

PREHENSIUNE ȘI MINIMANIPULARE ÎN ROBOTICĂ - NOI CONTRIBUȚII

Ionel STAREȚU¹

staretu@unitbv.ro

Abstract. First, the paper presents the general structure of the human hand biosystem, then the significant historical landmarks of the evolution of the study of the human hand and the structural and functional characteristics of the human hand. Grip experimentation for several types of objects is presented. The adaptation of Cutkosky's taxonomy is also presented, through experiments for all the situations taken into account, to which is added the situation of holding between two adjacent fingers and holding firmly with two opposable fingers an object of relatively large dimensions. Similarly, the strong grip, according to Lyons, is experimented. The paper is highlighted by addressing the specific aspects of grips and minimanipulations for which suggestive tests are made, as well as the unitary presentation of the variety of human hand grip cases to substantiate and extend the taxonomy, best known to date, namely the taxonomy of Cutkosky. The aspects of the mathematical modeling of static grip and minimanipulation are presented. Below are the structural and functional characteristics of an anthropomorphic five-finger gripper, for which a prototype was made that was tested for different grip situations, which is controlled with a Motion Leap sensor. Finally, it is recommended to equip human arm robots with anthropomorphic finger grips of the type described to maximize the functionality of human robotic arms.

Keywords: human hand, grasp, minimanipulation, taxonomy, mathematical model, prototype, anthropomorphic gripper, robotic arm.

Rezumat. Această lucrare prezintă mai întâi structura generală a biosistemului mâinii umane, apoi reperele istorice semnificative ale studiului acesteia și caracteristicile structurale și funcționale ale mâinii umane. Este prezentată experimentarea prehensiunii cu mâna umană pentru mai multe tipuri de obiecte. Adaptarea taxonomiei lui Cutkosky este, de asemenea, prezentată, prin prinderi reale pentru toate situațiile luate în considerare inițial, la care se adaugă situația de a prehensa între două degete adiacente și de a prehensa ferm cu două degete opuse un obiect de dimensiuni relativ mari. În mod similar, este experimentată prinderea puternică (după Lyons). Lucrarea se evidențiază prin abordarea aspectelor specifice ale prehensiunii și minimanipulării, pentru care se fac teste sugestive și o prezentare unitară a varietății de cazuri de prehensiune cu mâna umană pentru fundamentarea și extinderea taxonomiei, cea mai cunoscută până în prezent, și anume taxonomia Cutkosky. Sunt prezentate aspectele modelării matematice a prehensiunii statice și a minimanipulării. De asemenea, sunt prezentate caracteristicile structurale și funcționale ale unui prehensor antropomorf cu cinci degete, pentru care a fost realizat un prototip ce a fost testat pentru diferite situații de prehensiune și este controlat cu un senzor de mișcare de tip Motion Leap. În cele din urmă, se recomandă echiparea roboților cu prehensoare antropomorfe de tipul celui descris pentru a maximiza în special funcționalitatea structurilor robotice de tip braț uman.

Cuvinte-cheie: mâna umană, prehensiune, minimanipulare, taxonomie, model matematic, prototip, prehensor antropomorf, braț robot.

Cuprins

1. Introducere
 - 1.1. Repere istorice
 - 1.2. Structura anatomică-cinematică a mâinii umane
2. Prehensiunea și minimanipularea umană – experimente semnificative
 - 2.1. Prehensiunea unui obiect de tip tijă
 - 2.2. Prehensiunea unui obiect de formă oarecare de mici dimensiuni
 - 2.3. Prehensiunea unui obiect de formă oarecare de mărime medie
 - 2.4. Minimanipularea unui obiect de tip tijă

¹ Prof. univ. dr. ing., Universitatea Transilvania din Brasov; Academia de Științe Tehnice din România.

3. Considerații privind modelarea matematică a prehensiunii
 - 3.1. Echilibrul unui sistem de corpuri solide
 - 3.2. Condițiile minime de prehensiune statică
 - 3.3. Condițiile matematice minime pentru stabilitatea minimanipulării
 4. Sistematizarea prehensiunii
 5. Prehensur antropomorf pentru roboți – simulare și testare - studiu de caz
 - 5.1. Aspecte preliminare
 - 5.2. Modelul CAD și simularea funcțională a unui prehensur antropomorf cu cinci degete
 - 5.2.1. Particularitățile structurale și funcționale ale prehensurului
 - 5.2.2. Modelul CAD al prehensurului
 - 5.2.3. Comanda prehensurului
 - 5.3. Prototipul prehensurului și testarea funcționării sale
 6. Sistem robotic integrat: braț robotic – prehensur antropomorf
 7. Concluzii
- Bibliografie

1. Introducere

În natură există o varietate foarte mare de biosisteme de prehensiune / prindere, denumite și bioprehensoare, care folosesc la prinderea în diferite moduri a obiectelor (corpurilor) cu care acestea intră în interacțiune. Studiul acestora a contribuit substanțial la îmbogățirea cunoștințelor despre ele și a fost și este deosebit de util pentru conceperea și perfecționarea sistemelor de prehensiune utilizate la roboți.

Mâna umană este evident cel mai important biosistem de prehensiune și datorită rolului esențial în edificarea civilizației prin îndeplinirea funcțiilor specific umane și ca purtător de unelte. În structura sa, de principiu, acest biosistem de prehensiune (Fig. 1) se compune din: partea creierului ce coordonează funcționarea biosistemului; fibrele musculare acționate de energia biochimică și care acționează prin tendoane scheletul osos al mâinii; pielea pentru percepția și controlul contactului cu obiectul prins; ochiul pentru identificarea locului și formei obiectului prins și nervii ce fac legătura între aceste componente și prin care se transmit informațiile necesare funcționării optime a biosistemului.

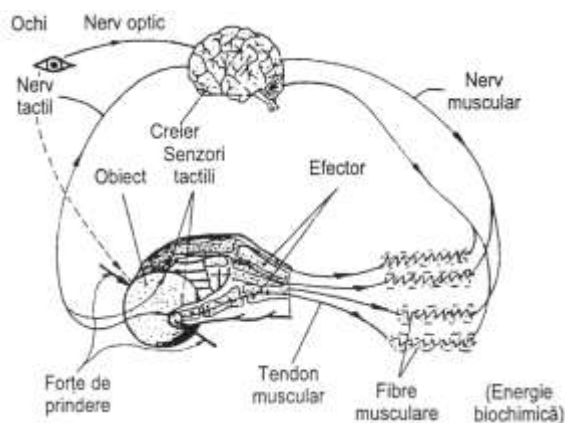


Fig. 1 - Structura bioprehensurului mâinii umane.

Din punct de vedere al prehensiunii, dintre componentele descrise mai sus, interesează în mod deosebit acea parte care realizează prinderea și dezvoltă forța necesară pentru aceasta, mâna ca parte a brațului uman. În special scheletul osos al acesteia va fi descris mai detaliat în continuare, deoarece structura sa permite, în primul rând, varietatea extrem de mare a modalităților de prehensiune.

Referitor la funcționalitate, mâna umană poate realiza prehensiunea (prinderea) cu unul până la cinci degete în funcție de mărimea și forma obiectului preluat.

1.1. Repere istorice

Mâna umană este, comparativ cu alte biosisteme de prehensiune întâlnite în natură, cel mai evoluat biomecanism de prehensiune, fiind și cel mai studiat și cercetat din cele mai vechi timpuri până astăzi. Încă cu mii de ani în urmă a fascinat omul acelor vremuri, care a încercat să lase diferite reprezentări ale sale cum sunt cele de la Altamira (Fig. 2), datate cu peste 20000 de ani î.e.n.



Fig. 2 - Reprezentarea mâinii umane la Altamira, Spania.

Reprezentări au fost și sub formă de sculpturi; dintre cele mai exacte în reprezentarea corpului uman, deci și a mâinilor, fiind sculpturile antice grecești, la care mâna este reprezentată în diferite situații de prehensiune a unor obiecte, cum este la statuia lui *Zeus din Olimpia* (Fig. 3 a), realizată de *Phidias* în jurul anului 435 î.e.n.; statuia ține în mâna stângă un glob ce susține o Victorie, iar cu mâna dreaptă ține un sceptru. Tot *Phidias* a realizat și statuia zeiței *Atena Parthenos* (Fig. 3 b), în anii 450 ÷ 448, la care se observă reprezentarea foarte elaborată a mâinilor în configurații simbolice. O altă statuie remarcabilă este *Discobolul* lui *Myron*, realizat de acesta în anii 460 ÷ 450 î.e.n., figurat în momentul prinderii discului (Fig. 3 c).

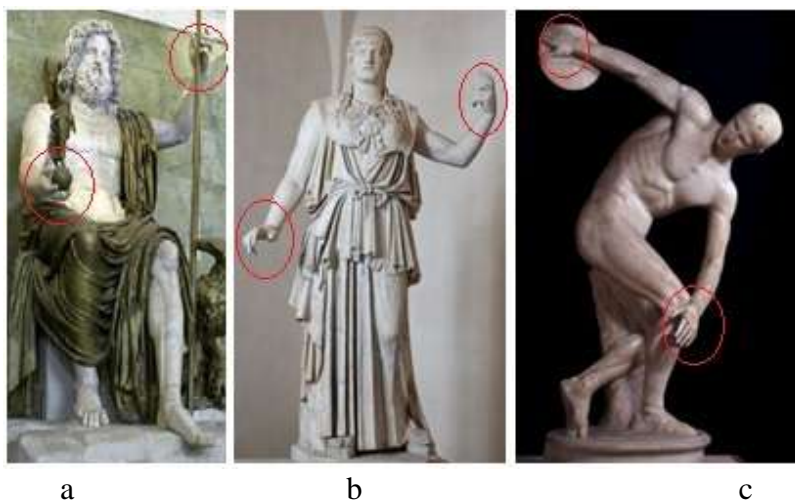


Fig. 3 - Reprezentarea mâinii umane la statuile Greciei antice.

Un rol important s-a dat mâinii în reprezentările creștine, a arhierilor la care mâinile au diferite configurații simbolice sau țin un obiect sacru - de obicei o carte (Fig. 4 a), a maștrilor constructori sau iconari care fac gesturi simbolice sau țin diferite instrumente specifice activității lor (Fig. 4 b).



Fig. 4 - Reprezentarea mâinii umane în iconografia de origine bizantină.

Din perioada Renașterii a început cercetarea structurii și funcționării mâinii. Evident că încercări în acest sens au fost făcute și mai înainte, dacă amintim numai faptul că școli de medicină au existat încă din mileniul I, de exemplu școala de medicină de la Universitatea din Constantinopol, care a funcționat încă înainte de anul 500, iar după anul 1000 astfel de școli au funcționat în mai multe centre europene, ca acela de la Montpellier (unde școala de medicină s-a înființat în sec. al XII-lea). Cu siguranță în aceste școli s-a studiat într-o oarecare măsură funcționarea și chiar anatomia mâinii umane. În continuarea acestor preocupări trebuie amintite lucrările lui *Leonardo da Vinci* (1452 ÷ 1519) – Fig. 5 și reprezentările scheletului uman de *Andreas Vesalius* (1514-1564) – Fig. 6, unde se observă că biomecanismul mâinii era deja cunoscut în detaliu.



Fig. 5 - Reprezentări ale mâinii la Leonardo da Vinci.



Fig. 6 - Scheletul uman de Andreas Vesalius.

O dovadă în plus în sensul celor de mai sus este și pictura lui *Rembrandt*, *Lecția de anatomie a doctorului Tulp* (Fig. 7), datată în anul 1632, în care se observă că se studiază prin disecție brațul uman, implicit mâna.



Fig. 7 – Rembrandt - Lecția de anatomie a doctorului Tulp, 1632 – Mauritshuis, Haga.

Evident că studiile anomiștilor Renașterii, în special cele ale lui *Leonardo da Vinci*, ca și ale altor oameni interesați de performanțele remarcabile ale mâinii (a se vedea pictura *Etude de main*, din 1715 de *Nicolas de Lorgillierre*, Muzeul Louvre – Franța), au continuat până în prezent, dar au fost însoțite și de încercări de a realiza copii, la început exclusiv mecanice, ale mâinii. În acest context sunt de amintit: robotul umanoid a lui *Leonardo da Vinci*, ale cărui schițe au fost realizate în jurul anului 1500, proteza *Goetz* din 1509 (Fig. 8), care este prima copie perfecționată a scheletului mâinii [16] și automatul mecanic al lui *Vaucanson*, *Flautistul* (*Le joueur de flûte* -1738) – Fig. 9, care cânta la flaut, având toate cele patru degete, din prelungirea palmelor celor două mâini, cinematic active.

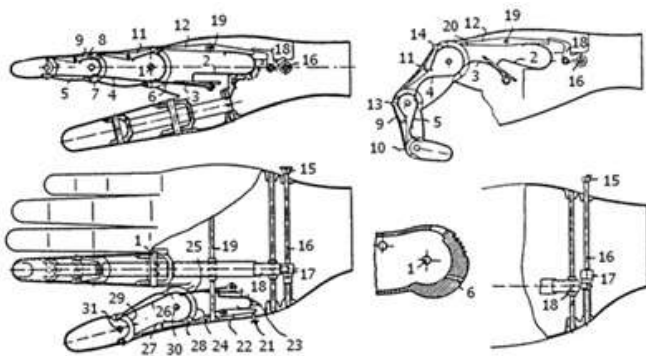


Fig. 8 - Proteza Goetz [1].



Fig. 9 - Flautistul lui Vaucanson.

1.2. Structura anatomică-cinematică a mâinii umane

Pentru a evidenția performanțele de prehensare și minimanipulare ale mâinii umane s-au făcut o multitudine de studii [2, 3, 4, 5], cu accent însă pe prehensare și mai puțin pe minimanipulare. Acestea s-au axat mai întâi pe evidențierea caracteristicilor structurale ale mâinii umane prin identificarea tipului de elemente componente, tipurile de articulații dintre acestea și stabilirea gradului de mobilitate, iar apoi pe evidențierea funcționalității mâinii umane pentru estimarea capacităților de

prehensiune ale acesteia. Din prima perspectivă, cea structurală, mâna umană este compusă din trei tipuri de elemente (oase) și anume: 8 oase carpiene, 5 oase metacarpiene și 14 falange (Fig. 10) [2].

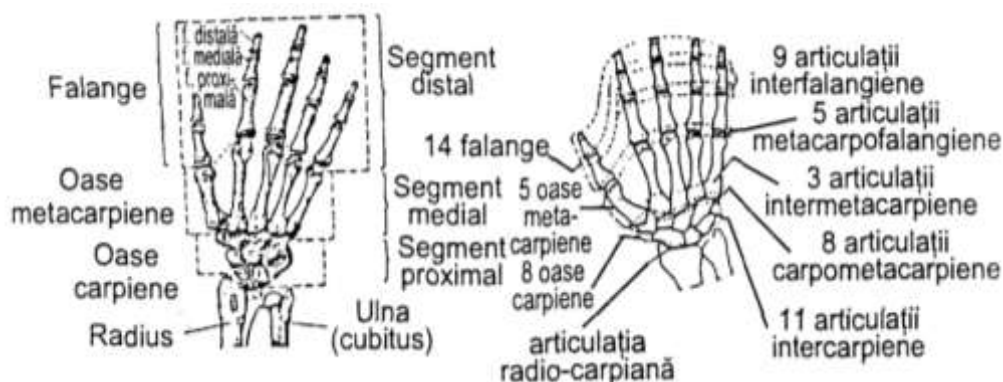


Fig. 10 - Structura osoasă a mâinii umane [2].

Între acestea există articulații (cuple cinematice) monomobile sau bimobile după cum urmează: 11 articulații intercarpiene, 3 articulații metacarpiene și 9 articulații interfalangiene. În plus există 8 articulații carpo-metacarpiene și 5 articulații metacarpo-falangiene. Rezultă un total de 27 de elemente (oase) și 36 de articulații. Ca urmare gradul de mobilitate al mâinii umane rezultă $M = 35$, numai la nivelul falangelor existând un grad de mobilitate de $M_f = 19$ [19]. Este semnificativ că posibilitățile deosebite de a avea diferite configurații și de a prehensa o varietate mare de obiecte, de dimensiuni proporționale cu cele ale mâinii, este și respectarea aproximativă a secțiunii de aur, raportul de 1,618 (Fig. 11), între dimensiunile oaselor metacarpiene și prima falangă ($13/8 = 1,625$), între dimensiunile primei falange și celei de a doua falange ($8/5 = 1,6$) și între dimensiunile ultimilor două falange ($5/3 = 1,66$).

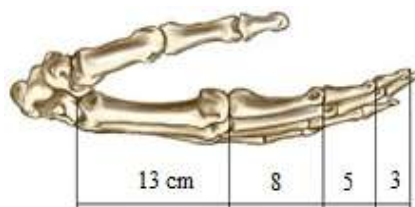


Fig. 11 - Evidențierea „secțiunii de aur” la mâna umană.

Cealaltă acțiune importantă care se poate realiza este minimanipularea obiectului prins, adică modificarea poziției acestuia fără schimbarea degetelor folosite la prehensare sau transferul obiectului de la prinderea cu unele degete la prinderea cu alte degete prin schimbarea contactelor dintre degete și obiectul prehendat. În această lucrare se exemplifică mai sugestiv decât până în prezent în alte lucrări și modalitățile de prehensare și minimanipulare din perspectiva prehensiunii robotizate pentru a reprezenta o referință mai clară pentru realizarea unor prehensoare antropomorfe performante pentru roboți.

2. Prehensiunea și minimanipularea umană – experimente semnificative

2.1. Prehensiunea unui obiect de tip tijă

În Fig. 12 se exemplifică prehensiunea pentru un obiect liniar de tip creion cu un deget, cu două degete, cu trei degete, cu patru degete și cu cinci degete (Fig. 12 a, b, c, d, e).

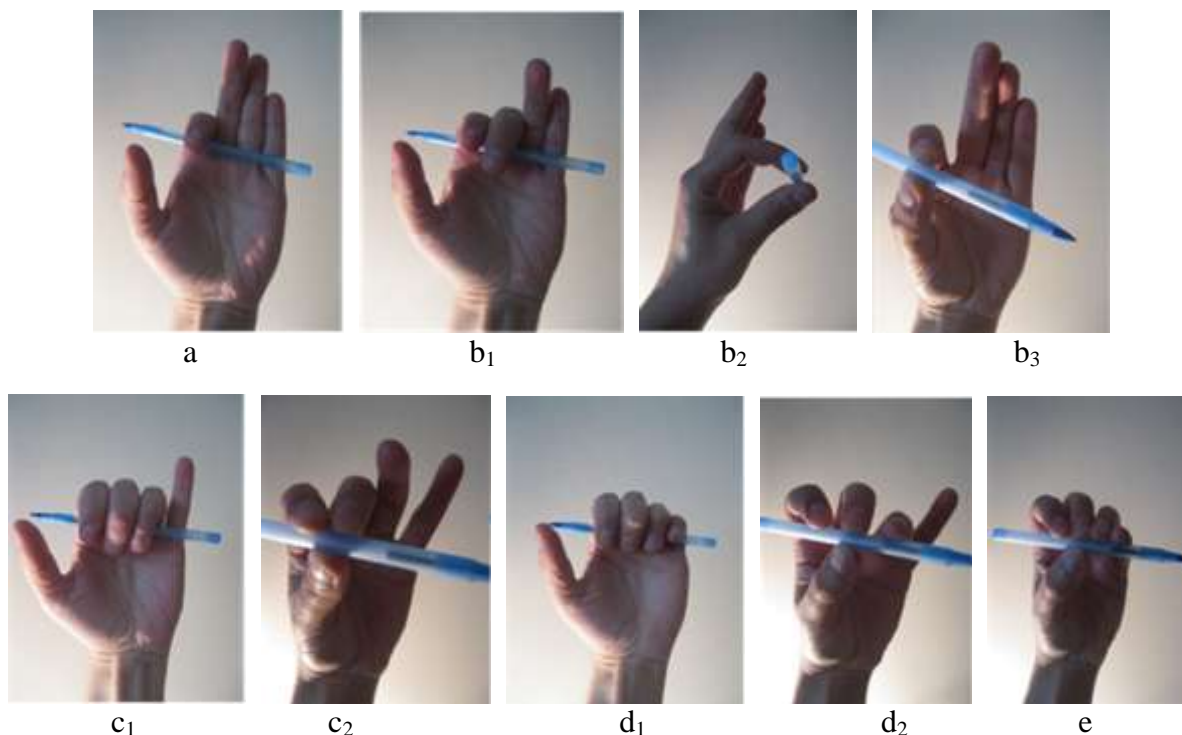


Fig. 12 - Prehensiunea cu mâna umană a unui obiect de tip tijă.

Se observă că prehensiunea poate fi realizată fără degete opozabile (Fig. 12 a, b₁, c₁, d₁) sau cu degete opozabile. Din acest experiment rezultă că sunt semnificative numai prehensiunea cu un deget, cu două degete și cu trei degete, deoarece folosirea a mai mult de trei degete nu mai crește precizia sau siguranța prehensiunii, intervine o oarecare redundanță, folosirea celui de al patrulea deget sau degetelor patru și cinci fiind inutilă.

2.2. Prehensiunea unui obiect de formă oarecare de mici dimensiuni

În Fig. 13, pentru un obiect aproximativ sferic de mici dimensiuni, cu diametrul mediu de aproximativ 10·mm, se constată că dacă, teoretic, prehensiunea se poate imagina ca fiind făcută cu un deget până la cinci degete, practic prehensiunea nu se poate realiza decăt cu un deget sau două degete (Fig. 13 a, b, c). Se observă că în acest caz sunt semnificative numai prehensiunea cu un deget și cu două degete opozabile (Fig. 13 a, c), folosirea a încă unui deget sau a două, trei, patru degete nefiind necesară chiar datorită imposibilității contactului cu piesa la aceste dimensiuni. Deci utilă este folosirea numai a două degete, într-un caz limită a trei degete, caz în care există o anumită redundanță a prinderii.

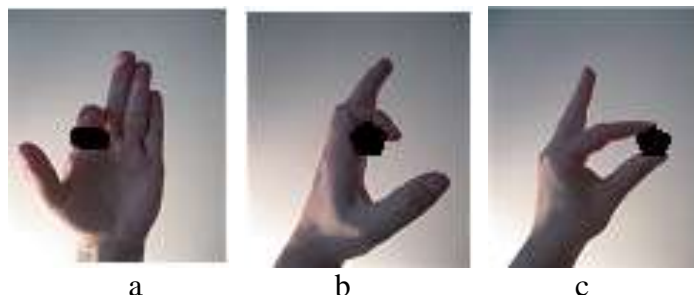


Fig. 13 - Prehensiunea unui obiect de mici dimensiuni.

2.3. Prehensiunea unui obiect de formă oarecare de mărime medie

Este evident că dacă mărimea corpului crește nu mai este posibilă prehensiunea numai cu un deget, ci cu minim două degete, iar cele trei, patru sau cinci degete au o altă utilitate. Pentru un astfel de caz se arată situațiile posibile de prehensiune a unui obiect de tip „mouse” (Fig. 14: prehensiune cu două degete: vedere frontală - Fig. 14 a, vedere laterală - Fig.14 b; prehensiunea cu trei degete - Fig. 14 c și prehensiunea cu patru degete - Fig. 14 d).

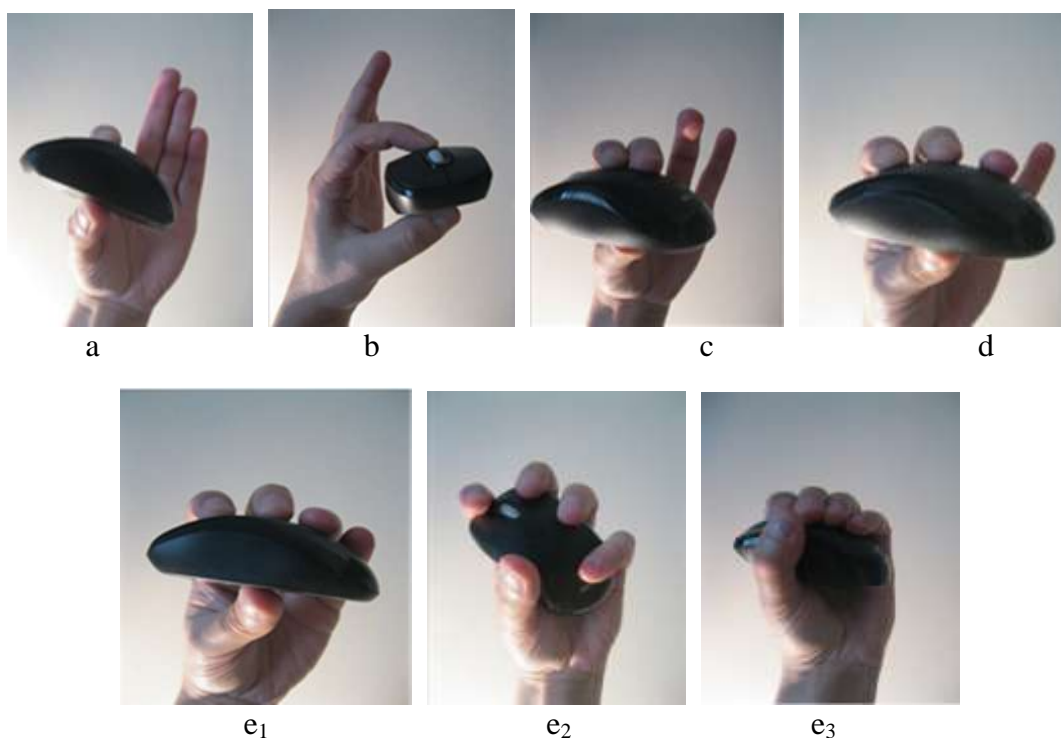


Fig. 14 - Prehensiunea unui obiect de tip „mouse”, cu dimensiuni medii.

În acest caz se observă că prehensiunea devine cu atât mai stabilă cu cât numărul de degete este mai mare, prehensiunea fiind cea mai sigură în cazul folosirii a 4 sau 5 degete, iar siguranța este maximă dacă este posibilă cuprinderea obiectului ca în cazul din Fig. 14 e₂ și e₃.

2.4. Minimanipularea unui obiect de tip tijă

Ca exemplu de manipulare, caracteristică specifică prehensoarelor antropomorfe, se arată manipulara unui obiect de tip tijă, în acest caz sub forma unui creion (Fig. 15). Se observă că manipulara se poate face, cu cel puțin două degete și are, pe măsura creșterii numărului de degete, tot mai multe ipostaze.

Aspectele prezentate în acest studiu de caz au urmărit să exemplifice mai sugestiv și mai clar decât până în prezent posibilitățile deosebite de prehensiune și manipulare ale mâinii umane și totodată să constituie baze de plecare pentru gândirea și realizarea proceselor antropomorfe robotice similare.

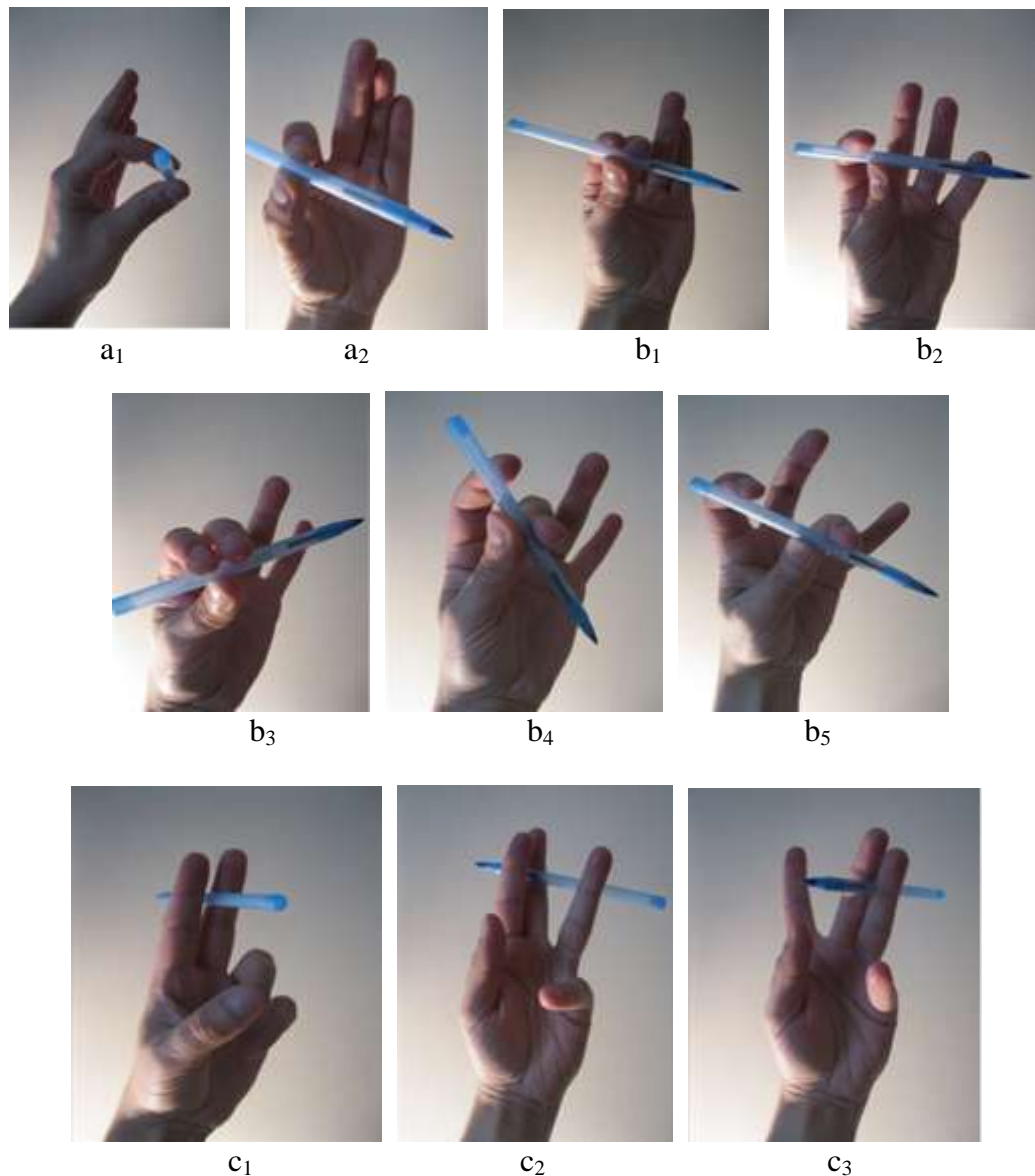


Fig. 15 - Minimanipularea cu două degete (a), cu trei degete (b) și transferul între primele două degete și următoarele două degete (c).

3. Considerații privind modelarea matematică a prehensiunii

Pe baza experimentelor efectuate, se poate schița o modelare matematică a prehensiunii. Se consideră cazul prehensiunii obiectului solid de formă oarecare din Fig. 14 e_1 , pentru care (conform Fig. 16 a) au fost reprezentate forțele de contact F_i aplicate de degete în punctele de contact P_i ($i = 1, \dots, n$), asupra obiectului prehendat, iar pornind de la această situație s-a trecut la cazul general al prehensiunii unui corp solid (CS), ca parte a unui sistem de corpuri solide, conform Fig. 16 b. În continuare se fac precizări privind modelarea matematică a prehensiunii.

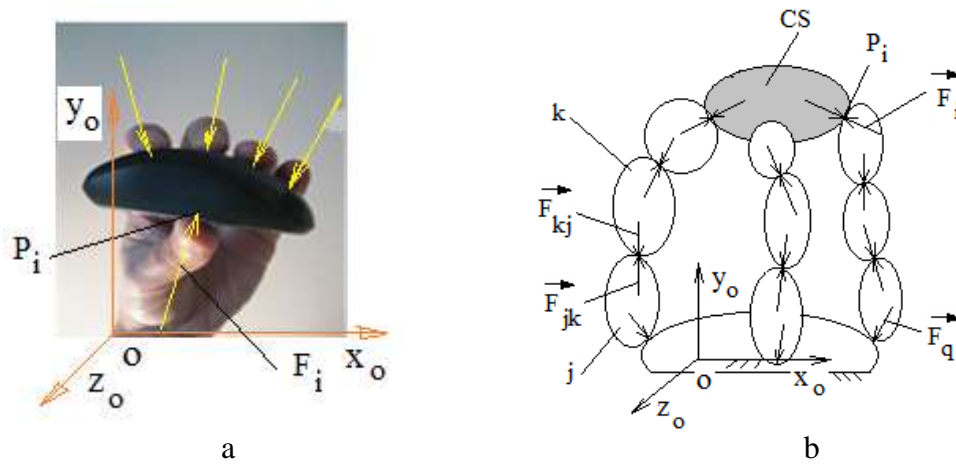


Fig. 16 - Schematizarea forțelor de contact în cazul prehensiunii unui obiect de formă oarecare: prehensiunea unui obiect real (a); schematizarea prehensiunii unui obiect ca parte a unui sistem de corpuri solide (b).

3.1. Echilibrul unui sistem de corpuri solide

Dacă se consideră un sistem de corpuri solide nedeformabile (rigide), Fig. 16 b și Fig. 17, asupra căruia acționează *forțele exterioare* \vec{F}_q (forțe motoare și de greutate) cu momentele generate de acestea \vec{M}_q ($q = 1, 2, \dots, n$), iar în interior (la cuplările dintre corpuri) *forțele de legătură interioare* \vec{F}_{kj} cu momentele generate de acestea \vec{M}_{kj} ($k = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$; $k \neq j$), condițiile de echilibru static al sistemului de corpuri solide sub acțiunea *forțelor exterioare* și *forțelor de legătură interioare* sunt exprimate (considerând și momentele corespunzătoare) prin ecuațiile (teorema solidificării [12]):

$$\begin{cases} \sum_{q=1}^n \vec{F}_q + \sum_{k=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \vec{F}_{kj} = 0 \\ \sum_{q=1}^n \vec{r}_q \times \vec{F}_q + \sum_{q=1}^n \vec{M}_o(\vec{F}_q) + \sum_{k=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \vec{r}_j \times \vec{F}_{kj} + \sum_{k=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \vec{M}_o(\vec{F}_{kj}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

unde \vec{r}_q și \vec{r}_j sunt vectorii de poziție ai punctelor de aplicație ale forțelor \vec{F}_q , respectiv \vec{F}_{kj} [12].

Prin proiecția condițiilor de echilibru pe axele unui reper triortogonal Oxyz pot fi obținute un număr de ecuații liniare scalare de echilibru care folosesc la determinarea forțelor reacțiuni interioare și forțelor dependente exterioare sistemului. Sistemul mecanic de prehensiune, respectiv mecanismul de prehensiune, este asimilat, într-o primă etapă, cu un sistem de corpuri rigide între care unul din ele este corpul prehensat. Pe baza acestui caz simplificat se poate trece la tratarea situației considerării deformabilității elementelor de contact (extremităților degetelor) în zona de contact cu obiectul prehensat sau a deformabilității corpului(obiectului) prehensat.

3.2. Condițiile minime de prehensiune statică

Se consideră mai întâi cazul simplificat al prehensiunii unui corp solid (CS), deformabil elastic, asupra căruia acționează numai forțele de contact \vec{F}_i (Fig. 17), perpendiculare (normale) pe

un plan tangent (Π_i) la suprafața corpului în punctele P_i ($i = 1, \dots, n$), generate de elementele de contact ale prehensurului, considerate solide nedeformabile S_i (deget), care contactează corpul în punctele P_i .

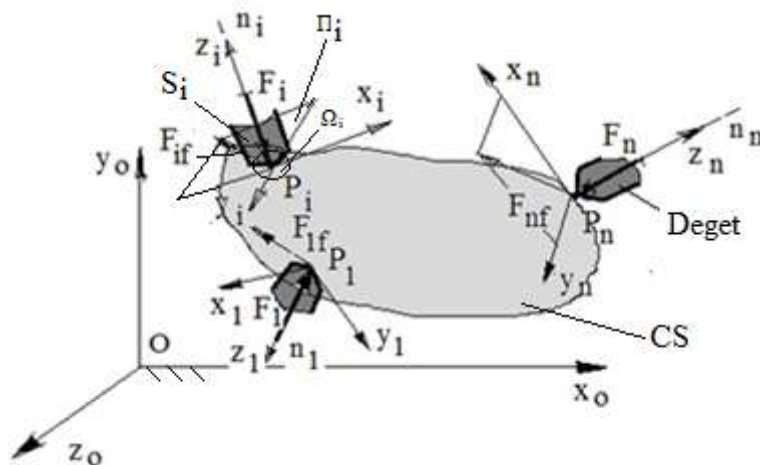


Fig. 17 - Cazul general al forțelor de contact la prehensiunea unui corp solid deformabil.

În fiecare punct P_i se atașează un sistem de referință triortogonal $\{P_i x_i y_i z_i\}$, astfel ca axa z_i să coincidă cu normala $\vec{n}_i(P_i) \equiv \vec{n}_i$ la suprafața corpului și care este perpendiculară la planul Π_i în punctul P_i [19]. De asemenea fiecare punct P_i se consideră centrul de simetrie al unei zone de contact de suprafață Ω_i , urmare a deformabilității corpului (care determină apariția momentului de frecare de pivotare), dispusă în planul (Π_i).

În aceste ipoteze în punctele P_i se dezvoltă următoarele forțe: o forță de contact \vec{F}_i ce are ca suport normala \vec{n}_i la suprafața corpului, o forță de frecare \vec{F}_{if} dispusă în planul tangent Π_i la suprafața corpului și un moment de frecare de pivotare ce are ca suport aceeași normală \vec{n}_i (momentul de frecare de rostogolire se neglijează).

Cu torsiile acestor forțe exprimați în sistemul de referință $Ox_0y_0z_0$ se poate forma matricea notată cu G și denumită **matricea de prehensiune**, matrice linie formată din matricele coloană ale torsiilor corespunzătoare forțelor considerate [19]:

$$G = [[\tau_o(\vec{F}_1)] \quad \dots \quad [\tau_o(\vec{F}_i)] \quad \dots \quad [\tau_o(\vec{F}_n)]] \quad (2)$$

În ipotezele de mai sus, condiția necesară de prehensiune a corpului considerat, față de originea sistemului de referință $Ox_0y_0z_0$, este:

$$\text{rang } G = 6. \quad (3)$$

Aceasta înseamnă ca prin acțiunea forțelor de contact asupra corpului prehensat, sunt generate 6 forțe liniar independente, care vor bloca cele 6 mișcări liniar independente posibile (trei mișcări de rotație și trei mișcări de translație față de axele unui sistem de referință triortogonal). La condiția de mai sus, pentru realizarea prehensiunii trebuie adăugată și condiția de echilibru static a sistemului forțelor de de contact. În cazul în care s-ar utiliza un sistem de șase forțe de contact independente (de rang 6), în cazul neglijării forțelor de frecare, corpurile fiind rigide, condiția de echilibru static ar conduce la un sistem omogen de șase ecuații cu șase necunoscute (șase forțe de contact), care nu admite decât soluția banală (parametri necunoscuți rezultă cu valoarea zero); evident într-un astfel de caz prehensiunea corpului nu este posibilă (forțele de contact rezultând cu valoarea zero). Ca urmare, rezultă că pentru a realiza prehensiunea corpului, în cazul considerării cel puțin a greutateii acestuia, sunt necesare minim șapte forțe exterioare cu contact punctiform ($\Sigma c = 7$, c reprezintă numărul de forțe de contact) de rang $C_{12} = 6$ (C_{12} reprezintă rangul matricei

formată de matricele coloană ale vectorilor atașați forțelor de contact); într-adevăr, condiția echilibrului static conduce la un sistem omogen de 6 ecuații independente cu 7 necunoscute. Ca urmare, șase dintre forțele de contact pot fi calculate în funcție de cea de-a șaptea forță care este nedeterminată (independentă); prin intermediul acesteia se reglează mărimea forțelor de prehensiune (de contact) a corpului. Sintetic condiția necesară și suficientă pentru prehensiunea unui corp în cazul considerării numai a forțelor de contact poate fi formulată astfel:

Prehensiunea unui corp, care presupune anularea a $C_{12} \leq 6$ grade de libertate, impune utilizarea unui sistem format din minimum $C_{12} + 1$ legături (forțe de contact) de rang C_{12} [19].

3.3. Condițiile matematice minime pentru stabilitatea minimanipulării

Pornind de la minimanipularea cu mâna umană (Fig. 15 b 4 și Fig. 18 a), în general, într-un sistem de referință Pxyz, în ipoteza neglijării frecării, diferența puterilor de intrare și de ieșire dintr-un sistem mecanic este nulă. Astfel, dacă considerăm puterea de ieșire $[P_e]$, puterea corespunzătoare forțelor de contact cu obiectul prehensat, forțe exprimate prin matricea de prehensiune $[G]$ și $[\Omega]$ matricea care grupează toate vitezele punctelor de aplicație ale forțelor de contact ale degetelor (${}^1V_c, {}^2V_c, {}^3V_c$, pentru cazul din Fig. 18 b) transmise prin contactele P_i ($i=1,2,\dots,n$) cu piesa prehensată, $[\Omega]_O = [\omega_{Ox}, \omega_{Oy}, \omega_{Oz}, V_{Ox}, V_{Oy}, V_{Oz}]^t$ fiind matricea coloană a mișcării de rotație impusă unui punct O atașat piesei prehensate, în care ω este mișcarea (viteza) de rotație în jurul unei axe, iar V este mișcarea (viteza) de translație de-a lungul unei axe a sistemului de referință ce rezultă în funcție de vitezele din punctele de contact ale degetelor, adaptând după [8, 10, 14, 18, 20], se poate scrie relația:

$$[P_e] = [G]^t \cdot [\Omega]. \quad (4)$$

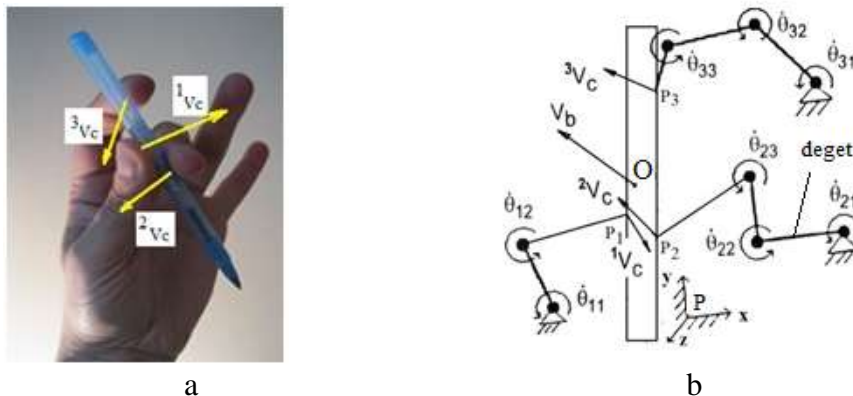


Fig. 18 - Schema cinematică a minimanipulării: minimanipulare cu trei degete reale (a) și schematizarea acestei minimanipulări (b).

Dacă $[\dot{\theta}] = [(\dot{\theta}_{ij})_{P_k}]$ (pentru cazul din Fig. 18 b, $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3, k=1, 2, 3$) este matricea mișcărilor motoare $\dot{\theta}_{ij}$ (conform Fig. 18 b, $\dot{\theta}_{11}, \dot{\theta}_{12}, \dots, \dot{\theta}_{33}$) din articulațiile corespunzătoare fiecărui "deget" și $[M]$ este matricea momentelor motoare din articulațiile degetelor, puterea de intrare $[P_i]$ va fi :

$$[P_i] = [M] \cdot [\dot{\theta}]. \quad (5)$$

Pe baza relațiilor 4 și 5, și egalității $[P_e] = [P_i]$, vitezele unghiulare din articulațiile degetelor $[\dot{\theta}]$ se pot obține, în cazul unei mișcări impuse piesei prehensate, cu relația:

$$[\dot{\theta}] = [M]^{-1} \cdot [G]^t \cdot [\Omega]. \quad (6)$$

Pe de altă parte, *minimanipularea*, din perspectiva roboticii, reprezintă posibilitatea schimbării poziției piesei prehensate numai față de prehensur, cu sau fără modificarea punctelor de contact, datorită capacității prehensurului de a permite modificarea poziției relative a unor elemente proprii. Posibilitatea minimanipulării este specifică prehensoarelor antropomorfe sau altor prehensoare care funcționează asemănător cu acestea, cum ar fi prehensoarele tentaculare [19]. Considerând piesa prinsă de două degete articulate (Fig. 19 a- C_1 , C_2 -punctele de contact), prin modificarea poziției relative a elementelor degetelor, implicit a unghiurilor dintre acestea, piesa poate fi deplasată în poziția din Fig. 19 b, eventual până la o poziție extremă (Fig. 19 c, s-reprezintă în Fig. 19 zona de minimanipulare a centrului de greutate q al piesei) [21].

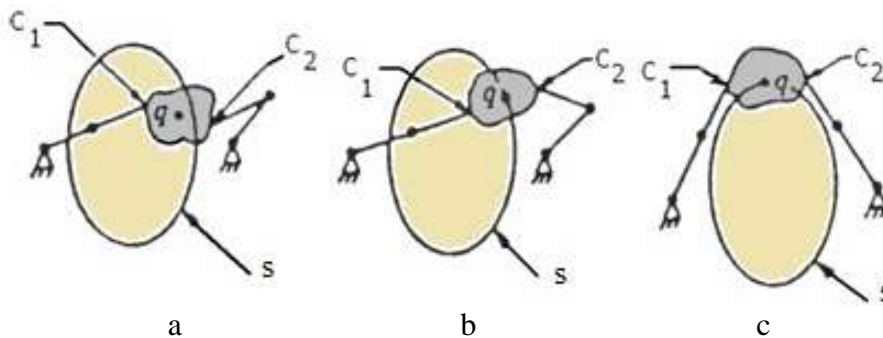


Fig. 19 - Minimanipularea cu două degete mecanice articulate: trei poziții (a,b,c) posibile ale obiectului (adaptat după [8]).

În cazul montajului robotizat această deplasare, care implică modificarea poziției piesei față de prehensur, trebuie făcută în sensul reducerii erorii de montaj Δ , dintre axele pieselor care urmează să fie montate (Fig. 20).

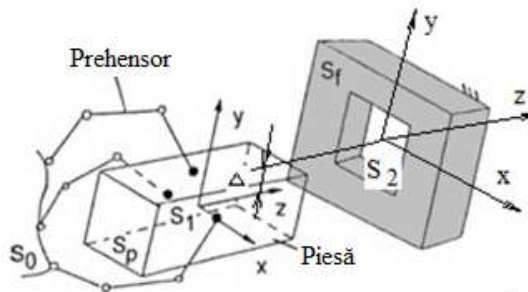


Fig. 20 - Minimanipularea în scopul montajului.

Și la minimanipulare, ca și la complianța activă [4,19], forța care apare la montaj este folosită pentru a stabili micile mișcări ce trebuie executate de "degete", astfel ca treptat forța care se opune montajului, datorită erorilor de poziționare dintre piesele supuse montajului, să se diminueze și montajul să poată fi efectuat. Evident "degetele" sunt dotate cu traductoarele de forță necesare. Pentru rezolvarea problemei minimanipulării se folosește atât cinematica directă cât și aceea inversă, utilizate la studiul lanțurilor de ghidare (poziționare plus orientare) ale roboților [4]. Exemplificarea minimanipulării cu un prehensur antropomorf cu patru degete a unei piese paralelipipedice este arătată în Fig. 21, prin două instantanee (a și b) din cursul acestei operații.

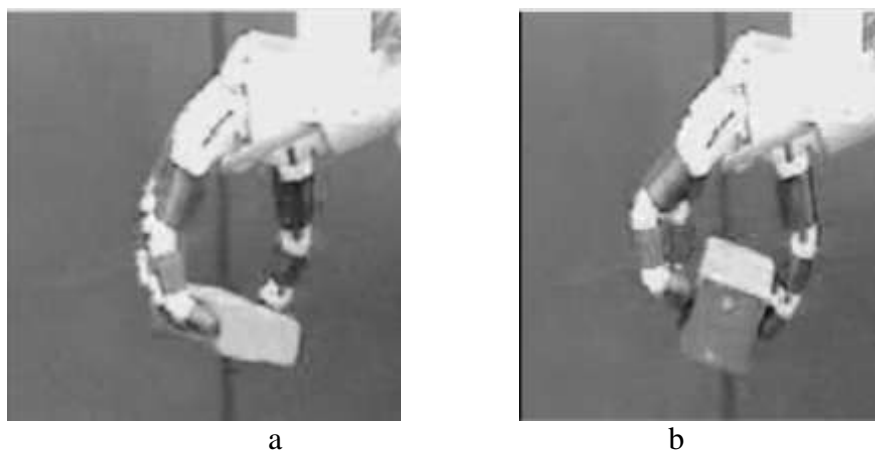


Fig. 21 - Exemplificarea minimanipulării [1].

O modalitate de montaj mult mai apropiată de cea umană este manipularea în sensul reducerii erorii de montaj, folosind senzori vizuali (camere de luat vederi), așa se vedea Fig. 21 a.

Minimanipularea, prezentată pe scurt mai sus, este utilă nu numai la montaj ci și pentru modificarea poziției piesei prehendate în general, sau chiar pentru a executa unele operații când piesa este un ansamblu mobil, ca de exemplu deplasarea pistonului unei seringi (Fig. 21 b).

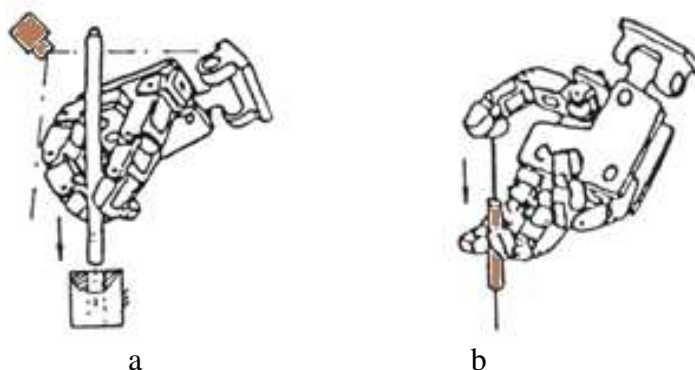
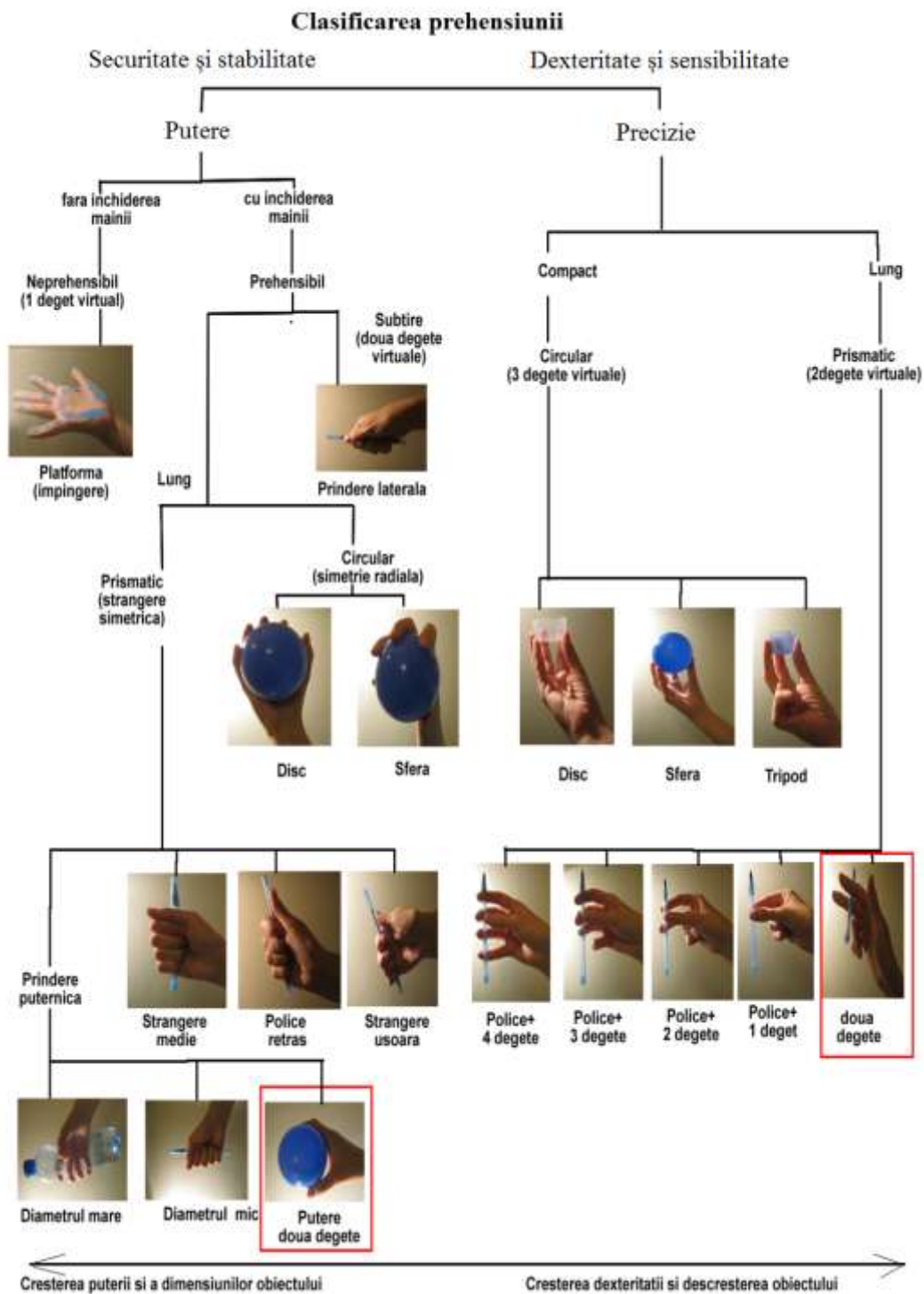


Fig. 21 - Exemple de minimanipulare: la inserția unui știft (a); la acționarea unei seringi (b). Problemele legate de minimanipulare sunt încă obiectul de certă actualitate al multor studii.

4. Sistematizarea prehensiunii

În literatura de specialitate privind prehensiunea este arhicunoscută sistematizarea situațiilor de prehensare folosind mâna umană propusă de *Cutkosky* [5], la care în timp s-au adăugat și alte abordări oarecum similare [6,9,15,17]. Sistematizarea *Cutkosky* este făcută din două perspective și anume: precizie și putere, adaptată de autor conform Fig. 22.

Adaptarea constă în înlocuirea schițelor pentru tipurile de prehensiune luate în considerare cu imagini corespunzătoare aceluiași tipuri de prehensiune cu mâna umană și extinsă cu două situații și anume: prinderea între două degete dintre cele patru din prelungirea palmei și prinderea de putere cu două degete opozabile a unui obiect de formă ovoidală și dimensiuni medii spre mari privind posibilitățile de prehensare ale mâinii, limitate de dimensiunile degetelor și capacitatea lor de cuprindere (contactare utilă) a obiectului prehendat.

Fig. 22 - Taxonomia după *Cutkoski*, adaptată de autor.

Și pentru o altă sistematizare, într-un fel tot după precizie și putere, și anume cea a lui *Lyons* [11], în Fig. 23, este prezentată o adaptare propusă de autor, prin înlocuirea schițelor cu imagini similare ale prehensiunii cu mâna umană a unor obiecte reale.

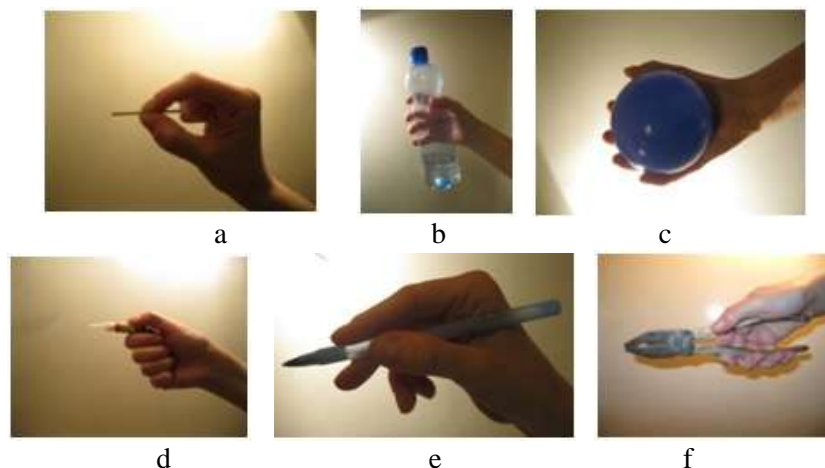


Fig. 23 – Prehensiunea, adaptată de autor, după Lyons
 tijă cu două degete (a), obiect cilindric prin cuprindere (b), sferă (c),
 disc (d), obiect tip pix cu trei degete (e), laterală clește (f).

5. Prehensor antropomorf pentru roboți – simulare și testare - studiu de caz

5.1. Aspecte preliminare

Prehensoarele antropomorfe sunt prehensoare inspirate după modelul mâinii umane, având diverse particularități constructive și funcționale. Comparativ cu alte clase de prehensoare, cum ar fi prehensoarele cu bacuri [19,20], sau prehensoarele tentaculare [4], au avantaje evidente deoarece sunt mult mai asemănătoare cu mâna umană, atât constructiv cât și funcțional, considerând mâna umană ca cel mai perfecționat prehensur [2,19]. În prezent există mai multe variante de prehensoare antropomorfe dintre care unele în stadiu de proiect, altele sub formă de prototip, iar o parte sub formă de produse comerciale [10,14,18,23,24]. Aceste prehensoare diferă prin mai multe particularități constructive și funcționale, dintre care principale sunt următoarele: numărul degetelor care poate fi: 2,3,4,5 sau chiar 6; numărul falangelor pe deget: 2 sau 3; tipul mecanismelor-elementelor constructive semnificative pentru degete: barele articulate sau role și fire; gradul de mobilitate, după care pot fi variante monomobile până la variante multimobile cu gradul de mobilitate mare, egal cu al degetelor, sau chiar foarte mare, egal cu al falangelor, respectiv cu numărul articulațiilor, grad de mobilitate apropiat sau chiar egal cu al mâinii umane ($\mathcal{M}=36$); tipul motoarelor folosite: electrice sau pneumatice; echiparea sau nu cu senzori și tipul senzorilor folosiți: de contact, de alunecare, de proximitate; tipul sistemului de comandă utilizat: prin instrucțiuni de program, prin dispozitive-mănuși de tip *Date Glove*, prin realitate virtuală, prin smartphone, prin voce, etc. Analizând comparativ un număr semnificativ de variante de prehensoare antropomorfe pentru roboți se pot identifica următoarele dezavantaje majore: o complexitate exagerată comparativ cu o funcționalitate scăzută; un nivel tehnologic scăzut; un cost și mai ales un preț mari sau chiar foarte mari fără a exista, de cele mai multe ori, și performanțe și fiabilitate ridicate, etc.

În acest context, în această lucrare se propun câteva noi abordări, care să reducă măcar în parte dezavantajele evidențiate mai sus, abordări care sunt centrate pe:

- realizarea proiectului tehnic, al modelului CAD și a simulării funcționale a unui prehensur antropomorf cu cinci degete, cu un grad ridicat de asemănare cu mâna umană;
- comanda prehensurului printr-o soluție de mare actualitate și anume prin captarea configurațiilor-gesturilor mâinii umane și transmiterea datelor pentru simularea prehensiunii într-o scenă virtuală și apoi la prehensurul real;

- realizarea prototipului printr-o metodă modernă și mai puțin costisitoare, și anume aceea a prototipării virtuale.

5.2. Modelul CAD și simularea funcțională a unui prehensur antropomorf cu cinci degete

5.2.1. Particularitățile structurale și funcționale ale prehensurului

Pentru echiparea robotului din postul de lucru robotizat, asemănător cu altele similare, destinate ansamblurilor mici și medii [5], s-a stabilit utilizarea unui prehensur antropomorf cu cinci degete, cu un număr sporit de articulații, peste cel minim, pentru a exista o asemănare și o funcționalitate cât mai apropiată de cele ale mâinii umane. S-a plecat de la un model cunoscut [22], care s-a adaptat scopului propus. Fiecare deget este format din câte trei falange: f_1 , f_2 , f_3 , între care există cuple monomobile de rotație, acționate prin fire (Fig. 24 a). Pentru acționare se folosesc motoare electrice, câte unul pentru fiecare deget, astfel încât prehensurul are gradul de mobilitate $\mathcal{M} = 5$. Pentru închiderea degetului, motorul se rotește într-un sens și închiderea se obține prin tragerea firului f_i , iar deschiderea – revenirea degetului la poziția inițială – corespunde rotirii motorului în sens opus, și se obține prin tragerea firului exterior f_e (Fig. 24 a).

Schema structurală a prehensurului a fost realizată pe baza a 17 cuple monomobile de rotație: 10 cuple interfalangiene, 3 cuple dintre primele falange ale degetului mare și primelor două degete și palmă, 4 cuple de legătură între două piese care înlocuiesc oasele metacarpiene pentru ultimele două degete, cuple de legătură cu palma și cu primele falange ale acestor degete. Se evidențiază cele două cuple de rotație cu axele înclinate față de axa longitudinală a prehensurului, care asigură într-o anumită măsură o asemănare cu situația existenței oaselor metacarpiene ale mâinii umane [22].

5.2.2. Modelul CAD al prehensurului

Modelul CAD al prehensurului s-a realizat cu mediul „software” CATIA [3] și este reprezentat în Fig. 24 b.

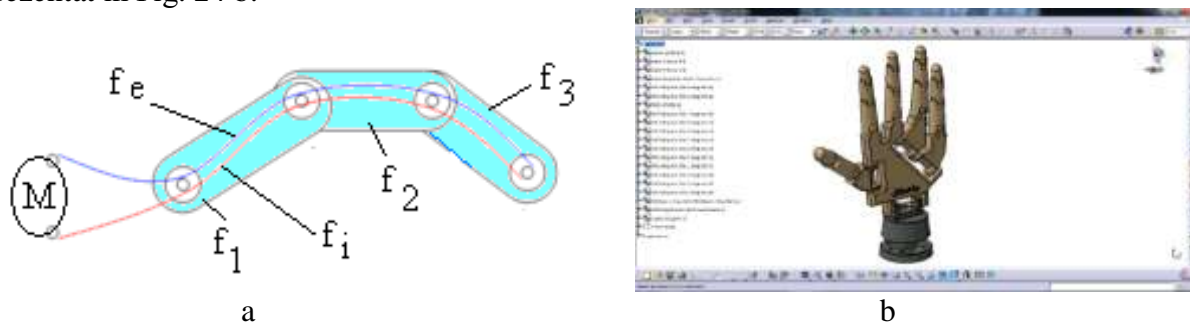


Fig. 24 - Schema unui deget (a) și modelul CAD al prehensurului antropomorf proiectat (b).

Cu același „soft” se poate face și simularea funcțională a prehensurului pentru verificarea închiderii corecte fără o piesă de preluat sau cu preluarea unor piese de forme și dimensiuni variate (Fig. 25).

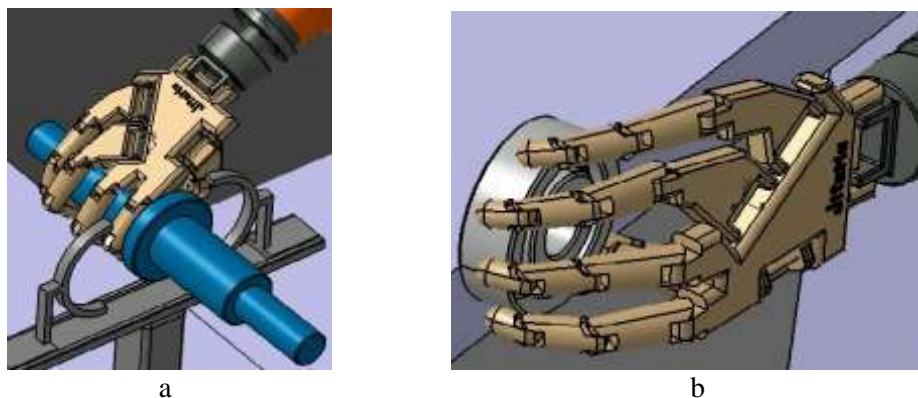


Fig. 25 - Simularea CAD a prehensării folosind prehsorul antropomorf proiectat: prehensarea unui ax(a) și prehensarea unui rulment(b).

Pe baza modelului CAD al prehsorului se obține documentația tehnică necesară realizării prototipului corespunzător.

5.2.3. Comanda prehsorului

Comanda prehsorului se face folosind o metodă de captare a configurațiilor mâinii umane. Pentru aceasta se folosește un dispozitiv *Motion Leap* (Fig. 26 a) [13]. În Fig. 26 b este arătat cubul de interacțiune, zonă în care se pot capta mișcările degetelor mâinii umane.

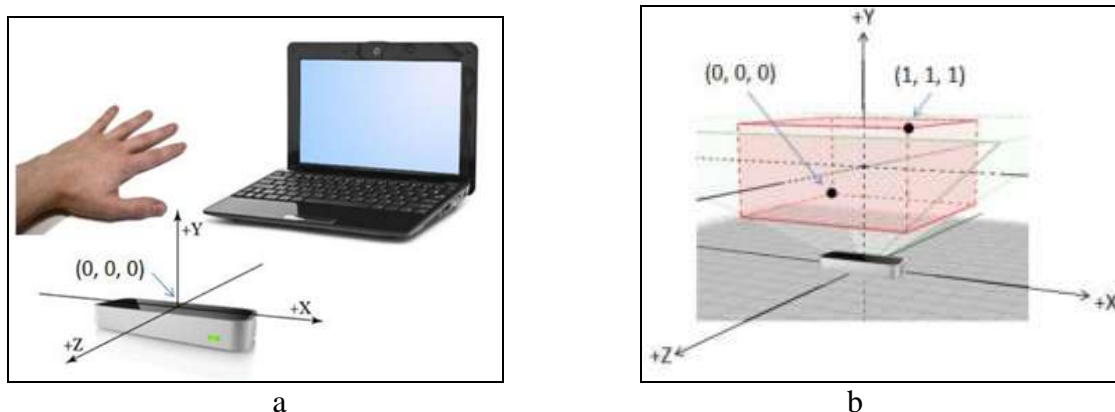


Fig. 26 - Particularitățile funcționale ale dispozitivului *Motion Leap*: poziționarea mâinii față de senzor (a) și spațiul(paralelipipedul roz) din care senzorul poate înregistra informații (b).

Acesta are capacitatea de a putea capta configurația degetelor, Fig. 27 a, similar cu aceea în care s-ar prehensia un anumit obiect. Datele astfel obținute, Fig. 27 b, și validate de prehensiunea unui obiect virtual similar cu cel real de către un prehsor virtual similar, Fig. 27 c, se transmit în final la prehsorul real [13].

Această metodă se poate perfecționa atât prin creșterea performanțelor funcționale ale dispozitivului *Motion Leap*, creșterea acurateții sale, cât și prin optimizarea simulării prehensiunii în mediul virtual, inclusiv prin creșterea detaliilor constructive ale prehsorului virtual pentru a avea o construcție și o funcționare identice cu cele ale prehsorului real.

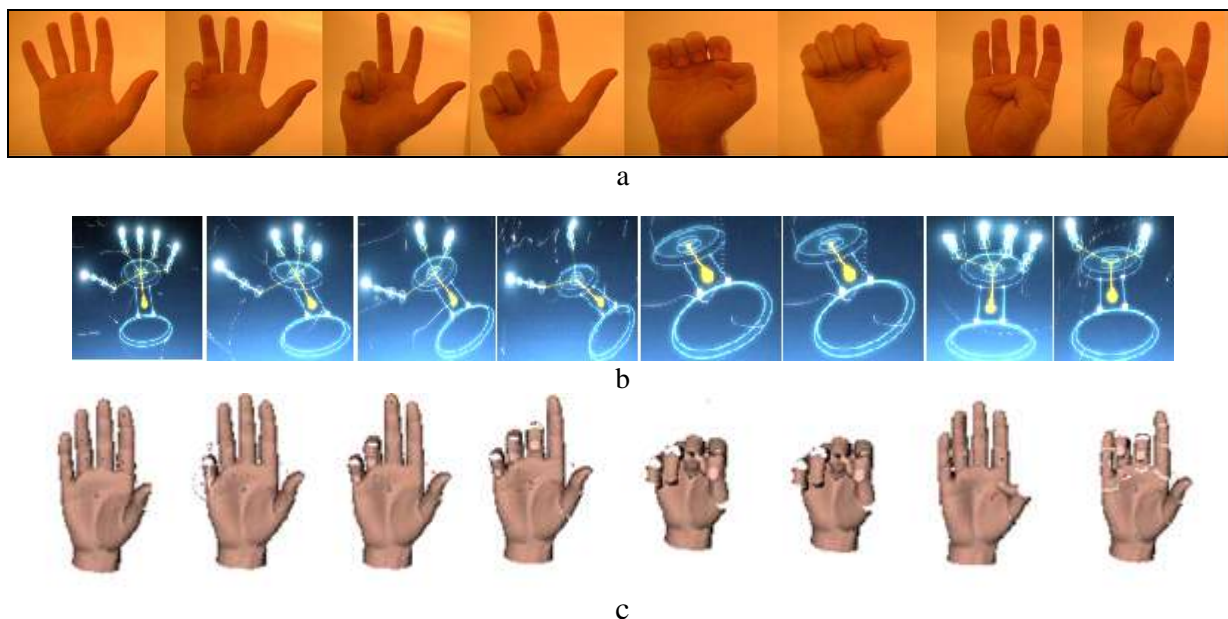


Fig. 27 - Etapele înregistrării configurațiilor degetelor mâinii umane cu dispozitivul *Motion Leap*: configurațiile mâinii umane (a), configurațiile modelate în softul senzorului (b), configurațiile virtuale corespunzătoare celor reale (c).

5.3. Prototipul prehensorului și testarea funcționării sale

Pe baza proiectului tehnic s-a realizat un prototip al prehensorului antropomorf. Piesele s-au realizat folosind o imprimantă 3D. Fiecare deget este acționat prin intermediul unui fir, cu câte un servomotor de tip Tower Pro MG 995 (Fig. 28 a) comandat printr-un microcontroler de tip ATmega32U4 (Fig. 28 b). Servomotorul are următoarele caracteristici tehnice: tensiune de lucru 6V, moment al forței 180·N·cm, dimensiuni 44·mm × 23·mm × 25 × ·mm, greutate 35·g, iar microcontrolerul are următoarele caracteristici principale: tensiune de operare 5V, terminale („pini”) de intrare / de ieșire pentru semnale digitale 20, canale PWM 7, canale analogice de intrare 12, memorie flash 32 kB, frecvența procesorului 16 Hz [13].

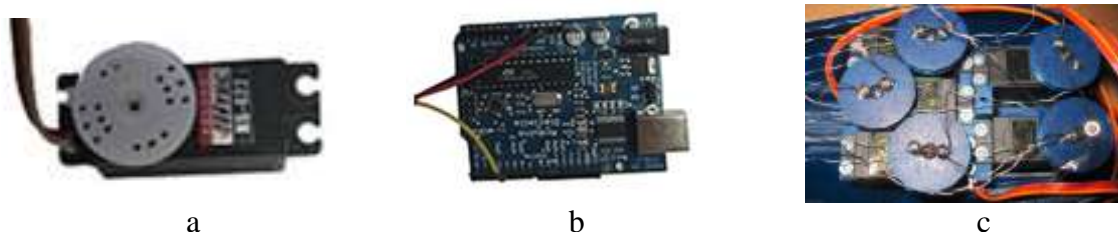


Fig. 28 - Imagini ale componentelor folosite: servomotorul (a), microcontrolerul (b), ansamblul motoarelor (c).

Acționarea fiecărui deget se face printr-un singur tendon, care este tras de motor și imprimă o mișcare de rotație roților amplasate în cuplurile de rotație interfalangiene, implicit falangelor. La mișcarea de rotație a servomotorului într-un sens se realizează închiderea degetului, iar la mișcarea în sens opus se obține revenirea degetului la poziția inițială (poziția rectilinie - deget deschis). În Fig. 29 a este arătat prototipul realizat, iar în Fig. 29 b, o simulare funcțională în care se observă

manevrabilitatea mare a degetelor. Testarea funcțională s-a făcut pentru mai multe obiecte-piese dintre care se dau două exemple și anume: prehensarea unui obiect sferic (o minge de tenis) în (Fig. 29 c) și prehensarea unui ax (Fig. 29 d) [13].

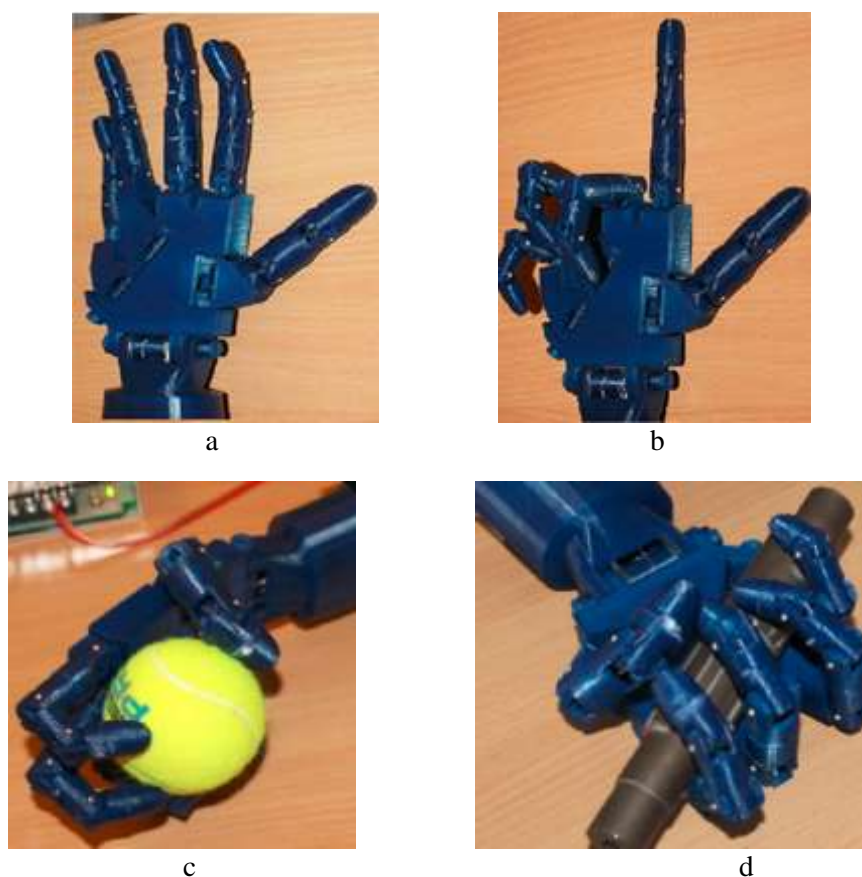


Fig. 29 - Simularea funcționării prototipului prehensorului antropomorf: fără obiect prehensat (a, b); cu un obiect prehensat (c - o minge de tenis, d - un ax).

Din aceste exemple rezultă funcționalitatea ridicată a prehensorului comparativ cu alte tipuri de prehensoare cum sunt cele cu bacuri [2].

6. Sistem robotic integrat: braț robotic – prehensor antropomorf

În prezent un post de lucru robotizat avansat este dotat cu un robot colaborativ de tip braț uman și un prehensor antropomorf cu cinci degete. Postul de lucru robotizat poate fi optimizat prin utilizarea unui senzor de tip *Kinect*, care să preia mișcările unui braț uman și să le transmită brațului robotic, prehensorul antropomorf fiind configurat pentru prehensarea unor piese diverse cu ajutorul unui senzor *Motion Leap* (Fig. 30).

Prezentarea acestei soluții caută să încurajeze utilizarea pe scară largă a brațelor robotice de tip braț uman, cunoscute și ca roboți colaborativi, dotate cu prehensoare antropomorfe cu cinci degete, de complexitate medie, realizabile la costuri reduse, care să contribuie cu adevărat la robotizarea cvazitotală a proceselor tehnologice de fabricație și asamblare.

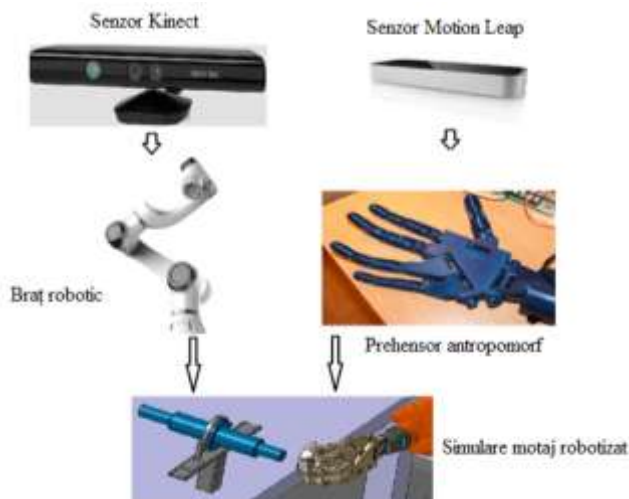


Fig. 30 - Structura unui post de lucru robotizat cu braț robotic și prehensor antropomorf.

7. Concluzii

Pe baza celor prezentate în această lucrare se pot formula următoarele concluzii:

- detalierea caracteristicilor structurale și funcționale ale mâinii umane sunt esențiale pentru orice abordare a problemei prehensiunii în vederea modelării matematice a prehensiunii și realizării unor prehensoare antropomorfe pentru roboți;

- experimentarea prehensiunii cu mâna umană pentru anumite tipuri de obiecte este utilă pentru a constata modificarea caracteristicilor prehensiunii în funcție de numărul degetelor folosite și pentru a argumenta numărul optim de degete ale unui prehensor antropomorf, în cazul de față, acesta fiind de trei până la cinci degete;

- minimanipularea unui obiect prin mișcarea degetelor fără schimbarea punctelor de contact între degete și piesa prehensată sau prin transferul obiectului între degete, cu schimbarea punctelor de contact între degete și obiectul prehensat este o problemă de mare interes și rar experimentată, care merită analizată cu atenție, cele prezentate în această lucrare deschizând o perspectivă interesantă în această direcție;

- pentru eliminarea dezavantajelor prehensoarelor cu bacuri, dintre care cel mai important este posibilitatea redusă de prehensare, uneori limitată la o singură tipodimensiune de piesă, se recomandă folosirea prehensoarelor antropomorfe cu trei sau mai multe degete cu structuri relativ simple dar funcționalități ridicate;

- pentru echiparea robotului sau roboților se pot utiliza prehensoare antropomorfe cu cinci degete, ca cel prezentat în lucrare, care se pot obține cu costuri scăzute folosind procedee moderne cum este prototiparea rapidă;

- pentru optimizarea controlului funcționării robotului și prehensorului se pot folosi metode avansate cum sunt cele de înregistrare a mișcărilor degetelor mâinii pentru comanda prehensorului și a mișcărilor brațului uman la comanda robotului.

8. Bibliografie

1. Brock, O., Fagg, A., Grupen, R., Platt, R., Rosenstein, M., Sweeney, J., A framework for learning and control in intelligent humanoid robots in International Journal of Humanoid Robotics, 2005, 10(2), pp. 301-336.

2. Dudiță, FL.; Diaconescu, D. ; Gogu, Gr., *Mecanisme. Fasc. 4. Cinematica mecanismelor articulate. Mecanisme clasice. Robotomecanisme*, Universitatea din Brașov, 1987.
3. CATIA 5 software, Reference Manual, 2005.
4. Coiffet, P., *La robotique, principes et applications*, Paris: Hermes, 1992.
5. Cutkosky, M., On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hand for Manufacturing Tasks.” in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, Vol.5, No.3, pp.269-279.
6. Feix, T.; Romero, J.; Schmiedmayer, H-B.; Dollar, A. M.; Kragic, D., The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types, in *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2016, Vol. 46, No.1, pp. 66-77.
7. Hadăr, A., Petre, C., Marin, C., Voicu, A., *Metode numerice în inginerie*, Ed. Politehnica Press, București, 2004.
8. Kerr, J.; Roth, B., Analysis of Multifingered Hands, in *The International Journal of Robotics Research*, 1986, Vol. 4, No 4, pp. 3-17.
9. Liu, J.; Feng, F.; Nakamura, Y. C.; Pollard, N. S., A Taxonomy of Everyday Grasps in Action, in 14th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2014, pp. 573-580.
10. Liu, G., Real-Time Grasping-Force Optimization for Multifingered Manipulation: Theory and Experiments, in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 9, No. 1, 2004, pp. 65-77.
11. Lyons, D., A simple set of grasps for a dextrous hand, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, MO, 1985, USA, pp. 588-593.
12. Mangeron, D., Irimiciuc, N., *Mecanica rigidelor cu aplicații în inginerie (Vol.2: Mecanica sistemelor de rigide)*, Ed. Tehnică, București, 1980.
13. Moldovan, C., Cercetări teoretice și experimentale privind diversificarea interacțiunii unei mâini virtuale cu obiecte dintr-o scenă virtuală cu aplicații în inginerie industrială, Teză de doctorat, Universitatea Transilvania din Brașov, 2014.
14. Nakashima, A.; Uno, T.; Hayakawa, Y.; Kondo, T.; Sawada, S.; Nanba, N., Synthesis of Stable Grasp by Four-Fingered Robot Hand for Pick-and-Place of Assembling Parts, in 5th IFAC Symposium on Mechatronic Systems, Marriott Boston Cambridge, Cambridge, MA, USA, Sept 13-15, 2010, 43(18), pp. 669-676.
15. Pollard, N.S., Evaluation of Dexterous Manipulation in the Wild, Carnegie Mellon University, <http://clem.dii.unisi.it/~malvezzi/graspquality/wp-content/uploads/2016/05/WSbenchmark-Pollard>.
16. Püschel, F., *Künstliche Hände Künstliche Arme*, Berlin:Technischer Verlay Herbert Cram,W35,1956.
17. Rosheim, M.E., *Robot Evolution-The development of Anthrobotics*, New York: A Wiley Interscience publication, 1994.
18. Salisbury, K.; Roth, B., Kinematic and force analysis of articulated mechanical hands, in *ASME J. Mech., Transmiss., Autom. Design*, Vol.105, No. 1, 1983, pp. 35-41.
19. Staretu, I., *Sisteme de prehensiune*, Ed. Lux Libris, Brașov, 1996(ediția a II-a, revăzută și completată, Ed. Lux Libris, Brașov, 2010).
20. Staretu, I., *Gripping systems*, Tewksbury, Massachusetts: Derc Publishing House, 2011.
21. Staretu, I., Grasp and Micromanipulation with Human Hand – a New Experimentation and Systematization, in *Procedia Manufacturing*, Volume 46, 2020, pp. 491-498.
22. Starețu, I. ș.a., *Mâini mecanice. Mecanisme antropomorfe de prehensiune pentru protezare și roboți*, Ed. Lux Libris, Brașov, 2001.
23. Zheng, Y.; Qian, W-H., A Fast Procedure for Optimizing Dynamic Force Distribution in Multifingered Grasping, in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, Vol. 36, No. 6, 2006, pp. 1417-1422.
24. Watanabe, T.; Jiang, Z.W.; Yoshikawa, T., Task Based Hybrid Closure Grasping Optimization for Autonomous Robot Hand, in D. Liu, L. Wang, and K.C. Tan (Eds.): *Design and Control of Intel. Robotic Systems*, SCI 177, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, pp. 425-451.