

ISTORIA ROBOȚILOR PARALELI

Alexandra ROTARU¹

alexandra.rotaru11@gmail.com

ABSTRACT: In the past few decades, a considerable attention was given to the parallel robots and most of the scientific papers refer in the introduction that they were initially proposed to deal with the drawbacks of serial ones. These types of robots are stiffer, faster and more accurate and they have numerous applications in many fields. The first *hexapod* was built in 1950 by E. Gough that many, paradoxically, refer to as the *Stewart* platform. Klaus Cappel also designed independently the same hexapod, licensed and built most motion simulators prior to early 1980, but no one even knew about him. This paper presents a short description of the importance of parallel robots in the industry field and the history of their development which illustrates the huge gap that exists between industry and academia and gives a few examples of some type of parallel robots that revolutionized industry.

KEYWORDS: parallel robots, octahedral hexapod, mechanism

Introducere

Ultimii ani au fost marcați de o dezvoltare importantă a utilizării roboților în lumea industrială, în principal datorită flexibilității lor. Aceștia oferă avantaje incontestabile în raport cu munca operatorilor umani, cum ar fi: viteză și precizie de execuție, ușurință în utilizare, preț de cost relativ scăzut etc., pentru cele mai multe aplicații.

Roboții industriali se împart în general în două categorii: seriali și paraleli. Multe lucrări de specialitate susțin că roboții paraleli au fost propuși inițial pentru a face față problemelor întâlnite la echivalenții lor seriali, și anume: o capacitate redusă de încărcare, precizie scăzută și o slabă rigiditate a elementelor componente. Acest tip de roboți a fost introdus acolo unde era nevoie de o rigiditate și de o precizie mai mare de poziționare al *end-effector*-ului în raport cu dimensiunile robotului.

¹ Student – doctorand al Școlii Doctorale de Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice, asistent al Universității POLITEHNICA din București, Departamentul de Teoria Mecanismelor și a Roboților

Roboții paraleli au o multitudine de aplicații în domenii cum ar fi: electronica, sectoarele alimentare și farmaceutice, aeronautică sau dispozitive medicale.

Alegerea acestui subiect referitor la evoluția istorică a roboților paraleli s-a considerat a fi o parte importantă din cadrul lucrării de doctorat, care se află în stadiu de finalizare și susținere, teză care are ca subiect optimizarea dimensiunilor elementelor componente ale roboților industriali paraleli.

Prezenta lucrare este alcătuită din două părți. În prima parte se face o descriere a roboților paraleli: definirea acestora, prezentarea elementelor structurale, a avantajelor și dezavantajelor utilizării structurilor paralele și câteva dintre cele mai importante aplicații. A doua parte conține evoluția istorică a roboților paraleli și descoperirea unor structuri paralele care au revoluționat lumea industrială. Numeroase resurse bibliografice și brevete de invenție au fost consultate în realizarea acestei lucrări științifice.

Descrierea roboților paraleli

Mecanismele cunoscute ca roboți paraleli sunt definite în terminologia pentru știința mecanismelor și a mașinilor ca manipolatoare care controlează mișcarea *end-effectorul*-ului prin intermediul unor lanțuri cinematice paralele [14].

Roboții paraleli au devenit o parte indispensabilă a roboților generali în industrie și în mediul academic. În afară de acest lucru, odată cu dezvoltarea rapidă a roboților paraleli cu câteva decenii în urmă, cercetarea privind teoria mecanismelor, modelarea cinematică și dinamică, sinteza dimensională și optimizarea proiectării au crescut pe scară largă.

Din punct de vedere al elementelor structurale, într-un robot paralel se distinge o platformă fixă, o platformă mobilă și mai multe lanțuri cinematice de conexiune. Fiecare dintre acestea din urmă sunt la rândul lor lanțuri cinematice de tip serial, ale căror cuple exterioare (potențiale) sunt adiacente celor două platforme. Spre deosebire de roboții seriali, ale căror articulații sunt toate acționate de motoare, roboții paraleli au cuplele motoare între elementele lanțurilor cinematice de conexiune, ceea ce constituie o diferență semnificativă între cele două tipuri. Prezența articulațiilor neacționate face ca analiza roboților paraleli să fie în general mult mai complicată decât a celor seriali [9].

Acest tip de mecanism este interesant din mai multe motive [8]: un minim de două lanțuri ce permit distribuirea sarcinii pe lanțurile cinematice

de conexiune, numărul motoarelor de acționare minim, numărul minim de senzori necesari pentru controlul în buclă închisă al mecanismului și posibilitatea robotului de a rămâne în propria sa poziție, atunci când motoarele de acționare sunt blocate, acesta fiind un aspect de siguranță pentru anumite aplicații, cum ar fi în domeniul roboticii medicale.

Topologia structurii afectează performanța generală a robotului. Spre deosebire de roboții seriali pentru care există un număr limitat de structuri mecanice, roboții paraleli au o foarte largă varietate de posibile structuri și soluții constructive, fiecare cu avantaje și dezavantaje specifice.

Avantaje și dezavantaje ale roboților paraleli

Arhitectura mecanică a roboților paraleli împarte încărcătura manipulată între lanțurile cinematice de conexiune și ca rezultat, fiecare lanț poartă doar o fracțiune din sarcina totală. Astfel, este posibilă crearea structurilor mecanice cu o rigiditate mai mare, care conțin legături mobile cu mase relativ mici.

Masele mici ale elementelor componente favorizează în timpul mișcării o bună comportare dinamică, ceea ce asigură viteze și accelerații mari de maxim 6 m/s, respectiv 22 g. Un alt avantaj al mecanismelor paralele este că au o precizie foarte bună de poziționare al *end-effector*-ului (0,010–0,005 mm).

Un dezavantaj al roboților paraleli în comparație cu roboții seriali este spațiul de lucru limitat datorită dimensiunilor geometrice ale elementelor. Spațiul de lucru al roboților paraleli este redus și de existența singularităților, care sunt poziții unde variațiile lungimii motoarelor liniare de acționare, sau rotațiile celor rotative, produc deplasări infinite de mici ale *end-effector*-ului. În apropiere de o poziție singulară, o forță (precum greutatea) aplicată *end-effector*-ului, induce solicitări foarte mari în sistemele de acționare. De asemenea, modelul geometric și cinematic complicat al roboților paraleli afectează sistemul de conducere și control.

Determinarea pozițiilor singulare ale unui robot paralel general este o problemă mai dificilă decât pentru un robot serial; unele poziții singulare pot să se găsească – în unele cazuri particulare – în interiorul spațiului de lucru al robotului paralel. Acest lucru are ca efect faptul că spațiul de lucru al robotului paralel este de obicei limitat artificial la o regiune mică în care se știe că nu există nici o singularitate.

Un alt dezavantaj al roboților paraleli este comportamentul lor neliniar: comanda de care este nevoie pentru a obține o mișcare liniară sau circulară a unui punct al *end-effector*-ului depinde de locația spațiului de lucru și nu variază liniar în timpul mișcării.

Din punct de vedere al domeniului de aplicații, roboții seriali au operații simple și variate pe spații largi. În cazul roboților paraleli însă, operațiile sunt complexe la viteze și accelerații mari, într-un spațiu de lucru redus.

Aplicații ale roboților paraleli

Numărul de aplicații în care sunt utilizate structurile robotice paralele este unul foarte mare și zeci de companii oferă în prezent roboți paraleli, în cea mai mare parte *hexapodi* și roboți *Delta*. În cazul simulării mișcării, una dintre cele trei aplicații populare pentru roboții paraleli, liderul în industrie este Moog. Un alt furnizor major al sistemelor de mișcare este Bosch Rexroth. Există zeci de alți constructori mai mici cum ar fi InMotion Simulation și Servos & Simulation [16].

După propunerea inițială a platformei *Stewart*, au urmat numeroase dezvoltări ale roboților paraleli pentru simulatoarele de zbor. În prezent, multe companii construiesc simulatoare de mișcare cu realitate virtuală, nu numai pentru aeronave, ci și pentru nave, trenuri, camioane etc. Acest sector este probabil cel în care structurile paralele au cel mai mult succes, putându-se menționa CAE (Canada), Thalès (France), Frasca (USA).

În cazul multor roboți paraleli, motoarele sunt fixate la bază, ceea ce permite părții mobile să fie relativ ușoară. Acest lucru a făcut ca roboții *Delta* să fie cei mai rapizi roboți care au fost proiectați până acum, cu o rată de transfer foarte înaltă și precizie ridicată ce le permite manipularea obiectelor fragile, precum cele întâlnite în industria alimentară.

Astfel, a doua aplicație populară a roboților paraleli este operația de asamblare. Roboții *Delta* care sunt cei mai utilizați în acest scop, sunt fabricați de ABB, FANUC, Kawasaki, Motoman, Panasonic și o mulțime de producători mai mici din întreaga lume. Alte tipuri de roboți sunt robotul *Quattro* cu patru grade de mobilitate produs de Adept Technology, *Veloce* de Penta Robotics, iar companiile Codian Robotics și VELTRU fabrică atât roboți standard *Delta*, cât și cu brațe duble, în timp ce Electro ABI oferă roboți *Delta* asimetrici cu trei brațe [16].

A treia cea mai populară aplicație este poziționarea precisă. Majoritatea acestor roboți sunt bazați pe *hexapodi* și *tripodi* și principalii producători

de *hexapodi* pentru alinierea cu precizie înaltă sunt PI, Symétrie, Newport, SmarAct și ALIO Industries.

Precizia înaltă de poziționare și rigiditatea mare a roboților paraleli îi determină să fie instrumente foarte folositoare în diferite domenii industriale. Ca primă aplicație industrială, structurile paralele robotice au fost proiectate prima dată pentru sarcini de montaj. Alte domenii ar fi: mașini – unelte, sudarea în puncte și tratamentul pieselor. Majoritatea mașinilor cinematice paralele sunt construite de către Starrag Group, Metrom și de către licențiații de la Exechon. În cele din urmă există companii care oferă produse bazate pe roboți paraleli, cum ar fi, de exemplu, jucăriile *IXI-play*.

Precizia înaltă a structurilor paralele le face să fie bune candidate pentru mașinile de măsură. Datorită lățimii mari de bandă, structurile paralele pot fi utilizate în amortizarea vibrațiilor și pentru măsurătoarea de forțe și vibrații. De asemenea, sunt alegera preferată pentru dispozitivele haptice sau *joystick*-uri, care sunt fabricate de Force Dimension, Entact Robotics și Novint.

În ceea ce privește aplicațiile spațiale, mecanismele paralele au fost propuse pentru astfel de dispozitive de foarte mult timp, o primă utilizare fiind studierea trenului de aterizare al unui modul lunar. Structurile formate din bare articulate sunt special adaptate pentru construirea unor structuri spațiale reconfigurabile, iar *hexapod*-urile gonflabile au fost luate în considerare pentru desfășurarea unor structuri ușoare de mari dimensiuni în utilizarea spațială.

O utilizare de succes a structurilor paralele este la construcția dispozitivelor de indicare pentru telescoape. Aproape toate telescoapele recente utilizează *hexapod*-uri: ca sistem secundar de aliniere al oglinzii, ca dispozitiv primar de indicare al poziției oglinzii sau ca instrument științific.

Roboții paraleli au pătruns în domeniul medical cu sisteme ca *Da Vinci* (Intuitive Surgical) sau *Zeus* (Computer Motion). În sistemul *Crigos* al lui Brandt, un robot paralel a fost utilizat pentru operații chirurgicale ortopedice.

Este posibil să se utilizeze și un alt avantaj al structurilor paralele: comparate cu cele seriale, ele sunt mult mai puțin sensibile la efectul de scalare și de aceea sunt adecvate pentru micro-roboți. În aplicațiile medicale sunt potrivite pentru chirurgie minim invazivă, în special endoscopia.

Evoluția istorică a roboților paraleli

Dintre diferiții autori care se ocupă cu originile roboților paraleli, cercetătorul I. A. Bonev [15] consideră că istoria lor a început atunci când un mare vizionar s-a gândit să construiască o platformă mobilă pentru industria de divertisment. Acest dispozitiv pentru distracție a fost proiectat de James E. Gwinnett și brevetat în 1931 [1]. Surprinzător a fost faptul că acest dispozitiv era bazat pe un robot paralel sferic. Din păcate, industria divertismentului nu a acordat atenție unei astfel de invenții la acea vreme.

Zece ani mai târziu, Williard L. V. Pollard a proiectat un nou robot paralel pentru vopsire prin pulverizare automată [3], care este considerat ca fiind primul robot industrial paralel. Această invenție reprezintă un robot paralel cu cinci grade de mobilitate, în care trei brațe proximale pivotează cu ajutorul unor motoare rotative fixate la bază, iar trei brațe distale sunt conectate la cele trei brațe proximale prin articulații universale. Două dintre brațele distale sunt conectate la a treia prin articulații sferice, în timp ce capul sculei este conectat la al treilea braț distal printr-o cuplă cardanică. Astfel, cele trei motoare determină poziția capului sculei, în timp ce orientarea sa este controlată de alte două motoare fixate la bază, care transmit mișcarea către capul sculei printr-un cablu flexibil rotativ [15].

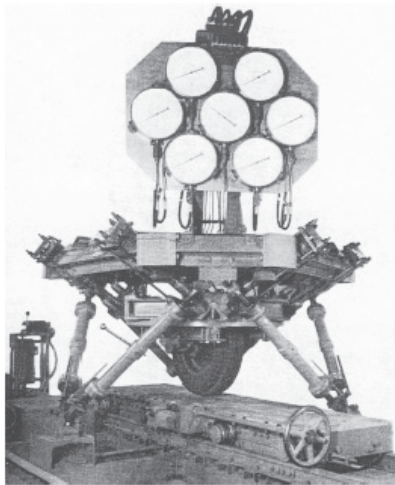


Fig. nr. 1 – Primul hexapod octaedric – platforma originală Gough construită în 1954

Robotul paralel a lui W. L. V. Pollard a fost destinat pentru vopsirea prin pulverizare, dar nu a fost, din păcate, niciodată construit. Fiul lui W. Pollard a fost cel care a proiectat și construit primul robot industrial paralel [2]. Williard Pollard Jr. a depus la 29 octombrie 1934 un brevet pentru o mașină de vopsit prin pulverizare. Brevetul de invenție este alcătuit din două părți: un sistem de control electric și un manipulator mecanic. Sistemul de control este format în principal din pelicule perforate, densitatea găurii fiind direct proporțională cu viteza fiecărui motor. Manipulatorul mecanic este un robot paralel bazat pe un pantograf acționat de două motoare rotative la bază.

Brevetul lui W. Pollard Jr. a fost emis în cele din urmă la 16 iunie 1942, iar între timp, în 1937 a fost acordată o licență companiei DeVilbiss. În 1941, această companie a devenit primul furnizor de roboți industriali, finalizând primul prototip sub conducerea lui Harold Roselung. Robotul de vopsire prin pulverizare a lui H. Roselung, brevetat în 1944 [4], a utilizat doar sistemul de control propus de W. Pollard Jr. și nu a fost un robot paralel.

Dezvoltarea industrială a structurilor paralele a început însă cu adevărat în 1947, când un nou robot paralel a fost inventat, un robot care avea să devină cel mai popular și care a schimbat industria – primul *hexapod* octaedric (fig. nr. 1). Inventat de Eric Gough, inginer auto la Dunlop Rubber Co. din Birmingham, Anglia, acest dispozitiv a dorit să răspundă problemelor de aterizare în cazul unor sarcini ridicate, astfel era necesară o mașină universală care să determine proprietățile anvelopelor sub sarcini combinate.

Acest *hexapod* octaedric nu a fost inventat de la zero, deoarece, așa cum E. Gough menționează în propria sa lucrare [11], sistemele de tip *hexapod* erau deja cunoscute la acea vreme. Astfel de tipuri de sisteme sunt în continuare fabricate de numeroase companii.

Noutatea platformei Gough era aranjamentul celor șase bare de susținere. Deoarece Eric Gough avea nevoie de intervale relativ mari de mișcare, el a ales în mod natural un aranjament simetric, formând astfel un octaedru. Mașina a fost construită la începutul anilor 1950 și a fost pe deplin operațională în 1954. Proiectarea originală a presupus utilizarea unor articulații universale la bază și la platforma mobilă. O a doua structură de tip *hexapod* montată sub platforma mobilă încorporează celulele de sarcină. Un deceniu mai târziu mașina a fost actualizată cu motoare de acționare controlate digital și înregistrare electronică a celulelor de sarcină. Dispozitivul

universal al lui E. Gough a continuat să fie funcțional în fabrica Dunlop până aproape în prezent.

În anii 1960, expansiunea industriei aeronautice, creșterea costurilor pentru instruirea piloților și necesitatea de a testa noi aeronave a condus la crearea unor noi structuri mecanice capabile să deplaseze o platformă cu o sarcină utilă foarte mare (care poate transporta de exemplu carlingi de aeronave). Scopul acestor sisteme era de a crea manipolatoare cu capacități de accelerare rotațională foarte mari. În acest scop, *hexapozii* sunt foarte potriviți deoarece au raport foarte ridicat al sarcinii utile/masa structurii.

Idea de a utiliza *hexapozii* pentru aeronautică a apărut în 1965, când D. Stewart a descris un manipulator cu șase grade de mobilitate pentru utilizare ca simulator de zbor [12]. Mecanismul paralel propus este diferit de *hexapod*-ul octaedric care este adesea denumit „platforma Stewart”. Articolul a avut un impact imens asupra dezvoltării ulterioare în domeniul roboților paraleli.

În anul 1962, inginerul american Klaus Cappel a fost solicitat de Laboratoarele de cercetare ale Institutului Franklin din Philadelphia să îmbunătățească un sistem de vibrații convențional existent cu șase grade de mobilitate bazat pe un hexapod. Cuplele motoare orizontale nu erau trei la număr, ci patru și erau așezate într-un model ciclic, într-o încercare de a reduce masele orizontale necesare. Cu toate acestea, redundanța configurației cu cele șapte bare de susținere era prea complexă pentru a putea fi controlată, iar forțele rezultate fracturau în cele din urmă masa. Prin observarea tuturor acestor lucruri, K. Cappel a venit cu același aranjament octaedric propus de E. Gough [5].

În acest fel, în 1971, US Patent și TradeMark Office a acordat un brevet lui Klaus Cappel pentru propria sa invenție și pentru utilizarea lui ca simulator de mișcare. Brevetul a fost depus la 7 decembrie 1964, moment la care K. Cappel nu avea cunoștință de invenția lui E. Gough sau de articolul lui D. Stewart, nepublicat încă. Cererea de brevet de invenție și ideea simulatorului de mișcare a rezultat din cererea biroului corporativ al Diviziei de Aeronave Sikorsky pentru proiectarea și construcția unui simulator de zbor cu elicopterul, care să aibe șase grade de mobilitate.

Acesta a fost primul simulator de zbor construit (fig. nr. 2) care era bazat pe un *hexapod* octaedric, iar prima licență a fost acordată la sfârșitul anilor 1960 primului producător de simulatoare de zbor, Link. De-a-lungul timpului, K. Cappel a elaborat diverse alte sisteme paralele cinematice

pentru testarea la vibrații. Cu toate acestea, a fost nevoie de o lungă perioadă pentru ca aceste proiectări să fie acceptate în industrie.

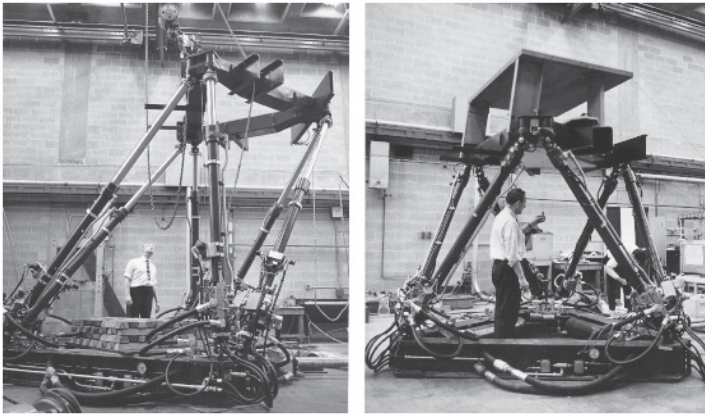


Fig. nr. 2 – Primul simulator de zbor bazat pe un hexapod octaedral a lui K. L. Cappel

Potrivit lui K. Cappel, răspunsul inițial la acest nou concept de *hexapod* a fost unul negativ pentru mulți ani, până a fost acceptat pe scară largă. Decenii mai târziu, mii de astfel de *hexapodi* octaedrici aproape identici sunt în continuare fabricați, mai ales pentru simulatoarele de mișcare. Cu toate acestea, încă sunt companii care copiază mecanic această proiectare, fără a avea nici o noțiune de spațiu de lucru, singularități sau cinematică directă.

E. Gough a fost primul care a inventat și construit popularul *hexapod* octaedric cunoscut ca platforma Gough. Cu toate acestea, K. Cappel, care a proiectat în mod independent același hexapod, l-a brevetat, a trimis licența primelor companii de simulatoare de zbor și a realizat primele simulatoare de mișcare comerciale de tip *hexapod* octaedric. Însă cel care, în mod neintenționat, a făcut popular conceptul Gough a fost D. Stewart, care a propus idea de simulatoare de zbor mediului academic.

Acest robot paralel bazat pe o structură de tip *hexapod* octaedric nu ar trebui numit nici platforma Gough, nici Cappel sau Stewart, iar contribuțiile celor trei ingineri ar trebui să fie recunoscute corespunzător. Ei pot fi considerați cu adevărat pionierii roboților paraleli [10].

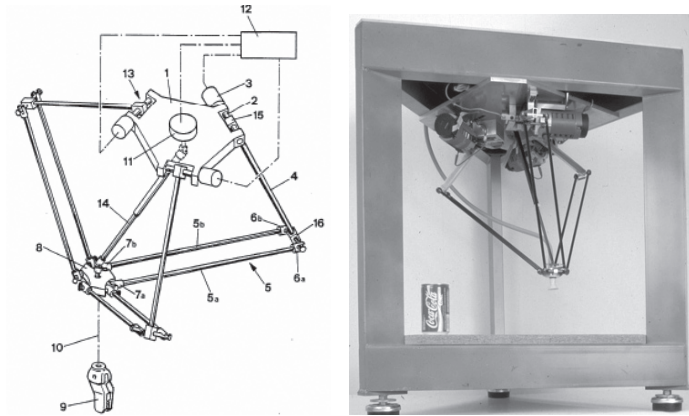


Fig. nr. 3 – Figura schematică a robotului paralel *Delta* din brevetul prof. R. Clavel [7] și primul robot *Delta* construit în 1985

Pentru următoarele două decenii, roboții paraleli au atras puțină atenție, dar la începutul anilor 1980, popularitatea lor a început dintr-odată să crească fără oprire [13]. În 1985, Donald C. Fyler de la Laboratorul Charles Stark Draper din Statele Unite ale Americii, a venit cu ideea de a folosi un mecanism cu cinci bare ca robot [6]. El susținea că acest robot este o bună alternativă la robotul *SCARA* care a fost inventat în 1979 de profesorul Hiroshi Makino. Sute de alte modele noi au fost propuse și aproape la fel de multe aplicații depuse [8]. Multe dintre aceste arhitecturi paralele sunt cu adevărat inovatoare, dar a fost unul care a devenit cel mai de succes robot paralel pentru aplicații industriale: robotul *Delta*.

În vara anului 1985, profesorului Raymond Clavel de la EPFL, Elveția, a venit cu ideea originală de a utiliza paralelograme pentru a construi un manipulator paralel cu patru grade de mobilitate, pentru poziționarea și orientarea unui element în spațiu (fig. nr. 3). El a aplicat pentru o serie de brevete [7], pe baza cărora autorul și câteva companii, inclusiv ABB, a obținut în cele din urmă licența pentru fabricarea propriei invenții. Pe durata de viață a brevetelor sale, mai mult de 10 000 de unități au fost fabricate. Astăzi, proiectarea robotului *Delta* nu mai este protejată și zeci de companii oferă propriile versiuni, inclusiv FANUC, Motoman și Kawasaki.

În prezent există roboți paraleli cu diferite arhitecturi, fiecare potri-viți pentru anumite aplicații. Câteva exemple reprezentative sunt robotul Quattro produs de Adept Technologies, manipulatorul Paradex, robotul

Tricept, micro-robotul chirurgical MIPS, robotul paralel Orthoglide sau robotul CaPaMan al lui M. Ceccarelli.

Concluzii

Roboții paraleli sunt o parte indispensabilă a domeniului industrial, iar în mediul academic, numeroase lucrări de specialitate tratează acest subiect. Caracteristicile structurale, cum sunt rigiditatea ridicată, un raport mare al masei manipulate față de masa robotului, o bună comportare dinamică și o precizie mare de poziționare al *end-effector*-ului în raport cu dimensiunile robotului, permit utilizarea lor în foarte multe aplicații practice.

Istoria roboților paraleli relevă faptul că ei nu se bazează pe o tehnologie nouă, deoarece lucrările teoretice legate de mecanismele paralele, în special cele de tip *hexapod*, datează de foarte mult timp. În evoluția istorică a acestor roboți industriali sunt prezente invenții care sunt cu mult înaintea timpului lor, industria nefiind pregătită pentru astfel de dispozitive complexe.

Pionierii roboților paraleli cu o structură de tip *hexapod* octaedric sunt inginerii E. Gough, K. Cappel și D. Stewart, iar contribuțiile acestora ar trebui apreciate în mod corespunzător. Dintre multele arhitecturi paralele inovatoare nu trebuie uitat profesorul R. Clavel, al cărui robot *Delta* este unul dintre cei mai de succes roboți paraleli utilizați în aplicațiile industriale.

Deși au fost scrise multe publicații care au avut ca subiect structurile de tip *hexapod*, nimeni nu a încercat să contacteze compania Dunlop, unde primul *hexapod* octaedric a funcționat anonim timp de zeci de ani. Klaus Cappel a licențiat și construit cele mai multe simulatoare de mișcare înainte de începutul anilor 1980, dar nu se menționează nimic despre el. Ceea ce era cunoscut de către cercetători privind istoria roboților paraleli se baza pe articolul publicat al lui D. Stewart, care a fost prezentat mediului academic.

Toate aceste lucruri relevă distanța care există între industrie și mediul academic, individualismul și superficialitatea din cadrul cercetărilor în domeniul tehnic.

În prezent există o multitudine de informații și expertiză legată de roboții paraleli, dar de care mediul industrial nu profită îndeajuns de mult. În continuare sunt inventate noi mecanisme și noi modele de roboți

paraleli de care industria, de cele mai multe ori, nu are o nevoie actuală. Deși E. Gough, D. Stewart și K. Cappel și-au creat invențiile neștiind unul de altul, totuși, ei le-au realizat ca răspuns direct la nevoile industriale.

Bibliografie:

- [1] James E. Gwinnett, „*Amusement devices*”, US Patent No. 1,789,680, 20 Ianuarie 1931.
- [2] Williard Lacey George Pollard Jr., „*Spray Painting Machine*”, US Patent No. 2,213,108, 26 August 1940.
- [3] Williard L. V. Pollard, „*Position controlling apparatus*”, US Patent No. 2,286,571, 16 Iunie 1942.
- [4] H. A. Roselung, „*Means for moving spray guns or other devices through predetermined paths*”, US Patent No. 2,344,108, 14 Martie 1944.
- [5] Klaus L. Cappel, „*Motion Simulator*”, US Patent No. 3,295,224, 3 Ianuarie 1967.
- [6] D. C. Fyler, „*Control arm assembly*”, US Patent No. 4,712,971, 15 Decembrie 1987.
- [7] Reymond Clavel, „*Device for movement and displacing of an element in space*”, US Patent No. 4,976,582, 11 Decembrie 1990.
- [8] Jean-Pierre Merlet, „*Parallel Robots*”, Springer, 2nd edition, 2006.
- [9] Jorge Angeles, „*Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms*”, Second Edition, Ed. Springer, 2003.
- [10] Dan Zhang, „*Parallel Robotic Machine Tools*”, Ed. Springer Science + Business Media, New York, 2010.
- [11] Eric V. Gough, S. G. Whitehall, „*Universal tyre test machine*”, Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress, p. 117–137, Mai 1962.
- [12] D. Stewart, „*A platform with six degrees of freedom*”, Proceedings of the IMechE, vol. 180, pt. 1, p. 371–385, 1965–66.
- [13] E. F. Fichter, „*A Stewart platform-based manipulator: General Theory and practical construction*”, The International Journal of Robotics Research, vol. 5, Nr. 2, pp. 157–182, 1986.
- [14] Sébastien Briot, „*Analysis and Optimization of a New Family of Parallel Manipulators with Decoupled Motions*”, Ph. D. Thesis, INSA de Rennes, 20 Iunie 2007.
- [15] Illian A. Bonev, „*The true origins of parallel robots*”, 24 Ianuarie 2003 <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>
- [16] <http://www.mecademic.com/What-is-a-parallel-robot.html>