

Αλγόριθμοι Ευθυγράμμισης Τρισδιάστατων Αντικειμένων

Νίκος Καραμπατζιάκης

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

20 Οκτωβρίου 2005

Ορισμός του Προβλήματος

- Ευθυγράμμιση: Εύρεση ενός γεωμετρικού μετασχηματισμού που φέρνει κοντά δύο τρισδιάστατα αντικείμενα.
- Εναλλακτικά: Εύρεση ενός γεωμετρικού μετασχηματισμού που απεικονίζει ένα τρισδιάστατο αντικείμενο σε ένα άλλο.
- Διαφορετικές αναπαραστάσεις.
- Περιοριζόμαστε σε
 - Στερεούς μετασχηματισμούς.
 - Αντικείμενα της ίδιας κλάσης (πρόσωπα).

Εφαρμογές

Μόλις βρεθεί ένας τέτοιος μετασχηματισμός πολλά προβλήματα μπορούν να λυθούν χρησιμοποιώντας τις ευθυγραμμισμένες αναπαραστάσεις.

- Σύγκριση και συνένωση δεδομένων από διαφορετικές μετρήσεις.
- Τρισδιάστατη αναγνώριση αντικειμένων.
- Παρακολούθηση της πόζας αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο.
- Συγχώνευση δεδομένων από διαφορετικούς αισθητήρες.

Γενικό Πλαίσιο

- Το πρόβλημα της ευθυγράμμισης αντιμετωπίζεται συνήθως σε δύο στάδια.
 - 1 Δημιουργία αντιστοιχίσεων μεταξύ χαρακτηριστικών των δύο αντικειμένων.
 - 2 Εύρεση του κατάλληλου μετασχηματισμού που θα φέρει τα χαρακτηριστικά κοντά μεταξύ τους.
- Τα χαρακτηριστικά είναι συνήθως σημεία στην επιφάνεια ενός πολυγωνικού μοντέλου.
- Αντικείμενο μοντέλο και αντικείμενο σκηνής.

Βασική Λύση

- Δεδομένων των αντιστοιχίσεων μεταξύ των σημείων αναζητούμε ένα στερεό μετασχηματισμό.
- Έξι βαθμοί ελευθερίας.
- Δύο αντιστοιχίσεις αρκούν.
- Σφάλματα στις μετρήσεις. Περισσότερες αντιστοιχίσεις.
- Λύση ελαχίστων τετραγώνων.
- Διάφορες μέθοδοι εύρεσης αναλυτικής λύσης.

Βασική Λύση

- Δεδομένων των αντιστοιχίσεων μεταξύ των σημείων αναζητούμε ένα στερεό μετασχηματισμό.
- Έξι βαθμοί ελευθερίας.
- Δύο αντιστοιχίσεις αρκούν.
- Σφάλματα στις μετρήσεις. Περισσότερες αντιστοιχίσεις.
- Λύση ελαχίστων τετραγώνων.
- Διάφορες μέθοδοι εύρεσης αναλυτικής λύσης.

Βασική Λύση

- Δεδομένων των αντιστοιχίσεων μεταξύ των σημείων αναζητούμε ένα στερεό μετασχηματισμό.
- Έξι βαθμοί ελευθερίας.
- Δύο αντιστοιχίσεις αρκούν.
- Σφάλματα στις μετρήσεις. Περισσότερες αντιστοιχίσεις.
- Λύση ελαχίστων τετραγώνων.
- Διάφορες μέθοδοι εύρεσης αναλυτικής λύσης.

Βασική Λύση (2)

- Έστω m_i τα σημεία του μοντέλου και s_i τα σημεία της σκηνής
- Αναζητούμε περιστροφή R και μεταφορά t που ελαχιστοποιούν το

$$\sum_i \|Rm_i + t - s_i\|^2$$

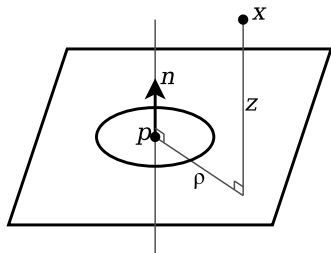
- Horn '87: Λύση με μοναδιαία quaternions.
 - 1 Κατασκευή ενός 4×4 πίνακα N από τις συντεταγμένες των m_i, s_i .
 - 2 Εύρεση του ιδιοδιανύσματος e της μεγαλύτερης ιδιοτιμής του πίνακα N .
 - 3 Το e είναι το quaternion που αναπαριστά τη βέλτιστη περιστροφή.
 - 4 Η βέλτιστη μεταφορά είναι η διαφορά του κέντρου βάρους της σκηνής από το κέντρο βάρους του περιστραμμένου μοντέλου.
- Επεκτείνεται εύκολα σε σταθμισμένη λύση.

$$\sum_i w_i \|Rm_i + t - s_i\|^2$$

Spin Images

- Απομένει τώρα η δημιουργία αντιστοιχίσεων μεταξύ χαρακτηριστικών των δύο αντικειμένων.
- Δύσκολο πρόβλημα.
- Spin Images προσφέρουν καλά αποτελέσματα.
- Προσανατολισμένα σημεία.
- Περιγραφή του σχήματος στις 2 διαστάσεις με βάση ένα προσανατολισμένο σημείο.

Κατασκευή Ενός Spin Image



```
CreateSpinImage(O, M)
```

```
I = 0
```

```
for each point x in M
```

```
  ( $\rho, z$ ) =  $S_O(x)$ 
```

```
  ( $a, b$ ) =  $(\frac{0.5 \text{Support} - z}{\text{BinSize}}, \frac{\rho}{\text{BinSize}})$ 
```

```
  ( $i, j$ ) = ( $\lfloor a \rfloor, \lfloor b \rfloor$ )
```

```
  ( $u, v$ ) = ( $a - i, b - j$ )
```

```
   $I_{i,j} += (1 - u)(1 - v)$ 
```

```
   $I_{i+1,j} += u(1 - v)$ 
```

```
   $I_{i,j+1} += (1 - u)v$ 
```

```
   $I_{i+1,j+1} += uv$ 
```

Για κάθε προσανατολισμένο σημείο $O = (p, n)$ ορίζουμε τη συνάρτηση

$$S_O(x) = (\rho, z) = \left(\sqrt{\|x - p\|^2 - (n \cdot (x - p))^2}, n \cdot (x - p) \right)$$

- Το Spin Image I του O προκύπτει από τη ρουτίνα CreateSpinImage.
- Το I είναι ένα διδιάστατο ιστόγραμμα της κατανομής των (ρ, z) .

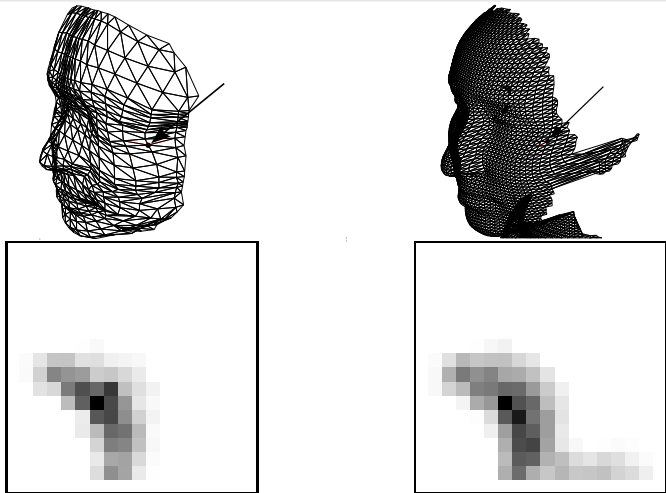
Σύγκριση Δύο Spin Images (1)

- Η απεικόνιση $S_O(x)$ παραμένει αναλλοίωτη σε στερεούς μετασχηματισμούς.
- Το ίδιο και τα Spin Images.
- Εύρεση αντίστοιχων σημείων με σύγκριση Spin Images.
- Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης δύο εικόνων P, Q :

$$R(P, Q) = \frac{N \sum p_i q_i - \sum p_i \sum q_i}{\sqrt{\left(N \sum p_i^2 - (\sum p_i)^2\right) \left(N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2\right)}}$$

- Τι γίνεται όταν υπάρχει θόρυβος, ελλιπή δεδομένα;

Σύγκριση Δύο Spin Images (2)



$$C(P, Q) = (\operatorname{atanh}(R(P, Q)))^2 - \lambda \left(\frac{1}{N-3} \right)$$

Διαδικασία Ευθυγράμμισης με Spin Images

- Υπολογίζονται όλα τα Spin Images του μοντέλου.
- Για τυχαίο Spin Image της σκηνής υπολογίζονται όλες οι ομοιότητες με τα Spin Images του μοντέλου.
- Πιθανές αντιστοιχήσεις: outliers στην κατανομή των αποστάσεων.
- 5%-20% τυχαία σημεία.
- Απόρριψη αντιστοιχήσεων με
 - ομοιότητα μικρότερη από τη μισή της μέγιστης
 - λίγες άλλες γεωμετρικά συνεπείς αντιστοιχήσεις.
- Ομαδοποίηση αντιστοιχήσεων. Κάθε ομάδα έχει γεωμετρικά συνεπείς αντιστοιχήσεις σημείων με μεγάλες μεταξύ τους αποστάσεις.
- Κάθε ομάδα πληθικότητας ≥ 3 δίνει ένα υποψήφιο μετασχηματισμό.

Ο Αλγόριθμος ICP

Βασική Ιδέα

Όταν τα προς ευθυγράμμιση αντικείμενα είναι κοντά τότε είναι πιθανό το σημείο της σκηνής το οποίο πραγματικά αντιστοιχεί σε ένα σημείο m του μοντέλου να είναι το κοντινότερο σημείο της σκηνής στο m .

Ορολογία

- M, S : ακολουθίες σημείων μοντέλου και σκηνής.
- $M = \{m_i\} 1 \leq i \leq N_m$ $S = \{s_j\} 1 \leq j \leq N_s$.¹
- $T = \mathcal{C}(M, S)$: Τελεστής κοντινότερου σημείου

$$t_i = \operatorname{argmin}_{s \in S} \|s - m_i\| \quad \forall m_i \in M$$

Υλοποιείται γρήγορα αν το S οργανωθεί σε kd -δέντρο.

- $(A, d) = \mathcal{Q}(M, T)$: Τελεστής βασικής λύσης

$$d = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \|Am_i - t_i\|^2$$

¹Οι σειρές των m_i και s_j είναι αυθαίρετες και ανεξάρτητες

Διατύπωση του Αλγορίθμου

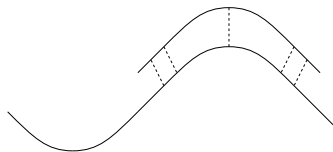
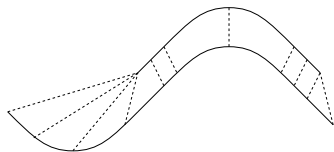
- Δίνονται τα αντικείμενα M και S και κατασκευάζεται το kd -δέντρο για το σύνολο των σημείων του S .
- $M_0 = M$, $A = I_4$, $k = 0$. Το M_k θα αντιπροσωπεύει την τρέχουσα θέση του μοντέλου. Τα παρακάτω βήματα επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.
 - 1 Υπολογισμός των κοντινότερων σημείων: $T_k = \mathcal{C}(M_k, S)$ (κόστος $O(N_m \log N_s)$)
 - 2 Υπολογισμός του μετασχηματισμού: $(A, d_k) = \mathcal{Q}(M, T_k)$ (κόστος $O(N_m)$)
 - 3 Εφαρμογή του μετασχηματισμού: $M_{k+1} = AM$ (κόστος $O(N_m)$)
 - 4 Έλεγχος σύγκλισης: Αν $d_{k-1} - d_k < \tau$ τότε ο αλγόριθμος σταματά και επιστρέφει τον πίνακα A .

Παρατηρήσεις

- Μονότονη σύγκλιση σε τοπικό ελάχιστο του d .
- Χρησιμοποιεί περισσότερες αντιστοιχήσεις από τα Spin Images.
- Επιβεβαίωση και βελτίωση των μετασχηματισμών των Spin Images.
- Χαμηλή πολυπλοκότητα, γρήγορη σύγκλιση.
- Σχετικά ευθυγραμμισμένα αντικείμενα.
- Το M πρέπει να επικαλύπτεται από το S .

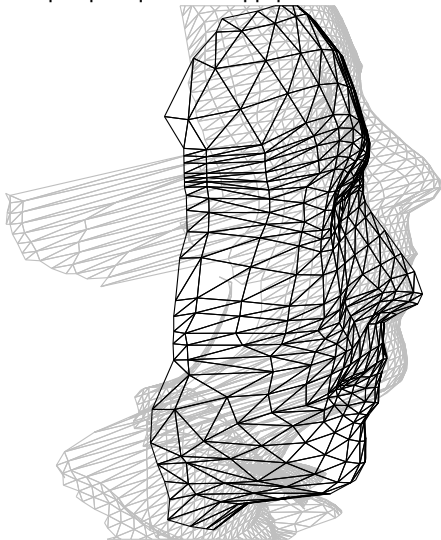
Τροποποιήσεις του ICP

- Μερική επικάλυψη: Απόρριψη αντιστοιχίσεων με σημεία στα σύνορα των επιφανειών.
- Ανοχή στο θόρυβο: Απόρριψη αντιστοιχίσεων με τις μεγαλύτερες αποστάσεις.
- Χρήση της σταθμισμένης βασικής λύσης.
- Άλλες τροποποιήσεις (άλλα κριτήρια απόρριψης αντιστοιχίσεων και ανάθεσης βαρών, ελαχιστοποίηση διαφορετικής μετρικής, αναλλοίωτα χαρακτηριστικά).



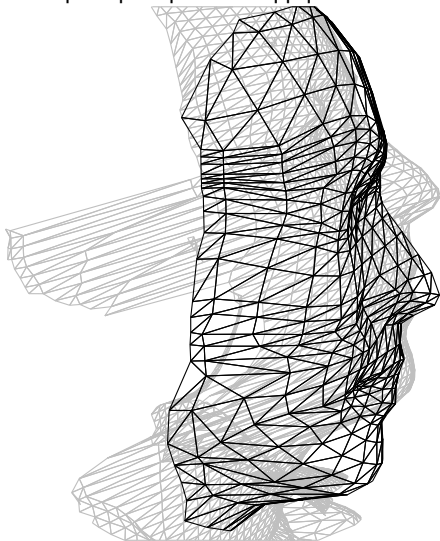
Παράδειγμα εκτέλεσης του ICP

Μετά την πρώτη επανάληψη.



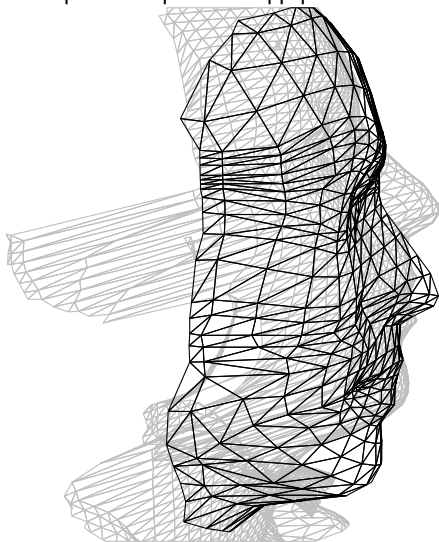
Παράδειγμα εκτέλεσης του ICP

Μετά την πέμπτη επανάληψη.



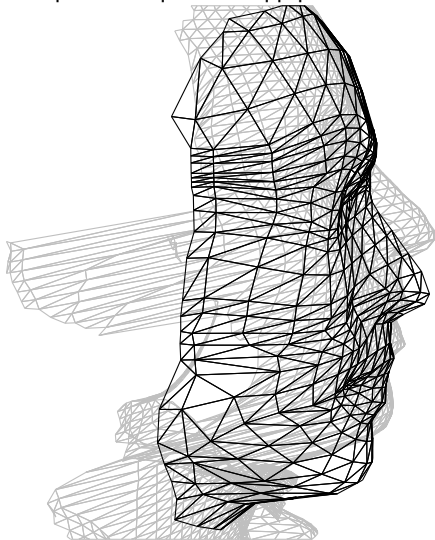
Παράδειγμα εκτέλεσης του ICP

Μετά την δέκατη επανάληψη.



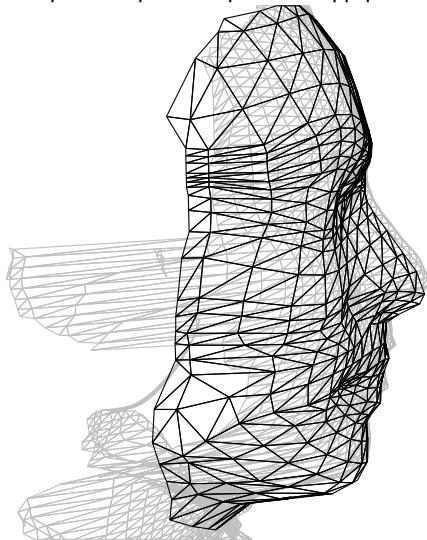
Παράδειγμα εκτέλεσης του ICP

Μετά την εικοστή επανάληψη.



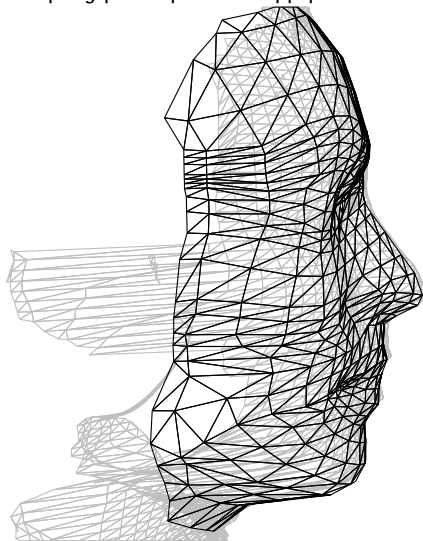
Παράδειγμα εκτέλεσης του ICP

Μετά την τεσσαρακοστή επανάληψη.



Παράδειγμα εκτέλεσης του ICP

Μετά την εξηκοστή επανάληψη.



Ευθυγράμμιση με Εικόνες Βάθους

- Αν θέλουμε ακόμα ακριβέστερα αποτελέσματα ;
- Ευθυγράμμιση επιφανειών των αντικειμένων.
- Εκμετάλλευση της μνήμης βάθους (z-buffer).
- Εικόνα βάθους: διακριτή περιγραφή της επιφάνειας.
- Ελαχιστοποίηση της διαφοράς της καμπυλότητας των επιφανειών.
- Δεδομένα από range scanner \Rightarrow μία εικόνα βάθους αρκεί.

Ευθυγράμμιση με Εικόνες Βάθους

- Διάνυσμα παραμέτρων μετασχηματισμού $\omega = [t_x, t_y, t_z, \phi, \theta, \psi]$
- Μετρική σφάλματος

$$\epsilon_d = \frac{1}{A} \iint_S \left| \frac{\partial d_1(x, y)}{\partial x} - \frac{\partial d_2(x, y)}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial d_1(x, y)}{\partial y} - \frac{\partial d_2(x, y)}{\partial y} \right| dS$$

- Προβλήματα από ασυνέχειες στις εικόνες.
- Επιβολή άνω ορίου στις τιμές των παραγώγων.
- Εύρεση βέλτιστου ω με enhanced simulated annealing.
- Ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες.

Ευθυγράμμιση με Εικόνες Βάθους

- Διάνυσμα παραμέτρων μετασχηματισμού $\omega = [t_x, t_y, t_z, \phi, \theta, \psi]$
- Μετρική σφάλματος

$$\epsilon_d = \frac{1}{A} \iint_S \left| \frac{\partial d_1(x, y)}{\partial x} - \frac{\partial d_2(x, y)}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial d_1(x, y)}{\partial y} - \frac{\partial d_2(x, y)}{\partial y} \right| dS$$

- Προβλήματα από ασυνέχειες στις εικόνες.
- Επιβολή άνω ορίου στις τιμές των παραγώγων.
- Εύρεση βέλτιστου ω με enhanced simulated annealing.
- Ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες.

Ευθυγράμμιση με Εικόνες Βάθους

- Διάνυσμα παραμέτρων μετασχηματισμού $\omega = [t_x, t_y, t_z, \phi, \theta, \psi]$
- Μερική σφάλματος

$$\epsilon_d = \frac{1}{A} \iint_S \left| \frac{\partial d_1(x, y)}{\partial x} - \frac{\partial d_2(x, y)}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial d_1(x, y)}{\partial y} - \frac{\partial d_2(x, y)}{\partial y} \right| dS$$

- Προβλήματα από ασυνέχειες στις εικόνες.
- Επιβολή άνω ορίου στις τιμές των παραγώγων.
- Εύρεση βέλτιστου ω με enhanced simulated annealing.
- Ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες.

Ευθυγράμμιση με Εικόνες Βάθους

- Διάνυσμα παραμέτρων μετασχηματισμού $\omega = [t_x, t_y, t_z, \phi, \theta, \psi]$
- Μειτρική σφάλματος

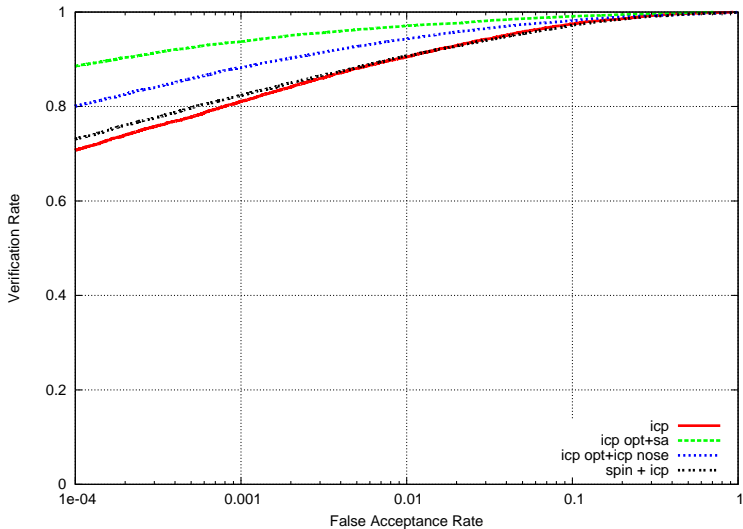
$$\epsilon_d = \frac{1}{A} \iint_S \left| \frac{\partial d_1(x, y)}{\partial x} - \frac{\partial d_2(x, y)}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial d_1(x, y)}{\partial y} - \frac{\partial d_2(x, y)}{\partial y} \right| dS$$

- Προβλήματα από ασυνέχειες στις εικόνες.
- Επιβολή άνω ορίου στις τιμές των παραγώγων.
- Εύρεση βέλτιστου ω με enhanced simulated annealing.
- Ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες.

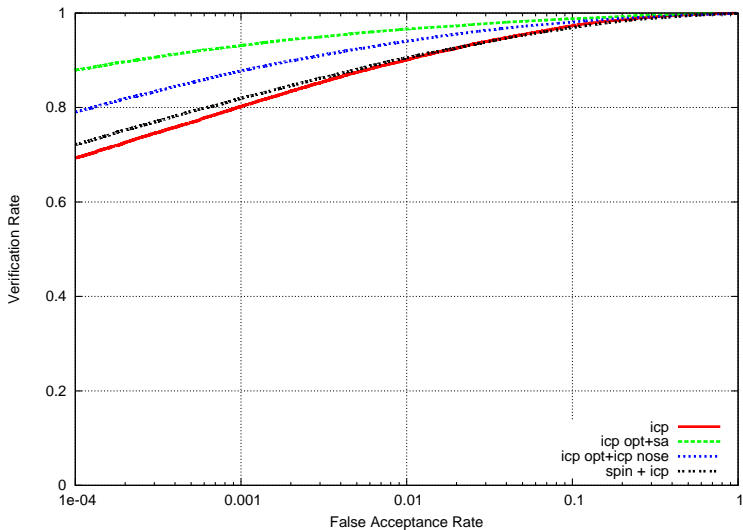
Πειραματικό Πλαίσιο

- Αναγνώριση προσώπων.
- FRGC2: 4007 τρισδιάστατα πρόσωπα με εκφράσεις.
- Σύστημα αναγνώρισης UR3D.
- Ευθυγράμμιση ενός γενικού μοντέλου προσώπου.
- Αξιολόγηση με βάση καμπύλες ROC.
- Τρεις καθιερωμένες μάσκες του FRGC2.

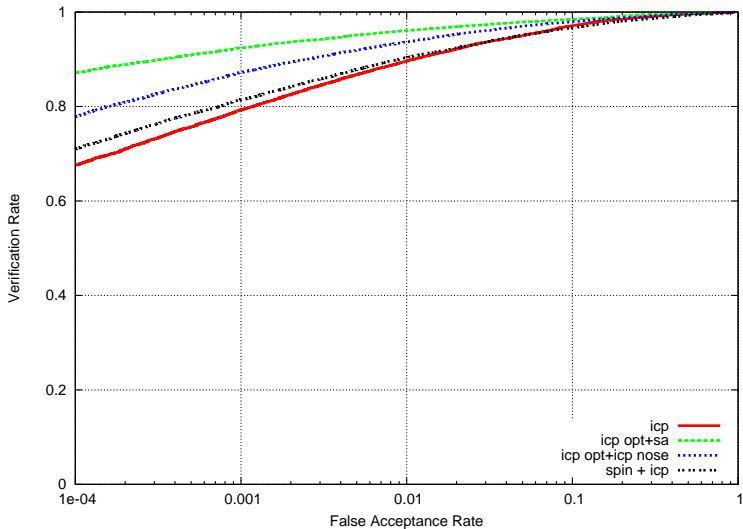
Πρώτη Μάσκα



Δεύτερη Μάσκα



Τρίτη Μάσκα



Μελλοντικές Κατευθύνσεις

- Σύγκριση με άλλες τεχνικές ευθυγράμμισης.
- Άλλα αναλλοίωτα χαρακτηριστικά. Ευρωστία σε αρχικές συνθήκες.
- Ενσωμάτωση κανονικών διανυσμάτων στη βασική λύση.
- Βελτιώσεις στον ICP. (ανάλυση μοντέλων, κοντινότερα σημεία)
- Άλλες μέθοδοι αναζήτησης στις εικόνες βάθους.

▶ Γεωμετρική συνέπεια :

Ευχαριστώ για την προσοχή σας.
Περιμένω τις ερωτήσεις σας. . .

Powered by L^AT_EX Beamer

