



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

Παρουσίαση Διπλωματικής Εργασίας

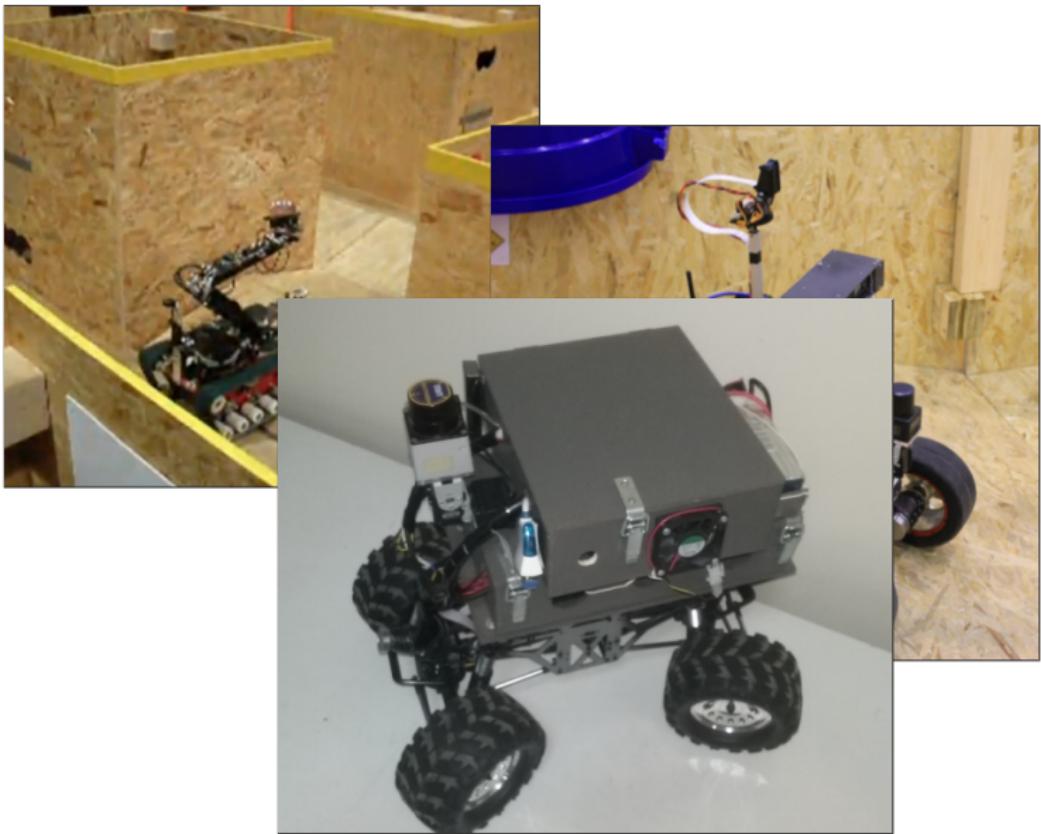
Ανάπτυξη Ρομποτικού Οχήματος Εδάφους με Κινηματικό Μοντέλο 4WS4WD και Υλοποίηση Συστήματος για Αυτόνομη Εξερεύνηση σε Άγνωστο Περιβάλλον

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
- Πειράματα

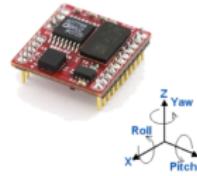
Ρομποτική Πλατφόρμα Monstertruck

Τηλεκατευθυνόμενο Όχημα Groundpounder, της Redcat Racing.

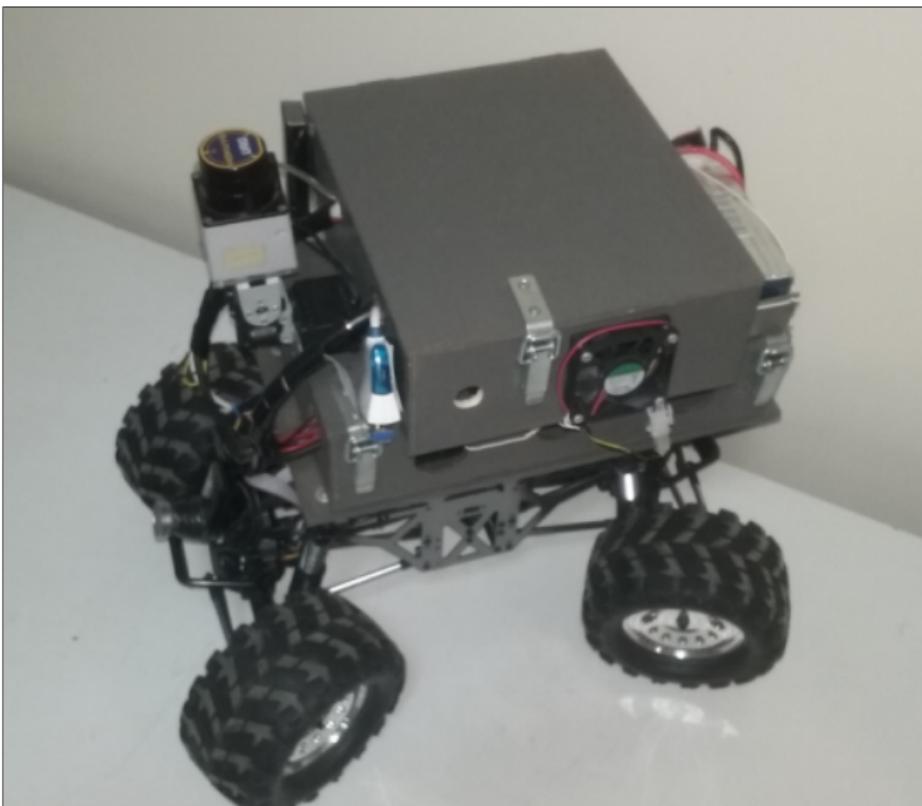


- Τετρακίνηση - 4WD
- Τετραδιεύθυνση - 4WS
- Αναρτήσεις
- Μεταλλικό Σασί
- Τροχοί Offroad

Εξοπλισμός



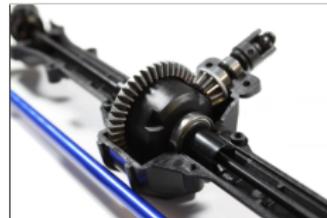
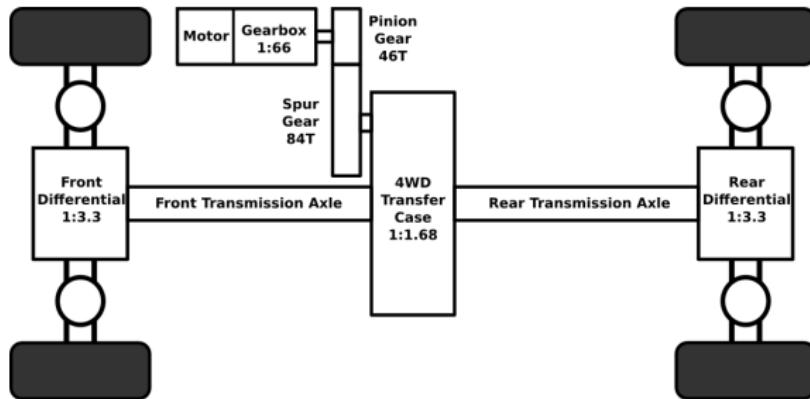
Τελική Ρομποτική Πλατφόρμα



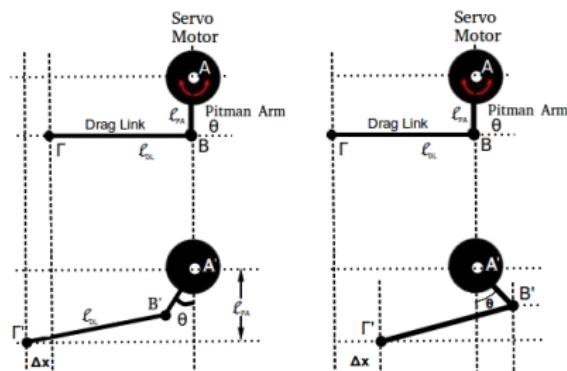
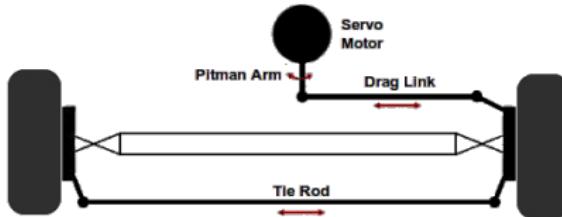
Κινηματική Ανάλυση

Σύστημα Τετρακίνησης

$$\omega_{wheel} = \omega_{motor}/(\lambda_{gearbox} \times \lambda_{spur_pinion} \times \lambda_{transfer_case} \times \lambda_{differential}) = \omega_{motor}/644$$

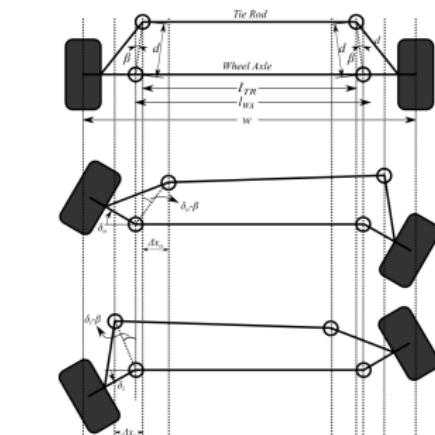


Σύστημα Τετραδιεύθυνσης



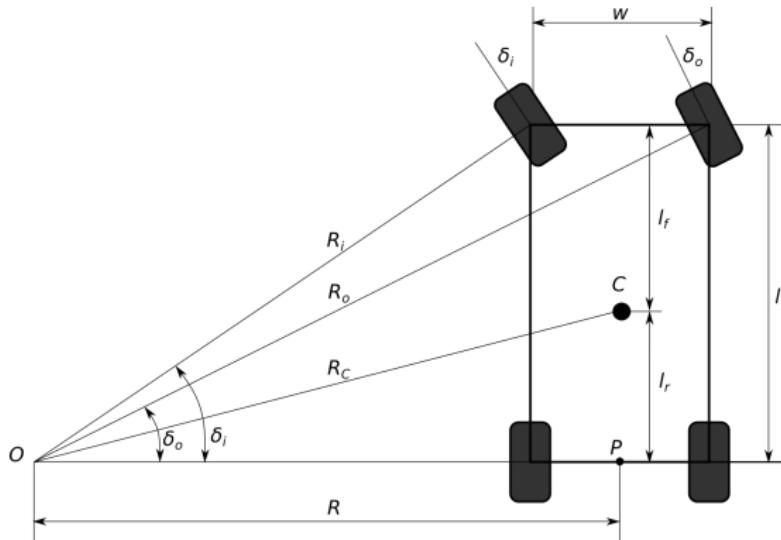
$$\delta_i = \beta + \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{l_{DL}^2 - l_{PA}^2(1 - \cos(\theta))} + l_{PA} \sin |\theta| - l_{DL} - d \sin \beta}{d} \right)$$

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



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

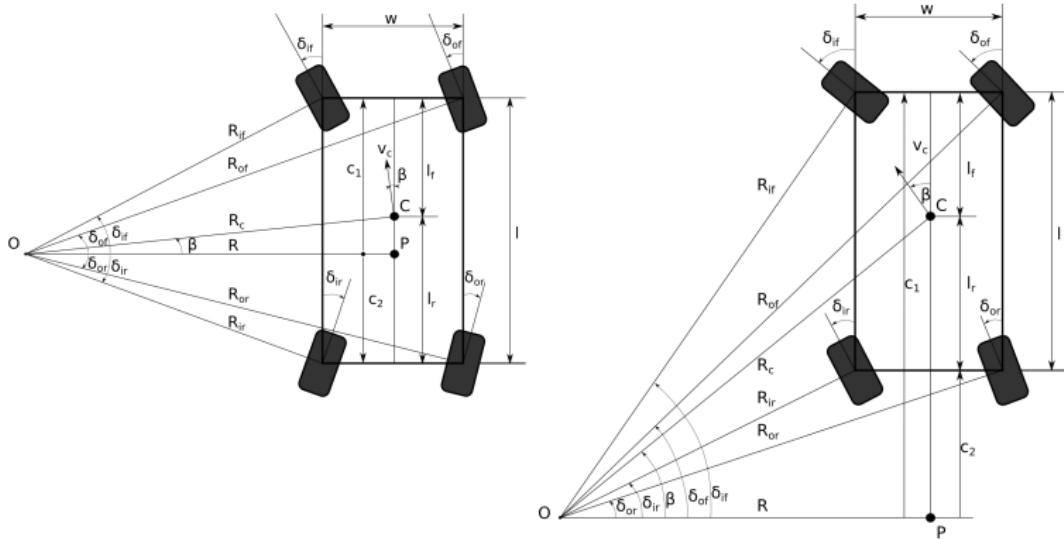
Κινηματικό Μοντέλο ACKERMANN



Συνθήκη Ackermann:

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

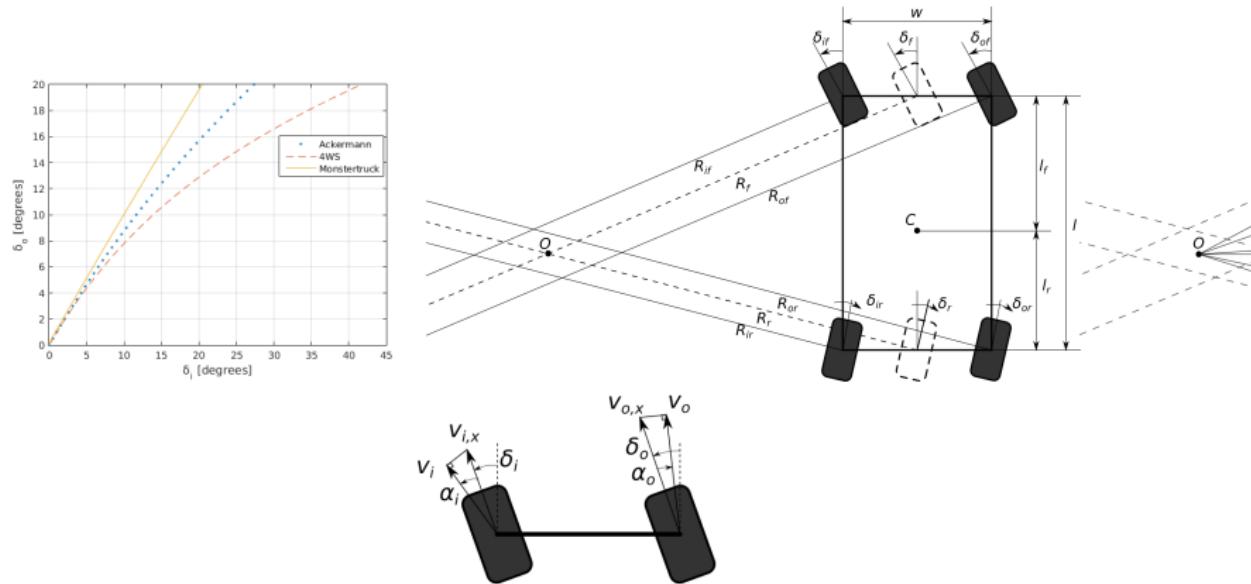
Κινηματικό Μοντέλο Τετραδιεύθυνσης (4WS)



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



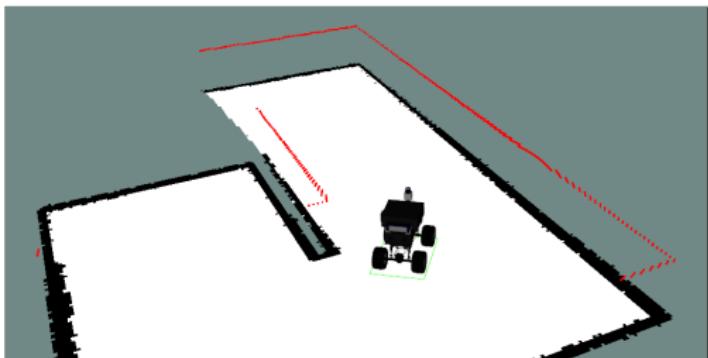
Μη Ιδανική Συνθήκη Τετραδιεύθυνσης:

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

Εκτίμηση Κατάστασης και Χαρτογράφηση

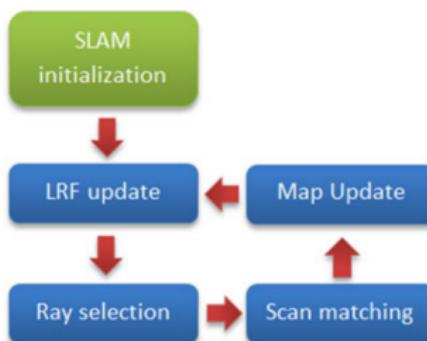
Κατάσταση και Χαρτογράφηση

- 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, Εκτίμηση Κατάστασης → αλληλένδετα
- Αξιοποίηση πληροφορίας από σαρωτές λέιζερ
- Σταθεροποίηση του σαρωτή λέιζερ στο επίπεδο



CRSM: Critical Rays Scan Matching

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

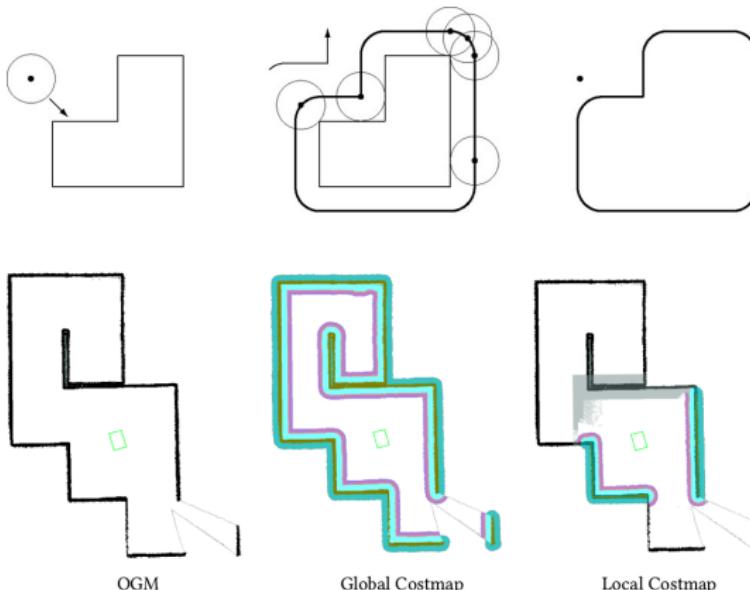


- Σωματίδια (particles)
- Rao-Blackwellized Φίλτρα Σωματιδίων
- Εκτίμηση κατάστασης μέσω συνδυασμού
 - Οδομετρίας και
 - Αντιστοίχισης σκαναρίσματων σαρωτή λέιζερ
- Υψηλή εξάρτηση χαρτογράφησης από αξιόπιστη εκτίμηση κατάστασης
- Εκτίμηση Κατάστασης μέσω συνδυαστικής αντίληψης
- EKF: Εκτεταμένα Φίλτρα Kalman
- Συνδυασμός πληροφορίας από
 - οδομετρία τροχών $\rightarrow (x, y, \theta)$
 - πυξίδα $\rightarrow (roll, pitch, yaw)$
 - οπτική οδομετρία $\rightarrow (x, y, z, roll, pitch, yaw)$

Αυτόνομη Πλοήγηση και Εξερεύνηση

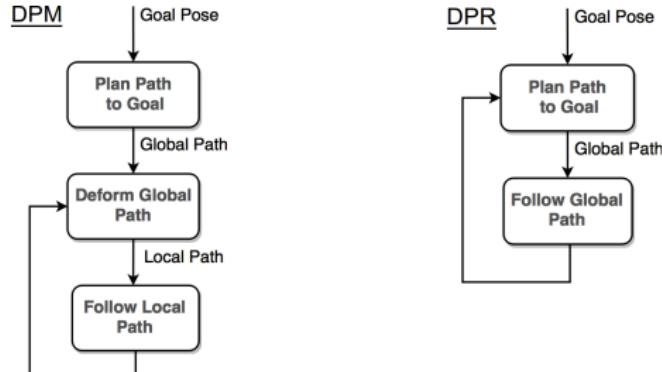
Αυτόνομη Πλοήγηση

- 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



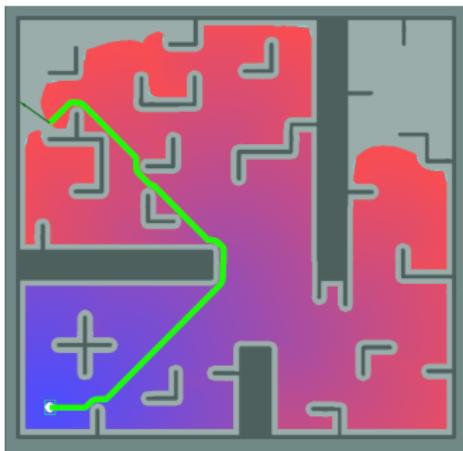
Προτάσεις

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

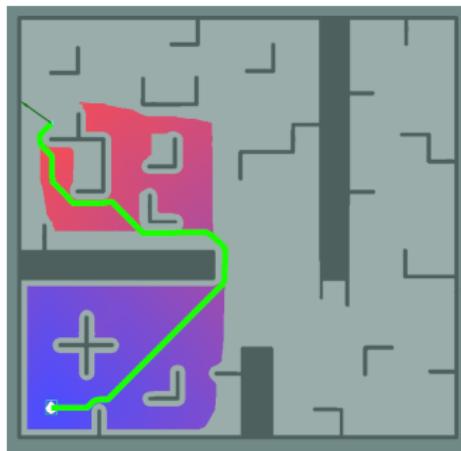


DPM (1/3): Ολικό Μονοπάτι μέσω Dijkstra ή A*

- 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*

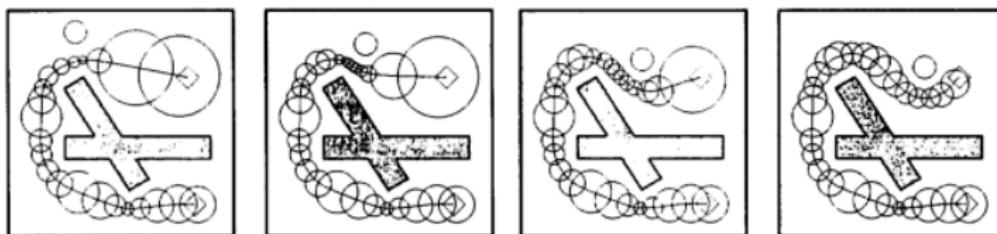
DPM (2/3): Μετατροπή Μονοπατιού σε Ελαστική Ζώνη

- 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

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

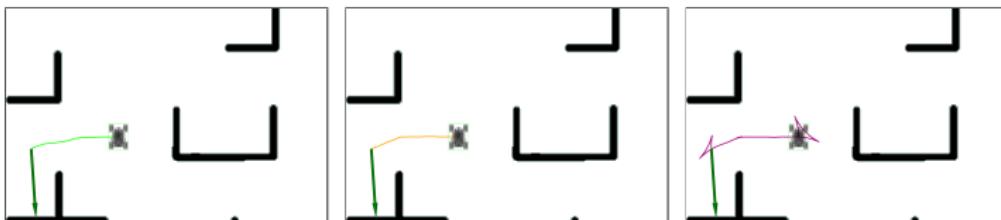


Μονοπάτι Reeds-Shepp: βέλτιστο μονοπάτι για ένα αυτοκίνητο που κινείται και μπρος και πίσω

- 48 τύποι μονοπατιών Reeds-Shepp βάσει των λέξεων:

$$\begin{aligned} & \{C|C|C, CC|C, C|CC, CSC, CC_\beta|C_\beta C, C|C_\beta C_\beta|C, \\ & C|C_{\frac{\pi}{2}} SC, CSC_{\frac{\pi}{2}}|C, C|C_{\frac{\pi}{2}} SC_{\frac{\pi}{2}}|C\}, \quad C \in \{R, L\} \end{aligned}$$

- Σύνδεση των σημείων της ελαστικής ζώνης με μονοπάτια
Reeds-Shepp → Ζώνη Reeds-Shepp
→ Κινηματικά εφικτό μονοπάτι



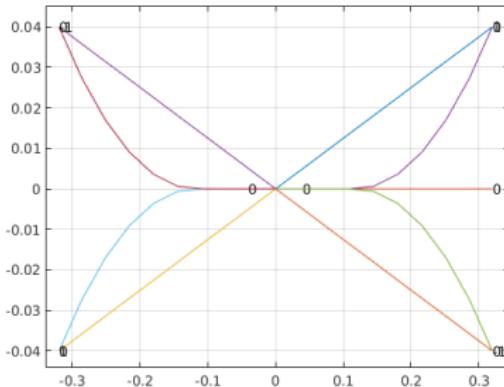
Ολικό Μονοπάτι

Ελαστική Ζώνη

Ζώνη Reeds-Shepp

DPR(1/2): SBPL LATTICE PLANNER

- 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*

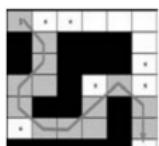


DPR(2/2): ARA* και AD*

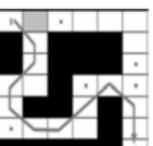
ARA*: Anytime Repairing A*

AD*: Anytime Dynamic A*

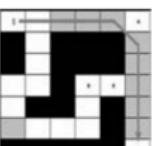
- A* σε Μεγάλο πρόβλημα → παραβίαση χρονικών περιορισμών
→ παραλλαγές του A*
- ARA*: αρχική μη βέλτιστη λύση και συνεχή βελτίωση
- $\epsilon > 1$: παράγοντας διαστολής κόστους μονοπατιού
- $f(n) = g(n) + \epsilon \cdot h(n)$
- Επαναχρησιμοποίηση πληροφορίας από προηγούμενες αναζητήσεις
- AD*: ARA* +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



$\epsilon = 2.5$

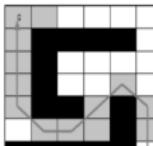


$\epsilon = 1.5$

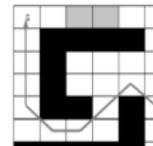


$\epsilon = 1.0$

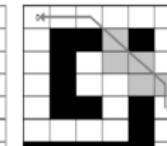
ARA*



$\epsilon = 2.5$



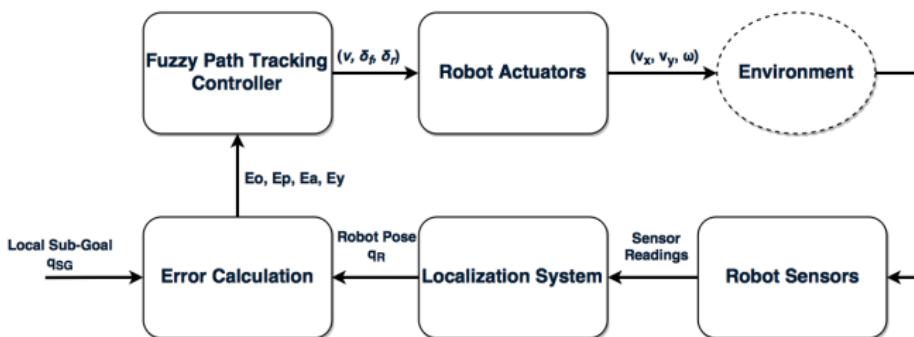
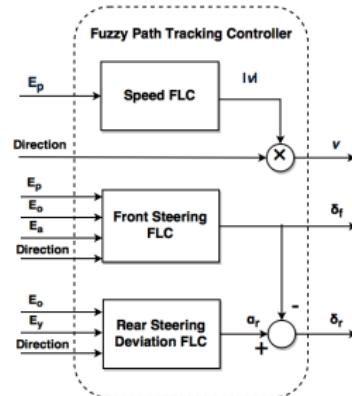
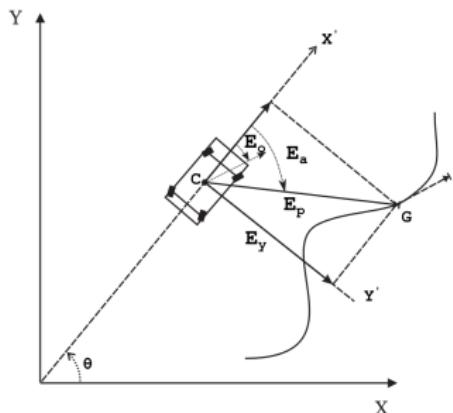
$\epsilon = 1.5$



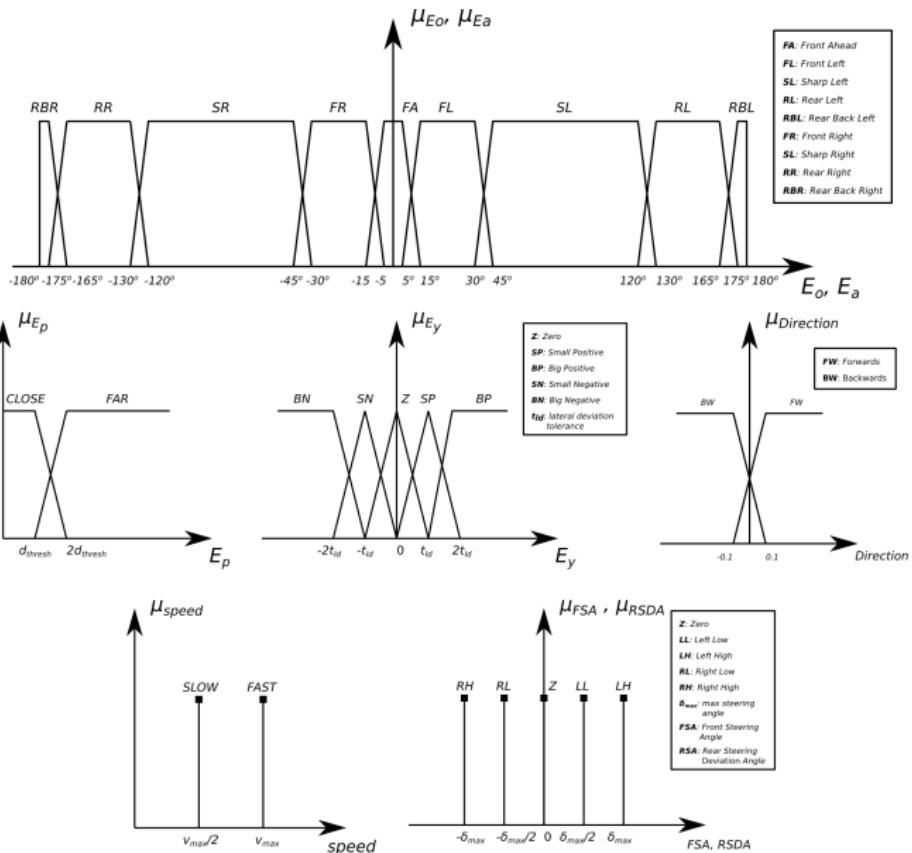
$\epsilon = 1.0$

AD*

Ασαφής Ελεγκτής Διάσχισης Μονοπατιού(1/3)



Ασαφής Ελεγκτής Διάσχισης Μονοπατιού(2/3): Μεταβλητές



Ασαφής Ελεγκτής Διάσχισης Μονοπατιού(3/3): Κανόνες

- v : ανάλογη της απόστασης E_p από τον τρέχον στόχο
- δ_f : διόρθωση E_α μακρυά από τον στόχο και διόρθωση E_o κοντά
- α_r : διόρθωση πλευρικής απόκλισης E_y εάν E_o, E_y μικρά
- Αντίστοιχη συμπεριφορά για θετική και αρνητική φορά κίνησης

Speed Fuzzy Rules
if Ep is CLOSE then Speed is SLOW if Ep is FAR then Speed is FAST

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

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 Ey is BP then RSDA is Z if Direction is FW and Eo is FL and Ey is BP then RSDA is Z if Direction is FW and Eo is FR and Ey is BP then RSDA is Z if Direction is FW and Eo is FA and Ey is SP then RSDA is LH if Direction is FW and Eo is FL and Ey is SP then RSDA is LH if Direction is FW and Eo is FR and Ey is SP then RSDA is LH if Direction is FW and Eo is FA and Ey is Z then RSDA is Z if Direction is FW and Eo is FL and Ey is Z then RSDA is Z if Direction is FW and Eo is FR and Ey is Z then RSDA is Z if Direction is FW and Eo is FA and Ey is SN then RSDA is RH if Direction is FW and Eo is FL and Ey is SN then RSDA is RH if Direction is FW and Eo is FR and Ey is SN then RSDA is RH if Direction is FW and Eo is FA and Ey is BN then RSDA is Z if Direction is FW and Eo is FL and Ey is BN then RSDA is Z if Direction is FW and Eo is FR and Ey is BN then RSDA is Z if Direction is BW and Eo is FA and Ey is BP then RSDA is Z if Direction is BW and Eo is FL and Ey is BP then RSDA is Z if Direction is BW and Eo is FR and Ey is BP then RSDA is Z if Direction is BW and Eo is FA and Ey is SP then RSDA is LH if Direction is BW and Eo is FL and Ey is SP then RSDA is LH if Direction is BW and Eo is FR and Ey is SP then RSDA is LH if Direction is BW and Eo is FA and Ey is Z then RSDA is Z if Direction is BW and Eo is FL and Ey is Z then RSDA is Z if Direction is BW and Eo is FR and Ey is Z then RSDA is Z if Direction is BW and Eo is FA and Ey is SN then RSDA is RH if Direction is BW and Eo is FL and Ey is SN then RSDA is RH if Direction is BW and Eo is FR and Ey is SN then RSDA is RH if Direction is BW and Eo is FA and Ey is BN then RSDA is Z if Direction is BW and Eo is FL and Ey is BN then RSDA is Z if Direction is BW and Eo is FR and Ey 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

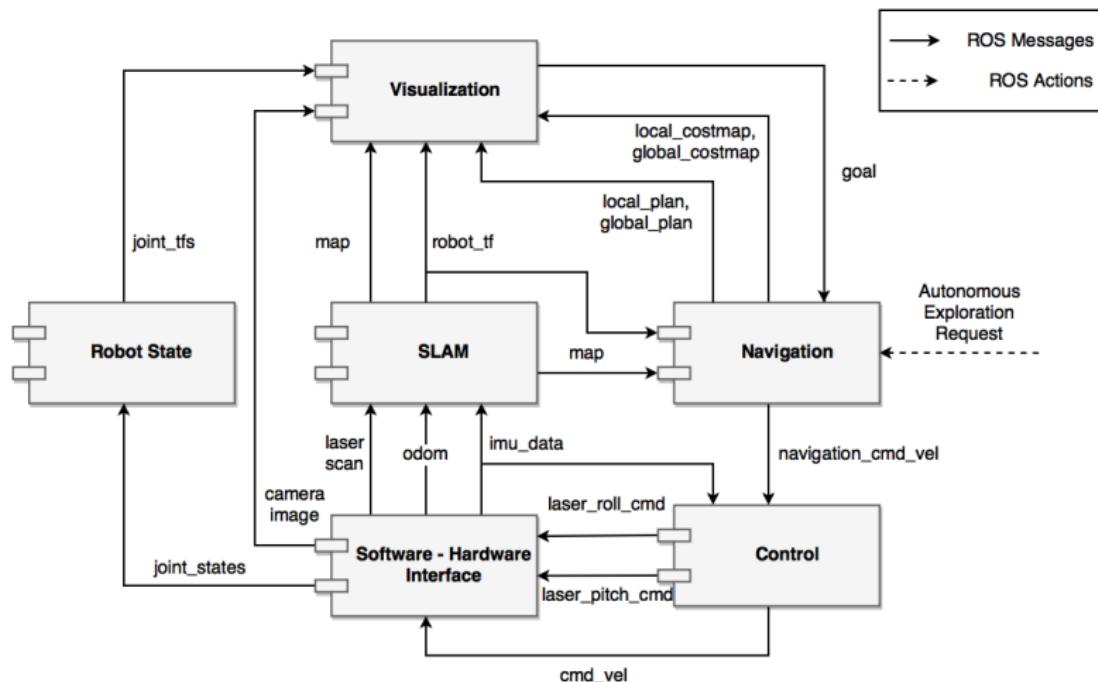
Αρχιτεκτονική Συστήματος



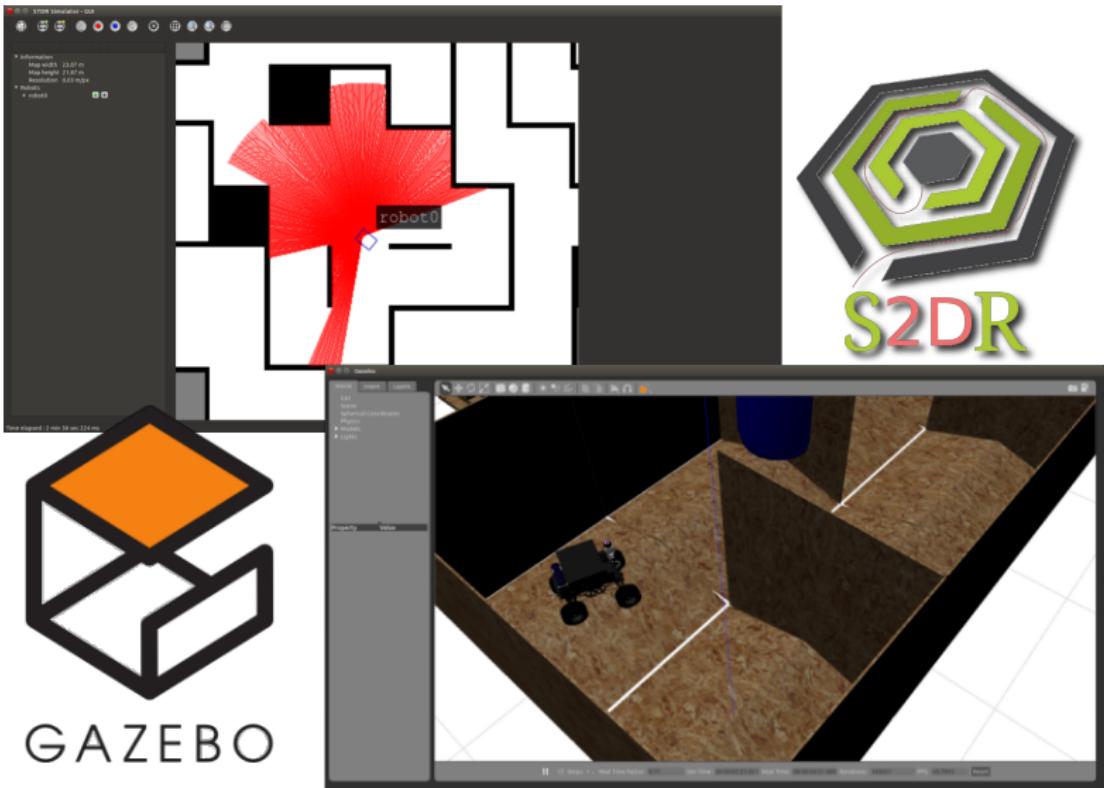
ROS: Robotic Operating System

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

Διάγραμμα Τμημάτων Λογισμικού

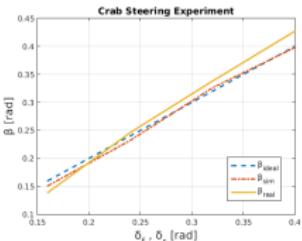
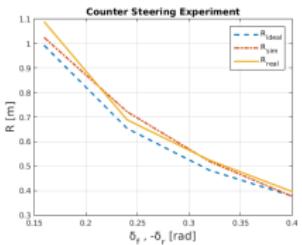
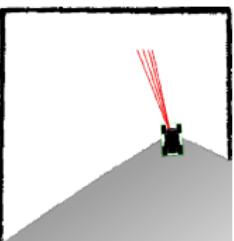
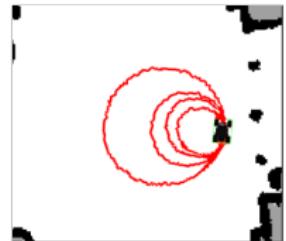
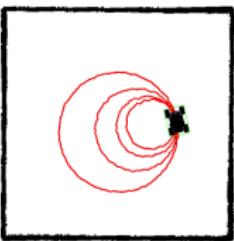
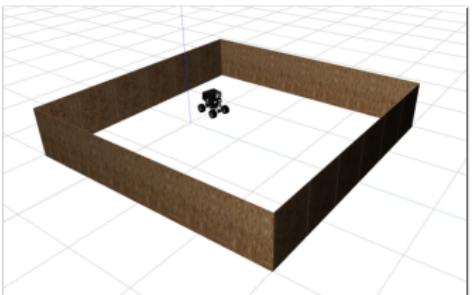


Προσομοίωση

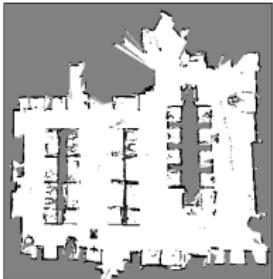
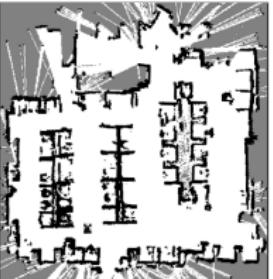
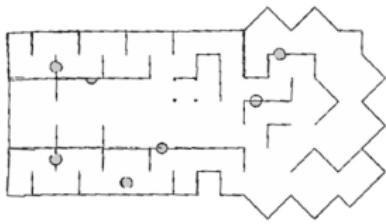
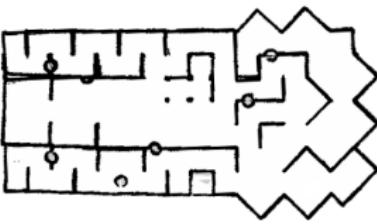
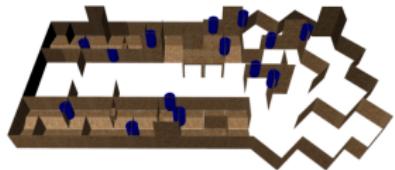
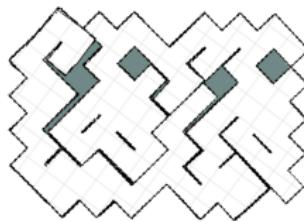
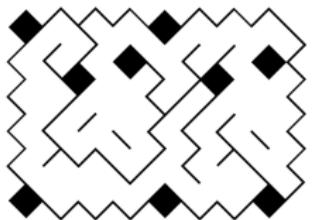


Πειράματα

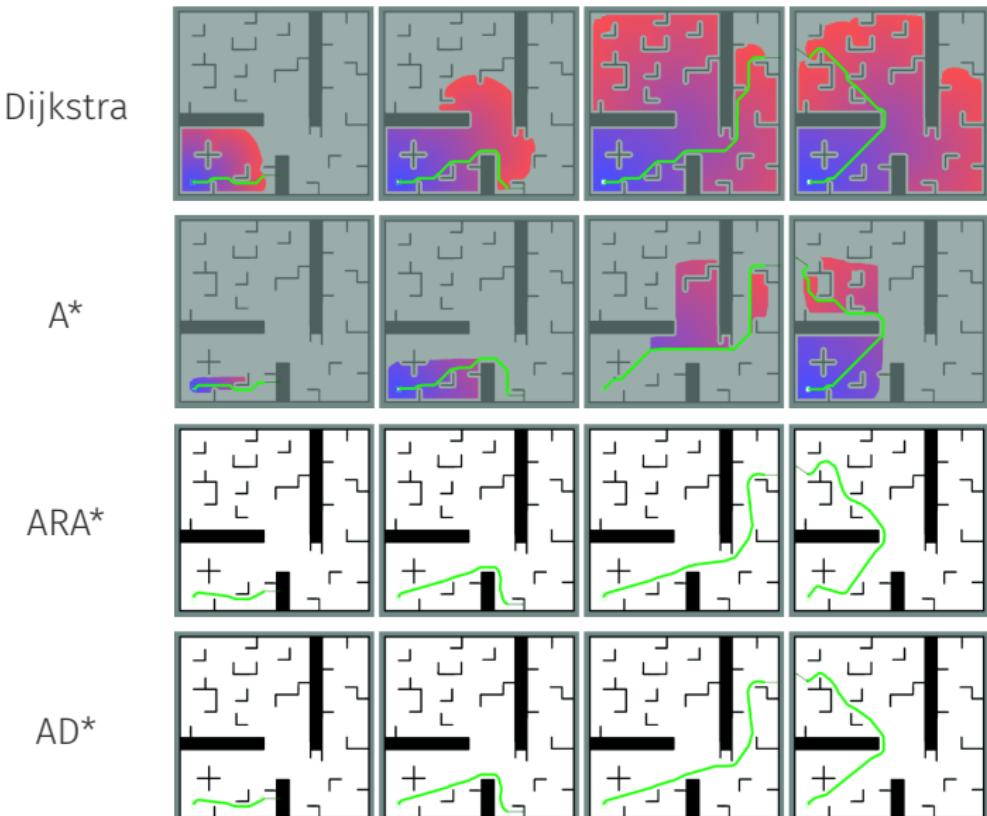
Πειράματα Κινηματικού Μοντέλου



Πειράματα Χαρτογράφησης



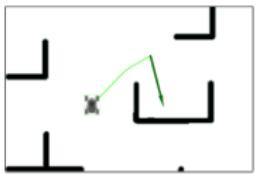
Πειράματα Κατασκευής Ολικού Μονοπατιού (1/2)



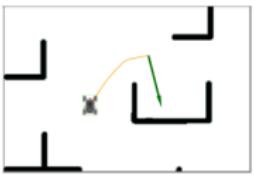
Πειράματα Κατασκευής Ολικού Μονοπατιού (2/2)

Στόχοι	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

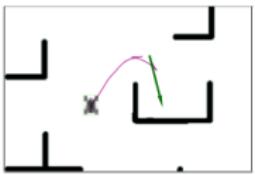
Πειράματα Δυναμικής Παραμόρφωσης Μονοπατιού



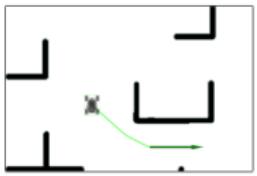
(α') Ολικό Μονοπάτι 1.



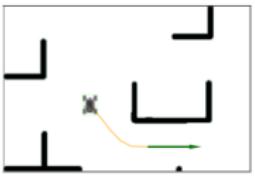
(β') Ελαστική Ζώνη 1.



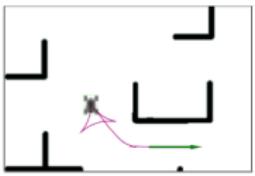
(γ') Ζώνη Reeds-Shepp 1.



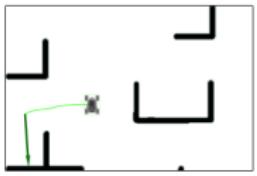
(δ') Ολικό Μονοπάτι 2.



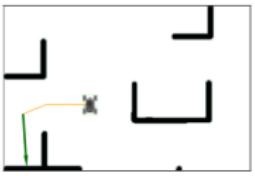
(ε') Ελαστική Ζώνη 2.



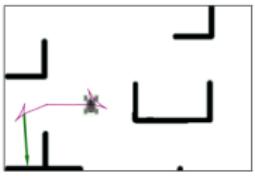
(στ') Ζώνη Reeds-Shepp 2.



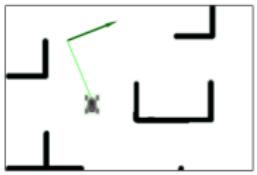
(ζ) Ολικό Μονοπάτι 3.



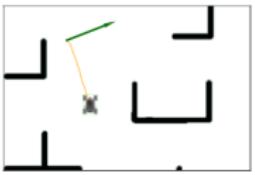
(η') Ελαστική Ζώνη 3.



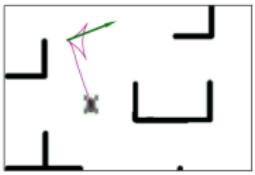
(θ') Ζώνη Reeds-Shepp 3.



(ι') Ολικό Μονοπάτι 4.

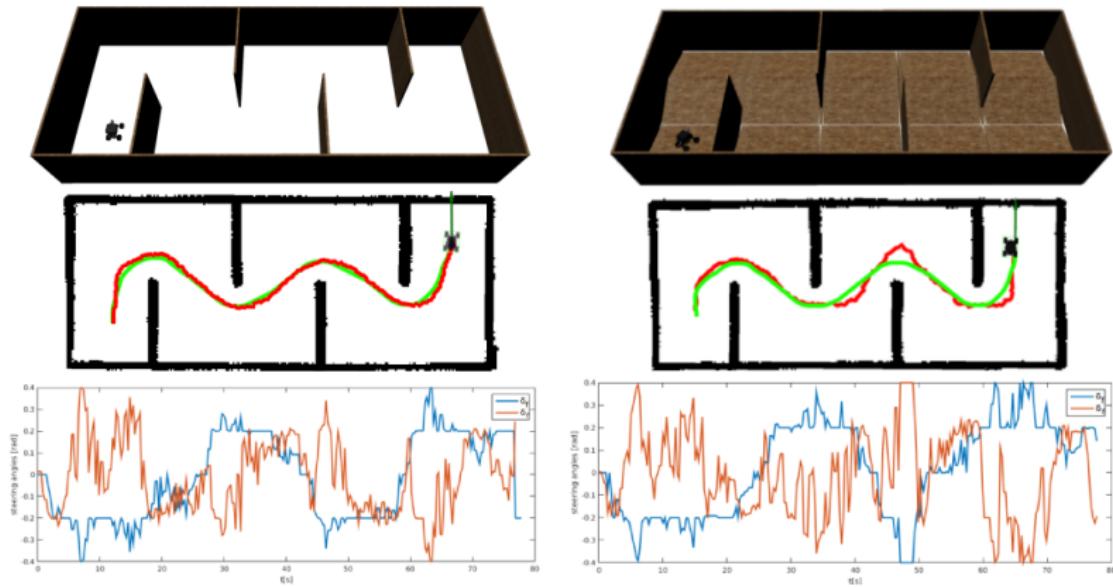


(ια') Ελαστική Ζώνη 4.

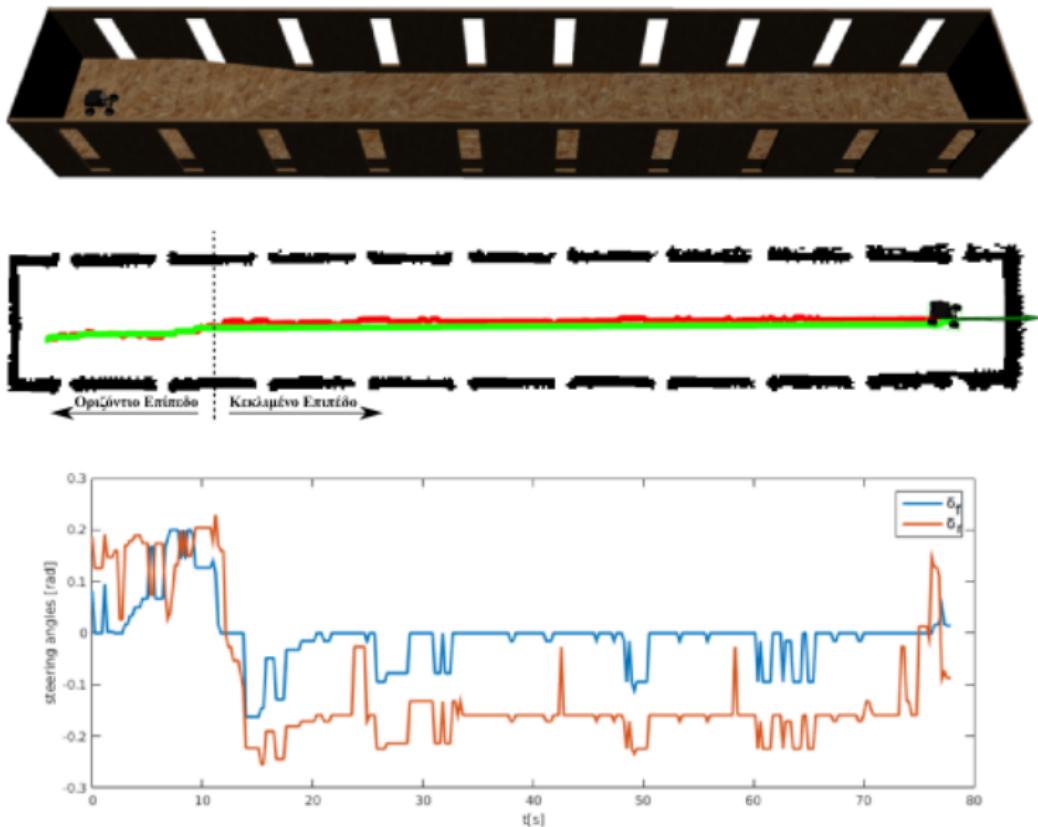


(ιβ') Ζώνη Reeds-Shepp 4.

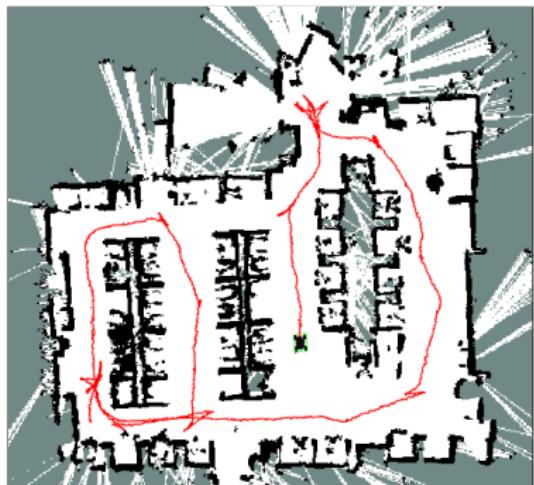
Πειράματα Διάσχισης Μονοπατιού(1/2)



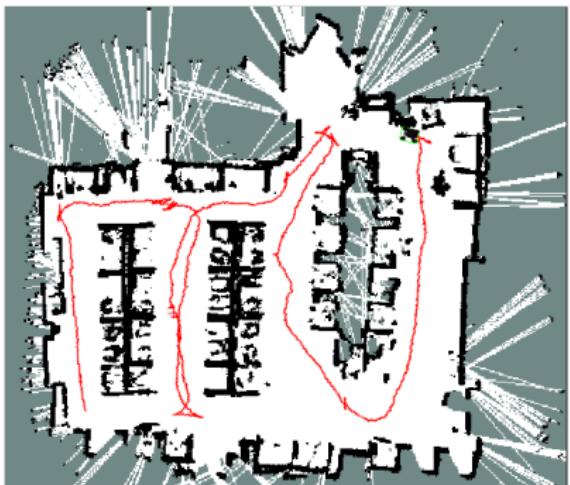
Πειράματα Διάσχισης Μονοπατιού(2/2)



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.