

Università degli Studi di Catania



Corso di Laurea in Ingegneria dell'Automazione e Controllo dei Sistemi
Complessi

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e dei Sistemi

Carlotta Scirè Scappuzzo

Tesi di Laurea Specialistica

Studio di un sistema robotizzato per il monitoraggio di depositi di scorie radioattive

Relatori:

Chiar.mo Prof. Ing.G.Muscato

Dott.Paolo Finocchiaro

Alla mia famiglia

Sommario

Abstract	6
Prefazione	9
Organizzazione della tesi.....	10
Capitolo 1	11
I rifiuti radioattivi	11
1.1 Classificazione rifiuti radioattivi	12
1.2 La gestione dei rifiuti radioattivi	13
1.2.1 Obiettivi generali.....	15
1.2.2 Generazione dei rifiuti.....	15
1.2.3 Trattamento	15
1.2.4 Il condizionamento.....	16
1.2.5 Stoccaggio temporaneo	16
1.2.6 Lo smaltimento definitivo	19
1.2.7 Materiali per lavorare in ambienti radioattivi.....	20
1.3 Strategia sul nucleare.....	21
1.4 Situazione in Italia	22
1.4.1 Ansaldo Nucleare S.p.A.	25
1.4.2 SOGIN	25
1.5 Situazione dopo Fukushima	25
1.6 Unità di misura	26
Capitolo 2	27
Monitoraggio.....	27
2.1 DMNR	27
2.1.1 Sensori per monitoraggio.....	28
2.1.2 Il sistema SiPM e fibra ottica	29
2.1.3 Elettronica di front-end.....	32
2.1.4 Raccolta dati	33
2.2 Test.....	35
Capitolo 3	38
Perché un sistema robotizzato?	38
3.1 Stato dell'arte.....	39

3.1.1 SWAMI.....	44
3.1.2 ARIES	47
3.1.3 IMSS.....	48
3.1.4 ABCD.....	49
3.1.5 RTIEE.....	50
3.1.6 ROBICEN III	51
3.1.7 WALL-CLIMBING MICROROBOTS	52
Capitolo 4	53
Progettazione del sistema.....	53
4.1 Utilità del sistema.....	53
4.2 LightWave-NewTek	54
4.3 Ambiente di lavoro.....	54
4.4 Requisiti per il sistema robotico di ispezione.....	55
4.5 Realizzazione di un pallet	58
4.5.1 Dimensionamento.....	60
4.6 Prima soluzione	62
4.7 Seconda soluzione.....	66
4.8 Terza soluzione (attuale).....	68
4.9 Sistema di aggancio.....	69
4.10 Sistema di attuazione	70
4.11 Set di sensori	72
4.12 Tecniche di navigazione	73
Capitolo 5	75
Studio della struttura meccanica del braccio.....	75
5.1 In-Bo	75
5.1.1 Spazio di lavoro	76
5.1.2 Sistemi di riferimento.....	77
5.2 Cinematica diretta.....	81
5.3 Cinematica inversa	82
5.4 Pianificazione delle traiettorie	84
5.5 Dinamica.....	85
5.6 Studio analitico della movimentazione	87
5.6.1 Dimensionamento del motore	91

5.7 Momenti d'inerzia	94
5.8 Configurazioni principali del braccio	98
Capitolo 6	99
Realizzazione del prototipo	99
6.1 Apparato Sperimentale	99
6.2 Sistema di Controllo	109
6.2.1 Motori DC	110
6.2.2 Servo.....	111
[24]	113
6.3 Interfaccia grafica per il controllo	113
Capitolo 7	118
In futuro.....	118
7.1 Applicazioni generali	118
7.2 Altri scenari	119
7.3 Movimentazione	120
Conclusioni	121
Ringraziamenti	122
Bibliografia	123

Abstract

Radioactive waste produced worldwide needs to be packed in special drums and monitored, therefore a lot of care should be taken in implementation of future effective monitoring systems.

The DMNR (Detector Mesh for Nuclear Repositories) project deals with a system for on-line monitoring of waste repositories of short-medium term, in order to allow the prevent of possible contamination of the environment and to preserve people's health.

The goal is to develop an integrated solution for an efficient real-time monitoring system, in order to achieve the alarm and leak detection, to make a 3D radioactivity map, to have low cost for detectors and data transmission, to facilitate the waste management through modular interconnectivity.

The system is made of a mesh of detectors, namely scintillating fibers, a read at both ends by means of SiPM (Silicon PhotoMultipliers).

The scintillating fibers are plastic, thanks to their advantage in term of flexibility, one can arrange them and change their geometry in a very simply way. The SiPM consists of an array of identical photodiode cells, operating in avalanche regime.

When a fiber intercepts radiation coming off the drum wall, the energy released is converted into scintillation light, that propagates to both the SiPMs installed at the ends of the fiber itself. Each photosensor detects the scintillation light and converts it into a signal that is handled by an amplifier, whose output goes into a discriminator. The output signals of two discriminators are combined by a coincidence unit. An FPGA implements a counter and a high level graphical interface, allowing system overview and interaction with the operator.

A test was performed using two horizontal sensor units arranged in a circular loop shape and three vertical sensor unit around a prototype mini-drum. The results are

very encouraging, the system showed quite sensitive to variations in the radioactivity distribution.

The inspection and maintenance of storage tanks in nuclear power plants has also an immediate need of automation for better working conditions and higher living quality.

The main subcomponents of a robotic system are : base vehicle, inspection sensor packages, off-board operator controls, on board computer, data analysis and presentation, wireless Ethernet communications (the transceivers do not require special frequencies)

In general Robots consist of a mobile self-navigating base vehicle, outfitted with sensor packages to automatically identify rust and other corrosion cues. The robots are as good as, or better than, human inspectors in certain aspect of inspection.

The vehicle needs to have some basic function and attribute, such as position sensor packages near each drum for inspection, additional battery for the sensors, reduced size to navigate in aisles and access all drums, and tolerance of temperature extremes.

The navigation techniques are based on: internal map of the environment, originating from CAD Files; dead reckoning; active or passive landmarks; local features to constantly improve the robot's estimate of its position on that map; set of tactile sensors and no-contact laser or ultrasound ranging systems for the obstacle identification; autocharging systems to allow the robot to return to the base station.

The inspection package includes: color cameras, strobe light illumination, barcode readers, drum center sensors, additional actuators to give the proper standoff for data capture, fine positioning system, on-board computers to control the equipment and provide an interface to the base vehicle and the host workstation.

The robot graphic based controls are: facility set-up, task inception, monitoring and control, results presentation and archiving of inspection records, interfaces to site-wide material databases, features to reduce the occurrence of false positive

Some robot prototypes have been developed, which allow to reduce the worker's exposure to radiation. The most known are SWAMI (dev by The University of South Carolina (USC) and the Westinghouse Savannah River Company (WSRC)-1993), ARIES (dev by the South Carolina Universities Research and Education Foundation) and IMSS (dev by Lockheed Martin-1999) systems.

In this thesis a prototype robotic arm was studied with a color camera and a radiation sensor. It has not a base vehicle, instead it is moved around by a crane and attach itself to the iron cage that supports the waste drums. After the coupling, the end-effector of the robotic arm moved to explore the drum surface, in order to detect leak or damage.

Prefazione

Negli ultimi anni gli studi sul settore impiantistico si sono dedicati allo sviluppo di sistemi finalizzati a fornire servizi di monitoraggio e manutenzione di siti ad alto rischio, in una cornice mondiale dove è sempre maggiore la consapevolezza della necessità di interventi per rendere i siti nucleari sicuri e tenere sotto controllo i depositi di scorie esistenti in custodia passiva.

Da qui nasce l'esigenza di studiare una strategia che soddisfi le esigenze di smantellamento, ispezione e mantenimento di impianti in modo remotizzato e automatizzato in modo da limitare l'intervento umano, i rischi per la sicurezza e rendere più semplice l'esplorazione di aree di non facile accesso.

In quest'ottica la robotica si pone l'obiettivo di creare soluzioni e strumenti che possano rispondere alle esigenze specifiche della problematica di ispezione e aiutino nello svolgimento delle funzioni richieste, permettendo di migliorare lo stato di ispezione nei depositi grazie ad una maggiore operatività nell'ambiente.

In questo contesto, nasce il progetto DMNR proposto dall'INFN-LNS e a cui partecipa anche Ansaldo Nucleare. Il progetto ha come scopo, appunto, lo studio e la realizzazione di un sistema completo per il monitoraggio real-time e da remoto che integri sensoristica, automazione e sistemi di comunicazione.

Un aspetto importante di questo progetto è la cooperazione tra diverse aree di sviluppo: il gruppo DMNR è formato da persone con competenze in ambiti diversi, per poter realizzare un sistema completo in ogni aspetto (aspetto informatico, fisico, elettronico, robotico).

Organizzazione della tesi

La tesi è organizzata in questo modo: il capitolo 1 è un'introduzione alla problematica dei rifiuti radioattivi, la loro classificazione, la modalità con cui essi vengono gestiti: trattamento, condizionamento, stoccaggio e smaltimento. Una breve occhiata alla situazione in Italia e alcune definizioni.

Nel capitolo 2 è presentato il progetto DMNR, nelle sue componenti ed elettronica. Sono riportati i risultati sperimentali ottenuti da un test effettuato presso gli INFN-LNS.

Nel capitolo 3 è illustrata una panoramica sullo stato dell'arte nella robotica per ispezione, dando una breve descrizione dei principali progetti presenti nello scenario internazionale.

Nel capitolo 4 si discute dei requisiti che deve avere un sistema di ispezione automatizzato e si introduce il sistema sviluppato, facendo prima un excursus delle soluzioni precedentemente vagliate.

Nel capitolo 5 si affronta lo studio del braccio robotico dal punto di vista cinematico e dinamico, lo studio analitico della movimentazione e del dimensionamento di un motore. Sono effettuati dei calcoli considerando le specifiche delle parti e componenti del braccio robotico.

Nel capitolo 6 è approfondito lo studio meccanico del braccio e della realizzazione di un prototipo dal punto di vista delle componenti meccaniche ed elettroniche. E' introdotta l'interfaccia software sviluppata appositamente per il controllo del braccio robotico ed è data una descrizione dell'architettura e delle funzionalità.

Nel capitolo 7 una breve discussione sulle possibili evoluzioni future del progetto e del sistema di controllo.

Capitolo 1

I rifiuti radioattivi

Definizione internazionale: il rifiuto radioattivo è un qualsiasi materiale che contiene o è contaminato da radionuclidi a concentrazioni o livelli di radioattività superiori alle "quantità esenti" stabilite dalle Autorità Competenti, e per i quali non è previsto alcun uso.

Definizione fornita dall'Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica (**IAEA** International Atomic Energy Agency): il rifiuto radioattivo è un materiale radioattivo in forma solida, liquida o gassosa per il quale non è previsto alcun ulteriore uso e che è tenuto sotto controllo come rifiuto radioattivo dall'Organismo Nazionale a ciò preposto secondo le norme e le leggi nazionali.

Definizione secondo la legge italiana: il rifiuto radioattivo è qualsiasi materia radioattiva, ancorché contenuta in apparecchiature o dispositivi in genere, di cui non è previsto il riciclo o la riutilizzazione, di cui al D.Lgs. 17 marzo 1995, n. 230, e al D.Lgs. 26 maggio 2000, n. 241.

Definizione wikipedia: in genere la scoria radioattiva è lo scarto di combustibile nucleare esausto derivante dalla fissione nucleare; esso è considerato scoria nucleare di III categoria, cioè scorie di alta radiotossicità e di grande persistenza nell'ambiente. Si classificano scorie di I e II categoria invece prodotti contaminati o rifiuti radiologici da ambito nucleare, industriale e radioterapico.

1.1 Classificazione rifiuti radioattivi

I rifiuti radioattivi possono essere classificati in base a diversi parametri come ad esempio il contenuto in radionuclidi, l'origine, il tipo di radiazione emessa, il tempo di dimezzamento dei radionuclidi presenti, la radiotossicità dei radionuclidi presenti, la modalità di gestione, la destinazione finale (tipo di smaltimento definitivo).

In base al tempo necessario affinché la radioattività scenda a livelli non nocivi le scorie si suddividono in tre categorie. Quelle di prima e di seconda categoria sono rifiuti a bassa e media radioattività, e comprendono indumenti, carta, stracci, guanti, sovrascarpe, filtri, parti strutturali contaminati, scarti di lavorazione, rottami metallici, liquidi, fanghi, resine esaurite etc.

Le prime hanno una carica radioattiva che si esaurisce in poche decine di anni, mentre quella delle seconde decade in tempi dell'ordine delle centinaia di anni a livelli di alcune centinaia di Bq/g, e contengono radionuclidi a lunghissima vita media a livelli di attività inferiori a 3700 Bq/g, la carica radioattiva può durare fino a tre secoli.

Le scorie di terza categoria sono ad alta radioattività, decadono in tempi dell'ordine delle migliaia di anni a livelli di radioattività di alcune centinaia di Bq/g (vedi par.1.4), e contengono radionuclidi a lunghissima vita media a livelli di attività superiori a 3700 Bq/g; derivano dall'impiego come combustibile nelle centrali nucleari di isotopi radioattivi, dal loro riprocessamento (procedimento con cui uranio e plutonio vengono separati dalle scorie per essere utilizzati nel reattore) e dall'uso in radioterapia. La loro radioattività dura a lungo: 432 anni per l'americio 241, 24 mila anni per il plutonio 239, 211 mila anni per il tecnezio 99, più di 2 milioni di anni per il nettunio 237..

Il **decadimento radioattivo** è un processo spontaneo per il quale alcune specie di nuclei atomici (isotopi instabili di alcuni elementi chimici) si trasformano in altre (isotopi instabili o stabili degli stessi o di altri elementi chimici), emettendo

radiazioni. Questa trasformazione fa sì che l'atomo tenda a portarsi in una situazione di maggiore stabilità.

Le particelle emesse si distinguono per la loro capacità penetrante, che viene messa in evidenza con opportuni schermi. Esistono tre tipi di radiazioni

- α carica positiva +2, poco penetranti (si fermano con un foglio di carta);
- β carica negativa -1, penetranti (per fermarle occorre uno strato di piombo di circa 0.5 cm);
- γ priva di carica, molto penetranti (per fermarle occorre uno strato di piombo di almeno 10 cm).

La capacità penetrante di una particella è dovuta alla sua energia cinetica, alla sua dimensione ma soprattutto dipende dall'interazione elettromagnetica che la ferma e non le rende possibile attraversare un reticolo di atomi.

1.2 La gestione dei rifiuti radioattivi

La gestione dei rifiuti radioattivi si articola in differenti fasi tra loro interconnesse.

Le attività operative ed amministrative che riguardano la gestione dei rifiuti radioattivi sono la manipolazione, la raccolta, il trattamento, il condizionamento, il trasporto, lo stoccaggio, e lo smaltimento definitivo dei rifiuti radioattivi stessi.

L'obiettivo finale è la loro messa in sicurezza, per cui tali attività vengono effettuate nel rispetto di principi fondamentali universalmente accettati.

Nella gestione dei rifiuti radioattivi possono individuarsi tre approcci fondamentali:

- **Diluisci e Disperdi (D&D)** si ricorre a questo tipo di approccio solo in casi limitati e consiste del diluire e disperdere i rifiuti nell'ambiente sotto forma di effluenti contenenti radionuclidi (materiali che producono radiazioni ionizzanti) in quantità inferiori ai limiti di radioprotezione vigenti;
- **Concentra e Confina (C&C)** dei rifiuti che contengono significative quantità di radionuclidi a vita lunga;
- **Custodia e Decadimento (C&D)** dei rifiuti che contengono solamente radionuclidi a vita breve;

I principi fondamentali nella gestione dei rifiuti radioattivi sono:

- Garantire un adeguato livello di protezione della salute dell'uomo.
- Garantire un adeguato livello di protezione dell'ambiente.
- Tener conto dei possibili effetti sulla salute dell'uomo e sull'ambiente al di fuori dei confini nazionali.
- I prevedibili impatti sulla salute delle future generazioni non siano superiori ai livelli di impatto oggi ritenuti accettabili.
- Non imporre carichi indebiti alle generazioni future.
- Presenza di una adeguata legislazione nazionale, che includa una chiara ripartizione delle responsabilità e che preveda un organismo regolatorio indipendente.
- La generazione dei rifiuti radioattivi deve essere limitata al minimo possibile.
- Deve essere tenuta nella dovuta considerazione l'interdipendenza tra tutte le fasi della generazione e della gestione dei rifiuti.
- La sicurezza degli impianti e delle infrastrutture ove si effettua la gestione dei rifiuti radioattivi deve essere assicurata durante tutto il loro previsto periodo di vita.

1.2.1 Obiettivi generali

E' molto importante porre come obiettivi principali la protezione delle presenti e delle future generazioni da esposizione alle radiazioni e la protezione delle presenti e future generazioni dal riciclo nella biosfera di radionuclidi.

Per impedire il rilascio dei rifiuti radioattivi nella biosfera, essi sono circondati da un adeguato numero di barriere, sia artificiali che naturali (applicazione del concetto "multibarriera"). Quest'ultime hanno il compito di fungere da schermo nei confronti delle radiazioni emesse dai rifiuti e di impedire o ritardare la migrazione dei radionuclidi, in modo da garantire che essi non raggiungano la biosfera.

Il sistema "multibarriera" e' costituito da un insieme di barriere di tipo fisico e chimico, poste in serie tra il rifiuto radioattivo e l'ambiente esterno, in modo ridondante, per assicurare l'immobilizzazione dei radionuclidi a fronte di un loro possibile trasporto nella biosfera da parte di acque di origine meteorica o sotterranea.

1.2.2 Generazione dei rifiuti

I rifiuti possono essere generati da diverse fonti. Le più importanti sono: reattori nucleari, ciclo del combustibile, produzione ed uso di radioisotopi (medicina, industria, ecc.), decontaminazioni, disattivazione impianti nucleari.

In Italia ci sono circa 60.000 metri cubi di rifiuti radioattivi di seconda e terza categoria, ai quali vanno aggiunte 298,5 tonnellate di combustibile irraggiato. Le centrali nucleari italiane (chiuso dopo il referendum del 1987) hanno prodotto 55 mila metri cubi di scorie a questi vanno aggiunti altri 2 mila metri cubi di rifiuti radioattivi, di origine medica e sanitaria, o creati durante le attività di ricerca.

1.2.3 Trattamento

In questa fase della gestione si persegue alla riduzione di volume e alla predisposizione per la successiva fase di "Condizionamento".

A tale scopo si impiegano processi fisici e/o processi chimici come: Evaporazione, Filtrazione, Ultrafiltrazione, Precipitazione, Incenerimento, Supercompattazione.

1.2.4 Il condizionamento

Questa fase della gestione si occupa di immobilizzare, all'interno di un idoneo contenitore, il rifiuto radioattivo, inglobandolo in una matrice solida stabile che soddisfi i requisiti di resistenza fisica, chimica e meccanica(*) , in modo da ottenere una forma finale idonea allo smaltimento definitivo.

La matrice immobilizzante deve possedere certe caratteristiche: compatibilità fisica e chimica con il rifiuto da immobilizzare, insolubilità in acqua e impermeabilità all'acqua (resistenza alla lisciviazione), resistenza meccanica, resistenza agli agenti esterni, resistenza agli sbalzi termici, resistenza alle radiazioni, stabilità nel tempo.

(*) In Italia tali requisiti sono definiti dalla Guida Tecnica 26 dell'ANPA.

Per i rifiuti a bassa e media attività, e per quelli a più alta radioattività ma con bassa emissione di calore, la matrice più usata è un particolare tipo di cemento: condizionamento mediante cementazione.

Per i rifiuti ad alta attività e significativa emissione di calore, la matrice più usata è un particolare tipo di vetro, il vetro borosilicato: condizionamento mediante vetrificazione.

1.2.5 Stoccaggio temporaneo

Questa fase della gestione permette la conservazione in sicurezza i rifiuti radioattivi condizionati per alcune decine di anni, in modo da permettere un congruo abbattimento dell'emissione di calore, per effetto del progressivo decadimento dei radionuclidi a breve- media vita (caso tipico: combustibile irraggiato, rifiuti ad alta attività vetrificati).

A tal fine si richiede la realizzazione di un sito nazionale centralizzato per lo smaltimento definitivo (caso tipico: rifiuti a bassa e media attività cementati) e la

possibilità di adottare nuove strategie di gestione finale, nel frattempo resesi disponibili.

Per lo stoccaggio delle scorie di prima e seconda categoria esistono due tipi di deposito. In quello *superficiale* le scorie sono annegate nel cemento all'interno di bidoni ermeticamente chiusi, immersi nella malta a formare delle unità, i moduli, delimitate da un involucro di cemento armato. Queste sono sommerse in materiale inerte a formare celle delimitate da pareti in cemento armato e ricoperte da uno spesso strato di terra. In quello *subsuperficiale* le scorie sono trattate nello stesso modo ma poste a una profondità di 50 metri. La maggior parte dei depositi realizzati sono del tipo superficiale (*near surface*) caratterizzati da strutture di isolamento semplici.

Le strutture di isolamento sono barriere di contenimento poste in serie, la cui funzione è di impedire la diffusione degli isotopi radioattivi verso l'ambiente esterno.

L'efficienza delle barriere e dell'isolamento sono continuamente controllati da sistemi e da reti di monitoraggio ambientali, estesi al deposito e alle aree circostanti, e attivi per tutto il periodo di controllo istituzionale, al termine del quale il sito viene rilasciato senza restrizioni.

Sono realizzati o previsti depositi non superficiali per rifiuti a bassa attività in cavità artificiali o in miniere dismesse. In alcuni paesi sono presi in considerazione anche depositi geologici sia per i rifiuti a bassa attività che per quelli ad alta attività.

Le scorie di terza categoria sono annegate in matrici solide di vetro all'interno di grossi container inseriti in contenitori d'acciaio detti "cask" e stoccate in gallerie a una profondità di almeno 300 metri, in formazioni geologiche profonde che assicurano l'isolamento dei radionuclidi dalla biosfera per periodi dell'ordine di milioni di anni. I requisiti essenziali del sito sono l'assoluta stabilità sismica e l'isolamento da eventuali falde acquifere circostanti.

In attesa di disporre di un sito di smaltimento geologico, i rifiuti radioattivi a vita lunga condizionati vengono conservati in sistemi impiantistici adatti allo stoccaggio per periodi dell'ordine di qualche decennio e oltre.

Il progetto Pangea (1999), finanziato da enti internazionali, ha individuato e proposto un sito in un area remota dell'Australia (*), destinato ad accogliere i rifiuti a vita lunga di diversi paesi, se non di tutti, o alternativamente siti in Sud America e in Asia; si tratta di depositi geologici internazionali nelle aree più remote del pianeta, in condizioni quindi di massima sicurezza e di minimo impatto ambientale.

(*) In questa area in teoria si dovrebbe creare un deposito di 5 Km quadrati alla profondità di 500 metri, con tutte le moderne misure di contenimento e di controllo per lo stoccaggio di oltre 75.000 tonnellate di rifiuti radioattivi provenienti da tutto il mondo (ovviamente per adesso il Governo Australiano ha gentilmente rifiutato questo onore).

Da non dimenticare che attualmente in fondo agli oceani ci sono vere e proprie discariche di materiali radioattivi:

- 51 missili nucleari inesplosi (44 sovietici e 7 statunitensi) ognuno con molte testate nucleari.
- 7 reattori nucleari (5 sovietici e 2 statunitensi) perduti insieme ai sommergibili nucleari.
- 19 reattori nucleari (18 sovietici e 1 statunitense) scaricati in mare intenzionalmente.
- 25 discariche nucleari (solo quelle conosciute).

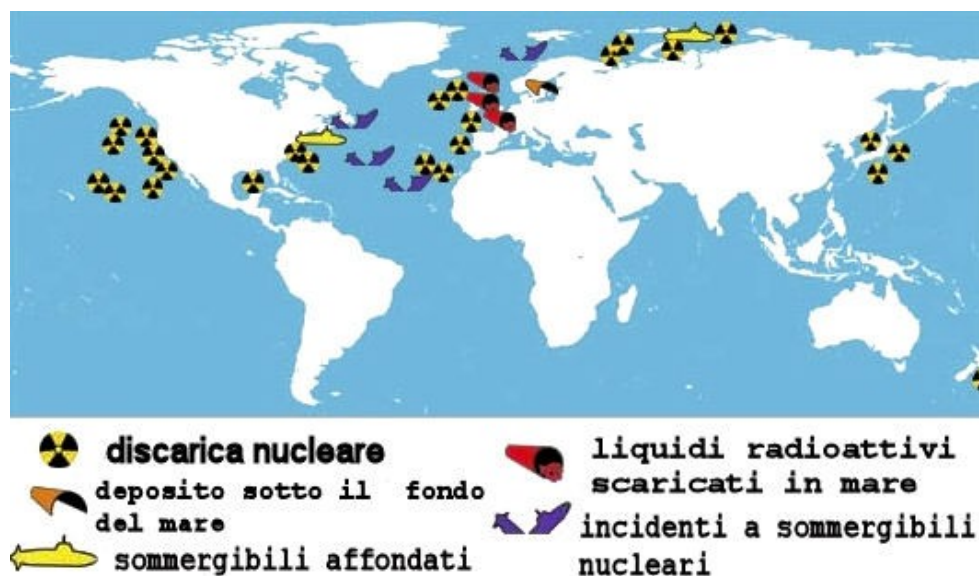


Fig 1.2 Discariche radioattive nel mondo

Queste fonti di Uranio e Plutonio sono state sparse in tutte le parti del mondo.

[1]

1.2.6 Lo smaltimento definitivo

L'ultima fase della gestione dei rifiuti radioattivi si caratterizza per la collocazione definitiva, in un'apposita struttura, dei rifiuti radioattivi condizionati, con l'intenzione di non recuperarli, protezione dell'uomo e dell'ambiente fino a quando la radioattività residua, per effetto del decadimento, non raggiunge valori paragonabili a quelli naturali e la dose annua alla popolazione non deve superare una frazione del valore di dose massima annua per le persone del pubblico definita dalla vigente normativa.

Il fondo naturale di radioattività a cui siamo tutti normalmente e quotidianamente esposti (perché arriva dallo spazio attraverso i raggi cosmici o da isotopi presenti in modo naturale nell'ambiente) si aggira tra 0,1 e 0,3 $\mu\text{Sv/h}$ (microSievert/ora)(vedi paragrafo 1.6), a seconda del luogo di residenza.

I rifiuti a bassa e media attività e basso-medio tempo di decadimento (Rifiuti di Seconda Categoria) necessitano di alcune centinaia di anni per raggiungere livelli di radioattività paragonabili al fondo naturale.

I rifiuti ad alta attività e/o a lungo tempo di decadimento (Rifiuti di Terza Categoria) necessitano fino a centinaia di migliaia di anni per raggiungere livelli di radioattività paragonabili al fondo naturale.

Negli ultimi tempi, si sta sempre più affermando il concetto di "retrievability" (recuperabilità), nel senso di progettare il deposito in modo tale da non precludere l'eventuale recupero dei rifiuti ivi depositati, in vista di possibili altre destinazioni.

(fonte: A.N.P.A Agenzia Nazionale Protezione Ambiente)

(fonte Cumo, M., Impianti nucleari, Casa Editrice Università La Sapienza, 2008)

Nel nostro continente esistono due impianti per il riprocessamento del combustibile esausto a elevata radioattività: La Hague in Francia e Sellafield in Inghilterra. Qui le scorie provenienti dai reattori nucleari europei sono dissolte e separate in uranio, plutonio e soluzioni altamente radioattive. Questo trattamento permette di riciclare il 97% del combustibile, lasciando solo il 3% di scorie. L'uranio e il plutonio recuperati sono rispediti alle centrali di provenienza per essere utilizzati nuovamente come combustibile, mentre le scorie rimanenti devono essere stoccate.

[2]

1.2.7 Materiali per lavorare in ambienti radioattivi

In teoria, non è possibile bloccare totalmente i raggi X e le radiazioni gamma, tuttavia siamo in grado di prevedere il grado di assorbimento o attenuazione di una determinata schermatura. Le schermature, come ad esempio i camici di protezione degli operatori che utilizzano macchine a raggi X, hanno la funzione di attenuare l'intensità del fascio di radiazioni, assorbendone una parte considerevole. Tutti i materiali possono essere utilizzati come schermi ma quelli ad alta densità e alto numero atomico offrono una schermatura più efficiente e pertanto raggiungono lo scopo con uno spessore minore (è il motivo per cui si usano spesso protezioni di piombo).

[3]

1.3 Strategia sul nucleare

In seguito al grave terremoto che ha devastato il Giappone (Fukushima 11-03-2011) causando drammatiche conseguenze per via delle centrali nucleari in funzione nel paese, la comunità internazionale procederà quanto prima ad effettuare delle verifiche sulla sicurezza sugli impianti nucleari in funzione in Europa e anche il nostro Paese ha voluto prendere una pausa di riflessione sull'energia nucleare.

Nel Consiglio dei ministri del 23 marzo scorso è stata decisa la moratoria di almeno un anno per il nucleare. La decisione è stata formalizzata nel decreto legge n.34/2011.

Il nucleare era stato reintrodotta nel nostro Paese con la legge delega 99/2009.

Contestualmente alla moratoria è stato approvato in via definitiva nello stesso Consiglio dei ministri un decreto legislativo recante modifiche al decreto attuativo sul nucleare (n.31 del 15 febbraio 2010).

La decisione di abrogare tutte le norme sulla realizzazione e costruzione di nuove centrali nucleari in Italia è stata presa dal governo il 19 aprile scorso ed è contenuta in un emendamento presentato al Senato nel corso dell'esame per la conversione del Decreto Legge n.34/2011.

Con l'emendamento viene affidato al Consiglio dei Ministri la definizione di una nuova Strategia energetica nazionale.

La Strategia terrà conto delle indicazioni stabilite dall'Ue e dai competenti organismi internazionali e dovrà soddisfare alcune esigenze illustrate dal ministro dello Sviluppo economico, Paolo Romani, in Senato il 20 aprile scorso: "alla sicurezza della produzione di energia e alla sostenibilità ambientale; all'idoneità dell'approvvigionamento energetico sotto il profilo quantitativo, all'economicità per

le famiglie e per le imprese e, al tempo stesso, all'attenuazione delle condizioni di dipendenza dai Paesi esportatori di petrolio e gas".

Il referendum del 2011 sul nucleare ha avuto lo stesso impatto di quello avuto 24 anni fa e lo stesso risultato: gli Italiani hanno scelto di non servirsi dell'energia nucleare anche a costo di non avere completa autonomia energetica dagli altri Paesi. Questo risultato è considerato come presa di coscienza di una scelta eco responsabile a favore del ridotto impatto ambientale.

[4]

1.4 Situazione in Italia

Secondo i dati forniti dal generale Carlo Jean alla commissione ambiente della Camera, in Italia ci sono circa 60.000 metri cubi di rifiuti radioattivi di seconda e terza categoria, ai quali vanno aggiunte 298,5 tonnellate di combustibile irraggiato. Le centrali nucleari italiane (chiuso dopo il referendum del 1987) hanno prodotto 55 mila metri cubi di scorie. Ma la verità è che più che chiuse le centrali sono in stato di «custodia protetta passiva. A questi vanno aggiunti altri 2 mila metri cubi di rifiuti radioattivi, di origine medica e sanitaria, o creati durante le attività di ricerca o simili, e poi rottami metallici, vecchi quadranti luminescenti, parafulmini. E inoltre è bene ricordare che ospedali e aziende producono ogni anno 500 tonnellate di nuove scorie. È stimato che i rifiuti radioattivi italiani ammontino complessivamente a circa 80.000 m³.

[5]



Fig 1.3 Depositi di scorie radioattive in Italia

In Italia sono presenti depositi temporanei di rifiuti radioattivi negli ex impianti nucleari di potenza di Trino Vercellese (Vercelli), di Caorso (Piacenza), di Latina, del Garigliano (Caserta), e degli impianti del ciclo del combustibile di Saluggia (Vercelli), di Bosco Marengo (Alessandria), in Casaccia (Roma) e in Trisaia Rotondella (Matera); vari interventi sono stati effettuati per garantire all'interno di ciascun sito il contenimento del materiale radioattivo esistente in attesa che maturi una scelta diversa. Da una situazione di questo tipo, deriverebbero oltre 20 siti di deposito in 11 regioni. Questo comporterebbe numerosi inconvenienti, perché i siti esistenti non sono stati progettati per uno stoccaggio di medio-lungo periodo e dovrebbero essere realizzare infrastrutture *ex novo*. Inoltre resterebbe aperto il problema della destinazione dei rifiuti radioattivi collocati all'estero e che rientreranno in Italia tra il 2020 e il 2025, né si potrebbero smaltire i rifiuti provenienti da attività mediche e industriali.

Da non sottovalutare che la presenza di materiale radioattivo nei siti di stoccaggio determina un grave problema di sicurezza ambientale, soprattutto se si tiene conto che questi siti si trovano spesso nelle vicinanze di paesi e di città densamente popolati.

Con l'emanazione della legge 24 dicembre 2003, n. 368, si è avuta una prima soluzione che prevedeva possibili siti di stoccaggio di scorie radioattive nelle regioni Sardegna, Toscana, Puglia e Basilicata, ma, a seguito dei fatti accaduti nel novembre 2003 a Scanzano Ionico (Basilicata), è subentrata l'idea di creare un unico sito italiano come discarica delle scorie radioattive, ma trovare il sito adatto e ottenere il consenso della comunità locale, alla luce dell'accresciuto allarme verso l'energia

nucleare in generale, sembra improbabile nell'immediato futuro. Politici, sociologi ed economisti parlerebbero di sindrome NIMBY (*Not In My Back Yard*, lett. "Non nel mio cortile").

Curiosità

La miniera di Pasquasia, chiusa dal 1992, è stata la più importante miniera per l'estrazione di Sali alcalini misti ed in particolare di Kainite per la produzione di solfato di potassio della Sicilia, situata in provincia di Enna, lungo la valle del fiume Morello. Dopo la chiusura, è stata avviata un'indagine per sospetti rifiuti nucleari che sarebbero stati lì sepolti dal 1995, mentre la popolazione locale era all'oscuro di tutto. Ciò spiegherebbe l'improvvisa chiusura della miniera, che era fonte d'occupazione per migliaia di persone. Ufficialmente la miniera venne smantellata per gli alti costi di realizzazione di una lunga condotta di scarico. Ovviamente, le istituzioni hanno da sempre negato la presenza di scorie tossiche nella zona, ma ancora oggi, nell'area, si registra un alto tasso di tumori e leucemie tra la popolazione.

[25] [6] [7]

Il commissario regionale dei Verdi Francesco Emilio Borrelli dichiara:

“Il sito dell' ex centrale atomica del Garigliano in provincia di Caserta è tra quelli che con maggiore probabilità potrebbe ospitare il deposito nazionale di scorie radioattive nazionali. Infatti l' impianto ha tutte le caratteristiche previste dalla Sogin ,la società controllata dal Tesoro per la gestione degli impianti nucleari, per contenere le scorie. Inoltre tra pochi mesi saranno completati i lavori per la costruzione della nuova vasca di contenimento, molto più spaziosa dell' attuale, delle scorie attualmente ospitate nella centrale. Lavori appaltati e assegnati a tempi di record”.

“Su questo tema ci aspettiamo una posizione dura da parte del governo regionale anche perchè il sud Italia produce già il 20% in più di energia rispetto al proprio fabbisogno regalando il surplus alle industrie del nord”.

[8]

1.4.1 Ansaldo Nucleare S.p.A.

Ansaldo Nucleare S.p.A. è una azienda italiana che opera nel settore nucleare, realizzando centrali nucleari di terza generazione raffreddate ad acqua. L'Ansaldo Nucleare nel corso del programma nucleare italiano è stata la società che ha prodotto i reattori nucleari provati (refrigerati ad acqua bollente) su licenza della General Electric e si era preparata a sviluppare il reattore nucleare ad acqua pressurizzata che doveva costituire l'elemento fondamentale del PUN (Progetto unificato). Con i referendum del 1987 lo sviluppo del PUN è stato arrestato, e l'Ansaldo Nucleare, rimasta come divisione dell'Ansaldo Meccanico Nucleare, ha tentato di conservare le sue competenze in campo nucleare lavorando per l'esportazione di centrali all'estero.

1.4.2 SOGIN

La SOGIN (acronimo che sta per **SOcietà Gestione Impianti Nucleari**) S.p.A. è un'azienda italiana che opera nel settore nucleare ed è stata costituita il 1º novembre 1999 in ottemperanza al *decreto legislativo 16 marzo 1999, n. 79* (il cosiddetto decreto Bersani di liberalizzazione del settore elettrico italiano), con il compito di controllare, smantellare, decontaminare e gestire i rifiuti radioattivi (attività di decommissioning) degli impianti nucleari italiani spenti dopo i referendum abrogativi del 1987.

1.5 Situazione dopo Fukushima

Mentre nell'impianto di nucleare di Fukushima si lavora assiduamente per la stabilizzazione dei reattori danneggiati in previsione dell'arresto a freddo degli stessi, si comincia opportunamente a discutere delle scorie ulteriori prodotte in questi mesi e del loro stoccaggio; un problema certamente già ben noto ma che ha conosciuto con la crisi di Fukushima un incremento nell'attenzione dei media e dell'opinione

pubblica giapponese. Il primo ministro giapponese, Naoto Kan, ha annunciato l'intenzione di abbandonare il progetto di 14 nuovi reattori nucleari da qui al 2030.

Nel dopo Fukushima è in atto una profonda revisione della politica energetica anche in Germania, dove la Commissione Etica, avrebbe indicato come necessaria e possibile l'uscita dal nucleare entro i prossimi 10 anni e che anzi sarebbe opportuno chiudere tutti gli impianti entro il 2011.

1.6 Unità di misura

Il Becquerel (Bq) è l'unità di misura del Sistema internazionale dell'attività di un radionuclide, o attività della sorgente, intesa come il numero di disintegrazioni nucleari che essa subisce in un dato intervallo di tempo ed è definita come l'attività di un radionuclide che ha un decadimento (disintegrazione) al secondo. Il Curie (Ci) è l'unità vecchia e corrisponde a $3.7 \cdot 10^{10}$ disintegrazioni al secondo (circa uguale alla attività di 1g di radio).

L'unità di misura della dose assorbita, cioè l'energia depositata dalle radiazioni in una massa di riferimento, è il Gray (Gy) pari ad 1 joule per ogni Kg di massa.

La dose assorbita efficace ha come unità di misura nel SI il Sievert (Sv), che è la dose in Gray moltiplicata per un fattore di qualità che varia da 1 per i raggi X e gamma a 20 per gli ioni pesanti (per i raggi alfa vale 10). Il sievert misura gli effetti e il danno provocato dalla radiazione su un organismo.

Si stima che l'esposizione a 4/5 Sv provoca la morte del 50 % dei soggetti esposti nell'arco di 2 mesi, l'esposizione a 50 Sv entro 2 settimane, oltre i 5 KSv nell'arco di due giorni.

Il Roentgen (R) è riferito solo a radiazioni gamma (o X) ed è definito come la quantità di radiazione che produce in un campione di aria di 1ml a 0°C e 1 atm, una quantità di ioni corrispondente ad una carica elettrica di 1 ues.

Capitolo 2

Monitoraggio

Il monitoraggio delle scorie a breve, medio e lungo termine è uno dei principali problemi nello stoccaggio di rifiuti radioattivi. Si è già detto che per i rifiuti a lungo termine sono previsti piani di smaltimento; i rifiuti a breve e medio termine invece sono imballati dentro fusti oppure tenuti all'interno del sito di produzione o ancora trasportati in siti di raccolta dedicati.

In ogni caso si deve avere una cura particolare nel rilevamento di possibili perdite di materiale radioattivo dovute a lesioni strutturali o accidentali. Pertanto è importante effettuare misurazioni con una certa cadenza temporale, registrare i risultati ed elaborarli in modo da individuare delle anomalie nell'andamento delle serie temporali, indice che qualcosa non va bene.

Un aspetto molto importante da non sottovalutare è la così detta Radiation Hardness, o resistenza alle radiazioni, in quanto in prossimità dei fusti si potrebbe arrivare a registrare un livello di radioattività dai 10 ai 100 mGy/h. Anche i sensori utilizzati in queste applicazioni, quindi, devono avere una resistenza alle radiazioni tale da mantenersi in regime di operatività per un certo numero di anni.

2.1 DMNR

All'interno dei Laboratori Nazionali del Sud è stato sviluppato il progetto **DMNR** (Detector Mesh for Nuclear Repository) che nasce da una collaborazione con Ansaldo, esso prevede la realizzazione di un dimostratore prototipo fatto da una rete di rivelatori per il monitoraggio online di siti di deposito di scorie radioattive a medio e breve termine.

Il sistema proposto può aprire una nuova prospettiva nelle modalità di imballaggio e immagazzinamento di rifiuti radioattivi.

2.1.1 Sensori per monitoraggio

L'obiettivo principale è la misura della radioattività attorno ad ogni fusto o gruppo di fusti, l'ideale sarebbe prevedere una rilevazione in regime continuativo con sensori dedicati ad ogni fusto o gruppo di fusti; questo si può fare con l'utilizzo di contatori Geiger-Muller(*), il problema è che questi dispositivi sono molto costosi quindi ci si deve adattare con altre soluzioni, come controlli periodici fatti da operatori oppure da robot appositi e sistemi di monitoraggio fissati all'interno dei depositi.

(*)Un contatore Geiger-Muller è utilizzato per contare il numero di decadimenti che avvengono in un intervallo di tempo, è costituito da un cilindro conduttore chiuso alle estremità, con all'interno un filo metallico coassiale isolato dal conduttore; tra catodo (tubo) e anodo (filo interno) è applicata una elevata differenza di potenziale. Il tubo è riempito con un gas a bassa pressione, il passaggio di una particella ionizzante produce quindi una ionizzazione all'interno del tubo Geiger. Questi ioni, accelerati dal campo elettrico, producono una ionizzazione secondaria, terziaria e così via, dando origine al cosiddetto effetto valanga. Il passaggio di una particella viene rivelato come una variazione di tensione ai capi di una resistenza posta in parallelo al tubo.

Le caratteristiche che deve avere un sensore per soddisfare le specifiche della problematica trattata sono: resistenza alle radiazioni, funzionamento da contatore, alta sensibilità, bassa efficienza, affidabilità, sensibilità alla posizione, robustezza meccanica, ridondanza, basso costo, facilità nell'installazione, manutenzione, rimozione e assemblaggio, sensibilità a specifiche radiazioni, capacità di misurare la dose totale, indipendentemente dalla registrazione storica dei conteggi riportati.

A questo scopo è stato creato e testato un nuovo tipo di sensore che risponde alle caratteristiche sopra citate che si comporta come un contatore Geiger-Muller a scintillazione a basso costo, replicato a formare una griglia attorno ad ogni fusto con lo scopo di conteggiare la radiazione gamma, indipendentemente dalla struttura fisica del singolo fusto o dalla configurazione topologica. Il nuovo sensore è costituito da una fibra ottica e dei **SiPM** (Silicon PhotoMultiplier), fotosensori in grado di

rilevare segnali minuscoli prodotti da un numero irrisorio di fotoni. Questo sistema è in grado di acquisire informazioni online sulla distribuzione del conteggio nel tempo e nello spazio all'interno di un deposito.

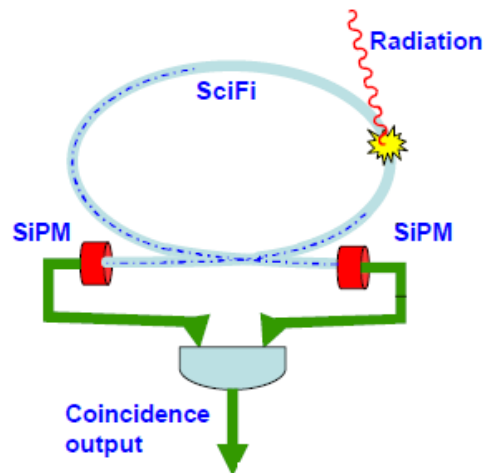
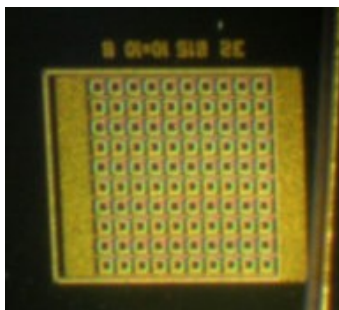


Fig 2.1 Principio di funzionamento del sensore

2.1.2 Il sistema SiPM e fibra ottica

I SiPM sono prodotti direttamente da un wafer di silicio impiantando in esso matrici di microcelle identiche lette in parallelo e ciascuna delle quali è un diodo che lavora leggermente al di sopra della sua tensione di breakdown in modalità Geiger. I terminali di output delle celle sono collegati e la loro somma costituisce l'uscita del dispositivo, rendendolo un contatore di fotoni quasi-digitale. I SiPM rivelano la luce proveniente dalla fibra attivata e la convertono in un segnale elettrico.



(a)



(b)

Fig 2.2 Due esempi di SiPM: (a) STM 10x10, (b) Hamamatsu MPPC 10x10 S10362-11-100U

I SiPM sono stati caratterizzati in termini di guadagno, risoluzione in fotoni, efficienza globale, rumore e in particolare in termini di cross-talk, in modo da poter determinare la più bassa soglia raggiungibile. Il cross-talk tra celle implica che se una cella è coinvolta ci sono probabilità (~10%) che altre celle rispondano, per questo motivo si è deciso di impiegare due SiPM, installati uno per ogni estremità della fibra, che operano in coincidenza e permettono di settare un valore di soglia adatto per ognuno di essi.

La forma tipica dello spettro di un SiPM testato con una sorgente laser a bassa intensità è mostrata in figura.

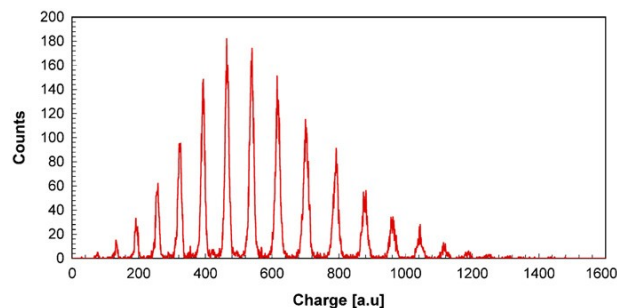


Fig 2.3 Spettro di carica di un SiPM (10x10 celle-STM) irraggiato da un laser, utilizzando un amplificatore sviluppato all'INFN-LNS

La rivelazione di n fotoni è dimostrata dalla struttura multi picco la cui convoluzione segue una distribuzione di Poisson.

Le fibre ottiche scintillanti, che rappresentano l'elemento sensibile di base, sono filamenti di materiale vetroso o polimerico (in questo caso polimerico) che producono fotoni di luce visibile quando sono attraversati da radiazioni ionizzanti.

Si possono utilizzare fibre ottiche con caratteristiche diverse a seconda della necessità, in base all'efficienza, distribuzione spettrale e temporale in quanto queste dipendono dal materiale utilizzato e dalla sua composizione.

Un rivelatore a scintillazione assolve tre principali funzioni: assorbimento della radiazione incidente con produzione di fotoni visibili, amplificazione della luce

(convertita in un flusso di elettroni) tramite il fotomoltiplicatore ed emissione di un impulso in uscita.

L'impulso elettrico in uscita è proporzionale alla luce incidente sul fotomoltiplicatore, a sua volta proporzionale all'energia della particella che ha generato la luce.

E' importante conoscere la lunghezza d'onda della luce prodotta perché lo scintillatore deve accoppiarsi nel modo migliore al fotomoltiplicatore che amplifica e rivela la luce.

Le prerogative delle fibre le rendono adatte a questo tipo di applicazione: flessibilità, immunità ai disturbi elettrici e alle condizioni atmosferiche più estreme (es. variazione di temperatura). Le fibre di natura plastica possono essere facilmente adattate alla forma desiderata e sono facilmente modificabili, si possono tagliare e posizionare attorno ad un fusto. Un loro punto di forza sta nella loro vita (dai 100 ai 1000 anni) in prossimità di un fusto con dose di radiazione di 10-100 mGy/h. Il loro deterioramento consiste nell'opacizzarsi.

Ogni fusto del sito sarà circondato da una griglia di questi sensori, che costantemente misureranno la radiazione proveniente dai fusti stessi. Si tratta principalmente di radiazione gamma. Come già menzionato nello scorso capitolo, i raggi γ sono una forma di radiazione elettromagnetica (meno ionizzanti dei raggi α e β) e occorrono schermi molto spessi per proteggere gli esseri umani dagli effetti che essi possono recare ai tessuti. Per abbattere la radiazione gamma del 50% ci vuole uno schermo di 1 cm di piombo oppure di 6 cm di cemento.

Per un primo prototipo sono state utilizzate fibre circolari di 1 mm di diametro e SiPM quadrati con area sensibile di 1 mm x 1 mm (SensL). Le fibre a sezione circolare non hanno un orientamento preferenziale rispetto all'incidenza della radiazione.

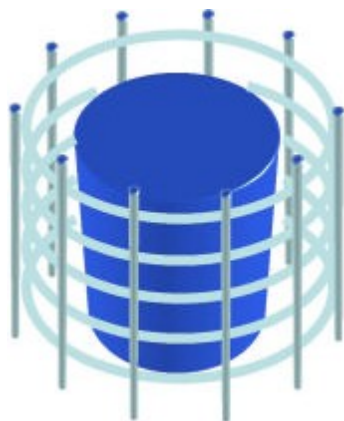


Fig 2.4 Configurazione dei sensori a geometria mista, i sensori sono disposti sia longitudinalmente che circolarmente attorno al fusto.

2.1.3 Elettronica di front-end

L'elettronica di front-end deve essere semplice ed economica.

Ogni fibra fornisce due segnali di luce che saranno convertiti in segnali elettrici dai SiPM, utilizzando la logica della coincidenza dei segnali ad entrambe le estremità si individua la radiazione sulla fibra e dalla determinazione dell'intervallo di tempo tra i due segnali si ottiene la posizione di irraggiamento.

Il guadagno tipico di un SiPM, che consiste nel numero di elettroni generati dall'effetto valanga di una singola cella, è dell'ordine di 10^5 - 10^6 . Questo vuol dire che è necessario utilizzare degli amplificatori. In questa applicazione sono utilizzati degli amplificatori lineari con guadagno nominale di 200 e larghezza di banda di 4 GHz, realizzati proprio per questo scopo presso l'INFN-LNS.

L'intera elettronica di front-end è implementata in una board che comprende l'alimentazione di bias, gli amplificatori, i discriminatori e le unità di coincidenza, in grado di manipolare oltre 32 fibre. Inoltre nella stessa board un **FPGA** (Field Programmable Gate Array), un dispositivo elettronico programmabile, implementa i contatori e l'interfaccia dati verso il computer dove un'interfaccia grafica ad alto livello permette di avere una panoramica generale sul sistema e l'intervento di un operatore su di esso.

possibilità di monitorare i livelli di radioattività che secondo le aspettative dovrebbero abbassarsi nel tempo.

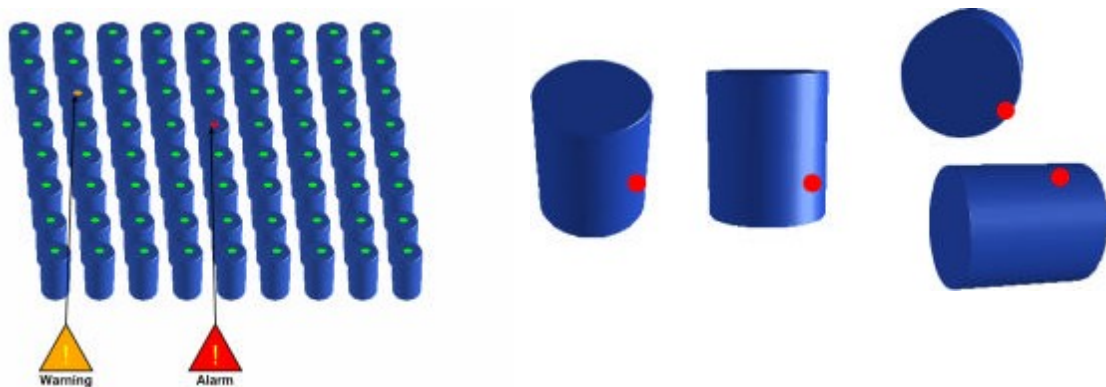


Fig.2.6 Esempio di mappa 3D real-time di radioattività di un settore di fusti, il segnale arancione rappresenta una situazione di preallarme, quello rosso rappresenta una situazione di allarme. Grazie all'utilizzo della griglia di sensori è possibile localizzare il punto danneggiato del fusto in allarme.

Utilizzando unità a basso costo molto potenti, si può assicurare una trasmissione di dati ridondante tramite cavi differenziali e wireless per la connessione con la rete locale di computer. Essa può essere localizzata o in prossimità del sito oppure a notevole distanza, in modo da non richiedere resistenza alle radiazioni. L'obiettivo principale è quello di immagazzinare i dati storici acquisiti del sito e replicarli per motivi di sicurezza ridondante.

Un'applicazione ausiliaria di questo progetto è il braccio meccanico che effettua un'ispezione parallela del sito, sia visiva attraverso l'uso di una telecamera che qualitativa tramite l'installazione di un rivelatore di radiazione ad alta risoluzione.

Il robot può essere utilizzato a scopo manutentivo (ispezione periodica) e nel caso in cui vi sia un allarme proveniente dal sistema di monitoraggio online, il braccio andrà a controllare la presenza di danneggiamento sulla superficie del fusto, individuare con precisione il punto, o un guasto fisico del sensore ed eventualmente sarà in grado di sostituire componenti elettronici, moduli o batterie.

Questo sistema è stato pianificato per essere distribuito, robusto, affidabile e basato su componenti a basso costo, inoltre test effettuati su di un piccolo dimostratore a contatto con una sorgente radioattiva hanno dimostrato delle performance incoraggianti in termini di sensitività.

2.2 Test

E' stato fatto un test utilizzando tre sensori organizzati ad anello chiuso attorno ad un box cilindrico contenente quattro differenti sorgenti di raggi gamma messe in diverse posizioni all'interno del fusto, mentre i sensori posti a differenti livelli hanno registrato il tasso di conteggio.

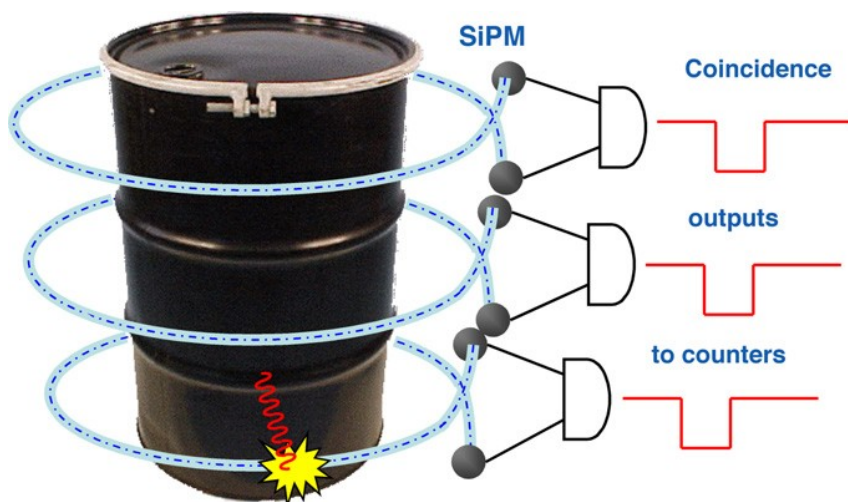


Fig 2.7 Possibile arrangiamento dei sensori attorno al fusto

I risultati del test hanno evidenziato che anche un sistema semplice caratterizzato da solo tre sensori è abbastanza sensibile alla variazione di distribuzione della radioattività, in questo caso causata dalla diversa posizione delle sorgenti.

Da osservare che l'efficienza delle fibre misurata è approssimativamente dell'ordine dei 10^{-4} , mentre il numero dei raggi gamma per secondo che interagiscono con una singola fibra in una configurazione realistica è di circa 10^8 - 10^9 . Questo implica un possibile tasso di conteggio di circa 10^4 - 10^5 s⁻¹.

Nella configurazione elettronica attuale il segnale logico di coincidenza proveniente dal sensore ha la durata di 50 ns, questo impone un limite superiore di circa 10^7 conteggi/s.

Con questo test si è dimostrata la fattibilità del principio fisico, dando le basi per la realizzazione di un prototipo a larga scala da testare su reali depositi di scorie.

Possono esserci delle perdite dovute ad un cattivo accoppiamento ottico tra fibre e fotosensori, dovute a problemi di natura puramente ottica oppure a problemi di natura meccanico-geometrica. La soluzione è utilizzare strati antiriflesso per i fotosensori e gel siliconici e microcomponenti ottici per un efficiente accoppiamento tra fibre e fotosensori.



Fig 2.8 Prova di posizionamento della sorgente tramite il braccio robotico

Setup del prototipo realizzato per il test, con tre fibre arrangiate in modo concentrico attorno ad un fusto. Un braccetto robotico, comandato in tempo reale, si occupa del posizionamento della sorgente in zone diverse all'interno del fusto.

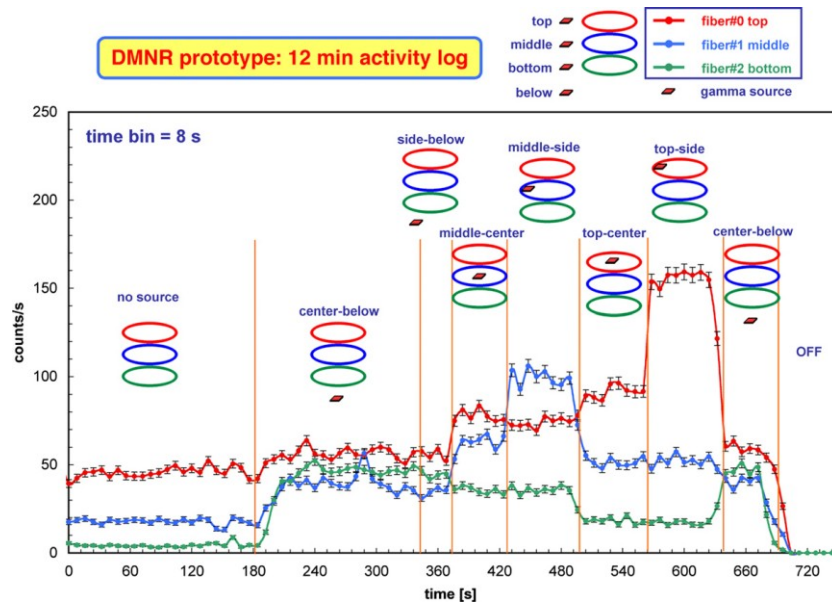


Fig 2.9 In questa figura è riportato il tasso di conteggio delle tre fibre in funzione della posizione della sorgente.

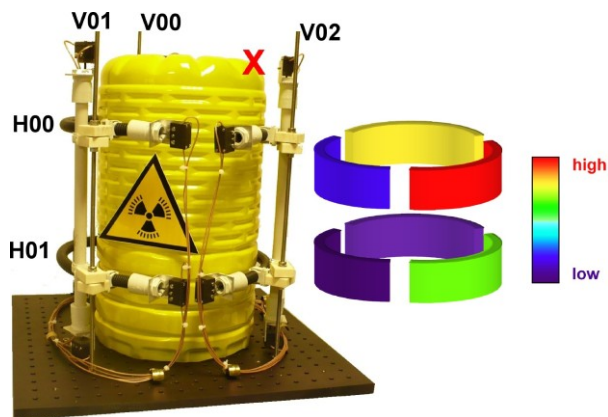


Fig. 2.10 Il fusto prototipo con tre fibre (V01 V02 V03) verticali e due orizzontali (H00 H01)

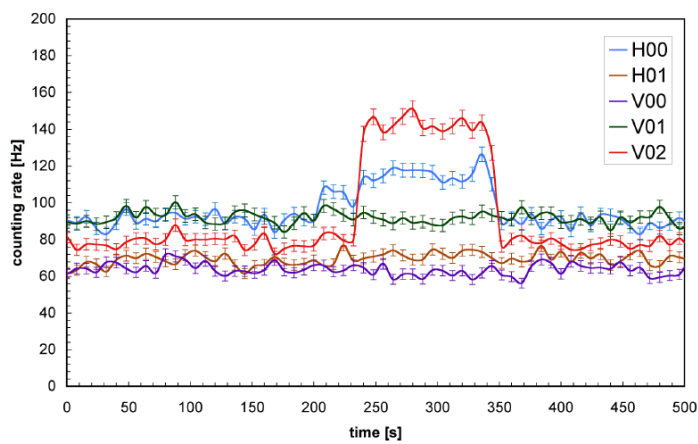


Fig. 2.11 Tasso di conteggio rispetto al tempo

[9][10]

Capitolo 3

Perché un sistema robotizzato?

La robotica nucleare si è concentrata su tre attività principali:

1. smantellamento
2. ispezione
3. manutenzione impianti di potenza

In generale Sistemi di ispezione a distanza (RI) possono essere utili in tre tipi di situazioni: in primo luogo si può ridurre o eliminare la necessità per l'uomo di entrare in un tale ambiente. Secondo la riduzione del rischio per la sicurezza. In terzo luogo la capacità di esplorare aree che sarebbe impossibile esplorare.

Il progetto sotto studio è incentrato sullo sviluppo, la realizzazione e l'utilizzo dimostrativo di un sistema robotizzato di ispezione, controllo e sorveglianza, in risposta a problematiche specifiche che riguardano sistemi ed aree d'impianto critici di accesso limitato o addirittura impossibile ai fini delle ispezioni, oppure disagiata o rischiosa per il personale addetto. Il sistema progettato ha implicazioni non solo in termini di razionalizzazione degli interventi di manutenzione, con conseguente miglioramento dell'affidabilità e contenimento dei costi, ma anche di sicurezza del personale e degli impianti.

Possiamo trovare nella moderna tecnologia dei sistemi automatizzati e robotizzati, dotati di sensoristica avanzata e operabili a distanza, la risposta più efficace al più generale obiettivo di mantenere e migliorare l'affidabilità degli impianti, anche in termini di sicurezza e di miglioramento delle condizioni di lavoro del personale preposto alla sorveglianza ed alle ispezioni.

3.1 Stato dell'arte

L'ispezione e la manutenzione dei depositi di stoccaggio nelle centrali nucleari ha un bisogno immediato di sistemi automatizzati per garantire migliori condizioni di lavoro e migliore qualità di vita.



Fig 3.1 Tipico impianto di stoccaggio DOE (U.S.Department of Energy)

Effettuando ricerche sulle soluzioni presenti in ambito internazionale, utilizzando come strumento di ricerca il web, ho individuato delle caratteristiche di base dei sistemi di monitoraggio utilizzati in varie installazioni e voglio qui farne una panoramica.

I sottocomponenti principali del sistema sono: veicolo di base, sensori di ispezione, controllo off-board, computer di bordo, analisi dei dati e presentazione delle comunicazioni tramite Wireless Ethernet (i ricetrasmittitori non richiedono particolari frequenze).

In generale, un robot mobile auto-navigante consiste in un veicolo base, dotato di sensori per identificare automaticamente la ruggine e la corrosione dei componenti.

Automatizzando l'ispezione dei depositi, gli ispettori umani devono solo verificare un piccolo numero di fusti sospettati di essere danneggiati.

In alcuni siti i fusti emettono radiazioni gamma di un certo rilievo e questo rende l'ispezione più pericolosa.

L'impatto di una nuova tecnologia è difficile da predire sia per gli operatori che per gli utenti che devono imparare le limitazioni della tecnologia.

In un progetto in progresso diventa sempre più chiaro che il numero di variabili in campo è più grande della previsione fatta.

Sono stati sviluppati tre prototipi completi di robot in scala, tutti e tre sono costituiti da un veicolo mobile, che naviga da solo, attrezzato di un package di sensori che permettono di identificare automaticamente ruggine e corrosione.

Promettono una bassa dose di radiazione e di alleggerire lo sforzo degli operatori, migliorando la diligenza, consistenza e documentazione.

- 1)SWAMI –Stored Waste Autonomous Mobile Inspector
- 2)ARIES – Autonomous Robotic Inspection Experimental System
- 3)IMSS –Intelligent Mobile Space System

C'è anche un sistema sotto sviluppo basato su un metodo di analisi delle immagini a sé stante. ABCD –Automated Baseline Change Detection.

Ogni sistema ha funzioni simili, anche se offrono approcci diversi.

[11]

Il DOE MWFA (Mixed Waste Focus Area) ha lanciato un' iniziativa per testare questi sistemi e integrare i migliori elementi in un sistema finale pronto al commercio.

******Gli attributi che hanno in comune includono le sottocomponenti: il veicolo base, package di sensori di ispezione, controllo da parte dell'operatore off-board, analisi di

dati e presentazione, e comunicazione wireless tramite protocollo Ethernet tra host e robot.

La funzione basilare del veicolo è il posizionamento dei sensori vicino ogni fusto in modo da essere ispezionato. Per questa applicazione sono necessarie batterie per fornire ulteriore potenza ai sensori, una dimensione ridotta per navigare tra le isole del deposito e tolleranza alle temperature estreme.

Le macchine circolano automaticamente all'interno del deposito utilizzando una mappa interna originata da un file CAD standard. La tecnica di navigazione include la ricognizione, landmarks attivi o passivi e caratteristiche locali che costantemente aiutano il robot a stimare la sua posizione nella mappa. Inoltre la capacità di identificazione di ostacoli permette al robot di trovare oggetti e aggirarli tramite l'utilizzo di un set di sensori tattili e laser senza contatto oppure di un sistema di ultrasuoni.

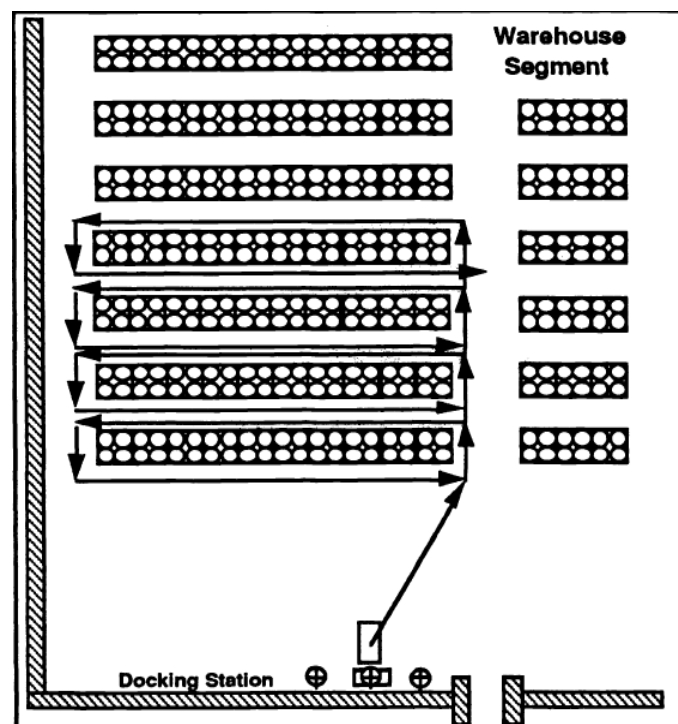
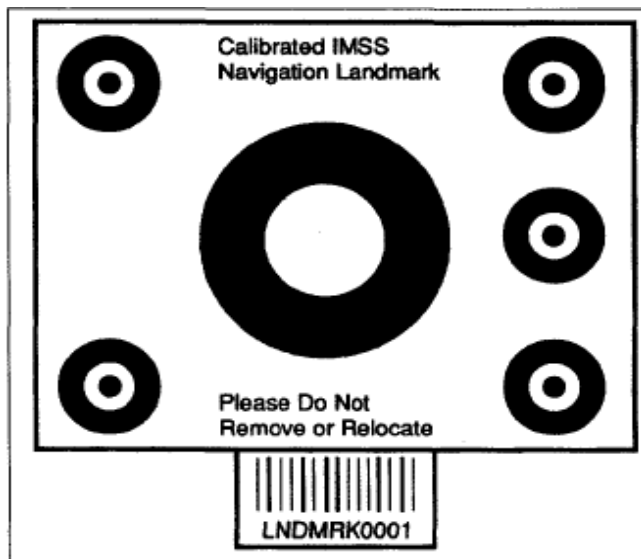


Fig 3.2 Tipico scenario di navigazione



- Un pezzo di metallo o carta
- Set di cerchi concentrici in alto contrasto
- Schema predeterminato

Utilizzati per aggiornare la posizione e l'orientamento del veicolo nella struttura e resettare gli errori accumulati dal dead reckoning

Fig 3.3 Landmark passivo rappresentativo

Dead Reckoning (DR) è il processo di stima della propria posizione corrente sulla base di una posizione precedentemente determinato, o di correzione, in base alla conoscenza della e la stima del tempo trascorso.

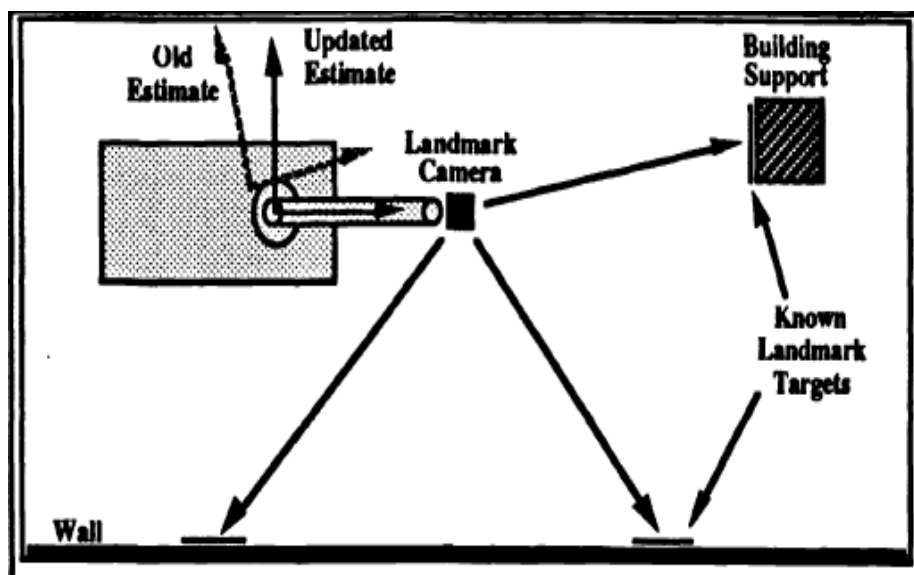


Fig 3.4 Sistema di navigazione tramite landmarks

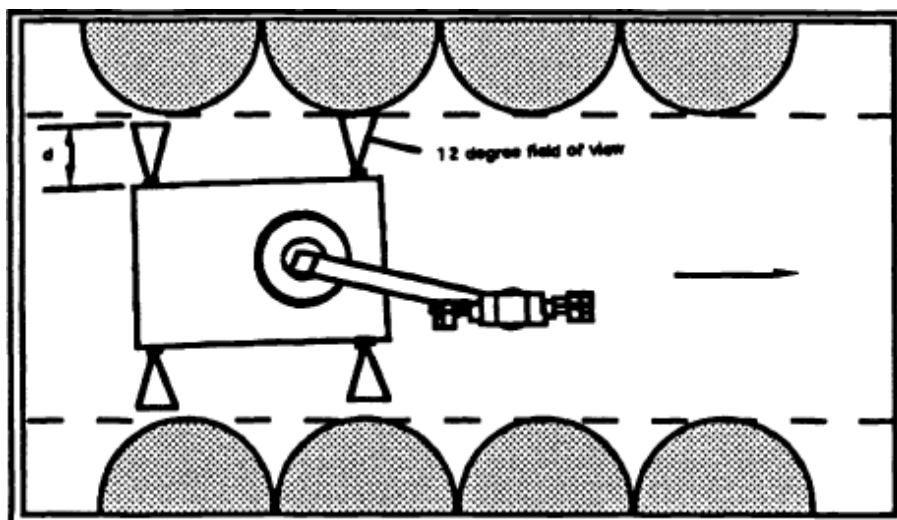


Fig 3.5 Ispezione corridoio

Molti veicoli includono sistemi di autocarica in modo che il robot possa tornare alla stazione base per ricaricarsi quando necessario.

Dei computer on-board interagiscono con i computer esterni e l'interfaccia tra loro può cambiare al variare di alcune condizioni, infatti nei depositi reali le isole sono frequentemente variate in dimensione, forma, posizione e per quanto riguarda la temperatura, si può avere la presenza di ghiaccio o acqua.

Per alcune macchine si preferisce operare di notte perché si riduce la variazione e l'intensità della luce di sottofondo.

I package di ispezione consistono almeno in camere di colore, illuminazione con luci 'strobe' e lettori di codici a barre.

Ci sono vari metodi per ispezionare denti e altre caratteristiche topografiche come ad esempio la 'structured lighting', dove ci sono una sorgente di luce (come un laser) e una camera che cattura la luce riflessa. La superficie può essere ricostruita usando modelli geometrici della sorgente di luce, ricevitore e la superficie ideale del fusto, quando la distanza tra il fusto e il robot è conosciuta.

Sono utilizzati package di sensori multipli per incrementare la collezione di dati e le immagini multiple dei fusti permettono di catturare caratteristiche di corrosione sulla superficie visibile dei fusti.

Degli attuatori supplementari sono utilizzati per fornire il preciso posizionamento per l'acquisizione di dati e dei computer on-board supplementari provvedono al controllo dell'attrezzatura e a fornire un'interfaccia tra il veicolo base e la workstation host.

Durante l'ispezione robotizzata è raccolta una grande quantità di dati, le immagini multiple per ogni fusto sono caricate dall'host, la trasmissione avviene tramite il sistema wireless Ethernet e il ricevitore non richiede speciali frequenze.

La luce incide in modo considerevole sulla riuscita dell'analisi delle immagini; i laser usati per l'identificazione di denti, del centro dei fusti etc, sono sensibili alla riflessione speculare prodotta dai fusti nero lucente.

Per l'analisi di immagini servono hardware speciali, ma la grande quantità di dati e le tecniche sofisticate utilizzate per questo tipo di analisi rendono il processamento delle immagini dei fusti lento.

Le stazioni base per le macchine consistono in aree di ricarica e una o più stazioni per host. Il robot opera tramite controlli basati sulla grafica che provvedono al set-up del deposito, all'inizio del compito, al monitoraggio e controllo, alla presentazione dei risultati e all'archiviazione dei record di ispezione.

Per controllare l'inventario dei record spesso sono fornite interfacce al database del sito.

[12]

3.1.1 SWAMI

Autonomous Mobile Robot for Inspection of Nuclear Waste Storage Facilities (University of South Carolina (USC)-Westinghouse Savannah River Company (WSRC)-1993)

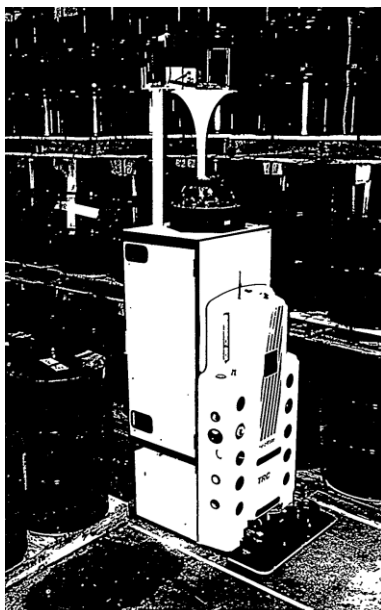


Fig 3.6 SWAMI

Sviluppato per l'ispezione di quattro alte pile di fusti di 85 galloni.

Sono stati sviluppati due prototipi, uno nel 1993 al Savannah River Site e uno nel 1995 al Fernald's TS-4. Questo è dotato di un ricaricatore automatico e di un sistema sofisticato evita ostacoli, oltre che altri miglioramenti come un inseguitore di isole, sistema di 'sopravvivenza' alla radiazione, processamento e cattura di immagini e un sistema wireless con protocollo di comunicazione Ethernet.

Un computer fuori bordo è utilizzato come interfaccia primaria con il robot. Il sistema di sopravvivenza alla radiazione usa dei contatori a scintillazione invece che detector proporzionali a gas trovati in altri robot (SRTC). Il controllore da supervisione che sta a bordo è costituito da tre microcomputer VME che utilizzano il software di controllo GENISAS.

Due sensori sono posizionati su un albero nel robot per coprire i fusti in alto; ognuno ha una camera e 'strobe' per la cattura di immagini, un lettore di codici a barre e laser con camere nera e bianca per l'individuazione delle ammaccature. Il centro del fusto in uno stack è trovato grazie ad un sistema con un laser speciale che aggiusta e la posizione del sensore per realizzare una misura ottima di altezza, portata e offset laterale dalla superficie tramite uno spostamento lineare.

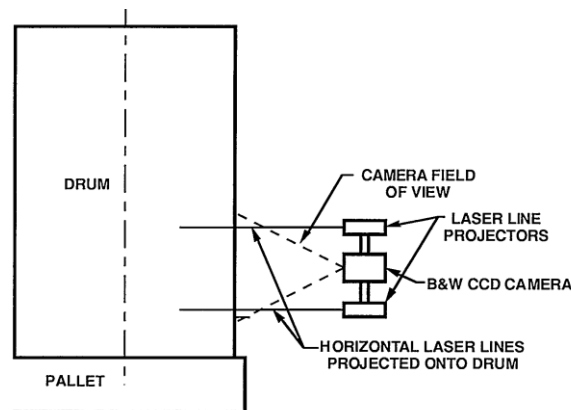


Fig 3.7 Sistema di centraggio del fusto

I laser sono di classe 2, quindi sono sicuri agli occhi, i pods sono attaccati dietro al robot ispezionando solo una parte di isola per volta.

L'attrezzatura fuori-bordo di SWAMI include la stazione base, computer per il processamento visuale, stampanti e stazioni di carica. L'interfaccia per le principali operazioni per gli utenti è chiamata Operator Interface (SOI). I fusti da ispezionare sono selezionati da una mappa del deposito aggiornata con le ultime informazioni fornite dal database SWIFTS del sito. Selezionando una o 'più righe a metà' è generato automaticamente un profilo di missione e inviato al robot. Il robot segnala il fusto sospetto che ha trovato e identifica i fusti che non sono al loro posto in base al database.

Le immagini sono caricate e analizzate sul computer da un processamento di visione e quindi inviate da SWAMI su uno o due canali Ethernet wireless.

I risultati dell'ispezione sono presentati in una finestra separata che dà una priorità in base alla gravità della corrosione.

Selezionando un fusto con il mouse, questo è rappresentato all'operatore con l'area sospetta cerchiata dal programma stesso.

Sono poi utilizzate delle utilità per tirare fuori i risultati per una verifica fisica nel campo. Le immagini sono infine immagazzinate in un archivio schedato nel database SWIFTS.

[13]

3.1.2 ARIES

Intelligent Inspection and Survey Robot (South Carolina Universities Research and Education Foundation).



Fig 3.8 ARIES nella sua area di lavoro

Il robot ARIES è stato dimostrato per la prima volta nel novembre del 1995 e successivamente nell'estate del 1996 in seguito all'apporto di miglioramenti.

Fusti della capacità di 55-85 e anche 110 galloni possono essere ispezionati in isole fatte da quattro pallets in altezza. ARIES è stato il primo robot a permettere l'ispezione di fusti dalle molteplici dimensioni e l'unico per fusti di 110 galloni.

Una workstation di controllo fornisce la pianificazione delle missioni e il monitoraggio, mentre la comunicazione Ethernet wireless fornisce collegamenti ai computer di bordo usati per il controllo e l'analisi delle missioni real-time. Sono stati inclusi anche un sistema di gestione della potenza e un sistema di destrezza supplementare.



Fig 3.9 Cybermotion K3A

La macchina di base è la Cybermotion K3A, ridisegnata per ispezionare isole di 36 pollici. Questa naviga utilizzando un sistema di ricognizione (misurando la distanza di moto e i cambiamenti) e aggiornamento di posizione tramite dei landmark passivi. I landmark appaiono come palle da tennis a forma di cilindro ricoperte con nastro retroriflettente.

Sei ruote nelle tre unità orizzontali migliorano l'accuratezza degli spostamenti mantenendo costante il contatto con il pavimento.

In cima al robot è installato un Camera Positioning System (CPS) con quattro package di strumenti, uno per ogni livello.

[14]

3.1.3 IMSS

Intelligent Mobile Sensor System (Lockeed Martin-1999)



- Il veicolo è piuttosto stretto e necessita di speciali ruote per spostare o ruotare in qualsiasi direzione
- Sensori di ostacolo costituiti ad ultrasuoni in serie (per allineare il robot con le estremità dell'isola e gli ingressi del corridoio)
- 4-5 ore di autonomia
- Tre array di sensori fissi montati su un albero verticale per controllare fino a tre pile di tamburi contemporaneamente
- Due sensori ad ultrasuoni per determinare i centri dei tamburi, un lettore di codici a barre, due telecamere a colori e una luce alogena diffusa per individuare la presenza di ruggine, un laser di classe 3A e una telecamera B / N per il rilevamento dell' inclinazione e di ammaccature
- Due assi verticali paralleli di movimento per spostare la suite di sensori a sinistra o a destra
- Tutti i difetti vengono processati onboard in tempo reale
- Sistema autonomo di navigazione
- Database integrato

[15] [16]

3.1.4 ABCD

Automated Baseline Change Detection System (Lockeed Martin-1999)

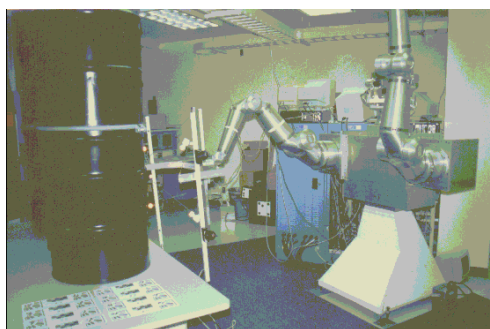


Fig 3.10 ABCD

- La piattaforma base muove il sensore vicino ad una pila di barili e si ferma quando il sensore è quasi centrato sull'etichetta di identificazione e posizione
- Confronta l'immagine corrente acquisita con un' immagine archiviata

- Se l'analisi interpretativa non conosce il tipo di cambiamento osservato, gli operatori sono avvisati della condizione potenzialmente pericolosa
- Questo sistema, disponibile in commercio, è utilizzato per identificare un'etichetta applicata a tutti i fusti e calcola la distanza del sensore dal fusto e poi rapidamente e con precisione riposiziona il sensore

[17]

3.1.5 RTIEE

Robotic End Effector for Inspection of Storage Tanks (Oceaneerig Space Systems, Inc.-1999)



Fig 3.11 RTIEE

- tecnica di valutazione elettromagnetica non distruttiva (NDE), Misure di corrente alternata di campo (ACFM)
- sistema di visione compatta e di illuminazione per permettere all'operatore di distinguere i potenziali siti di corrosione
- ACFM non richiede contatto elettrico o una interfaccia accoppiante con la superficie della parete del serbatoio
- è stato progettato un sistema di scansione per auto-allineamento con il muro, il manipolatore spinge l'end-effector contro la superficie della parete
- vengono immagazzinati dati di ispezioni attuali e precedenti in modo da creare una "Tank Wall Map"
- una videocamera montata sulla linea centrale del l'end-effector

[18]

3.1.6 ROBICEN III

Un robot climbing pneumatico per l'ispezione di tubazioni e serbatoi.

Se c'è un posto in cui l'utilizzo di un robot ha senso, è in un impianto nucleare, dove le ispezioni sono essenziali ma l'ambiente è potenzialmente letale. ROBICEN III è macchina costruita da Joan Savall ei suoi colleghi presso l'Università di Navarra e CEIT (Spagna). Questo piccolo robot afferra l'esterno delle pareti del serbatoio di stoccaggio con i suoi quattro piedi a ventosa e usa camere e sensori ad ultrasuoni per controllare le saldature e rilevare crepe. I suoi piedi sinistro e destro sono collegati a un asse che scivola avanti e indietro e gira. ROBICEN III fissa il piede anteriore e posteriore del piede al serbatoio, solleva il piede sinistro e destro, e poi scivola in avanti e li sigilla di nuovo al serbatoio. Poi stacca i piedi avanti e dietro e si tira avanti. Ogni piede è incernierato in modo che il robot può afferrare le parti curve di un fusto.

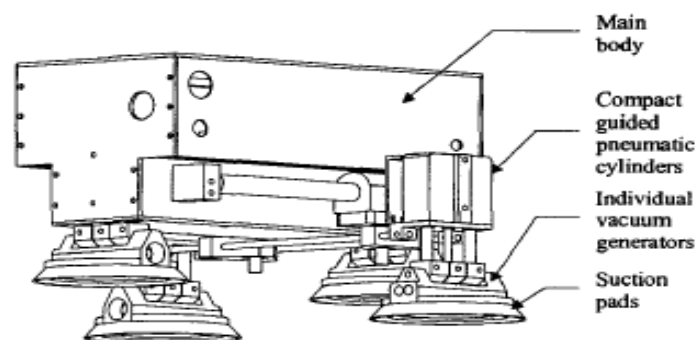


Fig 3.12 ROBICEN III

[19]

3.1.7 WALL-CLIMBING MICROROBOTS

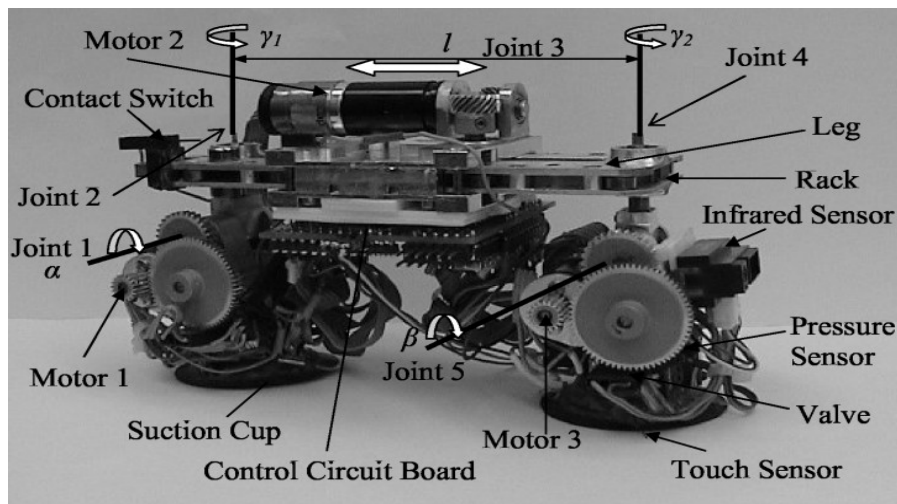


Fig 3.13 Wall-Climbing Robot

Il robot è in grado di : scalare pareti, camminare sui soffitti, transitare tra due superfici inclinate, strisciare attraverso tubi, aderire alle superfici delle pareti, muoversi in giro con appositi sensori o strumenti, sostituire i lavoratori umani in questi compiti pericolosi, eliminare costose erezioni di ponteggi. Hanno piccole dimensioni (circa 80 millimetri di altezza e 50 mm di larghezza), sono molto leggeri (450 g) e presentano bassi consumi.

[20]

Capitolo 4

Progettazione del sistema

In questo capitolo si farà una introduzione al sistema che è stato realizzato in definitiva, partendo da considerazioni sul carattere che esso deve avere per assolvere i compiti per cui è stato proposto e sui requisiti necessari per assolverli in modo efficiente.

Sarà fatta anche una breve panoramica delle soluzioni principali studiate e una descrizione di quella finale, il cui studio sarà approfondito nei successivi capitoli.

4.1 Utilità del sistema

E' auspicabile rendere il sistema di ispezione automatizzato, utilizzando un braccio robotico al fine di migliorare le condizioni di lavoro, la sicurezza dell'utente e la ripetibilità e controllo sulla gestione del processo.

Utilizzare un sistema automatizzato consente di ottenere macchine e sistemi veloci e coordinati che aumentano il rendimento in tutte le sue parti.

Inoltre l'automatizzazione nell'ispezione dei depositi permette un intervento sui fusti ridotto al minimo da parte degli ispettori, al contrario delle condizioni operative odierne che richiedono del personale preposto ad effettuare l'ispezione a diretto contatto con l'ambiente contaminato.



(a)



(b)

Fig. 4.1 a), b) Esempi di ispezione non automatizzata.

4.2 LightWave-NewTek

Uno strumento valido utilizzato è stato il programma LightWave 3D che ha permesso di simulare l'ambiente di lavoro e di verificare eventuali problematiche legate al dimensionamento e ai vincoli meccanici che riducono lo spazio operativo del sistema di ispezione.

Lightwave 3D è un sistema grafico di modellazione e rendering completo disponibile su tutte le piattaforme, è un programma leggero, non intasa il sistema, gestisce la memoria in modo elegante e non si inchioda quasi mai.

Lightwave è costituito da due moduli:

Modeler-> per la modellazione, rappresenta uno spazio di lavoro caratterizzato da quattro finestre e una serie di pulsanti di azione che permettono di realizzare qualsiasi oggetto si voglia.

Layout-> per l'allestimento della scena, strutturalmente simile al modeler permette di allestire una vera e propria scena con viste delle telecamere e delle luci.

I due moduli sono eseguibili separatamente e un modulo di comunicazione tra i due (HUB) si occupa della loro connessione.

Il Rendering 3D è un ottimo strumento per ottenere presentazioni di alto realismo e impatto visivo, per studi di fattibilità e progettazione architettonica.

Tramite l'utilizzo di questo potente programma, sono state realizzate tutte le immagini che si vedranno in seguito del sistema progettato e un video che mostra la modalità con cui esso lavora.

4.3 Ambiente di lavoro

Un possibile scenario per un deposito su cui studiare una soluzione è il seguente:

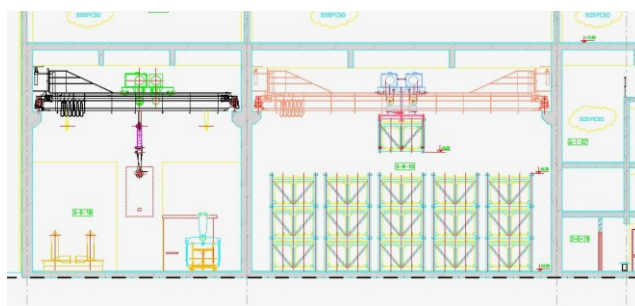


Fig. 4.2 Vista laterale

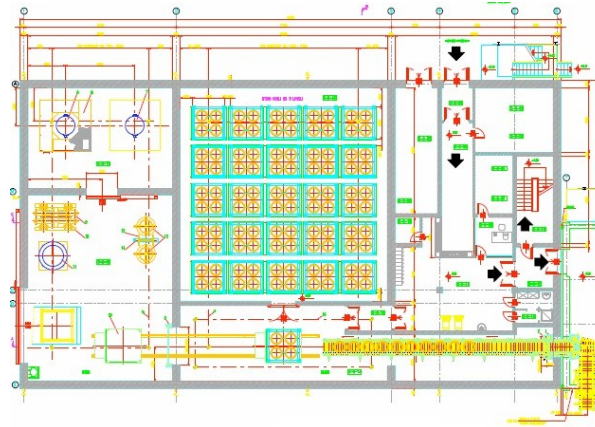


Fig. 4.3 Vista dall'alto

Nelle due figure in alto vediamo un progetto di massima di un deposito che si è preso in esame per lo studio, la progettazione e la realizzazione di un possibile sistema di monitoraggio e ispezione.

4.4 Requisiti per il sistema robotico di ispezione

Il sistema deve assolvere alcuni requisiti:

- Esecuzione di compiti tipici nell'ambito industriale di manutenzione, ispezione e intervento. Il sistema deve essere in grado di offrire supporto nell'individuare guasti, malfunzionamenti o danneggiamenti e la possibilità di manipolare componenti elettronici al fine di sostituire o riparare gli stessi.
- Controllo di sicurezza, il sistema dovrebbe essere in grado di monitorare la sicurezza dell'utente. Nel momento in cui viene registrato qualcosa di anomalo, il sistema dovrebbe dare un segnale di allarme.
- Comunicazione delle informazioni raccolte (rilevazioni sensoriali, immagini, dati) tramite un'interfaccia semplice.
- Controllo remoto real-time.

Le specifiche di progetto sono economicità, semplicità e affidabilità, per cui si è optato per un sistema che agisca dall'alto, che si integri il più possibile con le strutture preesistenti e che rispetti le esigenze di fattibilità tecnico-economica.

Agisca dall'alto perché, come possiamo ben vedere dal progetto del deposito, non si ha molto spazio nei corridoi tra i pallet di fusti, quindi utilizzare un robot su ruote non è una buona soluzione.

Si integri con le strutture preesistenti: visto che un carro ponte è sempre presente in un deposito, possiamo sfruttarlo a nostro vantaggio utilizzandolo come sistema di posizionamento che agisce in modo sicuro ed efficiente dall'alto, permettendo di poter 'recuperare' il sistema di ispezione in ogni momento in modo estremamente semplice.

Rispetto delle esigenze di fattibilità tecnico-economica: si cerca di ridurre i costi e di realizzare qualcosa che sia molto semplice, trovando un accordo qualità/prezzo senza dover perdere in termini di efficienza e affidabilità.

Il sistema progettato, allo stato attuale, per assolvere tali compiti si avvale dell'utilizzo di:

- Un carro ponte che assicura il posizionamento al di sopra della struttura e sostiene il sistema di ispezione.

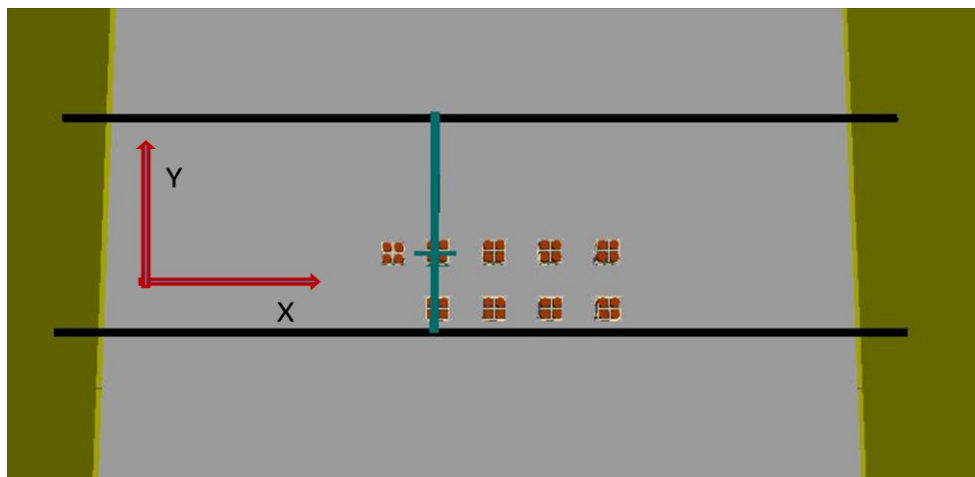


Fig. 4.4 Vista dall'alto, posizionamento x-y tramite il carro ponte

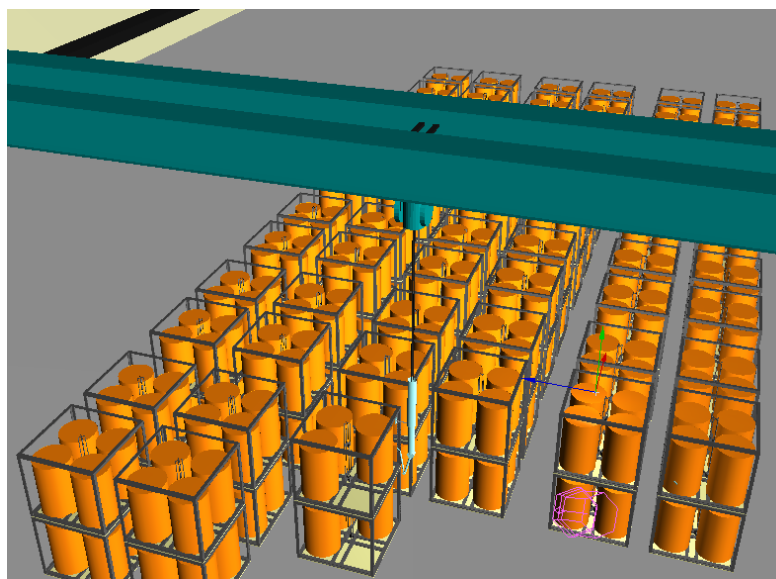


Fig. 4.5 Il carroponte sostiene il braccio robotico

- Il sistema di ispezione è costituito da un braccio flessibile (per l'ispezione nell'area dei fusti).

Il braccio flessibile è dotato di una telecamera e di un sensore di radioattività nella parte estrema (end effector) ed è costituito da 5 link interconnessi tra loro per mezzo di articolazioni, dette giunti, che ne consentono il moto relativo e assicurano una escursione dell'ordine del metro in modo da poter spazzolare tutta la superficie del fusto sia internamente alla struttura che esternamente.

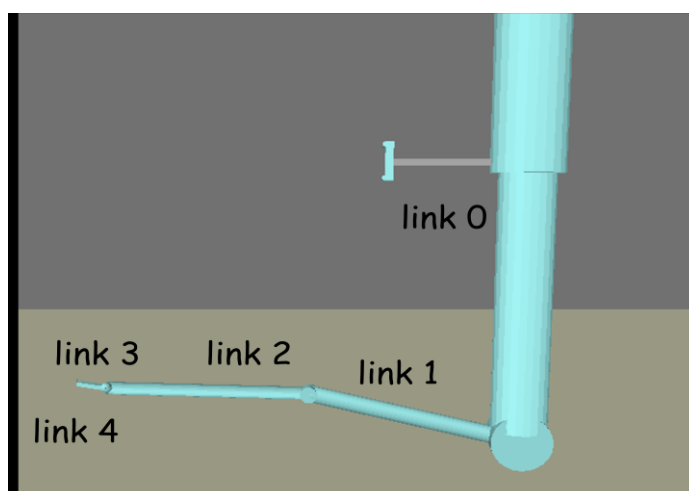


Fig. 4.6 Braccio robotico e i suoi link

La necessità è che il braccio sia il più possibile leggero e sottile ma allo stesso tempo permetta una precisione e robustezza nell'azione.

Una volta definiti i componenti del braccio, il problema principale è determinarne il corretto dimensionamento per soddisfare i requisiti richiesti e per una realizzazione semplice. Inoltre è importante lo studio della cinematica, che è uno studio analitico della geometria del movimento del manipolatore e della dinamica, studio di forze e coppie a cui è sottoposto il manipolatore in ogni sua parte.

Il braccio è sostenuto da un elettromagnete per l'aggancio e l'ancoraggio con la struttura di ferro.

Il carico deve essere più leggero possibile in quanto il braccio deve essere sottile per potersi muovere in uno spazio limitato tra i fusti; tutta la struttura sostenuta dal carro ponte deve essere leggera e in questo senso si faranno delle scelte progettuali ben precise.

4.5 Realizzazione di un pallet

E' stato necessario il supporto tecnico di un esperto meccanico per la realizzazione del prototipo in quanto nel passaggio dalla fase di progetto a quella di realizzazione sorgono diverse problematiche meccaniche che necessitano di una supervisione da parte di un operatore con una certa esperienza.

Il primo passo è stato quello di realizzare il cestello base (chiamato d'ora in poi 'struttura base') dove alloggiano quattro fusti, secondo specifiche di progetto fornite dalle tavole Ansaldo. Avendo libertà nella scelta della particolare forma della struttura in un primo momento si è pensato di dotare ogni lato di aste oblique per garantire una robustezza in fase di sollevamento della struttura stessa.

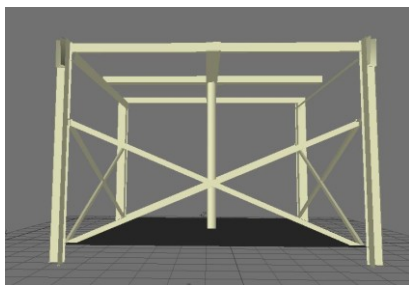


Fig. 4.7 Visione frontale della struttura in ferro

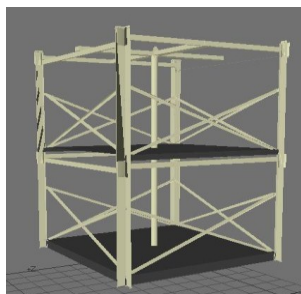


Fig. 4.8 Due strutture in pila

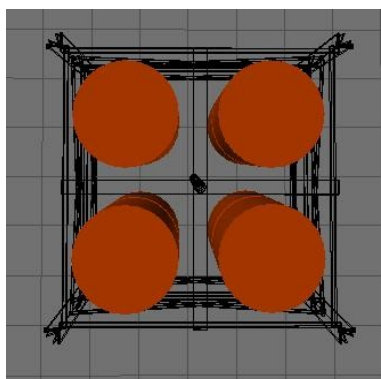
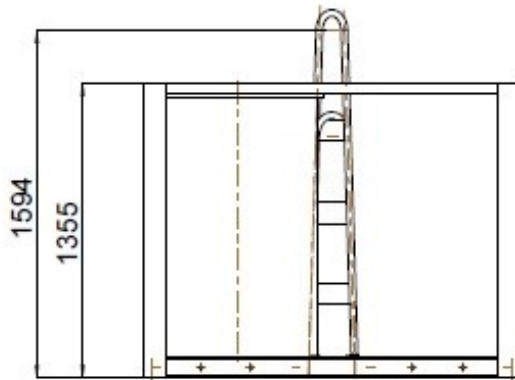


Fig. 4.9 Vista dall'alto della struttura con i fusti

In secondo luogo sono stati realizzati i fusti, o meglio sagome di fusto, per rendere più realistico lo scenario di operatività.

4.5.1 Dimensionamento



Ufficio Tecnico INFN-LNS
Drawn, Controlled and
Approved by Piscopo Massimo

Mat: fe360

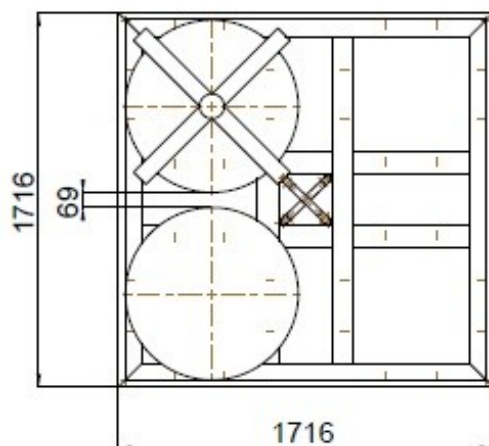


Fig. 4.10 Struttura in ferro
Lato: 1,716 m
Distanza tra due fusti: 6,9 cm
Distanza telaio-struttura: 20 cm

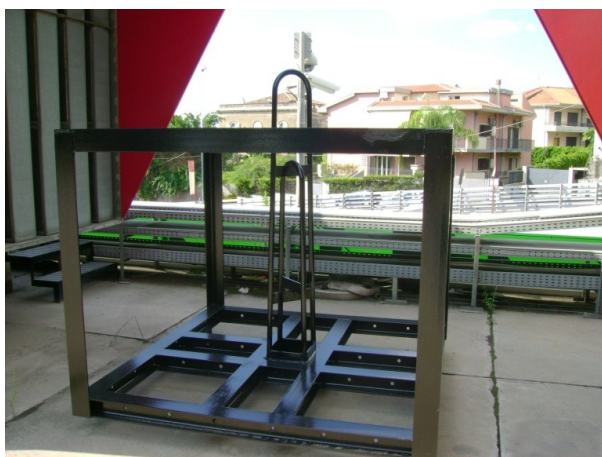


Fig. 4.11 Struttura base realizzata presso l' INFN-LNS

Per definire le caratteristiche della struttura in ferro è stato necessario fare dei calcoli sul peso che questa deve sostenere, in modo da evitare un' incurvatura della stessa e garantire la robustezza in ogni situazione.

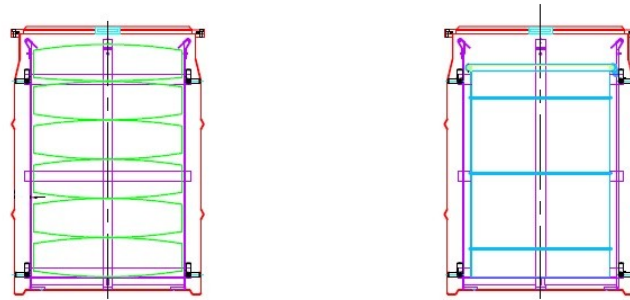


Fig. 4.12 Assemblaggio fusto

Il fusto è costituito da delle piastre (o pizze) supercompattate da 220 litri che contengono il materiale radioattivo mescolato a cemento. Le piastre sono inserite all'interno del cestello, che viene riempito fino all'orlo con una malta cementizia e infine sigillato.

Peso del fusto:

$$p_{fe} = 7,87 \text{ g/cm}^3 = 7870 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{fe} = 0,012078 \text{ m}^3$$

$$P_{fe} = V_{fe} p_{fe} = 95,058 \text{ kg}$$

$$p_{ce} = 2,3 \text{ g/cm}^3 = 2300 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{ce} = 0.22 \text{ m}^3 \text{ (220 l di cemento)}$$

$$P_{ce} = V_{ce} p_{ce} = 506 \text{ kg}$$

$$P_{fusto} = 601,058 \text{ kg}$$



Fig 4.13 Struttura di ferro più le sagome dei fusti (i fusti sono vuoti)

4.6 Prima soluzione

Inizialmente si è pensato a due possibili soluzioni: braccio telescopico e braccio a flessione. Entrambi adatti a questo tipo di applicazione in quanto in grado di modificare la propria lunghezza e di ritirarsi offrendo la possibilità di uno spazio operativo che punta sulla profondità di affondo.

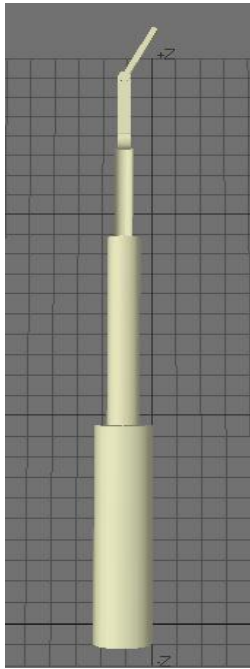


Fig 4.14 Braccio telescopico

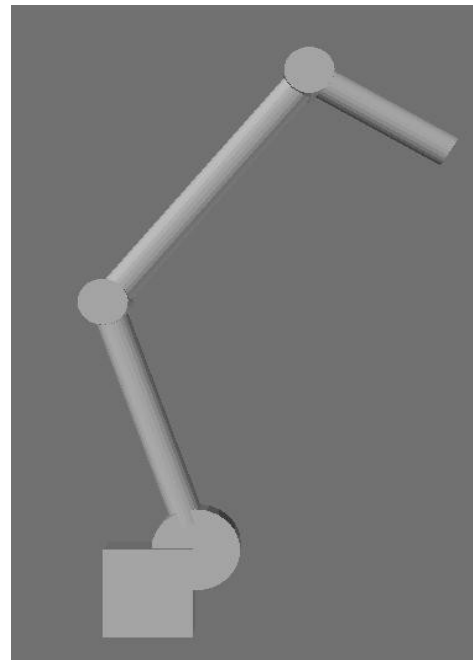


Fig 4.15 Braccio a flessione

Entrambe le soluzioni offrono aspetti positivi e negativi in termini di semplicità nel controllo, riduzione di ingombri, costo di realizzabilità, peso etc.

La scelta è ricaduta inizialmente sul braccio telescopico soprattutto perché è sembrata la configurazione più efficiente nell'ambito dell'ambiente in cui deve operare (ha una migliore manipolabilità), è possibile ridurre al minimo l'ingombro ed è la soluzione più elegante.

Sistemi telescopici:

La scelta del tipo di telescopio deve tener conto della capacità di adeguarsi alle variazioni di lunghezza richieste dall'applicazione.

Un importante requisito degli elementi telescopici è la capacità di scorrere sotto carico generando ridotte spinte telescopiche.

Le spinte telescopiche si traducono in forze assiali e momenti flettenti che agiscono sui giunti e sui supporti delle prese di moto riducendone la durata.

La capacità di scorrere sotto carico generando ridotte spinte telescopiche è espressa dal rapporto tra la spinta T e la coppia M ed è un fattore importante per la scelta degli elementi telescopici.

Minore è il rapporto T/M , minori sono le spinte agenti sui supporti della trasmissione. La lubrificazione degli elementi telescopici è fondamentale per limitare l'usura delle superfici e le spinte assiali di scorrimento.

[21]

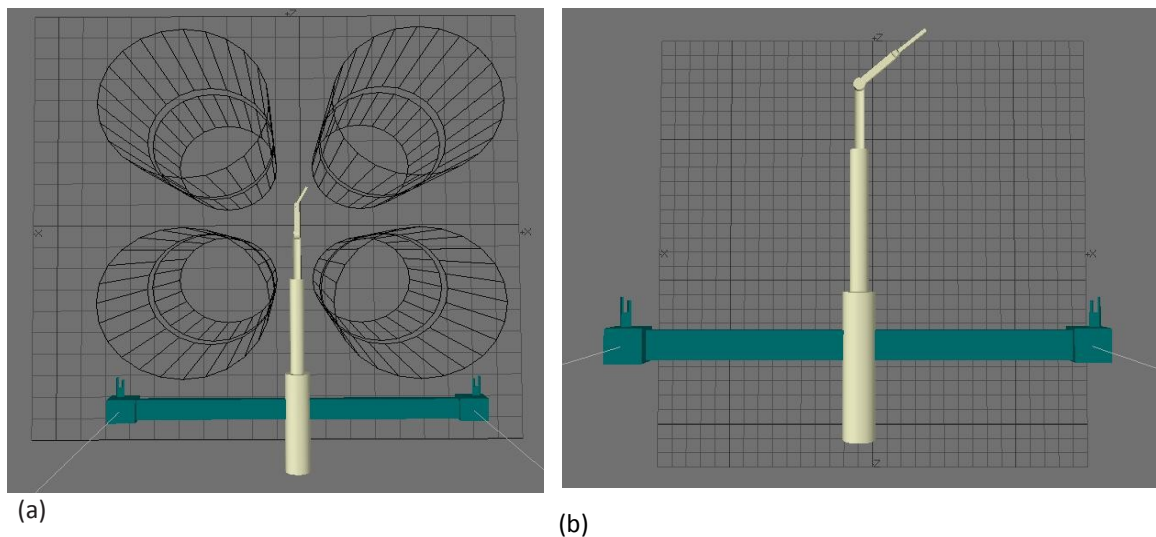


Fig 4.16 due viste dall'alto del braccio telescopico nell'ambiente di lavoro

Il sistema inoltre prevede l'utilizzo di un telaio da sostegno per il braccio telescopico, un'asta che permette lo spostamento lungo l'asse x e predispone l'aggancio e un saldo ancoraggio alla struttura di ferro che fa da cestello ai quattro fusti, tramite le pinze pneumatiche poste ad entrambi gli estremi. Questo presuppone la presenza di inviti meccanici per facilitare l'incanalamento delle pinze lungo la sezione verticale della struttura in ferro oppure si può pensare a delle pinze già predisposte con degli inviti integrati.

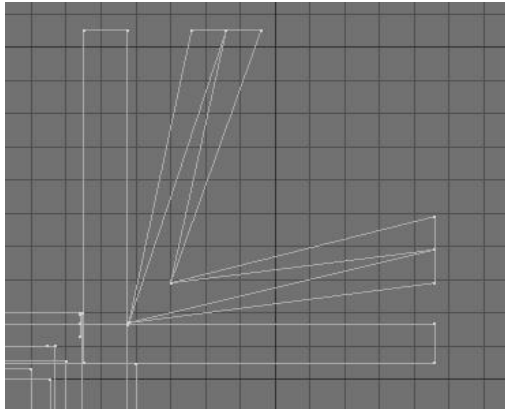


Fig. 4.17 Vista dall'alto degli Inviti angolari

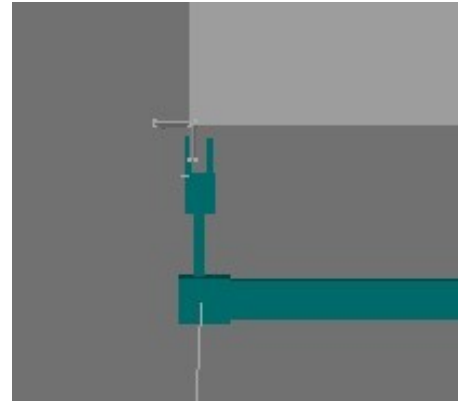


Fig. 4.18 Pinza pneumatica

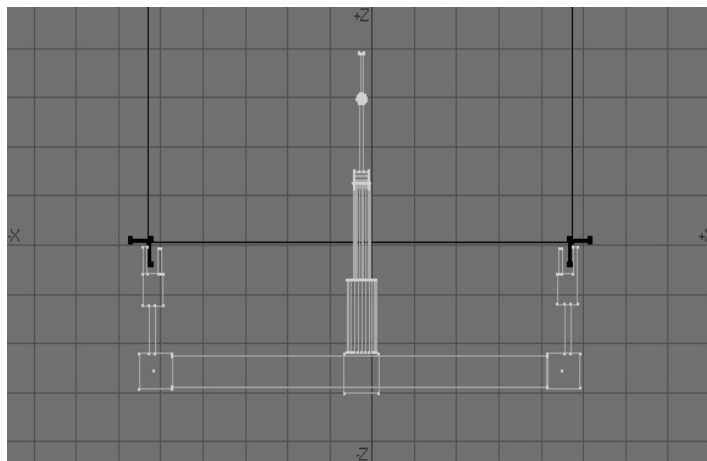


Fig. 4.19 Vista strutturale del braccio agganciato agli angolari

Si è pensato all'utilizzo di pinze pneumatiche a griffe parallele, una fissa e l'altra mobile. La forza di chiusura richiesta va determinata sia in base al peso da sollevare che alla velocità di spostamento.

Sorgono dei problemi facendo considerazioni di calcolo di coppia: le pinze devono essere più vicine possibile alla struttura in quanto devono sostenere il telaio e il braccio (che hanno un certo peso).

Si è fatta strada quindi un'idea alternativa: invece di utilizzare un sistema di pinze pneumatiche prevedere un sistema con elettromagneti che assicurano l'adesione ad una guida ferromagnetica posta verticalmente lungo la struttura in ferro.

La ruota alla base del carro ponte serve per ruotare la struttura che sostiene dai 90° ai

180°. I 2 verricelli che sostengono il telaio si muovono verticalmente assicurando l'escursione del sistema a diversa quota dal suolo.

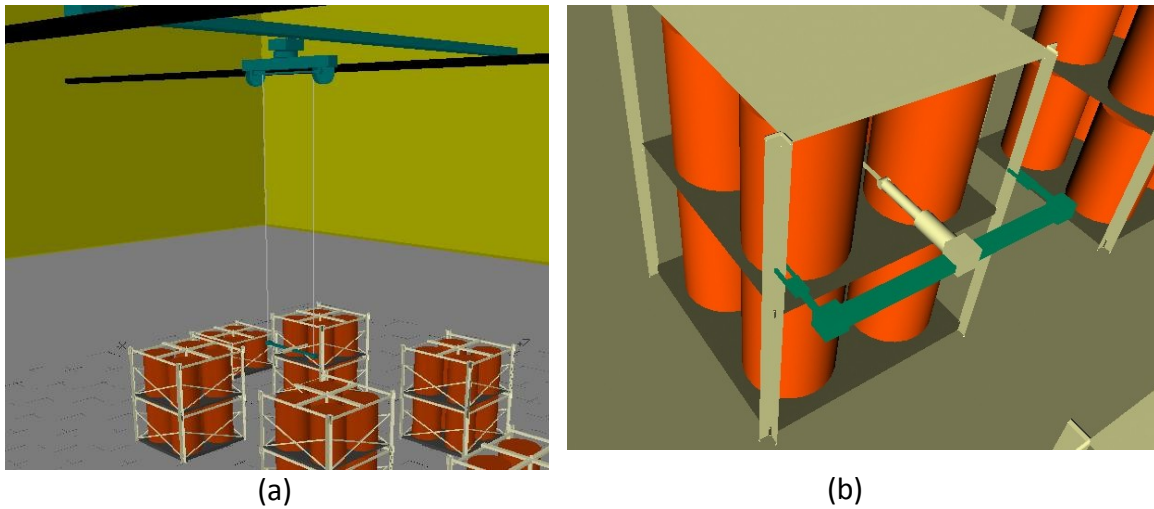


Fig. 4.20 Viste del carroponete che sostiene il sistema di ispezione

Certamente l'utilizzo di 2 verricelli implica il fatto che ci vogliono due attuatori, uno per ogni ruota, che devono muoversi in modo sincrono.

In un primo studio di progetto si è scelto di utilizzare 3 tubi di 60 cm ciascuno, l'end-effector è collegato al resto del manipolatore da un giunto rotoidale e una puleggia ed è dotato di una telecamera e di un sensore di radioattività per svolgere il suo compito di ispezione. Idealmente vorremmo utilizzare un giunto sferico (*), ma questo è impossibile da realizzare fisicamente con un solo attuttore, inoltre si può sacrificare un grado di rotazione visto che ci servono solo le rotazioni attorno l'asse x (per spazzolare il fusto dall'alto in basso) e attorno l'asse z (per andare a destra e a sinistra).

Successivamente si è passato alla considerazione di due problematiche molto importanti: determinare l'ingombro del manipolatore e il suo peso totale.

(*)Gli snodi sferici e i terminali sono costruiti in diverse esecuzioni e varie combinazioni delle superfici di lavoro, ognuna con le proprie caratteristiche che le rendono adatte a specifiche condizioni d'impiego.

Per scegliere un tipo di snodo e definirne le dimensioni, i principali fattori da considerare sono i seguenti: carichi esterni agenti, capacità di carico e durata

richiesta.

4.7 Seconda soluzione

Il sistema è costituito da:

- un CARROPONTE che sostiene una
- ASTA telescopica con un sistema di aggancio elettromagnetico e un
- BRACCIO telescopico leggero e sottile con una escursione dell'ordine del metro.

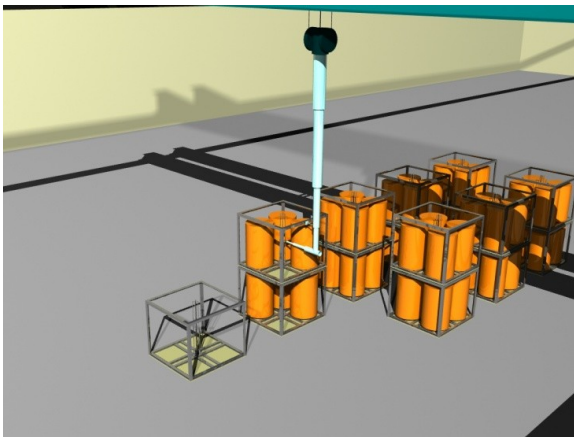


Fig. 4.21 Vista del sistema dall'alto

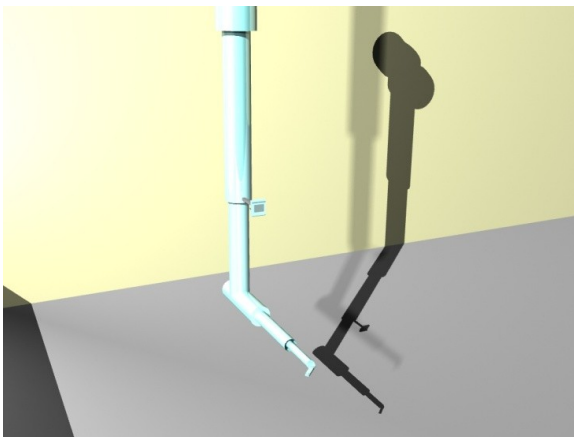
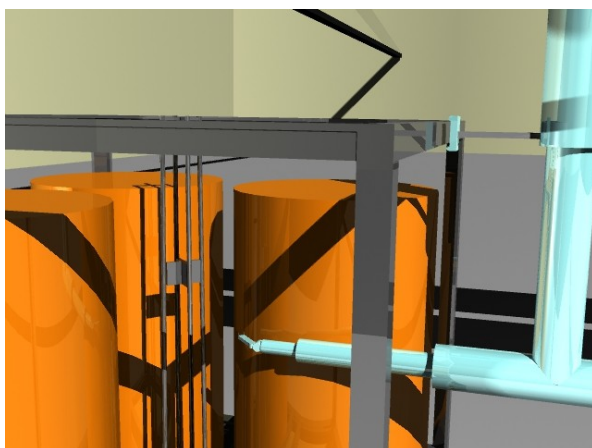
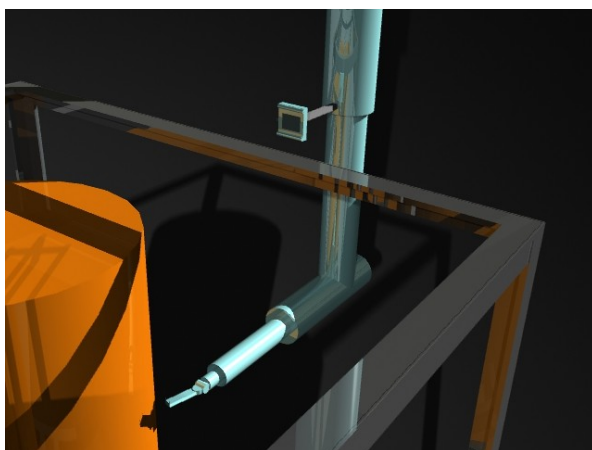


Fig. 4.22 Il braccio telescopico è sostenuto da un altro braccio telescopico



(a)



(b)

Fig. 4.23 a) e b) Il braccio si ancora alla struttura

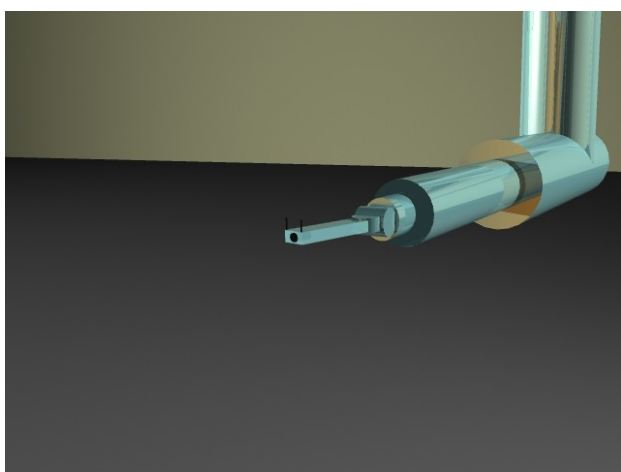


Fig. 4.24 Particolare dell'end-effector, le due 'antenne' rappresentano delle aste di supporto per la telecamera o per qualsiasi sensore si voglia installare.

L'utilizzo dei un braccio telescopico 'portante' al posto del meccanismo a verricelli e

telaio, rende il sistema più compatto e permette di eliminare i problemi dell'aggancio pneumatico: difficoltà nell'incanalamento lungo gli angolari della struttura e di mantenimento di una posizione di equilibrio, infatti le pinze potrebbero agganciarsi in modo non perfettamente simmetrico causando una inclinazione del telaio e un corrispondente sbilanciamento dell'intero sistema.

4.8 Terza soluzione (attuale)

Questa soluzione è uguale alla seconda, la cosa che cambia è che il braccio non è più telescopico ma a flessione. Tale scelta è dovuta a delle considerazioni di natura progettuale e soprattutto dai fattori non trascurabili di tempo, costo e semplicità.

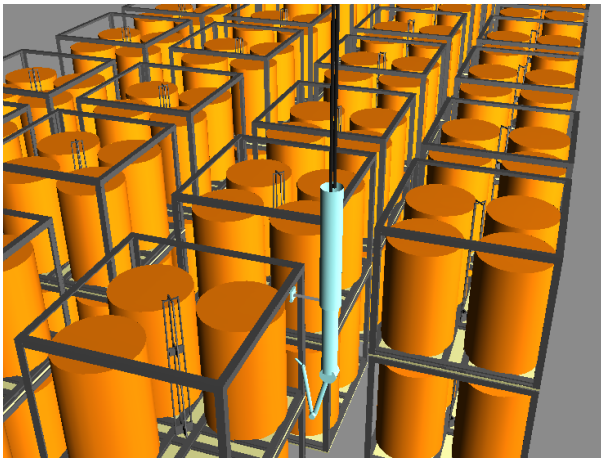


Fig. 4.25 Vista dall'alto, il sistema risulta più compatto e semplice da manovrare

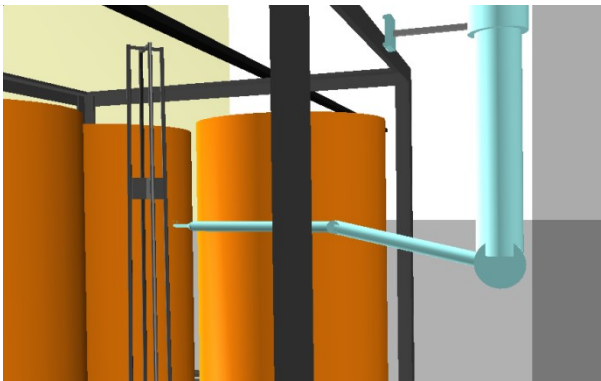


Fig. 4.26 Il braccio affonda tra i due fusti

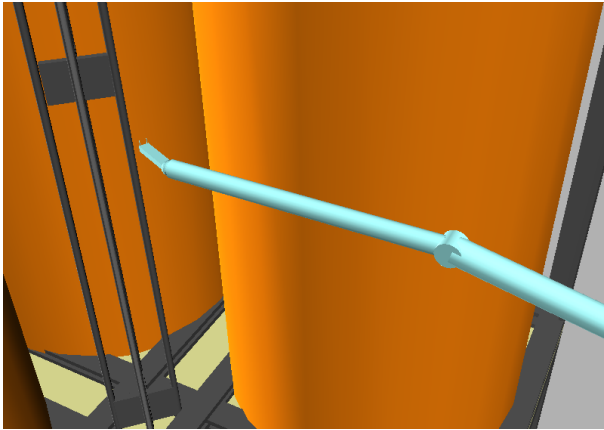


Fig. 4.27 L'end-effector spazzola la superficie dei fusti internamente.

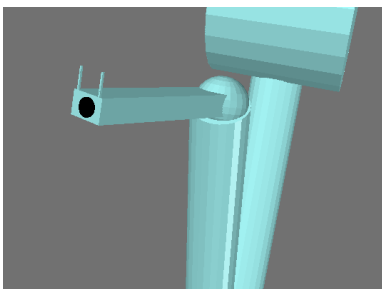


Fig. 4.28 Particolare dell'end-effector, collegato idealmente con un giunto sferico al resto del braccio

Una volta scelta la soluzione che sembra migliore, passiamo allo studio della fattibilità del sistema, in modo da individuare le parti e le componenti di cui esso sarà dotato.

4.9 Sistema di aggancio

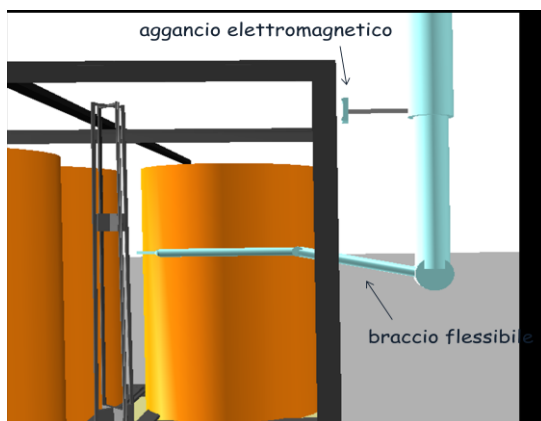


Fig. 4.29 Il braccio si avvicina alla struttura consentendo la presa dell'elettromagnete

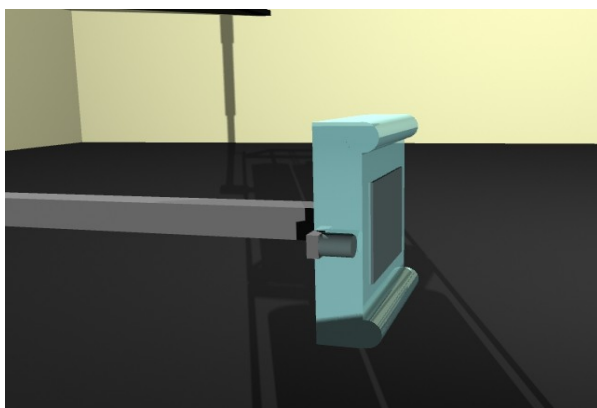


Fig. 4.30 Una telecamera affiancata all'elettromagnete permette di semplificare la manovra di avvicinamento alla piastra

Il sistema di aggancio magnetico permette di limitare l'ondeggiamento provocato dalle funi del carroponte che reggono l'intero sistema. In questo modo il sistema si ancora alla struttura in ferro e il braccio parte da una posizione fissa.

L'elettromagnete deve essere in grado di sostenere il peso del braccio e inoltre necessita l'utilizzo di una telecamera di 'assistenza' nella fase di avvicinamento alla struttura e centraggio della placca di ferro in modo da consentire una presa immediata e la forza di ritenuta massima.

4.10 Sistema di attuazione

Si individuano tre sistemi di attuazione principali: pneumatico, idraulico ed elettrico. In base alle varie applicazioni ed esigenze di lavoro si farà una scelta opportuna.

Sistema pneumatico: si trasforma l'energia pneumatica fornita da un compressore in energia meccanica tramite pistoni o turbine ad aria. Si utilizza aria compressa. La regolazione quindi non è più di tipo continuo ma aperto/chiuso. L'attuatore pneumatico è formato da un sistema cilindro-pistone.

Il gruppo di generazione dell'aria lavora in modo da mantenere costante la pressione all'interno del serbatoio di accumulo. Il compressore spesso lavora in modo intermittente.

L'aria è un fluido non tossico e può essere restituito all'atmosfera senza particolari trattamenti, questo comporta una serie di vantaggi e differenze in termini impiantistici non indifferenti (impianti aperti e non pericolosi).

Sistema idraulico: si trasforma l'energia idraulica immagazzinata in un serbatoio di accumulazione, in energia meccanica mediante opportune pompe.

Realizzati con la presenza di una o più camere variabili sfruttando coppie pistone-cilindro.

Il generatore lavora in modo continuo spesso a portata costante, elementi di accumulo servono per ridurre transitori, valvole limitatrici di pressione dissipano per laminazione energia/portata in eccesso.

Il fluido per effetto di rendimenti/laminazioni/perdite di carico si riscalda, quindi necessita un'azione di raffreddamento, effettuata attraverso pareti tubazioni e nel serbatoio della centralina dove si ha la miscelazione con fluido proveniente da altre utenze. Nel caso di assenza del serbatoio, è necessaria la presenza di refrigeratori.

Per quanto riguarda la pressione in un liquido il volume è approssimativamente costante quindi si possono ottenere delle pressioni molto elevate (anche 500 bar) con potenze modeste e variazioni volumetriche molto piccole.

Invece in un gas alla compressione è associata una grande variazione di volume che rende poco agevole e conveniente l'aumento della pressione di esercizio oltre i 10/15 bar.

Vantaggi:

- Ottimo rapporto potenza/peso
- Niente surriscaldamento in situazioni statiche
- Autolubrificati
- Il fluido circolante aiuta lo smaltimento del calore

Svantaggi

- Costo elevato
- Basso rendimento della conversione di potenza

- Indispensabile centrale idraulica di alimentazione
- Difficoltà di miniaturizzazione
- Perdite di liquidi, olio (inquinamento ambiente)

I servomotori idraulici sono basati sul principio di funzionamento di variazione di volume sotto l'azione di un fluido in pressione.

Sistema elettrico: si trasforma l'energia elettrica, fornita dalla rete di distribuzione (o batterie) in energia meccanica.

In robotica:

- Servomotori a corrente continua a magneti permanenti
- Servomotori a commutazione elettronica (Brushless)

Vantaggi

- Disponibilità diffusa di sorgente di alimentazione
- Facilità di controllo
- Buon rendimento di conversione di potenza
- Manutenzione agevole
- Non inquinanti nell'ambiente di lavoro

Svantaggi

- Problemi di surriscaldamento in situazioni statiche (sol. freni di stazionamento)
- Necessità di particolari protezioni in ambienti critici.

Generalmente gli attuatori utilizzati in robotica sono proprio quelli elettrici

4.11 Set di sensori

Per poter svolgere il suo compito di ispezione e monitoraggio, il sistema deve essere dotato di una serie di sensori e apparecchiature:

- Videocamera a colori, per individuare eventuali danneggiamenti alla superficie esterna del fusto.
- Sistema di lettura di barcode/RFID, per individuare in quale fusto si sta effettuando l'ispezione, ogni fusto sarà infatti dotato di un identificativo che permette di riconoscerlo univocamente.
- Sensore per centraggio del fusto.
- Computer on-board per il controllo delle apparecchiature e dei dispositivi elettronici.
- Inclinometro, il braccio deve costantemente sapere quale è la sua posizione rispetto ad un sistema di riferimento fisso, come il pavimento.

Al momento il sistema di ispezione è dotato di una videocamera e di un fotorivelatore.

4.12 Tecniche di navigazione

I sistemi robotici ricevono informazioni circa l'ambiente che li circonda attraverso i sensori e modificano il proprio stato secondo i compiti imposti attraverso gli attuatori.

Sempre più spesso i robot, per compiere appieno le proprie funzioni, hanno necessità di conoscere l'ambiente in cui operano, per fare questo ci si avvale dell'utilizzo di:

- Mappe interne dell'ambiente, originate da un file CAD, una mappa è una rappresentazione matematica o geometrica della conoscenza del mondo.
- Tecniche di Planning, il cui obiettivo è determinare una traiettoria che il robot deve eseguire per raggiungere una configurazione finale a partire da una configurazione iniziale (la sua posizione attuale) evitando gli ostacoli.
- Metodi e Sistemi di localizzazione, tramite ad esempio utilizzo di landmarks (*) attivi o passivi, naturali o artificiali, dead reckoning- odometria (ma questo

vale per i robot su ruote) o sistemi di localizzazione alternativi map-based(**) o ancora boe attive(***)).

- Controllo remoto (via sw tramite utilizzo di un joystick)

Il problema della navigazione può essere definito come il problema di raggiungere una posizione finale partendo da una posizione iniziale, specificate in termini geometrici o di stato sensoriale, evitando gli ostacoli.

(*)I Landmark sono delle forme caratteristiche che il robot può riconoscere utilizzando i propri sistemi sensoriali. I Landmark possono essere forme geometriche (es. rettangoli, linee, cerchi, ..) e possono contenere informazioni aggiuntive (es. Barcode). I Landmark sono scelti in modo tale da essere facilmente riconosciuti dal robot. Posizione e caratteristiche dei Landmark devono essere memorizzate nella base di dati del robot.

(**)I sistemi di localizzazione basati sulle mappe, conosciuti anche come *map matching*, utilizzano uno o più sistemi sensoriali per costruire una mappa locale. La mappa locale è poi confrontata con una mappa globale precedentemente memorizzata. Se un match viene trovato, il robot calcola la sua posizione e orientamento nello spazio. Una mappa può essere un modello CAD o può essere costruita utilizzando i sistemi sensoriali del robot

(***)I sistemi di localizzazione con boe attive sono costituiti da un insieme di dispositivi ricevitori/trasmittitori (boe) di cui è conosciuta la posizione assoluta nell'ambiente e che sono rilevabili da un sensore trasmettitore/ricevitore posto sul robot. L'unità a bordo del robot è un sensore rotante che invia un segnale laser recepitibile dalle boe e che codifica l'angolo di rotazione della torretta. Le boe ricevono il segnale laser e rispondono con un segnale ad infrarossi, recepitibile dalla torretta rotante, che codifica l'angolo di rotazione ricevuto e l'identificativo.

Capitolo 5

Studio della struttura meccanica del braccio

In questo capitolo si affronta lo studio del braccio robotico , partendo dalla determinazione della cinematica, per capire come esso si muove e della dinamica, per vedere quali sono le forze e le coppie in gioco durante la movimentazione.

5.1 In-Bot

In-Bot (Inspection Robot) è un robot a 5 gradi di libertà (g.d.l.): 3 rotazioni (pitch), 1 rotazione (yaw), 1 traslazione (asse z).

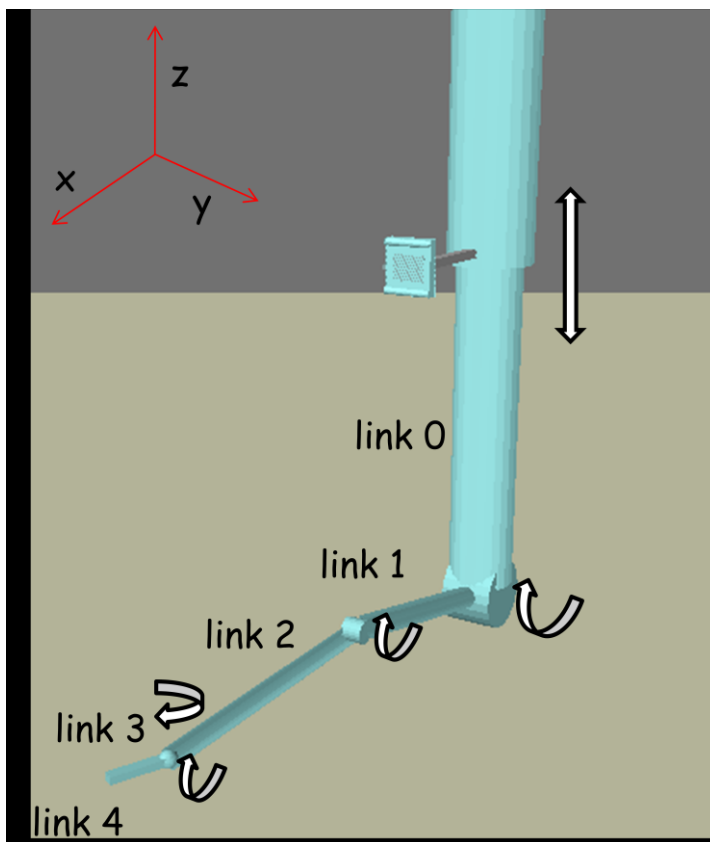


Fig 5.1 g.d.l. del braccio robotico

La struttura meccanica del robot è costituita da una sequenza di bracci interconnessi tra loro per mezzo di articolazioni, dette giunti, che ne consentono il moto relativo. I cinque giunti che collegano i link che lo compongono sono individuati con i nomi di: g1, g2, g3, g4 e g5.

I giunti sono movimentati tramite motori in corrente continua dotati di rapporti di riduzione diversi per ogni giunto, l' end-effector è movimentato per mezzo di due servomotori (pitch e yaw), esso in realtà è costituito da due parti collegate tramite i servo per implementare i due gradi di libertà, quindi considero due link (3 e 4). Per conoscere la posizione angolare di ogni giunto, i motori sono dotati di encoder di tipo incrementale montati in asse con l'albero di ogni singolo motore.

Sarà necessaria un' operazione di homing per portare il robot ad una posizione iniziale conosciuta, per esempio utilizzando dei microinterruttori che vengono chiusi quando l'angolo del giunto relativo è ad una posizione nota.

5.1.1 Spazio di lavoro

Spazio di lavoro del robot : regione descritta dall'origine della terna utensile quando ai giunti del manipolatore si fanno eseguire tutti i movimenti possibili.

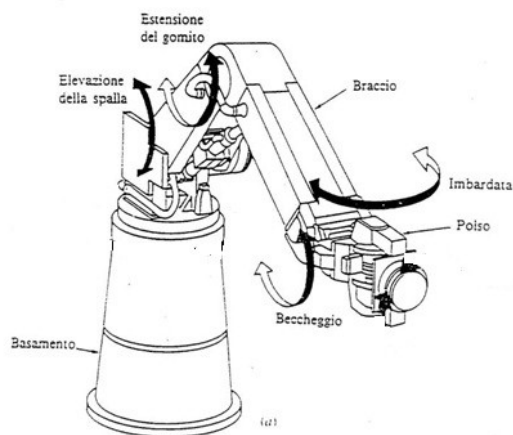


Fig 5.2 Spazio di lavoro di un manipolatore a 4 g.d.l.

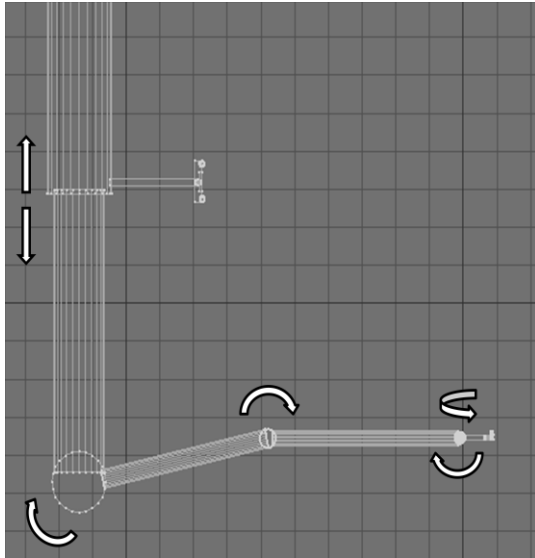
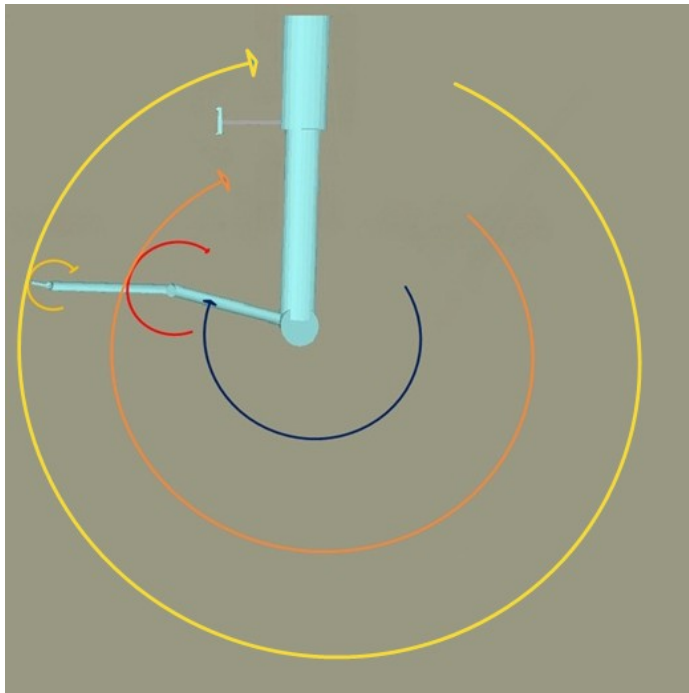
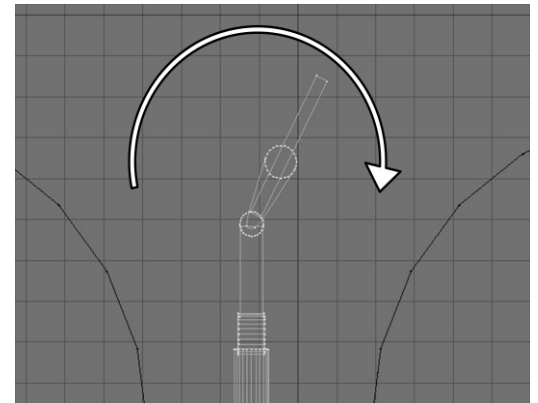


Fig 5.3 Spazio di lavoro del robot a 5 g.d.l.



(a)



(b)

Fig. 5.4 (a) e (b) spazio operativo

5.1.2 Sistemi di riferimento

Si vuole rappresentare la posizione finale dell' end-effector rispetto alla terna base fissa, per far questo si deve fissare un sistema di riferimento per ogni giunto secondo la convenzione di Denavit-Hartenberg.

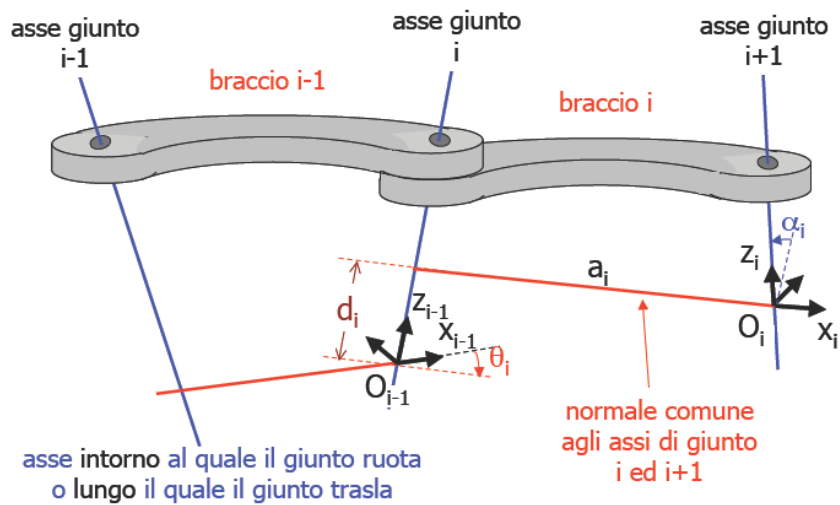


Fig 5.4 Riferimento per la determinazione dei sistemi di ogni giunto

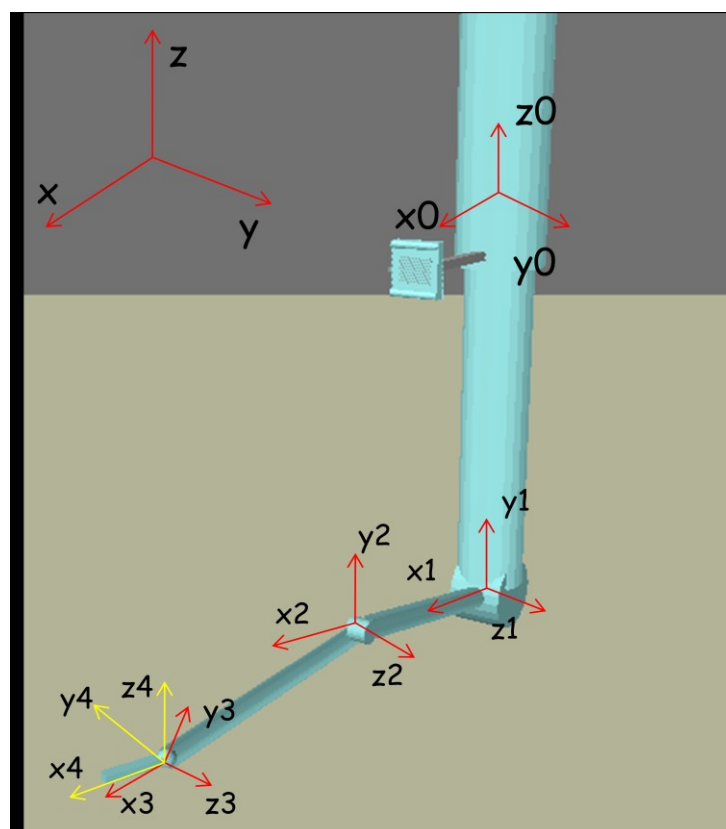


Fig 5.5 Sistemi di riferimento del braccio

Per il giunto di base, sistema di riferimento $(Oxyz)_0$, si è scelto l'asse z_0 lungo l'asse di traslazione del giunto; il centro del sistema di riferimento è stato scelto arbitrariamente nel centro della base del braccio, gli assi x_0 e y_0 sono stati fissati

arbitrariamente sulla base del robot in un piano normale a z_0 in modo da formare una terna destrorsa.

L'asse z_1 è posto lungo l'asse di rotazione del giunto g_2 e l'origine o_1 del sistema si trova nell'intersezione tra la normale agli assi z_0 e z_1 e l'asse z_1 . L'asse x_1 è diretto lungo la normale comune agli assi z_0 e z_1 , l'asse y_1 è determinato di conseguenza per completare la terna levogira.

L'asse z_2 è fissato sull'asse di rotazione del giunto g_3 , l'origine o_2 si individua dall'intersezione tra la normale agli assi z_1 - z_2 e l'asse z_2 . L'asse x_2 è fissato lungo la direzione della normale comune agli assi z_1 - z_2 , l'asse y_2 è scelto in modo da completare la terna levogira.

L'asse z_3 è fissato lungo l'asse di rotazione del giunto g_4 e l'origine o_3 di questo sistema si trova facendo l'intersezione tra la normale agli assi z_2 - z_3 e l'asse z_3 . L'asse x_3 è diretto lungo la normale comune agli assi z_2 - z_3 , l'asse y_3 completerà la terna levogira.

Infine l'asse z_4 è posto lungo l'asse di rotazione del giunto g_5 , l'origine del sistema o_4 si trova dall'intersezione degli assi z_4 e z_3 , l'asse x_4 è scelto lungo la direzione della normale comune a z_3 e z_4 , l'asse y_4 completerà la terna levogira.

Per quanto riguarda l'end-effector si pone l'origine nel centro del punto terminale dell'utensile, l'asse a è stato posizionato lungo la direzione di x_4 , l'asse n viene preso normale sia a z_4 che ad a e infine l'asse s completa la terna.

Una volta definite le terne solidali ai singoli giunti, la posizione e l'orientamento della terna i rispetto alla terna $i-1$, sono completamente definiti anche i seguenti parametri:

- a_i , distanza fra z_{i-1} e z_i (costante = "lunghezza" braccio i) ;
- α_i , angolo di twist tra z_{i-1} e z_i intorno a x_i (costante) ;
- d_i , distanza fra x_{i-1} e x_i misurata lungo la direzione di z_{i-1} (parametro variabile in un giunto prismatico);
- θ_i , angolo fra l'asse x_{i-1} e x_i attorno a z_{i-1} (parametro variabile in un giunto rotoidale).

Parametri di Denavit-Hartenberg (D-H):

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
0	0	$\pi/2$	q_1	0
1	a_2	0	0	q_2
2	a_3	0	0	q_3
3	a_4	0	0	q_4
4	a_5	$\pi/2$	0	q_5

5.2 Cinematica diretta

L'obiettivo della cinematica è quello di ricavare la posizione dell' end-effector partendo dalle configurazioni dei giunti. Dalla determinazione dei sistemi di riferimento secondo la convenzione (D-H) si è in grado di determinare la matrice di trasformazione di ogni terna, che rappresenta il passaggio dal sistema di riferimento i a quello $i+1$, quindi siamo in grado di determinare la posizione dell'end-effector semplicemente considerando la matrice di rotazione complessiva, che è espressa come successione di rotazioni parziali, ciascuna delle quali è definita rispetto alla rotazione precedente (rotazione in terna corrente).

La composizione di rotazioni successive rispetto alla terna corrente si ottiene per moltiplicazione da sinistra verso destra delle matrici delle singole rotazioni, nell'ordine della rotazione.

La matrice di rotazione rappresenta una trasformazione di coordinate che mette in relazione le coordinate di un punto in due terne differenti con origine comune. Inoltre rappresenta l'operatore che permette di ruotare un vettore (nella stessa terna), di un angolo prefissato, attorno ad un generico asse di rotazione nello spazio.

La matrice di trasformazione omogenea tiene conto non solo delle rotazioni, ma anche delle traslazioni, si comporta come la matrice di rotazione tranne per il fatto che essa non è ortonormale ($A^{-1} \neq A^T$).

Calcolando le matrici di trasformazione omogenea si ha:

$$A_i^{i-1}(q_i) = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nello specifico:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} c_{\theta_2} & -s_{\theta_2} & 0 & a_2 c_{\theta_2} \\ s_{\theta_2} & c_{\theta_2} & 0 & a_2 s_{\theta_2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} c_{\theta_3} & -s_{\theta_3} & 0 & a_3 c_{\theta_3} \\ s_{\theta_3} & c_{\theta_3} & 0 & a_3 s_{\theta_3} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} c_{\theta_4} & -s_{\theta_4} & 0 & a_4 c_{\theta_4} \\ s_{\theta_4} & c_{\theta_4} & 0 & a_4 s_{\theta_4} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^0(q) = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3$$

Con l'utilizzo del Robotics toolbox di Matlab definisco il manipolatore e vedo le posizioni che può assumere.

5.3 Cinematica inversa

Il problema cinematica inverso permette di determinare il valore delle variabili di giunto a partire dalla posizione e orientamento dell' end-effector.

A differenza della cinematica diretta, che ammette sempre una soluzione, il problema cinematico inverso potrebbe avere:

- Soluzioni multiple, quando esistono più modi per posizionare i link
- Infinite soluzioni, manipolatori ridondanti con infiniti modi per posizionare i link
- Nessuna soluzione ammissibile, quando la configurazione non appartiene allo spazio di lavoro del manipolatore

Il calcolo della cinematica diretta fornisce la matrice

$$T_4^0(q) = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Si cerca di determinare il vettore $q=[d_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$ tale che l'organo terminale si trovi in un punto desiderato.

Utilizzando la funzione $q=ikine(RobIn,T)$ si può calcolare la cinematica inversa per il robot RobIn tramite la matrice di trasformazione omogenea T, che rappresenta la configurazione dell'end-effector nello spazio operativo, restituendo in uscita il vettore q delle variabili di giunto.

Il comando *drivebot* permette di osservare le configurazioni che il braccio assume al variare del valore dei parametri di giunto:

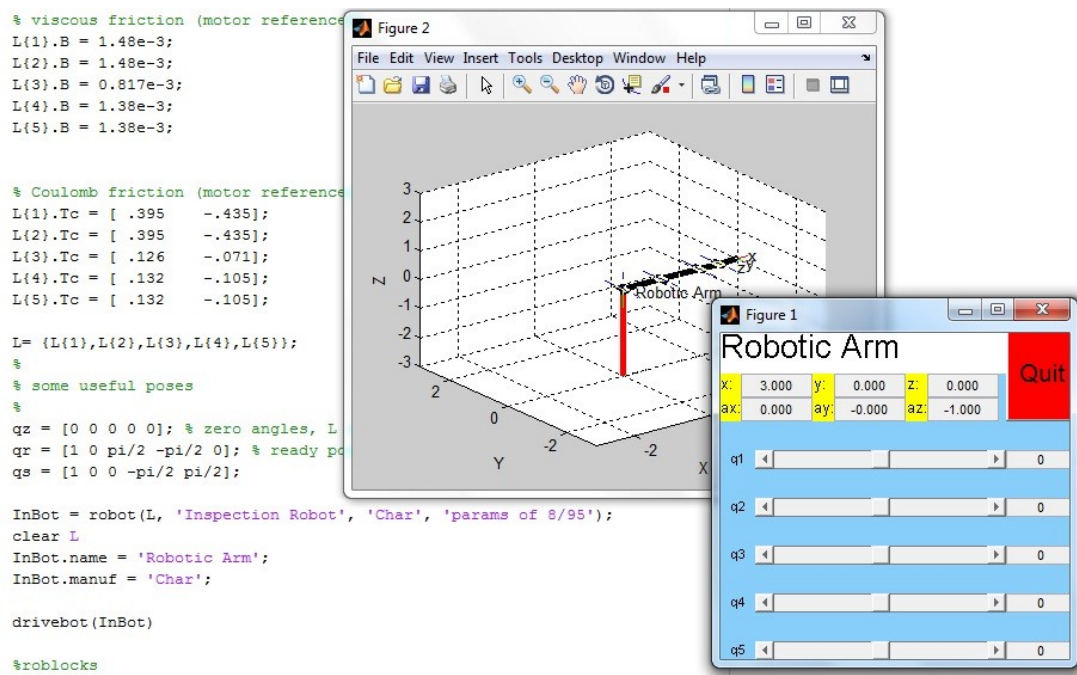


Fig 5.6 Funzione drivebot e tastiera per cambiare i valori dei q

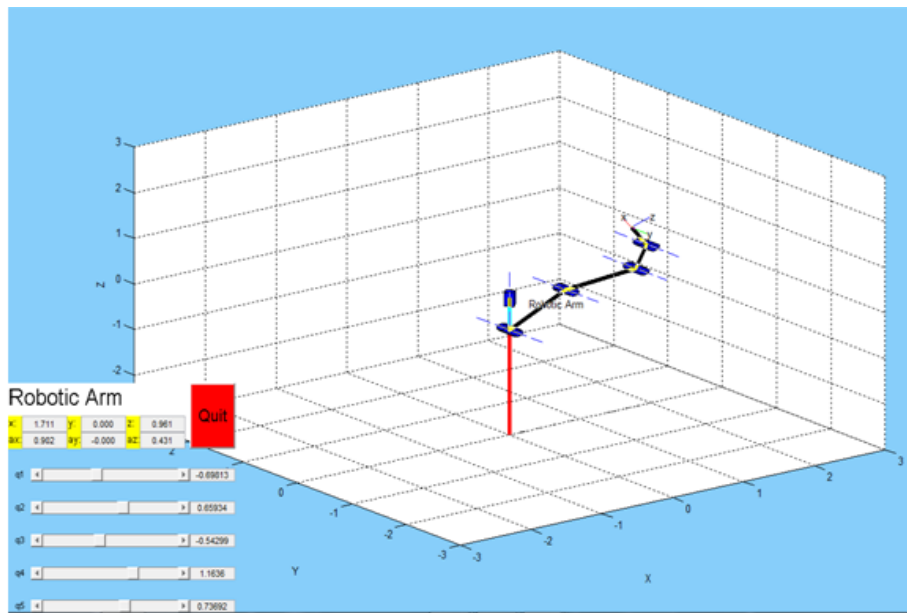


Fig. 5.7 es. di una

configurazione

5.4 Pianificazione delle traiettorie

Pianificare una traiettoria vuol dire produrre i riferimenti che assicurano l'esecuzione da parte dell'end-effector di una specifica traiettoria; i riferimenti consistono in una sequenza temporale di valori assunti dalla funzione scelta come traiettoria.

La pianificazione può essere eseguita sia nello spazio operativo (rappresentazione cartesiana dove si assegna un percorso all'end-effector) sia nello spazio dei giunti (si assegna un percorso ai giunti).

Le traiettorie generate devono essere poco onerose dal punto di vista computazionale. Devono essere minimizzati effetti indesiderati, quali ad esempio traiettorie a curvatura non regolare e si deve ottimizzare lo spostamento del giunto da una posizione all'altra cercando anche di minimizzare l'energia dissipata nello spostamento.

Pianificazione delle traiettorie nello spazio dei giunti

Il manipolatore si muoverà da una configurazione iniziale ad una finale in un tempo prefissato, è fondamentale che i giunti partano e raggiungano le configurazioni richieste.

Le posizioni e le velocità dei giunti devono essere delle funzioni continue nel tempo (può essere interessante anche la continuità nell'accelerazione).

Applichiamo un profilo di velocità cubica ai giunti espresso da:

$$q(t) = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad \text{posizione}$$

$$\dot{q}(t) = 3a_3 t^2 + 2a_2 t + a_1 \quad \text{velocità}$$

$$\ddot{q}(t) = 6a_3 t + 2a_2 \quad \text{accelerazione}$$

Pianificazione delle traiettorie nello spazio operativo

Vogliamo che l'end-effector segua un percorso predefinito portandosi da un punto iniziale ad uno finale. Entro un intervallo di tempo predefinito.

Per controllo nello spazio operativo si intende una strategia di controllo in cui l'errore viene formato direttamente sulle coordinate dello spazio operativo.

5.5 Dinamica

La dinamica di un manipolatore è lo studio della relazione esistente tra le forze applicate ed il moto risultante di un robot industriale.

Anche per la dinamica esistono due problemi di base:

- Problema dinamico diretto, che consiste nel calcolo della evoluzione di $q(t)$, $\dot{q}(t)$ e $\ddot{q}(t)$ dato il vettore delle forze generalizzate (coppie e/o forze) $\tau(t)$ applicato ai giunti:

$$\tau(t) \rightarrow \ddot{q}(t) (q(t), \dot{q}(t))$$

- Problema dinamico inverso, che consiste nel determinare il vettore $\tau(t)$ necessario per ottenere una traiettoria desiderata $\ddot{q}(t) (q(t), \dot{q}(t))$ note le eventuali forze applicate:

$$\ddot{q}(t) (q(t), \dot{q}(t)) \rightarrow \tau(t)$$

I più importanti approcci per ricavare il modello dinamico di sistemi meccanici articolati a più gradi di libertà sono:

1) metodo di Eulero-Lagrange

- formulazione energetica
- modello dinamico in forma chiusa (simbolica)
- utile nell'analisi e progetto di sistemi di controllo
- permette una facile aggiunta di contributi (ad es., la dinamica degli attuatori)

2) metodo di Newton-Eulero

- bilanciamenti di forze e coppie sui singoli corpi
- modello dinamico in forma ricorsiva (numerica)
- utile per un calcolo efficiente della dinamica inversa

Nello studio della dinamica di un manipolatore dobbiamo considerare che le Forze non conservative che compiono lavoro sono date da: Coppie di attuazione ai giunti + Coppie di attrito viscoso + Coppie di attrito statico + Coppie di attuazione a bilanciamento di forze di contatto esterne.

5.6 Studio analitico della movimentazione

Si considerino i dati imposti dal sistema di ispezione per risolvere il problema della movimentazione: il braccio robotico ha una sua massa (circa 5 Kg), deve percorrere una certa corsa, circa 1 metro, con una certa velocità.

Una cosa molto importante è scegliere il motoriduttore adatto a compiere tale movimentazione in termini di potenza, velocità angolare, momento fornito e rapporto di trasmissione. Inizialmente si trascurano le inerzie rotatorie di rotore e ingranaggi riduttori per semplificare i calcoli.

I diagrammi velocità/tempo permettono di studiare il problema cinematico, essi riportano sull'asse delle ascisse il tempo di percorrenza della corsa e sull'asse delle ordinate la velocità con cui si muoverà il braccio robotico, ottenendo così una figura geometrica che generalmente è un triangolo o un trapezio la cui area corrisponde allo spazio percorso (essendo $\text{area} = \text{velocità} \times \text{tempo}$) e la cui pendenza rappresenta l'accelerazione in ogni istante (essendo il rapporto tra velocità e tempo).

La scelta migliore dal punto di vista energetico è il diagramma a trapezio isoscele con la base minore pari ad $1/3$ di quella maggiore in quanto questa soluzione garantisce l'utilizzo della minima potenza possibile in modo da poter evitare velocità eccessive, mal sopportabili da pattini e cuscinetti a sfere.

Infatti la potenza è uguale a :

$$P = m * a * v$$

(massa x accelerazione x velocità), utilizzando un diagramma trapezoidale isoscele con le basi in tale rapporto si minimizza il prodotto accelerazione x velocità.

Se si utilizza quindi un diagramma trapezio con lati più o meno scoscesi, ha un tratto a velocità costante che mi garantisce la minimizzazione della potenza.

Allora avremo:

- Area Trapezio = (base maggiore + base minore) x altezza / 2
- Altezza = $2 \times \text{area} / (\text{base maggiore} + \text{base minore})$, considerando la base minore $1/3$ di quella maggiore
- Velocità massima = $2 \times \text{percorso} / (\text{tempo} + 1/3 \text{ tempo})$
- Accelerazione = velocità massima / $(1/3 \text{ tempo})$
- Potenza = peso x accelerazione x velocità massima
- Forza di inerzia = peso x accelerazione

Questi dati permettono di scegliere il rapporto di trasmissione più adatto, cioè quanti giri, radianti o gradi sessagesimali il motore compie per ogni metro lineare di corsa nel braccio robotico e determinare le rampe di velocità e accelerazione dei motori elettrici per poter poi definire corrente, tensione e frequenza da fornire al motore per ottenere dati movimenti.

Profilo di velocità trapezoidale

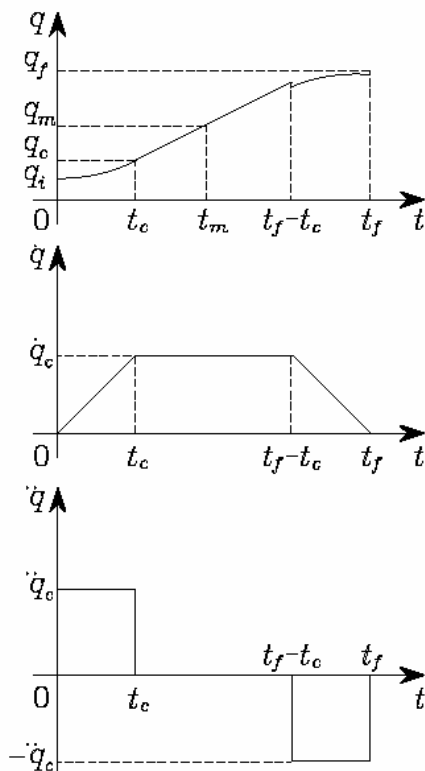


Fig 5.8 Posizione, velocità e accelerazione profilo di velocità trapezoidale

Un altro problema importante da affrontare è l'inerzia dei vari ingranaggi e rotori dei motori del meccanismo nelle sue parti rotanti. Si ha che il momento torcente = accelerazione angolare x momento di inerzia, ma si deve considerare che alla potenza necessaria ad accelerare la massa traslante si deve aggiungere quella necessaria a mettere in rotazione le masse rotanti.

Si può calcolare subito la potenza necessaria a tutto il sistema considerando le energie cinetiche che dovranno raggiungere le varie masse traslanti e rotanti, dopo aver definito il cinematismo, cioè le masse, Momenti d'inerzia, rapporti di trasmissione e velocità massime.

L'energia cinetica è data da: $\frac{1}{2}$ Momento d'inerzia x ω^2 (oppure $\frac{1}{2}$ Massa x velocità²), calcolandola per ogni organo meccanico e facendo la somma, ottengo l'energia cinetica totale del sistema.

Il lavoro che bisogna compiere per fornire energia cinetica al sistema è uguale a:

$$L = P \cdot t$$

(potenza x tempo).

Si supponga di conoscere il lavoro totale da fornire e il tempo necessario in accordo con le massime velocità ottenibili, possiamo ricavare la Potenza Massima come:

$$P_{max} = \frac{2 \times \text{Lavoro totale}}{\text{tempo transitorio di accelerazione}} = 2 \times \text{Potenza Media}$$

in quanto durante il transitorio di accelerazione supponiamo che la Forza d'inerzia rimane costante, mentre la Velocità varia con moto accelerato uniforme da zero fino ad un valore massimo e quindi il suo valore medio è $V_{max}/2$.

Attriti

Gli attriti non sono mai trascurabili in applicazioni pratiche, questi causano una modifica nei diagrammi di moto in quanto una parte della forza necessaria all'accelerazione viene assorbita incrementando così l'azione frenante. Questo si

traduce in un'asimmetria del profilo di velocità e nell'inevitabile aumento di complessità delle formule trattate fino ad ora.

Potenza necessaria alla traslazione in partenza:

$$\frac{(\text{Massa} \times \text{Accelerazione} + \text{Forza di Attrito}) \times \text{Velocità}}{\text{Rendimento di trasmissione complessivo dal motore alla massa traslante}}$$

Potenza necessaria alla traslazione in frenata:

$$\frac{(\text{Massa} \times \text{Accelerazione} - \text{Forza di Attrito}) \times \text{Velocità}}{\text{Rendimento di trasmissione complessivo dal motore alla massa traslante}}$$

Potenza necessaria alla rotazione in partenza:

$$\frac{(\text{Momento d'Inerzia} \times \text{Accelerazione Angolare} + \text{Momento di Attrito}) \times \text{Velocità}}{\text{Rendimento di trasmissione complessivo dal motore alla massa rotante}}$$

Potenza necessaria alla rotazione in frenata:

$$\frac{(\text{Momento d'Inerzia} \times \text{Accelerazione Angolare} - \text{Momento di Attrito}) \times \text{Velocità}}{\text{Rendimento di trasmissione complessivo dal motore alla massa rotante}}$$

Si deve tener conto del fatto che una parte della potenza sarà dispersa negli attriti presenti nella catena cinematica fino alla massa traslante/rotante, quindi si dovrà fornire al motore una potenza maggiore.

Per quanto riguarda l'Energia:

$$\frac{1}{2} \times \text{Massa} \times \text{Velocità}^2 = \frac{\frac{1}{2} \times \text{Inerzia Equivalente} \times \text{Velocità}^2}{\text{rendimento trasmissione della catena cinematica}}$$

(dalla massa a dove si considera l'inerzia equivalente).

E' molto importante conoscere i rendimenti , oltre che i giochi e le elasticità del sistema, perché la presenza del rendimento contribuisce all'aumento del valore della massa equivalente, richiedendo così una maggiore energia per ottenere quel determinato moto. Poi in fase di frenata il rendimento si moltiplica.

Per i carichi traslanti verticali oppure obliqui si ha che nel calcolo della Potenza si deve considerare la somma algebrica di accelerazione d'inerzia + accelerazione di gravità.

Quindi: Potenza = Massa x (Accelerazione + 9,18) x Velocità.

[22]

5.6.1 Dimensionamento del motore

Sui datasheet dei motori è sicuramente presente il valore di coppia di stallo, o start-up torque. La caratteristica del motore DC è una retta:

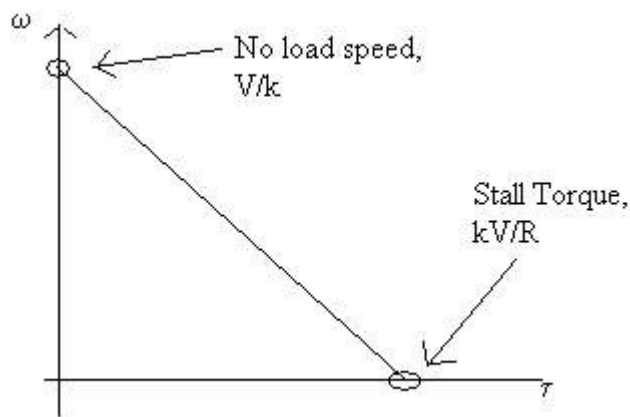


Fig. 5.9 Curva caratteristica Velocità /Coppia di un motore DC

Nel punto in cui la velocità è massima la coppia è zero, mentre nel punto in cui la coppia è massima, la velocità è zero (cioè a motore fermo, in “stallo”). Sul datasheet viene anche indicata la coppia nominale o rated torque.

La coppia di stallo è la massima coppia che può fornire il motore, ma in caso di stallo, in cui il motore è bloccato. Dal punto di vista pratico è più corretto considerare invece il valore di coppia nominale, ovvero la coppia che si ottiene nel funzionamento alla tensione nominale e corrente nominale ad una temperatura del motore di 25°C, al limite del campo di funzionamento continuo del motore in quanto coppie più alte possono portare ad un'inammissibile riscaldamento

dell'avvolgimento. Quindi per la scelta del motore si deve fare affidamento solo ed esclusivamente al valore di coppia nominale. In caso di assenza di questo dato, si considera valido come valore la metà della coppia di stallo, posizionandoci quindi a metà della curva caratteristica del motore.

Cosa si deve sapere per effettuare i calcoli:

- 1) il peso totale del robot;
- 2) che valore di accelerazione si vuole imprimere al robot (queste due informazioni sono necessarie per trovare il valore di coppia con cui scegliere il motore);
- 3) la massima velocità a regime da far raggiungere al robot (con questo valore è possibile sapere quanti giri deve effettuare al minuto il motore).

Nel caso in cui consideriamo un robot su ruote la relazione alla base del ragionamento per ricavare la coppia che dovrà fornire il motore è la seguente:

$$M/r = m \cdot a + F \cdot r$$

dove M è la coppia del motore, r è il raggio della ruota, m è la massa del robot, a è l'accelerazione che si vuole imprimere, e Fr sono le forze resistenti da vincere.

Questa relazione vuol dire che i motori devono fornire una forza maggiore del prodotto massa per accelerazione del robot, più le forze che si oppongono al moto, in questo caso quelle gravitazionali. In realtà ci sono altre forze resistenti dovute ad altri fattori (ad esempio l'attrito con l'aria o l'attrito volvente).

Come ricavare il valore di coppia di minima che deve fornire il motore per far muovere il robot è piuttosto semplice. La coppia è nient'altro che una coppia di forze che hanno stessa direzione e verso contrario applicate ad un braccio. Quindi moltiplicando il valore della forza da trovato per il raggio della ruota del robot, si ottiene il valore di coppia minimo che deve avere il motore per far muovere il robot.

Si supponga di voler imprimere al robot un'accelerazione di 0.5 m/s^2 e che il robot pesi 5 Kg. Il prodotto $m \cdot a$ sarà quindi pari a: $5 \text{ Kg} \cdot 0.5 \text{ m/s}^2 = 2.5 \text{ Kg} \cdot \text{m/s}^2$, ovvero 2.5 N. In alcuni datasheet la coppia del motore è espressa in Kgm, per convertirli in N si deve ricordare che 1 Kgf (chilogrammo forza) corrisponde a 9.81 N (in pratica è la massa unitaria di 1 Kg sottoposta all'accelerazione gravitazionale di 9.81 m/s^2).

Questo è il valore di forza che si deve applicare al robot per ottenere quel valore di accelerazione. Poi a questo prodotto massa per accelerazione vanno aggiunte le forze resistenti (in particolar modo il coefficiente di attrito volvente).

Non si deve dimenticare di applicare un fattore di sicurezza che permetta di non sottovalutare le forze resistenti dovute all'attrito volvente (e non solo) e soprattutto di dare un margine di sicurezza al conto. Una cosa importante da fare è di raddoppiare il valore ottenuto. Quindi se dal calcolo si ottiene un valore minimo di coppia, è consigliabile scegliere un motore con valore di coppia nominale doppio per stare tranquilli e per non sovraccaricare troppo il motore. In applicazioni industriali questo coefficiente è più grande, ma per il robottino va più che bene. L'esperienza in generale aiuta a scegliere il valore più adatto per questo coefficiente.

Una volta ottenuto un dimensionamento abbastanza corretto dei motori destinati a muovere il robot di peso noto, imprimendo un'accelerazione voluta e consentendogli di raggiungere senza problemi la velocità desiderata, con i valori calcolati di coppia e di giri al minuto è possibile quindi andare sul catalogo del produttore dei motori e scegliere quello che sembra più appropriato. Il calcolo non è precisissimo perché frutto di alcune semplificazioni, ma può essere ritenuto valido con una buona approssimazione.

Un metodo molto semplice per calcolare la coppia di un motore è quello di munirsi di un'asta di lunghezza nota, collegare tale asticella in modo che ad una sua estremità va fissato l'asse del motore in maniera perpendicolare all'asta mentre all'altra estremità collegare un dinamometro per misurarne la forza (espressa in Newton).

Facendo ruotare il motore, l'asta, collegata al suo asse, comincerà a ruotare fino ad un valore max, in cui il motore tende a bloccarsi.

Misurare dunque la forza indicata sul dinamometro quando il motore sta per bloccarsi. La coppia risultante sarà dunque pari al valore dei Newton misurati, moltiplicati per la lunghezza dell'asta.

E' consigliabile ovviamente che l'asta abbia peso trascurabile e che il calcolo venga fatto in maniera istantanea, per evitare surriscaldamenti del motore e quindi a letture sfalsate.

[23]

5.7 Momenti d'inerzia

Il momento di inerzia di un corpo è funzione della sua geometria, in particolare di come è distribuita la massa al suo interno.

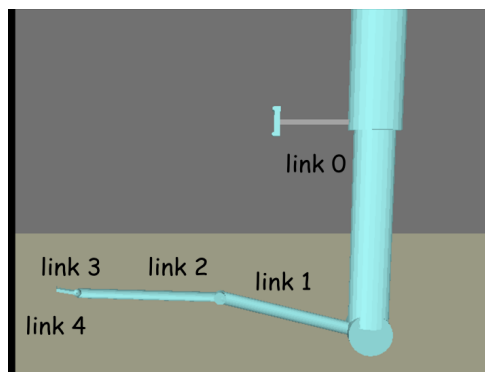


Fig 5.10 Ogni link del braccio è costituito da due barre angolari a sezione quadra affiancate a formare un parallelepipedo

Si considerino i link dei parallelepipedi. Il momento di inerzia di un parallelepipedo si calcola con la seguente formula:

$$J = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2)$$

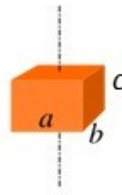


Fig 5.10 parallelepipedo a) lunghezza, b) spessore, c) profondità del link

Dove M è la massa del link, a e b sono i lati perpendicolari all'asse di rotazione

Link	giunto	attuatore
Link 4	g4	servo2
Link 3	g3	servo1
Link 2	g2	DC2
Link 1	g1	DC1
Link 0	g0	DC0

Tab 5.1 Corrispondenze di link, giunti e attuatori

Link	a(cm)	b(cm)	c(cm)	Peso (g)	J (Kg*m ²)
Link 4	12	2,5	8	268	0,0003355
Link 3	12	2,5	8	388	0,0004858
Link 2	39	3	9	508	0,006477
Link 1	39	3	9	1400	0,01785
Link 0	23	0,6x2	9	2174	

Tab 5.2 Calcolo del momento di inerzia per ogni link.

Link 0 è costituito da una flangia circolare di peso 200 g e da due piastre rettangolari di peso 400 g ciascuna, considerando anche le barre filettate di ferro e il pezzo di collegamento, il peso totale è circa 1200 g.

Link-attuatore	Velocità	Accelerazione (rad/s ²)	Coppia(Nm)
Link 4- servo1	0.23 sec/60	19,8	0,00664
Link 3 -servo2	0.23 sec/60	19,8	0,00961
Link 2- DC2	5000 rpm	35×10^{-3}	0,00226695
Link 1 -DC1	8000 rpm	110×10^{-3}	0,019635
Link 0 - DC0	/non presente		

Tab 5.3 Calcolo della coppia noti i valori di accelerazione e momento di inerzia per ogni link.

Link complessivo	Peso (g)
Link 4	268
Link 3 + Link 4	388
Link 2 + Link 3 + Link 4	508
Link1 + Link 2 + Link 3 + Link 4	1400
Link 0 + Link1 + Link 2 + Link 3 + Link 4	2174

Tab. 5.4 Calcolo del peso in corrispondenza dei giunti, considerando il peso che ognuno di essi deve sostenere.

Componenti	Peso (g)	Dimensioni axbxc (mm)
Telecamera	68	38x32x38
Fotosensore	200	25x25x120
Sostegno link4	10	42x60x122
Sostegno link3	10	42x60x122
Sostegno link2	50	400x90x20
Sostegno link1	50	400x90x20
Sostegno link0	1100	230x90x90
Rinvio angolare 1	300	83x76x33
Rinvio angolare 2	300	83x76x33

Tab 5.5 Dimensioni e peso delle parti del braccio.

Motore	Peso(g)	marca	modello	alimentazione	Coppia (Nm)
Servo 1	110	hitec	hs755hb	4.8/6 (V)	13.2 kg cm
Servo 2	110	hitec	hs755hb	4.8/6 (V)	13.2 kg cm
DC2	275	faulhaber	3557	12 (V)	50 (mNm)
gearheads	171		30/1 (43:1)		
DC1	400	faulhaber	3863	12 (V)	110 (mNm)
gearheads	720		44/1 (111:1)		
DC0					
Elettromagnete	76,5	magnetschultz	GMHX 065 X20 A01	12 (V)	

Tab 5.6 Caratteristiche dei motori e componenti elettrici del braccio.

Tutto il braccio è realizzato in alluminio, il cui peso specifico è: 2,7-2,75 (kg/dm³).

Il peso specifico del ferro è: 7,85 (kg/dm³).

5.8 Configurazioni principali del braccio

Il braccio può assumere diverse configurazioni, a seconda dei movimenti che si impongono agli attuatori e alle posizioni che assumono i vari link. Le configurazioni che assumono maggiore importanza sono quelle che mi permettono di ispezionare il fusto nella sua totalità:

- Massima estensione

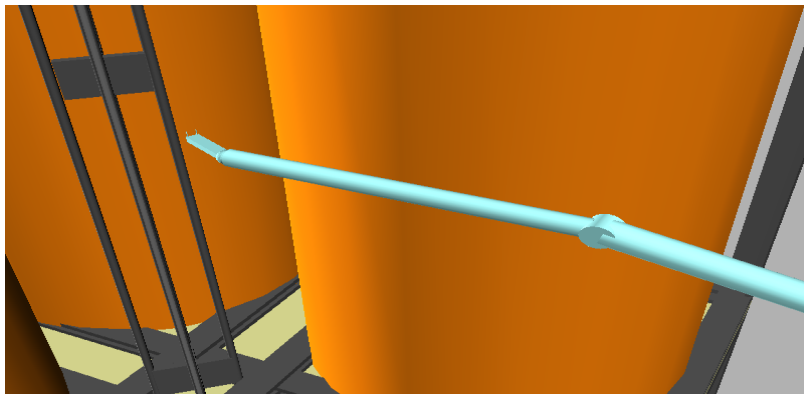


Fig 5.11 l'end-effector affonda tra i fusti e raggiunge la zona più interna della struttura

- Flessione completa

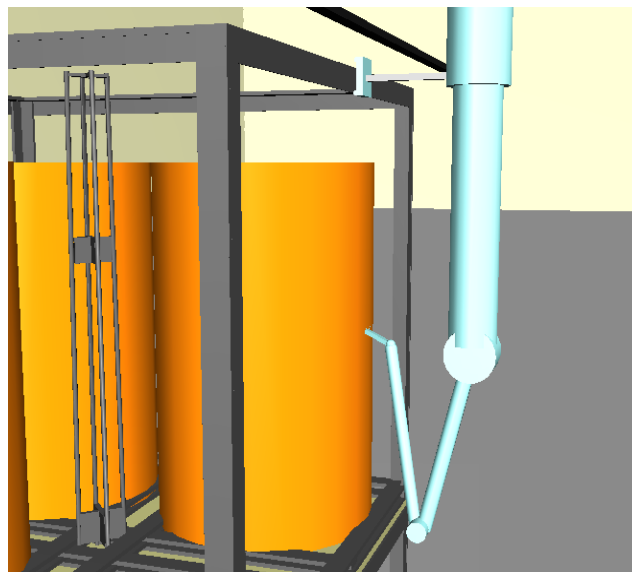


Fig 5.12 ispezione esterna dei fusti e riduzione dell'ingombro per il sollevamento

Capitolo 6

Realizzazione del prototipo

In-Bot è un manipolatore a 5 gradi di libertà munito di un end-effector che ha la funzione di “ispettore”. Il prototipo di cui si farà la descrizione è solo un dimostratore, non pretende essere la soluzione finale ma semplicemente una temporanea, per cui i componenti utilizzati non sono quelli definitivi.

Ad esempio non è stata affrontata la problematica della radiation hardness, in quanto per comprendere le modalità di danneggiamento dei componenti elettronici ed eventualmente fare una scelta più appropriata, si devono effettuare dei test in ambiente controllato.

6.1 Apparato Sperimentale

In questo paragrafo è fatta una carrellata dei componenti meccanici che costituiscono il braccio robotico, partendo dall’end-effector, che rappresenta la parte operativa del sistema.

Link 4 – link 3

Si parte dalla determinazione delle caratteristiche generali dell’end-effector nelle sue dimensioni, peso e componenti con le relative funzionalità.

In un primo momento l’ultimo link sarà dotato di una telecamera per la visualizzazione dello stato dei fusti e della struttura sperimentale e di un sensore fatto da un cristallo di materiale sensibile alla radiazione () e un fotomoltiplicatore (PMT).

Telecamera:

La scelta della videocamera è un passo importante, in quanto questa deve essere in

grado di fornire immagini esaustive alle diverse distanze dal fusto. Questo presuppone una certa flessibilità.

Ad oggi è possibile avere camere in cui la messa a fuoco è controllabile via sw.

A questo punto le caratteristiche di rilievo che faranno da guida nella scelta della camera sono: peso, ingombro, schermatura della circuiteria e resistenza delle componenti.

Per quanto riguarda l'ingombro si deve conoscere la distanza tra i fusti e scegliere un dispositivo la cui dimensione non dia problemi. Un altro aspetto importante è il tipo di trasmissione della camera, se wireless o con fili. Bisognerebbe capire se l'ambiente in cui ci si trovi a lavorare potrebbe causare interferenze al sistema wireless, che per le sue caratteristiche sarebbe l'ideale visto che vogliamo ridurre al minimo l'ingombro della telecamera.

La telecamera scelta è una telecamera compatta a colori, 380 linee TV con audio e realizzata con tecnologia CMOS per impieghi generici. La telecamera è dotata di LED IR.



- **Sensore:** 1/3" CMOS colore
- **Pixel effettivi:** 628(H) x 582(V) -CCIR-
- **Sistema:** PAL
- **Ottica:** f3.6mm/F2.0
- **Risoluzione:** 380 linee TV
- **Angolo di ripresa:** 92°
- **Sensibilità:** 0,5 Lux / F1.4
- **Rapporto S/N:** >48dB
- **Velocità otturatore:** 1/160 a 1/6.000
- **Uscita video:** 1 Vpp videocomposito, 75 ohm (RCA - giallo)
- **Uscita audio:** RCA - bianco
- **Alimentazione:** 9 Vdc / 200 mW (adattatore incluso)
- **Temperatura di lavoro:** -10°C ~ 45°C
- **Temperatura di stoccaggio:** -30°C ~ 60°C
- **Dimensioni:** 38 x 38 x 32 mm
- **Peso:** 68 g

Fig. 6.1 Telecamera installata sull'end-effector e le sue caratteristiche

Sensore:

Si è già fatta una introduzione sui rivelatori a scintillazione nel cap.2, riprendiamo il concetto di come essi funzionano:

un rivelatore a scintillazione è realizzato mediante l'accoppiamento di uno scintillatore e di un fototubo:

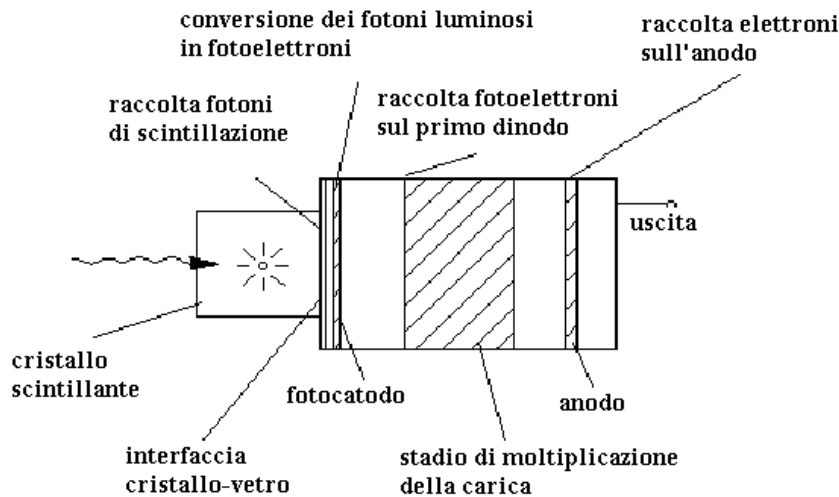


Fig. 6.2 Schema di un rivelatore a scintillazione

Se una radiazione incide sul cristallo scintillante, rilascia all'interno una certa quantità di energia che causa un' emissione di luce di scintillazione proporzionale all'energia della particella incidente (se assumiamo che la risposta del cristallo sia lineare).

Solo una parte della luce emessa raggiunge l'interfaccia cristallo-vetro a causa della riflessione sulle pareti laterali del cristallo e per auto assorbimento.

All'uscita del fototubo si ottiene un segnale in corrente proporzionale all'energia rilasciata nel cristallo.

In questo modo è possibile misurare la distribuzione energetica della radiazione incidente analizzando i segnali in uscita dal PMT.



Fig. 6.3 Rivelatore a scintillazione montato sul braccio robotico

Il cristallo è un cilindretto di 2,54 cm di diametro e 2,54 cm di spessore (1inchx1inch) e densità pari a 5 g/cm³.

Il PMT ha lo stesso diametro ed è attaccato alla base più larga, l'insieme di base più PMT ha una lunghezza di circa 9 cm.

Il peso complessivo del sensore è di circa 160 g, esso sarà rivestito di un materiale isolante a tenuta di luce ed inserito in un supporto che sarà predisposto anche per l'ancoraggio della telecamera ed eventualmente di altri dispositivi.

Supporto:

Struttura per il fissaggio della telecamera e del sensore.

(foto)

Movimentazione:

Due servo (hitec mod:hs755hb) per implementare i due gradi di libertà dell'end-effector, controllati tramite schede SSC-32 (Lynxmotion)



Fig. 6.4 Servo hs755hb



Fig. 6.5 scheda SSC-32

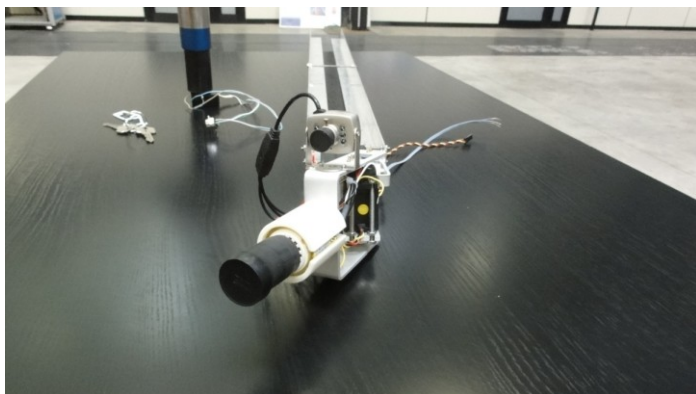


Fig. 6.6 End-effector con telecamera e sensore

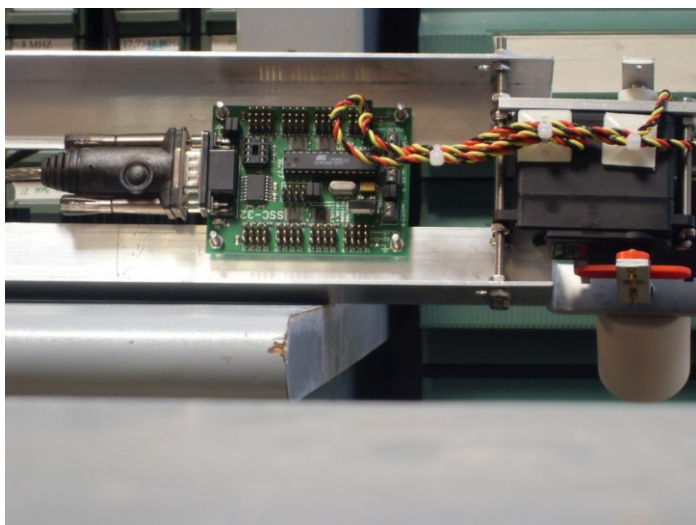


Fig. 6.6 Particolare collegamento scheda SSC-32 e servo

Link 2

Il link 2 è costituito da un' asta in acciaio della lunghezza di 40 cm ed è collegato al link1 tramite un rinvio angolare a T con rapporto di trasmissione 1:1

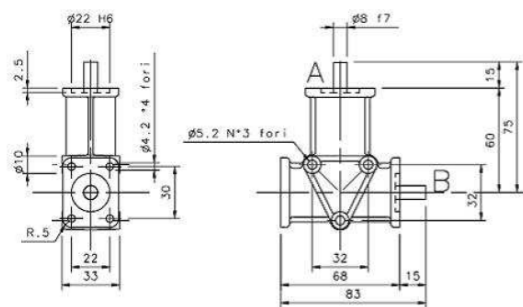


Fig. 6.7 Rinvio angolare a due vie

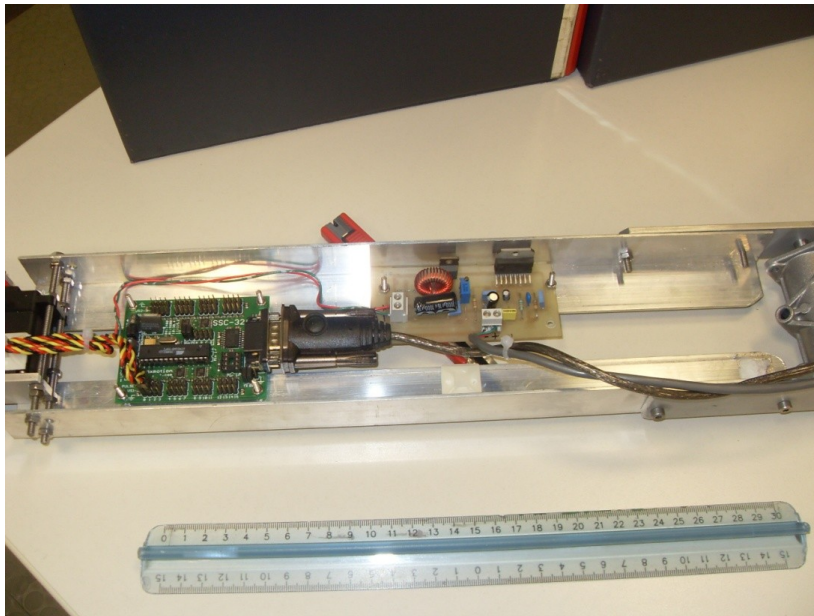


Fig. 6.8 Foto del link 2

Link 1

E' costituito da un'asta di lunghezza 40 cm con un alloggiamento interno per il motore DC2 che movimenta il link2 .

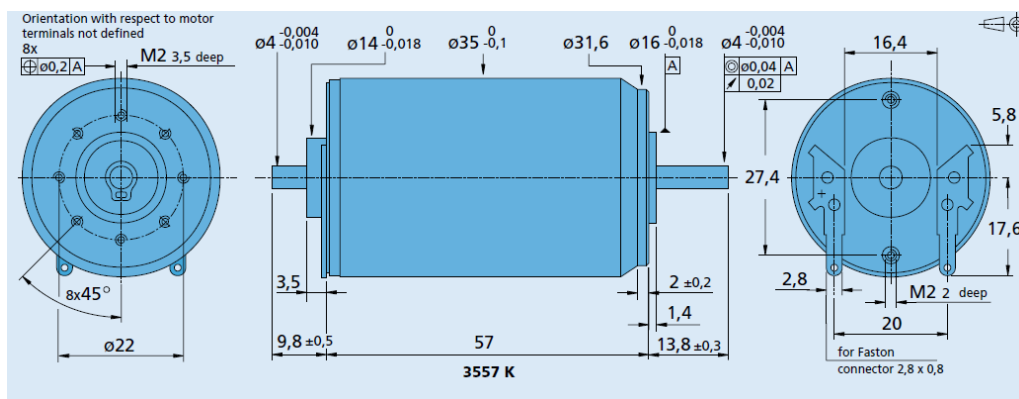


Fig. 6.9 DC2 (Faulhaber)

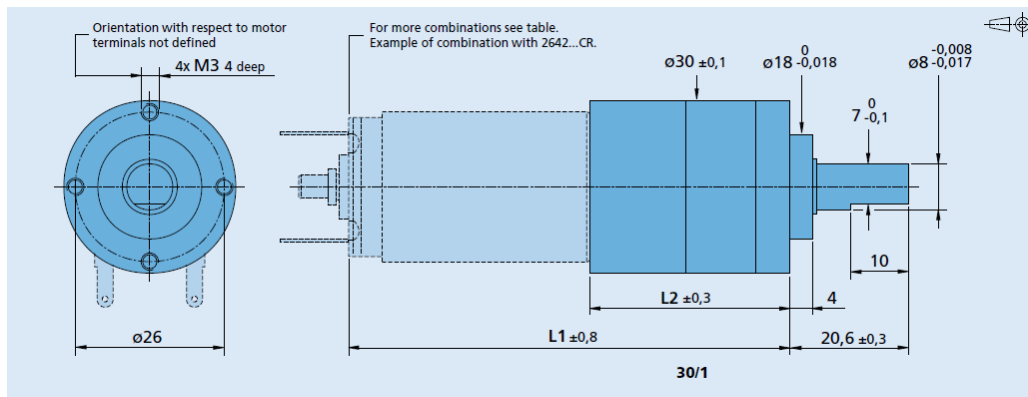


Fig. 6.10 Planetaty gearhead (Faulhaber)

E' collegato al link0 tramite un ingranaggio movimentato per mezzo del motore DC1

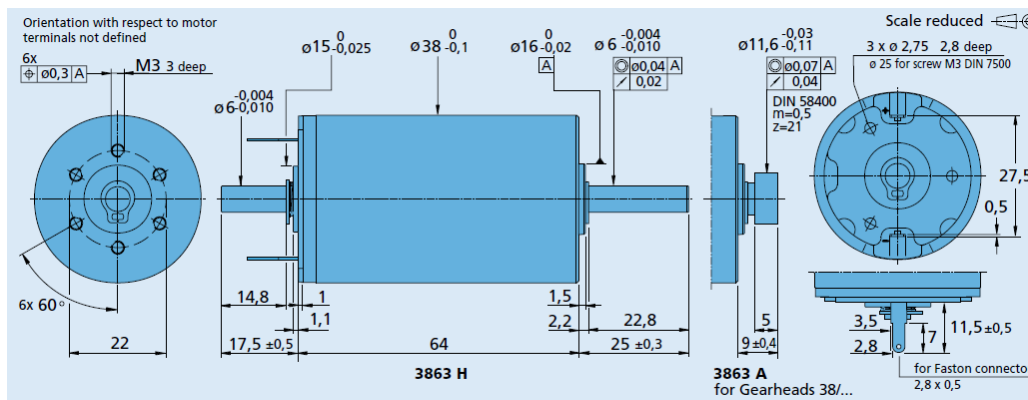


Fig. 6.11 DC1 (Faulhaber)

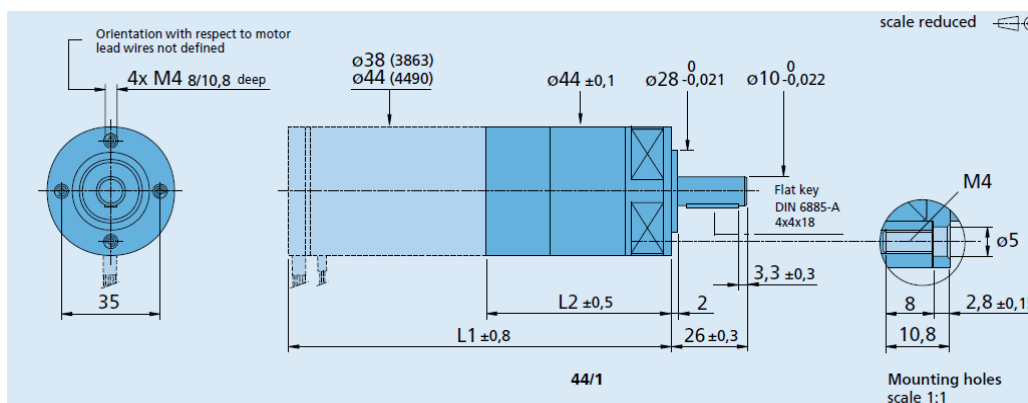


Fig. 6.12 Planetaty gearhead (Faulhaber)

L'ingranaggio è un rinvio angolare a T con rapporto di trasmissione 1:2

Sul link 1 è presente un fine corsa meccanico, l'encoder fornisce un valore sull'angolo in cui è stato trovato il finecorsa fornendo un valore assoluto della posizione, relativa al sistema di riferimento fisso, che è il pavimento.

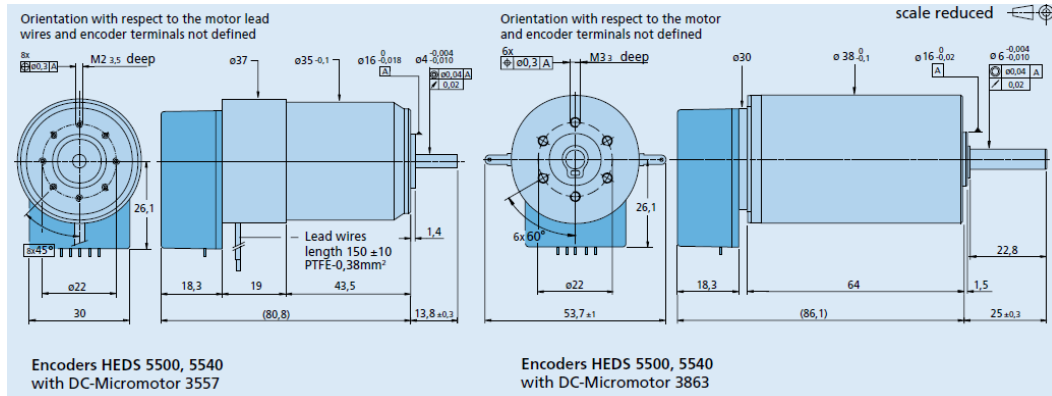


Fig. 6.13 Encoder per i DC1 e DC2

Una volta che il link1 ha trovato il suo finecorsa, si dice che il robot è nella sua posizione di home.

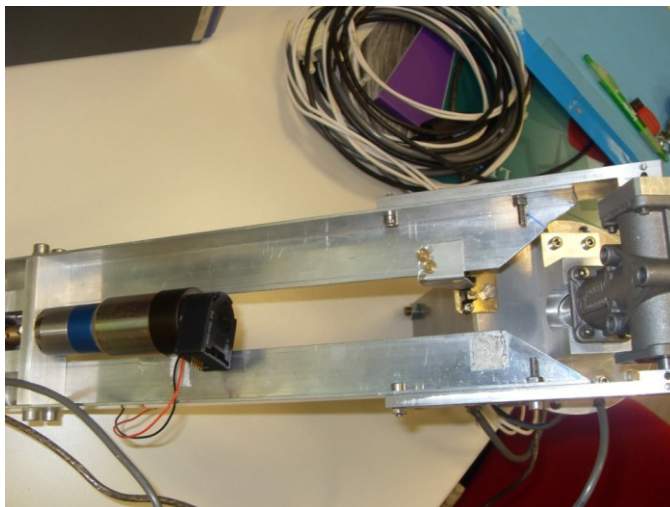


Fig. 6.14 Immagine link 1

Link 0

Al momento il link0 è fisso, il grado di libertà traslazionale non è stato implementato. Due piastre di acciaio massicce fanno da sostegno all'intero braccio e fanno da alloggiamento al motore DC1.

Su queste piastre sarà poi installato l'elettromagnete, che si aggancerà alla piastra corrispondente fissata sulla struttura di ferro.

Elettromagnete

L'elettromagnete lavora in questo modo: blocca se eccitato/sblocca se diseccitato. Mi permette di effettuare il blocco e lo sblocco a distanza. Presenta prestazioni ottimali se utilizzato con una armatura sovradimensionata in modo da coprire tutta la superficie, ma ha un buon funzionamento anche su una superficie di ferro, purchè sia liscia e dello spessore adeguato.

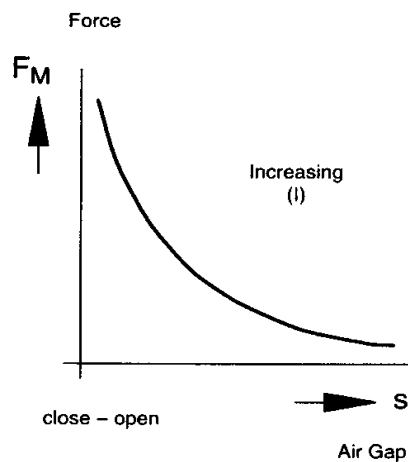


Fig. 6.15 Caratteristica della forza, al diminuire del gap d'aria aumenta la forza di tenuta

G MH X	025	030	040	050	065	080	100
Duty rating ED	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1
Power consumption P_{20} (W)	3,2	4	5,6	6,2	9,8	12,4	17
Magnet weight m_M (kg)	0,07	0,1	0,22	0,38	0,75	1,3	2,2
Armature weight m_A (kg)	0,012	0,029	0,05	0,1	0,21	0,4	0,74
Armature thickness (mm)	3	5	5	6	8	10	12
Armature diameter $\varnothing$ (mm)	25	30	40	50	65	80	100
Air gap s (mm)	Holding force F_M (N)						
See note 1	0	150	280	520	800	1480	2280
	0,1	36,3	70	275	569	1128	1942
	0,16	18,2	38	157	373	883	1600
	0,25	9,8	20	80	216	618	1256
	0,4	3,5	10	30	93	294	657
	0,6	1,8	5	14	41	132	314
	1,0	0,9	2	6,2	18	61	128
	1,6	—	—	2,6	7	18	45
	2,5	—	—	1,3	2,2	10	18
	4	—	—	0,5	0,8	3,2	9,8
	6	—	—	—	0,4	2,6	4,9
Holding force F_M (N) with armature G ZZ (s = 0 mm)	130	230	420	700	1200	1850	3000
See note 2							

Fig. 6.16 Caratteristiche dell'elettromagnete (serie 065)

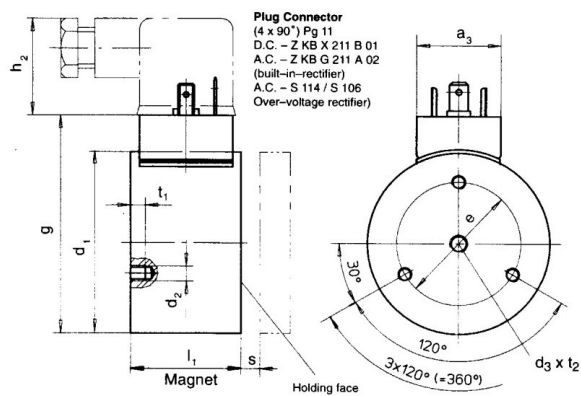


Fig. 6.17 Connettore

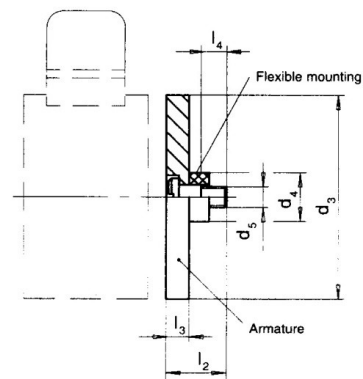


Fig. 6.18 Armatura



Fig. 6.19 link 0

6.2 Sistema di Controllo

Il sistema di controllo di un robot è un dispositivo composto in genere da un sistema multi-processore, collegato in rete con altre risorse locali di controllo, monitoraggio e immagazzinamento dati.

Funzioni di base:

- Interazione con l'operatore
- Immagazzinamento di dati
- Calcolo delle traiettorie
- Controllo in tempo reale del moto dei giunti
- Monitoraggio sensori
- Interazione con altri macchinari
- Interazione con altre risorse computazionali

Il sistema di controllo tratta ogni giunto del braccio come un semplice servomeccanismo o un motore dc, indipendente dagli altri.

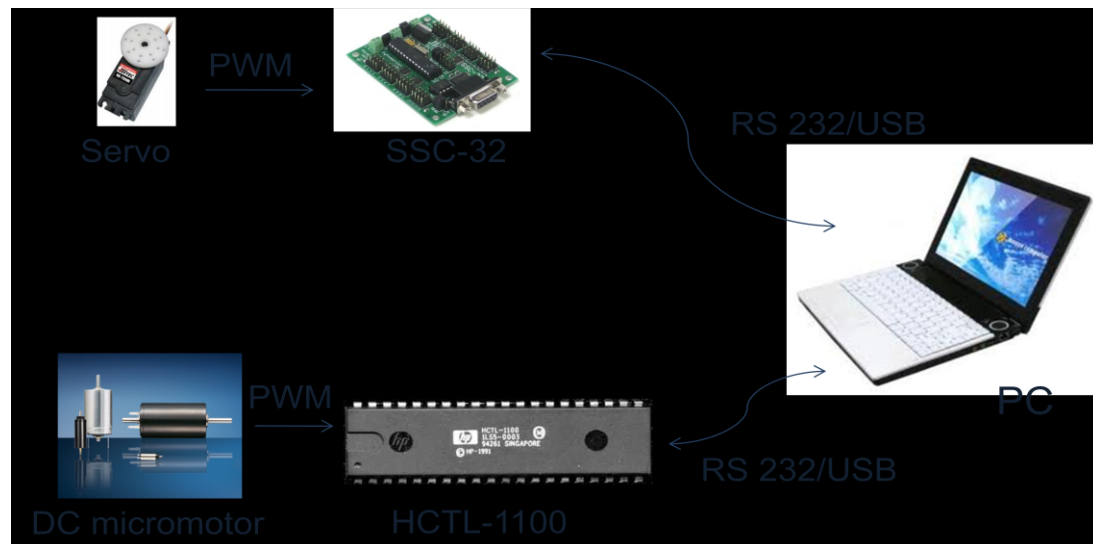


Fig. 6. 20 Architettura del sistema hardware

6.2.1 Motori DC

La scheda di controllo utilizzata per i motori DC è la **HCTL-1100** (Hewlett-Packard) le cui caratteristiche sono:

- Tecnologia HP CMOS
- Controllo di motori DC, DC Brushless, e Stepper
- TTL compatibile
- Controllo di Posizione e di Velocità
- Commutatore e Filtro Digitale Programmabili
- Porte di Comando Motori 8-bit Parallele e PWM
- Porta di input Encoder
- Pin SYNC per coordinazione di schede multiple HCTL-1100
- Operazioni da 100 kHz a 2 MHz

La scheda HCTL-1100 riceve i comandi di input da un processore host e un feedback di posizione da un encoder incrementale con uscita in quadratura.

Le modalità di controllo sono quattro: Controllo di Posizione, Velocità Proporzionale, Velocità Integrata e Profilo Trapezoidale.

Il Position Profile Generator calcola i profili necessari per il controllo a profilo trapezoidale e controllo di velocità integrale. L' HCTL-1100 confronta la posizione desiderata (o velocità) con la posizione reale (o velocità) per calcolare i comandi motore di compensazione utilizzando un filtro digitale programmabile $D(z)$. Il comando del motore è disponibile esternamente alla porta di comando del motore come un byte e alla porta PWM come un segnale Pulse Width Modulated (PWM).

Il Controllo di posizione effettua uno spostamento punto-punto senza utilizzo di profili di velocità. L'utente specifica un comando di posizione a 24-bit, che il regolatore confronta alla posizione attuale. Una volta che l'errore di posizione è calcolato, viene applicata la compensazione integrale digitale e il comando motore è mandato in uscita.

Il Controllo di velocità proporzionale esegue il controllo della velocità del motore usando solo il fattore di guadagno, K , di compensazione. Il polo dinamico e lo zero di compensazione non vengono utilizzati. La velocità attuale è calcolata tramite un algoritmo. Il comportamento del sistema dopo un nuovo comando di velocità è governato solo dalla dinamica del sistema fino a quando non è raggiunto un valore di velocità costante.

Il Controllo di velocità integrale esegue il profiling continuo della velocità che è specificato da un comando di velocità e un comando di accelerazione. L'utente può modificare velocità e accelerazione in qualsiasi momento. La scheda manterrà la velocità specificata fino a un nuovo comando.

Il Controllo con profilo trapezoidale effettua uno spostamento punto-punto seguendo una traiettoria con profilo di velocità trapezoidale o triangolare. L'utente specifica solo la posizione finale desiderata, l'accelerazione e la massima velocità. Il regolatore calcola il profilo necessario per conformarsi ai dati di comando.

[24]

6.2.2 Servo

Caratteristiche dei servomotori:

- Bassa inerzia ed elevato valore del rapporto potenza/peso
- Elevate possibilità di sovraccarico e sviluppo di coppie impulsive
- Capacità di sviluppare elevate accelerazioni
- Elevato campo di variazione di velocità (da 1 a 100)
- Elevata precisione di posizionamento (1/1000 di giro)
- Basso fattore di ondulazione della coppia in modo da garantire rotazioni continue anche a bassa velocità.

Tra i vari tipi di **Servo Controller**, che si differenziano sia per il numero di servo che sono in grado di pilotare simultaneamente, che per le dimensioni, il protocollo di

comunicazione e la semplicità di utilizzo, uno dei migliori per le sue caratteristiche notevoli unite ad un costo molto contenuto e' l'**SSC32** della Lynxmotion. Questo controllore ha il firmware open source ed e' aggiornabile direttamente tramite il collegamento seriale con il PC, inoltre è caratterizzato dalla presenza di porte I/O utilizzabili per la gestione dei servi o per altri utilizzi.

La scelta della potenza del servo, dipende dal tipo di applicazione, dalla potenza richiesta e dalla frequenza di utilizzo. E' consigliabile utilizzare sempre servo di caratteristiche superiori a quelle richieste per ottenere una maggiore affidabilità dell'oggetto finito e una maggiore durata. Da tenere presente che i **servo digitali**, sebbene abbiano un valore di coppia spesso simile agli equivalenti analogici, hanno una potenza in tenuta nettamente superiore, oltre ad avere la possibilità, almeno nel caso degli Hitec, di essere programmati tramite l'apposito **programmatore**, per modificare i valori preimpostati dalla fabbrica; questo consente la variazione della corsa, della velocità, della posizione centrale ed altri parametri importanti.

(fonte)

I servo a impulsi proporzionali sono utilizzati per il controllo del moto tramite segnali facili da trasmettere e ricevere: il segnale è un impulso positivo a cui durata è compresa tra 0.9 e 2.1 ms, ripetuto 50 volte al secondo (ogni 20 ms). La posizione che viene fuori dipende dalla larghezza dell'impulso.

Generalmente i servo si muovono in un range di 90°, ma molti hanno un range meccanico di 180° di rotazione, anche se non sempre sono in grado di muoversi nell'intero range. Quando i comandi superano i limiti meccanici potrebbero danneggiare il funzionamento dei servo.

La scheda SSC-32 permette di utilizzare un range di 180°, un valore di posizione di 500 corrisponde ad un impulso di 0.5 ms, un valore di posizione di 2500 corrisponde ad un impulso di 2.5 ms.

La risoluzione in posizione è di 0.09°/unità, cioè 180°/2000.

Il terminale Lynx SSC-32 è il modo più semplice per testare il controller, esso lavora con un adattatore USB seriale.

Si possono inserire righe di codice oppure utilizzare i cursori per effettuare un controllo in real-time.

[24]

6.3 Interfaccia grafica per il controllo

Per la realizzazione dell'interfaccia di comando è stata scelta una nuova tecnologia di programmazione visuale chiamata Windows Presentation Foundation (WPF) che, insieme ad altre due tecnologie Windows Communication Foundation (WCF) e Windows Workflow Foundation (WF), rivoluziona ed estende enormemente gli scenari nei quali possono essere utilizzati i linguaggi .NET. Il linguaggio utilizzato qui è il C#.

Il linguaggio C# è relativamente recente, ha esordito nel 2002 con l'uscita della prima versione di Visual Studio.NET e grazie alla somiglianza con i linguaggi C++ e Java è diventato uno dei linguaggi maggiormente utilizzati per lo sviluppo software in ambito Windows e web.

Visual Studio è un ambiente di sviluppo integrato (Integrated development environment o IDE) sviluppato da Microsoft, che permette la realizzazione di applicazioni, siti web, applicazioni web e servizi web. La versione che utilizzo è la 2010, dotata di nuove e migliori funzionalità rispetto alle versioni precedenti, che semplificano l'intero processo di sviluppo dalla progettazione alla distribuzione.

L'interfaccia di controllo della movimentazione è molto semplice e user-friendly, dotata di pulsanti e box di testo con specifiche funzioni in modo da soddisfare le specifiche di sviluppo necessarie per il controllo:

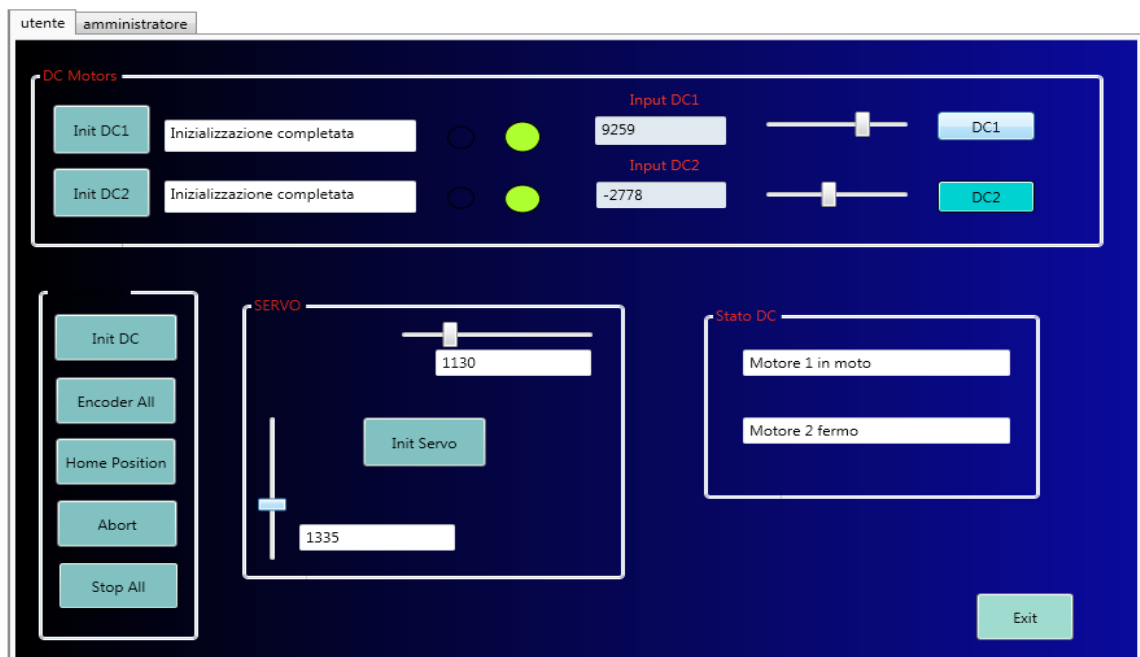


Fig. 6.21 Interfaccia grafica

Sono presenti due tab: *utente* e *amministratore*, il primo permette di movimentare il braccio senza poter apportare modifiche alla logica della scheda di controllo e l'altro è riservato per operazioni più specializzate, come il reset della scheda, il settaggio della posizione di home e lo stacco di alimentazione della scheda.

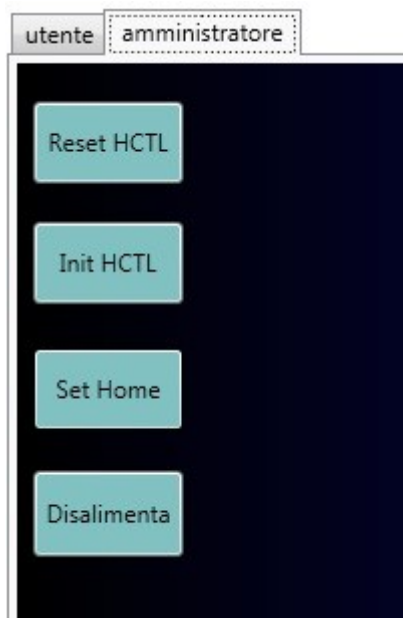


Fig.6.22 Tab amministratore

Pulsanti tab utente:

Init DC:

Vengono inizializzati i motori DC.

Encoder All:

Interroga gli encoder per conoscere lo stato dei motori nell'istante in cui viene premuto.

Home Position:

Il braccio si porta alla posizione di home, che è una posizione conosciuta assoluta settata dal pannello dell'amministratore.

Abort:

Viene bloccata istantaneamente qualsiasi azione.

Stop All:

Tutti i motori sono fermati ma si mantiene ma non si stacca l'alimentazione.

Exit:

I motori sono messi in stato di stop e si chiude la finestra dell'applicazione.

Il group box *DC Motors*:

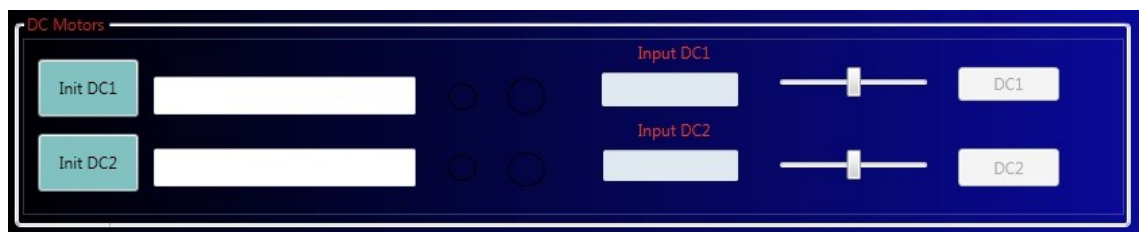


Fig. 6.23 Box comandi DC

I pulsanti di Init DC1 e Init DC2, danno luogo alla routine per l'inizializzazione dei motori DC, le caselle di testo corrispondenti e i led rappresentano lo stato dei motori durante questa fase, in particolare:

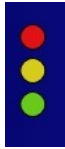


Fig. 6.24 Rosso: Motore in movimento, Giallo: Motore disalimentato, Verde: Motore fermo

Se la fase di inizializzazione è andata a buon fine, si accende il led più grande e vengono abilitati i comandi per i DC (fig. 6.25). Dagli slider è possibile settare il valore di posizione da assegnare al giunto corrispondente (da -25000 a +25000) e le caselle di testo Input DC1 e Input DC2 mostrano il valore settato.

I pulsanti DC1 e DC2 abilitano a sua volta l'invio del comando al rispettivo motore.

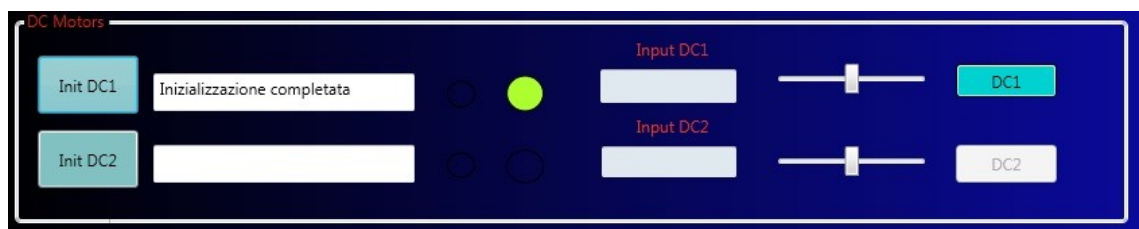


Fig. 6.25 Inizializzazione DC1

Il group box *Servo* è caratterizzato da due slider, uno per ogni servo, il cui valore va da 750 a 2250. Le caselle di testo mostrano il valore assunto dallo slider corrispondente. Qui, a differenza dei DC, il comando viene inviato in real-time ai servo, non c'è bisogno di abilitare la scrittura sulla porta seriale.

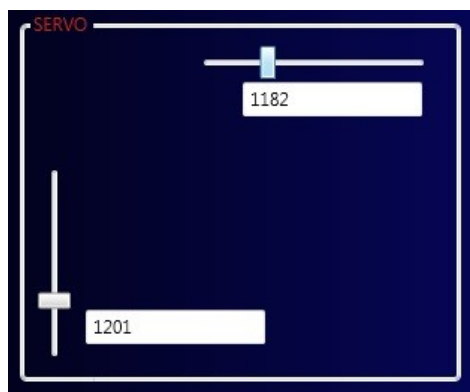


Fig. 6.26 Box comandi servo

Il group box *Stato DC* costituisce un importante mezzo per monitorare costantemente lo stato dei motori, in base alla lettura delle stringhe provenienti dalla porta seriale.

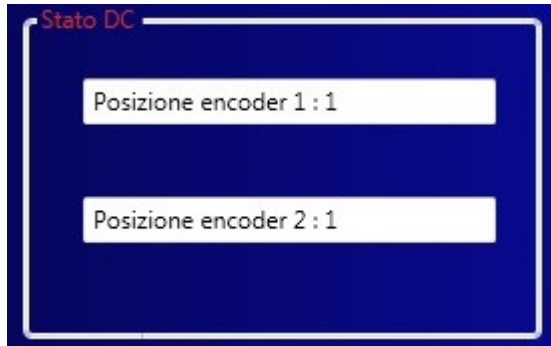


Fig. 6.26 Stato motori (posizione encoder 1 e 2)

I possibili stati dei motori possono essere:

- In moto
- Fermo
- Finecorsa ok
- Finecorsa errore
- Nessun finecorsa
- Posizione desiderata ok
- Posizione desiderata errore
- Inizializzazione ok
- Motore disalimentato
- Abort ricevuto

Capitolo 7

In futuro...

In questo capitolo si parlerà delle potenzialità e prospettive di applicazione del sistema progettato, facendo riferimento a soluzioni e a configurazioni alternative che aprono nuove possibilità di operazione.

7.1 Applicazioni generali

Le applicazioni principali per cui è stato progettato il sistema sono quelle elencate sotto, alcune sono state implementate, altre richiedono un ulteriore studio per la loro realizzazione:

- Indagini ravvicinate -> luce visibile e rivelatore di radiazioni ad alta risoluzione
- Intervenire, in caso di allarme del sistema -> comunicazione con il sistema di monitoraggio esistente basato sui sensori fissati in tutto il deposito
- Manutenzione periodica -> il braccio segue una routine di ispezione, secondo fasi prestabilite e a cadenza temporale impostata
- Sostituzione moduli di elettronica -> i componenti elettronici non hanno vita infinita, inoltre potrebbero danneggiarsi più facilmente in ambienti ad un certo livello di radiazione
- Sostituzione batteria -> alcuni moduli potrebbero richiedere l'ausilio di una batteria esterna che periodicamente deve essere sostituita

Queste ultime due fasi prevedono l'utilizzo di un end-effector a pinza:



Fig. 7.1

Nasce l'esigenza quindi di fornire, alla parte terminale del braccio, un organo a presa diretta che permetta di afferrare e manipolare oggetti.

Allo scopo di poter inserire, rimuovere o movimentare i fusti all'interno del sito è necessario poter installare e rimuovere i sensori in maniera rapida , affidabile e remotizzata.

7.2 Altri scenari

Tra le varie soluzioni di braccio per ispezione è possibile pensare ad un sistema che utilizzi una snake camera controllabile da remoto (fig. 7.2) oppure un braccio snake a più gradi di libertà (fig. 7.3) o ancora un braccio telescopico che ridurrebbe il problema dell'ingombro e della coppia (fig. 7.4).

Tutte soluzioni che sono state prese in considerazione ma, per mancanza di tempo e di fondi, sono state accantonate nella fase attuale del progetto.



Fig. 7.2



Fig. 7.3

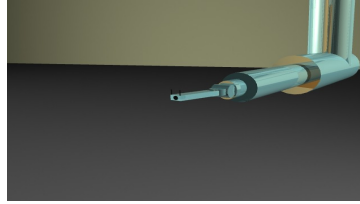


Fig. 7.4

Tutte queste soluzioni, soprattutto le prime due, richiedono uno studio approfondito dal punto di vista cinematico, dinamico e meccanico, in quanto implementano un numero di gradi di libertà elevato.

Ciò implica che l'algoritmo per la movimentazione è più complicato perché si deve controllare un elevato numero di attuatori, fare un calcolo delle traiettorie in tempo reale per fornire i valori di riferimento ai vari giunti.

7.3 Movimentazione

Al momento attuale il sistema robotico è controllato tramite un'interfaccia software che permette di inserire i valori di posizione che vogliamo far assumere agli attuatori.

Un'alternativa a questo tipo di controllo potrebbe essere l'utilizzo di un joystick, che rende l'applicazione più piacevole e compatta, permettendo di non dover scrivere da tastiera nessun valore e di effettuare una movimentazione in tempo reale per tutti gli assi.

Un joystick pensato per i giochi potrebbe avere sei differenti assi ed una moltitudine di tasti (a noi servirebbero 5 assi). Lo script di controllo deve essere in grado di sentire gli input provenienti da ogni asse, cioè interpretare i movimenti e i comandi provenienti dal joystick; quindi di tradurli in istruzioni seriali che invia alla scheda di controllo del braccio .

Quest'ultimo, pertanto, si sposterà seguendo lo stato della leva del joystick.



Fig. 7.5 Es. joystick 1



Fig. 7.6 Es. joystick 2

Conclusioni

In questa tesi si sono affrontati lo studio e la realizzazione di un sistema robotizzato per l'ispezione da remoto di siti di deposito di scorie radioattive.

Il contesto è quello del nostro Paese, in cui sono presenti un numero non trascurabile di depositi contenenti i rifiuti generati dalle centrali nucleari presenti in Italia (fino al referendum del 1987) e a questo si devono aggiungere rifiuti provenienti ogni anno da attività di ricerca, fabbriche, ospedali etc.

Si parla di un problema attuale che ha smosso l'opinione pubblica principalmente dal punto di vista dell'impatto ambientale, ancor prima che di quello energetico.

Risulta necessario, quindi, adottare una strategia di gestione di tali rifiuti, con obiettivo fondamentale la loro messa in sicurezza e il continuo monitoraggio per evitare dispersioni.

Il sistema robotico studiato non pretende essere una soluzione finale alla problematica di monitoraggio, esso rappresenta un esempio base per la realizzazione futura di un robot più specializzato che si avvarrà dei principi trattati in questo lavoro di tesi.

Ringraziamenti

Ringrazio tutti coloro che mi sono stati accanto in questi anni. La mia famiglia, che mi ha supportato tutto questo tempo con fiducia e incoraggiandomi, il mio ragazzo, Antonio, che mi ha sempre stimolata a fare tanto e meglio e ha creduto sempre in me, i miei amici, che sono il mio conforto.

Un ringraziamento particolare va al Dott. Paolo Finocchiaro, che ha seguito il mio lavoro ed è stato sempre presente come riferimento e come guida, a tutti i miei colleghi e collaboratori presso l'INFN-LNS, Alfio Pappalardo, Gianluigi Cosentino, Sergio Scirè, con i quali ho condiviso tutta la mia esperienza di tirocinio e che mi hanno sostenuta e aiutata sempre, Massimo Piscopo, che ha dato un contributo fondamentale per la progettazione e realizzazione delle parti meccaniche ed è stato molto paziente, Giovanni De Luca, che ha messo a disposizione le sue conoscenze, la sua esperienza sulla robotica e il suo tempo, ai colleghi passati e presenti, Massimo Barbagallo, Vincenzo Febbraro, Giuseppe Greco, Giovanni Guardo, Gianfranco Vecchio.

Grazie al prof. Giovanni Muscato che mi ha permesso di lavorare a questo progetto fornendomi il suo appoggio e grazie all'ing. Domenico Longo, che mi ha seguita costantemente nel mio lavoro dandomi suggerimenti e supporto.

Bibliografia

[1]= <http://lamaniglia.altervista.org/atomica.html>

[2]= http://www.ilrasoiodioccam.it/articoli/scorie_nucleari.html

[3]= <http://ulisse.sissa.it/>

[4]= Redazione Internet - Rosella Rega (r.rega@governo.it)

[5]=http://www.zonanucleare.com/questione_scorie_italia/mappa_attuali_depositi/A_rapporto_installazioni_attuali.htm

[6]= Classificazione e tecniche procedurali per la gestione dei rifiuti radioattivi- di Elisabetta Bemporad, Mario Mariani e Carmine Zicari -ISPESL - Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro – DIPIA- ambiente&sicurezza Il Sole 24ore rivista 3 luglio 2007 N. 13

[7]= http://notizie.virgilio.it/tecnologia/scorie_nucleari_italia.html

[8]= <http://www.ischiablog.it/index.php/natura-e-salute/italia-ex-centrale-garigliano-come-area-per-deposito-nazionale-scorie-nucleari/>

[9]= Real-time online monitoring of radwaste storage: a proof-of-principle test prototype- Luigi Cosentino, Claudio Calì, Giovanni De Luca, Giovanni Guardo, Pietro Litrico, Alfio Pappalardo, Massimo Piscopo, Carlotta Scirè, Sergio Scirè, Enrico Botta, and Paolo Finocchiaro-

[10]= Silicon photomultipliers for radioactive waste online monitoring- P. Finocchiaro , M.Barbagallo , L.Cosentino , G.Greco , G.Guardo, A. Pappalardo , C.Scirè, S.Scirè- Elsevier

[11]= F.B. Hazen, FERMCO, R.D. Warner, Department of Energy- Drum Inspection Robots: Application Development- Presentation at Waste Management Project P.O. Box 538704 Cincinnati, Ohio 45253-8704

[12]= Eric Byler, Wendell Chun, William Hoff, Dan Layne- *Autonomous Hazardous Waste Drum Inspection Vehicle- IEEE Robotics & Automation Magazine* 1070-9932/95/\$4.0001995 IEEE March 1995

[13]= K.D. Peterson Westinghouse Savannah River Company, Savannah River Site Aiken, South Carolina 29808 C.R. Ward- Development of the Stored Waste Autonomous Mobile Inspector (SWAMI II)- WASTE MANAGEMENT '95 at Tucson from 02/26/95-03/02/95

[14]= J.S. Byrd- An Intelligent Inspection and Survey Robot- Conference: Industry Partnerships to Deploy Environmental Technology- October 22-24, 1996-Paper Number: DOE/MC/28245-97/C0790

[15]= TECHNOLOGY DEVELOPMENT DATA SHEET- Intelligent Mobile Sensor System (IMSS) for Autonomous Monitoring & Inspection (AMI)- OST Reference Number: 0264 May 1999 *Federal Energy Technology Center*

[16]= Eric Byler- Navigation, behaviors, and control modes in an autonomous vehicle- 106 ISPIE Vol. 2352 Mobile Robots IX (1994) 0-8194-1687-8/95

[17]= TECHNOLOGY DEVELOPMENT DATA SHEET- Automated Baseline Change Detection (ABCD) for Robotic Drum Inspection- OST Reference Number: 0265 May 1999 *Federal Energy Technology Center*

[18]= TECHNOLOGY DEVELOPMENT DATA SHEET- Robotic End Effector for Inspection of Storage Tanks - OST Reference Number: 0278 May 1999 *Federal Energy Technology Center*

[19]= J. Savall*, A. Avello* and L. Briones** - Two Compact Robots for Remote Inspection of Hazardous Areas in Nuclear Power Plants- Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation Detroit, Michigan May 1999

[20]= Jun Xiao, Jizhong Z. Xiao, *Member, IEEE*, Ning Xi, *Member, IEEE*, R. Lal Tummala, *Senior Member, IEEE*, and Ranjan Mukherjee, *Member, IEEE*- Fuzzy Controller for

Wall-Climbing Microrobots- IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS, VOL. 12, NO. 4,
AUGUST 2004

[21]= <http://pdf.directindustry.it/pdf/bondioli-pavesi/pto-driveshaft-ita>

[22]= GRAFICI VELOCITA' -TEMPO E CALCOLO POTENZE MOTORI E METODO DELLA
RIDUZIONE DELLE MASSE -E. Maticena

[23]= <http://www.robot-italy.net/>

[24]= UserManual SSC-32 Ver 2.0 – Lynxmotion, INC.

[25]= <http://www.ecoblog.it/post/11227/rifiuti-nucleari-in-sicilia>