



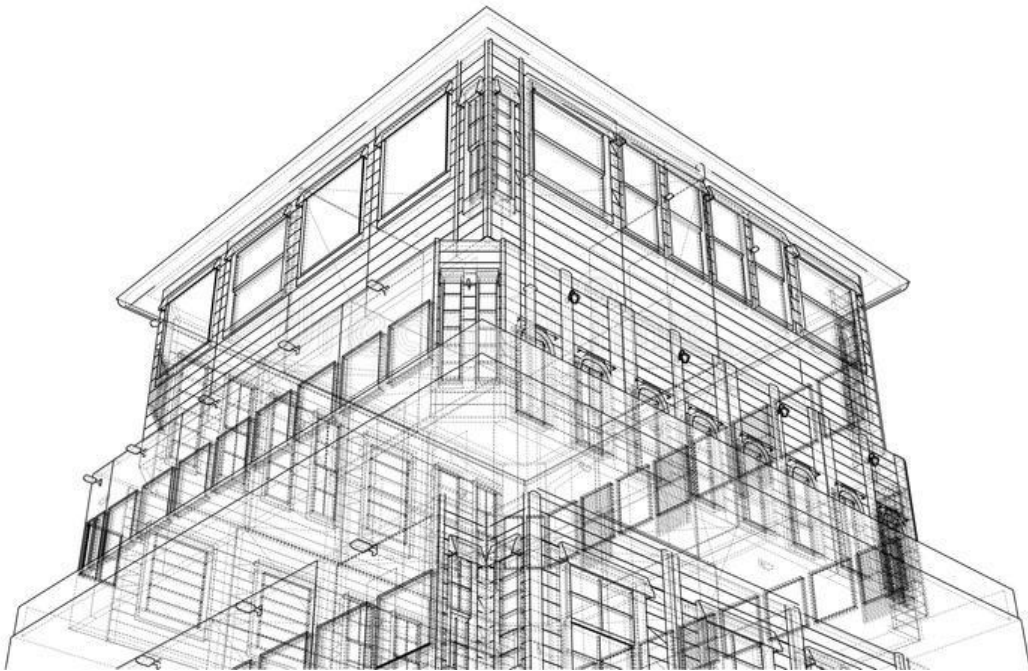
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

Ανάπτυξη Αυτοματοποιημένου Αλγορίθμου για τον Εντοπισμό Ακμών σε Νέφη Σημείων



Ορφέας Σκέντζος

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων καθηγητής: Ανδρέας Γεωργόπουλος

Αθήνα, Ιούλιος 2020

Ορφέας Σκέντζος
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΚΜΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ
ΣΗΜΕΙΩΝ

Ευχαριστίες

Με το τέλος της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν και στάθηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

Αρχικά, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ, πρωτίστως, στον Καθηγητή κ. Ανδρέα Γεωργόπουλο, τόσο για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας, όσο και για την καθοδήγηση, τη συμβολή, αλλά και την εμπιστοσύνη του στις δυνατότητες μου, καθώς και την στήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας άσκησης. Χωρίς τη βοήθεια και τις συμβουλές του, η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Επιπλέον, ένα θερμό ευχαριστώ όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, καθώς και στην κ. Σεβαστή Ταπεινάκη, την κ. Έλλη Κ. Σταθοπούλου, τον κ. Κωνσταντίνο Καράντζαλο και τον κ. Βαλσάμη Ντούσκο, για τις χρήσιμες συμβουλές τους, αλλά και τους συνεξεταστές κ. Χαράλαμπο Ιωαννίδη & κ. Τάσο Δουλάμη για την αξιολόγηση της παρούσας διπλωματικής.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ και στους γονείς μου, Σοφία και Αιμίλιο, για την τεράστια υποστήριξή τους υλικά και ψυχολογικά, σε αυτό το δύσκολο ταξίδι και κυρίως στην αδερφή μου Δανάη, αλλά και στους πολύτιμους φίλους μου, που ήταν και είναι πάντα δίπλα μου σε κάθε βήμα της ζωής μου.

Ορφέας Σκέντζος
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΚΜΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ
ΣΗΜΕΙΩΝ

Περίληψη

Η ερμηνεία των περιεχόμενων στοιχείων μιας εικόνας είναι το κυριότερο αντικείμενο στον κλάδο της Ψηφιακής Επεξεργασίας Εικόνων και της Όρασης Υπολογιστών. Μία εικόνα, ουσιαστικά αποτελείται από ένα σύμπλεγμα ακμών, δηλαδή έντονων ασυνεχειών που συναντώνται σε αυτήν. Ο ακριβής εντοπισμός των συγκεκριμένων ασυνεχειών, είναι και το πρωταρχικό στάδιο για την κατάτμηση της εικόνας και κατ' επέκταση την ερμηνεία και την σημασιολογική απόδοση των στοιχείων που αυτή απεικονίζει.

Στα πλαίσια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μια μελέτη των σύγχρονων και επικρατέστερων μεθόδων εντοπισμού ακμών, οι οποίες προσφέρονται για αντικείμενα μελέτης, όπως είναι οι ανθρώπινες κατασκευές και, κυρίως, πολύπλοκες επιφάνειες αυτών, οι οποίες περιέχουν μεγάλη αρχιτεκτονική πληροφορία που, πολύ συχνά, πρέπει να καταγραφεί με μεγάλη ακρίβεια και λεπτομέρεια.

Στο πρώτο σκέλος, σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα αυτόματης εξαγωγής και αποθήκευσης των ακμών, για μεγάλα σύνολα εικόνων στο λογισμικό MATLAB, με το κατάλληλο παραγόμενο αποτέλεσμα για το εκάστοτε αντικείμενο μελέτης.

Στο δεύτερο σκέλος, στόχος είναι, η αξιοποίηση αυτής της σημασιολογικής πληροφορίας για τις ακμές των δισδιάστατων εικόνων, στη διαδικασία παραγωγής τρισδιάστατων ακανόνιστων νεφών σημείων, ώστε κατ' επέκταση να απομονωθεί η πληροφορία που δίνεται από αυτές. Με άλλα λόγια, το παραγόμενο νέφος, θα περιέχει σημεία ενδιαφέροντος, δηλαδή σημεία που αποτελούν αποκλειστικά ακμές.

Τέλος, θα εξεταστεί το ενδεχόμενο να γίνει χρήση της πληροφορίας των παραγόμενων νεφών σημείων-ακμών, ώστε να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία διανυσματικής απόδοσής τους από άλλα λογισμικά, και κατ' επέκταση η εξαγωγή του περιγράμματος που χαρακτηρίζει τα αντικείμενα μελέτης και το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο τόσο σε περιβάλλοντα δισδιάστατης σχεδίασης CAD, αλλά και σε τρισδιάστατες εφαρμογές όπως τη Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίων (Building Information Modeling).

Λέξεις κλειδιά: Φωτογραμμετρία, Πολιτιστική Κληρονομιά, Ανιχνευτής Canny, Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνας, Εντοπισμός Ακμών, Τρισδιάστατη Ανίχνευση Γραμμών, Τεχνική Δομής Προερχόμενης από Κίνηση

Abstract

The interpretation of the elements of an image is the main subject in the field of Digital Image Processing and Computer Vision. An image essentially consists of a cluster of edges, that is, the intense discontinuities encountered in it. Accurate localization of these discontinuities is also the primary stage in image segmentation and, consequently, the interpretation and semantic rendering of the content it depicts.

As part of the thesis, a study of modern and predominant methods of edge detection is carried out, which thrive on study objects such as human constructions and, in particular, their complex surfaces, which contain great architectural information that very often must be recorded with high accuracy and detail.

In the first part, the goal is to create an automated edge extraction and storage program for large image datasets in MATLAB software, that will potentially prosper in this subject area.

In the second part, the aim is to use this semantic information for the edges of two-dimensional images, in the process of producing three-dimensional unorganized point clouds, in order to isolate the information given by them. In other words, the cloud produced will contain points of interest, thus points that are exclusively edges.

Finally, the possibility of using the information of the generated clouds will be examined, in order to automate the process of vector mapping from different software packages and consequently the production of the outline plan, as it would be reflected in a 2D CAD environment or even in 3D applications such as BIM modeling.

Key-words: Photogrammetry, Cultural Heritage, Canny Algorithm, Edge detection, SFM-MVS, Digital Image processing & pre-processing, 3D Line detection & 3D Line Fitting

Ορφέας Σκέντζος
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΚΜΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ
ΣΗΜΕΙΩΝ

Γλωσσάρι συντομεύσεων

<u>Συντομεύσεις</u>	<u>Απόδοση όρου</u>
SFM	Δομή προερχόμενη από κίνηση (Structure From Motion)
MVS	Multi-View Stereo
Bundle adjustment	Συνόρθωση κατά δέσμες
Feature-based	Τεχνική βασισμένη στα χαρακτηριστικά
Area-based φωτεινότητας	Τεχνική βασισμένη στη διαφορά έντασης
Remote Sensing	Τηλεπισκόπηση (ή και τηλεανίχνευση)
PCL	Point Cloud Library
RANSAC	Random Sample Consensus
HT	Hough Transform
LIDAR	Light Detection and Ranging
BIM	Building Information Modeling

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	10
Εισαγωγή	10
Σύγχρονες προσεγγίσεις.....	11
Τοποθέτηση του προβλήματος	14
Γεωμετρία της ακμής - Η ακμή στην ψηφιακή εικόνα	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	19
Ψηφιακή προ-επεξεργασία εικόνας (Digital Image Preprocessing)	19
Σημειακή επεξεργασία.....	20
Τοπική επεξεργασία.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	30
Διερεύνηση των διαφόρων τεχνικών εντοπισμού ακμών.....	30
Επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου και εφαρμογή στο αντικείμενο μελέτης ..	41
Σύγχρονη τεχνική του αλγόριθμου Canny με τη μεταβολή των προκαθορισμένων παραμέτρων T , σ	47
Αξιολόγηση της μεθόδου και συμπεράσματα	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	66
Δομή προερχόμενη από κίνηση (Structure from Motion)	66
Θεωρητική προσέγγιση.....	66
Εφαρμογή της μεθόδου στο αντικείμενο μελέτης	68
Συμπέρασμα	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	80
Διερεύνηση μεθόδων & λογισμικών διανυσματικής απόδοσης.....	80
Θεωρητική προσέγγιση.....	80
Υπάρχουσες τεχνικές	82
Αξιοποίηση υπαρχόντων λογισμικών.....	87
Περιθώρια βελτίωσης & μελλοντικές εφαρμογές	88
Βιβλιογραφία	92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Η ανίχνευση της πληροφορίας των ακμών που περιέχει μια εικόνα, αποτελεί ένα από τα βασικά και πρωταρχικά στάδια της επεξεργασίας εικόνων, καθώς μέσω αυτού του εντοπισμού, μπορούν να γίνουν διακριτές οι διάφορες οντότητες και, κατ' επέκταση, η ανάγνωση της πληροφορίας που αυτή παρέχει, από το υπολογιστικό σύστημα.

Οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται για την εύρεση των ακμών ποικίλλουν. Ωστόσο, για λόγους που θα αναλυθούν και παρακάτω διεξοδικά, η επικρατέστερη πλέον μέθοδος, είναι η μέθοδος Canny, που αποτελεί από τα πλέον διαδεδομένα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία εικόνας, με τα αποτελέσματά της να είναι, κατά ένα ευρύ φάσμα, ικανοποιητικά. Η συμβολή της πρόσθετης επεξεργασίας των εικόνων, εκ των προτέρων αλλά και εκ των υστέρων, καθίσταται συχνά αναγκαία, για τη βελτίωση του αποτελέσματος.

Η τεχνική της αυτοματοποιημένης σχεδίασης σύνθετων κατασκευών είναι χρήσιμη σε διάφορες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, για τον πολεοδομικό σχεδιασμό, τα μοντέλα πρόσοψης κτιρίων παρέχουν σημαντικές αναφορές για το σχέδιο πόλης σε αρκετά λεπτομερές επίπεδο. Ακόμα, και στην περίπτωση τεκμηρίωσης μνημείων, η πρόσοψη αποτελεί στοιχείο απαραίτητο για την καταγραφή τους και είναι πλούσια σε πληροφορία αξιοσημείωτων μερών προς σχεδίαση, η οποία προς το παρόν γίνεται χειροκίνητα και είναι αρκετά χρονοβόρα. Εξίσου σημαντική είναι και η καταγραφή φυσικά των κατόψεων των κτιρίων μιας πόλης σε μεγάλη κλίμακα, η οποία είναι δυνατόν να αυτοματοποιηθεί με την αντίστοιχη διαδικασία, ακόμα και από δορυφορικές εικόνες.

Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι τεκμηρίωσης, έχουν ως δεδομένα εισόδου, εικόνες κοντινού εύρους ή δεδομένα από επίγεια ή και εναέρια laser scanners. Η πληροφορία που δίνεται από αυτά, ωστόσο είναι, συχνά, ιδιαίτερα ογκώδης με παρουσία έντονου θορύβου και περιττής πληροφορίας. Όσον αφορά στις εικόνες, πρόκειται για μεγάλες συλλογές αυτών, εκ των οποίων, η λήψη κάθε μιας έχει γίνει από διαφορετικές οπτικές γωνίες και θέσεις. Όπως είναι λογικό, η κάθε σκηνή απαιτεί ιδιαίτερη διαχείριση, είτε τοπικά στην εικόνα είτε συνολικά, ώστε να εξαχθεί η επιθυμητή πληροφορία από την κάθε μια. Παρόλα αυτά, επειδή σκοπός είναι να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία, είναι σημαντικό να εντοπιστεί και να αναπτυχθεί η κατάλληλη μεθοδολογία με τη χρήση αλγορίθμων, τέτοιων ώστε το αποτέλεσμα να πλησιάσει το ιδανικό για το σύνολο των εικόνων χωρίς ή έστω με ελάχιστη χειροκίνητη παρέμβαση από το χρήστη.

Το κείμενο ερώτημα είναι κατά πόσο η αξιοποίηση των ακμών που θα εξαχθούν από τις εικόνες εισόδου, μπορεί να μεταφερθεί ως πληροφορία, με τη φωτογραμμετρική διαδικασία της δομής προερχόμενης από κίνηση (SfM), δηλαδή από τη διαδικασία ανακατασκευής του ακανόνιστου νέφους σημείων, απευθείας σε αυτό, αλλά και κατά πόσο η εξαγωγή των ακμών στο τρισδιάστατο νέφος, είναι ικανή ώστε να αυτοματοποιηθεί, αν όχι πλήρως, τότε ως έναν ικανοποιητικό βαθμό, η διαδικασία διανυσματικής απόδοσης από άλλα προγράμματα που εκτελούν το βήμα αυτό. Με άλλα λόγια, κατά πόσο από ένα νέφος διακριτών σημείων στο χώρο, υπάρχει τρόπος να αποδοθούν, με αυτόματο ή αυτοματοποιημένο τρόπο, συνεχείς γραμμές σε αυτό.

Σύγχρονες προσεγγίσεις

Η ανάγκη για την τη συλλογή, τη διαχείριση και την επεξεργασία μεγάλου όγκου τρισδιάστατων δεδομένων στον τομέα της αρχαίας, αλλά και της σύγχρονης αρχιτεκτονικής και πολιτιστικής κληρονομιάς, έχει επιφέρει μεγάλη εξέλιξη στις μεθόδους καταγραφής αυτών των στοιχείων τα τελευταία χρόνια (Grilli Eleonora, 2018). Τόσο η ακρίβεια, όσο και η ταχύτητα αλλά και ευελιξία που προσφέρουν τα μέσα αυτά, καθιστούν μεγάλα έργα και μελέτες πολύ πιο άμεσα εκτελέσιμα, ακόμα και με τη χρήση μικρών ισχυρών φορητών συσκευών. Φυσικά, επίκεντρο όλων αυτών είναι η τρισδιάστατη πληροφορία που παρέχουν, δηλαδή τα νέφη σημείων, που αποτελούν και την κοινή βάση, η οποία διαμοιράζεται από χρήστη σε χρήστη και αξιοποιείται διαφορετικά ανάλογα με το σκοπό και το στάδιο της εκάστοτε μελέτης. Ωστόσο, για την εκτενέστερη αντίληψη του δυναμικού που η τελευταία προσφέρει, αλλά και για την πλήρη αξιοποίησή της, καθίσταται πολλές φορές αναγκαίο, να αποδοθούν και σημασιολογικά, πέραν από αμιγώς χωρικά, χαρακτηριστικά στα μοντέλα.

Ακριβώς επειδή τα νέφη σημείων περιέχουν πολύ μεγάλη και ακανόνιστη χωρική πληροφορία, η προσπάθεια, αυτά, να υποστούν μια κατάτμηση σε υποομάδες σημείων αλλά και να αποδοθούν σημασιολογικά χαρακτηριστικά σε αυτές, χειροκίνητα ή και αυτόματα, είναι εξαιρετικά απαιτητική σε πόρους και χρονοβόρα. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη για μια πιο αυτοματοποιημένη διαδικασία, η οποία πλέον είναι και πιο επιτυχής, λόγω της εξέλιξης των σύγχρονων συστημάτων, τόσο σε υλικό αλλά και σε λογισμικό επίπεδο. Παράλληλα, η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης και μάθησης, έχει επιφέρει πολλά πλεονεκτήματα στον τομέα αυτό και έχει βρει εφαρμογή σε πολλά ζητήματα που αφορούν τόσο το πεδίο των γεωχωρικών

επιστημών, αλλά, και σε εξίσου αξιοσημείωτο βαθμό σε ζητήματα παλαιάς και σύγχρονης αρχιτεκτονικής.

Η χρήση των νεφών σημείων, για την τεκμηρίωση αλλά και τη διάδοση της πολιτιστικής κληρονομιάς, είτε αυτά έχουν συλλεχθεί από συσκευές laser scanning, είτε από φωτογραμμετρικές μεθόδους, είναι ολοένα και αυξανόμενη. Όπως είναι γνωστό τα νέφη σημείων, είναι μια συλλογή γεωμετρικής πληροφορίας, ικανή να χαρακτηρίσει το σχήμα, το μέγεθος, τη θέση και τον προσανατολισμό των αντικειμένων στο χώρο, παρέχοντας μετρική πληροφορία σε ένα εικονικό περιβάλλον. Για να εμπλουτισθεί η πληροφορία που παρέχουν, έχουν ήδη δημιουργηθεί ποικίλες μέθοδοι οι οποίες αποδίδουν πρόσθετη πληροφορία για:

- Τη διαφοροποίηση των κατασκευαστικών τεχνικών
- Την αναγνώριση των αποκατεστημένων ή και ανακαινισμένων μερών της κατασκευής
- Την αναγνώριση και ποσοτικοποίηση των διαφόρων σταδίων συντήρησης
- Την αναγνώριση και διαφοροποίηση των δομικών αλλά και διακοσμητικών μερών μιας κατασκευής

Οι περισσότερες απόπειρες για την τρισδιάστατη σημασιολογική απόδοση και κατ' επέκταση την κατάτμηση και ταξινόμηση σε κλάσεις των νεφών σημείων, βρίσκουν ρίζες στη δισδιάστατη κατάτμηση, δηλαδή αυτή των εικόνων. Τυπικά αυτές οι περιοχές απεικονίζουν συγκεκριμένα και ξεχωριστά χαρακτηριστικά για κάθε ομάδα, τα οποία διαφέρουν από την εικόνα και το χώρο. Για τις εικόνες, αναφέρονται σε ιδιότητες όπως το μέγεθος, το σχήμα, το χρώμα, την υφή, ενώ στα δεδομένα των νεφών, αναφέρονται συνήθως σε πιο γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως κλίσεις, επιφάνειες και καμπυλότητες.

Η κατάτμηση των εικόνων, με τη σειρά της, βρίσκει τις ρίζες της σε μια από τις πιο διαδεδομένες και κλασσικές μεθόδους, αυτή που βασίζεται στις ακμές (edge-based segmentation). Είναι προφανές, ότι η ακμή, αποτελεί και το μοναδιαίο διάνυσμα της όλης διαδικασίας και επομένως είναι πολύ βασικό, ως πρώτο στάδιο, να γίνει ο εντοπισμός τους, τόσο στην εικόνα αλλά και κατ' επέκταση στο νέφος σημείων. Συγκεκριμένα οι αλγόριθμοι που εντοπίζουν τις ακμές στα νέφη και στη συνέχεια διαχωρίζουν τις κλάσεις επιτυγχάνονται μέσα από δύο βήματα:

- Τα όρια των διαφόρων κλάσεων, περιγράφονται μέσα από ασυνέχειες και έντονες αλλαγές στις χωρικές ιδιότητες της επιφάνειας των νεφών, όταν δηλαδή αυτές υπερβαίνουν ένα συγκεκριμένο όριο. Οι ιδιότητες αυτές αναφέρονται συνήθως σε επιφάνειες, κλίσεις, βασικές καμπυλότητες, αλλά και σε μεγάλου βαθμού παραγώγους, όπως για παράδειγμα την τομή δύο επιπέδων ή επιφανειών.

- Αφού έχουν εντοπιστεί τα όρια των διαφόρων περιοχών, τα σημεία μέσα σε αυτά χωρίζονται σε κλάσεις.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές προσεγγίσεις για τον εντοπισμό των ακμών, τόσο απευθείας στα νέφη σημείων, όσο και στις εικόνες. Όσον αφορά σε αντικείμενα μελέτης, όπως είναι οι ανθρώπινες κατασκευές, γίνεται αντιληπτό, ότι οι ακμές ενδιαφέροντος, αφορούν κυρίως βασικά χαρακτηριστικά για τη γεωμετρία και την αρχιτεκτονική τους δομή και, στην πλειονότητά τους, είναι ευθείες γραμμές.

Όσον αφορά στον δισδιάστατο εντοπισμό σε αντικείμενα μελέτης που σχετίζονται με τις ανθρώπινες κατασκευές, σύγχρονες και μη, έχουν γίνει ποικίλες απόπειρες, τόσο νέες, όσο και βελτίωσης των υπαρχουσών. Συγκεκριμένα, στο έργο των *Nevatia-Babu* (1984), για την εξαγωγή κυρίως ακμών και γραμμών, που είναι ευθείες, το αποτέλεσμα δεν ήταν το ιδανικό, καθώς, οι εντοπισμένες γραμμές, ήταν ασυνεχείς και χωρίς σύνδεση μεταξύ τους, αλλά προέκυψαν και ακμές που δεν αντιπροσώπευαν την πραγματική σκηνή, κυρίως λόγω πολύπλοκης υφής και έντονων σημείων στην επιφάνεια των αντικειμένων.

Ακόμα, το έργο των *Sarra & Devy* (2001), μέσω του οποίου η καταγραφή και εξαγωγή των ακμών, βασίστηκε στην τεχνική των κλεισμένων ισοϋψών καμπύλων από έναν δυαδικό χάρτη ακμών. Το 2009 οι *Wang & Shan*, εντόπισαν τα όρια κτιρίων χρησιμοποιώντας, ένα εργαλείο τοπικής κυρτότητας, το οποίο διαπερνούσε όλο το νέφος και εντόπιζε ασυνέχειες. Ωστόσο, αν και όλες οι μέθοδοι παρήγαγαν σχετικά γρήγορα αποτελέσματα, αυτά παρέμεναν ανακριβή και επισφαλή, καθώς ήταν εξαρτημένα από τον έντονο θόρυβο και την υπερβολικά μεγάλη πληροφορία, αλλά και την ενδεχόμενη αραιή διανομή σε ορισμένα σημεία κακής ορατότητας, που παρέχουν τα νέφη σημείων. Ακόμα, ο εντοπισμός ακμών που δεν συνδέονταν μεταξύ τους, δεν έκανε ευδιάκριτα τα όρια μεταξύ των διαφορετικών οντοτήτων, γεγονός που άφηνε μερικές περιοχές, ανοιχτές και χωρίς συμπλήρωση.

Πολλές άλλες απόπειρες έγιναν έκτοτε, ώστε να εμπλουτισθούν τα νέφη σημείων με σημασιολογική πληροφορία, ωστόσο η επεξεργασία και ο εντοπισμός τους, βασιζόνταν απευθείας στα νέφη σημείων. Η παράλληλη εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων αλλά και η αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης και όρασης υπολογιστών, μείωσε σε μεγάλο βαθμό τα παραπάνω προβλήματα. Ποικίλα συστήματα εκμάθησης, με τη χρήση ισχυρών βιβλιοθηκών και αλγορίθμων, έχουν δημιουργηθεί έκτοτε, όπως είναι η *OpenCV* και η *PCL* (*Point Cloud Library*), γεγονός που καθιστά τη σημασιολογική απόδοση στα τρισδιάστατα νέφη, ολοένα και πιο επιτυχή και αξιόπιστη.

Οι πιο πρόσφατες μέθοδοι, οι οποίες θα φανούν και χρήσιμες στο τελικό στάδιο της παρούσας εργασίας είναι αυτές των *Huan Ni et al.*, 2016, στο πλαίσιο της τρισδιάστατης ανίχνευσης ακμών σε νέφη, καθώς και της *K. Μητροπούλου* (2017), με

την ανάπτυξη προγράμματος εντοπισμού ακμών, ως τομές επιπέδων. Στην πλειονότητα αυτών γίνεται χρήση αλγορίθμων τύπου RANSAC (Random Sample Consensus) και Hough Transform. Η παρούσα διπλωματική, δίνει ένα πολύ σημαντικό προβάδισμα, καθώς το αρχικό νέφος σημείων που αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν, περιέχει πλέον μόνο τα σημεία ενδιαφέροντος, μειώνοντας κατά πολύ μεγάλο ποσοστό (70-90%), τον όγκο των δεδομένων προς επεξεργασία

Τοποθέτηση του προβλήματος

Όπως φάνηκε από το προηγούμενο κεφάλαιο, η πληροφορία που δίνεται από τα εικόνες με σημασιολογικά χαρακτηριστικά όπως οι ακμές, δεν έχει χρησιμοποιηθεί, ώστε να εντοπιστούν οι ακμές και στα ακανόνιστα νέφη σημείων. Μία εικόνα είναι ένας πίνακας δύο διαστάσεων, ενώ ένα νέφος σημείων είναι ένα μη οργανωμένο σύνολο δεδομένων στον χώρο. Για το λόγο αυτό, έως τώρα, οι περισσότερες προσεγγίσεις, αφορούσαν στον εντοπισμό των ακμών, απευθείας στο νέφος σημείων. Ωστόσο, αυτό απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ και πολύπλοκους αλγορίθμους, αλλά και μεγάλο κόστος και χρόνο περάτωσης, καθώς το εξεταζόμενο αντικείμενο είναι σύνθετο και με εκατομμύρια, ενδεχομένως, σημεία.

Στην παρούσα εργασία, θα γίνει μια εναλλακτική προσέγγιση στο πρόβλημα, αξιοποιώντας τη δυνατότητα που δίνεται από λογισμικά που επιτελούν τρισδιάστατη ανακατασκευή από εικόνες, οι οποίες θα έχουν ήδη την πληροφορία για τις ακμές και η συμβολή τους είναι κομβική. Πιο συγκεκριμένα, θα δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα, το οποίο αρχικά θα εξάγει τις απολύτως απαραίτητες ακμές για το σκοπό της μελέτης με ακρίβεια σε επίπεδο εικόνων και, στη συνέχεια, θα εκμεταλλεύεται την τεχνική της δημιουργίας δομής προερχόμενης από κίνηση (SfM & MVS). Με αυτόν τον τρόπο, θα γίνει απόπειρα στο στάδιο αυτό, να εμπλουτιστεί με την πληροφορία της ακμής, απευθείας, το παραγόμενο νέφος σημείων, κατά τη διαδικασία της τρισδιάστατης ανακατασκευής. Σημειώνεται ότι, το αντικείμενο μελέτης, παρά την πολυπλοκότητά του, είναι οι προσόψεις κατασκευών, οι οποίες είναι αρκετά επίπεδες όσον αφορά στην γεωμετρία τους, γεγονός που, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, θα διευκολύνει στην απευθείας μετάβαση των εντοπισμένων ακμών στο νέφος. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για διαφορετικά αντικείμενα μελέτης, όπως τη διανυσματική απόδοση κατόψεων μικρής και μεγάλης κλίμακας.

Εφόσον αυτό πραγματοποιηθεί με επιτυχία, θα εξετασθεί η πιθανότητα αξιοποίησης αυτής της πληροφορίας, με την εξαγωγή μόνο των σημείων-ακμών, ώστε στη

συνέχεια αυτά να απομονωθούν από το υπόλοιπο νέφος. Έχοντας κατ' αυτό τον τρόπο μειώσει κατά πολύ τον όγκο των δεδομένων προς επεξεργασία, με την απλούστευση το νέφους με τα σημεία ενδιαφέροντος και μόνον, θα γίνει χρήση υπαρχουσών μεθόδων και τεχνολογιών, για τον εντοπισμό και τη σχεδίαση των ακμών σε νέφη. Στόχος, δηλαδή, σε αυτό το στάδιο, είναι η διανυσματική απόδοση των ακμών, δηλαδή η μετάβαση από μεμονωμένα σημεία σε συνεχείς γραμμές. Τέλος, οι εξαγόμενες αυτές ακμές, με τις κατάλληλες μετατροπές θα μπορούν να εισαχθούν σε προγράμματα σχεδίασης, όπως είναι το AutoCAD, με την γεωχωρική πληροφορία που διαθέτουν από το νέφος. Τονίζεται ότι σε όλα τα ενδιάμεσα στάδια θα εξετασθεί, κατά πόσο η όλη διαδικασία είναι ακριβής και αξιόπιστη ως προς το παραγόμενο αποτέλεσμα.

Ειδικότερα, αντικείμενο μελέτης αποτελεί η πρόσοψη ενός μνημείου σύγχρονης πολιτιστικής κληρονομιάς και, συγκεκριμένα, το δημαρχείο της πόλης Leiden, στην Ολλανδία. Η πρόσοψη του μνημείου είναι αρκετά σύνθετη με πολλές αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες. Η συλλογή όλων των απαραίτητων πληροφοριών και εικόνων έγινε στα πλαίσια πρακτικής άσκησης.

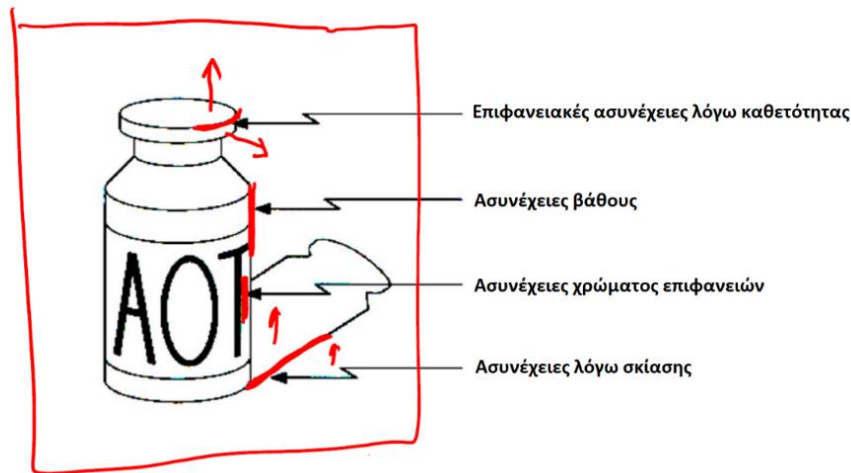
Γεωμετρία της ακμής - Η ακμή στην ψηφιακή εικόνα

Οι ακμές αποτελούν ένα βασικό στοιχείο σε μία εικόνα. Ουσιαστικά, είναι τα όρια μεταξύ δύο διαφορετικών περιοχών, που αντανακλώνται μέσω έντονων ασυνεχειών φωτεινότητας (Mehta et al., 2014). Ο εντοπισμός τους, μειώνει το πλήθος των δεδομένων προς ανάλυση, οριοθετεί τυχόν ασήμαντες πληροφορίες, διατηρώντας ωστόσο παράλληλα τις βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία της σκηνής. Μέσω αυτού του εντοπισμού επιτυγχάνεται και η κατάτμηση των εικόνων.

Η κατάτμηση είναι μια διαδικασία διαχωρισμού των αντικειμένων που εμπεριέχονται σε μια εικόνα από το υπόβαθρο-φόντο (Poonam Dhankhar et al., 2013). Οι 4 κυριότερες προσεγγίσεις για την επίτευξη αυτού του διαχωρισμού, είναι οι τεχνικές κατωφλίωσης, οι τεχνικές εντοπισμού ακμών, οι τεχνικές με κριτήριο τις περιοχές (Region-based) και οι τεχνικές συνδεσιμότητας και ασυνεχειών των αντικειμένων (connectivity-preserving relaxation methods). Η πιο διαδεδομένη και αποτελεσματική μέθοδος κατάτμησης της εικόνας είναι η μέθοδος της εύρεσης ακμών, η οποία με τη σειρά της επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους, που θα αναπτυχθούν σε αυτό το κεφάλαιο.

Η εύρεση ακμών, όπως αναφέρθηκε, είναι μια τεχνική κατά την οποία εντοπίζονται οι έντονες μεταβολές της φωτεινότητας μιας εικόνας. Οι τελευταίες, ουσιαστικά, αποτυπώνονται στη μορφή καμπύλων γραμμών, τις λεγόμενες ακμές.

Όπως αναφέρθηκε, οι ακμές περιγράφονται από τις απότομες αλλαγές της φωτεινότητας – δηλαδή του χρώματος – σε μια εικόνα (Li et al., 2011). Για αρχή, είναι σημαντικό να αναφερθούν οι 4 κύριοι παράγοντες εμφάνισής τους και αυτοί είναι οι εξής:



Εικόνα 1.1

Πηγή: "Finding lines: From detection to model fitting" -Fei-Fei Li (2011)

Στο σημείο αυτό, ακόμα είναι σημαντικό να αναλυθούν γεωμετρικά όλα τα είδη γραμμών που ενδέχεται να εντοπιστούν στις εικόνες. Φυσικά αυτές οι ακμές-γραμμές αντανακλούν τα εγγενή χαρακτηριστικά των ανθρώπινων κατασκευών που αφορούν τις προσόψεις και, επομένως, οι πιο συνηθισμένες γραμμές θα είναι ευθείες. Ωστόσο ενδέχεται να εμφανιστούν και άλλα είδη όπως:

- Τεθλασμένες, που περιέχουν μικρότερα ευθύγραμμα τμήματα σχηματίζοντας γωνίες:



- Καμπύλες, των οποίων κανένα τμήμα τους, δεν είναι ευθεία γραμμή:



- Μεικτές, που περιέχουν και ευθύγραμμα και καμπύλα τμήματα

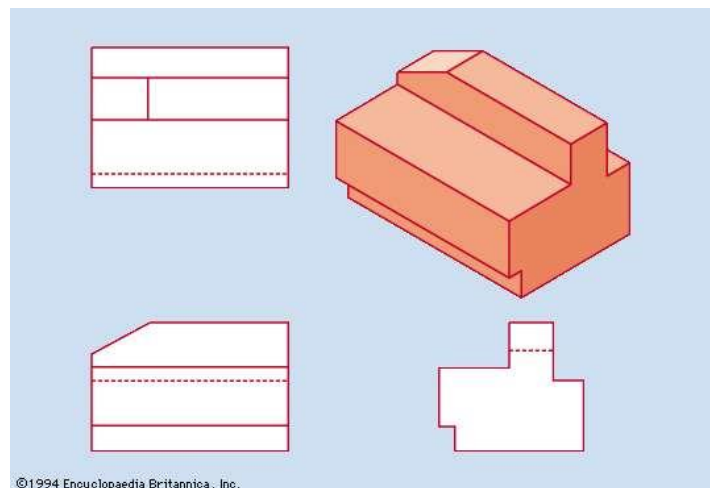
Συγκεκριμένα τώρα όσον αφορά στην προοπτική, οι ακμές που εξάγονται από μια δισδιάστατη εικόνα, η οποία προφανώς περιγράφει ένα αντικείμενο του χώρου στις τρεις διαστάσεις, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

A) τις εξαρτώμενες και

B) τις ανεξάρτητες

από την οπτική γωνία ή, αλλιώς, τη θέση λήψης της εικόνας.

Μια ακμή ανεξάρτητη της γωνίας θέασης, τυπικά αντανακλά τις εγγενείς ιδιότητες των τρισδιάστατων αντικειμένων, δηλαδή χαρακτηριστικά σημεία επιφανειών ή υφές αυτών. Οι εξαρτώμενες ακμές, αποτελούν ασυνέχειες που περιγράφουν τη γεωμετρία της σκηνής, δηλαδή των αντικειμένων που απεικονίζονται, και ενδέχεται, από λήψη σε λήψη να μεταβάλλονται δραστικά ή ακόμα και να αποκρύπτονται ή και να εμπλέκονται με άλλες. Για να γίνει η παραπάνω διαφοροποίηση αντιληπτή, η εικόνα που ακολουθεί επισημαίνει ακμές που ανήκουν και στις δύο κατηγορίες:



Εικόνα 1.2

Πηγή: "Hidden Lines" – Encyclopedia Britannica Inc. 1994

(<https://www.britannica.com/topic/drafting/Hidden-lines>)

Προτού συγκριθούν οι διάφορες μέθοδοι εύρεσης ακμών, είναι σημαντικό να εξετασθεί η έννοια της ακμής και πώς αυτή καταγράφεται στην ψηφιακή εικόνα, καθώς και από τις κρίσιμες παραμέτρους από τις οποίες μπορεί να γίνει διακριτή:

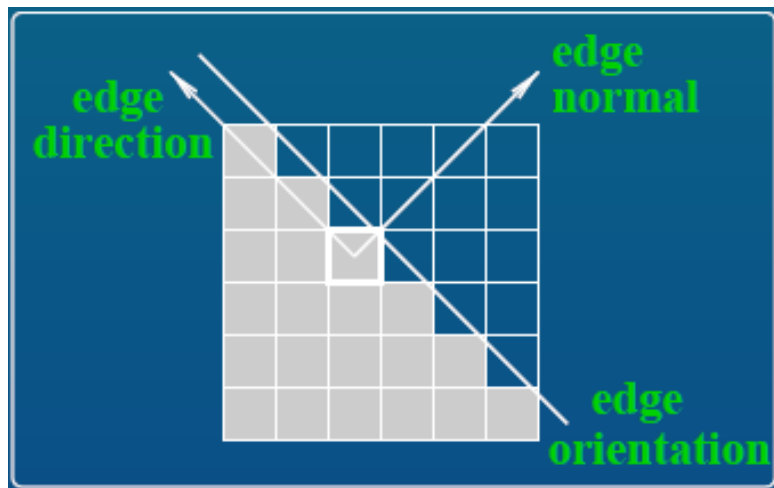
- I. Πορεία της ακμής: αποτελεί το μοναδιαίο διάνυσμα κατά τη διεύθυνση της μέγιστης αλλαγής έντασης της φωτεινότητας.

$$e_o(i,j) = \text{atan} \frac{J_x}{J_y}$$

Όπου i, j είναι οι συντεταγμένες στην εικόνα.

- II. Διεύθυνση ακμής: μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην πορεία της ακμής.
- III. Θέση ή αλλιώς κέντρο της ακμής: η θέση στην εικόνα στην οποία βρίσκεται η ακμή.
- IV. Ένταση της ακμής: τοπική αντίθεση στην εικόνα σύμφωνα με την πορεία της ακμής.

$$e_s(i,j) = \sqrt{J_x^2(i,j) + J_y^2(i,j)}$$



Εικόνα 1.3

Πηγή: "A Review and Research of Edge Detection Techniques for Image Segmentation" - Poonam Dhankhar , Neha Sahu (2013)

Όπως είναι λογικό, προκειμένου να εξαχθούν, όσο το δυνατόν πιο ευθείες γραμμές, τα αντικείμενα της εικόνας πρέπει να βρίσκονται κατά βάση στο κέντρο αυτής. Παράλληλα, για την αποφυγή σφαλμάτων, που προκύπτουν από την κεντρική προβολή, όπως είναι η ακτινική διαστρόφη, όλες οι εικόνες υπόκεινται σε μια προεπεξεργασία στο λογισμικό Photoshop, το οποίο δίνει αυτή τη δυνατότητα.

Συγχρόνως, μια άλλη δυσκολία που εντοπίζεται στις ψηφιακές εικόνες, όπως φαίνεται και στο σχήμα παραπάνω, είναι ότι το αποτέλεσμα των ακμών που θα αποδοθεί ως έξοδος, έχοντας ως μονάδα την ψηφίδα, αναγκαστικά δε θα είναι συνεχές, όπως μια ευθεία, αλλά θα περιγράφεται μέσα από μεγάλο αριθμό διακριτών

σημείων. Το γεγονός αυτό, καθιστά το έργο ακόμα πιο δύσκολο, αφού δεν επιτρέπει την απόλυτη συνέχεια των γραμμών, αλλά και την απόλυτη ευθεία αυτών που ενδεχομένως είναι. Όλα αυτά τα προβλήματα ενδέχεται να επιφέρουν σφάλματα, ωστόσο θα αναλυθούν στη συνέχεια όπως και οι τρόποι αντιμετώπισης που θα αναπτυχθούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ψηφιακή προ-επεξεργασία εικόνας (Digital Image Preprocessing)

Η ανάλυση και η ερμηνεία μιας εικόνας, αποτελεί βασικό στάδιο για την περαιτέρω εξαγωγή διαφόρων πληροφοριών, ανάλογα με το σκοπό της μελέτης. Στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας εργασίας, αντικείμενο μελέτης, φυσικά, είναι οι ψηφιακές εικόνες, καθώς και η ψηφιακή επεξεργασία που μπορούν να υποστούν. Η τελευταία, δύναται να γίνει σε ποικίλα χαρακτηριστικά στοιχεία που απαρτίζουν την εικόνα, όπως ο τόνος, η γεωμετρία και η μορφή, το μέγεθος των αντικειμένων, η δομή, η υφή και η σκίαση. Ακόμα, περιλαμβάνει ραδιομετρικές διορθώσεις, καθώς και βελτιώσεις και μετασχηματισμούς της εικόνας, αυτής καθαυτής, αλλά και των μετα-δεδομένων που αυτή περιέχει – για παράδειγμα το ιστόγραμμα -, ώστε να προκύψουν χρήσιμες πληροφορίες, ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται.

Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο αυτό θα εντοπιστούν και θα εφαρμοστούν όλα τα χρήσιμα εργαλεία, που διατίθενται από το λογισμικό Matlab, ώστε να είναι πιο εύκολες και διακριτές οι ακμές, με την παράλληλη μείωση τυχόν θορύβου, λεπτομερειών αλλά και άλλων στοιχείων, που πιθανώς, να μην είναι χρήσιμα για το σκοπό της μελέτης. Στην προσπάθεια, βελτίωσης της εικόνας, θα υποστούν επεξεργασία οι διάφορες ιδιότητές της, όπως η φωτεινότητα, η αντίθεση, η μείωση του θορύβου, η ευκρίνεια των ακμών και η τροποποίηση του ιστογράμματος της εικόνας. Για το λόγο αυτό, αρχικά, γίνεται μια μελέτη μερικών πιθανών αλλά και πιο βασικών τεχνικών βελτίωσης της εικόνας, σε στάδιο προ-επεξεργασίας, ώστε αυτή να αποδώσει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

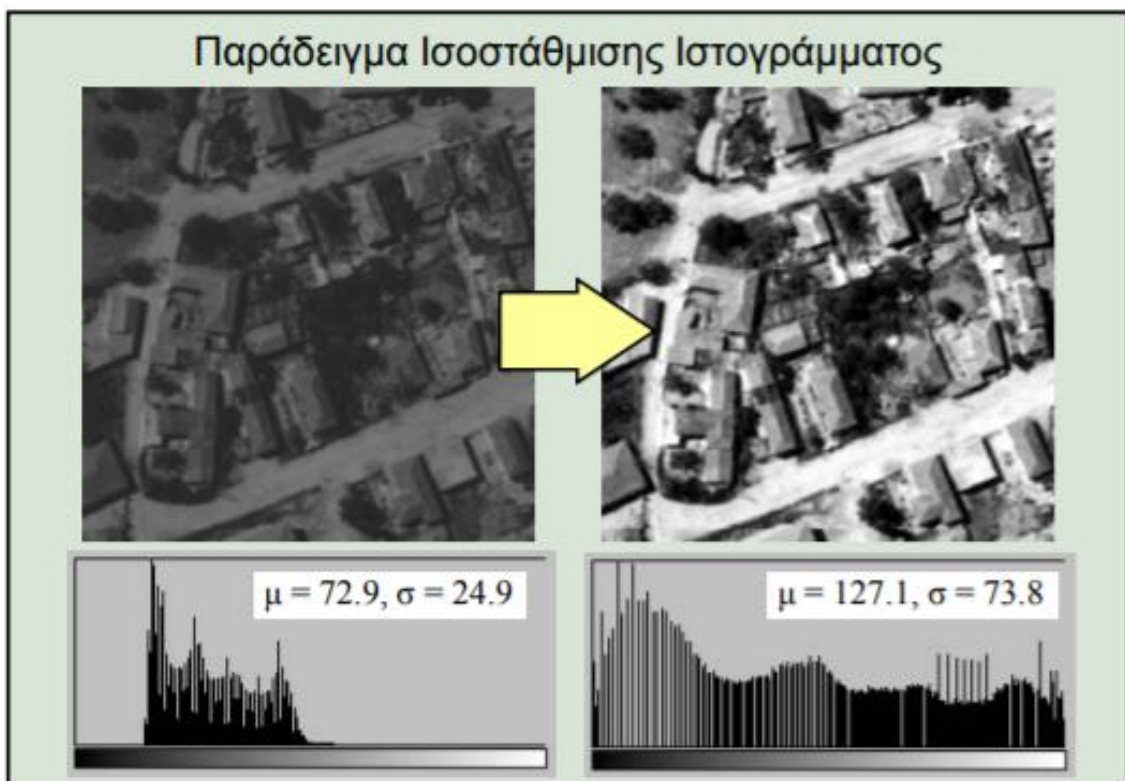
Η επεξεργασία αυτή μπορεί να γίνει είτε,

-σημειακά: μεταβολή του τόνου του γκριζου σε κάθε ψηφίδα της εικόνας, ανεξαρτήτως των τιμών των γειτονικών ψηφίδων είτε,

-τοπικά: όπου εδώ λαμβάνονται υπόψη οι τιμές των γειτονικών εικονοστοιχείων, με την εφαρμογή γραμμικών αλλά και μη γραμμικών φίλτρων.

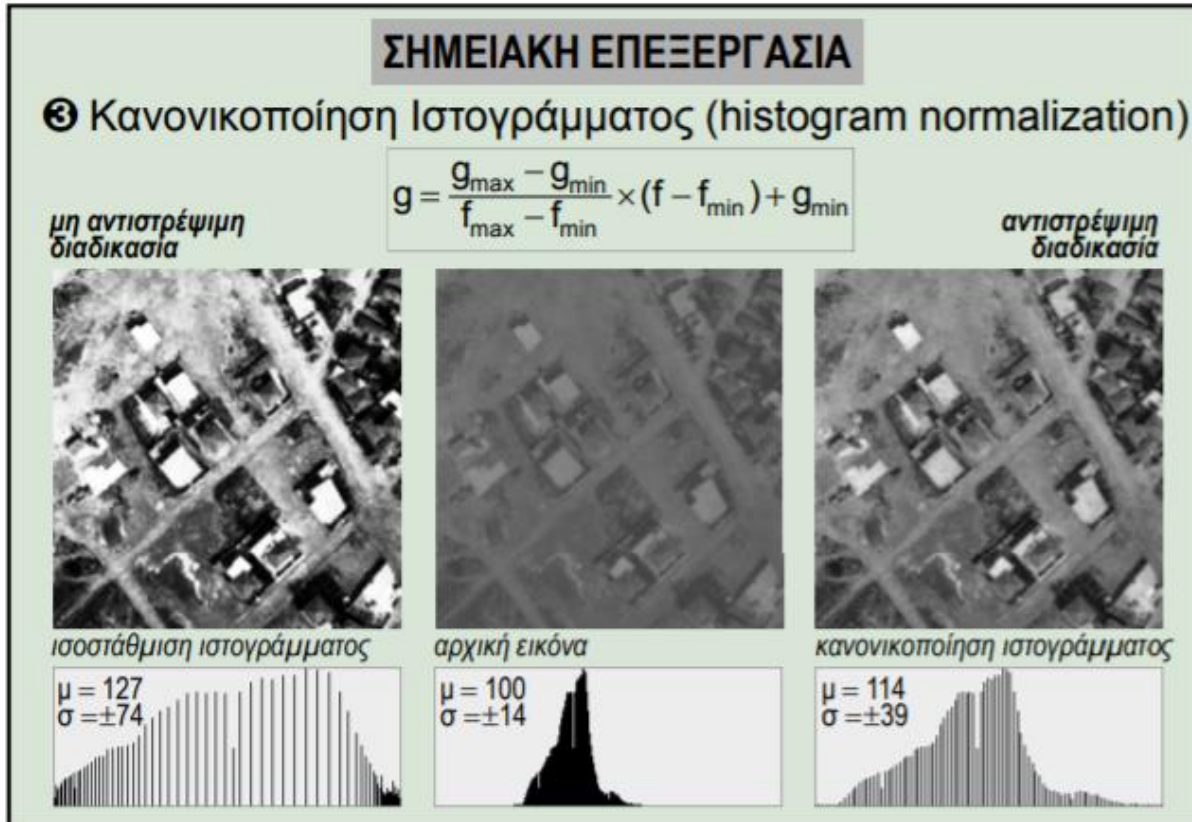
Σημειακή επεξεργασία

Μια από τις σημειακές επεξεργασίες, μέσω της οποίας τα αποτελέσματα είναι ομοιογενή και εφαρμόζονται σε όλη την εικόνα, ανεξαιρέτως, είναι η παρέμβαση απευθείας στο ιστόγραμμα. Με άλλα λόγια, με την αλλαγή στη φωτεινότητα και στην αντίθεση της εικόνας ή και σε συνδυασμό αυτών, δηλαδή με την ταυτόχρονη μεταβολή φωτεινότητας και αντίθεσης. Ουσιαστικά, η μεταβολή της φωτεινότητας, μεταφράζεται ως μια απλή μετάθεση του ιστογράμματος, ενώ η μεταβολή της αντίθεσης εκφράζεται με την «αραίωσή» του, δηλαδή μια ενίσχυση των ακραίων του τιμών. Η πιο συχνή σημειακή προ-επεξεργασία που, συνήθως, διευκολύνει την μετέπειτα ερμηνεία και ανάλυση, όχι μόνο των ακμών, αλλά και άλλων στοιχείων, είναι η ισοστάθμιση ή, ακόμα καλύτερα, η κανονικοποίηση του ιστογράμματος της εικόνας, οι οποίες, με άλλα λόγια, έχουν στόχο την εμφάνιση κάθε τόνου του γκριζου στην ίδια συχνότητα και, ως αποτέλεσμα, την ενίσχυση της αντίθεσης.



Εικόνα 2.1 : Ισοστάθμιση Ιστογράμματος

Πηγή: Εργαστήριο Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας – Γ. Καρράς



Εικόνα 2.2 : Κανονικοποίηση Ιστογραμματος

Πηγή: Εργαστήριο Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας – Γ. Καρράς

Άλλες τεχνικές σημειακής επεξεργασίας που, σε επόμενα στάδια, θα φανούν χρήσιμες είναι η αφαίρεση εικόνων, κατά την οποία τα στοιχεία ενδιαφέροντος της εικόνας, διαχωρίζονται από το υπόβαθρο (βλ. εικόνα 2.3.1), αλλά και η τεχνική της εύρεσης κοινών περιοχών, κατά την οποία ουσιαστικά συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή ενδιάμεσα στοιχεία διαχωρίζονται και αποβάλλονται από το υπόβαθρο προς απεικόνιση (βλ. εικόνα 2.3.2), γεγονός που συμβάλλει στην εξάλειψη εμποδίων από προσόψεις κτιρίων και, γενικότερα, σε περιπτώσεις εμφάνισης θορύβου.



Εικόνα 2.3.1 & 2.3.2 : Απαλοιφή θορύβου

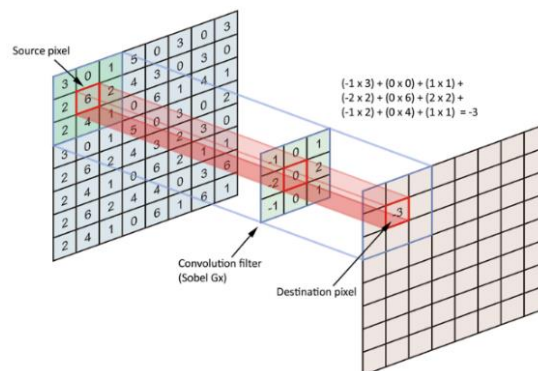
Πηγή: Εργαστήριο Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας – Γ. Καρράς

Τοπική επεξεργασία

Σε αντίθεση με τις παραπάνω βελτιώσεις της εικόνας, υπάρχουν και τεχνικές που τροποποιούν τις τιμές των τόνων για μια εικονοψηφίδα, λαμβάνοντας υπόψιν τον συνδυασμό των τιμών των γειτονικών ψηφίδων. Οι τεχνικές αυτές υλοποιούνται με τον καθορισμό ενός παραθύρου-τελεστή, με συντελεστές βάρους και διαστάσεων $n \times n$ (όπου n περιττός αριθμός), το οποίο μετακινείται σε όλη την εικόνα για κάθε γραμμή και στήλη της, με στόχο να αποδώσει μια διαφορετική τιμή για το κεντρικό εικονοστοιχείο του παραθύρου. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και ως συνέλιξη. Έστω για παράδειγμα, μια ασπρόμαυρη εικόνα $F(i,j)$ και ένα παράθυρο (ή αλλιώς μάσκα) $W(k,l)$, διαστάσεων (3×3) :

$$W_{kl} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} \end{bmatrix}$$

το οποίο εφαρμόζεται στην εικόνα όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 2.4

Πηγή: “Understanding Deep Self-attention Mechanism in Convolution Neural Networks” - Shuchen Du (2019)

Η νέα τιμή της εικόνας εξόδου $G(i,j)$, για το κεντρικό εικονοστοιχείο προκύπτει ουσιαστικά, από τα αθροίσματα των γινομένων των τιμών του γκρι του εκάστοτε τμήματος της εικόνας, όπως αυτό ορίζεται από τη μάσκα που εφαρμόζεται. Συγκεκριμένα, η τιμή του εκάστοτε κεντρικού εικονοστοιχείου στη νέα εικόνα θα δίνεται από την εξίσωση:

$$G_{ij} = W_{kl} * F_{ij} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & \dots & f_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_{11} \\ W_{21} \\ W_{23} \\ \dots \\ W_{33} \end{bmatrix} = f_{11}W_{11} + f_{12}W_{12} + f_{13}W_{13} + \dots + f_{33}W_{33}$$

Αν το κέντρο της μάσκας βρίσκεται στη θέση (x,y) , στο σύστημα της εικόνας, η τιμή του τόνου του γκρι στη θέση αυτή αντικαθίσταται από τη νέα τιμή G , της εξίσωσης. Η μάσκα μετακινείται στην επόμενη ψηφίδα, όπου επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία, έως ότου η μάσκα να έχει διαπεράσει όλα τα στοιχεία της εικόνας.

Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται η εικόνα, έχουν αναπτυχθεί ποικίλα φίλτρα (ή μάσκες), τα οποία, εξομαλύνουν ή απαλείφουν τυχαίο θόρυβο, ενισχύουν τις ακμές ή τις γραμμώσεις τους και άλλα. Όπως είναι προφανές, η εκ των προτέρων εφαρμογή αυτών των φίλτρων στην εικόνα, θα χρησιμεύσει στην καλύτερη αναγνώριση των ακμών.

Φίλτρα εξομάλυνσης

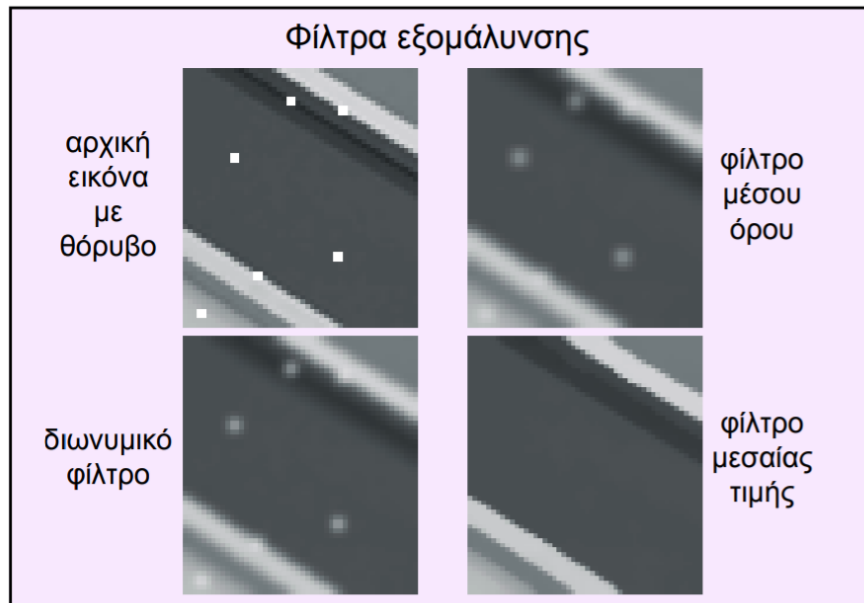
Τα συγκεκριμένα φίλτρα, αλλιώς και φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων, χρησιμοποιούνται, σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται να τονιστούν οι μεγαλύτεροι, ομοιογενείς τομείς με παρόμοιο τόνο στην εικόνα και, συγχρόνως, να απαλειφθούν μικρές λεπτομέρειες (Φαφούτης Ι., 2003). Τα κυριότερα φίλτρα, που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι, το φίλτρο μέσου όρου, το φίλτρο ενδιάμεσης τιμής, το φίλτρο Gauss και το διωνυμικό φίλτρο.

-Φίλτρο μέσου όρου: πετυχαίνει τη σημαντική μείωση ενδεχόμενου θορύβου, αλλά παράλληλα αμβλύνει και θολώνει σημαντικά τις ακμές, εάν χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα, με αποτέλεσμα να καθιστά την εξομαλυμένη εικόνα, δυσανάγνωστη για το σκοπό της μελέτης.

-Φίλτρο μεσαίας/ενδιάμεσης τιμής: Στην περίπτωση αυτή το επίπεδο του γκρι αντικαθίσταται από τη διάμεσο, των τιμών που ορίζονται από την περιοχή της μάσκας. Η τιμή δηλαδή του κεντρικού εικονοστοιχείου, αποτελεί τιμή, η οποία εντοπίζεται στο δείγμα του παραθύρου διερεύνησης. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα, μια εξομάλυνση στο σύνολο της εικόνας, με ταυτόχρονη, ωστόσο διατήρηση των ακμών της σκηνής, σε αντίθεση με το φίλτρο μέσου όρου. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου φίλτρου, ενδείκνυται κυρίως σε περιπτώσεις όπου ο θόρυβος είναι διάχυτος και μη κανονικός (salt and pepper noise).

-Φίλτρο Gauss: Το εξομαλυντικό αυτό φίλτρο, αποτελεί μια μάσκα με κατά προσέγγιση διακριτές τιμές της καμπύλης Gauss. Έχει ως αποτέλεσμα την έντονη εξομάλυνση της εικόνας, με άμβλυνση των ακμών αλλά και του διάχυτου θορύβου.

Παρακάτω ακολουθεί η σύγκριση των 3 αυτών φίλτρων, όπως αυτά εφαρμόστηκαν σε μια πρότυπη εικόνα η οποία παρουσιάζει και διάχυτο θόρυβο:



Εικόνα 2.5 : Εξομαλυντικά φίλτρα

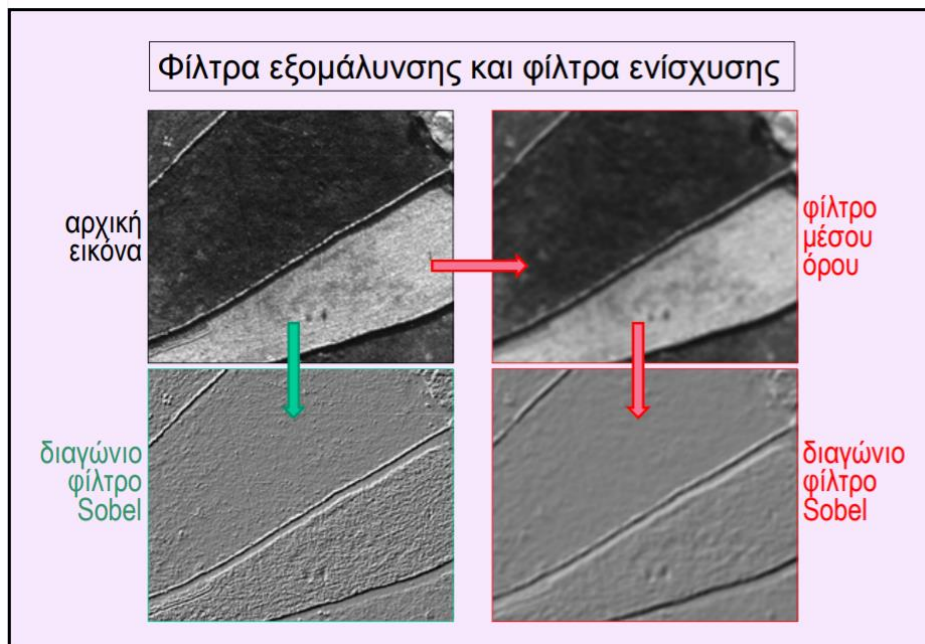
Πηγή: Εργαστήριο Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας – Γ. Καρράς

Φίλτρα παραγώγων

Τα φυσικά όρια των αντικειμένων, απεικονίζονται συχνά ως ασυνέχειες ή απότομες μεταβολές στην κλίμακα του γκρι, σε μια ή περισσότερες ψηφίδες. Αυτές οι περιοχές, μπορούν να εντοπιστούν μέσα από τα φίλτρα κλίσης, τα οποία ουσιαστικά υπολογίζουν την πρώτη παράγωγο της εικόνας. Συγκεκριμένα, όπου υπάρχουν απότομες μεταβολές στη φωτεινότητα, η πρώτη προσανατολισμένη παράγωγος της συνάρτησης έντασης της εικόνας $f(x,y)$ θα εμφανίζει μέγιστο, δηλαδή γίνεται μέγιστο το διάνυσμα κλίσης:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{διάνυσμα κλίσης} & \text{μέτρο} & \text{διεύθυνση} \\
 & \text{διανύσματος} & \text{διανύσματος} \\
 \vec{\nabla}f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} & \nabla f = \|\vec{\nabla}f\| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} & \theta = \arctan\left(\frac{\partial f / \partial x}{\partial f / \partial y}\right)
 \end{array}$$

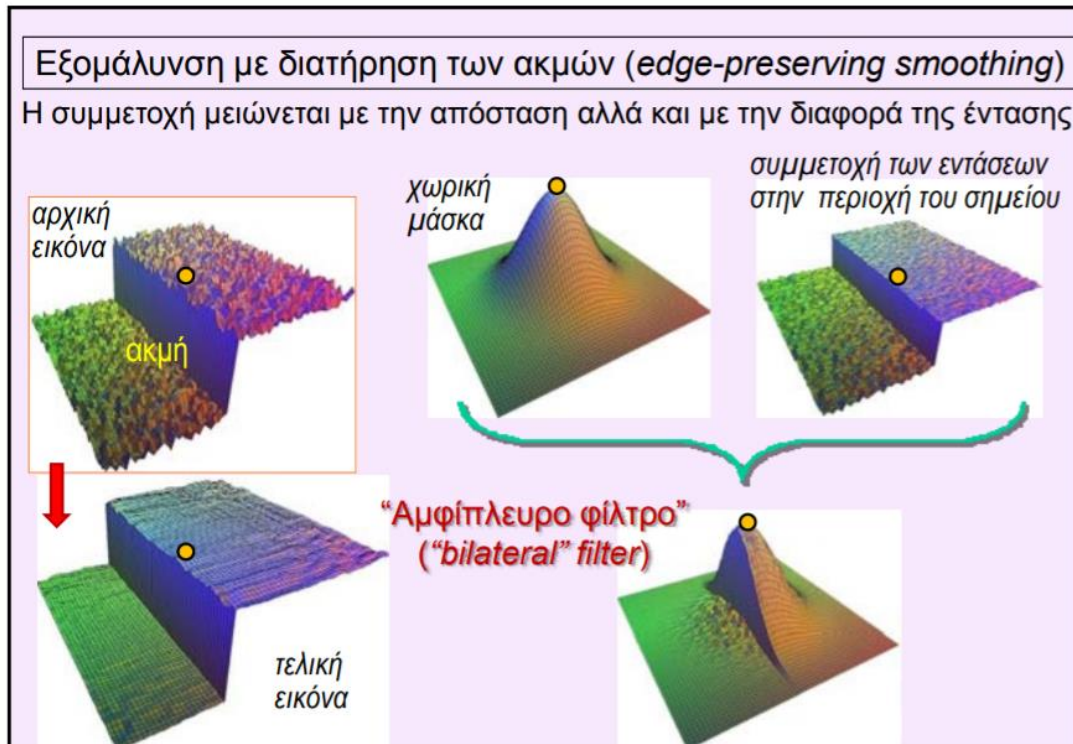
Οι συνηθέστερες μορφές φίλτρων κλίσης, όπως θα αναλυθεί και στο επόμενο κεφάλαιο, είναι τα φίλτρα, Roberts, Prewitt, Sobel και Marr Hildreth. Αν και δε θα αναλυθούν σε αυτή τη φάση περαιτέρω, αξίζει να σημειωθεί ότι τα φίλτρα εξομάλυνσης και φίλτρα κλίσης δε χρησιμοποιούνται μεμονωμένα, αλλά συνήθως, ενδείκνυται ή και απαιτείται η συνδυαστική τους χρήση. Η εφαρμογή, δηλαδή, αρχικά ενός εξομαλυντικού φίλτρου και στη συνέχεια ενός φίλτρου κλίσης. Στη συνέχεια ακολουθεί ένα παράδειγμα χρήσης απευθείας φίλτρου κλίσης στην αρχική εικόνα, συγκρινόμενο με την εφαρμογή φίλτρου στην ίδια εικόνα, στην οποία, πρώτα, έχει εφαρμοστεί φίλτρο μέσου όρου:



Εικόνα 2.6 : Συνδυασμός εξομαλυντικών και ενισχυτικών φίλτρων

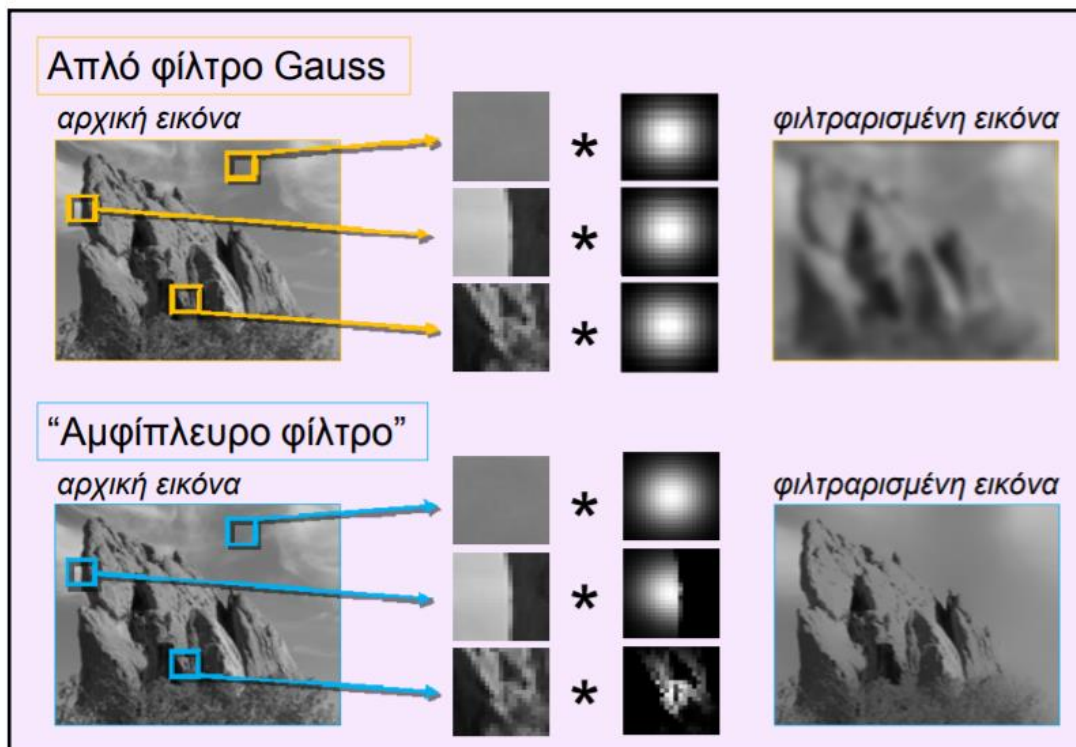
Πηγή: Εργαστήριο Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας – Γ. Καρράς

Αν και αυτά τα φίλτρα πλέον, δεν είναι αρκετά για την ανίχνευση ακμών, χρησιμοποιούνται ως στάδιο για τη διευκόλυνση του λογισμικού, στη φάση της ψηφιακής προ-επεξεργασίας της εικόνας. Τέλος, είναι αρκετά χρήσιμο γενικά η εικόνα να υφίσταται μια εξομάλυνση, αλλά με ταυτόχρονη διατήρηση των ακμών και των χαρακτηριστικών της περιοχών και σημείων, το λεγόμενο Edge Preserving Smoothing. Για να επιτευχθεί αυτό με επιτυχία, γίνεται χρήση του «αμφίπλευρου» (bilateral) φίλτρου, η εφαρμογή του οποίου σε σύγκριση με μια απλή εξομάλυνση φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 2.7 : Εξομάλυνση με ταυτόχρονη διατήρηση των ακμών

Πηγή: Εργαστήριο Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας – Γ. Καρράς



Εικόνα 2.8 : Διαφορά φίλτρου Gauss από το Αμφίπλευρο

Πηγή: Εργαστήριο Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας – Γ. Καρράς

Όπως παρατηρείται και στην εικόνα 2.8, η χρήση του αμφίπλευρου φίλτρου είναι αρκετά κομβική και χρήσιμη στη συνέχεια, ως προ-στάδιο για την εύρεση των ακμών της σκηνής. Ωστόσο, για την εξάλειψη ανεπιθύμητου θορύβου είναι σημαντικό να υποδεικνύεται στο σύστημα από το χρήστη, η υπό-περιοχή της εικόνας, το μοτίβο της οποίας επαναλαμβάνεται και είναι αυτός ο διάχυτος μη επιθυμητός θόρυβος. Επομένως, παρουσιάζεται μια δυσκολία για τη μαζική του εφαρμογή σε όλες τις εικόνες, καθώς αυτή η υπο-περιοχή, φυσικά είναι διαφορετική από εικόνα σε εικόνα.

Συγκεκριμένα, η εργαλειοθήκη του λογισμικού Matlab, επιτρέπει την εφαρμογή ενός παραθύρου-τελεστή στις εικόνες του δείγματος έτσι ώστε να οριστούν οι διάφορες παράμετροι, που θα συμβάλλουν στην εξάλειψη τυχόν θορύβου, με την παράλληλη διατήρηση των σημαντικών ακμών. Συνεπώς, είναι απαραίτητο σε αυτό το στάδιο, να αναλυθούν οι παράμετροι που τροποποιούνται, καθώς και η επίδρασή τους στην εκάστοτε εικόνα. Με άλλα λόγια, εφόσον είναι γνωστό από το σύστημα το μοτίβο του θορύβου που ορίζεται από το χρήστη, είναι δυνατόν το σύστημα μέσα από επαναλαμβανόμενα μοτίβα να ομαλοποιήσει συγκεκριμένα αντικείμενα της εικόνας, όπως για παράδειγμα μια τραχιά επιφάνεια ενός τείχους.

Η εφαρμογή του αμφίπλευρου φίλτρου, έχει ως στοιχεία εισόδου πέρα από την εικόνα και δύο άλλες σημαντικές παραμέτρους.

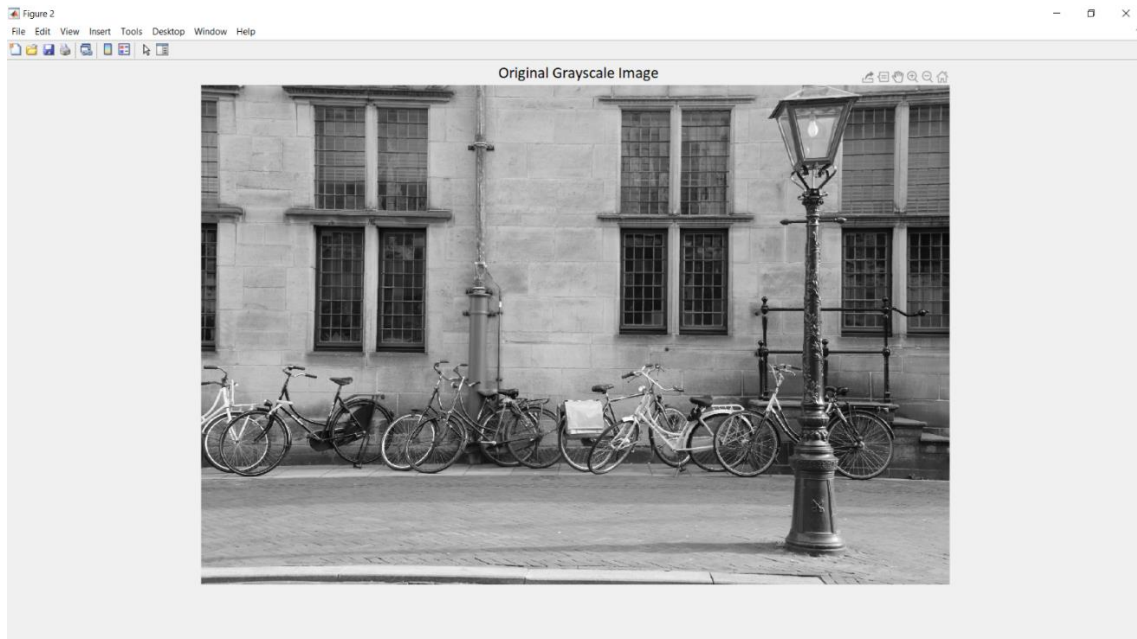
1. Degree of Smoothing (DoS): βαθμός εξομάλυνσης, καθορισμένος ως θετικός αριθμός. Η προεπιλεγμένη τιμή του, εξαρτάται από τον τύπο δεδομένων της εικόνας και ορίζεται ως το 0.01 του δείγματος των τιμών. Για παράδειγμα ο προεπιλεγμένος βαθμός εξομάλυνσης για εικόνες με εύρος τιμών στα εικονοστοιχεία [0,1] είναι το 0.01, ενώ για εικόνες 8-bit, δηλαδή 2^8 διαφορετικές τιμές, είναι 650.25.
2. Spatial Sigma (SS): τυπική απόκλιση του παραθύρου τελεστή Gauss. Η προκαθορισμένη τιμή είναι $\sigma=1$.

Για την καλύτερη κατανόηση της σημασίας του φίλτρου αυτού, αξίζει να εφαρμοστεί σε αυτή τη φάση, σε μια τυχαία εικόνα του δείγματος και να αξιολογηθεί το αποτέλεσμα, συγκρινόμενο με τις αρχικές εικόνες. Έπειτα από την εφαρμογή του με τις προκαθορισμένες τιμές, επιλέχθηκαν, ύστερα από πολλές δοκιμές συγκεκριμένες τιμές που θα αναλυθούν στην συνέχεια.

Όπως φαίνεται παρακάτω, ο διάχυτος θόρυβος της τραχιάς επιφάνειας του τοίχου της πρόσοψης, αλλά και αυτός του πεζοδρομίου, έχουν εξομαλυνθεί σημαντικά. Παράλληλα, οι ακμές των παραθύρων, και των άκρων της πρόσοψης, έχουν διατηρηθεί.

Ορφέας Σκέντζος
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΚΜΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ
ΣΗΜΕΙΩΝ

Σε οποιαδήποτε περίπτωση, η επιλογή των παραπάνω εργαλείων, είτε μεμονωμένα είτε και συνδυασμού αυτών καθώς και η εφαρμογή τους στις εικόνες εισόδου και εξόδου, αλλά και κατά πόσο τελικά συμβάλλουν, θα αναλυθούν στη συνέχεια περαιτέρω.



Εικόνα 2.9



Εικόνα 2.10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Διερεύνηση των διαφόρων τεχνικών εντοπισμού ακμών

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, οι ακμές χαρακτηρίζουν όρια και, επομένως, αποτελούν βασικό προς επίλυση πρόβλημα στην επεξεργασία εικόνας, καθώς μειώνουν τον όγκο δεδομένων προς ανάλυση και συγχρόνως εξαλείφουν τυχόν περιττή πληροφορία. Εφόσον η εύρεση των ακμών της σκηνής προς μελέτη, υλοποιείται σε αρχικό στάδιο για την αναγνώριση και ταυτοποίηση των αντικειμένων που εμπεριέχονται στην εικόνα, αλλά και ως βάση για την μετέπειτα τρισδιάστατη απόδοσή τους, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για την καλή κατανόηση αλλά και τη χρήση του κατάλληλου αλγορίθμου.

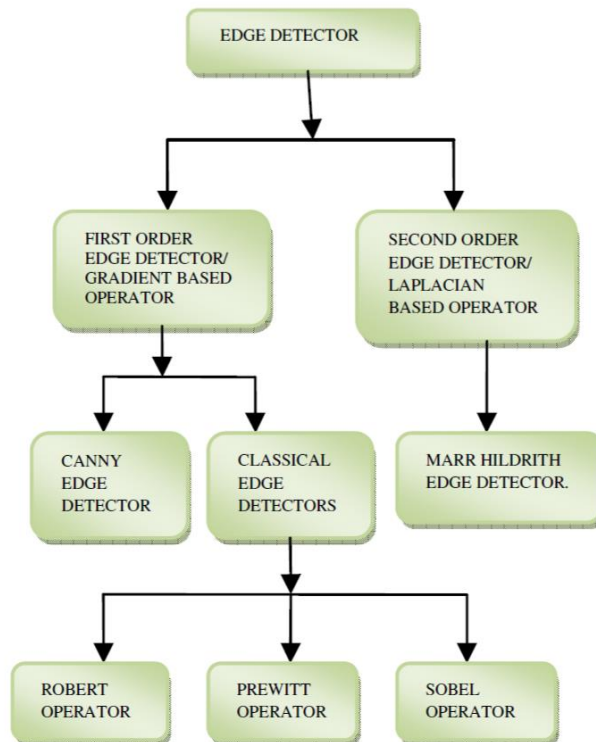
Σε αυτό το κεφάλαιο, λοιπόν, θα εφαρμοστούν ποικίλες τεχνικές εντοπισμού ακμών στις εικόνες του αντικειμένου μελέτης. Οι κλασικές μέθοδοι, περιλαμβάνουν την εφαρμογή ενός δισδιάστατου φίλτρου – συνήθως διαστάσεων 3×3 - στην εικόνα με συνέλιξη, το οποίο είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποδίδει τις έντονες ασυνέχειες που υπάρχουν σε αυτή. Πλέον, υπάρχουν απεριόριστα τέτοια φίλτρα, καθένα από τα οποία έχει διαφορετικές μεταβλητές, με αποτέλεσμα η επιλογή του καταλληλότερου, να ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα, είναι το φίλτρο *Roberts*, *Prewitt*, *Sobel*, *Marr Hildreth* και ο αλγόριθμος *Canny*. Η εφαρμογή τους θα γίνει, αρχικά, στο πλαίσιο των έτοιμων εργαλείων που διαθέτει το λογισμικό MATLAB και στη συνέχεια θα εξεταστεί η περίπτωση βελτίωσης αυτών, με την επεξεργασία της εικόνας πριν, αλλά και μετά την εξαγωγή των ακμών.

Οι μεταβλητές των φίλτρων που εφαρμόζονται στην εκάστοτε εικόνα, σχετίζονται με τη διεύθυνση της κλίσης, με το θόρυβο του περιβάλλοντος, αλλά και με τη δομή της ακμής. Από τη στιγμή, που τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται είναι δομημένα, ώστε να δείχνουν αυτές τις μεταβολές και επομένως υψηλοπερατά, είναι φυσικό και επόμενο να είναι και ευαίσθητα στο θόρυβο. Παράλληλα, ενδεχομένως να εντοπιστούν και περαιτέρω δυσκολίες, όπως περιπτώσεις, όπου μια ακμή δεν αποτυπώνεται απαραίτητα με την αλλαγή της έντασης στα εικονοστοιχεία της εικόνας, αλλά και περιπτώσεις κατά τις οποίες μια ακμή, ενδεχομένως να χάνεται ή και να δημιουργείται φαινομενικά, λόγω των κακών συνθηκών λήψης, όπως για παράδειγμα μια έντονη σκίαση (ή ένας έντονος φωτισμός), μια κακή εστίαση και άλλα.

Γίνεται, λοιπόν αντιληπτό, ότι ενδέχεται να υπάρξουν «λανθάνουσες» ακμές, απώλεια πραγματικών ακμών, περιορισμός των ακμών τοπικά ενώ δε θα έπρεπε, καθώς και προβλήματα απόκρυψης λόγω θορύβου. Για το λόγο αυτό, στόχος σε αυτό το κεφάλαιο είναι να γίνει χρήση των επικρατέστερων τεχνικών, πριν την εφαρμογή των βοηθητικών φίλτρων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ώστε να αξιολογηθούν κάτω από τις δυσμενέστερες συνθήκες και απευθείας στην εικόνα εισόδου χωρίς καμία υποβοήθηση.

Όπως θα φανεί και παρακάτω, από την αξιολόγηση των παραγόμενων εικόνων, η ανίχνευση ακμών με τη μέθοδο Canny, δίνει τα πιο αξιόπιστα και ικανοποιητικά αποτελέσματα για ποικίλες εφαρμογές και κάτω από πολλές διαφορετικές συνθήκες, αλλά και εικόνες του ίδιου αντικειμένου. Παρόλα αυτά το αποτέλεσμα δεν είναι το ιδανικό, καθώς ορισμένα προβλήματα εξακολουθούν να υφίστανται, τα οποία ωστόσο θα γίνει προσπάθεια να ελαττωθούν ή και εξαλειφθούν, στη συνέχεια με τη χρήση των φίλτρων στο στάδιο της ψηφιακής προ-επεξεργασίας των εικόνων του δείγματος.

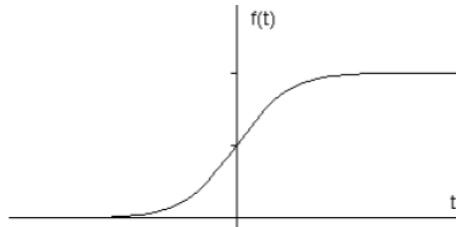
Η πλειονότητα των τεχνικών ανίχνευσης ακμών μπορεί, να διασπαστεί σε δύο βασικές κατηγορίες, όπως υποδεικνύεται και από το παρακάτω διάγραμμα (Rashmi et al., 2013).



Εικόνα 3.1

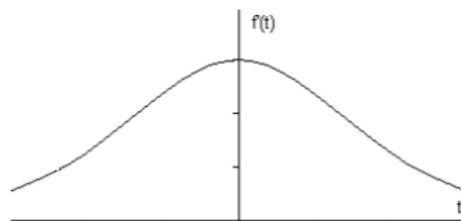
(I) Ανίχνευση ακμών με βάση την κλίση:

Αυτή η μέθοδος εντοπίζει τις ακμές αναζητώντας το ελάχιστο και το μέγιστο στην πρώτη παράγωγο της εικόνας. Ας υποθεθεί ότι μια εικόνα εκφράζεται, μονοδιάστατα, από το ακόλουθο σήμα, το άλμα του οποίου υποδεικνύει την έντονη αλλαγή της έντασης στο σημείο αυτό, επομένως και την ακμή:



Διάγραμμα 3.1

Η α' παράγωγος της παραπάνω καμπύλης, που ουσιαστικά στις 2 διαστάσεις της εικόνας εκφράζεται από την κλίση, θα είναι η εξής:

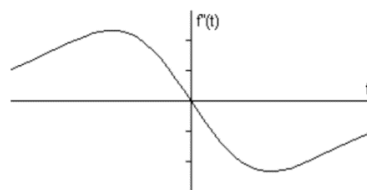


Διάγραμμα 3.2

Προφανώς, η παράγωγος δείχνει ένα μέγιστο, το οποίο εντοπίζεται στο κέντρο του αρχικού σήματος. Η τεχνική αυτή ανήκει στην οικογένεια των φίλτρων ανίχνευσης ακμών με βάση την κλίση και περιλαμβάνει τα φίλτρα *Roberts*, *Sobel*, και *Prewitt* αλλά και την πιο σύνθετη τεχνική *Canny*, η οποία χρησιμοποιεί ως πρωταρχικό στάδιο ανίχνευσης τα προαναφερθέντα φίλτρα.

(II) Ανίχνευση ακμών με βάση τη λαπλασιανή εξίσωση:

Η λαπλασιανή μέθοδος, αναζητεί σημεία καμπής στη δεύτερη παράγωγο της εικόνας, ούτως ώστε να εντοπίσει τις ακμές. Η β' παράγωγος του παραπάνω σήματος, προφανώς θα είναι μηδενική.



Διάγραμμα 3.3

Σε αυτά τα σημεία, λοιπόν, όπου η β' παράγωγος μηδενίζεται, θα εντοπίζεται και η έντονη ασυνέχεια στις τιμές της έντασης της εικόνας. Σε αυτή την οικογένεια ανιχνευτών ανήκει η τεχνική *Marr-Hildreth*.

I. Μέθοδος Roberts:

Η μέθοδος αυτή, υπολογίζει το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς μεταξύ των διαγωνίως γειτονικών εικονοστοιχείων και, στη συνέχεια, την κατά προσέγγιση κλίση της εικόνας (Maini et al., 2009). Πιο συγκεκριμένα, η εικόνα εισόδου υπόκειται σε συνέλιξη με το ζεύγος των δισδιάστατων πινάκων που φαίνονται παρακάτω. Όπως παρατηρείται ο πίνακας G_y είναι, επί της ουσίας, η στροφή του G_x κατά 90° :

$$\begin{array}{|c|c|} \hline +1 & 0 \\ \hline 0 & -1 \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|} \hline 0 & +1 \\ \hline -1 & 0 \\ \hline \end{array}$$

$G_x \qquad G_y$

Όπως παρατηρείται, οι πίνακες αυτοί αντιδρούν καλύτερα σε ακμές που έχουν πλάγιες διευθύνσεις στο πλέγμα της εικόνας, δηλαδή στη διεύθυνση των 45° . Επίσης, εφαρμόζονται στην εικόνα εισόδου ξεχωριστά και, στη συνέχεια, μπορούν να συνδυαστούν ώστε να υπολογιστεί το μέτρο του διανύσματος της κλίσης αλλά και η γωνία διεύθυνσης αυτής.

Το μέτρο του διανύσματος της κλίσης δίνεται από τον τύπο:

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Στην πράξη, όμως, χρησιμοποιείται αυτή η σχέση, διότι εκτελείται ταχύτατα από το υπολογιστικό σύστημα:

$$|G| = |G_x| + |G_y|$$

Η γωνία διεύθυνσης της κλίσης είναι:

$$\theta = \arctan(G_y / G_x) - 3\pi / 4$$

Πηγή: Raman Maini et al., 2009

Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής εύρεσης ακμών, έγκειται στο ότι είναι απλή. Ωστόσο, το γεγονός ότι έχει μικρούς πίνακες συνέλιξης που διαπερνούν την εικόνα, την καθιστά αρκετά ευαίσθητη στο θόρυβο.

II. Μέθοδος Sobel:

Σε αυτή τη μέθοδο εφαρμόζεται συνελκτικικά ένα ζεύγος πινάκων 3x3, που και σε αυτή την περίπτωση, ο ένας πίνακας είναι ουσιαστικά η στροφή του άλλου κατά 90°:

-1	0	+1
-2	0	+2
-1	0	+1

Gx

Πίνακας 3.1

+1	+2	+1
0	0	0
-1	-2	-1

Gy

Πίνακας 3.2

Πηγή: *Study and Comparison of Various Edge Detection Techniques* – Raman Maini, Dr Himanshu Aggarwal (2009)

Όπως παρατηρείται, τα φίλτρα αυτά είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να αντιδρούν ιδανικά, σε ακμές που ακολουθούν την κατακόρυφη και την οριζόντια διεύθυνση. Ομοίως εφαρμόζονται ξεχωριστά στην εικόνα και, οι σχέσεις που τις συνοδεύουν, για το μέτρο της κλίσης και τη γωνία διεύθυνσης αντίστοιχα, είναι οι εξής:

$$|G| = \sqrt{Gx^2 + Gy^2}$$

$$|G| = |Gx| + |Gy|$$

$$\theta = \arctan(Gy / Gx)$$

Πηγή: Maini, Aggarwal (2009)

Συγκρινόμενη με τη μέθοδο Ρόμπερτς, ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση του αλγορίθμου είναι πιο αργός, αλλά είναι λιγότερο επιρρεπής στο θόρυβο, καθώς έχοντας μεγαλύτερη μάσκα, σφάλματα που μπορεί να προκύπτουν λόγω του έντονου θορύβου, «εξουδετερώνονται» εν μέρει τοπικά.

III. Μέθοδος Prewitt:

Η μόνη διαφορά της μεθόδου αυτής έγκειται στο ζεύγος πινάκων, που χρησιμοποιούνται ως συνελκτικά φίλτρα στην εικόνα εισόδου.

-1	0	+1
-1	0	+1
-1	0	+1

G_x

Πίνακας 3.3

+1	+1	+1
0	0	0
-1	-1	-1

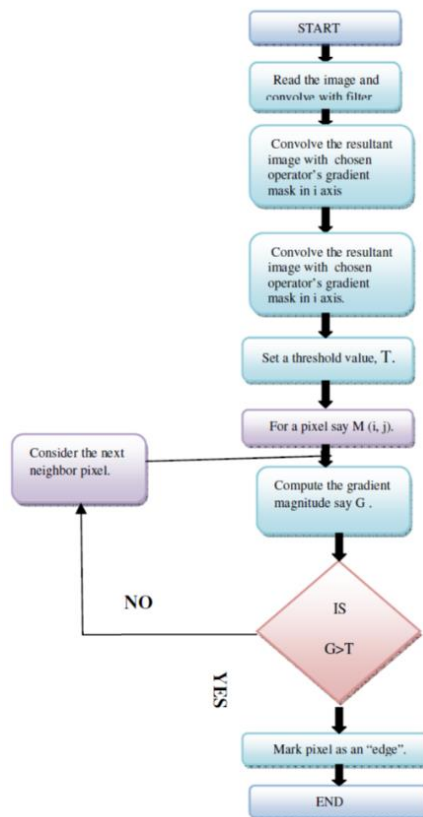
G_y

Πίνακας 3.4

Πηγή: *Study and Comparison of Various Edge Detection Techniques* – Raman Maini, Dr Himanshu Aggarwal (2009)

Κατά τα άλλα οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για των υπολογισμό των υπόλοιπων στοιχείων παραμένουν ίδιες.

Για την καλύτερη κατανόηση των μεθόδων που αναλύθηκαν παραπάνω, καθώς είναι σύνθετες διαδικασίες που περιλαμβάνουν τη σταδιακή εφαρμογή φίλτρων στην εικόνα, αξίζει να συμπυχθούν σε ένα διάγραμμα ροής, με τρόπο λειτουργίας τους, από την είσοδο της εικόνας στο υπολογιστικό σύστημα, μέχρι και το εξαγόμενο αποτέλεσμα, το οποίο είναι μια δυαδική εικόνα με την πληροφορία των ακμών:



Εικόνα 3.5

Πηγή: *Algorithm and Technique on Various Edge detection: A Survey* – Rashmi, Mukesh Kumar, Rohini Saxena (2013)

IV. Μέθοδος Marr Hildreth ή LoG (Laplacian of Gaussian):

Η συγκεκριμένη μέθοδος ήταν η πιο διαδεδομένη, πριν την εμφάνιση της μεθόδου Canny. Πιο συγκεκριμένα, κάνει χρήση της λαπλασιανής εξίσωση για τον υπολογισμό της δεύτερης παραγώγου στην εικόνα. Είναι μια μέθοδος που υπερτονίζει περιοχές απότομης αλλαγής της έντασης και επομένως περιοχές όπου υπάρχουν ακμές. Συνήθως, εφαρμόζεται, εφόσον έχει ήδη γίνει μια εξομάλυνση στην εικόνα με την εφαρμογή φίλτρου Gauss, όπως αυτό αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η μέθοδος λαμβάνει ως εικόνα εισόδου, μια ασπρόμαυρη εικόνα και παράγει μια αντίστοιχη ασπρόμαυρη εικόνα ως έξοδο με υπερτονισμένες τις ακμές.

Η λαπλασιανή εξίσωση $L(x,y)$ των ψηφίδων μιας εικόνας με τιμές έντασης $I(x,y)$, δίνεται από τον τύπο:

$$L(x,y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}$$

Προφανώς, η εικόνα δεν είναι συνεχής αλλά έχει διακριτά στοιχεία, επομένως οι συνήθεις πίνακες που χαρακτηρίζουν την παραπάνω εξίσωση και εφαρμόζονται συνελικτικά στην εικόνα, είναι οι εξής:

1	1	1
1	-8	1
1	1	1

-1	2	-1
2	-4	2
-1	2	-1

Οι συγκεκριμένοι πίνακες, προσεγγίζουν τη δεύτερη παράγωγο της εικόνας και είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι στην παρουσία θορύβου. Για το λόγο αυτό, εφαρμόζεται εκ των προτέρων και το εξομαλυντικό φίλτρο του Gauss, ώστε να μειωθούν υψηλής συχνότητας θόρυβοι που εμφανίζονται στην εικόνα.

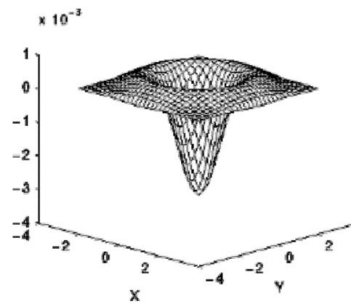
Στην πράξη για να αποφευχθεί η διπλή συνέλιξη στην εικόνα και να μειωθεί ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου, αρκεί να εντοπιστεί εκ των προτέρων το φίλτρο του Laplace συνδυαστικά με την εξομάλυνση του Gauss.

Συγκεκριμένα, η εξίσωση που χαρακτηρίζει την παραπάνω διαδικασία είναι η εξής:

$$LoG(x,y) = -1/\pi\sigma^4 [1 - (\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2})] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}$$

,όπου σ είναι η τυπική απόκλιση. Ουσιαστικά, το φίλτρο θα έχει την εξής επίδραση στην εικόνα:

Ορφέας Σκέντζος
 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΚΜΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ
 ΣΗΜΕΙΩΝ



Εικόνα 3.6

Πηγή: *Study and Comparison of Various Edge Detection Techniques* – Raman Maini, Dr Himanshu Aggarwal (2009)

Προκειμένου, η εφαρμογή του φίλτρου της εικόνας 3.6, να γίνει πιο κατανοητή ακολουθεί ένα παράδειγμα συχνού παραθύρου τελεστή, όπως αυτό εφαρμόζεται συνελικτικά στα διακριτά στοιχεία της εικόνας:

0	1	1	2	2	2	1	1	0
1	2	4	5	5	5	4	2	1
1	4	5	3	0	3	5	4	1
2	5	3	-12	-24	-12	3	5	2
2	5	0	-24	-40	-24	0	5	2
2	5	3	-12	-24	-12	3	5	2
1	4	5	3	0	3	5	4	1
1	2	4	5	5	5	4	2	1
0	1	1	2	2	2	1	1	0

Διακριτή προσέγγιση του LoG παραθύρου για $\sigma=1.4$

Πηγή: *Study and Comparison of Various Edge Detection Techniques* – Raman Maini, Dr Himanshu Aggarwal (2009)

V. Ο αλγόριθμος Canny:

Η μέθοδος αυτή είναι η πλέον εδραιωμένη τεχνική εύρεσης ακμών. Η αρχική απόπειρα του Canny, ήταν να βελτιώσει τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές, όπως και επιχείρησε με τη δημοσίευση του “A Computational Approach to Edge Detection” το 1986. Η επιτυχία του αλγορίθμου, έγκειται στο γεγονός ότι έχτισε κριτήρια με βασικότερο, την εξαγωγή των ακμών με χαμηλή πιθανότητα σφάλματος, κάτι που συνέβαινε πολύ συχνά με τη χρήση των υπαρχουσών τεχνικών, που είχαν ως αποτέλεσμα, λανθάνουσες ακμές και περιττή πληροφορία. Ο ακριβής εντοπισμός των σημείων που αποτελούν ακμή, χωρίς την επιρροή των γειτονικών ψηφίδων, αποτέλεσε το δεύτερο βασικότερο κριτήριο, όπως θα φανεί και στη συνέχεια μέσα από τα στάδια της μεθόδου. Με άλλα λόγια, ο δεύτερος βασικός στόχος, ήταν, η

απόσταση των εικονοστοιχείων που περιέχουν την ακμή με τα σημεία που είναι πραγματικά ακμή, να έχει χαμηλή απόκλιση.

Η μέθοδος, αποτελεί μια διαδικασία που περιλαμβάνει την εφαρμογή σταδιακών βημάτων και φίλτρων στην εικόνα. Ως αρχικό στάδιο, πριν την εφαρμογή του, είναι η μετατροπή της εικόνας εισόδου σε ασπρόμαυρη, μέσω της έτοιμης λειτουργίας που διαθέτει το λογισμικό MATLAB. Η μετατροπή αυτή ελαττώνει τον όγκο των δεδομένων που περιέχει η εικόνα, καθώς αντί για 3 κανάλια, ο αλγόριθμος εξετάζει την εικόνα σαν πίνακα 2 διαστάσεων με 256 διαφορετικές τιμές σε ένα φάσμα, δηλαδή σαν να υπάρχει ένα μοναδικό κανάλι. Ακόμα, όπως αναφέρθηκε, οι ακμές, αποτυπώνονται μέσω των έντονων μεταβολών της έντασης και όχι του χρώματος, επομένως, η ύπαρξη 3 καναλιών (Red, Green, Blue), δεν είναι χρήσιμη, παρά μόνο επιβαρυντική για την όλη διαδικασία. Στη συνέχεια, τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής:

Βήμα 1^ο: Ελαχιστοποίηση τυχόν θορύβου στην αρχική εικόνα με τη χρήση του εξομαλυντικού φίλτρου Gauss. Στο βήμα αυτό, είναι κρίσιμη η επιλογή μιας κατάλληλης μάσκας συνέλιξης στην εικόνα για την εξομάλυνσή της, ώστε με βάση το αντικείμενο που απεικονίζεται, να προκύψει και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Με άλλα λόγια να μην υπάρχει ούτε απώλεια σημαντικής πληροφορίας, αλλά ούτε και διατήρηση περιττής. Είθισται η επιλογή μάσκας συνέλιξης διαστάσεων 5x5.

Βήμα 2^ο: Σε αυτό το στάδιο υπολογίζεται το διάνυσμα της κλίσης της εικόνας. Η διαδικασία αυτή, υλοποιείται με την εφαρμογή μιας μάσκας συνέλιξης 2x2, όπως αναλύθηκε παραπάνω, για τον υπολογισμό της τιμής του διανύσματος αλλά και της διεύθυνσης. Η προσεγγιστική τιμή της μερικής α' παραγώγου κατά την κάθετη και οριζόντια διεύθυνση, X και Y, αντίστοιχα υπολογίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$E_x[i, j] = (I[i+1, j] - I[i, j] + I[i+1, j+1] - I[i, j+1]) / 2$$

$$E_y[i, j] = (I[i, j+1] - I[i, j] + I[i+1, j+1] - I[i+1, j]) / 2$$

Και επομένως, οι πίνακες που χρησιμοποιούνται είναι:

$$G_x = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$G_y = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}$$

Η τιμή και η διεύθυνση του διανύσματος κλίσης υπολογίζονται από τους τύπους:

$$|G| = |G_x| + |G_y|$$

$$\theta = \arctan(G_y / G_x)$$

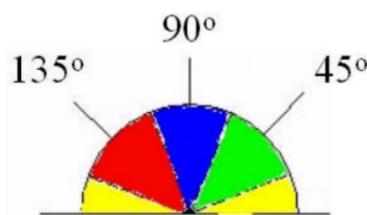
Βήμα 3°: Εφόσον έχουν υπολογιστεί τα παραπάνω, πρέπει να γίνει η συσχέτιση της διεύθυνσης με τα διακριτά στοιχεία της εικόνας. Πιο συγκεκριμένα, ας υποθεθεί ότι κεντρικό εικονοστοιχείο είναι το *a*, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3.6

Πηγή: *Study and Comparison of Various Edge Detection Techniques* – Raman Maini, Dr Himanshu Aggarwal (2009)

Παρατηρείται εύκολα, επομένως, ότι σε κάθε εικονοστοιχείο *a*, υπάρχουν τέσσερις (4) πιθανές διευθύνσεις για την περιγραφή της θέσης των γειτονικών εικονοστοιχείων – 0°, 45°, 90° και 135°. Παράλληλα, εάν συνυπολογίσει κανείς, το γεγονός ότι η εικόνα έχει διακριτές ψηφίδες, συμπεραίνεται ότι μια ακμή στο χώρο ούσα συνεχής, είναι φυσικό να μην ακολουθεί επακριβώς τις διευθύνσεις των βαθμίδων της εικόνας αλλά να εντοπίζεται σε μια ευρύτερη περιοχή αυτών, δηλαδή:



Εικόνα 3.7

Πηγή: *Study and Comparison of Various Edge Detection Techniques* – Raman Maini, Dr Himanshu Aggarwal (2009)

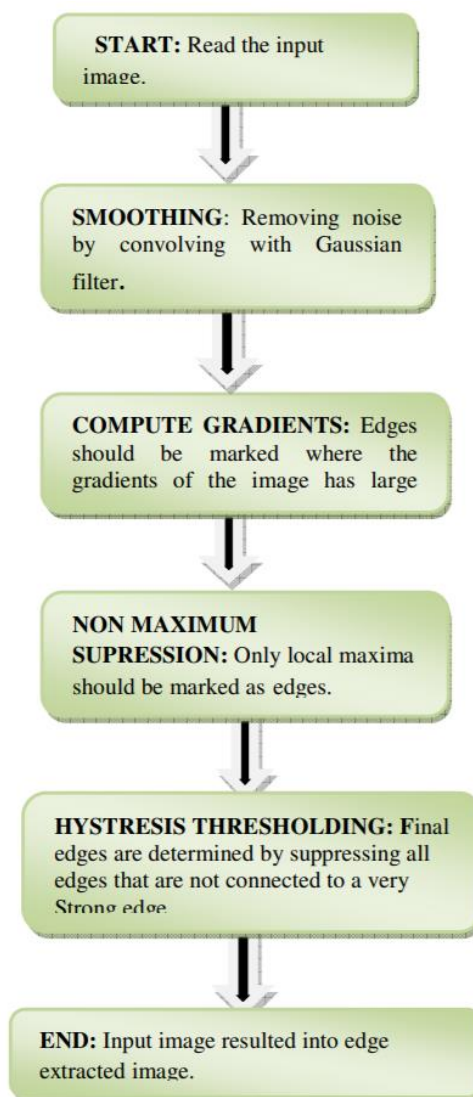
Με άλλα λόγια, εάν μια ακμή υπολογιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ανήκει στο κίτρινο εύρος (0-22.5 και 157.5-180 μοίρες), θα οριστεί ως μηδέν (0). Ομοίως αν μια ακμή ανήκει στο πράσινο εύρος (22.5-67.5) θα οριστεί ως 45° και ούτω καθεξής. Δηλαδή, εάν η γωνία διεύθυνσης στο προηγούμενο βήμα είναι ίση με 3°, θα εισαχθεί στην κίτρινη κλάση των 0°. Στη φάση αυτή, θα αποδοθούν ακμές ανομοιογενείς με διάφορα πάχη και διαφορετικές τιμές έντασης στην εικόνα στην κλίμακα 0-255.

Βήμα 4°: Αφού έχουν εντοπιστεί οι διευθύνσεις και έχουν βρεθεί επακριβώς οι περιοχές των ψηφίδων της εικόνας, στις οποίες απαντάται ακμή, θα πρέπει να εφαρμοστεί το στάδιο της καταστολής των ακμών (Non Maximum Suppression), που δεν είναι τόσο ισχυρές ώστε να είναι ακμές, ούτως ώστε να διατηρηθεί εκείνη η γραμμή που χαρακτηρίζει επακριβώς την πραγματικότητα. Έτσι, διατηρούνται μόνο τα εικονοστοιχεία της εικόνας, στα οποία η ένταση της κλίσης, όπως αναλύθηκε στο 2° βήμα παρουσιάζει μέγιστο, αλλά με τρόπο τέτοιο, ώστε η ακμή, να έχει μια

συνέχεια στην εικόνα. Με άλλα λόγια, αποτέλεσμα αυτού του βήματος είναι, να εντοπιστούν ακμές, κατά βάση ασυνεχείς (δηλαδή χωρίς να έχουν σύνδεση από ψηφίδα σε ψηφίδα της εικόνας), αλλά με πάχος, αυτό του ενός pixel.

Βήμα 5^ο: Ως τελευταίο βήμα της διαδικασίας είναι η παρακολούθηση των ακμών με υστέρηση (Double-Threshold method). Σε αυτό το βήμα, τα αδύναμα εικονοστοιχεία τα οποία προέκυψαν από την εφαρμογή του διπλού ορίου στο προηγούμενο στάδιο, μετατρέπονται σε ισχυρά, αν και μόνο αν τουλάχιστον ένα από τα γειτονικά εικονοστοιχεία, γύρω από το κεντρικό που ελέγχεται, είναι ισχυρό. Ουσιαστικά το αποτέλεσμα, δίνει απόλυτα ομοιογενείς ακμές ίδιου πάχους και έντασης και, παράλληλα, εξαλείφει τυχόν ασυνέχειες μεταξύ των ακμών.

Συνοπτικά παρουσιάζεται παρακάτω το διάγραμμα ροής των βημάτων που ακολουθεί ο αλγόριθμος Canny:



Εικόνα 3.8

Επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου και εφαρμογή στο αντικείμενο μελέτης

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας, αποτέλεσε το αποκατεστημένο κτίριο του δημαρχείου της πόλης Leiden, στην Ολλανδία, το οποίο μέχρι και σήμερα είναι σε χρήση. Τα σχετικά δεδομένα, είχαν συλλεχθεί στο πλαίσιο πρακτικής άσκησης και το συγκεκριμένο κτίριο, είναι ένα καλό παράδειγμα σύγχρονης πολιτιστικής κληρονομιάς με στοιχεία αρχιτεκτονικής της βόρειας Ευρώπης, αλλά και ένα καλό παράδειγμα για την εφαρμογή και τη σκοπιμότητα της παρούσας εργασίας. Ο κύριος λόγος που η ανάγκη για την τεκμηρίωση του μνημείου είναι επιτακτική, υφίσταται διότι στο παρελθόν, μεγάλο μέρος του, τόσο γενικά και κυρίως η πρόσοψή του, είχε καταστραφεί λόγω έντονης πυρκαγιάς. Η αποκατάσταση και η κατασκευή εκ νέου των κατεστραμμένων μερών, ωστόσο έγινε σε μια εποχή όπου τα τεχνολογικά μέσα που διατίθεντο τότε, δεν ήταν αρκετά ώστε, κατά τη φάση της ανακατασκευής, να ακολουθηθούν πιστά τα ελλιπή στοιχεία τεκμηρίωσης που είχαν κατά καιρούς συλλεχθεί, με αποτέλεσμα πολλά μέρη να διαφέρουν από το πρωτότυπο.

Συνεπώς, αναζητήθηκαν αρχεία, είτε ψηφιακά είτε αναλογικά - παλαιά σχέδια, σκαριφήματα αλλά και φωτογραφίες -, που περιείχαν την πληροφορία της πρόσοψης, πριν αυτή καταστραφεί εν μέρει από την πυρκαγιά και, στη συνέχεια, η φωτογραμμετρική τεκμηρίωση της παρούσας κατάστασης της πρόσοψης, έπρεπε να συγκριθεί με τα παλαιά αρχεία, ώστε να εντοπιστούν οι διαφορές που απαντώνται στο αποκατεστημένο κομμάτι. Οι διαφορές αυτές περιλάμβαναν, τόσο στοιχεία δομικά και οργανικά, αλλά και διακοσμητικά στοιχεία της πρόσοψης, με έμφαση ακόμα και στη χρήση των μερών της υψής της επιφάνειας του τείχους (αρμοί, τούβλα).

Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατό να εντοπιστούν ποια είναι τα παλαιά και ποια τα σύγχρονα μέρη της κατασκευής, αλλά και ενδεχόμενες παθολογίες και αδυναμίες που πιθανώς, εν καιρώ, να είναι επιβαρυντικές για τη διατήρηση του μνημείου. Είναι, επομένως, προφανές, ότι η ακρίβεια της μεθόδου πρέπει να είναι αρκετά υψηλή, ώστε το αποτέλεσμα να αφήσει ελάχιστα περιθώρια στην προσωπική κρίση των συντελεστών, ειδικών και μη, που ασχολούνται με το έργο. Έχοντας ψηφιοποιήσει τα παλαιά αρχεία και επιθέτοντας την υπάρχουσα κατάσταση της πρόσοψης στην παλαιά, η σύγκριση γίνεται αισθητά ευκολότερη. Αν στη φάση εκείνη του ελέγχου η πληροφορία εμπλουτιζόταν αποκλειστικά με τα στοιχεία για τις ακμές, θα ήταν ακόμα πιο εύκολη η οπτική σύγκριση με τα παλαιά σχέδια, γεγονός που θα διευκόλυνε κατά πολύ το στάδιο αυτό.

Προφανώς, για να έχει το παραγόμενο αποτέλεσμα, την ποιότητα και την ακρίβεια που απαιτείται, θα πρέπει και τα δεδομένα εισόδου να είναι εξίσου ποιοτικά. Είναι κατανοητό, ότι σε αυτό το στάδιο, τα δεδομένα που συλλέγονται θα είναι αξιόπιστα και ακριβή με τη χρήση των κατάλληλων μέσων. Πόσο μάλλον, στην περίπτωση όπου η σύγκριση γίνεται αναγκαστικά με παλαιά μέσα καταγραφής. Για το λόγο αυτό, οι εικόνες που χρησιμοποιούνται, είναι από κάμερα υψηλής ανάλυσης *Nikon D610*, τύπου full frame και οι οποίες είναι γνωστού εσωτερικού προσανατολισμού.

Στο στάδιο αυτό, εξετάζεται μια τυπική εικόνα του δείγματος και εφαρμόζονται οι τεχνικές που αναλύθηκαν παραπάνω, οι οποίες είναι ενταγμένες στην εργαλειοθήκη του λογισμικού MATLAB. Αξίζει να αναφερθεί ότι για λόγους ταχύτητας, εξετάστηκε και η περίπτωση σημαντικής μείωσης στην ανάλυση των εικόνων του δείγματος κατά τη διαδικασία επεξεργασίας των εικόνων, η οποία ωστόσο μετά αποκαθίσταται. Παράλληλα, ο βασικός στόχος σε αυτό το στάδιο, εστιάζεται στην εξαγωγή της πληροφορίας της ακμής με τον κατά το δυνατόν καλύτερο τρόπο, ώστε να απεικονίζονται τα απαραίτητα στοιχεία χωρίς απώλεια ή ύπαρξη περιττής πληροφορίας.

Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, αναδεικνύεται το πρόβλημα που εντοπίζεται στις αρχικές εικόνες λόγω της υψηλής ανάλυσης (4016x6016) που διαθέτουν. Πέραν του ότι αυτές απαιτούν πολλούς πόρους από το σύστημα, με αποτέλεσμα να καθυστερεί στην εξαγωγή του αποτελέσματος, ο αλγόριθμος ανιχνεύει υπερβολικά περιττή πληροφορία για τις ακμές, η οποία ουσιαστικά είναι θόρυβος. Από την άλλη, ωστόσο και οι εικόνες μειωμένης ανάλυσης ενέχουν κινδύνους απώλειας, αναξιοπιστίας και ελλιπούς ακρίβειας και για το λόγο αυτό, θα γίνει χρήση και σύγκριση και των δύο περιπτώσεων.

Προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω, δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα, για το πρώτο σκέλος της παρούσας εργασίας, στο λογισμικό MATLAB, το οποίο με σκοπό να εφαρμόζεται γρήγορα σε όλες τις εικόνες του δείγματος που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την ανακατασκευή του νέφους σημείων, εκτελεί τα εξής βήματα:

1^η περίπτωση: Μειωμένη ανάλυση – Αυξημένη Ταχύτητα

- Αυτόματη μείωση της αρχικής ανάλυσης των εικόνων κατά 500% της αρχικής. Η μείωση αυτή, προέκυψε μετά την εφαρμογή πολλών πειραμάτων και βρέθηκε ότι σε αυτή την ανάλυση, οι τεχνικές ανίχνευσης ακμών που θα εφαρμοστούν στη συνέχεια αποδίδουν τις απολύτως απαραίτητες πληροφορίες για το σκοπό της μελέτης. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι το ποσοστό της μείωσης αυτής μπορεί να είναι μεταβλητό, ανάλογα με τον εκάστοτε χρήστη. Στην ειδική περίπτωση της συλλογής των εικόνων της πρόσοψης του κτιρίου σε αυτή την κλίμακα, η μείωση σε αυτή την τιμή είναι ιδανική.
- Ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων μειωμένης ανάλυσης, με τη χρήση ενισχυτικών φίλτρων για τις ακμές, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, με σκοπό την εποπτεία για τη χρήση της καταλληλότερης στη συνέχεια.
- Χρήση των τεχνικών που περιέχει η εργαλειοθήκη του λογισμικού για την ανίχνευση των ακμών στις αρχικές εικόνες - Sobel, Prewitt, Roberts, Marr-Hildreth. Οι τεχνικές αυτές αναλύθηκαν και στο προηγούμενο κεφάλαιο.
- Χρήση του αλγόριθμου Canny σε όλες τις εικόνες και σύγκριση με τις μεθόδους του προηγούμενου βήματος με οπτική αξιολόγηση.
- Επαναφορά του μεγέθους των εικόνων των ακμών στο μέγεθος της αρχικής εικόνας(4016x6016) με διατήρηση της γεωμετρίας τους.
- Επεξεργασία της δυαδικής εικόνας των ακμών, με σκοπό τη μείωση της πάχους των εντοπισμένων ακμών.
- Αυτόματη εξαγωγή και αποθήκευση των εικόνων των ακμών σε ξεχωριστό φάκελο με ίδιο όνομα.

Στην περίπτωση αυτή, κατά την οποία οι εικόνες υπόκεινται τόσο έντονη μείωση της ανάλυσης, είθισται να εφαρμόζεται πριν τη χρήση της για τον εντοπισμό των ακμών, ορισμένα ενισχυτικά φίλτρα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

Original Image and Enhanced Images using imadjust, histeq, and adapthisteq



Εικόνα 4.1 : Αρχική εικόνα με τις τρεις διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας του ιστογράμματος

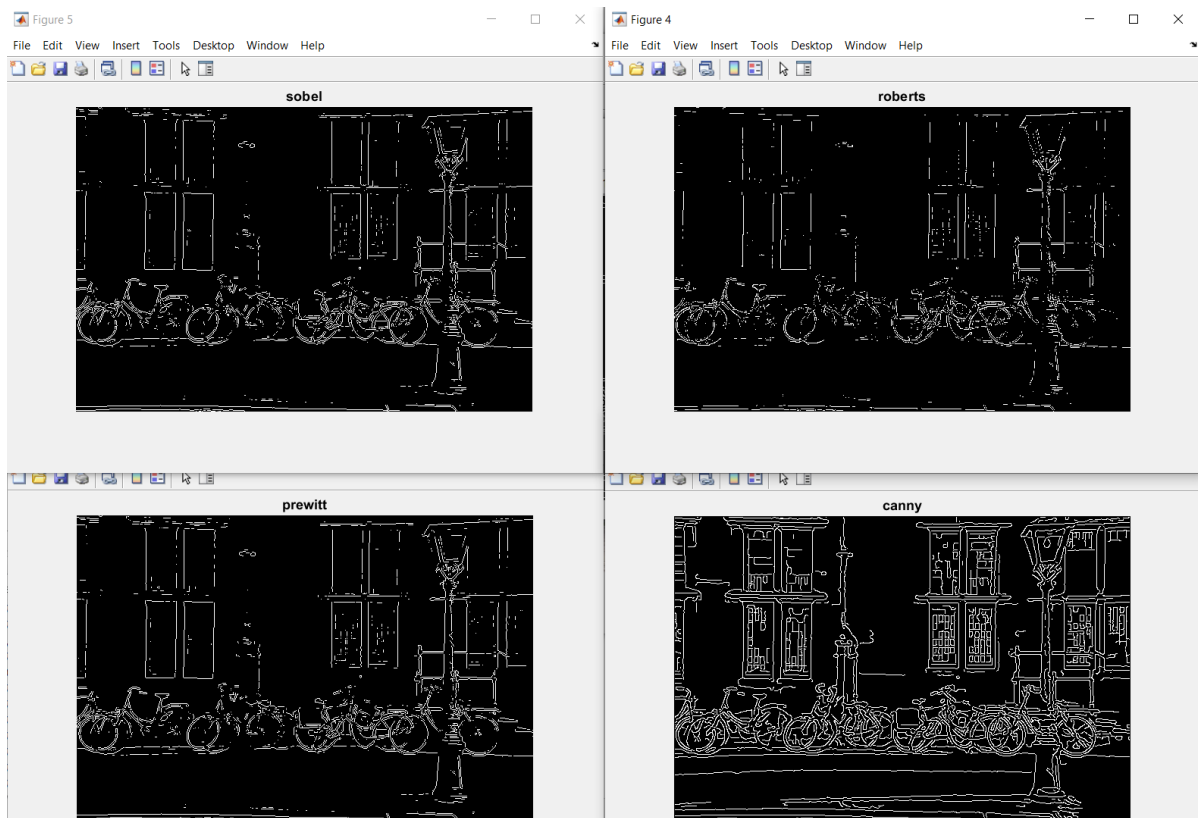
Ξεκινώντας με την αρχική εικόνα πάνω αριστερά, ακολουθούν οι τρεις διαφορετικές τεχνικές βελτίωσης του ιστογράμματος και των χρωμάτων για την ενίσχυση των ακμών. Όπως παρατηρείται η χρήση αυτών των τεχνικών επιβαρύνουν την εικόνα, δημιουργώντας έντονες μεταβολές, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνουν το έργο και, αυτό παρατηρείται για την εικόνα του δείγματος στο σχήμα που ακολουθεί. Επομένως, δε θα γίνει χρήση καμιάς από τις 3 εικόνες που δίνουν τα ενισχυτικά φίλτρα, παρά μόνο της αρχικής.

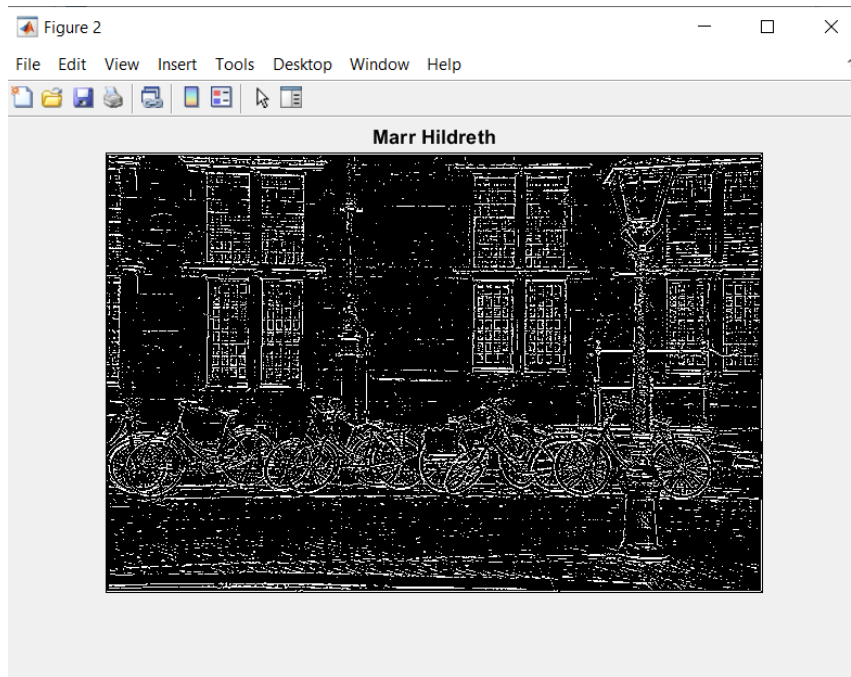
Σε αυτό το στάδιο, για μια τυπική εικόνα του δείγματος, εφαρμόζονται και οι 5 τεχνικές εντοπισμού ακμών που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ορφέας Σκέντζος
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΚΜΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ
ΣΗΜΕΙΩΝ



Εικόνα 4.2: Αρχική εικόνα (602x402)





Εικόνα 4.3 & 4.4 : Χρήση των πέντε (5) διαφορετικών τεχνικών εντοπισμού ακμών

Ο αλγόριθμος Canny, συγκρινόμενος με όλες τις παραπάνω τεχνικές, αποδίδει τα καλύτερα αποτελέσματα, ειδικά σε μια εικόνα που οι διευθύνσεις των ακμών αλλά και το σχήμα τους ποικίλλει, καθώς οι ακμές που εντοπίζονται, είναι συνεχείς, χωρίς την ύπαρξη έντονου θορύβου ή την απώλεια σημαντικής πληροφορίας. Είναι αρκετά σημαντικό, στην περίπτωση που το αντικείμενο μελέτης είναι οι σύνθετες ανθρώπινες κατασκευές και, πόσο μάλλον, στην περίπτωση προσόψεων κτιρίων, των οποίων οι λεπτομέρειες είναι σημαντικό να αποτυπωθούν, παρά την πιθανή και έντονη παρουσία θορύβου, χωρίς όμως να παραμένουν παράλληλα περιττές πληροφορίες οι οποίες να δυσχεραίνουν τη γεωμετρία της σκηνής προς αποτύπωση.

Παρόλο που ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται κατά κόρων στην όραση υπολογιστών και στην ανάλυση εικόνας, υπάρχουν κατά βάση δύο βήματα του αλγορίθμου που μπορούν να βελτιωθούν. Πιο συγκεκριμένα, η εργαλειοθήκη του λογισμικού διαθέτει τη σύγχρονη πλέον μέθοδο Canny, η οποία δίνει τη δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένων τιμών και την παραμετροποίηση αυτών, με σκοπό την εφαρμογή του, καταλλήλως στην εκάστοτε εικόνα, σύμφωνα με την ανάλυσή της αλλά και τα στοιχεία που απεικονίζει. Παράλληλα, θα γίνει χρήση μερικών σημαντικών φίλτρων που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, για την εξαγωγή του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος. Ωστόσο για αρχή, θα χρησιμοποιηθούν οι αρχικές εικόνες, αυτές καθαυτές, ώστε να γίνει η σύγκριση των αλγορίθμων κάτω από τις δυσμενέστερες συνθήκες.

Σύγχρονη τεχνική του αλγόριθμου Canny με τη μεταβολή των προκαθορισμένων παραμέτρων T , σ

Μεταξύ των ποικίλων τεχνικών, η μέθοδος Canny υπερέχει, ούσα και μεταγενέστερη αλλά και ανεπτυγμένη ώστε να επιλύει αδυναμίες των άλλων. Ωστόσο, επειδή το αντικείμενο μελέτης, όπως και κάθε αντικείμενο μελέτης για την τρισδιάστατη ανακατασκευή του, έχει φωτογραφηθεί από ποικίλες γωνίες θέασης και με κάμερα υψηλής ανάλυσης και ακρίβειας, το αποτέλεσμα του δεν είναι πάντα το επιθυμητό σε κάθε περίπτωση. Το γεγονός αυτό, δυσχεραίνει τον αλγόριθμο και ως εκ τούτου δεν έχει καλά αποτελέσματα στο σύνολο των εικόνων.

Δυστυχώς, η παλαιά τεχνική παρουσιάζει ορισμένες βασικές ελλείψεις. Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, ως πρώτο βήμα, ο παραδοσιακός αλγόριθμος, εφαρμόζει το Γκαουσιανό φίλτρο στην εικόνα, με προκαθορισμένη την τιμή της τυπικής απόκλισης ($\sigma=2$). Αυτό, έχει, ως αποτέλεσμα, την εξαγωγή αρκετού θορύβου σε εικόνες υψηλής ανάλυσης, αφού η εξομάλυνση στην οποία οι τελευταίες υπόκεινται, είναι ανεπαίσθητη. Επίσης, υιοθετεί την τεχνική του υπολογισμού κλίσης με α' τάξης μερική παράγωγο στην εικόνα, εφαρμόζοντας ένα φίλτρο 2×2 (βλ. βήμα 2). Η μέθοδος αυτή, ούσα απλή είναι πολύ γρήγορη υπολογιστικά, αλλά ευαίσθητη σε τυχόν θόρυβο. Τέλος, ένα ακόμα πρόβλημα, που συναντάται, είναι το γεγονός ότι στο τελευταίο στάδιο της διπλής κατωφλίωσης του αλγόριθμου Canny, το όριο είναι προκαθορισμένο σε μια συγκεκριμένη τιμή, η οποία δυστυχώς δε μπορεί να αλλαχθεί από τον χρήστη. Το γεγονός αυτό, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται ο αλγόριθμος, μαζικά σε εικόνες, οι οποίες είναι πλούσιες όσον αφορά στην πληροφορία των ακμών, δεν εξάγεται η επιθυμητή πληροφορία και πολλές από τις εντοπισμένες ακμές αποτελούν θόρυβο.

Για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων, αξίζει να εξετασθεί η σύγχρονη έκδοση του αλγόριθμου, η οποία δοκιμάστηκε σε πολλά πειράματα στο αντικείμενο μελέτης, με την τροποποίηση δύο βασικών παραμέτρων.

Συγκεκριμένα, κάνοντας χρήση τη μέθοδο Canny στο λογισμικό, παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να τροποποιήσει τόσο, το όριο ευαισθησίας T , όπως αποκαλείται, όσο και την τυπική απόκλιση, σ του φίλτρου Gauss.

- **T** : Όριο που προσδιορίζεται με αριθμητικές τιμές, ή διάνυσμα δύο στοιχείων για τη μέθοδο Canny. Ουσιαστικά, ο εντοπισμός των ακμών, αγνοεί όλες τις ακμές που δεν είναι ισχυρότερες από το όριο. Εάν αυτό το όριο, δεν οριστεί από το χρήστη, το λογισμικό επιλέγει αυτόματα τις τιμές αυτές. Ουσιαστικά δηλαδή εφαρμόζει δύο όρια για την κλίση: ένα υψηλό όριο για χαμηλή ευαισθησία στον εντοπισμό και ένα χαμηλό για υψηλή ευαισθησία. Με τον τρόπο αυτό, η μέθοδος ξεκινά τον εντοπισμό με το υψηλό όριο και στη

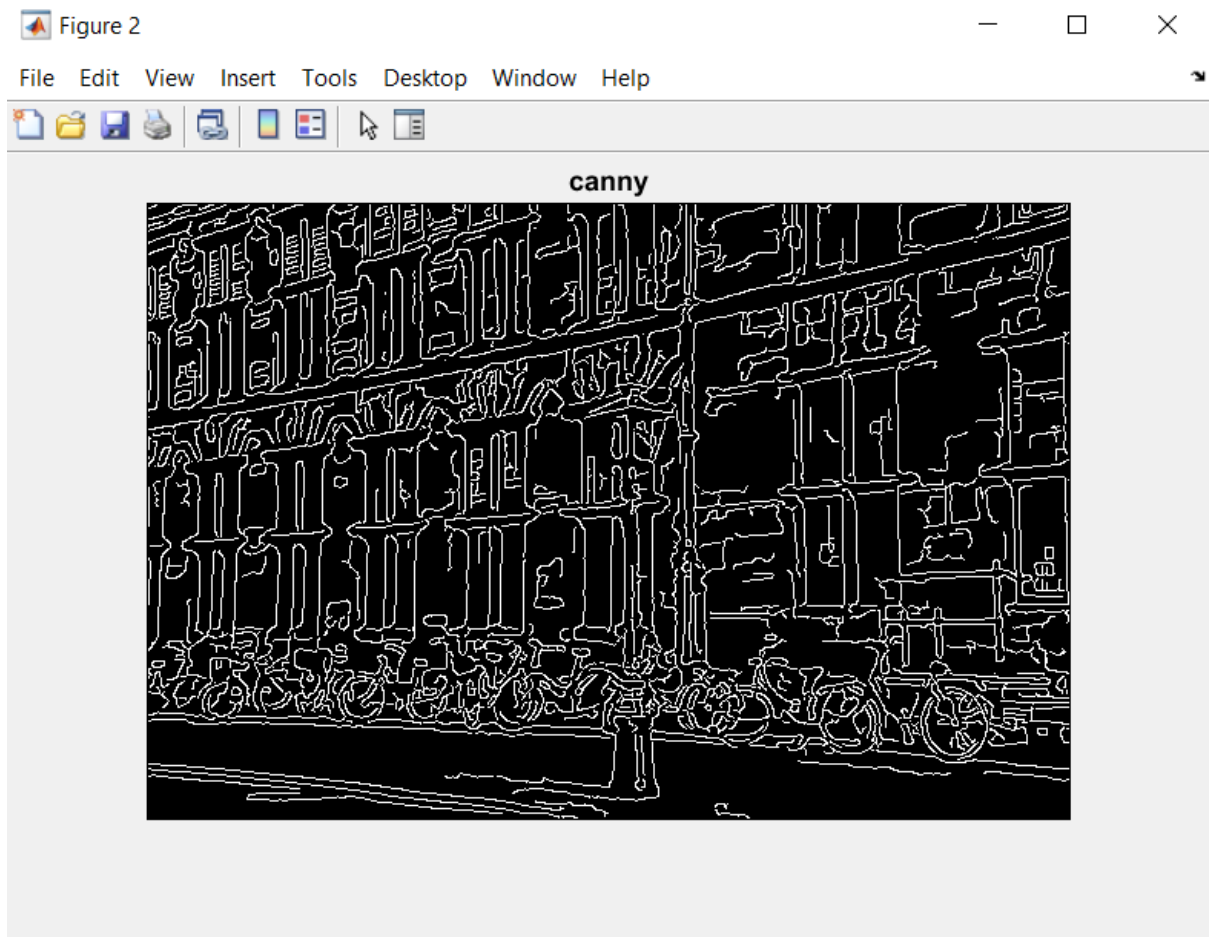
συνέχεια μειώνεται, ώστε να συμπεριλάβει εικονοστοιχεία από το χαμηλό όριο. Αυτό, συμβάλει στη συμπλήρωση κενών στις ανιχνευόμενες ακμές και στη σύνδεση εικονοστοιχείων που γειτνιάζουν και έχουν, πράγματι, σχέση μεταξύ τους. Σε όλες τις περιπτώσεις, η μέθοδος, επιλέγει το προεπιλεγμένο κατώφλι με προσεγγιστικό τρόπο, επεξεργαζόμενη τα δεδομένα εισόδου. Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να τροποποιηθεί το κατώτατο όριο και να επιλεγθεί το καταλληλότερο, η μέθοδος εκτελείται τουλάχιστον μια φορά καταγράφοντας το υπολογισμένο κατώφλι από το σύστημα, ως στοιχείο εξόδου. Στη συνέχεια, με αφετηρία την τιμή που υπολογίστηκε ως στοιχείο εισόδου, αυτή τη φορά, ρυθμίζεται το κατώτατο όριο σε μια υψηλότερη τιμή ή χαμηλότερη τιμή, για την ανίχνευση λιγότερων ή περισσότερων ακμών αντίστοιχα, ώστε να εξαχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

- **σ :** Αριθμητική τιμή που καθορίζει την τυπική απόκλιση του φίλτρου Gauss. Η προκαθορισμένη τιμή είναι $\sigma=2$. Με τον τρόπο αυτό ο αλγόριθμος επιλέγει το μέγεθος της μάσκας σύμφωνα με την τυπική απόκλιση. Όσο αυτή η τιμή αυξάνεται, τόσο εντονότερη είναι η εξομάλυνση που υπόκειται η εικόνα, άρα τόσο μεγαλύτερη σε διαστάσεις και η μάσκα συνέλιξης που χρησιμοποιείται.

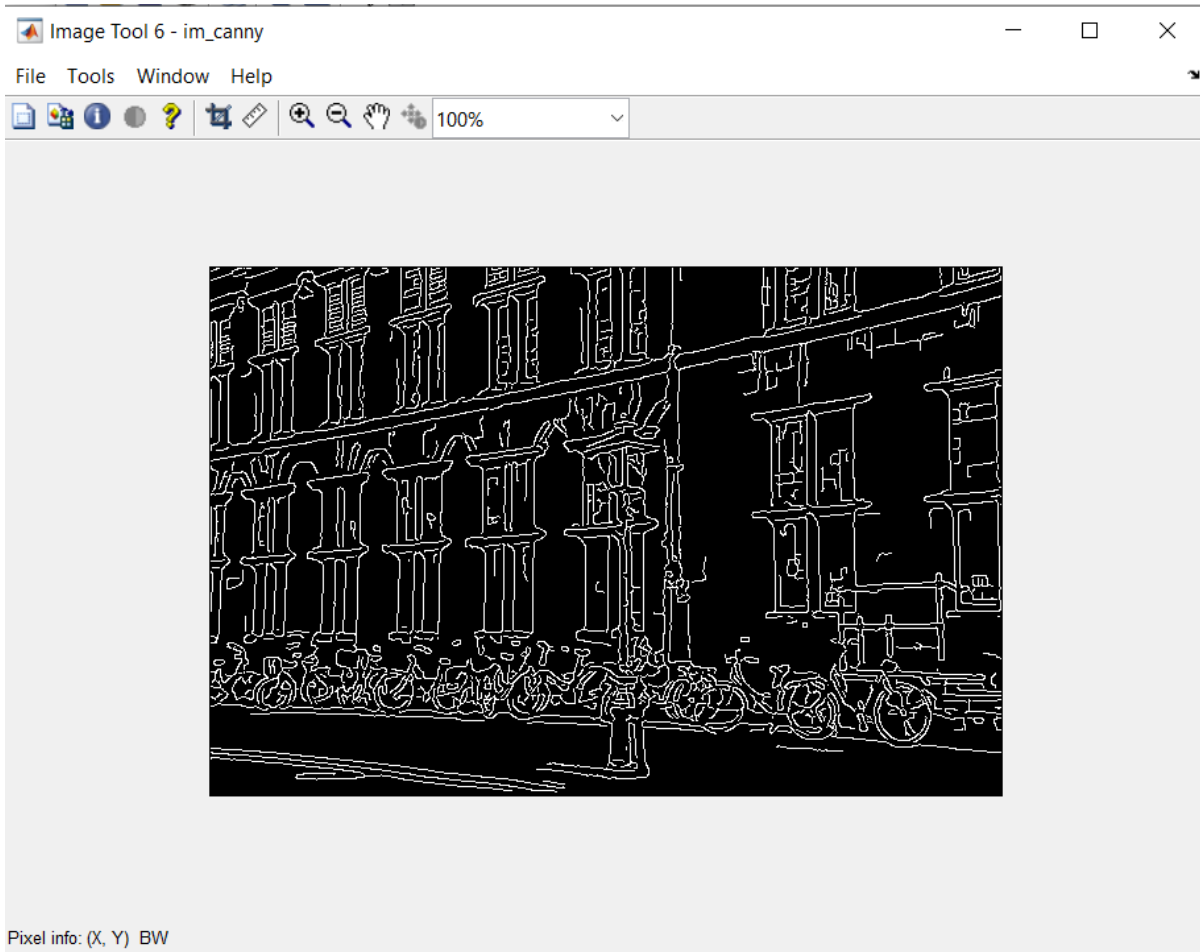
Σε γενικές εφαρμογές, οι εικόνες προς επεξεργασία είναι, κατά βάση, φτωχές σε ακμές – περιπτώσεις εικόνων από μικροσκοπία – και, σπανιότερα, εικόνες με πληθώρα ακμών – όπως στην περίπτωση σύνθετων μνημείων και κατασκευών. Στην περίπτωση αυτή, η αντίθεση των εικόνων ποικίλλει και είναι ασυνεχής. Επομένως, η επιλογή ενός ορίου, για όλη την εικόνα, δε θα είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα, αφού για κάποιες περιοχές μπορεί να ήταν είτε πολύ υψηλό, με αποτέλεσμα να χάνονται υπαρκτές και σημαντικές ακμές της σκηνής, είτε πολύ χαμηλό με αποτέλεσμα να εμφανίζεται έντονος θόρυβος. Ακόμα, κάθε εικόνα απεικονίζει εντελώς διαφορετικά αντικείμενα της πρόσοψης, γεγονός που, καθιστά την επιλογή ενός ορίου από μια μεμονωμένη εικόνα, φαινομενικά αδύνατη για το σύνολο και των υπόλοιπων εικόνων. Συνεπώς, υφίστανται μεταβολές τόσο σε συγκεκριμένες περιοχές της μίας εικόνας, αυτής καθαυτής, όσο και στις διαφορετικές εικόνες του δείγματος. Ωστόσο, όσον αφορά στο όριο ευαισθησίας για το στάδιο της διπλής κατωφλίωσης, μετά από πολλά πειράματα αλλά και με την εφαρμογή του, τουλάχιστον μια φορά και την εξαγωγή του ορίου από το σύστημα, βρέθηκε συγκεκριμένο εύρος τιμών το οποίο φαίνεται να λειτουργεί ικανοποιητικά στο σύνολο των εικόνων της παρούσας άσκησης. Φυσικά, σε διαφορετικές συλλογές εικόνων, οι τιμές αυτές θα διαφοροποιούνται.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι στην περίπτωση, κατά την οποία οι εικόνες έχουν υποστεί έντονη μείωση της ανάλυσής τους, οι διαφορές είναι ανεπαίσθητες στις περισσότερες εικόνες. Παρόλα αυτά, σε ορισμένες από αυτές, παράγουν καλύτερα αποτελέσματα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται παρακάτω (βλ. εικόνες 4.5

& 4.6). Η χρήση της μεθόδου αυτής, σε αυτή τη φάση, υπενθυμίζεται ότι έγινε χωρίς την εφαρμογή ενισχυτικών φίλτρων στην αρχική εικόνα ώστε να εξετασθεί κατά πόσο αυτή ανταποκρίνεται στις δυσμενέστερες συνθήκες. Ο αλγόριθμος αυτός, γίνεται πολύ συχνά χρήση και έχει πλέον αντικαταστήσει την παλιά έκδοση που, ακόμα εμπεριέχεται στο λογισμικό MATLAB:



Εικόνα 4.5 : Χρήση της παραδοσιακής μεθόδου Canny με χρήση των προκαθορισμένων τιμών, με επαναφορά στην αρχική ανάλυση (6016x4016)



Εικόνα 4.6: Χρήση της σύγχρονης μεθόδου Canny με μεταβολή των παραμέτρων T , σ , με επαναφορά στην αρχική ανάλυση (6016x4016)

Παρατηρείται, επομένως, ότι η ευελιξία που παρέχει η βελτιωμένη έκδοση του αλγορίθμου, δίνει την επιλογή να μειωθεί ο ενδεχόμενος θόρυβος, αλλά, παράλληλα, να διατηρηθούν τα σημαντικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία της σκηνής.

Δεδομένου του πλεονεκτήματος της βελτιωμένης τεχνικής του αλγορίθμου, παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και στη 2^η περίπτωση, όπου χρησιμοποιούνται οι αρχικές εικόνες υψηλής ανάλυσης.

2^η περίπτωση: Διατήρηση αρχικής ανάλυσης – Ακρίβεια, Χαμηλή ταχύτητα

- Ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων μειωμένης ανάλυσης, με τη χρήση ενισχυτικών φίλτρων για τις ακμές, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια.
- Χρήση των τεχνικών που περιέχει η εργαλειοθήκη του λογισμικού για την ανίχνευση των ακμών στις επεξεργασμένες εικόνες του προηγούμενου βήματος -Sobel, Prewitt, Roberts, Marr-Hildreth. Οι τεχνικές αυτές αναλύθηκαν και στο προηγούμενο κεφάλαιο.
- Χρήση του αλγόριθμου Canny σε όλες τις εικόνες και σύγκριση με τις μεθόδους του προηγούμενου βήματος με οπτική αξιολόγηση.
- Αυτόματη εξαγωγή και αποθήκευση των εικόνων των ακμών σε ξεχωριστό φάκελο με ίδιο όνομα.
- Εναπόθεση της εικόνας των ακμών στην αρχική εικόνα και αποθήκευσή της, για περαιτέρω χρήση σε λογισμικά τρισδιάστατης μοντελοποίησης.
- Επανάληψη της διαδικασίας στην επόμενη εικόνα του δείγματος.



Εικόνα 4.7 : Αρχική εικόνα (6016x4016)



Εικόνα 4.8 : Δυαδική εικόνα των ακμών με χρήση των προκαθορισμένων τιμών

Όπως παρατηρείται, η παραπάνω εικόνα (Εικόνα 4.8) παρέχει πολύ περισσότερη πληροφορία και με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο, ο όγκος αυτής της πληροφορίας δεν είναι βοηθητικός για το σκοπό της μελέτης, καθώς στόχος είναι να αποτυπωθούν τα βασικά στοιχεία της κατασκευής, όπως αυτά θα καταγράφονταν σε μια πρόσοψη ενός τοπογραφικού και αρχιτεκτονικού σχεδίου. Επομένως, μένει να εξετασθεί και σε αυτή την περίπτωση, κατά πόσο υπάρχει η δυνατότητα να μειωθεί αυτός ο θόρυβος, όσο το δυνατόν πιο αυτόματα γίνεται, εφαρμόζοντας την παραμετροποίηση των αρχικών τιμών, αλλά και πρόσθετων φίλτρων, πριν τον εντοπισμό των ακμών, όπως αυτά αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι το αποτέλεσμα μπορεί να βελτιωθεί με τη χειροκίνητη παρέμβαση από το χρήστη, για καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα, αλλά και για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς το λογισμικό παρέχει πολλά εργαλεία επεξεργασίας εικόνων πριν και μετά τον εντοπισμό των ακμών. Ωστόσο, αυτό είναι κάτι το οποίο είναι αρκετά χρονοβόρο, ειδικά σε ογκώδεις συλλογές εικόνων που συχνά χρησιμοποιούνται συλλογικά για την τρισδιάστατη ανακατασκευή. Αντίθετα, με τη χρήση κώδικα δίνεται η δυνατότητα λειτουργίας, μαζικά και ταχύτατα, με ικανοποιητική ακρίβεια, όπως φαίνεται και από το αποτέλεσμα, γεγονός που αποτελεί και το στόχο της εργασίας που είναι η κατά δυνατόν μεγαλύτερη αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Στην περίπτωση αυτή, σε αντίθεση με την περίπτωση 1, είναι απαραίτητη η εφαρμογή ορισμένων φίλτρων, στο στάδιο της ψηφιακής προ-επεξεργασίας εικόνων. Επιπρόσθετα βήματα υπερτονίζονται παρακάτω. Ύστερα, από την εφαρμογή του αλγορίθμου σε πολλές εικόνες του δείγματος, η διαδικασία, σε στάδια, για την επίλυση του προβλήματος που εντοπίζεται στην παραπάνω εικόνα (βλ. εικόνα 4.8) του δείγματος και για τη μείωση της περιττής πληροφορίας, είναι η εξής:

- ❖ Μετατροπή της αρχικής εικόνας σε ασπρόμαυρη.
- ❖ Εφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής στην ασπρόμαυρη εικόνα.
- ❖ Εφαρμογή του αμφίπλευρου φίλτρου στην εικόνα του προηγούμενου βήματος, όπως αυτό αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο με εύρος τιμών $DoS=[200, 500]$ και τυπική απόκλιση $\sigma=10$.
- ❖ Εφαρμογή εντοπισμού ακμών με τη μέθοδο Canny, με όριο ευαισθησίας 0.2 και $\sigma=4$ ή $\sigma=6$.
- ❖ Επιλογή της κατάλληλης εικόνας οπτικά ($\sigma=4$ ή $\sigma=6$) και αποθήκευση αυτής.

Παρακάτω, παρουσιάζεται η εικόνα που προέκυψε μετά την εφαρμογή των βοηθητικών φίλτρων και παραμέτρων. Όπως γίνεται αντιληπτό, μειώνεται αισθητά το πρόβλημα του θορύβου. Αξίζει σε αυτό το σημείο, να αναφερθεί ότι όλες οι ενδιάμεσες τιμές για τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν, μπορούν να τροποποιηθούν, από το χρήστη, ώστε να οριστούν αυτοβούλως, ανάλογα με το αντικείμενο και το σκοπό της μελέτης, καθώς και την επιθυμητή λεπτομέρεια, που ο κάθε χρήστης επιζητεί.



Εικόνα 4.9 : Δυαδική εικόνα με τροποποιημένες τις προκαθορισμένες παραμέτρους αλλά και με τη χρήση φίλτρου υποβοήθησης

Αξιολόγηση της μεθόδου και συμπεράσματα

Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί το αποτέλεσμα στις εικόνες, αλλά και κατά πόσο η ακρίβεια της μεθόδου είναι αντίστοιχη των προδιαγραφών για το σκοπό της μελέτης. Είναι κομβικό να διαπιστωθεί, αρχικά, αν οι ακμές αντιπροσωπεύουν πράγματι τα όρια των αντικειμένων και τη γεωμετρία που χαρακτηρίζει τις αρχικές εικόνες, ειδικά στην περίπτωση που οι τελευταίες υφίστανται μεγάλη μείωση στην ανάλυσή τους, η οποία μετά επαναφέρεται στην αρχική.

Για να πραγματοποιηθεί αυτή η αξιολόγηση, τόσο για την πρώτη όσο και για τη δεύτερη περίπτωση, κατασκευάστηκε ένα πρόγραμμα το οποίο αξιοποιεί τις ασπρόμαυρες εικόνες με την πληροφορία των ακμών, όπως αυτές δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο στάδιο και, στη συνέχεια, τις επιθέτει στην αρχική εικόνα, υπερτονίζοντάς τις με έντονο διαφορετικό χρώμα ώστε να είναι ευδιάκριτες. Πιο συγκεκριμένα, έχοντας την πληροφορία των εικονοσυντεταγμένων για τα σημεία που αποτελούν ακμές από την ασπρόμαυρη μάσκα, δίνεται η δυνατότητα να τροποποιηθεί το χρώμα στις θέσεις της έγχρωμης εικόνας, όπου εντοπίζονται ακμές και, ως εκ τούτου να υπερτονιστούν, διατηρώντας παράλληλα την πληροφορία και το χρώμα στα υπόλοιπα εικονοστοιχεία. Το βήμα αυτό θα γίνει αντιληπτό παρακάτω (βλ. εικόνες 5.1 – 5.10).

Αξίζει να σημειωθεί, στο σημείο αυτό, ότι η επιλογή του κόκκινου χρώματος, έγινε διότι, όπως παρατηρήθηκε, τόσο αυτό, όσο και οι κοντινές αποχρώσεις του, συναντώνται σε πολύ μικρότερο βαθμό από άλλα χρώματα. Ωστόσο, σε ένα διαφορετικό σύνολο εικόνων, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής άλλου χρώματος, ανάλογα με το αντικείμενο που απεικονίζεται. Με τον τρόπο αυτό, κατασκευάζεται μια νέα εικόνα, η οποία έχει μεν την πληροφορία των ακμών, αλλά παράλληλα διατηρεί το αρχικό χρώμα στις υπόλοιπες ψηφίδες και, η οποία αποθηκεύεται σε ξεχωριστό αρχείο.

Ωστόσο, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, οι νέες αυτές εικόνες δεν περιέχουν την πληροφορία του εσωτερικού προσανατολισμού και γενικά όλων των μετά-δεδομένων που υπάρχουν στις αρχικές εικόνες, όπως αυτές θα μεταφέρονταν υπό άλλες συνθήκες από την κάμερα κατά την εισαγωγή τους στο υπολογιστικό σύστημα και, στη συνέχεια, σε άλλο πρόγραμμα καταγραφής. Αυτό συμβαίνει διότι, στο λογισμικό MATLAB, οι νέες εικόνες που κατασκευάζονται, αποτελούν αμιγώς πίνακες με την πληροφορία του χρώματος για κάθε κελί και μόνο, ενώ παράλληλα, το συγκεκριμένο λογισμικό δεν δίνει αυτή τη δυνατότητα. Ωστόσο, αυτό δεν επιφέρει

κάποιο περαιτέρω πρόβλημα στην εξέλιξη της διαδικασίας, που να μην μπορεί να επιλυθεί, όπως θα διαπιστωθεί και στα επόμενα στάδιά της.

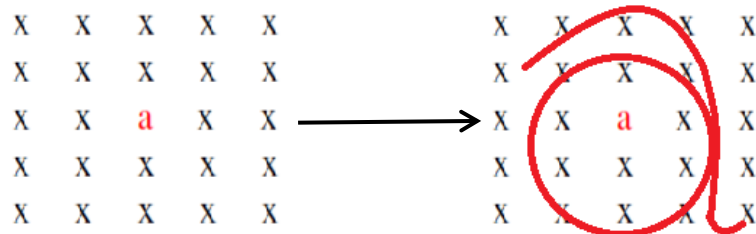
1^η περίπτωση: Μειωμένη ανάλυση – Αυξημένη ταχύτητα αλγορίθμου

Όπως φαίνεται, από τις εικόνες του δείγματος που ακολουθούν παρακάτω (βλ. εικόνα 5.1 έως 5.5), οι ακμές πράγματι αντιπροσωπεύουν την αρχική γεωμετρία της σκηνης. Ωστόσο, εάν κανείς επικεντρωθεί σε συγκεκριμένες περιοχές των εικόνων, κυρίως στις ακμές στις οποίες είναι καμπύλες, παρατηρείται ελλιπής πληροφορία, η οποία δεν αντιπροσωπεύει με ακρίβεια τη γεωμετρία και το σχήμα των στοιχείων της κατασκευής που απεικονίζεται. Το πρόβλημα αυτό, γίνεται έντονα ορατό στην εικόνα 5.5 που ακολουθεί παρακάτω. Το σφάλμα αυτό, κυρίως στις καμπυλόγραμμες ακμές, οφείλεται στη διαφορά της ανάλυσης της εικόνας, η οποία έχει ως έμμεση συνέπεια την αύξηση του μεγέθους του εικονοστοιχείου.

Στο σημείο αυτό,, υπενθυμίζεται ότι στόχος είναι να γίνει ένας χονδρικός εντοπισμός των ακμών, που να περιλαμβάνει κυρίως τα σημαντικά οργανικά και διακοσμητικά στοιχεία και μέρη της κατασκευής προς καταγραφή, όπως είναι το περίγραμμα των παραθύρων, της πόρτας, των σωληνώσεων, η βάση του κτιρίου και οι σκάλες, ή με άλλα λόγια οτιδήποτε περιγράφει το αποτύπωμα της πρόσοψης (footprint of building facade). Επομένως, αν και η μείωση της ανάλυσης συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στο σκοπό αυτό, δε συνεπάγεται ότι η εύρεση είναι ακριβής και αξιόπιστη, πόσο μάλλον στην περίπτωση που ο εντοπισμός των ακμών γίνεται στις χαμηλής ανάλυσης εικόνες. Είναι σημαντικό, δηλαδή, να τονιστεί ότι ακολουθεί ένας αλγόριθμος δημιουργίας νέων εικόνων-ακμών, που θα ανταποκρίνονται στις αρχικές διαστάσεις, από τα περιορισμένα εικονοστοιχεία των εικόνων χαμηλής ανάλυσης, οι οποίες εν τέλει επιτίθενται στις αρχικές εικόνες. Γίνεται ξεκάθαρο, ότι μεσολαβούν πολλές διαδικασίες που θα επιφέρουν ενδεχόμενα σφάλματα προς αξιολόγηση.

Για να γίνει το παραπάνω πρόβλημα πιο αντιληπτό, υπενθυμίζεται ότι ο εντοπισμός των ακμών στα διακριτά στοιχεία της εικόνας, κατά το βήμα 3 του αλγορίθμου Canny (βλ. εικόνα 3.6 & 3.7), εκπίπτει σε μια ευρύτερη περιοχή του εικονοστοιχείου. Με άλλα λόγια, κατά τη διαδικασία μείωσης της ανάλυσης της εικόνας, η ίδια περιοχή που θα απεικονιζόταν σε 150x150 εικονοστοιχεία, τώρα θα απεικονίζεται σε 15x15. Αυτό, πρακτικά σημαίνει ότι, η μονάδα της εικόνας, δηλαδή το εικονοστοιχείο, αυτό καθαυτό, μεγεθύνεται κατά 5 φορές. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση, ένα εικονοστοιχείο, θα απεικονίζει πολύ μεγαλύτερη πληροφορία, η οποία χάνεται, αφού κατά τη διαδικασία μείωσης της ανάλυσης, η τιμή της έντασης σε αυτό είναι

αναγκαστικά μοναδική και θα «απορροφά» τις τιμές των γειτονικών ψηφίδων (βλ. εικόνα 3.6.1 & 3.6.2). Για το λόγο αυτό, ο εντοπισμός των ακμών στις εικόνες αυτές, είναι σχετικά χονδροειδής, με απώλεια στην πληροφορία του σχήματος των καμπύλων λεπτομερειών.

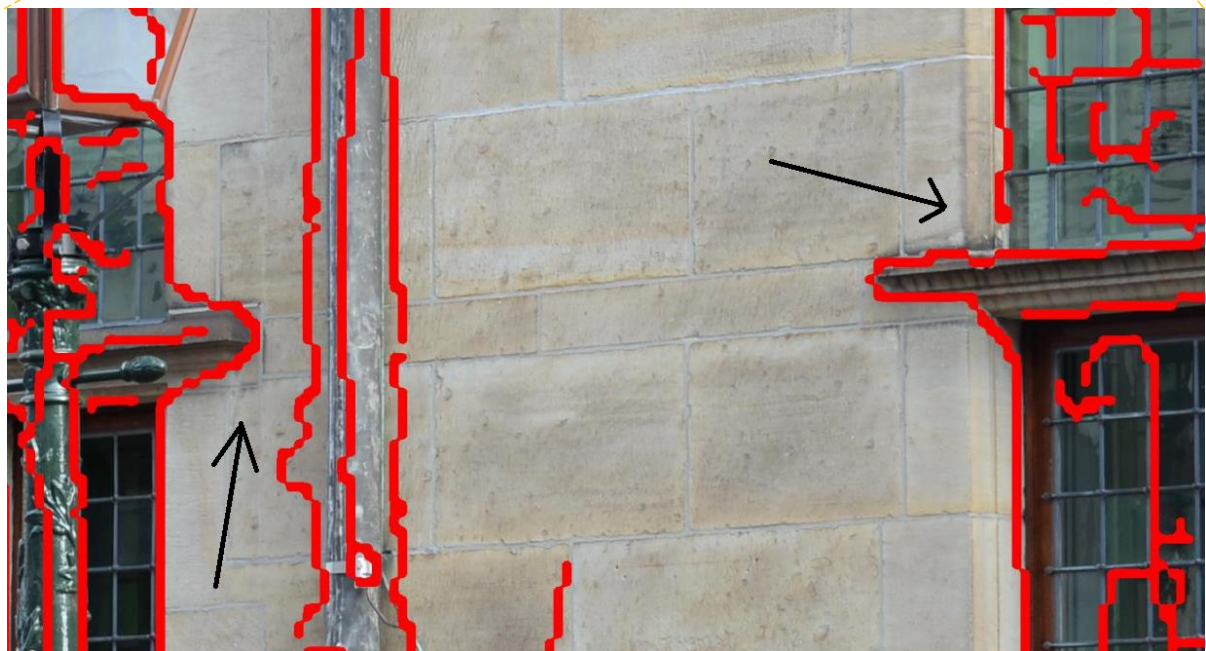
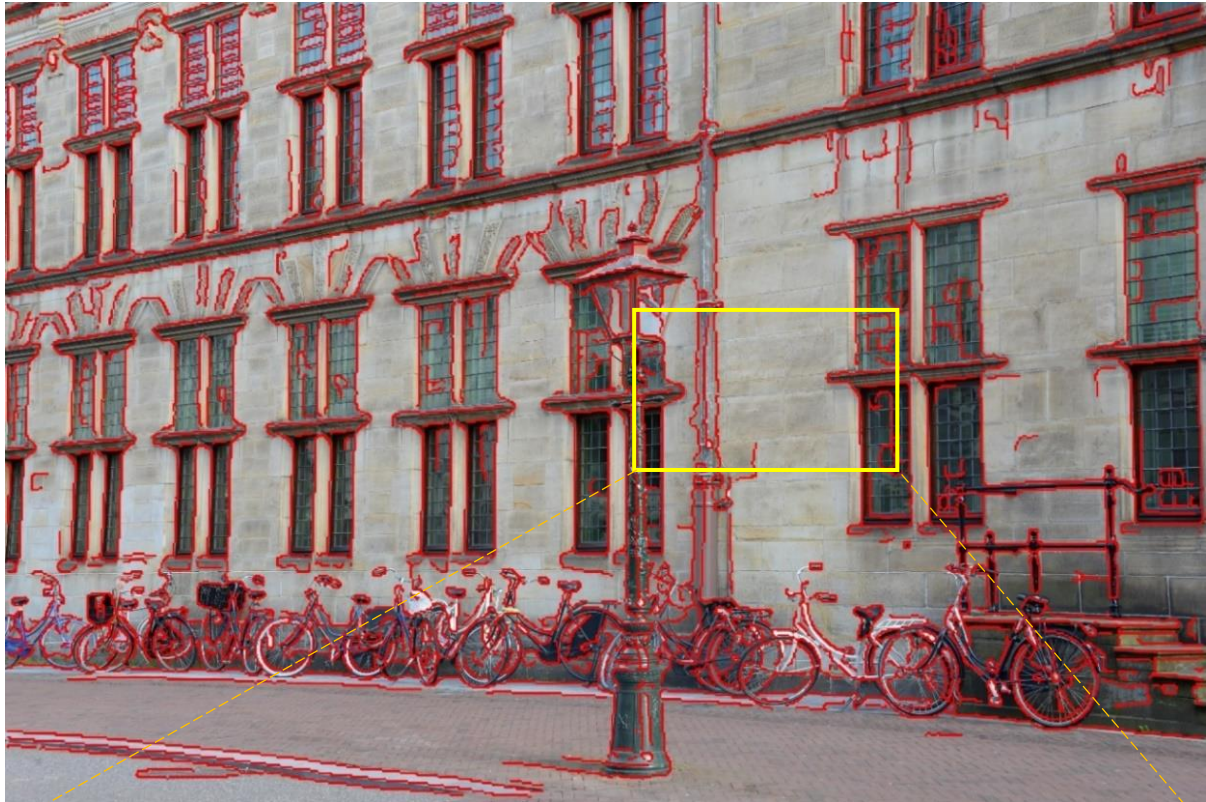


Εικόνα 3.6.1 & 3.6.2: Επίδειξη της ίδιας περιοχής στην εικόνα της αρχικής ανάλυσης έναντι της εικόνας με τη μειωμένη

Αναπόφευκτα, καταγράφεται ταυτόχρονα και θόρυβος, ο οποίος εντοπίζεται, στη συγκεκριμένη περίπτωση, στη βάση της πρόσοψης του κτιρίου. Ο θόρυβος αυτός, σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας είναι αδύνατο να εξαλειφθεί. Προφανώς, υπό διαφορετικές συνθήκες θα ήταν δυνατό να αποφευχθεί κατά τη διαδικασία της φωτογραφικής τεκμηρίωσης στο πεδίο. Ωστόσο στην περίπτωση αυτή, υπάρχει η δυνατότητα χειροκίνητης παρέμβασης στο πυκνό νέφος σημείων, ώστε να εξαλειφθούν τυχόν σημεία εκτός του ενδιαφέροντος. Πέρα από το παραπάνω πρόβλημα, η επιφάνεια και η υφή του αντικειμένου μελέτης, είναι αρκετά πολύπλοκη και μάλιστα περιέχει έντονη πληροφορία και διαφορετικά μέρη της κατασκευής με έντονες αλλαγές φωτεινότητας και χρώματος, καθώς και υλικών έντονης ανακλαστικότητας. Το γεγονός αυτό, δημιουργεί την ανάγκη σε κάθε εικόνα να γίνει διαφορετική χρήση του αλγόριθμου αλλά και μια προ-επεξεργασία των εικόνων, ώστε να μειωθεί ο ενδεχόμενος θόρυβος που θα προκύψει στη συνέχεια.

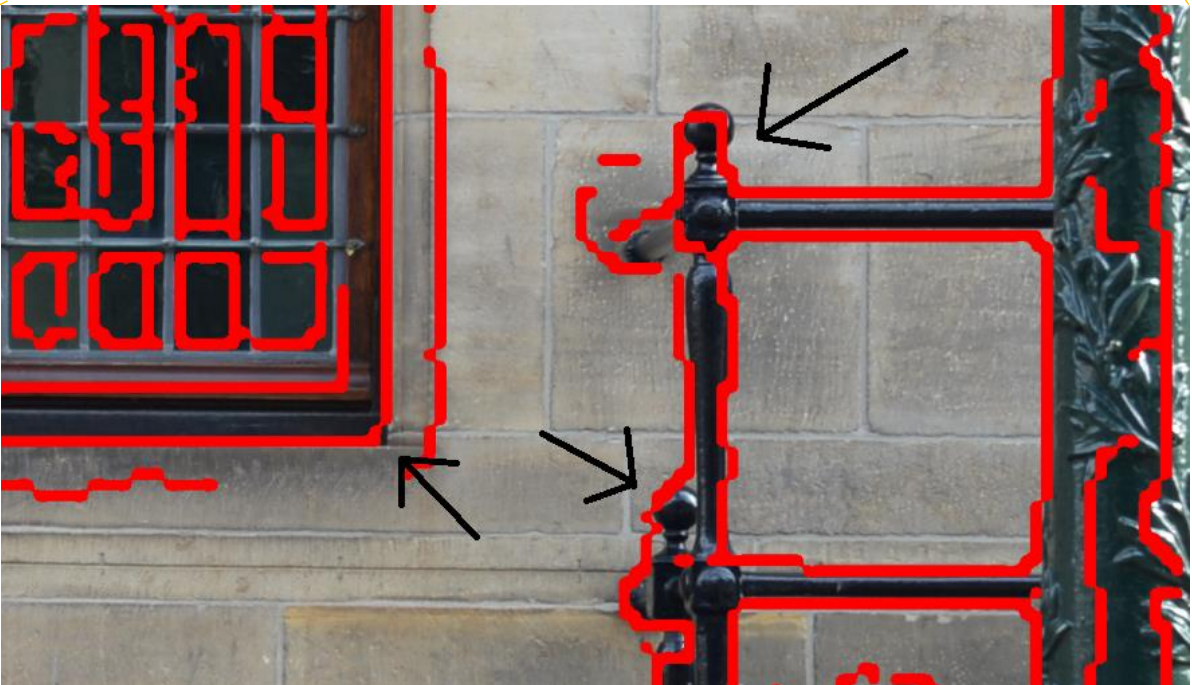
Προφανώς, πέρα από το παραπάνω πρόβλημα, λόγω, αρχικά, της έντονης μείωσης της ανάλυσης των εικόνων, στη συνέχεια, του εντοπισμού των ακμών σε αυτές, και, τέλος, της επαναφοράς τους στην αρχική ανάλυση, το πάχος των ακμών που προκύπτουν είναι αναπόφευκτα ιδιαίτερα μεγάλο και σε ορισμένες περιπτώσεις, αποκρύπτει πληροφορία των γειτονικών ψηφίδων. Το γεγονός αυτό, επιφέρει επιπρόσθετη επεξεργασία στην εικόνα, αφού έχουν εντοπιστεί οι ακμές ώστε, να μειωθεί το πάχος. Το λογισμικό δίνει αυτή τη δυνατότητα απευθείας στη μάσκα και πριν την εναπόθεσή τους στην αρχική εικόνα, ωστόσο για την αποτελεσματική σύγκριση αλλά και την επίδειξη των σημείων, στα οποία υστερεί αυτή η μέθοδος σε σχέση με την επόμενη, θα διατηρηθεί το συγκεκριμένο πάχος.

Δύο χαρακτηριστικά παράδειγμα του δείγματος που επιδεικνύουν τη διαφορετική αντιμετώπιση που χρειάζεται κάθε εικόνα, όπως προέκυψε με την κατασκευή του προγράμματος, φαίνονται παρακάτω.



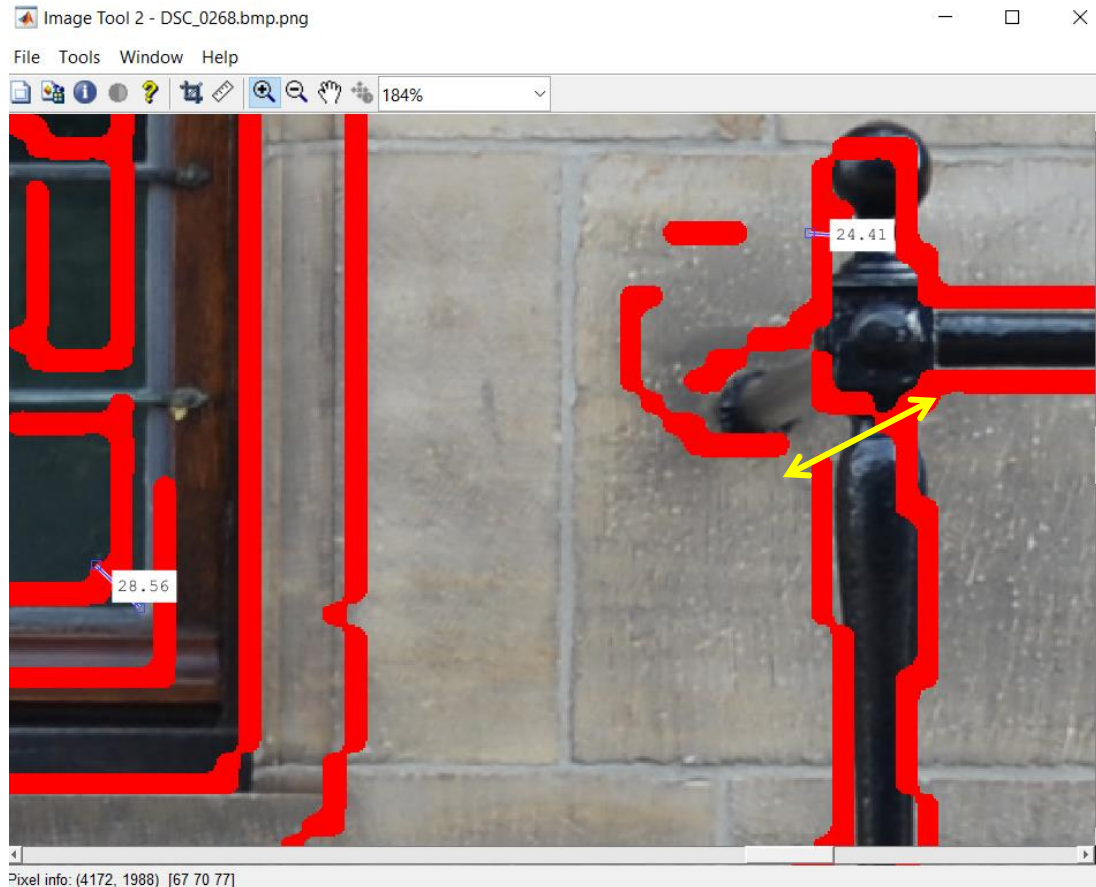
Εικόνα 5.1 – 5.2 : Επισήμανση προβληματικών περιοχών

Ορφέας Σκέντζος
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΚΜΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ ΣΗΜΕΙΩΝ



Εικόνα 5.4 : Επισήμανση προβληματικών περιοχών





Εικόνα 5.5 : Επισήμανση ακμών Α' περίπτωσης με μεγάλο σφάλμα εντοπισμού και πάχος

Όπως γίνεται αντιληπτό, το χονδροειδές αυτό σφάλμα που μπορεί να προκύψει σε ορισμένες περιοχές, ξεπερνάει και τις 30 ψηφιακές μονάδες (pixel). Αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 5-6 cm πραγματικού σφάλματος στον χώρο, γεγονός που καθιστά τις εικόνες αυτές, οριακά μη αξιοποιήσιμες για το σκοπό της μελέτης. Αν αναλογιστεί κανείς, τη γεωμετρία της επίπεδης εικόνας, το σφάλμα αυτό θα μπορούσε κάλλιστα κατά τη μεταφορά του στο τρισδιάστατο μοντέλο, το οποίο μιμείται τον πραγματικό χώρο και επομένως αποκτά και τρίτη διάσταση, δηλαδή το βάθος, να είναι κατά πολύ μεγαλύτερο. Το σφάλμα αυτό, γίνεται αντιληπτό στην παραπάνω εικόνα, στην οποία το αντικείμενο στα δεξιά, έχει μια διαφορά βάρους με το τείχος της κατασκευής της τάξης του ενός μέτρου. Κατά συνέπεια, οι λανθασμένα εντοπισμένες ακμές, που αποτυπώνονται στον τοίχο, θα έχουν σφάλμα μεγαλύτερο του 1 μέτρου.

Το σφάλμα αυτό είναι ανεξάρτητο της ανάλυσης της αρχικής εικόνας αλλά και της υπό-περιοχής στην οποία αυτή βρίσκεται, δηλαδή στο κέντρο ή στα άκρα της εικόνας. Παράλληλα, είναι προφανές ότι παρόλο που και το πάχος των ακμών ανέρχεται στις 8 ψηφίδες, ακόμα και με την επιπρόσθετη επεξεργασία της εικόνας για τη μείωσή του, a posteriori, το πρόβλημα του αναξιόπιστου εντοπισμού, το οποίο φυσικά προηγείται και γίνεται στην εικόνα με τη μειωμένη ανάλυση, θα παραμείνει. Αξίζει, ωστόσο, να αναφερθεί, ότι η χρήση των εικόνων αυτών έχει το σημαντικό

πλεονέκτημα του μειωμένου χρόνου, καθώς στην αρχή της διαδικασίας της εξαγωγής των ακμών στην εικόνα η επεξεργασία εκτελείται ταχύτατα. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος περάτωσης όλων των εικόνων και εξαγωγής των ακμών στο λογισμικό Matlab, ήταν δέκα (10) φορές ταχύτερος της δεύτερης μεθόδου για το σύνολο των εικόνων. Το μόνο πρόσθετο βήμα που χρειάστηκε ήταν η μείωση της ανάλυσης όλων των εικόνων, όπως αναφέρθηκε σε άλλο κεφάλαιο αλλά η διαδικασία αυτή είναι απλή και γρήγορη. Ωστόσο σε επόμενο στάδιο, η δημιουργία του νέφους και στις δύο περιπτώσεις δε διαφέρει όσον αφορά τον όγκο των σημείων που παράγονται κατά το αραιό και πυκνό νέφος. Μάλιστα συναντώνται και δυσκολίες που σχετίζονται με τη μειωμένη ακρίβεια αλλά και το αυξημένο πάχος των ακμών, οι οποίες θα αναλυθούν και στην πορεία. Συγκεκριμένα, στο στάδιο της ανακατασκευής του τρισδιάστατου μοντέλου μέσω των εικόνων ακμών, θα αξιολογηθεί κατά πόσο ο εντοπισμός με τη συγκεκριμένη μέθοδο, είναι ικανοποιητικός για το σκοπό της μελέτης και κατά πόσο η μεταφορά από την εικόνα στο τρισδιάστατο μοντέλο, ενέχει πιθανότητες μετάδοσης ή και αυξομείωσης του σφάλματος στο νέφος σημείων.

Είναι επίσης πολλά ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο συγκεκριμένο στάδιο της τρισδιάστατης απόδοσης, καθώς λόγω της πληθώρας των επικαλυπτόμενων αλλά και του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί η τεχνική της δομής προερχόμενης από κίνηση, ενέχει τον κίνδυνο να βγάλει έντονο θόρυβο με περίσσεια σημείων ενδιαφέροντος. Επομένως, οι εντοπισμένες ακμές, ενδεχομένως να πρέπει να είναι όσο το δυνατόν αφαιρετικές και απλές, ακόμα και αν σε μερικές εικόνες, φαινομενικά είναι ελλιπείς.

Για να γίνει το παραπάνω πρόβλημα αντιληπτό, έστω οι επικαλυπτόμενες εικόνες των ακμών του δείγματος της 1^{ης} περίπτωσης παρακάτω:



Εικόνα 5.6 : Τριάδα επικαλυπτόμενων εικόνων της 1^{ης} περίπτωσης κατά μήκος



Εικόνα 5.7 : Τριάδα επικαλυπτόμενων εικόνων της 1^{ης} περίπτωσης κατά μήκος

Όπως παρατηρείται οι παραπάνω εικόνες, πέραν του θορύβου που εντοπίζεται σε πολλά σημεία της πρόσοψης, έχουν ιδιαίτερα μεγάλο επικαλυπτόμενο κομμάτι τόσο κατά μήκος όσο και κατά πλάτος κατά τη διαδικασία της λήψης. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο πρόγραμμα, να αποδίδει χρώμα από μια πληθώρα εικόνων κατά τη διαδικασία αυτή, γεγονός που μπορεί να επιφέρει έντονο θόρυβο και περίσσεια κόκκινων σημείων που αποτελούν ακμές, όπως θα αποδειχθεί και παρακάτω.

2^η περίπτωση: Υψηλή ανάλυση - Ακρίβεια – Πιο αργός χρόνος περάτωσης

Σε αυτή την περίπτωση, το οπτικό αποτέλεσμα διαφέρει κατά πολύ του προηγούμενου, καθώς το πάχος των ακμών είναι αισθητά μικρότερο, αλλά και η πληροφορία για τις ακμές στην εικόνα είναι πολύ πιο πλούσια και ακριβής. Οι εικόνες του δείγματος που χρησιμοποιούνται ως παραδείγματα είναι οι ίδιες με την πρώτη περίπτωση για καλύτερη αξιολόγηση και σύγκριση του αποτελέσματος.

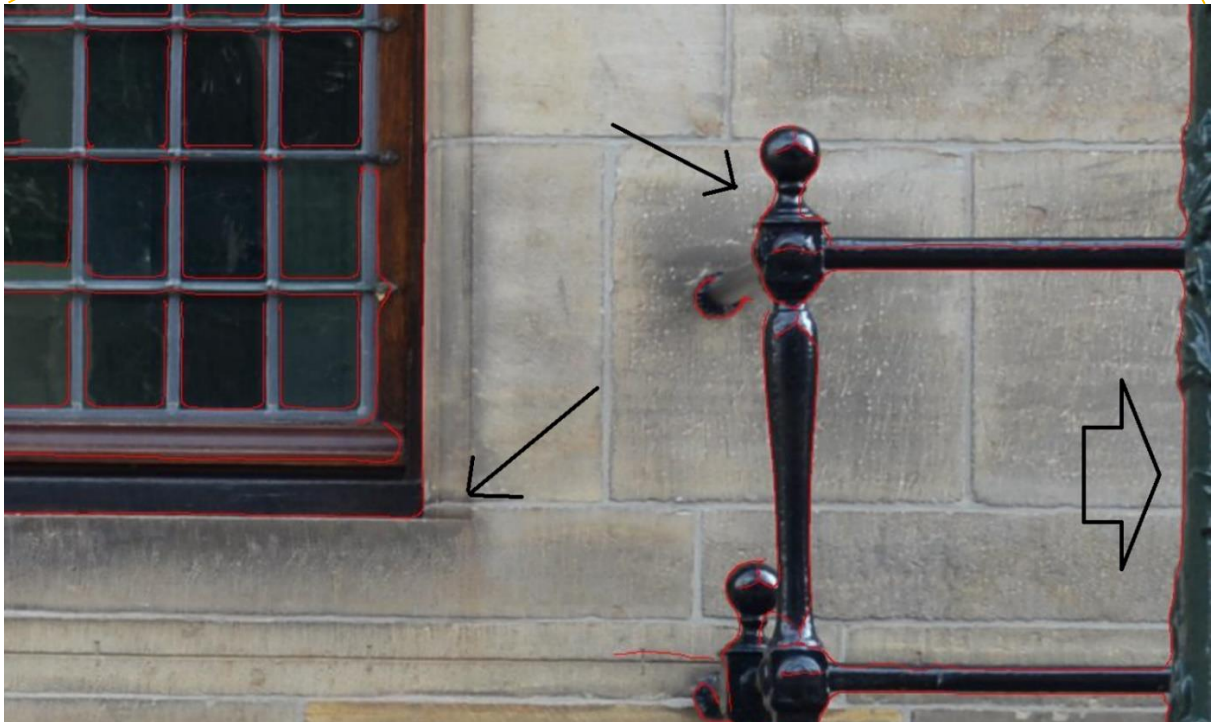
Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι όλες οι λεπτομέρειες της επιφάνειας της πρόσοψης του κτιρίου είναι εμφανείς, εφόσον γίνει χρήση του αλγορίθμου χωρίς καμία προ-επεξεργασία, όπως φαίνεται καθαρά και στην εικόνα 4.8 του προηγούμενου κεφαλαίου. Στην περίπτωση της καταγραφής, μόνο των σημαντικών μερών της κατασκευής, προφανώς η πληροφορία αυτή είναι περιττή. Ωστόσο, είναι πολύ σημαντικό να αναλογιστεί κανείς τις προεκτάσεις του συγκεκριμένου πλεονεκτήματος, καθώς η πληροφορία αυτή για τις ακμές μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη σε άλλες εφαρμογές.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί ένα πρόγραμμα επίβλεψης και εποπτείας ευαίσθητων μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς, για τη διατήρησή τους. Με την καταγραφή των ρωγμών στην επιφάνειά τους, είναι δυνατόν να εντοπιστεί οποιαδήποτε παθογένεια ενδέχεται να απαντάται στα θεμέλια και στη βάση αυτών, ώστε να αποφευχθεί οποιοσδήποτε ενδεχόμενος κίνδυνος κατάρρευσης. Η ακρίβεια εντοπισμού, λοιπόν, των ακμών σε αυτή την περίπτωση πρέπει να είναι ιδιαίτερα υψηλή, ώστε το σύστημα εποπτείας των διάφορων μικρό-κινήσεων να μην είναι εσφαλμένο. Ακόμα, ο έλεγχος θα ήταν αισθητά ευκολότερος με τον τρόπο αυτό, ειδικά σε περιπτώσεις συντήρησης μνημείων και συγκεκριμένα σε σύγχρονες κατασκευαστικές παρεμβάσεις που αυτά έχουν υποστεί, όπου στόχος είναι να εντοπιστούν τυχόν διαφορές μετά την μετατροπή τους, από ανθρώπινα ή και φυσικά αίτια.

Ωστόσο, για το σκοπό της παρούσας εργασίας, θα γίνει χρήση των εικόνων με την εφαρμογή του φίλτρου ενδιάμεσης τιμής, του αμφίπλευρου φίλτρου, αλλά και της σύγχρονης τεχνικής του αλγορίθμου Canny, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο

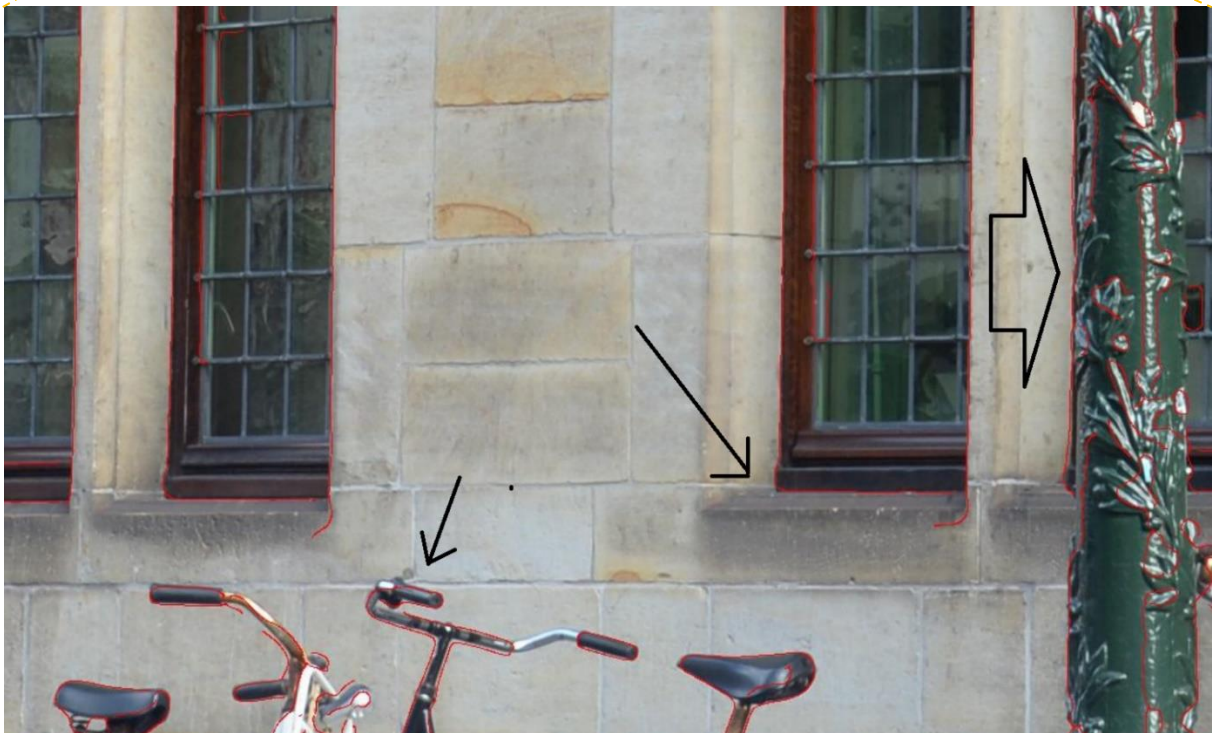
Ορφέας Σκέντζος
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΚΜΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ
ΣΗΜΕΙΩΝ

κεφάλαιο, ούτως ώστε οι ακμές που θα εντοπιστούν να είναι οι απολύτως απαραίτητες. Ο παραπάνω αλγόριθμος της διαδικασίας με τη συγκεκριμένη σειρά, προέκυψε ύστερα από την πειραματική δοκιμή πολλών εναλλακτικών βημάτων. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 5.6 & 5.7 : Εύρεση ακμών με a priori επεξεργασία εικόνας

Ορφέας Σκέντζος
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΚΜΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ
ΣΗΜΕΙΩΝ



Εικόνα 5.8 & 5.9 : Εύρεση ακμών με a priori επεξεργασία εικόνας





Εικόνα 5.10 : Επίδειξη ακμών Β' περίπτωσης με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια και κατάλληλο πάχος

Από τις εικόνες αυτές παρατηρείται, ότι ο εντοπισμός των ακμών είναι πολύ πιο ακριβής και αξιόπιστος και απεικονίζει λεπτομερώς την πραγματική γεωμετρία και το σχήμα των αντικειμένων. Όπως είναι εμφανές, παρόλο που η γεωμετρία του αντικειμένου είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, ο εντοπισμός των ακμών, έχει επιτευχθεί με υψηλή ακρίβεια, της τάξης των 2-3 ψηφιακών μονάδων (pixel) σε ακραίες περιπτώσεις, που αντιστοιχεί σε ακρίβεια 3-4 mm, ενώ σε άλλες είναι αισθητά καλύτερη.

Προφανώς, οι συνθήκες φωτισμού, με τις έντονες σκιάσεις που δημιουργούν, καθώς και η παλαιότητα της πρόσοψης, με τις διαβρωμένες περιοχές, σε ορισμένα σημεία αποδίδουν ακμές, οι οποίες είναι αχρείαστες και αποτελούν θόρυβο, που είναι αδύνατο να απαλειφθεί σε αυτή τη φάση. Επίσης, είναι σημαντικό, να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι παρά τη διαφορά στη θέση και τη γωνία λήψης, η ακρίβεια εντοπισμού των ακμών μένει αναλλοίωτη, παρόλο που η ανάλυση των εικόνων, που έχουν ληφθεί υπό έντονη γωνία, στα άκρα μειώνεται, καθώς η απόσταση από το αντικείμενο μελέτης αυξάνεται.

Στο στάδιο μετά την εξαγωγή των ακμών, σημειώνεται ότι έγινε περαιτέρω προσπάθεια για την απαλοιφή ανεπιθύμητων ακμών, με τη χρήση των μορφολογικών χαρακτηριστικών στις εξαγόμενες δυαδικές εικόνες. Τα χαρακτηριστικά αυτά εντοπίζονται μέσα στην εργαλειοθήκη του MATLAB. Ωστόσο, οι τεχνικές αυτές, δημιούργησαν νέα προβλήματα, καθώς μετέτρεπαν ορισμένες συνεχείς ακμές σε διακεκομμένες, ενώ παράλληλα εντοπίζονταν απώλειες σε ακμές που ήταν απολύτως αναγκαίες.

Εκτός αυτού, όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται ότι οι ακμές δεν συνάδουν με απόλυτα ευθείες γραμμές, εκεί που θα έπρεπε, και αυτό οφείλεται τόσο στην ακρίβεια εντοπισμού τους, στη θέση και τη γωνία λήψης, αλλά, κυρίως και στο γεγονός ότι ως βάση γίνεται χρήση ψηφιακών εικόνων, οι οποίες προφανώς έχουν διακριτές μονάδες, τα εικονοστοιχεία. Επομένως, οι γραμμές είναι αδύνατο να είναι απόλυτα ευθείες και συνεχείς. Ωστόσο, σε επόμενο στάδιο της διαδικασίας και κατά τον εντοπισμό των ακμών στο νέφος, έπειτα από τη χρήση πολλών επικαλυπτόμενων μερών, αυτό το πρόβλημα, όπως θα φανεί και στη συνέχεια δεν εμφανίζεται.

Συνεπώς, ορισμένα προβλήματα θορύβου που εξακολουθούν να υφίστανται, σε αυτό το στάδιο, δεν είναι δυνατόν να επιλυθούν, καθώς απαιτούν τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης και ανάπτυξης προγραμμάτων εκμάθησης. Κάθε εικόνα του δείγματος, διαφέρει τόσο ως προς τα στοιχεία που απεικονίζει, όσο και ως προς τις συνθήκες της φωτογράφισης, δηλαδή το φωτισμό, τη σκίαση, την απόσταση από τα αντικείμενα κ.ο.κ., με αποτέλεσμα η κάθε μια μεμονωμένα, να απαιτεί ιδιαίτερη διαχείριση και επεξεργασία. Το γεγονός αυτό, δυσχεραίνει κατά πολύ την αυτοματοποίηση της διαδικασίας σε αυτό το στάδιο και την εφαρμογή ενός αλγορίθμου με τον ίδιο τρόπο, αλλά και άλλων βοηθητικών φίλτρων, στο σύνολο των εικόνων.

Ακολουθως, είναι αξιόλογο να αναφερθεί και σε αυτή την περίπτωση, ότι, φαινομενικά, ενδέχεται να υπάρχει απώλεια ορισμένων ακμών σε κάποιες εικόνες, αλλά ταυτόχρονη μείωση αισθητού θορύβου. Ωστόσο, αν αναλογιστεί κανείς ότι υπάρχει πληθώρα επικαλυπτόμενων εικόνων, για την τρισδιάστατη ανακατασκευή, αυτή η απώλεια δεν είναι τόσο σημαντική όσο η ύπαρξη θορύβου, αφού θα αποκατασταθεί στο επόμενο βήμα της διαδικασίας, καθώς άλλα επικαλυπτόμενα κομμάτια του ίδιου αντικειμένου έχουν ανιχνεύσει την ακμή προς αποτύπωση. Αντιθέτως, η ύπαρξη θορύβου στις εικόνες, αυτομάτως θα μεταφερθεί και στο νέφος σημείων.

Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι δεν υπάρχει περαιτέρω ευελιξία σε αυτό το στάδιο και, για το λόγο αυτό, θα εξετασθεί στη συνέχεια η πιθανότητα να μειωθεί το πρόβλημα του θορύβου, ή να αποκατασταθούν αυτές οι απώλειες, σε άλλα στάδια της διαδικασίας, όπως είναι η ανακατασκευή του νέφους, ή κατά τη διαδικασία της διανυσματοποίησης σε περιβάλλον CAD.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Δομή προερχόμενη από κίνηση (Structure from Motion)

Θεωρητική προσέγγιση

Η φωτογραμμετρία και η εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας από τις εικόνες, αποτελεί μια παλιά τεχνική, οι δυνατότητες της οποίας έγιναν πιο φανερές, με την εξέλιξη τόσο των υπολογιστικών συστημάτων - σε υλικό, αλλά και σε λογισμικό - όσο και των ψηφιακών καμερών.

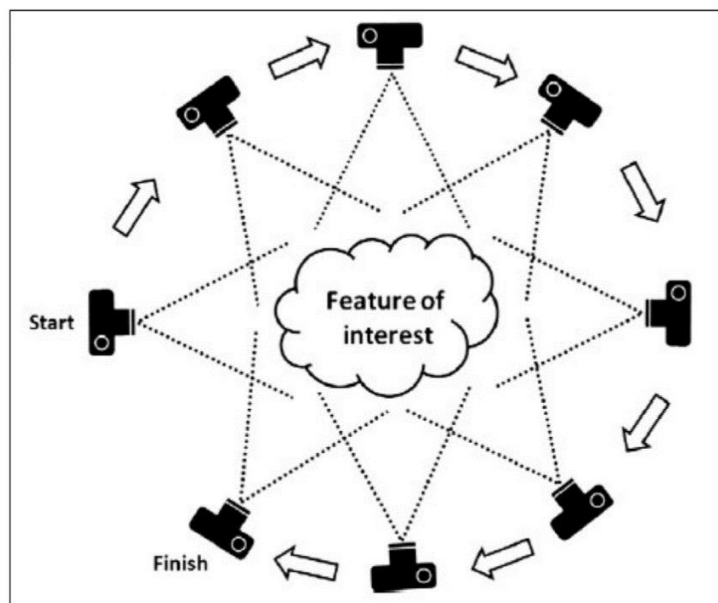
Οι τοπογραφικές σε συνδυασμό με τις φωτογραμμετρικές μετρήσεις αποτελούν τις πλέον βασικές μεθόδους, μετά τη χρήση των επίγειων αλλά και των εναέριων σαρωτών laser, που χρησιμοποιούνται για την ακριβή καταγραφή σύνθετων κατασκευών και αντικειμένων, είτε σύγχρονων είτε παλαιάς πολιτιστικής κληρονομιάς (Micheletti et al., 2015). Συγκεκριμένα, οι φωτογραμμετρικές τεχνικές είναι ιδανικές, καθώς είναι μη καταστροφικές για το αντικείμενο μελέτης, αφού γίνονται χωρίς την επαφή με αυτό, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες σε περιπτώσεις ευπαθών ή και απρόσιτων αντικειμένων αλλά και έργων μεγάλης κλίμακας σε μικρό χρονικό διάστημα.

Οι περισσότερες τοπογραφικές τεχνικές, ακόμα, απαιτούν σχετικά ακριβό εξοπλισμό αλλά και εξειδικευμένη εποπτεία χρηστών. Παρόλα αυτά, η μέθοδος της τρισδιάστατης καταγραφής και μοντελοποίησης μέσω της κίνησης, εξαλείφει ως ένα βαθμό και τους δύο αυτούς περιορισμούς, αφού επιτρέπει τη χρήση ψηφιακών καμερών που βρίσκονται εύκολα στο εμπόριο για το μέσο καταναλωτή, καθώς και ελεύθερων λογισμικών αρκετά αυτοματοποιημένων στην επεξεργασία πολλών δεδομένων. Ο τρόπος λειτουργίας αυτής της τεχνικής τεκμηρίωσης, όπως δηλώνει και ο όρος βασίζεται στη συλλογή κατά σειρά εικόνων, του ίδιου αντικειμένου, ώστε να ψηφιοποιηθεί και να παραχθεί ένα νέφος σημείων αυτόματα. Αξίζει, ωστόσο, στο σημείο αυτό, να αναφερθεί ότι το υψηλό επίπεδο αυτοματοποίησης που παρέχεται μέσω της τεχνικής SfM από τα λογισμικά που τη συντελούν, πέρα από τα πλεονεκτήματά της, ενέχει και κινδύνους, κυρίως διότι ο έλεγχος του χρήστη, προκύπτει σε περιορισμένες λειτουργίες.

Για να είναι επιτυχής ο στόχος της παρούσας εργασίας, επομένως, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα ενδιάμεσα βήματα της επεξεργασίας των δεδομένων, σε ποικίλα στάδια της τρισδιάστατης μοντελοποίησης του αντικειμένου μελέτης. Το γεγονός αυτό, έχει ως αποτέλεσμα και την προσθήκη σημασιολογικής απόδοσης στο νέφος σημείων, αλλά και την καλύτερη εποπτεία και τον έλεγχο κατά τη διαδικασία παραγωγής των

μοντέλων, μειώνοντας έτσι κινδύνους χαμηλής ακρίβειας ή εμφάνισης χονδροειδών σφαλμάτων.

Όπως και στην κλασική φωτογραμμετρία, έτσι και η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί μια πολύ-εικονική διαδικασία, δηλαδή από μια συλλογή επικαλυπτόμενων εικόνων, η λήψη των οποίων έχει γίνει από διαφορετικές οπτικές γωνίες, προκύπτει η ανακατασκευή του αντικειμένου μελέτης. Η διαφορά σε σχέση με την κλασική φωτογραμμετρία, έγκειται στο γεγονός ότι στην περίπτωση της μεθόδου αυτής, τόσο ο εσωτερικός προσανατολισμός των εικόνων, όσο και ο εξωτερικός, δεν αποτελούν προϋπόθεση για την τεκμηρίωση της σκηνής (Nyimbili et al., 2016). Ωστόσο, φυσικά, αυτό έχει ως αποτέλεσμα της απώλειας πληροφορίας όσον αφορά την κλίμακα και τον προσανατολισμό.



Πηγή: *Structure from Motion (SfM) – Approaches & Applications*, Nyimbili P.H, Demirel H., Seker D.Z, Erden T.

Πιο συγκεκριμένα, αποτυπώνονται πολλαπλές εικόνες του ίδιου αντικειμένου, με μεγάλη περιοχή επικάλυψης και, στη συνέχεια, με τη χρήση του γνωστού αλγόριθμου μετασχηματισμού χαρακτηριστικών, ανεξαρτήτως κλίμακας (SIFT – Scale Invariant Feature Transform), εντοπίζονται κοινά σημεία στις εικόνες, ικανά ώστε να δημιουργηθούν οι χωρικές εξισώσεις που σχετίζουν το αντικείμενο και τα σημεία που το απαρτίζουν, με τη θέση λήψης της εικόνας σε ένα αυθαίρετο τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων (D. G. Lowe, 2004). Ουσιαστικά, πραγματοποιείται μια συνταύτιση των χαρακτηριστικών σημείων, δηλαδή μια αυτόματη εύρεση των ομόλογων σημείων ενδιαφέροντος μεταξύ όλων των πιθανών ζευγών εικόνων. Ως κριτήριο για τη συνταύτιση αυτών είναι η απόσταση των διανυσμάτων περιγραφικών χαρακτηριστικών των σημείων ενδιαφέροντος.

Το σημαντικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου αυτού είναι η αξιοπιστία του ακόμα και σε δυσμενείς συνθήκες φωτογράφισης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση καταγραφής

ενός σύνθετου αντικειμένου, σε σχετικά μεγάλη κλίμακα και διαφορετικές ώρες της ημέρας, παρά την έντονη ποικιλομορφία στη γωνία και την απόσταση λήψης, το φωτισμό, ακόμα και στην πιθανή απόκρυψη, ο αλγόριθμος εξακολουθεί να εντοπίζει κοινά χαρακτηριστικά σημεία. Ως επιπρόσθετο έλεγχο, μάλιστα, υλοποιεί πρόσθετες τεχνικές, όπως την κατωφλίωση της απόστασης περιγραφέντων, τον διασταυρωμένο έλεγχο, αλλά και τη γεωμετρική επαλήθευση ομολογιών μέσω του αλγορίθμου RANSAC, ώστε να απορριφθούν τυχόν λανθασμένες ομολογίες.

Τα εναπομείναντα ομόλογα σημεία, αποτελούν την αφετηρία, για τον αρχικό εντοπισμό των θέσεων της κάμερας και των συντεταγμένων του αντικειμένου και, στη συνέχεια, λόγω της πληθώρας των επικαλυπτόμενων εικόνων και, επομένως, της περίσσειας των παρατηρήσεων, διορθώνονται και εντοπίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Εφαρμογή της μεθόδου στο αντικείμενο μελέτης

Για την ψηφιακή ανακατασκευή του αντικειμένου μελέτης, επιλέχθηκε, αρχικά, το λογισμικό Agisoft Metashape. Ωστόσο, θα μπορούσε, κάλλιστα, για τον ίδιο σκοπό να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε ελεύθερο λογισμικό, όπως το Visual SfM. Στόχος σε αυτό το στάδιο, είναι να μεταφερθεί η πληροφορία από τις εικόνες, στο ακανόνιστο νέφος σημείων, δηλαδή αφού δημιουργηθεί αρχικά το τρισδιάστατο μοντέλο του αντικειμένου μελέτης, να εμπλουτιστεί με την πληροφορία των ακμών και, στη συνέχεια, τα σημεία που αποτελούν ακμές να απομονωθούν από το υπόλοιπο νέφος.

Για την αντιμετώπιση του παρόντος σταδίου, γίνεται χρήση τόσο των αρχικών εικόνων, όσο και των εικόνων που κατασκευάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, στις οποίες η πληροφορία της ακμής υπάρχει ως επίθεση στην αρχική. Η δημιουργία του μοντέλου, λοιπόν, υλοποιείται με τη χρήση τριών διαφορετικών συνόλων εικόνων και, ως εκ τούτου, αποδίδει τρία διαφορετικά νέφη σημείων:

- Σε πρώτη φάση με τη χρήση των αρχικών εικόνων, χωρίς την πληροφορία των ακμών.
- Στη συνέχεια, με τη χρήση των παραγόμενων εικόνων με την πληροφορία της ακμής της 1^{ης} περίπτωσης
- Τέλος, με τη χρήση των αντίστοιχων εικόνων της 2^{ης} περίπτωσης.

Με αφετηρία και ως οδηγό, το αρχικό νέφος σημείων, επιτυγχάνεται οποιαδήποτε μορφή σύγκρισης και ελέγχου της αξιοπιστίας, σε σχέση με τα άλλα δύο νέφη, ώστε να εντοπιστούν τυχόν διαφορές ή και χονδροειδή σφάλματα, τόσο με το αρχικό, όσο και μεταξύ τους.

1. Νέφος σημείων με τη χρήση των αρχικών εικόνων

Η βασική διαφορά με τις άλλες δύο περιπτώσεις έγκειται στο γεγονός ότι εδώ, ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται εικόνες, οι οποίες έχουν την πληροφορία του εσωτερικού προσανατολισμού από τα αρχεία της εικόνας όπως αυτά εισάγονται από την κάμερα στο υπολογιστικό σύστημα. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω, στη διαδικασία της ανακατασκευής, δεν προστίθεται η πληροφορία των φωτοσταθερών για την επίλυση του απόλυτου προσανατολισμού και, κατ' επέκταση της απόκτησης μετρικής πληροφορίας, αφού, για τη μετάδοση της πληροφορίας των ακμών αλλά και την αξιολόγηση του αποτελέσματος, το βήμα αυτό δεν είναι απαραίτητο. Ωστόσο, το λογισμικό επιλύει τον σχετικό προσανατολισμό και εντοπίζει τις θέσεις κάμερας, σε ένα αυθαίρετο σύστημα αναφοράς. Η απόκτηση της πληροφορίας του απόλυτου προσανατολισμού, δε θα άλλαζε σε καμία περίπτωση το παραγόμενο αποτέλεσμα, αφού αυτό βασίζεται στις εικόνες και μόνο. Υπό άλλες συνθήκες, με τη χρήση φωτοσταθερών σημείων, γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων, ως αποτέλεσμα, δίνεται και ο απόλυτος προσανατολισμός των εικόνων.

Κατά την εκτέλεση του προσανατολισμού των εικόνων, που αποτελεί και το πρώτο βήμα δημιουργίας του νέφους, το λογισμικό, όπως προαναφέρθηκε, υπολογίζει τις παραμέτρους τόσο του εσωτερικού όσο και του «εξωτερικού» προσανατολισμού, συμπεριλαμβανομένων και των μη γραμμικών παραμέτρων ακτινικής διαστροφής, στο αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων που ορίζει το εκάστοτε λογισμικό. Για να γίνει με επιτυχία η διαδικασία αυτή στο λογισμικό Agisoft, αν οι εικόνες προέρχονται από διαφορετικές κάμερες, των οποίων συνακόλουθα ο εσωτερικός προσανατολισμός διαφέρει, θα πρέπει αυτές να διαχωριστούν σε διαφορετικά τμήματα και να πραγματοποιηθεί μεμονωμένα η δημιουργία του νέφους για καθένα από αυτά. Στη συνέχεια, αυτά μπορούν να ενωθούν με σημεία σύνδεσης.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η τεκμηρίωση της πρόσοψης του μνημείου, έγινε με τη χρήση μιας και μοναδικής full frame κάμερας, της NIKON D610, με φακό σταθερής εστιακής απόστασης. Τα μόνα στοιχεία που μεταβάλλονται, είναι το διάφραγμα και το κλείστρο. Η πρόσβαση σε όλα αυτά τα μετά-δεδομένα, είναι πολύ χρήσιμη, για την καλύτερη κατηγοριοποίηση των εικόνων, όσον αφορά στην ποιότητα και στην ανάλυση κάθε μιας από αυτές και, κατ' επέκταση, στη συμμετοχή της ή μη στην τρισδιάστατη μοντελοποίηση. Τα σημεία που εντοπίζονται και προστίθενται στο νέφος, αποτελούν σημεία σύνδεσης και είναι χαρακτηριστικά και ισχυρά σημεία τα οποία εντοπίζονται με αυστηρά κριτήρια σε ζεύγη -ή και σε περισσότερες των δύο – εικόνων.

Όπως είναι λογικό, κατά τη διαδικασία αυτή, καθώς το αντικείμενο μελέτης έχει πολλά επαναλαμβανόμενα μοτίβα στην πρόσοψή του, υπάρχει μεγάλος κίνδυνος οι ομοιογένειες που θα προκύψουν να είναι λανθασμένες. Ιδιαίτερα, στην περίπτωση όπου προστίθεται η πληροφορία των ακμών με έντονο κόκκινο χρώμα, του οποίου η απόχρωση είναι πανομοιότυπη και επικαλύπτει το αρχικό χρώμα της σκηνής, υπάρχει μεγάλος κίνδυνος, το λογισμικό να εντοπίσει λάθος ομοιογένειες.

Εφόσον, το παραπάνω στάδιο ολοκληρωθεί με επιτυχία και δημιουργηθεί ένα αραιό νέφος σημείων ακολουθεί η «συμπλήρωση» αυτού με την κατασκευή του πυκνού νέφους σημείων. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται από το λογισμικό μια αυτόματη διαδικασία συνταύτισης εικόνων, η οποία εντοπίζει τις ομοιογένειες για όλα τα εικονοστοιχεία της εικόνας και όχι μόνο για τα ομόλογα σημεία, καθώς είναι γνωστός τόσο ο εσωτερικός όσο και ο εξωτερικός προσανατολισμός των εικόνων. Με τον τρόπο αυτό, εντοπίζονται όλες οι ομοιογένειες για κάθε ψηφίδα της εικόνας και το αραιό νέφος αρχίζει να πυκνώνει.



Εικόνα 6.2 : Πυκνό νέφος σημείων από αρχικές εικόνες

2. Νέφη σημείων-ακμών

Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις, επειδή οι εικόνες προέρχονται από τις αρχικές αλλά προκύπτουν από το λογισμικό MATLAB, δεν υπάρχει τρόπος τα μετά-δεδομένα των αρχικών να μεταβιβαστούν σε αυτές, παρά μόνο η πληροφορία για το χρώμα και, συνακόλουθα και για τις ακμές στα εικονοστοιχεία αυτών.

Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε, με τη χρήση του εσωτερικού προσανατολισμού που εμπεριέχεται στις πρωτότυπες εικόνες. Πιο συγκεκριμένα, με την εισαγωγή των πρωτότυπων εικόνων στο λογισμικό Agisoft και μάλιστα, πριν τη δημιουργία του νέφους το λογισμικό έχει τη δυνατότητα όχι μόνο να διαβάσει τα μεταδεδομένα των εικόνων, δηλαδή στοιχεία που αφορούν την κάμερα με την οποία έγινε η λήψη τους καθώς και τα στοιχεία αυτής, αλλά και τη δυνατότητα αποθήκευσης των στοιχείων αυτών με τη μορφή λίστας ανά εικόνα.

Η λίστα αυτή, μπορεί με τη σειρά της να εισαχθεί σαν αρχείο στο αντίστοιχο σύνολο εικόνων, εφόσον πρόκειται για το ίδιο και τα αρχεία των εικόνων έχουν πανομοιότυπο όνομα. Ύστερα από δοκιμή, συμπεραίνεται ότι η εξαγωγή του τελευταίου από το αρχικό και, στη συνέχεια, η εισαγωγή του στο σύνολο με τις εικόνες των ακμών, υποβοηθά το πρόγραμμα για την τρισδιάστατη απόδοσή του νέφους και ελαττώνει σε σημαντικό βαθμό λανθασμένες ομολογίες. Στο σημείο αυτό, τονίζεται ότι η λίστα αυτή προκύπτει καθαρά και μόνο από τα αρχεία των εικόνων. επομένως, δεν είναι απαραίτητη η υλοποίηση του νέφους σημείων για τις πρωτότυπες εικόνες για την απόκτηση της πληροφορίας τους εσωτερικού προσανατολισμού, κάτι το οποίο αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα της διαδικασίας.

Είναι σημαντικό, στο σημείο αυτό, να αναφερθεί ότι εναλλακτικά δοκιμάστηκε η χρήση των εικόνων-ακμών και ως μάσκα για την τρισδιάστατη ανακατασκευή, με σκοπό την απομόνωση των υπόλοιπων σημείων. Ωστόσο αυτό δεν απέδωσε καλά αποτελέσματα, αν αναλογιστεί κανείς ότι εδώ προστίθεται και η έννοια του βάθους. Με τη χρήση των εικόνων-ακμών ως μάσκα, το λογισμικό αποδίδει τα σημεία που βρίσκονται εκτός της μάσκας, αλλά και οτιδήποτε υπάρχει σε όλο το εύρος βάθους της περιοχής αυτής.



Εικόνα 6.3 : Πυκνό νέφος σημείων-ακμών της 1^{ης} περίπτωσης



Εικόνα 6.4 : Δημιουργία προβληματικών περιοχών εντός των παραθύρων και έντονου θορύβου στο τείχος της κατασκευής

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω εικόνες, η πρώτη περίπτωση εξαγωγής των τρισδιάστατων ακμών, δεν αποδίδει το επιθυμητό αποτέλεσμα, γεγονός αναμενόμενο, αφού η ακρίβεια εντοπισμού τους στην δισδιάστατη εικόνα, δεν ήταν η επιθυμητή. Παράλληλα, επειδή οι εικόνες αυτές δεν έχουν υποστεί α priori επεξεργασία, παρουσιάζεται έντονος θόρυβος και ακμές σε ανεπιθύμητα μέρη της κατασκευής, γεγονός που καθιστά αναγκαία την χειροκίνητη παρέμβαση από το χρήστη, προκειμένου αυτός να απαλειφθεί.

Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται και το πρόβλημα που δημιουργεί η πρώτη περίπτωση κατά τη δημιουργία των σχέσεων ομολογιών, καθώς το αυξημένο πάχος των ακμών και, επομένως, του κόκκινου χρώματος με τη συνακόλουθη απόκρυψη ορισμένων περιοχών της κατασκευής, έχει ως αποτέλεσμα ο αλγόριθμος SIFT, να εντοπίζει εσφαλμένες ομολογίες μεταξύ των εικόνων, ιδιαίτερα στην περίπτωση που το αντικείμενο προς ανακατασκευή έχει έντονη ανακλαστικότητα.

Το πρόβλημα αυτό, είναι πολύ σημαντικό στην περίπτωση της τρισδιάστατης αποτύπωσης των ακμών, καθώς έχει ως συνέπεια μεγάλες αποκλίσεις κατά την εύρεση ομολογιών στα ακραία σημεία της κατασκευής, δηλαδή τις ακμές. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα ορατό στις εικόνες 6.12 & 6.14, όπου απεικονίζεται το νέφος, αποκλειστικά, των ακμών.

Αντίθετα με την πρώτη περίπτωση, η χρήση των εικόνων υψηλής ανάλυσης με την παραμετροποίηση ορισμένων τιμών, έρχεται να λύσει το πρόβλημα τόσο του θορύβου, όσο και των λανθασμένων ομολογιών.



Εικόνα 6.5 : Πυκνό νέφος σημείων-ακμών της 2^{ης} περίπτωσης



Εικόνα 6.6 : ίδια περιοχή σύγκρισης με την προηγούμενη περίπτωση χωρίς την εμφάνιση λανθασμένων ομολογιών και θορύβου

Όπως είναι ορατό στην παραπάνω εικόνα, ο εντοπισμός των ακμών είναι πολύ ακριβής χωρίς την απόκρυψη, άλλων στοιχείων της κατασκευής αλλά και χωρίς την ύπαρξη θορύβου. Ακόμα, παρά τη φυσική δυσκολία της καταγραφής των παραθύρων, λόγω της έντονης ανακλαστικότητας του υλικού, τόσο οι ακμές όσο και τα υπόλοιπα στοιχεία έχουν εντοπιστεί αισθητά καλύτερα, αν όχι ιδανικά.

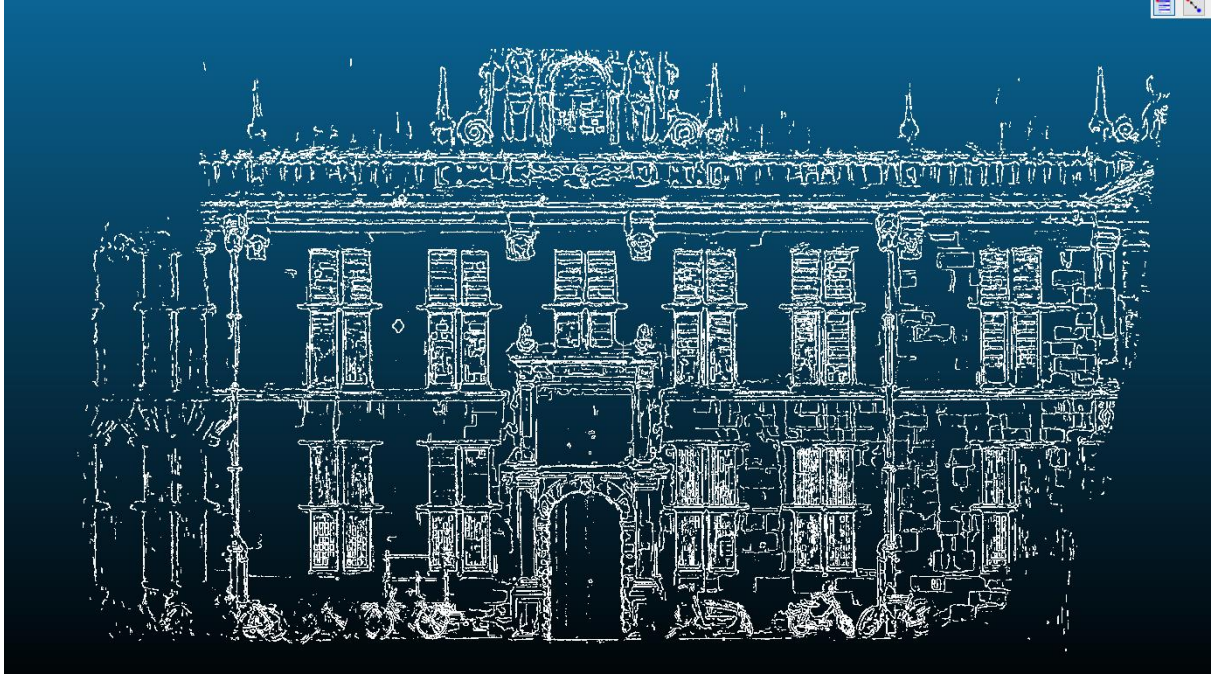
3. Νέφη ακμών

Για τη δημιουργία των νεφών ακμών, αξιοποιείται η σημασιολογική πληροφορία που έχει πλέον το νέφος, μέσω του χρώματος, ώστε τελικά να αποκλειστούν οποιαδήποτε άλλα σημεία δεν βρίσκονται στην κατηγορία αυτή. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται το εργαλείο κατάταξης σημείων σε κλάσεις, βάσει του χρώματος, που παρέχεται από το λογισμικό.

Εναλλακτική προσέγγιση στο πρόβλημα θα ήταν η χρήση του αρχείου .pts του νέφους και η επιλογή σημείων αμιγώς κόκκινων, δηλαδή με απολύτως μηδενικές τιμές στα άλλα δύο κανάλια. Ωστόσο αυτό δεν είναι απόλυτα εφικτό, καθώς πέραν του γεγονότος ότι τα αρχεία αυτά είναι ογκώδη, για τα πυκνά νέφη σημείων και δύσκολα στη διαχείριση, τα σημεία των ακμών δεν είναι απόλυτα κόκκινα και στις δύο περιπτώσεις. Αυτό, οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο το λογισμικό συντελεί τη διαδικασία τρισδιάστατης ανακατασκευής και προσδίδει το χρώμα από τις εικόνες στο νέφος, κάτι το οποίο δεν μπορεί να τροποποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη περίπτωση που δίνει πιο έντονες και κόκκινες ακμές, διευκολύνει το λογισμικό στον

εντοπισμό αυτών των σημείων. Ωστόσο το μειονέκτημα, σε αυτή την περίπτωση, όπως αναφέρθηκε είναι η χαμηλή ακρίβεια. Με την αξιοποίηση του εργαλείου που προσφέρει το λογισμικό, ο εκάστοτε χρήστης, έχει το ελεύθερο να παρέμβει περαιτέρω, με χειροκίνητο τρόπο, στα επιλεγμένα σημεία και, εφόσον επιθυμεί να απαλείψει ανεπιθύμητο θόρυβο, ο οποίος ενδεχομένως να εμφανίζεται σε διαφορετικά αντικείμενα μελέτης. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω:

1^η περίπτωση:

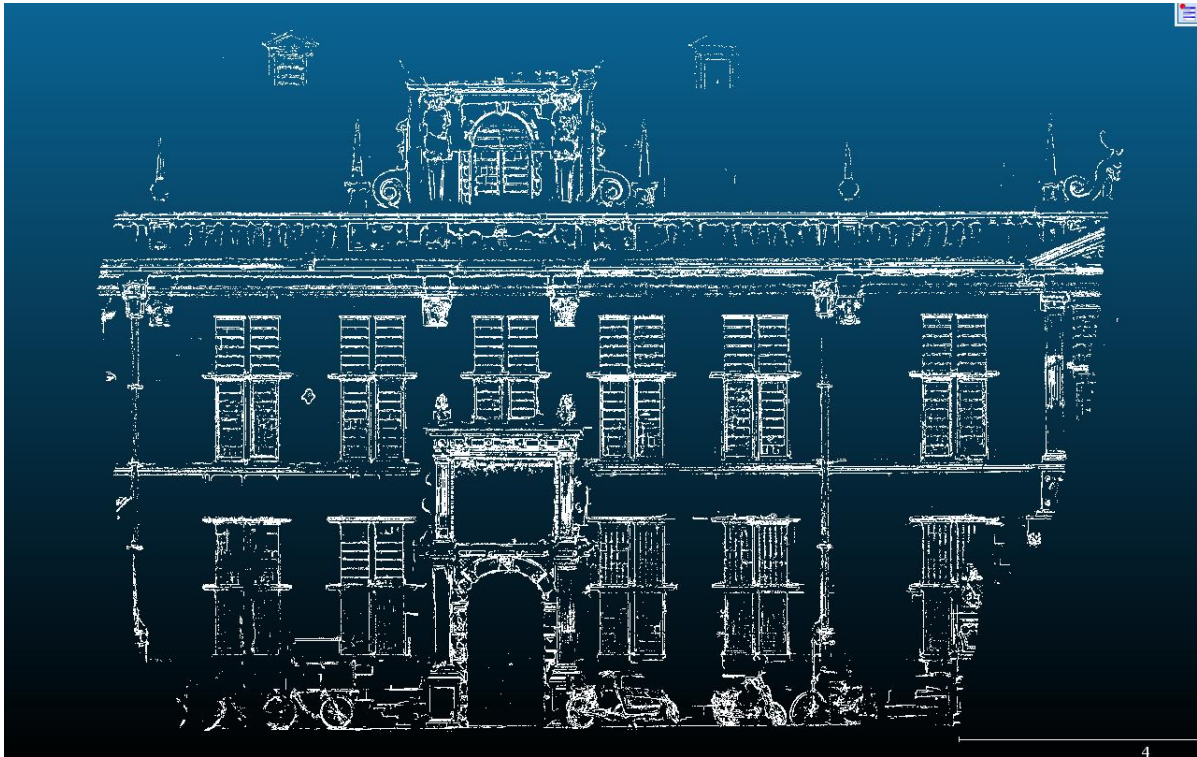


Εικόνα 6.7 : Πυκνό νέφος ακμών με ύπαρξη έντονου θορύβου

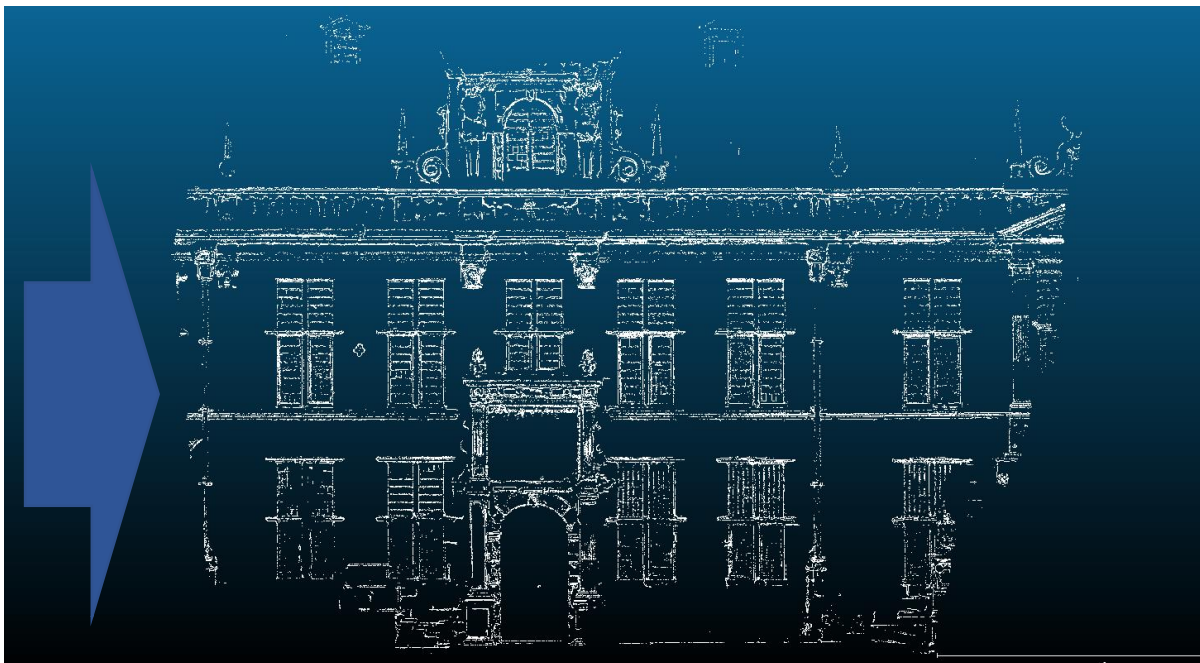


Εικόνα 6.8 : Πυκνό νέφος ακμών με χειροκίνητη απαλοιφή του θορύβου

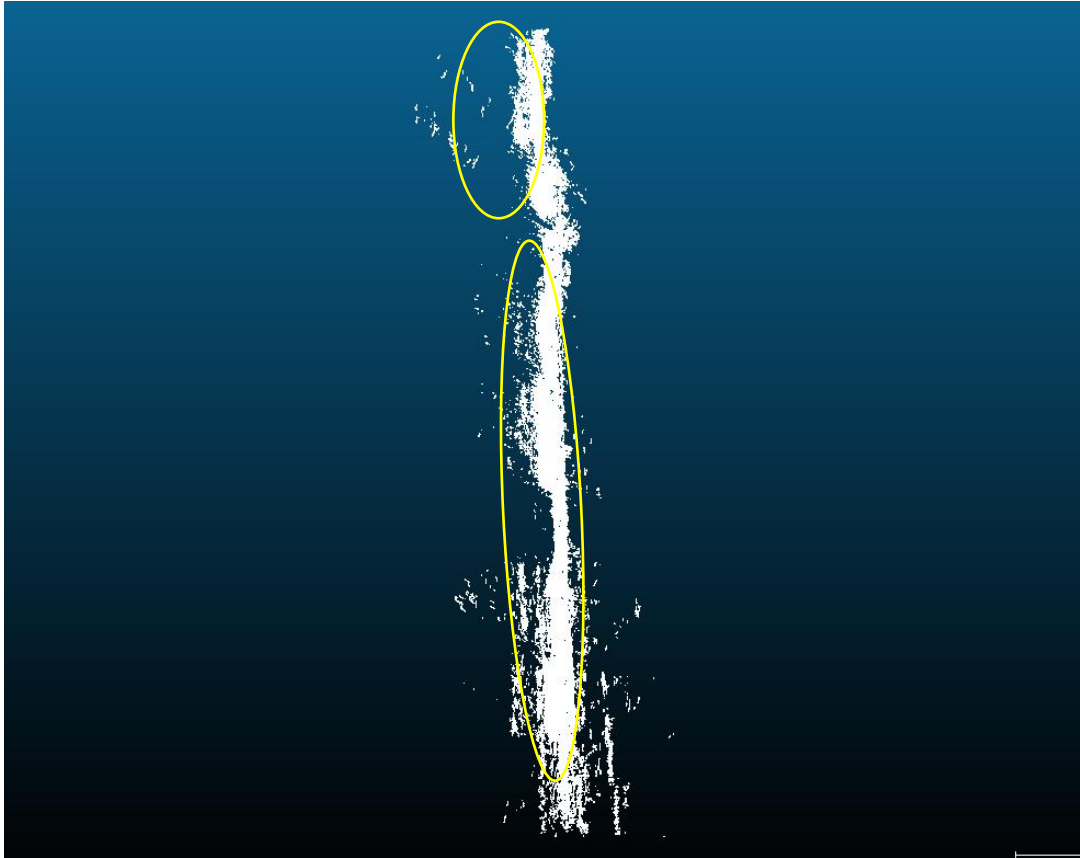
2^η περίπτωση:



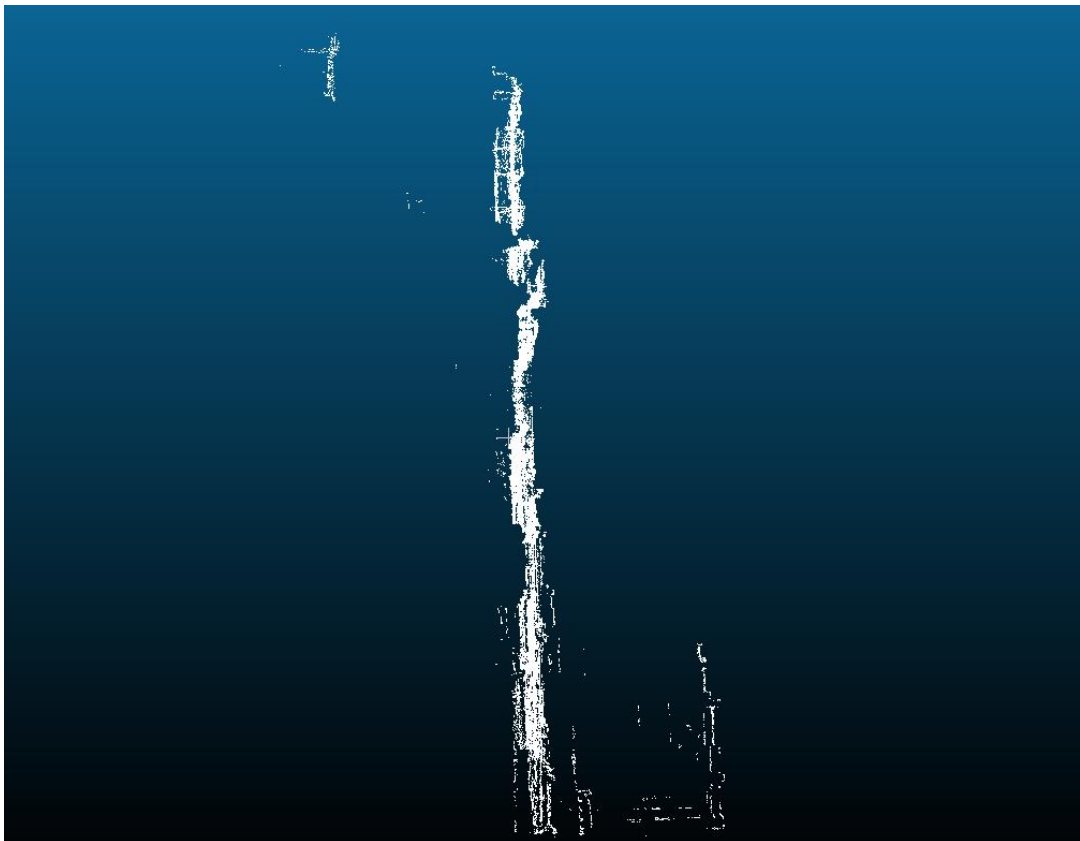
Εικόνα 6.10 : Πυκνό νέφος ακμών με ύπαρξη ελάχιστου θορύβου



Εικόνα 6.11 : Πυκνό νέφος ακμών μετά από απαλοιφή του θορύβου



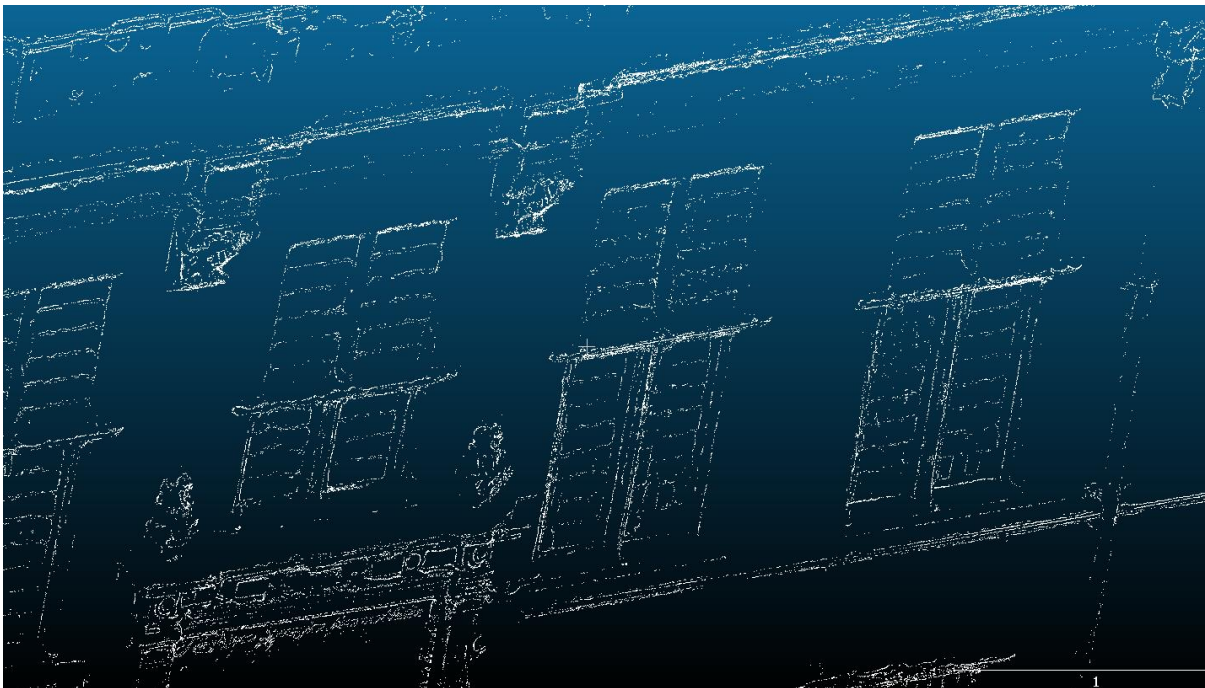
Εικόνα 6.12 : Πλάγια όψη του καθαρού νέφους ακμών της 1^{ης} περίπτωσης



Εικόνα 6.13 : Πλάγια όψη του καθαρού νέφους ακμών της 2^{ης} περίπτωσης



Εικόνα 6.14 : Προοπτικό νέφους 1^{ης} περίπτωσης



Εικόνα 6.15 : Προοπτικό νέφους 2^{ης} περίπτωσης

Όπως γίνεται ορατό (βλ. εικόνες 6.12 έως 6.15), παρατηρούνται περιοχές του νέφους, όπου το λογισμικό έχει εντοπίσει λανθασμένα το βάθος στην 1^η περίπτωση (βλ. μαρκαρισμένες περιοχές σημείων στην εικόνα 6.12 & 6.14). Παρόλο που στην πρόσοψη, το νέφος ακμών, φαίνεται σωστό, στην πλάγια όψη και στο προοπτικό εμφανίζονται οι λανθασμένα εντοπισμένες ακμές. Αυτό, ήταν σε ένα βαθμό αναμενόμενο, τόσο λόγω του σφάλματος της διαδιάστατης εύρεσης ακμών που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, όσο και λόγω του μεγάλου πάχους των ακμών. Προφανώς, το λογισμικό, καθώς εντοπίζει στο 1^ο νέφος, σημεία με απολύτως

ίδια ένταση και χρώμα, θεωρεί εσφαλμένα ότι πρόκειται για ομόλογα σημεία και ως συνέπεια η τρισδιάστατη ανακατασκευή, είναι προβληματική.

Συμπέρασμα

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των παραπάνω αποτελεσμάτων, συμπεραίνεται ότι, η αξιολόγηση των δύο περιπτώσεων, είναι σημαντικό να γίνει βάσει ορισμένων κριτηρίων:

- Ακρίβεια και αξιοπιστία της μεθόδου
- Ταχύτητα
- Ύπαρξη θορύβου
- Ανάγκη χειροκίνητης παρέμβασης
- Όγκος παραγόμενου νέφους

Όσον αφορά στη 2^η περίπτωση, τόσο η ακρίβεια όσο και η αξιοπιστία της μεθόδου είναι ιδανικές για το σκοπό τις παρούσας εργασίας, αφού αυτή προσεγγίζει τα 2-3 mm, χωρίς την παρουσία χονδροειδών σφαλμάτων στις ομολογίες και με την ύπαρξη ανεπαίσθητου θορύβου, ο οποίος μειώθηκε σημαντικά με ελάχιστη χειροκίνητη παρέμβαση.

Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι και ο όγκος του παραγόμενου νέφους ακμών είναι αισθητά μικρότερος στην 2^η περίπτωση και, μάλιστα, σχεδόν 5 φορές. Συγκεκριμένα, πριν την εξάλειψη τυχόν θορύβου, το ένα νέφος καταναλώνει 180MB αποθηκευτικού χώρου (1^η περίπτωση) έναντι 40MB (2^η περίπτωση). Το νούμερο αυτό, όπως παρατηρείται δεν είναι τυχαίο, καθώς ανταποκρίνεται, στη μείωση της ανάλυσης των εικόνων κατά 5 φορές, που είχε πραγματοποιηθεί σε προηγούμενο στάδιο. Αυτό, όπως αναφέρθηκε, οδήγησε σε αύξηση του μεγέθους του εικονοστοιχείου και κατά συνέπεια και σε πάχος ακμών, 5 φορές μεγαλύτερο και, επομένως, στην ανακατασκευή περισσότερων σημείων κατά μήκος και πλάτος των ακμών, γεγονός που γίνεται ορατό και από τις εικόνες των 2 νεφών.

Στο σημείο αυτό, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφερθεί ότι, το αρχικό νέφος καταναλώνει 2,2 GB αποθηκευτικού χώρου. Αν αναλογιστεί κανείς, επομένως, ότι μετά την απομόνωση των σημείων ενδιαφέροντος, το νέφος αυτό, είναι κατά 55 φορές μικρότερο σε όγκο, συμπεραίνεται ότι είναι και εύκολα μεταβιβάσιμο από χρήστη σε χρήστη αλλά και από πρόγραμμα σε πρόγραμμα. Παράλληλα, ο εξαιρετικά αυτός μειωμένος όγκος το καθιστά πολύ πιο αξιοποιήσιμο και ταχύτατα εκτελέσιμο κατά τη χρήση του σε διαφορετικά λογισμικά, για την απόσπαση άλλων πληροφοριών αλλά και διεργασιών που αυτά συντελούν, όπως είναι η διανυσματική απόδοση των

ακμών από τα υπάρχοντα σημεία, ωστόσο αυτό είναι κάτι που θα εξετασθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Διερεύνηση μεθόδων & λογισμικών διανυσματικής απόδοσης

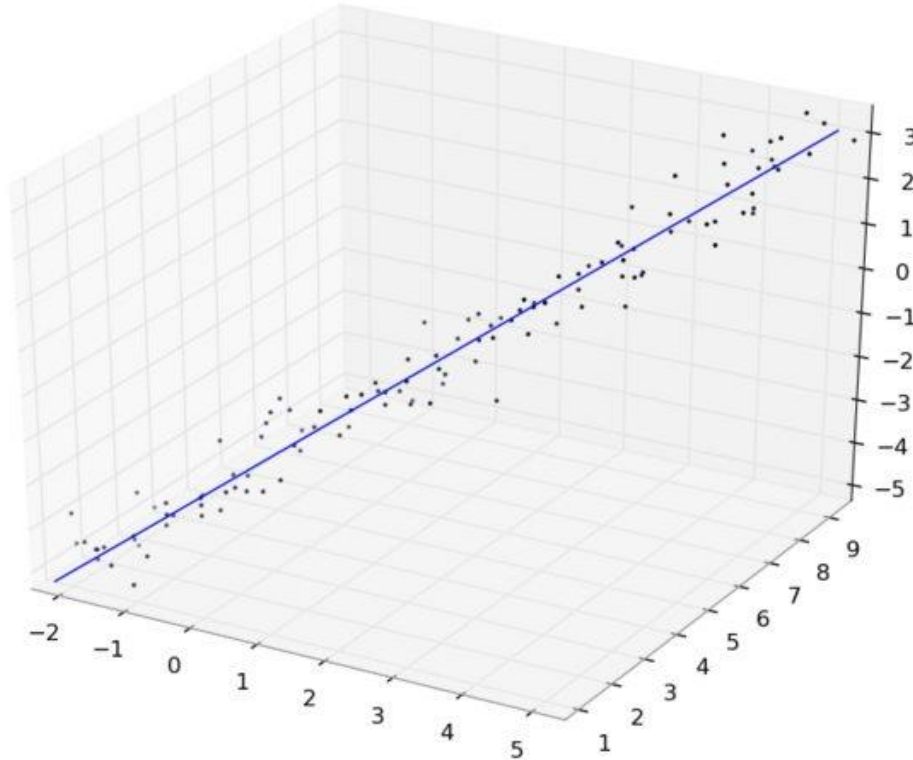
Θεωρητική προσέγγιση

Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, η όλη διαδικασία μέχρι το νέφος με τις εντοπισμένες ακμές, έγινε με στόχο την αξιοποίησή του από άλλα λογισμικά, ώστε τελικά να αποδοθούν αυτές διανυσματικά. Πιο συγκεκριμένα το παραγόμενο νέφος ακμών, αποτελείται από ένα σύνολο σημείων στον χώρο. Προκειμένου να υλοποιηθεί η μετάβαση από μια απεικόνιση διακριτών σημείων σε μια συνεχή καμπύλη - εν προκειμένω την ζητούμενη ακμή -, θα πρέπει να βρεθεί η μαθηματική συνάρτηση που περιγράφει την καμπύλη αυτή μέσα από τα εκατοντάδες σημεία που την απαρτίζουν.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή η μετάβαση από μια καμπύλη σε εκατοντάδες σημεία είναι σχετικά απλούστερη, δεδομένου του γεγονότος ότι το μεταβαλλόμενο διάνυσμα της καμπύλης καθώς και η ακριβής μαθηματική συνάρτηση που την περιγράφει, είναι γνωστά και απολύτως μοναδικά σε κάθε σημείο του χώρου (βλ. εικόνα 7.1). Ωστόσο, ένα ακανόνιστο σύνολο σημείων στο χώρο, όπως είναι αναμενόμενο δεν είναι ιδανικά κατασκευασμένο, ώστε να μπορεί να αποδοθεί μία και μοναδική καμπύλη που να περιγράφει επακριβώς τα σημεία αυτά.

Η διαδικασία για την τεκμηρίωση και την τρισδιάστατη απόδοση ενός αντικειμένου στον χώρο, όπως έχει αναλυθεί, υλοποιείται αρχικά φωτογραμμετρικά με τη φωτογραφική τεκμηρίωση αυτού, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια και, στη συνέχεια, με την δημιουργία του νέφους σημείων με τη χρήση της τεχνικής SfM. Προκειμένου να γίνουν πιο κατανοητές οι παραπάνω έννοιες, ας υποθεθεί ότι από ένα υποσύνολο σημείων του νέφους ακμών, όπως αυτό κατασκευάστηκε σε προηγούμενο στάδιο, πρέπει να αποδοθεί μια απολύτως ευθεία ακμή διανυσματικά και όχι ως σύνολο σημείων. Γίνεται αντιληπτό, πρωτίστως, ότι το ακανόνιστο αυτό νέφος θα περιέχει πολλά σημεία γύρω από την υποτιθέμενη ευθεία ακμή και, δευτερευόντως, ότι πρακτικά καμία ανθρώπινη κατασκευή δεν περιγράφεται από απόλυτα ευθείες γραμμές.

Επομένως, δημιουργείται η ανάγκη ανάπτυξης μιας διαδικασίας, ικανής να άρει τα 2 παραπάνω προβλήματα, τα οποία μπορούν να γίνουν αντιληπτά στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 7.1 : Σύνολο σημείων ευθείας γραμμής στο χώρο

Πηγή: www.stackoverflow.com

Η γεωμετρική ερμηνεία των στοιχείων αυτών, γίνεται ακόμα πιο πολύπλοκη, αν αναλογιστεί κανείς ότι το νέφος περιέχει, πολύ συχνά, ακμές οι οποίες είναι καμπύλες, ακμές με απότομες αλλαγές κλίσης, αλλά και ακμές που ενδεχομένως τέμνουν η μία την άλλη.

Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ερμηνεία τους, γίνεται στον ψηφιακό χώρο, επομένως η γεωμετρία και οι κανόνες που τη διέπουν διαφοροποιούνται σε ένα βαθμό, εφόσον πρόκειται για διακριτά στοιχεία (Digital Geometry & Discrete Geometry). Με άλλα λόγια, όπως είναι προφανές, η διαδικασία της ψηφιοποίησης, απεικονίζει ένα αντικείμενο του συνεχούς χώρου με τη μορφή ενός συνόλου διακριτών σημείων. Αυτοί οι κλάδοι γεωμετρίας, μελετούν συνδυαστικές ιδιότητες και κατασκευαστικές μεθόδους διακριτών γεωμετρικών αντικειμένων. Τα περισσότερα ζητήματα στη Διακριτή Γεωμετρία, περιλαμβάνουν πεπερασμένα ή διακριτά σύνολα βασικών γεωμετρικών αντικειμένων, όπως σημεία, γραμμές, επίπεδα, κύκλους, σφαίρες, πολύγωνα κ.ο.κ. Η βασική μελέτη του κλάδου, επικεντρώνεται στις συνδυαστικές ιδιότητες αυτών των αντικειμένων, όπως το πώς

τέμνονται μεταξύ τους ή πώς μπορούν να ταξινομηθούν στο χώρο ώστε να απαρτίζουν ένα μεγαλύτερο αντικείμενο (Sulovsky, 2011).

Τη λύση στα παραπάνω προβλήματα, έρχεται να δώσει η μέθοδος της προσαρμογής της ισχυρότερης γραμμής ή καμπύλης, όπως υποδεικνύεται και στην εικόνα 7.1 (Line & Curve Fitting). Η τεχνική αυτή, ουσιαστικά αποτελεί μια διαδικασία κατασκευής καμπύλης, ή μαθηματικής συνάρτησης, η οποία να ακολουθεί με τον πιο αντιπροσωπευτικό τρόπο την πορεία μιας σειράς σημείων (Arlinghaus, 1994). Η προσαρμογή αυτής της καμπύλης, μπορεί να περιλαμβάνει είτε τη μέθοδο της παρεμβολής, όπου απαιτείται ακριβής προσαρμογή στα δεδομένα σημεία, είτε, με μία εξομάλυνση αυτής, που να πλησιάζει με προσεγγιστικό τρόπο σε αυτά.

Ένα αντίστοιχο ζήτημα, όπως προκύπτει από τα παραπάνω, είναι και η γραμμική παλινδρόμηση, η οποία αποτελεί μια προσέγγιση της μοντελοποίησης της σχέσης μιας εξαρτημένης μεταβλητής με μία ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων, με σκοπό να κατασκευαστεί η γραφική παράσταση που περιγράφει ένα φαινόμενο, όταν είναι γνωστή μόνον μια σειρά από πειραματικές τιμές των μεγεθών που το περιγράφουν και όχι η ακριβής μαθηματική τους σχέση.

Με άλλα λόγια, υποθέτοντας ότι μια ακμή περιγράφεται από εκατοντάδες παρατηρήσεις, δηλαδή τα δεδομένα σημεία του νέφους, υλοποιείται μια προσέγγιση της καμπύλης, ή αλλιώς της γραφικής παράστασης που περιγράφει με τον καλύτερο τρόπο τα δεδομένα αυτά και υπόκειται φυσικά και σε μια αβεβαιότητα. Η περίσσεια των παρατηρήσεων αυτών, δίνει τη δυνατότητα του ελέγχου της αξιοπιστίας και της ακρίβειας της μεθόδου, με την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας υπό τη μορφή σφάλματος.

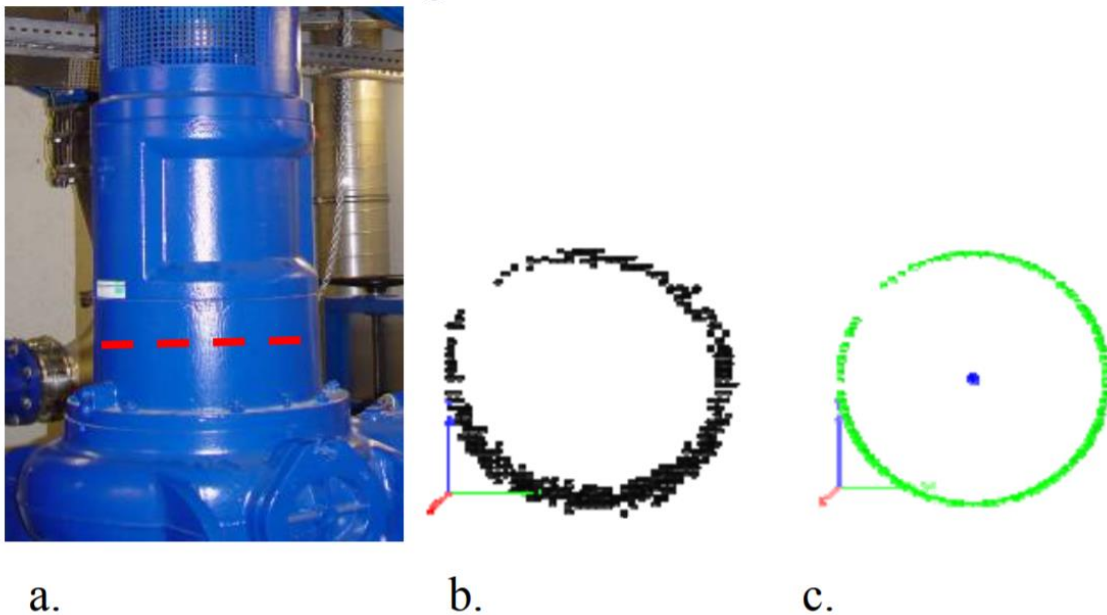
Υπάρχουσες τεχνικές

Η ανάγκη για την πιο αυτοματοποιημένη διανυσματική απόδοση των ανθρώπινων κατασκευών, σε συνδυασμό με την εξελισσόμενη τεχνολογία και την αξιοποίηση των παραπάνω μεθόδων, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ποικίλων αλγορίθμων και λογισμικών, ικανών να διαχειριστούν ακανόνιστα νέφη σημείων, εντοπίζοντας σημασιολογικές πληροφορίες, όπως είναι οι ακμές. Οι περισσότερες από αυτές συντελούν τον εντοπισμό σε ιδιαίτερα ογκώδη σύνολα σημείων, επιβαρύνοντας το χρόνο και την απόδοση αυτών.

Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να αναλυθούν οι υπάρχουσες τεχνολογίες και τα λογισμικά που συντελούν τη διανυσματική απόδοση των ακμών, αλλά και τις συγκεκριμένες μεθόδους που το καθένα χρησιμοποιεί, ούτως ώστε με ένα

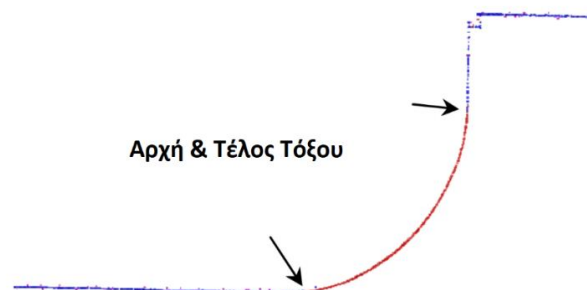
συνδυασμό αυτών, το αποτέλεσμα του παραγόμενου νέφους ακμών, να μπορεί να αξιοποιηθεί στον καλύτερο δυνατό βαθμό.

Με παρόμοιο τρόπο, όπως και στον εντοπισμό των ακμών στις δύο διαστάσεις, πριν την διερεύνηση για την ανάπτυξη μιας πιο αυτοματοποιημένης διανυσματικής απόδοσης σε τρεις διαστάσεις, είναι σημαντική η απαλοιφή ενδεχόμενου εναπομείναντος θορύβου, για την εξαγωγή του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος (Bienert, 2008). Η διαδικασία αυτή, διαχειρίζεται νέφη σημείων από εναέριους ή και επίγειους σαρωτές laser, με την εφαρμογή εξομαλυντικών φίλτρων και αλγορίθμων, παρόμοιων με αυτών που αναλύθηκαν παραπάνω για την προσαρμογή ευθύγραμμων, καμπύλων τμημάτων, τόξων (Arc Fitting), αλλά και συνδυασμού όλων των παραπάνω (βλ. εικόνα 7.2 & 7.3).



Εικόνα 7.2: a) Σωλήνας b) Νέφος σημείων με παρουσία θορύβου c) Εξομάλυνση σημείων

Πηγή: Vectorization, Edge Preserving Smoothing and Dimensioning of Profiles in Laser Scanner Point clouds, Anne Bienert, 2008



Εικόνα 7.3: Εξομάλυνση ακμής, που αποτελείται τόσο από ευθύγραμμα όσο και από καμπύλα τμήματα

Πηγή: Vectorization, Edge Preserving Smoothing and Dimensioning of Profiles in Laser Scanner Point clouds, Anne Bienert, 2008

Στη συνέχεια, είναι δυνατόν να γίνει χρήση λογισμικών που εκτελούν τη διανυσματική απόδοση από τα νέφη σημείων. Ακριβώς επειδή στο νέφος σημείων που έχει παραχθεί (βλ. εικόνα 6.11), έχει ήδη επιτευχθεί ο εντοπισμός των ακμών, η μέθοδος που συμβάλλει περισσότερο στη διανυσματική απόδοση βασίζεται στο μετασχηματισμό Hough (Hough Transform, HT).

Η τεχνική αυτή έχει ευρεία εφαρμογή ιδιαίτερα σε εικόνες και σε εφαρμογές δύο διαστάσεων, ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει απόπειρες να υλοποιηθεί και σε νέφη σημείων. Αρχικά, με την πατέντα που κατέθεσε το 1962 ο Paul Hough, η χρήση της μεθόδου ξεκίνησε με σκοπό τον εντοπισμό γραμμών σε εικόνες, αλλά στην πορεία η χρήση του επεκτάθηκε και στον κλάδο της Όρασης Υπολογιστών (Ballard, 1981), αλλά και στην εύρεση περισσότερων αφηρημένων σχημάτων και κυρίως, κύκλων και ελλείψεων αλλά και συνδυασμού αυτών, δηλαδή σύνθετων καμπύλων γραμμών που περιγράφονται από τα παραπάνω γεωμετρικά στοιχεία (Duda et al., 1972).

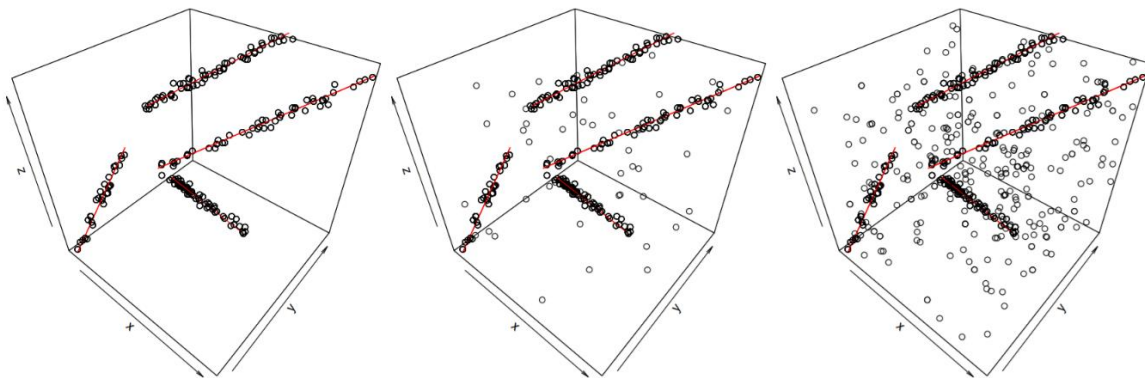
Το βασικό χαρακτηριστικό του προσδιορισμού ευθύγραμμων και καμπύλων τμημάτων με τον HT, είναι η σχέση σημείου-γραμμής. Ένα σημείο P , μπορεί να οριστεί είτε από ένα ζεύγος συντεταγμένων είτε ως σημείο τομής ενός συνόλου ευθειών που διέρχονται από αυτό. Αυτή η σχέση σημείου-γραμμής ισχύει και αν διατυπωθεί αντιστρόφως. Όπως ένα σημείο μπορεί να προσδιοριστεί ως σημείο τομής ενός συνόλου ευθειών, έτσι και μια γραμμή – είτε καμπύλη είτε ευθεία - μπορεί να προσδιοριστεί από ένα σύνολο σημείων στο χώρο (Κεσίδης, 2001).

Συγκεκριμένα, η μέθοδος που έχει αναπτυχθεί (Dalitz et al., 2017), έχοντας ως πληροφορία εισόδου ένα νέφος σημείων, προσπαθεί να εντοπίσει ευθύγραμμα τμήματα και γενικά παραμετρικά εκφραζόμενες καμπύλες, κοντά στις οποίες εντοπίζονται πολλά σημεία τα οποία ακολουθούν μια συγκεκριμένη πορεία στον τρισδιάστατο χώρο. Η ιδέα του μετασχηματισμού αυτού, είναι να μετατρέψει τον άπειρο χώρο όλων των πιθανών γραμμών σε πεπερασμένο, μέσω μιας διαδικασίας «ψηφοφορίας», όλων των υποψήφιων σημείων που ανήκουν σε αυτές τις γραμμές.

Οι περισσότερες απόπειρες διανυσματικής απόδοσης από νέφη σημείων, βρίσκουν κυρίως εφαρμογή σε δεδομένα που προέρχονται από εναέριες μεθόδους αποτύπωσης έργων μεγάλης κλίμακας - με τη χρήση λογισμικών όπως το VisionLidar, PointCab, SCC r13, VRmesh - όπως η αποτύπωση οδών, ηλεκτροφόρων καλωδίων κτλ. (Utility Mapping). Ωστόσο, με παρόμοιο τρόπο, η τεχνική αυτή συμβάλλει σημαντικά και σε περιπτώσεις, όπως το παραγόμενο νέφος ακμών, το οποίο προέκυψε από επίγειες μετρήσεις που αφορούν όψεις κτιρίων μικρής κλίμακας. Η τεχνική αυτή, υλοποιείται, αρχικά με την εισαγωγή του νέφους σημείων και την ομαδοποίησή του σε διάφορες κλάσεις (Guo et al., 2015). Με παρόμοιο τρόπο, θα αναλυθεί στη συνέχεια πως αυτή η λειτουργία εντοπισμού που εμπεριέχεται σε διάφορα

λογισμικά, συμβάλλει, πράγματι, στην εξαγωγή των ακμών ως διανύσματα, αλλά και στην αποθήκευση αυτών ως αρχεία συμβατά με λογισμικά σχεδίασης CAD.

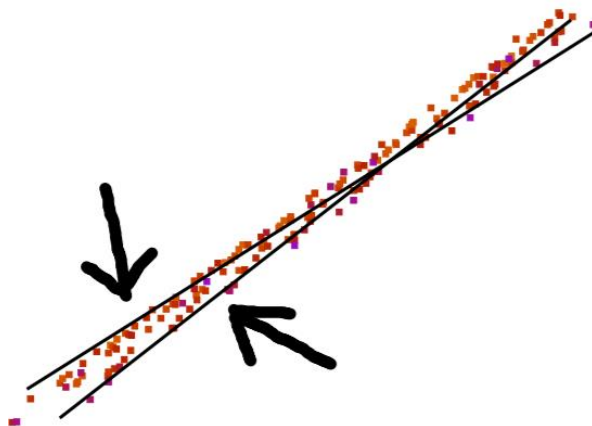
Το σημαντικό πλεονέκτημα ανάπτυξης της μεθοδολογίας της παρούσας εργασίας, είναι ο αυτόματος αποκλεισμός των περιττών σημείων από το υπάρχον νέφος πριν τη διαδικασία της διανυσματικής απόδοσης των ακμών. Η χρήση αποκλειστικά των σημείων ενδιαφέροντος από το νέφος, διευκολύνει σημαντικά τον τρόπο λειτουργίας αυτών των λογισμικών, αφού ελαττώνει σημαντικά το θόρυβο και τον όγκο του νέφους προς επεξεργασία, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό με την επίδειξη των 3 διαφορετικών περιπτώσεων νέφους σημείων που ακολουθούν παρακάτω:



Εικόνα 7.4 : Επισήμανση διαφόρων 3 διαφορετικών περιπτώσεων νέφους σημείων

Πηγή: Iterative Hough Transform for Line Detection in 3D Point Clouds (Dalitz et al., 2017)

Όπως γίνεται ορατό από την εικόνα 7.4, η αξιοποίηση του νέφους που περιέχει αποκλειστικά σημεία ενδιαφέροντος, όχι μόνο ελαττώνει τον όγκο των δεδομένων προς επεξεργασία, ειδικά στην περίπτωση όπου υλοποιείται η εξομάλυνση του νέφους, αλλά και την πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος στις εντοπισμένες ακμές (βλ. εικόνα 7.5).

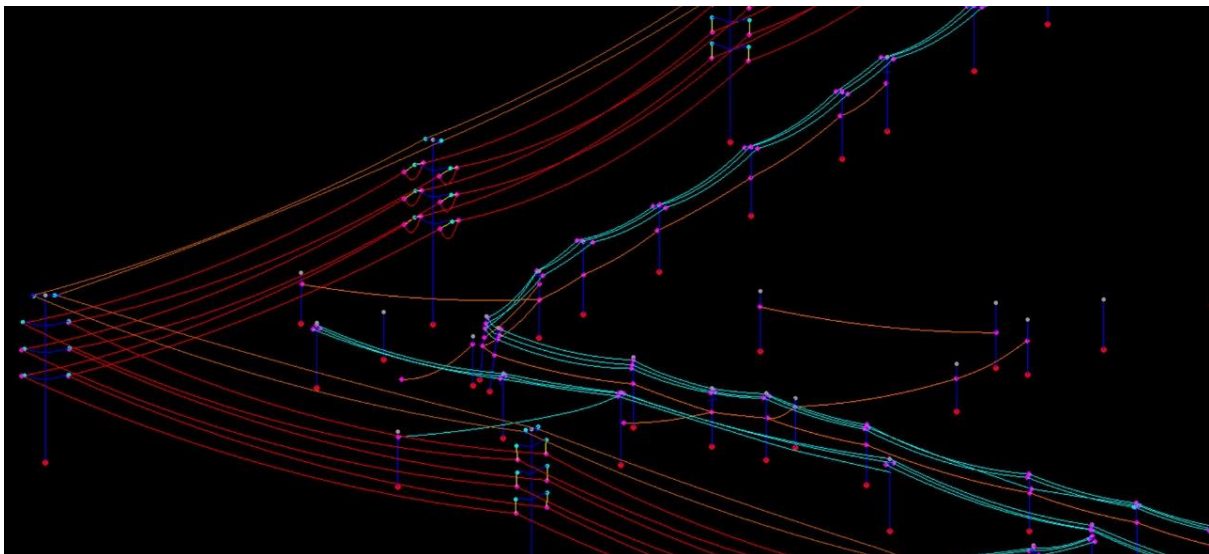


Εικόνα 7.5: Ύπαρξη περισσότερων σημείων γύρω από την περιοχή της ακμής ενός αντικειμένου

Πηγή: Iterative Hough Transform for Line Detection in 3D Point Clouds (Dalitz et al., 2017)

Στο σημείο αυτό, αξιοσημείωτες είναι και οι σχετικές εφαρμογές που έχουν αναπτυχθεί, τόσο για τον εντοπισμό όσο και τη διανυσματική απόδοση σε νέφη σημείων που αφορούν σε όψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας. Οι περισσότερες από αυτές, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, υλοποιούν τον εντοπισμό απευθείας στο νέφος και ελάχιστες, στη συνέχεια, αποδίδουν το διάνυσμα αυτών.

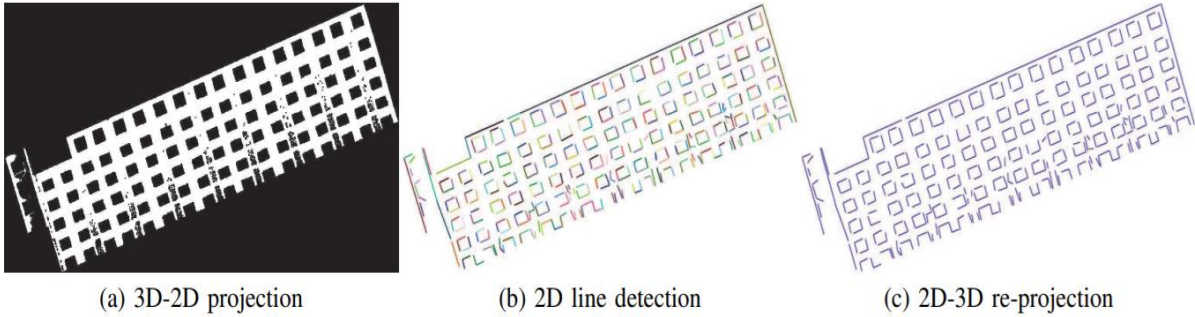
Η συλλογή δεδομένων εναέριων σαρωτών LIDAR, έχει διευκολύνει σε πολύ σημαντικό βαθμό την τρισδιάστατη ανακατασκευή κατόψεων κτιρίων και γενικότερα οριζοντιογραφικής απόδοσης των στοιχείων ενδιαφέροντος σε μεγάλη κλίμακα (Awrangjeb et al., 2018). Η τεχνική αυτή, με τη γεωμετρική ερμηνεία των σχέσεων γειννίασης των γραμμών ενδιαφέροντος (παραλληλία, καθετότητα, καμπυλότητα κτλ.), υλοποιεί σε ικανοποιητικό βαθμό την απόδοση στοιχείων, όπως γραμμές οδοποιίας, ηλεκτροφόρα καλώδια, σε ένα εύρος πολλών χιλιομέτρων.



Εικόνα 7.6 : Αυτοματοποιημένη διανυσματική απόδοση από δεδομένα LIDAR

Πηγή: <https://www.dielmo.com/wp-content/uploads/2016/06/VECTORES-3D.jpg>

Μια εναλλακτική προσέγγιση, η οποία βασίζεται κυρίως, στον εντοπισμών ακμών σε όψεις κτιρίων, οι οποίες έχουν κατά βάση μικρό εύρος βάθους, είναι και η τεχνική της προβολής του τρισδιάστατου νέφους σε ένα επίπεδο (3D to 2D Projection). Η μέθοδος αυτή, αν και βασίζεται απευθείας στο νέφος σημείων, αξιοποιεί την απλούστερη γεωμετρία που διέπει το επίπεδο, ώστε να εντοπίσει εκεί τις ακμές και, τελικά, υλοποιεί μια επαναπροβολή (Lu et al., 2019) των ακμών πάλι πίσω στο νέφος του τρισδιάστατου χώρου, εφόσον η πληροφορία για τις θέσεις των σημείων ήδη διατίθεται (2D to 3D projection).



Εικόνα 7.7 : Διαδικασία εντοπισμού ακμών σε νέφη σημείων με τη μέθοδο της επαναπροβολής

Πηγή: Fast 3D Line Segment Detection From Unorganized Point Cloud. Lu et al., 2019

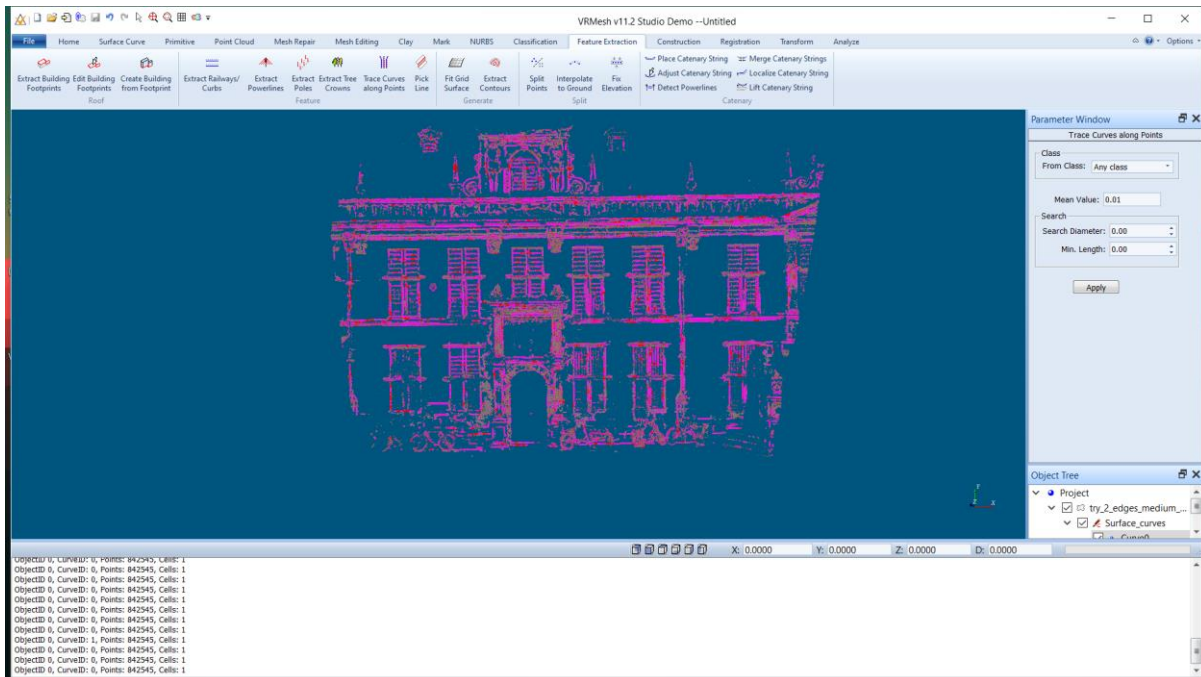
Αξιοποίηση υπαρχόντων λογισμικών

Σε προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε μια συνοπτική αναφορά σε ορισμένα λογισμικά που εκτελούν, αυτοματοποιημένη διανυσματοποίηση σε νέφη σημείων. Ωστόσο τα περισσότερα από αυτά δεν είναι ελεύθερα, ούτε δίνεται η δυνατότητα τροποποίησής τους, για την καλύτερη δυνατή εφαρμογή στο αντικείμενο μελέτης. Ωστόσο, θα γίνει αναφορά σε 2 εξ αυτών, τα οποία, δίνουν μια πρόσβαση σε αρκετές χρήσιμες λειτουργίες, για περιορισμένο χρόνο.

Τα αποτελέσματα του πρώτου με την εισαγωγή του νέφους των ακμών δίνουν άμεσα και γρήγορα συνεχή διανύσματα. Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο το πρόγραμμα επιτυγχάνει τον εντοπισμό και την απόδοση από τα σημεία καθώς και τα ενδιάμεσα βήματα που υλοποιεί, δεν είναι στοιχεία στα οποία ο χρήστης έχει πρόσβαση. Παράλληλα, η ελεύθερη έκδοση του λογισμικού δε δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας και αποθήκευσης του αποτελέσματος παρά μια οπτικοποίησή του.

Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση της υψηλότερης δυνατής ακρίβειας, υλοποιείται η διανυσματοποίηση των καμπύλων τμημάτων (Trace Curves Along Points) και το πρόγραμμα δίνει το παρακάτω αποτέλεσμα. Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί, ότι η πλήρης έκδοση του πακέτου δίνει τη δυνατότητα αποθήκευσης του παραγόμενου αποτελέσματος σε αρχείο *.dxf*, το οποίο είναι συμβατό με λογισμικά σχεδίασης, όπως το AutoCAD.

Ορφέας Σκέντζος
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΚΜΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ
ΣΗΜΕΙΩΝ



Εικόνα 7.8 : Χρήση του λογισμικού VRMesh για τη διανυσματική απόδοση των σημείων ακμών

Περιθώρια βελτίωσης & μελλοντικές εφαρμογές

Όπως αναφέρθηκε, με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής προτείνεται μια εναλλακτική προσέγγιση, για τον εντοπισμό των ακμών σε νέφη σημείων, με τη χρήση εικόνων κοντινού εύρους και φωτογραμμετρικών τεχνικών, αντί την επεξεργασία του νέφους και την εξαγωγή των ακμών απευθείας σε αυτό. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει το πλεονέκτημα, της πληροφορίας των ισχυρών και συνεχών γραμμών που παράγονται με τον ανιχνευτή Canny στις εικόνες, γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα και την απόδοση βελτιωμένων και πιο συμπαγών αποτελεσμάτων για τις γραμμές και στο παραγόμενο νέφος σημείων. Ο εντοπισμός και η εξαγωγή των ακμών σε εικόνες, είναι διαδικασίες που επιτυγχάνονται με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια, σε σύγκριση με τα νέφη σημείων, τα οποία είναι πιο κατάλληλα για την εξαγωγή επίπεδων χαρακτηριστικών και επιφανειών.

Ακόμα, όπως και στην περίπτωση αντικειμένου μελέτης της παρούσας εργασίας, ένα τρισδιάστατο μοντέλο πρόσοψης κτιρίου, τα δεδομένα του οποίου προέρχονται από επίγειους σαρωτές laser, μπορεί να περιέχει διάφορα σφάλματα. Τα τελευταία, εμφανίζονται συνήθως στα άκρα του μοντέλου και εκφράζονται μέσα από μια σχετική

απόκλιση, σε σύγκριση με τις πραγματικές τους θέσεις και οφείλονται σε κενά που προϋπάρχουν στα δεδομένα του σαρωτή αλλά και σε αλγορίθμους ανακατασκευής του μοντέλου από δεδομένα laser. Αυτά τα σφάλματα, ωστόσο, δεν υφίστανται στην περίπτωση αξιοποίησης της τεχνικής SfM με τη χρήση εικόνων με τις εντοπισμένες ακμές, για την απόδοση του νέφους. Με τον τρόπο αυτό, αντί για τη χρήση των αρχικών εικόνων η οποία θα απέδιδε ένα μη οργανωμένο νέφος με άπειρα σημεία τα οποία αποτελούν περιττή πληροφορία, προκύπτει άμεσα και με ακρίβεια χιλιοστού το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Παρά τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής για τον εντοπισμό των ακμών στα νέφη σημείων, προκύπτουν ορισμένα προβλήματα προς επίλυση στο επόμενο στάδιο της διανυσματικής απόδοσης αυτών. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρατηρείται (βλ. εικόνα 7.8) με τη χρήση των υπαρχόντων πακέτων και συγκεκριμένα του VRMesh, εντοπίζονται ορισμένες περιοχές, όπου οι ακμές που αποδίδονται διανυσματικά δεν είναι συνεχείς και δυστυχώς το λογισμικό δε δίνει τη δυνατότητα περαιτέρω επεξεργασίας ή αποθήκευσης και επεξεργασίας σε άλλο λογισμικό, για τη βελτιστοποίηση του αποτελέσματος. Ωστόσο, παρά αυτό το μειονέκτημα, αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο πακέτο υλοποιεί τρισδιάστατη διανυσματική απόδοση, χωρίς πρόσθετη επεξεργασία του νέφους ή της προβολής αυτού σε επίπεδο, όπως υλοποιούν άλλες μέθοδοι. Ορισμένες αξιοσημείωτες εναλλακτικές προσεγγίσεις, βρίσκονται και στο έργο των Lu et al. (2019) και Dalitz et al. (2017), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ωστόσο για τη χρήση των μεθόδων αυτών, δεν έχει αναπτυχθεί γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI – Graphical User Interface).

Μια ακόμα εναλλακτική προσέγγιση, είναι η αυτοματοποιημένη διανυσματική απόδοση που υλοποιούν διάφορα πακέτα σε δύο διαστάσεις. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί και το λογισμικό PointCab. Πιο αναλυτικά, το συγκεκριμένο πακέτο υλοποιεί διανυσματική απόδοση, αρχικά με τη δημιουργία ορθό-εικόνων (orthophotos) για κατόψεις οι προσόψεις κτιρίων με τη συνήθη μέθοδο της τομής του νέφους σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο και, στη συνέχεια, μέσω του εργαλείου *Vectorizer*, αξιοποιεί την ακρίβεια και τη λεπτομέρεια που προσφέρουν οι μετρήσεις, είτε αυτές προέρχονται από επίγεια φωτογραμμετρική τεκμηρίωση είτε από σαρωτές laser, ώστε τελικά, να αποδώσει διανυσματικά σε μορφή CAD δισδιάστατου σχεδίου, τη συγκεκριμένη τομή.

Όλες οι υπάρχουσες τεχνολογίες που συζητήθηκαν παραπάνω, σε συνδυασμό με την αξιοποίηση του νέφους με τις εντοπισμένες ακμές, όπως προέκυψε από το πέρας της παρούσας εργασίας, μπορούν να συμβάλλουν στην εκ νέου ανάπτυξη ενός προγράμματος με γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη, ικανού να εκτελεί αυτοματοποιημένη τρισδιάστατη διανυσματική απόδοση από νέφη σημείων, χωρίς την ενδιάμεση επεξεργασία που χρειάζεται σε άλλες περιπτώσεις, όπως και στην περίπτωση του PointCab, που αναλύθηκε παραπάνω.

Η ανάπτυξη αυτών, ωστόσο είναι μια σύνθετη διαδικασία που μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση ισχυρών βιβλιοθηκών, όπως η PCL (Point Cloud Library), αλλά και η OpenCV.

Τέτοιες εφαρμογές μπορούν να γίνουν χρήση στην τρισδιάστατη τεκμηρίωση ανθρώπινων κατασκευών, σύγχρονων και μη, όσο σύνθετα και αν είναι το σχήμα και η γεωμετρία που τις χαρακτηρίζει, γεγονός που μειώνει σημαντικά τον χειροκίνητο τρόπο διαχείρισης και επεξεργασίας σε αυτά τα στάδια. Η χρησιμότητά τους βρίσκεται εφαρμογές στον τομέα της πολεοδομίας, όπου οι όψεις κτιρίων παρέχουν σημαντικές αναφορές για το σχέδιο πόλης σε λεπτομερές επίπεδο. Ομοίως για την τεκμηρίωση μνημείων και αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς αλλά και για την ανάπτυξη μοντέλων BIM, η ακριβής σχεδίαση του περιγράμματος μέσω των ακμών, περιλαμβάνει ένα μεγάλο πλήθος πολύτιμων πληροφοριών που πρέπει να καταγραφούν. Ακόμα και για εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας όπου η οπτική του χρήστη μιμείται τη φυσική παρουσία, όπως ο εικονικός τουρισμός, ή τα ενημερωτικά εικονικά παιχνίδια, η συμβολή και η αξιοποίηση των παραγόμενων νεφών σημείων με τις λεπτομερώς εντοπισμένες ακμές, είναι κομβική.

Ορφέας Σκέντζος
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΚΜΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ
ΣΗΜΕΙΩΝ

Βιβλιογραφία

Δημοσιεύσεις:

Grilli E., 2020: Automatic classification of architectural and archaeological 3D Data (PhD Thesis).

Poonam Dhankhar, Neha Sahu, 2013. A Review and Research of Edge Detection Techniques for Image Segmentation. International Journal of Computer Science and Mobile Computing - IJCSMC Vol.2, No. 7.

Aman Mehta, H. Lehri, P. Thakur, S. Tambe, 2014. Exploring Methods to Improve Edge Detection with Canny Algorithm. Department of Computer Science and Information Technology of Veermata Jijabai Technological Institute.

Rashmi, M. Kumar, R. Saxena, 2013. Algorithm and Technique on Various Edge detection: A Survey". Signal & Image Processing : International Journal (SIPIJ) Vol.4, No.3, June 2013

R. Maini, A. Himanshu, 2009. Study and Comparison of Various Image Edge Detection Techniques. International Journal of Image Processing. 3.

V. Volkov, R. Germer, A. Oneshko, D. Orlov, 2012. Objects Description and Extraction by the Use of Straight Line Segments in Digital Images.

N. Micheletti, J. Chandler, S. N. Lane, 2015: Structure from motion (SfM) photogrammetry. Loughborough University. Journal contribution ISSN 2047-0371. <https://hdl.handle.net/2134/17493>.

P. H. Nyimbili, H. Demirel, D. Seker, T. Erden, 2016. Structure from Motion (SfM) - Approaches and Applications. Journal contribution. Proceedings of the International Scientific Conference on Applied Sciences, Antalya, Turkey.

David G. Lowe, 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision.

Azriel Rosenfeld, 1976. Digital picture analysis. Berlin: Springer-Verlag. ISBN 0-387-07579-8.

Azriel Rosenfeld, R. Klette, 2004. Digital Geometry: Geometric Methods for Digital Image Analysis (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics). San Diego: Morgan Kaufmann. ISBN 1-55860-861-3.

G. T. Herman , 1998. Geometry of Digital Spaces. Applied and Numerical Harmonic Analysis. Boston, MA: Birkhäuser Boston, Inc. ISBN 978-0-8176-3897-9. MR 1711168.

L. Chen, 2004. Discrete Surfaces and Manifolds: A Theory of Digital-Discrete Geometry and Topology. SP Computing. ISBN 0-9755122-1-8.

C. Dalitz, T. Schramke, M. Jeltsch, 2017. Iterative Hough Transform for Line Detection in 3D Point Clouds. Image Processing On Line, 7, pp. 184–196. <https://doi.org/10.5201/ipol.2017.208>

M. Jeltsch, C. Dalitz, R. Pohle-Frohlich, 2016. Hough parameter space regularisation for line detection in 3D, in International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), 2016, pp. 345–352.

Bienert, Anne. (2008). Vectorization. Edge preserving Smoothing and Dimensioning of Profiles in Laser Scanner Point Clouds.

E. K. Stathopoulou, F. Remondino, 2019. Semantic Photogrammetry – Boosting Image-Based 3d Reconstruction with Semantic Labeling

Lu Xiaohu, Liu Yahui, Li Kai, 2019. Fast 3D Line Segment Detection From Unorganized Point Cloud.

M. Awrangjeb, Y. Gao, G. Lu, 2018. Classifier-Free Extraction of Power Line Wires from Point Cloud Data. 1-7. 10.1109/DICTA.2018.8615869.

B. Guo, Q. Li, X. Huang, C. Wang, 2016. An Improved Method for Power-Line Reconstruction from Point Cloud Data. Remote Sensing. 8. 36. 10.3390/rs8010036.

S. Pu, G. Vosselman, 2010. Refining building facade models with images.

Ιστοσελίδες:

https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py_tutorials/py_imgproc/py_canny/py_canny.html

<https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/canny.html>

<https://justin-liang.com/tutorials/canny/>

<https://www.dielmo.com/wp-content/uploads/2016/06/VECTORES-3D.jpg>

http://vision.stanford.edu/teaching/cs231a_autumn1112/lecture/lecture4_edges_lines_cs231a_marked.pdf (Finding lines: From detection to model fitting - Fei-Fei Li 2011)

<https://www.britannica.com/topic/drafting/Hidden-lines> (Encyclopedia Britannica Inc. 1994)

<https://medium.com/ai-salon/understanding-deep-self-attention-mechanism-in-convolution-neural-networks-e8f9c01cb251> (Understanding Deep Self-attention Mechanism in Convolution Neural Networks” - Shuchen Du ,2019)

Βιβλία:

Ανάλυση και Ερμηνεία εικόνας. Φαφούτης Ιωάννης, 2003 (Γεωμετρική διόρθωση, Βελτίωση, Μετασχηματισμοί και Υπέρθωση Εικόνας SAR. Κεφ. 5)

Arlinghaus, Sandra L. (ed.) Practical Handbook of Curve Fitting. CRC Press, 1994. 249pp. Persistent URL (URI): <http://hdl.handle.net/2027.42/58759>

Kolb, William M. Curve Fitting for Programmable Calculators. 3rd ed. Bowie, Md.: SYNTEC Inc., 1984

A. Σκορδάς, Β. Αναστασόπουλος. Ψηφιακή επεξεργασία Εικόνων & Σημάτων

A. Δερμάνης, 1986. Συνορθώσεις Παρατηρήσεων και Θεωρία Εκτίμησης (τόμος 1)

Jaan Kiusalaas. Numerical Methods in Engineering with MATLAB®

Depth, Crossings and Conflicts in Discrete Geometry By Marek Sulovský (ISBN 978-3-8325-3119-5).

Π. Πατιάς, 1991. Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία

Karl Kraus. Φωτογραμμετρία, Τόμος 1: Βασικές Έννοιες και Μέθοδοι