



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου • ΤΗΛ.: 7723572, FAX: 7723571

Αρ.Πρωτ.: 9628

Αθήνα, 27-11-2015

Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του **Μάτσα Ηλία**, Διπλωματούχου **Μηχανολόγος Μηχανικός του ΕΜΠ**, που θα πραγματοποιηθεί την Παρασκευή 4 Δεκεμβρίου 2015, ώρα 11:30π.μ. στην Αίθουσα Πολυμέσων του κτιρίου της Κεντρικής Βιβλιοθήκης του ΕΜΠ Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Το Θέμα της Διδακτορικής Διατριβής είναι:

**«Ανάπτυξη και Αξιολόγηση Διαδραστικών Μοντέλων Εικονικής
Πραγματικότητας για το σχεδιασμό Ρομποτικών Συστημάτων Παραγωγής»**

Επισυνάπτεται περίληψη της παραπάνω Διδακτορικής Διατριβής

Ο ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ



Η. ΤΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π



Ανάπτυξη και Αξιολόγηση Διαδραστικών Μοντέλων Εικονικής Πραγματικότητας για το Σχεδιασμό Ρομποτικών Συστημάτων Παραγωγής

Διδακτορική Διατριβή

του **Ηλία Μάτσα**, Διπλ. Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ

Περίληψη

Στα σύγχρονα συστήματα παραγωγής, τα τελευταία χρόνια έχει εμφανιστεί η ανάγκη για συνεργασία Ανθρώπου-Βιομηχανικού Ρομπότ (A-P) σε κοινό (διαμοιραζόμενο) χώρο εργασίας, για την από κοινού εκτέλεση βιομηχανικών καθηκόντων ή κατεργασιών. Ο σκοπός της συνεργασίας και της συνύπαρξης A-P κατά την εκτέλεση καθηκόντων που συνήθως εκτελούνται χειρωνακτικά, είναι η βελτίωση της ποιότητας και η αύξηση της παραγωγικότητας, εμπλουτίζοντας τη γνώση, τις δεξιότητες και τις κιναισθητικές δυνατότητες του εργαζόμενου με τη δύναμη, την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα των ρομπότ. Στην περίπτωση που εξετάζουμε λοιπόν, αντί να έχουμε αντικατάσταση της ανθρώπινης εργασίας από ρομπότ σε επαναλαμβανόμενα, επικίνδυνα ή χαμηλής προστιθέμενης αξίας καθήκοντα, επιθυμούμε τη συνύπαρξη A-P και τη συνεργατική υποστήριξη της ανθρώπινης εργασίας και δεξιότητας από το ρομπότ, με αποτέλεσμα την πραγματοποίηση συνολικής εργασίας υψηλής προστιθέμενης αξίας.

Μέχρι και σήμερα, τα ανακύπτοντα ζητήματα ασφαλείας αντιμετωπίζονται πρωτίστως με χωρικό ή/και χρονικό διαχωρισμό ανθρώπου και ρομπότ, και, κατ' αυτό τον τρόπο, κρατούν ακόμα την εφαρμογή της συνεργασίας A-P ουσιαστικά ανεκμετάλλευτη στη βιομηχανία. Επιπρόσθετα, οι υφιστάμενες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας είναι δομημένες σε μια σειριακή λογική γεγονότων τύπου «σταμάτα-και-προχώρα» (stop-and-go), η οποία είναι αναποτελεσματική, καθώς ενδέχεται να σταματά την παραγωγή, και να ακυρώνει ουσιαστικά τα πλεονεκτήματα της συνεργασίας A-P.

Η παρούσα ερευνητική εργασία διερευνά τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας οι οποίες δεν διακόπτουν -κατά το δυνατόν- την ομαλή ροή της συνεργασίας A-P. Επιπλέον, αναζητά τρόπους γνωστικής διευκόλυνσης και υποστήριξης της αντίληψης της κατάστασης του χρήστη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ρομπότ. Τέλος, ερευνάται η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας, αλλά και τα κριτήρια ενεργοποίησης των τεχνικών αυτών, έτσι ώστε να αποφεύγονται πιθανές άσκοπες, ή πρώιμες ενεργοποιήσεις.

Προκειμένου να επιτευχθεί η παραπάνω διερεύνηση, προτείνεται η δημιουργία ενός υψηλά-αλληλεπιδραστικού Εικονικού Περιβάλλοντος (ΕΠε), το οποίο λειτουργεί ως πλατφόρμα δοκιμών της συνεργασίας A-P. Κατά τη διάρκεια της συνεργασίας του με το ρομπότ, ο χρήστης δέχεται ανάδραση με δυναμικά ερεθίσματα (γνωστικά βοηθήματα) σε πραγματικό χρόνο, τα οποία σκοπεύουν να εμπλουτίσουν με πληροφορία την ερευνώμενη συνεργασία. Τέλος, προτείνονται δύο στρατηγικές (τεχνικές) ασφαλούς συνεργασίας: στην πρώτη το ρομπότ επιβραδύνει όταν ανιχνεύεται επερχόμενη σύγκρουση (ανεπιθύμητη επαφή) με τη χρήστη, ενώ στη δεύτερη το ρομπότ υποχωρεί και κατευθύνεται στον τελικό προορισμό με τροποποιημένη τροχιά, έτσι ώστε να αποφύγει τον άνθρωπο.

Με βάση τα παραπάνω, στην παρούσα θεώρηση, προέκυψαν τρεις βασικές ερευνητικές προβληματικές. Η πρώτη προβληματική έχει δύο σκέλη: αναφέρεται αφενός στην ικανότητα και την αποτελεσματικότητα της μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P από το διαδραστικό ΕΠε, και αφετέρου, στην αποδοχή του ΕΠε από το χρήστη, ως εργαλείου για τη διερεύνηση αυτής της συνεργασίας και για την εκπαίδευση σε αυτήν. Η δεύτερη προβληματική αφορά στη χρήση των γνωστικών βοηθημάτων, που παρέχονται στο χρήστη, αλλά και στην επίδραση που έχουν αυτά

στην αντίληψη του κινδύνου και στην αντίληψη της κατάστασης. Η τρίτη προβληματική αφορά στη χρήση των διαφορετικών στρατηγικών ασφάλειας (επιβράδυνση/υποχώρηση), στην αποδοχή τους από το χρήστη και στην επίδραση που έχουν στην ασφάλεια και στην απόδοση (εύροια) της συνεργασίας A-P.

Ο *βραχυπρόθεσμος στόχος* της διδακτορικής διατριβής ήταν η δημιουργία ενός Εικονικού Περιβάλλοντος (ΕΠε) υψηλής αλληλεπίδρασης και εμπύθισης, το οποίο θα λειτουργεί ως μια πλατφόρμα πειραματισμού και δοκιμών των τεχνικών αλληλεπίδρασης A-P και της εύροιας της συνεργασίας A-P στον εικονικό κόσμο. Ο *μεσοπρόθεσμος στόχος* είναι η διερεύνηση της επαυξημένης εμπειρίας, της αντίληψης και της συμπεριφοράς του χρήστη στο ΕΠε κατά τη διάρκεια της εικονικής συνεργασίας A-P. Το διαδραστικό ΕΠε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της αποδοχής και της ασφάλειας της συνεργασίας A-P, ενισχύοντας την αντίληψη (awareness) του χρήστη όσον αφορά την κίνηση του ρομπότ με τη χρήση πολυαισθητηριακών σημάτων και βοηθημάτων. Τελικά, ο *μακροπρόθεσμος στόχος* αυτής της έρευνας είναι η διερεύνηση τρόπων ασφαλειοκεντρικού προγραμματισμού της τροχιάς του ρομπότ, με την αξιολόγηση διαφορετικών τεχνικών αποφυγής συγκρούσεων και τη χρήση τεχνικών, μέσα στο ΕΠε, βασισμένων στην αντίληψη της κίνησης και την επικοινωνία της πρόθεσης, τόσο από τον άνθρωπο όσο και από τον ελεγκτή του βιομηχανικού ρομπότ.

Συνεπώς, η διδακτορική διατριβή περιστρέφεται γύρω από τη συνεργασία Ανθρώπου-Ρομπότ (A-P) στα ρομποτικά συστήματα παραγωγής, την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και την αποδοχή αυτής της συνεργασίας και τέλος, γύρω από τη διαδραστική Εικονική Πραγματικότητα αφενός ως εργαλείο μελέτης της παραπάνω συνεργασίας, και αφετέρου, η ίδια εγγενώς, ως ερευνητικό πεδίο έρευνας το οποίο αναπαριστά και εμπλουτίζει γνωστικά την αλληλεπίδραση με τον άνθρωπο.

Προκειμένου να διερευνηθούν οι ερευνητικές προβληματικές και οι υποθέσεις επίλυσής τους, δημιουργήθηκε το ΕΠε “beWare of the Robot”. Η “beWare of the Robot” είναι μια αυτόνομη (standalone) εφαρμογή που αναπτύχθηκε και συναρμολογήθηκε στο περιβάλλον του Unity 3d™ και η οποία μπορεί να τρέξει σε έναν τυπικό προσωπικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows™. Το δημιουργηθέν ΕΠε είναι πλήρως πρωτότυπο και έντονα διαδραστικό, ενώ στην εικονική σκηνή χρησιμοποιείται ένα ρεαλιστικό μοντέλο ανθρωποειδούς και το μοντέλο ενός βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι τρισδιάστατων διεπαφών αλληλεπίδρασης: (i) κάσκες στερεοσκοπίας (HMDs), ως συσκευές εξόδου τρισδιάστατης απεικόνισης (Z800 3DVisor και Oculus Rift DK2), αλλά και ως συσκευές εισόδου για την αναγνώριση της κίνησης του κεφαλιού και (ii) αισθητήρες αναγνώρισης κίνησης (Microsoft Kinect™) ως τρισδιάστατες συσκευές εισόδου και κιναισθητικού ελέγχου.

Ως πεδίο εφαρμογής (υπόθεση εργασίας) επιλέχθηκε η συνεργατική χειροκίνητη στρώση ανθρακοϋφασμάτων (hand lay-up), καθώς είναι ισχυρά αλληλεπιδραστική, απαιτεί μεγάλη εγγύτητα και παράλληλη εργασία A-P, ενώ μπορούν να προσαρμοστούν σε αυτήν οι συνηθέστεροι τύποι συνεργασίας A-P (τροφοδοσία, παράδοση τεμαχίου, συγκράτηση, ταυτόχρονη και από κοινού εργασία πάνω στο ίδιο τεμάχιο).

Συνολικά αναπτύχθηκαν δύο περιπτώσεις εφαρμογής (use cases). Η πρώτη περίπτωση εφαρμογής (εκδόσεις beWare of the Robot v1.0 και v1.5) αναπαριστά τη ρομποτική τροφοδοσία (παράδοση) των ανθρακοϋφασμάτων από έναν πάγκο εναπόθεσης υφασμάτων προς τον άνθρωπο και συνιστά συγχρονισμένο τύπο συνεργασίας με χωρική σύμπτωση A-P. Η δεύτερη περίπτωση εφαρμογής, (έκδοση beWare of the Robot v2.0) αφορά συνεργατική προετοιμασία του τεμαχίου (αφαίρεση ενός αυτοκόλλητου καλύμματος) και συνεργατική και από κοινού στρώση του ανθρακοϋφάσματος σε ένα καλούπι (ταυτόχρονος και υποβοηθητικός τύπος συνεργασίας A-P).

Για την εκτέλεση των βασικών καθηκόντων της συνεργασίας A-P στο Εικονικό Περιβάλλον χρησιμοποιείται μεγάλο πλήθος τεχνικών αλληλεπίδρασης. Εξαιτίας της ανίχνευσης κίνησης (tracking) και της χρήσης του ανθρωποειδούς για την αναπαράσταση των καθηκόντων του χρήστη, επιτυγχάνεται αντίστοιχα αμεσότητα και φυσικότητα σε όλα τα γενικά καθήκοντα

αλληλεπίδρασης (επιλογή, πλοήγηση, χειρισμός και έλεγχος συστήματος). Επίσης, δημιουργήθηκαν δύο πρωτότυπες μεταφορές αλληλεπίδρασης, αυτές της εικονικής συνεργατικής στρώσης (virtual lay metaphor) και αυτή της εικονικής αφαίρεσης του αυτοκόλλητου καλύμματος (virtual removal metaphor), και μία τεχνική. Η τεχνική «ακολούθησε το χέρι μου» (follow my hand) πραγματοποιείται με τη χρήση ενός εικονικού χεριού (οδηγού/πιλότου) και ενός μοτίβου κίνησης, παράγοντας ένα γνωστικό βοήθημα προσομοίωσης του πραγματικού καθήκοντος στο ΕΠε.

Οι δημιουργηθείσες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε παθητικές/προνοητικές (proactive) τεχνικές και ενεργητικές/προσαρμοστικές (adaptive) τεχνικές. Η λογική των προβλεπτικών τεχνικών βασίζεται κυρίως στη χρήση γνωστικών βοηθημάτων (οπτικών και ηχητικών ενδείξεων, νύξεων και συναγερμών) και στοχεύει στην υποστήριξη της επικοινωνίας του χρήστη με το ρομπότ, της επίγνωσης της κατάστασης και της αντίληψης του κινδύνου. Οι προσαρμοστικές (adaptive) τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας A-P που ερευνούμε είναι δύο (i-επιβράδυνση, ii-υποχώρηση), αναφέρονται στην (προσαρμοστική) κινηματική συμπεριφορά του ρομπότ και εστιάζουν στην αποφυγή της επαφής μεταξύ A-P, χωρίς διακοπή της κίνησης του ρομπότ (αδιάκοπη συνεργασία).

Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές χρηστών, μία για κάθε περίπτωση εφαρμογής, και χρησιμοποιήθηκαν τόσο υποκειμενικές μετρικές ικανοποίησης των χρηστών (αυτό-αξιολόγηση), όσο και μετρικές απόδοσης της συνεργασίας A-P (χρόνοι, ταχύτητα ρομπότ, αριθμός συγκρούσεων A-P). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν έπειτα από στατιστικά τεστ, δείχνουν ότι οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας (επιβράδυνση/υποχώρηση) είναι όντως αποτελεσματικές και αποδεκτές από τους χρήστες, αλλά επιβαρύνουν την απόδοση της συνεργασίας. Επίσης, συνολικώς θετικά κρίνονται τα αποτελέσματα στις θεματικές ενότητες της αποτελεσματικότητας της μοντελοποίησης της συνεργασίας A-P, της αποτελεσματικότητας και της αποδοχής του ΕΠε και της εμπλοκής, εμπύθισης και παρουσίας του χρήστη.

Το κείμενο της διδακτορικής διατριβής αποτελείται από δέκα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο επιχειρείται να γίνει μια ουσιαστική εισαγωγή, περιγράφεται το πλαίσιο και η ανάγκη για την έρευνα της συνεργασίας A-P σε ακαδημαϊκό και βιομηχανικό επίπεδο. Στο 2ο κεφάλαιο ορίζεται και κατηγοριοποιείται η συνεργασία A-P. Στο 3ο κεφάλαιο περιγράφονται τα προβλήματα ασφάλειας της συνεργασίας A-P, δίδεται η στάθμη των γνώσεων όσον αφορά τα κριτήρια και τις τεχνικές ασφαλούς συνεργασίας, και την αποδοχή, αυτής της συνεργασίας από τον άνθρωπο. Στο 4ο κεφάλαιο γίνεται μια πολύ σύντομη αναφορά στη διαδραστική εικονική πραγματικότητα και σε χαρακτηριστικές έννοιες των εικονικών περιβαλλόντων. Στο 5ο κεφάλαιο διατυπώνονται η προβληματική, τα ερευνητικά ερωτήματα και οι υποθέσεις επίλυσης αυτών. Στο 6ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση του ΕΠε και των συνιστωσών του, ενώ στο 7ο κεφάλαιο επιχειρείται να συστηματοποιηθεί η περιγραφή και η ανάλυση του ΕΠε με τη χρήση διαγραμμάτων UML, αλλά και η περιγραφή των χρησιμοποιούμενων τεχνικών 3Δ αλληλεπίδρασης. Το 8ο κεφάλαιο περιγράφει τις προτεινόμενες τεχνικές αποφυγής συγκρούσεων και τους μηχανισμούς ενεργοποίησης αυτών. Τέλος στο κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται οι δοκιμές με τους χρήστες, τα ερωτηματολόγια, οι μετρικές συμπεριφοράς και τα αποτελέσματα, ενώ στο 10ο κεφάλαιο ανοίγει μια συζήτηση με βάση τα αποτελέσματα και την αποκτηθείσα εμπειρία, και παρατίθενται τα συμπεράσματα της ερευνητικής εργασίας όσον αφορά τη χρήση της ΕΠ, την εμπειρία του χρήστη και την αποτελεσματικότητα των τεχνικών ασφαλούς συνεργασίας A-P.

Η διδακτορική διατριβή έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II . Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ