Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών

Φοιτήτρια του

Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος Τ. Ε

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΕΙΣ STEWART PLATFORM
Steward Platform models and usage

Φοιτήτρια : Οικονομάκη Γρηγορία

ΑΜ: Τ.Φ 1638

Επιβλέπων Καθηγητής : Αντωνιδάκης Εμμανουήλ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2025

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται ο μηχανισμός της πλατφόρμας Stewart συμμετρικής δομής, κλειστής κινηματικής αλυσίδας, έξι βαθμών ελευθερίας, η σχεδίαση της πλατφόρμας, τα διάφορα πεδία εφαρμογής της καθώς και το κόστος της πλατφόρμας ανάλογα με το μέγεθος της.

Abstract

This thesis presents the mechanism of the Stewart platform with a symmetrical structure, closed kinematic chain, six degrees of freedom, the design of the platform, and its various fields of application as well as the cost of the platform depending on its size.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή

2. Ιστορική αναδρομή

3. Περιγραφή μηχανισμού

4. Σχεδίαση πλατφόρμας Stewart – Κινηματική

5. Εφαρμογές πλατφόρμας Stewart

6. Κόστος πλατφόρμας Stewart

7. Επίλογος

8. Βιβλιογραφία

1. Εισαγωγή

Ο μηχανισμός Stewart συγκαταλέγεται στους ρομποτικούς μηχανισμούς κλειστής κινηματικής αλυσίδας (parallel manipulators). Ειδικότερα, και σύμφωνα με την ταξινόμηση των παράλληλων ρομποτικών μηχανισμών (επίπεδους (2-D), σφαιρικούς και χωρικούς (3-D) μηχανισμούς), ο μηχανισμός Stewart εντάσσεται στους χωρικούς ρομποτικούς μηχανισμούς (spatial manipulators). Μία τυπική δομή τέτοιων μηχανισμών είναι μία κινούμενη πλατφόρμα, η οποία στηρίζεται σε καθορισμένο αριθμό μηχανικών «ποδιών». Η χαρακτηριστική ιδιότητα των μηχανισμών αυτών είναι, ο αριθμός των ποδιών να είναι ίσος με των αριθμό των βαθμών ελευθερίας του μηχανισμού. Ένα τέτοιο ρομποτικό σύστημα είναι γνωστό ως «πλήρως παράλληλο ρομποτικό σύστημα» (fully parallel manipulator).

Οι παράλληλοι ρομποτικοί μηχανισμοί χαρακτηρίζονται κυρίως από την υψηλή τους στιβαρότητα, τη χαμηλή αδράνεια και την ικανότητά τους για κύκλους εργασίας μεγάλων μηχανικών φορτίων. Ωστόσο, παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως πχ. Ο μικρός χώρος εργασίας που προσφέρουν και ο δύσκολος σχεδιασμός. Προσεγγίζοντας το πρόβλημα των συστημάτων αυτών περισσότερο θεωρητικά, διαπιστώνεται ότι η πολύπλοκη κινηματική δομή τους οδηγεί σε μαθηματικές ιδιομορφίες (singularities), οι οποίες μεταφράζονται σε αστάθεια και απώλεια στήριξης της κατασκευής. Τέτοια προβλήματα εστιάζονται κατά την επίλυση των κινηματικών εξισώσεων, η οποία τις περισσότερες φορές δεν οδηγεί σε μοναδική λύση.

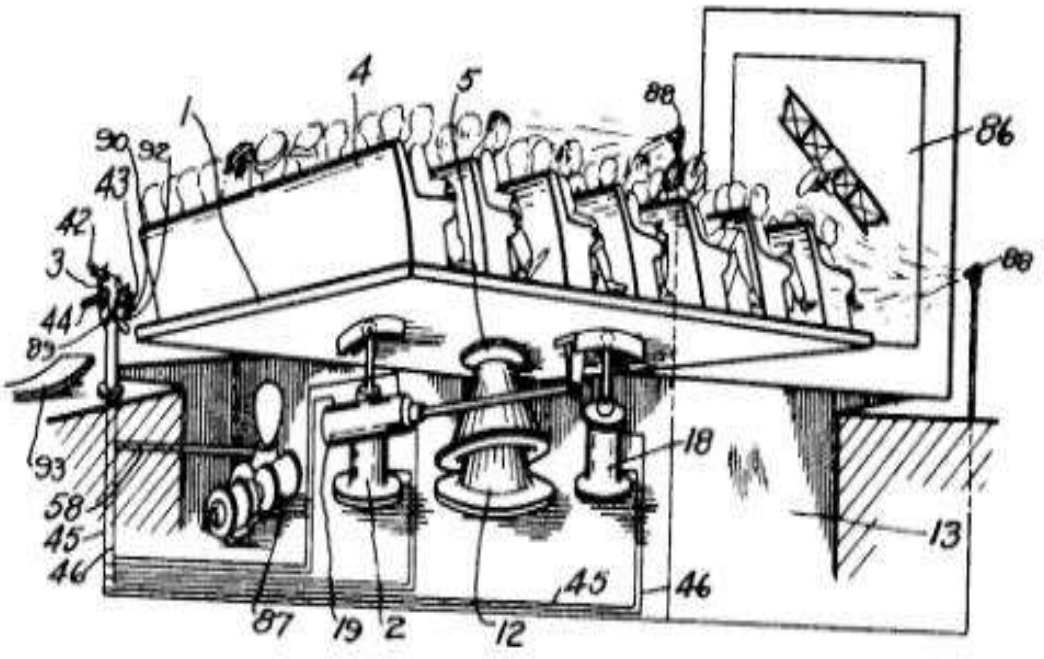
Ο μηχανισμός Stewart είναι ένας από τους μηχανισμούς των ρομπότ με κλειστή κινηματική αλυσίδα (παράλληλοι χειριστές). Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την ταξινόμηση των μηχανισμών των παράλληλων ρομπότ (επίπεδοι (2-D), σφαιρικοί και χωρικοί (3-D) μηχανισμοί), ο μηχανισμός Stewart περιλαμβάνεται στους μηχανισμούς των χωρικών ρομπότ (χωρικοί χειριστές). Ένας τέτοιος μηχανισμός είναι μια κινητή πλατφόρμα που στηρίζεται σε σταθερό αριθμό μηχανικών «μαχαιριών». Το χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών των μηχανισμών είναι ότι ο αριθμός των ποδιών είναι ίσος με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας του μηχανισμού. Ένα τέτοιο ρομποτικό σύστημα είναι γνωστό ως ένας πλήρως παράλληλος χειριστής.

Οι μηχανισμοί των παράλληλων ρομπότ χαρακτηρίζονται κυρίως από υψηλή αντοχή, χαμηλή αδράνεια και ικανότητα εργασίας με υψηλά μηχανικά φορτία. Έχουν όμως και κάποια μειονεκτήματα, όπως μικρό χώρο εργασίας και δύσκολη κατασκευή. Προσεγγίζοντας το πρόβλημα αυτών των συστημάτων πιο θεωρητικά, διαπιστώθηκε ότι η πολύπλοκη

κινηματική δομή τους οδηγεί σε μαθηματικές ιδιομορφίες που μεταφράζονται σε αστάθεια και απώλεια στήριξης της δομής. Τέτοια προβλήματα επικεντρώνονται στην επίλυση κινηματικών εξισώσεων, οι οποίες πολύ συχνά δεν οδηγούν σε μια μοναδική λύση.

2.Ιστορική αναδρομή

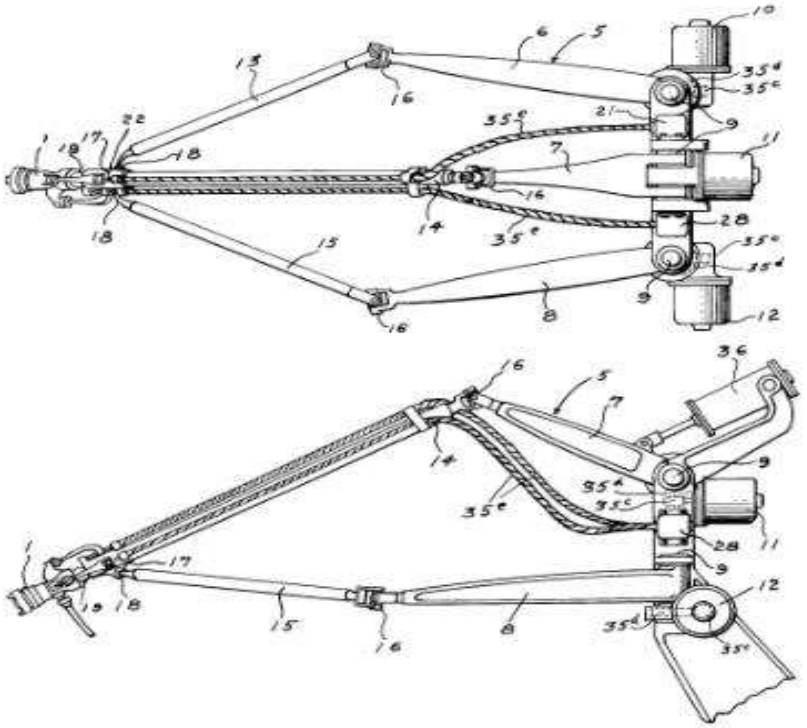
Το μαθηματικό υπόβαθρο των παράλληλων μηχανισμών βασίζεται στη θεωρία των πολυέδρων. Αν και οι πρώτες βάσεις της θεωρίας αυτής αναπτύχθηκαν αρκετούς αιώνες πριν, ωστόσο οι παράλληλοι μηχανισμοί πρωτοεμφανίστηκαν μόλις λίγο πριν τα μισά του περασμένου αιώνα. Ένας από τους πρώτους παράλληλους μηχανισμούς ήταν ένας σφαιρικός παράλληλος μηχανισμός, του οποίου η χρήση εξυπηρετούσε ψυχαγωγικούς σκοπούς. Ο μηχανισμός αυτός σχεδιάστηκε το 1928 από το μηχανικό James E. Gwinnett. Τρία χρόνια αργότερα, κατασκευάστηκε για τον ίδιο λόγο ένας μηχανισμός, ο οποίος απετέλεσε ενδεχομένως και τον πρώτο χωρικό παράλληλο μηχανισμό, βλ. Σχ. 2-1



Σχήμα 2-1. Πιθανώς ο πρώτος χωρικός παράλληλος μηχανισμός, 1931.

Οι πρώτες σκέψεις για υλοποίηση και χρήση παράλληλων μηχανισμών στη βιομηχανία ήρθαν τη δεκαετία του 1930, όταν ο Willard L.V. Pollard σχεδίασε ένα μηχανισμό, ο οποίος θα προοριζόταν για βαφή μετάλλων.

Δυστυχώς, ο μηχανισμός αυτός δεν κατασκευάστηκε ποτέ. Το 1942 όμως, η υλοποίηση μιας παραλλαγής του πραγματοποιήθηκε από το γιο του Pollard, η χρήση του οποίου αποσκοπούσε στην ίδια εφαρμογή, βλ. Σχ. 2-2. Πρόκειται για τον πρώτο χωρικό παράλληλο μηχανισμό, ο οποίος προοριζόταν αποκλειστικά για βιομηχανική χρήση.

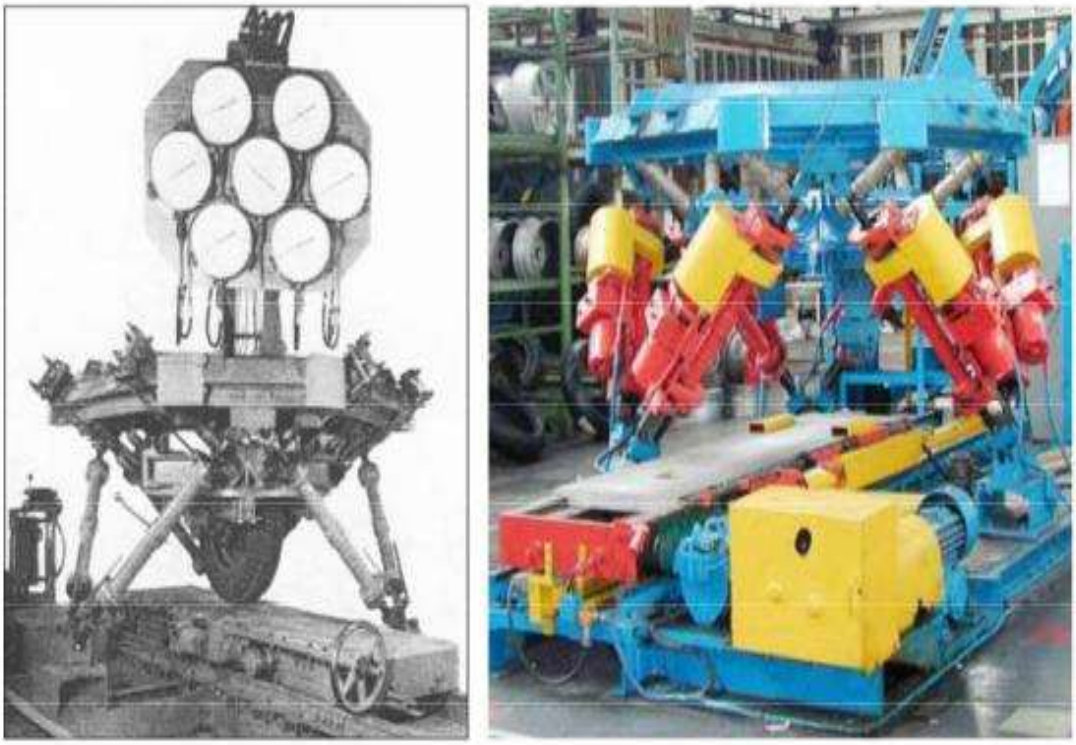


Σχήμα 2-2. Ο πρώτος χωρικός παράλληλος μηχανισμός για βιομηχανική χρήση, 1942.

Αν και στα επόμενα χρόνια κατασκευάστηκαν αρκετοί πολυποδικοί μηχανισμοί,
γνωστοί με το αρκτικόλεξο MAST (Multi-Axis Simulation/ or Shake Table), πχ. βλ. Σχ.2-3, ωστόσο, η ριζική επανάσταση στην εμφάνιση των μηχανισμών αυτών και η καθιέρωση του όρου «παράλληλοι μηχανισμοί» οφείλεται στον Dr. Eric Gough (1906-1973), ο οποίος επινόησε τον οκταεδρικό εξάποδο μηχανισμό με μεταβλητά μήκη, το 1947, βλ. Σχ. 2-4. Ο μηχανισμός αυτός υλοποιήθηκε στις αρχές της δεκαετίας ’50, ενώ λειτούργησε το 1954, με σκοπό την αξιοπιστία υλικών σε αντοχή, τα οποία θα υποβάλλονταν σε δοκιμασία κόπωσης (tire-testing machine). Αρχικά, ο μηχανισμός λειτουργούσε χειροκίνητα, μία δεκαετία αργότερα όμως αναβαθμίστηκε ενσωματώνοντας στην κατασκευή του ψηφιακά καθοδηγούμενους ηλεκτροκινητήρες και ηλεκτρονικά συστήματα ανάκτησης πληροφοριών. Ο οκταεδρικός εξάποδος μηχανισμός του Gough ήταν το έναυσμα για τη δημιουργία εκατοντάδων, έως σήμερα, παρόμοιων μηχανισμών, οι οποίοι συναντώνται σε πλήθος εφαρμογών.

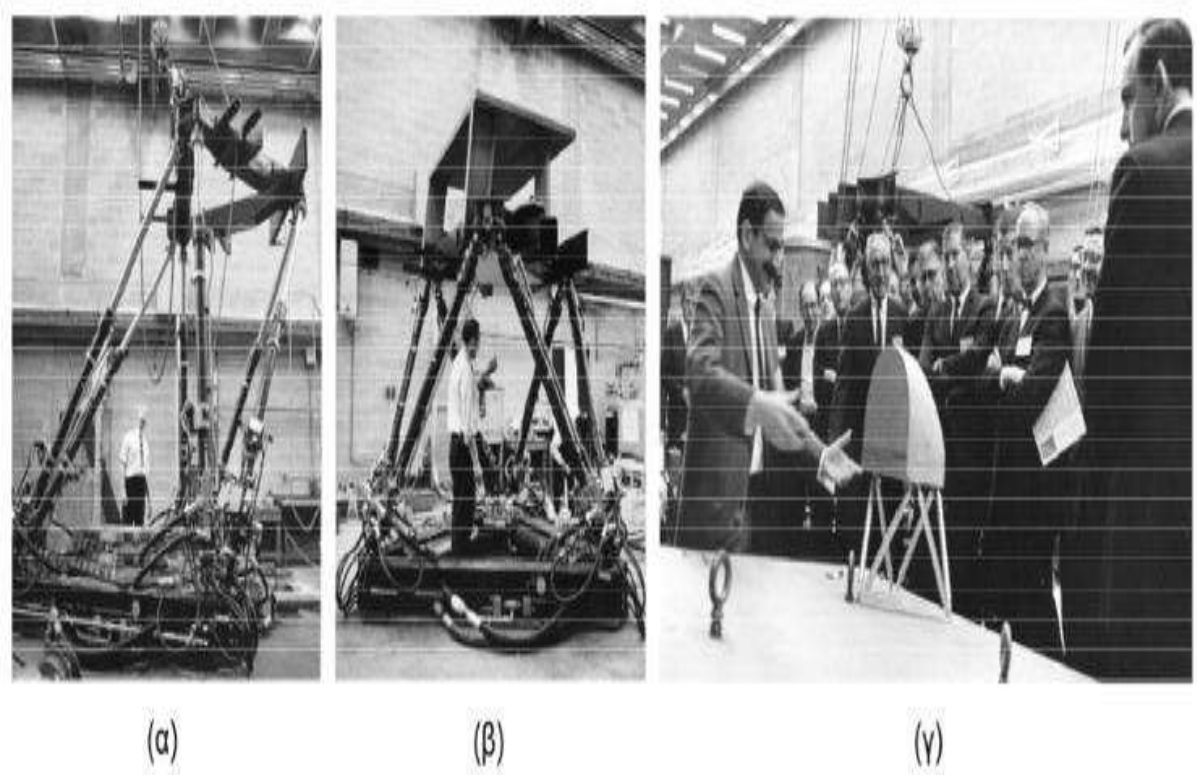


Σχήμα 2-3. Ένα τυπικό σύστημα MAST (courtesy of Prof. Hubert Hahn, RTS, University of Kassel). Εξάποδα της μορφής αυτής εμφανίστηκαν αρκετά πριν το μηχανισμό Gough.



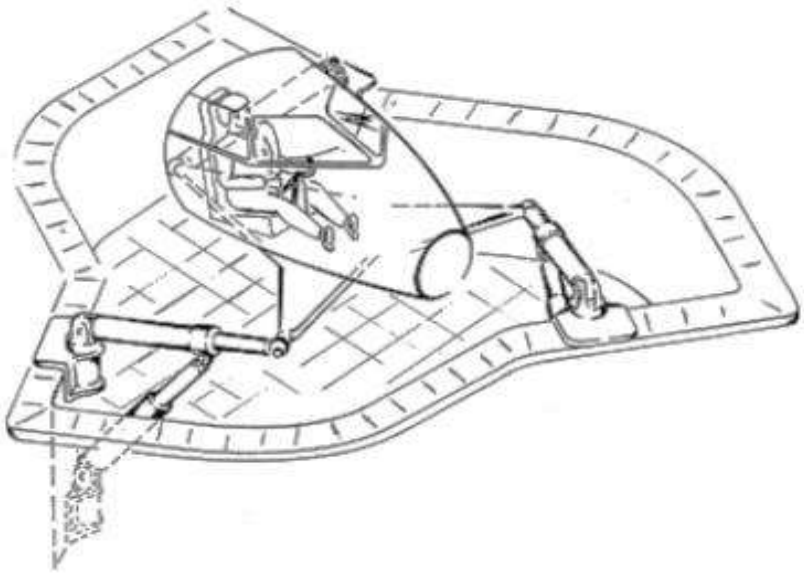
Σχήμα 2-4. (α) Ο πρώτος οκταεδρικός εξάποδος μηχανισμός, 1954, (β) ο ίδιος μηχανισμός λίγο πριν αποσυρθεί, 2000, (courtesy of Mike Beeson, Dunlop Tyres factory).

Λίγο αργότερα, το 1962, το Franklin Institute ανέθεσε στο μηχανικό Klaus Cappel να βελτιώσει έναν υπάρχοντα, συμβατικού τύπου MAST, ταλαντωτικό μηχανισμό έξι βαθμών ελευθερίας. Ο Cappel σχεδίασε έναν παράλληλο εξαποδικό μηχανισμό, πανομοιότυπο με αυτόν του Gough, βλ. Σχ. 2-5. Ο μηχανισμός αυτός, ο οποίος κατοχυρώθηκε ως ευρεσιτεχνία στα τέλη του 1964, κατασκευάστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1960 και απετέλεσε τον πρώτο εξομοιωτή πτήσεων που βασίστηκε στην, πρωτότυπη μέχρι τότε, οκταεδρική εξάποδη κινηματική δομή.



Σχήμα 2-5. (α-β) Ο πρώτος εξομοιωτής πτήσεων βασισμένος στην οκταεδρική εξάποδη κινηματική δομή, (γ) ο Klaus Cappel εξηγώντας τη λειτουργία του εξαποδικού μηχανισμού στα στελέχη του Franklin Institute, μέσα δεκαετίας 1960.

Την ίδια εποχή, 1964-1965, ο μηχανικός D. Stewart δημοσίευε μία εργασία του, στην οποία παρουσίαζε το σχεδιασμό ενός, συναφούς με τους μηχανισμούς των Gough και Cappel, παράλληλου μηχανισμού, που θα χρησιμοποιόταν ως προσομοιωτής αεροσκαφών, βλ. Σχ. 2-6. Αν και οι ιδέες των Gough και Cappel προηγήθηκαν της ιδέας του Stewart, οι μηχανισμοί αυτού του τύπου αναφέρονται ακόμα και σήμερα με την ονομασία «μηχανισμοί Stewart» (Stewart platforms), αλλά αρκετές φορές συναντώνται και ως «μηχανισμοί Stewart – Gough» (Stewart – Gough platforms).

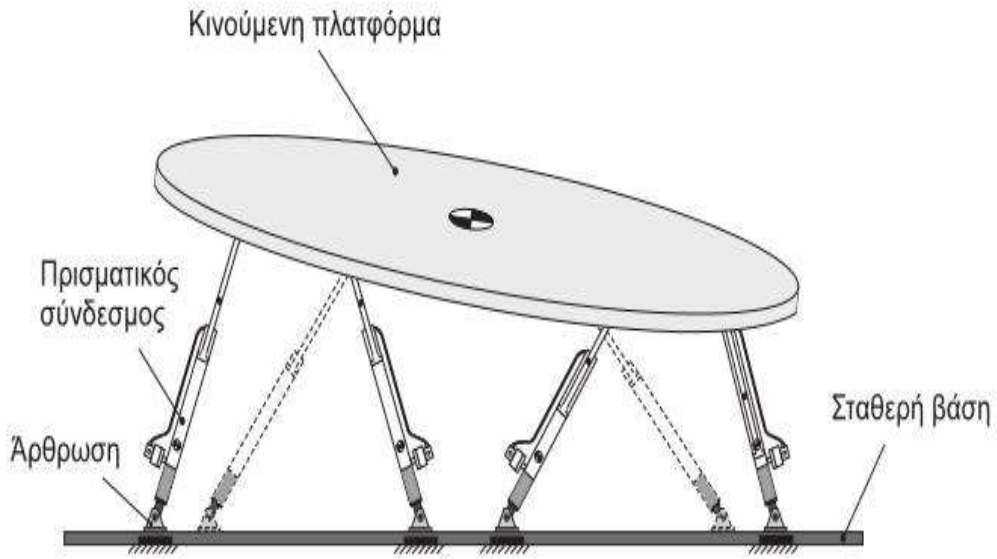


Σχήμα 2-6. Σχηματική απεικόνιση εξομοιωτή πτήσεων του D. Stewart, 1964-1965.

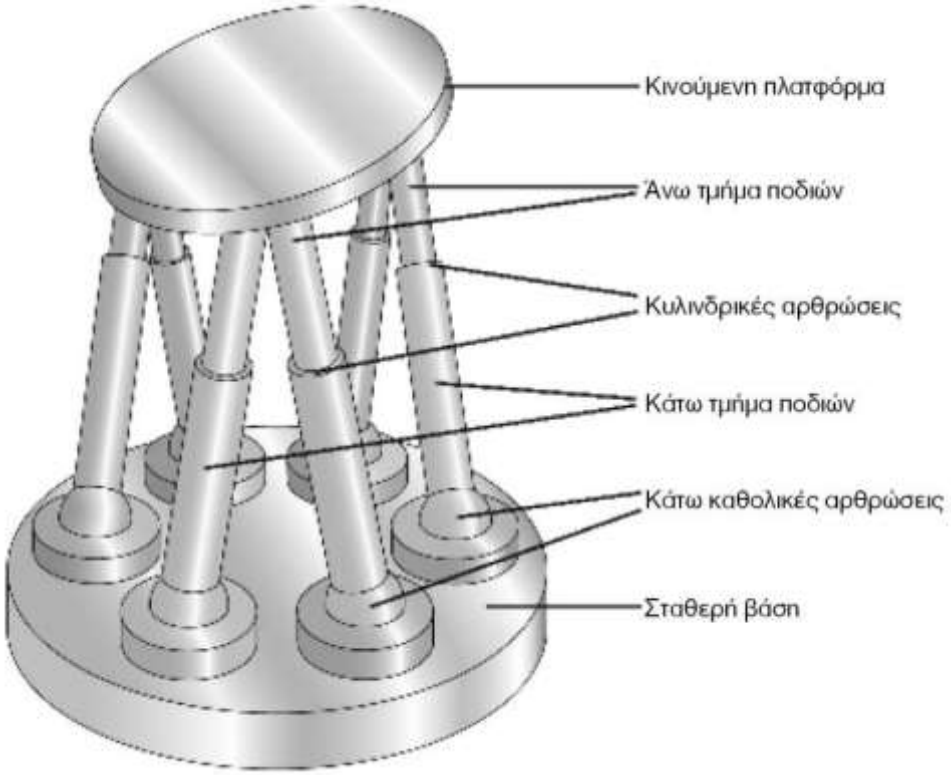
3. Περιγραφή μηχανισμού

Ο μηχανισμός Stewart είναι ένας παράλληλος ρομποτικός μηχανισμός ο οποίος αποτελείται από μία σταθερή βάση, μία κινούμενη πλατφόρμα και έξι πρισματικούς, μεταβαλλόμενου μήκους συνδέσμους, οι οποίοι συνδέουν τη σταθερή βάση με την πλατφόρμα μέσω αρθρώσεων, βλ. Σχ. 3-1, Σχ. 3-2 . Η συνδυασμένη κίνηση των έξι πρισματικών συνδέσμων έχει σαν αποτέλεσμα την οδήγηση της κινούμενης πλατφόρμας στο χώρο. Η κινούμενη πλατφόρμα μπορεί να κινηθεί στους έξι βαθμούς ελευθερίας στους οποίους είναι δυνατή η κίνηση ενός ελεύθερα αναρτημένου φορτίου: τρεις γραμμικές κινήσεις x, y, z (πλευρικές, διαμήκεις και κάθετες) και τρεις περιστροφικές (pitch, roll, and yaw). Οι πλατφόρμες Stewart είναι γνωστές με διάφορα άλλα ονόματα. Μερικές φορές ονομάζεται πλατφόρμα έξι αξόνων ή πλατφόρμα 6-DoF λόγω των πιθανών κινήσεών της και, επειδή οι κινήσεις παράγονται από έναν συνδυασμό κινήσεων πολλαπλών επενεργητών, μπορεί να αναφέρεται ως πλατφόρμα συνεργιστικής κίνησης, λόγω της συνέργειας (αμοιβαία αλληλεπίδραση) μεταξύ του τρόπου με τον οποίο προγραμματίζονται οι επενεργητές. Επειδή η συσκευή έχει έξι επενεργητές, αποκαλείται συχνά εξάποδο (έξι πόδια) στην κοινή ονομασία.

Η επιλογή ενός συμμετρικά σχεδιασμένου μηχανισμού ελαττώνει σημαντικά τις γεωμετρικές παραμέτρους του συστήματος και απλουστεύει σε μεγάλο βαθμό την άλγεβρα της κινηματικής και δυναμικής ανάλυσης.

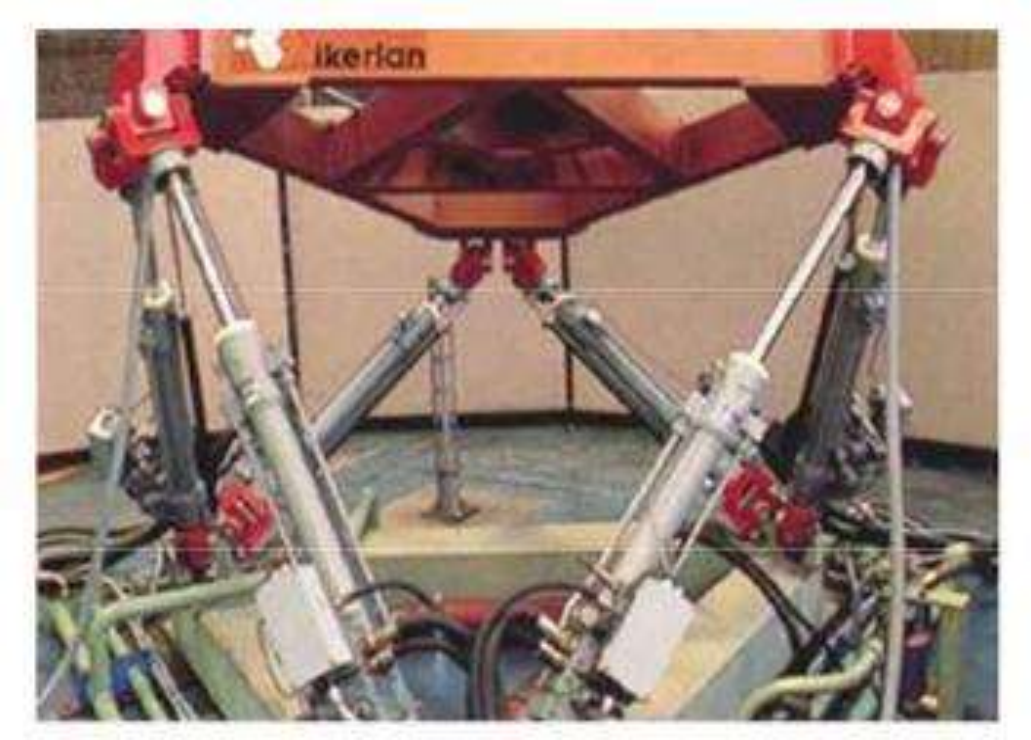


(α)



(β)

Σχήμα 3-1. (α)Σχηματική απεικόνιση ενός 6-6 συμμετρικού μηχανισμού Stewart με συνδέσμους υδραυλικά έμβολα, (β) Σχηματική απεικόνιση πλατφόρμας Stewart.



Σχήμα 3-2. Πραγματικός μηχανισμός Stewart, έξι βαθμών ελευθερίας, ηλεκτροϋδραυλικά οδηγούμενος.

4. Σχεδίαση πλατφόρμας Stewart- Κινηματική και Δυναμική ανάλυση

Ο μηχανισμός Stewart είναι ενδογενώς ισχυρά μη γραμμικό δυναμικό σύστημα με εσωτερικούς κινηματικούς περιορισμούς και υπάγεται στην ανάλυση των ρομποτικών μηχανισμών κλειστής κινηματικής αλυσίδας, η οποία διαφέρει σημαντικά από την ανάλογη ανάλυση των κινηματικών αλυσίδων ανοικτού τύπου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κινηματική μελέτη, όπου στον εν λόγω μηχανισμό, αλλά και γενικότερα στους παράλληλους μηχανισμούς, η ευθεία κινηματική ανάλυση είναι πεπλεγμένη, ενώ η αντίστροφη είναι απλή.
Η παραδοσιακή επίλυση δυναμικών προβλημάτων με τη μέθοδο Newton-Euler αποφεύγεται στους μηχανισμούς κλειστής μορφής, για το λόγο ότι η ανάλυση αυτή απαιτεί τη γραφή των εξισώσεων κίνησης κάθε ενός από τα επιμέρους σώματα του μηχανισμού, γεγονός που οδηγεί αναπόφευκτα σε ένα μεγάλο αριθμό δυναμικών εξισώσεων, η αριθμητική ολοκλήρωση των οποίων επιτυγχάνεται με μεγάλη δυσκολία.
Εναλλακτικά, η
περιγραφή τέτοιων συστημάτων βασίζεται στις αρχές της Αναλυτικής Δυναμικής (Lagrangian/ Hamiltonian Dynamics), η οποία εισάγει την έννοια των γενικευμένων συντεταγμένων, με σημαντικότερα

πλεονεκτήματα από ό,τι η χρήση των φυσικών συντεταγμένων της Νευτώνειας Δυναμικής.

- **Κινηματική Ανάλυση**



Σχήμα 4-1. Stewart Platform.

Για να μετακινήσετε την επάνω πλάκα, κάθε πόδι πρέπει να ελέγχεται με έναν ενεργοποιητή για την αλλαγή του συνολικού μήκους του ποδιού. Με τον ανεξάρτητο έλεγχο του μήκους κάθε ποδιού και με μαθηματικούς υπολογισμούς που ονομάζονται μπροστινή και αντίστροφη κινηματική, η θέση του κορυφαίου κέντρου θα μπορούσε να αλλάξει με ακρίβεια. Δεν υπάρχει συσσώρευση σημαντικού σφάλματος με κάθε σύνδεσμο επειδή υπάρχει κατανομή των σφαλμάτων κάθε μεμονωμένου σκέλους(ποδιού). Για παράλληλα ρομποτικά συστήματα, το πρόβλημα της άμεσης κινηματικής είναι συνήθως προκλητικό, αλλά η αντίστροφη κινηματική είναι απλή. Η μπροστινή (άμεση) κινηματική επιτρέπει τη θέση και να είναι γνωστός ο προσανατολισμός του τελικού τελεστή, δεδομένων όλων των τιμών της άρθρωσης. Αντίστροφη κινηματική καθορίζει τις τιμές άρθρωσης δεδομένης μιας γνωστής ή επιθυμητής θέσης και προσανατολισμού του τελικού τελεστή. Το άμεσο κινηματικό πρόβλημα των παράλληλων μηχανισμών είναι πολύ πιο δύσκολο από το αντίστροφο πρόβλημα κινηματικής αφού απαιτεί την επίλυση ενός συνόλου μη γραμμικών εξισώσεων. Διάφοροι ερευνητές έλυσαν αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους όπως παρουσιάζονται παρακάτω. Η αναλυτική λύση για τη γενική περίπτωση είναι αρκετά δύσκολη λόγω της μη γραμμικής εξίσωσης με πολλαπλές λύσεις. Μια πιο συμφέρουσα τεχνική για την επίλυση του άμεσου κινηματικού προβλήματος είναι η υπολογιστική. Σε αυτή την περίπτωση, προκειμένου να βρεθούν όλες οι πραγματικές ρίζες, οι μέθοδοι εξάλειψης χρησιμοποιούνται για την απλοποίηση των κινηματικών εξισώσεων. Αν και οι αριθμητικές μέθοδοι έχουν υπολογιστικά πλεονεκτήματα, δεν είναι χρήσιμες για την πρόβλεψη του συνολικού αριθμού των ριζών σε ένα σύνθετο πεδίο ορισμού. Ο P. Dietmaier έδωσε ένα παράδειγμα ρομποτικού μηχανισμού με 40 πραγματικές λύσεις στο άμεσο κινηματικό

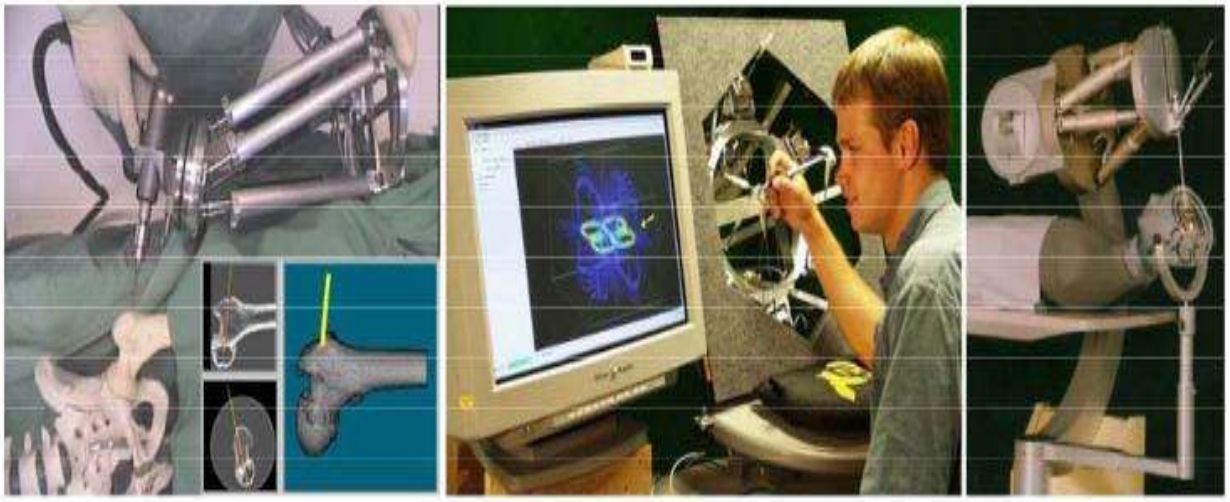
πρόβλημα. Το πρόβλημα της αντίστροφης κινηματικής πλατφόρμας Stewart έχει μοναδική λύση, αλλά όταν μειώνεται ο αριθμός των κινηματικών αλυσίδων, ο αριθμός των λύσεων του προβλήματος της αντίστροφης κινηματικής αυξάνεται και το πρόβλημα γίνεται πιο απαιτητικό. Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις για την επίλυση της αντίστροφης κινηματικής. Μία από αυτές τις προσεγγίσεις βασίστηκε σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Μια άλλη μέθοδος είναι η χρήση ενός διανύσματος θέσης και πίνακας περιστροφής. Σε έναν παράλληλο ρομποτικό μηχανισμό, η ανάλυση των δυνάμεων περιορισμού που αντιστοιχούν σε κινηματικούς περιορισμούς είναι πολύ σημαντική γιατί οι παράλληλοι ρομποτικοί μηχανισμοί δεν μπορούν να αντισταθούν σε εξωτερικές δυνάμεις και ροπές σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις λόγω κάποιων περιορισμών. Αυτοί οι περιορισμοί πρέπει να είναι καθορισμένοι. Οι αρχιτεκτονικές περιορίζουν την κίνηση και τη συμπεριφορά του παραλλήλου ρομποτικού μηχανισμού και δημιουργούν πολύπλοκες κινηματικές ιδιομορφίες εντός του χώρου εργασίας.

- **Δυναμική Ανάλυση**

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της δυναμικής για την πλατφόρμα Stewart εξαιτίας της πολυπλοκότητας της. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος που βρίσκεται στη βιβλιογραφία είναι η διατύπωση Lagrangian. Μια λιγότερο κοινή μέθοδος δυναμικής που είναι γνωστή είναι η διατύπωση Newton-Euler με μερικούς να εφαρμόζουν έναν Ιακωβιανό Πίνακα σε αυτή τη μέθοδο για να απλοποιήσουν τις εξισώσεις. Η μέθοδος Newton-Euler χρησιμοποιεί το συνδυασμό της εξίσωσης κίνησης Newton και των γωνιών Euler για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται στο μοντέλο. Αρκετοί ερευνητές χρησιμοποίησαν αυτή τη μέθοδο. Η μέθοδος Lagrangian για τον υπολογισμό της δυναμικής ενός παράλληλου χειριστή είναι ένα καλά δομημένο σύνολο εξισώσεων που μπορούν να εκφραστούν σε κλειστή μορφή. Οι εξισώσεις υπολογίζονται σε συμβολική μορφή και δημιουργούνται από τον υπολογισμό του δυναμικού και των κινητικών ενεργειών του χειριστή, οι οποίες στη συνέχεια περιορίζονται από τη γεωμετρία και την κινηματική του χειριστή. Χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους στη συμβολική μορφή, μερικές παράγωγοι των περιοριστικών εξισώσεων και των εξισώσεων κίνησης μπορούν να συνδυαστούν και να οργανωθούν σε ένα σύστημα εξισώσεων που ισούται με τον αριθμό των αγνώστων. Οι πολλαπλασιαστές Lagrangian υπολογίζονται από τη σχέση μεταξύ των ενεργών και παθητικών αρθρώσεων του χειριστή. Με τους Lagrangian πολλαπλασιαστές, οι δυνάμεις μπορούν να λυθούν σε μορφή πίνακα από το σύστημα εξισώσεων που αναφέρθηκε προηγουμένως.

5. Εφαρμογές πλατφόρμας Stewart

Ο μηχανισμός Stewart έχει γίνει ευρέως γνωστός και απαντάται πλέον συχνά σε ποικίλες εφαρμογές, όπως στην ιατρική, στη βιομηχανία, στο στρατό, σε προσομοιώσεις οχημάτων βαρέων τύπου και αυξημένων απαιτήσεων (πχ. φορτηγά, τρένα, υποβρύχια, ελικόπτερα, αεροσκάφη, άρματα μάχης κτλ.), στην έρευνα (πχ. ρομποτική), στις εφαρμοσμένες επιστήμες (αντισεισμικός σχεδιασμός προστασίας, ανυψωτικές μηχανές κτλ.), σε δραστηριότητες τέχνης και ψυχαγωγίας κά. Στη συνέχεια αναφέρονται μερικές από τις πιο ενδιαφέρουσες και χαρακτηριστικές εφαρμογές του μηχανισμού. Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία έχει εισβάλει δυναμικά στο πεδίο της ιατρικής επιστήμης. Μάλιστα, από τη δεκαετία του ‘90 η παρουσία του μηχανισμού Stewart στο χώρο της ιατρικής γίνεται ολοένα και πιο έντονη. Συγκεκριμένα, ο μηχανισμός χρησιμοποιείται σε απτικές εφαρμογές, σε λεπτές επεμβάσεις, σε ανθρώπους με κινητικά προβλήματα κτλ. Οι βασικότεροι λόγοι που συνέβαλαν στην επιλογή του μηχανισμού αυτού στις προαναφερθείσες εφαρμογές είναι η μικρή αδράνεια και η υψηλή στιβαρότητά του, η περιορισμένη εμφάνιση δυνάμεων τριβής, η ευελιξία, λόγω των πολλών βαθμών ελευθερίας του τελικού σημείου δράσης (κινούμενη πλατφόρμα), ο μεγάλος σε σχέση με άλλους παράλληλους μηχανισμούς χώρος εργασίας του, η μηδενική ανάκρουση χάρη στα μηχανικά του μέρη (near-zero backlash), η ικανότητα για οπισθοκίνηση (backdriveability), η συμπαγής κατασκευαστική του δομή και η συμβολή του στην ανάδειξη δεξιοτήτων του χρήστη. Παράδειγμα συνεργασίας απτικού μηχανισμού με τη διάταξη Stewart – Gough αποτελεί ο μηχανισμός, ο οποίος υλοποιήθηκε στα πλαίσια ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος (GRIGOS – Compact Robot for Image Guided Orthopedic Surgery), βλ. Σχ. 5-1 (α). Πρόκειται για μία κατασκευή που βασίζεται στην πλατφόρμα Stewart έξι βαθμών ελευθερίας, πάνω στην οποία προσαρτάται το υψηλής ακρίβειας απτικό εργαλείο. Προορισμός της συσκευής είναι η επέμβαση σε οστά ασθενών. Παρόμοιες ιδιοσυσκευές παρουσιάζονται στα Σχ. 5-1 (β,γ). Επιπλέον, στο Σχ. 5-2 εικονίζονται μηχανισμοί, βασισμένοι σε δομές Stewart, οι οποίοι βοηθούν ανθρώπους με κινητικά προβλήματα.



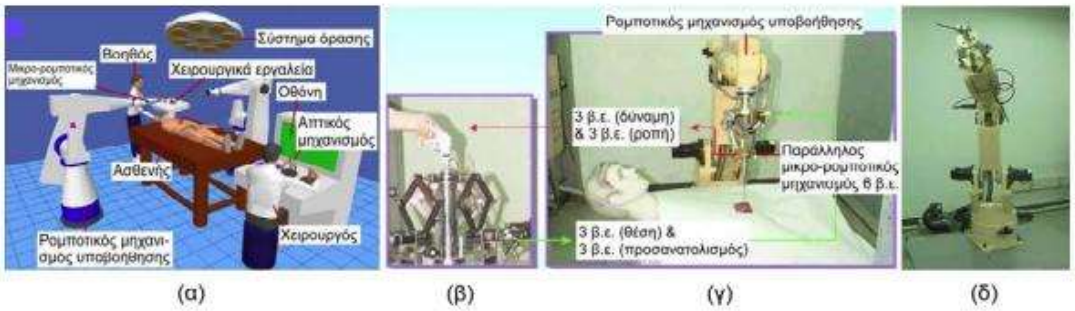
Σχήμα 5-1. Εφαρμογές της πλατφόρμας Stewart σε απτικούς μηχανισμούς. (α) Εκμάθηση του ρομπότ GRIGOS, (β) Εκμάθηση απτικού μηχανισμού, με παράλληλη γραφική απεικόνιση των εφαρμοζόμενων δυνάμεων του χρήστη, (γ) Εκμάθηση απτικού μηχανισμού για λεπτή εγχείρηση σε εγκέφαλο.



Σχήμα 5-2. Η πλατφόρμα Stewart ως μηχανισμός υποβοήθησης ανθρώπων με κινητικά προβλήματα.

Στο Σχ. 5-3 παρουσιάζεται η εικονική αναπαράσταση μιας πρωτοποριακής μικροχειρουργικής επέμβασης με τηλεχειρισμό, η οποία προτάθηκε από το KAIST της Ν. Κορέας σχετικά πρόσφατα. Πρόκειται για ένα τηλεχειριζόμενο σύστημα, στο οποίο μία απτική διεπαφή ανάδρασης ροπών και δυνάμεων αποτελεί την κύρια διάταξη (master), ενώ ένας παράλληλος μηχανισμός Stewart έξι βαθμών ελευθερίας (slave) εκτελεί

πιστά τις εντολές του απτικού μηχανισμού που εισάγει ο χρήστης (ιατρός), με σκοπό τη μικροεπέμβαση του ασθενούς.



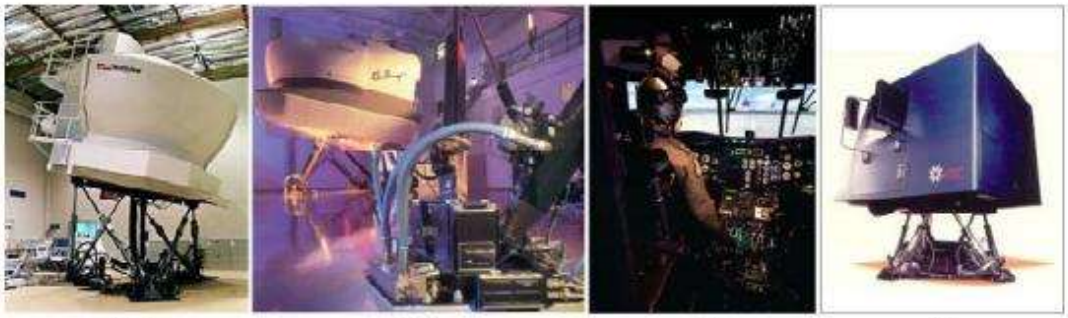
Σχήμα 5-3. Μικροχειρουργική επέμβαση με τηλεχειρισμό, συνδυάζοντας απτικό μηχανισμό και πλατφόρμαμα Stewart (α) Γραφική αναπαράσταση του συστήματος, (β) απτική διεπαφή ανάδρασης δυνάμεων έξι β.ε. (master), (γ) ο μικρορομποτικός μμηχανισμός Stewart (slave) εκτελεί τις εντολές του χρήστη, (δ) ο μμηχανισμός Stewart προσαρτημένος σε σειριακό ρομπότ υποβοήθησης.

Οι ανάγκες της σύγχρονης βιομηχανίας και οι απαιτήσεις για μεγαλύτερη αξιοπιστία και ακρίβεια, των υλικών παραγωγής καθιστούν ολοένα και περισσότερο επιτακτική την ανάγκη της δημιουργίας περισσότερο ευέλικτων εργαλειομηχανών (CNC) και κέντρων κατεργασίας (πχ. milling machines) από τις ήδη υπάρχουσες. Κάτι τέτοιο υπόσχεται ο μμηχανισμός Stewart, ο οποίος έχει εισβάλει δυναμικά στο χώρο των βιομηχανικών εφαρμογών και αντικαθιστά βαθμηδόν τα συμβατικά βιομηχανικά ρομπότ. Αν και στην Ελλάδα αυτό δεν είναι ακόμα άμεσα ορατό, ωστόσο μεγάλα βιομηχανικά κέντρα της Ευρώπης και των ΗΠΑ ήδη χρησιμοποιούν αποδοτικά τον εν λόγω μηχανισμό. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από μία τέτοια εφαρμογή είναι αρκετά. Καταρχάς, η συμφυής στιβαρότητα και δυσκαμψία του μμηχανισμού Stewart που προσφέρει η κινηματική του δομή, σε συνδυασμό με τις γρήγορες αποκρίσεις που μπορεί να πετύχει, συνιστούν το μηχανισμό περισσότερο αποτελεσματικό. Επιπλέον, οι πολλοί βαθμοί ελευθερίας του μηχανισμού προσδίδουν μεγάλη ευελιξία του τελικού σημείου δράσης της πλατφόρμας (πχ. δύσκολα κατεργάσιμα σημεία, γωνιές κτλ), με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ακρίβεια και καλύτερη ποιότητα του προσδοκώμενου τεμαχίου. Η ευκολία προσαρμογής πολλών, αλλά και διαφορετικής χρήσης εργαλείων κοπής στο τελικό σημείο δράσης του μηχανισμού αποτελεί συμφέρουσα οικονομικά λύση και καθιστά ένα τέτοιο σύστημα περισσότερο ευέλικτο. Επίσης, οι αναπτυσσόμενες αδρανειακές δυνάμεις της πλατφόρμας σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες των συμβατικών τύπων ρομπότ, γεγονός που οδηγεί στον περιορισμό ανεπιθύμητων δυναμικών φαινομένων (ταλαντώσεις, αστάθεια κτλ). Στο Σχ. 5-4 εικονίζονται μηχανισμοί τύπου Stewart, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικά κέντρα της Ευρώπης και Αμερικής.

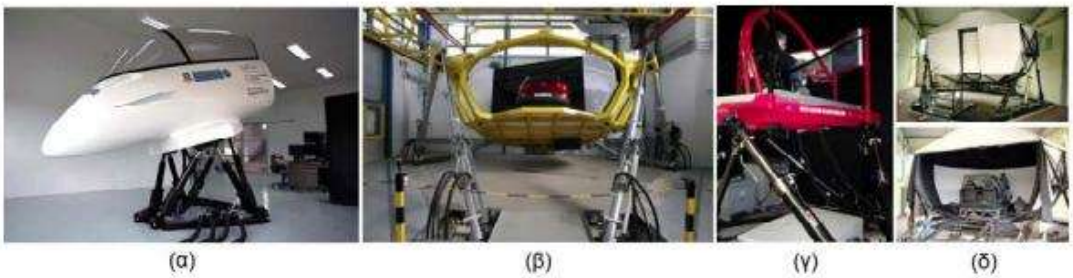


Σχήμα 5-4. Εφαρμογές μηχανισμού Stewart στη βιομηχανία.

Η εφαρμογή που έκανε ευρέως γνωστό το μηχανισμό Stewart είναι η χρήση του ως εξομοιωτής οχημάτων. Πράγματι, στις δεκαετίες ’70 και ’80 κυρίως, ο εν λόγω μηχανισμός χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον ως εξομοιωτής πτήσης, αλλά και ως εξομοιωτής άλλων επίγειων και θαλάσσιων οχημάτων. Ακόμα και σήμερα, με τη βοήθεια του μηχανισμού Stewart εκπαιδεύεται πλήθος υποψηφίων πιλότων της πολιτικής και στρατιωτικής αεροπορίας σχεδόν σε όλα τα ανεπτυγμένα κράτη. Η διαδικασία προσομοίωσης πραγματοποιείται όταν ο εκπαιδευόμενος εισέλθει σε ένα ειδικά διαμορφωμένο χώρο (συνήθως κουβούκλιο), μέσα στον οποίο βρίσκεται μία μονάδα εικονικής πραγματικότητας (virtual reality). Ο χώρος αυτός είναι προσαρτημένος στιβαρά πάνω στην κινούμενη πλατφόρμα του μηχανισμού, η οποία δέχεται εντολές από ισχυρή μονάδα ελέγχου, μέσω των πρισματικών επενεργητών. Τα Σχ. 5-5 και 5-6 εικονίζουν σύγχρονα συστήματα προσομοιώσεων οχημάτων, που βασίζονται στην πλατφόρμα Stewart.



Σχήμα 5-5. (α) Εξομοιωτής πτήσης (NASA), (β) στιγμιότυπο εξομοιωτή «εν ώρα πτήσης», (γ) καμπίνα εξομοιωτή CAE, (δ) Εξομοιωτής πτήσης



Σχήμα 5-6. (α) Εξομοιωτής πτήσης, (β-γ) εξομοιωτές οχημάτων, (δ) εξομοιωτής οχήματος

Μία από τις κύριες εφαρμογές των πλατφορμών Stewart είναι η παρακολούθηση στόχων. Σε αυτήν την εφαρμογή είτε ο στόχος θα μπορούσε να είναι μια σταθερή θέση ενώ η πλατφόρμα κινείται (όπως γεωστατικοί δορυφόροι ή επίγειος στόχος ραντάρ/αναζήτησης) είτε ο στόχος θα μπορούσε να κινείται ενώ η πλατφόρμα είναι ακίνητη (όπως εφαρμογές ηλιακών/αστρικών ανιχνευτών). Το πείραμα ραδιοτηλεσκόπιου AMiBA είναι ένα καλό παράδειγμα για την τελευταία περίπτωση, όπου οι κεραίες του τηλεσκοπίου κατευθύνονται προς στόχους γαλαξίες/αστρικά αντικείμενα με τη βοήθεια μιας πλατφόρμας Stewart, βλ. Σχ. 5-1.



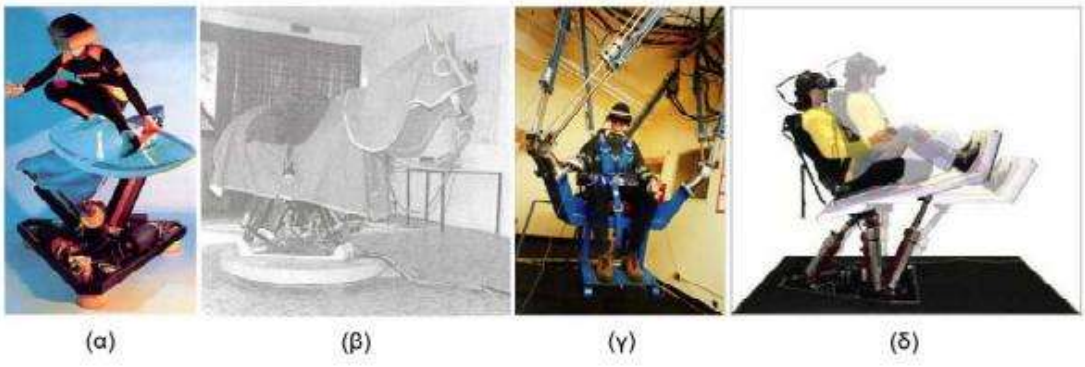
Σχήμα 5-7. Το ραδιοτηλεσκόπιο AMiBA, ένα πείραμα κοσμικού μικροκυματικού υποβάθρου, είναι τοποθετημένο σε μια πλατφόρμα Stewart 6 μέτρων

Αν και ο μηχανισμός Stewart έχει μελετηθεί σε αρκετά μεγάλο βαθμό, ωστόσο διεξάγονται έρευνες με αμείωτους ρυθμούς ακόμα και σήμερα. Οι ερευνητές εστιάζουν την προσοχή τους κυρίως, στη ανάπτυξη νέων νόμων αυτομάτου ελέγχου και μεθόδων που θα αποσκοπούν σε κατασκευαστικά βέλτιστες και οικονομικά συμφέρουσες λύσεις, αλλά και σε ενδεχόμενες νέες εφαρμογές του μηχανισμού. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν πρόσφατες εργασίες, στις οποίες η δομή του μηχανισμού Stewart μελετάται σε μικροκλίμακες, στα πλαίσια της νανοτεχνολογίας, βλ. Σχ. 5-8.



Σχήμα 5-8. Απεικόνιση μοριακής δομής πλατφόρμας Stewart, όπως αποδόθηκε από τον K. Eric Drexler. Η δομή περιλαμβάνει 2.596 άτομα.

Επιπλέον, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις, όπου ο μηχανισμός Stewart χρησιμοποιείται ως μέσο ψυχαγωγίας και διασκέδασης. Λόγω της ευελιξίας του τελικού σημείου δράσης του, ο μμηχανισμός προσφέρεται ακόμα και για εξομοιωτής αθλημάτων υψηλής επικινδυνότητας (πχ. surfing κτλ). Επιπλέον, ήδη σε μμερικές χώρες της Ευρώπης (Αγγλία, Γερμανία κτλ.) ο μμηχανισμός Stewart χρησιμοποιείται ως μαζικό μέσο ψυχαγωγίας (πχ. σε κινηματογράφους, σε συστήματα που συνεργάζονται με εικονικά περιβάλλοντα κτλ).



Σχήμα 5-9. Η πλατφόρμα Stewart ως μέσο ψυχαγωγίας και διασκέδασης. (α-β) Εξομοιωτές surfing και ιππασίας, (γ-δ) εφαρμογές σε εικονική πραγματικότητα.



Σχήμα 5-10. Διαδραστικοί εξομοιωτές οχημάτων πολλών θέσεων.

6. Κόστος πλατφόρμας Stewart

Το εμπορικό κόστος μιας πλατφόρμας Stewart είναι συνδυασμός του βάρους-φορτίου που θα δεχθεί η κινούμενη πλατφόρμα καθώς και του μεγέθους της όλης πλατφόρμας.

Πλατφόρμες Stewart (Διάφορα ωφέλιμα φορτία)

Πλατφόρμες Stewart (Ωφέλιμο Φορτίο 100 Kg)

1. Πλατφόρμα κίνησης Stewart Simulation 6-DOF 100kg ωφέλιμου φορτίου υψηλής ακρίβειας



Εταιρεία : Motustechs Co., Ltd
Εμπορικό κόστος : $8.140 - $8.880

Πλατφόρμες Stewart (Ωφέλιμο Φορτίο 150 Kg)

2.Πλατφόρμα κίνησης Stewart Simulation 6-DOF 150 kg ωφέλιμου φορτίου υψηλής ακρίβειας



Εταιρεία : Foshan World Safety Technology Co., Ltd
Εμπορικό κόστος : $20.200

Πλατφόρμες Stewart (Ωφέλιμο Φορτίο 300 Kg)

3.Πλατφόρμα κίνησης Stewart Simulation 6-DOF 300 kg ωφέλιμου φορτίου υψηλής ακρίβειας



Εταιρεία : Motustechs Co., Ltd
Εμπορικό κόστος : $9.900- $12.990

Πλατφόρμες Stewart (Ωφέλιμο Φορτίο 3.000 Kg)

4.Πλατφόρμα κίνησης Stewart Simulation 6-DOF 3.000 kg ωφέλιμου φορτίου υψηλής ακρίβειας



Εταιρεία : Shenzhen Packway Technology Development Co., Ltd
Εμπορικό κόστος : $1.600

Πλατφόρμες Stewart (Ωφέλιμο Φορτίο 4.000 Kg)

5.Πλατφόρμα κίνησης Stewart Simulation 6-DOF 4.000 kg ωφέλιμου φορτίου υψηλής ακρίβειας



Εταιρεία : Motustechs Co., Ltd
Εμπορικό κόστος : $96.000- $100.000

Πλατφόρμες Stewart (Προσομοιωτές όλων των τύπων)

6.Πλατφόρμα κίνησης Stewart 6-DOF προσομοιωτής ψυχαγωγίας αγωνιστικού αυτοκινήτου με τρεις οθόνες για VR



Εταιρεία : Guangzhou Juchuang Intelligent Technology Co., Ltd

Εμπορικό κόστος : $8.800.00

7.Πλατφόρμα κίνησης Stewart 6-DOF προσομοιωτής ψυχαγωγίας αγωνιστικού αυτοκινήτου με τρεις οθόνες για VR



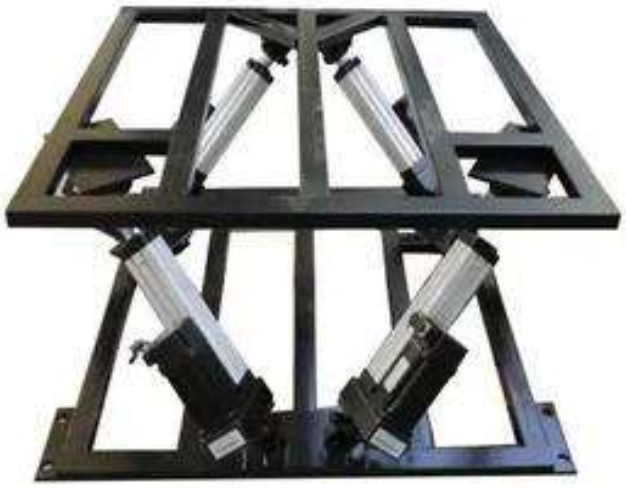
Εταιρεία : Guangzhou Movie Power Technology Co., Ltd.
Εμπορικό κόστος : $12.500

8.Πλατφόρμα κίνησης Stewart 6-DOF προσομοιωτής ψυχαγωγίας για σινεμά



Εταιρεία : Guangzhou Movie Power Technology Co., Ltd.
Εμπορικό κόστος : $15.500

9.Πλατφόρμα κίνησης Stewart 6-DOF προσομοιωτής πτήσης (μόνο η πλατφόρμα)



Εταιρεία : Shenzhen Tela Technology Co., Limited
Εμπορικό κόστος : $6.800

Επίλογος

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία αναλύθηκε ο ρομποτικός μηχανισμός της πλατφόρμας Stewart και μελετήθηκε η κινηματική της ανάλυση καθώς και τα διάφορα πεδία εφαρμογής της καθώς και το κόστος της στο εμπόριο ανάλογα με το μέγεθος και το ωφέλιμο φορτίο τους . Ύστερα από τη μελέτη και εκπόνηση αυτής της πτυχιακής αποτυπώθηκαν τα εξής συμπεράσματα, στα οποία είτε πλεονεκτεί είτε μειονεκτεί η πλατφόρμα Stewart:

- Το βασικότερο σημείο που πλεονεκτεί η πλατφόρμα Stewart είναι η ιδιαιτερότητα του μηχανισμού της που λειτουργεί κατά των έξι (6) βαθμών ελευθερίας.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άφθονες εφαρμογές, αφού μπορεί να κατασκευαστεί σε οποιοσδήποτε μέγεθος.
- Υπάρχει δυνατότητα, στην άνω βάση της, να τοποθετηθεί οποιοδήποτε μοντέλο προσομοίωσης ή οποιαδήποτε αρπάγη, πράγμα το οποίο την κάνει εφαρμόσιμη σε διάφορες κατασκευές ρομποτικών μηχανισμών.
- Με δεδομένο ότι είναι ένας ρομποτικός μηχανισμός κλειστής κινηματικής αλυσίδας, παρέχει μεγάλη μηχανική ακαμψία, οπότε και τη δυνατότητα αντοχής σε μεγάλες καταπονήσεις παρόλο που είναι έξι (6) βαθμών ελευθερίας. Οι καταπονήσεις βέβαια εξαρτώνται πάντα από το μέγεθός της.
- Αναλόγως με τις καταπονήσεις που δέχεται και το περιβάλλον που θα λειτουργεί, υπάρχει η δυνατότητα να ελεγχθεί με διαφόρους τύπους επενεργητών.
- Κατά την κινηματική της ανάλυση, επειδή είναι ένας ρομποτικός μηχανισμός κλειστής κινηματικής αλυσίδας, είναι πιο εύκολο να υπολογιστεί το αντίστροφο κινηματικό, εν αντιθέσει με το ευθύ που δεν έχει μοναδική λύση για την πλατφόρμα Stewart. Ενώ συμβαίνει το αντίθετο σε κάθε ρομποτικό βραχίονα ανοιχτής κινηματικής αλυσίδας.
- Το κόστος της πλατφόρμας είναι συνάρτηση του μεγέθους της πλατφόρμας και του ωφέλιμου φορτίου.

Βιβλιογραφία

[1] web: https://en.wikipedia.org/wiki/Stewart_platform

[2] web: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2015/928139

[3]web:https://www.ferrobotics.com/app/uploads/2020/11/Publikation_movic2008_Gattringer_Naderer.pdf

[4] web: https://acrome.net/post/the-use-of-the-stewart-platform-in-real-life

[5] web: https://www.mdpi.com/2075-1702/10/8/711

[6] web: https://wikipredia.net/el/Stewart_platform

[7] web: https://docplayer.gr/54466884-3-platforma-stewart-exi-vathmon-eleytherias-14.html

[8] web: https://gr.packwaymachines.com/news/detail-259771.html

[9] web: https://www.alibaba.com/showroom/stewart-platform.html

[11] web: https://acrome.net/post/exploring-acromes-stewart-platform-capabilities-deliverables-and-usage

[12] web: https://www.alibaba.com/product-detail/High-Precision-payload-100kg-6-DOF_1600573423383.html?spm=a2700.7724857.0.0.4fba70ecsNzuH4

[13] web: https://www.alibaba.com/product-detail/Earn-Money-6-Dof-Motion-Platform_1600669695652.html?spm=a2700.7724857.0.0.4fba70ecsNzuH4&s=p

[14] web: https://www.alibaba.com/product-detail/High-Quality-Motion-7D-9D-Cinema_60438980479.html?spm=a2700.details.you_may_like.4.31475ebedaDUum

[15] web: https://www.alibaba.com/product-detail/Wholesale-Precision-Precision-Vibration-Platform-4000kg_1600087667868.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.6ae05f29Cb9E8X

[16] web: https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/16196

[17] web: https://scholar.archive.org/work/aypszscmtrc5fj2eqt64ib33ha

[18] web: https://symetrie.fr/wp-content/uploads/2018/09/SYMETRIE_Positioning-hexapods-catalog.pdf

[19] web: https://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1024/418/1/M-EFAR-2019.pdf

[20]web:https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb_etd/etd/r/1501/10?clear=10&p10_accession_num=ohiou1606121360298874

[21]web: https://open.library.ubc.ca/media/stream/pdf/831/1.0065196/2

[22] web: https://scholarworks.bgsu.edu/ms_tech_mngmt/25/

[23] web: https://www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2023-01/07_Lupulescu_Alina_Elena_Studies%20on%20stewart%20platform%20%E2%80%93%20a%20review.pdf

[24] web: https://www.iri.upc.edu/files/academic/thesis/19-Singularity-Invariant-Leg-Rearrangements-in-Stewart-Gough-Platforms.pdf

[25] web: https://goldberg.berkeley.edu/pubs/2018_ISMR_stewart_design.pdf