

# Πολυπρακτορική οφιοειδής κίνηση με αντιδραστική αποφυγή εμποδίων

Γεώργιος Μπιρμπίλης  
Καθ. Νίκος Ασπράγκας

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών & Αεροναυπηγών, Πανεπιστήμιο Πατρών

# Εισαγωγή – το πρόβλημα

- υπολογισμός κίνησης σειριακής σύνδεσης (αλυσίδας)
  - φυσικές αλυσίδες: σειριακοί βραχίονες (serial manipulators)
  - εικονικές αλυσίδες: οφιοειδείς σχηματισμοί σμηνών κινούμενων ρομπότ (snake-like swarm formations)
- χρονικά μεταβλητό περιβάλλον, πιθανώς περιέχον άγνωστα εμπόδια
  - στάσιμα εμπόδια
  - κινούμενα εμπόδια (σε ταχύτητες σχετικές με την ταχύτητα κινητήρων των αρθρώσεων)
- κάθε τμήμα της αλυσίδας λαμβάνει πληροφορίες από αισθητήρες κατά την προσέγγιση σε εμπόδια
- χρησιμοποιείται μια προσέγγιση *ικανοποίησης γεωμετρικών περιορισμών*

# Εισαγωγή – προσεγγίσεις

- Σχεδιασμός κίνησης σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον: Πολλές προσεγγίσεις (δείτε επισκόπηση από Hwang και Ahuja)
- Άγνωστα κινούμενα εμπόδια ευνοούν τοπικό σχεδιασμό, ολικός επανασχεδιασμός έχει υπερβολικό κόστος:
  - με πολλά εμπόδια, ή
  - όταν πρέπει να γίνει σχεδιασμός για συστήματα με πολλούς βαθμούς ελευθερίας (DOFs - Degrees Of Freedom), υψηλώς πλεονάζοντα (highly redundant) συστήματα (δείτε Chen και Hwang, Challou και λοιποί)
- Περισσότεροι βαθμοί ελευθερίας (B.E.) = μεγαλύτερη ευελιξία συστήματος
- εκτιμούμε μια προσέγγιση που:
  - εύκολα κλιμακώνεται (scales up) σε υψηλώς πλεονάζοντα συστήματα
  - υποστηρίζει συστήματα με λιγότερους βαθμούς ελευθερίας
- Καθοδική (top-down) κεντριοποιημένη προσέγγιση: αυξανόμενη πολυπλοκότητα και κόστος όσο ο αριθμός των B.E. αυξάνει
- Αντίθετα, προτείνεται μια ανοδική (bottom-up), τμηματική προσέγγιση, μοντελοποιημένη ως *πολυπρακτορικό σύστημα*

# Εισαγωγή – προσεγγίσεις σε σμήνη

## Σμήνη κινούμενων ρομπότ

Dorigo και λοιποί.:

- εξέλιξαν αυτό-οργανωτικές συμπεριφορές για το “swarm-bot”
- οκτώ ρομπότ συνδεδεμένα με εύκαμπτους συνδέσμους σε οφιοειδή σχηματισμό
- ικανά να:
  - διαπραγματευτούν μια μοναδική κατεύθυνση
  - παραγάγουν συντονισμένη κίνηση κατά μήκος της διαπραγματευθείσης κατεύθυνσης
  - αποφεύγουν τοίχους συλλογικά
- Εύκαμπτοι σύνδεσμοι:
  - Το σμήνος τείνει να αλλάζει σχήμα κατά τις φάσεις συντονισμού και κατά τη σύγκρουση με εμπόδια
- Τα μέλη τείνουν να διατηρούν τη δικιά τους διεύθυνση κίνησης:
  - το σμήνος είναι ικανό να περνά από στενά περάσματα, αλλάζοντας το σχήμα του ανάλογα με τη διαμόρφωση των εμποδίων



# Εισαγωγή – προσεγγίσεις σε βραχίονες

## Ρομποτικοί βραχίονες

βασισμένες σε πολυπρακτορική πλατφόρμα για το πρόβλημα σχεδιασμού κίνησης:

- σχεδιασμός σε κάθε υποτομή της δομής του βραχίονα (σχεδόν όλες)
- συνδυάζουν λύσεις υποπροβλημάτων σε επίλυση ολικού προβλήματος (σχεδόν όλες)
- σύνθεση υλοποιείται σε πραγματικό χρόνο, μέσω αλληλεπίδρασης (συνεργασία ή ανταγωνισμός) πρακτόρων που χειρίζονται διάφορα μέρη του βραχίονα (οι περισσότερες προσεγγίσεις)
- Overgaard και λοιποί:
  - πολυπρακτορικό σύστημα με πράκτορες αρθρώσεων και συνδέσμων
  - έλεγχος οφιοειδούς ρομπότ 25 B.E.
  - περιβάλλον με εμπόδια μοντελοποιημένο με χρήση ενός τεχνητού πεδίου δυναμικού (*artificial potential field* [Khatib])
- Bohner και Lürpen:
  - ρομπότ 7 B.E.
  - μόνο αρθρώσεις του ρομπότ ως πράκτορες
  - ενσωμάτωση αισθητήρων-δεδομένων και σχεδιασμός κίνησης ανά πράκτορα
  - αποσύνθεση προβλήματος και μείωση πολυπλοκότητας στο άθροισμα των υποπροβλημάτων

# Εισαγωγή – η προσέγγισή μας

## Προηγούμενη εργασία μας

- Πολυπρακτορικό σύστημα
- Κάθε πράκτορας λογισμικού ελέγχει συγκεκριμένο τμήμα της αλυσίδας αρθρώσεων-συνδέσμων ενός επίπεδου ρομποτικού βραχίονα
- Οι πράκτορες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για να προσαρμόσουν (σε πραγματικό χρόνο) τη διαμόρφωση του βραχίονα σε
  - εξωτερικά γεγονότα
  - μεταβαλλόμενες καταστάσεις
- Προσέγγιση ικανοποίησης γεωμετρικών περιορισμών
- Μειώνει το σχεδιασμό κίνησης ενός ρομποτικού βραχίονα στο σχεδιασμό κίνησης για ένα μόνο κομμάτι αυτού (π.χ. άκρο εργασίας)
- τα υπόλοιπα τμήματα της αλυσίδας του βραχίονα *αντιδρούν και προσαρμόζονται ή φέρουν αντίρρηση (βέτο)* στην μετακίνηση του κινούμενου τμήματος.

## Σε αυτή την εργασία

- αναθεωρούνται ελαφρά οι αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων
- υλοποιείται η προτεινόμενη αρχιτεκτονική σε:
  - 2-Δ επίπεδο
  - 3-Δ χώρο
  - φυσικές συνδεσμολογίες αλυσίδας (σειριακοί βραχίονες)
  - εικονικές αλυσίδες (σμήνη κινούμενων ρομπότ)
- νέα ευρήματα σχετικά με δυνατές εφαρμογές.

# Πολυπρακτορικά συστήματα

Ο Liu και λοιποί ορίζουν:

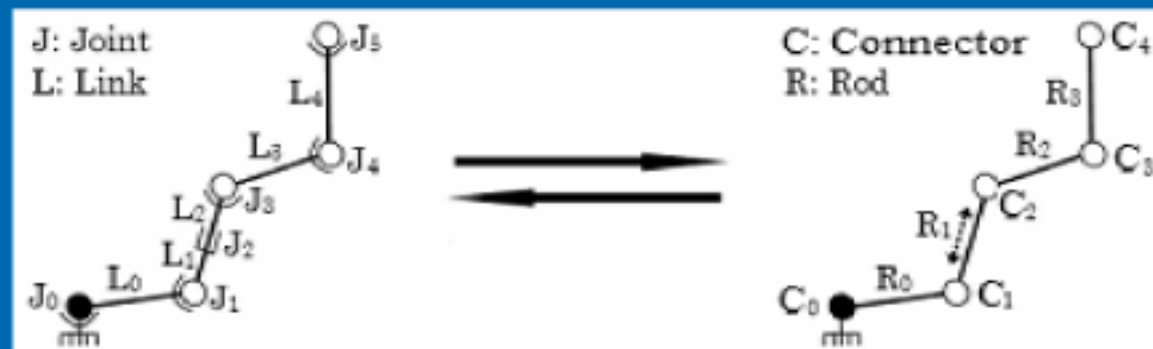
- πράκτορας (agent) = μια οντότητα
  - ικανή να ζει και να δρα σε ένα περιβάλλον,
  - ικανή να αισθάνεται το τοπικό της περιβάλλον,
  - οδηγούμενη από ορισμένους στόχους,
  - έχει κάποια «αντιδραστική» (reactive) συμπεριφορά
- πολυπρακτορικό (multi-agent) σύστημα = ένα σύστημα
  - έχει ένα περιβάλλον (χώρος όπου κατοικούν οι πράκτορες),
  - έχει ένα σύνολο από κανόνες αντίδρασης (που ορίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ πρακτόρων και περιβάλλοντος – οι νόμοι του πρακτορικού σύμπαντος)
  - έχει ένα σύνολο από πράκτορες

# Προτεινόμενο μοντέλο ιδεατού συστήματος

- ελέγχει την κίνηση της αλυσίδας μιμούμενο μια αλυσίδα από ράβδους, συνδεδεμένων στα άκρα τους με συνδετήρες (εν δυνάμει περιορισμένων σφαιρικών αρθρώσεων)
- τα δύο άκρα της αλυσίδας είναι συνδετήρες
- οι ράβδοι μπορούν να είναι μεταβλητού μεγέθους ( $[min, max]$  περιορισμός μήκους)
- κάθε τμήμα της αλυσίδας που αρχικοποιεί την κίνηση «ωθεί» ή «έλκει» τα υπόλοιπα μέρη της αλυσίδας
- διατηρούνται οι περιορισμοί που ορίζουν τη δομή της αλυσίδας
- υψηλός αριθμός ράβδων και συνδετήρων: συμπεριφέρεται όπως φίδι σερνόμενο ανάμεσα σε εμπόδια.



# Αντιστοίχιση κινηματικών σε ιδεατούς περιορισμούς (για βραχίονες)



Αλυσίδα βραχίονα:

- συνδετήρας βάσης (συνδέεται με το περιβάλλον): καλύπτει εν δυνάμει κινητές (ελεύθερα ή μερικά/ολικά περιορισμένες) βάσεις ρομποτικών βραχιόνων
- περιστροφική άρθρωση και ο εξερχόμενος σύνδεσμος της: αντιστοιχούν απευθείας στον πρώτο συνδετήρα μια ράβδου σταθερού μήκους
- πρισματική άρθρωση και τόσο ο εισερχόμενος όσο και ο εξερχόμενος σύνδεσμός της: αντιστοιχούν σε συνδετήρα + μεταβλητού μήκους ράβδο
- Πράκτορας συνδετήρα: ιδιότητα θέσης
- Πράκτορας ράβδου: ιδιότητα μήκους
- Περιορισμοί: όρια μήκους ράβδου σεβαστά από τις θέσεις των πρακτόρων συνδετήρων στα δύο άκρα της ράβδου
- Τιμές παραμέτρων αρθρώσεων: υπολογιζόμενες γεωμετρικά από τις θέσεις των συνδετήρων

# *Αντιστοίχιση κινηματικών σε ιδεατούς περιορισμούς (για σμήνη)*

Σχηματισμός αλυσίδας σμήνους:

ράβδοι: περιορισμοί απόστασης μεταξύ ζευγών  
από διαδοχικά ρομπότ

συνδετήρες: περιορισμοί γωνίας μεταξύ τριάδων  
συνεχόμενων ρομπότ

Η αντιστοίχιση μεταξύ ιδεατού και κινηματικού  
μοντέλου γίνεται όπως και στις αλυσίδες  
ρομποτικών βραχιόνων

# Διαπρακτορικές σχέσεις

## Σχέση Αφέντης – Σκλάβος με βέτο

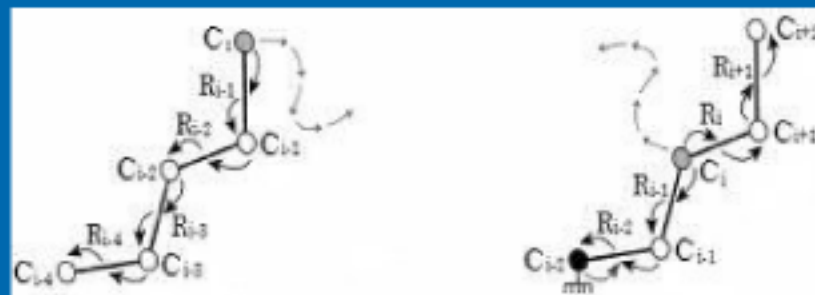
Οντότητα Σκλάβος:

- ακούει για αλλαγές της κατάστασης της οντότητας-αφέντη
- αντιδρά σε αυτές τις αλλαγές
  - αλλάζοντας τη δική του κατάσταση ή
  - φέρνοντας αντίρρηση στην αλλαγή κατάστασης του αφέντη (βέτο)
- μπορεί να λάβει μέρος ως αφέντης σε άλλες σχέσεις (να έχει τους δικούς του σκλάβους)

Αλυσίδα από σχέσεις Αφέντης – Σκλάβος με βέτο:

- πεπερασμένο πλήθος οντοτήτων
- πρώτη οντότητα αφέντης δεύτερης, δεύτερη οντότητα αφέντης τρίτης κλπ.

# Διάδοση γεγονότος αλλαγής κατάστασης



- Γεγονότα αλλαγής κατάστασης στην κεφαλή της αλυσίδας σχέσεων αφέντη-σκλάβου διαδίδονται προς την ουρά της
- Ο σκλάβος αντιδρά και προσπαθεί να προσαρμοστεί στο γεγονός αλλαγής κατάστασης του αφέντη του (αλλάζοντας τη δικιά του κατάσταση και προκαλώντας δικό του σκλάβο να αντιδράσει επίσης κλπ.)
- Οποιοδήποτε τμήμα (όχι μόνο τα ακραία σημεία) μπορεί να αρχικοποιήσει την κίνηση
  - ενεργώντας αυτόνομα για να αποφύγει εμπόδια
  - λαμβάνοντας εντολές κίνησης από μονάδα σχεδιασμού ή άνθρωπο χειριστή
- Η αλυσίδα αντιμετωπίζεται ως δυο υπό-αλυσίδες, με κεφαλή τους το τμήμα που αρχικοποίησε την κίνηση, και ουρές την κεφαλή και την ουρά της αρχικής αλυσίδας



# Ανάστροφη διάδοση γεγονότος αλλαγής κατάστασης (βέτο)

- Ένα τμήμα σκλάβος μπορεί να φέρει αντίρρηση (βέτο) στην κίνηση του τμήματος αφέντη του αν δεν μπορεί
  - να κινηθεί για να προσαρμοστεί στην κίνηση του αφέντη και ταυτόχρονα
  - να διατηρήσει το μοντέλο αλυσίδας και τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς

Η έγερση βέτο επιτρέπει:

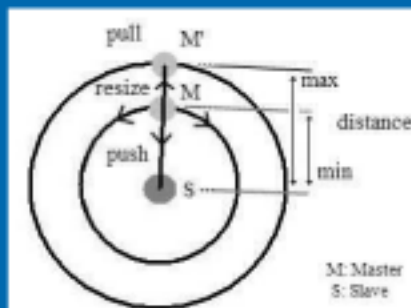
- βραχίονες σταθερής βάσης (Ο πράκτορας συνδετήρας στη σταθερή βάση πάντα φέρνει αντίρρηση στη μετατόπιση του)
- επανασχεδιασμό στην περίπτωση όπου κάποιος σκλάβος είναι παγιδευμένος σε εμπόδια ή δυσλειτουργεί

# Σύνολο κανόνων αντιδράσεων πράκτορα

Σύνολο κανόνων οντότητας σκλάβου:

- ορίζω πως αντιδρά σε αλλαγές της κατάστασης της οντότητας αφέντη του.
- ορίζει αντιδράσεις για τη διατήρηση περιορισμών που έχουν τεθεί στο αντικείμενο σκλάβο και τη σχέση του με τον αφέντη του:
  - σχεδιαστικούς
    - εσωτερικούς, περιορισμούς υλικού
    - δομή αλυσίδας
  - αποφασιζόμενους δυναμικά κατά το χρόνο εκτέλεσης
    - περιβαλλοντικούς περιορισμούς
    - εμπόδια (στάσιμα ή κινούμενα)
    - αστοχία υποτμημάτων

# Αντίδραση σε κίνηση αφέντη



Κανόνες αντίδρασης εκθέτουν τη συμπεριφορά διατήρησης περιορισμών της δομής αλυσίδας: Ώθηση, Έλξη, Μεταβολή μήκους

Ορίζουμε μια οδηγό γραμμή ( $g$ ), συνδέουσα την νέα θέση του αφέντη με την παλιά θέση του σκλάβου:

- Ο συνδετήρας σκλάβος μπορεί να κινηθεί πάνω στη  $g$ , ωθούμενος ή ελκούμενος από τον αφέντη του
- Η ράβδος διασύνδεσης μπορεί να αλλάζει μήκος και πάντα είναι ευθυγραμμισμένη πάνω στη  $g$

Κανόνας Ώθησης:

- Συνθήκη: απόσταση ( $d$ ) συνδετήρων αφέντη-σκλάβου  $<$  ελάχιστο μήκος ( $\text{minRL}$ ) ράβδου διασύνδεσης
- Αντίδραση: σκλάβος κινείται πάνω στη  $g$ , απόσταση συνδετήρων αφέντη-σκλάβου  $= \text{minRL}$  (ράβδος συμπίεστηκε)

Κανόνας Έλξης:

- Συνθήκη:  $d >$  μέγιστο μήκος ( $\text{maxRL}$ ) ράβδου διασύνδεσης
- Αντίδραση: σκλάβος κινείται πάνω στη  $g$ , απόσταση συνδετήρων αφέντη-σκλάβου  $= \text{maxRL}$  (ράβδος εκτάθηκε)

Κανόνας Μεταβολής μήκους:

- Συνθήκη:  $d$  στο  $[\text{minRL}, \text{maxRL}]$
- Αντίδραση: σκλάβος δεν κινείται, ράβδος αλλάζει μέγεθος σε  $d$  (εντός  $[\text{minRL}, \text{maxRL}]$ )

Όλοι μαζί καλούνται συμπεριφορά Ώθησης – Έλξης – Μεταβολής μήκους

# Αντίδραση σε ανιχνευμένα εμπόδια



Κανόνας περιστροφής:

- Συνθήκη: σύγκρουση ράβδου διασύνδεσης με εμπόδιο
- Αντίδραση: ράβδος περιστρέφεται γύρω από το συνδετήρα αφέντη

Κίνηση του συνδετήρα αφέντη οδηγεί σε περιστροφή της οδηγού γραμμής ώστε να περνά πλησίον του σημείου σύγκρουσης ράβδου-εμποδίου που είναι πλησιέστερα στον αφέντη

Αυτή η συμπεριφορά διατήρησης περιβαλλοντικών περιορισμών καλείται *Ωθηση – Έλξη – Περιστροφή*



# Αυτόνομη πλοήγηση

Πλοήγηση πράκτορα αρχικοποίησης κίνησης (χειριστή):

Επεκτάθηκε ένας αλγόριθμος ακολούθησης τοίχου με:

- συμπεριφορά αναζήτησης στόχου
- συμπεριφορά διάβασης διαδρόμων

Βήματα:

8. Ανάγνωση εμπρός-αριστερού και εμπρός-δεξιού πλευρικών αισθητήρων (ανιχνευτής λέιζερ) για λήψη κοντινότερης απόστασης από ορατά εμπόδια στην αριστερά και τη δεξιά πλευρά του πράκτορα ελεγκτή
9. Βάσει των μετρήσεων των αισθητήρων, υπολογίζεται η μεταβολή της θέσης του κινούμενου πράκτορα

Επίτευξη ελάχιστης και μέγιστης απόστασης από εμπόδια (στην εξομοίωση 0.7 και 0.9 μέτρα αντίστοιχα): ορισμός συμπεριφοράς αντίδρασης κινούμενου με χρήση μιας στοίβας επιπέδων υπαγωγής (subsumption [Brooks])

- Κατώτερα επίπεδα υπαγωγής: εν δυνάμει αντικαθιστούν συμπεριφορά εκτιθέμενη από ανώτερα επίπεδα
- Αποφυγή εμποδίων = κατώτατα επίπεδα συμπεριφοράς

Αποτέλεσμα:

- Διάβαση στενών διαδρόμων (ακόμη και υψηλής καμπυλότητας) = Πρωτεύων σχεδιαστικός στόχος
- Λειτουργεί και με δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον / κινούμενα εμπόδια όταν η ταχύτητα των εμποδίων είναι συγκρίσιμη με την ταχύτητα του κινούμενου μέρους

Subsumptive layers<sup>a</sup>

Priority: Layer	Trigger condition	Output
6: KEEP-MOVING	Always	$v_l = v_r = s$
5: TARGET-CHECK	Target detection	$v_l, v_r$ to target
4: FAR-RIGHT	Leaving right wall	$v_l = s, v_r = 0$
3: FAR-LEFT	Leaving left wall [but not right one]	$v_l = 0, v_r = s$
2: CLOSE-RIGHT	Wall close to right	$v_l = 0, v_r = s$
1: CLOSE-LEFT	Wall close to left [but not to right]	$v_l = s, v_r = 0$

# Πειράματα

Περιβάλλον δοκιμών "MachineLab" για 3-Δ προσομοιώσεις:

- RemObjects PascalScript για Delphi / Object Pascal
- Μέτα-μεταγλωττιστής Logo σε PascalScript

Pascal script:

- 3-Δ οφιοειδής κίνηση σε πραγματικό χρόνο για 450+ πράκτορες



2-Δ προσομοιωτής κινούμενων ρομπότ  
MobotSim:

SAX Basic script:

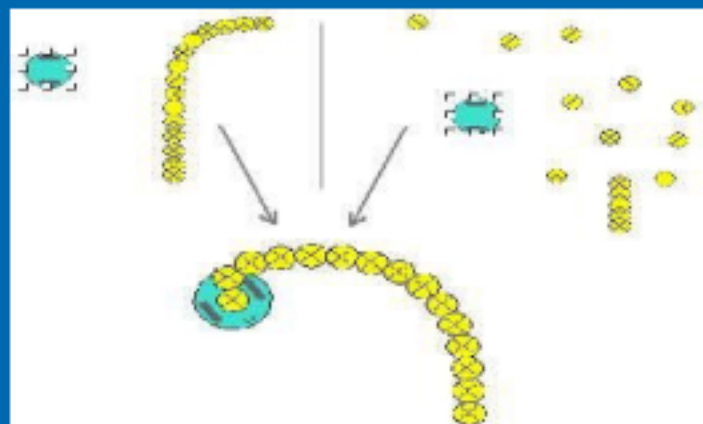
- σμήνος κινούμενων ρομπότ:
  - περιπλανώμενο ρομπότ ελεγκτής με ανιχνευτή λέιζερ
  - 15 ρομπότ σκλάβοι ακολουθούν σε οφιοειδή σχηματισμό χρησιμοποιώντας απλούστερους αισθητήρες επικείμενης σύγκρουσης
- αποφυγή εμποδίων σε στενούς καμπύλους διαδρόμους

# Μελλοντική εργασία

- Σχεδίαση και υλοποίηση γωνιακών περιορισμών και αντίστοιχων αντιδράσεων
- Διερεύνηση/μέτρηση απόδοσης στην εύρεση λύσεων για το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα σε φυσικές (βραχίονες) ή ιδεατές (σμήνη) αναδιαμορφωσιμες συνδέσεις αλυσίδας.

Παρατηρήθηκε ότι στην 2-Δ προσομοίωση παρέχει αυτόματα:

- λύση αντίστροφου κινηματικού
- ανασχηματισμός αλυσίδας σπασμένης με το χέρι:
  - διασκορπισμένα μέρη
  - ή ακόμη και σε λιγότερα μέρη
  - λύση σεβόμενη το σχετικό σχηματισμό των μη σπασμένων μερών στα δύο άκρα της αλυσίδας



- Υλοποίηση ανίχνευσης συγκρούσεων στον 3-Δ προσομοιωτή:
  - ελάχιστες αλλαγές στην υλοποίηση των κανόνων διατήρησης περιορισμών
  - διατήρηση πολυπρακτορικού συστήματος και σχεδίασης διάδοσης γεγονότων άθικτων

# Συμπεράσματα (1/2)

Μείωση προβλήματος σχεδιασμού κίνησης για σχηματισμούς αλυσίδας:

- Σχεδιασμός μόνο για ένα τμήμα αφέντη της αλυσίδας (συνήθως το άκρο εργασίας [tool-tip] ή το προπορευόμενο κινούμενο ρομπότ).
- Υπόλοιπα τμήματα της αλυσίδας:
  - προσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο στην κίνηση του αφέντη
  - αντιδρούν για να αποφύγουν εμπόδια που έχουν εντοπιστεί

Μπορεί να κλιμακωθεί αποδοτικά:

- ένας πράκτορας χρειάζεται μόνο να εντοπίζει (αισθάνεται) εμπόδια τοπικά
- ο πράκτορας αλληλεπιδρά μόνο με τους δυο γειτονικούς του πράκτορες στην αλυσίδα ελέγχου



# Συμπεράσματα (2/2)

Βέλτιστη εφαρμογή:

- βραχίονες υψηλά πλεοναζόντων B.E.
- αναδιαμορφώσιμοι βραχίονες
- σμήνη με υψηλό αριθμό ρομπότ
- που προσπαθούν να κινηθούν μέσα σε στενούς διαδρόμους

Δεν ασχολείται με:

Ανάστροφη διάδοση βέτο από σκλάβο πράκτορα μέχρι πίσω στον πράκτορα που ενεργοποίησε αρχικά την κίνηση (η υπόλοιπη αλυσίδα δεν μπορεί ν' ακολουθήσει):

- αυτόνομα κινούμενος: επανασχεδιασμός κίνησης
- ελεγχόμενος από μονάδα σχεδίασης ή άνθρωπο χειριστή: αφήνει το βέτο να διαδοθεί περαιτέρω στον χειριστή

# Αναγνώριση

Το Πανεπιστήμιο Πατρών είναι μέλος του χρηματοδοτούμενου από την Ε.Ε. δικτύου αριστείας (FP6 NoE) Innovative Production Machines and Systems (I\*PROMS).

<http://www.iproms.org>

# Αναφορές (1/2)

- [1] Hwang, Y., and Ahuja, N. Gross Motion Planning – A Survey. ACM Computing Surveys, no 3, vol 24 (1992) 219-291.
- [2] Chen, P., and Hwang, Y. Sandros, a motion planner with performance proportional to task difficulty. Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1992).
- [3] Challou, D., Boley, D., Gini, M., Kumar, V., Olson, C. In: Kamal Gupta and Angel P. del Pobil (Eds.) Practical Motion Planning in Robotics: Current Approaches and Future Directions, 1998.
- [4] Liu, J. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems: Explorations in Learning, Self-Organization, and Adaptive Computation. World Scientific, Singapore (2001).
- [5] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems. Oxford University Press, New York, NY, 1999.
- [6] Dorigo, M., Trianni, V., Sahin, E., Labella, T., Grossy R., Baldassarre, G., Nolfi, S., Deneubourg J-L., Mondada, F., Floreano D., Gambardella, L.M. Evolving Self-Organizing Behaviours for a Swarm-bot. Swarm Robotics special issue of the Autonomous Robots journal, 17(2-3) (2004) 223-245.

# Αναφορές (2/2)

- [7] Overgaard, L., Petersen, H., and Perram, J. Reactive Motion Planning: A Multi-agent Approach. Applied Artificial Intelligence, no 10 (1996) 35-51.
- [8] Khatib, O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. International Journal of Robotic Research, no. 5 (1986) 90-98.
- [9] Bohner, P., and Lüpken, R. Reactive Multi-Agent Based Control of Redundant Manipulators. Proceedings of the 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico (1997).
- [10] Birbilis, G. and Aspragathos N. In: Lenarcic J. and Galletti C. (Eds.) On Advances in Robot Kinematics. Kluwer Academic, Netherlands, 2004, pp 441-448.
- [11] Liu, J., Jing, H., and Tang Y., Multi-agent oriented constraint satisfaction. Artificial Intelligence no.136 (2002) 101-144.
- [12] Brooks, R. A. A robust layered control system for a mobile robot. IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-2, April (1986) 14-23.
- Delphi / Object Pascal: [www.borland.com/delphi](http://www.borland.com/delphi)
- PascalScript: [www.remobjects.com](http://www.remobjects.com)
- MobotSim: [www.mobotsoft.com](http://www.mobotsoft.com)