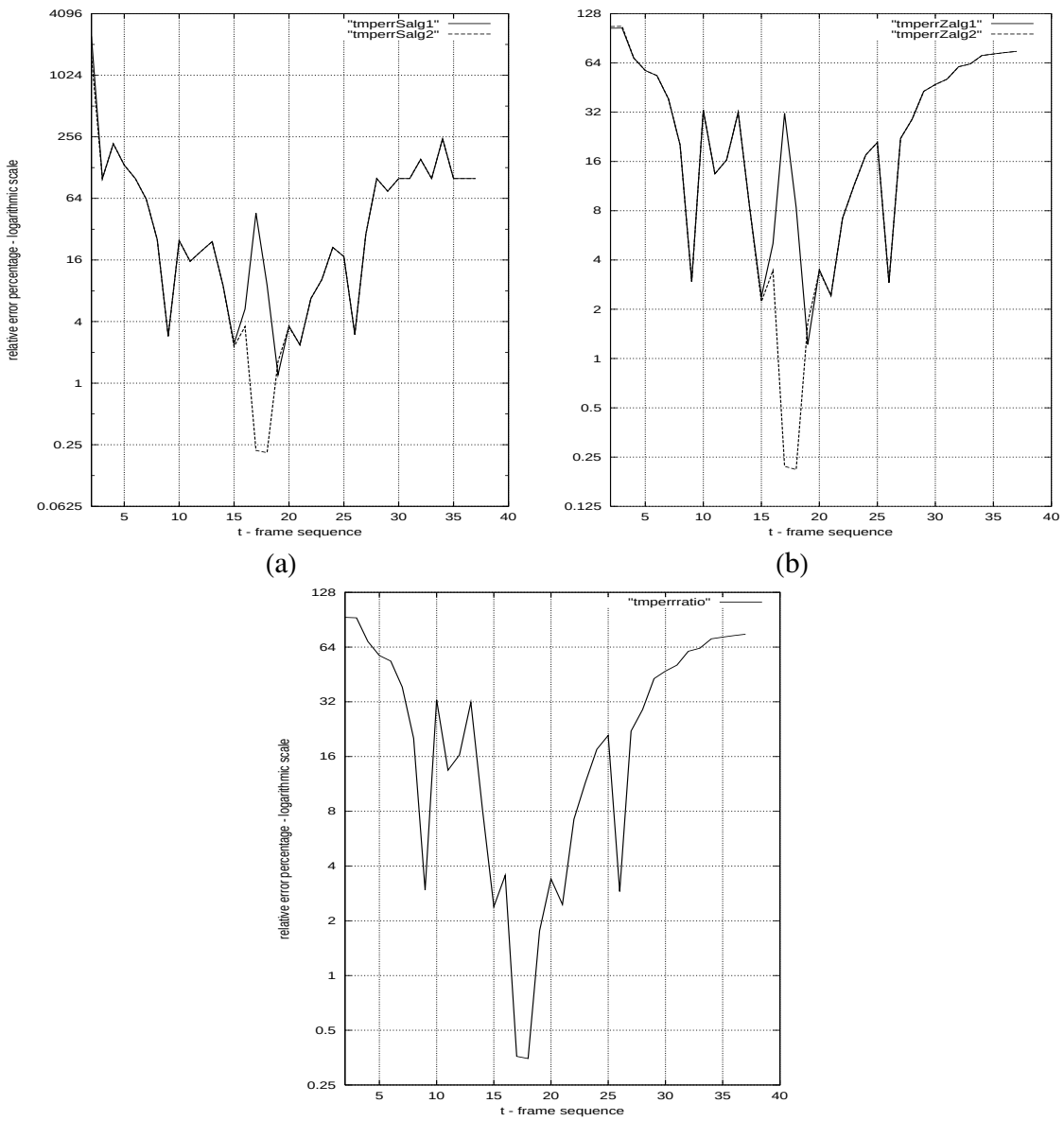
Σχήμα 4.20: Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για ταχύτητα S=0.4, οριζόντια ανάλυση IW=1800 και αρχικές αποστάσεις X_d=0.2 και Z_d=8

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η πραγματική ταχύτητα και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, όπου tmpSalg1 αντιστοιχεί στον πρώτο που παρουσιάστηκε στην εργασία και tmpSalg2 στον δεύτερο. Στο (b) απεικονίζεται το πραγματικό βάθος του σημείου και οι εκτιμήσεις που δίνουν οι δύο αλγόριθμοι, στο (c) απεικονίζεται το εύρος της κίνησης στο οπτικό πεδίο που κάνει το ιχνηλατούμενο σημείο σε μοίρες και στο (d) απεικονίζεται ο πραγματικός λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ και η εκτίμηση του προτεινόμενου αλγόριθμου. Οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα αφορούν τον αύξοντα αριθμό εικόνας της ακολουθίας.



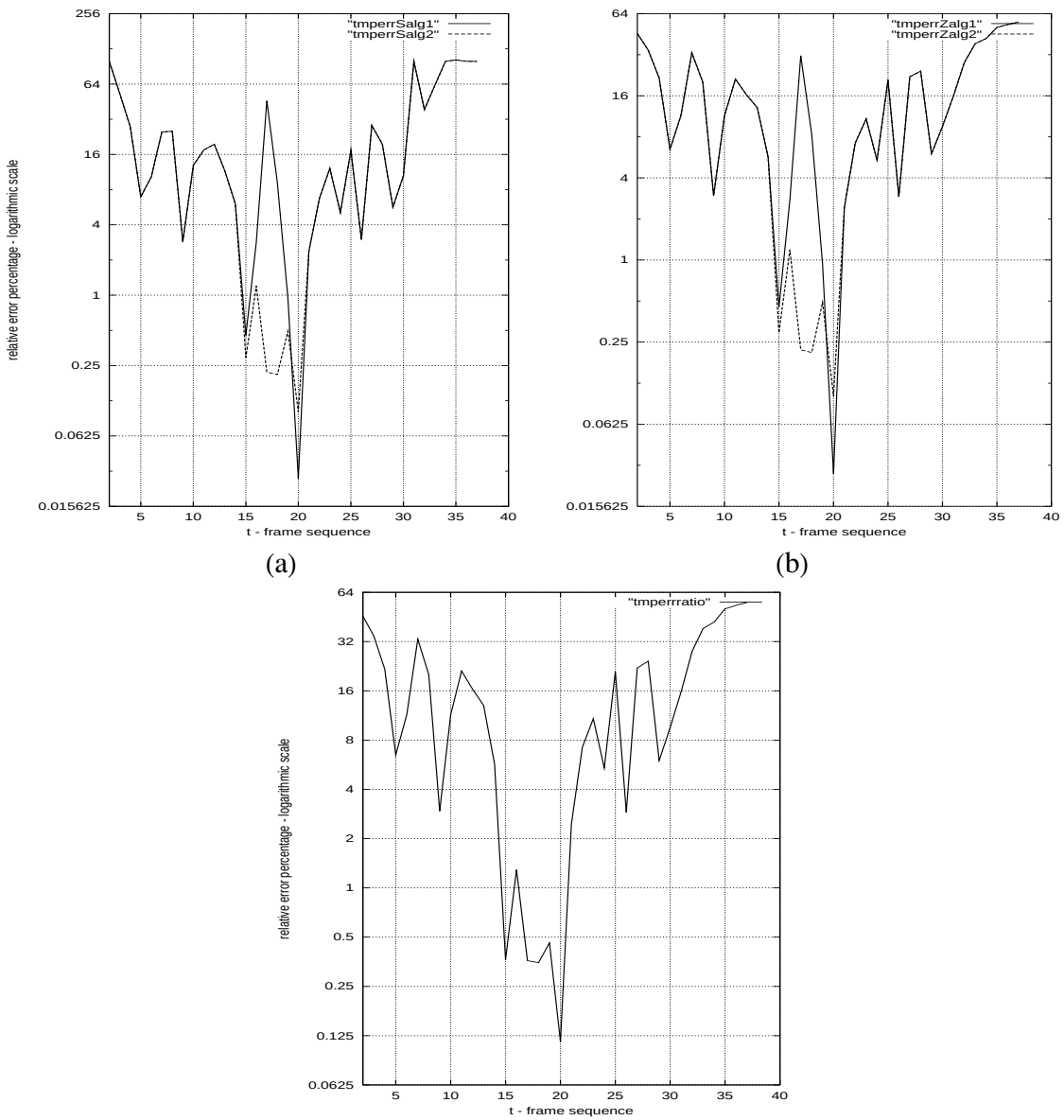
Σχήμα 4.21: Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.18.

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση της ταχύτητας που υπολογίζεται από τους δυο αλγόριθμους, από την πραγματική όταν IW=450. Αντιστοίχως στο (b) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση του βάθους και στο (c) η επί της % απόκλιση του λόγου όπως υπολογίστηκε απ'τον πραγματικό. Χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 4.22: Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.19.

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση της ταχύτητας που υπολογίζεται από τους δυο αλγόριθμους, από την πραγματική όταν IW=900. Αντιστοίχως στο (b) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση του βάθους και στο (c) η επί της % απόκλιση του λόγου όπως υπολογίστηκε απ'τον πραγματικό. Χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα.

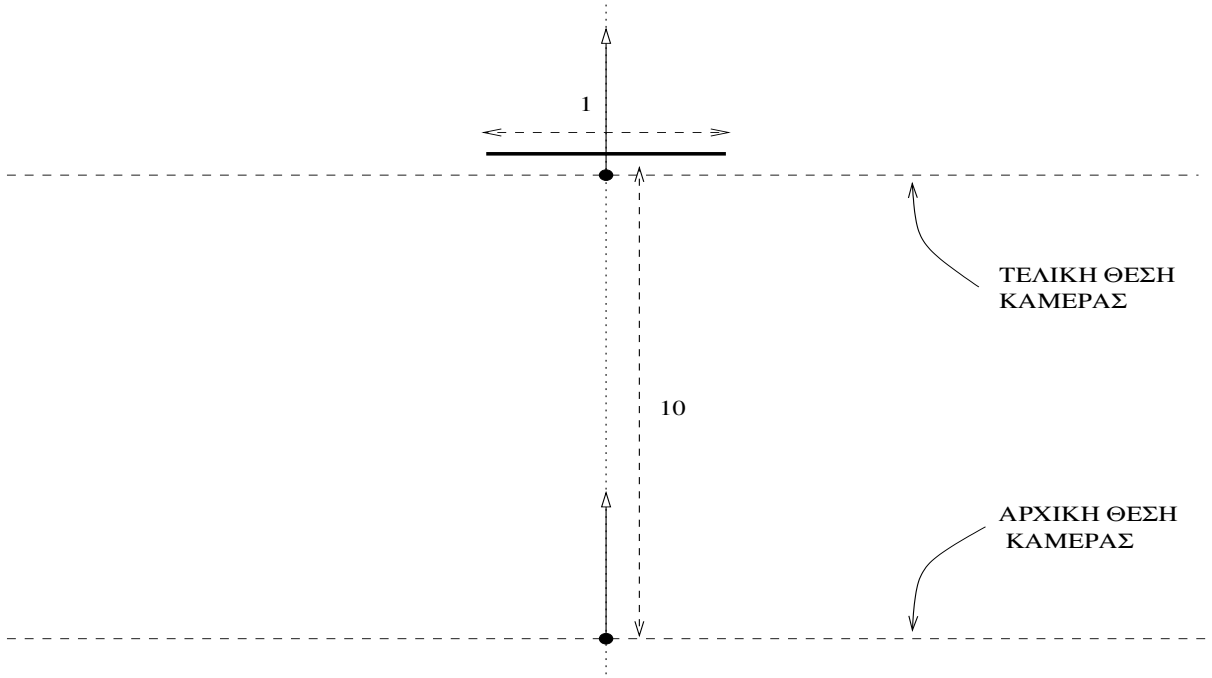


Σχήμα 4.23: Ποσοστό σχετικού λάθους για την περίπτωση του σχήματος 4.20.

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση της ταχύτητας που υπολογίζεται από τους δυο αλγόριθμους, από την πραγματική όταν IW=1800. Αντιστοίχως στο (b) απεικονίζεται η επί της % απόκλιση του βάθους και στο (c) η επί της % απόκλιση του λόγου όπως υπολογίστηκε απ'τον πραγματικό. Χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα.

4.1.3 Πειραματικά αποτελέσματα για την πρώτη μέθοδο χρησιμοποιώντας την κατακόρυφη μετατόπιση

Στις κεντρικές πανοραμικές κάμερες, το οπτικό πεδίο κατά τον κατακόρυφο άξονα είναι πολύ πιο στενό από το οπτικό πεδίο κατά τον οριζόντιο άξονα. Για αυτό τον λόγο, δεν προσφέρεται η χρησιμοποίηση μόνο της κατακόρυφης μετατόπισης για τον υπολογισμό των κριτηρίων κίνησης. Όμως, από τις εξισώσεις 3.13, 3.15 και 3.17 που αφορούν την κατακόρυφη μετατόπιση, παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη πληροφορία παρέχεται όταν η κατακόρυφη μετατόπιση γίνεται κατά την διεύθυνση της φοράς κίνησης, δηλαδή στις γωνίες $\frac{\pi}{2}$ και $\frac{3\pi}{2}$ του οριζόντιου άξονα. Ακριβώς για τα χαρακτηριστικά σημεία που αντιστοιχούν σε αυτές τις γωνίες, η οριζόντια μετατόπιση είναι ανύπαρκτη, οπότε τα κριτήρια που στηρίζονται στην οριζόντια μετατόπιση δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επομένως η κατακόρυφη μετατόπιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά για τον χαρακτηρισμό σημείων με μικρή οριζόντια μετατόπιση. Για την επαλήθευση των σχέσεων 3.13, 3.15 και 3.17 χρησιμοποιήθηκε το απλό σκηνικό η κάτοψη του οποίου απεικονίζεται στο σχήμα 4.24. Η κάμερα κινείται με σταθερή ταχύτητα S=0.6 προς το κέντρο ενός τετραγώνου πλευράς 1 που βρίσκεται αρχικά σε απόσταση ίση με 10.



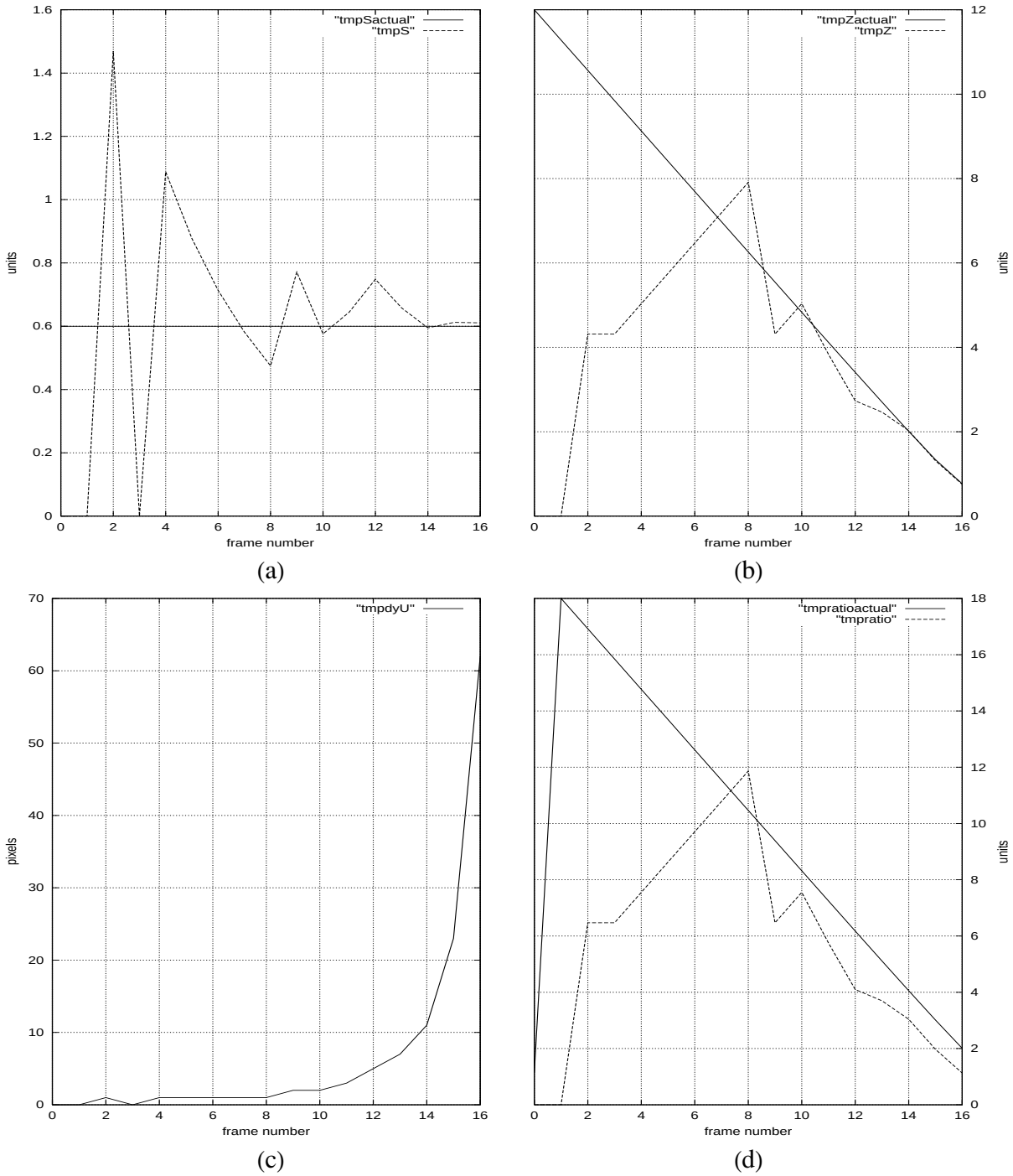
Σχήμα 4.24: Το σκηνικό του πειράματος-δισδιάστατη άποψη (κάτοψη)

Στα σχήμα 4.25 απεικονίζονται ορισμένες εικόνες της ακολουθίας για την σκηνή

που περιγράφηκε, για οριζόντια ανάλυση της εικόνας ίση με 900 εικονοστοιχεία και κατακόρυφη ανάλυση ίση με 450 εικονοστοιχεία.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το σχήμα 4.26, οι εκτιμήσεις για το βάθος και την ταχύτητα της κάμερας αρχίζουν να συγκλίνουν προς τις πραγματικές τιμές τους μετά την 8η εικόνα της ακολουθίας, όμως τα αποτελέσματα μπορεί να θεωρηθούν ικανοποιητικά μόνο στις τρεις τελευταίες εικόνες, οπότε η μετατόπιση στο οπτικό πεδίο αντιστοιχεί σε τουλάχιστον 10 εικονοστοιχεία (γράφημα (c) του σχήματος 4.26). Αντίστοιχα, υπάρχει σημαντική απόκλιση στον υπολογισμό του κριτηρίου επικινδυνότητας (γράφημα (d) του σχήματος 4.26). Τα αποτελέσματα αυτά οφείλονται στο ότι οι υποθέσεις βάση των οποίων εξάγεται η εξίσωση 3.4 ισχύουν μόνο για μικρές μετατοπίσεις των σημείων, σε συνδυασμό με την παραμόρφωση που εισάγουν οι πανοραμικές εικόνες στα άκρα τους στον κατακόρυφο άξονα. Ωστόσο η ακρίβεια είναι αρκετά ικανοποιητική ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά για τον υπολογισμό του κριτηρίου επικινδυνότητας, όταν οι μέθοδοι που στηρίζονται στην οριζόντια μετατόπιση δεν μπορούν να δώσουν μέτρηση.

Σχήμα 4.25: Οι εικόνες 1,4,8,10,12,14 και 16 της ακολουθίας του πειράματος, για IW=900, IH=450, S=0.6 και αρχική απόσταση ίση με 10. Οι οριζόντιες στήλες που αντιστοιχούν στα κάθετα ίχνη των πλευρών είναι τονισμένες.

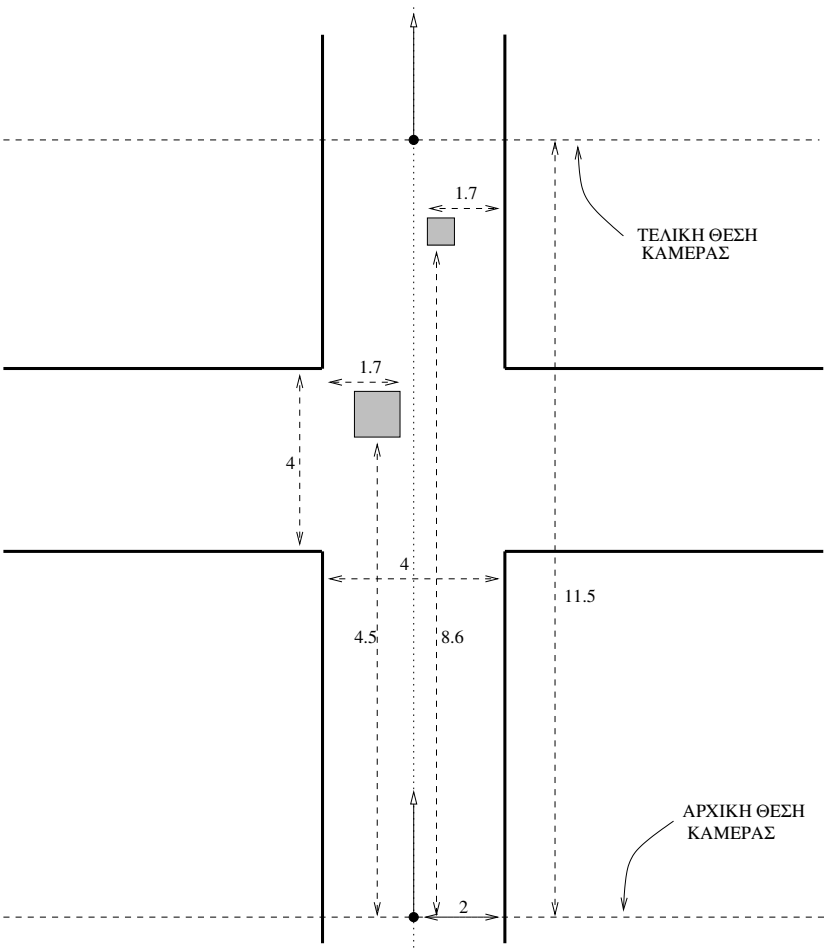


Σχήμα 4.26: Τα αποτελέσματα της πρώτης μεθόδου με την χρήση της κατακόρυφης μετατόπισης για ταχύτητα S=0.6, οριζόντια ανάλυση IW=900, κατακόρυφη ανάλυση IH=450 και αρχική απόσταση ίση με 10

Στο γράφημα (a) απεικονίζεται η πραγματική ταχύτητα και η εκτίμηση που δίνει ο προτεινόμενος αλγόριθμος. Στο (b) απεικονίζεται το πραγματικό βάθος του σημείου και η εκτίμηση που δίνει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, στο (c) απεικονίζεται το εύρος της κίνησης στο κατακόρυφο οπτικό πεδίο που κάνει το ιχνηλατούμενο σημείο σε εικονοστοιχεία και στο (d) απεικονίζεται ο πραγματικός λόγος $\frac{Z_k}{S}$ και η εκτίμηση του προτεινόμενου αλγόριθμου. Οι μονάδες στον οριζόντιο άξονα αφορούν τον αύξοντα αριθμό εικόνας της ακολουθίας.

4.2 Εφαρμογή του κριτηρίου επικινδυνότητας σε σύνθετες ακολουθίες εικόνων

Στο πείραμα αυτό, εφαρμόστηκε το κριτήριο επικινδυνότητας σε μια σύνθετη ακολουθία εικόνων του *POV-Ray*, προκειμένου να αποτυπωθούν τα επικίνδυνα σημεία. Στο σχήμα 4.27 απεικονίζεται η κάτοψη του σκηνικού της ακολουθίας και οι αρχικές αποστάσεις.



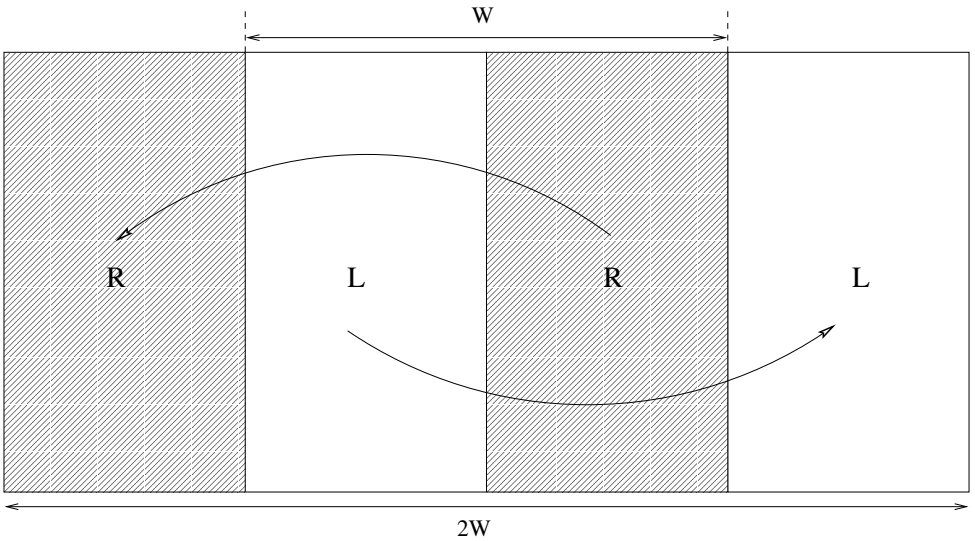
Σχήμα 4.27: Το σκηνικό του πειράματος - δισδιάστατη άποψη

Στο KLT χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω παράμετροι (απεικονίζονται μόνο οι παράμετροι που τροποποιήθηκαν):

```
mindist = 10
window_width = 15
window_height = 15
```

```
searchRange = 32
sequentialMode = FALSE
smoothBeforeSelecting = FALSE
borderx = 15
bordery = 15
nPyramidLevels = 2
subsampling = 4
```

Επειδή η πανοραμική εικόνα έχει οπτικό πεδίο εύρους 360^o, σημεία τα οποία βρίσκονται στο αριστερό άκρο της κυλινδρικής εικόνας γειτνιάζουν με σημεία τα οποία βρίσκονται στο δεξί άκρο της. Επομένως, ένα σημείο που μετακινείται από το ένα άκρο στο άλλο, πρέπει να ιχνηλατείται σωστά. Το KLT δεν παρέχει αυτή την δυνατότητα. Για το λόγο αυτό, σαν είσοδος στο KLT παρέχεται μια περιοδική επανάληψη της κυλινδρικής εικόνας κατά τον άξονα X. Πιο συγκεκριμένα, η υλοποίηση της περιοδικής επανάληψης, γίνεται επαναλαμβάνοντας το μισό αριστερό τμήμα της κυλινδρικής εικόνας μετά το δεξιό όριο της και επαναλαμβάνοντας το μισό δεξιό τμήμα της πριν το αριστερό όριο της (σχήμα 4.28). Κατόπιν, οι συντεταγμένες των σημείων που ιχνηλατήθηκαν επιτυχώς, επαναπροβάλλονται στην αρχική εικόνα.



Σχήμα 4.28: Η εικόνα που δίνεται σαν είσοδος στο KLT

Για τον υπολογισμό του κριτηρίου επικινδυνότητας χρησιμοποιήθηκε κυρίως ο λόγος $\frac{Z_k}{S_d}$ όπως δίνεται από την σχέση 3.24, που στηρίζεται στον υπολογισμό της οριζόντιας μετατόπισης του χαρακτηριστικού σημείου. Εναλλακτικά, όταν η οριζόντια μετατόπιση είναι μικρότερη της κάθετης μετατόπισης, χρησιμοποιείται ο λόγος $\frac{Z_{k-1}}{S}$

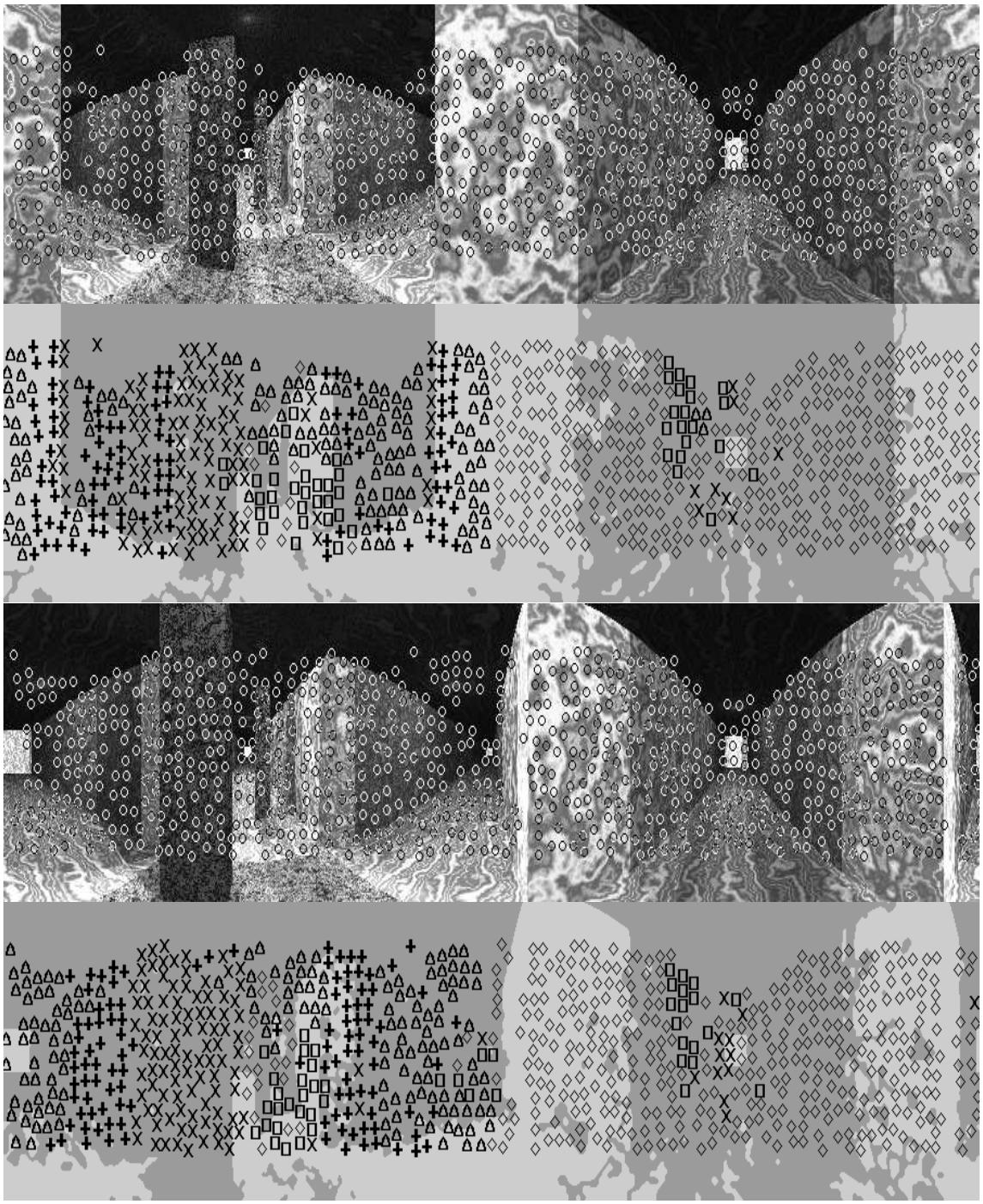
όπως δίνεται από την σχέση 3.17 για την τελική ταξινόμηση του χαρακτηριστικού σημείου ως προς την επικινδυνότητα του.

Αρχικά η ταχύτητα ορίστηκε ως S=0.075. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του κριτηρίου επικινδυνότητας απεικονίζονται στα σχήματα 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 και 4.33. Για κάθε επιτυχώς ιχνηλατούμενο σημείο υπολογίζεται το κριτήριο επικινδυνότητας (σχέση 3.24 ή 3.17) και γίνεται ταξινόμηση των σημείων, από το σημείο με την μικρότερη τιμή έως το σημείο με την μεγαλύτερη τιμή κριτηρίου. Κατόπιν, το 30% των σημείων με την μικρότερη τιμή κριτηρίου χαρακτηρίζονται ως τα πιο επικίνδυνα (απεικονίζονται με x στα σχήματα), το επόμενο 30% των σημείων χαρακτηρίζονται ως λιγότερο επικίνδυνα (απεικονίζονται με + στα σχήματα) και τα εναπομείναντα στοιχεία (40%) θεωρούνται ως ακίνδυνα (συμβολίζονται με △ στα σχήματα). Οι παραπάνω λόγοι μπορούν να μεταβληθούν ανάλογα με την εφαρμογή. Τα σημεία για τα οποία δεν υπάρχει καθόλου μετατόπιση στον οριζόντιο άξονα συμβολίζονται με □ στα σχήματα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα αποτελέσματα του πειράματος, η πλειοψηφία τέτοιων σημείων συγκεντρώνεται γύρω από τις κατευθύνσεις $\pi/2$ και $3\pi/2$ στις εικόνες. Τα σημεία για τα οποία το κριτήριο παίρνει αρνητικές τιμές συμβολίζονται με ◇.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο λόγος Z_k/S_d (ή Z_{k-1}/S για την κάθετη μετατόπιση) που χρησιμοποιείται ως κριτήριο επικινδυνότητας παίρνει αρνητικό πρόσημο για σημεία που έχει προσπεράσει η κάμερα. Θεωρητικά όλα τα σημεία που απεικονίζονται στο δεξί ήμισυ κάθε κυλινδρικής εικόνας θα έπρεπε να συμβολίζονται με ◇, γιατί τα σημεία αυτά απομακρύνονται από την κάμερα. Όμως, όπως φαίνεται στα πειράματα που έγιναν, σημεία με αρνητικό κριτήριο επικινδυνότητας εμφανίζονται και προς την φορά κίνησης της κάμερας (αριστερό ήμισυ της κυλινδρικής εικόνας), ενώ αντίστροφα σημεία με θετικό κριτήριο επικινδυνότητας εμφανίζονται στο στο δεξί ήμισυ κάθε κυλινδρικής εικόνας. Η εσφαλμένη αυτή συμπεριφορά οφείλεται τόσο σε αποτυχία σωστής ιχνηλάτησης από το KLT, όσο και σε σφάλματα κατά τη δημιουργία των πανοραμικών εικόνων από το Povray.

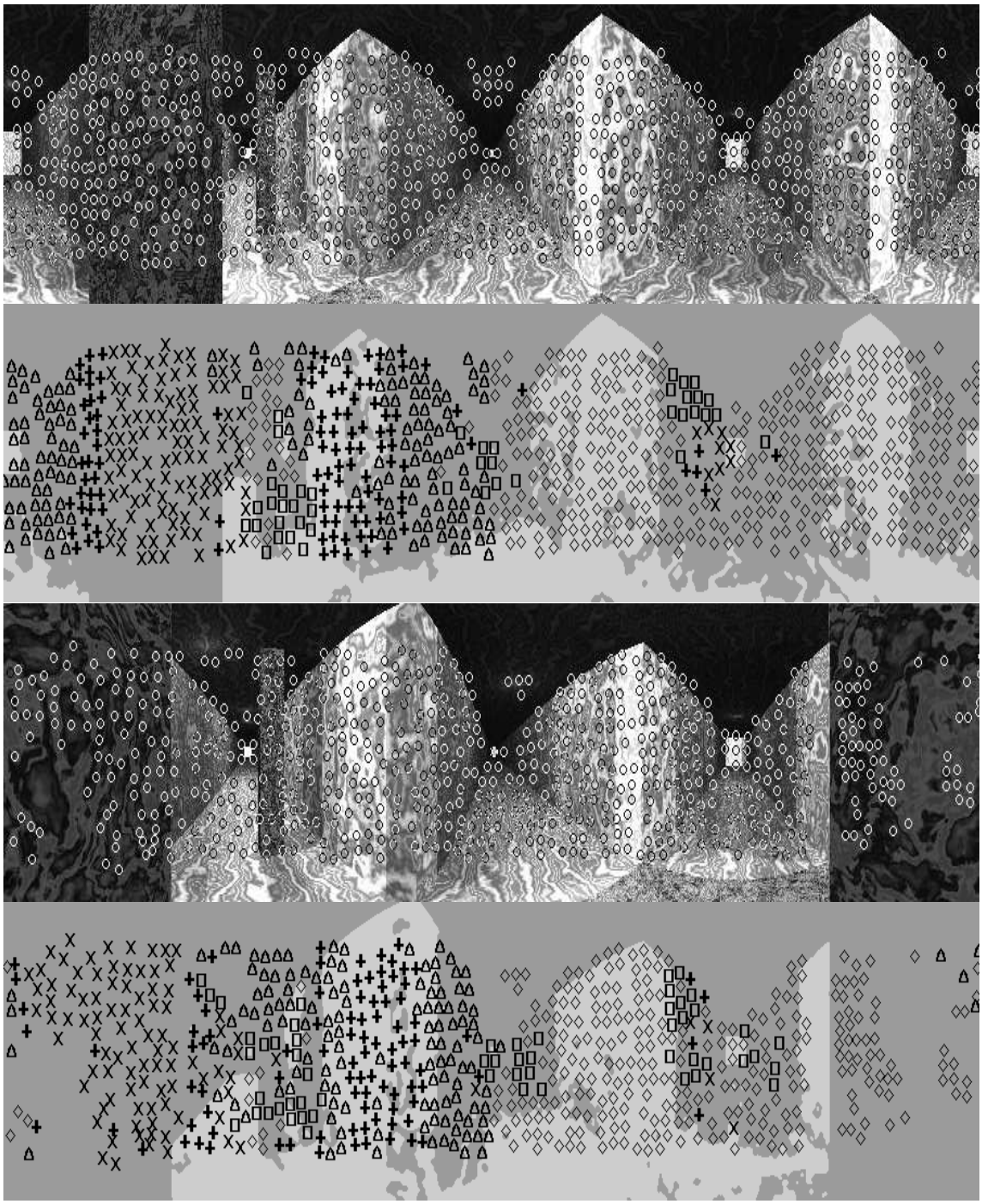
Το ίδιο πείραμα επαναλήφθηκε και για τετραπλάσια ταχύτητα S=0.3 και απεικονίζεται στα σχήματα 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 και 4.38. Σε αυτή την περίπτωση γίνονται φανεροί οι περιορισμοί που θέτει το KLT αφού για σημαντικές μετατοπίσεις ιχνηλατούνται επιτυχώς ελάχιστα σημεία (εικόνα 29 στο σχήμα 4.36).

Τα πειράματα αυτά δείχνουν τις δυσκολίες που εμφανίζονται σε ένα πολύπλοκο περιβάλλον, όμως τα αποτελέσματα που δίνει το κριτήριο επικινδυνότητας είναι αρκετά συνεπή, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πλοήγηση ρομπότ.



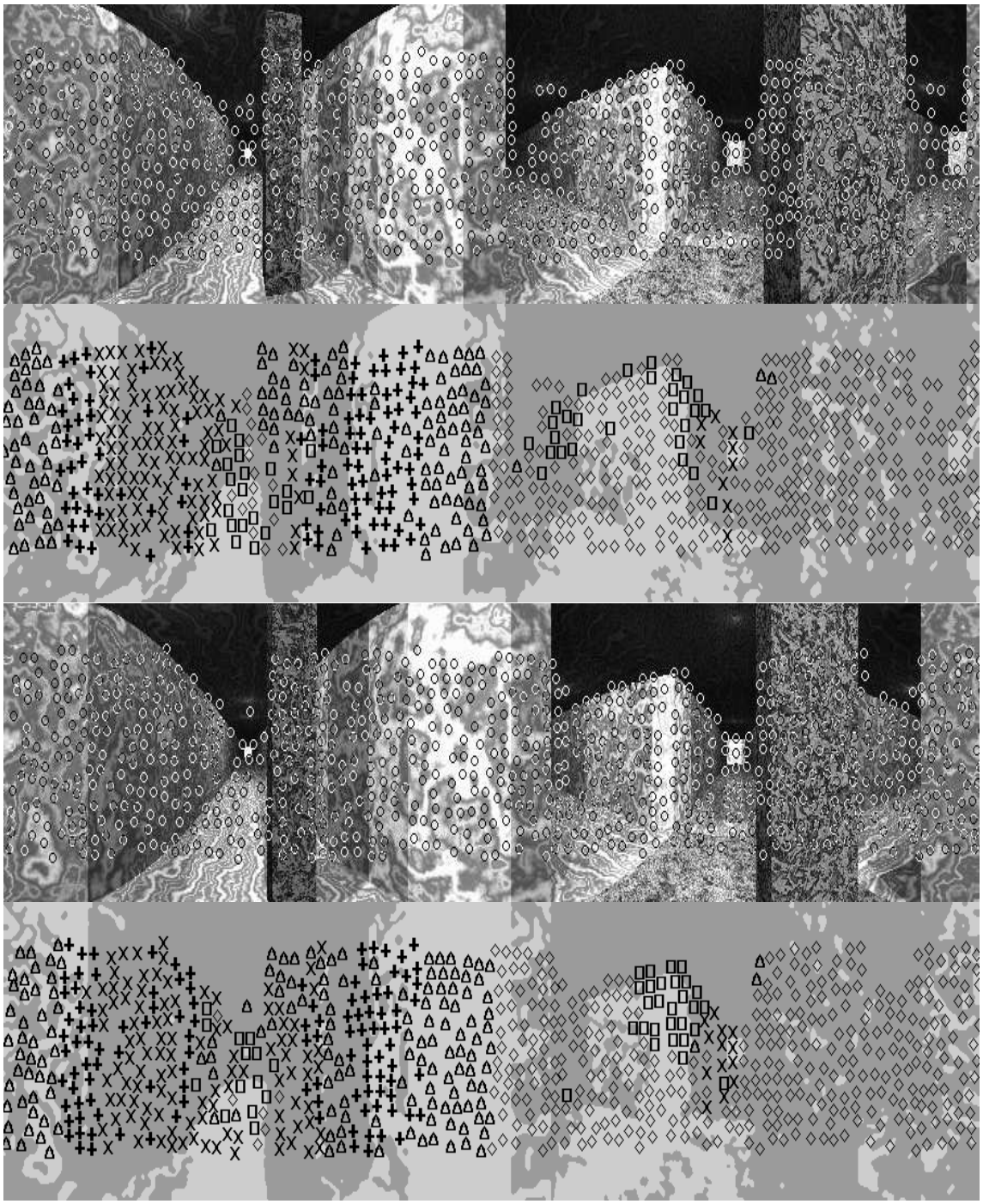
Σχήμα 4.29: Οι εικόνες 17 και 33 της ακολουθίας για S=0.075

Στις εικόνες (a,c) απεικονίζονται όλα τα σημεία που ιχνηλάτησε επιτυχώς το KLT και στις (b,d) φαίνονται τα σημεία ανάλογα με την επικινδυνότητα τους - x τα πιο επικίνδυνα, + τα λιγότερα επικίνδυνα και αυτά που είναι σχετικά ακίνδυνα συμβολίζονται με △. Με □ συμβολίζονται αυτά στα οποία δεν παρατηρήθηκε οριζόντια μετατόπιση και με ◇ αυτά που δίνουν αρνητικό λόγο Z_k/S_d. Η ταχύτητα της κάμερας είναι S=0.075.



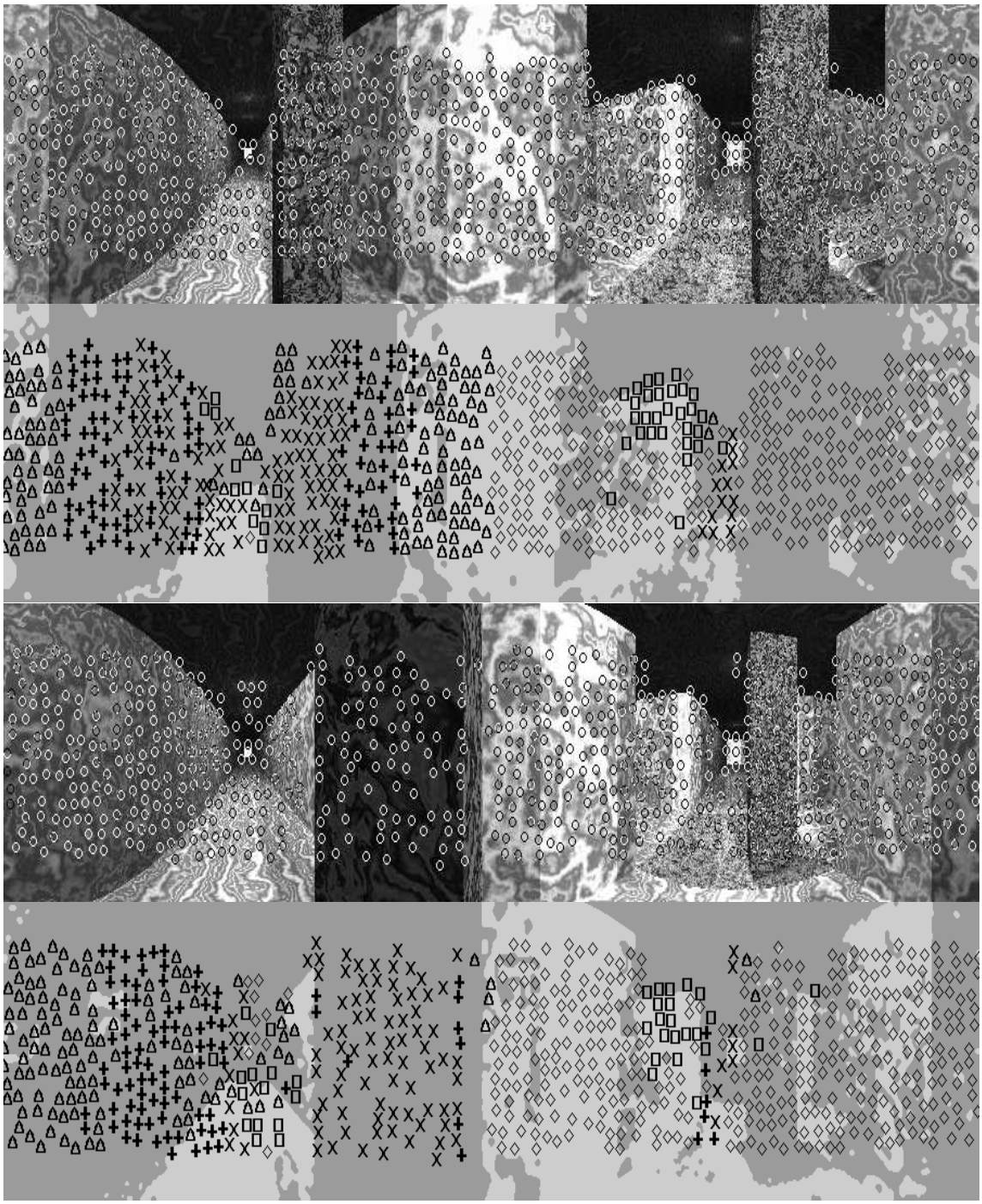
Σχήμα 4.30: Οι εικόνες 49 και 65 της ακολουθίας για S=0.075

Στις εικόνες (a,c) απεικονίζονται όλα τα σημεία που ιχνηλάτησε επιτυχώς το KLT και στις (b,d) φαίνονται τα σημεία ανάλογα με την επικινδυνότητα τους - x τα πιο επικίνδυνα, + τα λιγότερα επικίνδυνα και αυτά που είναι σχετικά ακίνδυνα συμβολίζονται με △. Με □ συμβολίζονται αυτά στα οποία δεν παρατηρήθηκε οριζόντια μετατόπιση και με ◇ αυτά που δίνουν αρνητικό λόγο Z_k/S_d. Η ταχύτητα της κάμερας είναι S=0.075.



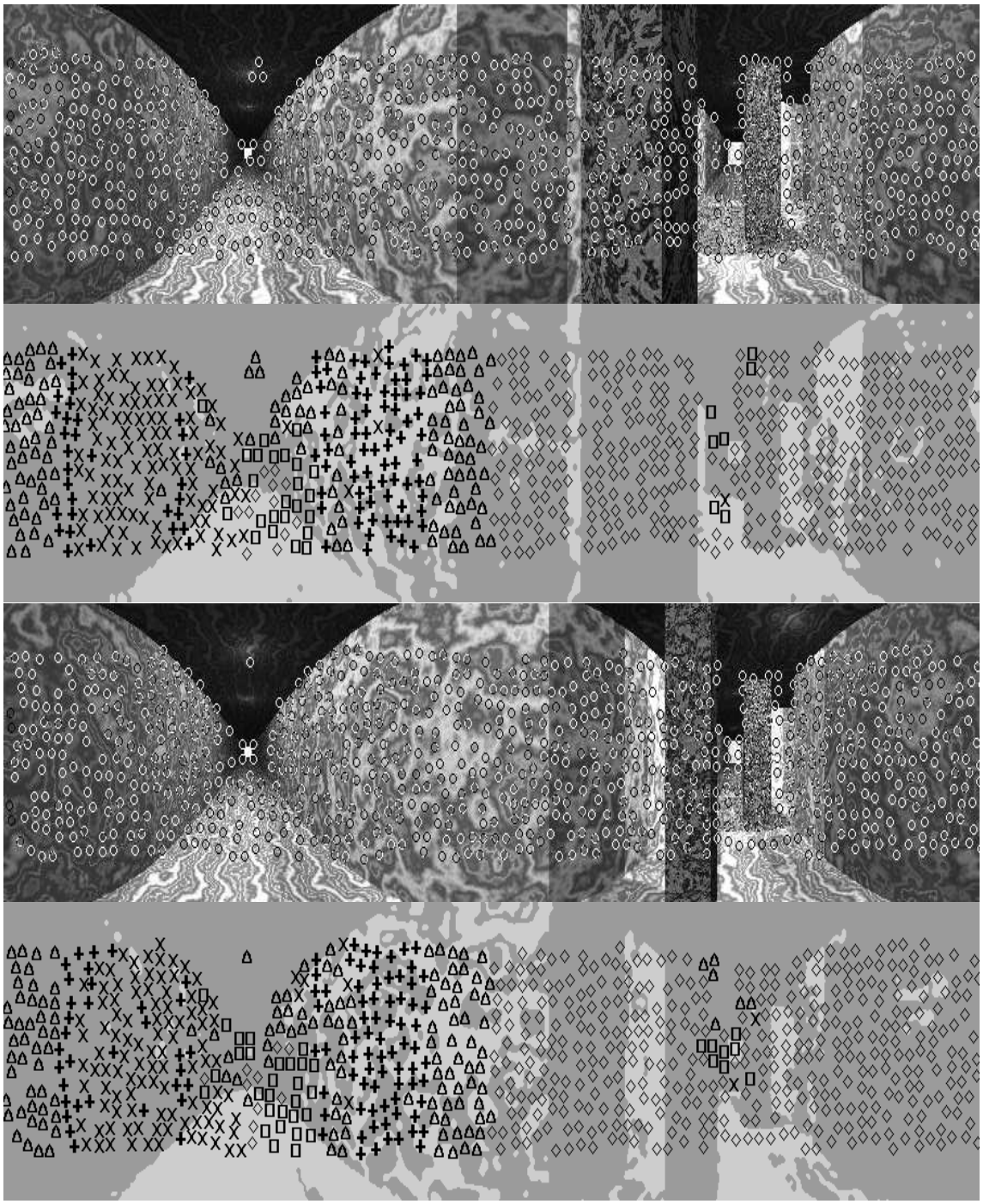
Σχήμα 4.31: Οι εικόνες 81 και 89 της ακολουθίας για S=0.075

Στις εικόνες (a,c) απεικονίζονται όλα τα σημεία που ιχνηλάτησε επιτυχώς το KLT και στις (b,d) φαίνονται τα σημεία ανάλογα με την επικινδυνότητα τους - x τα πιο επικίνδυνα, + τα λιγότερα επικίνδυνα και αυτά που είναι σχετικά ακίνδυνα συμβολίζονται με △. Με □ συμβολίζονται αυτά στα οποία δεν παρατηρήθηκε οριζόντια μετατόπιση και με ◇ αυτά που δίνουν αρνητικό λόγο Z_k/S_d. Η ταχύτητα της κάμερας είναι S=0.075.



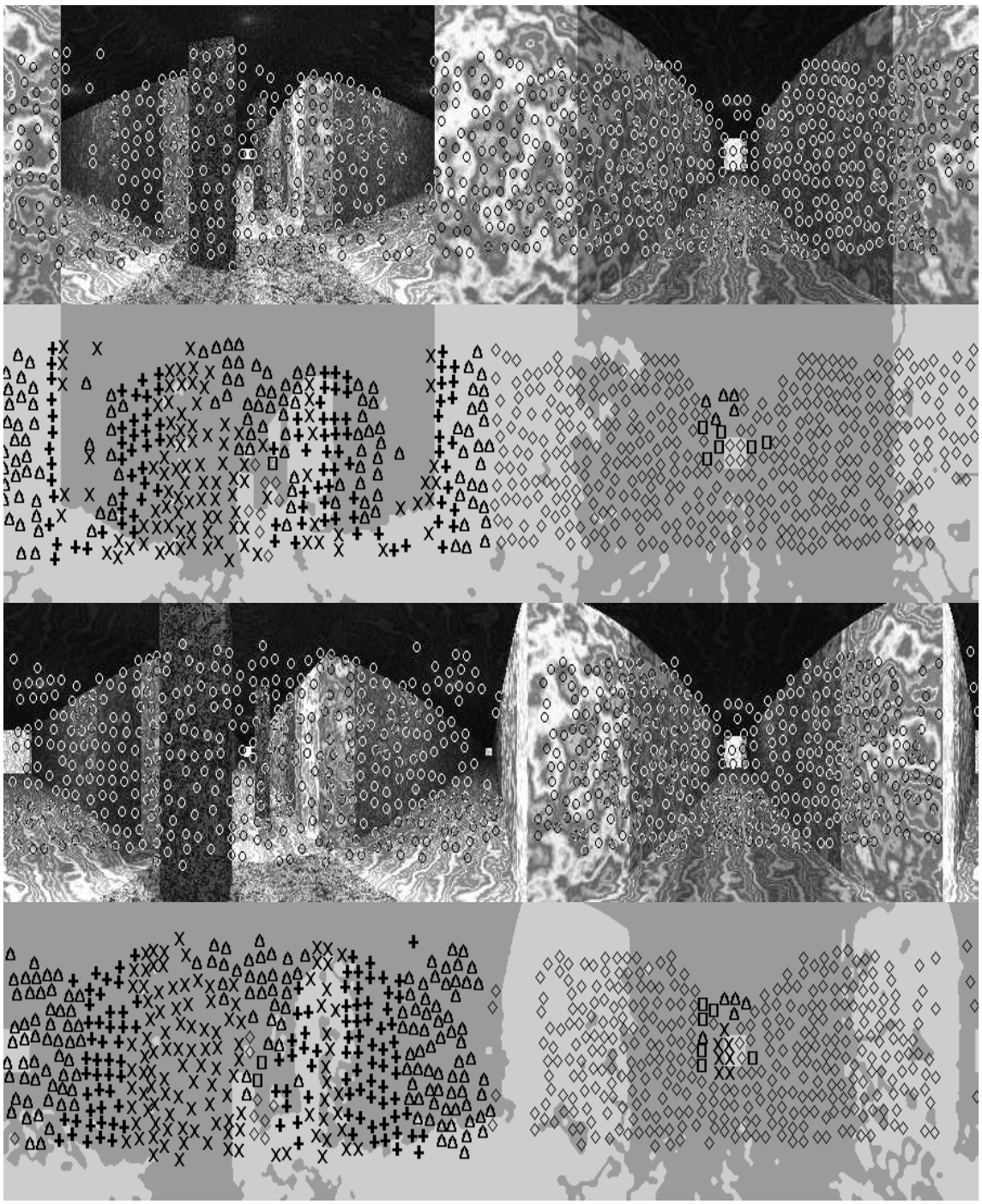
Σχήμα 4.32: Οι εικόνες 97 και 113 της ακολουθίας για S=0.075

Στις εικόνες (a,c) απεικονίζονται όλα τα σημεία που ιχνηλάτησε επιτυχώς το KLT και στις (b,d) φαίνονται τα σημεία ανάλογα με την επικινδυνότητα τους - x τα πιο επικίνδυνα, + τα λιγότερα επικίνδυνα και αυτά που είναι σχετικά ακίνδυνα συμβολίζονται με △. Με □ συμβολίζονται αυτά στα οποία δεν παρατηρήθηκε οριζόντια μετατόπιση και με ◇ αυτά που δίνουν αρνητικό λόγο Z_k/S_d. Η ταχύτητα της κάμερας είναι S=0.075.



Σχήμα 4.33: Οι εικόνες 129 και 145 της ακολουθίας για S=0.075

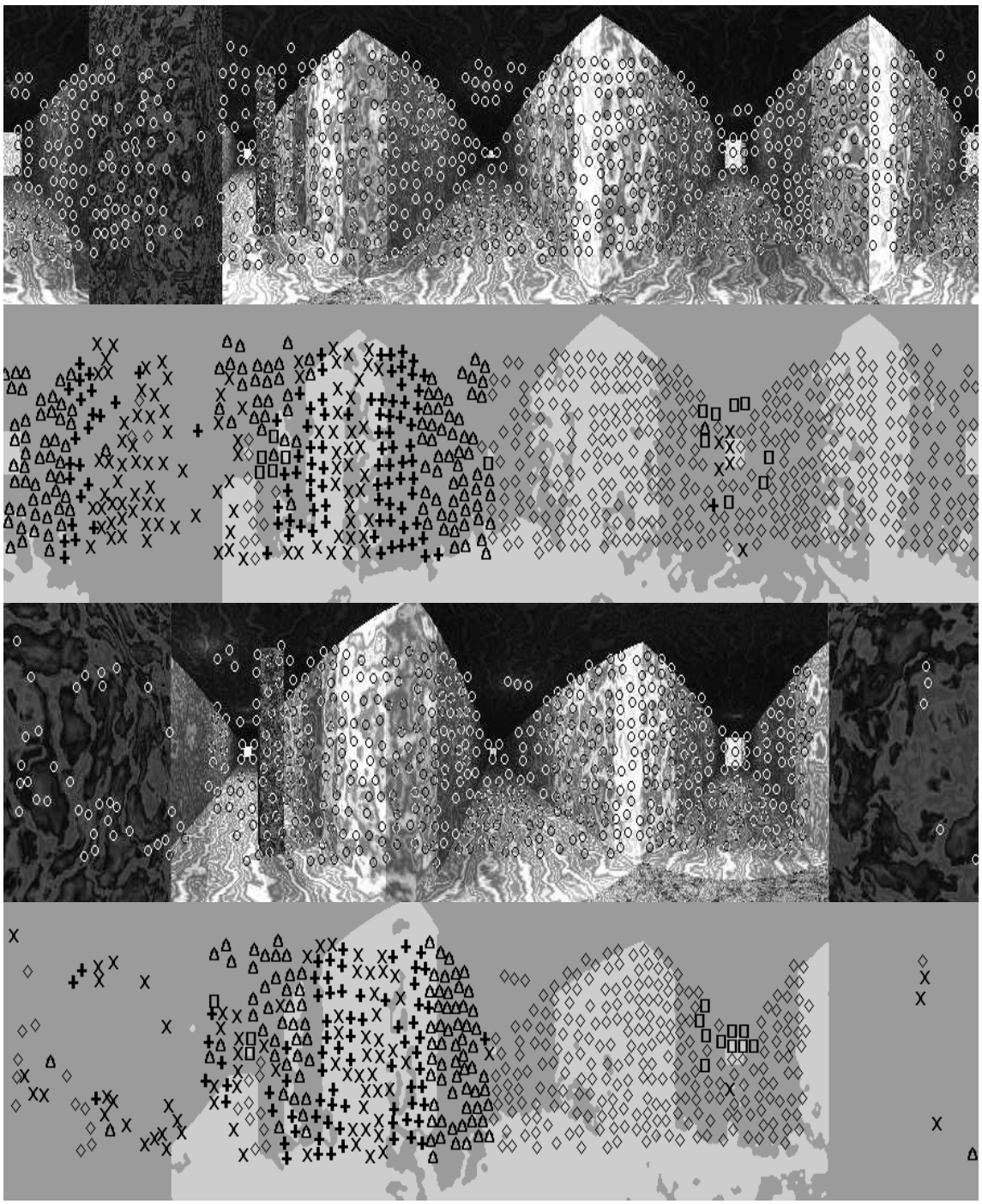
Στις εικόνες (a,c) απεικονίζονται όλα τα σημεία που ιχνηλάτησε επιτυχώς το KLT και στις (b,d) φαίνονται τα σημεία ανάλογα με την επικινδυνότητα τους - x τα πιο επικίνδυνα, + τα λιγότερα επικίνδυνα και αυτά που είναι σχετικά ακίνδυνα συμβολίζονται με △. Με □ συμβολίζονται αυτά στα οποία δεν παρατηρήθηκε οριζόντια μετατόπιση και με ◇ αυτά που δίνουν αρνητικό λόγο Z_k/S_d. Η ταχύτητα της κάμερας είναι S=0.075.



(a) (b) (c) (d)

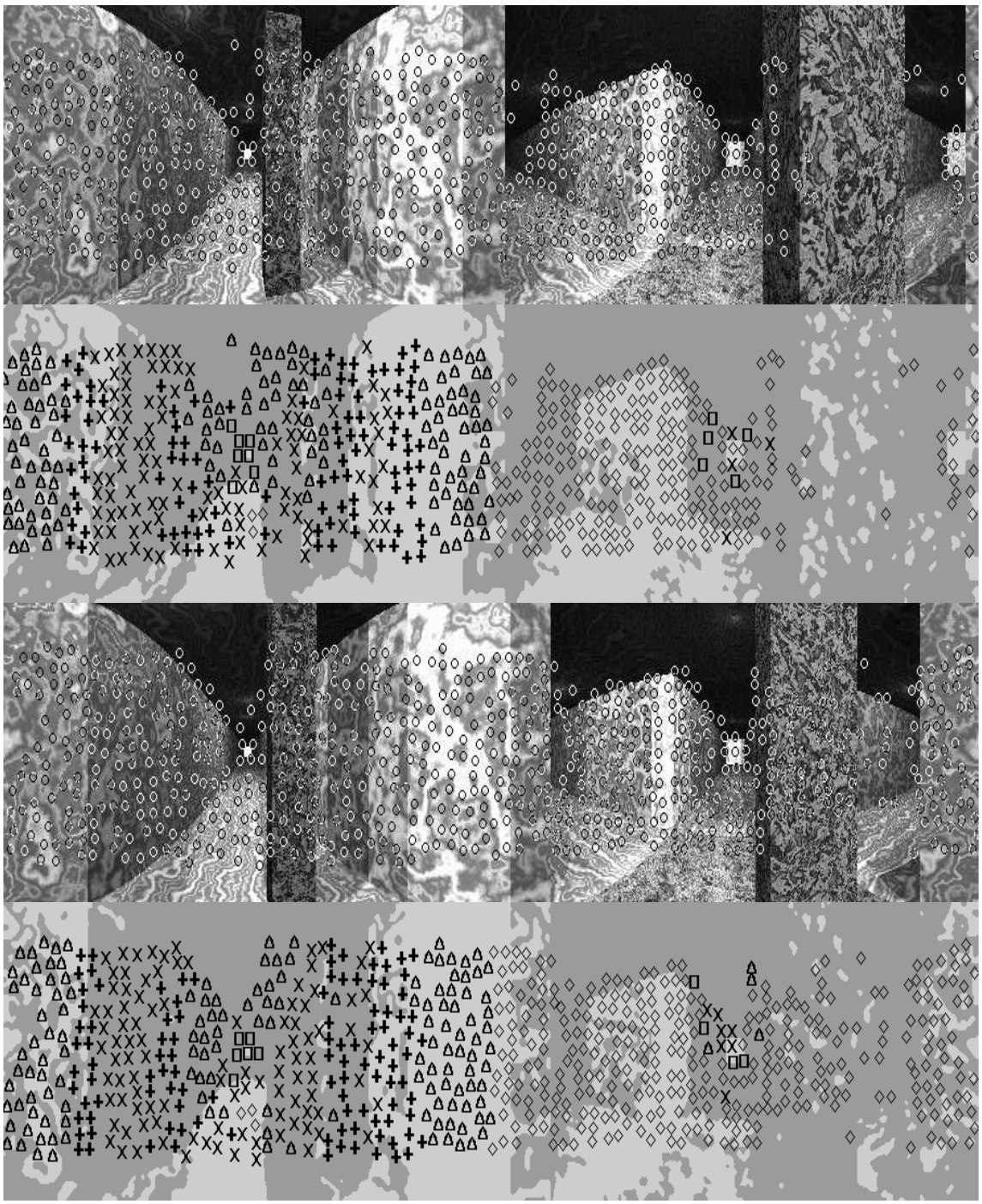
Σχήμα 4.34: Οι εικόνες 5 (17) και 9 (33) της ακολουθίας για S=0.3

Στις (a,c) απεικονίζονται οι εικόνες με όλα τα σημεία που ιχνηλάτησε επιτυχώς το KLT και στις (b,d) φαίνονται τα σημεία ανάλογα με την επικινδυνότητα τους - x τα πιο επικίνδυνα, + τα λιγότερα επικίνδυνα και αυτά που είναι σχετικά ακίνδυνα συμβολίζονται με τρίγωνο. Με τετράγωνο συμβολίζονται αυτά στα οποία δεν παρατηρήθηκε οριζόντια μετατόπιση και με ρόμβο αυτά που δίνουν αρνητικό λόγο Z_k/S_d. Τώρα η ταχύτητα είναι ίση με S=0.3 (τετραπλάσια από το προηγούμενο πείραμα). Σε παρενθέσεις αναφέρεται η εικόνα που αντιστοιχεί στην ίδια θέση στην περίπτωση που S=0.075.



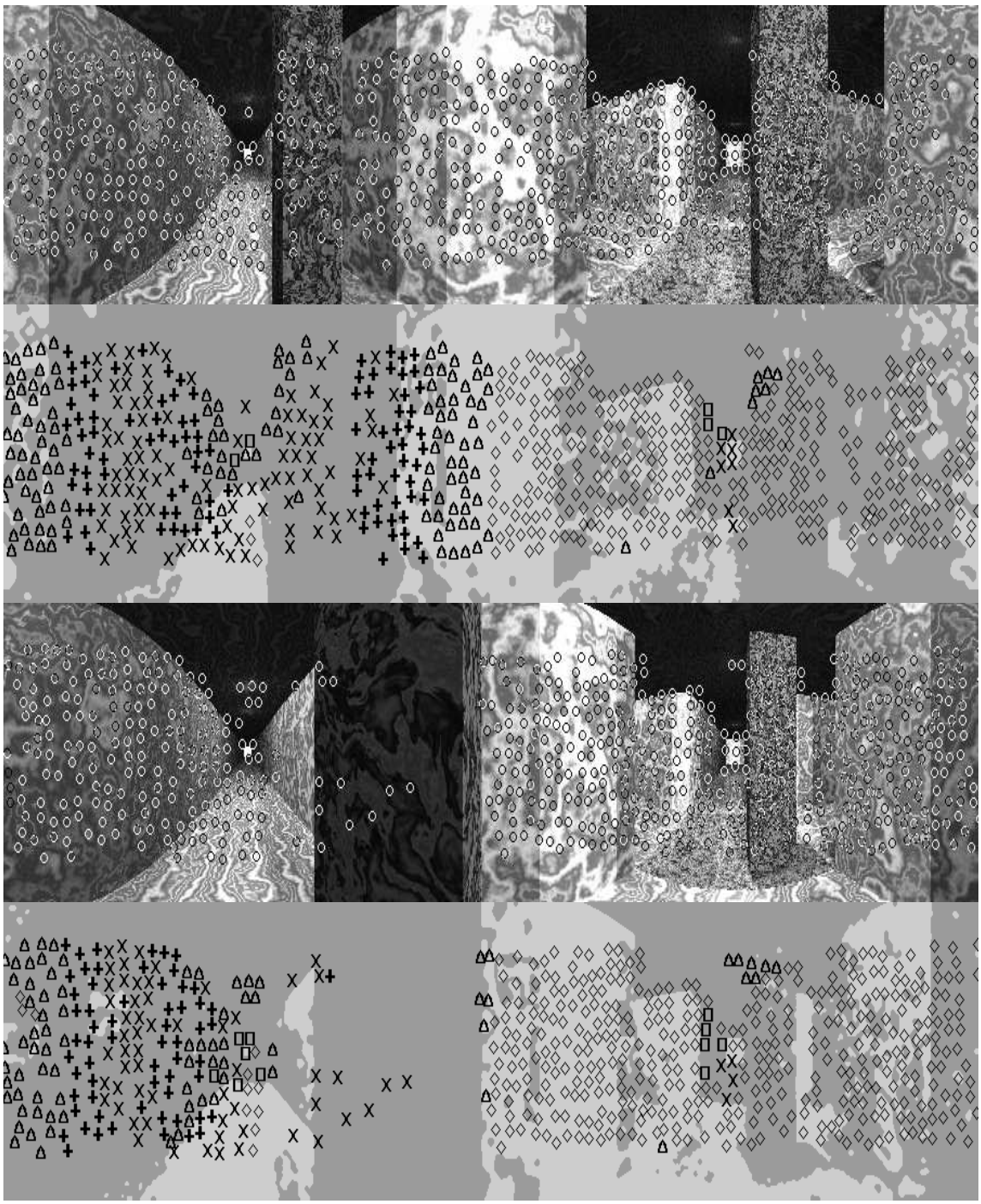
Σχήμα 4.35: Οι εικόνες 13 (49) και 17 (65) της ακολουθίας για S=0.3

Στις (a,c) απεικονίζονται οι εικόνες με όλα τα σημεία που ιχνηλάτησε επιτυχώς το KLT και στις (b,d) φαίνονται τα σημεία ανάλογα με την επικινδυνότητα τους - x τα πιο επικίνδυνα, + τα λιγότερα επικίνδυνα και αυτά που είναι σχετικά ακίνδυνα συμβολίζονται με τρίγωνο. Με τετράγωνο συμβολίζονται αυτά στα οποία δεν παρατηρήθηκε οριζόντια μετατόπιση και με ρόμβο αυτά που δίνουν αρνητικό λόγο Z_k/S_d. Τώρα η ταχύτητα είναι ίση με S=0.3 (τετραπλάσια από το προηγούμενο πείραμα). Σε παρενθέσεις αναφέρεται η εικόνα που αντιστοιχεί στην ίδια θέση στην περίπτωση που S=0.075.



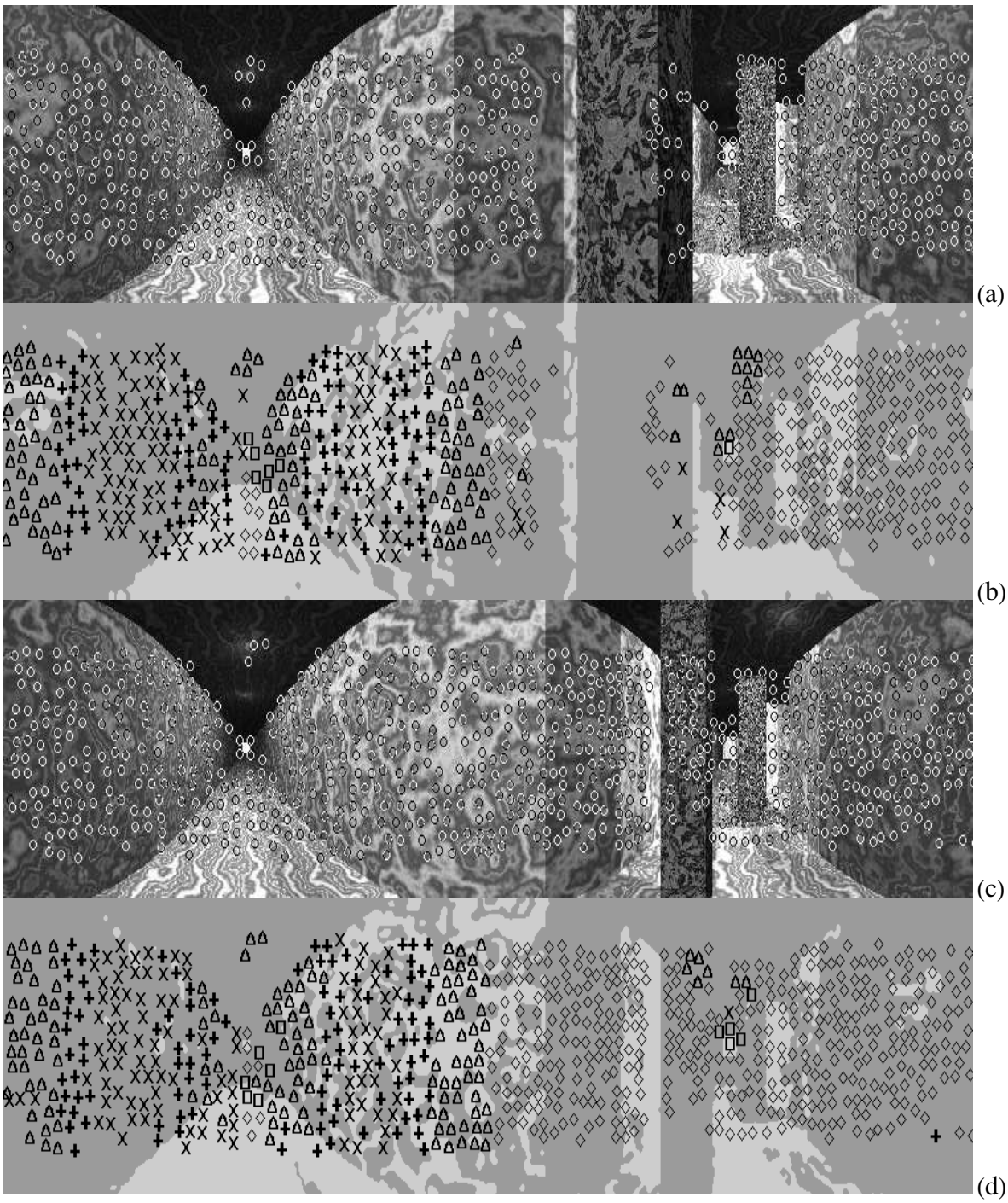
Σχήμα 4.36: Οι εικόνες 21 (81) και 23 (89) της ακολουθίας για S=0.3

Στις (a,c) απεικονίζονται οι εικόνες με όλα τα σημεία που ιχνηλάτησε επιτυχώς το KLT και στις (b,d) φαίνονται τα σημεία ανάλογα με την επικινδυνότητα τους - x τα πιο επικίνδυνα, + τα λιγότερα επικίνδυνα και αυτά που είναι σχετικά ακίνδυνα συμβολίζονται με τρίγωνο. Με τετράγωνο συμβολίζονται αυτά στα οποία δεν παρατηρήθηκε οριζόντια μετατόπιση και με ρόμβο αυτά που δίνουν αρνητικό λόγο Z_k/S_d. Τώρα η ταχύτητα είναι ίση με S=0.3 (τετραπλάσια από το προηγούμενο πείραμα). Σε παρενθέσεις αναφέρεται η εικόνα που αντιστοιχεί στην ίδια θέση στην περίπτωση που S=0.075.



Σχήμα 4.37: Οι εικόνες 25 (97) και 29 (113) της ακολουθίας για S=0.3

Στις (a,c) απεικονίζονται οι εικόνες με όλα τα σημεία που ιχνηλάτησε επιτυχώς το KLT και στις (b,d) φαίνονται τα σημεία ανάλογα με την επικινδυνότητα τους - x τα πιο επικίνδυνα, + τα λιγότερα επικίνδυνα και αυτά που είναι σχετικά ακίνδυνα συμβολίζονται με τρίγωνο. Με τετράγωνο συμβολίζονται αυτά στα οποία δεν παρατηρήθηκε οριζόντια μετατόπιση και με ρόμβο αυτά που δίνουν αρνητικό λόγο Z_k/S_d. Τώρα η ταχύτητα είναι ίση με S=0.3 (τετραπλάσια από το προηγούμενο πείραμα). Σε παρενθέσεις αναφέρεται η εικόνα που αντιστοιχεί στην ίδια θέση στην περίπτωση που S=0.075.



Σχήμα 4.38: Οι εικόνες 33 (129) και 37 (145) της ακολουθίας για S=0.3

Στις (a,c) απεικονίζονται οι εικόνες με όλα τα σημεία που ιχνηλάτησε επιτυχώς το KLT και στις (b,d) φαίνονται τα σημεία ανάλογα με την επικινδυνότητα τους - x τα πιο επικίνδυνα, + τα λιγότερα επικίνδυνα και αυτά που είναι σχετικά ακίνδυνα συμβολίζονται με τρίγωνο. Με τετράγωνο συμβολίζονται αυτά στα οποία δεν παρατηρήθηκε οριζόντια μετατόπιση και με ρόμβο αυτά που δίνουν αρνητικό λόγο Z_k/S_d. Τώρα η ταχύτητα είναι ίση με S=0.3 (τετραπλάσια από το προηγούμενο πείραμα). Σε παρενθέσεις αναφέρεται η εικόνα που αντιστοιχεί στην ίδια θέση στην περίπτωση που S=0.075.

Κεφάλαιο 5

Επίλογος

5.1 Γενικά συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία προτάθηκαν δυο μέθοδοι για τον υπολογισμό παραμέτρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οπτική πλοήγηση ενός ρομπότ που είναι εφοδιασμένο με μια πανοραμική κάμερα. Σκοπός ήταν να αποφευχθεί ο υπολογισμός της οπτικής ροής, λόγω υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Τέθηκαν οι περιορισμοί του στατικού περιβάλλοντος και της μεταφορικής κίνησης του ρομπότ.

Η πρώτη μέθοδος αφορά την ιχνηλάτηση αντικειμένων και υπολογισμού της θέσης των δύο άκρων τους, ώστε να εξαχθεί πληροφορία για τον χρόνο επαφής. Χωρίς τον άμεσο υπολογισμό της οπτικής ροής, είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης κάθε πλευράς αν η ιδία κίνηση της κάμερας είναι γνωστή. Αντιστρόφως αν είναι γνωστή η αρχική απόσταση μιας εκ των πλευρών του αντικειμένου, μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα της κάμερας.

Στην δεύτερη μέθοδο, γίνεται η ιχνηλάτηση ενός χαρακτηριστικού σημείου ώστε να υπολογιστεί η μετακίνηση του ίχνους του στον οριζόντιο άξονα. Ορίστηκε ένα κριτήριο επικινδυνότητας, ως ο λόγος της απόστασης του σημείου προς την ταχύτητα της κάμερας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πλοήγηση της κάμερας ακόμα και όταν οι δύο παράμετροι είναι άγνωστοι.

5.1.1 Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα αναφέρονται κυρίως στην δεύτερη μέθοδο που παρουσιάστηκε, δεδομένου ότι όπως αποδείχτηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα, η πρώτη μέθοδος πλεονεκτεί της δεύτερης μόνο αν γίνει υπολογισμός του πεδίου της οπτικής ροής, ώστε

να πάρουμε αποτελέσματα για μεγάλο αριθμό σημείων, καθώς και αν είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί η κατακόρυφη μετατόπιση στον υπολογισμό των κριτηρίων κίνησης.

Η προτεινόμενη μέθοδος για τον υπολογισμό της ιδίας κίνησης, αν είναι γνωστή η απόσταση από ένα ιχνηλατούμενο σημείο (και αντίστροφα της απόστασης από το σημείο αν είναι γνωστή η ταχύτητα της κάμερας) πετυχαίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ακόμα και σε δύσκολες περιπτώσεις, όπως στην χρήση εικόνων χαμηλής ανάλυσης, το ποσοστό απόκλισης κυμαίνεται μεταξύ 5% και 10%, όταν το σημείο ενδιαφέροντος βρίσκεται σε απόσταση ικανή για να παρθούν μετρήσεις.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μικρή υπολογιστική πολυπλοκότητα, επιτρέποντας την χρήση της για την δημιουργία χάρτη επικινδυνότητας για εκατοντάδες σημεία σε πραγματικό χρόνο. Στην περίπτωση της παρούσης εργασίας η μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση παρουσιαζόταν κατά το στάδιο της εύρεσης των χαρακτηριστικών σημείων και της ιχνηλάτησης τους με την χρήση του KLT.

5.1.2 Μειονεκτήματα

Το βασικότερο μειονέκτημα των προτεινόμενων μεθόδων έχει να κάνει με τους περιορισμούς που τίθενται στην κίνηση της πανοραμικής κάμερας και του περιβάλλοντος. Απαιτείται η κάμερα να κινείται με σταθερή ταχύτητα και χωρίς περιστροφική κίνηση. Αρχικά χρειάζεται να γίνει η κατάλληλη ευθυγράμμιση, ώστε το σημείο στην κυλινδρική μορφή που αντιστοιχεί στο $\frac{\pi}{2}$ να συμπίπτει με την φορά κίνησης της ρομποτικής πλατφόρμας.

Επιπλέον, το περιβάλλον θεωρείται στατικό, για να μπορεί το ρομπότ αν θέλει να αλλάξει κατεύθυνση, να σταματάει την μεταφορική κίνηση και να εκτελεί την απαιτούμενη περιστροφή χωρίς τον κίνδυνο πρόσκρουσης. Ένας δεύτερος λόγος για την απαίτηση του στατικού περιβάλλοντος, είναι ότι όταν πλησιάζει ένα αντικείμενο την πανοραμική κάμερα, επειδή η γωνία προσέγγισης είναι άγνωστη (η γωνία ϕ_k της σχέσης 3.18), δεν μπορεί να γίνει εκτίμηση του κινδύνου.

Ένα ακόμα μειονέκτημα οφείλεται στην χρήση χαρακτηριστικών σημείων, αντί για παράδειγμα της χρήσης αντικειμένων. Η χρήση σημείων για την ιχνηλάτηση αποτελεί μειονέκτημα, γιατί όταν το σημείο είναι προς την κατεύθυνση της κίνησης, η μετατόπιση του στο οπτικό πεδίο είναι ελάχιστη ή ανύπαρκτη με αποτέλεσμα η προτεινόμενη μέθοδος να αποτυγχάνει να το θεωρήσει επικίνδυνο ακόμα και αν η σύγκρουση είναι πιθανή.

5.2 Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Η παρούσα εργασία επιδέχεται πολλές βελτιώσεις και επεκτάσεις που μπορούν να υλοποιηθούν μελλοντικά.

Μια προφανής επέκταση είναι η τοποθέτηση πανοραμικής κάμερας σε μηχανισμό κίνησης και η λήψη πραγματικών πανοραμικών ακολουθιών εικόνων. Έτσι μπορεί να επιβεβαιωθούν τα πειραματικά αποτελέσματα από την χρήση συνθετικών ακολουθιών εικόνων.

Σημαντική βελτίωση για την χρησιμότητα της προτεινόμενης μεθόδου θα αποτελούσε η άρση του περιορισμού ως προς την κατεύθυνση της μεταφορικής κίνησης και η δυνατότητα ταυτόχρονης περιστροφικής κίνησης γύρω από τον κατακόρυφο άξονα της κάμερας.

Ένας ακόμα τρόπος βελτίωσης, θα ήταν η ιχνηλάτηση αντικειμένων ή ολόκληρων περιοχών της εικόνας, αντί για σημεία. Δηλαδή δεν θα μετριέται η μετακίνηση ενός σημείου, αλλά η διαφορά στο μέγεθος ενός αντικειμένου ώστε να μην υπάρχει αδυναμία εκτίμησης της επικινδυνότητας, για σημεία που βρίσκονται προς την φορά κίνησης.

Εναλλακτικά, συνεχίζοντας την χρησιμοποίηση σημείων, είναι δυνατή η τμηματοποίηση σε περιοχές της εικόνας και η ομαδοποίηση των επικίνδυνων σημείων ανά περιοχή, ώστε περιοχές με μεγάλο αριθμό επικίνδυνων σημείων να θεωρούνται συνολικά επικίνδυνες.

Μια ακόμα βελτίωση θα αποτελούσε η αντικατάσταση του KLT, είτε με πιο γρήγορους αλγόριθμους αναγνώρισης και ιχνηλάτησης σημείων, ή με αλγόριθμους που υποστηρίζουν και αφινικούς μετασχηματισμούς κατά την ιχνηλάτηση, ώστε να πετυχαίνονται καλύτερα αποτελέσματα κατά την χρήση πανοραμικής κάμερας.

Τέλος, μελλοντικά, η προτεινόμενη μέθοδος θα μπορούσε να επεκταθεί στην χρησιμοποίηση στερεοσκοπικής πανοραμικής όρασης, με την βοήθεια δύο πανοραμικών καμερών, όπου εκμεταλλευόμενοι τις διαφορετικές οπτικές γωνίες των καμερών, να είναι δυνατή η εκτίμηση της επικινδυνότητας ακόμα και για σημεία που βρίσκονται στην κατεύθυνση της κίνησης.

Βιβλιογραφία

[Ako97] G.A. Akoumianakis. Povanim - creating complicated image sequences using povray, 1997. Diploma Thesis, Computer Science Department - University of Crete.

[Ana89] P. Anandan. A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion. *IJCV*, 2(3):283--310, January 1989.

[Arn88] J. Arnspang. Optic acceleration. In *ICCV88*, pages 364--373, 1988.

[BA93] M.J. Black and P. Anandan. A framework for the robust estimation of optical flow. In *ICCV93*, pages 231--236, 1993.

[BFA98] T. Brodsky, C. Fermueller, and Y. Aloimonos. Directions of motion fields are hardly ever ambiguous. *IJCV*, 26(1):5--24, January 1998.

[BFB94] J.L. Barron, D.J. Fleet, and S.S. Beauchemin. Performance of optical flow techniques. *IJCV*, 12(1):43--77, February 1994.

[Bir96] S. Birchfield. Derivation of kanade-lucas-tomasi tracking equation, May 1996. Available at http://vision.stanford.edu/ birch/klt/.

[CB92] R. Cipolla and A. Blake. Surface orientation and time to contact from image divergence and deformation. In *ECCV92*, pages 187--202, 1992.

[CS96] J.S. Chahl and M.V. Srinivasan. Visual computation of egomotion using an image interpolation technique. *Biol. Cybernetics*, 74(5):405--411, 1996.

[CS97a] J.S. Chahl and M.V. Srinivasan. Navigation, path planning and homing for autonomous mobile robots using panoramic visual sensors. In *AISB workshop on Spatial Reasoning in Mobile Robots and Animals*, Manchester University, 1997.

[CS97b] J.S. Chahl and M.V. Srinivasan. Range estimation with a panoramic visual sensor. *JOSA-A*, 14(9):2144--2151, September 1997.

[CS97c] J.S. Chahl and M.V. Srinivasan. Reflective surfaces for panoramic imaging. *Applied Optics*, 36(31):8285--8275, November 1997.

[DN90] K. Daniilidis and H.H. Nagel. Analytic results on error sensitivity of motion estimation from two views. *IVC*, 8(4):297--303, November 1990.

[DN93] K. Daniilidis and H.H. Nagel. The coupling of rotation and translation in motion estimation of planar surfaces. In *CVPR93*, pages 188--193, 1993.

[EAH99] M. Etoh, T. Aoki, and K. Hata. Estimation of structure and motion parameters for a roaming robot that scans the space. In *ICCV99*, pages 579--584, 1999.

[Fer93] C. Fermueller - edited by Aloimonos. *Active Perception*, chapter 3, pages 103--150. Lawrence Erlbaum Associates, 1993.

[FJ90] D.J. Fleet and A.D. Jepson. Computation of component image velocity from local phase information. *IJCV*, 5(1):77--104, August 1990.

[GD99] C. Geyer and K. Daniilidis. Catadioptric camera calibration. In *ICCV99*, pages 398--404, 1999.

[GN98] J. Gluckman and S.K. Nayar. Ego-motion and omnidirectional cameras. In *ICCV98*, pages 999--1005, 1998.

[GV99] J. Gaspar and J.S. Victor. Visual path following with a catadioptric panoramic camera. In *7th International Symposium on Intelligent Robotic Systems*, Coimbra, Portugal, July 1999.

[Hee88] D.J. Heeger. Optical flow from spatiotemporal filters. *IJCV*, 1(4):279--302), January 1988.

[HS81] B.K.P. Horn and B.G. Schunck. Determining optical flow. *AI*, 17:185--203, 1981.

[KD98] S.B. Kang and P.K. Desikan. Virtual navigation of complex scenes using clusters of cylindrical panoramic images. In *Graphics Interface*, pages 223--233, 1998.

[LHP80] H.C. Longuet-Higgins and K. Prazdny. The interpretation of a moving retinal image. *RoyalP*, B-208:385--397, 1980.

[LK81] B.D. Lucas and T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *DARPA81*, pages 121--130, 1981.

[Lou98] M.I. Lourakis. *Navigation of Autonomous Robotic Systems based on the Analysis of Visual Motion*. PhD thesis, University of Crete, Computer Science Department, 1998.

[NA89] R.C. Nelson and Y. Aloimonos. Obstacle avoidance using flow field divergence. *PAMI*, 11(10):1102--1106, October 1989.

[Nag83] H.H. Nagel. Displacement vectors derived from second-order intensity variations in image sequences. *CVGIP*, 21(1):85--117, January 1983.

[Nay97] S.K. Nayar. Catadioptric omnidirectional cameras. In *CVPR97*, pages 482--488, 1997.

[OHS99] M. Ollis, H. Herman, and S. Singh. Analysis and desing of panoramic stereo vision using equi-angular pixel cameras. Technical Report CMU-RI-TR-99-04, Carnegie Mellon University, The Robotics Institute, 1999.

[RS98] K. Rushant and L. Spacek. An autonomous vehicle navigation system using panoramic machine vision techniques. In *6th International Symposium on Intelligent Robotic Systems*, Bangalore, India, 1998.

[SGGT93] G. Sandini, F. Gandolfo, E. Grosso, and M. Tistarelli - edited by Aloimonos. *Active Perception*, chapter 4, pages 151--190. Lawrence Erlbaum Associates, 1993.

[Sin90] A. Singh. *Image-Flow Computation: Estimation-Theoretic Framework, Unification and Integration*. PhD thesis, University of Columbia, Computer Science Department, 1990.

[SKS99] H. Shum, A. Kalai, and S. Seitz. Omnivergent stereo. In *ICCV99*, pages 22--29, 1999.

[SPH97] T. Svoboda, T. Pajdla, and V. Hlavac. Central panoramic cameras: Geometry and design. Technical report, Czech Technical University, Center for Machine Perception, 1997.

[SPH98] T. Svoboda, T. Pajdla, and V. Hlavac. Motion estimation using central panoramic cameras. In *IEEE Conference on Intelligent Vehicles*, pages 335--340, 1998.

[SS99] H. Shum and R. Szeliski. Stereo reconstruction from multiperspective panoramas. In *ICCV99*, pages 14--21, 1999.

[Sub90] M. Subbarao. Bounds on time-to-collision and rotational component from first-order derivatives of image flow. *CVGIP*, 50(3):329--341, June 1990.

[TA00] D.P. Tsakiris and A.A. Argyros. Corridor following by nonholonomic mobile robots equipped with panoramic cameras. In *IEEE 8th Mediterranean Conference on Control and Automation*, University of Patras, Rio, Greece, July 2000. To appear.

[tea99] POV-Ray team. Persistence of vision raytracer. *http://www.povray.org/*, 1999.

[TK91] C. Tomasi and T. Kanade. Detection and tracking of point features - cmu-cs-91-132. Technical report, Carnegie Mellon University, April 1991.

[TM93] P.H.S. Torr and D.W. Murray. Statistical detection of independent movement from a moving camera. *IVC*, 11:180--187, 1993.

[TS94] C. Tomasi and J. Shi. Good features to track. In *CVPR94*, pages 593--600, 1994.

[UGVT89] S. Uras, F. Girosi, A. Verri, and V. Torre. A computational approach to motion perception. *BioCyber*, 60:79--87, 1989.

[WJ99] N. Winters and Santos-Victor J. Mobile robot navigation using omni-directional vision. In *3rd Irish Machine Vision and Image Processing Conference*, Dublin, Ireland, September 1999.

[WKPS87] A.M. Waxman, B. Kamgar-Parsi, and M. Subbarao. Closed-form solutions to image flow equations for 3d structure and motion. *IJCV*, 1(3):239--258, October 1987.

[YNY95] Y. Yagi, Y. Nishizawa, and M. Yachida. Map-based navigation for a mobile robot with omnidirectional image sensor copis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation, RA*, 11(5):634--648, October 1995.

[ZT92] J.Y. Zheng and S. Tsuji. Panoramic representation for route recognition by a mobile robot. *International Journal of Computer Vision, IJCV*, 9(1):55--76, October 1992.