



ΦΩΤΟ 1. Εξάποδο υποθαλάσσιο σερβοϋδραυλικό ρομπότ HexaTerra σε πειράματα σε στεγνό χώρο (ΕΑΕ, ΣΜΜ του ΕΜΠ, 2016).

Σερβοϋδραυλικά συστήματα και ρομποτική τεχνολογία

Τεχνικό άρθρο Η υδραυλική τεχνολογία (ετυμολογείται από το ύδωρ και αυλός) ήταν από τις πρώτες που αναπτύχθηκαν κατά τη διαδρομή του ανθρώπινου πολιτισμού. Πράγματι, ο άνθρωπος αντλούσε ωφέλιμο έργο από κινούμενα ή υπό πίεση ρευστά πολλούς αιώνες πριν διατυπωθούν οι νόμοι στους οποίους στηρίζεται η σύγχρονη τεχνολογία υδραυλικής ενέργειας.

ΤΩΝ κ. ΙΩΑΝΝΗ ΝΤΑΒΛΙΑΚΟΥ
ΚΑΙ ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ*

Οι απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής, και ιδίως των σαράντα περίπου τελευταίων χρόνων, έχουν επιβάλει ραγδαίους ρυθμούς στην ανάπτυξη της τεχνολογίας στην περιοχή των σερβοϋδραυλικών συστημάτων. Ως αποτέλεσμα, εμφανίσθηκε ένας νέος τεχνολογικός κλάδος, η Υδροτρονική (Hydrotronics). Η εντυπωσιακή αυτή εξέλιξη οφείλεται κυρίως στη συνεισφορά των υπολογιστών, των μικροϋπολογιστών, των συστημάτων επικοινωνίας και των ψηφιακών συστημάτων γενικότερα.

Με τον όρο «σερβοϋδραυλικό σύστημα» εννοείται κάθε διάταξη ή εγκατάσταση της οποίας τα βασικά δομικά συστατικά της αποτελούνται από υδραυλικά υποσυστήματα, τα οποία λειτουργούν βάσει εντολών αυτόματου ελέγχου. Η επιστήμη των σερβοϋδραυλικών συστημάτων βασίζεται σε καλά ορισμένες αρχές και βρίσκει εφαρμογή σε ευρύτατα πεδία, όπως είναι η αυτοκινητο-

βιομηχανία, οι τηλεπικοινωνίες, τα ενεργειακά συστήματα, η αεροναυπηγική και διαστημική τεχνολογία, η βιομηχανία, η βιοϊατρική, η ρομποτική κλπ.

Ένα σερβοϋδραυλικό σύστημα αποτελείται από μία ηλεκτροϋδραυλική μονάδα τροφοδοσίας και ένα σερβομηχανισμό. Μια συνήθης ηλεκτροϋδραυλική μονάδα περιλαμβάνει έναν ηλεκτροκινητήρα, υδραυλική ή υδραυλικές αντλίες σταθερής πίεσης, έναν υδραυλικό αποταμιευτή ενέργειας αδρανούς αερίου σταθερής πίεσης (συσσωρευτή), έναν εναλλάκτη θερμότητας, ένα ελαιοδοχείο και άλλα υδραυλικά ή μηχανικά βοηθητικά εξαρτήματα, όπως είναι ασφαλιστικές και εκπονοτικές βαλβίδες, φίλτρα ελαίου, σωληνώσεις κ.ά. Ο σερβομηχανισμός αποτελεί μία διάταξη που περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους υδραυλικούς επενεργητές (υδραυλικούς κινητήρες ή υδραυλικά έμβολα), σερβοβαλβίδες και μηχανικά φορτία.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρία παραδείγματα σερβοϋδραυλικών συστημάτων που έχουν αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών.

■ Σερβοϋδραυλικό σύστημα με επενεργητή διπλής ενέργειας

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται ένα σερβοϋδραυλικό σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας, του οποίου η μελέτη και ο σχεδιασμός βασίστηκε σε μεθοδολογία βελτιστοποίησης, με κριτήρια τη σταθμισμένη ελαχιστοποίηση της ισχύος, του βάρους και του κόστους κατασκευής του. Στην **εικόνα 1** διακρίνονται ο σερβομηχανισμός και η ηλεκτροϋδραυλική μονάδα παροχής ισχύος. Ο σερβομηχανισμός αποτελείται από έναν επενεργητή (υδραυλικό έμβολο) διπλής ενέργειας, ο οποίος είναι κατάλληλα προσαρτημένος σε σύστημα μετακίνησης ωφέλιμου φορτίου, δομής κλειστής ρομποτικής κινηματικής αλυσίδας.

Ο επενεργητής οδηγείται από μία σερβοβαλβίδα τεσσάρων διαδρομών, υψηλής απόδοσης, εύρους συχνότητας 100 Hz. Το σύστημα αυτό κατασκευάστηκε προκειμένου να μελετηθεί ο σχεδιασμός και ο έλεγχος ενός παράλληλου ρομποτικού μηχανισμού, τύπου Stewart (βλ. **σχήμα 1**), βασικά στοιχεία του οποίου είναι μία σταθερή βάση, μία κινούμενη πλατφόρμα και έξι πρισματικοί και μεταβαλλόμενο μήκους σύνδεσμοι (υδραυλικοί επενεργητές), οι οποίοι συνδέουν τη σταθερή βάση με την πλατφόρμα μέσω μηχανικών αρθρώσεων.

Τέτοια συστήματα έχουν γίνει ευρέως γνωστά και απαντώνται πλέον συχνά σε ποικίλες εφαρμογές, όπως στην ιατρική, στη βιομηχανία, σε αμυντικά συστήματα, σε εξομοιώσεις οχημάτων βαρέος τύπου και αυξημένων απαιτήσεων (π.χ. για φορητά, τρένα, υποβρύχια, ελικόπτερα, αεροσκάφη, άρματα μάχης κλπ.), στην έρευνα (π.χ. ρομποτική), στις εφαρμοσμένες επιστήμες (στον αντισεισμικό σχεδιασμό προστασίας, στις ανιψωτικές μηχανές κλπ.), σε δραστηριότητες τέχνης και ψυχαγωγίας κ.α.



(α)



(β)

ΕΙΚΟΝΑ 1: Σερβοϋδραυλικό σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας, με επενεργητή διπλής ενέργειας: α) Σερβομηχανισμός και οδηγούμενο φορτίο, β) ηλεκτροϋδραυλική μονάδα παροχής ισχύος.

Η βασική μελέτη και η έρευνα του σερβοϋδραυλικού συστήματος της εικόνας 1 περιλάμβανε την αναγνώριση των παραμέτρων του συστήματος (π.χ. μάζες, αδράνειες, τριβή, υδραυλικές παραμέτρους κ.ά.), τη μοντελοποίηση της σερβοβαλβίδας, την υλοποίηση μη

κής κινηματικής αλυσίδας- βραχιόνων master-slave της SARCOS, οι οποίοι κινούνται με τη βοήθεια ειδικών υδραυλικών κινητήρων και μίνι σερβοβαλβίδων τύπου jet-ripe (βλ. **εικόνα 2**). Η κινηματική των δύο βραχιόνων βασίζεται σε αυτή του δεξιού ανθρώπινου χεριού. Ο βραχίονας master είναι ένας εξωσκελετικός βραχίονας δέκα βαθμών ελευθερίας (επτά βαθμοί ελευθερίας ανθρώπινου χεριού και τρία δάκτυλα), με ανάδραση δυνάμεων, ο οποίος χρησιμοποιείται ως εντολέας του βραχίονα slave (υπηρετή, επίσης δέκα βαθμών ελευθερίας), με αισθητήρες θέσης και ροπής. Ο χειριστής μπορεί να κινεί τον βραχίονα-υπηρετή και να αισθάνεται υπό κλίμακα –μέσω ανάδρασης δυνάμεων– τα φορτία ή τις αντιστάσεις που εφαρμόζονται σε αυτόν. Οι εφαρμογές ενός τέτοιου σερβοϋδραυλικού συστήματος εντοπίζονται στην ιατρική (τηλερομποτική χειρουργική), στη διαστημική τεχνολογία, στην άμυνα (πολλαπλασιαστής δύναμης), στους πυρηνικούς σταθμούς (λόγω της δύσκολης πρόσβασης από άνθρωπο) κ.α.

Η μελέτη και η έρευνα του συστήματος αυτού επικεντρώθηκε στην αναγνώριση παραμέτρων του συστήματος και στον έλεγχο του βραχίονα-υπηρετή, με δυνατότητα αντιστάθμισης των ροπών βαρύτητας. Ο έλεγχος υλοποιήθηκε με δύο τρόπους: μέσω υπολογιστή σε πραγματικό χρόνο, αλλά και με

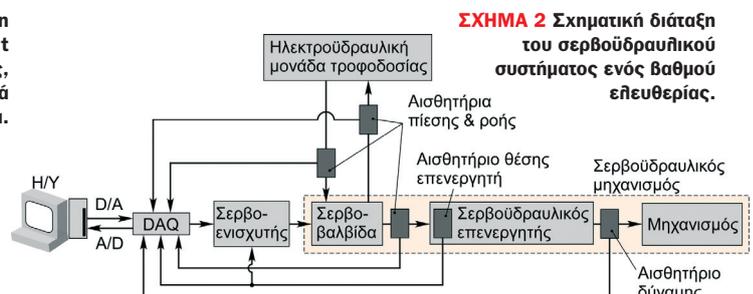
Στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ έχουν αναπτυχθεί τρία σερβοϋδραυλικά συστήματα

γραμμικών νόμων ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, βασισμένων στη μοντέρνα θεωρία αυτομάτου ελέγχου, και την ψηφιακή επεξεργασία σήματος από τα επιμέρους υποσυστήματα (αισθητήρες δύναμης, πίεσης, ροής, φίλτρα κλπ.).

Για την υλοποίηση του ελέγχου, ο επενεργητής επιλέχθηκε έτσι ώστε να ενσωματώνει ένα μαγνητοσυστολικό αισθητήριο θέσης (built in analog magnetostrictive transducer LVDT/MTS), το οποίο παρέχει ανάδραση θέσης του εμβόλου. Η σχηματική διάταξη του σερβοϋδραυλικού συστήματος εικονίζεται στο **σχήμα 2**.

■ Ρομποτικό σύστημα SARCOS

Άλλο ένα σερβοϋδραυλικό σύστημα του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου είναι το ρομποτικό σύστημα SARCOS. Πρόκειται για ένα τηλερομποτικό σύστημα δύο όμοιων –ανοικτής ρομποτι-





ΕΙΚΟΝΑ 2 Τηλερομποτικό σύστημα master-slave της SARCOS.

τη χρήση του βραχίονα-εντολέα.

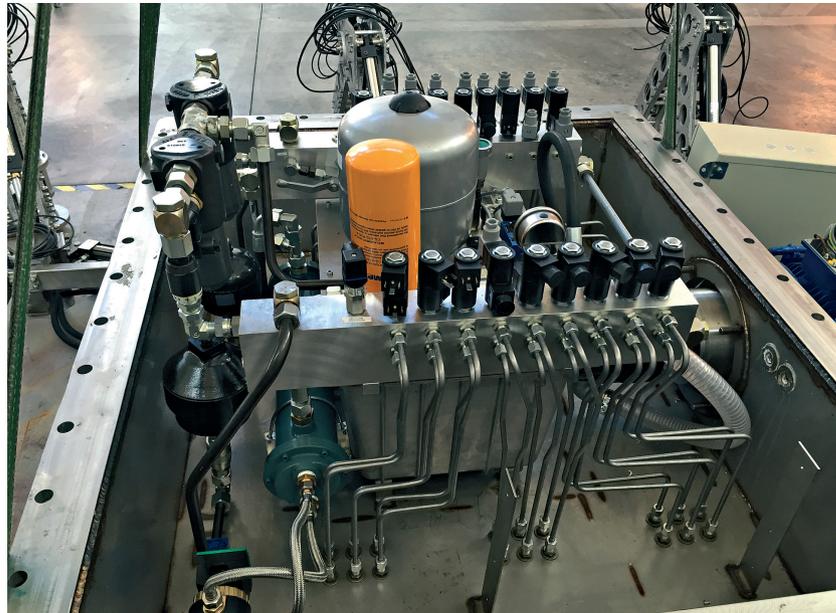
Για την υλοποίηση του ελέγχου σχεδιάστηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο του βραχίονα-υπηρέτη, σε κατάλληλο λογισμικό περιβάλλον, βάσει του οποίου δημιουργήθηκε μια προσομοίωση ικανή να υπολογίζει τις ροπές που αναπτύσσονται στις αρθρώσεις κατά την κίνηση του βραχίονα ή την παραμονή του σε κάποια θέση.

■ Υποθαλάσσιο σερβουδραυλικό ρομποτικό σύστημα HexaTerra

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένα παράδειγμα σερβουδραυλικού ρομποτικού συστήματος που ανήκει στην κατηγορία των συστημάτων αυτοματισμού της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης. Πρόκειται για ένα εξάποδο ρομπότ με υδραυλικές οδηγίες (HexaTerra), το μηχανολογικό και ηλεκτροϋδραυλικό σύστημα του οποίου μελετήθηκε, κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε από την ομάδα του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (βλ. **φωτό 1**).

Οι διαστάσεις του ρομπότ είναι 2m x 3m x 2m (μήκος / πλάτος / μέγιστο ύψος) και χαρακτηρίζεται από 18 βαθμούς ελευθερίας (τρεις για κάθε πόδι), καθένas από τους οποίους υποστηρίζεται από έναν υδραυλικό επενεργητή (έμβολα διπλής δράσης). Το ρομποτικό αυτό εξάποδο προορίζεται για υποθαλάσσιες δραστηριότητες υψηλού βαθμού δυσκολίας. Συγκεκριμένα, το ρομπότ μπορεί να φέρει κατάλληλο εξοπλισμό εκσκαφικού τύπου, ενώ κατασκευάστηκε έτσι ώστε να ποντίζεται σε απόκορμνες ακτές, με σκοπό να ανοίγει ανάλκια και να τοποθετεί καλώδια ισχύος προερχόμενα από ανεμογεννήτριες στη θάλασσα, κάτι που δεν μπορούν να κάνουν τα υπάρχοντα ερυστριόφορα οχήματα.

Ο σχεδιασμός του ρομπότ πραγματοποιήθηκε με χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης, σύμφωνα με τις οποίες προσδιορίστηκαν οι διαστάσεις και οι βασικές κατασκευαστικές παράμετροι (π.χ. κυρίως σώμα, πόδια με γόνα-



ΕΙΚΟΝΑ 3 Τροφοδοτικό υδραυλικής ισχύος του σερβουδραυλικού ρομπότ HexaTerra.

Το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου αναμένεται να επεκτείνει την έρευνά του και σε κινούμενα ρομπότ με πόδια.

το και πέλμα κ.ά.). Ο βηματισμός, η ευστάθεια και η δυναμική ισορροπία του ρομπότ μελετήθηκαν έτσι ώστε να προβλέπονται τα πιο δυσμενή σενάρια κίνησής του (π.χ. τρίποδος βηματισμός, απότομη αλλαγή κλίσης σε δύο επίπεδα, υψηλά εμπόδια, ισχυρά θαλάσσια ρεύματα κλπ.). Οι ταχύτητες που μπορεί να αναπτύξει το ρομπότ είναι της τάξης του 0,5 m/s.

Το τροφοδοτικό υδραυλικής ισχύος τοποθετήθηκε βάσει χωροτάξιμου σχεδιασμού, με απολύτως στεγανό τρόπο, μέσα στο κυρίως σώμα του ρομπότ. Η στεγανότητά του πιστοποιήθηκε ύστερα από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε δεξαμενή μεγάλων διαστάσεων του ΕΜΠ. Τα υδραυλικά δομικά στοιχεία επιλέχθηκαν με βάση την κινηματική και δυνα-



ΕΙΚΟΝΑ 4 Μία από τις δύο συστοιχίες αναπολικών βαλβίδων τεσσάρων διαδρομών και τριών θέσεων του ηλεκτροϋδραυλικού ρομπότ HexaTerra.

μική ανάλυση του ρομποτικού μηχανισμού, από τυπικά σενάρια κίνησής του. Τα κύρια εξαρτήματα του τροφοδοτικού υδραυλικής ισχύος είναι ένας επαγωγικός 3Φ κινητήρας στεγανού τύπου ισχύος 4 kW, μία εμβολοφόρα υδραυλική αντλία σταθερής πίεσης ρυθμιζόμενη στα 110 bar λειτουργίας, ένα δοχείο λαδιού 40 L, δύο υδραυλικοί συσσωρευτές αζώτου χωρητικότητας 0,7 λίτρων και ένα σύστημα απαγωγής της θερμότητας τόσο του υδραυλικού μέσου όσο και του κλειστού χώρου του σώματος του ρομπότ (βλ. **εικόνα 3**). Προκειμένου ο κινητήρας να ψύχεται με επάρκεια, τοποθετήθηκε

■ 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 Μηχανοτρονικής.

Το Εργαστήριο έχει ιδιαίτερες 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, σερβουδραυλικά

και υποβρύχια ρομπότ, με εξομοιωτή διαστημικών ρομπότ σε τροχιά, καθώς επίσης με εργαλειομηχανές, δίκτυα υπολογιστών, εργαλεία ανάπτυξης, εξειλιγμένα μετρικά συστήματα και εξειδικευμένο λογισμικό, και διαθέτει βασικό εργαστηριακό μηχανολογικό, ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό 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.

εξωτερικά από το κυρίως σώμα, έτσι ώστε να βρίσκεται σε επαφή με το νερό και να ψύχεται από αυτό.

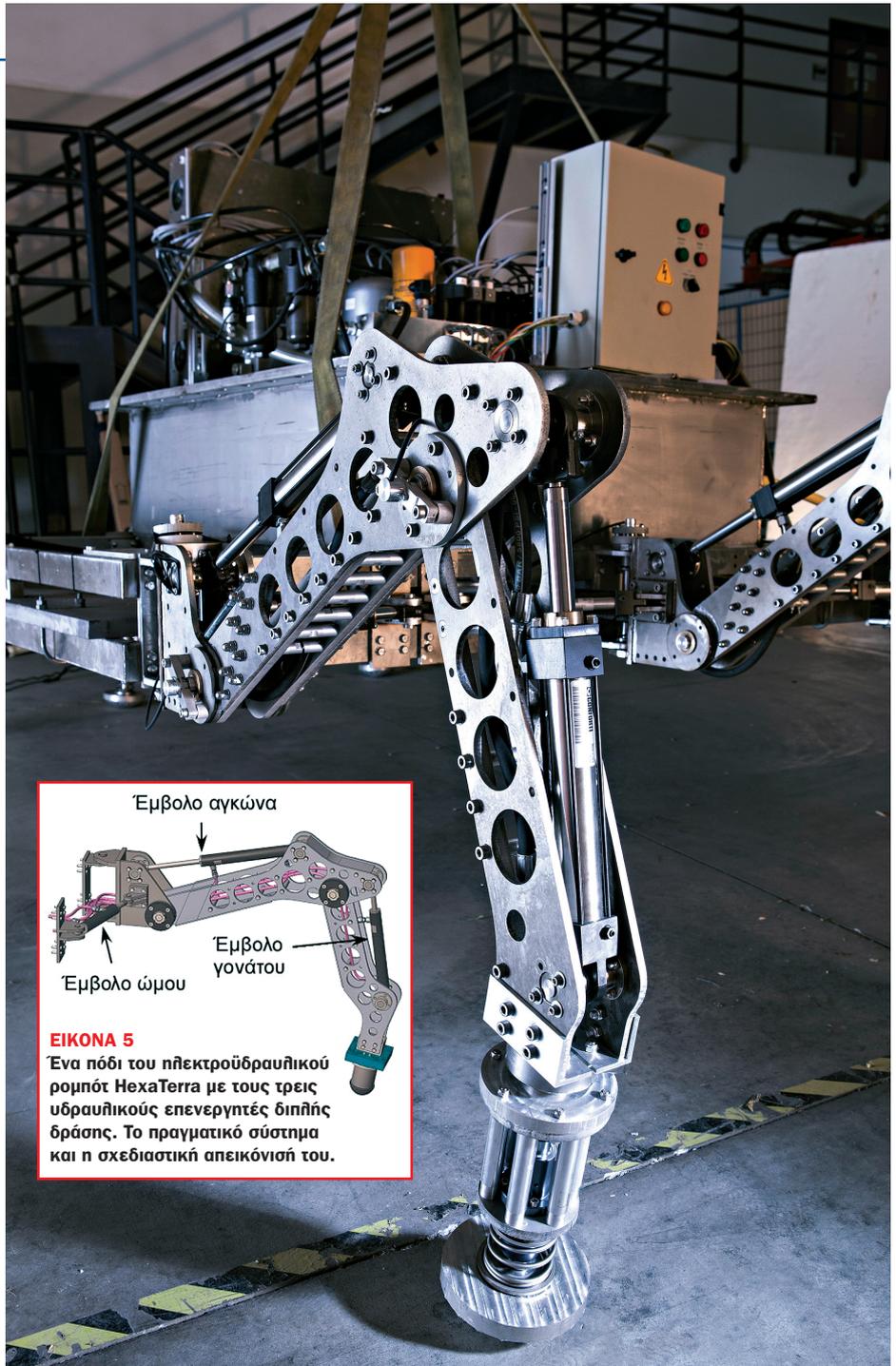
Ο ηλεκτροϋδραυλικός σερβομηχανισμός αποτελείται από 18 αναλογικές βαλβίδες (proportional valves) και ισάριθμους υδραυλικούς επενεργητές (υδραυλικά έμβολα) διπλής δράσης. Οι αναλογικές βαλβίδες είναι υψηλής απόκρισης, 4 διαδρομών και 3 θέσεων, και τοποθετήθηκαν συμμετρικά, εκατέρωθεν του υδραυλικού τροφοδοτικού, εντός του στεγανού σώματος του ρομπότ, σε δύο όμοιους χαλύβδινους διανεμητές (manifolds) κατασκευασμένους κατά ειδική παραγγελία (βλ. **εικόνα 4**). Πάνω στους χαλύβδινους διανεμητές τοποθετήθηκαν κατάλληλα και οι υδραυλικοί συσσωρευτές αζώτου. Οι υδραυλικοί επενεργητές είναι στεγανού τύπου και ενσωματώνονται στα πόδια του ρομπότ (τρεις ανά πόδι), όπως φαίνεται στην **εικόνα 5**.

Ο αυτόματος έλεγχος του ρομπότ βασίζεται στο μοντέλο του συστήματος (model based controller), με εμφωλευμένη δομή ελεγκτή τύπου PID για κάθε βαθμό ελευθερίας, ενώ όλοι οι κώδικες ελέγχου, καθώς και η ανάκτηση δεδομένων από τα αισθητήρια όργανα, επικοινωνούν με λογισμικό πραγματικού χρόνου που αναπτύχθηκε από την εταιρεία «Inpora».

Όλα τα ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα του συστήματος ελέγχου είναι τοποθετημένα εντός του σώματος του ρομπότ, σε ειδικά προστατευμένο περιβάλλον από την υγρασία αλλά και από μία πιθανή διαρροή του υδραυλικού μέσου. Για την κίνηση του ρομπότ αναπτύχθηκαν ειδικοί αλγόριθμοι που βασίζονται στη μεγιστοποίηση της ευστάθειάς του για κάθε επιθυμητή ταχύτητα, παρουσία διαταραχών (π.χ. από υποθαλάσσια ρεύματα).

Το Εργαστήριο Αυτόματου Ελέγχου (ΕΑΕ) της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ επεκτείνει την ερευνητική του δραστηριότητα στο πεδίο των σερβοϋδραυλικών συστημάτων και σε άλλες ρομποτικές εφαρμογές, όπως σε κινούμενα ρομπότ με πόδια κ.ά. Στο μέλλον, υπάρχει η προσδοκία πως η εμπειρία και η συμβολή του ΕΑΕ στο χώρο της εφαρμοσμένης έρευνας στη ρομποτική και στον αυτόματο έλεγχο σερβοϋδραυλικών συστημάτων θα επεκταθεί με επιτυχία και στο χώρο της βιομηχανίας και των βιομηχανικών σερβομηχανισμών. ■

* Ο κ. Ιωάννης Νταβλιάκος είναι διδάκτορας και μέλος του ειδικού διδακτικού προσωπικού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ενώ ο κ. Ευάγγελος Παπαδόπουλος είναι διδάκτορας και καθηγητής στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Αμφότεροι είναι στελέχη του Εργαστηρίου Αυτόματου Ελέγχου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



ΕΙΚΟΝΑ 5
Ένα πόδι του ηλεκτροϋδραυλικού ρομπότ HexaTerra με τους τρεις υδραυλικούς επενεργητές διπλής δράσης. Το πραγματικό σύστημα και η σχεδιαστική απεικόνισή του.

Βιβλιογραφία

1. Papadopoulos, E., and Davliakos, I., & A Systematic Methodology for Optimal Component Selection of Electrohydraulic Servosystems, & International Journal of Fluid Power, Vol. 5, No. 2, 2004, pp. 15-24.
2. Davliakos, I., and Papadopoulos, E., & Model Based Control of the 6-dof Electrohydraulic Gough-Stewart Platform, & Mechanisms and Machine Theory, Vol. 43, No. 11, 2008, pp. 1385-1400.
3. Fraczek J., Wojtyra M, Davliakos I., Papadopoulos E., & Simulational Study of a Hydraulically Driven Parallel Manipulator Control System, & Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 15, No. 1, 2008, pp. 51-67.
4. Davliakos, I., and Papadopoulos, E., & Invariant Error Dynamics Controller for a 6-dof Electrohydraulic Stewart Platform, & Proc. 6th CISM/IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control, (ROMANSY & #39;06), June 20-24 2006, Warsaw, Poland.
5. Davliakos, I., Zafiris, A. and Papadopoulos, E., & Joint Space Controller Design for Electrohydraulic Servos, & Proc. 2006 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control Systems Design, (CACSD & #39;06), October 4-6, 2006, Technische Universität München, Munich, Germany.
6. Νταβλιάκος, Ι. και Παπαδόπουλος, Ε., "Τα υδροπνευματικά συστήματα στην 4η Βιομηχανική Επανάσταση," Περιοδικό Μετάδοση Ισχύος, Αφιέρωμα, Ιουλίου-Αύγουστος 2018, σελ.24-27.
7. Davliakos, I., Roditis, I., Lika, K., Breki, Ch-M., and Papadopoulos, E., & Design, development, and control of a tough electrohydraulic hexapod robot for subsea operations, & Advanced Robotics, special issue on New Hydraulic Components for Tough Robots, May 2018, Vol. 32, No. 9, pp. 1-23.
8. Rekleitis, G., Vidakis, M., and Papadopoulos, E., "Optimal Leg Sequencing for a Hexapod Subject to External Forces and Slopes," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA & #39;19), Montreal, Canada, May 20-24, 2019.