

Σχεδιασμός Κίνησης σε Δισδιάστατα Περιβάλλοντα που Περιλαμβάνουν Εμπόδια Άγνωστης Τροχιάς

Ηλίας Κ. Ξυδιάς, Φίλιππος Ν. Αζαριάδης

Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων & Συστημάτων,

Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σύρος 84100

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια νέα μεθοδολογία για το σχεδιασμό κίνησης ενός αυτοκινούμενου ρομπότ το οποίο κινείται σε δισδιάστατο δυναμικό περιβάλλον το οποίο περιέχει ακίνητα εμπόδια των οποίων γνωρίζουμε τη θέση τους και τη γεωμετρία τους, και κινούμενα εμπόδια των οποίων η κίνηση και η γεωμετρία τους είναι άγνωστη. Η προτεινόμενη μεθοδολογία επιλύει το πρόβλημα σε δύο στάδια: αρχικά, σχεδιάζεται μια διαδρομή λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα ακίνητα εμπόδια του χώρου εργασίας του ρομπότ. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση των εμποδίων που έχουν εισέλθει στην περιοχή κάλυψης των αισθητήρων του ρομπότ, η παραγόμενη διαδρομή τροποποιείται κατάλληλα έτσι ώστε να αποφευχθούν οι συγκρούσεις με τα εμπόδια. Η προτεινόμενη μεθοδολογία δοκιμάστηκε με επιτυχία σε διαφορετικά δυναμικά περιβάλλοντα. Στην Ενότητα 4 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου σε περιβάλλον που περιέχει ένα κινούμενο εμπόδιο άγνωστης τροχιάς.

Λέξεις κλειδιά: σχεδιασμός κίνησης, εμπόδια άγνωστης τροχιάς, αυτοκινούμενο ρομπότ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής μεταξύ δύο σημείων σε ένα περιβάλλον με εμπόδια έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Μέθοδοι σχεδιασμού διαδρομών χρησιμοποιούνται σε μια πληθώρα εφαρμογών όπως είναι ο σχεδιασμός κίνησης ρομπότ (ενός ή περισσοτέρων), τα συστήματα πλοήγησης (GPS) και ο σχεδιασμός κυκλωμάτων (σε ηλεκτρονικές πλακέτες).

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια νέα μεθοδολογία για την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού κίνησης για ένα αυτοκινούμενο ρομπότ το οποίο καλείται να κινηθεί από ένα αρχικό σημείο σε ένα τελικό σημείο. Ο χώρος εργασίας του ρομπότ είναι δύο διαστάσεων και περιέχει ακίνητα εμπόδια των οποίων γνωρίζουμε τη γεωμετρία και τη θέση, και κινούμενα εμπόδια των οποίων η γεωμετρία και η κίνηση τους μας είναι άγνωστη. Το ρομπότ υποθέτουμε ότι έχει τα χαρακτηριστικά ενός αυτοκινήτου δηλαδή έχει ορθογώνιο σχήμα και έχει περιορισμούς στη γωνία στροφής του.

Πολλές από τις μεθόδους που έχουν προταθεί για την επίλυση του υπό-εξέταση προβλήματος (Nash et al. 2007) κατασκευάζουν γρήγορους αλγορίθμους οι οποίοι στηρίζονται στη διακριτοποίηση του χώρου εργασίας του ρομπότ με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διαδρομές οι οποίες δεν είναι ομαλές και δεν ικανοποιούν τους κινηματικούς περιορισμούς του ρομπότ όπως π.χ. περιορισμούς στη γωνία στροφής του. Μια εναλλακτική προσέγγιση στην οποία λαμβάνονται υπόψη οι κινηματικοί

περιορισμοί του ρομπότ είναι αυτή η οποία στηρίζεται στα τεχνητά δυναμικά πεδία (Cosio and Castaneda, 2004). Το κύριο μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι παρουσιάζουν τοπικά ελάχιστα τα οποία μπορούν να παγιδέψουν το ρομπότ.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία επιλύει το πρόβλημα σε δύο στάδια: αρχικά, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της Bump-Surface (Azariadis and Aspragathos, 2005) σχεδιάζεται μια διαδρομή, η οποία ενώνει το αρχικό και τελικό σημείο, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα ακίνητα εμπόδια του χώρου εργασίας. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση των κινούμενων εμποδίων τα οποία εισέρχονται στην περιοχή κάλυψης των αισθητήρων του ρομπότ η παραγόμενη διαδρομή τροποποιείται κατάλληλα έτσι ώστε να αποφευχθούν οι συγκρούσεις με τα εμπόδια.

Τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι: (α) Η παραγόμενη διαδρομή είναι ομαλή και σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του ρομπότ καθώς επίσης και τους κινηματικούς περιορισμούς του. (β) Ο αριθμός των «χρονικών βημάτων» τα οποία λαμβάνονται πάνω στη παραγόμενη διαδρομή για τον έλεγχο των συγκρούσεων (2^ο στάδιο) είναι μεταβλητός έτσι ώστε να αυξάνεται η «ασφάλεια από συγκρούσεις» και να μειώνεται ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για το σχεδιασμό της διαδρομής. (γ) Περιοχές με στενά περάσματα μπορούν να αναπαρασταθούν με υψηλή ακρίβεια από τη Bump-Surface.

2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτή την εργασία, ζητείται να σχεδιαστεί η κίνηση ενός αυτοκινούμενου ρομπότ το οποίο κινείται σε δισδιάστατο περιβάλλον που περιλαμβάνει ακίνητα εμπόδια και κινούμενα εμπόδια άγνωστης τροχιάς.

Οι υποθέσεις που γίνονται σε αυτή την εργασία είναι οι εξής: (α) Η γεωμετρία και η θέση των ακίνητων εμποδίων είναι γνωστή. (β) Το ρομπότ φέρει μια σειρά από αισθητήρες οι οποίοι επιτρέπουν τη μέτρηση σε πραγματικό χρόνο της θέσης, της γεωμετρίας, της γραμμικής ταχύτητας και της διεύθυνσης κίνησης όσων εμποδίων βρίσκονται μέσα στην περιοχή κάλυψής τους. Η περιοχή κάλυψης είναι κυκλική, ακτίνας r και με κέντρο το σημείο \mathbf{R} του ρομπότ, **Error! Reference source not found.** (γ) Η γεωμετρία, η θέση και η κίνηση των κινούμενων εμποδίων είναι άγνωστη, μέχρις ότου μπουν στην περιοχή κάλυψης των αισθητήρων του ρομπότ. (δ) Το αρχικό και τελικό σημείο της κίνησης του ρομπότ είναι γνωστό. (ε) Το ρομπότ έχει ορθογώνιο σχήμα και κινείται σύμφωνα με τους κινηματικούς περιορισμούς ενός αυτοκίνητου-ρομπότ (car-like robot). (ζ) Το ρομπότ μπορεί να κινείται μόνο προς τα εμπρός. (η) Ο προσανατολισμός θ του ρομπότ, σε κάθε σημείο της διαδρομής $\mathbf{R}(t)$ συμπίπτει με τη διεύθυνση του εφαπτόμενου διανύσματος σε αυτό το σημείο. (θ) Οι δυναμικοί περιορισμοί του ρομπότ δεν λαμβάνονται υπόψη.

2.1 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΟΣ ΑΥΤΟΚΙΝΟΥΜΕΝΟΥ ΡΟΜΠΟΤ

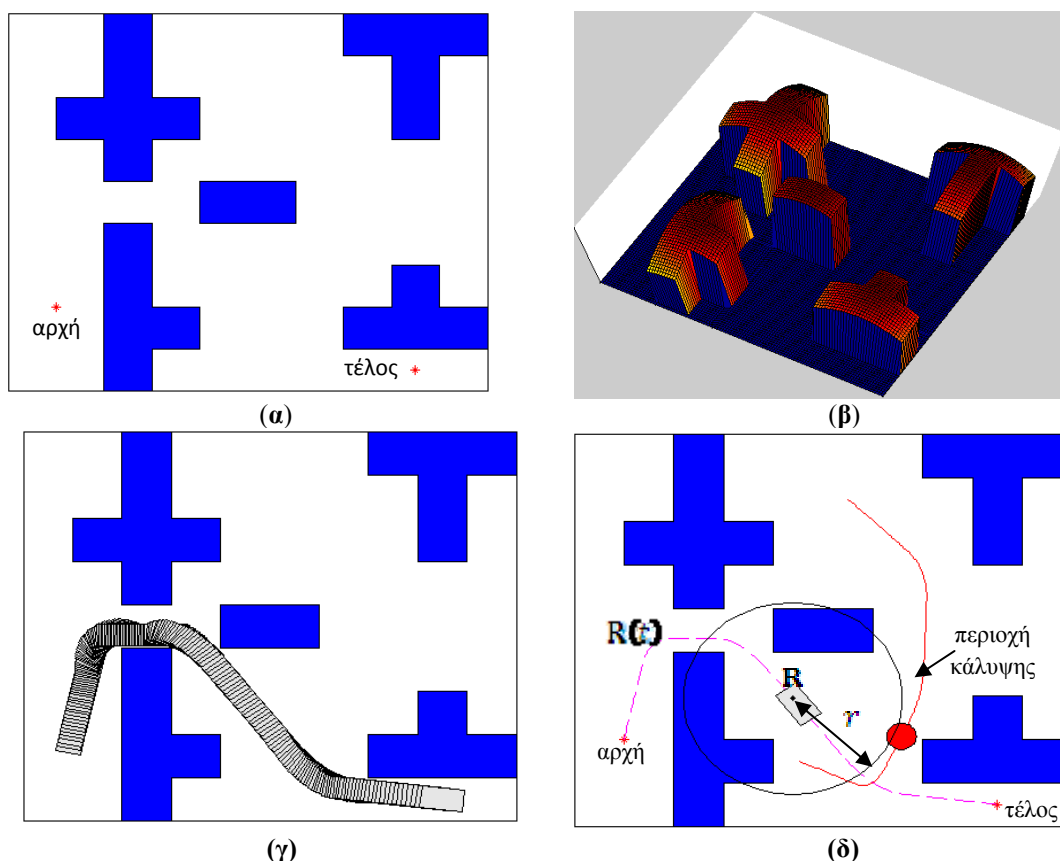
Η διαμόρφωση ενός αυτοκινήτου-ρομπότ στο δισδιάστατο περιβάλλον ορίζεται από $(u, v, \theta) \in \mathbb{R}^2 \times [0, 2\pi]$, όπου $(u, v) \in \mathbb{R}^2$ είναι η θέση του μεσαίου σημείου \mathbf{R} μεταξύ των δύο πίσω τροχών στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων και $\theta \in [0, 2\pi]$ είναι ο προσανατολισμός του ρομπότ, δηλαδή, είναι η γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα u και τον κύριο άξονα του ρομπότ. Η γωνία στροφής $\phi \in [0, \phi_{\max}]$, $\phi_{\max} < \frac{\pi}{2}$ του ρομπότ, όπου $|\phi| = \arctan(\frac{l}{\rho})$, ορίζεται από το μήκος του κύριου άξονα l και την ακτίνα καμπυλότητας ρ στο σημείο \mathbf{R} . Επειδή, ο

προσανατολισμός του ρομπότ περιορίζεται από τους μπροστινούς τροχούς, ο περιορισμός στη γωνία στροφής του ρομπότ ενσωματώνεται μέσω της ακτίνας καμπυλότητας ρ στη διαδρομή $\mathbf{R}(t)$ του ρομπότ με αποτέλεσμα να προκύπτει μια διαδρομή με ακτίνα καμπυλότητας $\rho \geq \rho_{\min}$. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο ενός αυτοκινούμενου ρομπότ ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αναφορά Latombe (1991).

3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

3.1 1^ο ΣΤΑΔΙΟ: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΡΟΜΠΟΤ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΑ ΑΚΙΝΗΤΑ ΕΜΠΟΔΙΑ

Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στη μεθοδολογία Bump-Surface για την αναπαράσταση του διδιάστατου χώρου εργασίας του ρομπότ. Ο χώρος εργασίας του ρομπότ αναπαριστάται από μια μαθηματική πολλαπλότητα δύο διαστάσεων, η οποία κείται στον Ευκλείδειο χώρο των τριών διαστάσεων (Σχήμα 1(β)) χρησιμοποιώντας μια επιφάνεια B-Spline. Η λύση του προβλήματος αναζητείται στη Bump-Surface με τη χρήση Γενετικών Αλγορίθμων και απεικονίζεται στο αρχικό περιβάλλον του ρομπότ με μια καμπύλη B-Spline. Η τελική λύση του προβλήματος είναι μια καμπύλη που παράγεται ακολουθώντας τη μέθοδο των Xidias et al. (2008) και Azariadis & Aspragathos (2005) και η οποία ενώνει την αρχική θέση και τελική θέση του ρομπότ και ικανοποιεί τα κριτήρια και τους περιορισμούς του προβλήματος σχεδιασμού κίνησης σε στατικό περιβάλλον, βλ. Σχήμα 1(γ-δ).

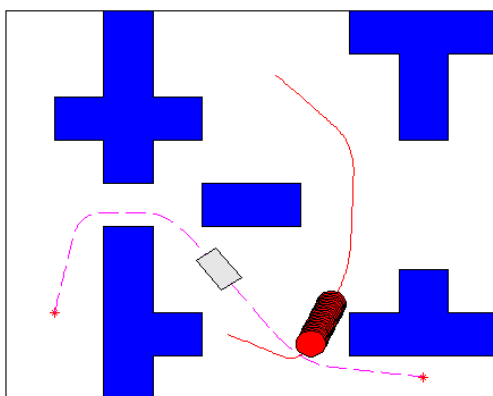


Σχήμα 1: (α) Το αρχικό διδιάστατο περιβάλλον. (β) Η αντίστοιχη Bump-Surface. (γ) Η παραγόμενη διαδρομή για το αυτοκινούμενο-ρομπότ. (δ) Μια τυχαία χρονική στιγμή.

3.2 2^ο ΣΤΑΔΙΟ: ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ

Στις περισσότερες από τις υπάρχουσες μεθοδολογίες για το σχεδιασμό κίνησης ενός ρομπότ σε περιβάλλοντα με κινούμενα εμπόδια άγνωστης τροχιάς (Nash et al., 2007), η τροποποίηση της αρχικής διαδρομής γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο: κατά μήκος της παραγόμενης διαδρομής (1^ο στάδιο) λαμβάνονται N σημεία (χρονικές στιγμές) στα οποία το ρομπότ ελέγχει με τους αισθητήρες του αν εισέρχεται κάποιο εμπόδιο στην περιοχή κάλυψής τους. Τα σημεία κατανέμονται ομοιόμορφα στη διαδρομή του ρομπότ, ενώ το πλήθος τους, N , ελέγχεται από το χρήστη. Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός N τόσο μεγαλύτερη είναι η ασφάλεια με την οποία κινείται το ρομπότ πάνω στην παραγόμενη διαδρομή εφόσον αυξάνονται οι έλεγχοι από τους αισθητήρες του ρομπότ. Το μειονέκτημα αυτού του τρόπου προσέγγισης είναι ότι αυξάνεται ο υπολογιστικός χρόνος κατασκευής της τελικής διαδρομής του ρομπότ και ότι η επιλογή του συνόλου των σημείων εξαρτάται από το χρήστη (το σύστημα δεν είναι αυτόνομο).

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια μεθοδολογία στην οποία ο αριθμός των σημείων που λαμβάνονται κατά μήκος της παραγόμενης διαδρομής είναι μεταβλητός και εξαρτάται από το χώρο εργασίας του ρομπότ και τη σχετική ταχύτητα των κινούμενων εμποδίων ως προς το ρομπότ. Αρχικά λαμβάνονται ομοιόμορφα N σημεία κατά μήκος της διαδρομής. Σε κάθε σημείο $\mathbf{R}(t_i)$, $i=1, \dots, N$ το ρομπότ ελέγχει αν έχει μπει κάποιο κινούμενο εμπόδιο στην περιοχή κάλυψής των αισθητήρων του. Αν δεν έχει μπει κάποιο εμπόδιο τότε προχωράει στο επόμενο σημείο $\mathbf{R}(t_{i+1})$. Αν έχει μπει κάποιο εμπόδιο στην περιοχή κάλυψής των αισθητήρων του ρομπότ τότε: (α) λαμβάνοντας υπόψη τις ταχύτητες των κινούμενων εμποδίων και του ρομπότ καθώς επίσης και τις τροχιές τους, μεταβάλουμε τη γεωμετρία των κινούμενων εμποδίων ως προς τη διεύθυνση της κίνησής του εμποδίου (**Error! Reference source not found.**). Η μεταβολή αυτή γίνεται για να αποφθεχθούν πιθανές «παγιδεύσεις» του ρομπότ από τα κινούμενα εμπόδια. Το τροποποιημένο εμπόδιο προκύπτει από την κυρτή θήκη των ιχνών του τις χρονικές στιγμές $t_i + t_{i+1} + \dots + t_{i+M}$, όπου t_{i+M} είναι η χρονική στιγμή στην οποία θα επέλθει σύγκρουση μεταξύ του εμποδίου και του ρομπότ. (β) Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε τη μεθοδολογία των Bump-Surfaces για την κατασκευή μιας νέας διαδρομής η οποία έχει ως αρχικό σημείο το $\mathbf{R}(t_i)$ και τελικό σημείο το $\mathbf{R}(t_N)$. (γ) Τέλος, το χρονικό βήμα μειώνεται κατά k και το ρομπότ κινείται προς το σημείο $\mathbf{R}_i(t_i + \frac{dt}{k})$ όπου, $\mathbf{R}_i(t)$ είναι η τροποποιημένη καμπύλη, $k = \frac{ds}{|\dot{\mathbf{v}}|}$ είναι μια σταθερά αντιστρόφως ανάλογη του μέτρου της σχετικής ταχύτητας του κινούμενου εμποδίου ως προς το ρομπότ, ds είναι το διάστημα που διανύει το κινούμενο εμπόδιο το χρονικό διάστημα dt , $|\dot{\mathbf{v}}|$ είναι το μέτρο της σχετικής ταχύτητας του εμποδίου ως προς το ρομπότ και $dt = t_{i+1} - t_i$. Πρέπει να τονισθεί, ότι για να εξασφαλιστεί ότι η κίνηση του ρομπότ θα είναι ομαλή απαιτείται η διαφορά του προσανατολισμού του ρομπότ $\theta(t_i)$ τη χρονική στιγμή t_i με το προσανατολισμό του $\theta(t_i + \frac{dt}{k})$ τη χρονική στιγμή $t_i + \frac{dt}{k}$ να τείνει στο μηδέν.



Σχήμα 2: Το τροποποιημένο κινούμενο εμπόδιο.

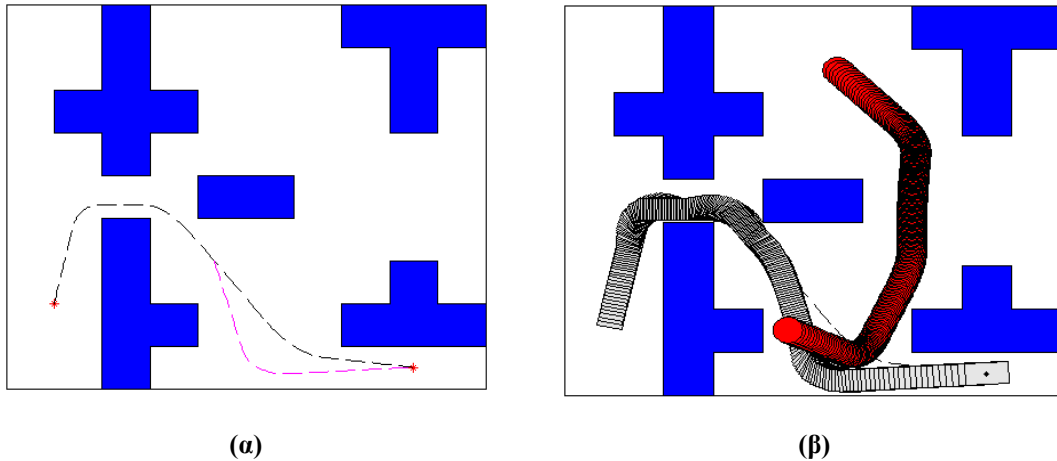
Το συνολικό πρόβλημα σχεδιασμού κίνησης εκφράζεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς το οποίο επιλύεται με τη χρήση Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ). Κάθε χρωμόσωμα του ΓΑ αποτελείται από πραγματικούς αριθμούς που αντιπροσωπεύουν τα ενδιάμεσα σημεία ελέγχου που ορίζουν τη διαδρομή του ρομπότ. Επιλέχθηκε η κωδικοποίηση του χρωμοσώματος να γίνει με πραγματικούς αριθμούς διότι έχει αποδειχθεί ότι είναι γρήγοροι και παρέχουν αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας χωρίς να αυξάνουν την υπολογιστική πολυπλοκότητα (Xidias et al., 2008).

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία δοκιμάστηκε με επιτυχία σε διαφορετικά δυναμικά περιβάλλοντα. Λόγο έλλειψης χώρου παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου σε περιβάλλον που περιέχει ένα κινούμενο εμπόδιο άγνωστης τροχιάς.

Το μέγεθος του πλέγματος σημείων που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της Bump-Surface είναι 100×100 . Επίσης, οι τελεστές του ΓΑ είναι $\text{population size}=150$, $\text{maximum number of generations}=200$, $\text{crossover rate}=0.75$ και $\text{boundary mutation rate}=0.004$. Η αναπαράσταση της Bump-Surface γίνεται με μια (2,2)-B-Spline επιφάνεια, ενώ ορίστηκε αρχικά $N = 80$.

Στο αρχικό δισδιάστατο περιβάλλον του Σχήματος 1(α), όπου ένα αυτόνομο ρομπότ πρέπει να κινηθεί από το δοθέν αρχικό σημείο στο δοθέν τελικό σημείο προστίθεται ένα κινούμενο εμπόδιο άγνωστης τροχιάς. Στο Σχήμα 1(γ) παρουσιάζεται η συνολική κίνηση του ρομπότ όπως προκύπτει από το 1^ο στάδιο της προτεινόμενης μεθόδου. Στο Σχήμα 1(δ) απεικονίζεται μια χρονική στιγμή στην οποία παρουσιάζεται η αρχική διαδρομή του ρομπότ, η περιοχή κάλυψης των αισθητήρων του ρομπότ και το κινούμενο εμπόδιο το οποίο έχει μπει στην περιοχή κάλυψης των αισθητήρων. Στο Σχήμα 3(α) παρουσιάζεται η τελική διαδρομή του ρομπότ με μωβ χρώμα. Επίσης, όπως παρατηρείται από το Σχήμα 3(β) η κίνηση του ρομπότ είναι ομαλή, ενώ ο τελικός αριθμός των σημείων που ελήφθησαν κατά μήκος της διαδρομής είναι 109.



Σχήμα 3: (α) Η τελική διαδρομή του ρομπότ. (β) Τα ίχνη του ρομπότ και του κινούμενου εμποδίου.

5 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάστηκε μια νέα μεθοδολογία για την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού κίνησης αυτοκινούμενου ρομπότ σε δισδιάστατα περιβάλλοντα που περιλαμβάνουν κινούμενα εμπόδια άγνωστης τροχιάς. Η προτεινόμενη μεθοδολογία επιλύει το πρόβλημα σε 2 στάδια: αρχικά, σχεδιάζεται μια διαδρομή λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα ακίνητα εμπόδια του χώρου εργασίας του ρομπότ. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση των κινούμενων εμποδίων τα οποία εισέρχονται στην περιοχή κάλυψης των αισθητήρων του ρομπότ, η παραγόμενη διαδρομή τροποποιείται κατάλληλα έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια και οι περιορισμοί του προβλήματος κίνησης. Η μελλοντική εργασία θα επικεντρωθεί στην επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού κίνησης μιας ομάδας αυτοκινούμενων ρομπότ σε μερικώς γνωστό περιβάλλον των οποίων η ταχύτητα θα μπορεί να μεταβάλλεται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Azariadis P., Aspragathos N.: Obstacle Representation by Bump-Surface for Optimal Motion-Planning, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 51, No. 2-3, 2005, pp 129-150.

Cosio F. A. and Castaneda M. P., “Autonomous robot navigation using adaptive potential fields,” *Math. Comput. Modelling* 40(9–10), 1141–1156 (2004).

J. C. Latombe, “Robot Motion Planning”, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991.

Nash, A., Daniel, K., Koenig, S. and Felner, A. (2007). Theta*: any-angle path planning on grids. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*. Menlo Park, CA, AAAI Press, pp. 1177–1183.

Elias K. Xidias, Philip N. Azariadis, Nikos A. Aspragathos. “Path Planning of Holonomic and Non-Holonomic Robots Using Bump-Surfaces”. *Journal of Computer Aided Design and Applications*, Vol. 5, Nos.1-4, pp. 497-507, 2008.