



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρονικής και Υπολογιστών

## Παρουσίαση Διπλωματικής Εργασίας

Ανάπτυξη Ρομποτικού Οχήματος Εδάφους με Κινηματικό Μοντέλο 4WS4WD και Υλοποίηση Συστήματος για Αυτόνομη Εξερεύνηση σε Άγνωστο Περιβάλλον

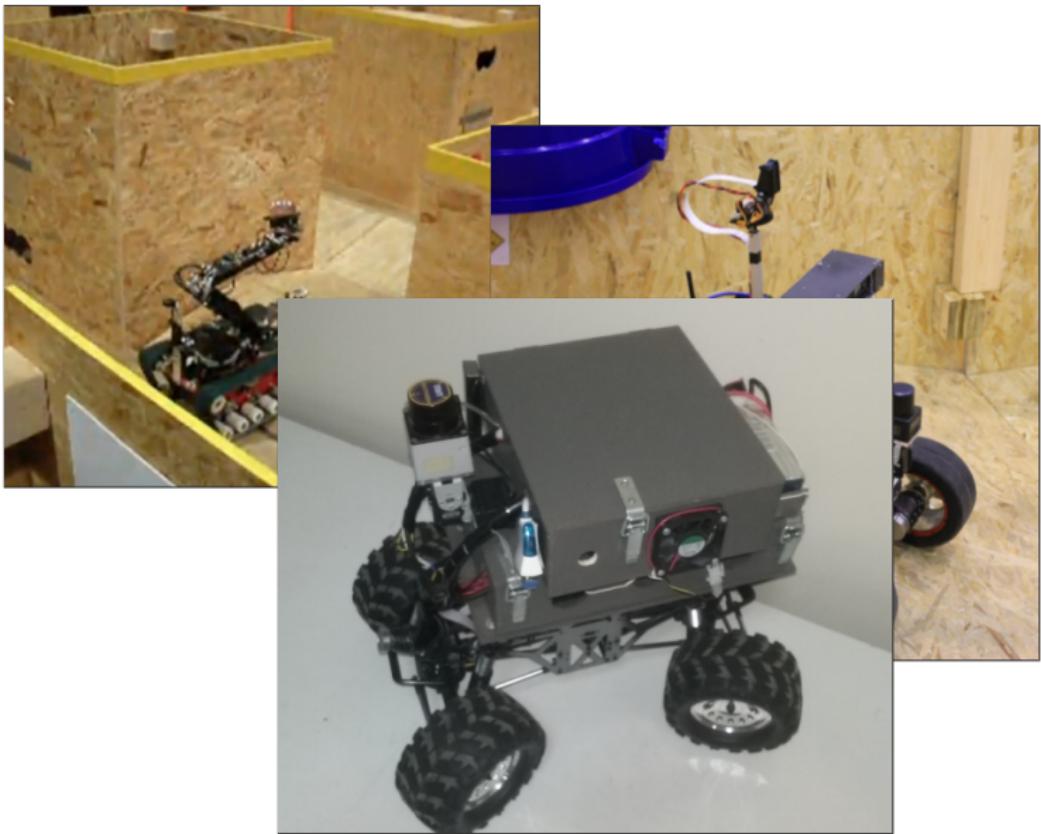
---

Εκπόνηση:  
Γεώργιος Κούρος

Επιβλέπων:  
Λουκάς Πέτρου

28 Οκτωβρίου 2016

# Κίνητρο



## Τμήματα:

- Ρομποτική Πλατφόρμα Monstertruck
- Κινηματική Ανάλυση
- Εκτίμηση Κατάστασης και Χαρτογράφηση
- Αυτόνομη Πλοήγηση και Εξερεύνηση
- Αρχιτεκτονική Συστήματος και Εργαλεία
- Πειράματα

Ρομποτική Πλατφόρμα Monstertruck

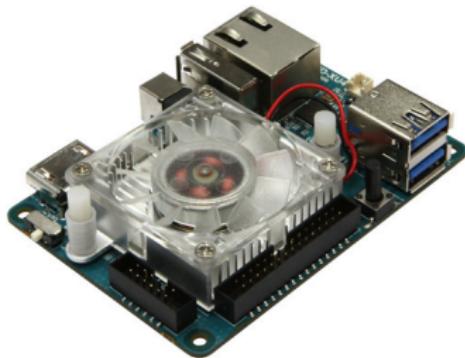
---

Τηλεκατευθυνόμενο Όχημα Groundpounder, της Redcat Racing.



- Τετρακίνηση - 4WD
- Τετραδιεύθυνση - 4WS
- Αναρτήσεις
- Μεταλλικό Σασί
- Τροχοί Offroad

# Εξοπλισμός



Roll  
Pitch  
Yaw

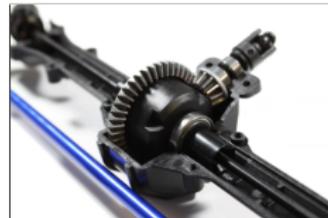
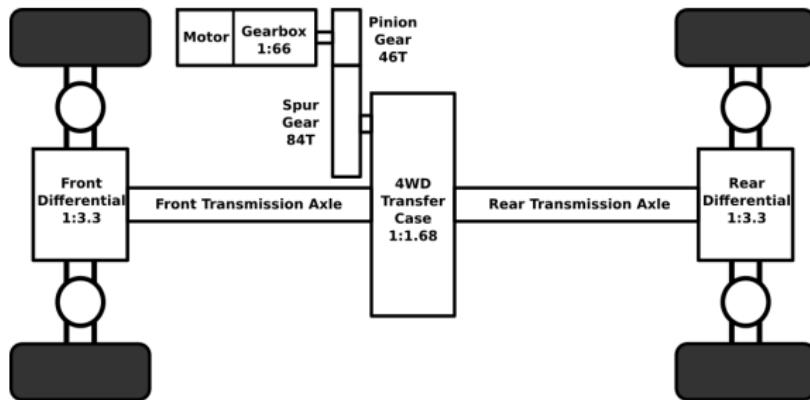


Κινηματική Ανάλυση

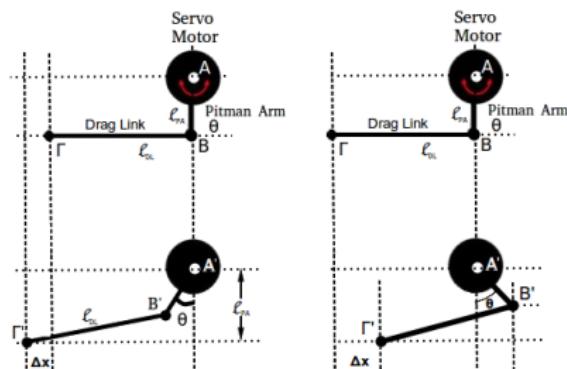
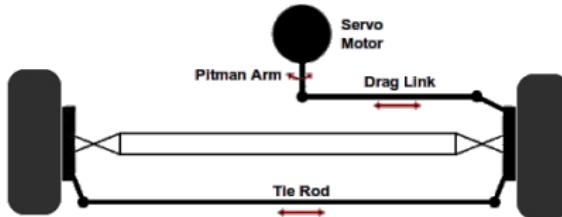
---

# Σύστημα Τετρακίνησης

$$\omega_{wheel} = \omega_{motor}/(\lambda_{gearbox} \times \lambda_{spur\_pinion} \times \lambda_{transfer\_case} \times \lambda_{differential}) = \omega_{motor}/644$$

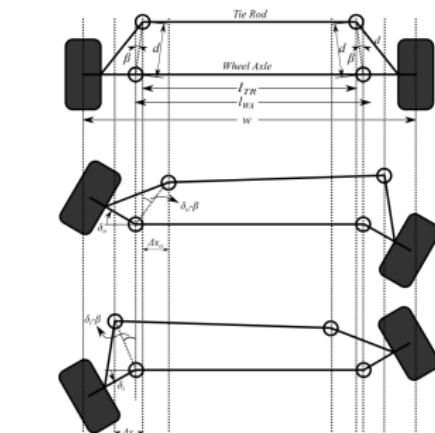


# Σύστημα Τετραδιεύθυνσης



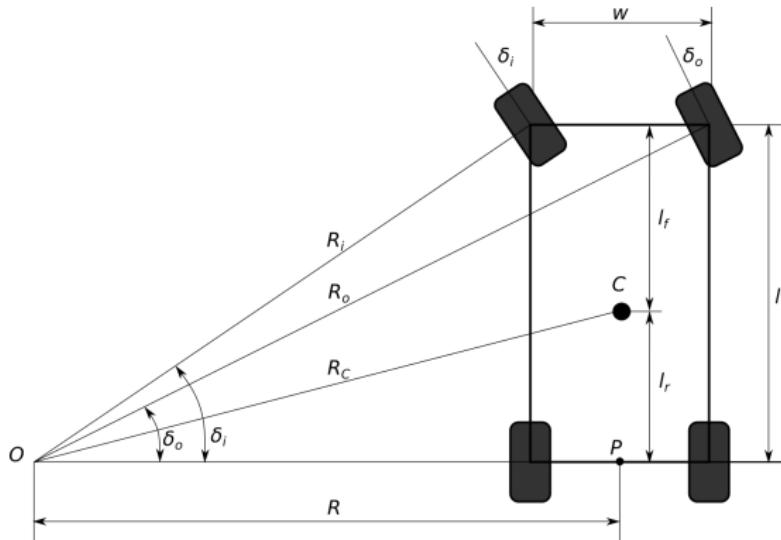
$$\delta_i = \beta + \sin^{-1} \left( \frac{\sqrt{l_{DL}^2 - l_{PA}^2(1 - \cos(\theta))} + l_{PA} \sin |\theta| - l_{DL} - d \sin \beta}{d} \right)$$

$$\delta_o = -\beta + \sin^{-1} \left( \frac{-\sqrt{l_{DL}^2 - l_{PA}^2(1 - \cos(\theta))} - l_{PA} \sin |\theta| - l_{DL} + d \sin \beta}{d} \right)$$



$$\sin(\beta + \delta_i) + \sin(\beta - \delta_o) = \frac{L}{d} + \sqrt{\left(\frac{L}{d} - w \sin \beta\right)^2 - \left(\cos (\beta - \delta_o) - \cos (\beta + \delta_i)\right)^2}$$

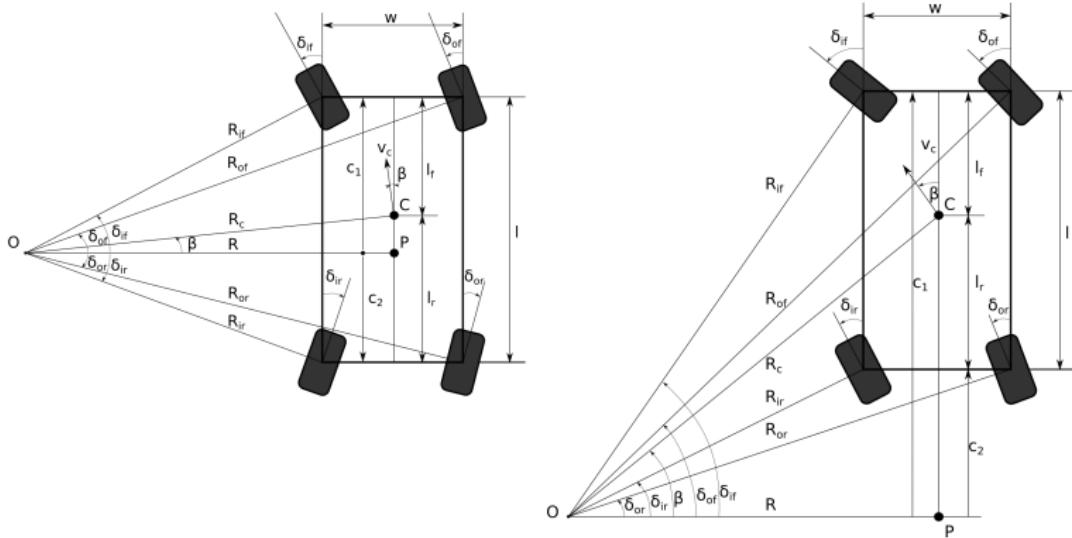
# Κινηματικό Μοντέλο ACKERMANN



Συνθήκη Ackermann:

$$\cot \delta_i - \cot \delta_o = w/l$$

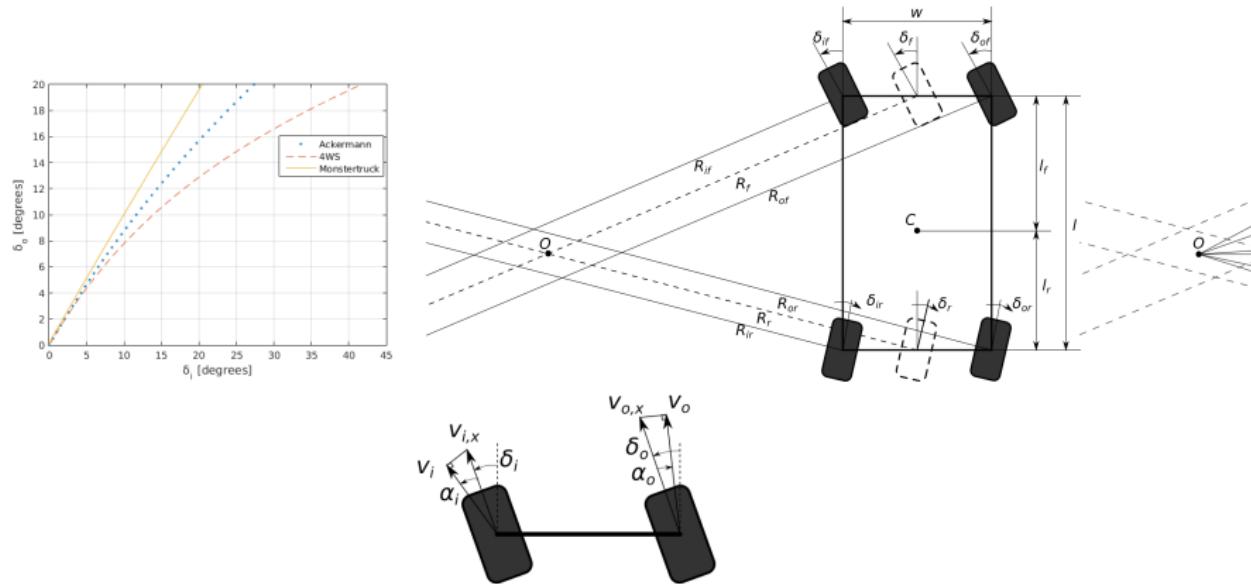
# Κινηματικό Μοντέλο Τετραδιεύθυνσης (4WS)



Συνθήκη Τετραδιεύθυνσης:

$$\frac{1}{\cot \delta_{of} - \cot \delta_{if}} + \frac{1}{\cot \delta_{or} - \cot \delta_{ir}} = \frac{l}{w}$$

# Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικής Πλατφόρμας MONSTERTRUCK



Μη Ιδανική Συνθήκη Τετραδιεύθυνσης:

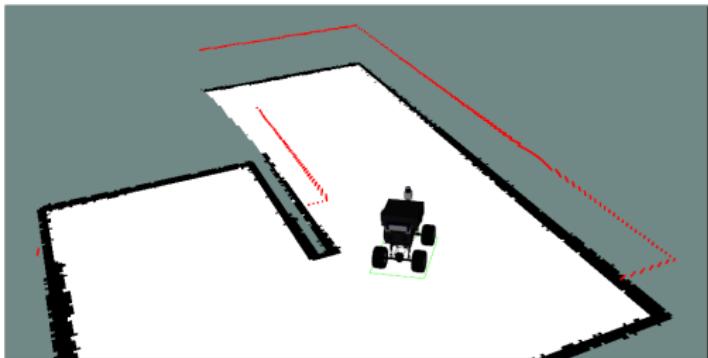
$$\frac{1}{\cot(\delta_{of} - \alpha_{of}) - \cot(\delta_{if} + \alpha_{if})} - \frac{1}{\cot(\delta_{or} - \alpha_{or}) - \cot(\delta_{ir} + \alpha_{ir})} = \frac{l}{w}$$

## Εκτίμηση Κατάστασης και Χαρτογράφηση

---

# Κατάσταση και SLAM

- 6D Κατάσταση:  $s = (x, y, z, \phi, \psi, \theta)$  ή  $(x, y, z, roll, pitch, yaw)$
- SLAM: Simultaneous Localization And Mapping
- 2D αλγόριθμοι SLAM → 3D πόζα  $p = (x, y, \theta)$
- Χάρτες Πλέγματος Κατάληψης (OGM)
- Χαρτογράφηση, εντοπισμός πόζας → αλληλένδετα
- Αξιοποίηση πληροφορίας από σαρωτές λέιζερ



## CRSM: Critical Rays Scan Matching

- Αντιστοίχιση σκαναρισμάτων σαρωτή λέιζερ
- Εντοπισμός πόζας → μετασχηματισμός διαδοχικών σκαναρισμάτων
- Προεπεξεργασία σκαναρισμάτων → επιλογή κρίσιμων ακτίνων
- Αντιστοίχιση τρέχοντος σκαναρίσματος με ολικό χάρτη  
→ Random-Restart Hill Climbing (RRHC)

## Gmapping

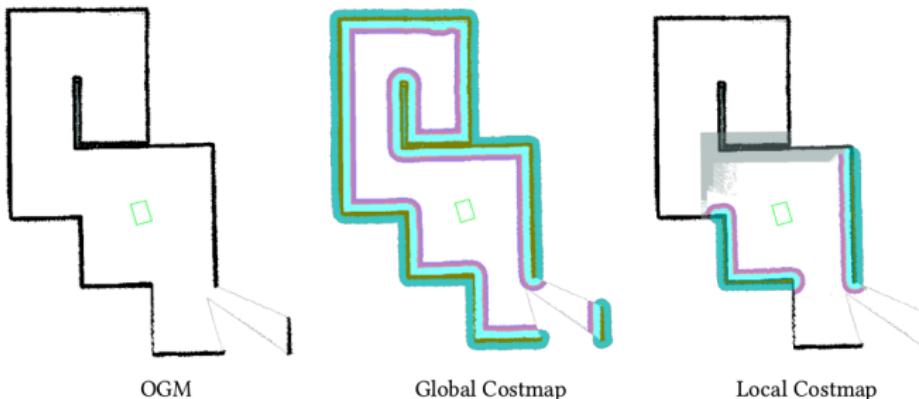
- Σωματίδια (particles)
- Rao-Blackwellized Φίλτρα Σωματιδίων
- Εκτίμηση κατάστασης → συνδυασμός
  - οδομετρίας και
  - αντιστοίχισης σκαναρισμάτων
- Συνδυαστική Οδομετρία → Εκτεταμένα Φίλτρα Kalman (EKF) σε
  - οδομετρία τροχών →  $(x, y, \theta)$
  - πυξίδα →  $(roll, pitch, yaw)$  ή  $(\phi, \psi, \theta)$

## Αυτόνομη Πλοήγηση και Εξερεύνηση

---

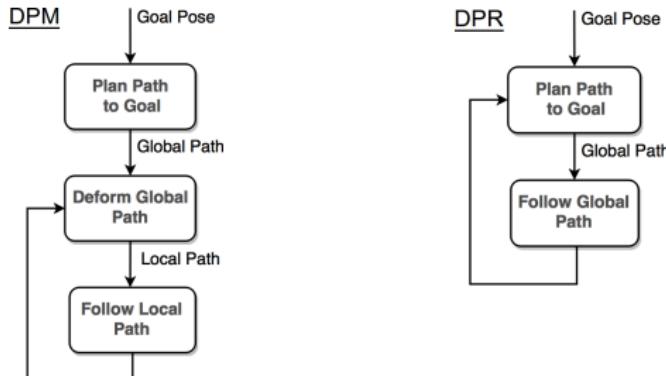
# Αυτόνομη Πλοήγηση

- Στόχος: Μετάβαση από μία αρχική πόζα  $p_{init}$  σε μία τελική  $p_{final}$
- Αναζήτηση λύσης σε Χάρτες Κόστους  
→ αναπαράσταση ρομπότ ως σημείο
- Διάσπαση Προβλήματος → Ολικό και Τοπικό πρόβλημα
- Κινηματικοί περιορισμοί → μεγαλύτερη πολυπλοκότητα



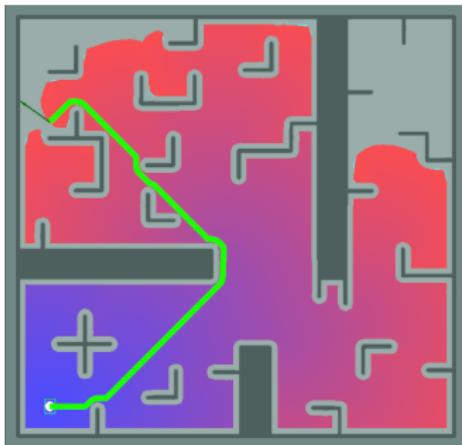
# Προτάσεις

1. Αυτόνομη Πλοήγηση με Δυναμική Παραμόρφωση Μονοπατιού (DPM)
  - 1.1 Κατασκευή στατικού ολικού μονοπατιού → Dijkstra / A\*
  - 1.2 Παραμόρφωση ολικού μονοπατιού σε τοπικό → Reeds-Shepp Band
  - 1.3 Διάσχιση τοπικού μονοπατιού με ελεγκτή ασαφούς λογικής
2. Αυτόνομη Πλοήγηση με Δυναμική Ανακατασκευή Μονοπατιού (DPR)
  - 2.1 Δυναμική ανακατασκευή ολικού μονοπατιού → SBPL Lattice Planner
  - 2.2 Διάσχιση τοπικού μονοπατιού με ελεγκτή ασαφούς λογικής

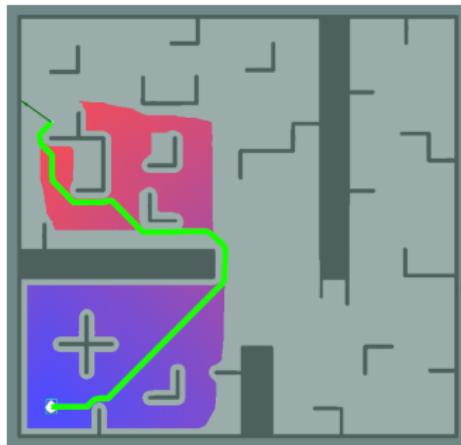


## DPM (1/3): Ολικό Μονοπάτι μέσω Dijkstra ή A\*

- Αντιμετώπιση του χάρτη κόστους ως γράφο
- Κατασκευή ολικού μονοπατιού μεταξύ αρχικής θέσης και στόχου
- Dijkstra → Breadth-First Search →  $f(n) = g(n)$
- $A^*$  → μεταξύ Breadth-First, Best-First Search →  $f(n) = g(n) + h(n)$
- Dijkstra → πάντα βέλτιστη λύση, αλλά  $A^*$  → αποδοτικότερος
- Κινηματικά μη εφικτό μονοπάτι για Car-Like Robots



Dijkstra



$A^*$

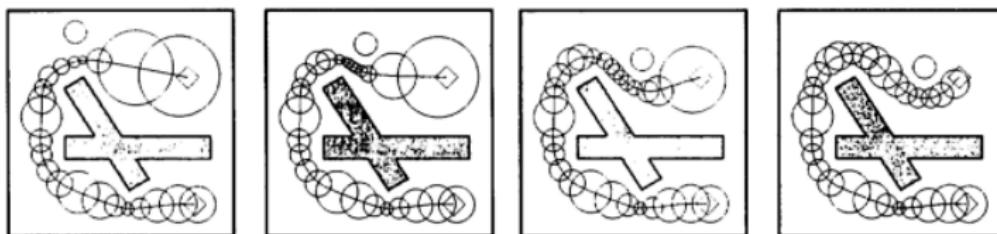
## DPM (2/3): Μετατροπή Μονοπατιού σε Ελαστική Ζώνη

- Μετατροπή σε ελαστική ζώνη → σημείο σε Φούσκα (Bubble)
- Φούσκα: Μέγιστο τοπικό, προσβάσιμο τμήμα γύρω από μία θέση  $b$   
→  $B(b) = \{q : \|b - q\| < \rho(b)\}$
- Παραμόρφωση μέσω τεχνητών
  - εσωτερικών ελκτικών δυνάμεων → τάση για ευθυγράμμιση

$$f_c = k_c \cdot \left( \frac{\mathbf{b}_{i-1} - \mathbf{b}_i}{\|\mathbf{b}_{i-1} - \mathbf{b}_i\|} + \frac{\mathbf{b}_{i+1} - \mathbf{b}_i}{\|\mathbf{b}_{i+1} - \mathbf{b}_i\|} \right)$$

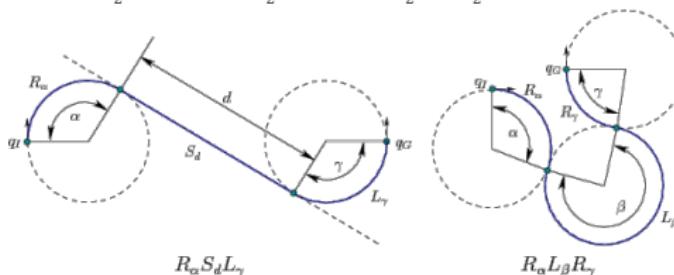
- εξωτερικών απωστικών δυνάμεων → απομάκρυνση από εμπόδια

$$f_r = \begin{cases} k_r \cdot (\rho_0 - \rho \frac{\partial \rho}{\partial b}) & \rho < \rho_0 \\ 0 & \rho \geq \rho_0 \end{cases}$$



**Μονοπάτι Reeds-Shepp:** βέλτιστο μονοπάτι για ένα αυτοκίνητο που κινείται και μπρος και πίσω

- 48 τύποι μονοπατιών Reeds-Shepp βάσει των λέξεων:  
 $\{C|C|C, CC|C, C|CC, CSC, CC_\beta|C_\beta C, C|C_\beta C_\beta|C,$   
 $C|C_{\frac{\pi}{2}}SC, CSC_{\frac{\pi}{2}}|C, C|C_{\frac{\pi}{2}}SC_{\frac{\pi}{2}}|C\}, \quad C \in \{R, L\}$



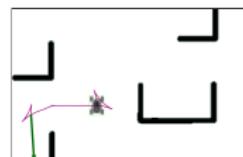
- Ζώνη Reeds-Shepp  $\rightarrow$  ακολουθία μονοπατιών Reeds-Shepp



Ολικό Μονοπάτι

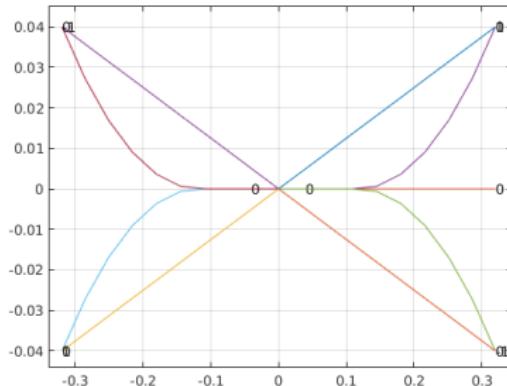


Ελαστική Ζώνη



Ζώνη Reeds-Shepp

- Κατάσταση  $s = (x, y, \theta, v)$
- Δικτύωμα Καταστάσεων  
→ διακριτοποίηση χώρου καταστάσεων + συνδέσεις καταστάσεων
- Σύνδεση μεταξύ δύο καταστάσεων  
→ κινηματικά και δυναμικά εφικτό μονοπάτι
- Χώρος Κινήσεων: κινηματικά εφικτές κινήσεις
- Μονοπάτι στο δικτύωμα → συνδυασμός εφικτών κινήσεων
- Κατασκευή Μονοπατιού → αναζήτηση σε γράφο → ARA\* ή AD\*

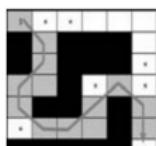


## DPR (2/2): ARA\* και AD\*

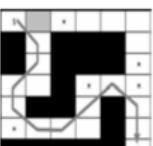
ARA\*: Anytime Repairing A\*

AD\*: Anytime Dynamic A\*

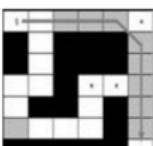
- A\* σε Μεγάλο πρόβλημα → παραβίαση χρονικών περιορισμών
- Λύση: παραλλαγές του A\* → APA\*, AD\*
- ARA\*: αρχική μη βέλτιστη λύση και συνεχής βελτίωση
- $\epsilon > 1$ : παράγοντας διαστολής κόστους μονοπατιού
- $f(n) = g(n) + \epsilon \cdot h(n)$
- Επαναχρησιμοποίηση πληροφορίας από προηγούμενες αναζητήσεις
- AD\*: ARA\* + D\*/D\* Lite → προσαρμογή σε δυναμικά εμπόδια



$\epsilon = 2.5$

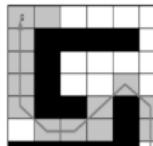


$\epsilon = 1.5$

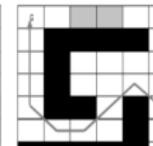


$\epsilon = 1.0$

ARA\*

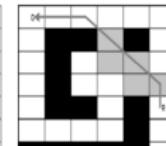


$\epsilon = 2.5$



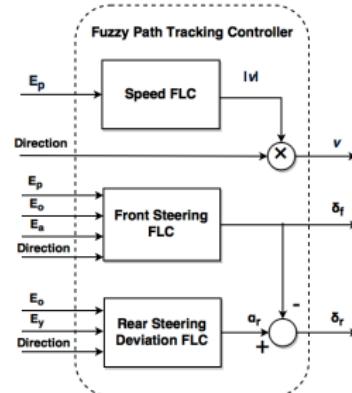
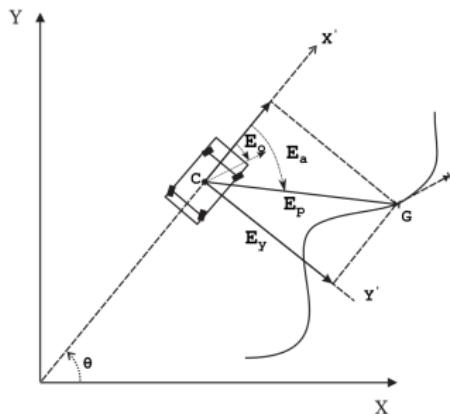
$\epsilon = 1.5$

AD\*



$\epsilon = 1.0$

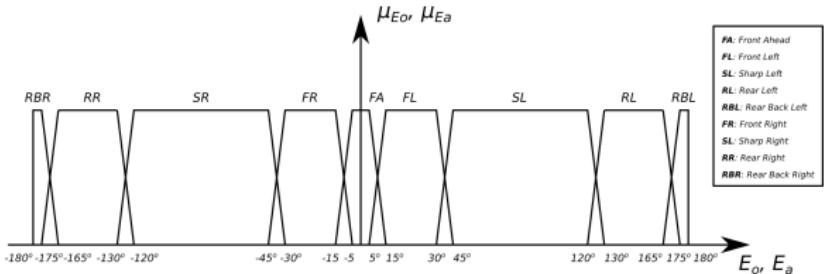
# Ασαφής Ελεγκτής Διάσχισης Μονοπατιού (1/2)



Επιθυμητή Συμπεριφορά:

- $v$  : ανάλογη της απόστασης  $E_p$  από τον τρέχον στόχο
- $\delta_f$  : διόρθωση  $E_\alpha$  μακριά από τον στόχο και διόρθωση  $E_o$  κοντά
- $\alpha_r$  : διόρθωση πλευρικής απόκλισης  $E_y$  εάν  $E_o$ ,  $E_y$  μικρά
- Αντίστοιχη συμπεριφορά για θετική και αρνητική φορά κίνησης

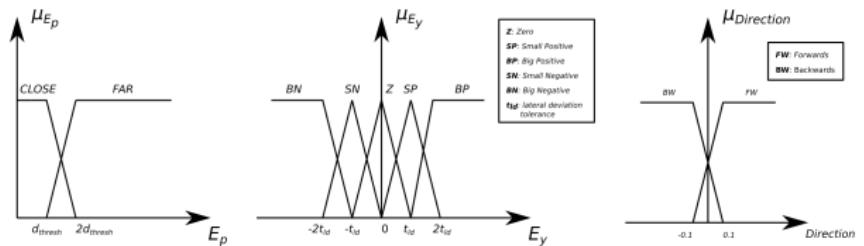
# Ασαφής Ελεγκτής Διάσχισης Μονοπατιού (2/2)



**FA:** Front Ahead  
**FL:** Front Left  
**SL:** Sharp Left  
**RL:** Rear Left  
**RBL:** Rear Back Left  
**FR:** Front Right  
**SL:** Sharp Right  
**RR:** Rear Right  
**RBR:** Rear Back Right

**Speed Fuzzy Rules**

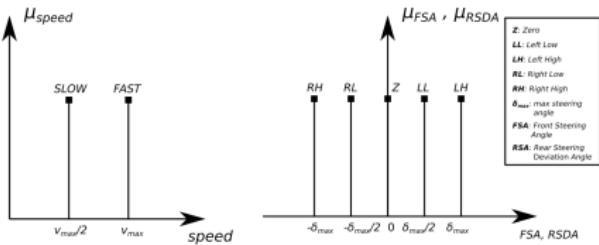
- if Ep is CLOSE then Speed is SLOW
- if Ep is FAR then Speed is FAST



**Z:** Zero  
**BP:** Big Positive  
**SP:** Small Positive  
**BN:** Big Negative  
**SN:** Small Negative  
**t<sub>fd</sub>:** lateral deviation tolerance

**FSA Fuzzy Rules**

if Ep is FAR and Ea is RBL then FSA is Z  
 if Ep is FAR and Ea is RL then FSA is LH  
 if Ep is FAR and Ea is SL then FSA is LH  
 if Ep is FAR and Ea is FL then FSA is LL  
 if Ep is FAR and Ea is FA then FSA is FA  
 if Ep is FAR and Ea is Z then FSA is Z  
 if Ep is FAR and Ea is FR then FSA is RL  
 if Ep is FAR and Ea is SR then FSA is RL  
 if Ep is FAR and Ea is RH then FSA is RH  
 if Ep is FAR and Ea is RR then FSA is RH  
 if Ep is FAR and Ea is RBR then FSA is Z  
 if Ep is CLOSE and Direction is FW and Ea is SL then FSA is LH  
 if Ep is CLOSE and Direction is FW and Ea is FL then FSA is LL  
 if Ep is CLOSE and Direction is FW and Ea is FA then FSA is Z  
 if Ep is CLOSE and Direction is FW and Ea is FR then FSA is RL  
 if Ep is CLOSE and Direction is FW and Ea is SR then FSA is RH  
 if Ep is CLOSE and Direction is BW and Ea is SL then FSA is RH  
 if Ep is CLOSE and Direction is BW and Ea is FW then FSA is RL  
 if Ep is CLOSE and Direction is BW and Ea is FR then FSA is LL  
 if Ep is CLOSE and Direction is BW and Ea is SR then FSA is Z



**Z:** Zero  
**LL:** Left Low  
**LH:** Left High  
**RL:** Right Low  
**RH:** Right High  
 **$\delta_{max}$ :** max steering angle  
**FSA:** Front Steering Angle  
**RSDA:** Rear Steering Deviation Angle

**RSDA Fuzzy Rules**

if Eo is not FA and Eo is not FR and Eo is not FL then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FA and Eo is BP then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FL and Eo is BN then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FR and Eo is BP then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FA and Eo is SP then RSDA is LH  
 if Direction is FW and Eo is FL and Eo is SP then RSDA is LH  
 if Direction is FW and Eo is FR and Eo is SP then RSDA is LH  
 if Direction is FW and Eo is FA and Eo is Z then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FL and Eo is Z then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FR and Eo is Z then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FA and Eo is SN then RSDA is RH  
 if Direction is FW and Eo is FR and Eo is SN then RSDA is RH  
 if Direction is FW and Eo is FA and Eo is BN then RSDA is RH  
 if Direction is FW and Eo is FR and Eo is BN then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FL and Eo is BN then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FR and Eo is BP then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FA and Eo is SP then RSDA is LH  
 if Direction is FW and Eo is FL and Eo is SP then RSDA is LH  
 if Direction is FW and Eo is FR and Eo is SP then RSDA is LH  
 if Direction is FW and Eo is FA and Eo is Z then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FL and Eo is Z then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FR and Eo is Z then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FA and Eo is SN then RSDA is RH  
 if Direction is FW and Eo is FL and Eo is SN then RSDA is RH  
 if Direction is FW and Eo is FR and Eo is SN then RSDA is RH  
 if Direction is FW and Eo is FA and Eo is BN then RSDA is Z  
 if Direction is FW and Eo is FL and Eo is BN then RSDA is Z

# Εξερεύνηση

- Αυτόνομη εξερεύνηση → αυτόνομη επιλογή στόχων
- Κάλυψη περιβάλλοντος
- Μέτωπο Εξερεύνησης → σύνορο
- Συνάρτηση κόστους
- Κριτήρια επιλογής
  - Μέγεθος μετώπου
  - Μήκος μονοπατιού
  - Γωνιακή απόκλιση
  - Συχνότητα επιλογής

## Αρχιτεκτονική Συστήματος και Εργαλεία

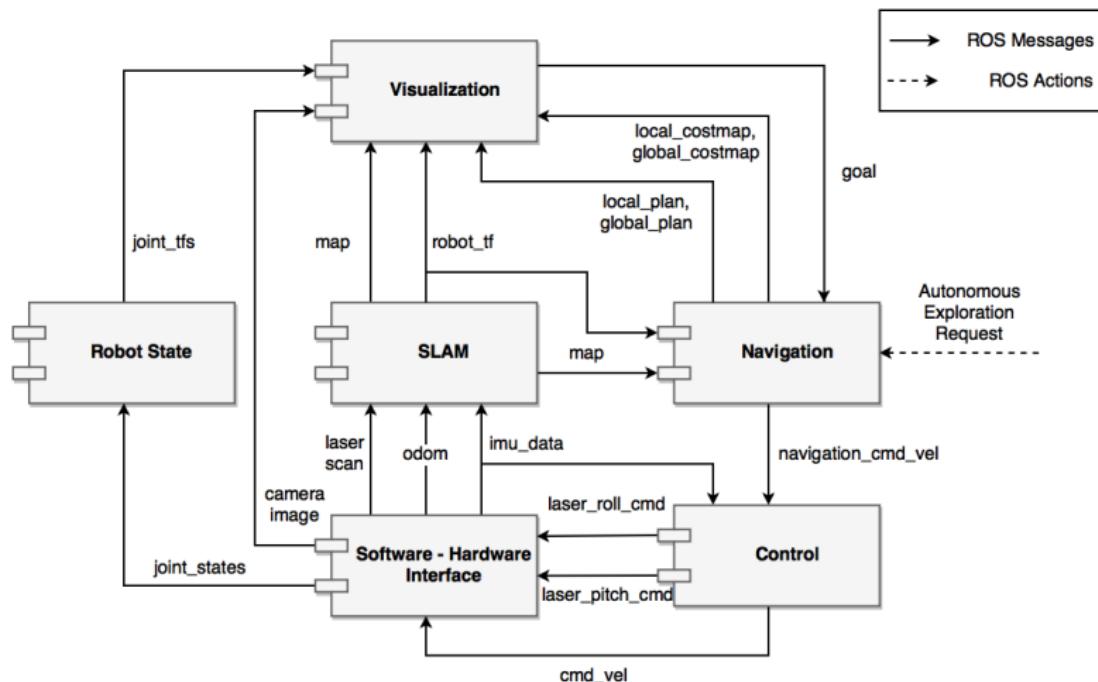
---



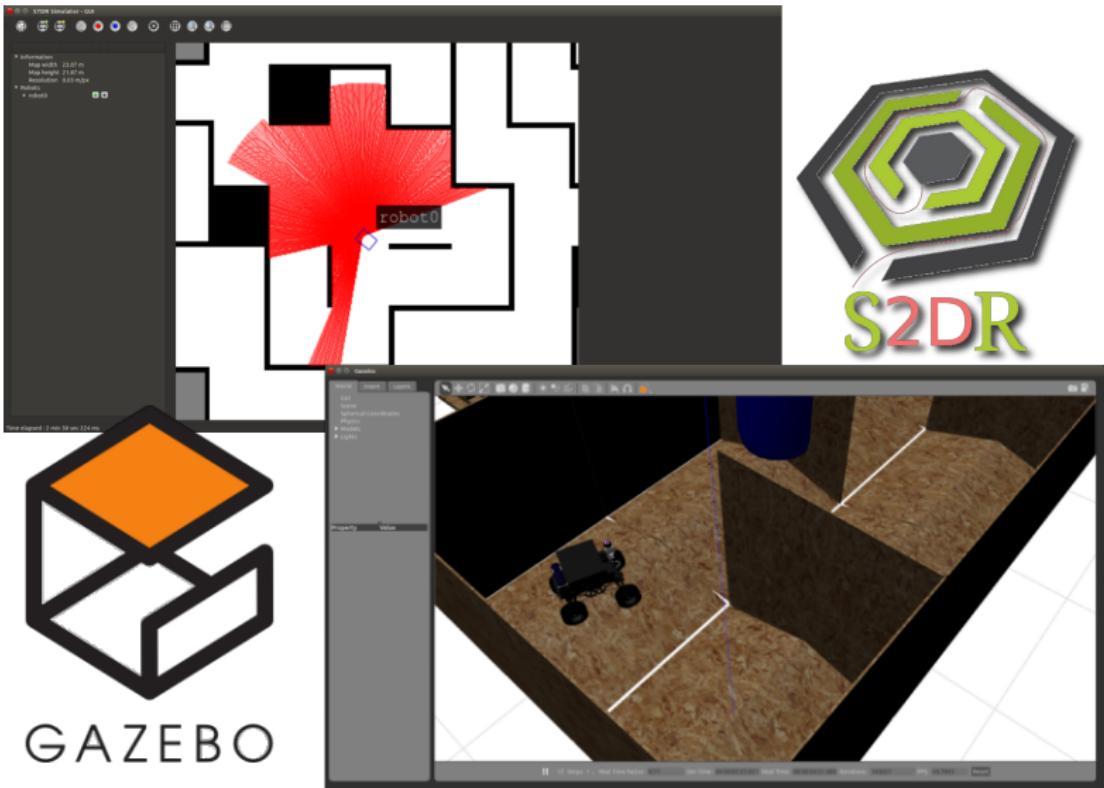
## ROS: Robotic Operating System

- Peer-to-Peer
  - Κόμβοι → διεργασίες με δυνατότητες επικοινωνίας
  - Επικοινωνία → messages, services, actions
- Multilingual
  - C++
  - Python
- Tools-Based
- Open Source

# Διάγραμμα Τμημάτων Λογισμικού



# Προσομοίωση

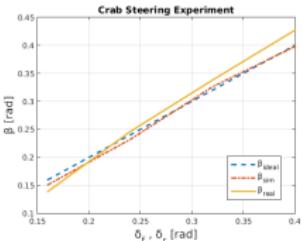
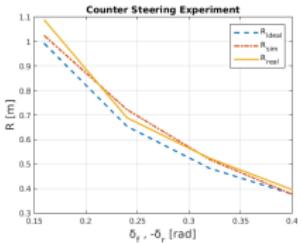
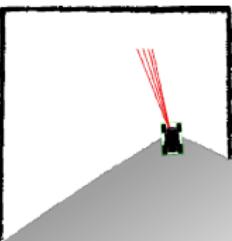
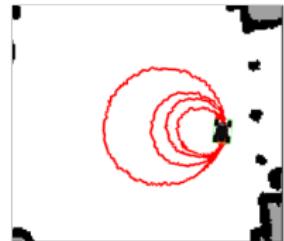
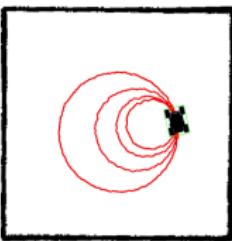
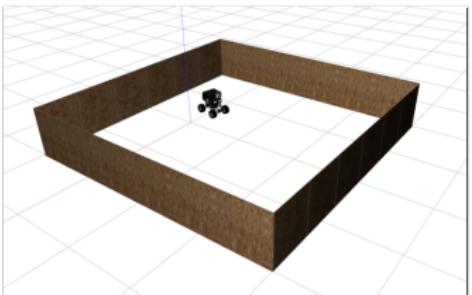


GAZEBO

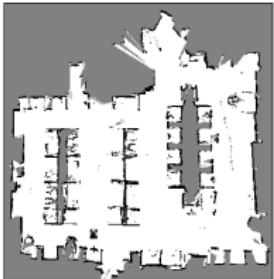
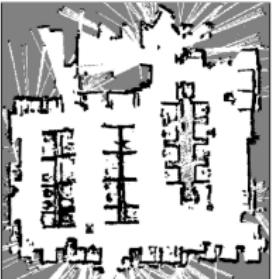
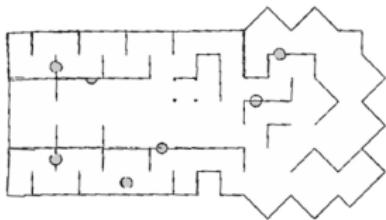
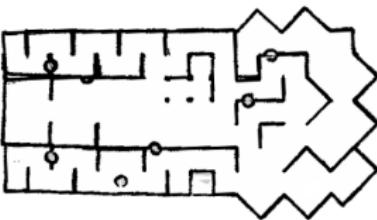
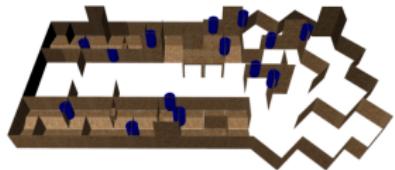
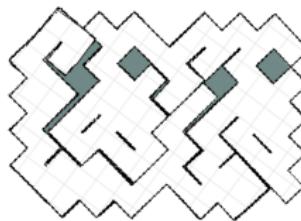
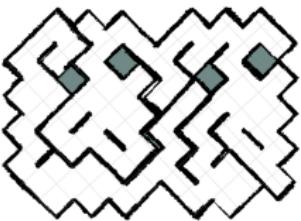
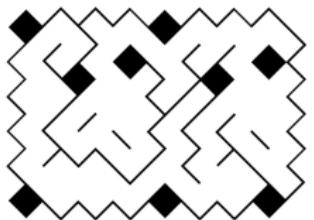
## Πειράματα

---

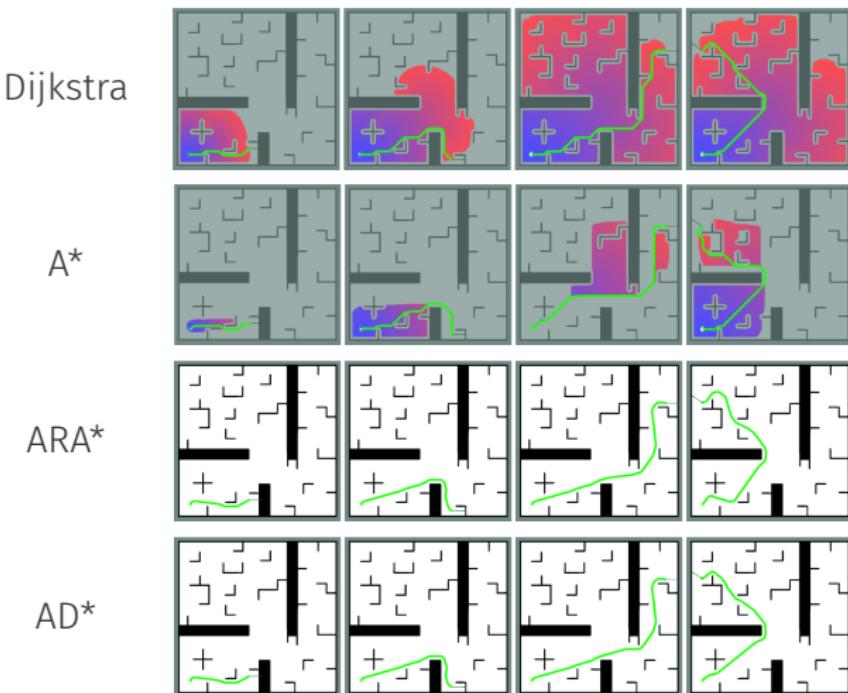
# Πειράματα Κινηματικού Μοντέλου



# Πειράματα Χαρτογράφησης

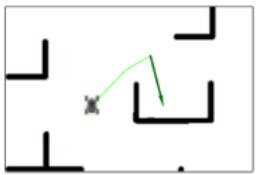


# Πειράματα Κατασκευής Ολικού Μονοπατιού (1/2)

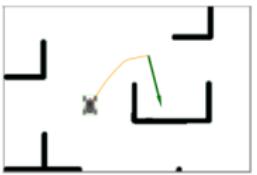


	Dijkstra		A*		ARA*		AD*	
	$T[s]$	$s[m]$	$T[s]$	$s[m]$	$s_{init}[m]$	$s_{final}[m]$	$s_{init}[m]$	$s_{final}[m]$
$p_1$	0.035	6.02	0.027	6.02	6.68	5.91	7.45	5.92
$p_2$	0.060	11.78	0.060	11.78	13.56	11.554	12.62	11.25
$p_3$	0.110	19.34	0.090	19.34	19.85	18.73	23.26	18.66
$p_4$	0.110	17.69	0.110	17.77	21.36	17.25	20.42	17.57

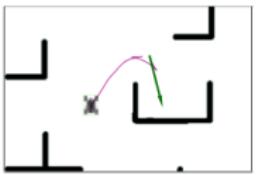
## Πειράματα Δυναμικής Παραμόρφωσης Μονοπατιού



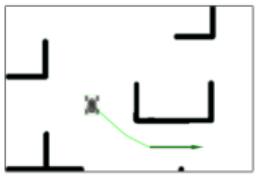
(α') Ολικό Μονοπάτι 1.



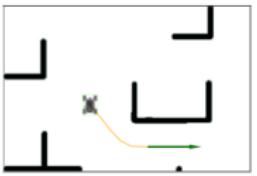
(β') Ελαστική Ζώνη 1.



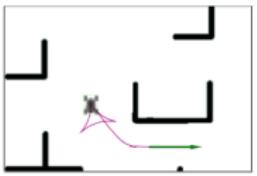
(γ') Ζώνη Reeds-Shepp 1.



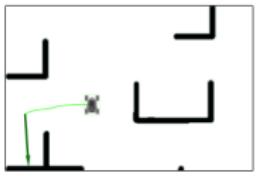
(δ') Ολικό Μονοπάτι 2.



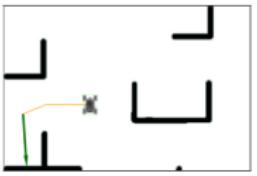
(ε') Ελαστική Ζώνη 2.



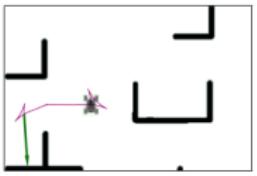
(στ') Ζώνη Reeds-Shepp 2.



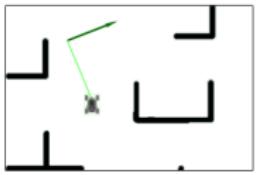
(ζ) Ολικό Μονοπάτι 3.



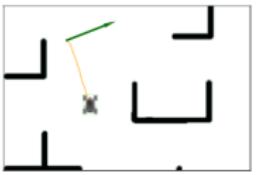
(η') Ελαστική Ζώνη 3.



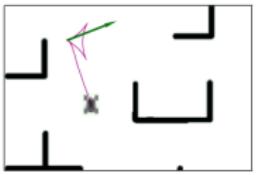
(θ') Ζώνη Reeds-Shepp 3.



(ι') Ολικό Μονοπάτι 4.

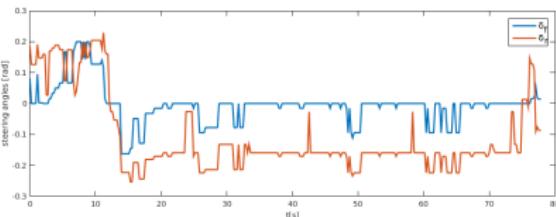
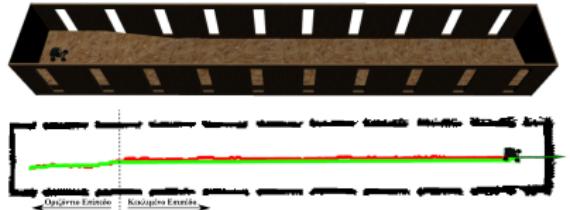
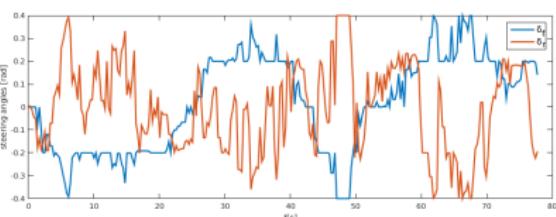
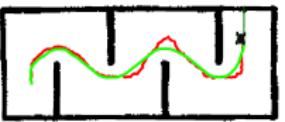
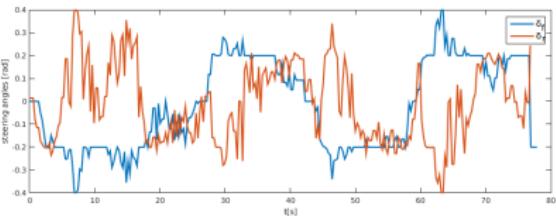
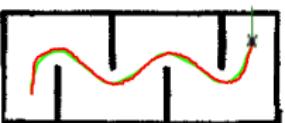


(ια') Ελαστική Ζώνη 4.



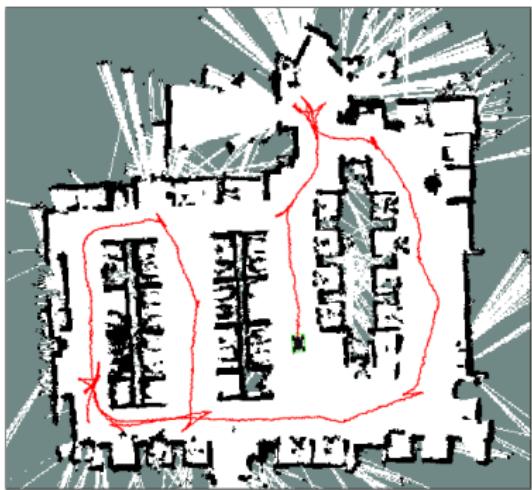
(ιβ') Ζώνη Reeds-Shepp 4.

# Πειράματα Διάσχισης Μονοπατιού

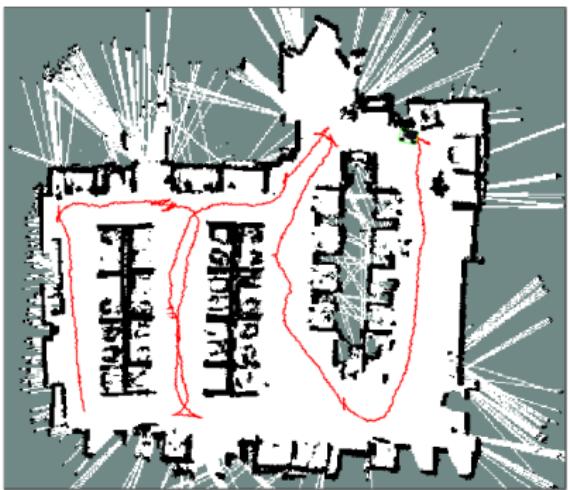


# Πειράματα Εξερεύνησης Πραγματικού Περιβάλλοντος

DPM



DPR



	$T_E$ [s]	$S_E$ [m]
DPM	486	114.89
DPR	698	93.38

# Συμπεράσματα

- Μικρά σφάλματα κινηματικού μοντέλου
- Ατέλειες χαρτογράφησης, αλλά επαρκής αναπαράσταση
- DPM: υψηλή συχνότητα, αλλά αστάθεια υπό περιπτώσεις
- DPR: ευσταθής συμπεριφορά, αλλά χαμηλή συχνότητα
- Διάσχιση Μονοπατιού: επιτυχής αντιστάθμιση σφαλμάτων, αλλά κίνδυνος σύγκρουσης

- Βελτίωση μηχανολογικής κατασκευής
- Επέκταση ρομποτικής αντίληψης
- Ενσωμάτωση αλγορίθμων ρομποτικής όρασης
- Αποδοτικότερος αλγόριθμος κατασκευής μονοπατιών Reeds-Shepp
- Διάσχιση μονοπατιού με εντοπισμό εμποδίων

# Ερωτήσεις



-  R. N. Jazar. “Vehicle Dynamics: Theory and Applications”. In: Springer Science and Business Media, LLC, 2009. Chap. 7: Steering Dynamics.
-  E. Tsardoulias and L. Petrou. “Critical Rays Scan Match SLAM”. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems* (2013).
-  G. Grisetti, C. Stachniss, and W. Burgard. “Improved Techniques for Grid Mapping with Rao - Blackwellized Particle Filters”. In: *IEEE Transactions on Robotics* 23 (2007), pp. 34–46.
-  M. Likhachev and D. Ferguson. “Planning Long Dynamically Feasible Maneuvers for Autonomous Vehicles”. In: *The International Journal of Robotics Research* 28 (2009), pp. 933–945.

-  M. Likhachev, G. Gordon, and S. Thrun. “ARA\*: Anytime A\* with Provable Bounds on Sub-Optimality”. In: *IN ADVANCES IN NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS 16: PROCEEDINGS OF THE 2003 CONFERENCE (NIPS-03)*. MIT Press, 2004.
-  M. Likhachev et al. “Anytime Dynamic A\*: An Anytime, Replanning Algorithm”. In: *In ICAPS*. 2005, pp. 262–271.
-  M. Khatib et al. “Dynamic path modification for car-like nonholonomic mobile robots”. In: *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*. Vol. 4. Apr. 1997, 2920–2925 vol.4. doi: 10.1109/ROBOT.1997.606730.
-  S. Quinlan and O. Khatib. “Elastic bands: connecting path planning and control”. In: *Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on*. May 1993, 802–807 vol.2. doi: 10.1109/ROBOT.1993.291936.

-  J. A. Reeds and L. A. Shepp. “Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards.” In: *Pacific J. Math.* 145.2 (1990), pp. 367–393. URL: <http://projecteuclid.org/euclid.pjm/1102645450>.
-  S. M. LaValle. *Planning Algorithms*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2006.
-  A. Mendes, L. C. Bento, and U. Nunes. “Path-tracking controller with an anti-collision behaviour of a bi-steerable cybernetic car”. In: *Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference*. Vol. 1. Sept. 2003, 613–619 vol.1. DOI: 10.1109/ETFA.2003.1247763.