



UNIVERSITÀ della CALABRIA



Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Meccanica

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica

XXIV Ciclo (2008-2011)

Scuola di Dottorato “Pitagora” in Scienze Ingegneristiche

Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/13 – Meccanica Applicata

Dissertazione finale sottomessa per il conseguimento il titolo di Dottore di Ricerca in
Ingegneria Meccanica

Progettazione end-effector per chirurgia laparoscopica

Coordinatore

Ch.mo Prof. Sergio Rizzuti

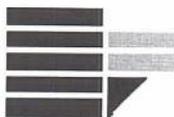
Supervisore/i

Ch.mo Prof. Guido Danieli

Candidato/a

Ing. Michele Perrelli

Anno Accademico 2011/2012



UNIVERSITÀ della CALABRIA



Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Meccanica

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica

XXIV Ciclo (2008-2011)

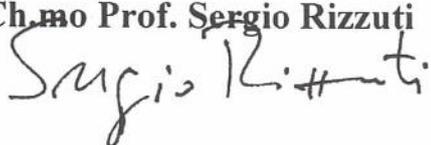
Scuola di Dottorato "Pitagora" in Scienze Ingegneristiche

Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/13 – Meccanica Applicata

Dissertazione finale sottomessa per il conseguimento il titolo di Dottore di Ricerca in
Ingegneria Meccanica

Progettazione end-effector per chirurgia laparoscopica

Coordinatore

Ch.mo Prof. Sergio Rizzuti


Supervisore/i

Ch.mo Prof. Guido Danieli


Candidato/a

Ing. Michele Perrelli



Anno Accademico 2011/2012

Sommario

INTRODUZIONE	10
1. LA CHIRURGIA LAPAROSCOPICA	18
1.1 CARATTERISTICHE INTERVENTI LAPAROSCOPICI	18
1.1.1 <i>Strumenti chirurgici comuni</i>	23
1.1.2 <i>Strumenti laparoscopici speciali</i>	25
1.1.2.1 Dissetto a ultrasuoni	25
1.1.2.2 Bisturi a ultrasuoni (bisturi armonico).....	26
1.1.2.3 Coagulatore a radiofrequenza	28
1.1.2.4 Ecoendoscopia.....	28
1.2 CENNI STORICI.....	29
1.3 LA ROBOTICA CHIRURGICA	33
2. IL NAVIROBOT ED IL CONTROLLO ELETTRONICO	38
2.1 LE CARATTERISTICHE DEI GIUNTI	41
2.1.1 <i>La struttura del giunto</i>	41
2.1.2 <i>Lo step-motor</i>	44
2.1.2.1 I motori passo-passo a magneti permanenti	45
2.1.2.2 I motori passo-passo a riluttanza variabile	49
2.1.2.3 I motori passo-passo ibridi	50
2.1.2.4 Confronto tra i vari tipi di motori passo-passo	51
2.1.2.5 Scelta dei motori da utilizzare	52
2.1.3 <i>I motori dc</i>	53
2.1.4 <i>L'encoder seriale assoluto a 16 bit</i>	57
2.2 CARATTERISTICHE DELL'ELETTRONICA DI CONTROLLO ORIGINALE	62
2.2.1 <i>Il sistema Master-multiSlave e l'interfaccia TWI non ottimizzati</i>	62
2.2.1 <i>I compiti del Master remoto</i>	65

2.2.2	<i>I compiti dello slave locale</i>	68
2.2.3	<i>Le schede elettroniche</i>	71
2.3	GLI ALGORITMI DI CONTROLLO	77
2.3.1	<i>Il Master</i>	77
2.4	LO SLAVE E GLI ALGORITMI DI CONTROLLO DEGLI ATTUATORI	81
2.4.1	<i>L'algoritmo di controllo del moto e di lettura dell'encoder</i>	81
2.4.2	<i>L'algoritmo di controllo del sistema frenante e di commutazione della modalità di funzionamento</i>	85
2.5	ANALISI DEI RITARDI, VELOCITÀ DI COMUNICAZIONE E PRESTAZIONI DEGLI SLAVE	88
3.	OTTIMIZZAZIONE DEL CONTROLLO ELETTRONICO DEL NAVIROBOT	92
3.1	LO STADIO LOGICO E GLI ALGORITMI DI CONTROLLO OTTIMIZZATI	93
3.1.1.1	Le risorse di I/O	101
3.1.1.2	I Timer/Counter	103
3.1.1.3	La USART	108
3.1.1.4	La TWI	111
3.1.1.5	Il convertitore analogico-digitale	113
3.1.1.6	L'SPI	119
3.1.2	<i>Gli algoritmi di controllo</i>	122
3.1.2.1	Il Master	123
3.1.3	<i>Lo slave e gli algoritmi di controllo degli attuatori</i>	125
3.1.3.1	L'algoritmo di controllo del moto	127
3.1.3.2	L'algoritmo di controllo del sistema frenante e di commutazione della modalità di funzionamento	133
3.2	GLI STADI DI POTENZA	134
4.	L' END EFFECTOR	139
4.1	PROBLEMATICA DEL PUNTO FISSO	141

4.2	DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA.....	145
4.3	CINEMATICA DIRETTA IDEALE.....	148
4.4	CINEMATICA INVERSA IDEALE.....	154
4.5	IL MECCANISMO DI ATTUAZIONE DELLE PINZE LAPAROSCOPICHE.....	161
4.6	CARATTERISTICHE TECNICHE E COSTRUTTIVE END-EFFECTOR.....	163
4.7	L'ELETTRONICA DI CONTROLLO E TEST DI FUNZIONAMENTO.....	168
5.	CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI	172
	BIBLIOGRAFIA.....	174

Indice delle Figure

FIGURA 1: EF A 6DOF	12
FIGURA 2: EF A STRUTTURA IBRIDA	13
FIGURA 3: EF CON CINGHIE E PULEGGE	13
FIGURA 4:EF CON DQA	14
FIGURA 5:SCHEMA A BLOCCHI CONTROLLO ELETTRONICO	15
FIGURA 6: TECNICHE A CA E CC	18
FIGURA 7: AGO DI VERRES	19
FIGURA 8: TROCAR DI HASSON	19
FIGURA 9: PNEUMOPERITONEO	20
FIGURA 10: INSERIMENTO CANNULE E TROCAR.....	20
FIGURA 11: CANNULA E TROCAR	21
FIGURA 12: ENDOSCOPIO MUNITO DI MINITELECAMERA E CAVO A FIBRE OTTICHE PER ILLUMINAZIONE	22
FIGURA 13:STRUMENTI CHIRURGICI DA 10 E 5 MM PER LAPAROSCOPIA	24
FIGURA 14: SUTURATRICE MECCANICA LINEARE ENDOSCOPICA	25
FIGURA 15: BISTURI ARMONICO.....	27
FIGURA 16: PUMA 560	31
FIGURA 17: PROBOT	31
FIGURA 18: ROBODOC.....	32
FIGURA 19: IL ROBOT DA VINCI	32
FIGURA 20:ROBOT PER LA BIOPSIA DELLA PROSTATA	35
FIGURA 21: END EFFECTOR NAVIROBOT	39
FIGURA 22: IL NAVIROBOT	40
FIGURA 23: NAVIROBOT - MODELLO 3D	40
FIGURA 24:MODELLO DEL GIUNTO ROTOIDALE CON ELETTRONICA OTTIMIZZATA INSTALLATA	41
FIGURA 25: MODELLO DEL SISTEMA FRENANTE	43

FIGURA 26:STRUTTURA STEP-MOTOR A MAGNETI PERMANENTI BIPOLARE.....	45
FIGURA 27:ALIMENTAZIONE SINGOLA DELLE FASI	46
FIGURA 28:ALIMENTAZIONE CONTEMPORANEA DI DUE FASI	47
FIGURA 29:AZIONAMENTO A MEZZO PASSO	47
FIGURA 30:STEP-MOTOR A MAGNETI PERMANENTI UNIPOLARE	48
FIGURA 31: STEP MOTOR A RILUTTANZA VARIABILE	49
FIGURA 32:STEP MOTOR IBRIDO	50
FIGURA 33:CARATTERISTICHE COPPIA/ FREQUENZA	52
FIGURA 34:SCHEMA MOTORE DC A MAGNETI PERMANENTI	54
FIGURA 35:ANDAMENTO DELLA CORRENTE (TEMPO-VALORE BINARIO ADC).....	55
FIGURA 36:SCHEMA CIRCUITALE MOTORE DC CON RSENS E DRIVER	56
FIGURA 37: SCHEMA DI UN ENCODER ASSOLUTO	58
FIGURA 38:BUS SSI/RS422.....	60
FIGURA 39:SEGNALI DIFFERENZIALI IN USCITA DAL TRASMETTITORE	60
FIGURA 40:CLOCK E DATA FRAME DELL'ENCODER SSI	60
FIGURA 41:SCHEMA A BLOCCHI DEL SISTEMA I2C	63
FIGURA 42:FORMATO DEL FRAME DATI E INDIRIZZO DEL PROTOCOLLO I2C.....	64
FIGURA 43: DIAGRAMMA DI FLUSSO OPERAZIONI MASTER	66
FIGURA 44:FLUSSO OPERAZIONI SLAVE A SEGUITO DELL'INDIRIZZAMENTO DIRETTO.....	69
FIGURA 45:FLUSSO OPERAZIONI SLAVE A SEGUITO DI UNA GENERAL CALL.....	70
FIGURA 46:DIAGRAMMA A BLOCCHI E DESCRIZIONE PACKAGE DELL'L298N	72
FIGURA 47:SCHEMA DI COLLEGAMENTO DEI DIODI DI PROTEZIONE	73
FIGURA 48:SCHEMATICO MASTER NON OTTIMIZZATO	74
FIGURA 49: SCHEMATICO SLAVE NON OTTIMIZZATO 1/2	75
FIGURA 50:SCHEMATICO SLAVE NON OTTIMIZZATO 2/2	76
FIGURA 51: ANDAMENTO CORRENTE CON FILTRAGGIO A 10 Hz	86

FIGURA 52:SCHEMA CIRCUITALE DRIVER MOTORE, RSENS, PARTITORI E FILTRI.....	86
FIGURA 53:TWI FREQUENZA DI 231KHZ.....	89
FIGURA 54:TWI FREQUENZA DI 102.5KHZ.....	89
FIGURA 55:TWI FREQUENZA 38KHZ	90
FIGURA 56:TWI FREQUENZA 11KHZ	90
FIGURA 57: PINOUT CONNETTORE RJ45 DEL BUS LOGICO.....	94
FIGURA 58: GIUNTO DEL NR CON NUOVA ELETTRONICA	95
FIGURA 59: SCHEMATICO STADIO LOGICO DI CONTROLLO	96
FIGURA 60:SCHEMATICO STADIO LOGICO DI CONTROLLO 2	97
FIGURA 61: VISTA ESTERNA DEL MICROCONTROLLORE ATMEGA8535	98
FIGURA 62: SCHEMA A BLOCCHI DELL'ATMEGA8535	99
FIGURA 63:CPU ATMEGA8535.....	100
FIGURA 64:SISTEMA DI PROTEZIONE DEI PIN DI I/O	102
FIGURA 65:SCHEMA A BLOCCHI DELLA PORTA DI I/O.....	102
FIGURA 66:DIAGRAMMA A BLOCCHI DEL TIMER/COUNTER0	104
FIGURA 67:DIAGRAMMA A BLOCCHI DEL TIMER/COUNTER1	106
FIGURA 68:DIAGRAMMA A BLOCCHI DEL PRESCALER.....	107
FIGURA 69:DIAGRAMMA A BLOCCHI DELLA USART.....	109
FIGURA 70:FORMULE PER IL CALOLO DEL BAUD RATE.....	110
FIGURA 71:FORMATO DEL FRAME DELLA COMUNICAZIONE TRAMITE USART	110
FIGURA 72:DIAGRAMMA A BLOCCHI DEL MODULO TWI	111
FIGURA 73:DIAGRAMMA A BLOCCHI DEL CONVERTIRE A/D	114
FIGURA 74:RANGE DI MISURA DIFFERENZIALE.....	116
FIGURA 75:ERRORE DI OFFSET.....	116
FIGURA 76:ERRORE DI GAIN	117
FIGURA 77:ERRORE DI NON LINEARITÀ INTEGRALE.....	117

FIGURA 78:NON LINEARITÀ DIFFERENZIALE (DNL)	118
FIGURA 79: SCHEMA A BLOCCHI SPI.....	120
FIGURA 80: CONNESSIONE MASTER-SLAVE SPI.....	121
FIGURA 81: INTERFACCIA SOFTWARE DI CONTROLLO NAVIROBOT	123
FIGURA 82: FLUSSO OPERAZIONI OTTIMIZZATE MASTER	124
FIGURA 83: FLUSSO OPERAZIONI OTTIMIZZATE SLAVE	126
FIGURA 84: ANDAMENTO COPPIA-VELOCITÀ STEPPER	129
FIGURA 85: IMPLUSI DI CLOCK A VELOCITÀ COSTANTE	129
FIGURA 86: ACCELERAZIONE, VELOCITÀ E POSIZIONE	130
FIGURA 87: RELAZIONE TRA RAMPA DI VELOCITÀ E IMPLUSI DI CLOCK	131
FIGURA 88: SCHEMA NUOVO CIRCUITO DI CONTROLLO SOVRACORRENTE	133
FIGURA 89: SCHEDA DI POTENZA OTTIMIZZATA MOTORI DC	134
FIGURA 90: SCHEMATICO CIRCUITO POTENZA MOTORI DC 1/2	135
FIGURA 91:SCHEMATICO CIRCUITO POTENZA MOTORI DC 2/2.....	136
FIGURA 92: STEP MOTOR CON SCHEDA DI POTENZA	137
FIGURA 93: SCHEMATICO CIRCUITO POTENZA MOTORI STEPPER.....	138
FIGURA 94: MOVIMENTI NECESSARIO ALLA MANIPOLAZIONE CORRETTA DI STRUMENTI LAPAROSCOPICI	140
FIGURA 95:STRUTTURA IBRIDA DELL' EF	142
FIGURA 96: EF CON CINGHIE E PULEGGE	143
FIGURA 97:STRUTTURA A DQA	144
FIGURA 98: DIMENSIONI CRITICHE PER LA ROTAZIONE SU PUNTO FISSO	145
FIGURA 99: IL PRIMO PROTOTIPO DELL'EF.....	147
FIGURA 100:ASSEGNAZIONE TERNE SECONDO D-H	148
FIGURA 101: DQA - ASSEGNAZIONE TERNE DEI SINGOLI QUADRILATERI	149
FIGURA 102: FRAME SECONDO CONVENZIONE D-H	152
FIGURA 103: INTERFACCIA SOFTWARE: (A) CONDIZIONE DI RIPOSO(B) $D_3=10\text{CM}$ (C) $D_3=10\text{CM}$ E $Q_2=\pi/4$	158

FIGURA 104: SPAZIO DI LAVORO EF.....	159
FIGURA 105: MODELLO 3D	159
FIGURA 106: MODELLO 3D	160
FIGURA 107: (A) VISTA INTERNA DELL'ATTUATORE (B) VISTA ESTERNA DELL'ATTUATORE	161
FIGURA 108: QUADRILATERO PER ATTUAZIONE PINZA LAPAROSCOPICA	162
FIGURA 109: SUPPORTO PER CONNESSIONE AL TELAIO	164
FIGURA 110: (A) BASE E FLANGIA MOTORE; (B) ALBERO.....	164
FIGURA 111: DETTAGLI DOPPIO QUADRILATERO	165
FIGURA 112: COMPONENTE PER AGGANCIO SLITTA	165
FIGURA 113: ABBASSAMENTO	166
FIGURA 114: IL PRIMO PROTOTIPO DELL'END EFFECTOR.....	168
FIGURA 115: PROTOTIPO SCHEDA DI CONTROLLO	169
FIGURA 116: IL PRIMO PROTOTIPO DELL'ELETTRONICA DI CONTROLLO	170

Introduzione

La ricerca in esame si pone nell'ambito della realizzazione di strumenti robotici per applicazioni laparoscopiche.

Obiettivo della ricerca è stato la progettazione di un end-effector in grado di utilizzare attrezzature laparoscopiche standard e lo sviluppo di sistema di controllo elettronico ottimizzato per un robot a 6 gradi di libertà.

La chirurgia mini-invasiva sta occupando uno spazio sempre più ampio nel campo della chirurgia grazie ai numerosi vantaggi introdotti. Tra questi vantaggi, infatti, si ha l'abbassamento del decorso post-operatorio del paziente, la riduzione dei traumi causati dall'intervento, una riduzione degli sforzi compiuti dai chirurghi durante interventi lunghi oltre che l'abbassamento dei costi globali delle procedure chirurgiche. Nella seguente tabella è riportato una comparazione tra diversi metodologie di intervento comparate ad una prostatectomia effettuata con sistema *da VinciTM* presso l'UC Irvine Medical Center, Irvine, CA*

	Chirurgia Tradizionale	Laparoscopia	Chirurgia Robotica
Tempo operazione	3,5 ore	4-5 ore	3,5 ore
Degenza	Due giorni	Un giorno	Un giorno
Lunghezza totale dell'incisione	5 pollici	2 pollici	2 pollici
Perdita di sangue Stimata	375 cc	400 cc	116 cc
Visualizzazione	3-D	2-D	3-D
Ingrandimento	Fino a 3X con Occhiali	Fino a 6X con singola camera	Fino a 10-12 X con due camere ad alta risoluzione
Manipolazione degli strumenti	Normale	Contro-intuitiva	Normale (Micro-precision)

Tabella 1: Confronto tecniche chirurgiche

* Prof. Francesco Rulli, Dipartimento di Chirurgia Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" - Robotica in Chirurgia stato dell'arte e nuove tecnologie

La chirurgia mini-invasiva consente quindi una minimizzazione dei rischi correlati con gli interventi stessi.

Gli strumenti robotici hanno ulteriormente contribuito a migliorare la precisione di questi interventi e a ridurre il numero di persone necessarie all'interno della sala operatoria per l'esecuzione degli stessi. Tuttavia, i robot attualmente in commercio presentano un costo molto elevato che non ha consentito una loro massiccia diffusione.

Oltre al costo proprio del robot, inoltre, gli strumenti che essi utilizzano presentano un costo molto elevato, non sono standard e possono essere usati solo per poche sessioni operatorie.

La nostra ricerca è mossa, quindi, dal desiderio di progettare un robot, che consenta la manipolazione strumenti laparoscopici classici mantenendo i vantaggi introdotti dalla chirurgia robotica e, al contempo, garantendo un notevole risparmio economico alle strutture che intendono dotarsi di tali tecnologie.

Tale ricerca, inoltre, ha lo scopo di creare un sistema in grado di manipolare strumenti laparoscopici più piccoli, rispetto a quelli dei robot in commercio, utilizzabile anche nel campo della chirurgia neonatale e pediatrica.

Durante l'attività di ricerca sono state valutate diverse configurazioni cinematiche dell'end-effector, con l'intento di trovare quella che garantisse una movimentazione ed un azionamento degli strumenti laparoscopici standard maggiormente efficace ed efficiente.

Una delle specifiche principali, nella definizione della nuova struttura, è stata quella di dover movimentare uno strumento laparoscopico classico che viene inserito

nell'addome attraverso un foro. Per tale motivo il sistema deve garantire una rotazione intorno ad un punto fisso per evitare stress e/o danneggiamenti ai tessuti circostanti.

La prima configurazione ipotizzata era costituita da 6 DOF conferiti da 3 giunti rotoidali, 3 giunti prismatici come visibile in figura 1.

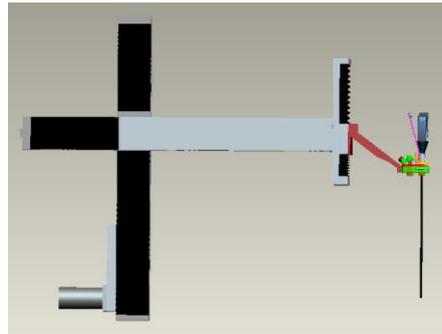


Figura 1: EF a 6DOF

A seguito della modellazione e della simulazione del comportamento dell'end-effector è stata verificata l'efficacia della soluzione proposta.

Infatti, con questa configurazione, lo strumento laparoscopico ruota intorno al punto fisso stabilito consentendo al chirurgo di effettuare tutti movimenti necessari a portare a termine intervento. L'elevato ingombro di questa struttura ha fatto sì che questa soluzione, anche se efficace, non sia risultata utilizzabile in quanto presentava dei rischi inaccettabili di collisione tra gli strumenti presenti intorno al tavolo operatorio, con una conseguente diminuzione dello spazio di lavoro destro.

Dopo aver investigato diverse possibili soluzioni alternative in grado di garantire la progettazione di una struttura di dimensioni contenute, si è scelto di utilizzare un sistema con un quadrilatero articolato, visibile in figura 2, in modo da rispettare meccanicamente la specifica di rotazione del punto fisso, riducendo il numero di DOF necessari e semplificando, quindi, anche il sistema di controllo.

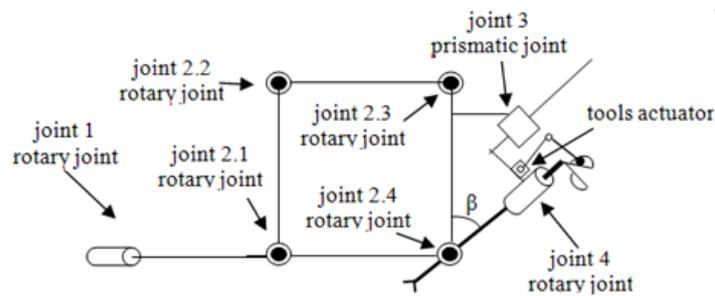


Figura 2: EF a struttura ibrida

Inoltre, un sistema che soddisfa meccanicamente tale condizione garantisce dei tempi di risposta per la compensazione prossimi allo 0. Tale scelta ha portato alla realizzazione di una struttura ibrida parallelo-seriale per l'end-effector.

Essendo fisicamente impossibile collocare un giunto sferico in corrispondenza del punto di inserzione, per creare un giunto sferico virtuale in corrispondenza di tale punto, sono state ipotizzate due diverse soluzioni per conferire il grado di libertà necessario ad inclinare la pinza nel piano longitudinale dell'end-effector.

La prima soluzione era caratterizzata da una catena cinematica aperta a 3 DOF ottenuta rimuovendo il giunto 2.4 dal quadrilatero articolato illustrato in figura 2 e attuando gli altri giunti attraverso cinghie e pulegge in modo da ridurre il numero di gradi di libertà da 3 ad 1 controllando opportunamente le variabili q_2 e q_3 in funzione di q_1 .

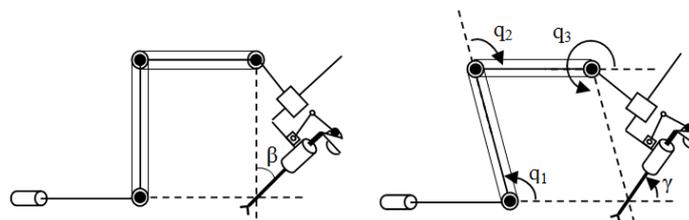


Figura 3: EF con cinghie e pulegge

Poiché la rotazione intorno al punto fisso in corrispondenza del punto di inserzione deve essere garantita meccanicamente, è fondamentale avere una struttura più rigida possibile, onde evitare che eventuali deformazioni dei link vadano a minare la geometria dell'end effector.

Per tale motivo, la seconda soluzione trovata è stata quella di progettare un sistema a catena chiusa che, oltre alla possibilità di avere un controllo più semplice, consenta di utilizzare dei link di spessore minore senza problemi di deformazioni che renderebbero il sistema inutilizzabile.

Vista l'impossibilità di collocare fisicamente una cerniera in corrispondenza del punto fisso si è scelto di utilizzare un sistema a Doppio Quadrilatero Articolato(DQA) come mostrato in figura 4.

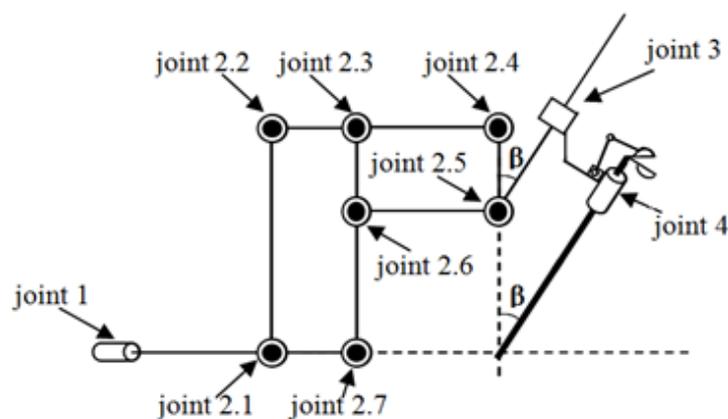


Figura 4:EF con DQA

Come si può osservare nella precedente figura, questo quadrilatero presenta l'ultimo link verticale di lunghezza inferiore rispetto ai due precedenti e una cerniera intermedia sul secondo link verticale.

Con questa struttura il terzo punto di rotazione del DQA viene ottenuto senza l'uso di una cerniera fisica in corrispondenza dello stesso.

Tale punto di rotazione corrisponde al punto di inserzione e quindi con questa struttura, opportunamente dimensionata, si è riusciti ad ottenere una rotazione intorno ad punto fisso con un numero minimo di gradi di libertà senza usare cerniere.

Parallelamente alla progettazione della struttura e dell'elettronica di controllo dell'end-effector, è stato sviluppato il sistema di controllo elettronico della struttura portante di un braccio robotico che verrà utilizzato per la movimentazione dell'endoscopio.



Figura 5:Schema a blocchi controllo elettronico

Il robot che si vuole utilizzare per il controllo del moto dell'endoscopio, è un robot ideato per applicazioni ortopediche che presenta 3 braccia e 18 giunti del quale solo il braccio centrale verrà impiegato nel caso di applicazioni laparoscopiche. Tale soluzione consentirà alle strutture che si doteranno di questi strumenti robotici, di poter contenere i costi utilizzando una strumentazione che, con la sola sostituzione dell'organo terminale, potrà essere usato in due campi di applicazione diversi.

Per controllare la movimentazione e i sensori del robot viene utilizzato un sistema di comunicazione master-multislave che utilizza il protocollo Inter-Integrated Circuit (I2C).

Usando microcontrollori a 8 bit, tale protocollo consente di indirizzare fino a 127 slave, con indirizzo univoco.

Il microcontrollore Master è progettato per fungere da interfaccia tra il computer, ovvero l'utente, e i 6 slave (1 per giunto) della struttura. Il suo compito sarà, quindi, quello di inviare agli slave i segnali di controllo opportuni. Gli slave invece sono progettati per controllare autonomamente i vari giunti in modo da poter distribuire il potere di calcolo su tutta la struttura semplificando anche gli algoritmi di controllo.

La presente tesi è strutturata in 5 capitoli.

Il primo capitolo affronta le caratteristiche della chirurgia laparoscopica tradizionale, l'evoluzione storica di tale pratica e i vantaggi introdotti rispetto alla chirurgia invasiva.

Inoltre, nel prosieguo dello stesso capitolo verranno analizzate le caratteristiche della chirurgia robotica e i robot attualmente utilizzati.

Nel secondo capitolo invece verrà descritto il sistema robotico Navi-Robot con particolare riferimento all'elettronica di controllo che veniva utilizzata per il robot all'inizio della mia attività di ricerca.

Nel terzo capitolo verranno descritte le operazioni effettuate per l'aggiornamento e l'ottimizzazione del sistema di controllo elettronico del braccio centrale del sistema robotico Navi-Robot.

Nel quarto capitolo vengono illustrate le peculiarità dell'end effector sviluppato con particolare riferimento alle fasi di progettazione e all'elettronica di controllo.

Nel quinto capitolo vengono analizzati i risultati ottenuti e illustrati gli futuri sviluppi previsti per il sistema.

Data una breve descrizione dei contenuti della tesi, non si può prescindere dal rimarcare che tutto il lavoro svolto è per sua natura suscettibile di sviluppo ed affinamento, sia in virtù del progresso tecnologico hardware, sia per la frenetica e continua attività di ricerca nel settore che rende rapidamente superate alcune problematiche e, nel contempo, ne solleva altre che necessitano di risoluzione.

1. La chirurgia laparoscopica

La chirurgia laparoscopica a differenza della tradizionale chirurgia open, non comporta la apertura dell'addome. L'accesso alla cavità peritoneale avviene, infatti, con incisioni da 0,5 a 2 cm attraverso cui vengono fatti passare tubi forniti di valvola, chiamati trocar.



Figura 6: tecniche a CA e CC

1.1 Caratteristiche interventi laparoscopici

È bene sottolineare che ogni intervento, eseguito per via laparoscopica o toracoscopica, deve ripercorrere esattamente i tempi e le tecniche eseguite a "cielo aperto" con la sola differenza di accesso alla cavità addominale o toracica.

Questo accesso avviene, infatti, a "cielo coperto", utilizzando minitelecamere e monitor ad alta risoluzione che permettono la visione del campo operatorio a più operatori e strumenti chirurgici, appositamente realizzati per "prolungare" la mano del chirurgo all'interno di una cavità che rimane virtualmente chiusa.

Il primo tempo di ogni intervento in laparoscopia è quello atto a realizzare uno spazio(induzione del pneumoperitoneo) che consente al chirurgo una adeguata visualizzazione delle strutture anatomiche ed una sufficiente libertà di manovra una volta introdotti gli strumenti operativi.

Attraverso una piccola incisione cutanea, eseguita solitamente a livello periombelicale, viene introdotto un ago di Veress, collegato ad uno strumento che è in grado di insufflare gas con un flusso ed una pressione regolabile dall'esterno e permette di ricostituire rapidamente eventuali perdite di pressione.

L'introduzione dell'ago di Veress è una manovra alla cieca, con il potenziale rischio di lesioni intestinali e vascolari e deve essere condotta con attenzione, soprattutto in caso di precedenti interventi addominali per i quali potrebbero essere presenti delle aderenze.

Alcuni chirurghi preferiscono creare lo pneumoperitoneo attraverso una piccola incisione delle fasce muscolari, quindi sotto visione diretta (tecnica di Hasson).



Figura 7: Ago di Verres



Figura 8: Trocar di Hasson

Quando la punta dell'ago di Veress è correttamente posizionata e si procede all'insufflazione di gas, si assiste ad un lento aumento della pressione intraddominale che progressivamente raggiunge i livelli di lavoro preimpostati (10-15 mmHg).

Il gas comunemente utilizzato è l'anidride carbonica, gas inerte che non permette la combustione e, essendo rapidamente solubile, riduce il rischio di embolia gassosa.

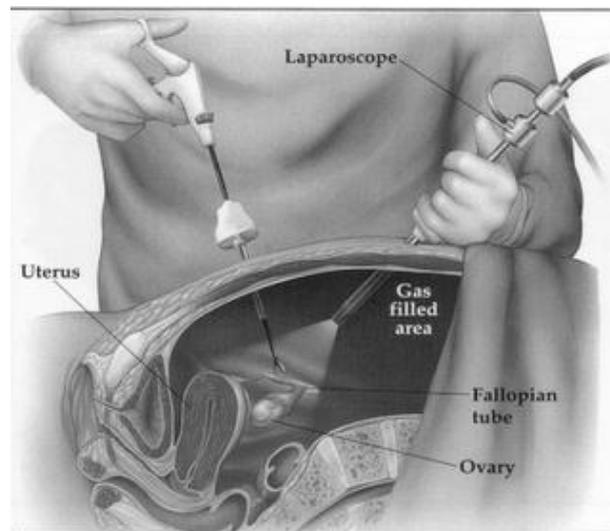


Figura 9: Pneumoperitoneo

Una volta raggiunta la pressione voluta dello pneumoperitoneo vengono inserite le cannule per l'introduzione dell'ottica e degli strumenti chirurgici.

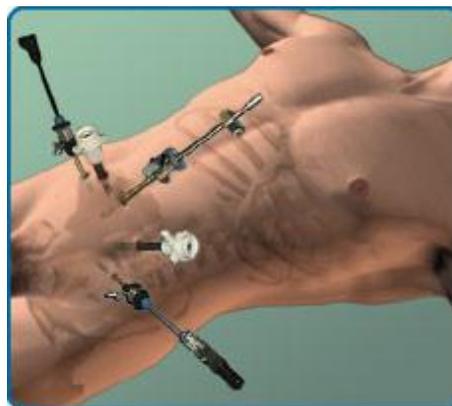


Figura 10: inserimento cannule e trocar

Le cannule hanno diametri diversi, usualmente 5-10 mm, a seconda del diametro degli strumenti da introdurre, e sono dotate alla loro estremità di una valvola antireflusso. Alcune di queste possono permettere l'introduzione di suturatrici meccaniche anche di grosse dimensioni (15-33 mm).



Figura 11: Cannula e trocar

La punta del trocar è rivestita da una guaina di plastica atraumatica che scatta dopo che la punta ha perforato la parete muscolare onde evitare la lesione di anse intestinali.

La visione del campo operatorio è ottenuta mediante un'ottica, solitamente rigida, del diametro di 10 mm, disponibile con angoli di visione differenti (0° - 30° - 45°) a seconda del tipo di intervento da eseguire.

La luce nel campo operatorio viene fornita all'ottica mediante un cavo a fibre ottiche collegato ad una sorgente regolabile di luce fredda ad alta intensità.

All'estremità esterna dell'ottica è collegata una microtelecamera computerizzata che trasmette la visione ai monitor televisivi ad alta risoluzione.

Queste telecamere, pur essendo di piccole dimensioni e molto leggere, permettono una visione ad altissima definizione del campo operatorio, indispensabile alla corretta riuscita dell'intervento.

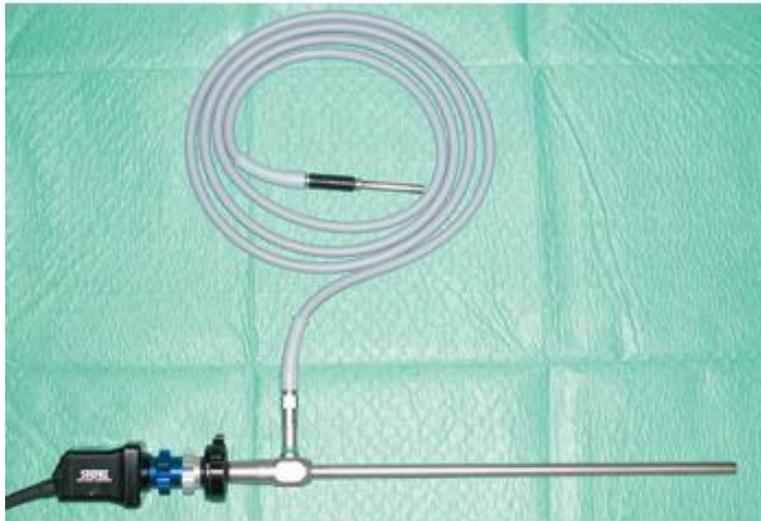


Figura 12: Endoscopio munito di minitelecamera e cavo a fibre ottiche per illuminazione

Una larga serie di strumenti chirurgici è oggi disponibile con caratteristiche specifiche per la chirurgia endoscopica.

Gli strumenti più utilizzati hanno un diametro di 5-10 mm, con lunghezza variabile da 25 a 35 mm a seconda del campo operatorio in cui vengono utilizzati. Sono realizzati in materiale monouso per singolo paziente o poliuso sterilizzabili.

Sono oggi disponibili, e spesso elaborati su richiesta del chirurgo in base alle necessità relative alle diverse tecniche chirurgiche, pinze da presa traumatiche e non traumatiche, forbici e bisturi, dissestori, divaricatori, aspiratori, coagulatori mono e bipolari, porta-ago per suture endocorporee, applicatori di clip metalliche e suturatrici meccaniche di varie forme e dimensioni.

Anche strumenti più sofisticati come dissestori ad ultrasuoni, coagulatori ad argon, laser e sonde per ecografia sono stati realizzati per l'uso endoscopico.

Al fine di eseguire interventi di chirurgia videoendoscopica, lo strumentario riveste un'importanza fondamentale.

Negli ultimi anni le case costruttrici hanno apportato notevoli miglioramenti allo strumentario chirurgico, adattandolo ed elaborandolo alle necessità specifiche dell'operatore e della tecnica chirurgica da eseguire.

1.1.1 Strumenti chirurgici comuni

Lo strumentario riveste un ruolo centrale in chirurgia mininvasiva, poiché la possibilità di eseguire un particolare tipo di intervento è in buona parte legata alla disponibilità e alla qualità degli strumenti.

In generale, facilità d'uso, biocompatibilità, radiotrasparenza, ridotta capacità di riflessione della luce, affidabilità e costi di manutenzione contenuti, sono le caratteristiche che devono essere prese in considerazione all'atto della scelta dello strumentario per chirurgia mininvasiva.

Esistono sul mercato strumenti mono e poliuso. I primi hanno il vantaggio di assicurare standard di elevata qualità in termini di sterilità e funzionamento. Gli strumenti poliuso, sebbene presentino alcuni limiti (sterilità, conducibilità elettrica, usura, radiopacità, ecc.), permettono, tuttavia, di contenere i già elevati costi della chirurgia endoscopica e, per questo motivo, sono indicati soprattutto per centri dove vengono eseguiti numerosi interventi.

Tra gli strumenti più utilizzati rientrano gli applicatori di clip. Come in chirurgia tradizionale gli applicatori di clip vengono utilizzati per la chiusura di vasi di piccolo calibro, vie biliari e vasi linfatici. Anche in questo caso si trovano in commercio versioni mono e poliuso. Le prime sono *multi-fire*, cioè sono dotate di una carica

intercambiabile contenente una decina di clip. Al contrario, la più economica versione poliuso richiede la ricarica manuale delle singole clip dopo ogni applicazione.

Le clip, solitamente in titanio, possono scivolare e staccarsi a causa della retrazione dei tessuti dopo la sezione. Per questo motivo sono state messe in commercio clip dallo speciale design ad elevata tenuta. Tuttavia, nel caso si intendano sezionare vasi o dotti di grosso calibro, è preferibile l'impiego di lacci intracorporei.

Mentre in chirurgia tradizionale, l'avvento delle suturatrici meccaniche ha essenzialmente permesso di ridurre i tempi operatori, in chirurgia mininvasiva, per l'elevata difficoltà di esecuzione delle suture endoscopiche "manuali", questi strumenti hanno determinato un significativo ampliamento delle indicazioni.

Poiché la massima affidabilità deve costituire la loro proprietà più importante, si tratta per lo più di strumenti monouso con caratteristiche e dimensioni varie a seconda del tessuto su cui debbono essere utilizzate. Le suturatrici endoscopiche sono strumenti relativamente grandi per la chirurgia mininvasiva, e il loro utilizzo all'interno della cavità addominale può essere difficoltoso: per questo motivo sono state messe in commercio le versioni dotate di estremità terminale angolabile.



Figura 13:Strumenti chirurgici da 10 e 5 mm per laparoscopia

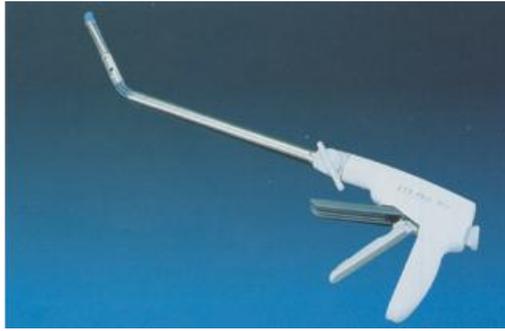


Figura 14: Suturatrice meccanica lineare endoscopica

1.1.2 Strumenti laparoscopici speciali

La possibilità di impiegare apparecchiature speciali anche nel campo della chirurgia mininvasiva ha ampliato notevolmente le sue indicazioni diagnostiche e terapeutiche.

Nel seguente paragrafo vengono riportate le caratteristiche di alcuni strumenti speciali che vengono utilizzati per la chirurgia mini-invasiva.

1.1.2.1 Dissettore a ultrasuoni

Questo tipo di apparecchiatura è in grado di generare frequenze elevatissime (superiori ai 20 kHz) che, a contatto con tessuti parenchimatosi, comportano l'emulsione delle cellule particolarmente ricche di acqua mentre vengono risparmiate le strutture vascolari, nervose, biliari e linfatiche, poiché prevalentemente costituite da tessuto connettivale. A questa azione si associa la capacità di irrigazione del campo operatorio e l'aspirazione di detriti cellulari e sangue.

Il dissettore ad ultrasuoni ha trovato un notevole campo di applicazione nella chirurgia resettiva di organi parenchimatosi ricchi di strutture vascolari (fegato, milza, rene, tiroide, pancreas, cervello e midollo spinale).

Sono attualmente disponibili sul mercato speciali manipoli per chirurgia mininvasiva; tuttavia l'emulsione delle cellule e l'irrigazione del campo operatorio possono sporcare ripetutamente la superficie dell'ottica, rendendo l'utilizzo di questa apparecchiatura piuttosto laboriosa.

1.1.2.2 Bisturi a ultrasuoni (bisturi armonico)

I problemi legati all'impiego dell'elettrobisturi in chirurgia endoscopica hanno portato alla ricerca di sistemi alternativi di dissezione/coagulazione.

Il bisturi armonico è costituito da un corpo macchina e da un manipolo: quest'ultimo può avere una forma a pinza o ad uncino alla cui estremità si trova una lama in titanio, capace di oscillare con un breve movimento longitudinale (circa 80 μm) ad elevatissima frequenza (circa 55.000 volte al secondo).

Questa oscillazione provoca, sul tessuto con il quale viene in contatto, due effetti: l'esplosione delle cellule per la vaporizzazione delle molecole di acqua in esse contenute e un effetto meccanico, determinato dall'oscillazione della lama che provoca la distruzione anche dei tessuti fibrosi più resistenti.

Il bisturi ad ultrasuoni permette di ottenere un effetto di coagulazione/dissezione, in quasi totale assenza di fumo, limitando al minimo il rischio di danno termico a carico dei tessuti adiacenti, non essendo presente alcun passaggio di corrente elettrica.

L'effetto di coagulazione/dissezione può essere incrementato aumentando la frequenza di oscillazione della lama.

Si tratta di uno strumento estremamente utile in corso di interventi di chirurgia laparoscopica maggiore, soprattutto in quei casi in cui sia necessario procedere a dissezione di strutture fibroadipose, contenenti vasi di un diametro fino a 5 mm.

Studi recenti hanno dimostrato che la temperatura della punta dello strumento raggiunge, e mantiene per qualche secondo, temperature elevate, superiori a 150 °C.

Inoltre, esami microscopici di strutture prossime all'estremità terminale del manipolo hanno evidenziato la presenza di microlesioni di grado diverso, a dimostrazione di una certa diffusibilità dell'effetto lesivo.



Figura 15: Bisturi armonico

È opportuno, quindi, impiegare il bisturi armonico con estrema cautela, utilizzando basse frequenze e mantenendo sempre sotto visione la punta dello strumento stesso.

1.1.2.3 Coagulatore a radiofrequenza

Di recente introduzione sul mercato, il coagulatore a radiofrequenza è una sorta di coagulatore bipolare: mediante la generazione di onde elettromagnetiche ad altissima frequenza, questo strumento provoca la rapida oscillazione degli ioni cellulari e quindi elevatissime temperature, che permettono la coagulazione di vasi di calibro sino a 7 mm.

I manipoli specificatamente designati alla laparoscopia sono dotati di una lama centrale per permettere la sezione del vaso dopo la sua coagulazione.

A differenza del bisturi ad ultrasuoni, il coagulatore a radiofrequenza è dotato di maggiori capacità emostatiche ed il calore generato dallo strumento risulta interamente compreso tra le due branche del manipolo.

1.1.2.4 Ecoendoscopia

La mancanza di sensazione tattile costituisce uno dei limiti principali della chirurgia mininvasiva. L'impiego della endoecografia intraoperatoria può in parte ovviare a questo problema. Tale metodica è di particolare efficacia soprattutto in corso di interventi esplorativi, a scopo di *staging*, per poter valutare con relativa certezza l'estensione di una malattia neoplastica.

Sono disponibili sul mercato sonde di calibro e lunghezza tali da permettere il loro passaggio attraverso trocar da 10 mm. È fondamentale che esse siano dotate di estremità terminale angolabile così da permettere un continuo contatto tra la sonda e la superficie dell'organo che si sta esplorando, garantendo immagini nitide.

Ancor più che in chirurgia tradizionale, l'impiego dell'ecocolore Doppler in chirurgia endoscopica risulta fondamentale per valutare i rapporti di organi e/o neoplasie con le strutture vascolari adiacenti.

1.2 Cenni storici

Il primo medico ad introdurre tecniche laparoscopiche a scopo terapeutico fu il ginecologo tedesco Kurt Semm di Kiel, che ha introdotto anche importantissime e innovazioni tecniche.

Dopo la realizzazione, nel 1986, di una telecamera miniaturizzata da connettere ad un laparoscopio, nel 1987, Mouret ha praticato con successo la prima video-laparocolecistectomia. Questo intervento, che ha mostrato da subito notevoli vantaggi rispetto all'intervento classico ed ha accresciuto enormemente l'interesse dei chirurghi generali per le tecniche laparoscopiche.

La chirurgia laparoscopica si è rapidamente diffusa in molti centri chirurgici e, soprattutto, venne estesa con successo ad un sempre maggior numero di affezioni.

A parte i vantaggi rappresentati dalla significativa riduzione dei tempi di degenza postoperatoria, dalla quasi totale assenza di dolore e dalla notevole diminuzione dei costi socio-sanitari, è opportuno sottolineare, altresì, le utili applicazioni in urgenza, campo in cui, almeno inizialmente, si ponevano controindicazioni all'approccio video-laparoscopico.

Procedendo in ordine cronologico, in letteratura si riporta che la prima visualizzazione endoscopica della cavità addominale fu ottenuta nel 1901 da Kelling a

Dresda, che, mediante un cistoscopio, fu in grado di vedere gli organi endoaddominali di un cane.

Gli autori che più contribuirono all'estensione della laparoscopia furono poi l'americano Ruddock che, nel 1937 presentò 500 casi senza mortalità, e lo stesso Kalk che con Bruhl pubblicò una casistica di 200 biopsie epatiche, sempre a mortalità zero, nel 1951.

L'evoluzione della laparoscopia è stata caratterizzata da innumerevoli innovazioni tecniche.

Nel 1933, Fervers aveva proposto l'uso della CO₂ per l'induzione del pneumoperitoneo mentre Veress sviluppò, nel 1938, un ago atraumatico per l'introduzione del gas in addome, derivato da un modello primitivamente impiegato per il pneumotorace.

Agli inizi degli anni '60, fu introdotto l'uso della sorgente luminosa fredda che diminuiva il rischio di ustioni intestinali da contatto con superfici luminose convenzionali incandescenti.

Nonostante la dimostrata affidabilità e le notevoli possibilità diagnostiche ottenibili, la laparoscopia è rimasta però a lungo patrimonio di pochi centri, soprattutto in Europa.

È possibile, quindi, affermare che tale chirurgia è stata per lungo tempo una disciplina a lento sviluppo tecnico e tecnologico.

Gli strumenti operatori della chirurgia tradizionali sono stati utilizzati per decenni, senza sostanziali modifiche progettuali, in controtendenza allo sviluppo tecnologico che, negli stessi anni, influenzava le altre discipline scientifiche modificandole radicalmente.

Solo negli anni '80, tale tendenza è profondamente mutata con l'avvento della laparoscopia che, per prima, ha proiettato la chirurgia verso i nuovi orizzonti tecnologici che culminano oggi con l'utilizzo della robotica.

Nel 1985 il robot PUMA 560 , è stato utilizzato per inserire un ago per una biopsia del cervello.

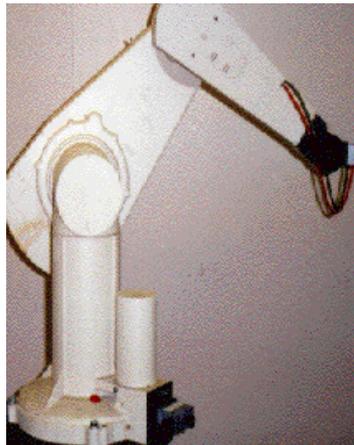


Figura 16: PUMA 560

Nel 1988, PROBOT, sviluppato presso l'Imperial College di Londra, è stato utilizzato per eseguire la chirurgia prostatica.

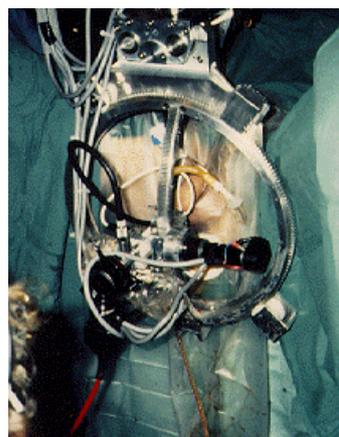


Figura 17: PROBOT

Il RoboDOC ideato dalla Integrated Surgical Systems di Sacramento è stato introdotto nel 1992 per l'inserimento di precisione di una protesi d'anca.



Figura 18: RoboDOC

Un ulteriore sviluppo di sistemi robotici è stato effettuato dalla Intuitive Surgical con l'introduzione del robot da Vinci che fu usato per la prima volta dal Dr. Friedrich-Wilhelm Mohr per un intervento di bypass coronarico nel 1998.

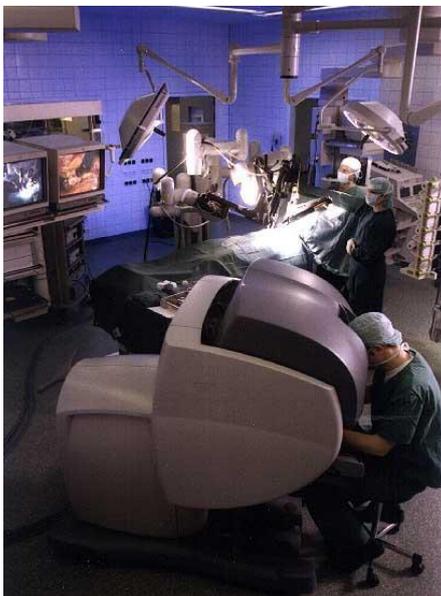


Figura 19: Il robot Da Vinci

Il sistema consiste in una serie di braccia, che montano gli strumenti chirurgici specifici, chiamati EndoWrist (pinze ,forbici, aspiratori), ed in una console da dove il chirurgo utilizzando un sistema ottico tridimensionale li può controllare e comandare a distanza.

I vantaggi del robot consistono essenzialmente:

- visione tridimensionale ad alta risoluzione;
- possibilità di utilizzare degli strumenti delicati;
- possibilità di muovere gli strumenti in ben sette direzioni cosa che non è possibile ottenere con la laparoscopia tradizionale;
- il movimento delle mani del chirurgo viene demoltiplicato da uno a sei consentendo una finezza di movimenti altrimenti non raggiungibile;
- Il sistema robotizzato assorbe ogni tremore e incertezza delle mani del chirurgo.

I pazienti che vengono operati nel mondo con il robot da Vinci annualmente hanno raggiunto il numero di 80000 e negli Stati Uniti oltre il 50% delle prostatectomie vengono eseguite con l'utilizzo del robot.

Dal 2005 la tecnica robotica ha avuto un incremento del 400%.

1.3 La robotica chirurgica

La laparoscopia ha comportato una rivoluzione culturale soprattutto nei pazienti, che la richiedono sempre più frequentemente, mentre dal punto di vista degli operatori chirurgici, le innovazioni apportate, dalle tecniche di chirurgia video-guidata, hanno introdotto notevoli difficoltà, sia nell'esecuzione che nell'apprendimento delle stesse.

Il chirurgo, infatti, è sempre stato valutato esclusivamente per le sue capacità manuali nell'agire sui tessuti anatomici del paziente mentre oggi deve anche dimostrarsi capace di interagire con gli strumenti e le tecnologie fornitegli. Inoltre, la sensibilità tattile risulta ridotta, così come la flessibilità dello strumento che è dotato di solo 3/4 gradi di libertà, a dispetto delle enormi possibilità di movimento della mano. Inoltre, la visione del campo operatorio risulta trasformata in quanto avviene per mezzo di telecamere.

Le maggiori difficoltà nascono dal diverso contatto tra medico e paziente, che non è più diretto ma mediato dagli strumenti endoscopici.

È stato necessario, quindi, unire ai vantaggi apportati ai pazienti dalla chirurgia endoscopica mininvasiva, un maggior confort operatorio per il chirurgo, mediante la realizzazione di strumenti quanto più possibile “user friendly” da utilizzare e maggiormente ergonomici.

La risposta a tali esigenze, è rappresentata proprio dalla robotica che, con il progresso tecnologico attuale, si è dimostrata capace di fornire strumenti assolutamente performanti nelle applicazioni chirurgiche.

Si possono individuare quattro ambiti fondamentali d'impiego della tecnologia robotica nella chirurgia generale: diagnostica, terapia, didattica ed apprendimento, telechirurgia.

Nella diagnostica, l'applicazione più interessante è quella dei robot per l'esecuzione di biopsie guidate da immagini ecografiche.

A tale scopo, si utilizzano manipolatori che possono coadiuvare il medico nell'effettuare i prelievi e ridurre il rischio di danni dovuti alla esposizione continua alle radiazioni generate dagli apparecchi radiografici.

In figura 20, è mostrato un robot utilizzato per la biopsia della prostata. Tale robot è dotato di un ago terminale in grado di effettuare il prelievo ed il punto di prelievo è rilevato attraverso l'ecografo collegato alla sonda ecografica.

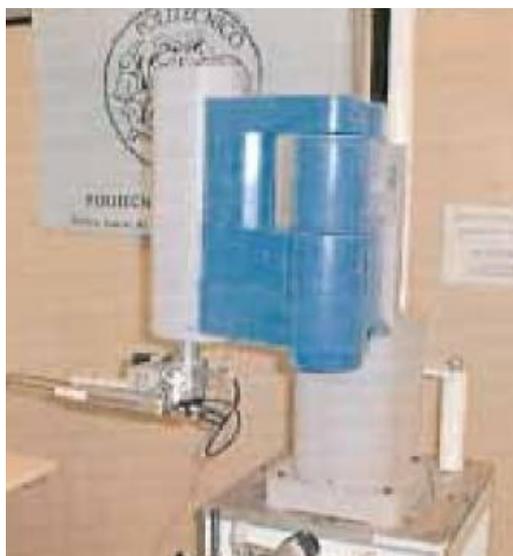


Figura 20: Robot per la biopsia della prostata

L'evoluzione della chirurgia endoscopica ha aperto nuovi orizzonti per la didattica ed il training chirurgico, grazie all'aiuto dei recenti sviluppi dell'information technology che, sfruttando le tecniche di image generation e realtà virtuale, ha consentito l'introduzione di sistemi dedicati che vanno dall'insegnamento dell'anatomia e delle condizioni fisiologiche e patologiche di un paziente virtuale, alla simulazione di interventi chirurgici. In terapia le applicazioni più significative della robotica riguardano le tecniche di chirurgia mininvasiva ed endoscopica per la chirurgia gastrointestinale, addominale, toracoscopica e ortopedica.

Per queste tecniche, che prevedono l'inserimento di strumenti operatori nel corpo del paziente attraverso orifizi naturali o piccole incisioni si utilizzano sistemi robotici, guidati e controllati da un operatore che può effettuare, quindi, interventi video-assistiti.

La telechirurgia che è il campo di applicazione in cui si fondono tecnologie robotiche e telematica. Essa si realizza secondo tre fondamentali modalità:

- Teleconsultazione chirurgica: utilizzando le tecniche di videoconferenza si trasmettono dei video intraoperatori ad un esperto che non è fisicamente presente, per discutere delle difficoltà delle operazioni in corso.
- Teleassistenza chirurgica: consente la guida a distanza di uno strumento o di un endoscopio da parte di un esperto che non si trova fisicamente vicino al paziente (telemonitoraggio ospedaliero o domiciliare).
- Telemanipolazione chirurgica: è caratterizzata dall'esecuzione di un'operazione o alcune fasi della stessa, senza la presenza fisica del medico in sala operatoria.

Sono diversi i sistemi robotici impiegati nella medicina e tra questi si segnalano:

- i sistemi per la chirurgia assistita che sfruttano l'elevata accuratezza del robot nel posizionare uno strumento (ad es. nell'impianto di una protesi d'anca), o, ancora, per la chirurgia laparoscopica in cui il chirurgo tele-opera il robot da una stazione di comando separata dal tavolo operatorio, stando seduto davanti ad un computer e manovrando un'interfaccia aptica;
- i sistemi per la diagnostica e la chirurgia endoscopica, in cui piccoli robot teleguidati dal medico navigano all'interno del corpo umano (ad es. dell'apparato digerente), trasmettendo immagini all'esterno o intervenendo in situ per biopsie, rilascio di farmaci o asportazione di formazioni neoplastiche;

- i sistemi per la riabilitazione motoria, in cui un paziente emiplegico indossa un esoscheletro, che interviene attivamente per sostenere e correggere i suoi movimenti secondo una strategia programmata dal fisiatra.

Di questi robot fa parte il Navi-Robot, non ancora in commercio, che è stato progettato per applicazioni ortopediche e che verrà usato per la movimentazione dell'endoscopio. Le caratteristiche di tale robot sono riportate nel seguente capitolo.

2. Il NaviRobot ed il controllo elettronico

L'idea del Navi-Robot, nasce dall'esigenza di fornire alla chirurgia uno strumento di grande precisione che possa risultare utile nella realizzazione degli interventi, introducendo importanti innovazioni nel panorama della robotica chirurgica.

I sistemi di navigazione attuali possono aiutare il chirurgo fornendogli informazioni e guidandolo nell'intervento, ma non possono in alcun modo agire sul paziente, lasciando così all'uomo l'incombenza di posizionare ed utilizzare le attrezzature.

I robot attivi agiscono, invece, autonomamente sulla base del planning preoperatorio o guidati da console di controllo. Solo il chirurgo, in base alla sua esperienza, conoscenza e sensibilità, può decidere coscientemente se una data operazione pianificata in precedenza, possa essere effettuata e con quali modalità.

Il chirurgo deve essere in grado, quindi, di agire in tutti i modi possibili durante lo svolgimento intervento anche, quando viene coadiuvato dalla strumentazione robotica.

Sulla base di tale necessità è iniziato il progetto del Navi-Robot che è nato, appunto, con l'obiettivo di fornire un sistema capace di operare attivamente con la possibilità ulteriore di essere manovrato come un navigatore passivo dal chirurgo, lasciando dunque a quest'ultimo piena facoltà di portare a termine le operazioni direttamente.

La ricerca scientifica in passato ha proposto alcuni robot, da utilizzare in ambito chirurgico, progettati in modo da sostituire completamente il chirurgo nelle operazioni di taglio (necessarie ad esempio per l'inserimento di una protesi) unicamente sulla base della pianificazione pre-operativa.

Il Navi-Robot è un sistema di navigazione autobilanciato, capace di trasformarsi automaticamente in robot, che può quindi posizionarsi adeguatamente nello spazio e guidare utensili operatori con degli strumenti come quelli visibili in figura.

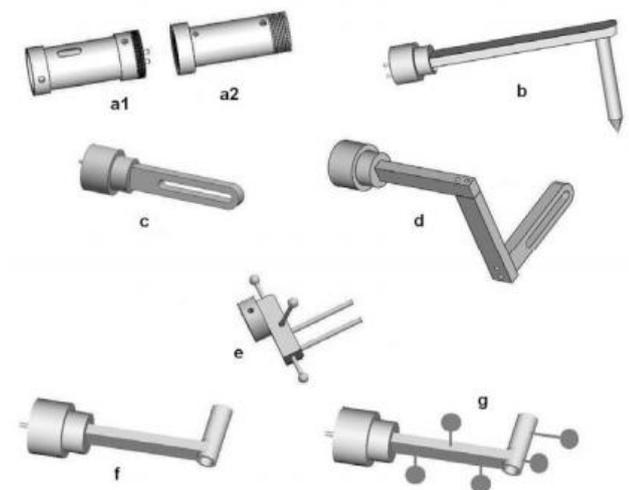


Figura 21: End effector NaviRobot

Il sistema è largamente configurabile e fornisce, quindi, una valida assistenza per il chirurgo negli interventi in cui è richiesto un controllo del movimento degli strumenti operatori molto preciso.

Un altro obiettivo per cui si stanno studiando nuove soluzioni è la riduzione dell'utilizzo di strumenti che emettano radiazioni ionizzanti.

La ricerca di tali soluzioni avviene per mezzo di strumenti di realtà aumentata che permettono di definire la posizione degli strumenti operatori, rispetto al corpo del paziente, unicamente sulla base di immagini radiografiche realizzate in fase pre-operatoria.

Il Navi-Robot, visibile nella seguente figura, è stato originariamente progettato per applicazioni ortopediche ed è costituito da tre bracci ognuno con sei gradi di libertà conferiti da sei giunti rotoidali dislocati su ogni braccio.

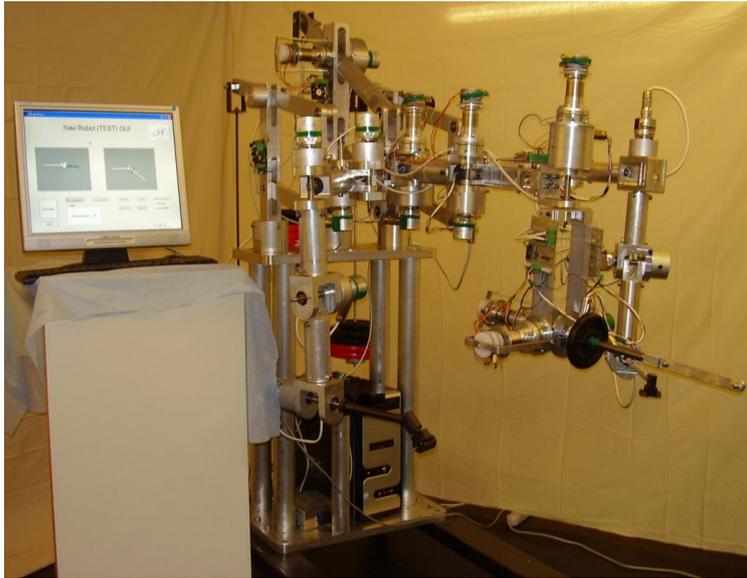


Figura 22: Il NaviRobot

In ortopedia la funzione dei due bracci laterali è quella di sostenere l'arto del paziente per misurarne i movimenti e permettere quindi il corretto posizionamento degli strumenti operatori durante l'intervento.

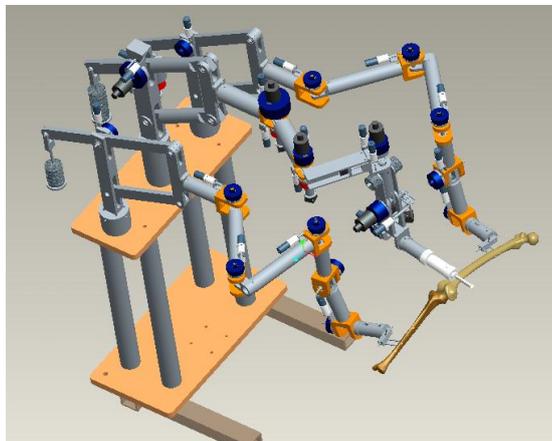


Figura 23: NaviRobot - modello 3d

Il braccio centrale, al contrario, può essere utilizzato sia in modalità navigatore che in modalità robot e viene usato per muovere opportunamente gli end effector che guidano il chirurgo nell'esecuzione dell'intervento.

Il robot, infatti, non esegue direttamente l'intervento ma funziona da guida attiva per posizionare correttamente dei supporti degli strumenti operatori che il chirurgo userà per eseguire materialmente l'intervento.

2.1 Le caratteristiche dei giunti

Al fine di entrare nell'ambito del controllo elettronico presente sulla struttura all'inizio dell'attività di ricerca, nel seguente paragrafo si descriverà in maniera più dettagliata la struttura dei giunti con particolare riferimento al controllo degli attuatori e del sensore di posizione presente.

2.1.1 La struttura del giunto

Osservando la struttura del giunto si nota che la presenza di tre attuatori e di un sensore di posizione.



Figura 24: modello del giunto rotoidale con elettronica ottimizzata installata

Per la movimentazione del giunto vengono utilizzati un motore passo-passo e due motori dc con i relativi riduttori per il controllo del freno e del sistema di commutazione da modalità attiva a modalità passiva.

Il giunto in questione, presenta un albero, nel quale vengono inseriti il sistema frenante, il sistema di commutazione da modalità robot a modalità navigatore e viceversa oltre che l'encoder.

Il sistema frenante e il sistema di commutazione della modalità di esercizio, sono identici dal punto di vista meccanico e vengono collegati saldamente alla struttura del giunto.

Le loro funzioni sono però diverse in quanto le casse esterne, che racchiudono il sistema di azionamento meccanico delle ganasce, presentano un approccio diverso alla struttura.

In particolare, la cassa del freno è saldamente bloccata sull'albero e quindi quando le ganasce vengono non sono in contatto, danno l'opportunità alla cassa di ruotare in maniera solidale con l'albero stesso.

Quando vengono portate a contatto con la cassa, essendo quest'ultime collegate rigidamente alla struttura fanno sì che la cassa e, di conseguenza, l'albero vengano bloccati.

Il sistema di commutazione della modalità di funzionamento, invece, presenta una cassa che serve da supporto agli step-motor e al relativo riduttore e quindi è in relazione con l'albero di rotazione attraverso essi.

Quando le ganasce vengono azionate e quindi i ferodi entrano in contatto con la cassa, si rende quest'ultima, quindi la cassa del motore, solidale alla struttura del giunto

per cui, facendo ruotare il motore, si riesce a mettere in rotazione l'albero e, quindi, si aziona il giunto.

Al contrario, quando le ganasce vengono rilasciate, il giunto agisce in modalità navigatore e una rotazione manuale del braccio meccanico mette in rotazione anche la cassa del motore che, nel caso in cui venisse azionato, non farebbe presa sull'albero del giunto ma a ruoterebbe intorno al proprio asse insieme alla cassa di supporto.

In figura 25, è riportato il modello CAD del sistema frenante realizzato per effettuare le operazioni appena descritte.

Osservando la struttura del freno si nota la presenza di un slider (indicato con la lettera A) collegato a due camme (indicate con la lettera B) e di due ganasce (indicate con la lettera C).

Tirando lo slider verso l'esterno, le due camme, vengono fatte ruotare, causando un allontanamento delle ganasce che entrano così in contatto con la cassa esterna.

Quando lo slider viene spinto verso l'interno, unitamente all'azione di molle posizionate tra le due ganasce, le camme ritornano nella posizione originale e le molle riavvicinano le ganasce sbloccando di conseguenza la cassa.

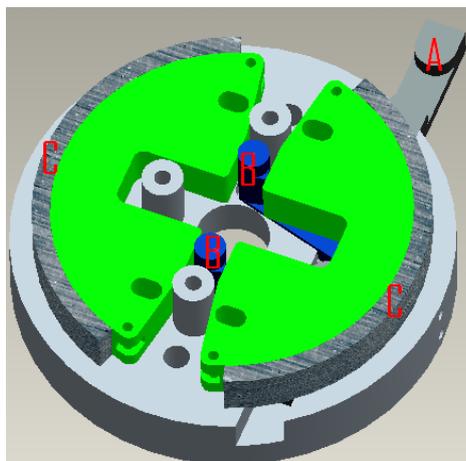


Figura 25: modello del sistema frenante

Dopo aver illustrato brevemente il sistema meccanico del giunto, è necessario illustrare i principi di funzionamento degli attuatori che rendono possibile l'esecuzione delle varie operazioni.

2.1.2 Lo step-motor

I motori passo-passo (step motor) sono attuatori realizzati appositamente per il controllo di posizione. Questi tipi di motori vengono pilotati da segnali elettrici digitali e ruotano di un angolo fisso, chiamato passo, ad ogni commutazione dei segnali di comando.

I motori passo-passo hanno, quindi, il vantaggio, di poter essere usati nei sistemi di controllo ad anello aperto e, rispetto ai motori in corrente continua (*“brushed”*), presentano una maggiore robustezza, non avendo parti soggette ad usura come le spazzole.

Gli svantaggi sono costituiti dalla maggiore complessità dei circuiti di azionamento e da un rapporto potenza/dimensioni più basso rispetto ai motori dc.

Il principio di funzionamento dei motori passo-passo è quello della minima riluttanza. Quando la corrente di eccitazione percorre l'avvolgimento statorico, il rotore si dispone in modo da offrire la minima riluttanza magnetica (ovvero la massima induttanza e il massimo flusso).

Quando l'eccitazione dell'avvolgimento statorico cambia, anche la posizione di minima riluttanza cambia, obbligando il rotore a spostarsi.

Da un punto di vista costruttivo, questi motori si dividono in:

- motori a magnete permanente;
- motori a riluttanza variabile;
- motori ibridi.

Lo step motor scelto per la movimentazione del braccio è di tipo ibrido. Questo tipo di motore unisce i vantaggi dei motori a riluttanza variabile e di quelli a magneti permanenti quali velocità e coppia molto alte, angoli di rotazione minima ridotti, inerzia bassa, precisione angolare elevata.

Il principale svantaggio è costituito, però, dal costo più elevato. Illustriamo ora le caratteristiche di questi tipi di motore.

2.1.2.1 I motori passo-passo a magneti permanenti

I motori a magneti permanenti vengono ulteriormente classificati in motori unipolari e bipolari in base alla modalità di alimentazione degli avvolgimenti.

In particolare nei motori bipolari, lo statore presenta due avvolgimenti (AB e CD in figura) che possono essere percorsi in entrambe i versi dalla corrente e il rotore è costituito, a sua volta, da un magnete permanente.

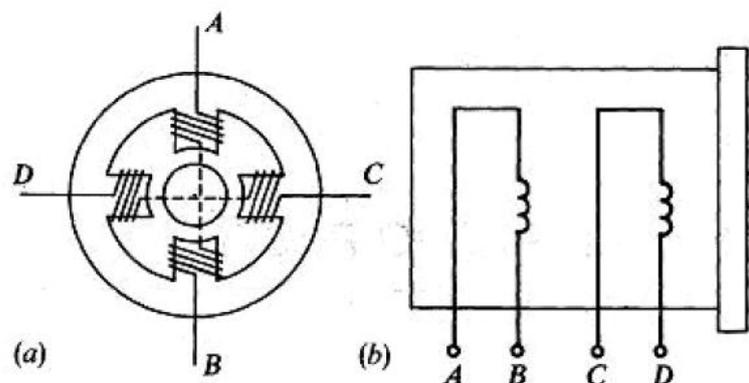


Figura 26: struttura step-motor a magneti permanenti bipolare

Le fasi possono essere pilotate in tre modi differenti. Nella prima modalità, si avvia una fase per volta secondo la sequenza indicata in figura.

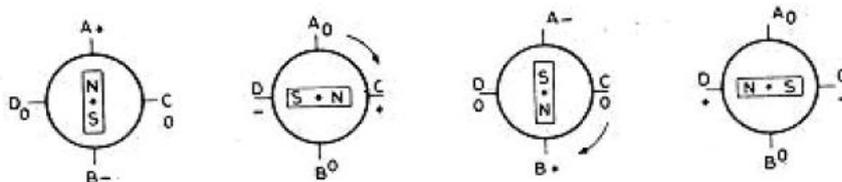


Figura 27:alimentazione singola delle fasi

Alimentando inizialmente la fase AB con la polarità positiva su A, si genera un campo magnetico tra gli avvolgimenti A e B.

Il rotore viene attratto dal campo generato dallo statore e si posiziona quindi in direzione verticale con il polo N su A e il polo S su B.

A questo punto, se si accende la fase CD con C positivo, il rotore si posizionerà orizzontalmente con il polo N sull'avvolgimento C e il polo S sull'avvolgimento D.

In seguito, alimentando la fase AB con B positivo, il rotore si riporta in posizione verticale disponendo, però, i suoi poli in maniera speculare al caso con A positivo. Lo stesso comportamento si ha alimentando la fase CD con D positivo.

Riepilogando quindi alimentando in sequenza le fasi in modo tale che si abbia A^+B , C^+D , B^+A e C^+D il rotore compie una rotazione in senso orario(in riferimento allo schema in figura 27) o antiorario se si inverte la polarità dell'alimentazione tra gli avvolgimenti nei quattro step.

Nella seconda modalità di esercizio, vengono attivate due fasi per volta come visibile nella seguente figura.

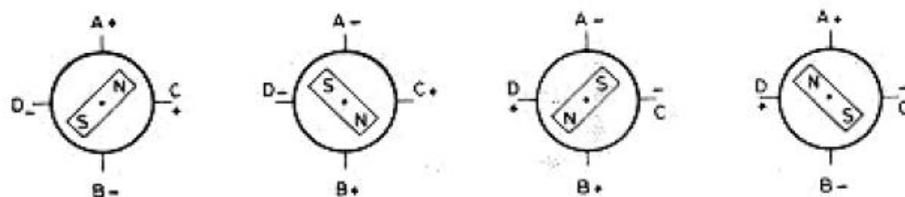


Figura 28:alimentazione contemporanea di due fasi

È possibile osservare che, a seguito di questo tipo di polarizzazione degli avvolgimenti il rotore si posiziona con il polo N al centro dei due avvolgimenti su cui viene applicata la tensione positiva, e quindi accendendo in sequenza A^+BC^+D , AB^+C^+D , AB^+CD^+ , A^+BCD^+ , si fa compiere al rotore un giro completo in senso antiorario. Se si inverte sequenza di alimentazione precedente il rotore ruoterà nella direzione opposta. Entrambe i tipi di polarizzazione delle fasi consentono di far compiere al motore passi di 90° e questa modalità di azionamento viene definita a “*passo intero*”. La differenza tra i due tipi di alimentazione degli avvolgimenti sta nel fatto che, nel secondo caso, la coppia generata è maggiore in quanto la forza di attrazione magnetica generata è doppia.

L’ultima modalità alimentazione degli avvolgimenti, riportata in fig. 29, è quella che permette di ruotare il rotore di 45° e viene definita pertanto “*azionamento a mezzo passo*”.

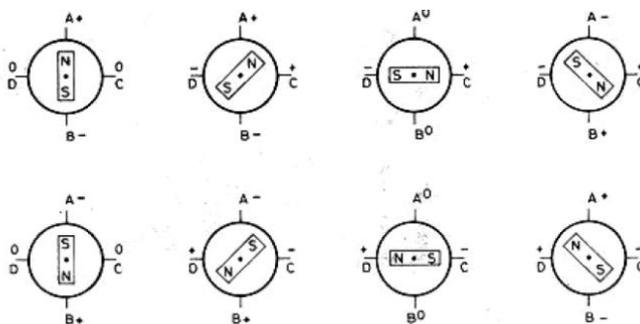


Figura 29:azionamento a mezzo passo

Questa modalità consiste nell'usare insieme i due tipi di azionamenti visti in precedenza in modo tale che la rotazione del motore sia pari a 45° .

La differenza sostanziale con i casi precedenti è che la coppia prodotta, risulta essere irregolare in quanto si passa da un valore massimo, quando le due fasi vengono alimentate, a un valore minimo relativo all'alimentazione di una sola fase.

Modulando i campi magnetici generati comunque possono essere realizzati anche azionamenti più fitti come l'azionamento a quarto e ad ottavo di passo.

Nei motori a magneti permanenti unipolari, a differenza di quelli bipolari, la corrente viene fatta scorrere in un solo verso e i fili degli avvolgimenti devono essere più sottili a parità di grandezza del motore essendo avvolti in coppia sulle espansioni polari dello statore.

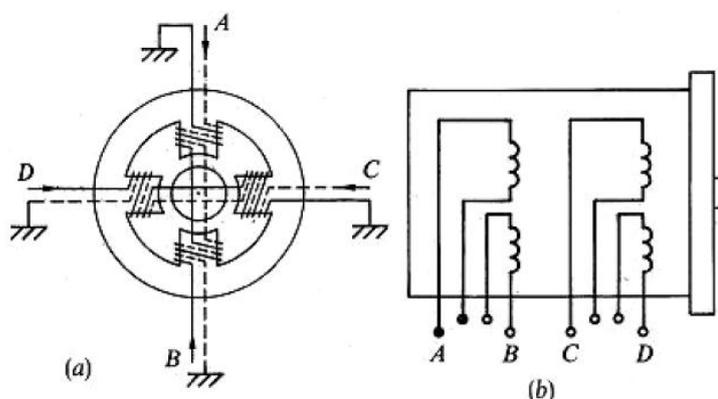


Figura 30:step-motor a magneti permanenti unipolare

In questo caso, alimentando, ad esempio, la fase A si genera un campo magnetico con il polo Sud sull'espansione superiore dello statore e il polo Nord su quello inferiore.

Attivando la fase B, invece, si genera un campo magnetico opposto a quello appena descritto. Le fasi C e D si comportano in maniera analoga. La sequenza di alimentazione delle fasi è identica a quelle viste per i motori bipolari.

Lo svantaggio principali dei motori unipolari rispetto a quelli bipolari è che la coppia motrice che si riesce a generare è minore.

Questo svantaggio è dovuto al fatto che, essendo gli avvolgimenti costituiti da fili più sottili e, quindi, con un maggiore resistenza, la corrente che vi può scorrere è minore il che si traduce in una forza di attrazione magnetica tra rotore e statore ridotta rispetto al caso precedente.

2.1.2.2 I motori passo-passo a riluttanza variabile

I motori passo-passo con rotore a magnete permanente non consentono di raggiungere elevate velocità di rotazione che, al contrario, possono essere raggiunti con i motori a riluttanza variabile il cui schema semplificato è riportato in fig. 31.

Osservando tale schema si nota che, in questi tipi di motore, lo statore è costituito da espansioni polari su cui vengono realizzati gli avvolgimenti e il rotore, realizzato in generale con ferro dolce, è costituito da un numero di espansioni minori rispetto allo statore.

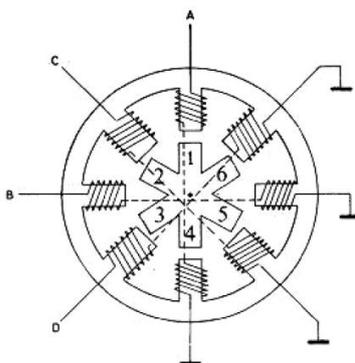


Figura 31: Step motor a riluttanza variabile

Anche con questo motore sono possibili i tre tipi di azionamenti visti in precedenza. La figura 31 illustra la posizione del rotore con la fase A attiva. Quando viene attivata la fase C il rotore ruota in modo da rendere minima la riluttanza del percorso magnetico. Il dente 2 del rotore, più vicino alla fase attiva, si allinea al polo ruotando in senso orario di 15° . L'attivazione della fase B fa ruotare il rotore di altri 15° , in modo che il dente 3 si venga ad allineare al nuovo polo attivo, e così via.

2.1.2.3 I motori passo-passo ibridi

Come detto in precedenza questo tipo di motori raggruppano i vantaggi dei due precedenti tipi di motori passo-passo.

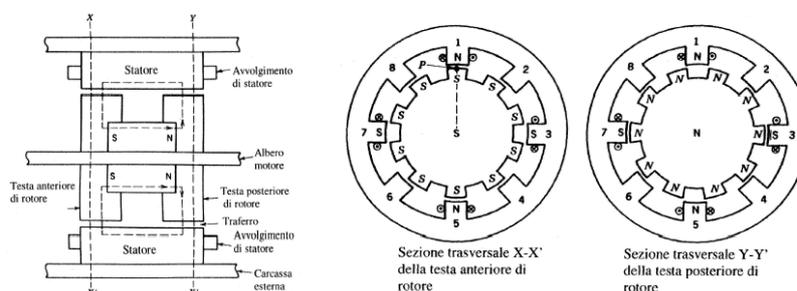


Figura 32:step motor ibrido

Come si può osservare in figura 32, lo statore è a poli salienti ovvero, ogni polo contiene, un avvolgimento di eccitazione sui denti longitudinali opposti.

Il rotore contiene un magnete permanente cilindrico assiale con i due poli alle estremità e porta su ogni metà un sistema di denti sfasati tra di loro come illustrato.

In assenza di eccitazione, il campo magnetico residuo sui poli statorici interagisce con quello rotorico creando una piccola coppia di ritenzione, utile a tenere fermo il motore.

2.1.2.4 Confronto tra i vari tipi di motori passo-passo

Il tipo di motore passo-passo più usato è quello a magneti permanente, mentre quello ibrido viene generalmente preferito a quello a riluttanza variabile e viene usato quando si richiedono elevate prestazioni.

I valori più comuni del passo di rotazione sono 1.8° , 3.6° , 7.5° , 9° , 15° . La frequenza dei passi, normalmente qualche centinaio per secondo, può raggiungere valori elevati, anche oltre gli 800 passi/sec, ed arrivare, in certi motori per applicazioni specialistiche, fino a 2000 passi/sec.

In figura 33 sono riportate le caratteristiche di coppia del motore passo-passo in funzione della frequenza di passo.

La curva A indica l'andamento della massima coppia di carico che può essere applicata al motore senza che questo perda il passo. La curva B, analoga alla precedente, è valida in fase di avviamento del motore.

Ovviamente, a parità di coppia di carico la velocità che il motore può sopportare senza perdere passi è minore in fase di avviamento, a causa dell'inerzia, che non a regime.

Nella zona di grafico compresa tra le due curve, detta *slew-range*, il motore non perde il passo a patto che la velocità non vari bruscamente.

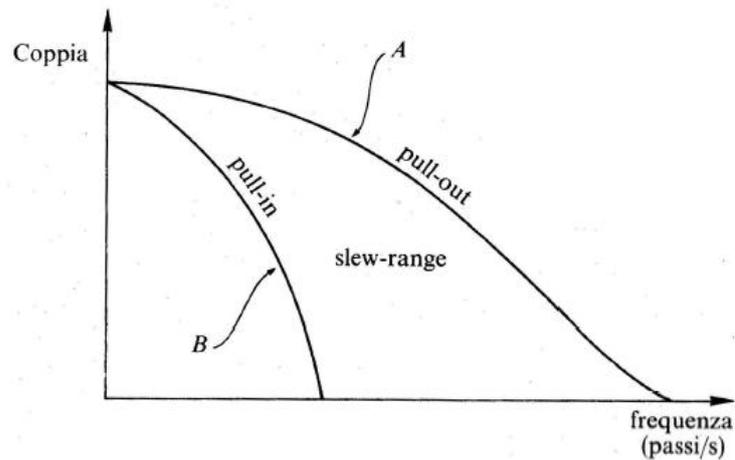


Figura 33:caratteristiche coppia/ frequenza

2.1.2.5 Scelta dei motori da utilizzare

Nello sviluppo del primo prototipo del Navi-Robot, la scelta di utilizzare gli step-motor per azionare i giunti, è stata dettata dalla necessità di ottenere un'alta precisione nel posizionamento, utilizzando un'elettronica di controllo che non era in grado di gestire in maniera automatica e veloce gli errori di posizionamento dovuti alle tolleranze meccaniche della struttura stessa e quindi di ridurre i giochi meccanici presenti.

Nel progetto del nuovo sistema di controllo utilizzato, basato codice e hardware ottimizzati, in realtà sarebbe stato possibile utilizzare anche i motori dc, temporizzando tutte le operazioni in maniera opportuna e usando i sensori di feedback presenti.

In ogni caso, si è ritenuto opportuno continuare ad utilizzare i motori passo-passo perché, grazie al loro particolare funzionamento, si riesce ad avere una sorta di doppia

retroazione potendo controllare il sistema sia in base al numero di passi, che utilizzando il sensore di posizione.

Il modello di motore utilizzato, prodotto dall'azienda "MAE" ed identificato dalla sigla "HY200 – 2220 100 D8" , è realizzato con una tecnologia che garantisce alte prestazioni con ingombro e peso ridotti. Si tratta di uno step motor standard da 200 passi/giro, avente, cioè, uno *step angle* pari a 1.8° .

Ovviamente, vista l'altissima risoluzione richiesta per i movimenti del Navi-Robot, 200 posizioni non possono ritenersi sufficienti (nonostante tale numero salga a 1600 con l'utilizzo della modalità a ottavo di passo) ed è stato quindi necessario utilizzare un riduttore di velocità, con rapporto di riduzione di $1/64$ per ottenere la risoluzione inferiore a quella rilevabile dai sensori di posizione.

2.1.3 I motori dc

I motori dc vengono utilizzati per muovere gli slider del sistema frenante e del sistema di commutazione tra modalità di funzionamento. I motori dc a magneti permanenti utilizzati sono prodotti dalla Johnson Electric.

I motori dc a magneti permanenti presentano, un rotore (A) e una parte (B e C) che genera un campo magnetico fisso detta statore.

Sull'albero è poi presente un interruttore rotante (D), o Anello di Pacinotti, con contatti striscianti (spazzole) in grafite, che inverte due volte ad ogni giro la direzione della corrente elettrica che percorre i due avvolgimenti.

Questa corrente genera un campo magnetico che entra ed esce dalle parti arrotondate dell'armatura ed è diretto, in base al verso di rotazione della corrente, dall'avvolgimento blu in figura all'avvolgimento rosso in figura o viceversa.

Questo campo magnetico fa nascere delle forze di attrazione e repulsione con i magneti permanenti fissi (N e S) che mettono in rotazione il rotore.

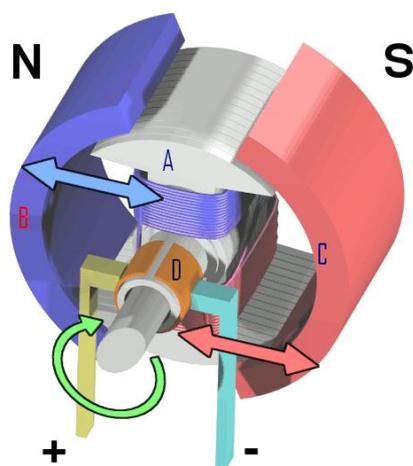


Figura 34:Schema motore dc a magneti permanenti

Tra spazzole e collettore, nei momenti di commutazione, si hanno transitori di apertura degli avvolgimenti induttivi e quindi scintillio.

Queste scintille comportano disturbi elettrici sia irradiati nell'ambiente circostante che trasmessi al generatore di tensione e possono causare, quindi, problemi di compatibilità elettromagnetica.

In figura 35, è riportata l'analisi dei disturbi presenti sulle linee di alimentazione del motore causati, dal fenomeno appena descritto, effettuata usando il motore dc collegato al freno senza alcun tipo di controllo.

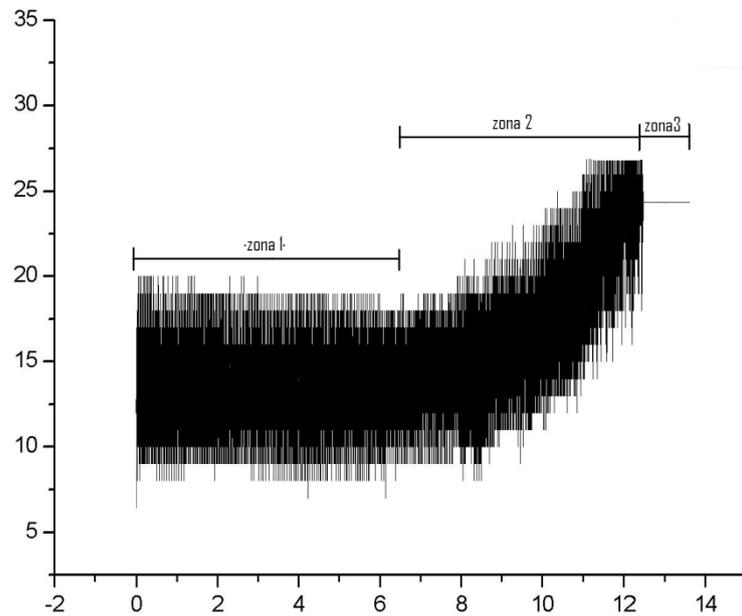


Figura 35:andamento della corrente (tempo-Valore binario ADC)

Osservando la forma d'onda, sono state individuate tre zone distinte indicative della modalità di lavoro del motore. Nella zona 1, il motore muove le camme senza particolare sforzo e si nota che il valore medio della corrente che scorre all'interno del motore resta circa costante, nella zona 2 il motore inizia a spostare le ganasce che cominciano ad entrare in contatto con la cassa esterna.

Per tale motivo, il motore, compie uno sforzo sempre maggiore e assorbe più corrente dall'alimentatore. Questo sforzo maggiore causa quindi un innalzamento del valore medio della corrente assorbita finché non si raggiunge la zona 3. In questa zona il motore, avendo ruotato al massimo le camme, non riesce più a ruotare e quindi, mentre il valore medio della corrente assorbita resta al valore massimo poiché il motore resta sotto sforzo, le oscillazioni risultano molto ridotte poiché il collettore a spazzole, solidale all'albero, resta fermo non generando lo scintillio.

Nel nostro caso, come verrà illustrato in seguito, si sfrutta l'innalzamento del valore medio per fermare in maniera automatica i motori durante la fase di espansione delle ganasce.

Per controllare i motori usando segnali TTL, viene utilizzato il driver L298N che consente di pilotare due motori che assorbono fino a 3 A.

Per effettuare l'analisi della forma d'onda della corrente, essendo stato necessario convertire il segnale in corrente in un segnale in tensione, è stata utilizzata una resistenza di sensing di $1\ \Omega$, collegata in serie con gli avvolgimenti del motore, ai capi della quale è stata prelevata in maniera differenziale la tensione.

Questa tensione differenziale viene in seguito convertita usando il convertitore AD SAR con amplificatore differenziale in ingresso, presente sui microcontrollori.

In linea di massima, il funzionamento del driver e della resistenza di sensing può essere riassunto con il seguente schema circuitale:

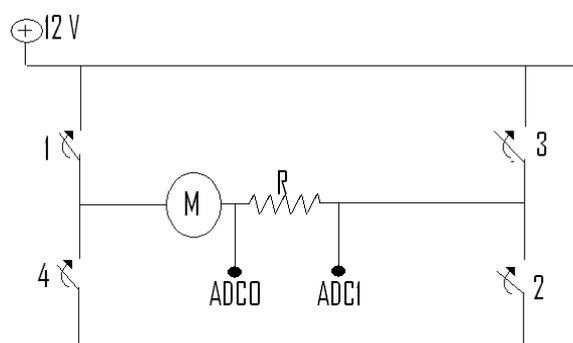


Figura 36:schema circuitale motore dc con Rsens e driver

Osservando la figura 36 si nota che, facendo chiudere alternativamente le coppie di interruttori 1/2 o 3/4, si inverte la rotazione del motore cambiando il verso della corrente.

Sulla resistenza di sensing scorre quindi una corrente I_{mot} , convertita dalla resistenza in un segnale di tensione

$$V_{mot} = R_{sens} * I_{mot} = 1 * I_{mot} ([\Omega] * [A])$$

che andrà in ingresso all'amplificatore differenziale con guadagno unitario che fornirà all'ADC il segnale da convertire.

2.1.4 L'encoder seriale assoluto a 16 bit

Per controllare la posizione del braccio meccanico relativo al giunto, viene utilizzato un encoder assoluto monogiro fotoelettrico a 16 bit, con interfaccia seriale SSI, modello “ocd-sl00b-0016-b150-pr1” prodotto dalla Fraba Posital.

Prima di illustrare le caratteristiche del tipo di interfaccia presente, è opportuno fare un accenno alle caratteristiche degli encoder assoluti.

L'encoder è un apparato elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse rotante in un segnale elettrico digitale.

Collegato ad opportuni circuiti elettronici, con appropriate connessioni meccaniche, l'encoder è in grado di misurare spostamenti angolari, movimenti rettilinei e circolari nonché la velocità di rotazione e accelerazioni.

Esistono varie tecniche per il rilevamento del movimento angolare: capacitiva, induttiva, potenziometrica e fotoelettrica.

Negli **encoder assoluti** fotoelettrici, i segnali elettrici d'uscita codificano l'esatta posizione istantanea del rotore rispetto al corpo.

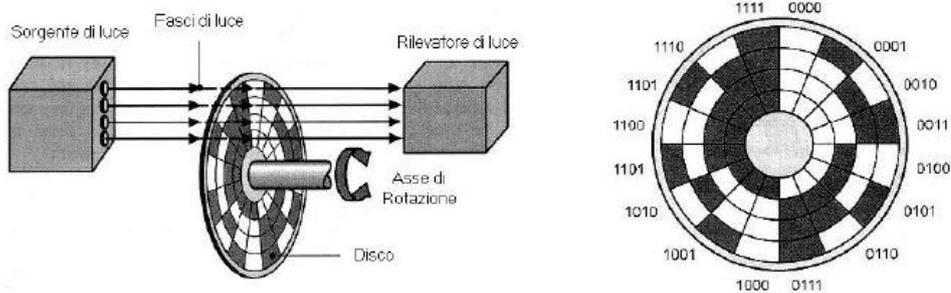


Figura 37: schema di un encoder assoluto

In qualsiasi momento, quindi, un adeguato circuito di decodifica può decodificare e visualizzare la posizione angolare dell'asse in esame.

I dati relativi allo spostamento dell'asse (direzione, velocità e accelerazione) sono derivati dall'elaborazione della sua posizione assoluta nel tempo.

Il cuore degli encoder assoluti, il cui schema è riportato in figura 35, è rappresentato dal disco.

Tale disco viene, infatti, codificato alternando delle zone chiare a delle zone opache, in modo tale che i sensori ottici presenti a valle del disco, quando quest'ultimo viene illuminato, ricevano o meno la luce creando così la parola binaria corrispondente ad una particolare posizione dell'albero dell'encoder.

In base alla struttura del disco si possono classificare ulteriormente gli encoder assoluti in **monogiro** che, facendo compiere una rotazione di 360° all'albero, fornisce lo stesso valore binario di partenza e **multigiro** che presenta un disco principale identico a quello dell'encoder assoluto monogiro e una serie di dischi secondari che permettono di conteggiare i giri del suo asse. I vari tipi di encoder assoluto possono fornire il dato in uscita in maniera seriale o parallela.

L'encoder utilizzato per il giunto in questione, presenta un'interfaccia di tipo seriale, chiamata Synchronous Serial Interface (SSI), che consente, utilizzando uno

shift-register a 16 bit in uscita, di ricevere i dati in maniera seriale a seguito di un opportuna generazione dei segnali di clock.

L'interfaccia SSI è basata sul protocollo di comunicazione RS422, che viene comunemente usato per comunicazioni a lunga distanza in ambiente industriale.

Questo tipo di interfaccia è stata introdotta dai costruttori di encoder, in seguito alla necessità di limitare in numero di connessioni necessarie all'interfacciamento degli stessi in caso di un elevato numero di bit, mantenendo comunque bassa la probabilità di errori di comunicazione.

Il numero di cavi necessari all'interfacciamento degli encoder SSI, è pari, infatti, a 6 di cui 2 differenziali per la linea dati, 2 differenziali per il clock, 1 per l'alimentazione e 1 per la massa.

Nel caso in cui l'encoder presenti funzioni quali Preset, Latch e Complement del valore di uscita, il numero di cavi necessari può salire al massimo a 10 contro, ad esempio, i 21 necessari con gli encoder paralleli nel caso di dati a 16 bit.

L'uscita dell'encoder è, quindi, di tipo differenziale e presenta livelli di tensione tra 0 e 5 V compatibili, quindi, con la logiche TTL.

In ambiente industriale, per comunicazioni a grandi distanze (circa 1200 m @ 10 Mbps), il segnale differenziale, interpretato usando dei fotoaccoppiatori che riescono a riconoscere il valore logico alto fino a quando la differenza di tensione tra le due linee è di 200 mV, consente di limitare al minimo gli errori di comunicazione.

Lo standard RS422 prevede, quindi, che le uscite del ricevitore e del trasmettitore siano pilotati da driver che generano un segnale differenziale, come illustrato in figura

38, mentre gli ingressi siano equipaggiati con fotoaccoppiatori per convertire il segnale differenziale in un singolo livello logico.

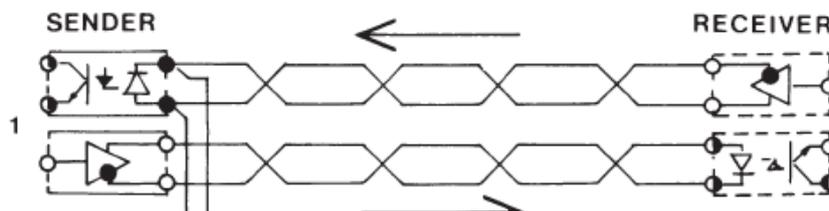


Figura 38:bus SSI/RS422

In figura 39, è riportato un esempio dei segnali differenziali che percorrono il bus di comunicazione dal trasmettitore al ricevitore.

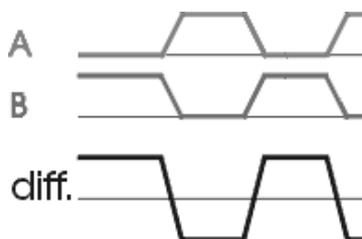


Figura 39:segnali differenziali in uscita dal trasmettitore

A questo punto, illustriamo più il dettaglio, la modalità di invio dei dati da parte dell'encoder scelto per la nostra applicazione.

In figura 40, è presentato il formato del frame dati e il segnale di clock single-ended.

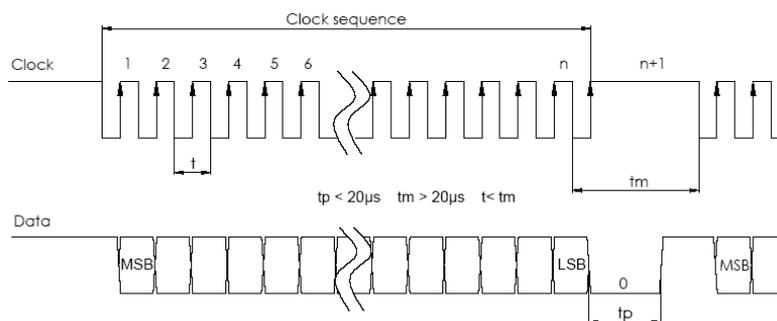


Figura 40:clock e data frame dell'encoder SSI

Prima di illustrare il principio di funzionamento è importante sottolineare che le linee data+ e Ck+ sono precaricate al valore logico alto dalla circuiteria interna dell'encoder.

Quando la linea del clock viene abbassata, l'encoder memorizza i dati su un particolare registro di uscita. A questo punto, su ogni successivo fronte di salita del clock, il dato viene trasmesso, in maniera differenziale, serialmente a partire dal MSB.

L'algoritmo di controllo era ed è tutt'ora implementato sugli slave che sono posizionati in prossimità di ogni giunto e quindi non è stato necessario utilizzare il fotoaccoppiatore per ricevere il dato differenziale poiché la lunghezza del bus di comunicazione non supera i 50 cm di lunghezza.

I segnali data+ e data- erano comunque utilizzati entrambe, ma semplicemente con lo scopo di rilevare degli eventuali errori su una delle due linee dati effettuando un OR logica tra i due valori digitali. In assenza di errori, il dato da elaborare veniva prelevato esclusivamente dalla linea data+.

2.2 Caratteristiche dell'elettronica di controllo originale

All'inizio dell'attività di ricerca l'elettronica di controllo del navi robot presentava molte problematiche in termini di prestazioni e caratteristiche hardware e firmware.

Tale sistema, che era ed è tutt'ora basato su una logica di tipo master-multislave, risultava infatti efficace ma non totalmente efficiente dal punto di vista del controllo degli attuatori, dei sensori e della velocità di comunicazione tra le varie parti.

2.2.1 Il sistema Master-multiSlave e l'interfaccia TWI non ottimizzati

Poiché il potere di calcolo del controllo elettronico è stato distribuito sulla struttura in corrispondenza dei singoli giunti, la necessità di rendere i giunti intelligenti e quindi in grado di comportarsi in maniera corretta gestendo gli eventuali errori durante le varie operazioni, aveva reso necessario la progettazione di un'elettronica distribuita sulla struttura in grado di agire sia in maniera indipendente che in maniera globale, rispondendo ai controlli richiesti dall'utilizzatore.

Per rispondere a tale esigenza, il robot è stato equipaggiato con un sistema master-multislave che consentiva, attraverso l'uso di un numero limitato di connessioni tra il master remoto e i microcontrollori slave locali, di inviare i vari segnali di controllo.

Per rendere i microcontrollori, presenti sui bracci, intercomunicanti, la scelta è ricaduta sull'utilizzo del protocollo Inter-Integrated Circuit (I²C) che, per motivi di copyright, sui microcontrollori della famiglia Atmel utilizzati, viene chiamato Two

Wire serial Interface (TWI) e che viene utilizzata tutt'ora per l'invio dei segnali di controllo e per la lettura dei dati.

Il protocollo I²C o TWI è, appunto, un protocollo basato sul concetto Master-Slave e, usando microcontrollori a 8 bit, tale protocollo consente di indirizzare fino a 127 slave con indirizzo univoco usando solo 3 cavi di connessione, uno per il clock SCL, uno per la linea dati SDA e uno per la massa.

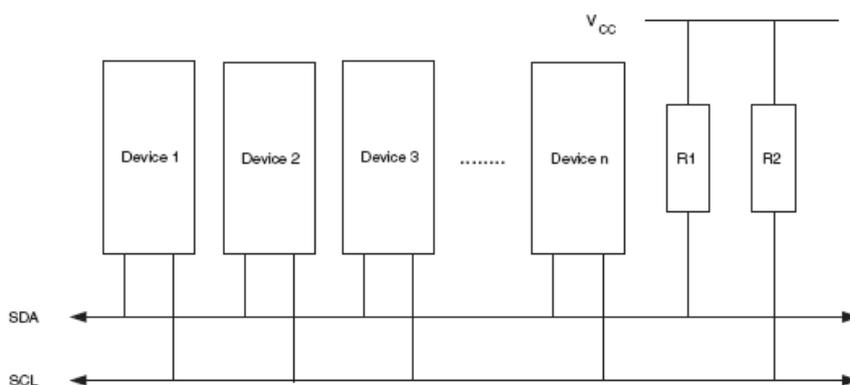


Figura 41:schema a blocchi del sistema I2C

Questo protocollo prevede che i dati vengano inviati usando un frame di 8 bit dati e di 7 bit per gli indirizzi più un ottavo bit usato per discriminare l'operazione di scrittura o di lettura su o da un particolare slave.

Un ulteriore aspetto importante del protocollo I²C, è la possibilità di effettuare delle chiamate generali con le quali, usando l'indirizzo 0x00 che indirizza tutti gli slave, si ha l'opportunità di scrivere lo stesso dato su tutti gli slave e quindi, ad esempio, di far eseguire le stesse operazioni contemporaneamente a tutti.

Il protocollo I²C, usando i microcontrollori Atmel, consentirebbe di trasferire dati con una velocità di trasmissione fino a 400 kHz anche se, in caso di un elevato numero

di slave connessi, questa velocità è raggiungibile solo a seguito di un opportuna bufferizzazione delle due linee SDA e SCL.

Tali linee vengono precaricate al valore logico 1 utilizzando due resistori di pull-up di valore opportuno calcolato secondo la seguente relazione:

f[kHz]	Rmin	Rmax
≤100	$(V_{cc}-0,4 \text{ V})/3\text{mA}$	1000 ns/Cb
>100	$(V_{cc}-0,4 \text{ V})/3\text{mA}$	300 ns/Cb

Tabella 2:Calcolo R di pull-up

dove Cb indica la capacità totale del bus.

Secondo questo protocollo il master deve controllare la correttezza della comunicazione, generare il segnale di clock, indirizzare correttamente lo slave con il quale vuole comunicare ed effettuare le general call.

Gli slave, quando vengono indirizzati, riconoscono via hardware il proprio indirizzo o la chiamata generale, si sincronizzano sul segnale di clock ed eseguono le operazioni richieste dal master.

Gli slave non indirizzati si portano in tri-state in modo da non disturbare la comunicazione. Nella seguente figura è riportato il formato del frame per la comunicazione tramite questa interfaccia.

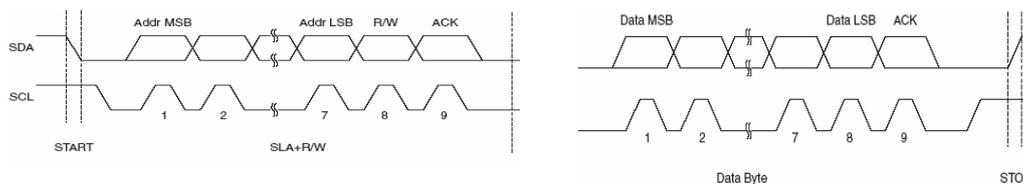


Figura 42:formato del frame dati e indirizzo del protocollo I2C

I segnali di START e di STOP vengono generati dal master mentre l'ACK viene usato per comunicare, a chi trasmette, la corretta ricezione dell'informazione.

Per il nostro particolare scopo, come sarà illustrato in dettaglio nel seguente paragrafo, il microcontrollore Master verrà progettato per fungere da interfaccia tra il computer, ovvero l'utente, e la struttura.

In particolare, il master invierà agli slave i segnali di controllo opportuni per far svolgere le varie operazioni previste per i singoli slave per tutti gli slave contemporaneamente.

2.2.1 I compiti del Master remoto

Come già accennato il microcontrollore master, ha esclusivamente la funzione di interfacciare l'utente con il NaviRobot e, quindi, con tutti i microcontrollori che su esso saranno dislocati.

Nella figura seguente è riportato il diagramma di flusso che descrive il funzionamento del microcontrollore e tutte le operazioni che esso svolgeva prima dell'ottimizzazione.

Il master restava in attesa dei comandi che gli arrivavano dall'utente e, solo dopo l'invio da parte dell'utente dei vari segnali di controllo, eseguiva diversi tipi di operazioni, a seconda che si volesse intervenire su un singolo o su tutti i giunti presenti nel sistema.

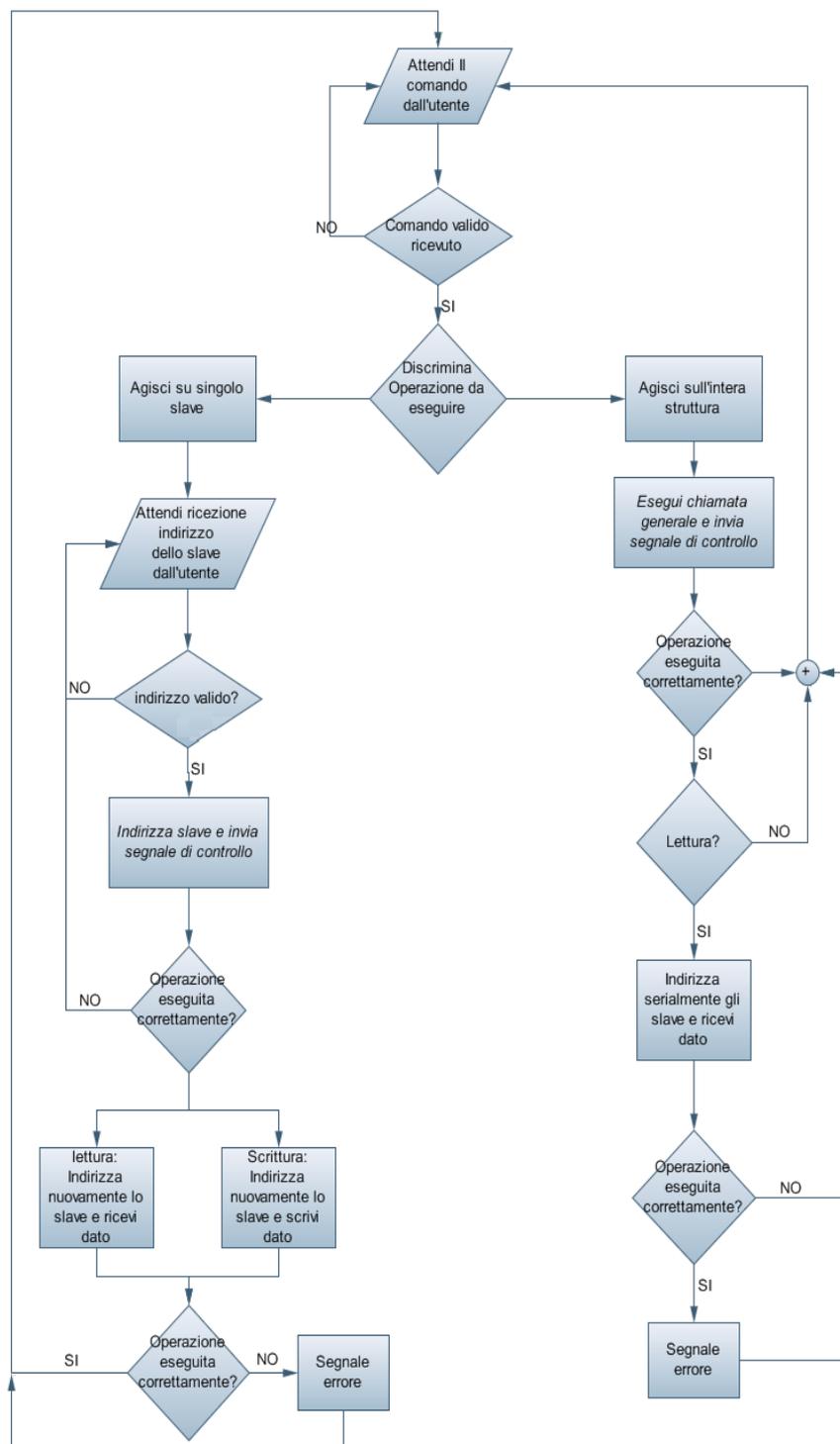


Figura 43: diagramma di flusso operazioni master

In particolare quando si agiva su un singolo giunto l'utente poteva eseguire le seguenti operazioni:

1. Comunicare allo slave di leggere il proprio encoder e successivamente di inviare i dati relativi alla posizione del braccio;
2. Comunicare allo slave di commutare il proprio giunto di competenza in modalità robot e inviare i byte relativi alla posizione da raggiungere;
3. Comunicare allo slave di bloccare o rilasciare il braccio azionando il freno di competenza;
4. Comunicare allo slave di far commutare il braccio da modalità Robot a Navigatore e viceversa azionando il sistema di commutazione;

Se, al contrario, si agiva in maniera congiunta su tutta la struttura era possibile comandare il master in modo da effettuare le seguenti operazioni.

1. Congelamento istantaneo della posizione dell'intero braccio meccanico. In questo caso tutti gli slave leggevano e memorizzavano i dati degli encoder su due registri dedicati esclusivamente a questa operazione. Successivamente, il master in modo automatico, indirizzava serialmente gli slave richiedendo l'invio dei dati memorizzati in precedenza. Questa operazione consentiva di memorizzare una particolare configurazione dell'intero braccio in una determinata posizione;
2. Bloccaggio o sbloccaggio istantaneo dell'intero braccio del NaviRobot. In questo caso, il master inviava un particolare segnale di controllo a tutti gli slave che provvedevano ad azionare opportunamente il sistema frenante;

3. Commutazione dell'intero braccio in modalità robot o Navigatore. In questo caso il master ordinava agli slave di azionare in modo opportuno il sistema di commutazione.

Una volta illustrate le operazioni compiute dal master si può procedere con l'illustrazione delle operazioni che venivano effettivamente eseguite per il controllo degli attuatori e dei sensori del robot.

2.2.2 I compiti dello slave locale

Il microcontrollore slave, posizionato in prossimità di ogni giunto, eseguiva tutte le operazioni richieste dal master e, inoltre, gestiva il sensore di posizione e gli attuatori in base agli algoritmi di controllo che verranno illustrati nel prosieguo.

Sia nella versione ottimizzata che nella versione precedente, lo slave locale rappresenta, effettivamente, il cervello di tutto il sistema in quanto è in grado di eseguire in maniera autonoma tutte le operazioni necessarie. Un primo aspetto importante in entrambe le versioni, che risalta osservando il flusso di processo delle operazioni dello slave, visibile nelle seguenti figure, è che, quest'ultimo, è totalmente svincolato dalle operazioni del master.

Questa caratteristica consente di intervenire su un qualsiasi giunto della struttura, in qualsiasi momento in modo da avere pieno controllo di ogni singola parte del sistema.

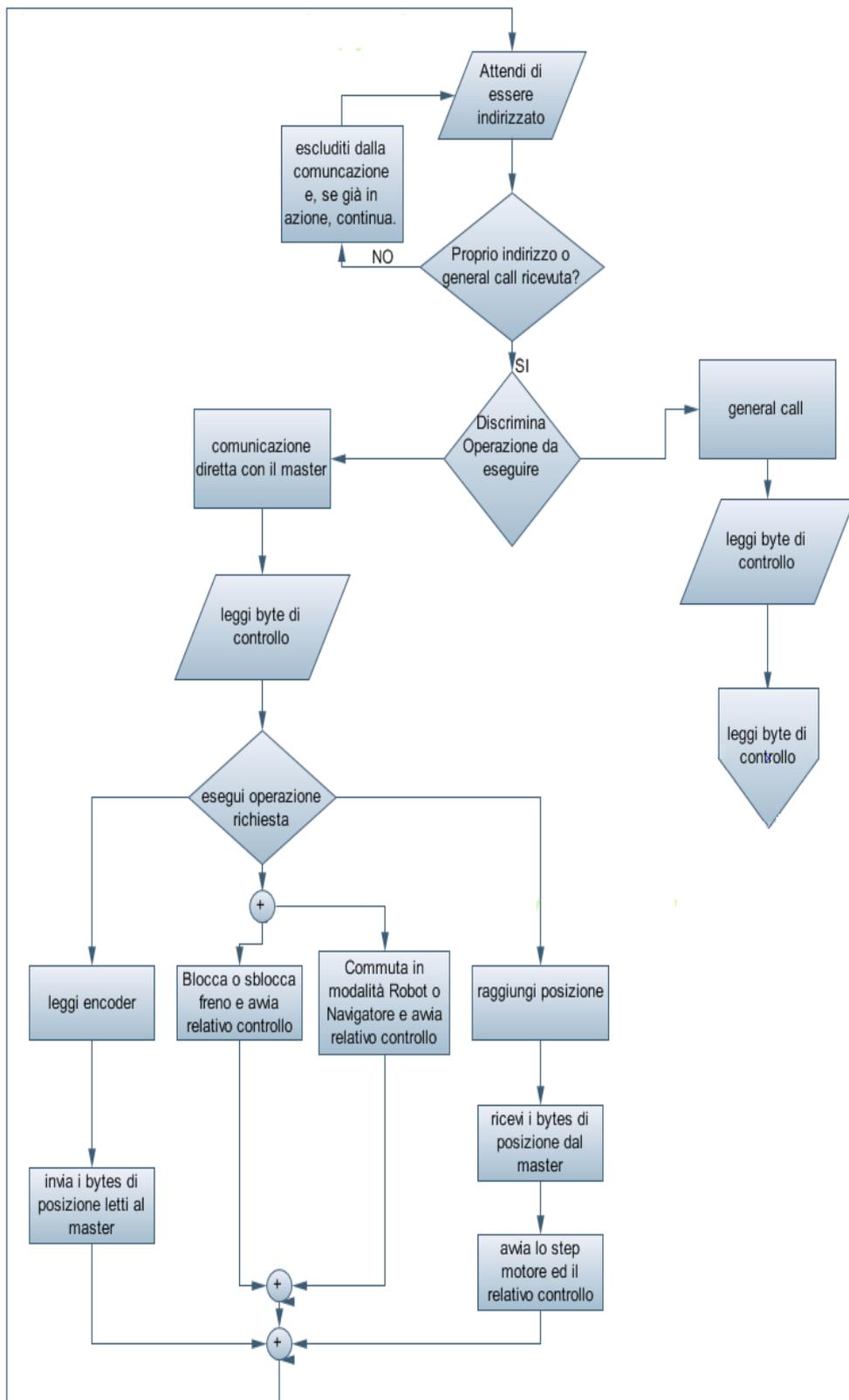


Figura 44:flusso operazioni slave a seguito dell'indirizzamento diretto

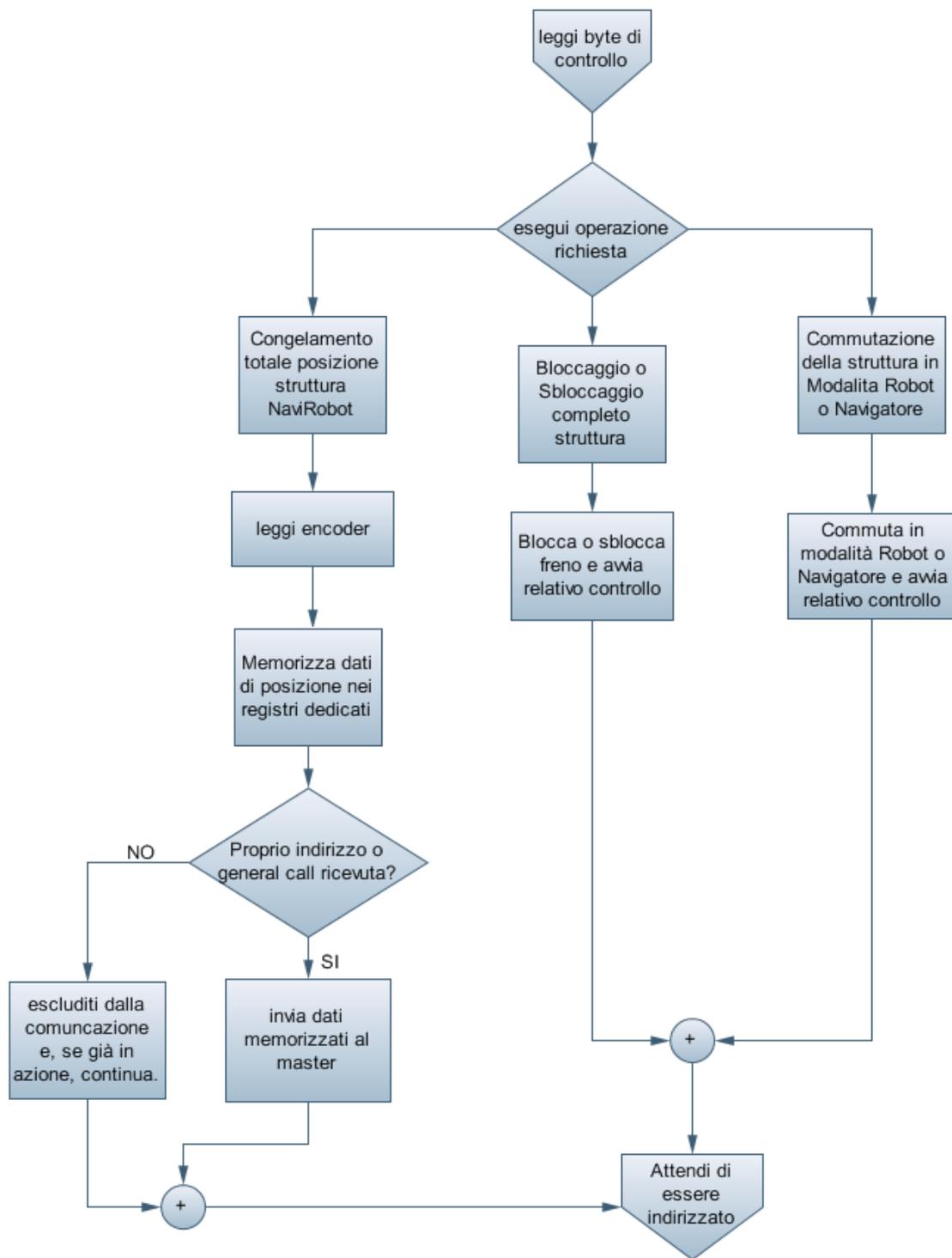


Figura 45:flusso operazioni slave a seguito di una general call

Viste le velocità di comunicazione in gioco, tale caratteristica consentiva un interfacciamento simultaneo, dal punto di vista dell'utente, con tutti i giunti presenti sul NaviRobot.

2.2.3 Le schede elettroniche

Con riferimento alla seguente figura, il prototipo della scheda elettronica del master era costituita semplicemente dal microcontrollore e dal blocco di alimentazione. Per quanto riguarda gli slave invece le schede erano composte dal microcontrollore, dal chip toshiba TA8435H, dal driver L298N per i motori dc, dall'interfaccia per il collegamento dell'encoder, dalle resistenze di sensing per la conversione dei segnali in corrente in segnali in tensione.

Inoltre, sugli slave erano presenti, i filtri RC e i relativi partitori di tensione, utilizzati rispettivamente per il filtraggio dei disturbi presenti sull'alimentazione dei motori e per rendere compatibili i livelli di tensione di modo comune ai capi delle resistenze di sensing, con i livelli logici TTL.

Di seguito è riportata una breve descrizione dei componenti utilizzati per la realizzazione della scheda che, tranne il driver toshiba TA8435H, sono stati utilizzati anche nella nuova versione.

Il driver L298N della ST Microelectronics consente di pilotare carichi di tipo induttivo che assorbono complessivamente fino a 4 A usando segnali logici di tipo TTL e consentendo, inoltre, una rapida interruzione dell'alimentazione al carico, quando i canali di ingresso TTL vengono posti a 0V.

In figura viene riportato il diagramma a blocchi e una vista del package esterno con descrizione dei pin del chip.

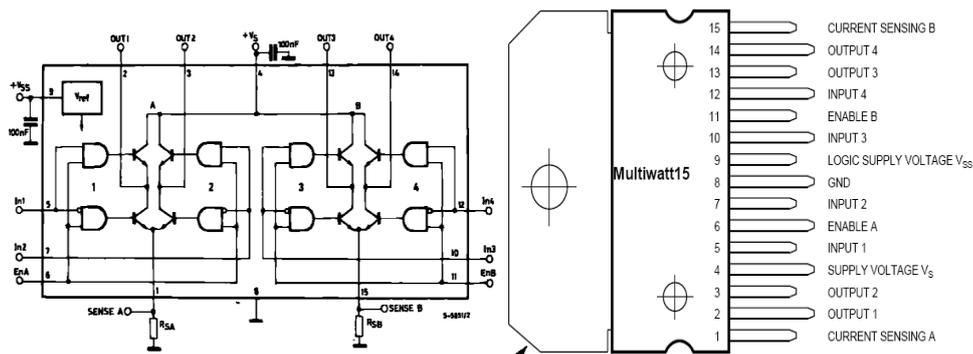


Figura 46:diagramma a blocchi e descrizione package dell'L298N

Il chip presenta 4 ingressi e 4 uscite, le quali costituiscono i due canali che consentono di interfacciare i due motori dc da controllare ai dispositivi logici TTL.

Questi due canali possono essere abilitati o meno applicando una tensione di 5 V agli ingressi di enable, rispettivamente, Ena ed Enb visibili in figura.

Inoltre, attraverso l'uso delle due resistenze di sensing indicate in figura 46, è possibile regolare la corrente di uscita massima. Per la nostra applicazione non si ha questa necessità e, quindi nella prima versione, i pin senseA e senseB sono stati collegati a massa tramite dei ponticelli, in modo da avere, in uscita, la massima corrente possibile.

Nella versione ottimizzata invece questi due pin sono stati collegati a due resistenze di valore 1Ω ed usate direttamente per il controllo della corrente eliminando, come vedremo sia i filtri RC e che i partitori di tensione in modo da ridurre le dimensioni

dell'hardware. Rispetto a chip, quali l'L293D, che però gestiscono al massimo fino a 1.2 A, l'L298N non presenta un sistema di protezione da sovratensione integrati dal lato del carico.

Per tale motivo, è stato necessario utilizzare dei diodi di protezione esterni collegati, come illustrato nella seguente figura, alle uscite del chip che collegano gli avvolgimenti induttivi.

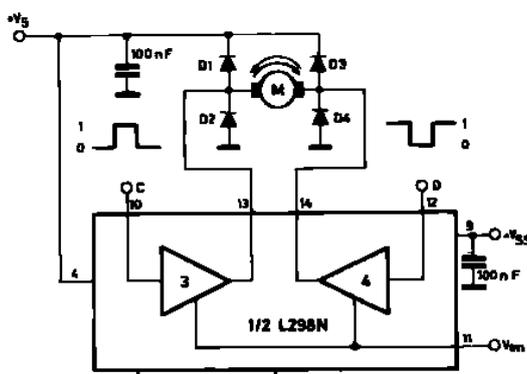


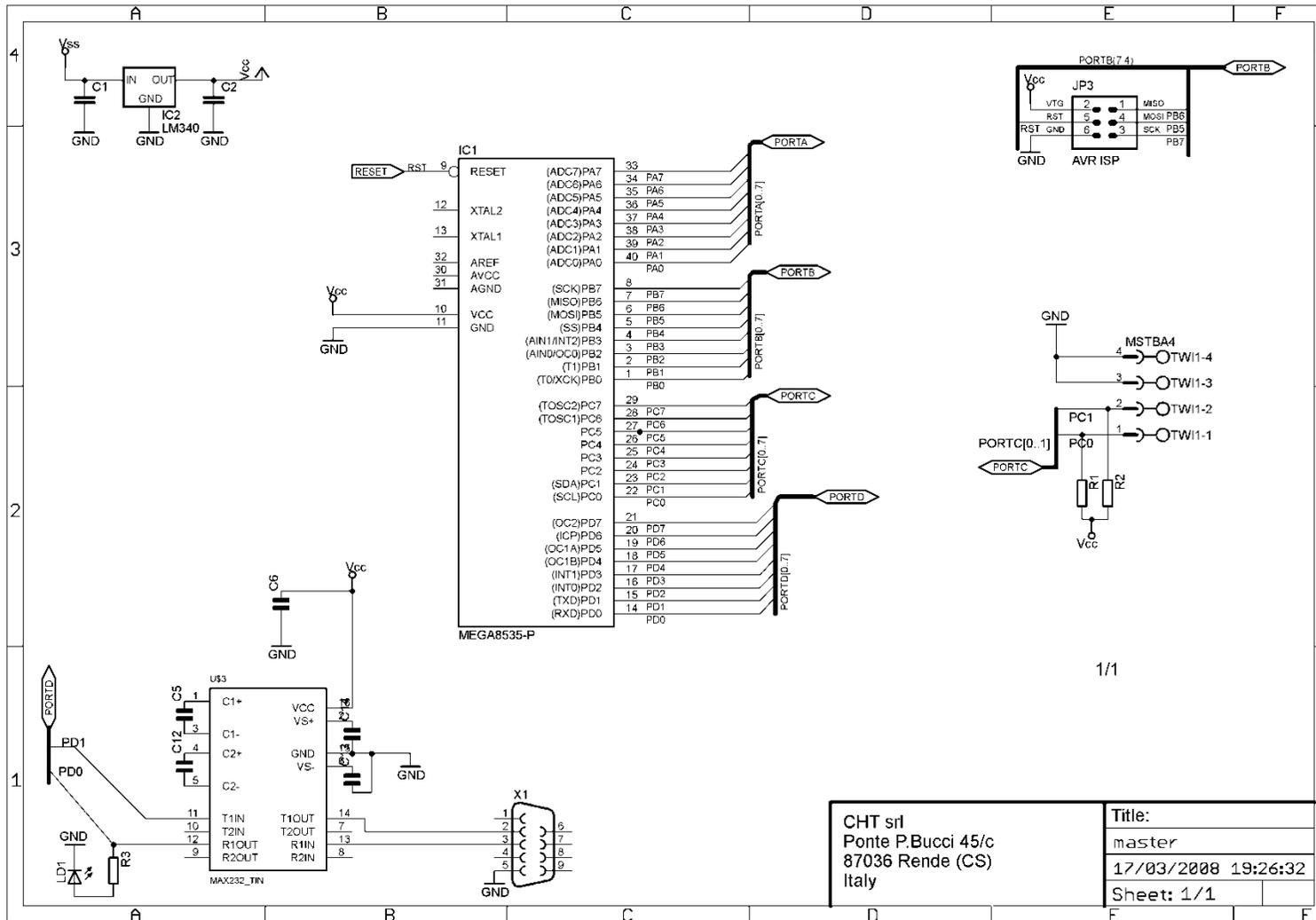
Figura 47:schema di collegamento dei diodi di protezione

I diodi di protezione utilizzati sono i BYV27 della VISHAY. Questi diodi sono del tipo Ultra Fast Avalanche che sopportano fino a 55 V di tensione inversa V_{RSM} e una corrente diretta I_{FWA} pari a 2 A, unitamente a reverse recovery time di 20ns. Gli ulteriori dettagli tecnici sono riportati nell'appendice A.

Su tutte le schede era inoltre l'interfaccia In-System Programming(ISP) che consente la programmazione del microcontrollore direttamente sulla scheda.

Si può notare, infine, che sulla scheda non sono presenti oscillatori in quanto il segnale di riferimento per il microcontrollore veniva generato dallo stesso, attraverso l'utilizzo di un oscillatore interno RC calibrato.

Nelle seguenti figure è possibile osservare le schede di controllo elettronico non ottimizzate i relativi schematici.



CHT srl Ponte P.Bucci 45/c 87036 Rende (CS) Italy		Title: master 17/03/2008 19:26:32 Sheet: 1/1	
--	--	---	--

Figura 48: Schematico Master non ottimizzato

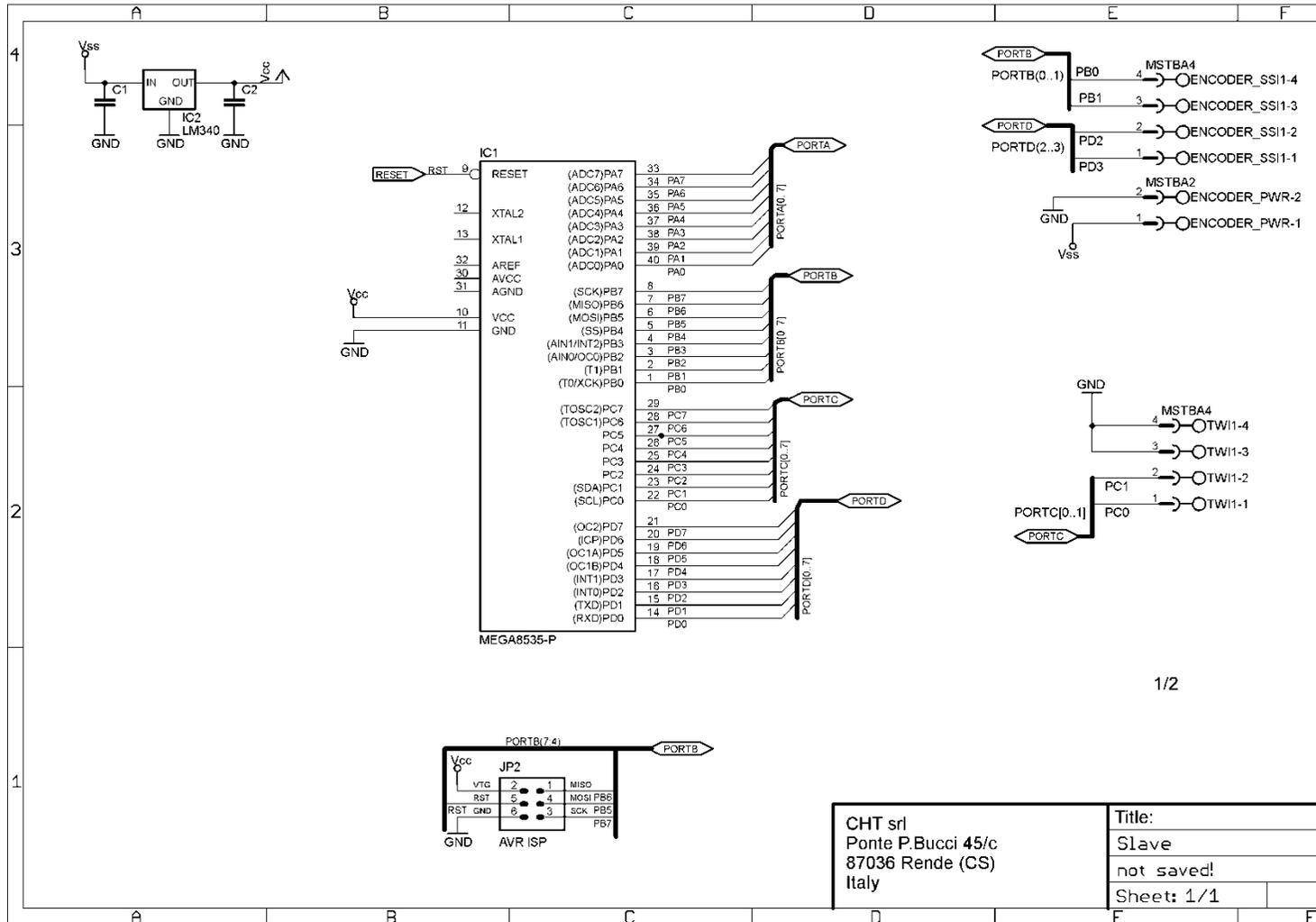


Figura 49: Schematico Slave non ottimizzato 1/2

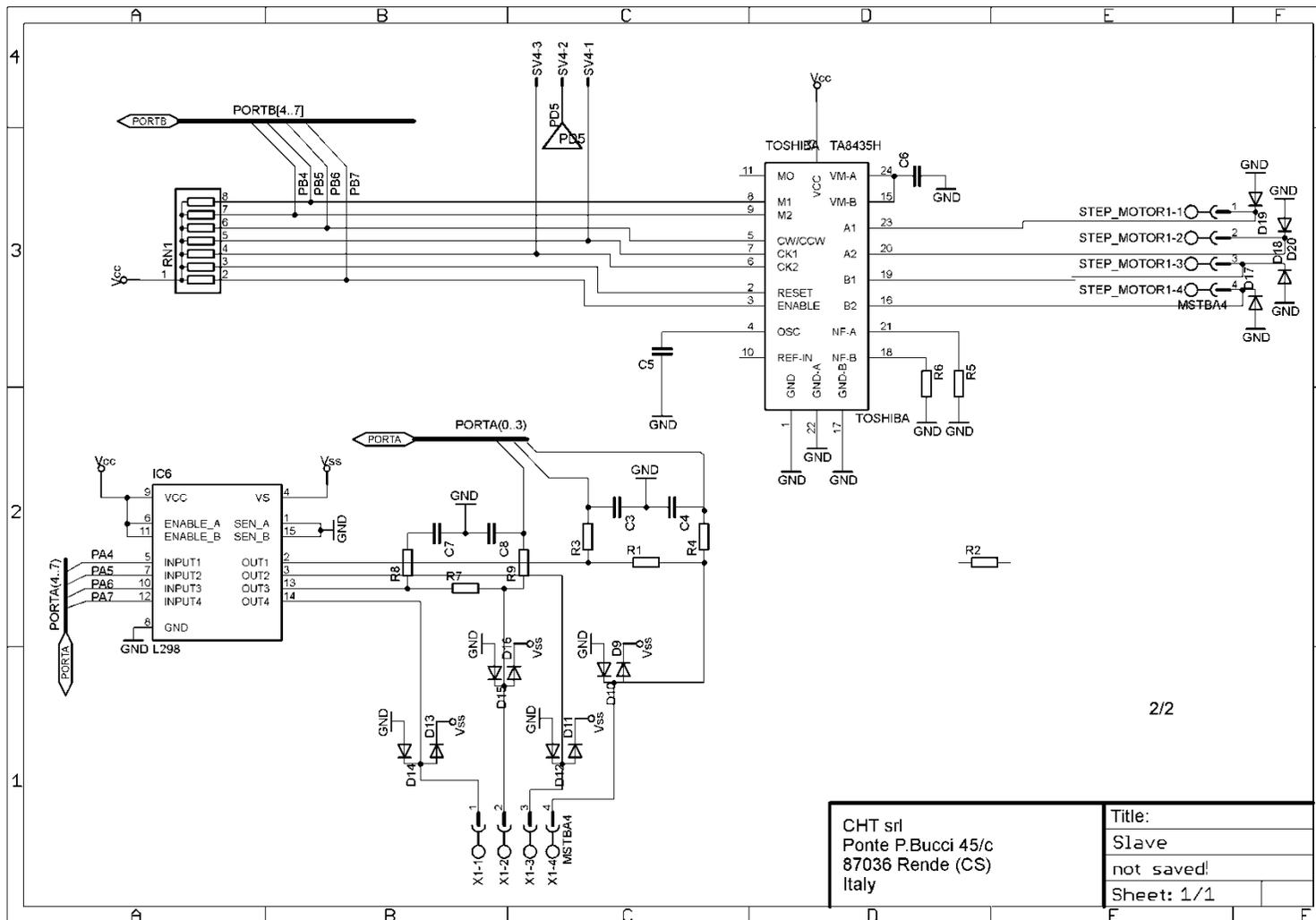


Figura 50: Schematic Slave non ottimizzato 2/2

CHT srl
 Ponte P.Bucci 45/c
 87036 Rende (CS)
 Italy

Title:	
Slave	
not saved!	
Sheet: 1/1	

2.3 Gli algoritmi di controllo

Dopo aver illustrato, nei precedenti capitoli, le varie caratteristiche degli attuatori, del sensore di posizione, del circuito elettronico e del microcontrollore, all'interno di questo paragrafo, si vogliono illustrare gli algoritmi di controllo che erano implementati sui microcontrollori master e slave e i dettagli del protocollo di comunicazione progettato con l'esposizione dei valori dei byte relativi al controllo che il master inviava allo slave.

2.3.1 Il Master

Come illustrato in precedenza, il master serve per interfacciare l'utente alla struttura. Il firmware implementato rendeva possibile l'attuazione delle operazioni illustrate nel diagramma di flusso di figura 43.

In riferimento al diagramma di flusso sopra citato, nel seguito saranno indicati i valori digitali relativi ai vari segnali di controllo inviati dall'utente e le azioni che il master svolgerà in seguito alla loro ricezione.

Quando il sistema viene acceso, il master si mette in ascolto, attraverso la USART, della porta seriale del pc.

L'utente aveva quindi l'opportunità, utilizzando un software che inviava dei caratteri ASCII, di comunicare al master il tipo di azione da eseguire secondo quanto riportato nella seguente tabella 1, per quel che riguarda le azioni su un singolo giunto, e nella tabella 3, per quel che riguarda le operazioni sull'intero braccio del NaviRobot.

Valori dei segnali di controllo inviati dall'utente per controllare un singolo giunto		
Carattere ASCII	Valore del bytes inviato al Master[Hex]	Azione che si vuole eseguire
1	0x31	Lettura encoder
2	0x32	Raggiungimento di una posizione
4	0x34	bloccaggio del freno
5	0x35	Sbloccaggio del freno
6	0x36	Commutazione in modalità Robot
7	0x37	Commutazione in modalità Robot

Tabella 3: Codici comunicati dall'utente al master

Poiché le operazioni sopra riportate, vengono eseguite su un singolo giunto, a seguito della ricezione di uno tra questi codici esadecimali, il software doveva comunicare al master l'indirizzo dello slave con il quale interagire.

Dopo questa operazione il master, utilizzando l'indirizzo comunicato dall'utente, comunicava allo slave i seguenti valori di controllo corrispondenti all'azione richiesta dell'utente.

Per ottenere la posizione di un giunto, l'utente, dopo aver comunicato al master l'indirizzo dello slave, non doveva più comunicare con esso ma era direttamente il master ad inviare automaticamente allo slave il byte di controllo relativo a questa operazione e a reindirizzare nuovamente lo slave richiedendogli, in questo caso, di inviare i due byte che letti dall'encoder.

Al contrario, per muovere il giunto verso una determinata posizione, il software doveva comunicare al master anche il numero esadecimale a quattro cifre relativo alla posizione da raggiungere, che il master inviava allo slave usando la TWI.

I codici di controllo che il master inviava allo slave utilizzando la TWI sono riassunti nella seguente tabella:

Valori dei segnali di controllo inviati dal master ad un solo slave	
Valore del byte inviato dal master[Hex] allo slave	Azione eseguita dallo slave
0x31	Letture dell'encoder e invio dei due byte di posizione
0x32	Raggiungimento della posizione indicata con relativo avvio dell'algoritmo di controllo
0x34	Avvio del motore dc relativo al freno e dell'algoritmo di controllo per lo stop in sovracorrente
0x35	Avvio del motore dc relativo al freno e dell'algoritmo di controllo per lo stop temporizzato
0x36	Avvio del motore dc relativo al sistema di commutazione e dell'algoritmo di controllo per lo stop in sovracorrente
0x37	Avvio del motore dc relativo al sistema di commutazione e dell'algoritmo di controllo per lo stop temporizzato

Tabella 4:valori dei byte di controllo inviati allo slave dal master

Se l'utente desiderava effettuare delle operazioni simultanee su tutta la struttura, il software di controllo inviava i caratteri ASCII, secondo quanto riportato nella seguente tabella:

Valori dei segnali di controllo inviati dall'utente per azionare tutti i giunti		
Carattere ASCII	Valore del bytes inviato al Master[Hex]	Azione che si vuole eseguire
3	0x33	Letture istantanea di tutti gli encoder
A	0x41	Bloccaggio dell'intero braccio
B	0x42	Bloccaggio dell'intero braccio
C	0x43	Commutazione dell'intero braccio in modalità robot
D	0x44	Commutazione dell'intero braccio in modalità navigatore

Tabella 5:valori dei byte di controllo per le azioni simultanee

Per effettuare questo tipo di operazioni, veniva sfruttata la general call prevista dal protocollo TWI, con la quale si scrive lo stesso dato su tutti i giunti presenti nel sistema.

A seguito ricezione di questi comandi da parte dell'utente, il master, avviava la general call usando l'indirizzo dedicato 0x00 e inviava i byte di controllo diversi in base all'azione da fare eseguire agli slave.

Per quanto riguarda l'operazione di lettura simultanea degli encoder, il master provvedeva autonomamente, dopo aver inviato il byte di controllo specifico, ad interrogare serialmente tutti gli slave facendosi inviare i due byte di posizione memorizzati da ognuno.

Valori dei segnali di controllo inviati dal master a seguito della general call	
Valore del byte inviato dal master[Hex] allo slave	Azione eseguita dallo slave
0x33	Lettura dell'encoder, memorizzazione dei due byte di posizione in registri dedicati e invio degli stessi quando indirizzato dal master
0x40	Avvio del motore dc relativo al freno e dell'algoritmo di controllo per lo stop in sovracorrente
0x41	Avvio del motore dc relativo al freno e dell'algoritmo di controllo per lo stop temporizzato
0x42	Avvio del motore dc relativo al sistema di commutazione e dell'algoritmo di controllo per lo stop in sovracorrente
0x43	Avvio del motore dc relativo al sistema di commutazione e dell'algoritmo di controllo per lo stop temporizzato

Tabella 6:valori dei byte di controllo inviati a seguito della general call

2.4 Lo slave e gli algoritmi di controllo degli attuatori

Come già illustrato in precedenza, lo slave è il vero e proprio cervello del sistema NaviRobot. Il suo firmware pertanto risulta più complesso di quello del master in quanto, oltre all'interfacciamento con esso, tramite la TWI, deve eseguire gli algoritmi di controllo progettati per tutti gli attuatori presenti sul giunto ed effettuare la lettura del sensore di posizione.

Nel seguito del paragrafo sono illustrati i principali algoritmi grazie ai quali viene controllato ogni singolo giunto e, quindi, l'intera struttura.

2.4.1 L'algoritmo di controllo del moto e di lettura dell'encoder

L'obiettivo principale degli algoritmi di controllo del moto era quello di portare il giunto in una determinata posizione con il minore errore possibile.

L'encoder, essendo di tipo assoluto, restituisce lo stesso valore binario a 16bit per la stessa posizione e si era scelto di montarlo sulla struttura in modo tale che il valore del codice binario crescesse se il verso di rotazione è orario e, viceversa, decrescesse se si ruotava in senso antiorario al fine di semplificare il controllo della posizione.

L'algoritmo che è stato implementato, era basato sull'interrogazione continua dell'encoder durante il moto in modo da consentire la regolazione, man mano che ci si avvicinava al punto desiderato, della velocità e del passo del motore.

La necessità di variare il passo e la velocità di rotazione del motore è dettata dal fatto che quando il motore si muove a passo intero, usando un riduttore 1/64, riesce a compiere uno spostamento minimo di $0,028^\circ$ mentre l'encoder ha una risoluzione di $0,0055^\circ$.

Vista la differenza tra le due risoluzioni, quando si era in prossimità del punto anche riducendo solo la velocità di rotazione, non si riuscirebbe a portare il braccio nella posizione voluta.

In questo caso, infatti, ad ogni singolo passo del motore, si otterrebbe una variazione di 5 valori dell'encoder con un conseguente errore minimo sul posizionamento di $0,0275^\circ$.

Per ottenere una risoluzione del motore inferiore a quella dell'encoder è necessario far muovere il motore con azionamento ad 1/8 di passo su ogni fronte del clock. In questo modo si otteneva una risoluzione di 0.0035° che garantiva il raggiungimento della posizione desiderata.

Oltre a ridurre il passo del motore però era necessario ridurre anche la velocità di rotazione del giunto poiché, a causa della tolleranze meccaniche del riduttore utilizzato il valore dell'errore a seguito dello spegnimento del motore risultava troppo elevato.

È stato osservato, infatti, che facendo muovere il motore con la velocità massima di rotazione (clock a 250Hz), essendo il riduttore costituito da ingranaggi di tipo plastico, risente dell'inerzia del braccio e inizia a farlo oscillare causando un errore di posizionamento che può arrivare anche all'ordine di $3/5^\circ$.

Per ovviare a tale problema nella versione ottimizzata sono stati infatti implementati profili di velocità trapezoidale come illustrato nel prosieguo di questa tesi.

Nella precedente versione del firmware, invece, si utilizzava la variazione di passo, il cambio di velocità e del verso di rotazione per limitare questo errore.

In questa versione del controllo, infatti, a seguito dell'invio da parte del master dei due byte indicanti la posizione desiderata, lo slave eseguiva una lettura dell'encoder in modo da conoscere la posizione del giunto.

Dopo la lettura, esso provvedeva a calcolare la differenza tra le posizioni di origine e di destinazione e determinava il verso di rotazione del motore settando il valore logico dell'ingresso Cw/Ccw del driver dello stepper.

Inoltre, se la differenza tra i due punti fosse tale da far sì che gli 8 bit più significativi delle due posizioni fossero differenti, lo slave settava il passo intero per l'attuazione del motore e avviava il motore con la velocità massima ovvero generando un clock, di frequenza pari a 200Hz (velocità massima ottenibile con gli step motor a disposizione senza generazione rampe di velocità).

Se, invece, le due posizioni differivano solo negli 8 bit meno significativi, lo slave avviava il motore a $\frac{1}{2}$ passo con una frequenza di 50 Hz.

Nel caso in cui anche i bit 7-4 risultavano uguali, invece, avviava il motore alla frequenza di 10 Hz ma settando l'azionamento a $\frac{1}{8}$ di passo per il motore in modo da riuscire ad ottenere una risoluzione pari a $0,0035^\circ$, tale da garantire il raggiungimento della posizione corretta.

Per chiarire meglio il funzionamento dell'algoritmo, consideriamo di voler spostare di molto il braccio per cui, inizialmente, si partiva settando la modalità di azionamento a passo intero e alla frequenza di 200Hz.

Durante il moto, l'encoder veniva continuamente interrogato dallo slave in quanto, avendo il clock del motore una frequenza di 200 Hz al massimo, si riuscivano a svolgere le operazioni di lettura dell'encoder tra due successivi fronti di salita del clock, e quindi prima che il motore compisse un ulteriore passo.

Per la lettura dell'encoder era stato necessario emulare l'interfaccia SSI poiché il protocollo SSI non è presente tra le risorse periferiche del microcontrollore. Tale protocollo era emulato creando, via software, i segnali di clock differenziali e ricevendo i dati presenti sulle linee data+ e data- in maniera seriale usando, rispettivamente i pin PD2(CK+) e PD3(CK-) come output e i pin PB0(data+) e PB1(data-) come input.

Le operazioni di lettura dell'encoder, anche se non venivano svolte tramite un hardware dedicato, duravano comunque solo 46 μ s e la frequenza del clock inviato all'encoder era di 380 kHz contro i 200 Hz del clock del motore.

L'unico problema è che durante la lettura dell'encoder la CPU non poteva essere utilizzata per nessuna altra operazione.

Proseguendo nella descrizione dell'algoritmo, man mano che ci si avvicinava al destinazione, quando gli 8 bit più significativi della posizione da raggiungere e di quella raggiunta diventavano uguali, il microcontrollore provvedeva a ridurre la frequenza a 50Hz e settava l'azionamento a mezzo passo del motore fino a che diventavano uguali i bit 15-4.

Una volta raggiunta tale situazione, il motore veniva azionato con l'ottavo di passo a 10 Hz finché la posizione letta dall'encoder, non era pari a quella desiderata dall'utente.

A causa di problemi dovuti a giochi meccanici presenti sulla struttura, utilizzando variazioni brusche di velocità si potevano avere delle oscillazioni sul braccio che causavano il superamento del punto desiderato durante il moto. Per ovviare a tale inconveniente, il sistema era stato progettato per autoregolarsi invertendo il automaticamente il verso di rotazione per riportare il sistema nella corretta configurazione.

2.4.2 L'algoritmo di controllo del sistema frenante e di commutazione della modalità di funzionamento

Per il controllo dei due motori DC che controllano rispettivamente il freno e sistema di commutazione tra modalità navigatore e modalità robot, si era reso necessario utilizzare come detto in precedenza, i due canali differenziali dell'ADC, uno per motore, in modo da prelevare i valori digitali corrispondenti ai vari livelli di corrente per effettuare un controllo sul valore medio della corrente.

Con riferimento alla 33, si nota che la forma d'onda originale della corrente, presenta dei disturbi molto elevati con variazioni molto ampie della corrente rispetto al valore medio.

Per tale motivo, si era reso necessario ridurre queste oscillazioni prima di procedere con la realizzazione del controllo in sovracorrente.

Per ridurre i disturbi caratteristici del motore DC, veniva utilizzato un filtro passo-basso esterno per filtrare la tensione in ingresso ai due canali degli ADC.

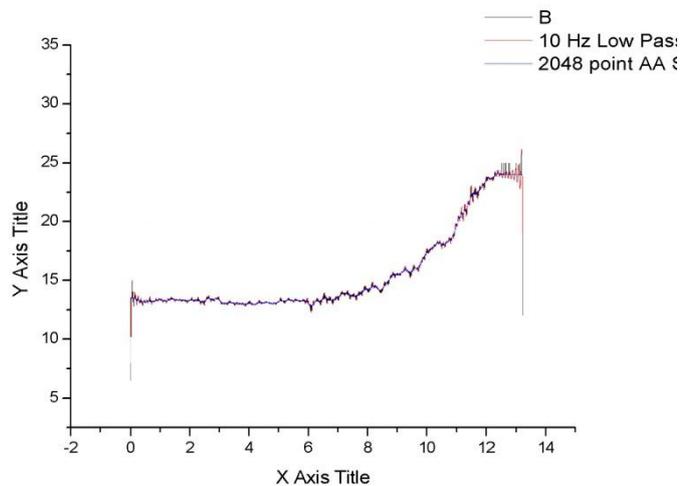


Figura 51: Andamento corrente con filtraggio a 10 Hz

Inoltre, poiché il motore DC è pilotato a 12 V, per rendere la tensione ai capi della resistenza di sensing compatibili con i livelli di tensione TTL, in modo da evitare di sovraccaricare i diodi di protezione delle porta del microcontrollore, si era provveduto ad abbassare tale tensione utilizzando, a monte del filtro, un partitore di tensione, ottenendo una tensione di modo comune di circa 4 V sui singoli canali degli amplificatori differenziali come illustrato in figura:

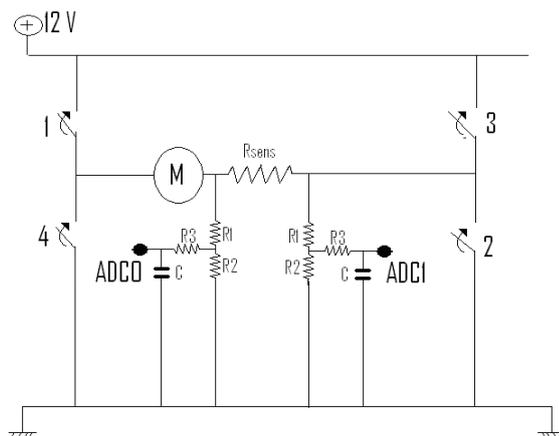


Figura 52:schema circuitale driver motore, Rsens, partitori e filtri

Per controllare i motori dc si utilizzavano due algoritmi distinti, in quanto, per assicurare un'azione di espansione delle ganasce tale da consentire il contatto completo con le casse esterne, non era conveniente utilizzare un algoritmo di stop temporizzato.

Infatti, con il passare del tempo e il ripetuto utilizzo, i ferodi tendono a consumarsi e quindi dopo un certo periodo, usando una azione temporizzata di espansione delle ganasce, poteva verificarsi una diminuzione del potere frenante del sistema.

Utilizzando, invece, il monitoraggio del valore medio della corrente per effettuare questa operazione si riusciva a compensare, entro limiti ragionevoli, anche il fenomeno di usura dei ferodi.

Lo slave quindi, durante la fase di espansione convertiva continuamente la tensione in ingresso proveniente dal filtro RC avviando il convertitore A/D, senza rallentare la CPU che poteva, dopo aver dato l'avvio a questa fase, eseguire altre operazioni. Infatti, il sistema di conversione A/D è totalmente svincolato dalla CPU, e ne interrompe momentaneamente le operazioni solo quando una conversione è stata completata.

Per fermare il motore quando i ferodi sono completamente in contatto con la cassa esterna, l'algoritmo utilizza un valore di soglia per la corrente che era stato scelto, dopo un'opportuna fase di taratura, pari ad un valore superiore di 1/3 rispetto ai valori di corrente che si hanno nella zona di rotazione libera.

Per quel che riguarda la fase di rientro delle ganasce invece, l'algoritmo era basato sullo stop temporizzato dei motori dc in quanto non si possono avere i problemi sovraesposti.

Per lo svolgimento di tale azione, veniva utilizzato il Timer/Counter0 in modalità CTC, che lavora sempre in modo dal tutto indipendente dalla CPU.

L'algoritmo temporizzato consisteva nell'avviare il motore per un intervallo di tempo necessario a far avvenire l'allontanamento dei ferodi dalla cassa esterna. In seguito ad un serie di test empirici, si è osservato che il tempo necessario ad effettuare questa operazione era di circa 180 ms pilotando il motore a 12 V.

2.5 Analisi dei ritardi, velocità di comunicazione e prestazioni degli slave

Utilizzando un sistema di comunicazione di tipo TWI senza sistemi di bufferizzazione, si è reso necessario studiare il comportamento del bus di comunicazione e i tempi di esecuzione delle operazioni da parte dello slave per garantire la corretta comunicazione tra le varie periferiche.

Per verificare l'effettiva velocità di comunicazione ottenibile utilizzando la TWI in assenza dei buffer di linea, sono stati effettuati vari test, per osservare il comportamento del segnale di clock del bus.

Analizzando la forma d'onda del clock SCL si è osservato che, usando un sistema non ottimizzato con un master e due slave, la capacità totale del bus pone un limite superiore alla massima frequenza di funzionamento dell'interfaccia, che è risultata essere pari a 38 kHz.

Con riferimento alla figure seguenti, si nota infatti che, per frequenze superiori a 38 kHz, il comportamento capacitivo della linea di clock risulta molto accentuato fino a rendere, per frequenze circa pari a 102.5 kHz, il segnale di clock inutilizzabile.

Questo fenomeno, quando si dovranno collegare i 6 slave presenti sulla struttura, potrebbe causare errori di trasmissione, anche alla frequenza attuale, che dovevano essere eliminati utilizzando sistemi di bufferizzazione delle linee di comunicazione.

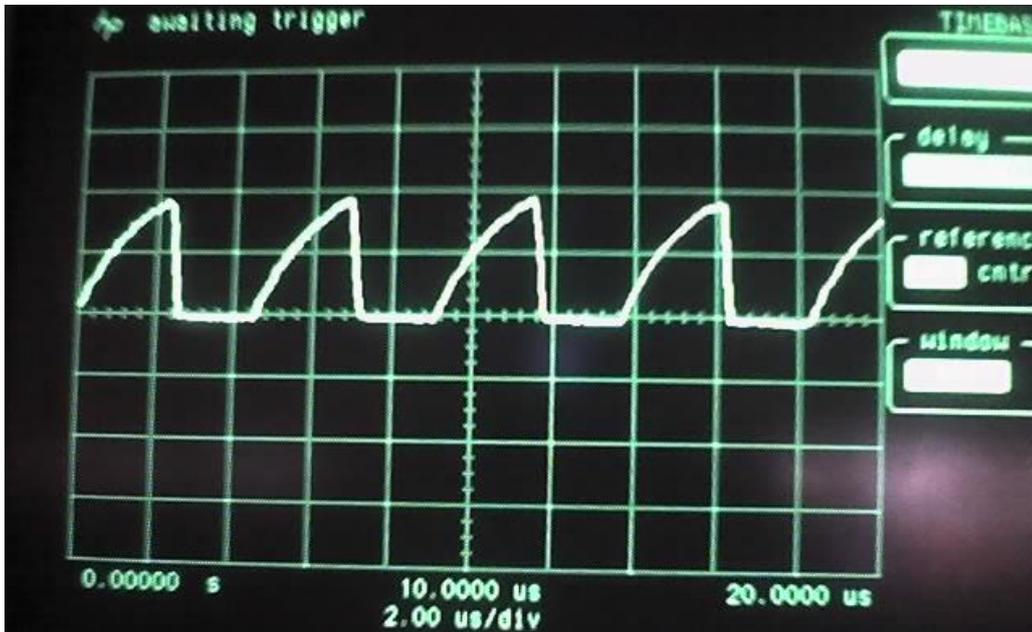


Figura 53:TWI frequenza di 231kHz

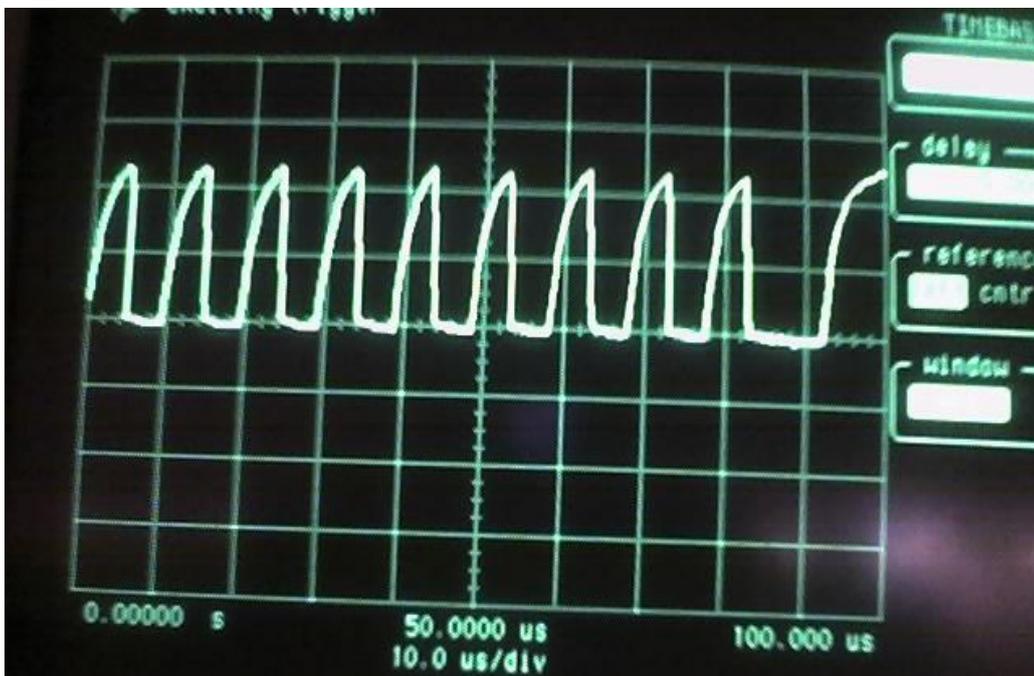


Figura 54:TWI frequenza di 102.5kHz

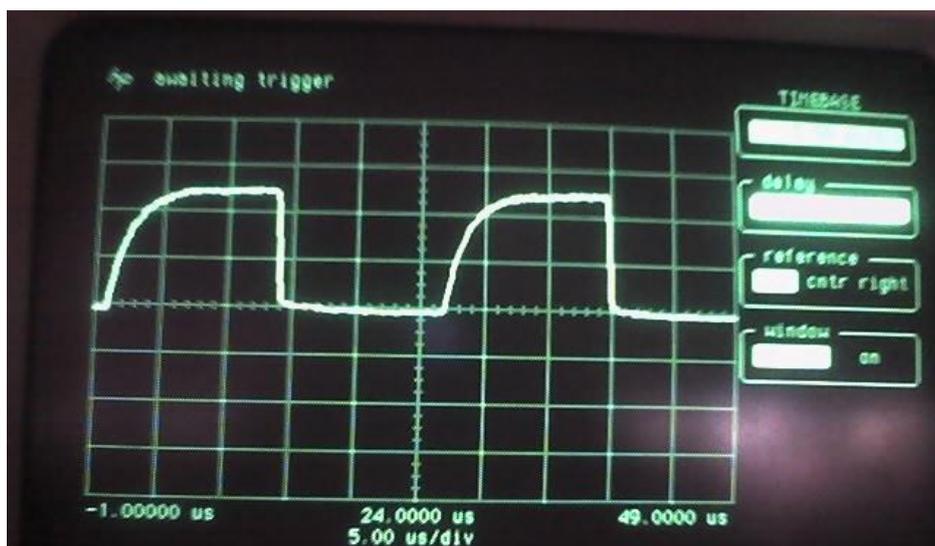


Figura 55:TWI frequenza 38kHz

Con l'hardware utilizzato quindi non si poteva ottenere una velocità di comunicazione elevata in quanto, per ottenere una forma d'onda del clock simile a quella del caso ideale, bisognava ridurre la frequenza fino a 11 kHz come visibile nella seguente figura.

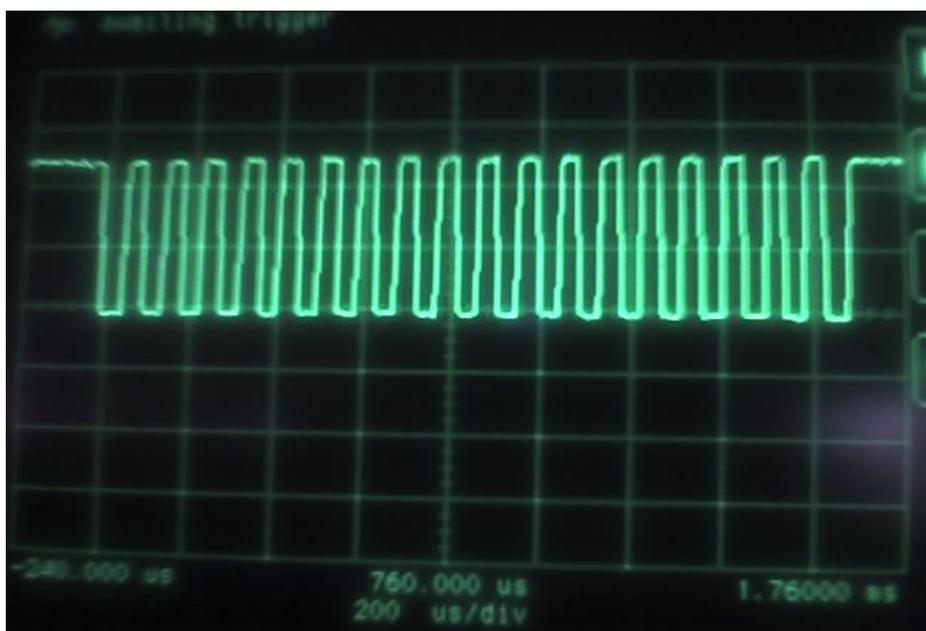


Figura 56:TWI frequenza 11kHz

Tale velocità di esecuzione è più lenta di circa un fattore 40 rispetto alle velocità ottenibili con il protocollo TWI per tale motivo si è reso necessario riprogettare quasi totalmente sia l'hardware che il firmware dei microcontrollori master e slave.

Infatti utilizzando tale velocità di comunicazione per effettuare il “*refresh*” dell'intera struttura ovvero leggere tutti i dati dei 6 encoder di ogni braccio e reinviare le eventuali correzioni di posizione erano necessari 50ms. Questo unitamente ai tempi di elaborazione di ogni singolo slave per eseguire tutti gli algoritmi implementati non garantisce una velocità di esecuzione delle operazioni sufficiente.

Per tale motivo parallelamente allo sviluppo dell'end effector per laparoscopia sono stati progettate delle nuove schede elettroniche e dei nuovi codici di controllo.

3. Ottimizzazione del controllo elettronico del NaviRobot.

Come anticipato in precedenza, uno degli obiettivi dell'attività di ricerca è stato quello di ottimizzare l'elettronica di controllo del braccio centrale NaviRobot al fine di poterlo utilizzare anche per la movimentazione dell'endoscopio.

Nei precedenti paragrafi sono state analizzate le caratteristiche dell'elettronica di controllo che equipaggiava il robot all'inizio della mia attività di ricerca.

I punti critici individuati dall'analisi effettuata sono risultati essere, tra gli altri:

1. Frequenza di funzionamento microcontrollori;
2. Stadi di alimentazione logica e di potenza;
3. Velocità di comunicazione del bus TWI;
4. Formato del Frame dati del bus;
5. Assenza del sistema di protezione tra gli stadi logici e gli stadi di potenza;
6. Sistema di controllo della corrente dei motori DC;
7. Assenza di controllo ottimizzato della velocità degli step motor;
8. Bassa velocità di lettura degli encoder.

Per risolvere tali problematiche, la prima attività eseguita è stata la riprogettazione dell'hardware di controllo. Tale riprogettazione ha portato alla realizzazione di 3 schede indipendenti una per lo stadio di potenza dei motori DC, una per la parte logica e di gestione del bus di comunicazione e una per l'alimentazione e la generazione dei segnali degli step motor.

Nei seguenti paragrafi verranno analizzate le caratteristiche delle singole schede e i vantaggi che sono stati introdotti rispetto alla precedente versione.

3.1 Lo stadio logico e gli algoritmi di controllo ottimizzati

Come anticipato, nella nuova versione dell'elettronica di controllo progettato, si è scelto di realizzare per ogni giunto un'elettronica divisa in moduli.

Tale scelta è stata effettuata, oltre che per motivi di carattere tecnico in modo da dividere gli stadi di potenza da quelli logici, anche per motivi di sviluppo.

Tale soluzione, infatti, consentirà, in futuro, di poter effettuare degli upgrade solo della parte di controllo, senza dover ogni volta ripensare anche le sezioni di potenza.

La scelta di separare completamente gli stadi logici da quelli di potenza è stata predominante anche nella definizione del numero di cavi che compongono il bus di comunicazione.

Complessivamente i cavi che percorrono la struttura sono aumentati rispetto alla precedente versione da 6 a 10 in quanto si è scelto di utilizzare linee distinte per la parte logica e per la parte di potenza. Per la sezione di potenza in particolare si utilizzano due linee una a 12 V e una di ground che trasportano una corrente totale pari a 25 A.

Per la sezione logica invece si è scelto di utilizzare i connettori rj45 con i relativi cavi a 8 poli, per l'alimentazione a 5V dei microcontrollori e le altre periferiche logiche, l'alimentazione a 12 V per il buffer TWI e i segnali Data e Clk. Tutti i segnali vengono "twistati" con una linea di gnd per ridurre fenomeni di interferenza. Nella figura seguente è possibile osservare lo schema del connettore del bus logico

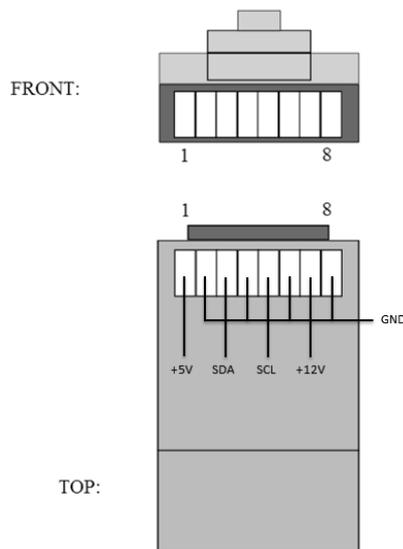


Figura 57: PINOUT Connettore RJ45 del bus logico

Il nuovo sistema utilizza infatti fotoaccoppiatori che consentono la trasmissione di segnali tra diverse schede di circuito elettricamente isolate tra loro. Questo ha consentito di eliminare il rischio di danneggiamenti della parte logica di controllo dovuti alla presenza di carichi induttivi.

L'utilizzo di questi sistemi infatti garantisce un alto grado isolamento. Nel prosieguo del paragrafo verranno analizzati i componenti principali del nuovo sistema.

Nella figura 58 è possibile osservare un giunto del NaviRobot equipaggiato con il nuovo hardware. Lo stadio logico di controllo è descritto nello schema a blocchi visibile nelle figure 59 e 60.

Tale hardware di controllo logico è uguale sia per il master che per gli slave con l'unica differenza del firmware di controllo presente nei microcontrollori e sulla frequenza degli stessi che è stata aumentata da 8 MHz a 16 MHz.

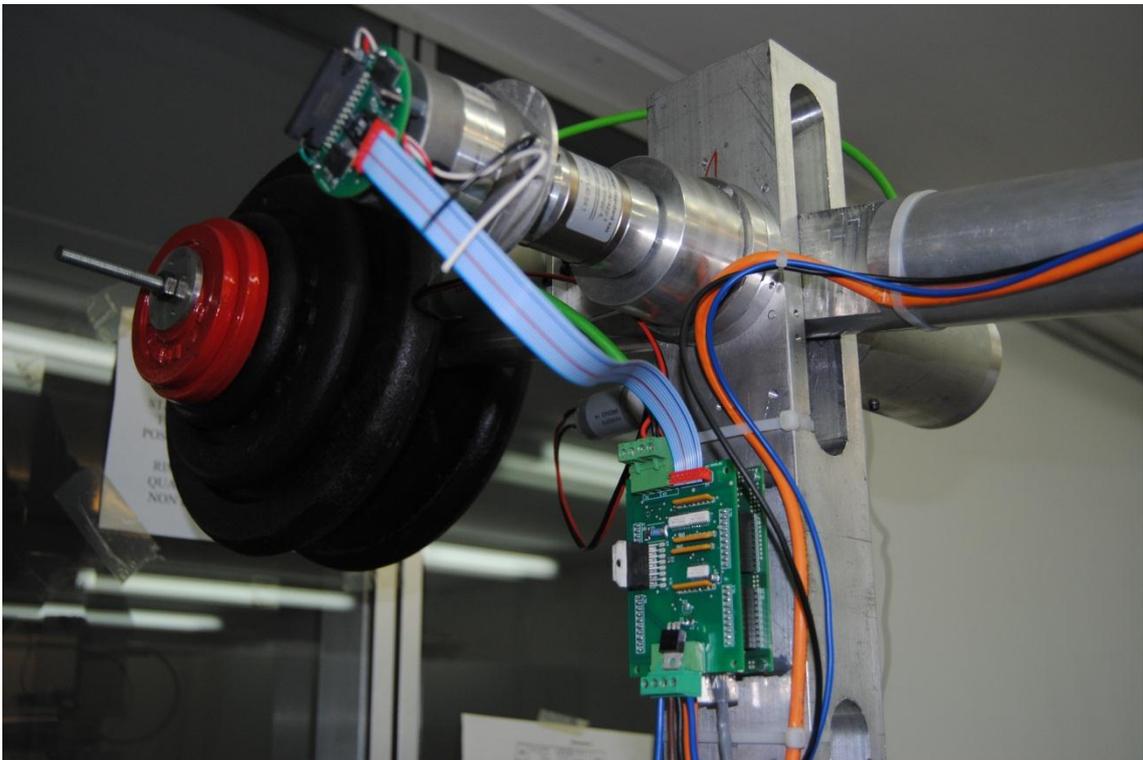
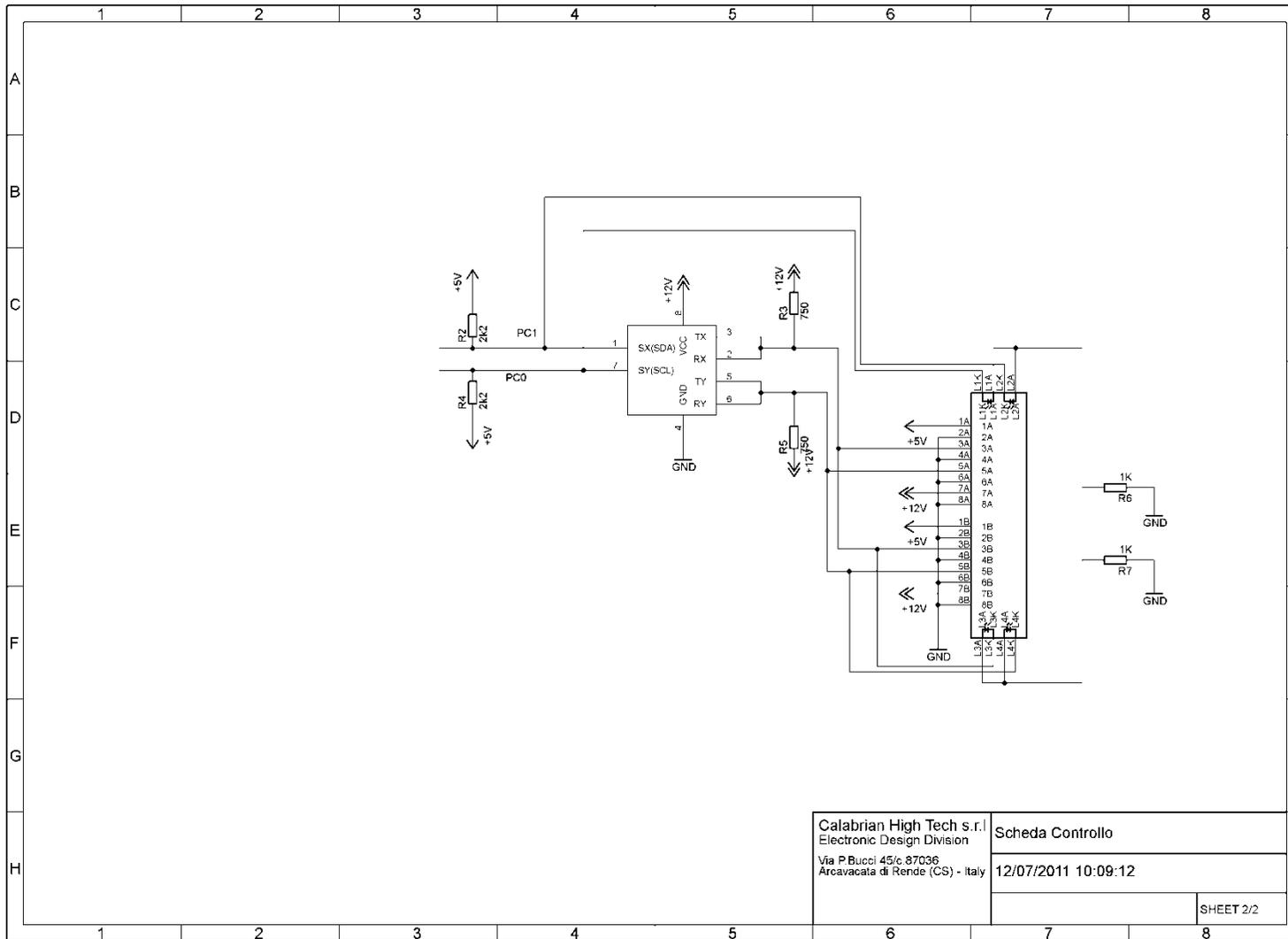


Figura 58: Giunto del NR con nuova elettronica

Lo stadio logico di controllo è composto dai seguenti componenti:

- Microcontrollore Atmel Atmega8535
- Connettore ISP per programmazione on board;
- Cristallo da 16MHz;
- Capacità e induttori;
- Connettori RJ45 per connessione del Bus TWI
- Buffer TWI NXP P82B96;
- Connettori a pettine per la connessione dall'alto della scheda di potenza per i motori DC e l'invio dei relativi segnali di controllo agli attuatori.



Calabrian High Tech s.r.l. Electronic Design Division Via P.Bucci 45/c. 87036 Arcavacata di Rende (CS) - Italy	Scheda Controllo
	12/07/2011 10:09:12
	SHEET 2/2

Figura 60:schematico stadio logico di controllo 2

Il cuore del sistema di controllo è rappresentato dal microcontrollore atmega8535 della Atmel che, grazie alla suddivisione del potere di calcolo sui singoli giunti contiene le risorse sufficienti per ottenere le prestazioni e il controllo desiderati.

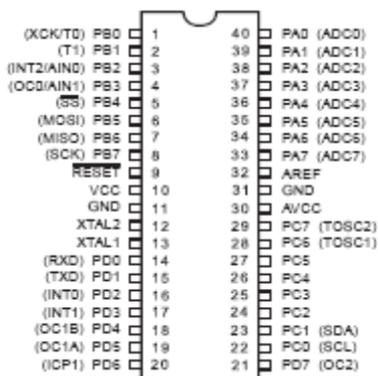


Figura 61: vista esterna del microcontrollore ATmega8535

In particolare, questi microcontrollori presentano un'architettura RISC avanzata, alimentata a 5V, che consente di utilizzare 130 istruzioni la maggior parte delle quali, eseguite in un singolo ciclo di clock, e garantisce fino ad un throughput di 16 MIPS @ 16MHZ. Nella figura 62 è riportato il diagramma a blocchi relativo a questi microcontrollori.

Nel chip sono presenti 8Kbytes di memoria flash programmabile "in-system" che consente di effettuare fino a 10000 cicli di cancellazione e scrittura.

Oltre alla memoria flash sono poi presenti 512 bytes di memoria EEPROM, anch'essa capace di sopportare fino a 10000 cicli di cancellazione e scrittura, 512 bytes di memoria SRAM interna e un Register File composto da 32 registri "general-purpose" di cui 16 sono ad accesso diretto e gli ultimi 6 possono, inoltre, essere utilizzati anche come puntatori a 16 bit per l'indirizzamento indiretto al Data Space.

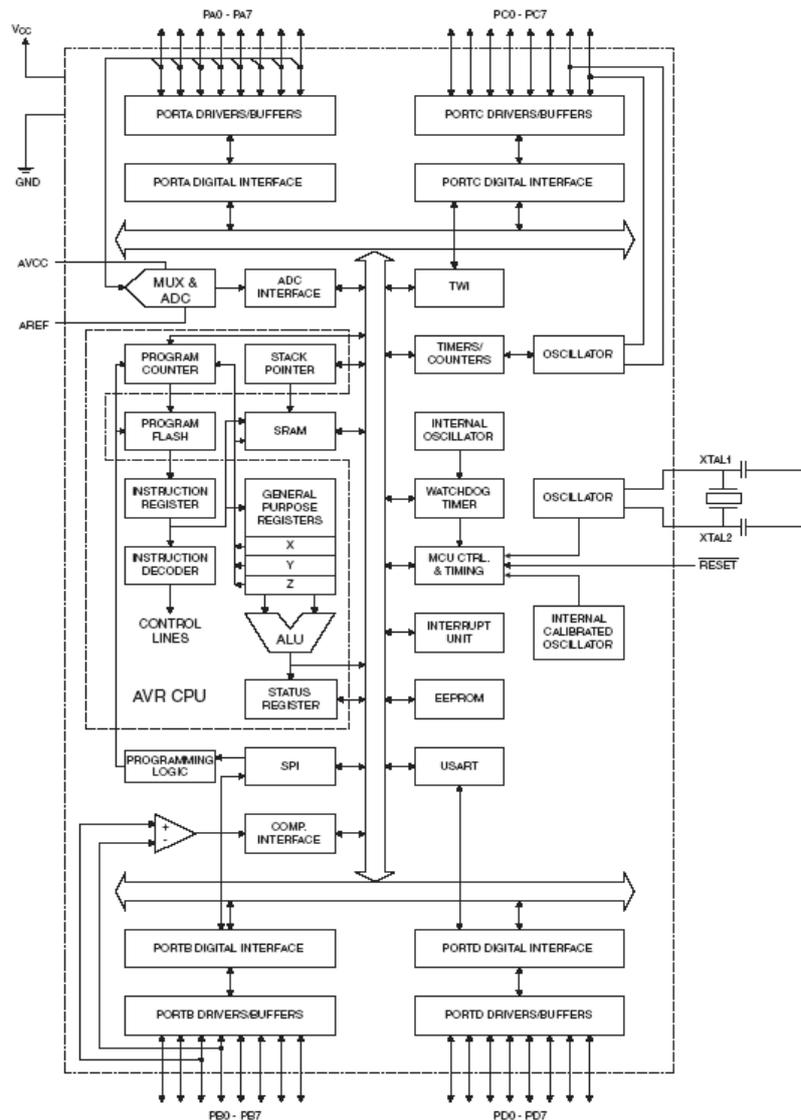


Figura 62: schema a blocchi dell'ATmega8535

Questi microcontrollori possiedono risorse hardware periferiche quali Timer/Counter, ADC, USART, Interfaccia SPI e TWI, watchdog, comparatori analogici, ecc..

Il registro stack pointer, viene utilizzato per eseguire operazioni sullo stack nel quale, vengono memorizzati i dati temporanei e le variabili locali.

Inoltre, lo stack viene utilizzato per memorizzare temporaneamente gli indirizzi per il ritorno dalle chiamate alle subroutine e dagli interrupt.

Per l'interfacciamento con l'esterno sono disponibili 4 porte di I/O a 8 bit (PortA, PortB, PortC e PortD), che possono essere utilizzate sia come tali, sia per accedere alle risorse periferiche del microcontrollore usando loro funzioni alternative.

Per i nostri scopi, non è stato necessario utilizzare integralmente le risorse periferiche del microcontrollore quindi, nel prosieguo del capitolo, verranno illustrate solo le principali caratteristiche delle risorse utilizzate.

Prima di passare a questa descrizione, è necessario, però, descrivere brevemente l'architettura del nucleo centrale ovvero della CPU, il cui schema a blocchi è riportato nella seguente figura.

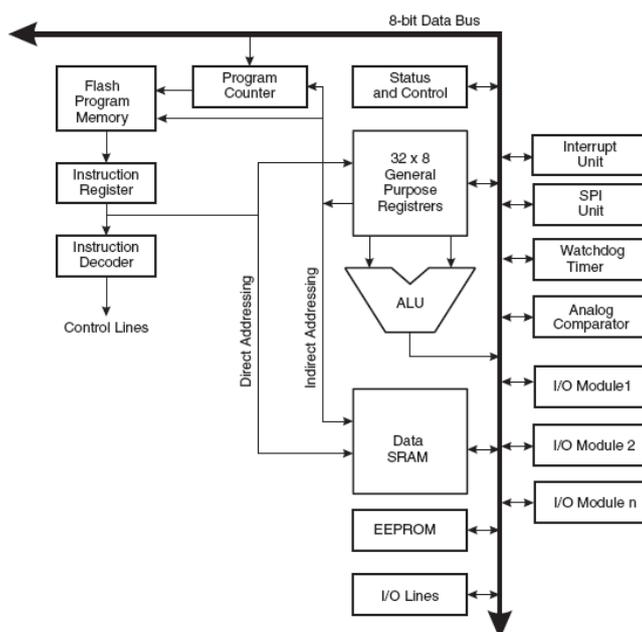


Figura 63: CPU ATmega8535

Il compito principale della CPU è quello di garantire la corretta esecuzione dei programmi e perciò deve essere in grado di accedere alle memorie, controllare le periferiche e gestire gli interrupt.

In modo da massimizzare le performance e il parallelismo, questi microcontrollori, utilizzano bus e memorie distinte per i dati e per i programmi.

Le istruzioni nella memoria programma vengono eseguite con pipelining a singolo livello.

I registri del register file consentono inoltre alla ALU di eseguire le operazioni aritmetiche in un singolo ciclo di clock sia tra i dati presenti in due di questi registri sia tra i registri ad accesso diretto e un valore “immediato” non memorizzato in alcun registro.

Nei seguenti paragrafi verranno illustrate le principali caratteristiche delle risorse utilizzate per la realizzazione del progetto.

In particolare, verranno riportate le caratteristiche del hardware relativo all’USART, usata solo nel Master, ai Timer/Counter0, al Timer/Counter1 e all’ADC usati solo dallo slave e alle porte di I/O e alla TWI usata in entrambe i microcontrollori.

3.1.1.1 Le risorse di I/O

Tutte le porte presenti nei microcontrollori, sono bidirezionali e quindi possono essere usate per svolgere funzioni di lettura o di scrittura da o verso l’esterno, quando vengono utilizzate come I/O generali.

Questo significa che la direzione delle porte, può essere cambiata. Tutti i pin di I/O sono provvisti di diodi di protezione come illustrato in figura.

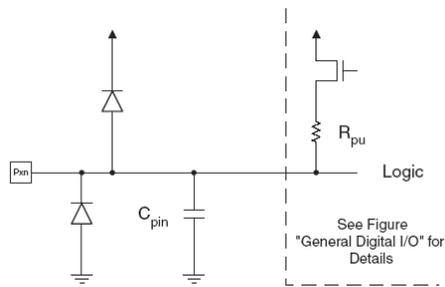
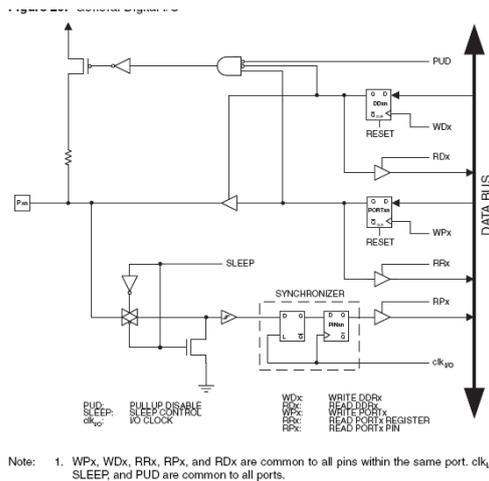


Figura 64:sistema di protezione dei pin di I/O

Per ogni porta, sono utilizzate tre locazioni di memoria con un determinato indirizzo. In particolare queste locazioni di memoria corrispondono al registro dati (Portx), al Data Direction Register (DDRx) e ai Port input Pin (PINx) come illustrato in figura.



Configuring the Pin

Each port pin consists of three register bits: DDx, PORTx, and PINx. As shown in "Register Description for I/O-Ports" on page 65, the DDx bits are accessed at the DDRx I/O address, the PORTx bits at the PORTx I/O address, and the PINx bits at ...

Figura 65:Schema a blocchi della porta di I/O

Il DDRx consente di selezionare la modalità di funzionamento come ingresso o come uscita di ognuno degli 8 pin di ciascuna porta, settando, al suo interno, rispettivamente, il valore logico 1 o 0 .

Le porte di I/O, inoltre, hanno delle funzioni alternative che, come accennato in precedenza, consentono di interfacciare l'esterno alle risorse periferiche del microcontrollore.

Quando le porte vengono usate per svolgere i compiti alternativi, la funzione di I/O generale viene sovrascritta.

Nel seguito della seguente trattazione, saranno riportate soltanto le indicazioni relative ai pin delle porte usate per accedere alle funzioni alternative utilizzate per lo svolgimento del progetto.

3.1.1.2 I Timer/Counter

I Timer/Counter vengono utilizzati dallo slave rispettivamente per la generazione del segnale di clock da inviare alla scheda di controllo dello step motor.

In particolare, il Timer/Counter0 è costituito da un modulo contatore general purpose a 8bit e a singolo canale le cui principali caratteristiche sono:

1. Reset del contatore automatico al raggiungimento del numero di conteggi desiderati.
2. Prescaler del clock di sistema a 10 bit
3. Possibilità di essere utilizzato come modulatore PWM
4. Generazione dell' interrupt relativo al raggiungimento del numero di conteggi desiderati e all'overflow.

Il diagramma a blocchi di questo contatore è riportato in figura 66.

Il contatore TCNT0 e l'Output Compare Register (OCR0) sono registri a 8 bit quindi, il numero di conteggi eseguibili con questo contatore è pari a 255.

Il contatore, inoltre, può lavorare in modi differenti, a seconda di come viene inizializzato.

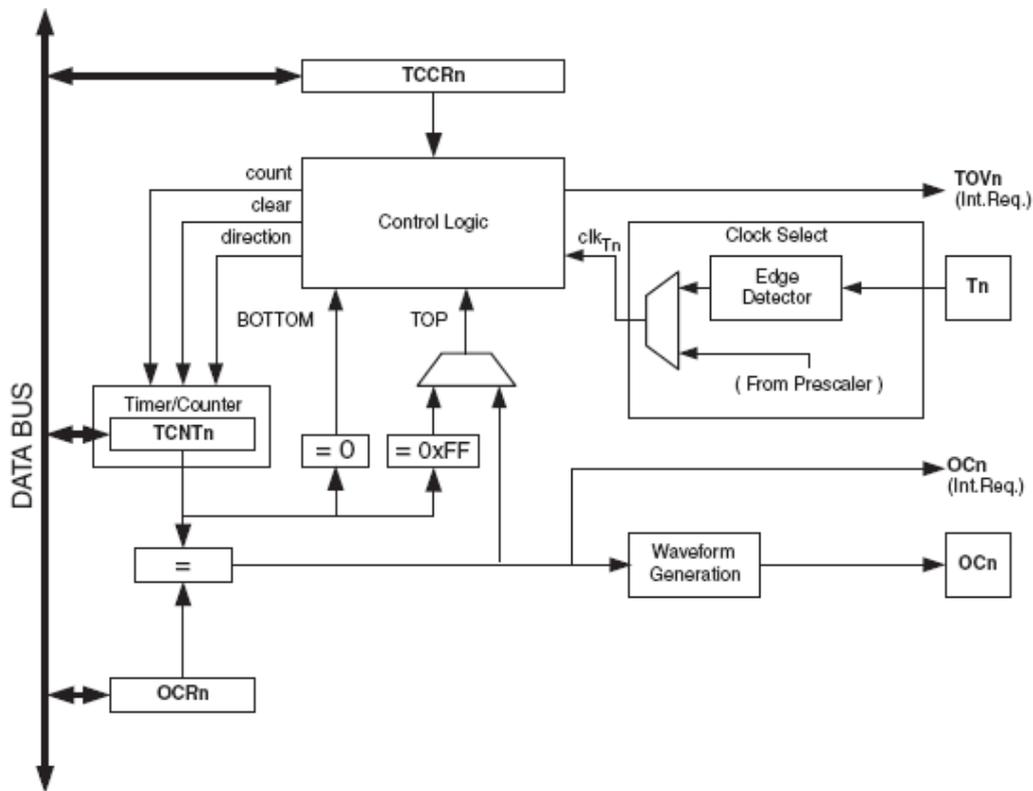


Figura 66:diagramma a blocchi del Timer/Counter0

La prima queste modalità e la modalità “normal”, nella quale, il contatore incrementa di uno il proprio valore continuamente ad ogni fronte di salita del clock e non viene mai resettato dalla logica di controllo.

In questa modalità, ogni volta che il contatore ritorna al valore zero, nello stesso momento, viene settato il flag TOV0 che fa scattare l’interrupt relativo all’overflow.

La seconda modalità di funzionamento è la “Clear Timer On Compare Match(CTC)”, la generazione del clock che verrà inviato alla scheda di controllo dello step motor.

In questa modalità il contatore viene fatto contare fino a quando non raggiunge il valore di riferimento settato all’interno del registro OCR0.

Quando il conteggio viene ultimato, il contatore viene azzerato e viene settato il flag OCF0 che fa scattare il relativo interrupt.

Usando questa modalità di funzionamento è inoltre possibile generare un forma d'onda PWM in uscita dal microcontrollore, variando opportunamente il valore di OCR0 nel corso delle operazioni, se viene settato l'output OC0 in modo che inverta il suo valore ad ogni evento di interrupt.

L'output OC0 è una funzione alternativa del pin di I/O PB3 che deve essere settato però come uscita nel DDRB.

La frequenza del segnale di uscita è stabilita dalla seguente relazione:

$$f_{OCn} = \frac{f_{clk\ I/O}}{2 \cdot N \cdot (1 + OCRn)}$$

dove N rappresenta il fattore di prescaler del clock del microcontrollore che può essere pari a 1,8,64,256 o 1024.

La terza modalità di funzionamento, la modalità "fast PWM", consente di generare il segnale PWM ad alta frequenza.

In questo caso il contatore conta a partire da un valore minimo fino ad un valore massimo, fissati dal progettista, e quindi riparte dal valore minimo quando termina il conteggio. La forma d'onda d'uscita viene prelevata sempre dal pin PB3.

Esistono altre tipologie di utilizzo del timer/Counter0 per le quali si rimanda al datasheet del microcontrollore.

Il Timer/Counter1 svolge le stesse funzioni viste per il Timer/Counter0 alle quali aggiunge altre funzioni più complesse per le quali si rimanda al datasheet del microcontrollore.

La frequenza del segnale di uscita viene definita dalla seguente relazione :

$$f_{OCn} = \frac{f_{clk_I/O}}{2 \cdot N \cdot (1 + OCRn)}$$

È importante sottolineare che il T/C1 consente di utilizzare un ulteriore pin di output per generare un'altra forma d'onda di uscita indipendente dalla precedente.

I segnali di clock che regolano il funzionamento di queste due periferiche vengono generati da un opportuno modulo (Fig. 42) che consente di generare un clock la cui frequenza è ridotta di un fattore 1,8,64,256 o 1024 rispetto alla frequenza di funzionamento del microcontrollore.

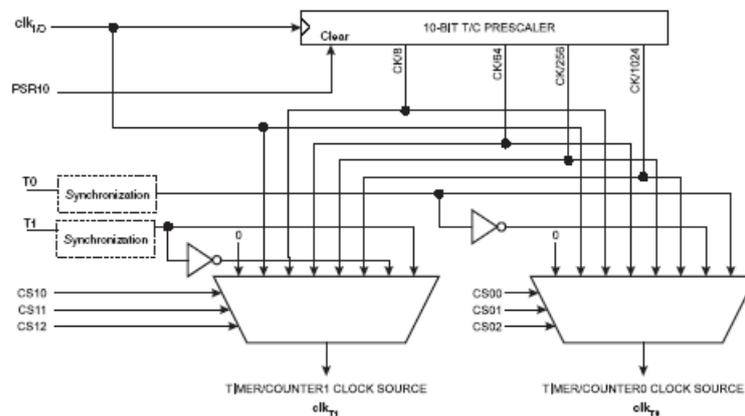


Figura 68:diagramma a blocchi del prescaler

3.1.1.3 La USART

L' Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Trasmitter (USART) è un dispositivo di comunicazione altamente flessibile le cui principali proprietà sono:

1. operazioni Full-duplex, grazie all'utilizzo di due canali separati per la ricezione e per la trasmissione;
2. possibilità di svolgere operazioni asincrone o sincrone in modalità master o slave ;
3. generatore di Baud Rate ad alta risoluzione;
4. generazione del bit di parità e parity check supportato via hardware dedicato;
5. rilevamento degli errori;
6. comunicazioni asincrone a velocità doppia.

Per i nostri scopi la USART viene usata dal master per interfacciarsi al computer da cui l'utente invia i vari segnali di controllo.

Nella figura 69, viene riportato il diagramma a blocchi di questa periferica nel quale, si nota la presenza di tre sezioni distinte, identificate per mezzo delle linee tratteggiate.

Come detto in precedenza, i canali di ricezione (Rx) e di trasmissione(Tx), sono realizzati con un hardware dedicato.

I canali Rx e Tx, si interfacciano con l'esterno, rispettivamente, tramite il pin0 e pin1 della porta D, che non possono essere più usati come general I/O quando viene inizializzata la USART.

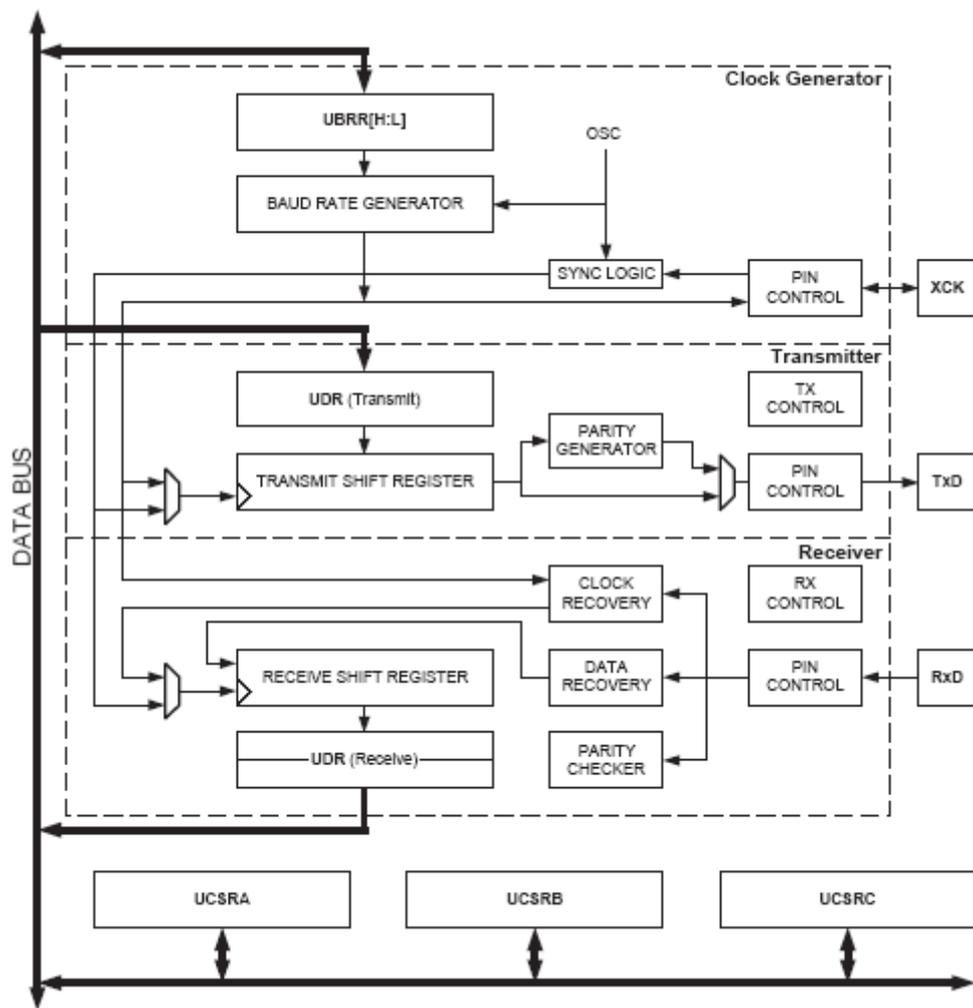


Figura 69:diagramma a blocchi della USART

I registri UCSRA, UCSRB e UCSRC sono i registri di stato e di controllo della periferica e vengono utilizzati per funzioni quali, ad esempio, l'abilitazione della ricezione o della trasmissione, per controllare se il registro dati UDR è vuoto in fase di trasmissione, ecc..

Di fondamentale importanza per il funzionamento della USART è il generatore di Baud Rate che, settando opportunamente il valore binario a 11 bit del registro UBRR, fa

sì che la comunicazione avvenga con la velocità ricavata secondo le formule, riportate nella seguente tabella, in funzione della modalità di funzionamento.

Operating Mode	Equation for Calculating Baud Rate ⁽¹⁾
Asynchronous Normal Mode (U2X = 0)	$BAUD = \frac{f_{osc}}{16(UBRR + 1)}$
Asynchronous Double Speed Mode (U2X = 1)	$BAUD = \frac{f_{osc}}{8(UBRR + 1)}$
Synchronous Master Mode	$BAUD = \frac{f_{osc}}{2(UBRR + 1)}$

Figura 70:Formule per il calcolo del Baud Rate

Il formato del frame è compatibile con le specifiche definite nel protocollo di comunicazione RS232, essendo composto da 1 bit di start, 5,6,7,8,o 9 bit dati, 1 o 2 bit di parità e 1 o 2 bit di stop come illustrato nella seguente figura.

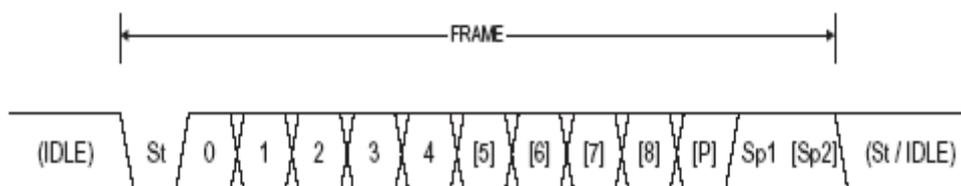


Figura 71:formato del frame della comunicazione tramite USART

Per l'interfacciamento del master con il computer, verrà utilizzato un Baud Rate di 115,2 Kbps (UBRR=1) con un frame dati a 8 bit e 1 bit di stop.

3.1.1.4 La TWI

Avendo già affrontato le caratteristiche del protocollo TWI durante la descrizione della precedente versione del controllo elettronico del NaviRobot, in questo paragrafo ci si limiterà ad indicare le risorse di I/O utilizzate dalla periferica e ad illustrare i principali componenti hardware presenti nel microcontrollore, che rendono possibile l'implementazione di questo tipo di protocollo di comunicazione.

Lo schema a blocchi del modulo TWI presente nel microcontrollore è riportato in figura.

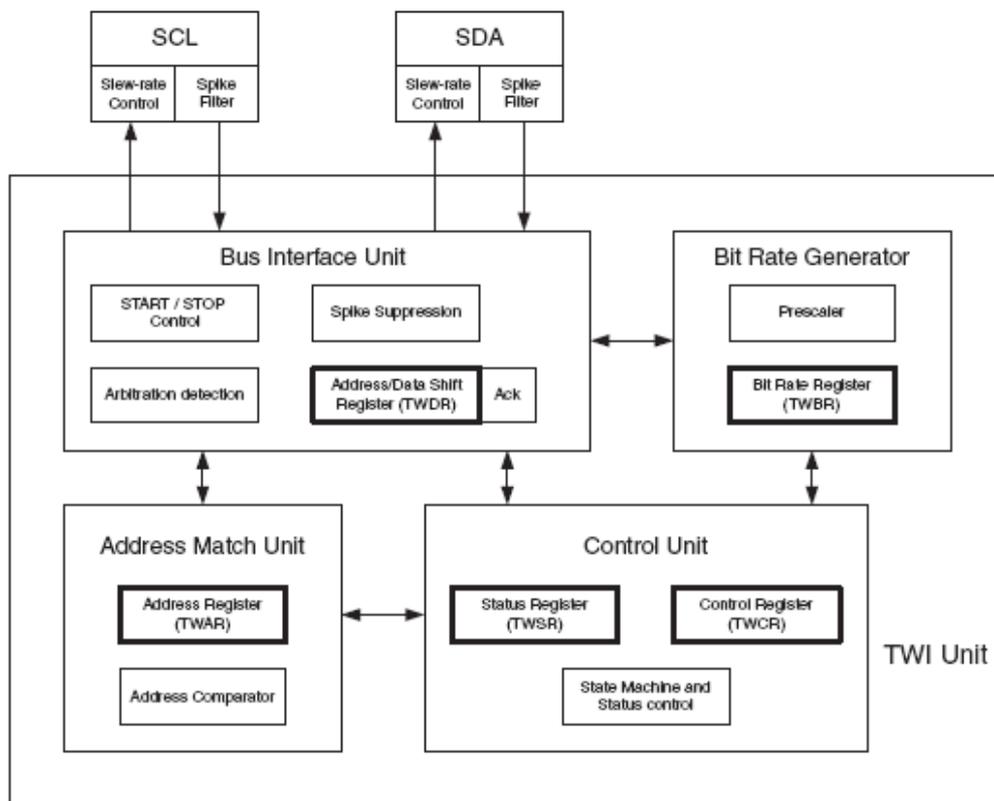


Figura 72:diagramma a blocchi del modulo TWI

Osservando il diagramma, si intuisce come l'hardware presente consenta di effettuare le operazioni descritte nel paragrafo 2.2.1.

Sui moduli SCL ed SDA, si nota la presenza di un sistema per la riduzione degli spike, che possono indurre errori nella comunicazione, e un controllo dello slew rate.

La struttura centrale è divisa in quattro macroblocchi, ognuno dei quali svolge una determinata operazione.

In particolare, all'interno dell'unità di interfacciamento al bus sono presenti il controllore dedicato al riconoscimento dei segnali di START e di STOP, il soppressore degli spike di tensione, il modulo adibito all'arbitraggio nell'utilizzo del bus in caso di sistemi multi-master e il registro TWDR nel quale viene caricato (nel master) e ricevuto (nello slave) l'indirizzo e i dati (il registro TWDR è usato per l'invio dei dati anche dallo slave).

Il macromodulo Bit Rate Generator contiene un prescaler con un registro chiamato TWPS, e il Bit Rate Register TWBR i quali, caricati con degli opportuni valori consentono di ottenere la frequenza di clock desiderata in base alla seguente relazione:

$$\text{SCL frequency} = \frac{\text{CPU Clock frequency}}{16 + 2(\text{TWBR}) \cdot 4^{\text{TWPS}}}$$

L'unità di riconoscimento dell'indirizzo, contiene un registro TWAR dove il progettista va a settare l'indirizzo univoco dello slave e l'unità di comparazione dell'indirizzo ricevuto.

Infine l'unità di controllo è formata da una macchina a stati che controlla, appunto, lo stato della comunicazione settando automaticamente lo status register TWSR, con dei valori stabili dal protocollo, in modo da consentire il controllo da parte del software dello svolgimento delle varie fasi della comunicazione.

Nell'unità di controllo è presente anche un registro di controllo TWCR che viene appunto utilizzato per controllare le operazioni di comunicazione della TWI.

Le risorse di I/O dedicate a questa periferica sono il pin0 e il pin 1 della porta C che, quando la TWI è attiva, diventano rispettivamente SCL ed SDA.

3.1.1.5 Il convertitore analogico-digitale

Il convertitore analogico digitale verrà impiegato, come già illustrato nei precedenti capitoli, per la conversione della tensione differenziale proveniente dalle resistenze di sensing.

L'ADC presente sui microcontrollori è ad approssimazioni successive (SAR) e presenta le seguenti caratteristiche:

1. risoluzione massima pari a 10 bit;
2. 0,5 LSB di Non-linearità Integrale;
3. ± 2 LSB di accuratezza assoluta;
4. tempi di conversione compresi tra 65 e 260 μ s;
5. fino a 15 kSPS alla risoluzione massima;
6. 8 canali di ingresso Single-ended;
7. 7 canali di ingresso differenziali;
8. 2 canali differenziali con guadagno settabile a 1x, 10x e 200x;
9. range di tensione compreso tra 0 e Vcc;
10. modalità di conversione Free Running o Singola;
11. Generazione di interrupt a conversione ultimata;

- 12. tensione di riferimento interna a 2,56V o esterna;
- 13. possibilità di prelevare il risultato in maniera left-adjusted;

L'hardware che implementa le funzionalità del convertitore A/D SAR è schematizzato nello schema a blocchi riportato in figura 73.

L'hardware presente consente di convertire la tensione in ingresso, in un segnale digitale a 10 bit in complemento a due. Il risultato della conversione usando segnali differenziali in ingresso è pari a:

$$ADC = \frac{(V_{POS} - V_{NEG}) \cdot GAIN \cdot 512}{V_{REF}}$$

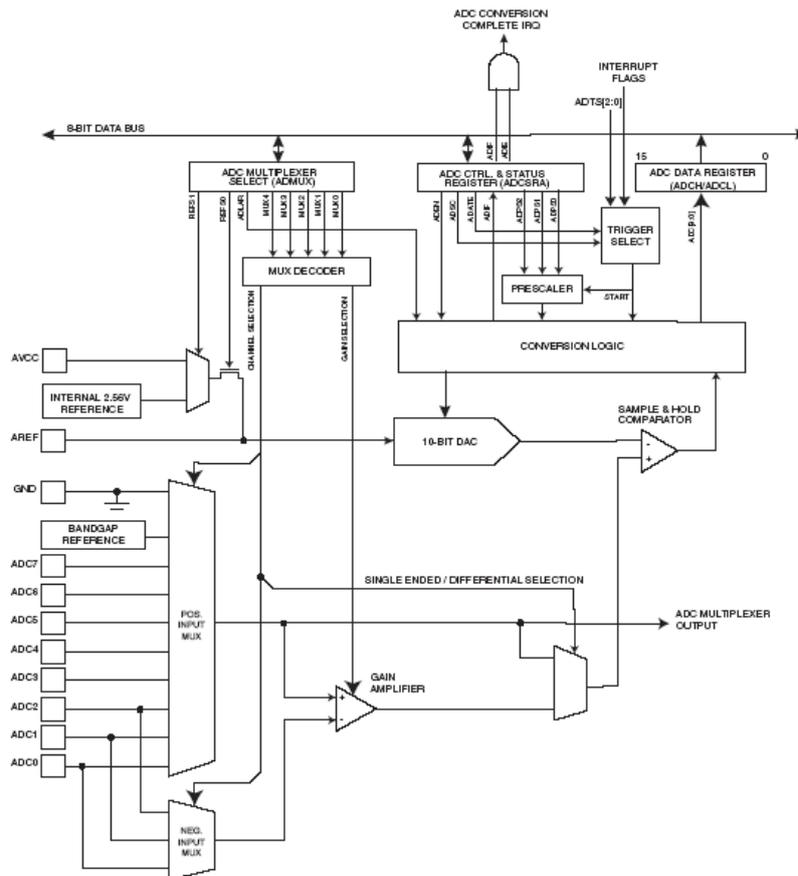


Figura 73:diagramma a blocchi del convertire A/D

Come visibile in figura, i canali dell'ADC corrispondono agli 8 pin della porta A. Per l'implementazione dell'algoritmo di controllo dei motori dc nella precedente versione, vista la necessità di convertire la tensione differenziale insistente ai capi delle resistenze di sensing, venivano utilizzati i canali ADC0-ADC1 e ADC3-ADC2 corrispondenti ai pin 0,1,2,3 della porta A, mentre, i restanti quattro bit saranno usati per pilotare gli motori dc attraverso il chip L298N. Usando tali ingressi dell'ADC, il segnale differenziale veniva elaborato e trasformato in un segnale single-ended dall'amplificatore operazionale d'ingresso presente.

Per il corretto funzionamento dell'algoritmo è importante collegare il valore più positivo della tensione differenziale all'ingresso positivo dei due amplificatori che, per la coppia ADC0-ADC1 è collegato al canale ADC0 mentre per la coppia ADC3-ADC2 è collegato al canale ADC3.

Nella nuova versione invece, grazie all'utilizzo del canale di sensing del chip L298N non vi è più la necessità di utilizzare i canali in maniera differenziale, ma vengono utilizzati due canali single ended ADC0 e ADC1, mentre i restanti 6 bit vengono utilizzati per pilotare ed abilitare i canali dell'L298 e quindi i motori DC.

Anche per il convertitore analogico digitale è presente un sistema di prescaler del clock di sistema, il quale consente di ottenere segnali di clock per l'ADC ridotti di un fattore 2,4,6,8,16,24,32,64 o 128 rispetto ad esso.

Anche se l'ADC converte la tensione in un valore binario a 10 bit, saranno usati solo gli 8 bit più significativi per attuare l'algoritmo di controllo in sovracorrente, in modo da velocizzare i tempi di calcolo.

Nelle seguenti figure sono riportati i grafici relativi al range di misura della tensione differenziale e alla accuratezza del convertitore riportati sul datasheet del microcontrollore.

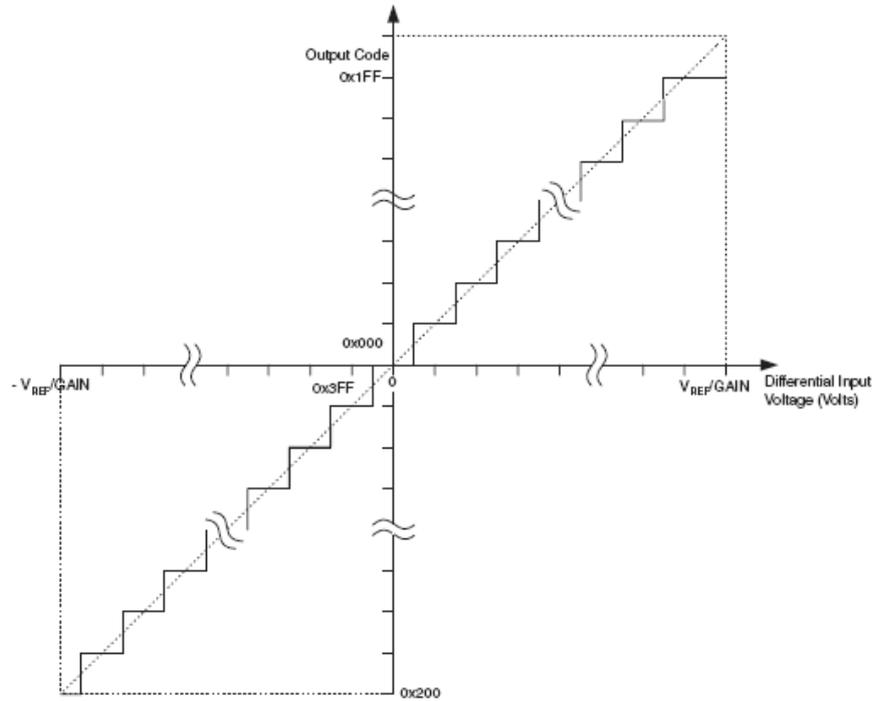


Figura 74:range di misura differenziale

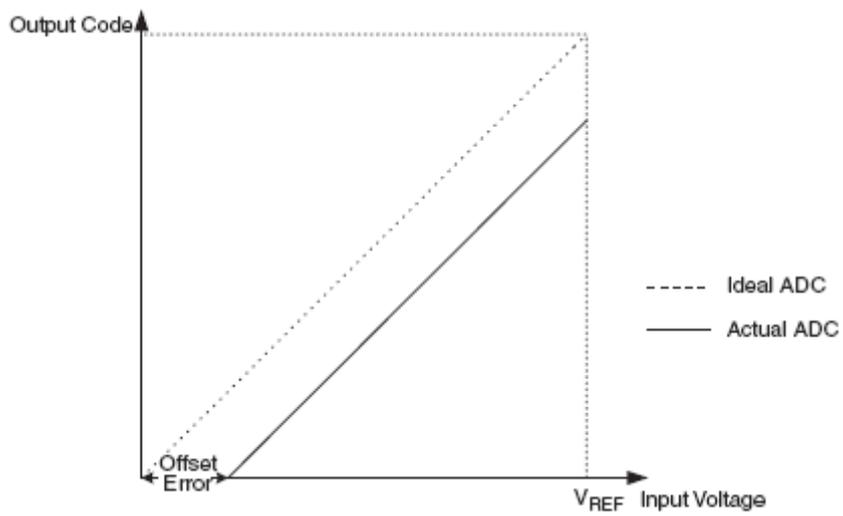


Figura 75:errore di offset

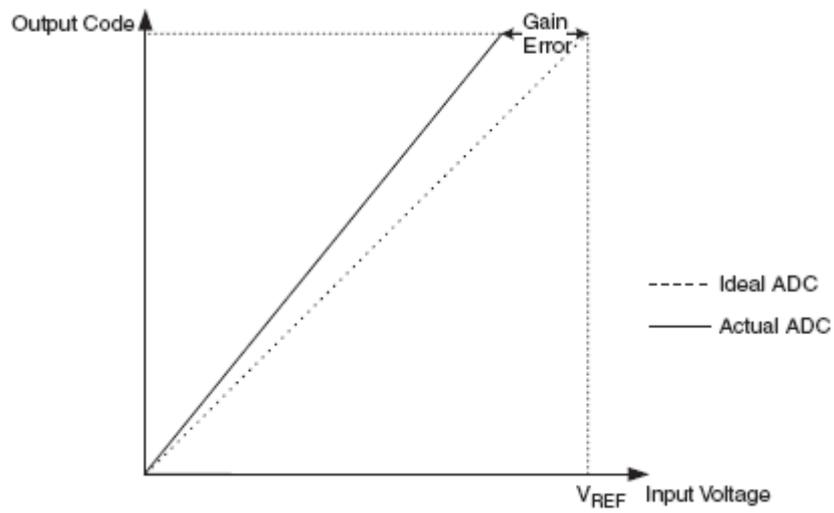


Figura 76:errore di gain

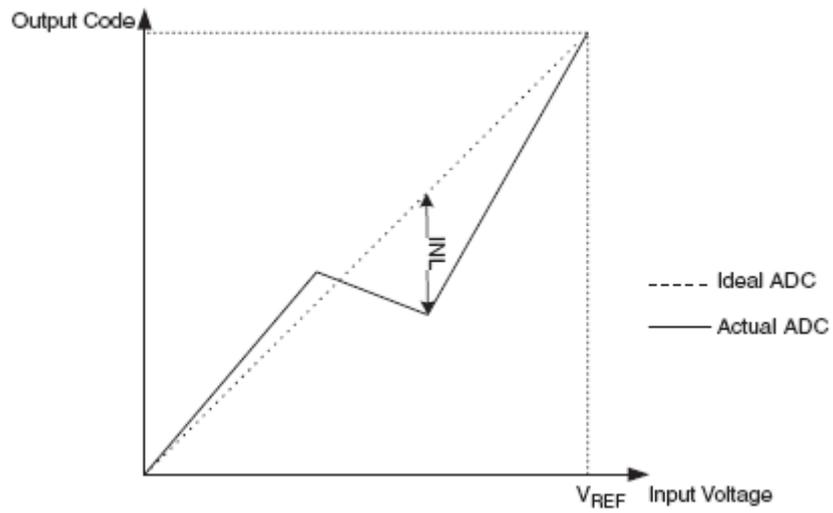


Figura 77:errore di non linearità integrale

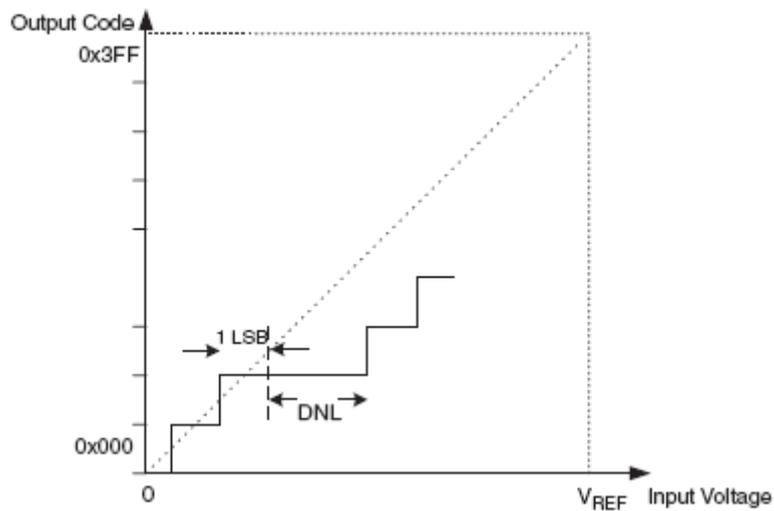


Figura 78: Non Linearità differenziale (DNL)

L'errore di offset, idealmente nullo, riportato in figura 75, rappresenta l'errore relativo alla prima transizione (dal valore 0x000 al valore 0x001) rispetto alla transizione ideale.

Per quel che riguarda l'andamento dell'errore di gain, idealmente nullo, è importante sottolineare che, quest'ultimo, è stato calcolato, dopo la compensazione dell'errore di offset, come lo scostamento dell'ultima transizione (da 0x3FE a 0x3FF) quindi al di sotto di 1,5 LSB, rispetto alla transizione ideale.

L'INL, riportato in figura 77 è stato invece calcolato, dopo la compensazione dell'errore di offset e dell'errore di gain, come lo scostamento di ogni transizione del codice binario, rispetto alla corrispondente transizione ideale.

Il DNL, rappresenta lo scostamento massimo dell'intervallo di tensioni tra due transizioni successive rispetto a quello ideale.

3.1.1.6 L'SPI

A differenza della versione precedente, dove questa periferica non veniva utilizzata, in questa nuova versione del controllo elettronico si è scelto di utilizzare le caratteristiche di questa periferica per emulare il protocollo SSI degli encoder in modo da poter eliminare i problemi della lettura in polling della versione precedente e di aumentare la velocità di lettura fino ad 1MHz come verrà illustrato in dettaglio in seguito.

La “*Serial Peripheral Interface (SPI)*” consente trasferimenti di dati sincroni ad alta velocità tra l'ATmega8535 e i dispositivi periferici.

L'SPI del microcontrollore in oggetto presenta le seguenti caratteristiche.

- Trasmissione Full Duplex;
- Operazioni Master or Slave;
- Trasferimento con LSB First or MSB First;
- Sette Bit Rates programmabili
- Interrupt Flag di fine trasmissione;
- Write Collision Flag Protection;
- Wake-up from Idle Mode;
- Double Speed (CK/2) Master SPI Mode

Nella seguente figura è possibile osservare lo schema a blocchi del modulo SPI:

Una volta configurato come master, l'interfaccia SPI del microcontrollore non ha alcun controllo automatico della linea \overline{SS} .

Questa operazione deve essere gestita via software dall'utente prima di iniziare la comunicazione.

Fatto questo, scrivendo un byte nel registro dati SPI si avvia il generatore di clock SPI, e l'hardware SPI trasferisce gli otto bit nello slave.

Quando viene configurato come Slave, l'interfaccia SPI del microcontrollore rimarrà in ascolto con il canale MISO in tri-state finché il bit \overline{SS} rimane alto. In questo stato, il software può aggiornare il contenuto del registro dati SPI, SPDR, ma i dati non verranno trasmessi anche in presenza di impulsi di clock in ingresso sul pin SCK finché il bit \overline{SS} non viene abbassato.

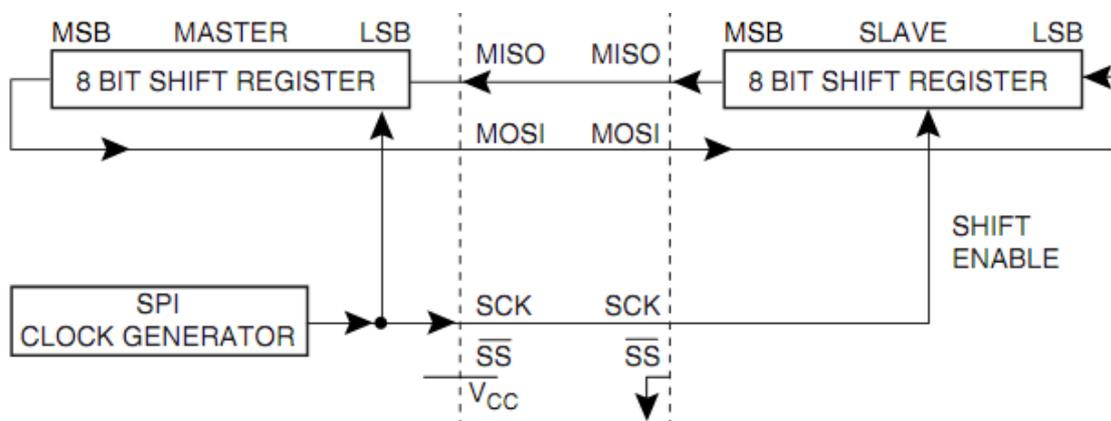


Figura 80: connessione master-slave SPI

Tralasciando le caratteristiche dei componenti comuni quali cristalli, connettori, resistenze, capacità ecc..., il componente che ha consentito un vero salto prestazionale

del nuovo controllo elettronico è rappresentato dal buffer del bus TWI che è presente su tutti gli stadi logici.

Il P82B96 è un circuito integrato bipolare che crea un interfaccia logica, bidirezionale, tra il classico bus TWI e una serie di altre configurazioni di bus. Questo chip consente l'interfacciamento del bus TWI con segnali logici aventi diversi valori di tensione e corrente.

Questo buffer, inoltre, aggiunge solo un carico minimo al bus TWI e i contributi capacitivi non vengono non vengono trasmessi o trasferiti al nodo locale.

La trasmissione di segnali SDA e SCL avviene tramite trasmissione bilanciata (doppini) o con isolamento galvanico (fotoaccoppiatore).

L'utilizzo di questo buffer ha permesso di aumentare la velocità di trasmissione del bus a 400KHz che è il limite nominale della periferica a bordo del microcontrollore.

3.1.2 Gli algoritmi di controllo

Come già discusso in precedenza, la semplice ottimizzazione dell'hardware non è sufficiente a migliorare le prestazioni del sistema. Per tale motivo è stato necessario riprogettare completamente i firmware di controllo dei microcontrollori master e slave.

Per prima cosa nei nuovi algoritmi di controllo, nessuna operazione viene eseguita in polling ma tutto è affidato alle periferiche esterne e quindi gestito tramite interrupt. In questo modo infatti la CPU non viene mai tenuta impegnata più del tempo che serve alla gestione del dato preprocessato dalle periferiche e resta sempre a disposizione di eventuali comunicazioni da parte del master.

3.1.2.1 Il Master

Come per la precedente versione dell'elettronica di controllo, il master serve esclusivamente per interfacciare l'utente alla struttura. L'utente attraverso un software, sul quale è implementato il modello cinematico del robot, comunica con esso attraverso una connessione seriale.

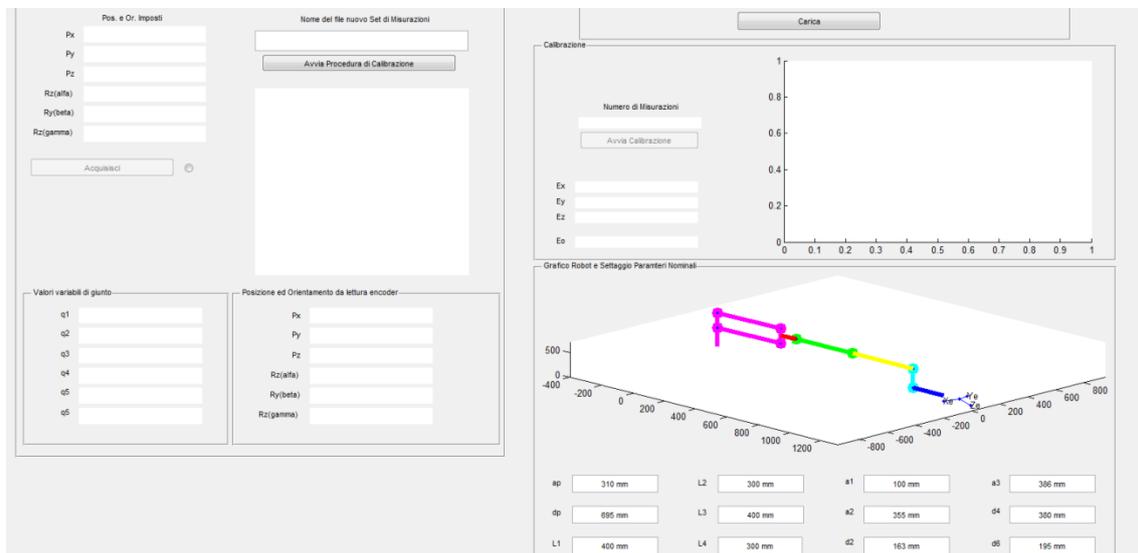


Figura 81: Interfaccia Software di controllo NaviRobot

Nell'attuale versione, anche la comunicazione via USART è stata impostata come “*interrupt-based*” al fine di garantire la possibilità di intervenire in qualsiasi momento sul master anche durante le operazioni di invio dati. Tale soluzione aumenta la stabilità e la sicurezza del sistema che può essere bloccato in qualsiasi momento.

Il firmware implementato rende possibile l'attuazione delle operazioni illustrate nel seguente diagramma di flusso.

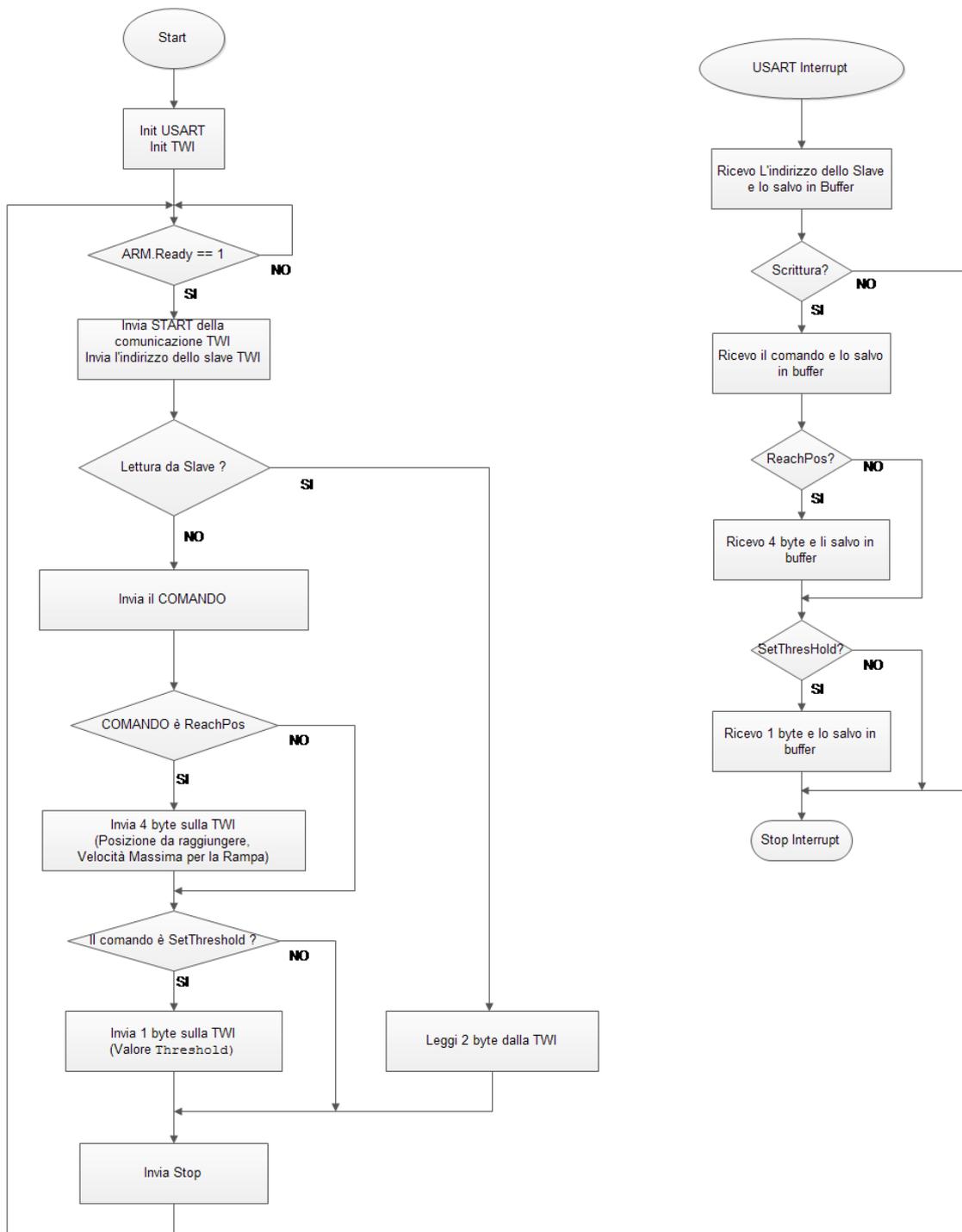


Figura 82: Flusso operazioni ottimizzate master

Rispetto al firmware precedente, le operazioni sono sostanzialmente rimaste le stesse. La differenza consiste nel fatto che per il comando di raggiungimento della posizione desiderata, oltre ai due byte indicanti la posizione, il master deve inviare anche altri due byte indicanti il valore di velocità massima del giunto. Tale valore servirà allo slave per generare i profili di velocità trapezoidali.

3.1.3 Lo slave e gli algoritmi di controllo degli attuatori

Anche per quanto riguarda lo slave le operazioni sono sostanzialmente rimaste le stesse rispetto alla versione precedente.

Le principali differenze si hanno nella gestione dello step motor e nella lettura degli encoder. Per quanto riguarda gli step motor, infatti, lo slave non si occupa più della determinazione del verso di rotazione che viene comunicato direttamente dal software di controllo tramite il master ma provvede a generare i profili di velocità trapezoidali come illustrato nel seguente paragrafo. Per quanto riguarda la lettura degli encoder, invece, la principale differenza sta nel fatto che nella nuova versione si utilizza la periferica SPI del microcontrollore.

Anche se l'SPI non è nata per tali scopi. Si è scelto di utilizzare il suo clock per emulare il clock del protocollo RS422 e leggere solo l'uscita single-ended Data+ sul canale MOSI del microcontrollore.

Tale soluzione ha consentito una gestione via interrupt della lettura degli encoder ad una velocità di 1 MHz contro i 380 KHz della precedente versione.

Tutte le operazioni eseguite della slave sono riportate nel seguente diagramma.

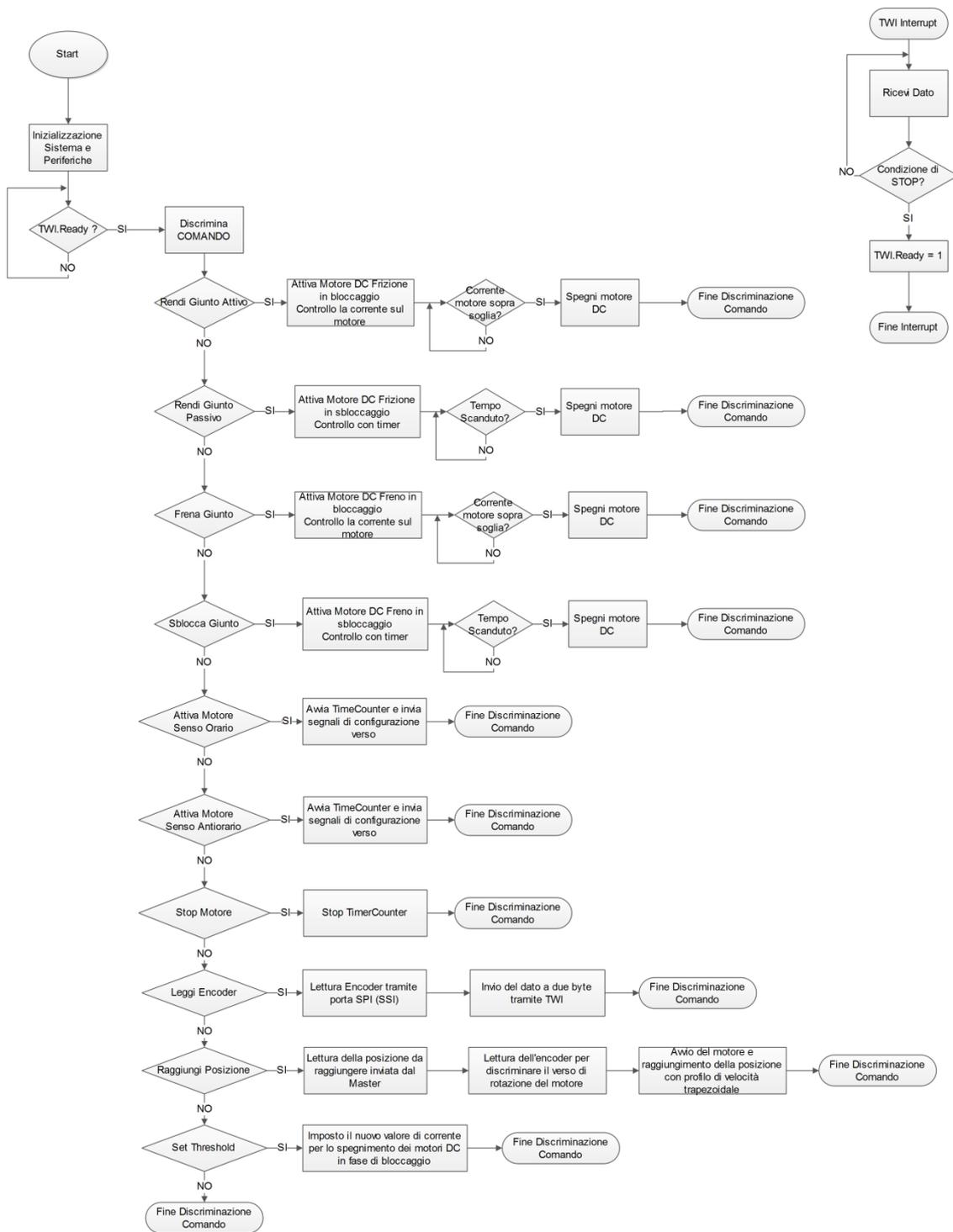


Figura 83: Flusso operazioni ottimizzate slave

3.1.3.1 L'algoritmo di controllo del moto

Nel paragrafo 2.4.1 è stato illustrato l'algoritmo di controllo implementato sulla precedente versione. Come evidenziato tale firmware implementava un controllo della velocità con variazioni brusche e variazione del tipo di eccitazione delle fasi dello stepper. Dai test effettuati si è osservato che tale tipo di controllo non risultava essere efficiente le variazioni di velocità brusche causavano delle improvvise accelerazioni sui giunti i quali, anche per l'effetto della componente inerziale, superavano le posizioni da raggiungere più volte durante il movimento costringendo lo slave a variare il verso di rotazione del motore e a ridurre la velocità molte volte. Tale soluzione causava un aumento dei tempi necessari a portare il robot nella posizione desiderata.

Per ovviare a questo problema e consentire ai progettisti del futuro software di controllo di controllare in maniera corretta il robot, si è scelto di implementare un algoritmo per la generazione di profili di velocità trapezoidali. Tali profili, grazie alla presenza di rampe ad accelerazione e decelerazione costante garantiscono il raggiungimento di velocità più elevate e un approccio alla posizione da raggiungere più controllato e meno soggetto quindi a oscillazioni non desiderate.

Mentre con i motori DC generare rampe di accelerazione e decelerazione risulta essere agevole e semplice attraverso l'utilizzo di tecniche quali il PWM, per la generazione di tali profili con motori a passi discreti gli algoritmi risultano essere più complessi.

Come illustrato in precedenza, il motore passo-passo è un dispositivo elettromagnetico che converte impulsi digitali in rotazione dell'albero.

Esistono due possibilità di generare rampe di accelerazione e decelerazione utilizzando il TC1 del microcontrollore che genera il clock per i driver dei motori stepper.

La prima è quella di calcolare a priori tutti i valori di OCR1A, che regolano la temporizzazione degli impulsi, e di memorizzarli nella memoria del microcontrollore, mentre la seconda è quella di calcolare passo per passo il valore di OCR1A in modo da temporizzare la generazione degli impulsi in real-time.

Visto che la prima soluzione causerebbe un eccessivo consumo di memoria per la memorizzazione della *look-up table*, oltre che l'impossibilità di variare l'accelerazione e la velocità massima senza operazioni di riprogrammazione del microcontrollore. Per tale motivo la scelta è ricaduta sulla seconda modalità di generazione del clock dei motori stepper.

L'algoritmo implementato consente la parametrizzazione e calcolo in tempo reale, utilizzando solo semplici operazioni aritmetiche a virgola fissa e nessuna *look-up table*.

Uno dei principali svantaggi dei motori passo-passo è la coppia limitata alle alte velocità. Infatti, la coppia di un motore passo-passo diminuisce con l'aumentare della velocità ed al raggiungimento della velocità di risonanza, come mostrato in figura.

La velocità risonante dipende dal sistema di azionamento del motore passo-passo e il carico mentre la coppia massima viene raggiunta a basse velocità.

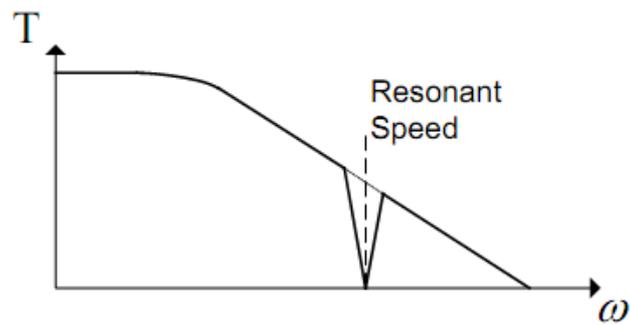


Figura 84: andamento coppia-velocità stepper

È noto che per creare un movimento di rotazione in un motore a passo, la corrente attraverso gli avvolgimenti devono cambiare nell'ordine corretto. Questo viene ottenuto utilizzando un driver che dà la corretta sequenza di uscita quando sottoposto ad un impulso e un segnale di direzione.

Per ruotare il motore passo-passo a velocità costante, impulsi deve essere generata ad una velocità costante, mostrato in figura.

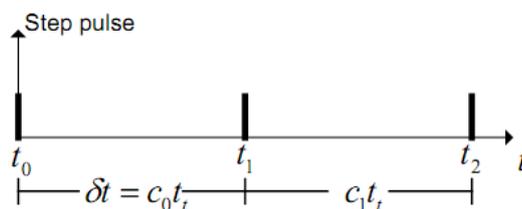


Figura 85: impulsi di clock a velocità costante

Il TC1 del microcontrollore lavora ad una frequenza pari a f_t e quindi il ritardo tra gli impulsi del motore stepper sarà data dalla seguente relazione:

$$\delta t = c t_i = \frac{c}{f_t} \text{ [s]}$$

Dove c indica il numero di conteggi che il timer counter effettua prima di generare l'impulso.

L'angolo di step α , la posizione θ e la velocità ω dei motori passo passo sono dati dalle seguenti relazioni:

$$\alpha = \frac{2\pi}{spr} [\text{rad}] \quad \theta = n\alpha [\text{rad}] \quad \omega = \frac{\alpha}{\delta t} [\text{rad/sec}]$$

La figura seguente mostra la relazione tra accelerazione, velocità e posizione.

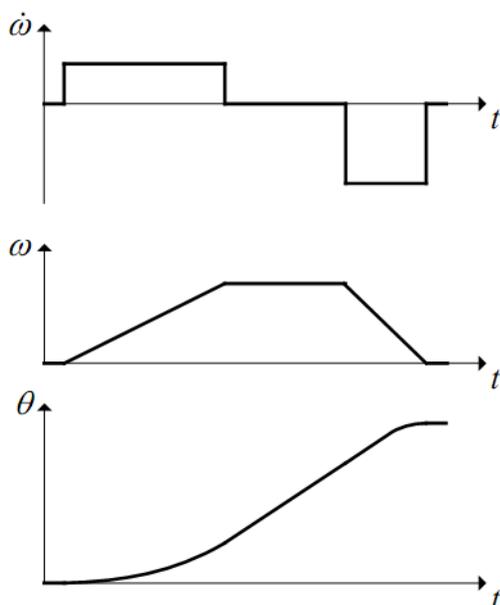


Figura 86: Accelerazione, velocità e posizione

Si nota come usando una accelerazione / decelerazione costante si ottiene un profilo di velocità trapezoidale.

Per creare tali rampe è quindi necessario controllare il ritardo tra i vari impulsi del clock.

Trattandosi di step discreti comunque, questa temporizzazione deve essere calcolata in modo tale che la velocità del motore passo-passo segua quando più possibile il profilo a rampa come visibile in figura.

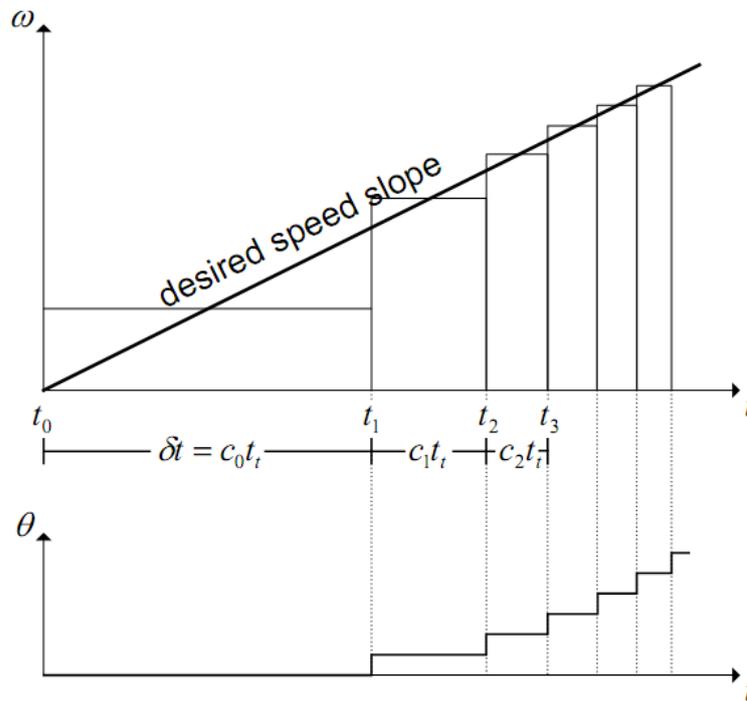


Figura 87: relazione tra rampa di velocità e impulsi di clock

Come riportato in alcuni studi, è stato dimostrato che per ottenere delle rampe lineari di velocità i conteggi da effettuare sono dati dalle seguente relazioni:

$$c_0 = \frac{1}{t_i} \sqrt{\frac{2\alpha}{\dot{\omega}}} \quad c_n = c_0 (\sqrt{n+1} - \sqrt{n})$$

Dove n è il numero degli step e i valori di c_0 e c_n sono i conteggi da effettuare che vengono memorizzati nel registro OCR1A del TC1.

Osservando queste equazioni si nota che, settando il valore di c_0 opportunamente, è possibile stabilire il valore dell'accelerazione, mentre per determinare la velocità massima è necessario impostare il valore c_n a partire al quale non viene più eseguito il calcolo del successivo ritardo.

In questo modo nel tratto ad accelerazione nulla si manterrà una frequenza di generazione degli impulsi costante.

Ovviamente, per non sovraccaricare la CPU con calcoli troppo complessi e che richiederebbero molto tempo come le radici quadrate, sui microcontrollori è stato implementato un tipo di calcolo approssimato meno complesso.

Per semplificare quindi il calcolo dei conteggi, il valore del contatore al passo n , viene calcolato utilizzando l'approssimazione in serie Taylor per cui si ottiene:

$$c_n = c_{n-1} - \frac{2c_{n-1}}{4n + 1}$$

Che risulta essere un calcolo molto più veloce per la CPU. Il problema è che, essendo un calcolo approssimato si hanno inevitabilmente degli errori ed in particolare viene introdotto un errore di 0,44 con $n = 1$. Un modo per compensare l'errore moltiplicando c con il valore empirico di 0,676.

Grazie all'implementazione di questo algoritmo il moto dei giunti risulta essere più armonico e la velocità massima raggiungibile è aumentata da 70rpm@250Hz a 300rpm@1KHz a passo intero.

In realtà per non lavorare con coppie molto basse si è scelto di utilizzare una velocità massima per i motori di 75rpm@2KHz con azionamento ad 1/8 di passo per ottenere coppie maggiori a parità di velocità.

Il fatto di poter usare frequenze più alte, quindi, ha consentito di utilizzare l'1/8 di passo come unica modalità di eccitazione degli avvolgimenti con una conseguente semplificazione del sistema di controllo.

3.1.3.2 L'algoritmo di controllo del sistema frenante e di commutazione della modalità di funzionamento

Anche in questa versione del controllo elettronico, per la gestione dei due motori DC che controllano rispettivamente il freno e sistema di commutazione tra modalità navigatore e modalità robot, è stato utilizzato il metodo a controllo della corrente assorbita.

La principale differenza tra le due versioni, sta nel fatto che, nella seconda, è stata eliminata la modalità differenziale di rilievo della corrente sulla resistenza di sensing e quindi tutto il blocco di filtraggio e riduzione della tensione. Questa soluzione ha consentito una riduzione delle dimensioni delle schede grazie all'eliminazione delle relative resistenze e capacità.

Per fare ciò sono state usate due resistenze collegate ai pin sense A e sense B del driver come visibile nelle seguenti figura.

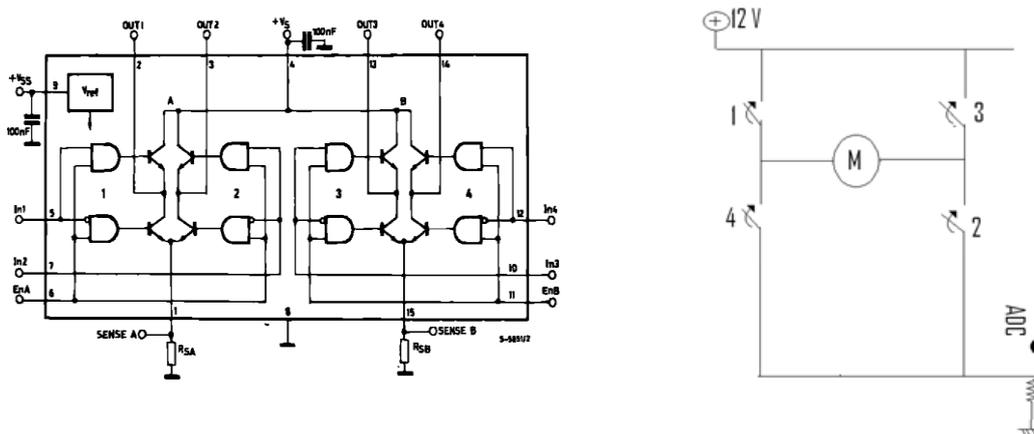


Figura 88: schema nuovo circuito di controllo sovracorrente

3.2 Gli Stadi di potenza

Come anticipato in precedenza rispetto alla precedente versione dell'elettronica di controllo per questa nuova versione sono state realizzate due nuove schede per la gestione degli attuatori di potenza ottimizzate in termini di dimensioni per una migliore dislocazione sulla struttura del robot.

In particolare è stata realizzata una nuova scheda, visibile in figura, per la gestione dei motori DC che è composta dai seguenti componenti:

- Driver L298N e diodi di protezione
- Resistori di potenza per il sensing della corrente
- Connettori femmina a pettine per collegamento con la scheda logica
- Fotoaccoppiatori per isolamento dello stadio logico
- Connettore micromatch per il trasferimento dei segnali logici e dell'alimentazione dallo stadio logico a quello di potenza dello step motor.

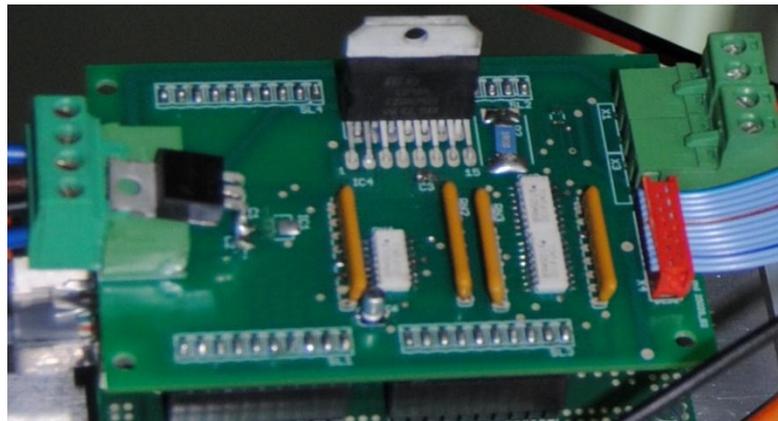


Figura 89: Scheda di potenza ottimizzata motori DC

Nella figura seguente è possibile osservare lo schematico dettagliato della suddetta scheda:

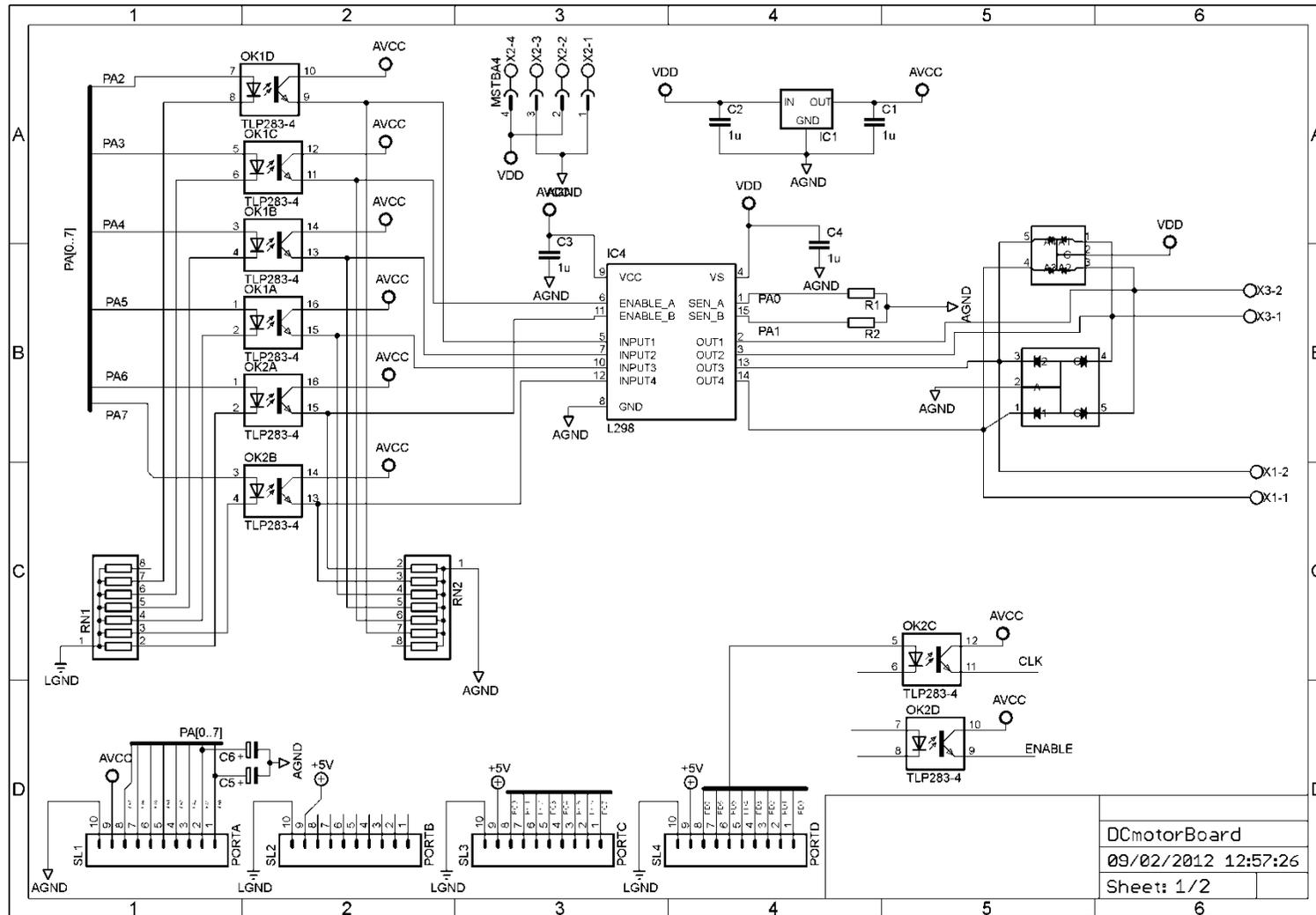


Figura 90: Schematico circuito potenza motori DC 1/2

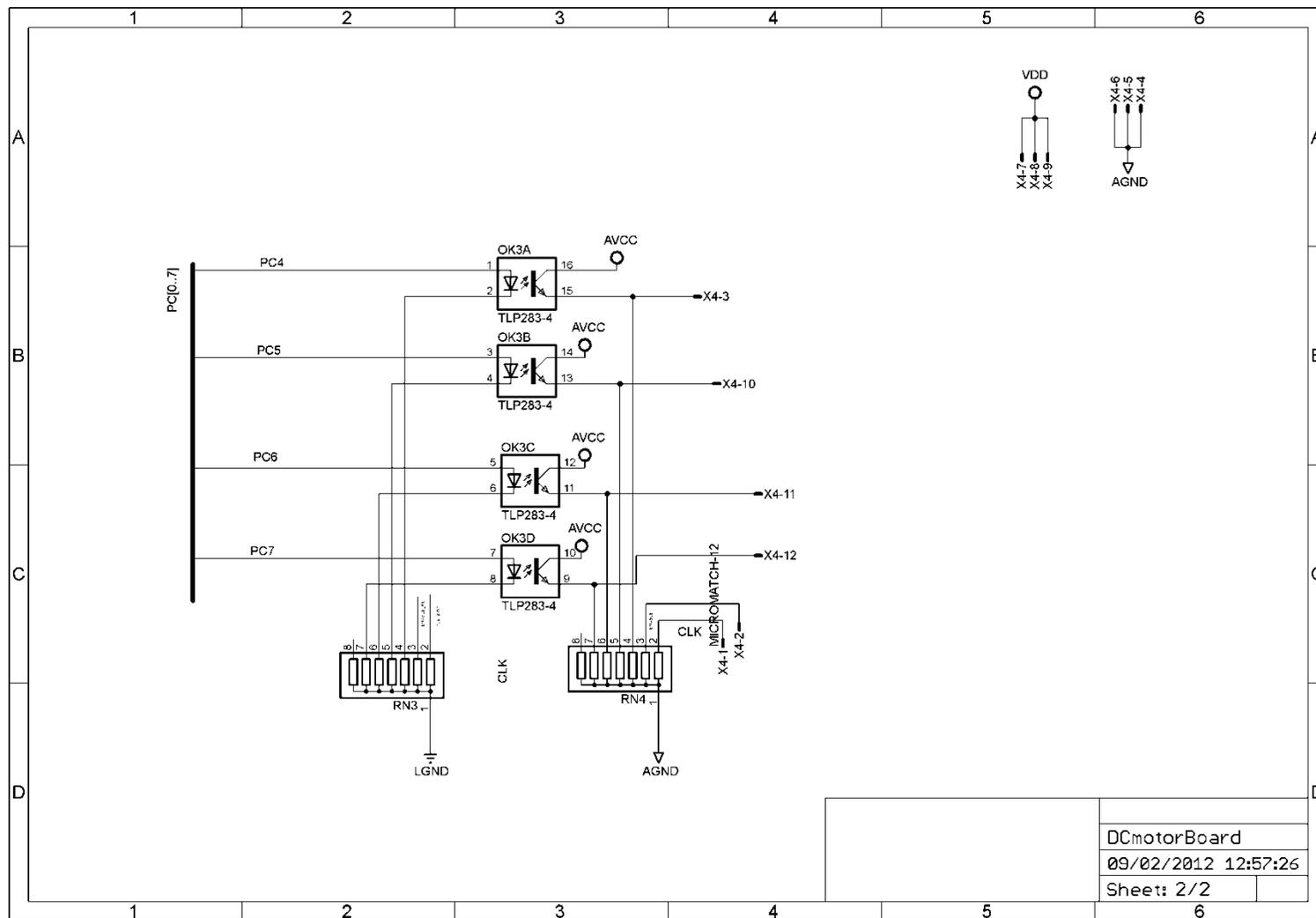


Figura 91: Schematico circuito potenza motori DC 2/2

Lo stadio di potenza dei motori stepper invece è stato realizzato in modo tale da essere collocato direttamente sulle casse dei motori come visibile in figura:

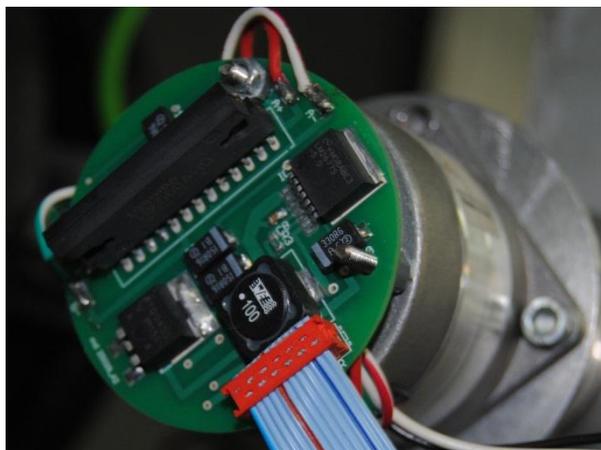


Figura 92: Step motor con scheda di potenza

Questa scheda è munita di un driver per motori Stepper toshiba TB6560 che, a differenza del toshiba TA8435H presente nella precedente versione, è caratterizzato da una più alta corrente di uscita, che si traduce in una coppia più alta erogata dal motore.

Su questa scheda, realizzata con componenti SMT, è presente anche uno stadio di alimentazione switching che eroga la corrente necessaria al funzionamento del motore convertendo la tensione di alimentazione da 12V a 5V con un'efficienza elevata.

Nella seguente figura è possibile riportare lo schematico dettagliato della scheda di potenza.

I test di funzionamento effettuati sia sullo stadio logico che su quello di potenza hanno dimostrato il corretto funzionamento delle schede progettate ed hanno permesso il loro utilizzo per il controllo del NaviRobot.

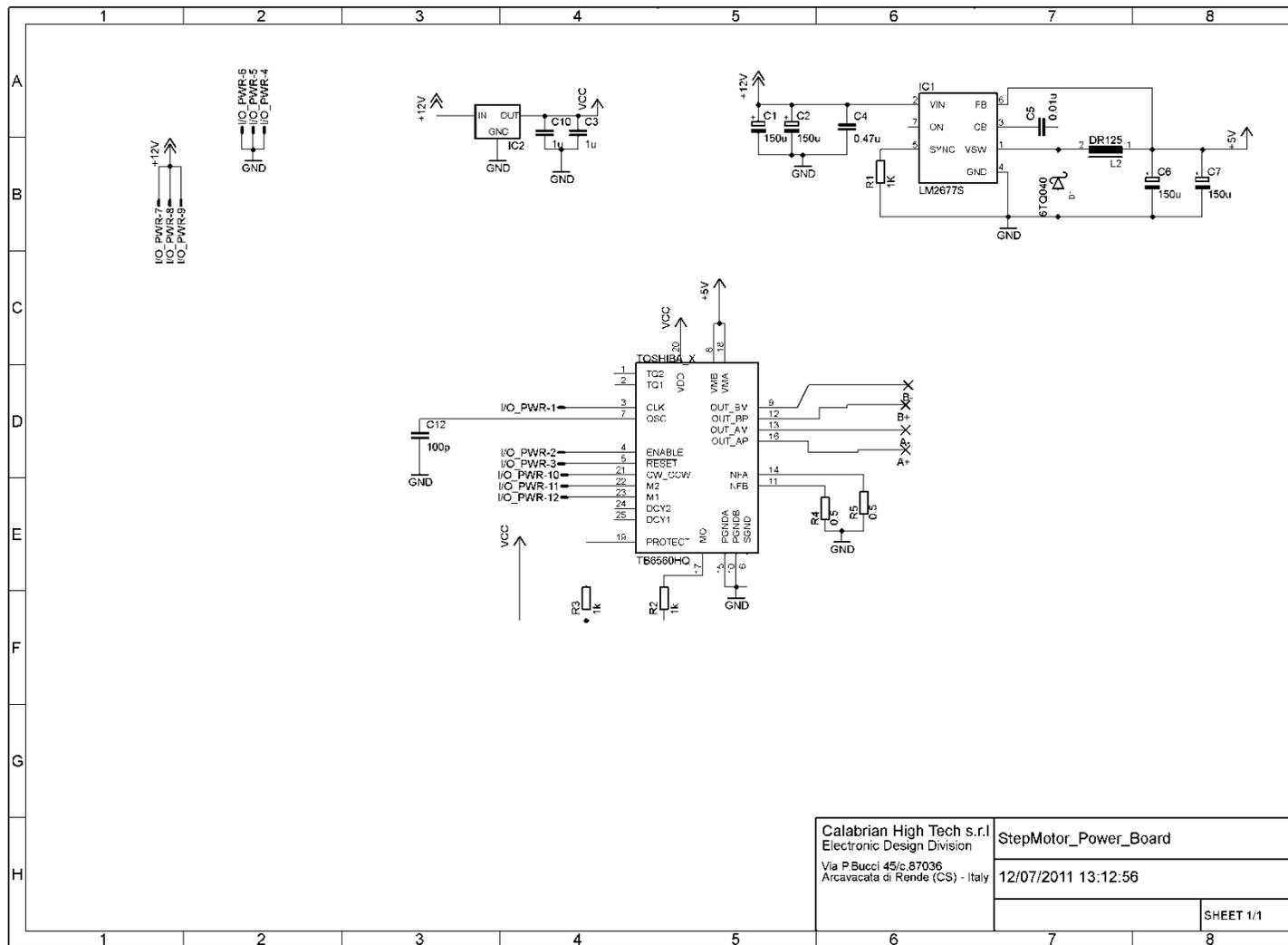


Figura 93: Schematico circuito potenza motori stepper

4. L' End Effector

Come evidenziato nel capitolo 1, i vantaggi della chirurgia mini invasiva sono molti ed è esperienza quotidiana che il paziente, in virtù del fatto che ha avuto modo di apprezzarne gli aspetti vantaggiosi attraverso i comuni mezzi d'informazione, sempre più frequentemente richiede al chirurgo, quando si deve sottoporre ad un intervento, di essere operato con tecnica mini invasiva.

Gli strumenti robotici hanno ulteriormente contribuito a migliorare la precisione di questi interventi, oltre a consentire l'impiego di un minor numero di persone all'interno della sala operatoria.

Tuttavia i robot attualmente in commercio hanno un costo molto elevato il che rende molto difficile la loro diffusione. Oltre al costo proprio del robot, gli strumenti laparoscopici che tali robot usano costano molto, sono costruiti ad hoc e possono essere usati solo per poche sessioni operatorie.

Per sopperire a tale necessità si è pensato di realizzare quindi un end-effector, installabile sia sui bracci laterali del sistema robotico per applicazioni ortopediche NaviRobot che su supporto indipendente che può essere fissato al tavolo operatorio.

Con questo end effector si vuole realizzare un strumento in grado di manipolare strumenti ed attuare un grande gamma di strumenti laparoscopici classici ottenendo risultati confrontabili con quelli dei robot esistenti.

Nella seguente figura sono illustrati i movimenti necessari per effettuare manipolazione di una pinza laparoscopica



Figura 94: Movimenti necessario alla manipolazione corretta di strumenti laparoscopici

La manipolazione di strumenti standard consente l'utilizzo di strumenti laparoscopici più piccoli rispetto a quelli dei robot in commercio. Questo rappresenta un grosso vantaggio soprattutto per quel che riguarda la chirurgia neonatale e pediatrica. Rispetto agli strumenti robotici come quelli del Da Vinci però si ha un DOF in meno e quindi una minore destrezza.

L'End-effector ideato sarà controllato in real time dal chirurgo tramite un joystick osservando il campo operatorio tramite un monitor. Complessivamente il dispositivo, presenta 4 DOF per il posizionamento e per l'orientamento dello strumento più un ulteriore DOF per l'attuazione delle maniglie delle pinze che vengono conferiti, rispettivamente da 3 giunti rotoidali e da 1 giunto prismatico e da un sistema a quadrilatero articolato.

Inizialmente l' End Effector era stato concepito per essere collocato sui bracci navigatori del NaviRobot ma successivamente si è scelto di utilizzare solo il braccio

centrale di tale robot progettando gli end effector in modo tale che essi potessero essere collocati su piedistalli indipendenti da fissare al tavolo operatorio, in modo da garantire una migliore trasportabilità ed aumentare le dimensioni dello spazio di lavoro.

Tale soluzione necessiterà di ulteriori studi per quanto riguarda il riconoscimento delle posizioni reciproche dei vari EF che verranno utilizzati in modo da garantire il corretto funzionamento in campo laparoscopico.

4.1 Problematica del punto fisso

Come descritto nel capitolo 1, negli interventi di laparoscopia, gli strumenti chirurgici vengono introdotti attraverso dei piccoli fori all'interno dell'addome del pazienti tramite delle speciali valvole chiamate trocar.

In base a tale condizione, nel controllo degli strumenti robotici si deve tenere conto del fatto che la rotazione degli strumenti laparoscopici deve avvenire intorno ad un punto fisso, coincidente con il punto di inserzione.

Nel progettare il nostro sistema, si è scelto di equipaggiarlo con un sistema a quadrilatero articolato in modo da rispettare meccanicamente la specifica di rotazione del punto fisso, evitando così la necessità di progettare un sistema di controllo del moto più complicato. Inoltre, un sistema che soddisfa meccanicamente tale condizione presenta dei tempi di risposta prossimi allo 0.

Tale scelta porta ha portato all'idea di una struttura ibrida parallelo-seriale per l'end-effector come mostrato in figura 95.

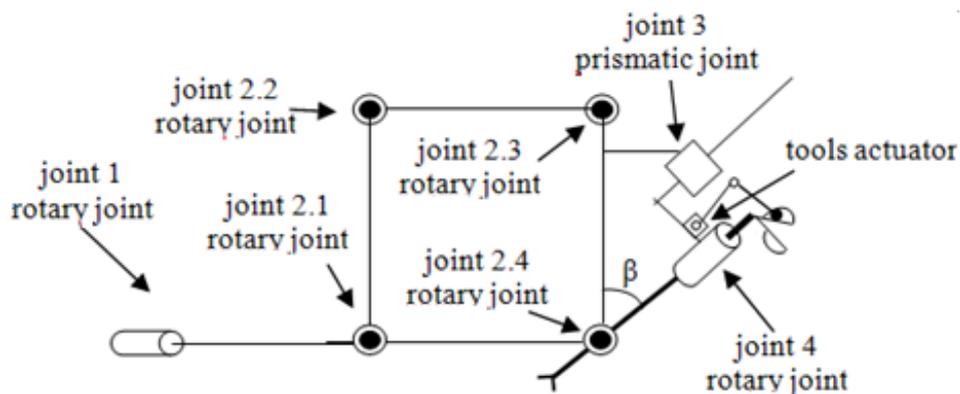


Figura 95:Struttura ibrida dell' EF

Per rendere possibile quanto detto sopra, creando un giunto sferico virtuale in corrispondenza del punto di inserzione, si è scelto di collocare il punto fisso di rotazione lungo l'asse di rotazione del primo giunto rotoidale che consente di inclinare lo strumento laparoscopico nel piano frontale dell'end-effector.

Una volta individuato l'asse su cui giace il punto fisso all'interno dello spazio di lavoro dell'end-effector (Giunto 2.4), il sistema di ancoraggio e attuazione degli strumenti laparoscopici standard viene connesso al resto della struttura inclinato di un opportuno angolo β . In questo modo l'asse del giunto utilizzato per ruotare su se stesso lo strumento laparoscopico interseca il punto fisso.

Il sistema di ancoraggio degli strumenti laparoscopici standard è composto da un ulteriore giunto di tipo prismatico che viene utilizzato per controllare la penetrazione dello strumento all'interno dell'addome del paziente e da un sistema per l'attuazione degli stessi, composto da un meccanismo che forma un quadrilatero articolato con la maniglia della pinza.

La scelta di utilizzare un sistema a catena chiusa invece che a catena aperta, oltre che per la possibilità di avere un controllo più semplice, è stata fatta perché, dovendo mantenere meccanicamente un punto fisso nello spazio riducendo al minimo il numero di gradi di libertà necessari, un sistema a catena chiusa è più rigido e quindi consente di utilizzare dei link di spessore minore senza problemi di deformazioni che renderebbero il sistema inutilizzabile.

Inizialmente infatti si era pensato ad un sistema caratterizzato da un catena cinematica aperta a 3 DOF ottenuta rimuovendo il giunto 2.4 dal quadrilatero articolato illustrato in figura.

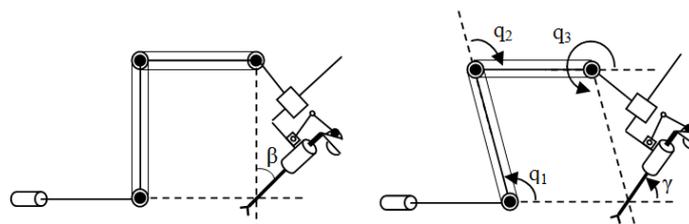


Figura 96: EF con cinghie e pulegge

Il corretto funzionamento di questo sistema era garantito da un sistema di cinghie e pulegge, che consentivano di ridurre il numero di gradi di libertà da 3 ad 1. La specifica di rotazione intorno ad un punto fisso era così soddisfatta se si verificavano le seguenti condizioni:

$$q_2 = -q_1$$

$$q_3 = \pi + q_1.$$

Tuttavia, poiché si è scelto di ottenere la rotazione intorno al punto fisso in corrispondenza del punto di inserzione meccanicamente, è fondamentale avere una

struttura più rigida possibile onde evitare che eventuali deformazioni dei link vadano a minare la geometria dell'end effector.

Vista l'impossibilità di collocare fisicamente una cerniera in corrispondenza del punto fisso si è scelto di utilizzare un sistema a Doppio Quadrilatero Articolato(DQA) come mostrato in figura 97.

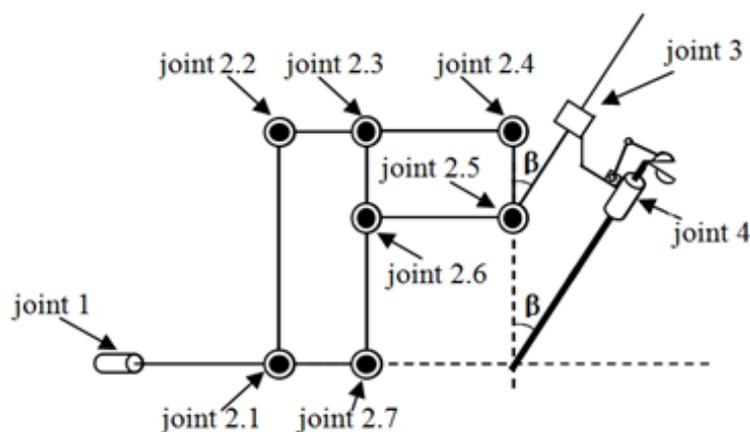


Figura 97:Struttura a DQA

Come si può osservare nella precedente figura, questo quadrilatero presenta l'ultimo link verticale di lunghezza inferiore rispetto ai due precedenti e una cerniera intermedia sul secondo link verticale.

Con questa struttura il terzo punto di rotazione del DQA viene ottenuto senza l'uso di una cerniera fisica in corrispondenza dello stesso.

Tale punto di rotazione corrisponde al punto di inserzione e quindi con un opportuno dimensionamento, si è riusciti ad ottenere intorno al punto fisso lo spazio necessario per condurre un intervento di laparoscopia.

Per tale motivo al fine di garantire l'intersezione tra gli assi dei giunti 1 e 4 con il terzo punto fisso di rotazione del DQA è stato necessario dimensionare opportunamente i suoi link come illustrato di seguito.

4.2 Dimensionamento del sistema

Poiché non tutti gli strumenti laparoscopici standard sono equipaggiati con un grado di libertà che consente la rotazione della pinza lungo l'asse dello strumento, è necessario ruotare la pinza insieme alla maniglia.

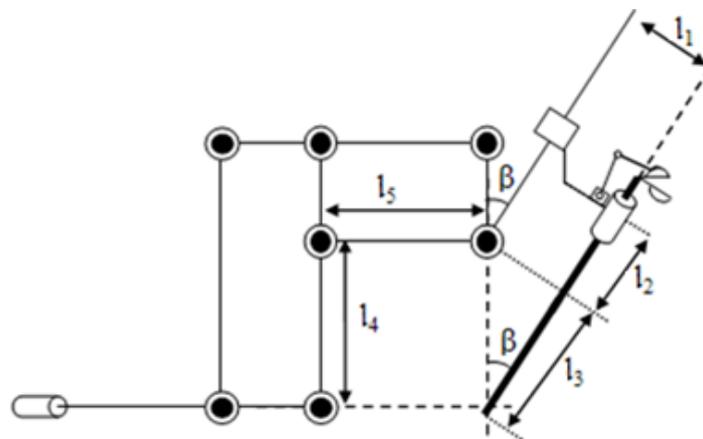


Figura 98: Dimensioni critiche per la rotazione su punto fisso

Questa prima versione dell'end-effector prevede la possibilità di utilizzare strumenti laparoscopici standard di qualunque tipo provvisti o meno del giunto rotazionale che consente la rotazione del tool-tip sul proprio asse. Con riferimento alla figura 98, dovendo prevedere la possibilità di dover ruotare lo strumento insieme alla

sua maniglia, che in generale può avere una lunghezza che arriva fino a 13 cm, si è scelto di utilizzare una lunghezza $l_1=15\text{cm}$ tra gli assi dei giunti 3 e 4.

Questa lunghezza consente di evitare eventuali collisioni tra la maniglia e la struttura del giunto prismatico.

Inoltre, poiché l'EF deve essere collocato sull'addome del paziente le distanze l_4 ed l_5 sono state imposte rispettivamente pari a 35 e 30 cm in modo da creare lo spazio sufficiente intorno al sito del trocar.

Avendo imposto queste lunghezze dei link si ottiene il seguente valore di β dato da:

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{l_1}{l_4}\right) = 25.3769^\circ$$

Al fine di rendere la realizzazione e l'assemblaggio del sistema più semplice possibile, è stato scelto un angolo $\beta=25^\circ$ e quindi sono stati ricavati i seguenti valori dei link l_2 , l_3 , ed l_4 :

$$l_4 = \frac{l_1}{\sin(\beta)} = 35,5\text{cm};$$

$$l_3 = l_4 \cdot \cos(\beta) = 32.2\text{ cm};$$

$$l_2 = L - l_3.$$

Dove L è la lunghezza dello strumento laparoscopico. Se si crea una struttura esclusiva per gli strumenti equipaggiati con il giunto rotazionale, le dimensioni dell'intera struttura possono essere notevolmente ridotte.

Tali dimensioni sono fondamentali per il soddisfacimento della specifica di rotazione intorno ad un punto fisso e per garantire il sufficiente spazio intorno al punto di inserzione.

In figura è possibile osservare il primo prototipo di end effector realizzato secondo queste specifiche.

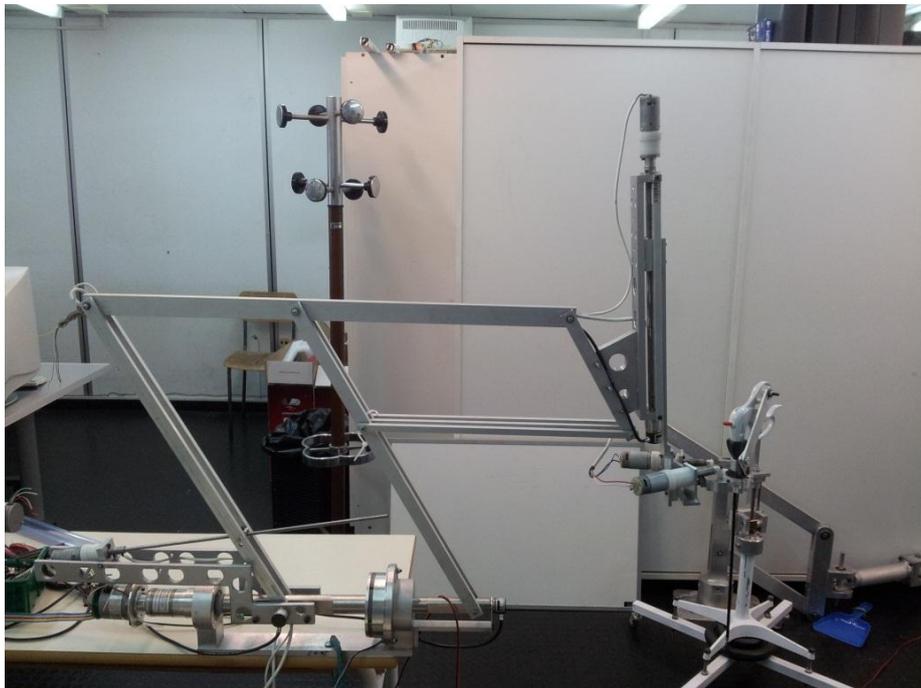


Figura 99: Il primo prototipo dell'EF

4.3 Cinematica diretta ideale

Una volta fissata la struttura dell'end-effector è possibile ricavare il suo modello cinematico e quindi le matrici di roto-traslazione che lo caratterizzano. Questo primo modello non tiene conto dei parametri di errore.

Il modello comprensivo di tali parametri sarà oggetto di studi futuri. Nella seguente figura è riportato il modello dell'end-effector e le terne di riferimento associate ai vari giunti dove il simbolo \odot sta per asse uscente mentre il simbolo \otimes sta per asse entrante.

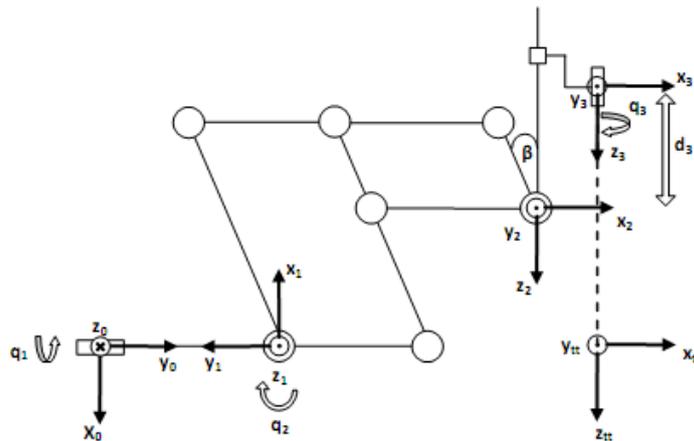


Figura 100:Assegnazione terne secondo D-H

Prima di procedere con la determinazione della matrice di rototraslazione complessiva A_4^0 è necessario illustrare il procedimento che porta alla determinazione della matrice A_2^1 . Per ricavare tale matrice è stato analizzato in maniera indipendente il doppio quadrilatero considerando singolarmente i due quadrilateri presenti e applicando ad essi la convenzione di D-H per le catene chiuse.

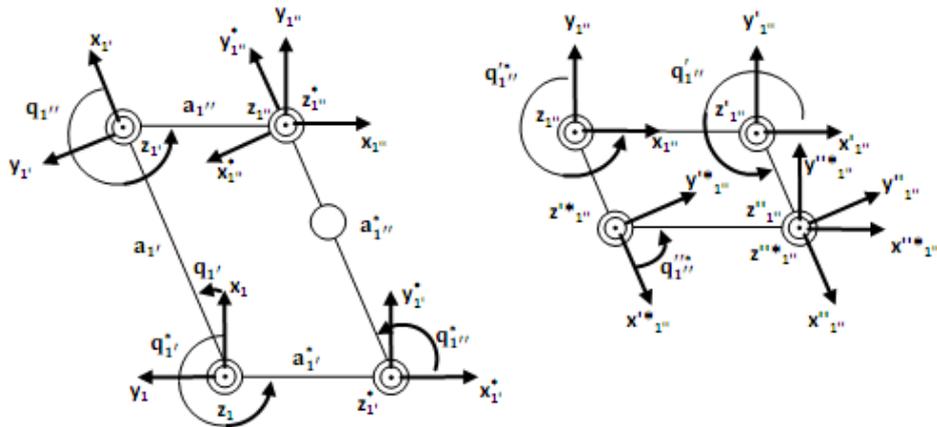


Figura 101: DQA - assegnazione terne dei singoli quadrilateri

Per quanto riguarda il primo quadrilatero si ottengono i seguenti parametri di D-H:

LINK	θ_i	d_i	α_i	a_i
1'	$q_{1'}$	0	0	$a_{1'}$
1''	$q_{1''}$	0	0	$a_{1''}$
1*'	$\frac{3}{2}\pi$	0	0	$a_{1*'}$
1*''	$q_{1''}^*$	0	0	$a_{1''}^*$

In funzione di questi parametri D-H per il ramo 1'-1'' si ottengono le seguenti matrici di rototraslazione:

$$A_{1^{*'}}^{1'} = \begin{bmatrix} c_{1'} & -s_{1'} & 0 & a_{1'} \cdot c_{1'} \\ s_{1'} & c_{1'} & 0 & a_{1'} \cdot s_{1'} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{1''}^{1'} = \begin{bmatrix} c_{1''} & -s_{1''} & 0 & a_{1''} \cdot c_{1''} \\ s_{1''} & c_{1''} & 0 & a_{1''} \cdot s_{1''} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Da cui si ottiene:

$$A_{1''}^1 = \begin{bmatrix} c_{1'1''} & -s_{1'1''} & 0 & a_{1'} \cdot c_{1'} + a_{1''} \cdot c_{1'1''} \\ s_{1'1''} & c_{1'1''} & 0 & a_{1'} \cdot s_{1'} + a_{1''} \cdot s_{1'1''} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Per quanto riguarda il ramo $1^{*'}-1^{*''}$ invece si ha:

$$A_{1'}^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -a_{1'}^* \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{1''}^1 = \begin{bmatrix} c_{q_{1''}^*} & -s_{q_{1''}^*} & 0 & a_{1''}^* \cdot c_{q_{1''}^*} \\ s_{q_{1''}^*} & c_{q_{1''}^*} & 0 & a_{1''}^* \cdot s_{q_{1''}^*} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Da cui si ottiene:

$$A_{1^{*''}}^1 = \begin{bmatrix} s_{q_{1''}^*} & c_{q_{1''}^*} & 0 & a_{1''}^* \cdot s_{q_{1''}^*} \\ -c_{q_{1''}^*} & s_{q_{1''}^*} & 0 & -a_{1'}^* - a_{1''}^* \cdot c_{q_{1''}^*} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A questo punto, essendo $z_{1''} = z_{1''}^*$, per considerare il fatto che i due rami formano una catena chiusa, si applica solo la il vincolo di coincidenza sulle origini delle terne $1''$ e $1^{*''}$. Eguagliando le quarte colonne delle due matrici di rototraslazione $A_{1''}^1$ e $A_{1^{*''}}^1$ si ottiene il seguente sistema:

$$\begin{aligned} a_{1'} \cdot c_{1'} + a_{1''} \cdot c_{1'1''} - a_{1''}^* \cdot s_{q_{1''}^*} &= 0 \\ a_{1'} \cdot s_{1'} + a_{1''} \cdot s_{1'1''} + a_{1'}^* + a_{1''}^* \cdot c_{q_{1''}^*} &= 0 \end{aligned}$$

Essendo $a_{1'} = a_{1''}^*$ e $a_{1''} = a_{1'}^*$, si possono riscrivere le precedenti equazioni nel seguente modo:

$$\begin{aligned} a_{1'} \cdot (c_{1'} - s_{q_{1''}^*}) + a_{1''} \cdot c_{1'1''} &= 0 \\ a_{1'} \cdot (s_{1'} + c_{q_{1''}^*}) + a_{1''} \cdot (1 + s_{1'1''}) &= 0 \end{aligned}$$

Trascurando i parametri fisici queste due equazioni sono soddisfatte se:

$$\begin{aligned} s_{q_1^{*''}} &= c_{1'} \\ c_{1'1''} &= 0 \\ -c_{q_1^{*''}} &= s_{1'} \\ s_{1'1''} &= -1 \end{aligned}$$

E quindi se:

$$\begin{aligned} q_1^{*''} &= \frac{\pi}{2} + q_{1'} \\ q_{1'} + q_{1''} &= -\frac{\pi}{2} \\ q_1^{*''} &= \frac{\pi}{2} + q_{1'} \\ q_{1'} + q_{1''} &= -\frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

Per cui si ottiene che:

$$\begin{aligned} q_1^{*''} &= \frac{\pi}{2} + q_{1'} \\ q_{1''} &= -\frac{\pi}{2} - q_{1'} \end{aligned}$$

Sostituendo $q_{1''}$ nella matrice $A_1^{1''}$ otteniamo una dipendenza solo alla variabile $q_{1'}$

come si può vedere nella seguente matrice:

$$A_1^{1''} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & a_{1'} \cdot c_{1'} \\ -1 & 0 & 0 & a_{1'} \cdot s_{1'} - a_{1''} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Procedendo allo stesso modo anche per il secondo quadrilatero otteniamo che :

$$A_{1''}^{1''} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & a_{1'} \cdot c_{1'} \\ -1 & 0 & 0 & a_{1'} \cdot s_{1'} - a_{1''} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Moltiplicando le matrici $A_1^{1''}$ e $A_{1''}^{1''}$ si ottiene la matrice di rototraslazione complessiva

del DP4BL . A questo punto per ricondurci alla figura 100, bisogna considerare il fatto

che il giunto prismatico è ruotato di un angolo β e quindi la matrice di rototraslazione complessiva dalla terna 1 alla terna 2, come indicato in figura 100, è pari a:

$$A_{\frac{1}{2}}^1 = \begin{bmatrix} s_{II} & 0 & -c_{II} & (a_2 - a_{2''''}) \cdot c_2 \\ -c_{II} & 0 & -s_{II} & -(a_{2'} + a_{2''}) + (a_2 - a_{2''''}) \cdot s_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

In questa matrice è stato indicato con il simbolo q_{II} l'angolo $q_2 - \beta$. Dopo aver ricavato questa matrice, è possibile completare il calcolo dell'equazione cinematica diretta.

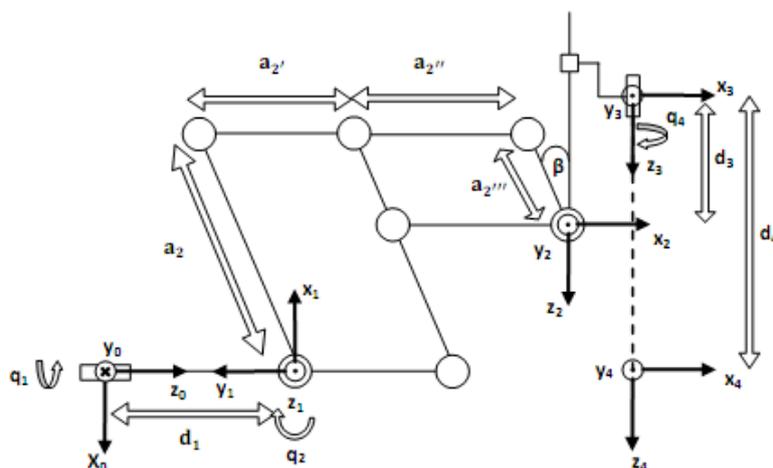


Figura 102: frame secondo convenzione D-H

Con riferimento alla precedente figura, per questa struttura possiamo ricavare i seguenti parametri D-H restanti link:

LINK	θ_i	d_i	α_i	a_i
1	q_1	d_1	$-\frac{\pi}{2}$	0
3	0	$d_3 - l_2$	0	a_3
4	q_4	d_4	0	0

Utilizzando questi parametri otteniamo quindi le seguenti matrici:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 - l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice di rototraslazione complessiva è quindi data da:

$$A_4^0 = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \cdot A_4^3 =$$

$$= \begin{bmatrix} c_1 s_{11} c_4 - s_1 s_4 & -c_1 s_{11} s_4 - s_1 c_4 & -c_1 c_{11} & [(a_2 - a_2''') \cdot c_2 + a_3 \cdot s_{11} - (d_3 - l_2 + d_4) \cdot c_{11}] \cdot c_1 \\ s_1 s_{11} c_4 + c_1 s_4 & -s_1 s_{11} s_4 + c_1 c_4 & -s_1 c_{11} & [(a_2 - a_2''') \cdot c_2 + a_3 \cdot s_{11} - (d_3 - l_2 + d_4) \cdot c_{11}] \cdot s_1 \\ c_{11} c_4 & -c_{11} s_4 & s_{11} & d_1 + a_2' + a_2'' - (a_2 - a_2''') \cdot s_2 + a_3 \cdot c_{11} + (d_3 - l_2 + d_4) \cdot s_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Che rappresenta l'equazione cinematica diretta dell'end-effector.

4.4 Cinematica inversa ideale

Anche se l'end-effector viene controllato direttamente dal utente che controlla tramite il joystick il valore delle variabili di giunto per orientare l'end-effector, il calcolo della cinematica inversa può tornare utile qualora fosse necessario effettuare dei test sul suo funzionamento in termini di risoluzione, accuratezza e ripetibilità oppure nel caso di utilizzo di sistemi di visione 3D.

Il problema della cinematica inversa è quello di descrivere l'orientazione e la posizione dell'end-effector (in questo caso della parte finale dello strumento laparoscopico) usando un numero minimo di coordinate sempre in riferimento alla geometria della struttura che si sta analizzando.

Una soluzione possibile è quella di utilizzare una terna di angoli di Eulero per descrivere l'orientazione della terna associata con il centro della tool tip dello strumento laparoscopico e una terna di coordinate per descrivere il suo posizionamento. In questo modo è possibile descrivere la posa dell'end-effector usando un vettore 6×1 composto dal vettore 3×1 di posizione(\mathbf{p}) e il vettore 3×1 degli angoli di Eulero(Φ). In questo modo si esprime la posizione e l'orientamento nel cosiddetto **spazio operativo** dell'end-effector.

Avendo a disposizione solo 4 DOF, non è possibile distinguere nettamente le due problematiche di posizionamento e orientamento in quanto, per la particolare geometria e il campo di applicazione del sistema, data una precisa posizione del tool tip dello strumento laparoscopico tale punto potrà essere raggiunto solo con un orientamento (a meno della rotazione pura sull'asse dello strumento) e viceversa. A tal fine, nel nostro

caso si vogliono ricavare le variabili di giunto q_1, q_2 e d_3 che consentono il raggiungimento di un particolare punto nello spazio di lavoro trascurando momentaneamente la variabile q_4 che invece è usata solo per ruotare lo strumento laparoscopico sul proprio asse e quindi non influenza il posizionamento.

Quindi dato un vettore posizione $P=[P_x, P_y, P_z]$ per ricavare il valore delle variabili di giunto che consentono di raggiungere tale punto, imponiamo l'uguaglianza del vettore P con la quarta colonna della matrice di rototraslazione A_4^0 ottenendo il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} [(a_2 - a_2''') \cdot c_2 + a_3 \cdot s_{II} - (d_3 - l_2 + d_4) \cdot c_{II}] \cdot c_1 = P_x \\ [(a_2 - a_2''') \cdot c_2 + a_3 \cdot s_{II} - (d_3 - l_2 + d_4) \cdot c_{II}] \cdot s_1 = P_y \\ d_1 + a_2' + a_2'' - (a_2 - a_2''') \cdot s_2 + a_3 \cdot c_{II} + (d_3 - l_2 + d_4) \cdot s_{II} = P_z \end{cases}$$

Quadrando e sommando le prime due equazioni otteniamo che:

$$[(a_2 - a_2''') \cdot c_2 + a_3 \cdot s_{II} - (d_3 - l_2 + d_4) \cdot c_{II}] = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$

Dalla terza equazione si ottiene invece che:

$$(d_3 - l_2 + d_4) = \frac{P_z - (d_1 + a_2' + a_2'') + (a_2 - a_2''') \cdot s_2 - a_3 \cdot c_{II}}{s_{II}}$$

E quindi sostituendo si ha:

$$\begin{aligned} (a_2 - a_2''') \cdot c_2 + a_3 \cdot s_{II} - \frac{P_z - (d_1 + a_2' + a_2'') + (a_2 - a_2''') \cdot s_2 - a_3 \cdot c_{II}}{s_{II}} \cdot c_{II} \\ = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \end{aligned}$$

$$(a_2 - a_{2''''}) \cdot c_2 s_{II} + a_3 \cdot s_{II}^2 - P_z \cdot c_{II} + (d_1 + a_{2'} + a_{2''}) \cdot c_{II} - (a_2 - a_{2''''}) \cdot c_{II} s_2 + a_3 \cdot c_{II}^2 = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \cdot s_{II}$$

$$(a_2 - a_{2''''}) \cdot (c_2 s_{II} - c_{II} s_2) + a_3 + (d_1 + a_{2'} + a_{2''} - P_z) \cdot c_{II} - \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \cdot s_{II} = 0$$

Dalle equazioni fondamentali di seno e coseno, essendo $q_{II} = q_2 - \beta$, si può esprimere :

$$s_{II} = s_2 c_\beta - c_2 s_\beta$$

$$c_{II} = c_2 c_\beta + s_2 s_\beta$$

e quindi sostituendo nella precedente equazione otteniamo:

$$-(a_2 - a_{2''''}) s_\beta + a_3 + (d_1 + a_{2'} + a_{2''} - P_z) \cdot c_{II} - \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \cdot s_{II} = 0$$

Come si può notare l'equazione dipende ora, solo dalla variabile q_{II} . Per risolvere questa equazione ricorriamo alle formule di duplicazione di seno e coseno dalle quali si ha che:

$$c_{II} = \frac{1 - \tan^2\left(\frac{q_{II}}{2}\right)}{1 + \tan^2\left(\frac{q_{II}}{2}\right)} = \frac{1 - t^2}{1 + t^2}$$

$$s_{II} = \frac{2 \cdot \tan\left(\frac{q_{II}}{2}\right)}{1 + \tan^2\left(\frac{q_{II}}{2}\right)} = \frac{2t}{1 + t^2}$$

Sostituendo questi valori e chiamando $K_1 = (d_1 + a_{2'} + a_{2''} - P_z)$, $K_2 = a_3 - (a_2 - a_{2''''}) s_\beta$ per semplicità, otteniamo:

$$(K_2 - K_1)t^2 - 2\sqrt{P_x^2 + P_y^2} \cdot t + (K_2 + K_1) = 0$$

Risolvendo questa equazione di secondo grado otteniamo:

$$t = \frac{\sqrt{P_x^2 + P_y^2} \pm \sqrt{P_x^2 + P_y^2 - K_2^2 + K_1^2}}{K_2 - K_1} = \frac{\sin \frac{q_{II}}{2}}{\cos \frac{q_{II}}{2}}$$

Grazie a questa equazione è possibile ricavare il valore di q_{II} che è quindi pari a:

$$q_{II} = 2 \cdot \text{atan2} \left(\sqrt{P_x^2 + P_y^2} \pm \sqrt{P_x^2 + P_y^2 - K_2^2 + K_1^2}, K_2 - K_1 \right)$$

e quindi possiamo ricavare la variabile di giunto

$$q_2 = q_{II} + \beta$$

Per le altre due variabili di giunto si ha

$$s_1 = \frac{P_y}{(a_2 - a_2''') \cdot c_2 + a_3 \cdot s_{II} - (d_3 - l_2 + d_4) \cdot c_{II}}$$

$$c_1 = \pm \sqrt{1 - s_1^2}$$

$$q_1 = \text{atan2}(s_1, c_1)$$

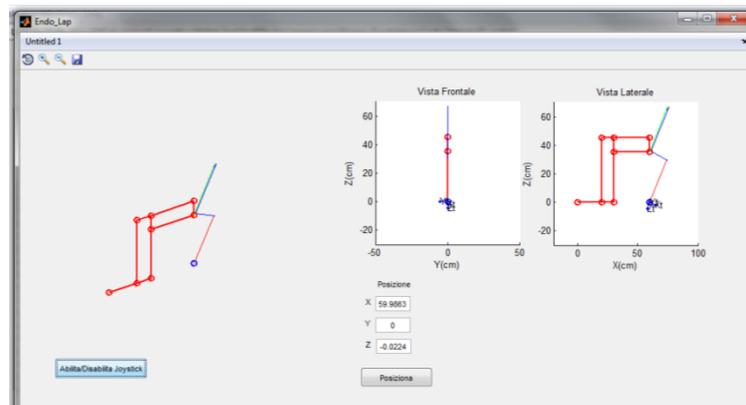
e

$$d_3 = \frac{P_z - (d_1 + a_2' + a_2'') + (a_2 - a_2''') \cdot s_2 - a_3 \cdot c_{II}}{s_{II}} + l_2 - d_4$$

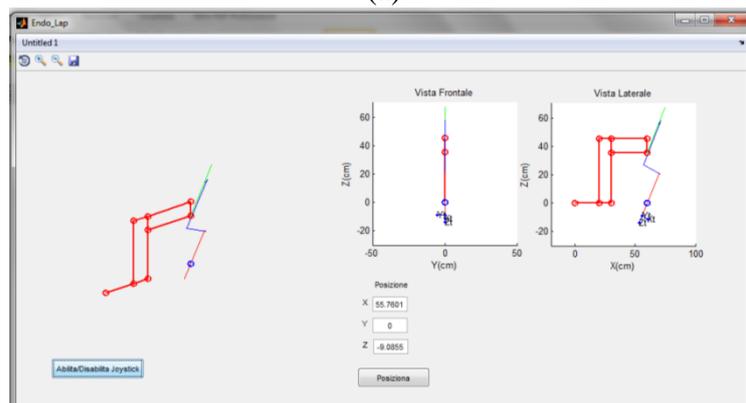
La variabile di giunto q_4 , non viene calcolata in quanto viene controllata direttamente dall'utente e visivamente dall'utente non essendo presente nessuna rete di feedback per monitorare la rotazione della pinza sul suo asse.

Una volta ricavato il modello cinematico dell'End Effector è stato realizzato un software in ambiente Matlab per verificare il corretto funzionamento e per avere

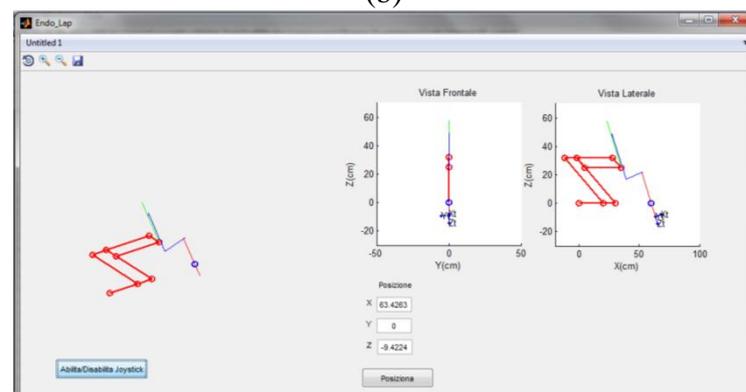
indicazioni riguardo lo spazio di lavoro del robot. Nella seguente figura è possibile osservare l'interfaccia grafica del software realizzato dove il punto fisso è indicato dal cerchio blu nella figura di destra.



(a)



(b)



(c)

Figura 103: interfaccia software: (a) condizione di riposo (b) $d_3=10\text{cm}$ (c) $d_3=10\text{cm}$ e $q_2=\pi/4$

Assegnando alle variabili di giunto i tutti i valori realmente ottenibili ed in particolare: $q_1=-115^\circ\div 115^\circ$; $q_2=-75^\circ\div 75^\circ$; $d_3=0\div 300\text{mm}$; $q_4=0\div 360^\circ$ è stato possibile

osservare che lo spazio di lavoro per l'end-effector che corrisponde ad una porzione di sfera come visibile in figura.

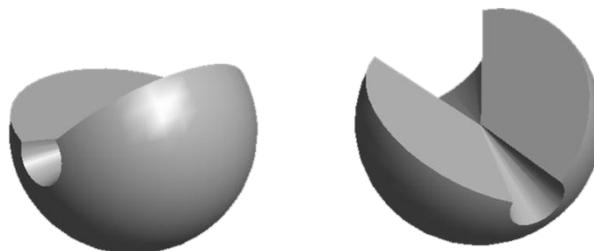


Figura 104: Spazio di lavoro EF

Utilizzando un modello in scala, inoltre, è stata realizzata una simulazione 3D del posizionamento dello strumento sul tavolo operatorio, come visibile nella seguente figura. Tale simulazione ha evidenziato che l'end effector è in grado di raggiungere tutti i punti necessari ad effettuare un intervento di laparoscopia.

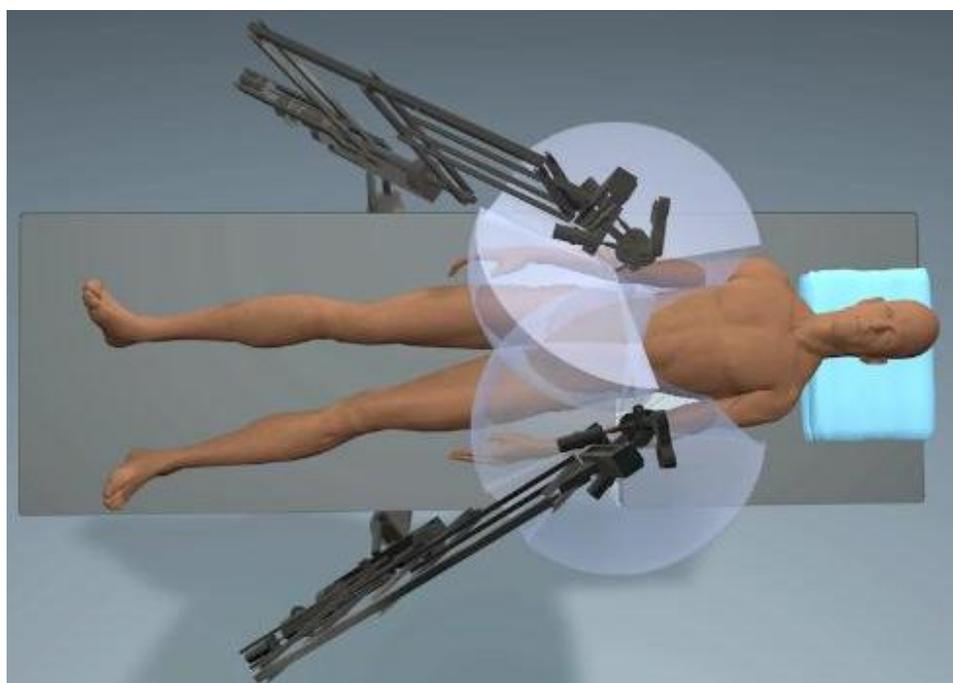


Figura 105: Modello 3D

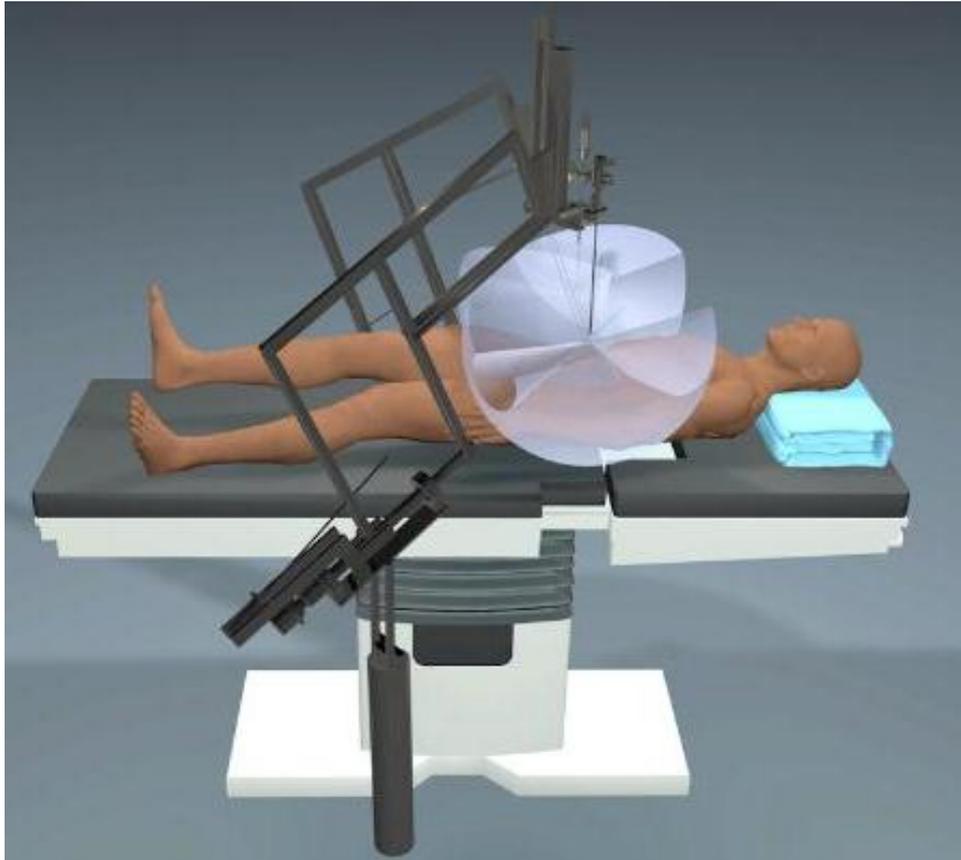


Figura 106: Modello 3D

4.5 Il meccanismo di attuazione delle pinze laparoscopiche

La struttura appena illustrate non potrebbe essere utilizzata senza un sistema in grado di attuare le pinze laparoscopiche. Per tale motivo l'end effector è equipaggiato con un sistema di attuazione composto un meccanismo a ruote dentate visibile nella seguente figura. Con questo meccanismo viene controllata, inoltre, la variabile di giunto q_4 che consente la rotazione sul proprio asse della pinza.

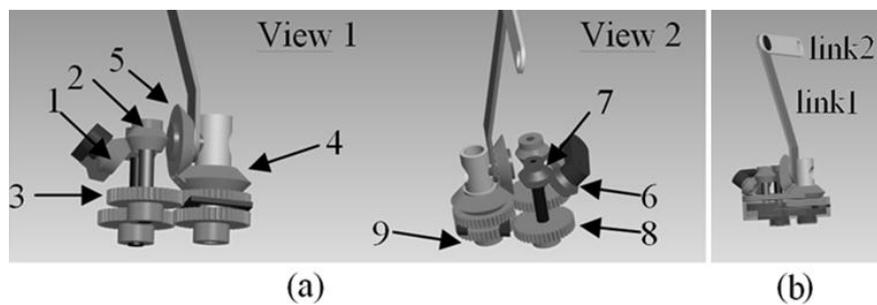


Figura 107: (a) Vista interna dell'attuatore (b) Vista esterna dell'attuatore

Nel meccanismo illustrato nella precedente figura la ruota dentata conica, indicata con il numero 1, è connessa al motore. La ruota dentata 2, azionata dalla 1, mette in rotazione la ruota dentata 4 attraverso la 3. La ruota dentata 4 è composta da una ruota dentata cilindrica in basso e un ingranaggio conico sulla parte superiore.

Osservando la figura si nota che azionando tale meccanismo, la ruota conica 5 aziona la maniglia dell'utensile laparoscopica attraverso il sistema a quadrilatero articolato. Al link 2 infatti viene connessa un ruota che entrando perfettamente nell'occhiello della maniglia della pinza laparoscopica crea un quadrilatero articolato come visibile nella seguente figura

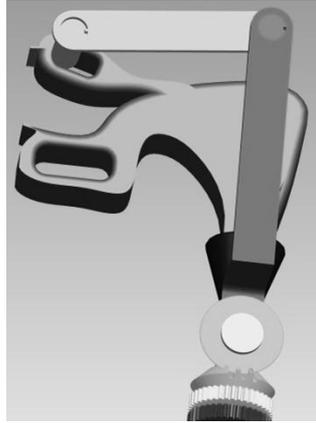


Figura 108: quadrilatero per attuazione pinza laparoscopica

Per utilizzare questo sistema di attuazione tutte le pinze laparoscopiche devono essere inserite nel blocco composto dalle ruote 4,5 e 9 e vengono fissate ad esso tramite un sistema ad aggancio rapido. Dopo aver inserito la pinza basta collocare all'interno dell'occhiello della maniglia il perno visibile in figura 108.

La ruota dentata 9 supporta anche l'asse della ruota dentata 5 che ingrana con la 4. Le restanti ruote coniche 6 e 7 e le ruote dentate 8 e 9 sono utilizzate per creare il 4° giunto rotoidale illustrato nella figura 100.

Per avere una rotazione pura dello strumento di entrambe le ruote 1 e 6 devono essere azionate contemporaneamente dai rispettivi motori, mentre azionando solo la ruota 1 viene azionato il quadrilatero articolato e quindi la pinza.

Questo sistema di attuazione connesso alla struttura esposta in precedenza rende quindi possibile la manipolazione desiderata per gli strumenti laparoscopici standard.

4.6 Caratteristiche tecniche e costruttive end-effector

Dopo avere simulato il comportamento cinematico dell'end-effector ed aver verificato la sua effettiva validità, è stato realizzato un primo prototipo secondo le indicazioni tecniche riportate nel presente paragrafo.

Come già accennato più volte, l'End Effector è stato pensato e progettato per raggiungere i seguenti requisiti:

- Semplicità costruttiva
- Elevata rigidità
- Sicurezza per l'operatore e per il paziente
- Ampio volume di lavoro

La struttura può essere sostanzialmente suddivisa in tre parti fondamentali:

- Sezione di aggancio al Navi Robot o al piedistallo;
- Struttura doppio quadrilatero;
- Piastra per connessione giunto prismatico e sistema di attuazione degli strumenti laparoscopici standard .

La struttura a doppio quadrilatero viene vincolata ad un telaio, fisso nel caso del piedistallo e mobile nel caso del NaviRobot, attraverso un apposito collegamento composto da una struttura a forma di C che sorregge avente un albero avente la duplice funzione di sostegno per il doppio quadrilatero e di trasmissione del moto per il primo grado di libertà.

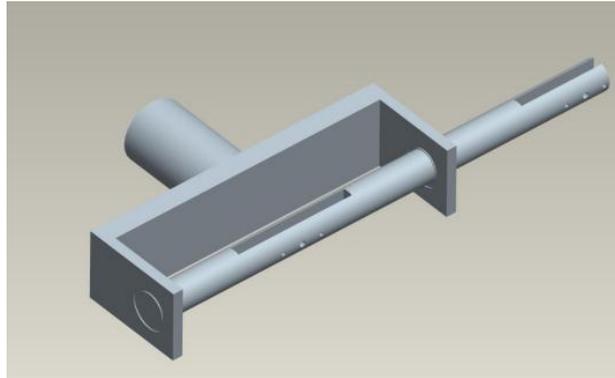


Figura 109: supporto per connessione al telaio

La particolare geometria dell'albero il movimento di massima apertura e massima chiusura (140° complessivo) della struttura a doppio quadrilatero rispettando le specifiche di progetto.

Questo supporto presenta quindi una struttura a forma di C composta da tre parti:

- Base;
- Flangia motore con alloggiamento cuscinetto;
- Albero trasmissione moto.

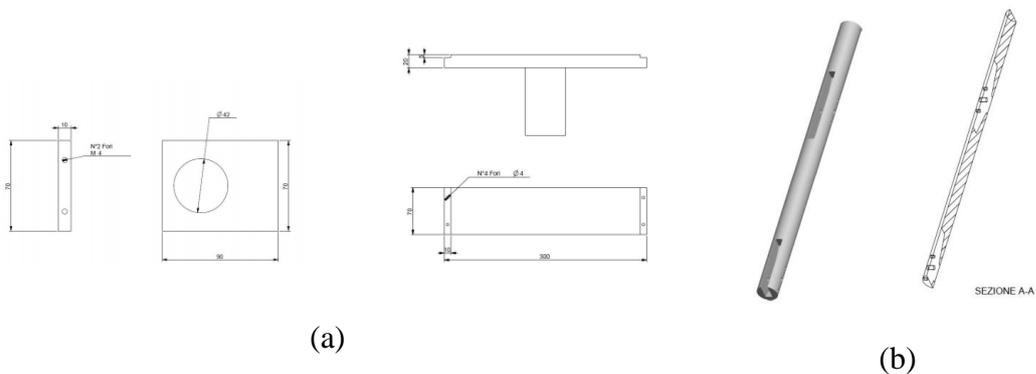


Figura 110: (a) base e flangia motore; (b) albero

Tutti questi componenti sono in Anticorodal 6060. Le due piastrine sono state progettate per consentire il montaggio di due cuscinetti radiali a sfere ad una corona di diametro esterno di 42 mm

La struttura a doppio quadrilatero composta da 5 link delle dimensioni indicate nel paragrafo 4.2. Ogni link del quadrilatero è realizzato in alluminio ed è collegato con appositi alberini di diametro 4 mm, fermati da anelli Seager e inseriti in apposite boccole come visibile in figura 111.

Per garantire il movimento della struttura, i link 1 e 2 sono connessi all'albero principale del primo giunto con alberi di 6 mm e appositi cuscinetti.

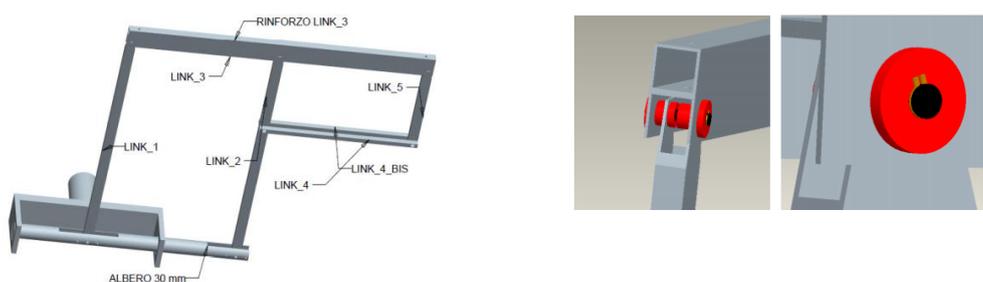


Figura 111: dettagli doppio quadrilatero

Infin, il corretto posizionamento del sistema di attuazione degli strumenti laparoscopici e del giunto prismatico, viene garantita da un componente in alluminio visibile nella seguente figura realizzato da una macchina a controllo numerico (CNC) e connesso al link_5 del doppio quadrilatero.

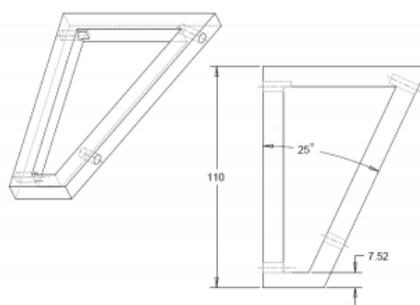


Figura 112: componente per aggancio slitta

Come già detto in precedenza il corretto funzionamento di questo sistema dipende essenzialmente dalla rigidità che esso presenta.

Per tale motivo prima di procedere alla realizzazione del prototipo sono stati effettuati dei test sulle deformazioni statiche del sistema. Infatti, in situazione di riposo, la struttura è sottoposta ai carichi derivanti dai singoli pesi dei link e di tutti gli elementi che compongono la parte di movimentazione slitta come riportato nella seguente tabella.

ANALISI PESI END EFFECTOR		
NOME COMPONENTI	PESO	UNITà
STRUTTURA DOPPIO QUADRILATERO	472	grammi
SLITTA	101	grammi
ALLOGGIO SLITTA	7,780	grammi
MOVIMENTAZIONE PINZA	280	grammi
MOTORI SLITTA	270	grammi
MOTORI 0.5 Nm	280	grammi
ALBERI 4 mm	150	grammi
TOTALE	1276,78	grammi

Tabella 7: pesi componenti EF

Supponendo un coefficiente di sicurezza pari a 1,5, il peso effettivo sull'ultimo link della struttura a doppio quadrilatero è stato approssimato a pari a 2 Kg, ossia 20 N ottenendo i risultati illustrati in figura.

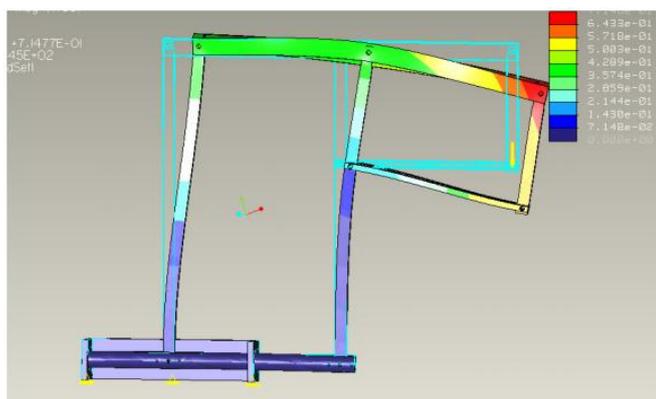


Figura 113: abbassamento

Le analisi effettuate riportano come risultato un abbassamento totale di circa 0.7 mm che risulta essere un valore accettabile per la particolare applicazione per la quale si utilizzano fori di ingresso all'addome dell'ordine di 10mm.

4.7 L'elettronica di controllo e test di funzionamento

A seguito della realizzazione del primo prototipo visibile nelle seguenti figure, per effettuare dei test sul reale funzionamento e sul soddisfacimento delle specifiche imposte. È stata realizzata una prima scheda di test per il controllo degli attuatori presenti.



Figura 114: Il primo prototipo dell'end effector

Il primo prototipo dell'end effector è stato equipaggiato con 3 motori DC per l'attuazione dei giunti 2,3 e 4 più un ulteriore motore per l'azionamento della pinza

laparoscopica. Inoltre, è presente anche uno step motor per l'azionamento del primo giunto rotoidale. Oltre a questi attuatori, sull'albero del primo giunto è stato connesso un freno di bloccaggio per immobilizzarlo in un specifica posizione.

Oltre a questi attuatori sono stati collocati degli encoder incrementali da 2048 passi/giro che consentono di rilevare variazioni di angolo pari a $0.17 \pm 0,035^\circ$.

A causa di ritardi nel montaggio del sistema non è stato possibile realizzare un controllo elettronico completo, che è attualmente in realizzazione e sta per essere ultimato. Nonostante questo è stata realizzata una scheda prototipo per il semplice controllo degli attuatori, che ha consentito di verificare il corretto funzionamento del sistema progettato aprendo il campo a nuove sperimentazioni e upgrade della struttura.

La scheda prototipo realizzata, visibile in figura 116, è stata fornita di componenti già presenti anche sul controllo elettronico del NaviRobot ovvero, un microcontrollore atmel atmega8535 e due driver per motori DC L298N e l'interfacci per la connessione alla scheda di controllo dello step motor descritta nel paragrafo 3.2.

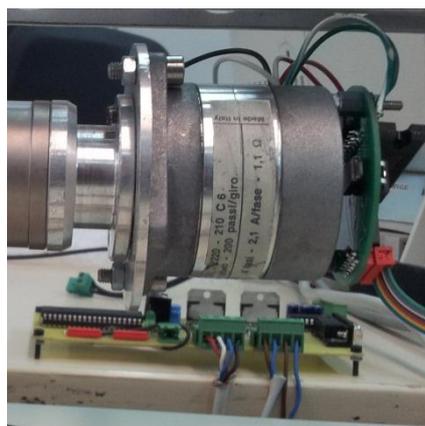


Figura 115: prototipo scheda di controllo

Per la regolazione della velocità di rotazione dello step motor viene utilizzato lo stesso algoritmo usati per il controllo del NaviRobot mentre per il controllo dei motori DC si fa uso di tecniche PWM per controllare il valore della tensione di alimentazione.

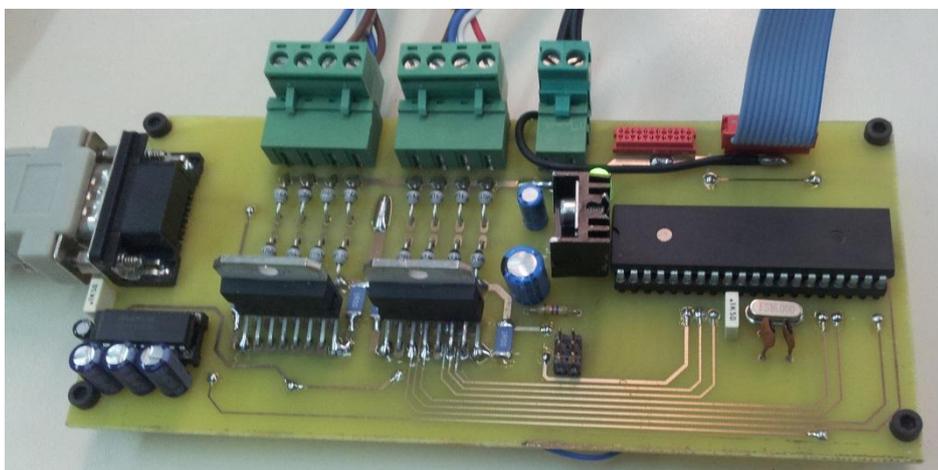
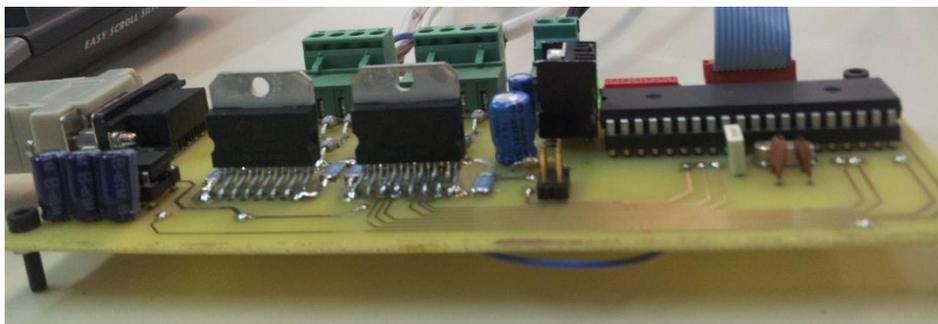
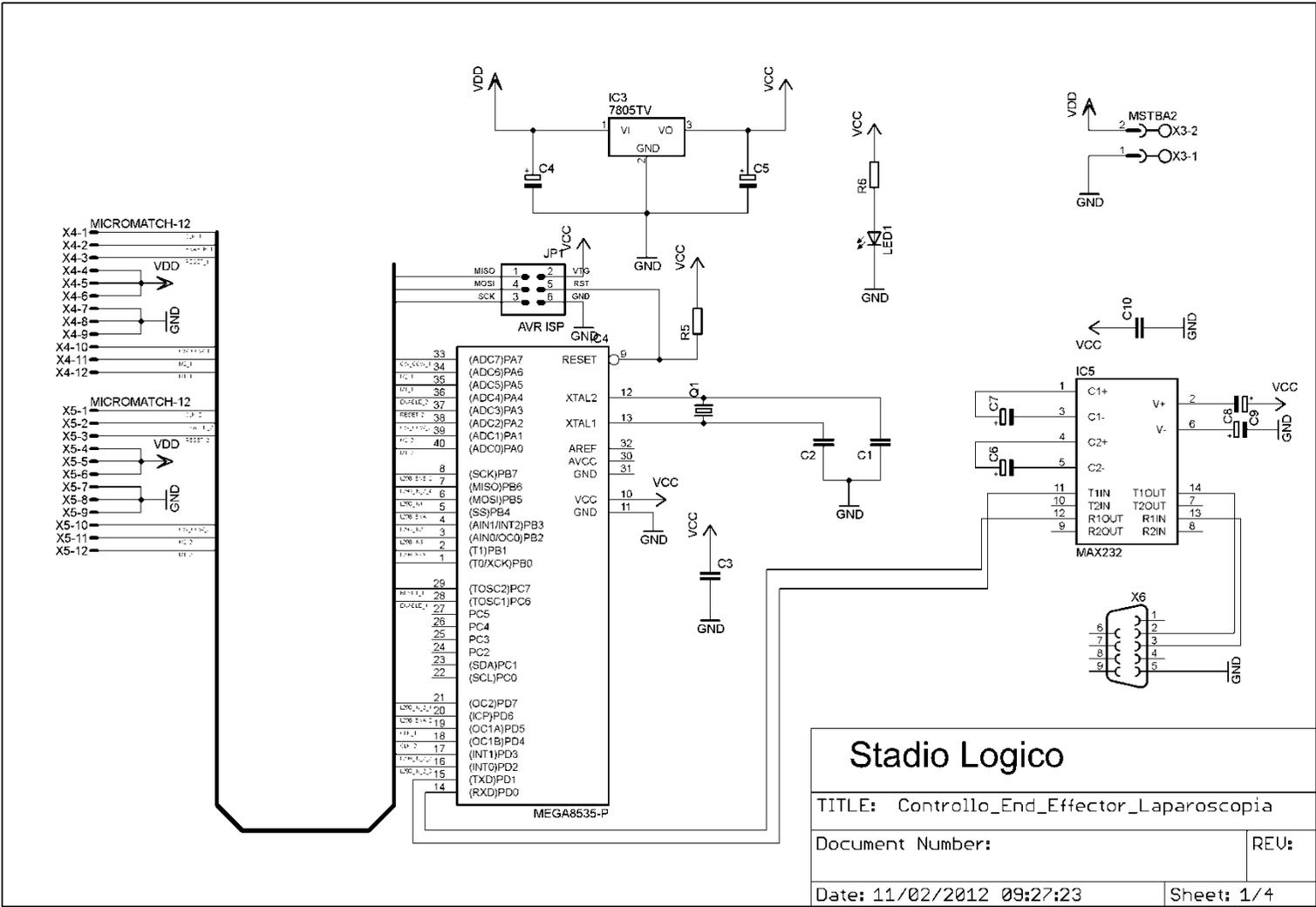


Figura 116: Il primo prototipo dell'elettronica di controllo

Lo schema dello stadio logico di questa scheda è riportato nel seguente schematico per gli stadi di potenza si rimanda agli schematici relativi al NaviRobot.



Stadio Logico

TITLE: Controllo_End_Effector_Laparoscopia

Document Number: _____ REV: _____

Date: 11/02/2012 09:27:23 Sheet: 1/4

5. Conclusioni e futuri sviluppi

Lo scopo della nostra ricerca è stato quello di ideare un strumento in grado di manipolare strumenti laparoscopici standard al fine di ridurre il costo della chirurgia robotica introducendo contemporaneamente la maggior parte dei vantaggi che tale disciplina presenta.

Inoltre, tale caratteristica permetterà la manipolazione di strumenti laparoscopici standard più piccoli di quelli robotici aprendo nuovi campi di applicazioni anche in chirurgia neonatale e pediatrica.

A causa di alcuni ritardi nella produzione del primo prototipo, non è stato possibile effettuare la progettazione dell'hardware elettronico e del software di controllo ma, dai test e dalle simulazioni effettuate è stato però possibile dimostrare la validità dello strumento progettato e ciò darà il via ad una nuova fase di sperimentazione e sviluppo fino ad arrivare anche alle sperimentazioni in vitro ed in vivo.

Il lavoro portato a termine in questi anni dovrà essere infatti completato con lo sviluppo di un elettronica di controllo completa, con lo sviluppo di un software di controllo in grado anche di gestire il sistema di feedback sensoriale e le operazioni di motion scaling che sono elementi fondamentali per l'utilizzo in chirurgia di strumenti robotici per laparoscopia.

Inoltre, per poter utilizzare più end effector contemporaneamente evitando problemi di interferenza fra le varie strutture sarà necessario implementare un sistema di riconoscimento dei vari end-effector presenti intorno al tavolo operatorio utilizzando tecniche di individuazione e riconoscimento delle posizioni reciproche.

Oltre allo sviluppo dell'end effector con questa attività di ricerca sono state sviluppate nuove soluzioni ottimizzate per il controllo degli attuatori e dei sensori del NaviRobot grazie alle quali si è riusciti ad ottenere un aumento della precisione nel posizionamento e una maggiore velocità di comunicazione.

Infatti, è stata aumentata di un fattore 40 la velocità del bus di comunicazione e di circa un fattore 3 la velocità di lettura dei sensori rispetto alla versione precedente del controllo.

Tale ottimizzazione permetterà di continuare con lo sviluppo del sistema permettendo un migliore utilizzo delle risorse hardware e una gestione più efficiente del movimentazione del robot.

Bibliografia

1. Bathis H., Perlick L., Tingart M., Luring C., Zurakowski D., Grifka J. - *Alignment in total knee arthroplasty. A comparison of computer-assisted surgery with the conventional technique* - J. Bone Joint Surg Br. 2004 Jul; 86(5), pp. 682-687.
2. Gebhard F., Krettek C., Hufner T. - *Computer aided orthopedic surgery (CAOS) -- a rapidly evolving technology*. Injury - Jun; 35 Suppl 1: S-A1.
3. Sugano N. - *Computer-assisted orthopedic surgery* - J. Orthop Sci. 2003; 8(3), pp. 442-448
4. Kahler D.M. - *Image guidance: fluoroscopic navigation* - Clin Orthop Relat Res. 2004, Apr; (421), pp 70-76.
5. Langlotz F. - *Potential pitfalls of computer aided orthopedic surgery* - Injury. 2004 Jun; 35 Suppl 1: S-A17-23.
6. Nolte L.P., Beutler T.- *Basic principles of CAOS* - Injury. 2004 Jun; 35 Suppl 1: S-A6-16.
7. Bouazza-Marouf K., Browbank I., Hewit J.R. - *Robot-assisted invasive orthopaedic surgery* - Mechatronics, Volume: 6, Issue: 4, June, 1996, pp. 381- 397.
8. Bouazza-Marouf K., Browbank I., Hewit JR. *Robotic-assisted internal fixation of femoral fractures* - Proc. IMechE part H – Engng Med. 209 (H1), 1995, pp. 51-58.
9. Adili A. - *Robot-assisted orthopedic surgery* - Semin Laparosc Surg. 2004 Jun;.
10. Zambelli P.Y., Dewarrat S.T., Bregand C.H., Marti G.A., Baur C.H., - Leyvraz P.F. *Electromechanical arm – An alternative to the classical opto-tracking system* - 3rd Annual Meeting of CAOS – International – Proceedings – Marbella (Spain) June 18-21, 2003. – 412 p.
11. Confalonieri N. - *The Role of Computer Assisted Surgery for Hip and Knee*. - 1st PRO.MI National Congress, Monza, nov. 12-13, 2004.
12. Taylor R.Hm et al. - *A. Computer-integrated revision total hip replacement surgery: concept and preliminary results* - Medical Image Analysis (1999) volume 3, number 3, Oxford University Press, pp 301–319.
13. Siebert W., Mai S., Kober R., Heeckt P.F. - *Technique and first clinical results of robot-assisted total knee replacement* - The Knee 9 (2002), pp. 173–180.
14. Nogler M. et al.- *Primary stability of a ROBODOC implanted anatomical stem versus manual implantation* - Clinical Biomechanics 19 (2004), pp. 123–129.
15. Siebel T., Kafer W. - *Clinical outcome following robotic assisted versus conventional total hip arthroplasty. A controlled and prospective study of seventy-one patients* - Zeitschrift fur Orthopadie und Ihre Grenzgebiete, 143 (4), Jul-Aug 2005, pp. 391-398.
16. Davies B.L., Hibberd R.D., Fan K.L., Jakopec M., Harris S.J. - *ACROBOT-Using Robots and Surgeons synergistically in Knee Surgery* - Proceedings ICAR'97, 8th International Conference on Advanced Robotics. July 7-9,. Monterey, California USA., 1997, pp.173-180.

17. Jakopec M., Baena F.R.Y., Harris S.J., Gomes P., Cobb J. and Davies B.L. - *The "Hands-on" Orthopaedic Robot "Acrobot": Early Clinical Trials of Total Knee Replacement Surgery* - IEEE Transactions on Robotics and Automation, Special Issue on Medical Robotics, 19(5), 2003, pp.902:911.
18. Cobb J.P., Henckel J., Harris S.J., Jakopec M., Baena F.R.Y., Gomes M.P.S.F. and Davies B.L. - *An Active Constraint Robot Improves Outcomes in Total Knee Arthroplasty* - Computer Assisted Orthopaedic Surgery, Third Annual Meeting of CAOS International, Marbella, Spain, 18-21 June, 2003
19. Cobb J.P., Henckel J., Gomes P., Harris S.J., Jakopec M., Rodriguez F., Barrett A., Davies B.L., - *Hands-on robotic unicompartmental knee replacement - A prospective, randomised controlled study of the Acrobot system* - Journal of Bone and Joint Surgery-British Volume, 88B (2): FEB 2006, pp. 188-197.
20. Mohsen Mahvash, et al. - *Modeling the Forces of Cutting with Scissors* - IEEE Trans Biomed Eng. 2008 March; 55(3): 848–856.
21. Wahrburg J., Gross I., Knappe P., Pieck S., Künzler S., Kerschbaumer F. - *An interactive mechatronic assistance system to support surgical interventions* - International Congress Series 1268 (2004), pp. 431– 436.
22. Leardini A., Rapagnà L., Ensini A., Catani F., Cappello A. - *Computer-assisted preoperative planning of a novel design of total ankle replacement* - Computer Methods and Programs in Biomedicine, Volume: 67, Issue: 3, March, 2002, pp. 231 – 243.
23. Voss G., Bisler A., Bockholt U., Muller-Wittig W.K., - *Schaffer A. ICAPS an integrative computerassisted planning system For pedicle screw insertion* - Stud Health Technol Inform 2001;81, pp.561: 563.
24. Gatti G., Mundo D. and Danieli G.A. - *Kinematic Analysis and Performance Evaluation of 6R Instrumented Spatial Linkages* - Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering Volume: 34 Issue: 1 Article Number: 015107 Published: 2010.
25. Danieli G.A., Fragomeni G., Gatti G., Moschella D. and Mundo D. - *Introducing Navi – Robot, a novel instrument for surgical procedures* - International Congress on Computational Biomechanics, Zaragoza, sept. 23-26 2002, Vol. 1, pp. 125-129.
26. Denavit J. and Hartenberg R.S. - *A kinematic notation for lower-pair mechanism based on matrices* - ASME J. Appl. Mechan 1955, 77, pp. 215-221.
27. Anderson C, Ellenhorn J et al. - *Pilot series of robot-assisted laparoscopic subtotal gastrectomy with extended lymphadenectomy for gastric cancer.* - Surgical Endoscopy 21 (9): 1662-1666 SEP 2007.
28. Advincula AP, Song A et al.: - *The role of robotic surgery in gynecology.*- Current Opinion in Obstetrics and Gynecology 19 (4): 331-336 AUG 2007.

29. Danieli G.A. and Riccipetitoni G. - *Robotized System of control and micrometric actuation of an endoscope*. - In: PCT/IT05/000486 del 08/08/2005, WO2006016390 A1 of February 16th 2006, EP 05778903.4, IPC A61B 19/00.
30. Dewaele F., Caemaert J. et al. - *Intradural endoscopic closure of dural breaches ion a case of post-traumatic tension pneumocephalus* - *Minimally Invasive Neurosurgery* 50 (3): 178-181 JUN 2007.
31. Goldstraw M.A., Patil K et al. - *A selected review and personal experience with robotic prostatectomy: implications for adoption of this new technology in the United Kingdom*. - *Prostate Cancer and Prostatic Diseases* 10 (3): 242-249 SEP 2007.
32. Hernandez-Divers SJ, Stahl SJ et al. - *Endoscopic orchidectomy and salpingohysterectomy of pigeons (Columba livia): An avian model for minimally invasive endosurgery*. - *Journal of Avian Medicine and Surgery* 21 (1): 22-37 MAR 2007.
33. Korets R, Hyams ES et al.- *Robotic associated laparoscopic ureterocalicostomy* -*Urology* 70 (2): 366-369 AUG 2007.
34. Muller-Stich BP, Reiter MA et al. - *Robot assisted versus conventional laparoscopic fundoplication: short-term outcome of a pilot randomized controlled trial*. - *Surgical Endoscopy* 21 (10): 1800-1805 OCT 2007.
35. Nappi C, Di Spiezio Sardo A et al. - *Prevention of adhesions in gynaecological endoscopy*. - *Human Reproduction Update* 13 (4): 379-394 Jul-Aug 2007.
36. Nieves MNCY, Haas E, Hollerhage HG et al. - *Combined minimal invasive techniques in deep supratentorial intracerebral haematomas*. - *Minimally Invasive Neurosurgery* 47 (5): 294-298 OCT 2004.
37. Tayar C, Karoui M et al. - *Robot assisted laparoscopic mesh repair of incisional hernias with exclusive intracorporeal suturing: a pilot study*. - *Surgical Endoscopy* 21 (10): 1786-1789 OCT 2007.
38. Wang GJ, Barocas DA, Raman JD et al. - *Robotic vs open radical cystectomy: prospective comparison of perioperative outcomes and pathological measures of early oncological efficacy* - *BJU INT*, eFIRST date: 25 SEP 2007.
39. Korets R, Hyams ES et al. - *Robotic associated laparoscopic ureterocalicostomy* - *UROLOGY* 70 (2): 366-369 AUG 2007.
40. Muller-Stich BP, Reiter MA et al. - *Robot-assisted versus conventional laparoscopic fundoplication: short-term outcome of a pilot randomized controlled trial* - *SURG ENDOSC* 21 (10): 1800-1805 OCT 2007.