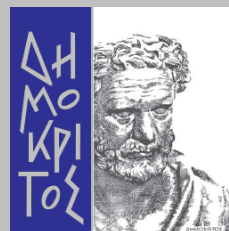




ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
HAROKOPIO UNIVERSITY



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΤΙΤΛΟΣ:

ΕΚΘΕΣΗ ΠΕΠΡΑΓΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση
Ειδική Υπηρεσία Διαχείρισης
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΕΠΑνΕΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ • ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ • ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ





ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ:
ΣΤΕΦΑΝΙΔΟΥ ΑΡΤΕΜΙΣ

Α.Μ.:
IT21996

ΠΡΑΚΤΙΚΗ
ΦΟΡΕΑΣ: Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος

ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ: 1/7/2022 - 30/9/2022

ΤΙΤΛΟΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗΣ:
SCORING OF AN EVALUATION METRIC FOR ROAD NETWORK PROPOSALS

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΤΣΕΡΠΕΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΦΟΡΕΑ:
ΧΑΡΟΥ ΕΛΕΝΗ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ PROJECT:
ΒΕΚΙΝΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

Scoring of an Evaluation Metric for Road Network Proposals

Άρτεμις Στεφανίδου

1/7/2022

Run Project

Για αρχή για να τρέξει το πρόγραμμα σωστά απαιτείται να δημιουργήσετε ένα conda environment. Σε αυτό θα πρέπει με τη σειρά να εγκαταστήσετε, μέσω pip, τα ακόλουθα :

1. pip install scikit-image
2. pip install opencv-python
3. pip install sknw
4. pip install matplotlib
5. pip install Shapely
6. pip install osmnx
7. pip install utm
8. pip install rdp
9. pip install argparse

Αυτό μπορείτε να το κάνετε είτε με την εντολή **pip install requirements.txt**, όπου μέσα στο txt αρχείο υπάρχουν τα όσα χρειάζεται το πρόγραμμα για να λειτουργήσει είτε, χειροκίνητα και να τα κατεβάσετε ένα προς ένα με τη σειρά που αναφέρεται πιο πάνω.

Αν αντιμετωπίσετε πρόβλημα με το GDAL ή το Fiona θα πρέπει πρώτα να δείτε την έκδοση της python που χρησιμοποιείται και να κατεβάσετε το αντίστοιχο αρχείο από την ακόλουθη σελίδα. Αν για παράδειγμα έχετε την έκδοση 3.8 τότε θα κατεβάσετε το αρχείο GDAL-3.4.3-cp38-cp38-win_amd64.whl και το αντίστοιχο για το Fiona. Μόλις κατεβάσετε και τα δύο αρχεία τότε κάνετε pip install (το path του αρχείου).

Περίληψη

Το να αντληθούν συμπεράσματα οδικών γραφημάτων από δορυφορικές εικόνες είναι μία πρόκληση για τους υπολογιστές. Σε αυτή την Έκθεση Πεπραγμένων' χρησιμοποιήσαμε το APLS από το Project "CRESIn2" και το προσαρμόσαμε κατάλληλα στο δικό μας. Προσπαθήσαμε δηλαδή, να γενικοποιήσουμε το APLS metric, για να μπορέσουμε να το χρησιμοποιήσουμε και σε άλλους κλάδους, πέρα από τα road networks, όπως για παράδειγμα στην σωστή παρακολούθηση και στον έλεγχο των φλεβών στον άνθρωπο. Χρησιμοποιούμε το APLS Metric επειδή μέσα από μια έρευνα που πραγματοποιήσαμε είδαμε ότι έχει χρησιμοποιηθεί και σε άλλα projects, σαν μια evaluation metric που είναι αξιόπιστη στη χρήση σε άλλα road networks

Εισαγωγή

Η σωστή χαρτογράφηση των δρόμων, παραμένει ένα άλυτο πρόβλημα σε πολλές χώρες του πλανήτη μας, ειδικά σε δυναμικά σενάρια όπως είναι οι φυσικές καταστροφές. Τα συστήματα τα οποία ήδη χρησιμοποιούνται για την συλλογή τέτοιων δεδομένων, όπως είναι το GPS για κινητά, είναι ανεπαρκή εξαιτίας της σπάνιας συλλογής δεδομένων. Σε περιπτώσεις όπως, πυρκαγιάς, πλυμμύρας, τυφώνα και γενικότερα κατοστροφής μεγάλης κλίμακας, με τον τρόπο που ενημερώνεται το GPS ίσως και να χρειαστούν μήνες μέχρι να υπάρξει μια σωστή και πλήρη χαρτογράφηση της περιοχής που καταστράφηκε, Κάτι που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην μετακίνηση των ανταποκριτών. Για παράδειγμα στον κυκλώνα 'Μαρία' που έγινε το 2017 στο Πουέρτο Ρίκο, το ανθρώπινο δυναμικό της ομάδας OpenStreetMap, χρειάστηκε διάστημα δύο μηνών για την πλήρη χαρτογράφηση της περιοχής, κάτι που καθυστά αδύνατη την άμεση χαρτογράφηση των δρόμων έτσι ώστε να γίνει πιο γρήγορα και πιο σωστά η εκκένωση της περιοχής και η αποφυγή πολλών θυμάτων. Γι' αυτό το λόγο μου ανατέθηκε αυτό το κομμάτι του project, για

να μπορέσουμε να δώσουμε τη δυνατότητα και να διευκολύνουμε το evaluation της χαρτογράφησης των δρόμων για να μπορέσει να βοηθήσει τους ανταποκριτές

Datasets

Το project αυτό βασίζεται σε ένα dataset που μου παραχώρησε ο doctor Ανδρέας Βεκίνης για την πρακτική μου άσκηση. Το dataset αυτό προέρχεται από το SpaceNet και απαρτίζεται από δύο φακέλους με tif αρχεία. Ο πρώτος φάκελος με το όνομα ground_truth περιέχει τις μάσκες των εικόνων του SpaceNet που μου δώθηκαν από τον doctor Ανδρέας Βεκίνης (όπου υπάρχει δρόμος είναι 1 και όπου δεν υπάρχει είναι 0), ενώ ο δεύτερος φάκελος με το όνομα proposal περιέχει προτεινόμενα δίκτυα δρόμων των αρχείων από τον πρώτο φάκελο. Πρώτο μέλημα που είχα έτσι ώστε να συνεχιστεί σωστά το project ήταν να δημιουργήσω ένα script που θα έβρισκε τα κοινά ονόματα των αρχείων που έχουν και οι δύο φακέλοι (μερικά αρχεία από τον πρώτο φάκελο δεν έχουν προτεινόμενο δρόμο στον δεύτερο φάκελο), προκειμένου, να γίνει η σύγκριση τους και να βγει ένα αποτέλεσμα (νούμερο) από το APLS. Αυτό το νούμερο θα δείχνει το πόσο όμοια είναι τα δύο γραφήματα(ground_truth, proposal) ή όχι

City List	
Areas	Km of Road
Vegas	3685
Paris	425
Shanghai	3537
Khartoum	1030
Moscow	3066
Mumbai	1951
San Juan	1139

Προαπαιτούμενες Γνώσεις

Σε αυτή την παράγραφο θα αναλύσουμε τα αντικείμενα με τα οποία ασχοληθήκαμε έτσι ώστε να υπάρξει μια καλύτερη κατανόηση των όσων έπονται.

Graph

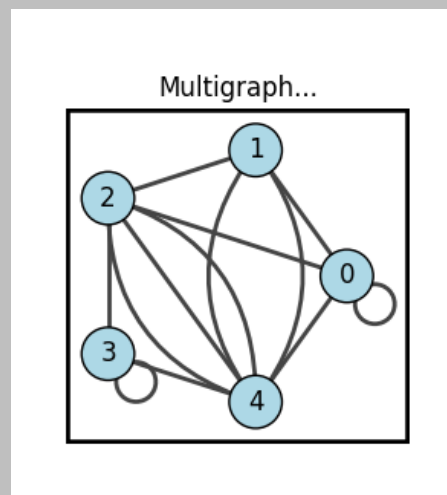
Το αντικείμενο που χρησιμοποιήσαμε ήταν της κλάσης `networkx.classes.graph.Graph`. Με λίγα λόγια η κλάση `Graph` είναι ένα μη κατευθυνόμενο γράφημα. Ένα μη κατευθυνόμενο γράφημα G είναι ένα ζευγάρι (V, E) όπου V είναι ένα σύνολο κόμβων και E είναι ένα σύνολο με ζευγάρια κόμβων.



[6] Δίκτυο Δρόμων ως Graph

MultiGraph

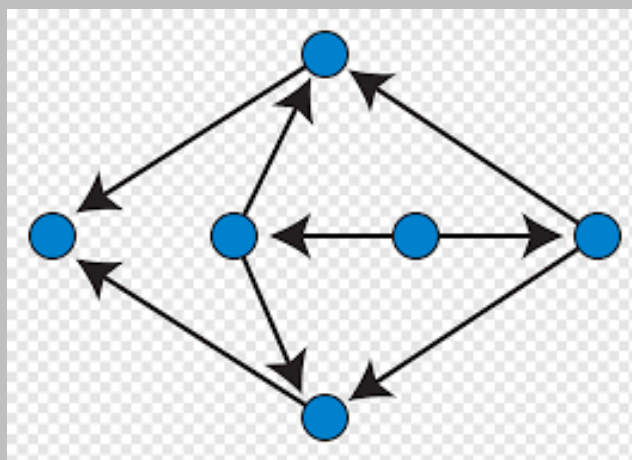
Το αντικείμενο που χρησιμοποιήσαμε ήταν της κλάσης `networkx.classes.multigraph.MultiGraph`. Με λίγα λόγια η κλάση `MultiGraph` είναι ένα μη κατευθυνόμενο γράφημα με πολλαπλές ακμές. Όταν αναφερόμαστε σε γράφους με πολλαπλές ακμές εννοούμε ότι υπάρχουν πολλαπλές ακμές μεταξύ των κόμβων (επιτρέπονται τα self loops). Σε ένα `MultiGraph` κάθε ακμή έχει ένα κλειδί για τη διάκριση μεταξύ πολλαπλών ακμών που έχουν τον ίδιο source κόμβο και τον ίδιο target.



[7] Multigraph

DiGraph

Το αντικείμενο που χρησιμοποιήσαμε ήταν της κλάσης `networkx.classes.graph.DiGraph`. Με λίγα λόγια η κλάση `DiGraph` είναι ένα κατευθυνόμενο γράφημα. Ένα κατευθυνόμενο γράφημα G είναι ένα ζευγάρι (V, E) όπου V είναι ένα σύνολο κόμβων και E είναι ένα σύνολο με διατεταγμένα ζευγάρια κόμβων. Δηλαδή, ένα κατευθυνόμενο γράφημα ονομάζεται έτσι λόγω του ότι έχει κατευθυνόμενες ακμές. Σε ένα τέτοιο γράφο επιτρέπονται τα self loops αλλά όχι οι πολλαπλές παράλληλες ακμές.

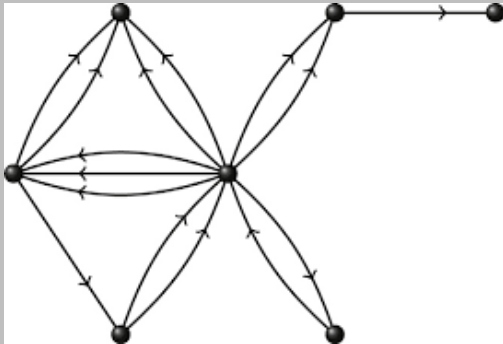


[8] Κατευθυνόμενο Γράφημα

MultiDiGraph

Το αντικείμενο που χρησιμοποιήσαμε ήταν της

κλάσης `networkx.classes.multigraph.MultiDiGraph`.ρη από το όριο θα μετατραπούν σε 0 (Μαύρο). Με λίγα λόγια η κλάση `MultiDiGraph` είναι ένα κατευθυνόμενο γράφημα με πολλαπλές κατευθυνόμενες ακμές (επιτρέπονται τα self loops).

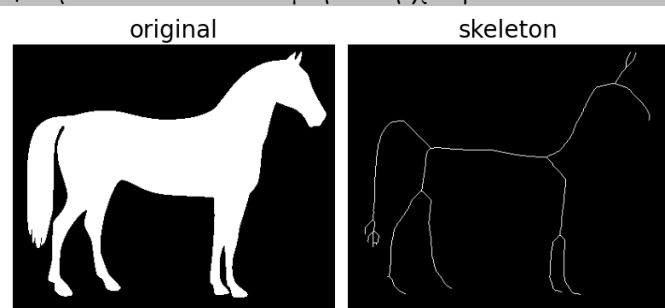


[9] MultiDiGraph

Skeletonize

Ο σκελετισμός χρησιμοποιείται ευρέως στην αναπαράσταση αντικειμένων, ανάκτηση, χειρισμό, αντιστοίχιση, εγγραφή, παρακολούθηση, αναγνώριση, συμπίεση κ.λπ.

Μπορεί να διευκολύνει τη γρήγορη και ακριβή επεξεργασία εικόνας στον ελαφρύ σκελετό της, αντί για μια κατά τα άλλα βαρυσή αρχική εικόνα.



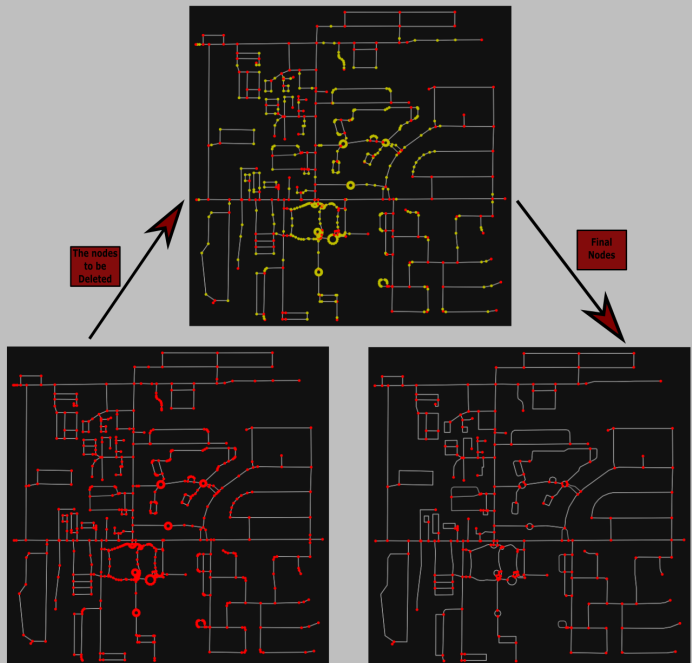
[10] skeletonize

Για να ολοκληρωθεί το skeletonization πρέπει η εικόνα να περάσει και από το thresholding.

Το thresholding είναι η διαδικασία μετατροπής μιας εικόνας σε κλίμακα του γκρι σε δυαδική εικόνα. Με βάση μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου, τα pixels με τιμή μεγαλύτερη από το όριο θα μετατραπούν σε 255 (Λευκό) και μικρότε-

Simplify Graph

Το `simplify_graph` καθορίζει την τοπολογία γραφήματος αφαιρώντας όλους τους κόμβους που δεν είναι τομές ή αδιέξοδα.



Η μέθοδος `simplify_graph` παίρνει σαν παράμετρο ένα `MultiDiGraph`, το οποίο το αναλύσαμε παραπάνω.

Ramer-Douglas-Peucker

Ο αλγόριθμος Ramer-Douglas-Peucker είναι ένας αλγόριθμος για τη μείωση του αριθμού των κόμβων σε μια καμπύλη που προσεγγίζεται με μια σειρά κόμβων.

Evaluation Metric

Ιστορικά, οι μετρήσεις που βασίζονται σε pixel, όπως το F1 score έχουν χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της ποιότητας των proposal graphs. Αυτές οι μετρήσεις όμως δεν είναι οι βέλτιστες για τους λόγους που θα πούμε παρακάτω. Γι' αυτό το λόγο στο project χρησιμοποιήσαμε το Average Path Length Similarity (APLS) που είναι σχεδιασμένο για τη μέτρηση ομοιότητας μεταξύ γραφημάτων ground truth και proposal graph.

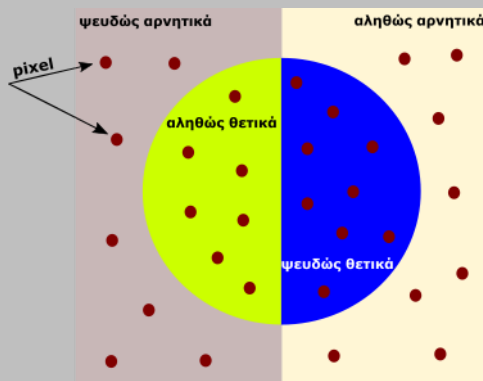
F1 Metric

Το F1 score σε επίπεδο pixel είναι μία μέτρηση που χρησιμοποιείται συνήθως για την αξιολόγηση τμηματοποίησης του computer vision. Για να γίνει πιο κατανοητό το τί κάνει ακριβώς το F1 metric θα δώσουμε ένα παράδειγμα. Ας υποθέσουμε πως έχουμε τις παρακάτω φωτογραφίες:



[3] F1 METRIC

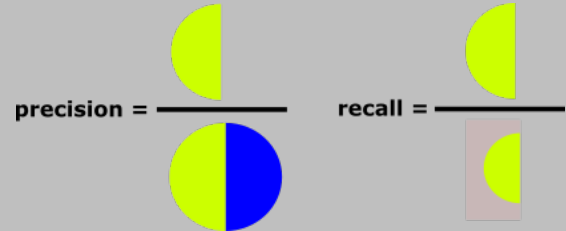
το F1 score αυτό που θα κάνει για αρχή, είναι να ομαδοποιήσει τα pixels και να βγάλει ένα αποτέλεσμα όπως το παρακάτω:



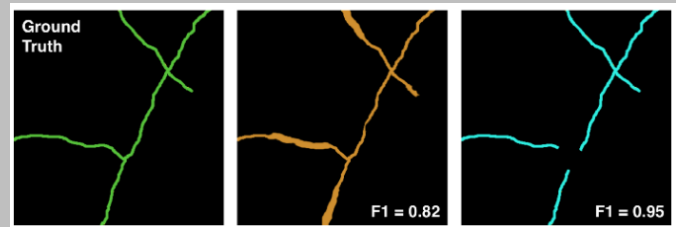
Στη συνέχεια, θα υπολογίσει μέσω μαθηματικών πράξεων ένα score για κάθε μία από τις εικόνες (εικόνες με κίτρινο και μπλε χρώμα, όχι για το ground truth) όπως παρακάτω:

$$2 * \frac{\text{precision} * \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}}$$

όπου,



Άρα στην προκειμένη περίπτωση, φαίνεται ότι το πορτοκαλί έχει περισσότερα διαφορετικά pixel από ότι το μπλε σε σχέση με το ground truth άρα περιμένουμε να έχει και χειρότερη f1 βαθμολογία (κλιμακώνεται από 0 (κακή) έως 1 (τέλεια)).



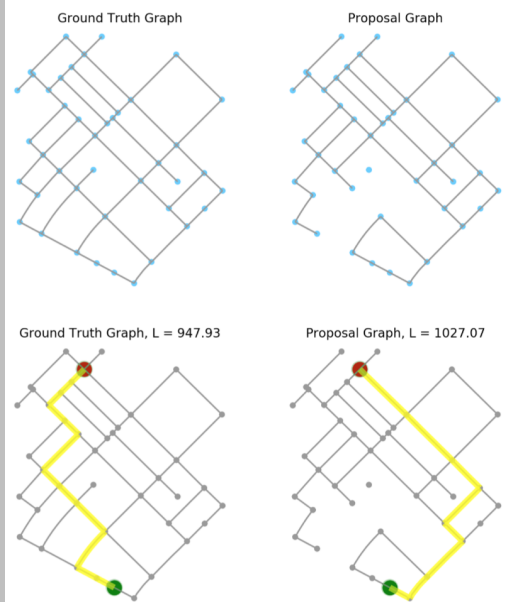
[3] F1 METRIC SCORE

Άρα το συμπέρασμα που μπορούμε να βγάλουμε είναι ότι το F1 score δεν είναι βέλτιστο για road networks, δεδομένου ότι ένα ελαφρύ σφάλμα στο πλάτος του δρόμου τιμωρείται πολύ, ενώ το να μην υπάρχουν τα σωστά junctions σε έναν proposal δρόμο (από μια σκιά ή ένα προεξέχον δέντρο, για παράδειγμα) τιμωρείται ελαφρά.

APLS Metric

Το APLS (Average Path Length Similarity) είναι μία μέθοδος για να μετρήσουμε τη διαφορά μεταξύ ground truth και proposal γραφημάτων. Σε σύγκριση με την F1 Metric το APLS ενδιαφέρεται

για την σωστή σύνδεση των δρόμων και όχι για τα σωστά pixels της εικόνας. Επομένως, η λογική γι' αυτή την μετρική, είναι το άθροισμα των διαφορών των βέλτιστων μηκών διαδρομής μεταξύ κόμβων στο ground truth graph G και στο proposal graph G'.



[3] DISTANCE BETWEEN OF NODES

Ο τύπος για το APLS Metric είναι:

$$C = 1 - \frac{1}{N} \sum \min \left\{ 1, \frac{|L(a,b) - L(a',b')|}{L(a,b)} \right\}$$

όπου, $L(a,b)$, $L(a',b')$ οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των δύο αυτών σημείων στο ground truth graph και proposal graph αντίστοιχα (για να βρεθεί η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σημείων, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος συντομότερης διαδρομής του Dijkstra) και N ο αριθμός των μοναδικών μονοπατιών.

Η μετρική APLS κλιμακώνεται από 0 (κακή) έως 1 (τέλεια). Για το πρώτο σενάριο όπου $C=0$ ισχύει ότι:

Αν $C=0$ δηλαδή,

$$C = 1 - \frac{1}{N} \sum \min \left\{ 1, \frac{|L(a,b) - L(a',b')|}{L(a,b)} \right\} = 0$$

για να ισχύει αυτό πρέπει

$$\frac{1}{N} \sum \min \left\{ 1, \frac{|L(a,b) - L(a',b')|}{L(a,b)} \right\} = 1$$

$$\sum \min \left\{ 1, \frac{|L(a,b) - L(a',b')|}{L(a,b)} \right\} = N$$

για να γίνει αυτό πρέπει:

$$1 \leq \frac{|L(a,b) - L(a',b')|}{L(a,b)} \text{ όπου } L(a,b) > 0 \text{ γιατί είναι απόσταση}$$

όπως και $L(a',b') > 0$

$$|L(a,b) - L(a',b')| > L(a,b)$$

$$L(a,b) \leq L(a',b') - L(a,b) \Rightarrow L(a,b) > L(a',b') + L(a,b) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{2L(a,b) \leq L(a',b')}$$

$$\text{ή } L(a',b') \leq 0 \text{ όπου } L(a',b') < 0 \text{ δεν γίνεται}$$

Άρα, $L(a',b') = 0$

δηλαδή a' και b' να είναι το ίδιο σημείο. Που δε γίνεται γιατί το aπλs δεν συγκρίνει ίδιους κόμβους.

Άρα συμπεραίνουμε ότι για να έχει ένα proposal graph κακή τιμή μετρικής πρέπει οι αποστάσεις που δίνει να είναι διπλάσιες ή και παραπάνω από τις αποστάσεις που δίνει το ground truth.

Για το δεύτερο σενάριο όπου $C=1$ ισχύει ότι:

Αν $C=1$ δηλαδή,

$$1 - \frac{1}{N} \sum \min \left\{ 1, \frac{|L(a,b) - L(a',b')|}{L(a,b)} \right\} = 1 \Rightarrow$$

$$\frac{1}{N} \sum \min \left\{ 1, \frac{|L(a,b) - L(a',b')|}{L(a,b)} \right\} = 0 \Rightarrow$$

$$\sum \min \left\{ 1, \frac{|L(a,b) - L(a',b')|}{L(a,b)} \right\} = 0 \Rightarrow$$

για να είναι το άθροισμα 0 πρέπει όλα τα συντελεστές του να είναι 0 ή να αλληλοαναιρούνται π.χ. $-0,5, 0,5 \rightarrow 0,5 + (-0,5) = 0$

για να συμβεί όμως το δεύτερο θα πρέπει το $\frac{|L(a,b) - L(a',b')|}{L(a,b)} < 0$

Που δε γίνεται γιατί ο αριθμητής είναι απόλυτη τιμή και ο παρονομαστής απόσταση.

$$\text{Άρα } \frac{|L(a,b) - L(a',b')|}{L(a,b)} = 0 \Rightarrow \boxed{L(a,b) = L(a',b')}$$

Άρα συμπεραίνουμε ότι για να έχει ένα proposal graph τέλεια τιμή μετρικής πρέπει οι αποστάσεις



που δίνει να είναι οι ίδιες με τις αποστάσεις που δίνει το ground truth.

Γενική Διαδικασία

Για να γίνει πιο κατανοητή η υλοποίηση του project ακολουθεί ένα screen cast :

Αποτελέσματα

Η αρχική σκέψη για την ανάθεση αυτού του project ήταν η δημιουργία δύο gpickle (τρόπος

αποθήκευσης δεδομένων) αρχείων για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν σαν είσοδο στο A-PLS project που θα υλοποιήσει, στη συνέχεια, ο Doctor Ανδρέας Βεκίνης. Το ένα αρχείο με όνομα Ground_Truth.gpickle θα δημιουργηθεί όταν εκτελέσουμε το πρόγραμμα με την εικόνα στο ground_truth φάκελο ενώ, το άλλο αρχείο με όνομα Proposal.gpickle θα δημιουργηθεί όταν εκτελέσουμε το πρόγραμμα με την εικόνα στο proposal φάκελο. (για παραπάνω πληροφορίες μπορείτε να αντρέξετε στην προηγούμενη ενότητα και να δείτε το screen cast).



1 Συνεργασία με τον Φορέα επιβλέποντές μου.

Στις 1/7/2022 ήρθα σε επαφή με την κυρία Ελένη Χάρου για να ξεκινήσω την Πρακτική μου Άσκηση όπως αυτή ορίστηκε από το Πανεπιστήμιο. Η κυρία Χάρου, αφού πρώτα μου εξήγησε αναλυτικά τις έρευνες με τις οποίες ασχολείται ο Δημόκριτος, μου έκανε μια ξενάγηση για να δω τα projects με τα οποία ασχολούνταν εκείνη την περίοδο. Αυτό έγινε με σκοπό να διαλέξω αυτό που θα μου ταίριαζε καλύτερα. Καταλήξαμε, λοιπόν, στο project του Ανδρέα Βεκίνη. Και με τους δύο θεωρώ πως είχαμε μια πολύ καλή συνεργασία. Αφού μου εξήγησαν λεπτομερώς το project, έτσι ώστε να κατανόησω ακριβώς το τι θα κάνουμε αλλά και το τι θα αναλάβω εγώ, ήταν εκεί και καθόλη τη διάρκεια της πρακτικής άσκησης για τυχόν απορίες που μου προέκυπταν.

2 Βαθμός Επίτευξης Πρακτικής Άσκησης

Το project που έπρεπε να διεκπεραιώσω ήταν το να καταφέρω να υλοποιήσω από το skeletonization των φωτογραφιών που μου δώθηκαν μέχρι και την δημιουργία δύο gprickle για να μπορέσει μετά να τα χρησιμοποιήσει ο doctor Ανδρέας Βεκίνης ως είσοδο στο arls. Η υλοποίηση του project ήρθε εις πέρας μέχρι και την τελευταία απαίτηση από τους

3 Οφέλη Π.Α. και Γνώσεις Προπτυχιακού Επιπέδου

Δεξιότητες	
Αξιοποιήθηκαν	Αποκτήθηκαν
coding in Python Anaconda envs	Γνώσεις για το sklearn Καλύτερη Κατανόηση των conda environments
Σωστή Διαχείριση των threads	Σωστή αντιμετώπιση προβλημάτων για GDAL Σωστή αντιμετώπιση προβλημάτων για το FIONA Χειρισμός του QGIS

4 Προτάσεις για Βελτίωση της Π.Α.

Δεδομένου των συνθηκών και της εποχής μας, όπου όλα έχουν μια πιο διαδικτυακή φύση, θεωρώ σκόπιμο κάποιες λειτουργίες του γραφείου της πρακτικής άσκησης στο πανεπιστήμιο μας, να γίνονται και αυτές διαδικτυακά. Έτσι, ο φοιτητής αλλά και όλο το σύστημα θα εξοικονομεί χρόνο, θα γίνονται οι λειτουργίες αυτές πιο οργανωμένα και θα αποφευχθεί ο συνωστισμός σε ώρες που είναι ανοιχτό το γραφείο της Π.Α..

Αναφορές

- [1] WIKIPEDIA F1 SCORE
- [2] SpaceNet: A Remote Sensing Dataset and Challenge Series: *τελευταία αναθεώρηση 15 Ιουλίου 2019*
- [3] SpaceNet Road Detection and Routing Challenge Μέρος I
- [4] Sat2Graph: Road Graph Extraction Through Graph-Tensor Encoding
- [5] Intersection over Union (IoU) for object detection: *από Adrian Rosebrock Νοέμβριο 7, 2016*
- [6] Δίκτυο Δρόμων ως Γράφος
- [7] Multigraph
- [8] DiGraph Description
- [9] A new matrix representation of multidigraphs
- [10] Skeletonize: *scikit-image*