

## Raport privind modelarea spațiului de lucru fără singularități cu evitarea coliziunilor a sistemului robotic ProHep-LCT

### 1. Modelarea spațiului de lucru fără singularități

Spațiul de lucru operațional al unui robot se referă la zona din spațiul cartezian în care acesta este capabil să își desfășoare sarcinile pentru care a fost dezvoltat. În abordare mai largă acesta se referă la zona în care robotul se poate mișca, manipula obiecte și duce la îndeplinire sarcinile impuse. Elementele cheie ale spațiului de lucru operațional al unui robot includ în principal:

**1. Accesibilitate.** Aceasta definește limitele în care efectorul final al robotului se poate mișca. În cazul concret aceasta se referă la cele două instrumente conduse de roboții sistemului ProHep-LCT și anume: instrumentul destinat conducerii și operării sondei ecografice (I-US) intraoperatorii precum și instrumentul destinat inserției multiple a acelor de brahiterapie, Figura 1. Parametrii care determină nivelul de accesibilitate a diferitelor zone ale spațiului de lucru al robotului sunt în primul rând dimensiunile elementelor componente (parametri geometrici).

**2. Numărul gradelor de libertate.** Numărul gradelor de libertate ale fiecărui robot component al sistemului robotic ProHep-LCT este de 5 (Figura 2), acesta asigurând translații de-a lungul celor trei axe (OX, OY și OZ), precum și orientarea în jurul axelor OY și OX. Fiecare dintre cele două instrumente de ghidare a sondei ecografice și a celui de inserție a acelor au câte 4 grade de mobilitate. În cazul sondei ecografice intraoperatorii două axe de mișcare, respectiv  $q_{US\_3}$  și  $q_{US\_4}$  sunt utilizate pentru acționarea levierelor care orientează capul distal al sondei (Figura 3), iar celelalte două,  $q_{US\_1}$  și respectiv  $q_{US\_2}$  sunt utilizate pentru inserția sondei și rotirea acesteia în jurul axei de simetrie.  $q_{US\_2}$  asigură gradul de mobilitate lipsă (cel de-al șaselea, pe care robotul nu îl oferă), dar care s-a dovedit a fi necesar pentru aplicația medicală considerată, în timp ce  $q_{US\_1}$  care asigură inserția sondei de-a lungul axei de simetrie este redundant, aceasta putând fi practic inserată utilizând cele 5 grade de mobilitate asigurate de robotul de ghidare a instrumentului pentru sonda intraoperatorie, însă conduce la un spațiu de lucru mult mai voluminos datorită cursei active de aprox. 300 mm. În cazul instrumentului pentru inserția acelor de brahiterapie (Figura 4), acesta are 3+1 grade de mobilitate și anume:  $q_{n1}$  și  $q_{n2}$ , sunt axele care acționează mecanismul Gantry, și sunt utilizate pentru preluarea acelor din magazia de ace. Deși robotul poate poziționa singur (utilizând cele 5 grade de mobilitate) un ac în spațiul cartezian, utilizarea mai multor ace într-o magazie nu poate fi realizată decât utilizând cele două grade. Utilizând mecanismul Gantry se aduc sistemului două mari avantaje: un spațiu de lucru mai mare și precizie de poziționare sporită datorită șuruburilor trapezoidale și a piulițelor cu pre-tensionare, care elimină jocurile bine-cunoscute ale acestor tipuri de șuruburi. Celelalte două grade de mobilitate ale instrumentului,  $q_{n3}$  și  $q_{n4}$ , sunt utilizate pentru inserarea acului (grad redundant, dar care îmbunătățește precizia de inserție și mărește spațiul de lucru), respectiv acționarea gripper-ului care prinde ferm acele de brahiterapie în vederea manipulării.

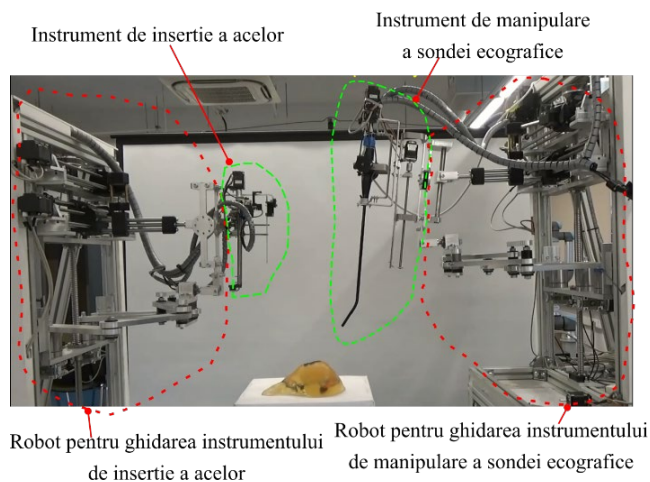


Figura 1. Modelul experimental al robotului ProHep-LCT

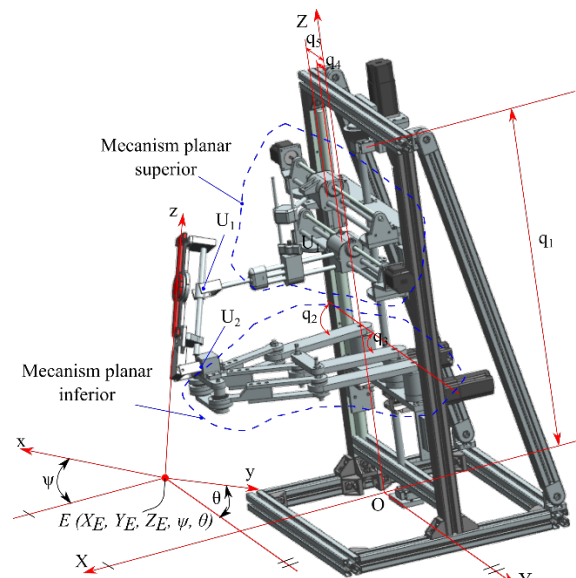


Figura 2. Modelul CAD al celor doi roboți ai sistemului ProHep-LCT

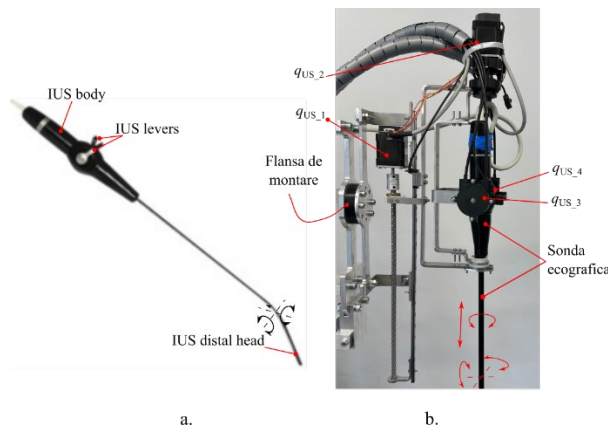


Figura 3. Instrumentul pentru manipularea sondei ecografice a robotului ProHep-LCT: a. Modelul real al sondei ecografice; b. Model CAD al instrumentului de manipulare.

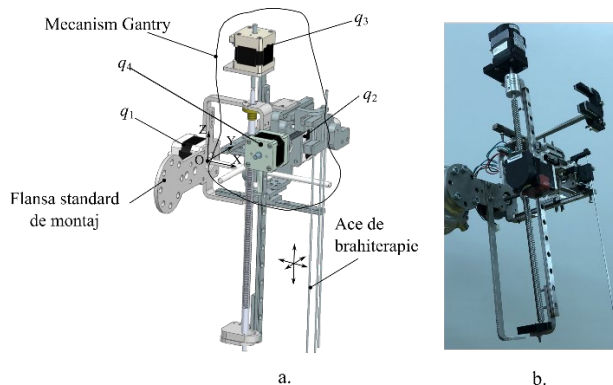


Figura 4. Instrumentul pentru inserția acelor de brahiterapie al robotului ProHep-LCT: a. Model CAD; b. Model real experimental.

**3. Limitele cuplelor active.** În cazul celor doi roboți (Figura 2) ai sistemului ProHep-LCT, limitele de variație ale cuplelor active sunt următoarele:  $q_1$  : 0-980 mm;  $q_2$  : 0-111°;  $q_3$  : 88° - 180°;  $q_4$  : 0-450 mm;  $q_5$  : 0-450 mm.

**4. Considerații legate de mediul de operare.** Acestea se referă în primul rând la limitele impuse de siguranța pacientului, generând mai degrabă constrângeri în operarea robotului, deoarece mediul va avea un puternic caracter dinamic și nu pot fi impuse condiții în prealabil. Alte condiții de mediu se referă la stabilirea unor limite, impuse în algoritmul de control al robotului care să ducă la evitarea coliziunilor dintre elementele celor doi roboți, precum și a configurațiilor singulare.

Considerațiile prezentate anterior au fost utilizate într-un program de generare a spațiului de lucru sub forma unui nor de puncte conform Figurii 5. În Figura 6 s-a încercat o mapare a spațiului de lucru

operațional al întregului sistem ProHep-LCT ținând cont spațiul de lucru al ambelor instrumente atașate roboților componenți, în vedere. Zona hașurată reprezintă spațiul de lucru comun, care acoperă zona de interes, dar care impune un control precis și realizarea algoritmului de evitare a coliziunilor tratat în capitolul următor.

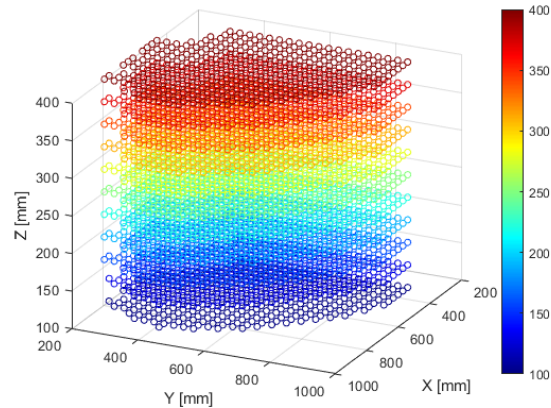
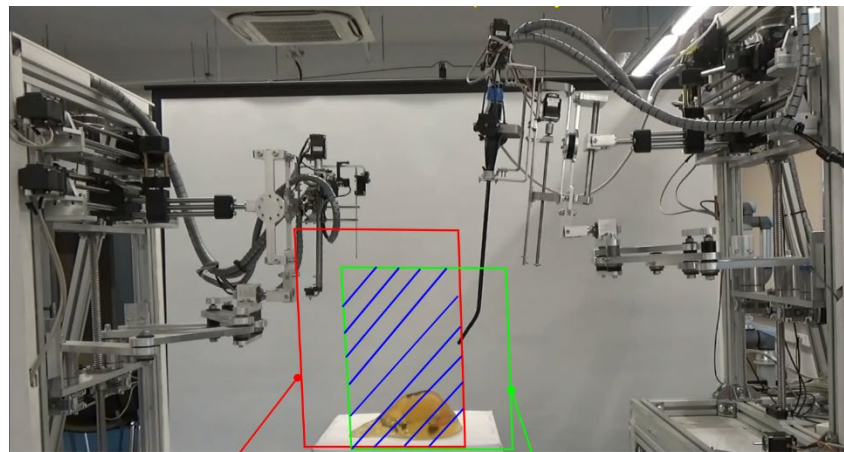


Figura 5. Spațiul de lucru al roboților componenți ai sistemului ProHep-LCT, fără singularități.



Spațiul de lucru combinat  
al robotului și instrumentului  
dedicat inserției acelor

Spațiul de lucru combinat  
al robotului și instrumentului  
dedicat ghidării sondei ecografice

Figura 6. Spațiul de lucru al sistemului ProHep-LCT, în vedere laterală.

## 2. Algoritm de evitare a coliziunilor

Algoritmii de evitare a coliziunilor în robotică sunt proiectați pentru a permite roboților să navigheze în mediul lor evitând în același timp coliziunile cu posibilele obstacole. Este evident că acești algoritmi au o importanță crucială în creșterea siguranței și eficienței sistemelor robotizate în diverse aplicații, inclusiv vehicule autonome, drone, roboți industriali, roboți medicali, etc. Există mai multe modalități de elaborare a acestor algoritmi, cum ar fi:

- Utilizarea unor senzori, cum sunt LiDAR (Light Detection and Ranging), radar, sonar sau alți senzori de proximitate, care oferă informații despre împrejurimile robotului, inclusiv locația și distanța obstacolelor din apropiere.

- Cartografierea mediului. În acest caz datele senzorilor sunt folosite pentru a crea o reprezentare a mediului de operare a robotului. Această reprezentare este adesea sub forma unei hărți, care poate fi 2D sau 3D, în funcție de aplicație.
- Planificarea traiectoriei (path planning). În acest caz un algoritm de planificare a traseului generează o traiectorie sigură și eficientă pe care robotul trebuie să o urmeze de la poziția sa actuală până la obiectiv, evitând în același timp obstacolele. Algoritmii obișnuiți de planificare a căilor includ A\* (A-Steja), algoritmul lui Dijkstra, RRT (Rapidly Exploring Random Trees) și alții.
- Evitarea obstacolelor. În cadrul planificării traseului, tehnicile de evitare a coliziunilor sunt integrate pentru a modifica traiectoria generată în timp real, pe baza datelor curente ale senzorilor. Alternativa o reprezintă metodele potențiale de câmp care atribuie forțe de respingere în jurul obstacolelor, iar robotul navighează urmând gradientul rezultat de forțe de atracție și de respingere. O altă variantă este reprezentată de algoritmi de calcul a vitezei pentru evitarea obstacolelor, care calculează viteza de mișcare a robotului luând în considerare dinamica acestuia și dinamica obstacolelor din apropiere.
- Control reactiv. Mecanismele de control reactiv permit robotului să răspundă rapid la schimbările dinamice din mediu. Dacă un obstacol apare brusc în calea robotului, algoritmi de control reactiv pot modifica traiectoria robotului în timp real pentru a evita coliziunea.
- Machine learning. În unele cazuri, tehnicile de învățare automată, cum ar fi reinforcement learning sau rețelele neuronale, sunt folosite pentru a antrena robotul să învețe strategii de evitare a coliziunilor bazate pe experiență și date acumulate.

Bineînțeles, metodele menționate se pot combina, astfel încât să conducă la o soluție fezabilă și sigură. Analiza mediului operațional al robotului ProHep-LCT a condus la următoarele concluzii:

- ✓ Prezintă un grad foarte ridicat de versatilitate, datorită faptului că ficatul este un organ masiv, iar tumorile pot fi plasate absolut aleatoriu, ceea ce conduce la o varietate mare de aborduri chirurgicale, dificil de previzionat;
- ✓ Definirea unui spațiu de lucru sigur, care să conducă la evitarea coliziunii cu alte elemente anatomice ale pacientului devine greu de realizat și poate conduce la îngreunarea actului medical prin impunerea unor limite care probabil trebuie suprascrise constant.
- ✓ Există o probabilitate ridicată de coliziune dintre cei doi roboți cu instrumentele aferente, ceea ce ar conduce la efecte negative grave: deraierea de la traiectoria impusă, crearea unor leziuni suplimentare, unele cu urmări fatale.

Prin urmare, se impune crearea unui algoritm care să conducă la evitarea coliziunilor dintre cei doi roboți, mai exact dintre instrumentele robotizate (cel de ghidare a sondei și cel de inserție a acelor). Analiza metodelor prezentate au condus la concluzia că, datorită dinamicii ridicate a mediului, a vitezei reduse de mișcare a instrumentelor și a concurenței dintre cele două instrumente într-un spațiu relativ se recomandă utilizarea unui rapid în execuție și ușor de implementat.

Pentru aceasta, cele două instrumente au fost asimilate la două capsule (Figura 7), stabilindu-se astfel limitele de contur ale acestora. Acestea au 2 dimensiuni: razele celor două jumătăți de calotă sferică (superioară și inferioară), precum și lungimile capsulelor.

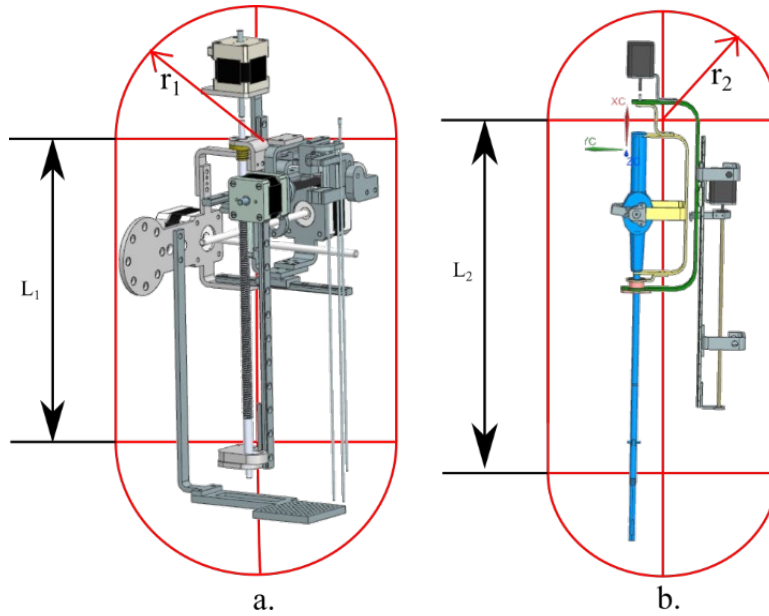


Figura 7. Spațiul de lucru al sistemului ProHep-LCT, în vedere laterală.

Se studiază în continuare cazurile de coliziune ale capsulelor. În acest sens, cele două capsule s-au redus la două axe, rezultând două cazuri de coliziune:

- ✓ Cazul 1: intersecția axelor se realizează în interiorul primei capsule. În acest caz distanța cea mai apropiată dintre două puncte ale capsulelor este  $D$  (Figura 7a.), iar dacă  $D > r_1 + r_2$  nu există risc de coliziune.
- ✓ Cazul 2: intersecția dintre axe are loc în afara capsulelor, când punctele cele mai apropiate sunt extremitățile capsulelor (Figura 7b.). Din nou, dacă  $D > r_1 + r_2$  nu există risc de coliziune.

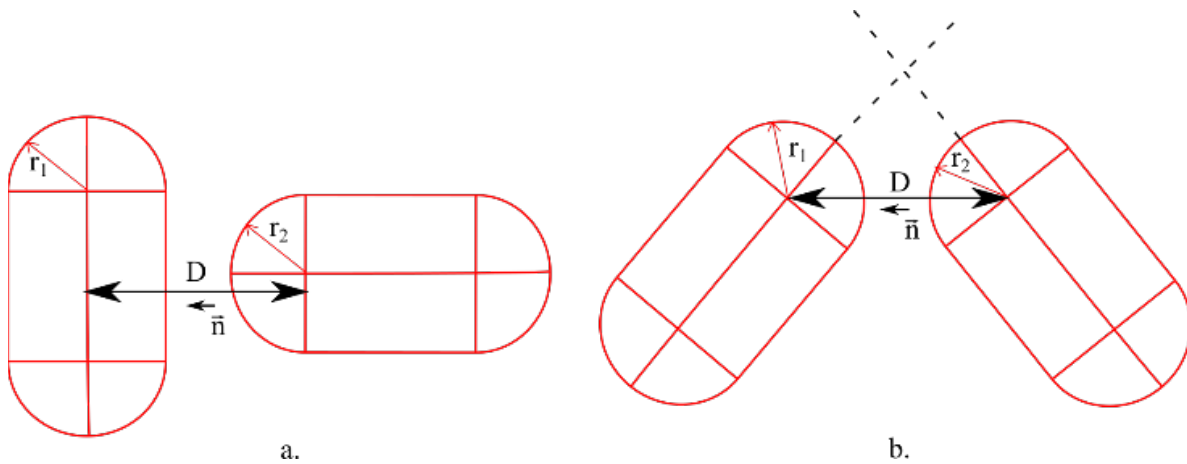


Figura 8. Spațiul de lucru al sistemului ProHep-LCT, în vedere laterală.

Pentru optimizare se poate minimiza diferența dintre starea inițială și dorită a celor două instrumente:

$$\frac{1}{2} |\dot{Q} - \dot{Q}_{target}| = \min \quad (1)$$

Unde  $\dot{X} = [\dot{q}_1 \quad \dot{q}_2 \quad \dot{q}_3 \quad \dot{q}_4 \quad \dot{q}_5]^T$ , reprezentând vectorul vitezelor cuplelor active. Utilizând matricea Jacobi se poate scrie:

$$\dot{X} = J \cdot \dot{Q}, \text{ cu } \dot{X} = [\dot{X} \quad \dot{Y} \quad \dot{Z} \quad \dot{\psi} \quad \dot{\theta}]^T \quad (2)$$

Unde  $\dot{X}$  este viteza celui mai apropiat punct al fiecărui instrument de celălalt. Proiectând (2) pe normala  $\vec{n}$  și înmulțind cu incrementul de timp  $\Delta t$ , condiția de evitare a coliziunilor se poate scrie ca:

$$-(\vec{n} \cdot J) \dot{Q} + \frac{D}{\Delta t} > 0 \quad (3)$$

**Prof. univ. dr. ing. Doina PISLĂ**

*DPisla*