

Τροχιακά - διαστημικά συστήματα και ρομποτική

Τεχνικό άρθρο

Για την απομάκρυνση των τροχιακών απορριμμάτων και την εκτέλεση των εξωτερικών εργασιών σε τροχιά, διεθνείς διαστημικοί οργανισμοί, σημαντικά ερευνητικά κέντρα και μεγάλα πανεπιστήμια σχεδιάζουν την ανάπτυξη διαστημικών ρομποτικών συστημάτων.

ΓΡΑΦΟΥΝ ΟΙ κ.κ.
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΡΕΚΛΕΙΤΗΣ,
ΙΩΣΗΦ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ,
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΝΑΝΟΣ,
ΟΛΓΑ-ΟΡΣΑΛΙΑ ΧΡΗΣΤΙΔΗ-ΛΟΥΜΠΑΣΕΦΣΚΙ
ΚΑΙ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ*

Σήμερα, εκατομμύνια διαστημικά απορριμμάτα (space debris) περιφέρονται σε τροχιά γύρω από τη Γη, αποτελώντας έναν υπαρκτό κίνδυνο για τα λειτουργικά διαστημικά συστήματα. Διαστημικά απορριμμάτα θεωρούνται αδρανείς δορυφόροι, εξαρτήματα από πυραύλους, καθώς και θραύσματα αυτών από συγκρούσεις μεταξύ τους.

Επίσης, τα τελευταία χρόνια, εργασίες σε τροχιά όπως η συντήρηση, η επισκευή και ο ανεφοδιασμός δορυφόρων γίνονται εξαιρετικά απαραίτητες για την υποστήριξη διαστημικών δραστηριοτήτων. Εντούτοις, η αποπεράτωση των εργασιών αυτών προϋποθέτει την παρουσία των αστροναυτών σε επικίνδυνο για τον άνθρωπο περιβάλλον.

Για την απομάκρυνση των τροχιακών απορριμμάτων και την εκτέλεση των εξωτερικών εργασιών σε τροχιά, διεθνείς διαστημικοί οργανισμοί, σημαντι-

κά ερευνητικά κέντρα και μεγάλα πανεπιστήμια σχεδιάζουν την ανάπτυξη διαστημικών ρομποτικών συστημάτων (ΔΡΣ). Η συντριπτική πλειοψηφία αυτών αποτελείται από έναν δορυφόροβάση επενεργούμενο από προωθητήρες και σφραγίδων αντίδρασης ή γυροσκοπικούς επενεργητές, και από έναν ή περισσότερους ρομποτικούς βραχίονες.

Η μελέτη αυτών των συστημάτων έχει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς η συμπεριφορά τους διαφέρει από εκείνη των επίγειων ρομποτικών βραχίονων. Η βασική τους διαφοροποίηση ως προς τα επίγεια συστήματα έγκειται στην έλλειψη σταθερής βάσης και στην επακόλουθη επίδραση της κίνησης των βραχίονων στη θέση και στον προσαντολισμό του δορυφόρου (βάσης).

Επίσης, η έλλειψη βαρύτητας οδηγεί σε διαφορετικό σχεδιασμό και έλεγχο αυτών των συστημάτων. Ανάλογα με το



ΕΙΚΟΝΑ 1: Ο διαστημικός εξοπλισμός του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του ΕΜΠ.

Αριστερά διακρίνεται το ενεργητικό ρομπότ και δεξιά το παθητικό σώμα, αιωρούμενα πάνω στην τράπεζα γρανίτη.

αν η επενέργηση στο δορυφόρο-βάση είναι ενεργή όχι, τα ΔΡΣ διακρίνονται σε ελεύθερα ιπτάμενα (ΕΙΔΡΣ) ή ελεύθερα αιωρούμενα ΔΡΣ (ΕΑΔΡΣ), αντίστοιχα.

Η θεωρητική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί και εξακολουθεί να πραγματοποιείται στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου (ΕΑΕ) σχετίζεται κυρίως με διεργασίες τροχιακών υπηρεσιών από ρομποτικά συστήματα, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα διεργασιών σε τροχιακό περιβάλλον.

■ Επεύθερα αιωρούμενοι διαστημικοί ρομποτικοί βραχίονες

Σε πολλές περιπτώσεις, για εξοικονόμηση καινούμαν και αποφυγή ανεπιθύμητων συγκρούσεων, επιλέγεται η μη επενέργηση της βάσης. Όμως, κατά αυτό τον τρόπο λειτουργίας εμφανίζεται δυναμική σύζευξη μεταξύ δύο των συνδέσμων του βραχίονα και του δορυ-

■ Σύλληψη διαστημικών συστημάτων σε τροχιά, από ρομποτικά συστήματα

Στον πιονίνα των τροχιακών υπηρεσιών βρίσκεται το πρόβλημα της προσέγγισης και σύλληψης - πρόσδεσης στόχου (δορυφόρου ή διαστημικού απορρίμματος), πλώγ της δυναμικής σύζευξης βάσης - βραχίονων, απλά και της εμφάνισης κρούσεων καθώς τα δύο σώματα έρχονται σε επαφή.

Μη επιτυχείς/ελεγχόμενες κρούσεις μπορεί να απομακρύνουν διαστημικά ρομποτικά συστήματα και στόχο, ή να προκαλέσουν ζημιές σε κρίσιμα υποσυστήματά τους. Χρειάζεται, ποιοπόν, προετοιμή των κρούσεων σε περιβάλλον έλλειψης βαρύτητας, και ειδικότερα απαιτείται: α) επαρκής μοντελοποίηση της διαδικασίας, β) μετέπειτα της επίδρασης των αδρανειακών παραμέτρων και των παραμέτρων ενδοτικότητας και γ) σχεδιασμός και έπειγχος μιας αποτελεσματικής προσέγγισης στόχου από διαστημικό ρομποτικό σύστημα.

Η μοντελοποίηση και ανάληση της κρούσης δύο σωμάτων στο διάστημα μπορεί να γίνει με υπάρχοντα βιοκοελαστικά μοντέλα ή με μια εξέλιξη αυτών, τα βιοκοπλαστικά μοντέλα. Με χρήση υπολογιστικά γρήγορων μεθόδων και χρησιμοποιώντας θεωρίες κρούσεως στερεών σωμάτων, μπορεί να εκτιμηθεί η συμπεριφορά των σωμάτων μετά την κρούση.

Με βάση την έννοια του κρουστικού κέντρου, μετεπήθηκε η ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων της κρούσης και η δυνατότητα ανάπτυξης συστήματος ελέγχου αντιστάθμισης των αντιδράσεων στις αρθρώσεις των βραχίονων και τελικά στη βάση ενός διαστημικού ρομποτικού συστήματος, κατά την διάρκεια των κρούσεων.

φάρουτων ελεύθερα αιωρούμενων διαστημικών ρομποτικών συστημάτων (ΕΑΔΡΣ), και αυτό οδηγεί σε διαφορές στη δυναμική και στον έλεγχο των συστημάτων αυτών σε σχέση με τους αντίστοιχους βραχίονες σταθερής βάσης.

Πιο συγκεκριμένα, η συμπεριφορά των ΕΑΔΡΣ καθορίζεται από τη διατήρηση της στροφορομής, η οποία συνήθως θεωρείται μηδενική. Όμως, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του ΕΑΔΡΣ, συσσωρεύονται μικρές ποσότητες στροφορομής, οι οποίες δε μπορούν να εξαλειφθούν λόγω κορεσμού

ποφεύγοντας τις πιθανές δυναμικές ιδιομορφίες [2].

Λόγω της κατασκευής τους, τα διαστημικά ρομποτικά συστήματα παρουσιάζουν ευκαμψίες τόσο στους συνδεσμούς όσο και στις αρθρώσεις του βραχίονα και προκαλούν ταλαντώσεις τόσο στην κίνηση του τελικού σημείου δράσης όσο και στην κίνηση της βάσης λόγω της δυναμικής σύζευξης. Επομένως, για να επιτευχθεί ακριβής πορεία του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός κατάλληλου συστήματος ελέγχου [3].

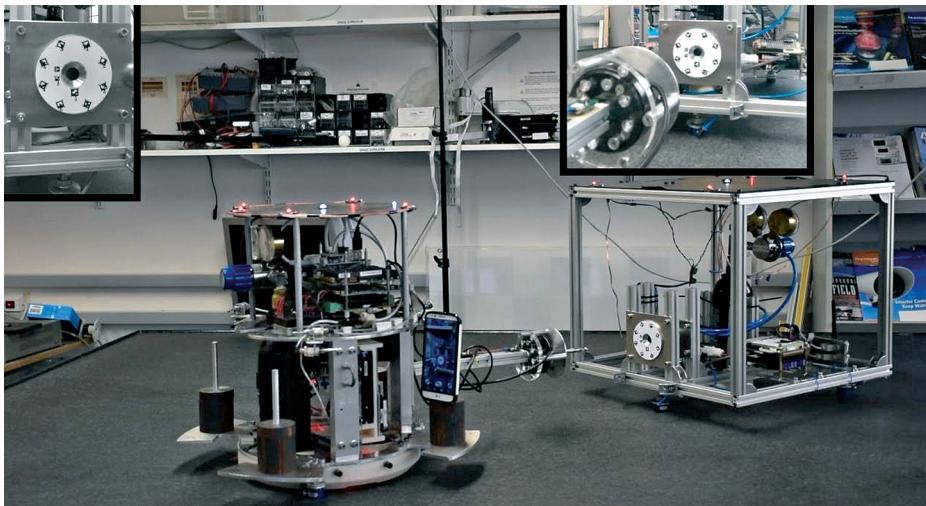
Για την επίτευξη εργασιών με μεγάλη ακρίβεια, απαιτούνται συστήματα αυτομάτου ελέγχου που εκμεταλλεύονται τη γνώση των παραμέτρων του συστήματος. Αυτές όμως μπορεί να αλλάξουν ή να είναι άγνωστες (π.χ. μπορεί να έχει συλληφθεί δορυφόρος ή άλλο αντικείμενο με άγνωστες παραμέτρους).

Έχουν αναπτυχθεί, λοιπόν, μέθοδοι αναγνώρισης παραμέτρων που βασίζονται στη διατήρηση της στροφορομής των ΕΑΔΡΣ, οι οποίες δεν είναι ευάσθιτες στο θόρυβο των μετρήσεων από αισθητήρες, αφού κατά την εφαρμογή τους δεν απαιτείται μέτρηση των επιταχύνσεων του δορυφόρου-βάσης και των αρθρώσεων του βραχίονα οι οποίες περιέχουν σημαντικό θόρυβο.

Αντίστοιχα, για την εκτίμηση των παραμέτρων που περιγράφουν τις ευκαμψίες των αρθρώσεων των διαστημικών ρομποτικών συστημάτων, έχει αναπτυχθεί μια μέθοδος η οποία βασίζεται στην εφαρμογή του ισοζυγίου ενέργειας [4].

■ Συνεργατικός Χειρισμός Παθητικού Σώματος από Πλήθος Ρομπότ με Βραχίονες

Στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου ερευνάται επίσης ο συνεργατικός χειρισμός παθητικού συστήματος από



ΕΙΚΟΝΑ 2: Πείραμα πρόσβεσης του ενεργητικού ρομπότ (αριστερά) στο παθητικό σώμα (δεξιά) στον διαστημικό εξομοιωτή, στο πλαίσιο του έργου ASSIST της European Space Agency (ESA).

πλήθος αυτόνομων διαστημικών ρομποτικών συστημάτων με βραχίονες, με εφαρμογή σε διεργασίες όπως είναι τροχιακές κατασκευές και διαχείριση τροχιακών απορροφών. Συγκεκριμένα, έχουν αναπτυχθεί τροσιδιάστατα μοντέλα τριών διαστημικών ρομποτικών συστημάτων με έναν ή περισσότερους βραχίονες και ο σχεδιασμός του ελέγχου ενός παθητικού σώματος μέσω αυτών.

Για τη εφαρμογή του συστήματος ελέγχου λήφθηκαν υπόψη ρεαλιστικοί περιορισμοί, όπως ο κορεσμός των κινητήρων των σφραγίδων ανάδρασης και η διακοπήμενη λειτουργία (εντός - εκτός) των προωθητήρων. Η σχετική θέση και ο προσανατολισμός μεταξύ παθητικού σώματος και των βάσεων των διαστημικών ρομποτικών συστημάτων ελέγχονται από τους σφραγίδους ανάδρασης και τους προωθητήρες, κρατώντας το όλο σύστημα μέσα στα δραγματικά του χώρου εργασίας του κάθε βραχίονα.

Επιπρόσθετα, μελετήθηκε η ευαισθησία του νόμου ελέγχου που αναπτύχθηκε σε αβεβαιότητα δυναμικών και κινηματικών παραμέτρων του παθητικού σώματος, πράγμα ιδιαίτερης σημασίας, ειδικά στην περίπτωση διαχείρισης τροχιακών απορροφών με αβέβαιες δυναμικές ιδιότητες.

Τέλος, μελετήθηκαν τόσο η δυνατότητα χρήσης ενός μεγάλου ρομποτικού εξυπηρετητή σε αντιδιαστολή με τη χρήση πολλών μικρότερων [8], όσο και οι δυνατότητες ή περιορισμοί κίνησης του παθητικού σώματος, όταν οι προωθητήρες των ρομποτικών εξυπηρετήσεων είναι ανενεργοί.

■ Εξομοιωτής διαστημικών ρομπότ (space robotic emulator [SRE])

Στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου είχει αναπτυχθεί ένας προηγμένος εξο-

μιωτής διαστημικών ρομπότ που κινούνται στο επίπεδο, και ο οποίος προσσυμοιώνει συνθήκες έλλειψης βαρούτης στη Γη. Ο εξομοιωτής αποτελείται από μία τράπεζα γρανίτη, δύο ρομπότ και ένα παθητικό σύστημα.

Στο ΕΑΕ έχει αναπτυχθεί ένας προηγμένος εξομοιωτής διαστημικών ρομπότ, ο οποίος προσομοιώνει συνθήκες έλλειψης βαρούτης στη Γη.

Η τράπεζα, βάρους 4 τόνων, είναι εξαιρετικά λεία, και τα προαναφερθέντα συστήματα (που φέρουν μικρή φιάλη με διοξείδιο του άνθρακα) μπορούν να αιωρούνται πάνω σε αυτήν σε απόσταση περίπου ίση με 0,01 χιλιοστά.

Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στα αεροστατικά έδρανα από πορώδη γραφίτη που διαθέτουν τα ρομπότ, και τα οποία δημιουργούν ένα φίλμ αερίου διοξειδίου του άνθρακα ανάμεσα σε αυτά και την τράπεζα.

Τα ρομπότ κινούνται με τη βιοήθεια μικροσκοπικών προωθητήρων που τροφοδοτούνται επίσης με διοξείδιο

του άνθρακα. Η ροή του αερίου σε αυτά δεν είναι συνεχής αλλά διακοπτόμενη (on-off thrusters), προσομοιώνοντας τους αντίστοιχους προωθητήρες των πραγματικών συστημάτων σε τροχιά.

Επίσης, για την καλύτερη εξομοιώση των διαστημικών οχημάτων, τα ρομποτικά συστήματα στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου διαθέτουν σφόνδυλο αντίδρασης για την εκτέλεση περιστροφικής κίνησης με ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή χωρίς να χρησιμοποιείται πολύτιμο αέριο, μια και τόσο στο διάστημα όσο και στο Εργαστήριο, τα διαθέσιμα καύσιμα είναι περιορισμένα.

Επίσης τα ρομποτικά συστήματα διαθέτουν δύο βραχίονες τριών συνδέσμων που είναι εφοδιασμένοι με αρπάγη για σύλληψη αντικειμένων ή άλλες εργασίες. Τα ρομπότ είναι αυτόνομα από άποψη ισχύος, διότι λειτουργούν με μιταρδίες αλλά και υπολογιστικά, αφού περιλαμβάνουν έναν πλήρη ενσωματωμένο υπολογιστή.

Επιπλέον, με χρήση του λογισμικού ROS, ελέγχεται η κίνηση της βάσης του ρομπότ και των βραχιόνων του, καθώς και η δύναμη στις αρπάγες. Τέλος, για να γνωρίζει ο υπολογιστής τη θέση και τον προσανατολισμό των αιωρούμενων συστημάτων, χρησιμοποιείται ένα σύστημα καταγραφής κίνησης Phace Space.

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί 8 κάμερες τοποθετημένες γύρω από την τράπεζα, οι οποίες παρακολουθούν διατάξεις από LED που είναι προσαρμοσμένες πάνω στα ρομπότ.

■ Ερευνητικά προγράμματα Διαστημικής-Τροχιακής Ρομποτικής

Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου έχουν ολοκληρωθεί πλήθος από ερευνητικά προγράμματα, τα οποία από τα οποία είναι τα ακόλουθα:

■ hArmonised System Study on Interfaces and Standardisation of fuel Transfer (ASSIST):

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ESA), σε συνεργασία με Ευρωπαίους κατασκευαστές

■ Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου (ΕΑΕ) της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών (ΣΜΜ) του ΕΜΠ, με επικεφαλής τον καθηγητή κ. Ευάγγελο Παπαδόπουλο, επικεντρώνει την ερευνητική του δραστηριότητα στην περιοχή του Αυτομάτου Ελέγχου, της Ρομποτικής και της Μηχανοτροπικής.

Το Εργαστήριο έχει ιδιαιτέρως δυναμική παρουσία διεθνώς, τόσο στην εκπόνηση ανταγωνιστικών ερευνητικών έργων, όσο και σε δημοσιεύσεις σε έγκριτα διεθνή περιοδικά και συνέδρια.

Το Εργαστήριο είναι εξοπλισμένο με τηλερομποτικά, τετράποδα, εξάποδα, σερβούδραυλικά

και υποβρύχια ρομπότ, με εξομοιωτή διαστημικών ρομπότ σε τροχιά, καθώς επίσης με εργαλειομηχανές, δικτυα υπολογιστών, εργαλεία ανάπτυξης, εξειλιγμένα μετρητικά συστήματα και εξειδικευμένο πλογισμικό, και διαθέτει βασικό εργαστηριακό μηχανολογικό, πλεκτρικό και πλεκτρονικό εξοπλισμό. Το ΕΑΕ έχει μεταξύ άλλων ολοκληρώσει τα τελευταία δώδεκα χρόνια τον έλεγχο διαφόρων ρομπότ, με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και διαφορετικούς στόχους.

Το Εργαστήριο στεγάζεται στο κτίριο «Μ» της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

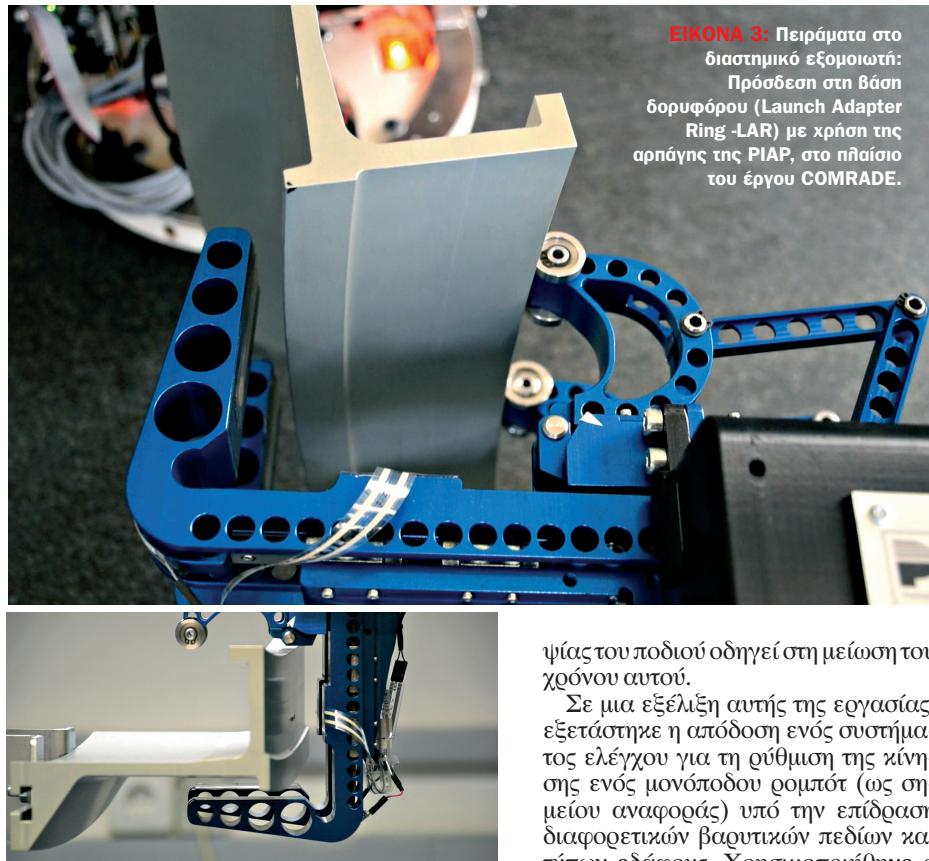
δορυφόρων, αποφάσισε –χρηματοδοτώντας την εν λόγω δραστηριότητα– να σχεδιάσει και να προωθήσει τυποποιημένες διατάξεις ανεφοδιασμού που μπορούν να εγκατασταθούν στις σημερινές ευρωπαϊκές δορυφορικές πλατφόρμες, για να μπορούν να χορηγοποιηθούν στο μέλλον. Ο ανεφοδιασμός σε ένα δορυφόρο είναι από τις πλέον χρήσιμες διαδικασίες συντήρησης, εφόσον ο χωριότερος λόγος διακοπής της λειτουργίας πλήθους δορυφορικών συστημάτων είναι η εξάντληση του καυσίμου τους.

Στα πλαίσια του έργου, το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου συμμετείχε στο σχεδιασμό του παθητικού τμήματος και του μηχανισμού για την πρόσδεση του ενεργητικού ρομπότ στο παθητικό σύστημα. Η ομάδα του Εργαστηρίου ήταν υπεύθυνη για το σχεδιασμό και την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών της λειτουργίας του μηχανισμού στο διαστημικό εξομοιωτή του εργαστηρίου (βλ. εικ. 1).

Ο μηχανισμός πρόσδεσης αποτελείται από μικρό πρόβολο (probe) με στοιχεία παθητικών ευκαμψιών που είναι προσδεδεμένος στο ενεργητικό ρομποτικό σύστημα, και από την κοιλότητα (drogue) η οποία είναι προσαρμοσμένη στο παθητικό σύστημα (δηλαδή στον προς εξυπηρέτηση δορυφόρο). Τα πειράματα εξέτασαν τη λειτουργικότητα του μηχανισμού για διάφορες συνθήκες πρόσκρουσης (σημείο, γωνία και ταχύτητα), παρέχοντας πολύτιμα συμπεράσματα τόσο για την απόδοση της διάταξης όσο και για πιθανές βελτιώσεις.

■ Control Management of Robotics Active Debris Removal (COMRADE): Το εν λόγῳ έργο, το οποίο επίσης χορηματοδοτήθηκε από την ESA, εστίαζε στον έλεγχο της βάσης του διαστημικού ρομποτικού συστήματος, σε συνδυασμό με τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα για τη σύλληψη και τη σταθεροποίηση του στόχου, με τελικό σκοπό την ελεγχόμενη έξοδο του στόχου από το τροχιακό περιβάλλον (de-orbiting).

Στο πλαίσιο του έργου έγιναν στον διαστημικό εξομοιωτή του Εργαστηρίου πειράματα για σύλληψη ενός παθητικού ομοιώματος (mock-up) πραγματικού τμήματος ανενεργού δορυφόρου, καθώς και για πρόσδεση (docking) του ρομποτικού συστήματος σε αυτό (βλ. εικ. 2). Η πρόσδεση έγινε με χρήση της ρομποτικής αρπάγης (gripper) της πολωνικής εταιρείας PIAP, ενώ δοκιμάστηκαν πλήθος συνθηκών επαφής, όπως γωνιακή ή γραμμική απόκλιση (offset) και σχετική ταχύτητα, παρέχοντας εξαιρετικά χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις δυνατότητες χρήσης της συγκεκριμένης αρπάγης σε τέτοιου είδους διεργασίες.



Η ESA ασχολείται με τα συστήματα που φέρουν δύο, τρία ή και περισσότερα πόδια και κινούνται σε ασυνεχές έδαφος.

■ Βηματισμοί σε διαστημικά περιβάλλοντα (Space Gaits)

Για την εξερεύνηση σε διαστημικά εδάφη, εκτός από τα συνηθισμένα οχήματα με τροχούς (όπως είναι τα γνωστά Pathfinder, Spirit & Opportunity και Curiosity της NASA), υπάρχει συνεχής έρευνα για συστήματα με δύο, τέσσερα ή και περισσότερα πόδια, τα οποία μπορούν να κινούνται σε ασυνεχές έδαφος και να υπερπηδούν με ευέλικτο τρόπο εμπόδια. Ανάμεσα στις διαστημικές υπηρεσίες που ασχολούνται με αυτά τα συστήματα είναι και η ESA.

Ο στόχος του έργου «ACT Ariadna: Space Gaits» ήταν να γίνει συστηματική χρήση διαγραμμάτων Hildebrand για να αναλύθει η κίνηση αυτών των ρομπότ (βηματισμός) όπως προκύπτει από μια διαδικασία βελτιστοποίησης, προκειμένου να εξακριβωθεί ο τρόπος επίδρασης παραμέτρων όπως είναι η βαρύτητα και ο τύπος εδάφους. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η αύξηση της τιμής της βαρυτικής έλξης οδηγεί στην αύξηση του χρόνου που βρίσκονται τα πόδια στο έδαφος, όπως και το ότι η αύξηση της τιμής δυσκαρι-

ΕΙΚΟΝΑ 3: Πειράματα στο διαστημικό εξομοιωτή: Πρόσδεση στη βάση δορυφόρου (Launch Adapter Ring -LAR) με χρόνο της αράγης της PIAP, στο πλαίσιο του έργου COMRADE.

ψίας του ποδιού οδηγεί στη μείωση του χρόνου αυτού.

Σε μια εξέλιξη αυτής της εργασίας, εξετάστηκε η απόδοση ενός συστήματος ελέγχου για τη ρύθμιση της κίνησης ενός μονόποδου ρομπότ (ως οπιέου αναφοράς) υπό την επίδραση διαφορετικών βαρυτικών πεδίων και τύπων εδάφους. Χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης κόστους μεταφοράς (CoT) για να συχετιστεί η ενεργειακή απόδοση του ελεγκτή και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα, που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό των συστημάτων με πόδια για την εξερεύνηση του διαστήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] Nanos, K., and Papadopoulos, E., "On the Dynamics and Control of Free-floating Space Manipulator Systems in the Presence of Angular Momentum," *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 4, Article 26, June 2017.
- [2] Nanos, K., and Papadopoulos, E., "Avoiding Dynamic Singularities in Cartesian Motions of Free-floating Manipulators," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (TAES)*, Vol. 51, No. 3, July 2015, pp. 2305 – 2318.
- [3] Nanos, K., and Papadopoulos, E., "On the Dynamics and Control of Flexible Joint Space Manipulators," *IFAC Control Engineering Practice (CEP)*, Vol. 45, December 2015, pp. 230 – 243.
- [4] Nanos, K., and Papadopoulos, E., "On the Parameter Estimation of Space Manipulator Systems with Flexible Joints Using the Energy Balance," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '19)*, Montreal, Canada, May 20-24, 2019.

*Οι συγγραφείς συνεργάζονται με το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, όπου οι κ. Γεώργιος Ρεκλείτης, Ιωσήφ Παρασκεύας και Κωνσταντίνος Νάνος είναι δρ. μηχανικοί και μεταδιδακτορικοί ερευνητές, η κ. Όλγα-Ορασία Χροντίδη-Λουμπαράση είναι διπλωματούχος μηχανολόγος μηχανικός και υποψήφια διδάκτωρ, ενώ ο κ. Ευάγγελος Παπαδόπουλος είναι καθηγητής.