Τεχνητή Όραση

ΤΠ 7004

Μάθημα 5ο και 6ο: Προσδιορισμός σχημάτων, μετασχηματισμός Hough

Δρ. Θάνος Δεμίρης

Μετασχηματισμός Hough

Εντοπισμός ευθειών γραμμών σε εικόνες

Intermediate Vision

- Η ανίχνευση ακμών μας δίνει μία σειρά από ενδεχόμενα τεμαχισμένες γραμμές και πολύ θόρυβο
  - Σπάνια αρκεί μόνο η ανίχνευση γραμμών για να εντοπίσουμε αντικείμενα
- Προκειμένου να «εξάγουμε χαρακτηριστικά», όπως
  - ευθείες γραμμές,
  - κύκλους,
  - γωνίες,
  - ελλειπτικά σχήματα ή ακόμη και άλλα,
  - όχι τόσο εύκολα γεωμετρικά προσδιορίσιμα, σχήματα
- απαιτείται ένα επιπλέον βήμα

Αναζητώντας τη γραμμή…

- Ο απλούστερος μαθηματικός ορισμός:
  - y = mx + b
  - η σταθερά m δίνει μία κλήση στη γραμμή και η σταθερά b προσαρμόζει τη διαφορά ύψους
- Έχει προβλήματα οριακών τιμών…
  - Γραμμές κάθετες στον άξονα x (και παράλληλες στον y)???

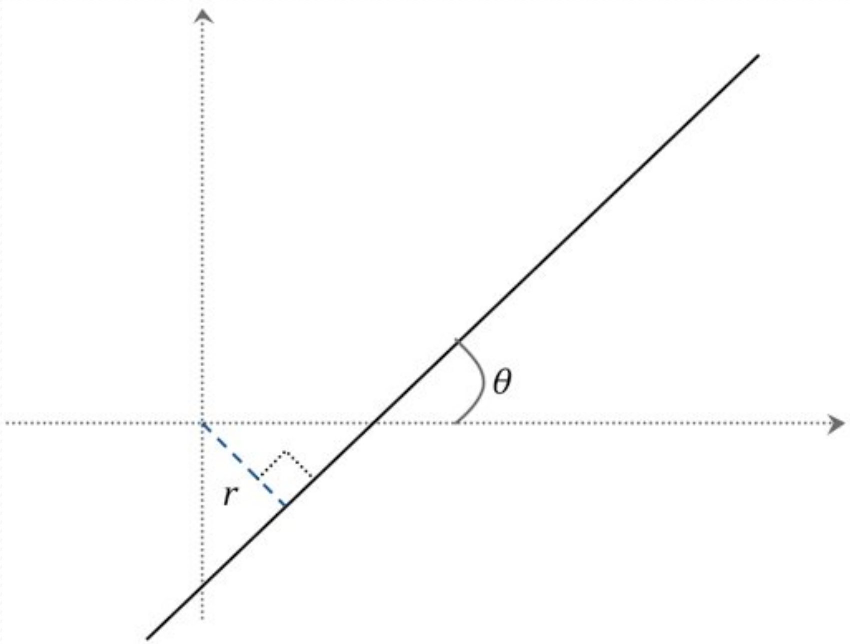
Εναλλακτικός ορισμός

$$y = \left(\frac{\cos\theta}{\sin\theta}\right)x + \left(\frac{r}{\sin\theta}\right) \Rightarrow$$

$$\boxed{r = x\cos\theta + y\sin\theta}$$

$$\theta \in [0,\pi] \wedge r \in R$$

$$[\theta \in [0,2\pi] \wedge r \geq 0]$$



Άλλες πληροφορίες για τη γραμμή

- Η προηγούμενη σχέση ως ημιτονοειδής συνάρτηση:

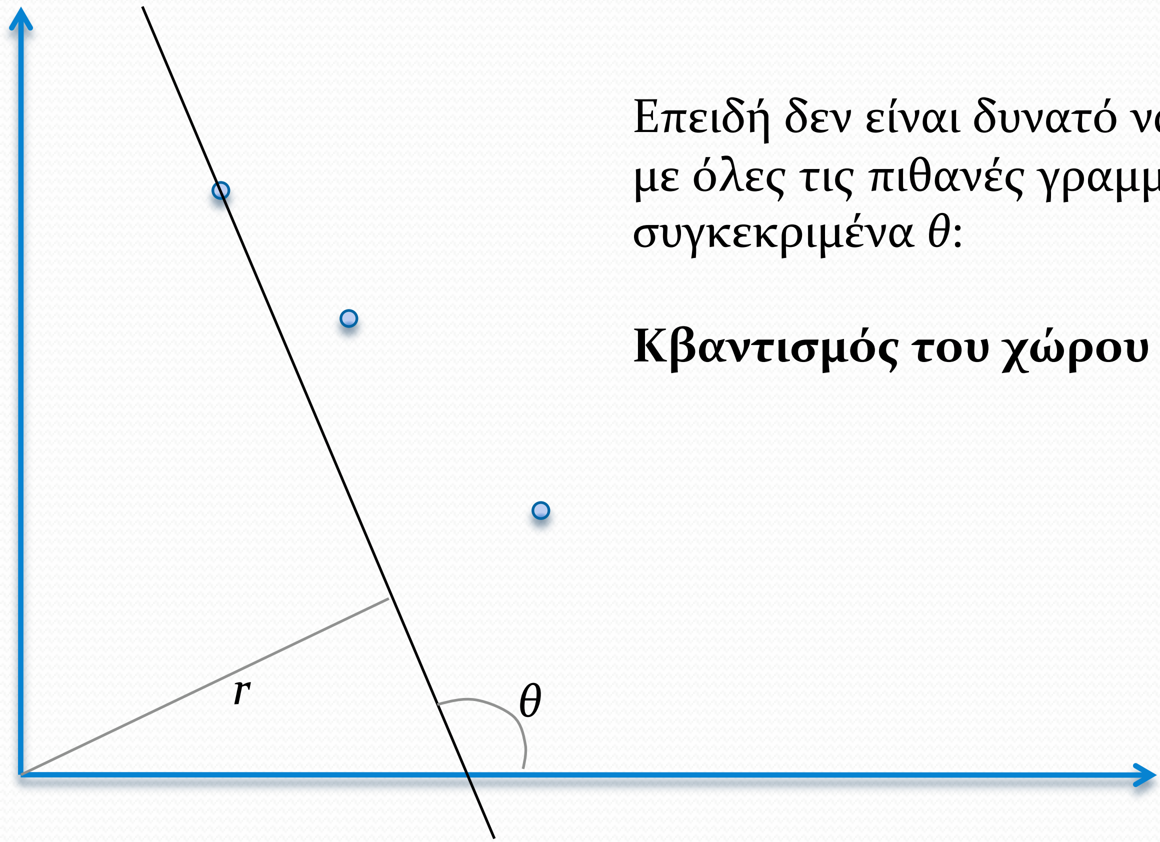
$$r(\theta) = x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta$$

- Η γραμμή ορίζεται από δύο σημεία στο χώρο τα οποία διαπερνά
- Αντίστροφα: ένα σημείο ορίζεται από την τομή γραμμών που το διαπερνούν
  - Κρατάμε σταθερά τις συντεταγμένες x και y και αλλάζουμε τις συντεταγμένες *r* και *ϑ* εξομοιώνοντας έτσι τις γραμμές που τέμνονται στο σημείο αυτό

Πίνακας συσσώρευσης

- Για ένα σύνολο σημείων θέλουμε να βρούμε τη γραμμή που τα διαπερνά
- Δημιουργούμε για κάθε σημείο την ημιτονοειδή του συνάρτηση
- Σχεδιάζουμε τις συναρτήσεις αυτές σε σύστημα συντεταγμένων με άξονες τα r και θ
  - Το αποτέλεσμα ονομάζεται **πίνακας συσσώρευσης** (accumulation array)
- Το σημείο τομής τους (αν υπάρχει) μας δίνει τη γραμμή που περνάει από όλα τα σημεία!!!
  - Η απόσταση από το μηδενικό σημείο, και η γωνία με τους άξονες είναι κοινή, άρα πρόκειται για κοινή γραμμή

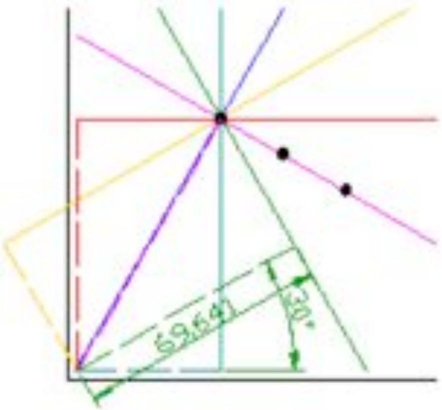
Παράδειγμα εύρεσης γραμμής από 3 σημεία



Επειδή δεν είναι δυνατό να δοκιμάσουμε με όλες τις πιθανές γραμμές επιλέγουμε συγκεκριμένα θ:

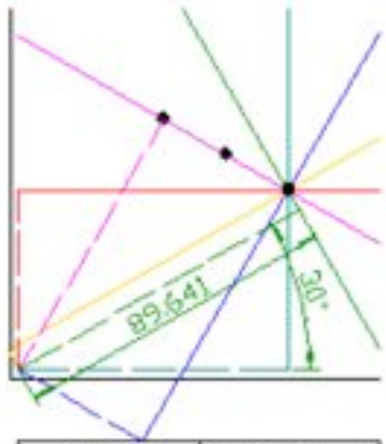
Κβαντισμός του χώρου Hough

Παράδειγμα εύρεσης γραμμής από 3 σημεία



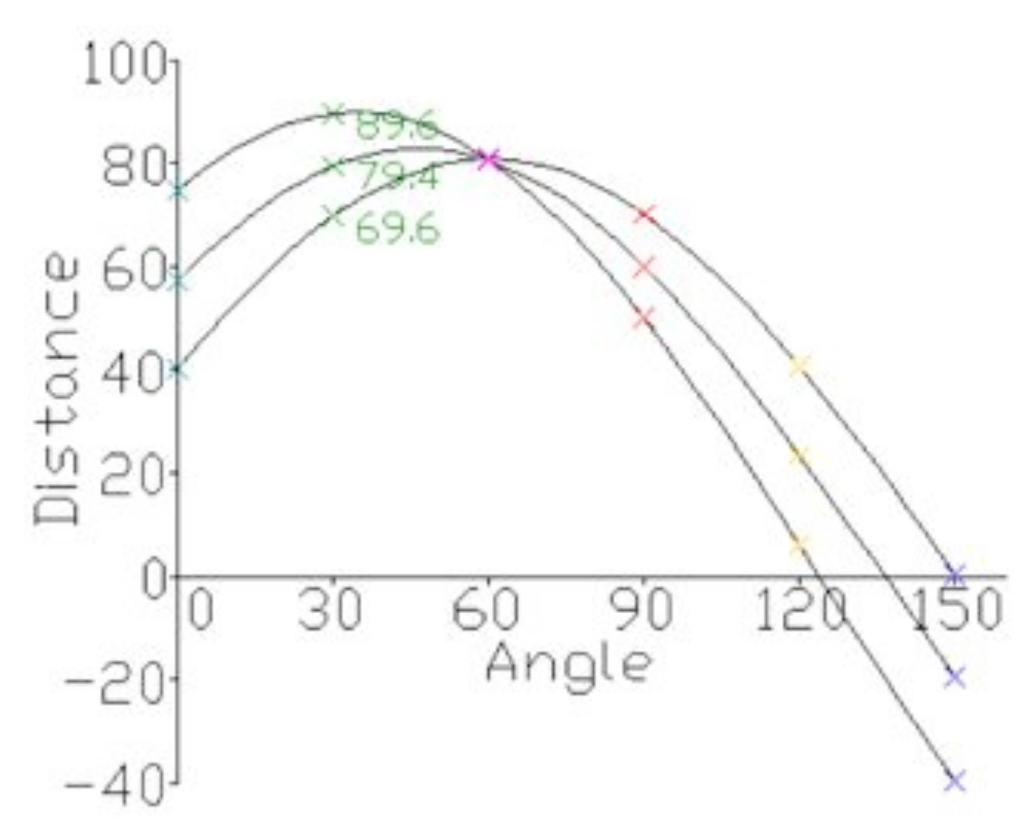
Angle	Dist.
0	40
30	69.6
60	81.2
90	70
120	40.6
150	0.4

Angle	Dist.
0	57.1
30	79.5
60	80.5
90	60
120	23.4
150	-19.5

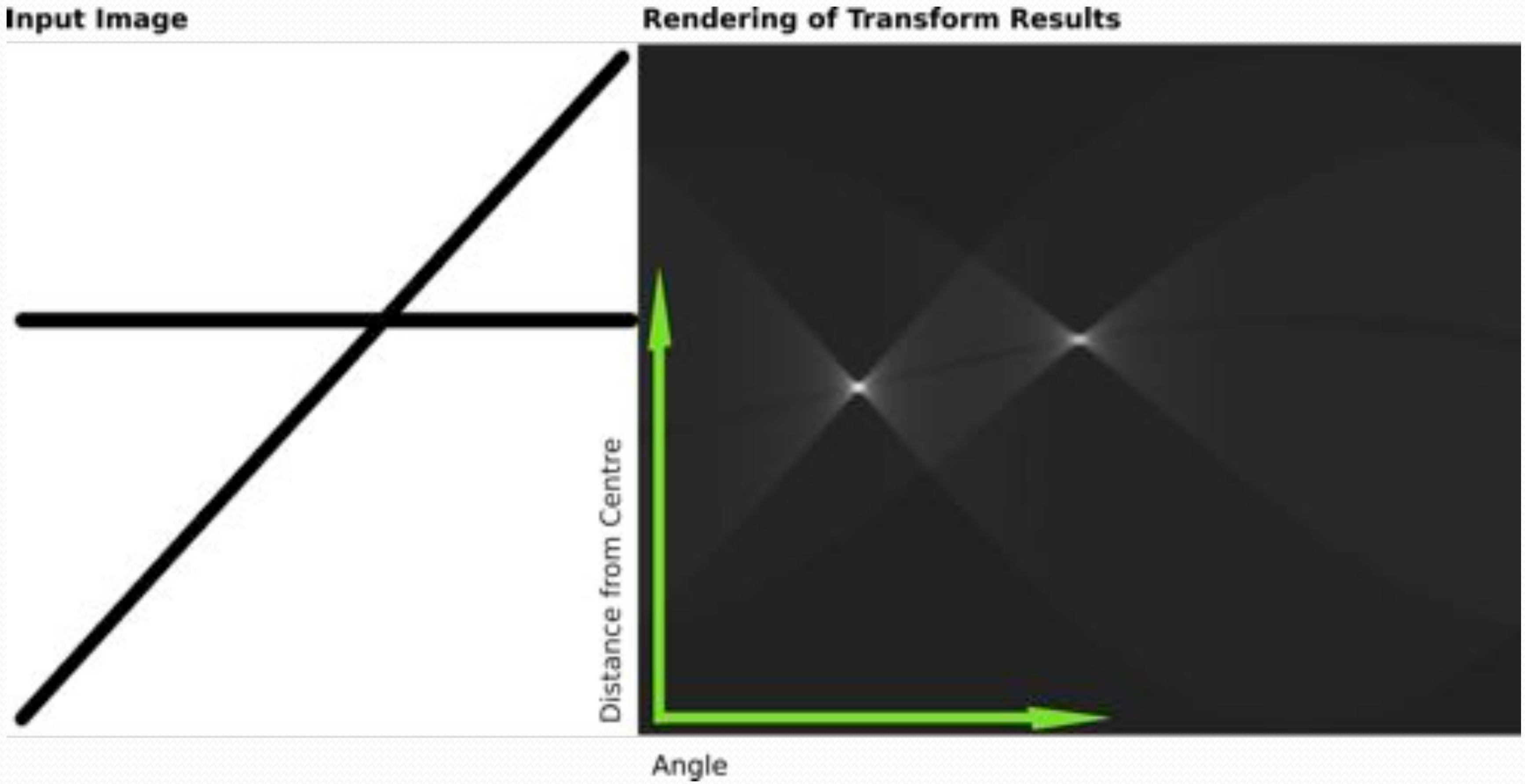


Angle	Dist.
0	74.6
30	89.6
60	80.6
90	50
120	6.0
150	-39.6

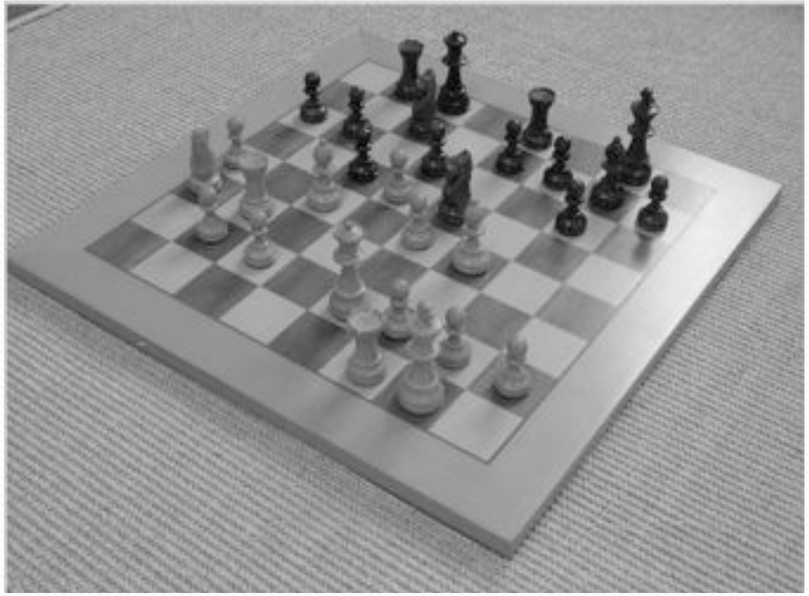
Διαγράμματα στο χώρο Hough

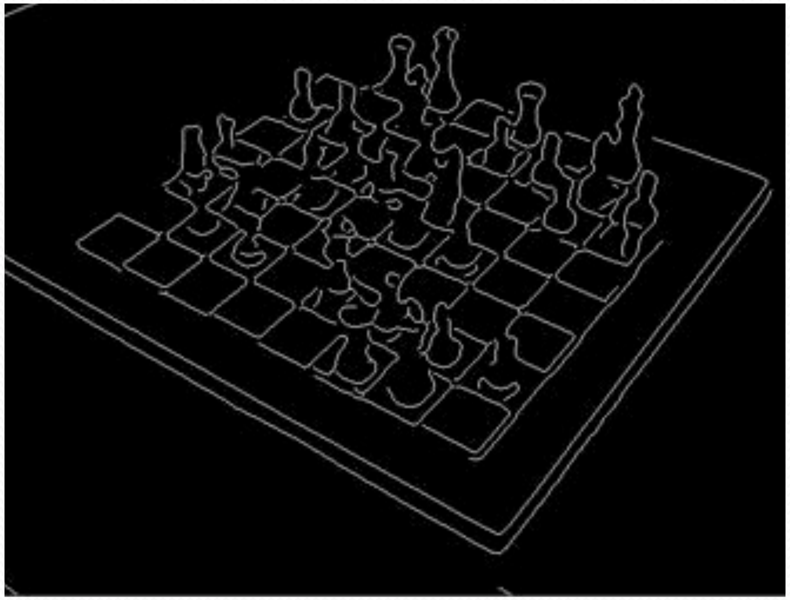


Πίνακας συσσώρευσης σε «όμοια» μορφή (congruent)

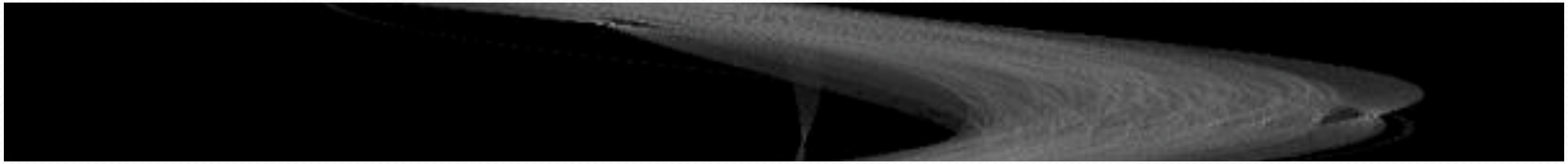


Βήμα 1ο – Εντοπισμός ακμών





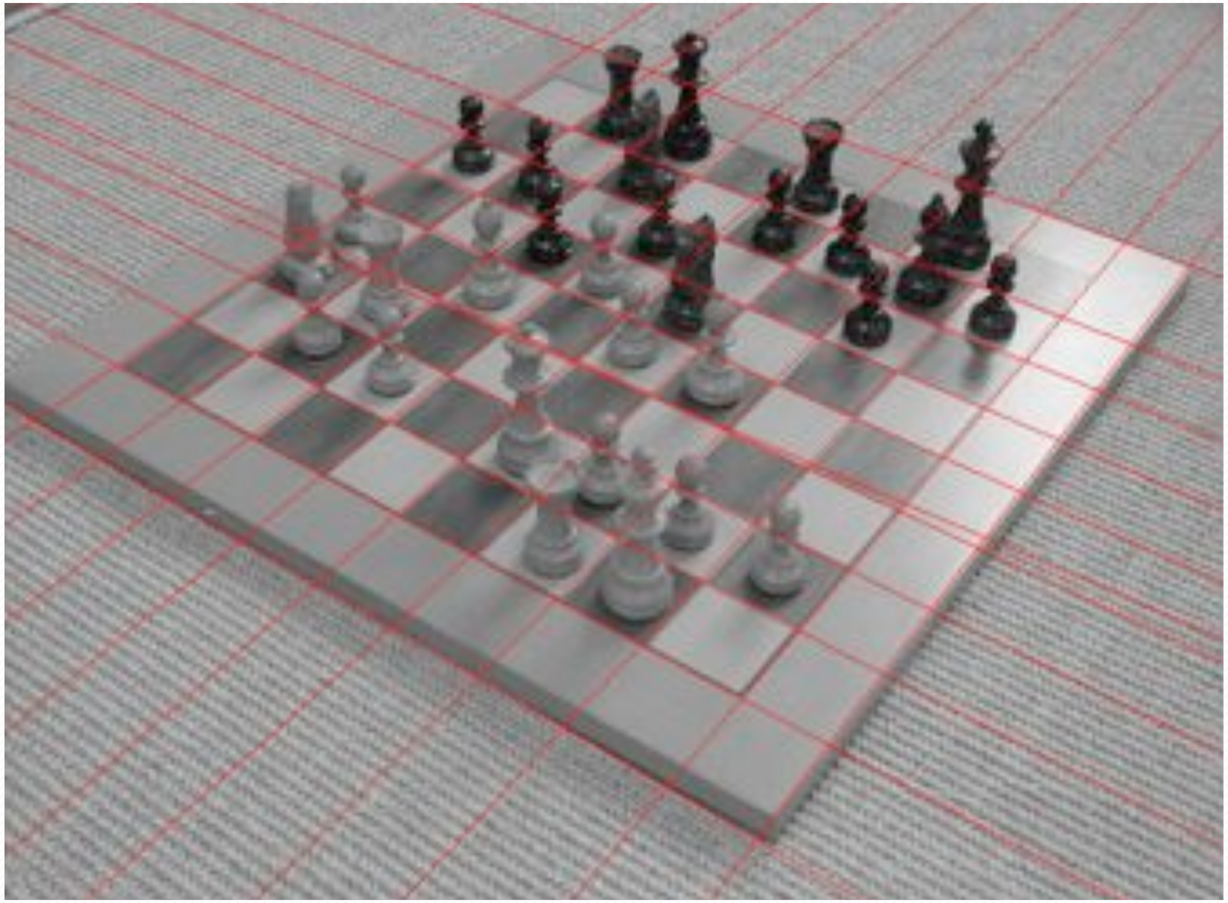
Βήμα 2ο: Μετασχηματισμός στο χώρο Hough και «ψηφοφορία»



Ο πίνακας συσσώρευσης (accumulator array) παρουσιάζει όλες τις υπάρχουσες ημιτονοειδείς με οριζόντιο άξονα το r και κάθετο το θ

Συμπληρωματική σημείωση:
Η παραπάνω απεικόνιση χαρακτηρίζεται ως «όμοια» προς τον χώρο των εικόνων (congruent)

Βήμα 3ο: Προβολή στον κανονικό χώρο



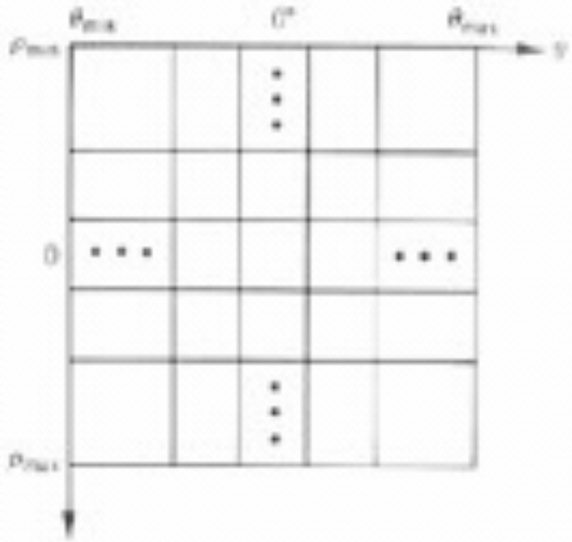
Περίληψη του αλγόριθμου

- Για όλα τα σημεία ακμών *(x,y)*
  - For ($\vartheta=\vartheta_{min}$; $\vartheta\leq\vartheta_{max}$; ϑ++) *//εδώ ορίζεται ο κβαντισμός*

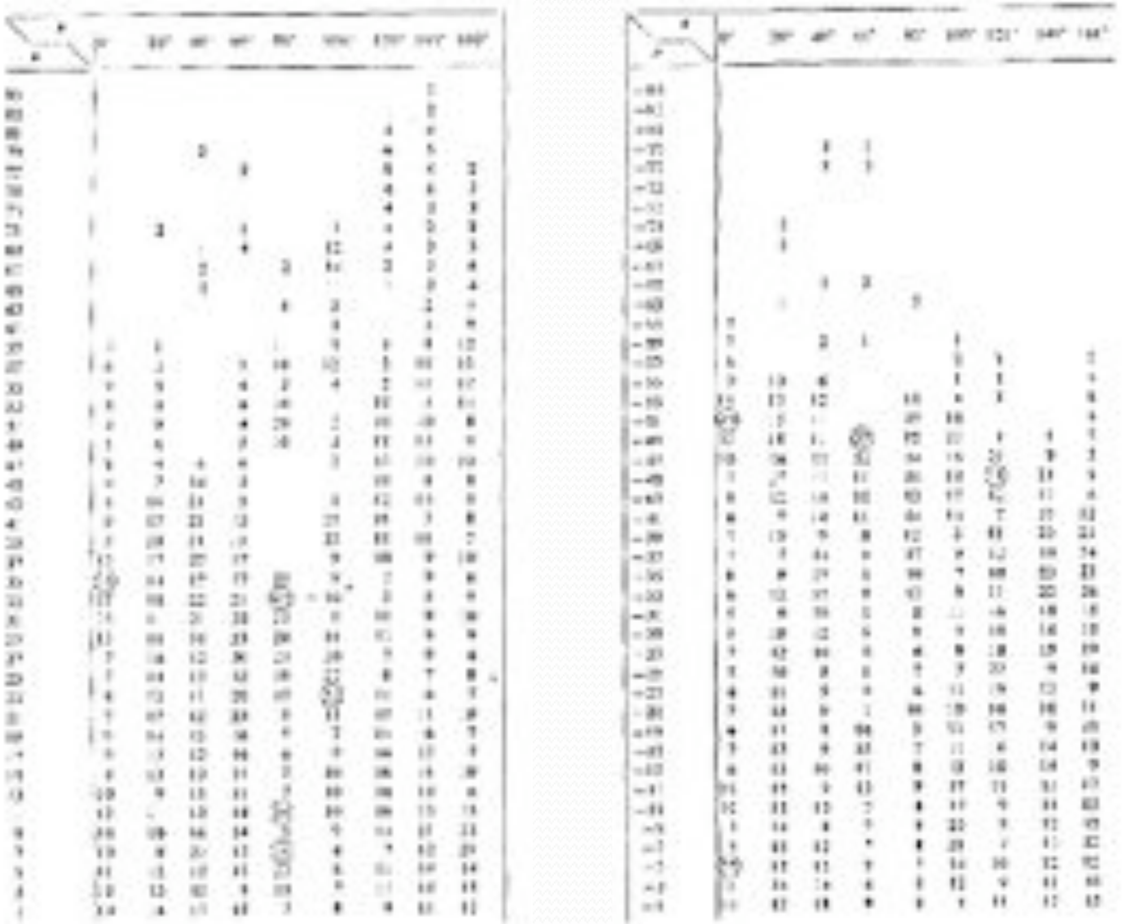
    $r = x\cos\theta + y\sin\theta$

    P[r][θ]++ // η λεγόμενη «ψηφοφορία»
- Βρες όλα τα τοπικά μέγιστα στο P[][]

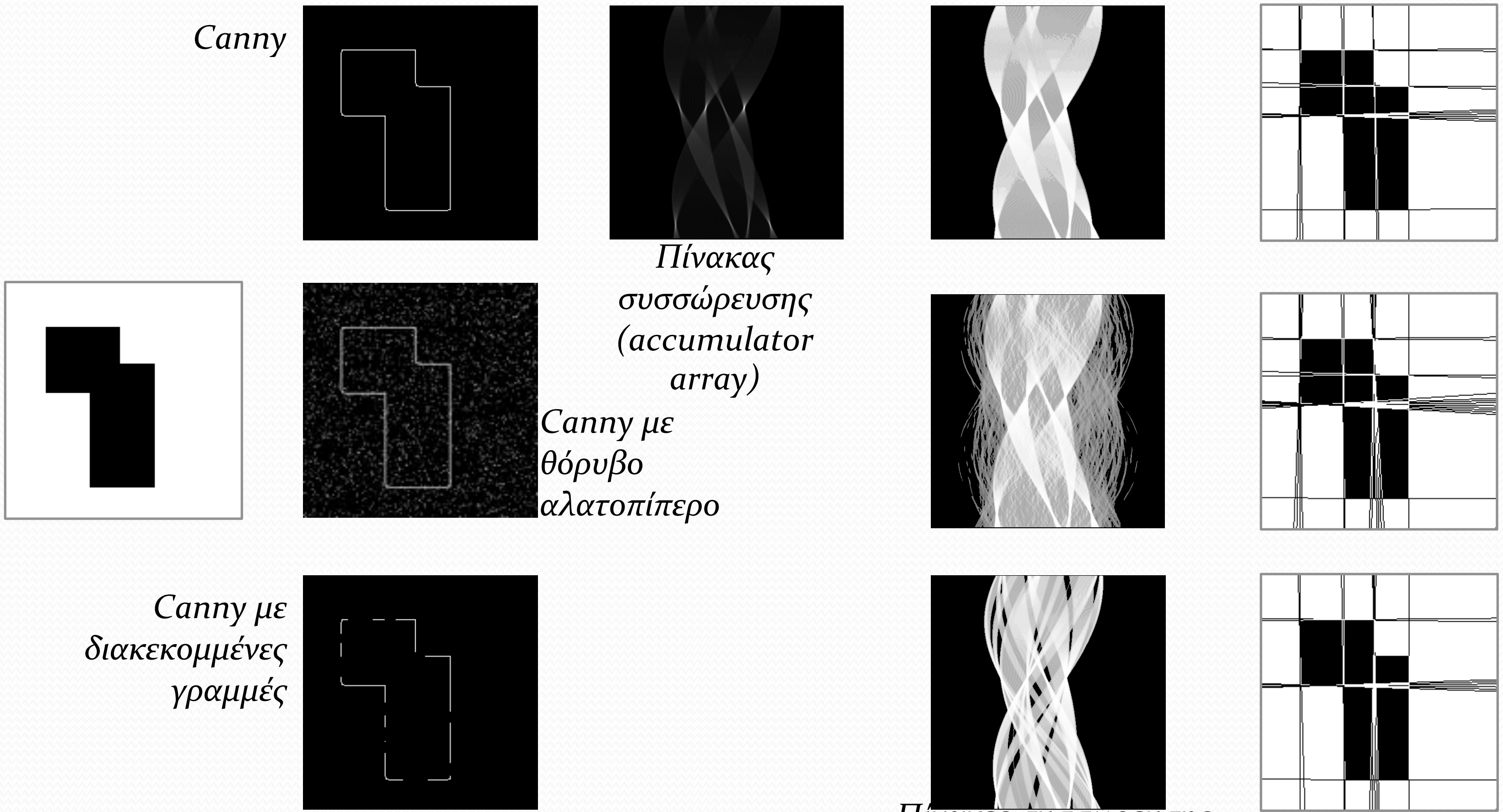
Πίνακας συσσώρευσης (Accumulator array)



Δείγμα πίνακα συσσώρευσης



Θόρυβος και άλλα χαρακτηριστικά



Εντοπισμός κύκλων

Με τροποποιημένο μετασχηματισμό Hough

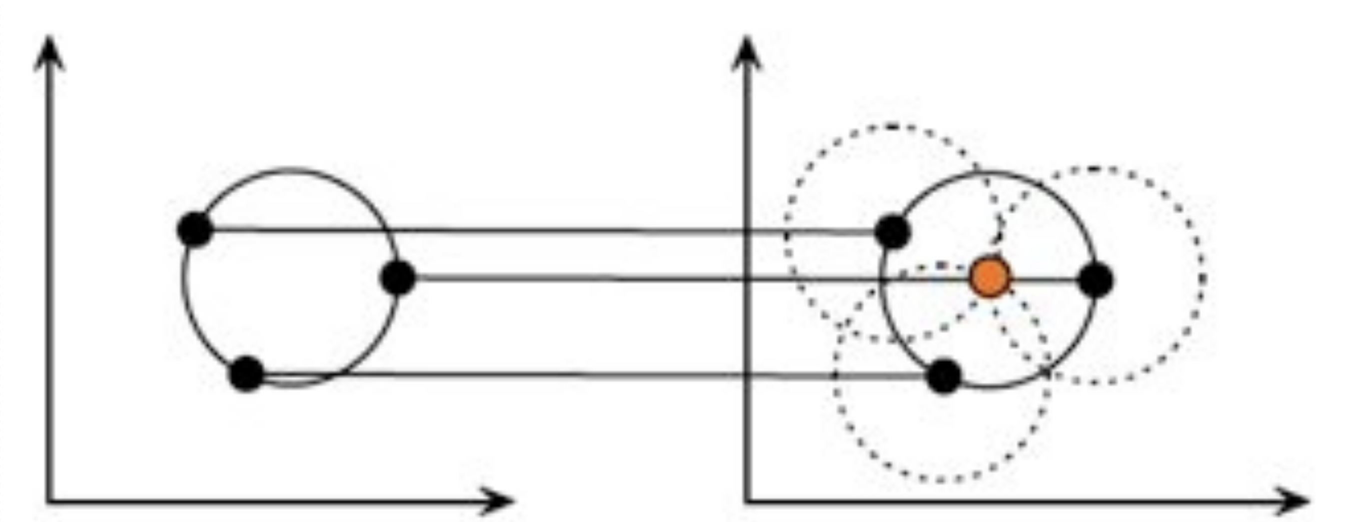
Αναγκαιότητα για εντοπισμό κύκλων

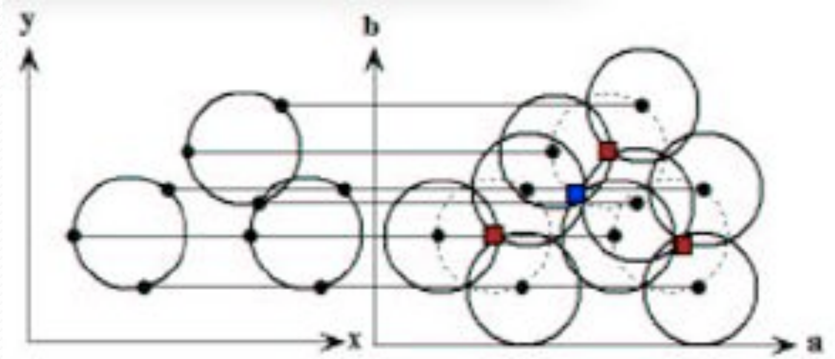
- Στο βιομηχανικό έλεγχο ποιότητας υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις κυκλικών αντικειμένων
  - Βιομηχανία τροφίμων (φρούτα, μπισκότα, πίτσες)
  - Βιομηχανία αυτοκινήτων (ρόδες, βίδες, πιστόνια)
  - Ευρύτερη βιομηχανία: ανίχνευση κυκλικών οπών (προγραμματισμένων ή ανεπιθύμητων)
- Πολλές εφαρμογές στη βιοϊατρική
  - κύτταρα
  - Μικρο-συστοιχίες

Προσδιορισμός των κύκλων

- Ο κύκλος προσδιορίζεται από την εξίσωση:
  - $(x-x_c)^2+(y-y_c)^2=r^2$
- Κατά συνέπεια σε ένα χώρο με τρεις μεταβλητές:
  - Τις συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου
  - Την ακτίνα του κύκλου
- Για γνωστή ακτίνα ο εντοπισμός διευκολύνεται

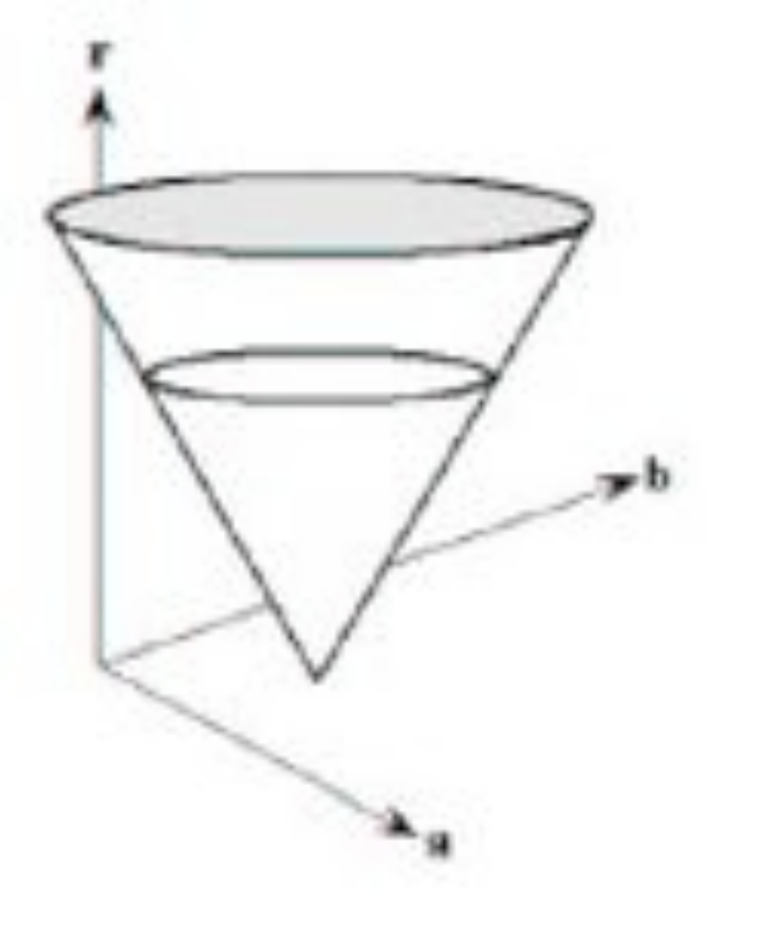
Ανίχνευση κύκλων με γνωστή ακτίνα





Προσδιορισμός με άγνωστη ακτίνα

- Ο χώρος Hough γίνεται 3-διάστατος
- Η απεικόνιση στοχεύει σε κοινά σημεία κώνων
- Υπολογιστικά ιδιαίτερα «βαριά» εφαρμογή
- Εναλλακτική και πάλι με την κλίση (βαθμίδα)



Γενικευμένη μορφή μετασχηματισμού Hough

Generalized Hough Transform

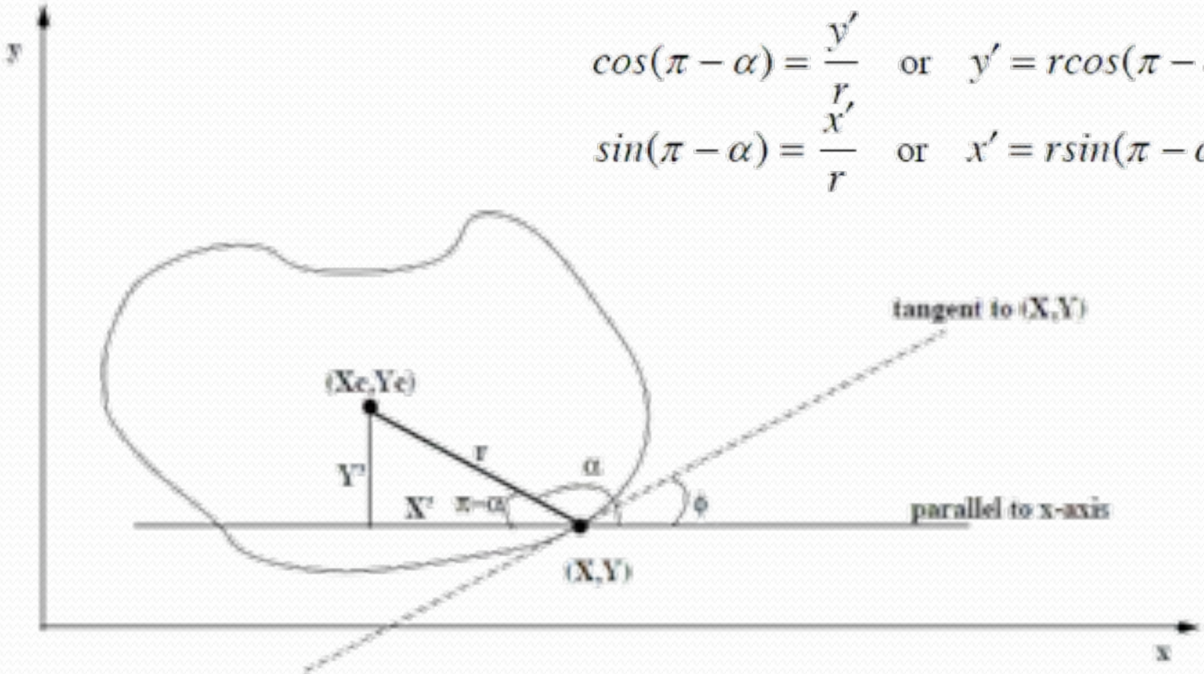
Λόγοι εισαγωγής του γενικευμένου μετασχηματισμού

- Δεν έχουν όλα τα σχήματα αναλυτικό τρόπο περιγραφής
- Προσπάθεια δημιουργίας μίας γενικευμένης μορφής που επιτρέπει την ανίχνευση οποιουδήποτε σχήματος
- Τρόπος:
  - Προεπεξεργασία του σχήματος που αναζητούμε ώστε να μας δώσει πίνακες με πληροφορίες για το σχήμα του

Για περιπτώσεις γνωστής κατεύθυνσης και μεγέθους

$$cos(\pi - \alpha) = \frac{y'}{r} \quad \text{or} \quad y' = rcos(\pi - \alpha) = -rsin(\alpha)$$

$$sin(\pi - \alpha) = \frac{x'}{r} \quad \text{or} \quad x' = rsin(\pi - \alpha) = -rcos(\alpha)$$



$$x = x_c + x' \quad \text{or} \quad x_c = x - x'$$
$$y = y_c + y' \quad \text{or} \quad y_c = y - y'$$

$$\boxed{\begin{aligned} x_c &= x + rcos(\alpha) \\ y_c &= y + rsin(\alpha) \end{aligned}}$$

Η προεπεξεργασία

- Ορισμός του σχήματος (πίνακας αναφοράς R – look-up table)
  - Επιλέγουμε ένα χαρακτηριστικό σημείο (συνήθως το κέντρο βάρους του αντικειμένου) (x_c, y_c)
  - Υπολογίζουμε τη γωνία φ
  - Αποθηκεύουμε τα χαρακτηριστικά (απόσταση και γωνία) για κάθε σημείο

Ο εντοπισμός

- Αρχικά κβαντισμός του αντικειμένου (επιλογή σημείων στο περίγραμμά του)
- Για κάθε σημείο χρήση της κλίσης (π.χ. υπολογισμένης από τον ανιχνευτή ακμών) για προσδιορισμό του φ
- Αναζήτηση στον πίνακα αναφοράς των τιμών του r και α για το συγκεκριμένο φ
- $x_c = x + r\cos(\alpha)$
- $y_c = y + r\sin(\alpha)$
- Διαδικασία ψηφοφορίας *P[xc][yc]++*
    - *Οι τοπικά μέγιστες τιμές δίνουν την πιθανότερη θέση*

Κριτική του γενικευμένου μετασχηματισμού

ΥΠΕΡ

- Αποτελεί μέθοδο αναγνώρισης αντικειμένων
- Ανεκτικό σε μετατροπές της εικόνας του αντικειμένου (π.χ. Μερική επικάλυψη από άλλα)
- Ανθεκτικό σε διάφορες μορφές θορύβου
- Ανίχνευση πολλών εμφανίσεων ενός αντικειμένου σε ένα «γύρο επεξεργασίας»

ΚΑΤΑ

- Πάρα πολύ απαιτητικό σε μνήμη
- Πάρα πολύ απαιτητικό σε υπολογιστική ισχύ (αλλά μπορεί να βελτιωθεί με παράλληλη επεξεργασία)

Σύντομη εισαγωγή στις ενεργές ακμές

(active contours, snakes)

Βασική ιδέα

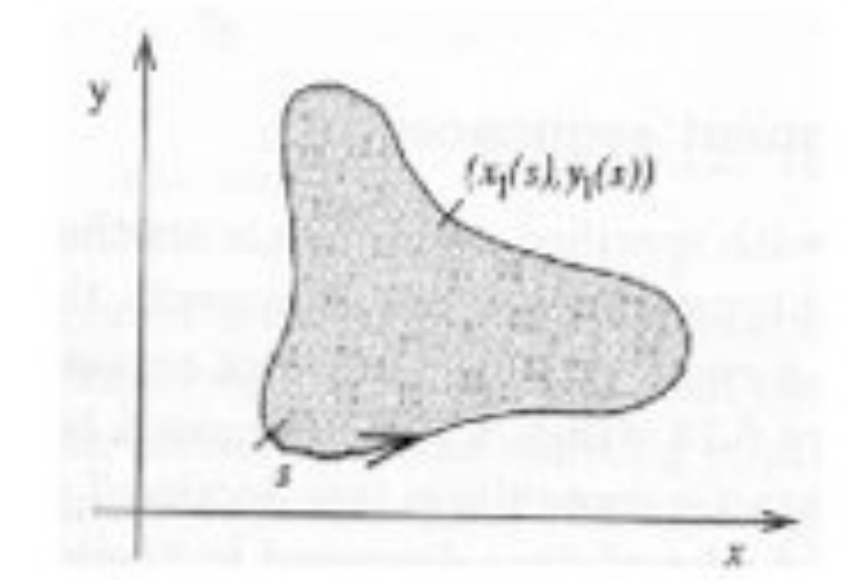
- Kass, Witkin, Terzopoulos 1987
- Ξεκινώντας από ένα γνωστό περίγραμμα, το τοποθετούμε στην εικόνα μας και το αφήνουμε να «κουλουριάσει» σα φίδι γύρω από το αντικείμενο που αναζητούμε

Η εικόνα σαν ενεργετικό πεδίο

- Στόχος: η ελαχιστοποίηση της ενέργειας που σχετίζεται με το δεδομένο περίγραμμα
- Η ενέργεια αποτελείται από δύο παράγοντες:
  - Εσωτερική ενέργεια
  - Εξωτερική ενέργεια
- Το περίγραμμα λειτουργεί σα λάστιχο που κινείται μέσα στην εικόνα
  - Αντί της εικόνας χρησιμοποιούμε το πεδίο των βαθμίδων

Ο ορισμός του περιγράμματος

- $c(s)=(x(s),y(s))$
  - $s \in [0,1]$



Η συνάρτηση

- $E = \int(\alpha(s)E_{cont} + \beta(s)E_{curv} + \gamma(s)E_{image})ds$

- α, β και γ απλά για έλεγχο της βαρύτητας κάθε ενεργειακού παράγοντα
- E_{image} έλκει την περίμετρο προς την πλησιέστερη ακμή
- E_{cont} διατηρεί την περίμετρο συνεχή
- E_{curv} διατηρεί την «ομαλότητα» της περιμέτρου (χωρίς υπερβολικές μεταβολές όπως «αγκάθια» κλπ.)
- Οι δύο τελευταίες είναι η **εσωτερική ενέργεια**, ενώ η πρώτη η **εξωτερική ενέργεια**

Το κριτήριο της συνέχειας

- Ξεκινάει η κίνηση της περιμέτρου…
- Για το επόμενο πιθανό σημείο:
- Υπολογισμός της πρώτης παραγώγου και διατήρησή της σε χαμηλή τιμή
  - $E_{cont} = (x_i - x_{i-1}) + (y_i - y_{i-1})$
- Καλύτερα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιήσουμε και το μέσο όρο των αποστάσεων των σημείων μεταξύ τους:
  - $E_{cont} = (d - ||p_i - p_{i-1}||)^2$
- Κατά συνέπεια: διατήρηση σχετικά ίσων αποστάσεων ανάμεσα στα σημεία

Το κριτήριο της ομαλότητας

- Βασίζεται στη δεύτερη παράγωγο
- Διατηρώντας τη σε χαμηλά επίπεδα, αποφεύγει κανείς απότομες και «ανώμαλες» τροποποιήσεις της περιμέτρου
- Προσέγγιση υπολογισμού:
  - $E_{curv} = ||p_{i-1} - 2p_i + p_{i+1}||^2$

Το κριτήριο της εγγύτητας σε ακμή

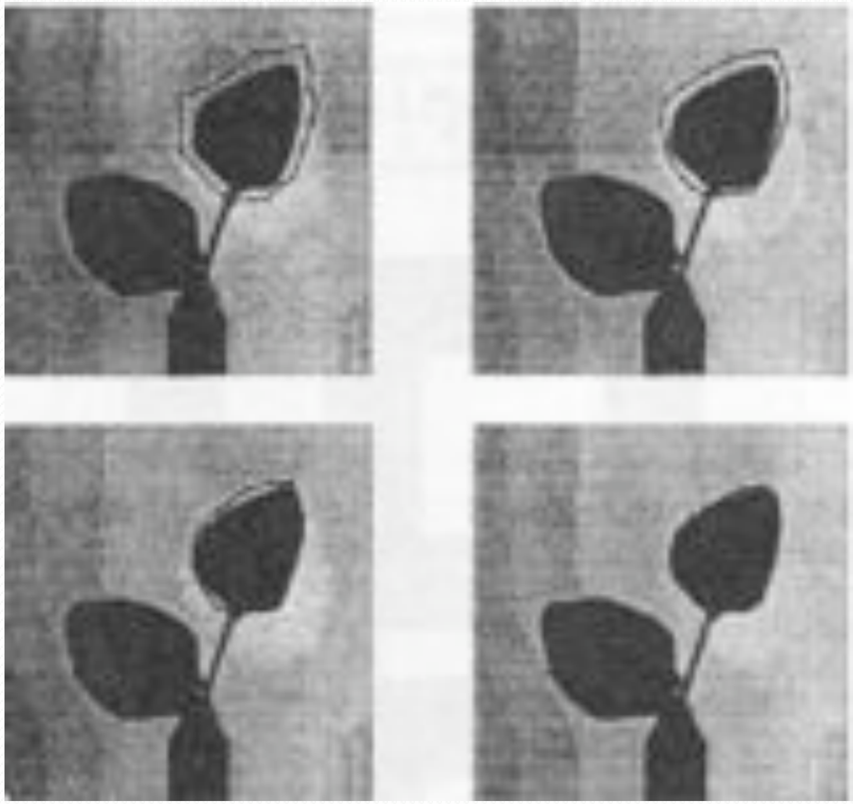
- Υπολογίζεται με τη βοήθεια της βαθμίδας
  - $E_{image} = -||\nabla I||$
- Όπου I η ένταση της φωτεινότητας (intensity)

Ο αλγόριθμος

- Ξεκινάμε με μία εικόνα *I* και τα σημεία της αρχικής περιμέτρου $p_1,\ldots,p_N$
- Για κάθε p_i, $i = 1, \ldots, N$, αναζητούμε στη γειτονιά *MxM* το σημείο εκείνο που μειώνει τη συνάρτηση της ενέργειας και μετακινούμε στο σημείο εκείνο
- Υπολογίζουμε την καμπυλότητα σε κάθε σημείο και όπου υπάρχουν τοπικά μέγιστες τιμές (π.χ. από γωνίες) θέτουμε τον αντίστοιχο όρο β για το σημείο αυτό στο 0
- Υπολογίζουμε εκ νέου τη μέση τιμή των αποστάσεων d
- Επαναλαμβάνουμε μέχρι να κινούνται μόνο πολύ λίγα σημεία (εκεί έχουμε προσεγγίσει πλέον κάποια βέλτιστη λύση)

Μερικά σχόλια

- Ο αλγόριθμος είναι «άπληστος» (greedy)
  - Δηλαδή επιλέγει τοπικά τις καλύτερες λύσεις με την ελπίδα ότι έτσι θα προκύψει και συνολικά μία ιδανική λύση
- Λειτουργεί καλά αν η αρχική περίμετρος τοποθετηθεί σχετικά καλά
- Συνήθως απαντάται σε «διαδραστική μορφή»



! ?