



**Università degli Studi di Padova**

Dipartimento di Innovazione Meccanica e Gestionale

---

***D.A.A.N.S.***

***Double Action Actuator  
for Neuro Surgery***

**Coordinatore: Prof. G. Legnani**

**Tutore: Prof. A. Rossi**

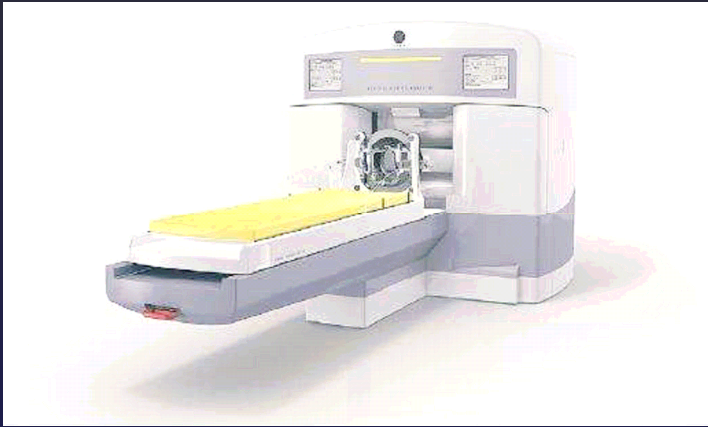
**dottorando: Aldo Dalla Via**

# CHIRURGIA STEREOTASSICA

TECNICA PER GUIDARE UN UTENSILE NEL CRANIO DEL PAZIENTE:

- ✓ attraverso un punto superficiale detto *Entry Point*
  - ✓ con l'orientamento definito da un *asse principale*
  - ✓ verso una precisa posizione all'interno del tessuto cerebrale, detta *Target*
- 
- ✓ Il *Target* viene individuato nell'analisi TAC
  - ✓ L'*Entry Point*, viene scelto dal chirurgo, in base all'esperienza e agli ostacoli presenti (es. vasi sanguigni)
  - ✓ L'*asse principale* è determinato dal vettore che collega i due punti

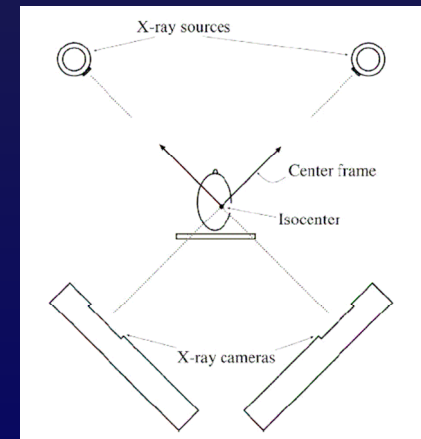
# SISTEMI ROBOTIZZATI PER NEUROCHIRURGIA: radioterapia extra cranica



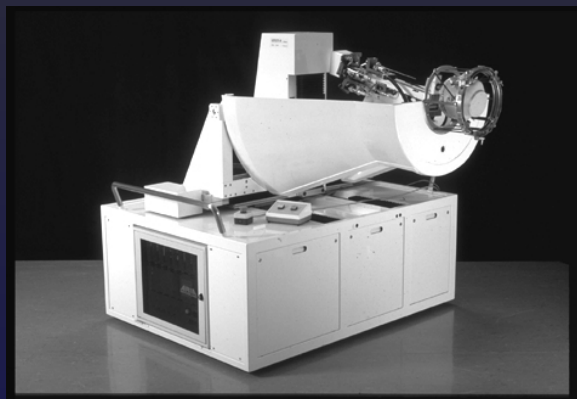
**Gamma Knife**  
Elekta Instruments Co.  
(Stockholm, Sweden)



**CyberKnife**  
Accuray Inc.  
(Sunnyvale, Calif. – USA)



# SISTEMI ROBOTIZZATI PER NEUROCHIRURGIA utilizzati per terapie intra-craniche



**Minerva**  
École Polytechnique  
Fédérale de  
Lausanne



**Pathfinder**  
Armstrong  
Healthcare Ltd

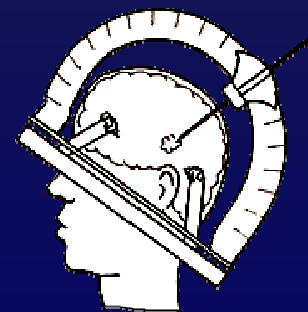


**Evolution 1**  
U.R.S. Universal Robot Systems  
GmbH & Co. (Parchim, Germany)

## VANTAGGI:

Riducono l'invasività dell'intervento, in quanto non c'è più la necessità di installare gli strumenti sul casco stereotassico.

Assicurano una precisione più elevata rispetto all'intervento manuale

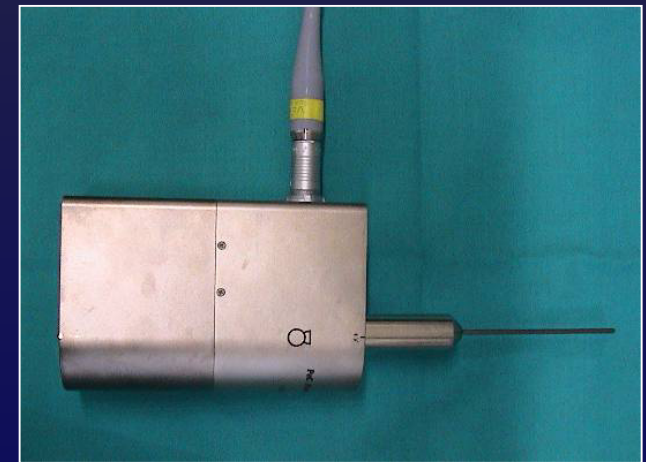


# SISTEMI ROBOTIZZATI PER NEUROCHIRURGIA APPARECCHIATURE PER RADIOTERAPIA



**Il NEUROMATE (ISS Corporation):** è un robot per il posizionamento degli utensili; lo scopo è quello di orientare gli utensili nello spazio in corrispondenza dell'entry point individuato dal chirurgo. l'inserimento nel cranio del paziente avviene manualmente.

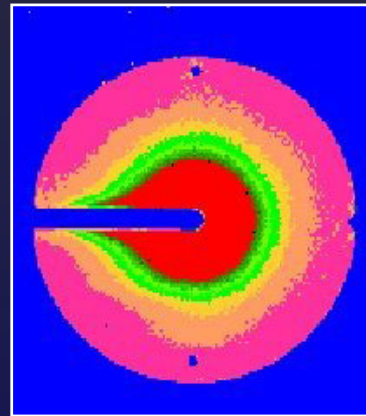
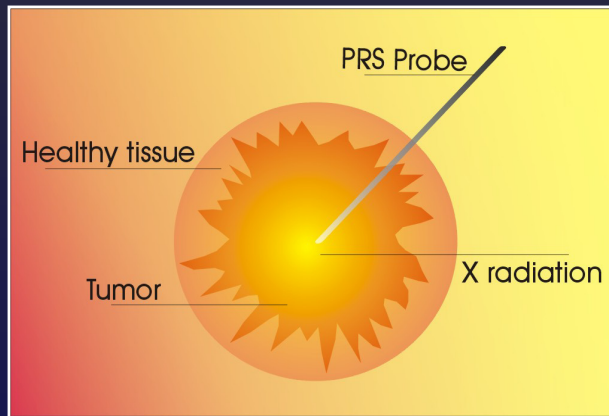
**Sonda PRS (Zeiss corporation):** è una sorgente di raggi X a bassa intensità ed elevato gradiente di dose che viene collocata al centro della lesione da trattare.



**Entrambi i sistemi sono in uso presso la clinica neurochirurgica dell'università di Firenze, partner del progetto.**

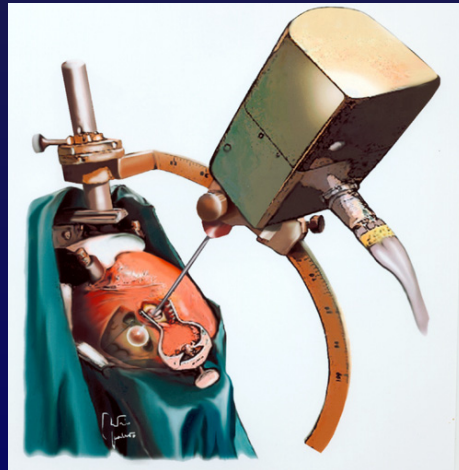
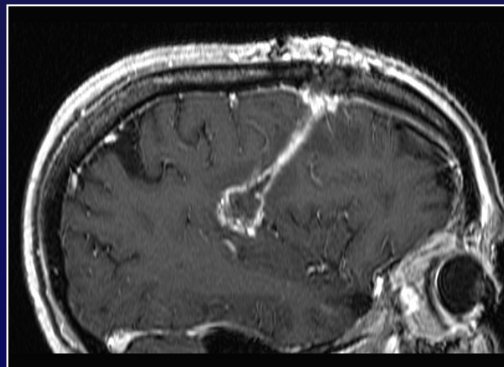
# RADIOTERAPIA INTERSTIZIALE NON CONFORMAZIONALE

Tecnica che utilizza una sorgente artificiale di radiazioni collocata in prossimità della lesione tumorale da trattare.



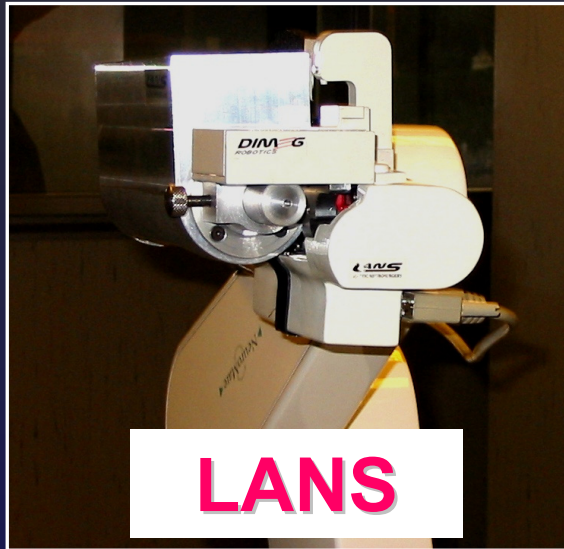
**Irradiazione di tipo isotropico:** impossibilità di trattare efficacemente lesioni di forma irregolare.

Necessita di un posizionamento accurato  
**L'intensità delle radiazioni è proporzionale a  $1/r^3$ .**



Il posizionamento viene effettuato in modo manuale o utilizzando dei sistemi robotizzati specifici (**LANS**).

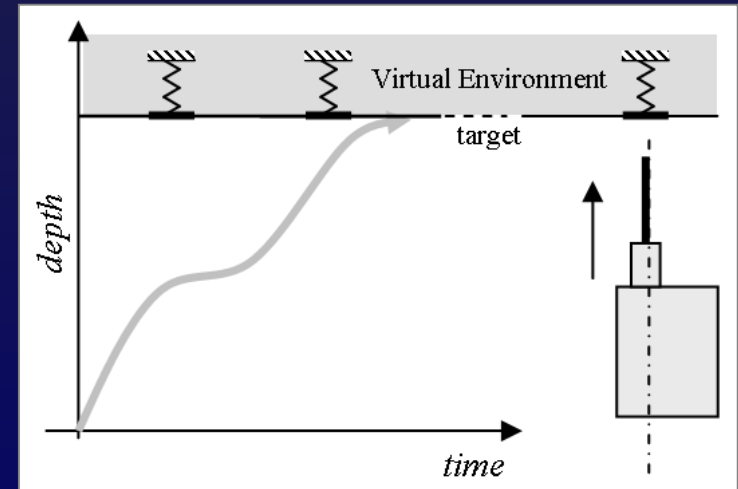
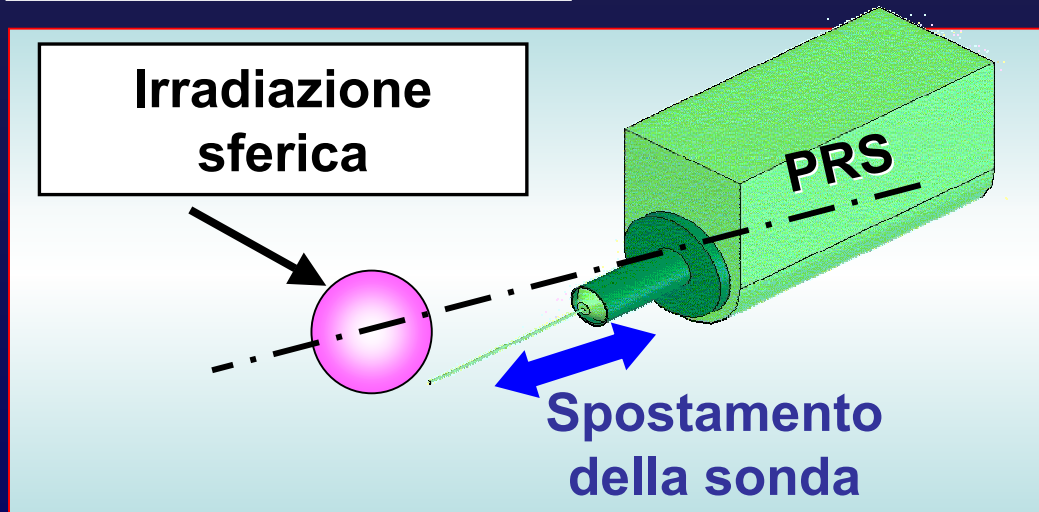
# SISTEMI ROBOTIZZATI PER LA RADIOTERAPIA INTERSTIZIALE NON CONFORMAZIONALE



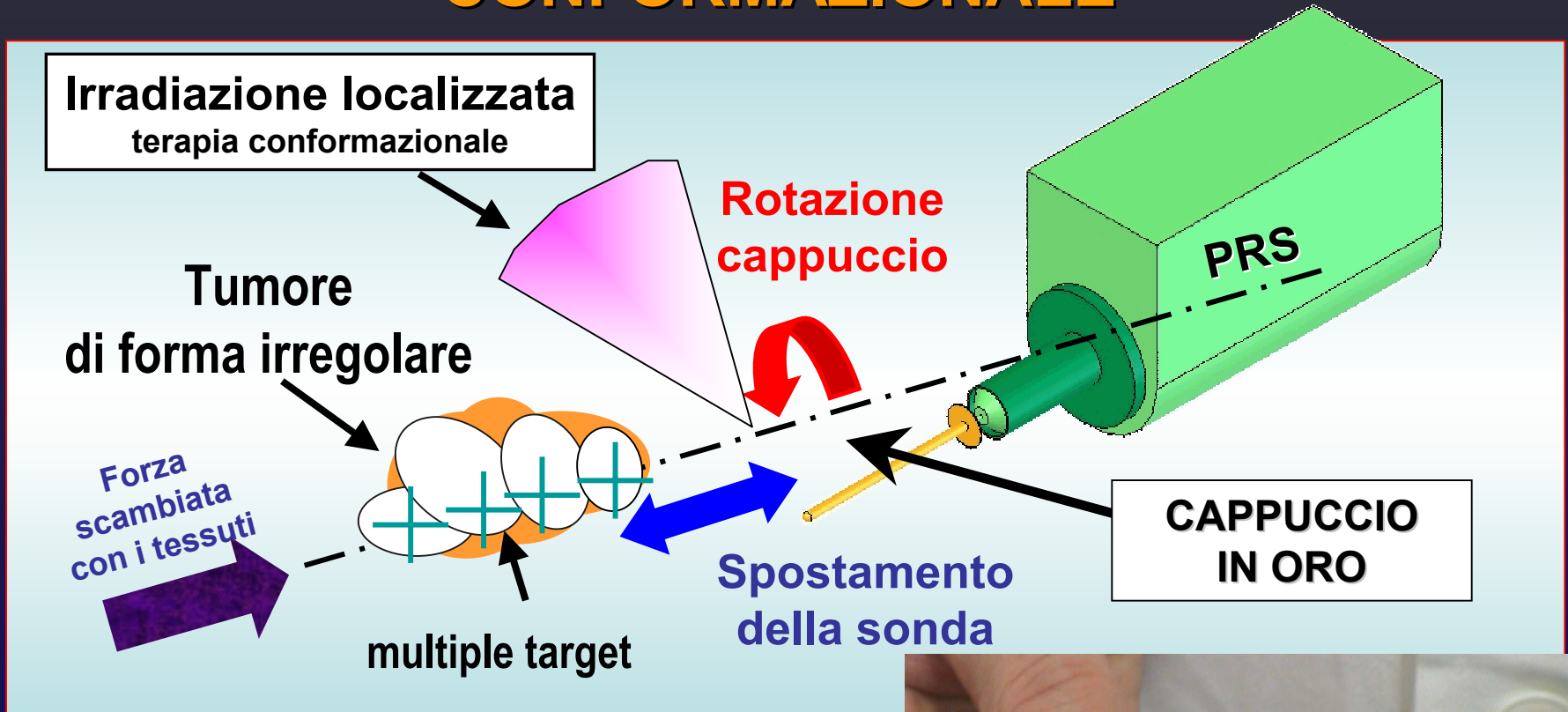
Sistema Aptico Master – Slave Sviluppato presso il Dipartimento di innovazione Meccanica e Gestionale dell'Università di Padova

Adatto ad essere installato su Neuromate: il robot svolge la funzione di supporto. Il fine motion è realizzato dal medico utilizzando l'interfaccia aptica

Utilizzato nelle fasi di foratura, biopsia, trattamento con PRS



# LA RADIOTERAPIA INTERSTIZIALE CONFORMAZIONALE



L'utilizzo di un cappuccio in oro su cui vengono predisposte delle apposite fessure permette di orientare la distribuzione della radiazione emessa.





# OBIETTIVI E SPECIFICHE GENERALI DEL PROGETTO

## OBIETTIVI

Sviluppo di un sistema robotizzato per terapie radiochirurgiche conformazionali.

Feedback di tipo tattile per simulare l'inserimento degli utensili che ad oggi vengono introdotti manualmente

L'apparecchiatura deve assicurare una elevata sensibilità (dell'ordine dei pochi grammi). L'orientazione del dispositivo rimane costante.

Rapporto di trasmissione scalabile. Deve essere possibile, per il chirurgo, avere sempre la percezione della traiettoria già percorsa.

Possibilità di monitoraggio in locale e da postazione remota.

## SPECIFICHE

Sono necessari 2 gradi di libertà:  
- traslazione lineare della sonda  
- rotazione del cappuccio in oro.

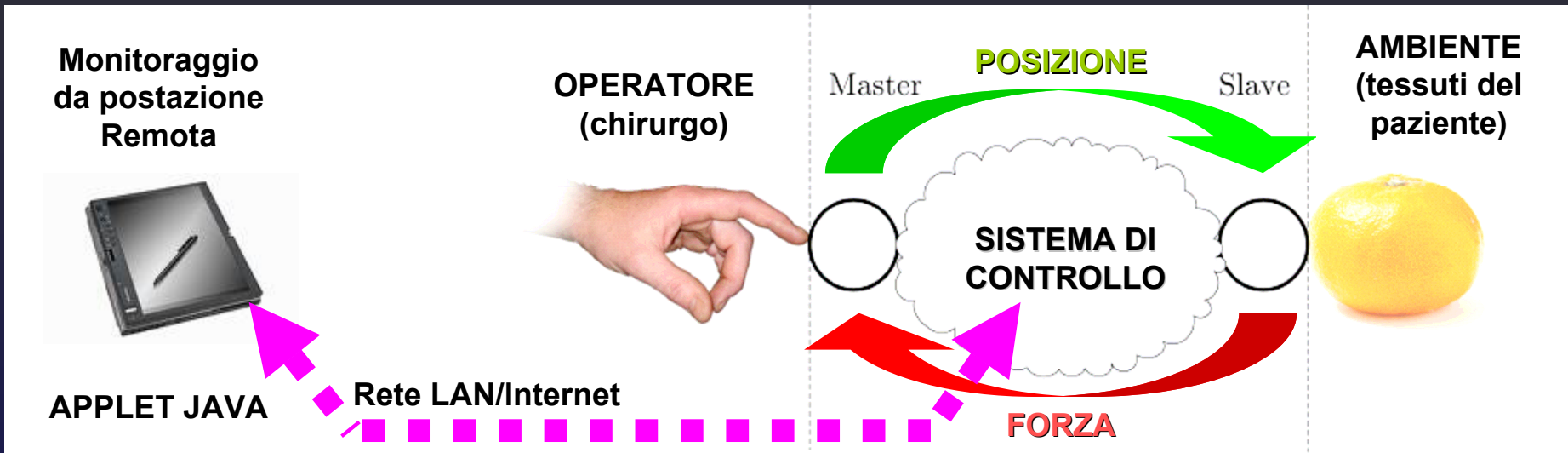
Il sistema deve essere dotato di una cella di carico che rileva le forze scambiate con i tessuti; una interfaccia aptica deve riprodurre le sensazioni tattili al chirurgo

Si ricorre ad una interfaccia aptica master – slave ad impedenza. Prima di procedere con l'operazione è necessario eseguire il bilanciamento delle forze per correggere l'offset della componente gravitazionale

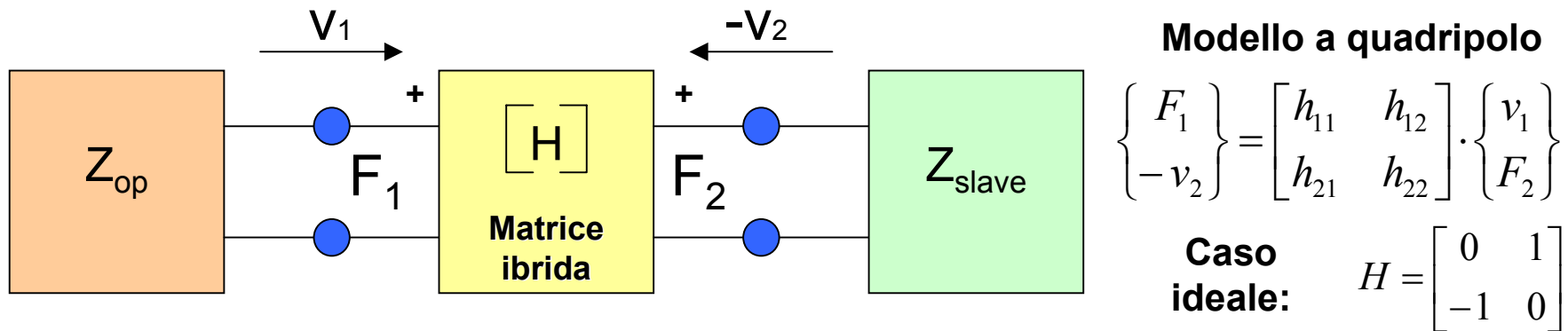
Si ricorre ad un master di tipo rotativo, con il quale comandare entrambi i gradi di libertà: ad ogni giro del master corrisponde un percorso ben definito dello slave, che dipende dal rapporto di trasmissione scelto

Programma di controllo locale + interfaccia Java per telemonitoraggio.

# Il progetto D.A.A.N.S - Schema di principio



## Modello interfaccia aptica (spostamento lineare)



# Il progetto D.A.A.N.S.

Il sistema deve interfacciarsi con il robot Neuromate attualmente in uso presso la Clinica Neurologica dell'Università di Firenze.

## Aree di intervento del progetto

### Slave

apparecchiatura che lavora a contatto con il paziente

### Master Aptico

### Console di comando

apparecchiatura su cui opera il chirurgo

### Software di controllo

### Applet Java

# SPECIFICHE DELLO SLAVE

- ❖ **Accuratezza di posizionamento**

lineare  $\pm 0.1$  mm – angolare  $\pm 1^\circ$

- ❖ **Cella di carico**

sensibile alle forze dirette lungo l'asse di traslazione

- ❖ **Intercambiabilità degli utensili**

- ❖ **Protezione dagli agenti esterni**

- ❖ **Possibilità di eseguire terapie conformazionali e non conformazionali**

## Caratteristiche tecniche DAANS

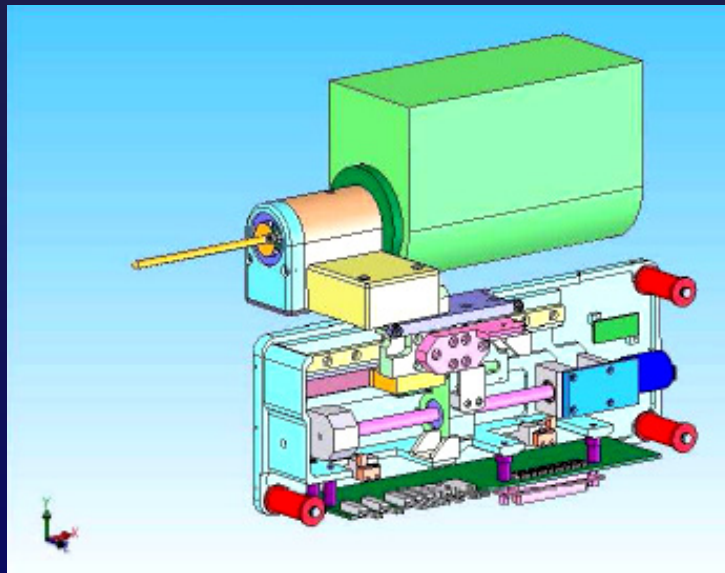
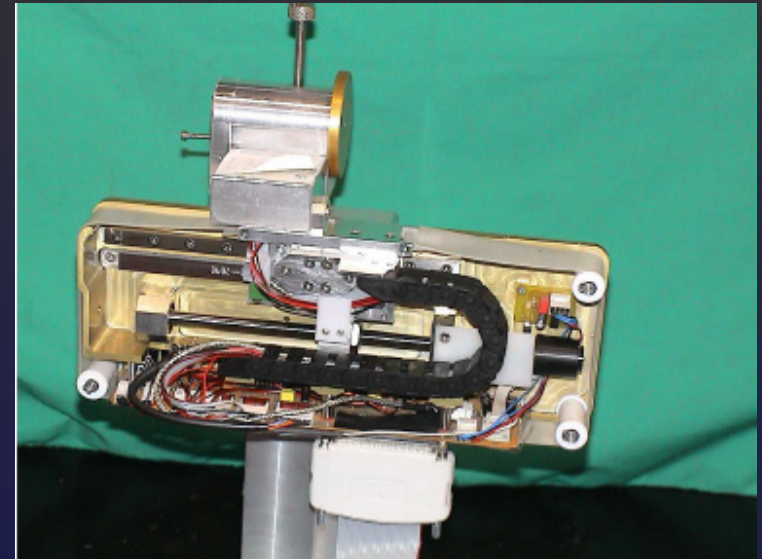
Corsa massima primo grado: **100 mm**

Escursione angolare 2° grado: **360 gradi**

Velocità massima di traslazione: **7 mm/s**

Peso complessivo: **2.2 Kg**

Max Payload: **2 Kg**



## Caratteristiche componenti

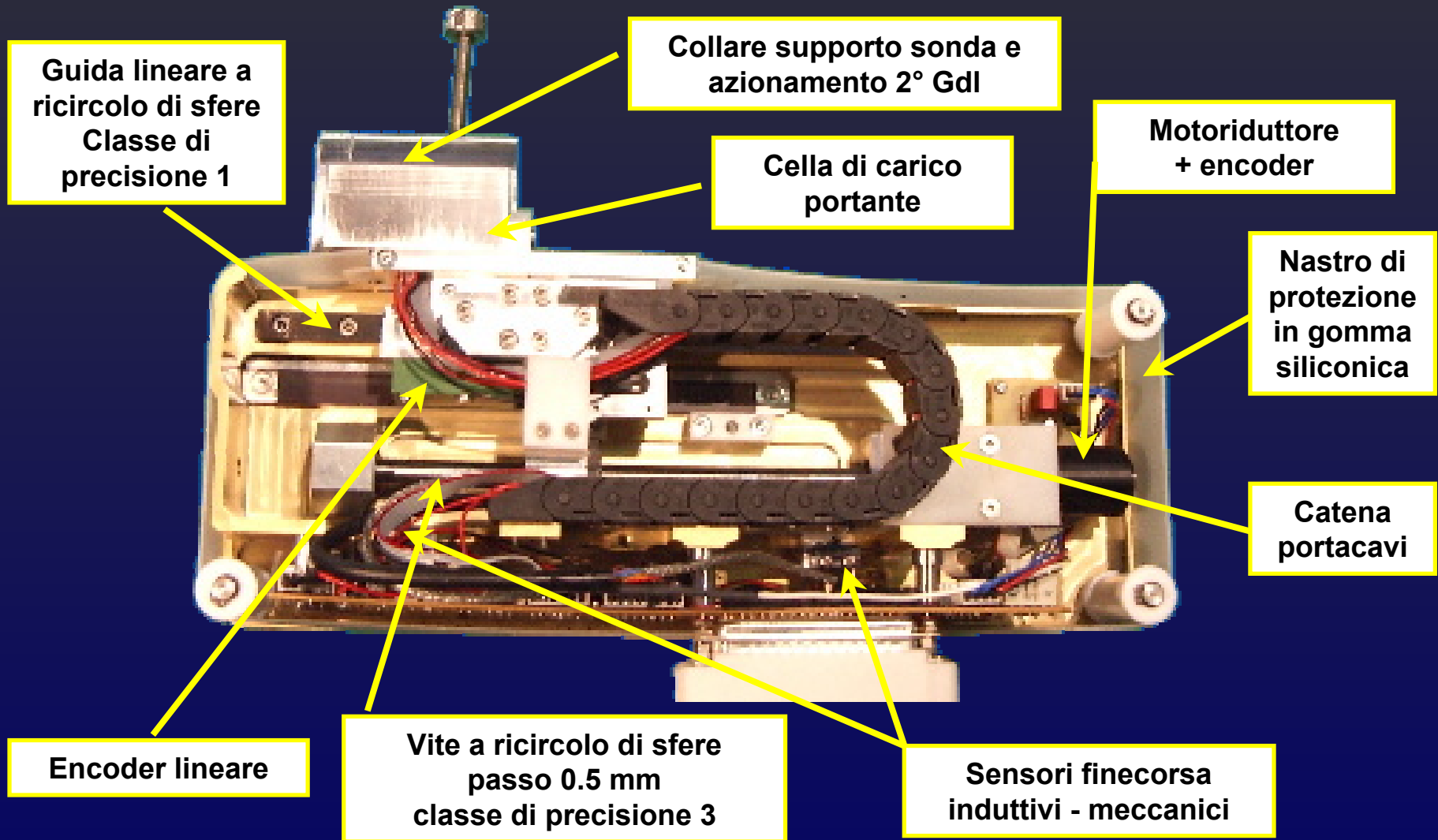
DC Brush Motor: **Faulhaber 2224U-018SR (21mNm – 8000 rpm)**  
**Faulhaber M1516-012SR (0.8mNm – 12000 rpm)**

Encoder : **Faulhaber IE2-512 (512 tacche giro)**  
**Faulhaber 05AB28 (16 tacche giro)**  
**Siko MSK200 5-E1-2.0-I-2-4 (una tacca ogni 0.002mm)**

Vite a ricircolo di sfere: **STEINMEYER 1112-0,5.8.145.170 T3P**  
**corsa massima 120 mm**  
**passo 0.5mm - classe di precisione 3**  
**Max speed: 1800 giri/min**

Guida a ricircolo di sfere: **MN 9 – 195 – 7.5 - 7.5 – G1 – V1**  
**Lunghezza 195 mm – Classe precisione 1**

# SISTEMA DI TRASLAZIONE 1° GRADO DI LIBERTÀ

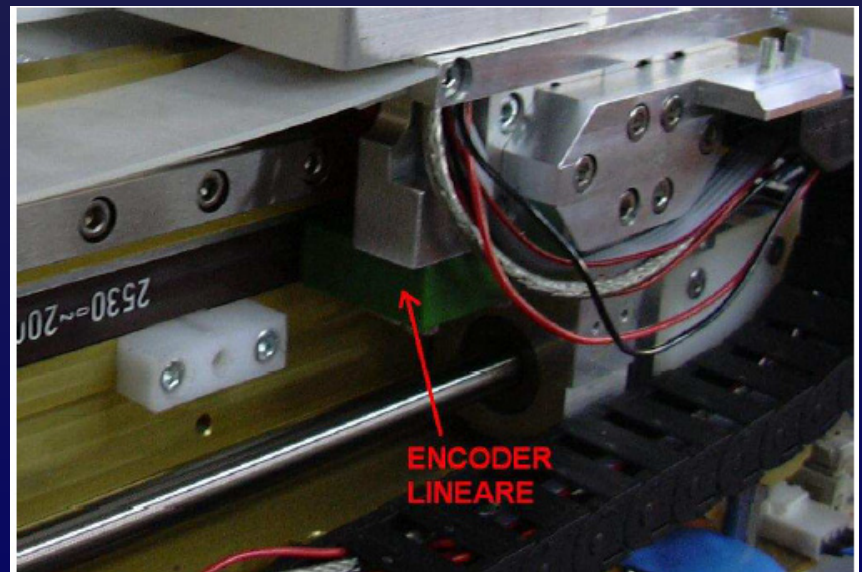
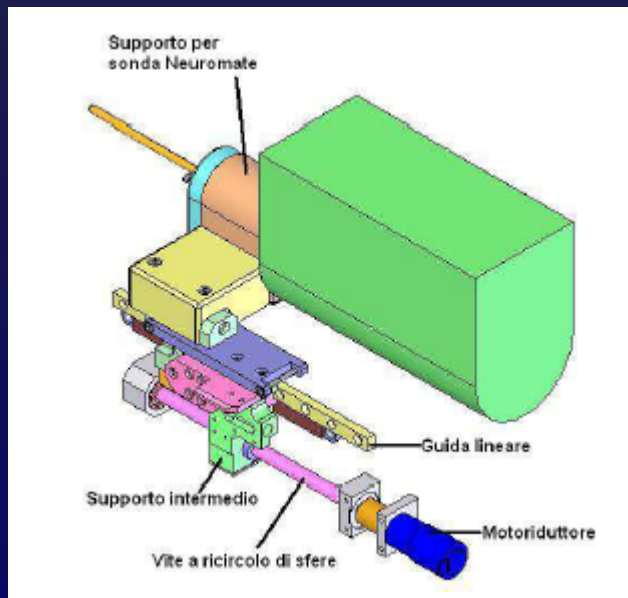


# SISTEMA DI TRASLAZIONE 1° GRADO DI LIBERTÀ

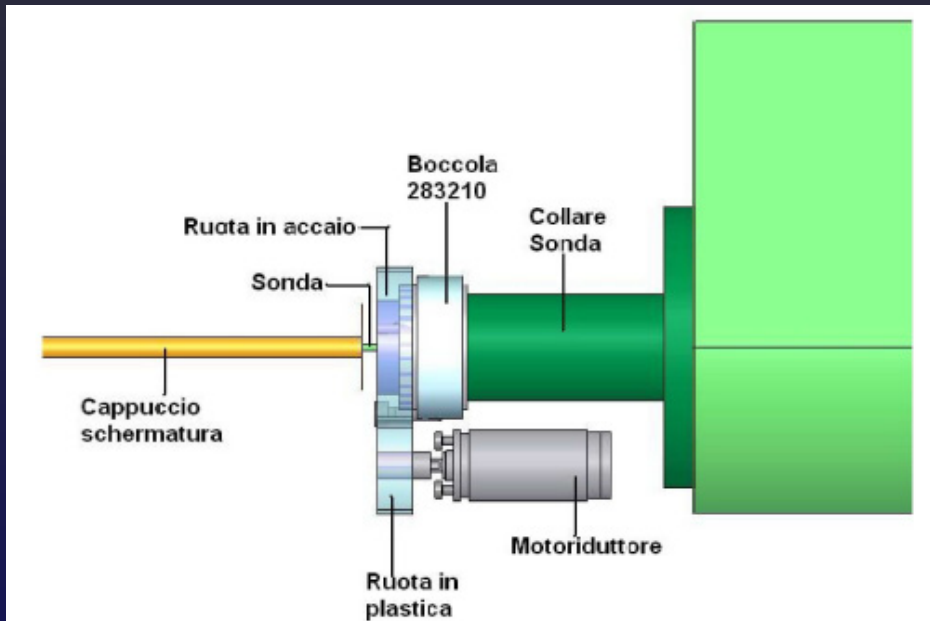
Per monitorare la posizione del primo grado di libertà sono stati utilizzati due encoder per avere un controllo ridondante della posizione.

- Encoder rotativo solidale all'albero motore (risoluzione  $6 \times 10^{-4}$  mm)
- Encoder lineare magnetico collegato al supporto della sonda (risoluzione  $2 \times 10^{-3}$  mm)

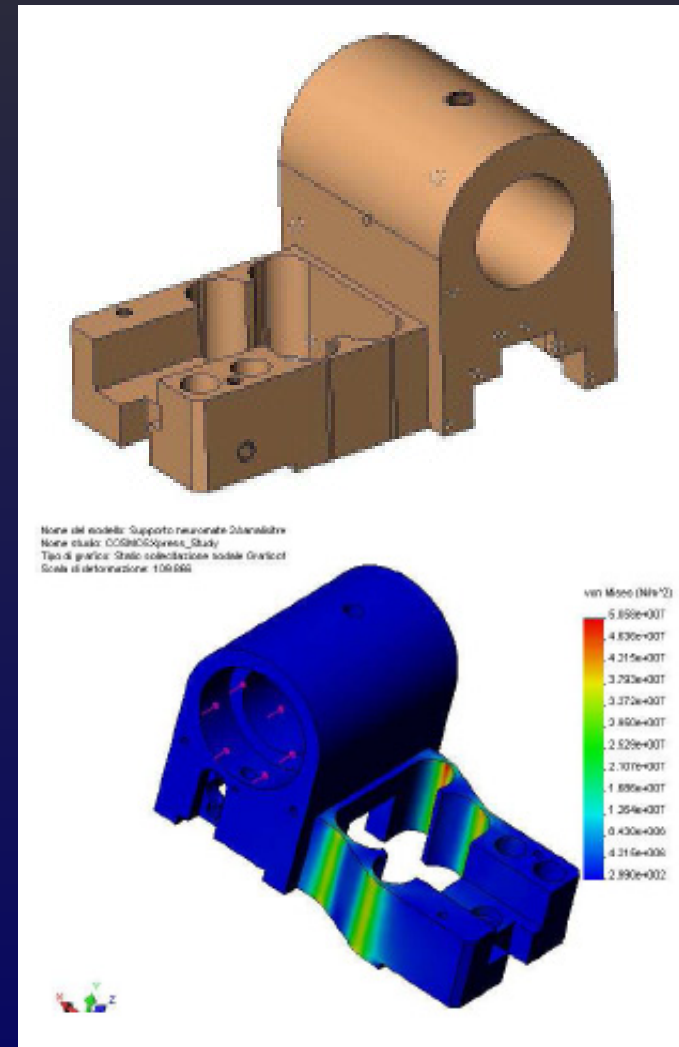
Una errore di misura tra le due posizioni superiore a 0.1 mm provoca l'immediata interruzione dell'operazione



# SISTEMA DI ROTAZIONE 2° GRADO DI LIBERTÀ



Sul collare sono installati il motore del 2 grado di libertà, la trasmissione a ruote dentate cilindriche, il sensore induttivo per l'azzeramento. Lo stesso pezzo svolge la funzione di cella di carico.



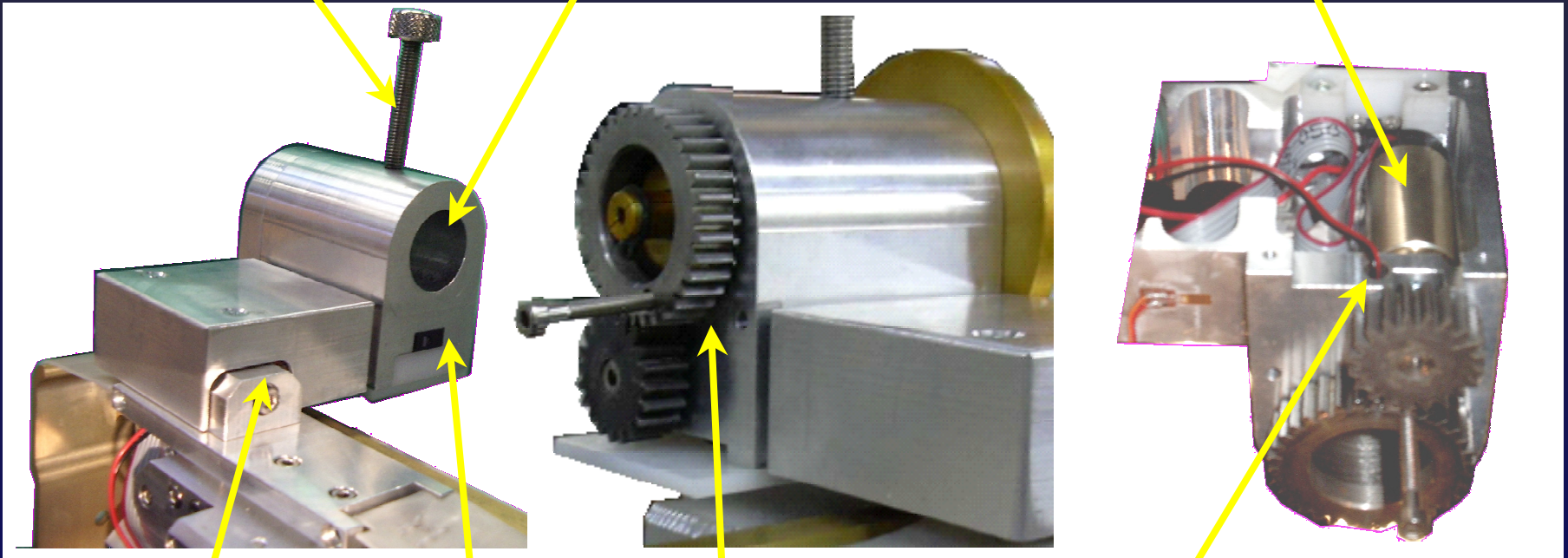


# SISTEMA DI ROTAZIONE 2° GRADO DI LIBERTÀ

Vite serraggio  
utensile

Collare supporto  
utensile

Motoriduttore



Schermo di  
protezione cella  
di carico

Switch  
inserimento  
utensile

Trasmissione  
finale a ruote  
dentate

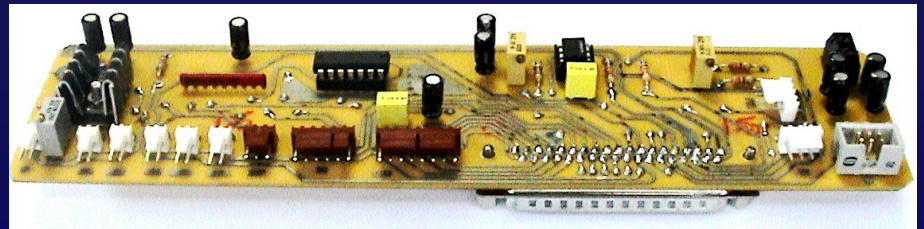
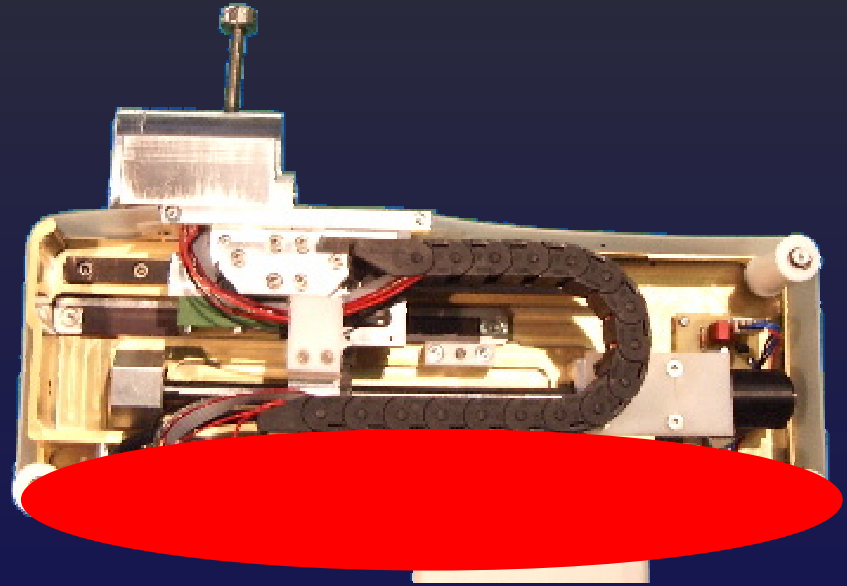
Sensore  
induttivo di zero  
del 2° Gdl

# SLAVE

## Elettronica di comando

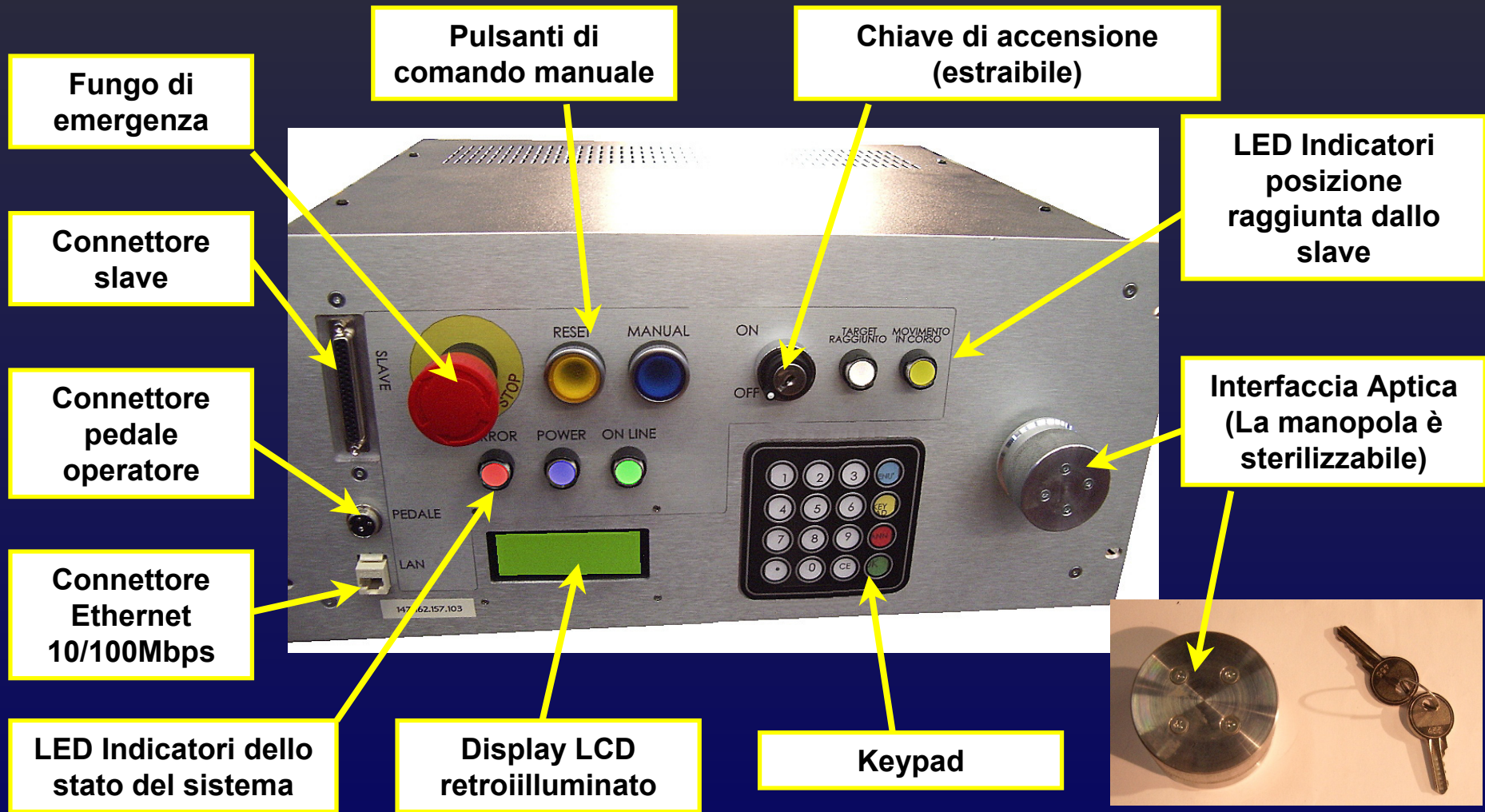
### Elettronica on-board

- ✓ Agevolare la sostituzione delle parti danneggiate
- ✓ Contenere i pesi dei cablaggi
- ✓ Amplificatore di precisione integrato (INA114): possibilità di variare guadagno, offset e tensione di alimentazione della cella di carico
- ✓ Sensore di temperatura

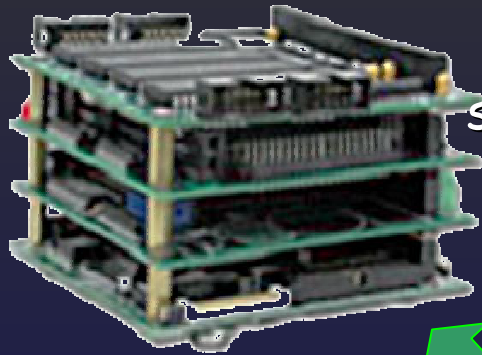


# CONSOLE DEL SISTEMA DAANS

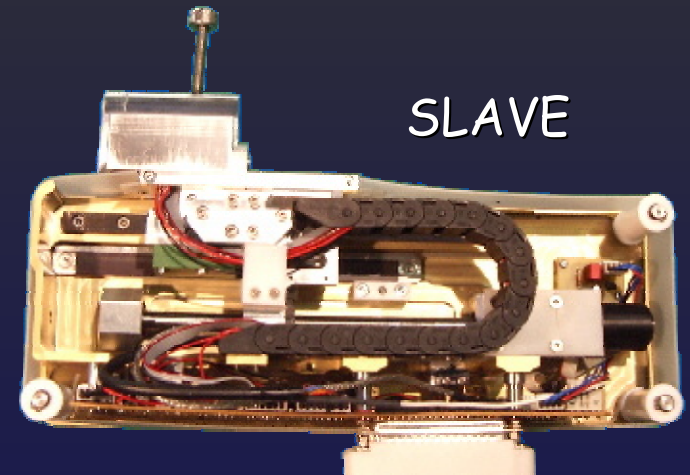
Racchiude l'interfaccia optica e i sistemi di controllo  
(PC, driver, alimentatore, elettronica di controllo)



# SCHEMA DI FUNZIONAMENTO

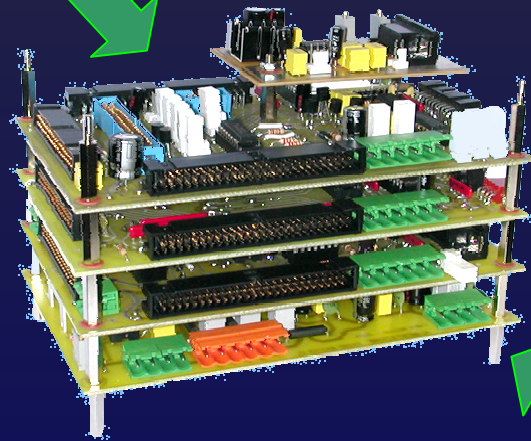


CPU PC104  
software di controllo



SLAVE

DAANS  
controller



MASTER e  
PANNELLO DI COMANDO



Il numero di componenti collegati al sistema è molto elevato. L'utilizzo di un circuito dedicato per l'interconnessione ha permesso di utilizzare dei componenti standard. Questo assicura tempi rapidi di intervento e di sostituzione di eventuali parti danneggiate.

# DAANS CONTROLLER

Per aumentare la sicurezza del dispositivo, è stato implementato un sistema a microcontrollore dedicato per monitorare le fasi di intervento e per individuare alcuni possibili guasti.

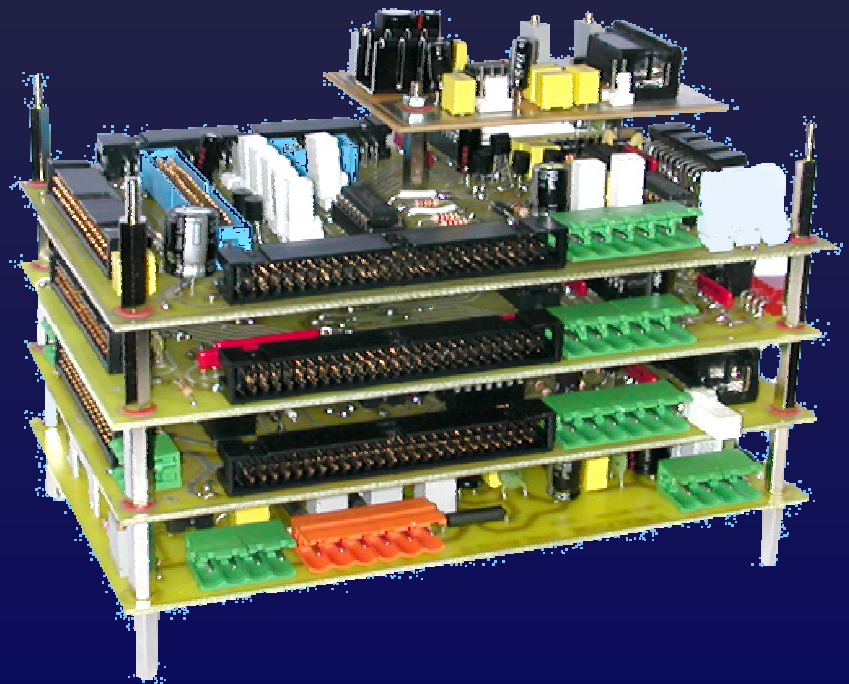
## MICROCONTROLLORI UTILIZZATI

Microchip PIC18F452 @ 40MHz

Microchip PIC18F252 @ 40MHz

Linguaggio di programmazione: ANSI C

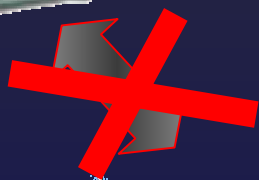
I microcontrollori utilizzati hanno EPROM di tipo flash e sono facilmente riprogrammabili: questo ha permesso di ottimizzare il firmware per assicurare elevate caratteristiche di affidabilità.



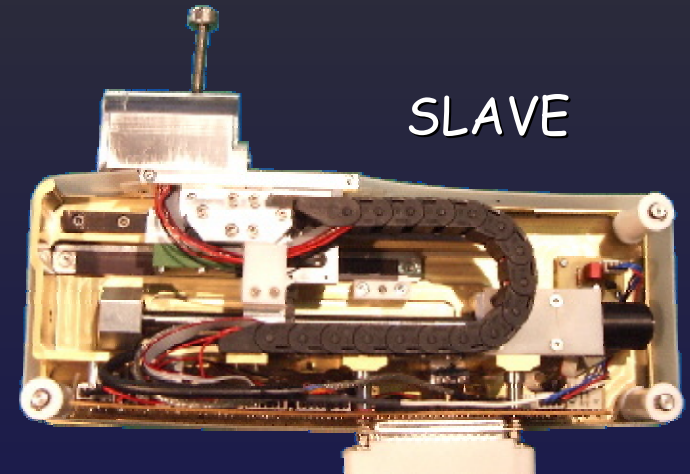
# SCHEMA DI INTERVENTO DAANS CONTROLLER



CPU PC104  
software di controllo



DAANS  
controller



SLAVE

MASTER e  
PANNELLO DI COMANDO



In caso di guasto della CPU principale il sistema è in grado di assicurare al medico la conclusione in sicurezza dell'intervento.

# DAANS CONTROLLER

## Microcontrollore principale PIC18F452

### PARAMETRI MONITORATI

- Fungo di stop e dei finecorsa meccanici
- Richiesta abilitazione dei motori;
- Velocità di traslazione della sonda;
- Tensione dei driver: deve essere nulla al momento della richiesta di abilitazione;
- Risposta ai segnali di watchdog;
- Stato della batteria tampone;
- Fault dei driver di controllo;

**Il microcontrollore gestisce l'abilitazione dei driver di controllo dei motori e le procedure per il ritorno controllato della sonda a seguito di un errore che ha causato il blocco del sistema.**

## Microcontrollore PIC18F252

Gestire gli algoritmi di controllo real time del sistema.

### Monitoraggio del segnale di watchdog

**La commutazione deve avvenire ogni 0.01 secondi.**

Tolleranze ammesse:

***Sulla singola lettura: +/- 0.005 secondi***

***Ogni 0.250 secondi: +/- 1 commutazione***

### Stato memoria condivisa

Il PIC genera un codice casuale a 4 bit ad una frequenza di 0.1Hz. Il PC104 deve rispondere con lo stesso codice dopo

***0.95 +/- 0.5 secondi***

# CONSOLE DEL SISTEMA DAANS

Ventilatori  
raffreddamento

Trasformatore /  
raddrizzatore

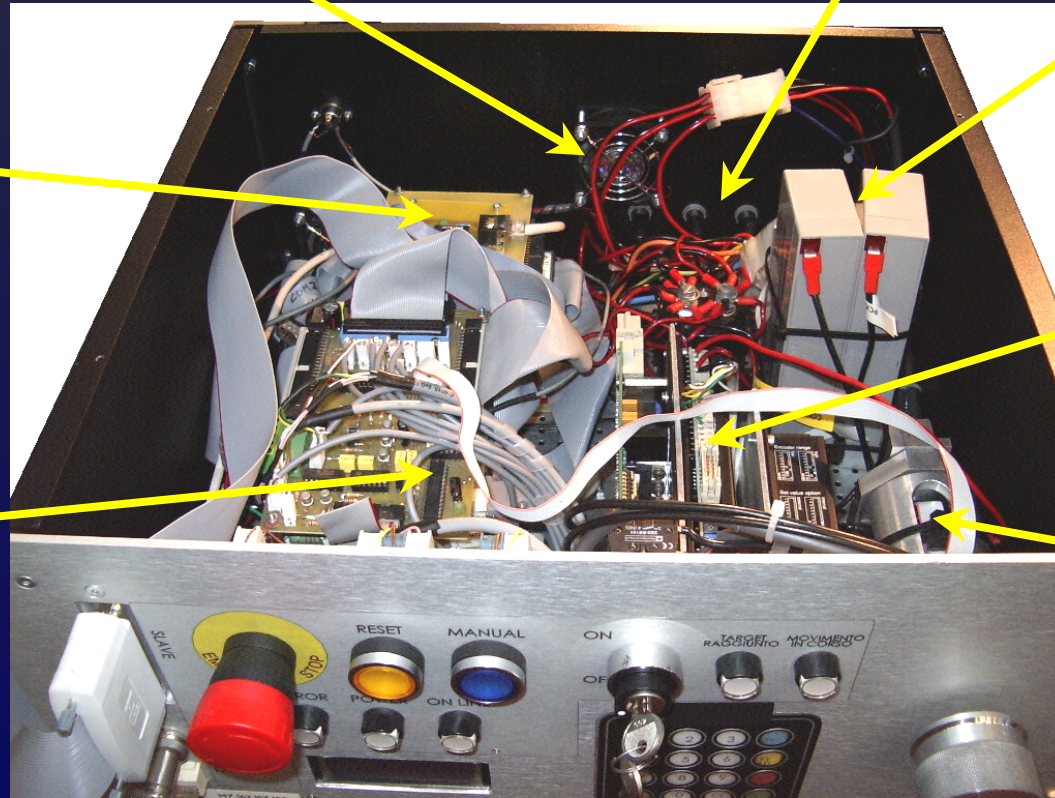
BATTERIE  
TAMPONE

CPU PC104 Plus  
Sensoray 526  
PCM3724  
Alimentatore/UPS

DRIVER MOTORI

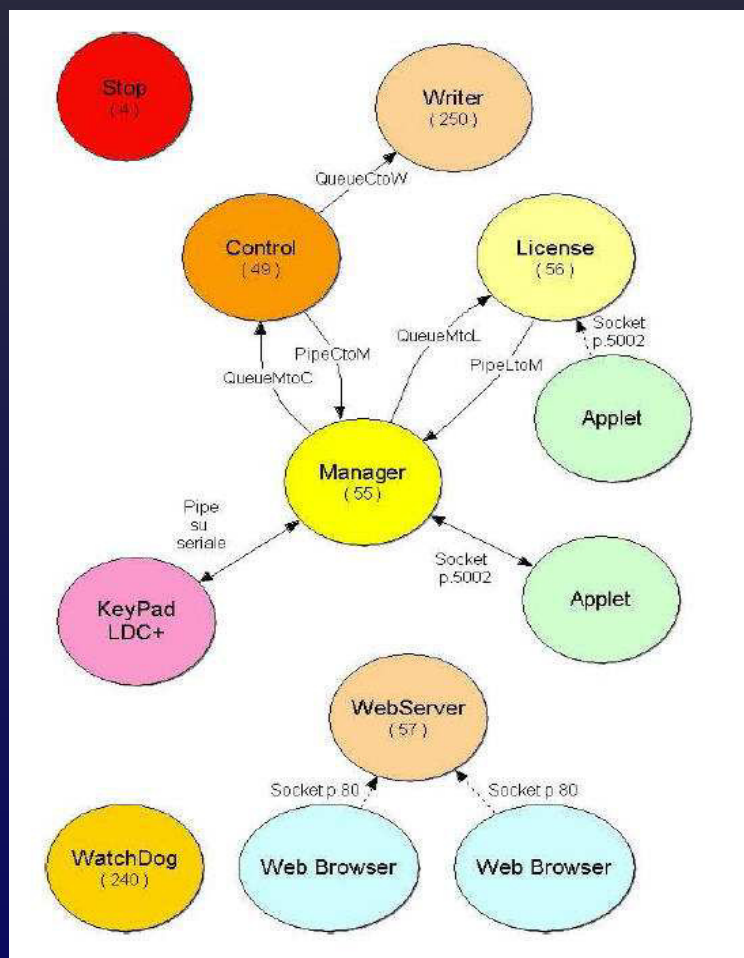
DAANS  
CONTROLLER  
Pic 18F452  
Pic 18F252

MOTORE MASTER





# STRUTTURA DEL SOFTWARE DI CONTROLLO



E' sviluppato in linguaggio C++ appoggiandosi al sistema operativo in tempo reale VxWorks della Wind River System.

Il framework di base è formato da un insieme di task che operano in parallelo. L'accesso alle risorse del sistema (CPU e memoria in primis) è regolato, per mezzo di semafori binari, da un algoritmo di preemptive priority scheduling che si basa su un valore di priorità assegnato a ciascun processo.

La comunicazione intertask è affidata a strutture dati ad alta efficienza quali pipe e code di messaggi.

Il software può interagire con applicazioni esterne (applet java) per mezzo di socket di rete.

Il processo di controllo lavora ad una frequenza di 2KHz

# PROCEDURA DI INTERVENTO

- CALIBRAZIONE INIZIALE DEL SISTEMA
- Scelta dell'utensile da utilizzare. Le scelte possibili allo stato attuale sono 3
  1. Sistema di puntamento laser (lo slave rimane bloccato nella posizione più arretrata)
  2. Ago per la biopsia: necessita del solo grado di libertà associato alla traslazione
  3. Sonda PRS: permette la movimentazione di entrambi i gradi di libertà

## solo per gli utensili Ago per la Biopsia e Sonda PRS

- Compensazione della componente gravitazionale sulla misura di forza
- Definizione dei target corrispondenti alle profondità da raggiungere Inizio della movimentazione (e dell'angolo di rotazione del secondo grado di libertà)
- Inizio dell'asservimento Master – Slave aptico: il comando avviene, per entrambi i gradi di libertà, con il joystick aptico.
- Fase di prelievo o di terapia (in cui il sistema rimane bloccato nella posizione)
- Definizione di un nuovo target, oppure ritorno nella posizione di home e cambio utensile

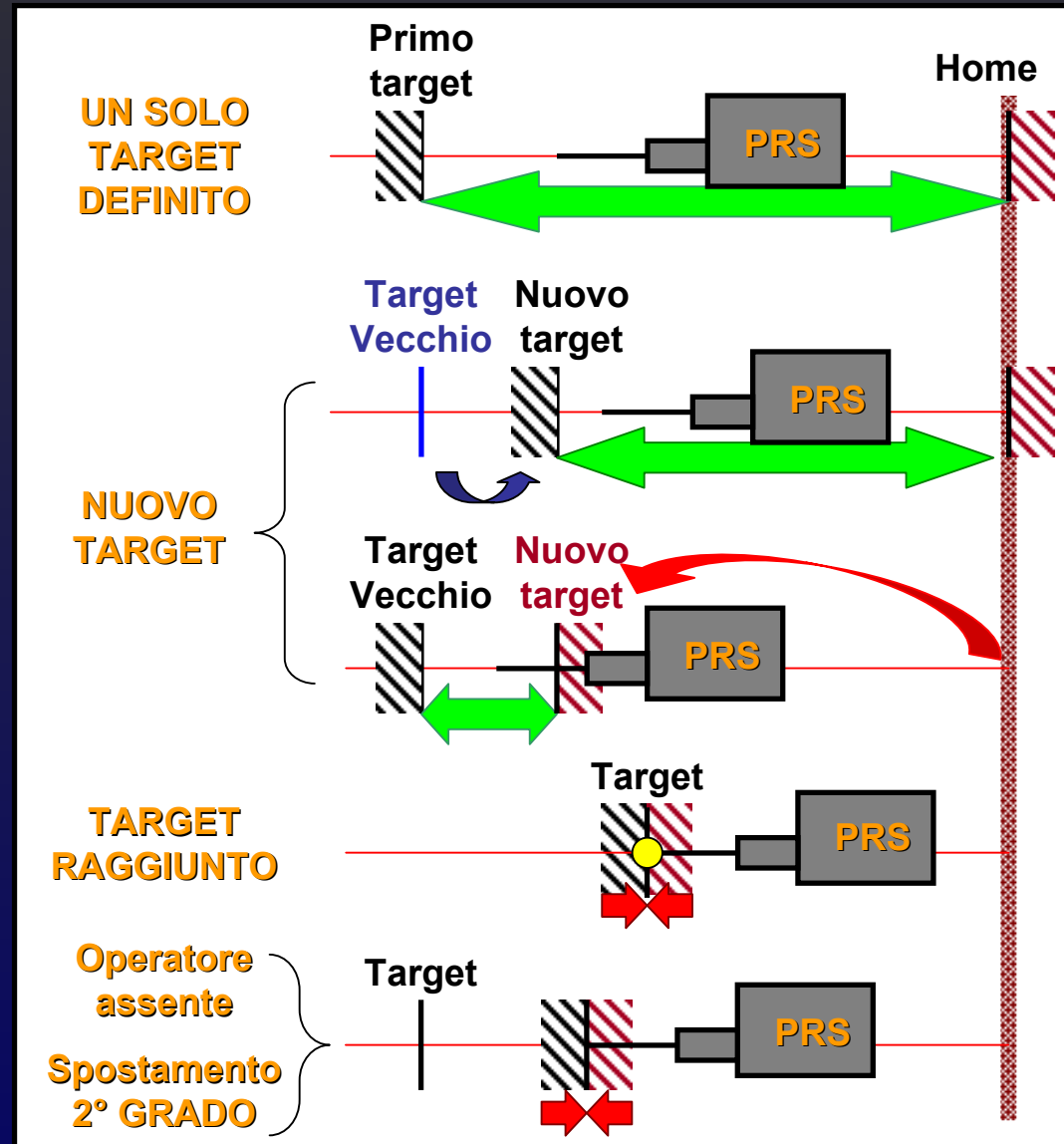
# MOVIMENTAZIONE DEL 1 GRADO

Il movimento della sonda è permesso solo entro due muri virtuali, che definiscono di volta in volta il range di spostamento possibile.

La posizione dei muri dipende dalle caratteristiche del target impostato.

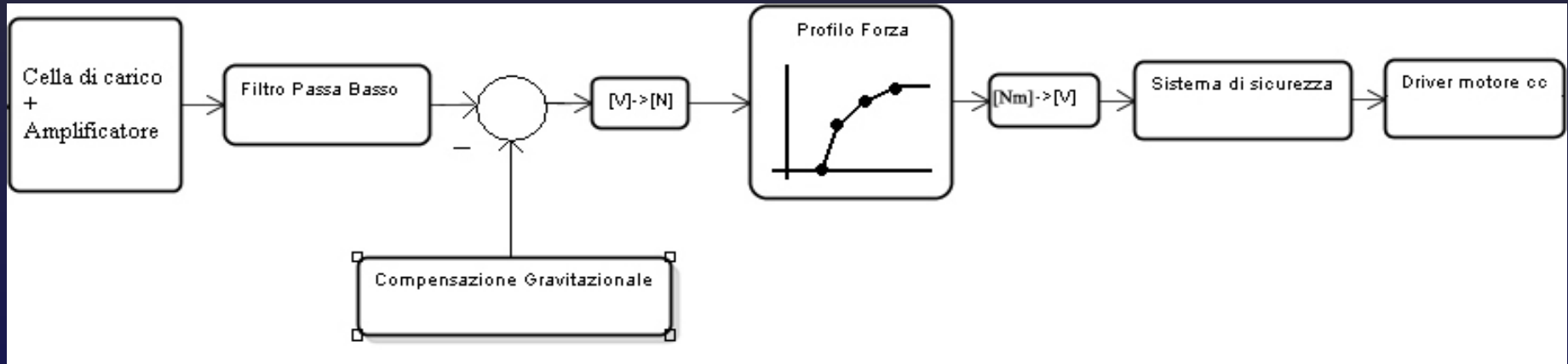
Al raggiungimento del target il muro diventa bilaterale: in questo modo la posizione del master e dello slave rimangono vincolati, e non c'è possibilità di spostamento.

Il muro virtuale bilaterale si attiva anche quando il pedale non è premuto o quando il medico sta movimentando il secondo grado di libertà.



# L'INTERFACCIA APTICA:

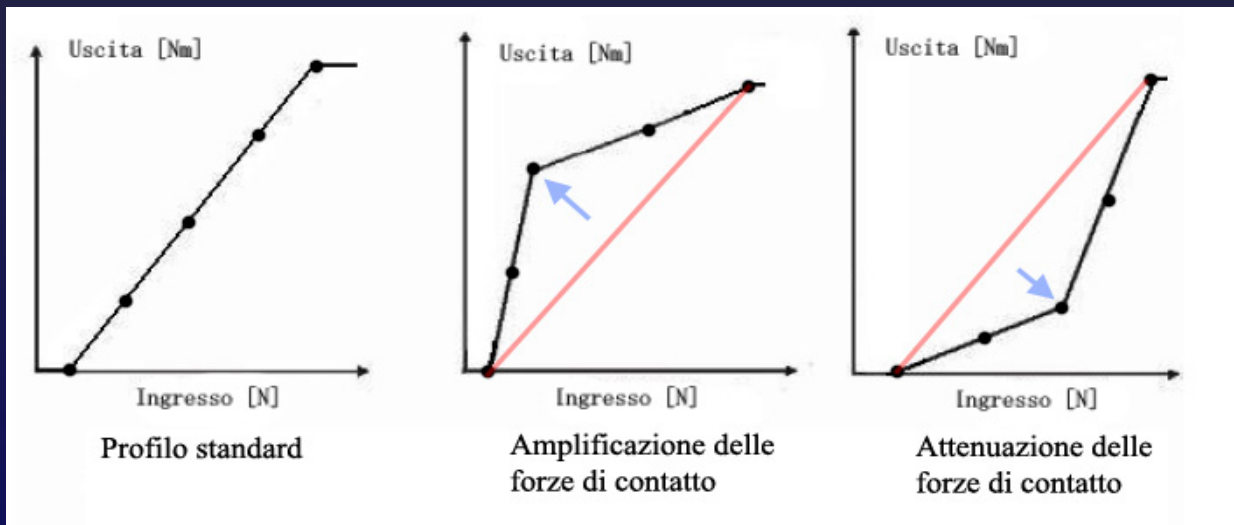
Obiettivo: consentire all'operatore di avere una chiara sensazione dell'ambiente circostante l'end effector del DAANS senza avere un riscontro visivo diretto.



- La forza sull'end effector viene rilevata da un cella di carico solidale al supporto utensile.
- La lettura della cella viene filtrata da un filtro passa basso per rimuovere i disturbi in alta frequenza.
- Mediante la compensazione gravitazionale viene rimosso l'offset causato dal peso della sonda.
- Ciascun campione viene pesato in funzione del profilo di forza scelto dall'operatore.
- Un sistema di sicurezza traduce la forza misurata in una coppia da imporre al master.

# PROFILI DI SENSIBILITA'

Grazie ai profili di sensibilità l'operatore può scegliere quale insieme di forze amplificare oppure attenuare. Il primo punto della curva definisce l'intervallo di forze che non viene tradotto in una coppia sul master (dead zone).



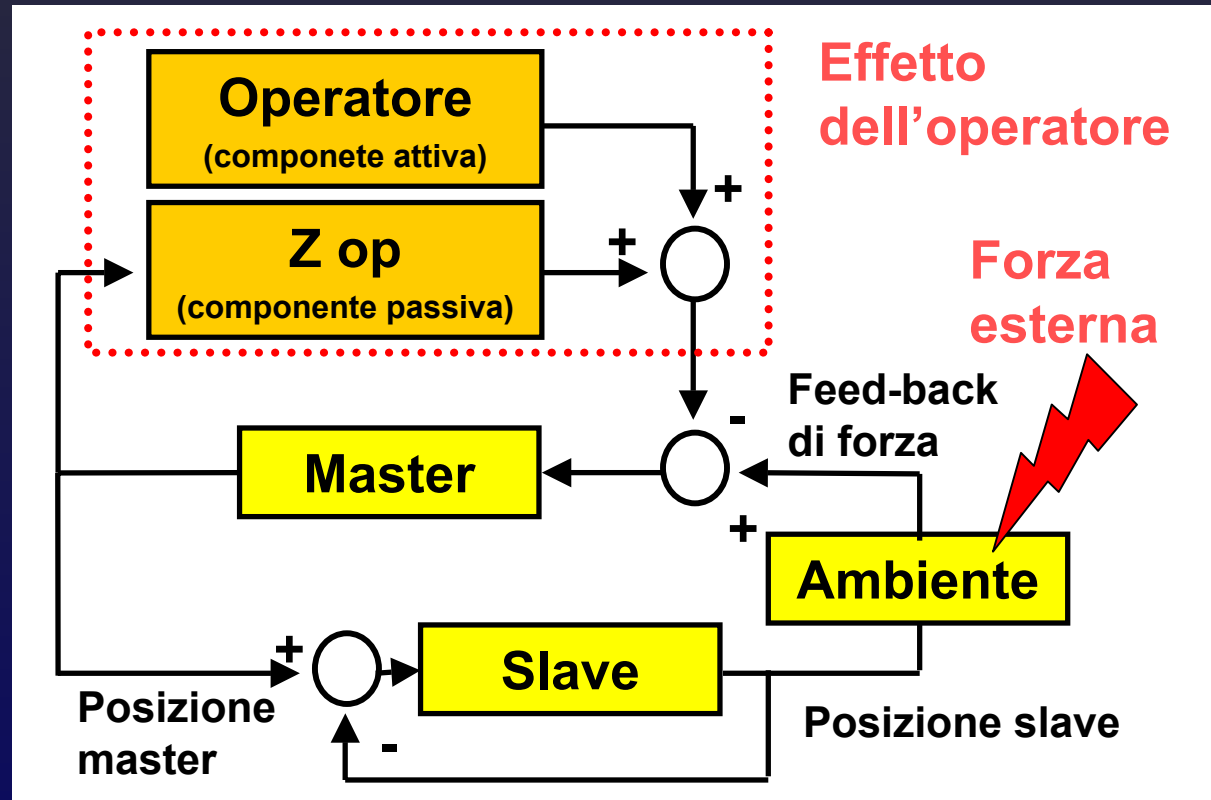
La curva del profilo è formata da una sequenza di spezzate che collegano fino a **6 punti** scelti dall'operatore. La lista dei punti è contenuta in un file di impostazioni e può essere modificata su richiesta del medico via software.

Il sistema eroga al master una coppia massima pari a circa 140 mNm

# SISTEMI DI SICUREZZA

Lo schema evidenzia che, all'insorgere di una forza esterna, se l'operatore non sta afferrando il master c'è la possibilità che il sistema derivi dalla posizione corrente. Per evitare questo fenomeno sono stati introdotti quattro livelli di protezione.

- LED che evidenzia quando lo slave è in movimento;
- Pedale operatore: interrompe la movimentazione se non viene premuto;
- Sistema di aggancio al target: viene impedita ogni movimentazione fino alla definizione di un nuovo target;
- Algoritmo di monitoraggio velocità e coppia del master per stimare la coppia scambiata con l'operatore



La deriva della sonda nelle peggiori condizioni è pari a 0.13 mm

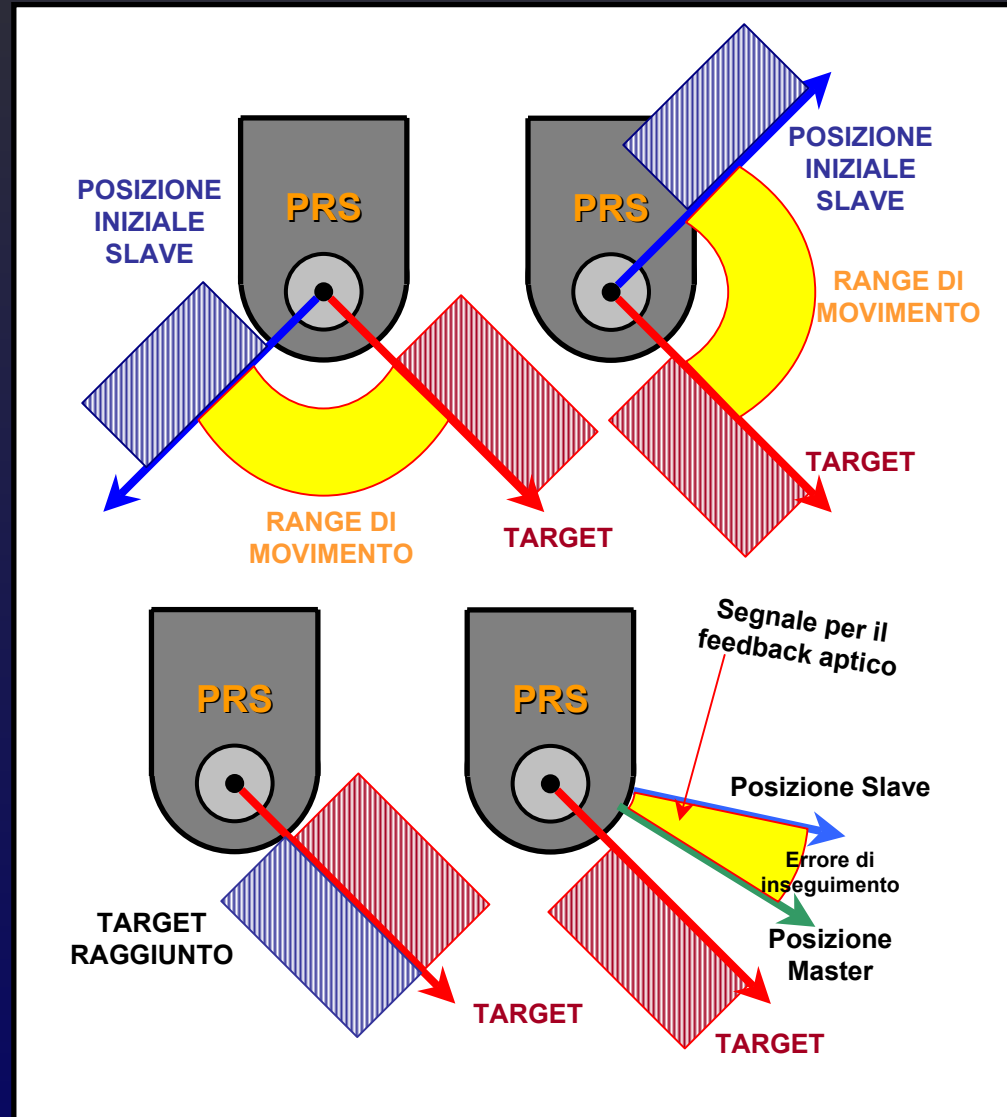
# MOVIMENTAZIONE DEL 2 GRADO

Il suo utilizzo è limitato alle sole terapie conformazionali.

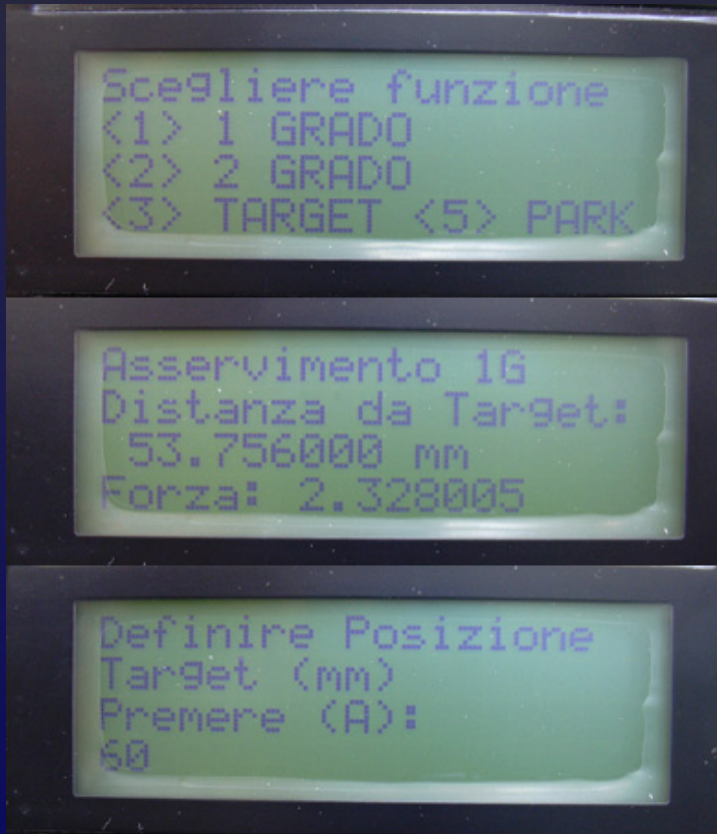
I muri virtuali che definiscono il range di spostamento possibile sono 2: uno corrisponde al target impostato dal medico, l'altro alla posizione dello slave all'inizio della movimentazione.

Al raggiungimento del target il muro diventa bilaterale: in questo modo la posizione del master e dello slave rimangono vincolati, e non c'è possibilità di spostamento.

L'errore di inseguimento, opportunamente filtrato e smorzato, costituisce il feedback per l'operatore.



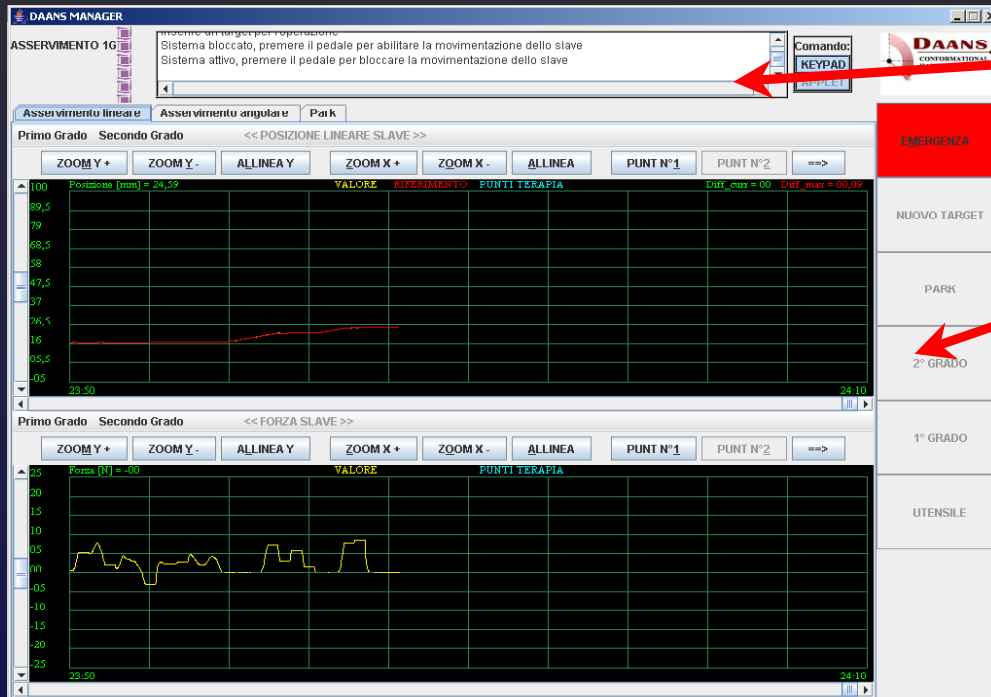
# INTERFACCIA DI COMANDO



- Utilizza dei menu contestuali per gestire la struttura a stati del sistema
- Visualizza informazioni sulla distanza dai target e sulle forze misurate dalla cella di carico durante la fase di asservimento
- Consente l'inserimento dei target e la selezione dell'utensile attraverso il tastierino numerico



# INTERFACCIA JAVA



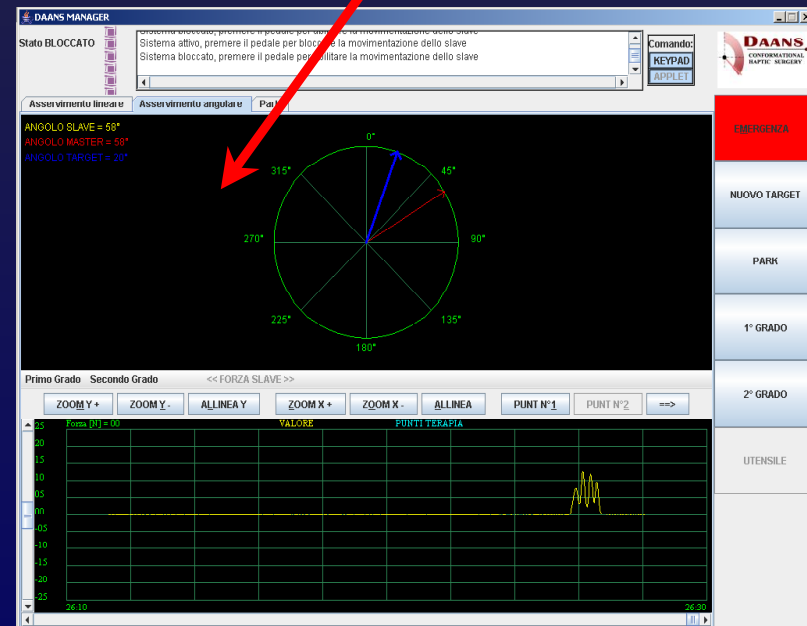
Console testuale

Pulsanti di comando

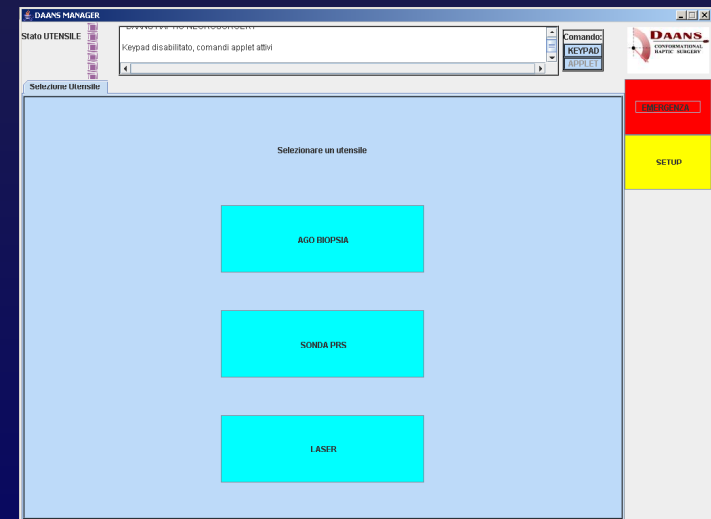
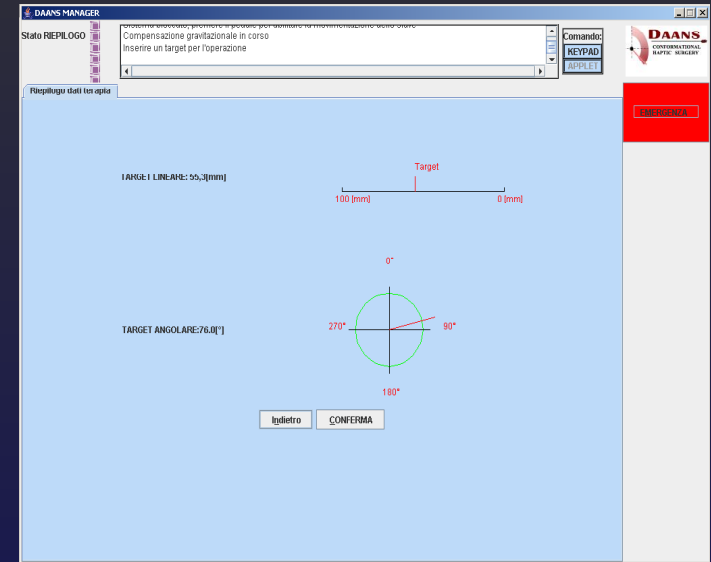
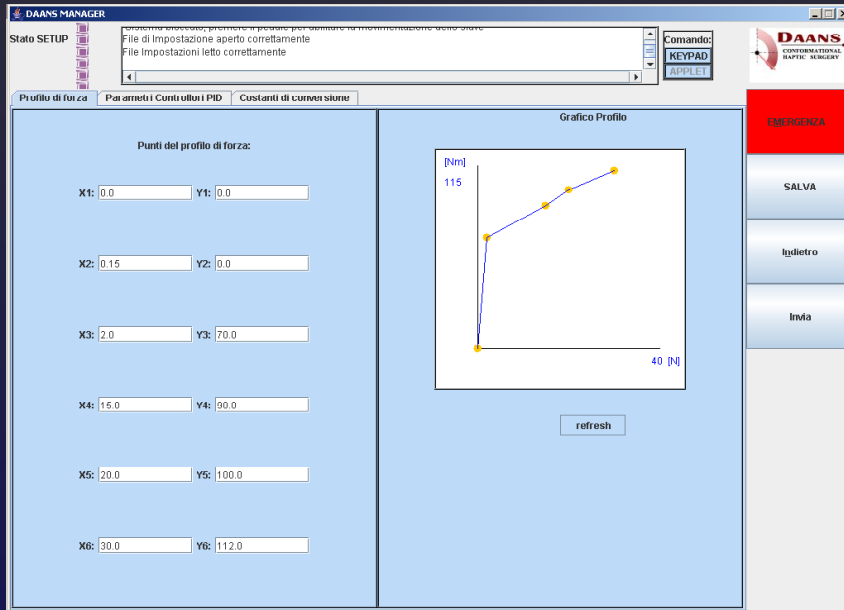
Grafici storici

- Diminuisce i tempi di calcolo
- Aumenta la sicurezza del sistema
- Consente di usare sistemi operativi diversi

Banda passante: 1.5 KByte/s



# INTERFACCIA JAVA



Collegamento in modalità ADMINISTRATOR

- Possibilità di utilizzare un'interfaccia grafica invece del tastierino numerico
- Possibilità di modificare i parametri di sensibilità

Fino a 4 Guest (solo monitoraggio)

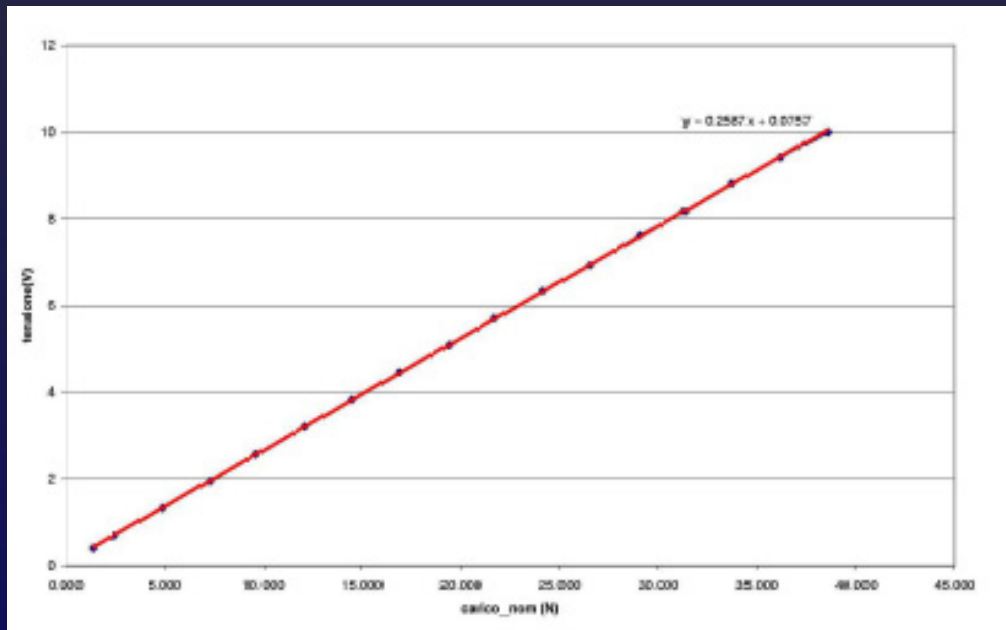
# VERIFICHE E TEST SPERIMENTALI

## Regolazione e taratura della cella di carico

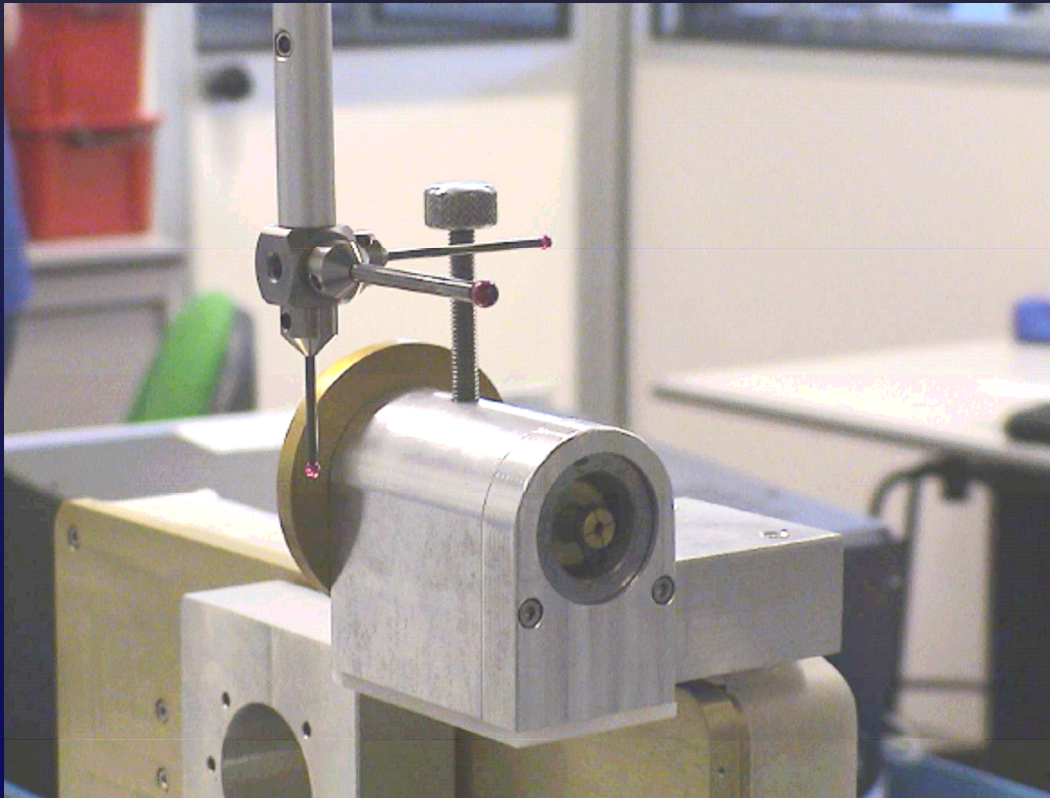
L'operazione è stata condotta in 2 fasi

- in una prima fase è stata regolata la sensibilità del sistema di misura. La regolazione è stata fatta in modo che il segnale amplificato raggiungesse la saturazione di  $\pm 10V$  in corrispondenza della forza massima per cui la cella di carico è stata progettata.

- Nella seconda fase è stata rilevata la caratteristica di carico della cella; questo valore è stato registrato nel software di controllo.



# VERIFICHE E TEST SPERIMENTALI



## Macchina di Misura a Coordinate

### ZEISS Prismo VAST 7

Le prove hanno permesso di:

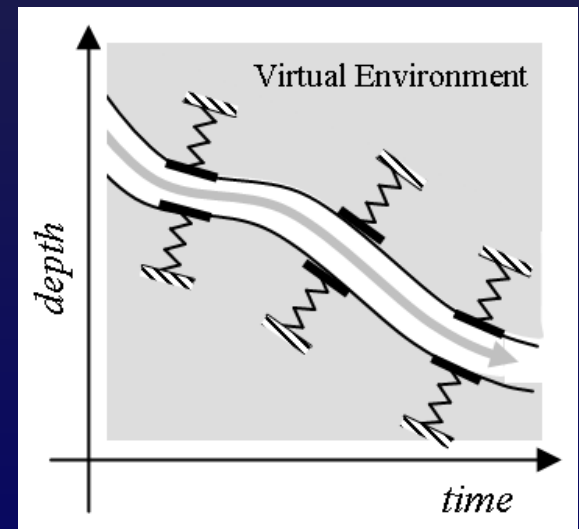
- Calibrare la corsa del sistema;
- Caratterizzare l'accuratezza della calibrazione (0.001 mm);
- Caratterizzare l'accuratezza nello spostamento lineare (0.035 mm);
- Caratterizzare le caratteristiche geometriche del sistema e la matrice di trasformazione.

# PATH PLANNING

Il sistema DAANS allo stato attuale può gestire fino a 4 differenti tipologie di intervento di radioterapia:

- single isocenter dose delivery
- multiple isocenter dose delivery
- single conformational dose delivery
- multiple conformational dose delivery

Possibilità di effettuare anche terapie di tipo **continuous path dose delivery**.



# FINE

