

**CESTER**

# **ROBOTICA MEDICALA**

## **CURS 4**

### **ROBOTUL MEDICAL PARAMIS 5M\_P**

**Modelarea geometrică, studiul singularităților și  
generarea spațiului de lucru**

**Prof. Dr.Ing. Doina PISLA**

**06 May 2013**

# Cuprins



- Aspecte introductive;
- Definirea si modelul geometric al unui robot medical cu 5 GDL pentru chirurgia minim invaziva;
- Analiza singularităților;
- Generarea analitică a spațiului de lucru pentru robotul hibrid PARAMIS 5M\_P;
- Modelul experimental al robotului PARAMIS 5M\_P;
- Bibliografie

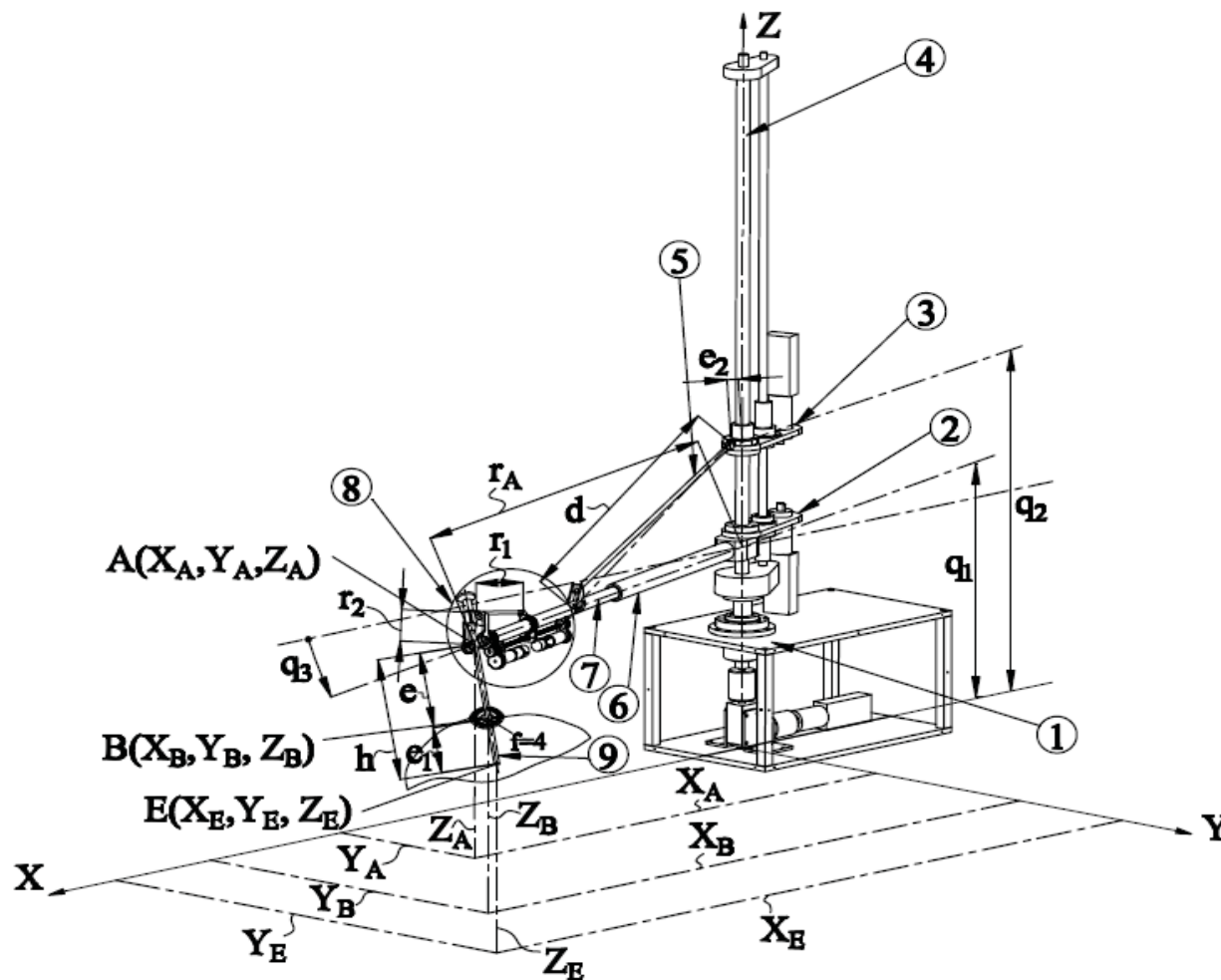
# Definirea si modelul geometric al unui robot medical paralel hibrid cu 5 GDL pentru chirurgia minim invaziva – PARAMIS 5M\_P

# Cerințe impuse unui sistem dezvoltat pentru CMIAR

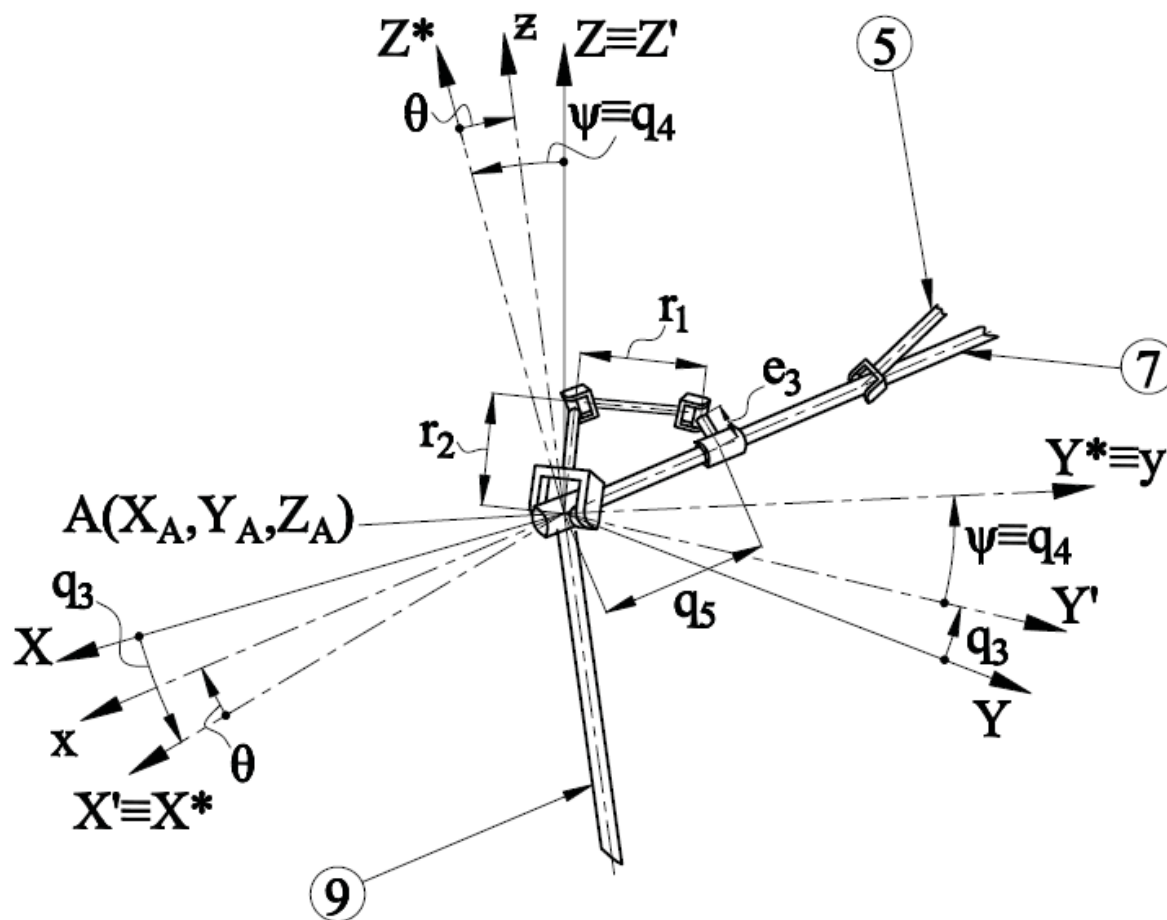


- ▶ să beneficieze de o precizie ridicată;
- ▶ să aibă un spațiu de lucru relativ restrâns, dar corespunzător cerințelor impuse;
- ▶ să fie capabil de un control eficient al poziției și vitezei;
- ▶ să aibă dimensiuni compacte, cu inerții reduse.

# Schema cinematica a structurii hibride PARAMIS 5M\_P



# Schema cinematică a modului paralel de orientare



# Modelul geometric al robotului PARAMIS 5M\_P



## Modelul geometric invers

Date

Necunoscute

$$\begin{matrix} X_E, Y_E, Z_E \\ X_B, Y_B, Z_B \end{matrix}$$



$$\psi, \theta, q_i, i = 1, 2, 3, 4, 5$$

## Modelul geometric direct

Date

Necunoscute

$$\begin{matrix} q_i, i = 1, 2, 3 \\ X_B, Y_B, Z_B \end{matrix}$$



$$X_E, Y_E, Z_E, \psi, \theta, q_4, q_5$$



# Modelul geometric direct



Date:  $q_1, q_2, q_3, X_B, Y_B, Z_B$

$b, d, h, e_2, e_3, r_1, r_2, \beta$

Se cer:  $X_E, Y_E, Z_E, \psi, \theta, q_4, q_5$

| Mărimi determinate | Relații de determinare                                                                                                                       |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $r_A$              | $r_A = b + e_2 + \sqrt{d^2 - (q_2 - q_1)^2}$                                                                                                 |
| $X_A; Y_A; Z_A$    | $X_A = r_A \cdot \cos(q_3); \quad Y_A = r_A \cdot \sin(q_3); \quad Z_A = q_1$                                                                |
| $e$                | $e = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}$                                                                                   |
| $\psi$             | $\psi = \text{atan2}(Y_B - Y_A, Z_A - Z_B)$                                                                                                  |
| $\theta$           | $\theta = \text{atan2}\left[X_A - X_B, \sqrt{e^2 - (X_B - X_A)^2}\right]$                                                                    |
| $q_4$              | $q_4 = \psi$                                                                                                                                 |
| $q_5$              | $q_5 = r_A - \left( r_2 \cdot \cos(90 - \theta - \beta) + \sqrt{r_1^2 - \left( r_2 \cdot \sin(90 - \theta - \beta) - e_3 \right)^2} \right)$ |
| $X_E; Y_E; Z_E$    | $X_E = X_A - h \cdot \sin(\theta)$ $Y_E = Y_A + h \cdot \sin(\psi) \cos(\theta)$ $Z_E = Z_A - h \cdot \cos(\psi) \cos(\theta)$               |



# Modelul geometric invers

Date:  $X_E, Y_E, Z_E, X_B, Y_B, Z_B$

$b, d, h, e_2, e_3, r_1, r_2, \beta$

Se cer:  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, \psi, \theta$

| Mărimi determinate | Relații de determinare                                                                                                          |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $e_1$              | $e_1 = \sqrt{(X_B - X_E)^2 + (Y_B - Y_E)^2 + (Z_B - Z_E)^2}$                                                                    |
| $\psi$             | $\psi = \text{atan2}(Y_E - Y_B, Z_B - Z_E)$                                                                                     |
| $\theta$           | $\theta = \text{atan2}\left(X_B - X_E, \sqrt{e_1^2 - (X_B - X_E)^2}\right)$                                                     |
| $r_A$              | $r_A = \sqrt{(X_E + h \cdot \sin(\theta))^2 + (Y_E - h \cdot \sin(\psi) \cos(\theta))^2}$                                       |
| $q_1$              | $q_1 = Z_E + h \cdot \cos(\psi) \cos(\theta)$                                                                                   |
| $q_2$              | $q_2 = Z_E + h \cdot \cos(\psi) \cos(\theta) + \sqrt{d^2 - (r_A - b - e_2)^2}$                                                  |
| $q_3$              | $q_3 = \text{atan2}(Y_E - h \cdot \sin(\psi) \cos(\theta), X_E + h \cdot \sin(\theta))$                                         |
| $q_4$              | $q_4 = \psi$                                                                                                                    |
| $q_5$              | $q_5 = r_A - \left( r_2 \cdot \cos(90 - \theta - \beta) + \sqrt{r_1^2 - (r_2 \cdot \sin(90 - \theta - \beta) - e_3)^2} \right)$ |

# Modelul geometric



Model geometric direct (MGD)

Model geometric invers (MGI)



→ Soluție analitică!

- ▶ Validarea modelelor geometrice pe baza modelului CAD

# Analiza singularităților

# Sistemul de ecuații

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1(q_1, Z_E, \psi, \theta) \equiv q_1 - Z_E - h \cdot \cos(\psi) \cos(\theta) = 0 \\ F_2(q_2, X_E, Y_E, Z_E, \psi, \theta) \equiv (q_2 - Z_E - h \cdot \cos(\psi) \cos(\theta))^2 - d^2 + (rad2 - b - e_2)^2 = 0 \\ F_3(q_3, X_E, Y_E, \psi, \theta) \equiv (X_E + h \cdot \sin(\theta)) \cdot \sin(q_3) - (Y_E - h \cdot \sin(\psi) \cdot \cos(\theta)) \cdot \cos(q_3) = 0 \\ F_4(q_4, \psi) \equiv q_4 - \psi = 0 \\ F_5(q_5, X_E, Y_E, \psi, \theta) \equiv q_5 - rad2 + \left( r_2 \cdot \cos(90 - \theta - \beta) - \sqrt{r_1^2 - (r_2 \cdot \sin(90 - \theta - \beta) - e_3)^2} \right) = 0 \end{array} \right.$$

**unde:**

$$rad2 = \sqrt{(X_E + h \cdot \sin(\theta))^2 + (Y_E - h \cdot \sin(\psi) \cos(\theta))^2}$$

# Matricale Jacobi

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_E} & \frac{\partial F_1}{\partial Y_E} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_E} & \frac{\partial F_1}{\partial \psi} & \frac{\partial F_1}{\partial \theta} \\ \frac{\partial F_2}{\partial X_E} & \frac{\partial F_2}{\partial Y_E} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_E} & \frac{\partial F_2}{\partial \psi} & \frac{\partial F_2}{\partial \theta} \\ \frac{\partial F_3}{\partial X_E} & \frac{\partial F_3}{\partial Y_E} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_E} & \frac{\partial F_3}{\partial \psi} & \frac{\partial F_3}{\partial \theta} \\ \frac{\partial F_4}{\partial X_E} & \frac{\partial F_4}{\partial Y_E} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_E} & \frac{\partial F_4}{\partial \psi} & \frac{\partial F_4}{\partial \theta} \\ \frac{\partial F_5}{\partial X_E} & \frac{\partial F_5}{\partial Y_E} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_E} & \frac{\partial F_5}{\partial \psi} & \frac{\partial F_5}{\partial \theta} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial q_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_2}{\partial q_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_3}{\partial q_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial F_4}{\partial q_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial F_5}{\partial q_5} \end{bmatrix}$$

# Singularități de tipul I

- **Singularități de tipul I** apar dacă  $\det(B)=0$ . Structura se blochează pierzând unul sau mai multe grade de mobilitate.

$$\det(B) = 2 \cdot (q_2 - Z_E - h \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(\theta)) \cdot \\ \cdot \left( (X_E + h \cdot \sin(\theta)) \cdot \cos(q_3) + (Y_E - h \cdot \sin(\psi) \cdot \cos(\theta)) \cdot \sin(q_3) \right)$$

- **Cazuri posibile:**

$q_2 = q_1$  – se elimina impunand următoarea condiție:  $q_2 > q_1$

$X_A^2 + Y_A^2 = 0$  – se elimina deoarece structura mecanică a robotului nu permite asemenea poziții;

# Singularități de tipul II

- **Singularități de tipul II** apar dacă  $\det(A)=0$ . Structura mecanică câștigă grade de mobilitate suplimentare, care îl fac necontrolabil.

$$\det(A) = 2 \cdot r_2 \cdot \left( b + e_2 - \sqrt{(Y_E - h \cdot \sin(\psi) \cdot \cos(\theta))^2 + (X_E + h \cdot \sin(\theta))^2} \right) \cdot \frac{((X_E + h \cdot \sin(\theta)) \cdot \cos(q_3) + (Y_E - h \cdot \sin(\psi) \cdot \cos(\theta)) \cdot \sin(q_3))}{\sqrt{(Y_E - h \cdot \sin(\psi) \cdot \cos(\theta))^2 + (X_E + h \cdot \sin(\theta))^2} \cdot \sqrt{r_1^2 - \left( e_3 - r_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \beta\right) \right)^2}} \cdot \left( \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \beta\right) \cdot \sqrt{r_1^2 - \left( e_3 - r_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \beta\right) \right)^2} + \left( r_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \beta\right) - e_3 \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \beta\right) \right)$$

► **Cazuri posibile:**

- $r_2 = 0$  – se elimina deoarece  $r_2$  diferă tot timpul de zero;
- $d = q_2 - q_1$  – se elimina deoarece structura mecanică nu permite asemenea poziții;
- $X_A^2 + Y_A^2 = 0$  – se elimina deoarece structura mecanică nu permite asemenea poziții;

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \beta\right) \cdot \sqrt{r_1^2 - \left( e_3 - r_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \beta\right) \right)^2} + \left( r_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \beta\right) - e_3 \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \beta\right) = 0 \quad - \text{se elimină}$$

prin proiectarea constructivă a modulului paralel;



# Singularități de tipul III



- ▶ **Singularități de tipul III** apar în cazul în care determinanții matricelor A și B sunt nuli în același timp. Se numesc singularități arhitecturale.

- ▶ **Cazuri posibile:**

$X_A^2 + Y_A^2 = 0$  – se elimina deoarece structura nu permite asemenea poziții;

- ▶ **Concluzie.** Având în vedere că singurele cazuri de singularitate apar în zone în care robotul nu poate să ajungă datorită constrângerilor constructive, se poate spune că, în spațiul de lucru al robotului, **NU exista puncte de singularitate.**

# Generarea analitică a spațiului de lucru pentru robotul medical hibrid PARAMIS 5M\_P

# Conditii impuse de actul chirurgical



- ▶ Axa longitudinală a instrumentului trebuie să treacă tot timpul prin punctul B de inserție;
- ▶ Unghiul pe care îl face instrumentul cu verticala (unghiul  $\theta$ ) să nu depășească  $50^\circ$  (condiție impusă de limitările mecanice a modului de orientare);
- ▶ Coordonata pe axa Z a punctului B să fie întotdeauna mai mare decât coordonata pe aceeași axă a punctului E (vârful instrumentului să se găsească tot timpul în interiorul abdomenului pacientului);
- ▶ Instrumentul trebuie să rămână introdus în cavitatea abdominală pe o lungime de cel puțin 50 [mm] – condiție impusă doar pentru generarea spațiului de lucru cu vizibilitate/acțiune a instrumentului, și să nu depășească lungimea de 220 [mm] – condiție impusă de lungimea instrumentelor chirurgicale folosit în testele experimentale;
- ▶ Robotul trebuie să evite zonele de singularitate, ceea ce înseamnă că distanța între cuplele motoare de translație ( $q_1$  și  $q_2$ ) să fie de minimum 120 [mm] (pentru a evita coliziunea între ele);

# Determinarea analitica a spatiului de lucru



Pentru generarea analitica a spatiului de lucru al unui robot se pot folosi doua abordari, in stransa corelare cu modelele geomtrice:

- ▶ Modelarea spatiului de lucru utilizand MGD
- ▶ Modelarea spatiului de lucru utilizand MGI

# Pseudo-codul pentru generarea spațiului de lucru al robotului PARAMIS 5M\_P

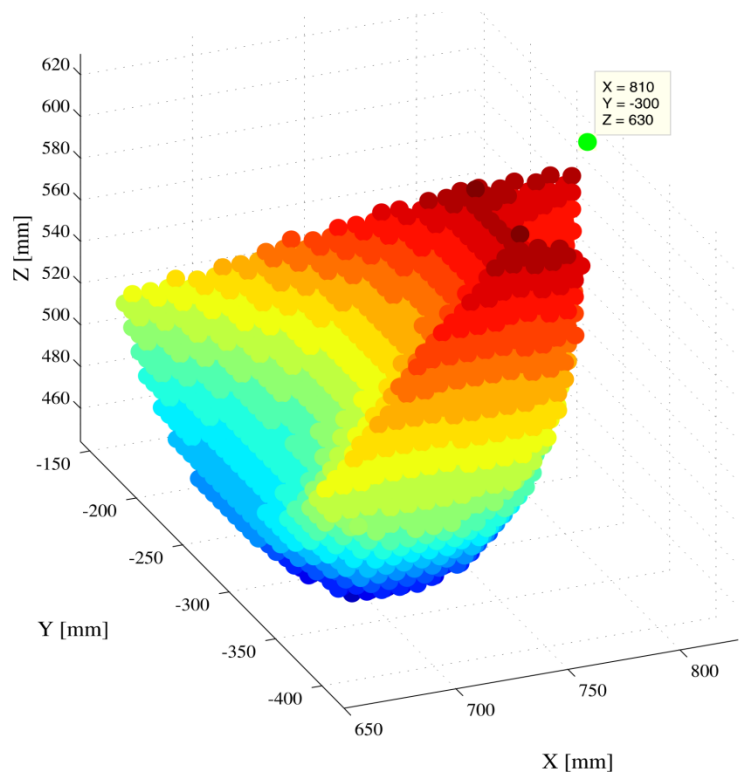


```
READ:XB, YB, ZB

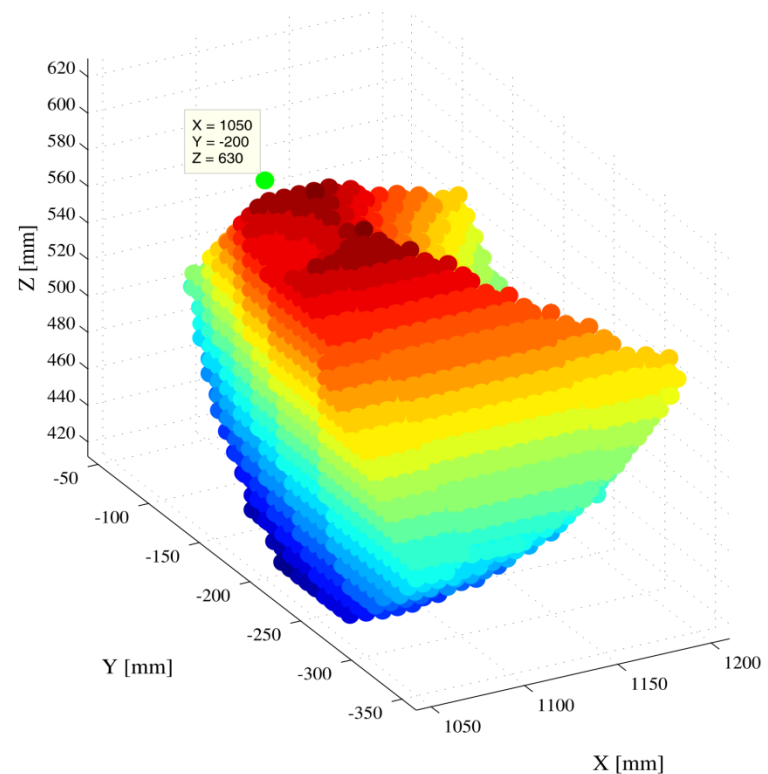
SET:  b, d, h, e2, e3, r1, r2,  $\beta$ , q1min, q1max, q2min, q2max, q3min, q3max, q4min, q4max, q5min, q5max
      limmin, limmax // Limits between the motors q1 and q2
      step // Increment
      XEmin, XEmax, YEmin, YEmax, ZEmin, ZEmax // Proposed limits for the workspace
FOR XE=XEmin:step:XEmax
  SET: YE=YEmin
  WHILE (YE<=YEmax)
    SET: ZE=ZEmin
    WHILE (ZE<=ZEmax)
      CALCULATE: e1
      IF (e1>=50) AND (e1<=220)
        CALCULATE: PSI, THETA, q1, q2, q3, q4, q5
        IF (q1min<=q1) AND (q1<=q1max) AND (q2min<=q2) AND (q2<=q2max)...
          AND (q3min<=q3) AND (q3<=q3max) AND (q4min<=q4) AND (q4<=q4max)
          AND (q5min<=q5) AND (q5<=q5max) AND (limmin<=(q2-q1)) AND ((q2-q1)<=limmax)
          SAVE: XE, YE, ZE
        END_IF
      END_IF
      ZE=ZE+step
    END_WHILE
    YE=YE+step
  END_WHILE
END_FOR

DISPLAY: XE, YE, ZE
```

# Spațiul de lucru incomplet cauzat de alegerea punctului de inserție incorect

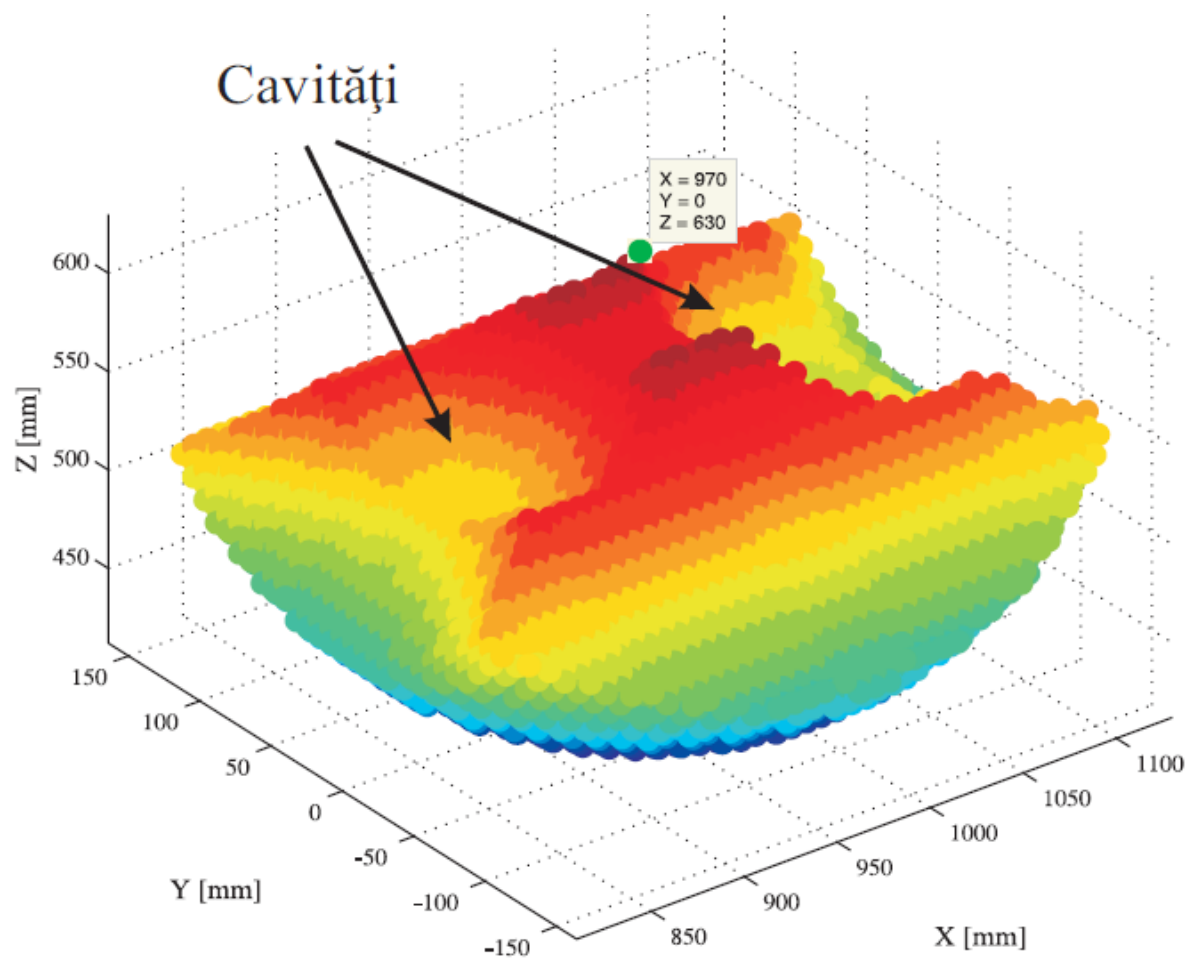


a)



b)

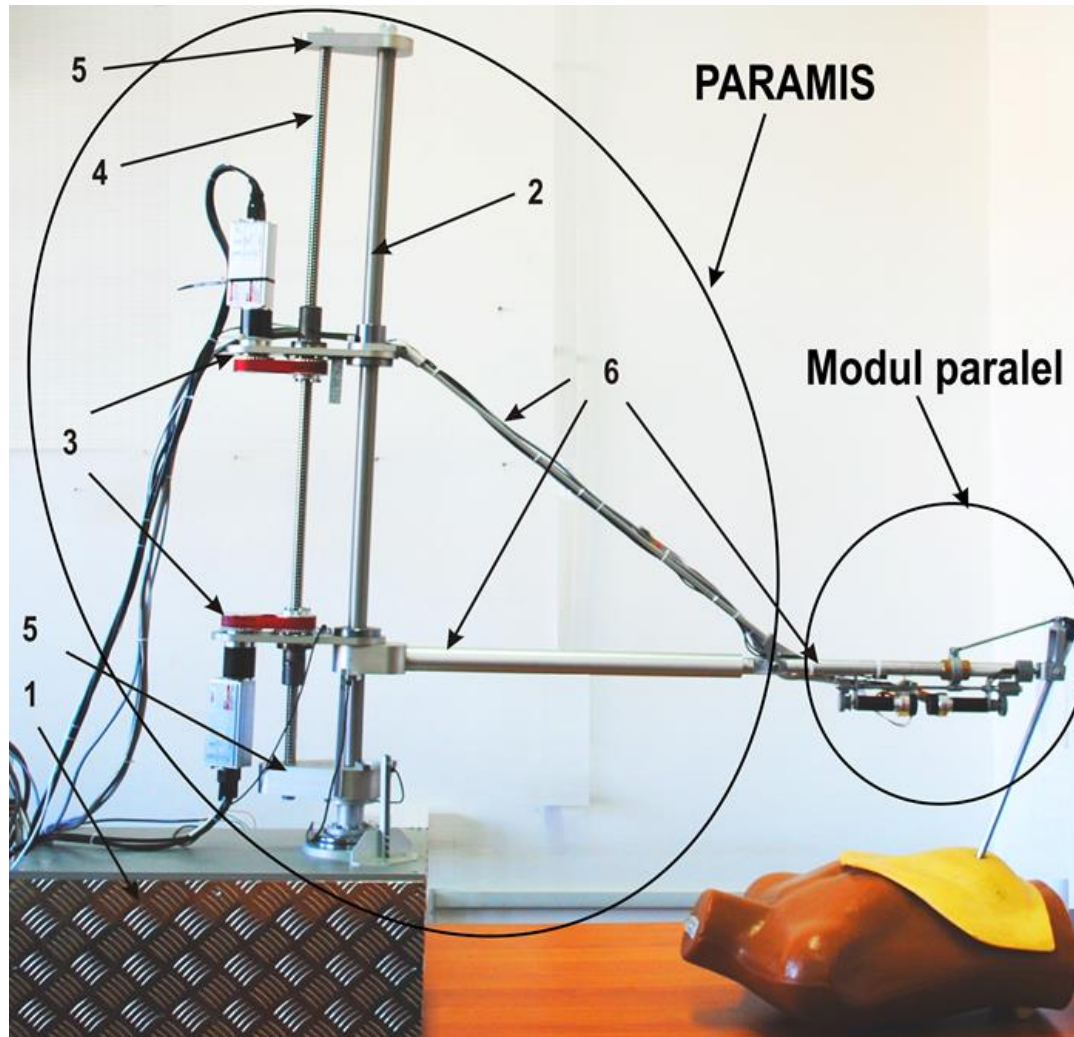
# Spațiul de lucru maxim al robotului în interiorul abdomenului



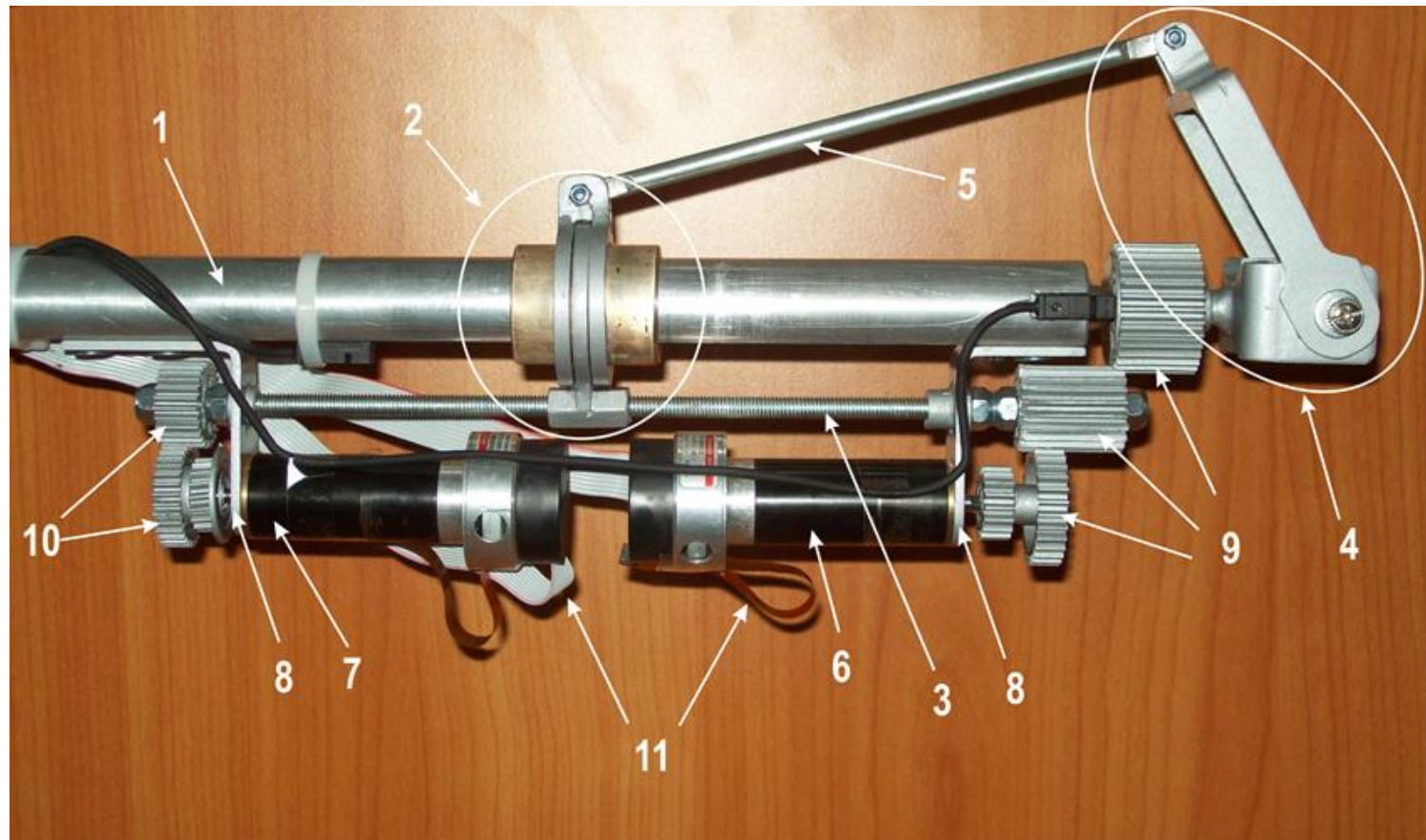
# Modelul experimental al robotului PARAMIS 5M\_P



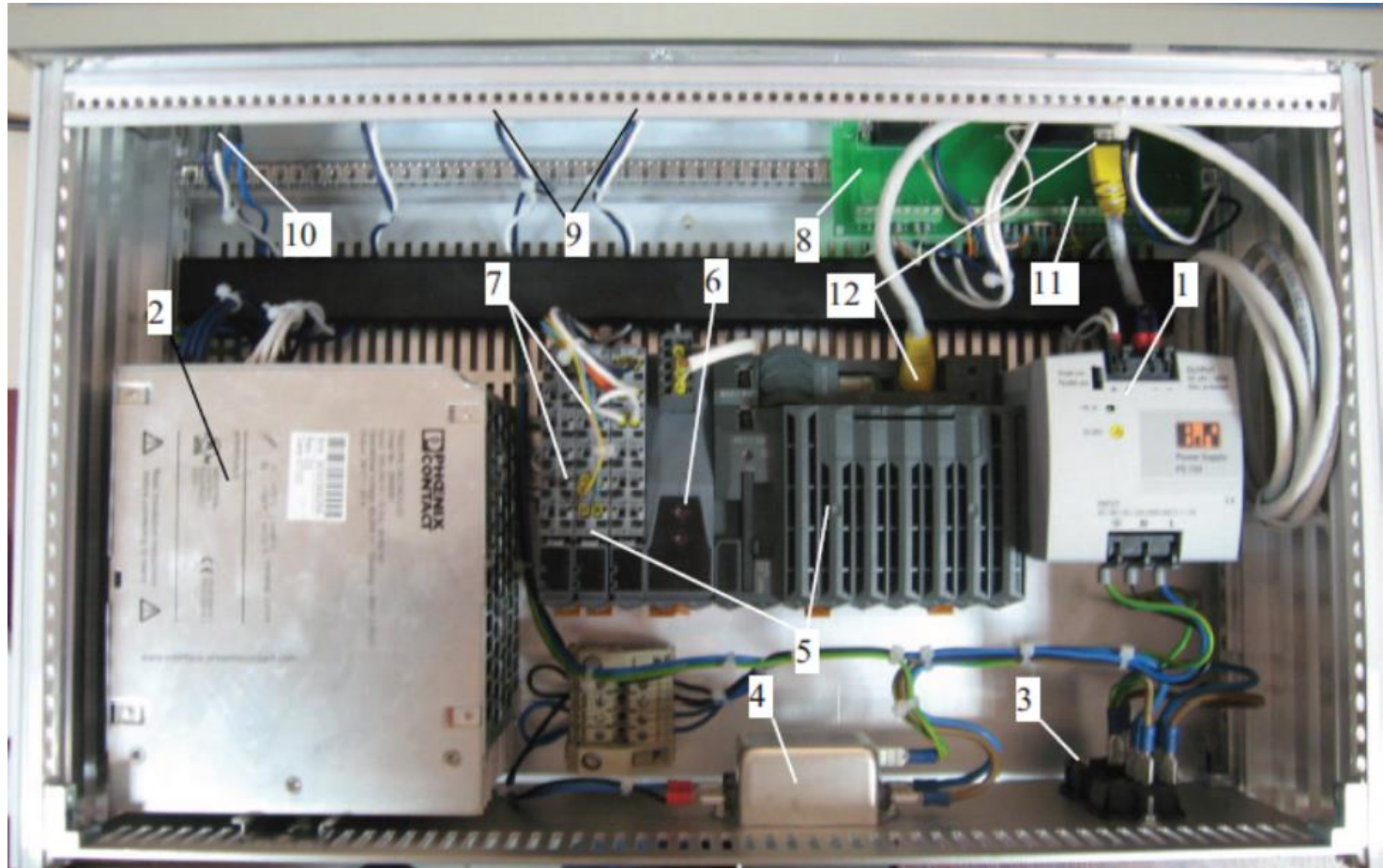
# Structura mecanica a robotului



# Modulul paralel de orientare

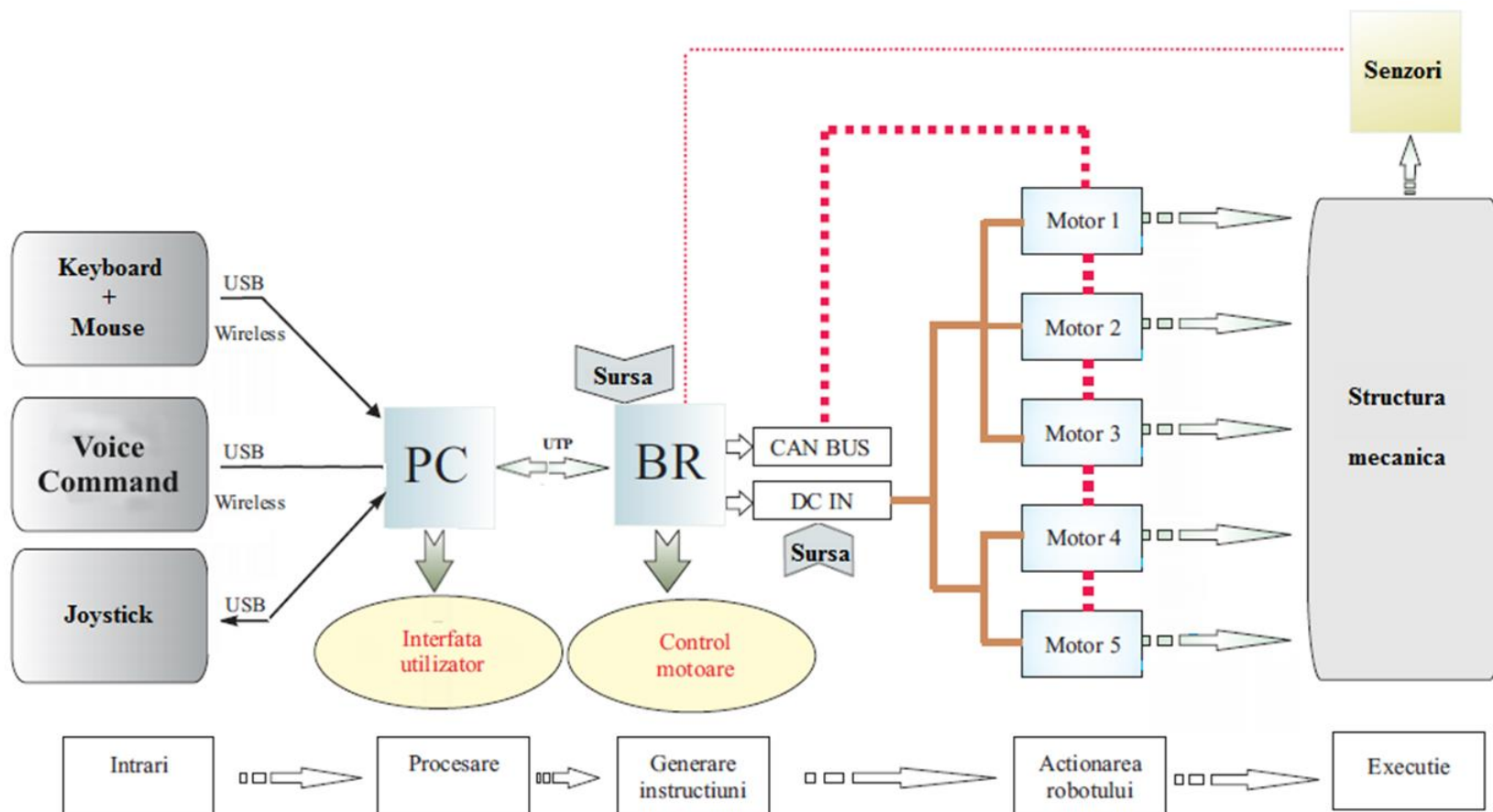


# Structura electrică de comandă al robotului

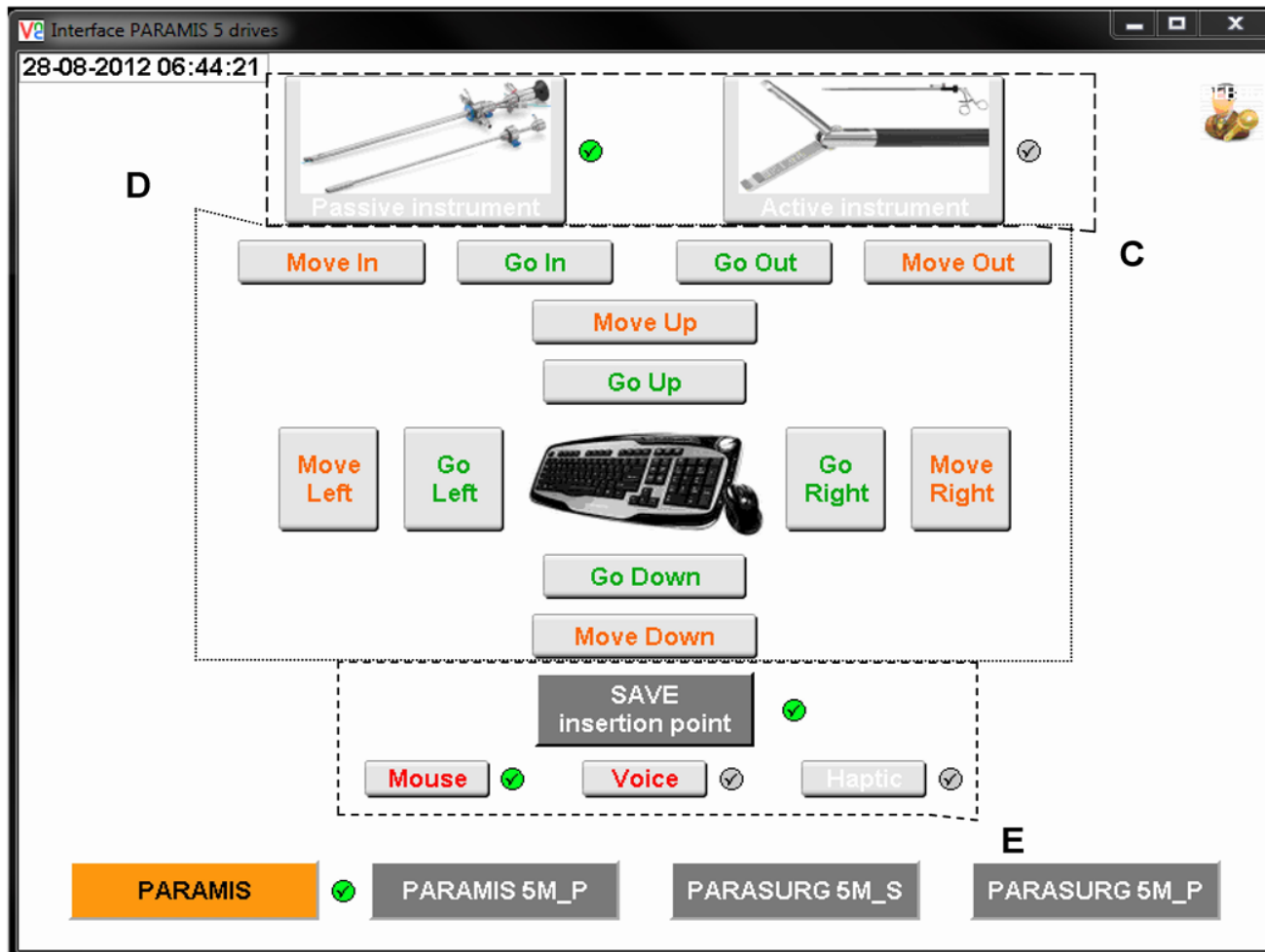




# Schema de actionare a robotului



# Comenzi definite pentru robotul PARAMIS 5M\_P



# Rezumat

S-a prezentat un nou robot medical paralel hibrid, format din doua module paralele legate in serie. Robotul hibrid obținut din cele două module, cel de poziționare și cel de orientare dezvoltat, este capabil să conducă atât instrumentele pasive cât și instrumentele activ de tăiere/prindere, etc.

- ▶ Definirea structurii robotului medical PARAMIS 5M\_P (modulul de poziționare paralel + modul de orientare paralel);
- ▶ Modelarea geometrică a noii structuri:
  - Modelarea geometrica directa → solutie analitica;
  - Modelarea geometrica inversa → solutie analitica;
- ▶ Analiza singularităților robotului PARAMIS 5M\_P → în spațiul de lucru al robotului nu există puncte singulare, ceea ce crește siguranța în exploatare;
- ▶ Determinarea și analiza spațiului de lucru;
- ▶ Prezentarea modelului experimental al robotului hibrid PARAMIS 5M\_P si a sistemului de comandă și control.

# Întrebări



1. Care sunt caracteristicile robotului medical PARAMIS 5M\_P?
2. Care este diferența dintre modelul geometric invers și modelul geometric direct?
3. Cum s-au determinat singularitățile robotului studiat?
4. Cum s-a determinat spațiul de lucru al robotului PARAMIS 5M\_P?
5. În cazul robotului medical PARAMIS 5M\_P, de ce apar acele cavități în spațiul de lucru?

# Raspunsuri

1. Robotul medical paralel PARAMIS\_5M\_P consta din doua module: modulul paralel de pozitionare al robotului PARAMIS si modulul paralel de orientare cu 2 grade de mobilitate
2. In cazul modelului geometric invers se cunosc parametri geometrici ai efectorului final si se determina parametri geometrici de la nivelul cuplelor active, iar in cazul modelului geometric direct se procedează invers.
3. Singularitățile robotului s-au determinat analizând determinanții matricelor Jacobi.
4. Spațiul de lucru al robotului s-a generat analitic pe baza modelului geometric invers luând in considerare restricțiile impuse de procedura medicala.
5. Cavitățile din spațiul de lucru prezentat, apar din cauza restricțiilor mecanice ale structurii, reprezentând zonele care nu se pot atinge cu efectorul final.



# Bibliografie

- ▶ I. A. Bonev and C. M. Gosselin, „Analytical determination of the workspace of symmetrical spherical parallel mechanisms”, IEEE Trans. Robot. 22(5), pp. 1011–1017, 2006.
- ▶ C. Gosselin, J. Angeles, „Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematik Chains”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 6, pp. 281–290, 1990.
- ▶ C. Han, J. Kim, J. Kim, F.C. Park, „Kinematic sensitivity analysis of the 3-UPU parallel mechanism”, Mechanism and Machine Theory 37, 787–798, 2002.
- ▶ J.-P. Merlet, „Parallel Robots (Second Edition)”, Solid Mechanics and Its Applications, Vol. 128, 2nd ed., ISBN: 978-1-4020-4132-7, XIX, 394 p., 2006.
- ▶ D. Pîslă, „Modelarea cinematică și dinamică a roboților paraleli, Cluj-Napoca, Editura Dacia, ISBN: 973-35-1941-3, 2005.

# Bibliografie



- ▶ D. Pisla, A. Szilaghyi, C. Vaida, N. Plitea, Kinematics and workspace modeling of a new hybrid robot used in minimally invasive surgery, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 29, Issue 2, April 2013, Pages 463–474, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2012.09.016>
- ▶ A. Szilaghyi, A. Stoica, D. Pisla, C. Vaida and N. Plitea, „Kinematics Analysis of a Parallel Surgical Robot”, Advances in Robot Kinematics Innsbruck, Austria, June 24–28 2012, published in Latest Advances in Robot Kinematics, Springer, pp 333–340, DOI: 10.1007/978-94-007-4620-6\_42, 2012
- ▶ A. Cs. Szilaghyi, “Cercetări privind modelarea, simularea și comanda unui robot paralel-hibrid chirurgical”, Teza de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, 2012.
- ▶ A. Stoica, D. Pisla, A. Szilaghyi, B. Gherman, N. Plitea, „Workspace and Singularity Analysis for a Parallel Robot Used in Surgical Applications”, New Trends in Mechanism and Machine Science, Mechanisms and Machine Science, Volume 7, pp 149–157, 2013.
- ▶ L.-W. Tsai, “Robot Analysis–The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators”, A Wiley-Interscience Publication, 1999