



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

Παρουσίαση Διπλωματικής Εργασίας

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

Εκπόνηση:

Γεώργιος Κούρος

Επιβλέπων:

Λουκάς Πέτρου

4 Νοεμβρίου, 2016

Επισκόπηση

· Κίνητρο

Επισκόπηση

- Κίνητρο
- Ρομποτική Πλατφόρμα Monstertruck

Επισκόπηση

- Κίνητρο
- Ρομποτική Πλατφόρμα Monstertruck
- Κινηματική Ανάλυση

Επισκόπηση

- Κίνητρο
- Ρομποτική Πλατφόρμα Monstertruck
- Κινηματική Ανάλυση
- Εκτίμηση Κατάστασης και Χαρτογράφηση

Επισκόπηση

- Κίνητρο
- Ρομποτική Πλατφόρμα Monstertruck
- Κινηματική Ανάλυση
- Εκτίμηση Κατάστασης και Χαρτογράφηση
- **Αυτόνομη Πλοήγηση και Εξερεύνηση**

Επισκόπηση

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

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

Επισκόπηση

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

Kίνητρο

Κίνητρο

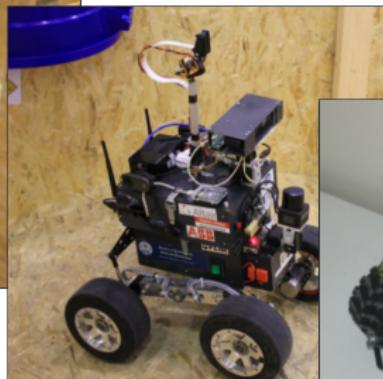
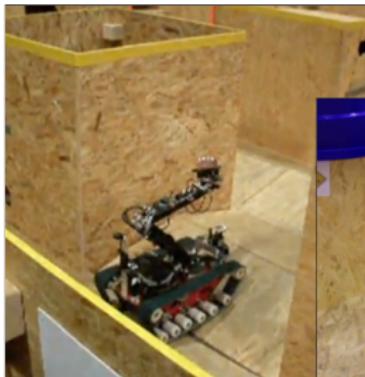


Κίνητρο



Κίνητρο





Ρομποτική Πλατφόρμα Monstertruck

Τηλεκατευθυνόμενο Όχημα Groundpounder, της Redcat Racing.



- Τετρακίνηση - 4WD
- Τετραδιεύθυνση - 4WS
- Κλίμακα 1:10
- Αναρτήσεις
- Μεταλλικό Σασί
- Τροχοί Offroad

Εξοπλισμός



ODROID-XU4

Προδιαγραφές	Odroid-XU4
CPU	Samsung Exynos5422 ARM® Cortex™-A15 Quad 2.0GHz/ Cortex™-A7 Quad 1.4GHz
GPU	Mali™-T628 MP6 OpenGL ES 3.0 / 2.0 / 1.1 and OpenCL 1.1 Full profile
Μνήμη RAM	2GB LPDDR3
Θύρες USB 2.0	1
Θύρες USB 3.0	2
Εικόνα	HDMI
Ηχος	HDMI Digital audio output
Αποθηκευτικός Χώρος	Micro SD ή eMMC 5.0
Ethernet	10/100/1000
Wifi	USB IEEE 802.11b/g/n 1T1R WLAN
Περιφερειακά - Διεπαφές	UART, 30-pin GPIO/IRQ/SPI/ADC 12-pin GPIO/I2S/I2C
Τροφοδοσία	5V, 4A
Διαστάσεις	82 x 58 x 22mm

Εξοπλισμός



ODROID-XU4

Προδιαγραφές	Odroid-XU4
CPU	Samsung Exynos5422 ARM® Cortex™-A15 Quad 2.0GHz/ Cortex™-A7 Quad 1.4GHz
GPU	Mali™-T628 MP6 OpenGL ES 3.0 / 2.0 / 1.1 and OpenCL 1.1 Full profile
Μνήμη RAM	2GB LPDDR3
Θύρες USB 2.0	1
Θύρες USB 3.0	2
Εικόνα	HDMI
Ηχος	HDMI Digital audio output
Αποθηκευτικός Χώρος	Micro SD ή eMMC 5.0
Ethernet	10/100/1000
Wifi	USB IEEE 802.11b/g/n 1T1R WLAN
Περιφερειακά - Διεπαρχίες	UART, 30-pin GPIO/IRQ/SPI/ADC 12-pin GPIO/I2S/I2C
Τροφοδοσία	5V, 4A
Διαστάσεις	82 x 58 x 22mm



Εξοπλισμός



ODROID-XU4

Προδιαγραφές	Odroid-XU4
CPU	Samsung Exynos5422 ARM® Cortex™-A15 Quad 2.0GHz/ Cortex™-A7 Quad 1.4GHz
GPU	Mali™-T628 MP6 OpenGL ES 3.0 / 2.0 / 1.1 and OpenCL 1.1 Full profile
Μνήμη RAM	2GB LPDDR3
Θύρες USB 2.0	1
Θύρες USB 3.0	2
Εικόνα	HDMI
Ηχος	HDMI Digital audio output
Αποθηκευτικός Χώρος	Micro SD ή eMMC 5.0
Ethernet	10/100/1000
Wifi	USB IEEE 802.11b/g/n 1T1R WLAN
Περιφερειακά - Διεπαρχίας	UART, 30-pin GPIO/IRQ/SPI/ADC 12-pin GPIO/I2S/I2C
Τροφοδοσία	5V, 4A
Διαστάσεις	82 x 58 x 22mm

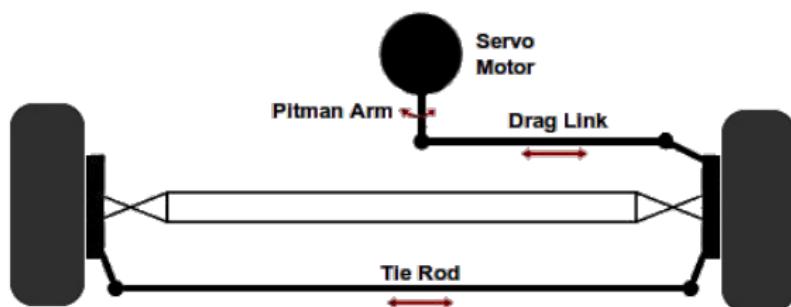
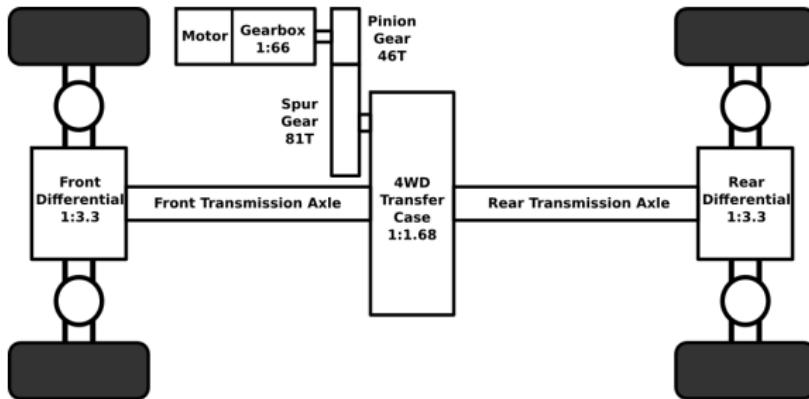


Roll
Pitch
Yaw

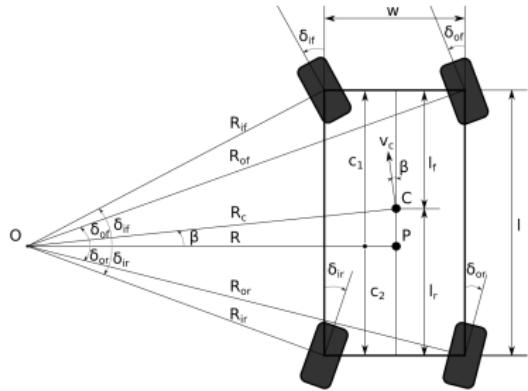


Κινηματική Ανάλυση

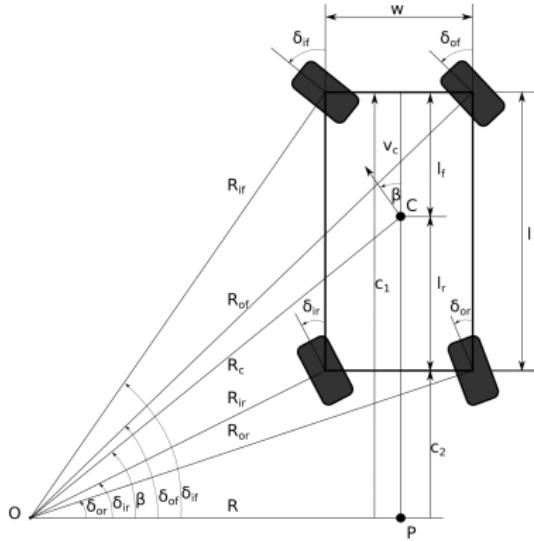
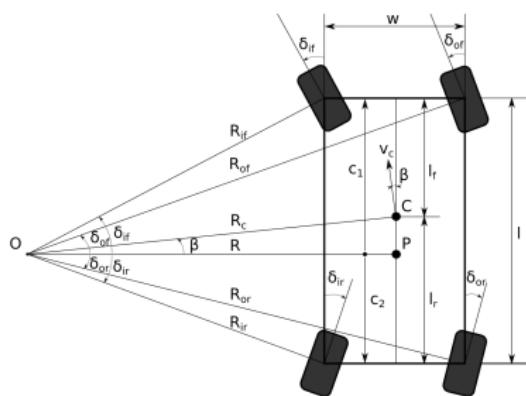
Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης



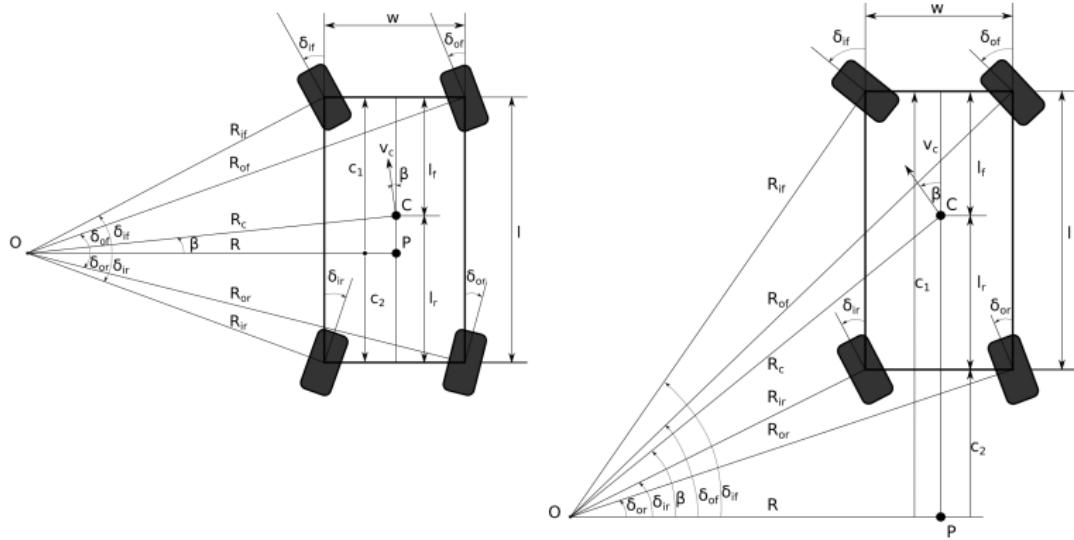
Κινηματικό Μοντέλο Τετραδιεύθυνσης (4WS)



Κινηματικό Μοντέλο Τετραδιεύθυνσης (4WS)



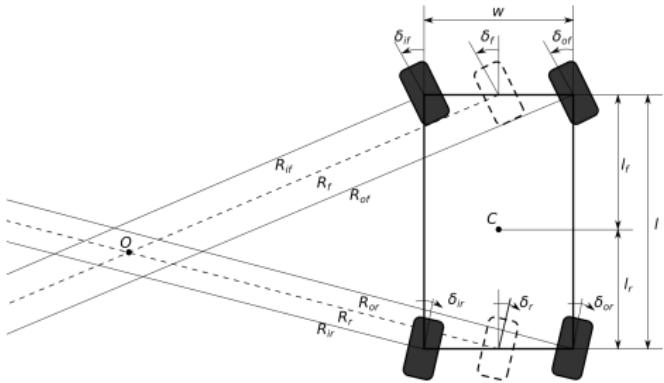
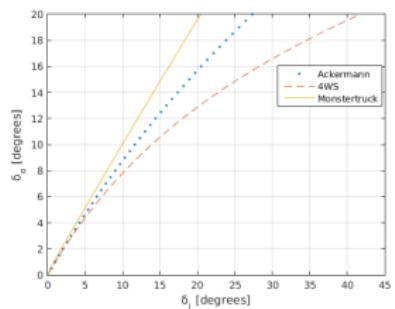
Κινηματικό Μοντέλο Τετραδιεύθυνσης (4WS)



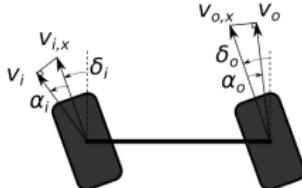
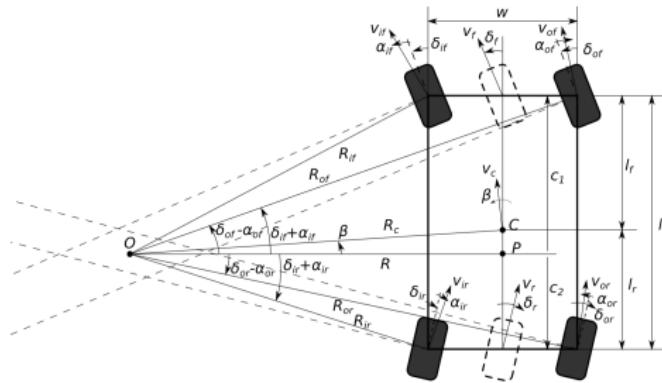
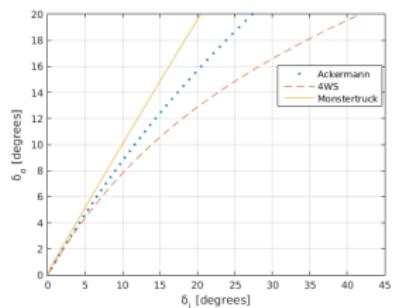
Συνθήκη Τετραδιεύθυνσης:

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

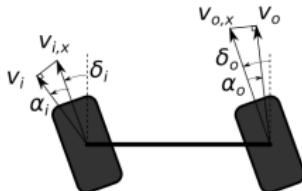
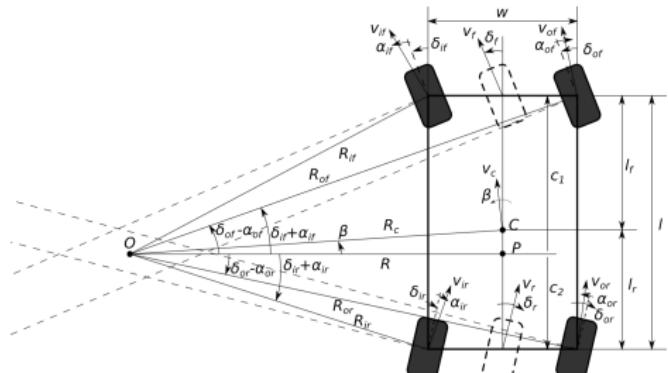
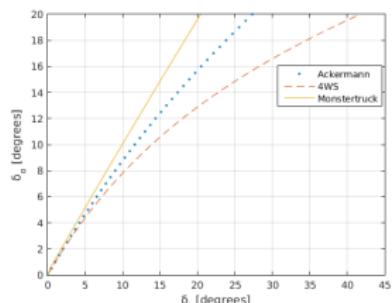
Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικής Πλατφόρμας MONSTERTRUCK



Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικής Πλατφόρμας MONSTERTRUCK



Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικής Πλατφόρμας MONSTERTRUCK



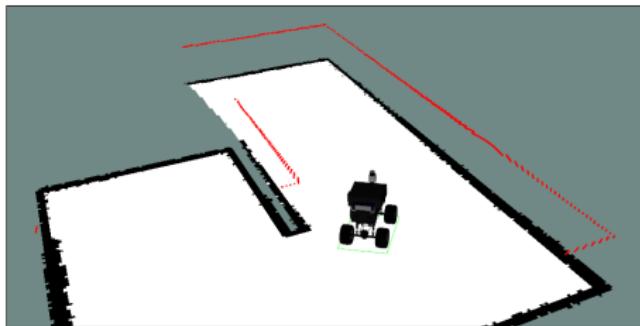
Μη Ιδανική Συνθήκη Τετραδιεύθυνσης:

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

Εκτίμηση Κατάστασης και Χαρτογράφηση

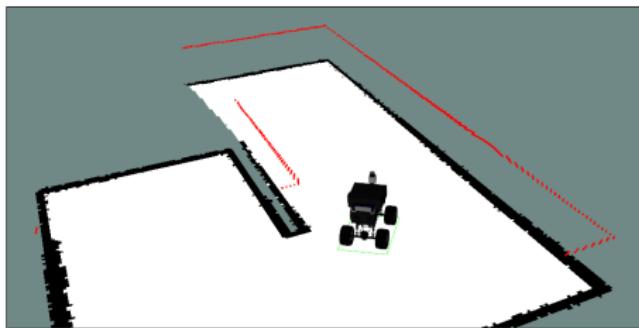
SLAM

- SLAM: Simultaneous Localization And Mapping
- 2D Χαρτογράφηση → Occupancy Grid Maps
- Εντοπισμός πόζας $p = (x, y, \theta)$



SLAM

- SLAM: Simultaneous Localization And Mapping
- 2D Χαρτογράφηση → Occupancy Grid Maps
- Εντοπισμός πόζας $p = (x, y, \theta)$

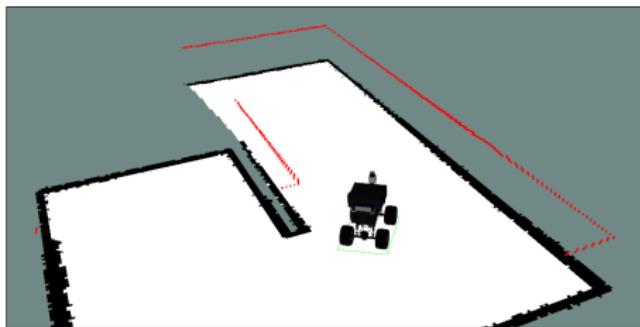


CRSM-SLAM

- Critical Rays Scan Match
- Αντιστοίχιση σκαναρισμάτων
→ RRHC
- Προεπεξεργασία σκαναρισμάτων
→ επιλογή κρίσιμων ακτίνων

SLAM

- SLAM: Simultaneous Localization And Mapping
- 2D Χαρτογράφηση → Occupancy Grid Maps
- Εντοπισμός πόζας $p = (x, y, \theta)$



CRSM-SLAM

- Critical Rays Scan Match
- Αντιστοίχιση σκαναρισμάτων
→ RRHC
- Προεπεξεργασία σκαναρισμάτων
→ επιλογή κρίσιμων ακτίνων

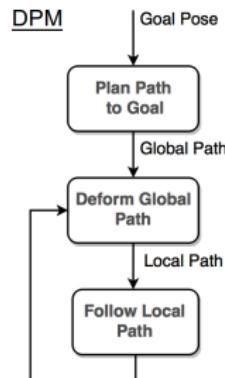
Gmapping

- Φίλτρα σωματιδίων
- Εκτίμηση χάρτη και τροχιάς ρομπότ βάσει
 - σκαναρισμάτων
 - οδομετρίας

Αυτόνομη Πλοήγηση και Εξερεύνηση

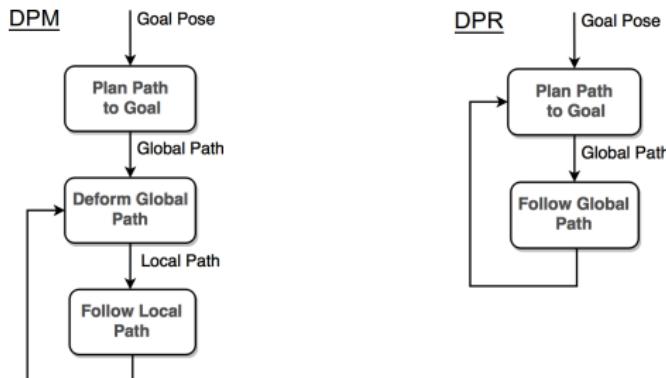
Προτάσεις

1. Αυτόνομη Πλοήγηση με Δυναμική Παραμόρφωση Μονοπατιού (DPM)
 - 1.1 Κατασκευή στατικού ολικού μονοπατιού → Dijkstra / A*
 - 1.2 Μετατροπή ολικού μονοπατιού σε τοπικό → Reeds-Shepp Band
 - 1.3 Διάσχιση τοπικού μονοπατιού → ελεγκτής ασαφούς λογικής



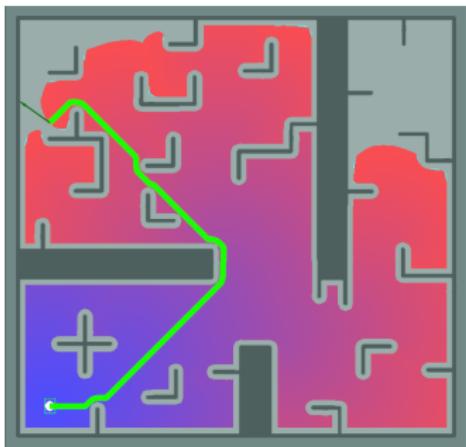
Προτάσεις

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

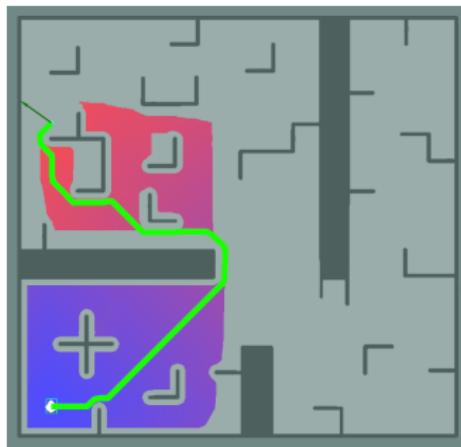


DPM (1/3): Ολικό Μονοπάτι μέσω Dijkstra ή A*

- Κατασκευή ολικού μονοπατιού → graph-search
- 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

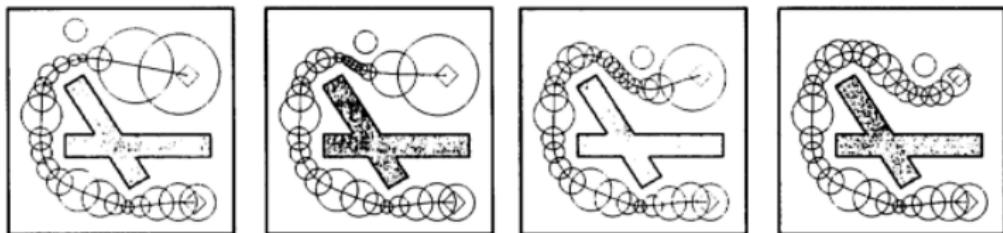


Dijkstra



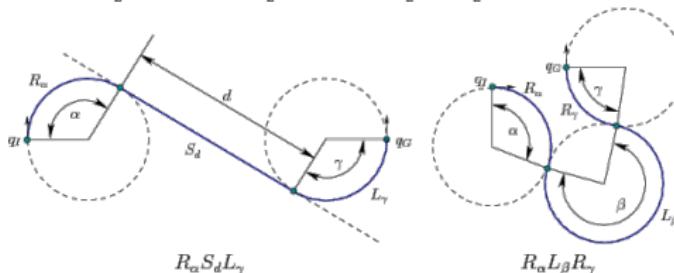
A*

- Μετατροπή σε ελαστική ζώνη
→ Φούσκες (Bubble) κατά μήκος του μονοπατιού
- Φούσκα: προσπελάσιμος κυκλικός τομέας γύρω από μία θέση
- Παραμόρφωση μέσω τεχνητών δυνάμεων
 - εσωτερικών ελκτικών δυνάμεων → τάση για ευθυγράμμιση
 - εξωτερικών απωστικών δυνάμεων → απομάκρυνση από εμπόδια

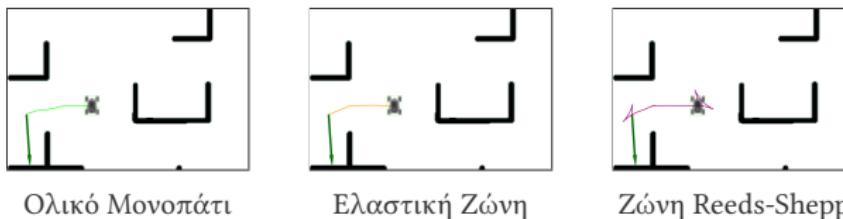


Μονοπάτι Reeds-Shepp: βέλτιστο μονοπάτι για ένα αυτοκίνητο που κινείται και μπρος και πίσω

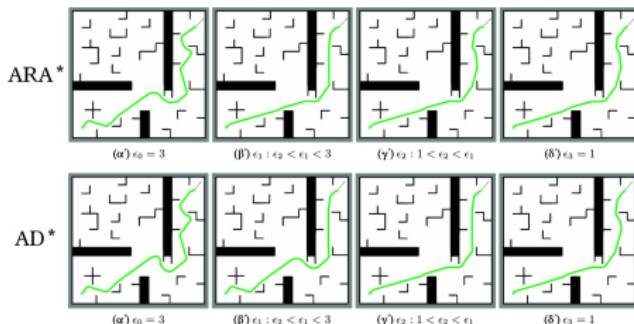
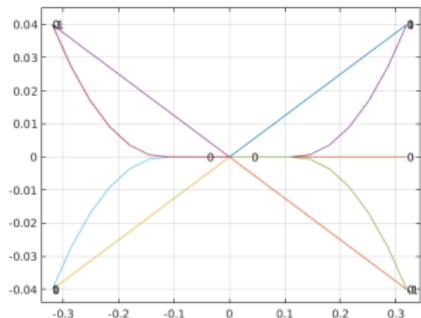
- 48 τύποι μονοπατιών Reeds-Shepp βάσει των λέξεων:
 $\{C|C|C, CC|C, C|CC, CSC, CC_\beta|C_\beta C, C|C_\beta C_\beta|C,$
 $C|C_{\frac{\pi}{2}}SC, CSC_{\frac{\pi}{2}}|C, C|C_{\frac{\pi}{2}}SC_{\frac{\pi}{2}}|C\}, \quad C \in \{R, L\}$



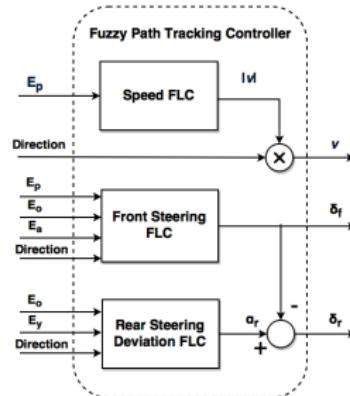
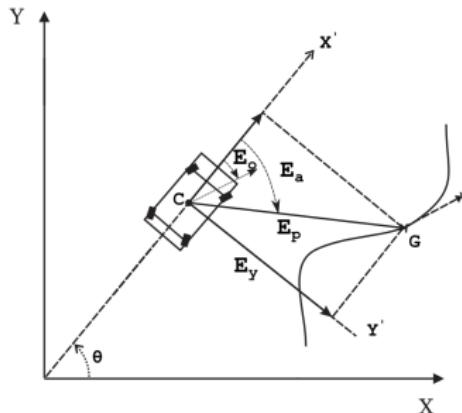
- Ζώνη Reeds-Shepp \rightarrow ακολουθία μονοπατιών Reeds-Shepp



- Δικτύωμα Καταστάσεων όπου $s = (x, y, \theta, v)$
 → διακριτοποίηση χώρου καταστάσεων + συνδέσεις καταστάσεων
- Χώρος Κινήσεων: κινηματικά εφικτές κινήσεις
- Κατασκευή Μονοπατιού → αναζήτηση σε γράφο → ARA* ή AD*

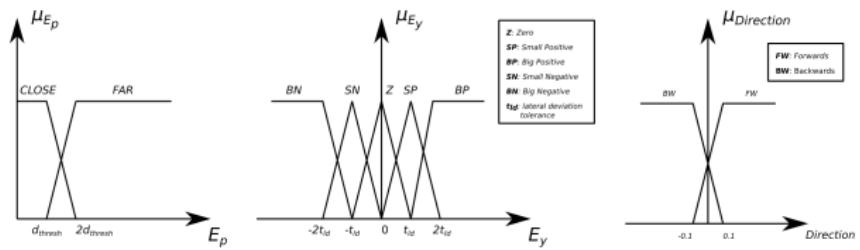
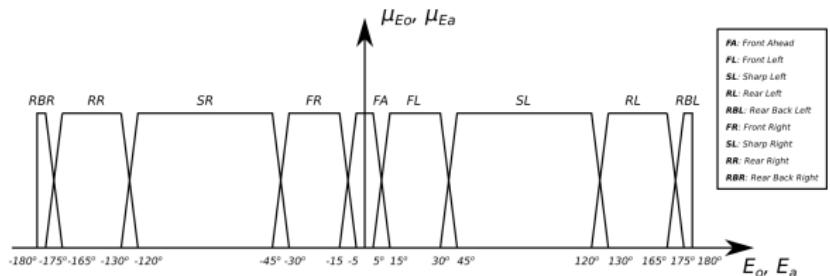


Ασαφής Ελεγκτής Διάσχισης Μονοπατιού (1/2)

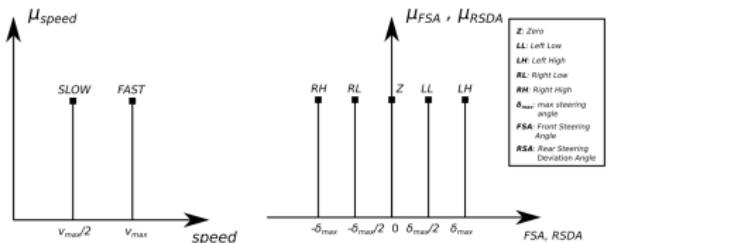
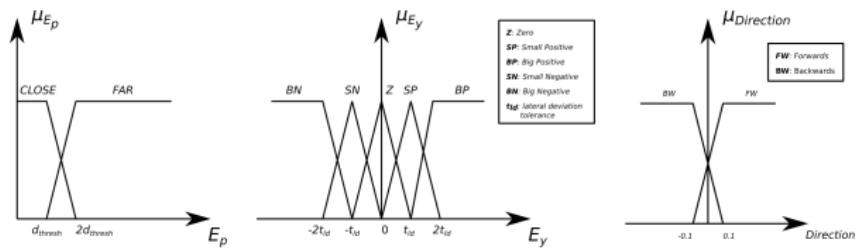
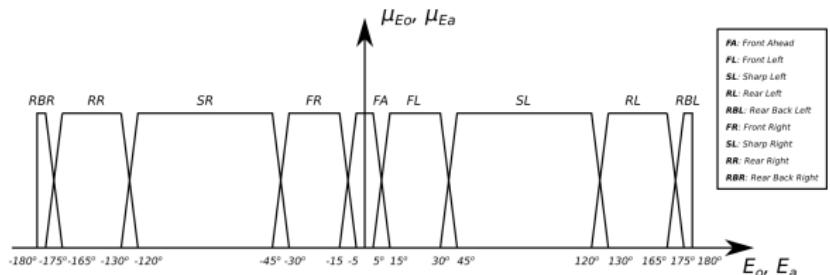


- v : ανάλογη της απόστασης E_p από τον τρέχον στόχο
- δ_f : διόρθωση E_α μακριά από τον στόχο και διόρθωση E_o κοντά
- α_r : διόρθωση πλευρικής απόκλισης E_y εάν E_o, E_y μικρά
- Αντίστοιχη συμπεριφορά για κάθε φορά κίνησης (*Direction*)

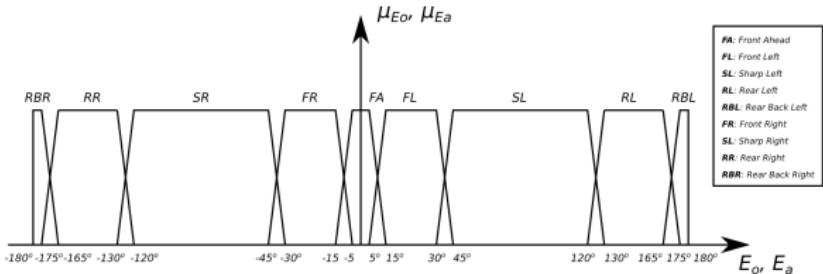
Ασαφής Ελεγκτής Διάσχισης Μονοπατιού (2/2)



Ασαφής Ελεγκτής Διάσχισης Μονοπατιού (2/2)

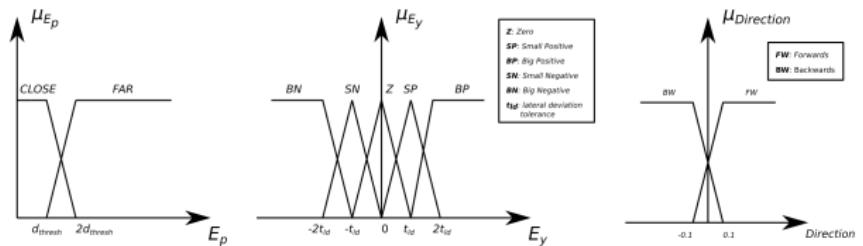


Ασαφής Ελεγκτής Διάσχισης Μονοπατιού (2/2)



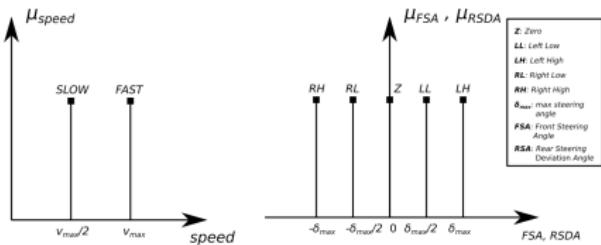
Front Ahead
FL: Front Left
SL: Sharp Left
RL: Rear Left
RBL: Rear Back Left
FR: Front Right
SL: Sharp Right
RR: Rear Right
RBR: Rear Back Right

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



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 Z
 if Ep is FAR and Ea is FR then FSA is Z
 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

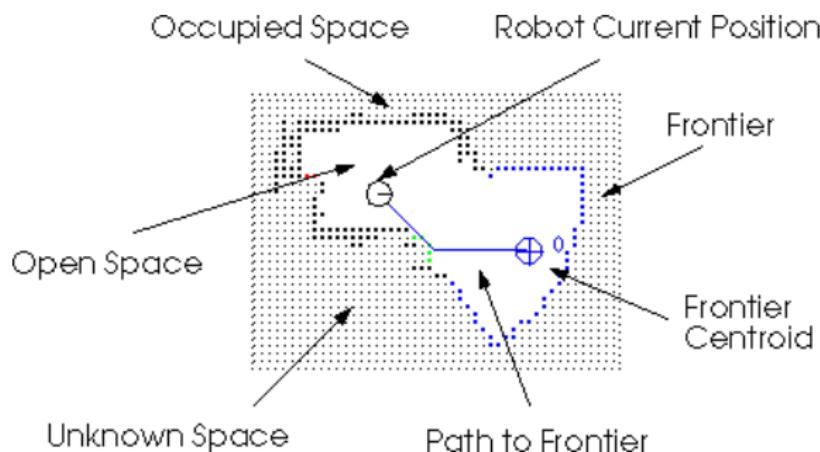


RSDA Fuzzy Rules

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 SR and Eo is BN 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

- Επιλογή στόχων
- Μέτωπο Εξερεύνησης → σύνορο
- Συνάρτηση κόστους → Κριτήρια επιλογής
 - Μέγεθος μετώπου
 - Μήκος μονοπατιού
 - Γωνιακή απόκλιση
 - Συχνότητα επιλογής



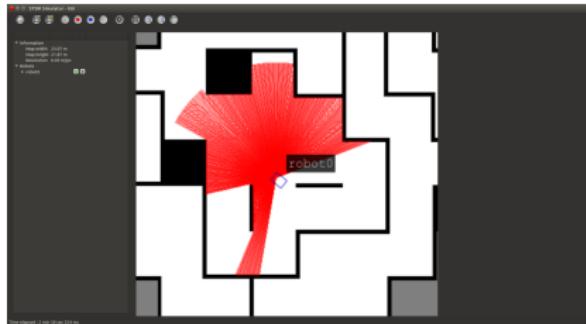
Εργαλεία και Αρχιτεκτονική Συστήματος

Εργαλεία

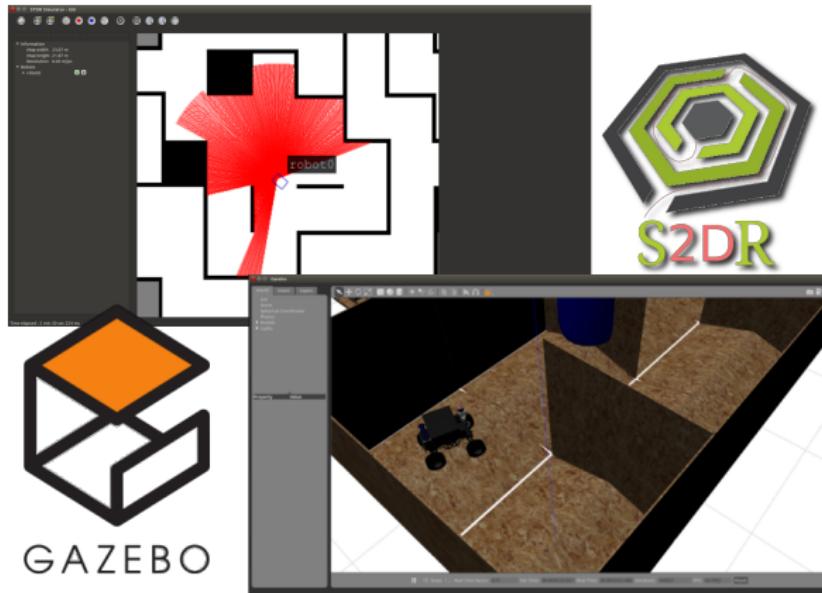


Εργαλεία

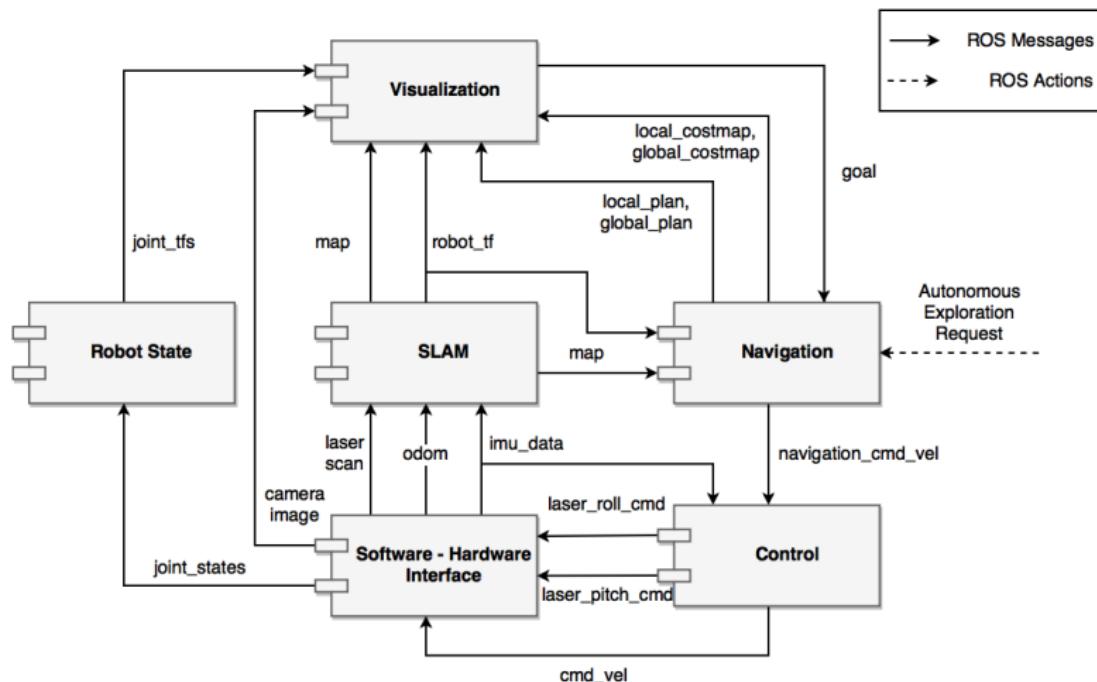
ROS



ROS

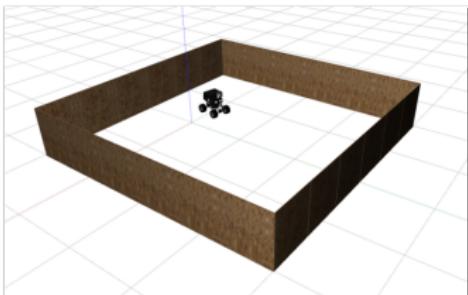


Διάγραμμα Τμημάτων Λογισμικού

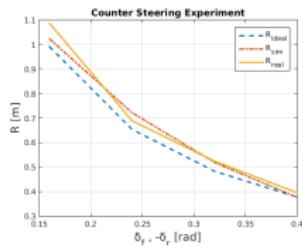
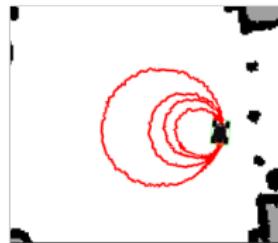
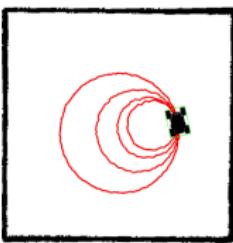
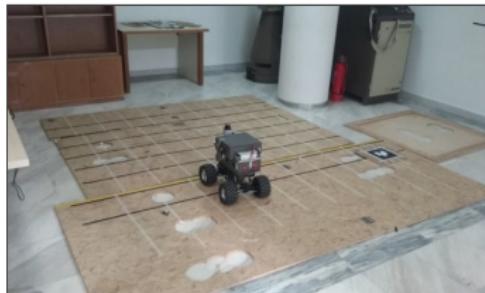
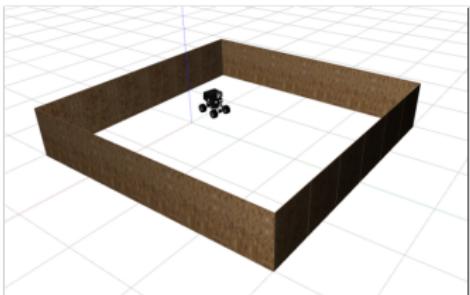


Πειράματα

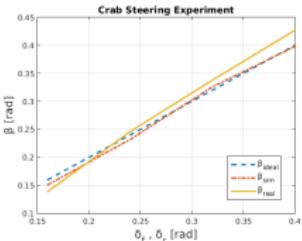
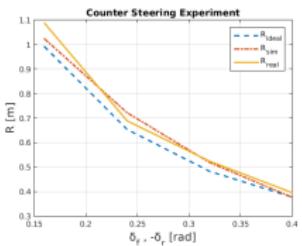
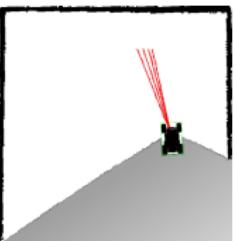
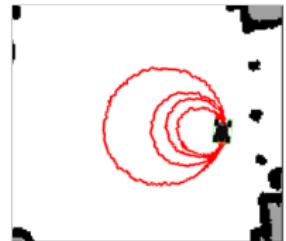
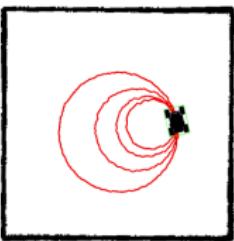
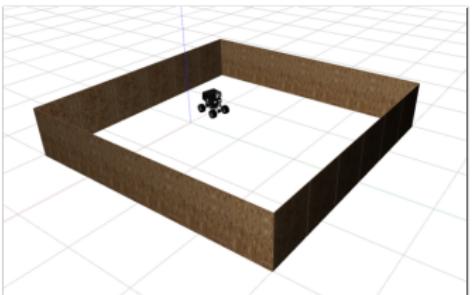
Πειράματα Κινηματικού Μοντέλου



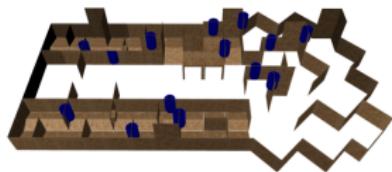
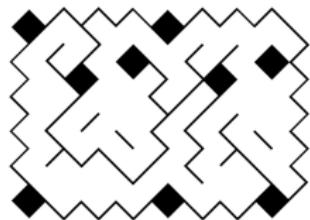
Πειράματα Κινηματικού Μοντέλου



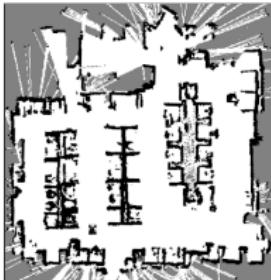
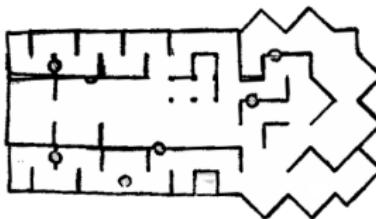
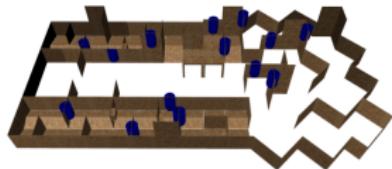
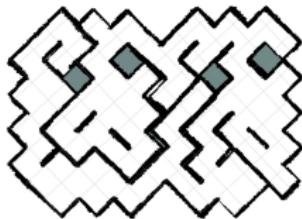
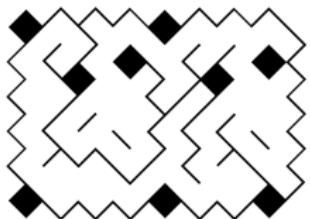
Πειράματα Κινηματικού Μοντέλου



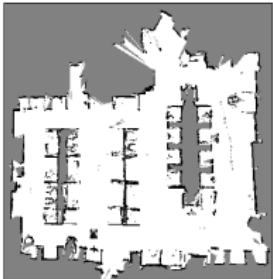
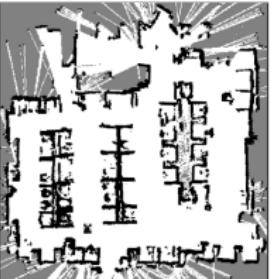
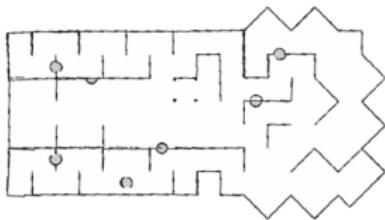
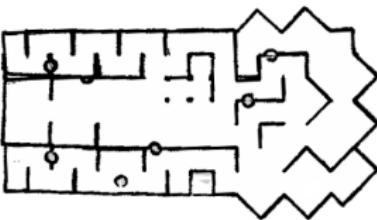
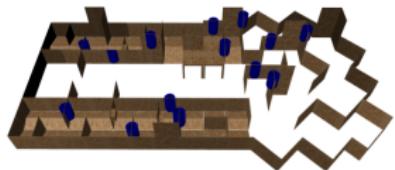
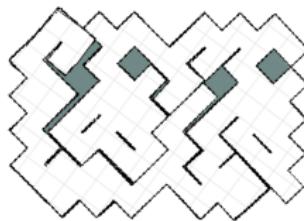
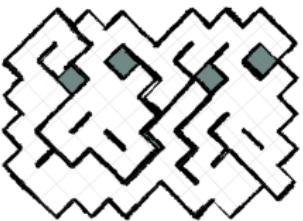
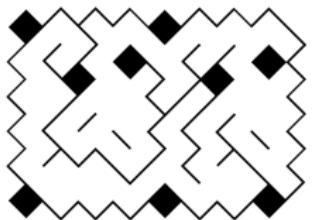
Πειράματα Χαρτογράφησης



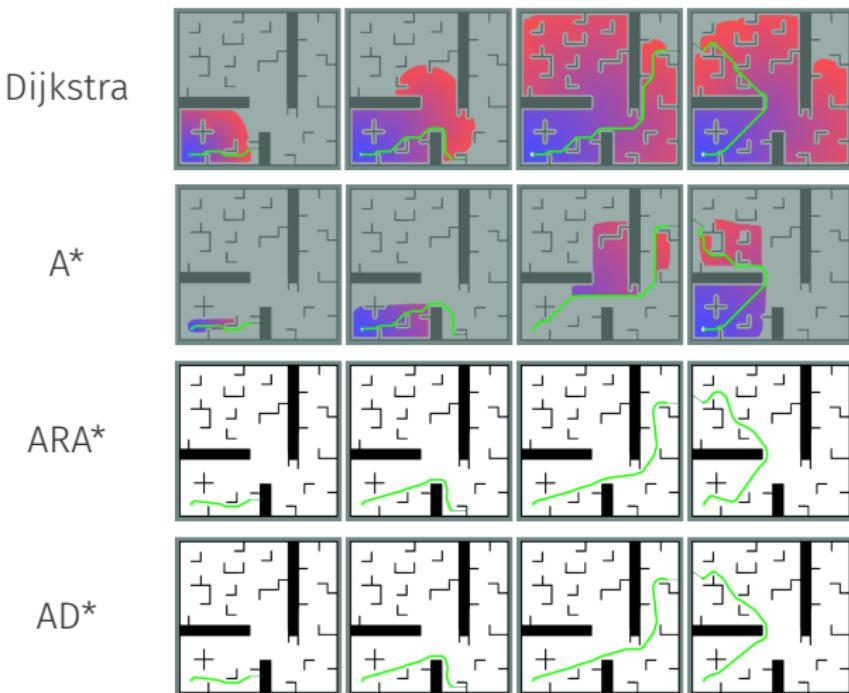
Πειράματα Χαρτογράφησης



Πειράματα Χαρτογράφησης

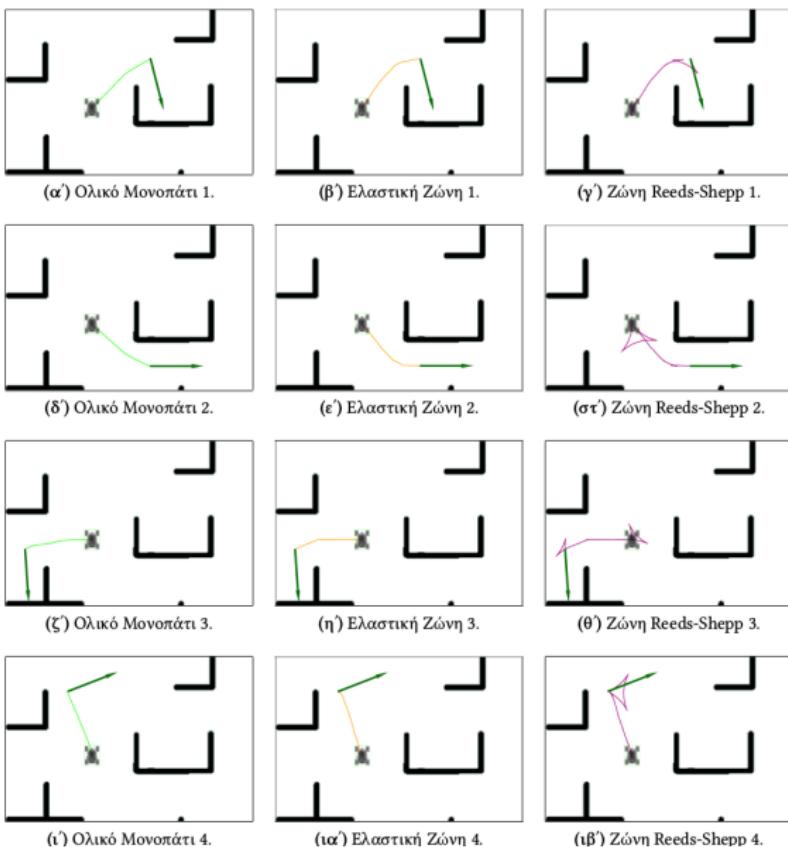


Πειράματα Κατασκευής Ολικού Μονοπατιού

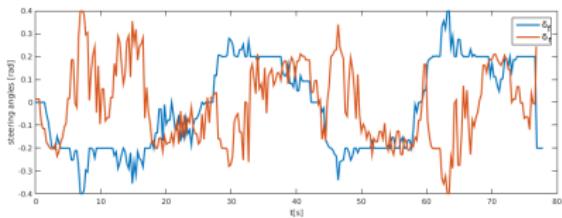
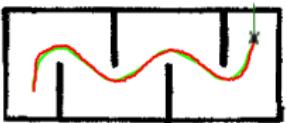


	Dijkstra		A*		ARA*		AD*	
	$T[s]$	$s[m]$	$T[s]$	$s[m]$	$s_{init}[m]$	$s_{final}[m]$	$s_{init}[m]$	$s_{final}[m]$
p_1	0.035	6.02	0.027	6.02	6.68	5.91	7.45	5.92
p_2	0.060	11.78	0.060	11.78	13.56	11.554	12.62	11.25
p_3	0.110	19.34	0.090	19.34	19.85	18.73	23.26	18.66
p_4	0.110	17.69	0.110	17.77	21.36	17.25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

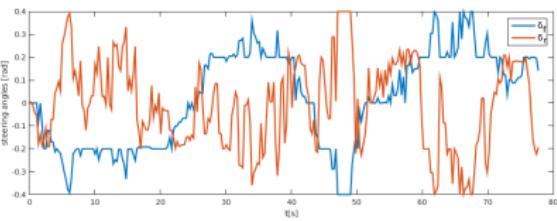
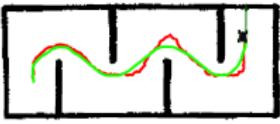
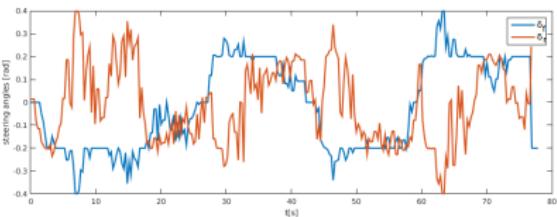
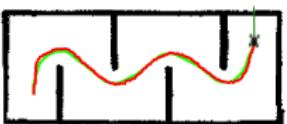
Πειράματα Δυναμικής Παραμόρφωσης Μονοπατιού



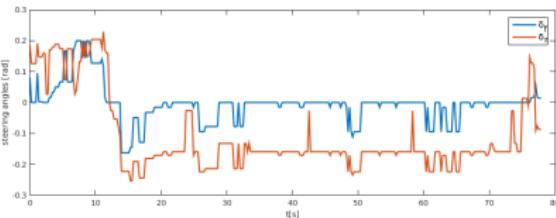
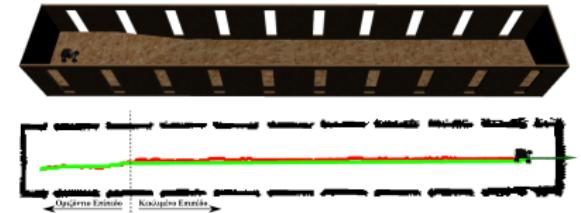
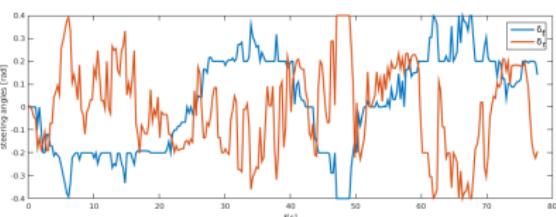
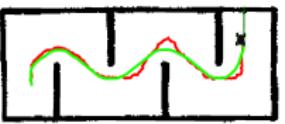
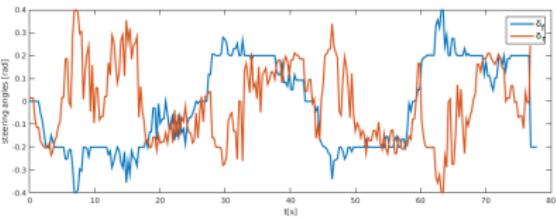
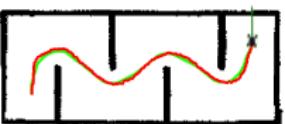
Πειράματα Διάσχισης Μονοπατιού



Πειράματα Διάσχισης Μονοπατιού

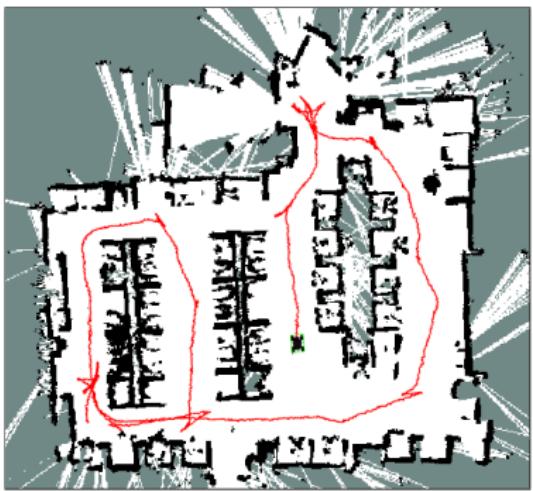


Πειράματα Διάσχισης Μονοπατιού

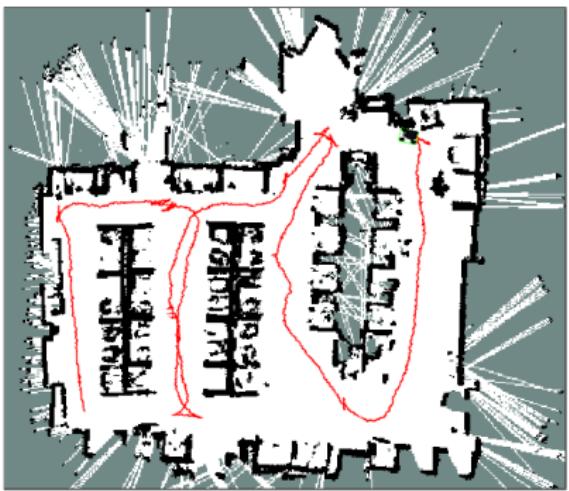


Πειράματα Εξερεύνησης Πραγματικού Περιβάλλοντος

DPM



DPR



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

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

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

Μελλοντικές Επεκτάσεις

- 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.