



# ROBOTICA E AUTOMAZIONE

## ANALISI DI UN ROBOT CALCIATORE

Emanuele Giacomini

Elettronica 5°ANT

# INDICE GENERALE

Introduzione .....	3
Robocup Jr. e robot calciatori.....	3
Capitolo 1. Sistemi Automatici .....	5
1.1 Automazione dei sistemi.....	5
1.2 Controlli ad azione diretta ed in Retroazione .....	5
Capitolo 2. Robot Soccer.....	8
2.1 Introduzione alla robocup jr .....	8
2.2 Introduzione AL ROBOT CALCIATORE .....	10
2.3 Analisi della componentistica.....	13
2.3.1 Microcontrollore.....	13
2.3.2 Bussola .....	14
2.3.3 Sensori di Palla .....	20
2.3.4 Sensori di Prossimità .....	24
2.3.5 Motori.....	29
2.3.6 Sensori di linea .....	39
2.3.8 Solenoide .....	44
2.3.9 Pixy.....	46
2.3.10 Bluetooth.....	47
Capitolo 3. Comunicazione.....	48
3.1 i2c.....	48
3.2 UART.....	52
3.3 SPI.....	56

Capitolo 4. Analisi Matematica .....	58
4.1 rapporto incrementale.....	58
4.2 Integrale di Riemann .....	59
Capitolo 5. Conclusioni.....	61

# Introduzione

## ROBOCUP JR. E ROBOT CALCIATORI

Con il termine Robocup Jr. si intende quella branca della RoboCup che ha lo scopo di diffondere nelle scuole primarie e secondarie la pratica della robotica.

Vi si distinguono tre sezioni fondamentali:

1. Robot Explorer
2. Robot Rescue
3. Robot Soccer

In questo lavoro verrà analizzata la sezione più complessa: Il **Robot Soccer**

La componentistica è stata scelta dopo un'attenta analisi dei vari prodotti offerti dal mercato, e i fondi per la realizzazione sono stati ottenuti tramite delle vincite di progetti scolastici sviluppati da alunni (CHEST) e da sponsorizzazioni di varie aziende che hanno apprezzato il nostro progetto (Robotics3D e MD s.r.l.).



Figura 1 Aziende sponsor:

1. *Robotics3D ha fornito parte della componentistica*
2. MD s.r.l. ha fornito i macchinari per la produzione dei circuiti stampati

In questo lavoro verranno esaminati gli aspetti elettronici ed informatici del robot, analizzando prima macroscopicamente il complesso, e poi microscopicamente tutti i componenti.

I robot durante il gioco, hanno numerose variabili di cui tener conto; verranno valutate le scelte fatte per monitorarle e gestirle, al fine di rendere il sistema il più rapido ed efficiente possibile.

# Capitolo 1. Sistemi Automatici

## 1.1 AUTOMAZIONE DEI SISTEMI

L'automazione è un complesso di tecnologie che usa sistemi di controllo (come circuiti logici o elaboratori) volte a sostituire l'intervento umano o a migliorarne l'efficienza nell'esercizio di dispositivi e impianti. Il notevole impulso che l'automazione ha ricevuto in tempi recenti è legato agli enormi progressi ottenuti nel campo degli elaboratori elettronici.

Un importante capitolo della scienza dell'automazione è quello che riguarda la disciplina denominata controlli automatici. Esso tratta lo studio dei dispositivi (detti regolatori), mediante i quali si modificano i comportamenti di un sistema da controllare, attraverso la manipolazione delle grandezze in ingresso.

Un sistema è un complesso di elementi interconnessi, in cui si possono distinguere grandezze soggette a variazioni nel tempo (variabili). Le funzioni che rappresentano l'andamento delle variabili nel tempo si dicono segnali.

## 1.2 CONTROLLI AD AZIONE DIRETTA ED IN RETROAZIONE

L'azione del regolatore si esplica mediante un *attuatore*, cioè un dispositivo che provvede a modificare la variabile manipolabile proporzionalmente ad un segnale fornito dal regolatore, dato dalla variazione di una grandezza fisica precedentemente adattata alla trasmissione a distanza (tensione o corrente) e amplificata.

Tali informazioni vengono rese disponibili mediante dei *trasduttori*, dispositivi che convertono una grandezza fisica (es: temperatura, accelerazione, velocità angolare, ecc.) in un segnale analogico proporzionale a tale grandezza, successivamente amplificato (figura 2).

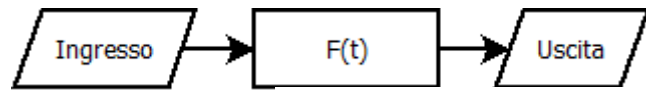


Figura 2 Schema di un trasduttore

Un'altra informazione che giunge al regolatore, è detta *variabile di riferimento* o *segnale di riferimento*  $r$ , che condiziona la variabile di uscita  $u$ . Nei sistemi di controllo più semplici e diffusi, l'obiettivo della regolazione è *l'inseguimento*, cioè l'ottenimento dell'uguaglianza tra  $r$  e  $u$ .

Se il regolatore opera utilizzando solamente variabili d'ingresso nel sistema e il segnale di riferimento, viene detto **controllo ad azione diretta** o **a catena aperta** (figura 3)

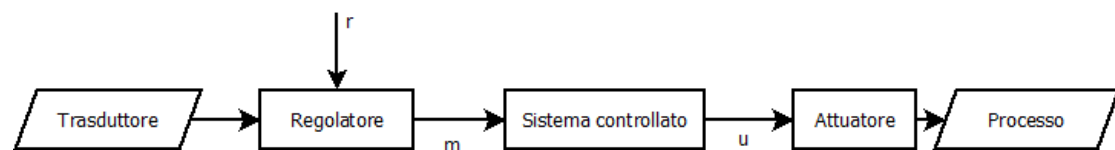


Figura 3 Schema di un sistema di controllo a catena aperta

Se il regolatore opera utilizzando informazioni che riguardano la variabile di uscita  $u$  o altre uscite, viene detto **controllo retroazionato** o **a catena chiusa** (figura 4). Un controllo ad azione diretta è caratterizzato dal fatto che il valore della variabile manipolabile è indipendente dalla variabile di uscita, mentre in

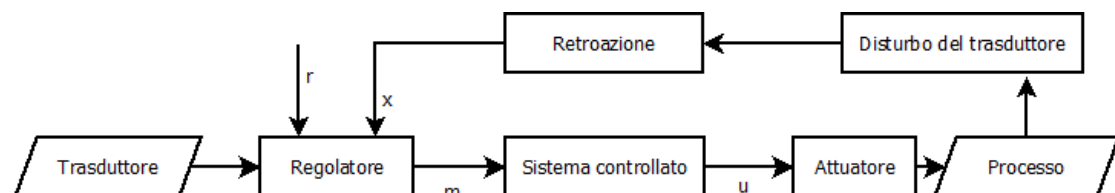


Figura 4 Schema di un sistema retroazionato

un controllo di retroazione il valore della variabile manipolabile dipende dalla

variabile di uscita e da altre variabili dipendenti del sistema controllato, per cui vi è sempre almeno un percorso di segnale chiuso (*anello di retroazione*).

Nel caso del robot calciatore, il sistema è di tipo complesso in quanto le variabili manipolate e controllate sono molteplici e vanno ad influire sul controllo dei motori e del solenoide, che ne determinano la posizione, il verso e il momento in cui calciare la palla. In figura 5 viene mostrato lo schema a blocchi del robot:

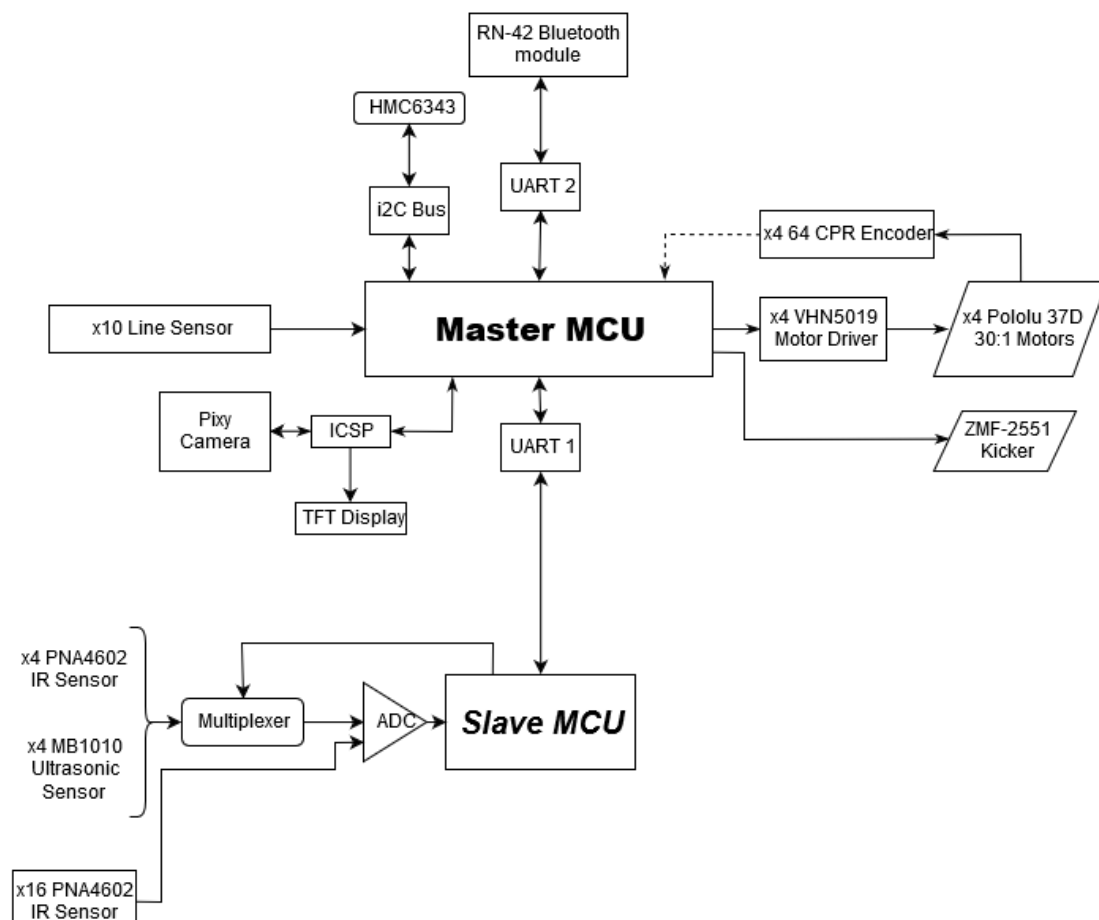


Figura 5 Schema a blocchi del robot calciatore



# Capitolo 2. Robot Soccer

## 2.1 INTRODUZIONE ALLA ROBOCUP JR

La RoboCup Jr. è un campionato mondiale in cui concorrono diverse discipline di *robot quali*:

- Rescue
- Dance
- Soccer

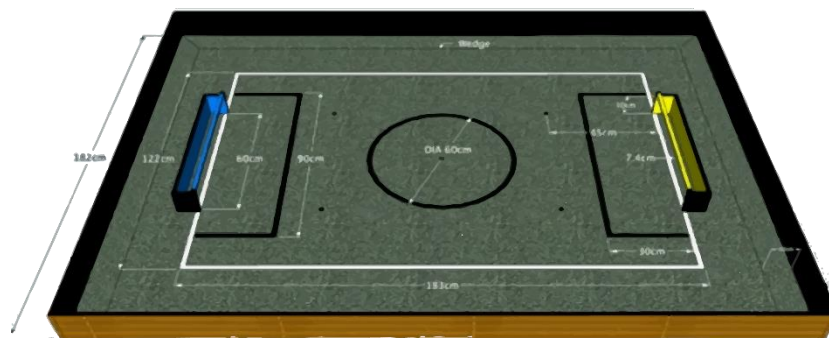
Per ogni nazione viene selezionata una squadra per ogni categoria che parteciperà al campionato mondiale che si svolge ogni anno in una nazione diversa.

Nella sfida di calcio della Robocup Junior, squadre di due robot automatizzati devono competere contro altri team di robot calciatori, in un'ambiente che simula un campo da calcio, i robot devono rilevare la posizione della palla e per fare punto devono portarla nella porta avversaria.

Tutto questo deve essere fatto in modo completamente autonomo senza l'intervento degli esseri umani.

I partecipanti sono tenuti a dare il meglio delle loro capacità in programmazione, robotica, elettronica e mecatronica, ma anche a contribuire al lavoro di gruppo e alla condivisione delle conoscenze con gli altri partecipanti, a prescindere dalla cultura, dell'età o del risultato della competizione.

Il campo da calcio (figura 6) è composto dal terreno di gioco di dimensioni 122 x 183 cm delimitato da linee bianche. Qualora il robot esca dal terreno di



*Figura 6 Campo da calcio regolamentare*

gioco, subirà una penalità che comporterà l'espulsione di un minuto, durante il quale, il gioco continuerà normalmente.

Le porte sono di colore blu e giallo, colori che non possono essere presenti in nessun robot poiché potrebbero causare interferenze.

Le partite si dividono in due tempi da 10 minuti, intervallati da 5 minuti di pausa. Il regolamento completo<sup>i</sup> è disponibile sul sito ufficiale della Robocup jr. dove si possono trovare le varie limitazioni di forza del calcio (kicker), il tipo di comunicazione wireless possibile tra i due robot, la massima tensione di alimentazione, le regole di Fair play e numerose altre restrizioni come il divieto di double defense (due robot in porta).

sub-league	<b>Open League</b>	<b>Light Weight League</b>
size / diameter	Ø 22.0 cm	Ø 22.0 cm
height	22.0 cm *	22.0 cm *
weight	2400 g **	1100 g **
ball-capturing zone	3.0 cm	3.0 cm

*Figura 7 Limitazioni fisiche dei robot in base alla categoria*

## 2.2 INTRODUZIONE AL ROBOT CALCIATORE

Una delle caratteristiche peculiari del robot calciatore, è la disposizione dei motori, ognuno dei quali disposto ogni  $90^\circ$  rispetto alla circonferenza del robot (figura 8). Abbinando i motori ad un tipo di ruote dette **omnidirezionali**<sup>1</sup> (figura 9) è possibile traslare il robot in qualsiasi direzione senza necessità di roteare.

Per traslare in avanti il robot, i motori di destra dovranno roteare in senso orario, mentre quelli a sinistra dovranno roteare in senso antiorario. Per muovere il robot a  $45^\circ$  a destra, è necessario che due motori diagonali siano fermi mentre gli altri due ruotino uno in senso orario ed uno antiorario.

La direzione e la rotazione del robot durante la partita vengono impostati a seconda delle variabili fornite dai vari trasduttori montati sul robot. Particolare attenzione va data al microcontrollore dedicato ai sensori di palla,

che fornisce la posizione della palla attorno al robot e la sua distanza tramite 20 sensori di cui: 15 posti ogni  $12,5$  gradi nei  $180^\circ$  frontali e 5 posti ogni  $30^\circ$  sul lato posteriore. Tale configurazione consente di avere una maggiore precisione nei movimenti quando la palla si trova davanti al robot.

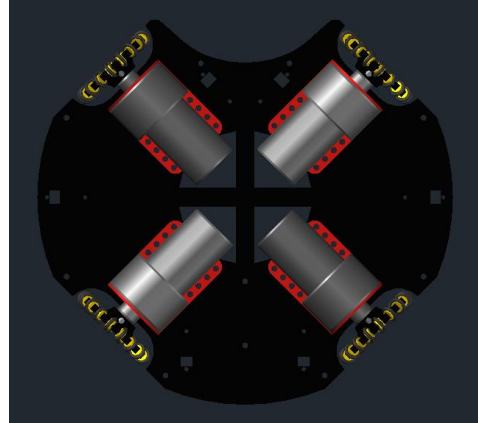


Figura 8 Disposizione dei motori

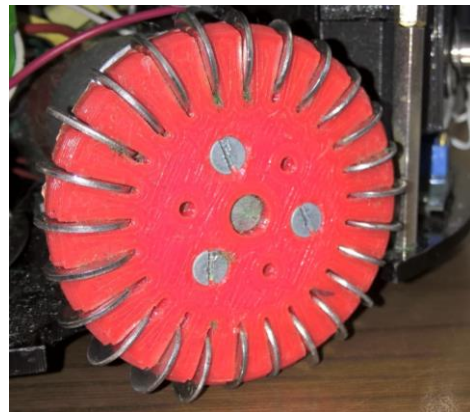


Figura 9 Esempio di ruota omnidirezionale

---

<sup>1</sup> le ruote omnidirezionali forniscono una trazione perpendicolare all'asse del motore e, grazie all'uso di ruotini posti sul perimetro della ruota stessa, anche parallelamente alla direzione del motore stesso.

La bussola elettronica HMC6343 della Honeywell, fornisce l'orientamento rispetto al nord magnetico terrestre compensato da eventuali campi magnetici parassiti o da errori di inclinazione, consentendo al robot di avere un punto di riferimento fisso necessario ad annullare eventuali componenti rotative non intenzionali del robot.

Come osservato nella sezione 2.1 (figura 6), il terreno di gioco ha delle linee bianche di bordo che il robot non deve superare per non essere penalizzato; a tale scopo sono impiegati vari sensori a riflessione posti sotto la base inferiore del robot per individuare eventuali variazioni di colore.

Per l'individuazione dei bordi del campo o eventualmente di robot avversari, il robot è equipaggiato con 4 sensori di prossimità ad ultrasuoni disposti ogni 90° attorno alla circonferenza del robot, ed un sensore di prossimità fotoelettrico con uscita analogica posto dietro al robot per rilevare con precisione la distanza dalla propria porta.

Inoltre, come inserito quest'anno nel regolamento internazionale, è possibile giocare con una palla arancione passiva<sup>2</sup>.

A tale scopo è stata aggiunta una telecamera con microprocessore dedicato con interfaccia SPI per il rilevamento dei colori. È possibile non solo riconoscere la palla, ma anche la colorazione delle porte ed eventuali segni particolari sui robot, consentendo tattiche più complesse come il riconoscimento dello sfasamento fra il robot e la porta avversaria, o addirittura la sua posizione all'interno del campo.



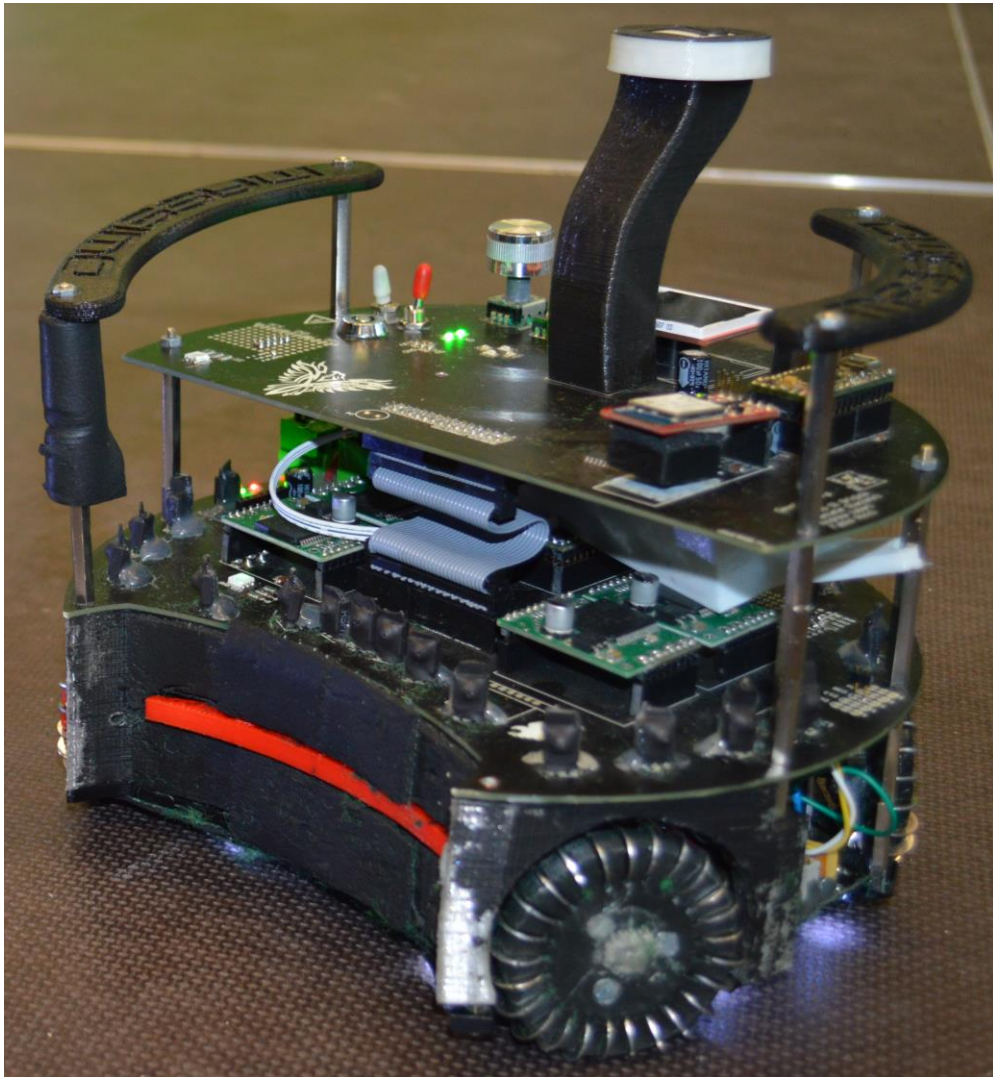
*Figura 10 Telecamera presente sul robot*

---

<sup>2</sup> Una palla di colore arancione che non emette luce propria come la palla standard da gioco.

Tutto questo è consentito grazie ad un modulo Bluetooth integrato nei robot che consente lo scambio di informazioni continuo fra i due robot.

Il robot possiede anche un sistema di calcio formato da un solenoide con un solido ferromagnetico al suo interno che, in presenza di un forte campo magnetico generato da una corrente che scorre nel solenoide, viene spinto fuori ad alta velocità.



*Figura 11 Foto del robot dove è possibile distinguere i vari componenti presenti sul robot*

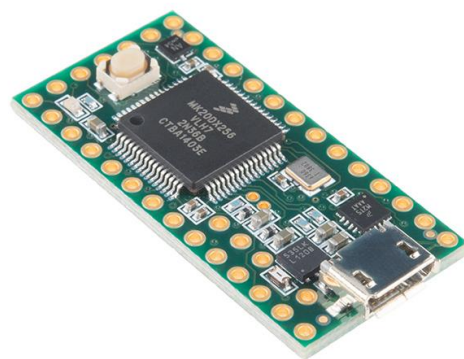
## 2.3 ANALISI DELLA COMPONENTISTICA

### 2.3.1 Microcontrollore

Prima di parlare di microcontrollore, è necessario chiarire la differenza fra microcontrollore e microprocessore.

Il microprocessore è l'unità di elaborazione dati e di controllo di un qualsiasi calcolatore, e viene spesso indicato con la sigla CPU (Central Processing Unit). Sebbene disponga di una potenza di calcolo molto elevata (frequenze di lavoro che si aggirano sui 4 GHz), la CPU da sola non può funzionare data la necessità di un'unità di memoria (RAM e ROM) esterna dove poter alloggiare i programmi su cui esso opera. Per applicazioni specifiche o di tipo industriale, si fa ricorso a sistemi più compatti, come i **microcontrollori**.

Un microcontrollore è un sistema completo integrato in un singolo chip, progettato per ottimizzare il rapporto prezzo-prestazione di una specifica applicazione. Esso incorpora al suo interno una CPU, unità di memoria (Flash, RAM, ROM) e può contenere diversi dispositivi I/O come buffer, ADC, linee di comunicazione I2C, UART, SPI, ed altri moduli a seconda dell'applicazione specifica. Il robot utilizza due microcontrollori ARM Cortex-M4 MK20DX256VLH7 inserito in una scheda compatibile con l'IDE (Integrated Development Environment) di Arduino chiamata Teensy 3.2 (figura 12).



*Figura 12 Scheda del microcontrollore Teensy 3.2 utilizzato*

Il microcontrollore incorpora una CPU da 32 bit con frequenza di lavoro da 72 MHz fino a 144 MHz (Contro gli 8 bit a 20MHz del microcontrollore precedentemente utilizzato Atmega2560), 34 canali digitali I/O che possono erogare 20mA a 3.3V di cui 12 con funzione PWM e 2 convertitori analogico-digitale che permettono di leggere fino a 21 sorgenti separate. Sono presenti inoltre 2 canali di



comunicazione I2C, un canale SPI e 2 canali UART che consentono di stabilire una comunicazione con un ampio numero di moduli esterni. Il microcontrollore è stato scelto per la sua velocità di calcolo e l'ampio numero di pin analogici e digitali che consentono di controllare un ampio spettro di moduli aggiuntivi. Come indicato precedentemente, la Teensy è compatibile con l'IDE di Arduino grazie al bootloader precaricato nel chip che gli consente di interfacciarsi con il computer tramite interfaccia seriale (Serial Wire Debug). Questo consente di programmare la Teensy senza dover ricorrere ad un programmatore ARM, che aumenterebbe il dispendio economico e lavorativo. Altro vantaggio notevole del bootloader è quello di poter utilizzare le librerie sviluppate dalla community di Arduino e PJRC (Casa produttrice della Teensy) che rendono il programma molto più fruibile rispetto a quello standard del microcontrollore.

### 2.3.2 Bussola

Come esplicito nella sezione 2.2, il robot ha bisogno di un punto di riferimento per potersi orientare relativamente all'ambiente circostante. Considerando l'elevato numero di disturbi magnetici (Motori dei robot, gambe in metallo del campo, solenoidi) è stato necessario optare per una bussola che fosse in grado di compensare campi magnetici esterni.



Figura 13 Bussola HMC6343

Il modulo HMC6343 restituisce il beccheggio, rollio e imbardata dal magnetometro e le forze agenti sul chip (X, Y, Z) grazie ad un accelerometro a 3 assi. Esso viene collegato al microcontrollore tramite interfaccia I2C ed invia pacchetti di 6 byte contenenti i dati relativi all'accelerometro o al magnetometro (ogni informazione è composta da 2 byte da ricomporre una volta giunti al microcontrollore come in figura 14).

```

Wire.requestFrom(slaveAddress, 2);
byte MSB = Wire.read();
byte LSB = Wire.read();

gradi = (MSB << 8) + LSB; // (MSB / LSB sum)
gradi = gradi / 10;

```

*Figura 14 Codice utilizzato per richiedere e comporre l'orientamento della bussola*

Durante il periodo di preparazione antecedente alla partita, è necessario impostare un punto di riferimento (Nord virtuale) e per farlo si ruota il robot verso la porta avversaria e si compone la media delle letture magnetiche in quella direzione. Questo viene poi comparato con i valori ricevuti successivamente per ottenere l'errore di sfasamento dal nord virtuale (nel software la variabile è chiamata gradiE). Al fine di correggere questo errore, è stato adibito un controllore PID software che attua 3 azioni sull'errore:

- Azione Proporzionale all'errore;
- Azione Integrale sull'errore;
- Azione Derivativa sull'errore;

```

113 //=====
114 //===== P.I.D. =====
115 //=====
116
117
118 // Imposta i valori delle 3 costanti per il PID
119
120 double kp = 0.8;
121 double ki = 0;
122 double kd = 0.05;

```

*Figura 15 definizioni costanti del PID sul programma*



### 2.3.2.1 Azione Proporzionale

$$u_P = K e$$

Dove:

- $K$  = costante utilizzata per la regolazione
- $e$  = valore di errore

Questo tipo di azione, è proporzionale all'errore e rappresenta l'azione più semplice per eliminare gran parte dello sfasamento

Sebbene parte dell'errore venga corretto, la sola azione proporzionale non è in grado di correggere valori d'errore bassi; per correggere tali valori è necessario incrementare la costante di regolazione, rendendo però instabile il sistema.

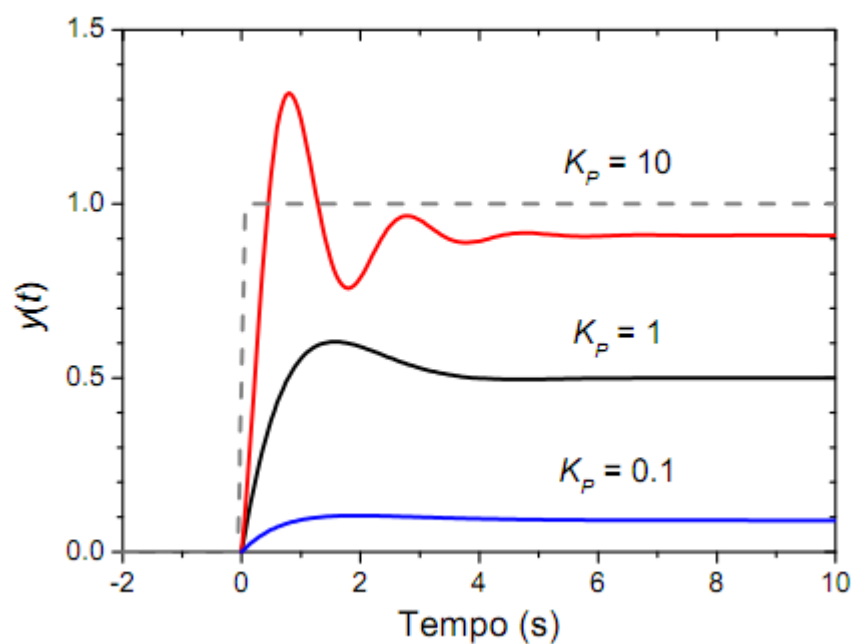


Figura 16 Vari esperimenti di un controllore P ( $K_p$  è la costante di regolazione)

### 2.3.2.2 Azione Integrale

$$u_I = K_I \int e(t) dt$$

Un'azione di tipo Integrale non considera solamente l'errore in un istante  $t$ , ma bensì tiene conto di tutti i suoi valori precedenti. Tale proprietà ha molteplici risvolti positivi in fatto di stabilità, infatti oltre ad attenuare gli sbalzi di instabilità dati dall'azione proporzionale, permette di eliminare completamente il fattore di errore a lungo termine. Una peculiarità di questa azione è che, il suo valore non è necessariamente nullo quando lo è quello dell'errore. Tale azione introduce però un ritardo al sistema, che ne ritarda la risposta e può causare problemi di prontezza.

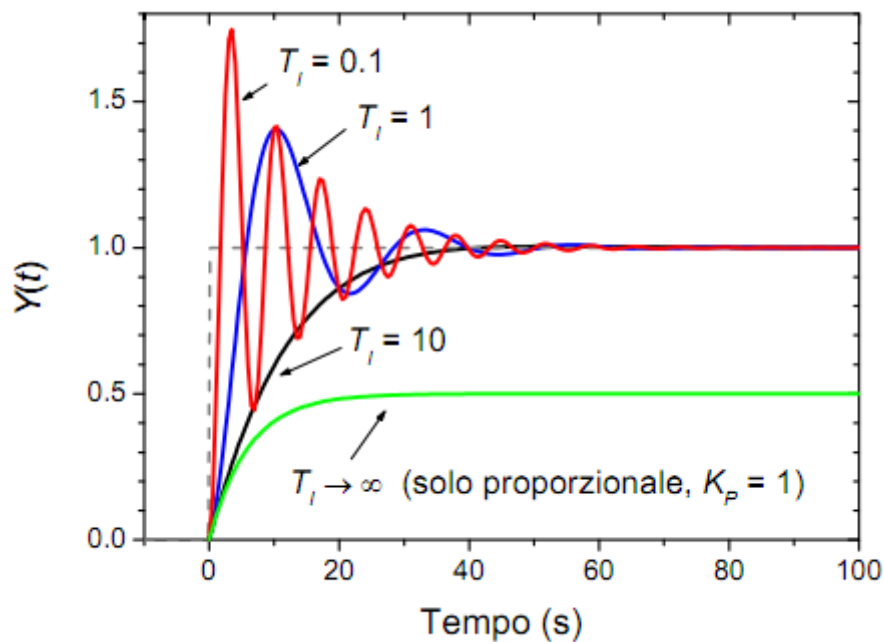


Figura 17 Vari esperimenti di un sistema PI (Proporzionale Integrale) con variazioni di  $K_I$

### 2.3.2.3 Azione Derivata

$$u_D = K_D \frac{de}{dt}$$

L'azione derivata migliora le prestazioni dinamiche del sistema compensando le variazioni dell'errore rapidamente. Potendo prevedere l'andamento dell'errore, se esso varia, l'azione derivativa non correggerà tale variazione proporzionalmente alla sua grandezza, ma in base alla sua velocità di variazione. Sebbene questa azione fornisca delle ottime prestazioni, spesso viene tralasciata perché rende il sistema eccessivamente sensibile causando brusche variazioni in caso di disturbi elevati o un cambio del set point del sistema.

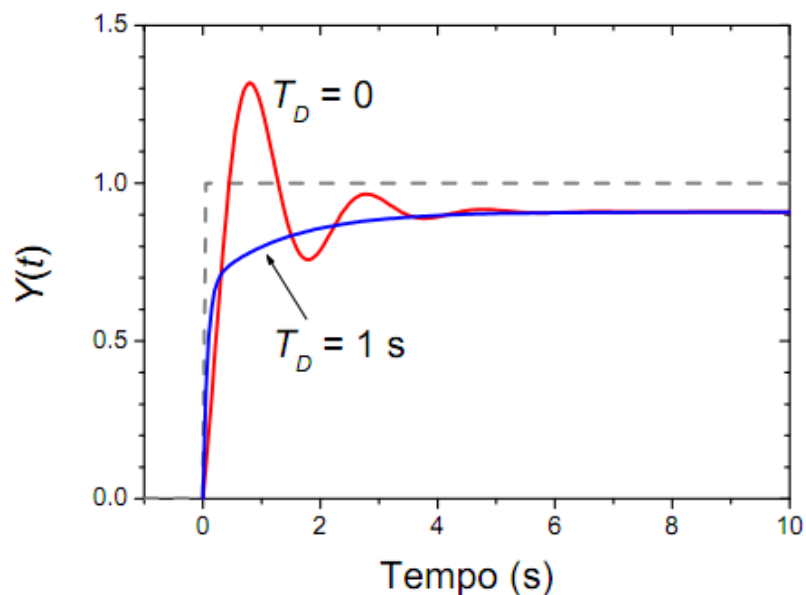


Figura 18 Vari esperimenti di un sistema D (derivativo) variando  $K_d$

### 2.3.2.4 *PID*

La somma delle 3 azioni sopra elencate costituisce la correzione prodotta dall'algoritmo e consente al robot di rimanere orientato verso la porta avversaria anche in caso di urti causati da altri robot o un malfunzionamento temporaneo di uno dei motori.

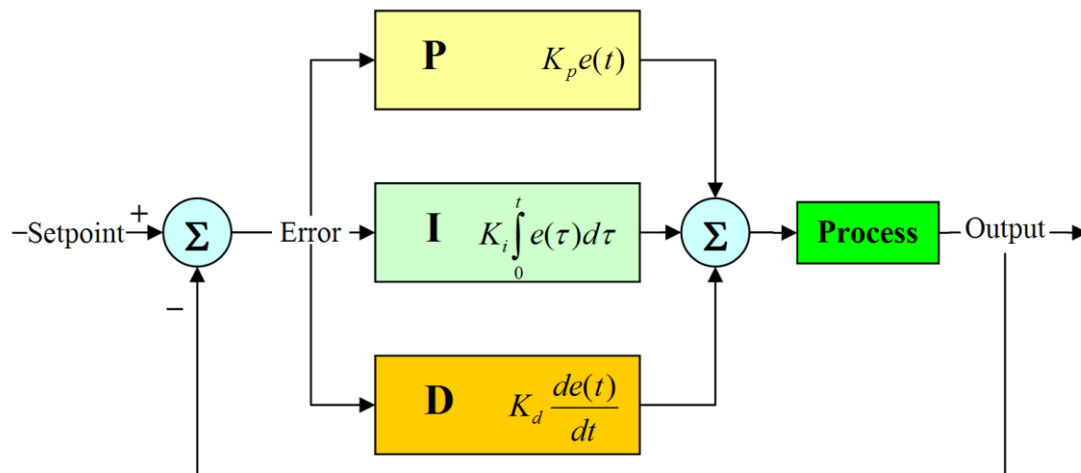


Figura 19 Schema a blocchi di un sistema automatico PID

Prima di gareggiare, è opportuno fare molteplici prove in campo per calibrare le costanti di regolazione in modo da ottenere una risposta rapida e precisa.

La procedura utilizzata per la calibrazione è la seguente:

1. Impostare tutte le costanti a 0
2. Incrementare  $K_p$  fino a raggiungere un livello accettabile sotto la soglia di instabilità del sistema.
3. Incrementare  $K_d$  fino a raggiungere la rapidità di risposta voluta.
4. Incrementare  $K_i$  fino alla rimozione totale dell'errore di traiettoria evitando di rendere instabile il sistema.

La procedura illustrata consente di ottenere una calibrazione efficiente entro i limiti accettabili. Verrà esplicita più a fondo l'integrazione del PID all'interno dei motori per migliorare la stabilità e la precisione nei movimenti nella sezione dedicata ai motori.

### 2.3.3 Sensori di Palla

#### 4. BALL

##### **4.1 General ball specification**

A well-balanced electronic ball shall be used. The ball will emit infrared (IR) light set to pulsed mode.

##### **4.2 Official suppliers for pulsed balls**

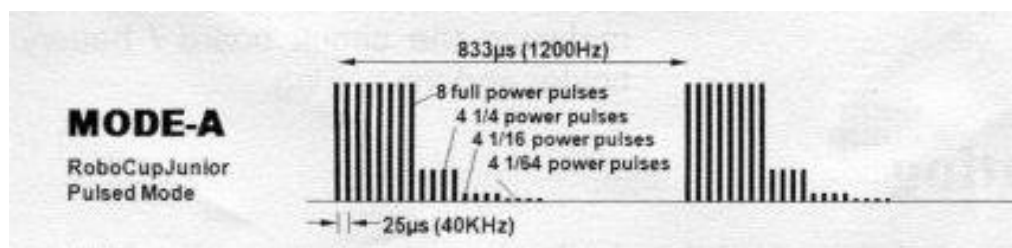
Currently, there is one ball that has been approved by the RoboCupJunior Soccer Technical Committee:

- RoboSoccer RCJ-05 ball operating in MODE A (pulsed) made by EK Japan/Elekit ([www.elekit.co.jp](http://www.elekit.co.jp))

Technical details are in the Appendix: “Technical Specification for Pulsed Soccer Ball”.

*Figura 20 Sezione palla regolamento Soccer 2016*

Come descritto nel regolamento<sup>[1]</sup> (figura 20), la palla regolamentare RCJ-05 è composta da 20 led infrarossi modulati a 40KHz (Necessario per eliminare eventuali disturbi dati da fonti di calore o emettitori infrarossi esterni) che inviano un treno di impulsi come in figura 21.



*Figura 21 Treno di impulsi della palla in modalità competizione*

Questo tipo di segnale consente il riconoscimento oltre che della posizione, anche della distanza della palla dato che allontanando la palla dal robot, gli impulsi più piccoli tenderanno a disperdersi

A fronte di ciò sono stati adottati dei ricevitori ottici PNA4602 specificatamente progettati per leggere gli impulsi modulati infrarossi, inoltre posseggono un filtro passabanda impostato su 40KHz che consente di eliminare ulteriori segnali infrarossi parassiti circostanti.

Tramite Inventor CAD è stata progettata una copertura che avvolgesse i sensori col fine di renderli altamente direzionali, aumentando l'affidabilità delle letture e quindi la precisione nei movimenti.

La disposizione dei sensori è stata scelta per favorire una maggiore precisione anteriore. Dei 20 sensori disponibili, 15 sono stati posizionati nell'emisfero frontale con  $12.5^\circ$  di differenza l'uno dall'altro, e gli altri 5 sono disposti nell'emisfero posteriore ogni  $30^\circ$  per avere una posizione relativamente precisa della palla (figura 23).

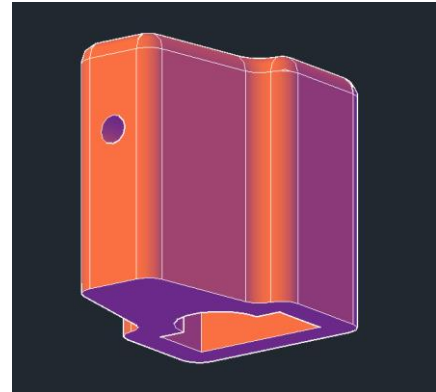


Figura 22 Copertura per PNA4602

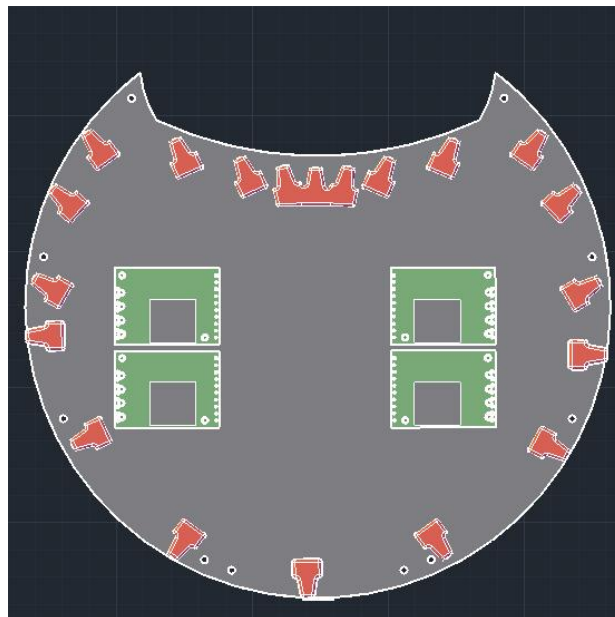


Figura 23 Disposizione dei sensori di palla sulla scheda. Si noti il maggior numero di sensori anteriori che consentono una maggiore precisione

Il circuito per l'acquisizione della distanza della palla è stato progettato sfruttando le proprietà del circuito integratore RC. Ricordando che il PNA4602 invia un segnale la cui ampiezza varia con l'intensità luminosa ricevuta dai led

interni della palla e quindi con la distanza di essa stessa dal ricevitore. Tramite un circuito RC (figura 24) opportunamente dimensionato, è possibile ricavare un valore di tensione da 0 a 5 Volt che rappresenta la distanza della palla.

Per poter dimensionare i componenti, è necessario prima di tutto analizzare il circuito in questione:

Osservando il circuito in uscita (Partitore fra R28 e C31), La tensione misurata dal microcontrollore è proprio quella che cade ai capi di C31 che segue la formula:

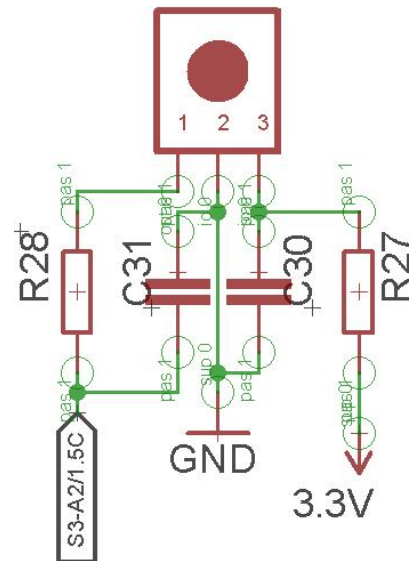


Figura 24 Circuito rilevamento palla del robot

$$i_c = \frac{dq}{dt}$$

Dove  $q = C \Delta V_c$

E

quindi

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \rightarrow V_c = \frac{1}{C} \int i_c dt$$

Poiché la corrente  $i_c$  è la stessa che scorre sulla resistenza R28, supponendo che lo strumento di misura abbia impedenza infinita, possiamo scrivere:

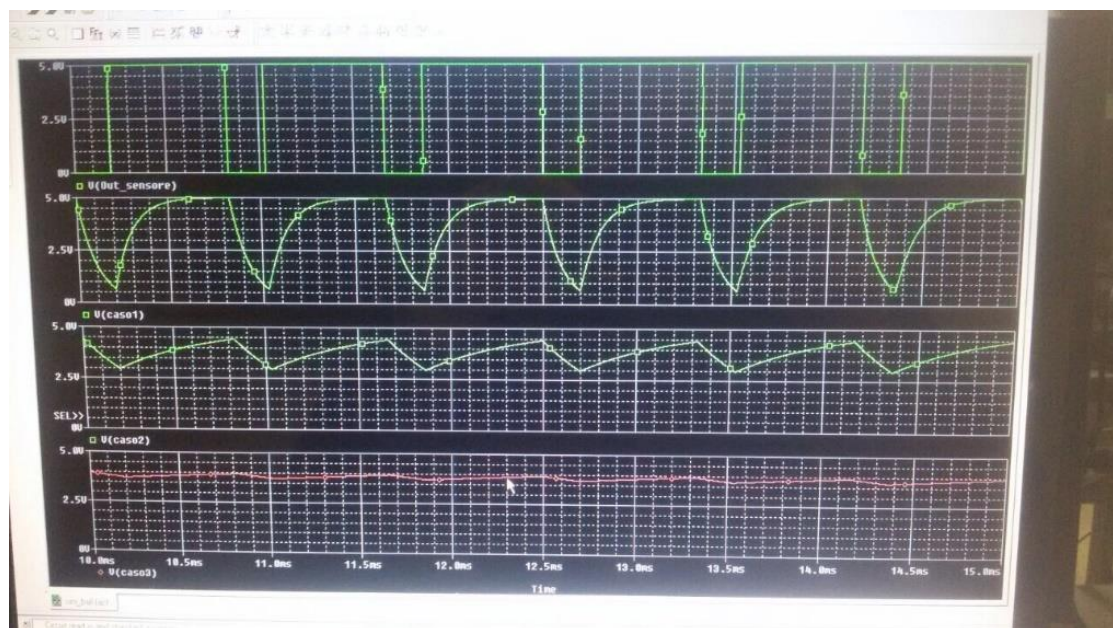
$$V_c = \frac{1}{RC} \int V_{in} dt$$

È chiaro che l'uscita è proporzionale all'integrale della tensione di ingresso con una costante di proporzionalità pari a  $\frac{1}{RC}$

Il circuito viene quindi usato per convertire in onde triangolari il segnale inviato dal ricevitore IR, ma a causa dello slew rate introdotto dal condensatore quando la costante di tempo  $\tau > \frac{1}{5}T$  la tensione di uscita tende a raggiungere un valore specifico. Se  $\tau$  cresce ancora, la tensione  $V_o$  diventerà quasi continua con valore

pari al valor medio dell'onda quadra. Conoscendo la frequenza del segnale in ingresso, bisogna dimensionare i componenti in modo tale che il tempo di carica del circuito non faccia scaricare il condensatore, ma che invece tenda a mantenere un valore più o meno fisso.

Tramite il software di simulazione di circuiti elettronici NI MultiSim<sup>[2]</sup> 13, sono stati eseguiti diversi esperimenti con diversi costanti di tempo per riuscire ad ottenere l'effetto desiderato.



*Figura 25 esperimenti con diverse costanti di tempo*

Nel primo caso, il  $\tau$  del circuito è uguale a  $1/5$  della semionda positiva, e infatti si ha un ripple molto alto. Incrementando la  $\tau$  è possibile ottenere risultati come il terzo evidenziato in rosso, che possiede un ripple molto piccolo, e mantiene la carica sul condensatore per un tempo prolungato, avendo quindi un segnale misurabile anche in assenza del segnale emesso dalla palla.



### 2.3.4 Sensori di Prossimità

Come spiegato nella sezione 2.2, per avere un'idea dei bordi fisici del campo e di eventuali ostacoli come robot avversari o addirittura le porte del campo, il robot è equipaggiato con 4 sensori di prossimità ad ultrasuoni. Questi sensori utilizzano il principio di funzionamento dei sonar: inviano un treno di impulsi sonori e ne rilevano un eventuale eco di ritorno causato dalla presenza di un oggetto nella portata del sensore.



*Figura 26 MB1010*

Dopo un'attenta analisi, la scelta del sensore è ricaduta sul **MB1010** (figura 26) della MaxSonar, in quanto fornisce un ampio raggio di azione ed una facilità di utilizzo maggiore rispetto agli altri competitor a parità di prezzo. Il sensore in questione possiede un'interfaccia multiformato, che comprende un'uscita in pulse-width (simile ad altri sensori ultrasonici), un'uscita in seriale asincrona (UART) e infine, l'uscita analogica da noi usata che fornisce una tensione proporzionale alla distanza dal sensore. È essenziale menzionare anche il raggio effettivo del sensore, che spazia da 0.152 fino a 6.45 metri con un passo di 2.54 cm (1 pollice).

Durante l'accensione, il sensore effettua in automatico la calibrazione, motivo per cui è importante non avvicinare oggetti attorno al robot durante l'avviamento. Se un oggetto dovesse trovarsi troppo vicino al sensore durante la calibrazione, il raggio di azione minimo potrebbe diventare maggiore, per cui è opportuno accendere il robot al centro del campo se possibile o comunque con una distanza da ogni sensore che va da 7 a 14 pollici.

Per collegare i sensori dobbiamo analizzare intanto i pin a disposizione sulla board:

- GND
- VCC
- TX
- RX
- AN
- PW
- BW

Osservando le funzioni dei pin sul datasheet<sup>ii</sup>, va evidenziata la funzione dei pin:

**Tx:** quando il pin BW è basso o disconnesso, il pin invia un treno di impulsi asincroni con formato RS232; Il segnale inviato consiste in una lettera ASCII “R” seguita da 3 caratteri ASCII rappresentanti le distanze in pollici fino a 255, seguito da un ritorno a capo (13 in ASCII). *Se BW è alto, a fine lettura, il pin invierà un singolo impulso, utile per la configurazione a catena dei sensori.*

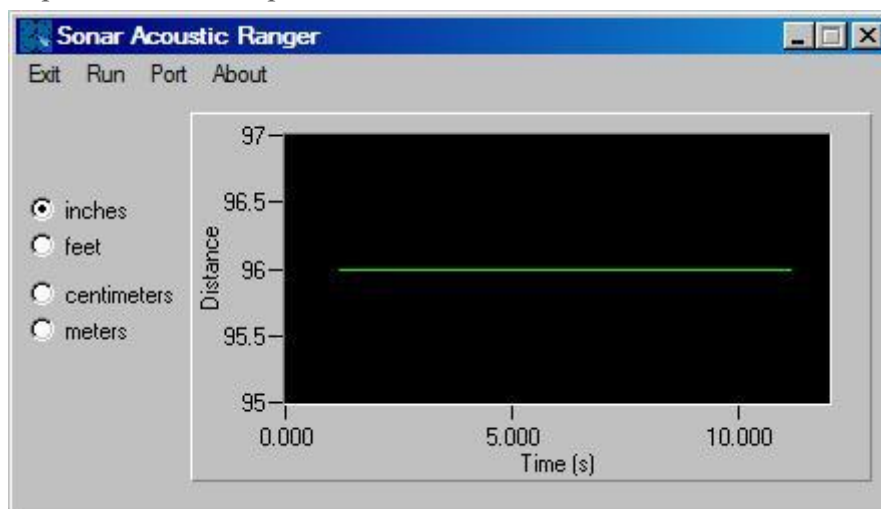
**Rx:** Questo pin è internamente tenuto alto, e finché resta in questo stato, verranno fatte e inviate continuamente le letture. Se portato a massa, il sensore smetterà di rilevare la distanza. *Per effettuare una lettura bisogna portare il pin a massa per un periodo da minimo 20uS*

**An:** l’Output dell’interfaccia analogica, ha una risoluzione pari a  $(VCC/512)$  per pollice, per cui a  $VCC = 5V$  l’uscita corrisponderà a 9.8mV/pollice mentre per  $VCC = 3.3V$  l’uscita sarà 6.4mV/pollice. L’uscita è collegata ad un buffer che permette di leggere la lettura più recente.

Quando si hanno più sensori che lavorano parallelamente nella modalità default detta Free-run (ogni sensore continuamente invia impulsi per rilevare la distanza) si incappa in alcuni problemi che possono portare a letture completamente errate.

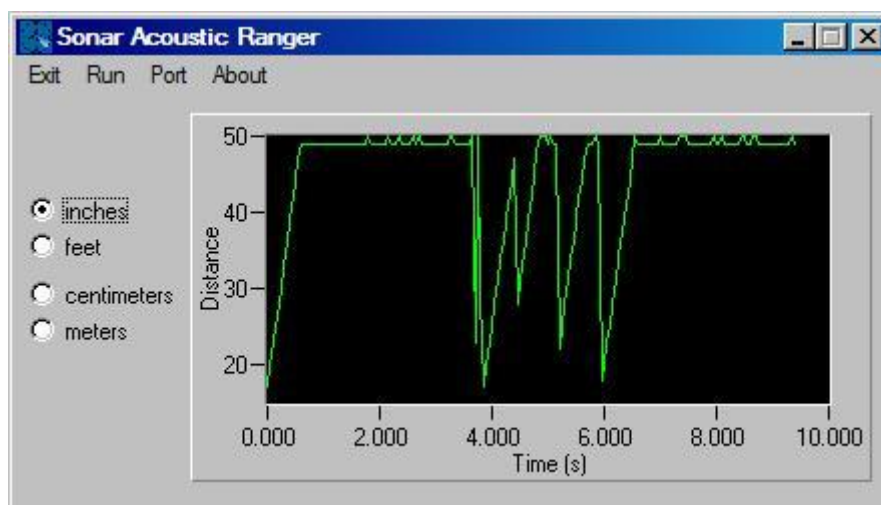
Ipotizzando di avviare tutti i sensori al medesimo istante, incappiamo nel primo problema: I sensori non essendo sincronizzati fra loro, giungono a un problema di Phase-Shifting causato dal fatto che la frequenza di lavoro non è perfettamente uguale. Un altro problema fondamentale è che lavorando al medesimo istante, c'è il rischio che un sensore rilevi gli impulsi di un altro sensore, causando false letture critiche.

La casa produttrice ha rilasciato delle analisi che mostrano come possano variare le letture quando avviene questo fenomeno.



*Figura 27 Uscita del sensore quando non ci sono interferenze da altri sensori*

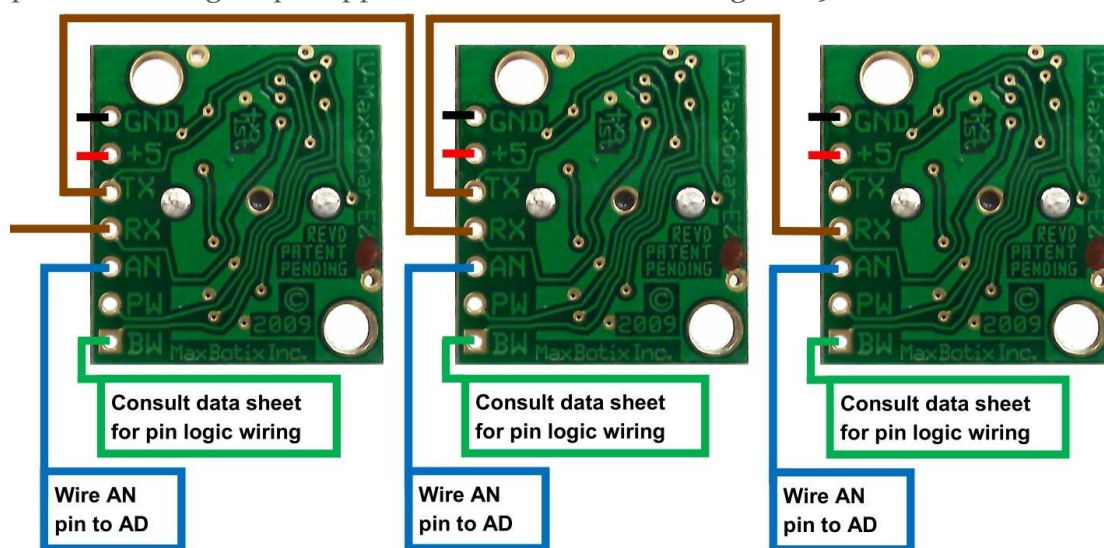
In figura 27, il sensore ha rilevato un ostacolo fisso a 96 pollici di distanza, non essendoci altri segnali di disturbo, l'uscita è costante.



*Figura 28 Uscita del sensore con interferenze derivanti da altri sensori*

Inserendo più sensori in modalità Free-run, a causa di rimbalzi sonori e di phase-shifting, il segnale di uscita sarà spesso errato e poco affidabile (figura 28).

Per poter ovviare a questi problemi e leggere più sensori, la modalità di default(Free-run) del sensore va alterata. Conoscendo le proprietà dei pin, è possibile collegare più apparati in cascata come in figura 29.



**Repeat to add as many sensors as desired**

*Figura 29 Configurazione in cascata per leggere più sensori senza interferenze*

Questa configurazione ha il vantaggio di attivare ogni sensore solamente quando il precedente finisce la scansione, ovviando ai problemi di phase-shifting e di overlap dei segnali acustici. Inserendo una resistenza da 1K tra il TX dell'ultimo sensore e l'RX del primo, si crea un sistema bistabile che continuerà a leggere tutti i sensori per un tempo indefinito.

Finalmente, per poter avviare il sistema, è necessario attendere 250 ms in cui il sensore si inizializza, e poi attendere altri 100 ms (1 ciclo da 49ms di calibrazione e 1 ciclo da 49ms per la prima lettura). Sarà poi necessario solamente leggere i pin AN di ogni sensore con una frequenza pari a 20Hz (frequenza di lettura dei sensori).

I sensori ultrasonici hanno un'ottima funzionalità nel rilevare un ostacolo anche a distanze relativamente ampie.

Per avere una risoluzione maggiore a corto raggio, è stato integrato il sensore di prossimità a tecnologia infrarossa SHARP GP2Y0D815ZoF con interfaccia analogica di uscita e raggio di azione che va da 2 a 15cm (figura 30).

Questo tipo di sensore sfrutta l'incidenza del raggio luminoso riflesso per rilevare la distanza dell'oggetto in questione.

Un impulso infrarosso viene emesso dal diodo led presente nel package, se non incontra nulla nel suo tragitto, il fascio luminoso continua ad allontanarsi; Se invece viene rilevato un oggetto, il fascio di luce viene riflesso e torna al ricevitore, formando un triangolo fra trasmettitore, ricevitore e l'oggetto come in figura.

Avvicinando o allontanando l'oggetto, l'angolo di incidenza al ricevitore cambia. È proprio questo principio che viene sfruttato quando il raggio riflesso, torna al ricevitore e viene incanalato da una lente di precisione verso un array CCD che permette di calcolare la distanza dell'oggetto.



Figura 30 Sensore di prossimità infrarosso

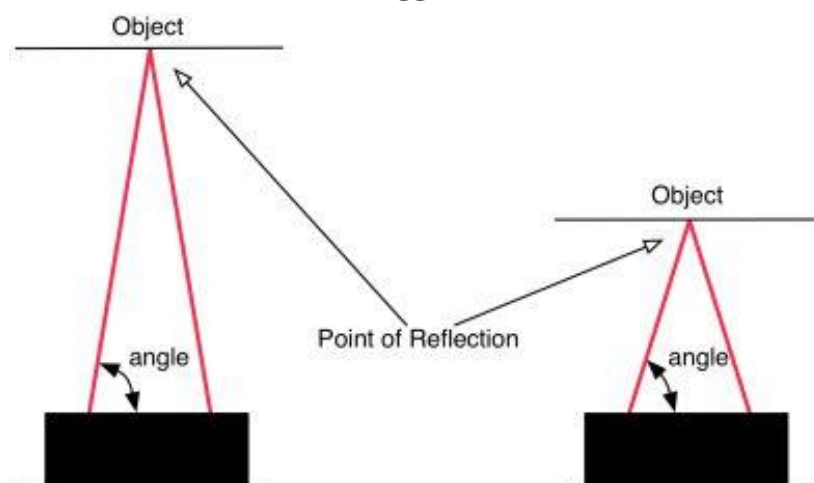


Figura 31 principio di funzionamento del sensore. Modificando la distanza dell'oggetto varia l'angolo di incisione del fascio luminoso

Importando diversi sensori all'interno del robot, possiamo conoscere con precisione la presenza di ostacoli vicini al robot. Questa scelta fornisce numerosi vantaggi per esempio nel rimanere entro una certa distanza dalla porta per il ruolo di portiere, conoscere le distanze dei bordi di campo in prossimità delle linee per una migliore comprensione della posizione o evitare collisioni con ostacoli fermi per allungare la vita dei vari componenti del robot.

### 2.3.5 Motori

I motori sono il modulo più importante del robot, in quanto definiscono la velocità, la trazione ed il peso del robot.

Esistono numerosi tipi di motori utilizzabili, fra cui:

Stepper, Servomotori, motori Brushed e Brushless. Tipicamente i motori utilizzati sono i Brushed in quanto hanno un costo relativamente basso unito a un buon rapporto coppia/giri.

I nostri motori nello specifico, sono motori DC brushed a magneti permanenti che convertono energia elettrica in energia motrice sfruttando le forze generate da un flusso elettrico che passa attraverso un campo magnetico. Per visualizzare il funzionamento del motore, bisogna conoscere la regola della mano sinistra di Fleming (figura 33), che espone come da una corrente con direzione indicata dal dito medio, immersa in un campo magnetico

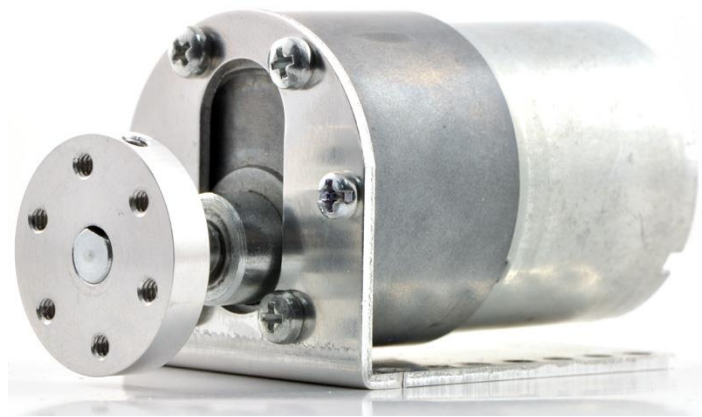


Figura 32 Motori attualmente in uso sul robot

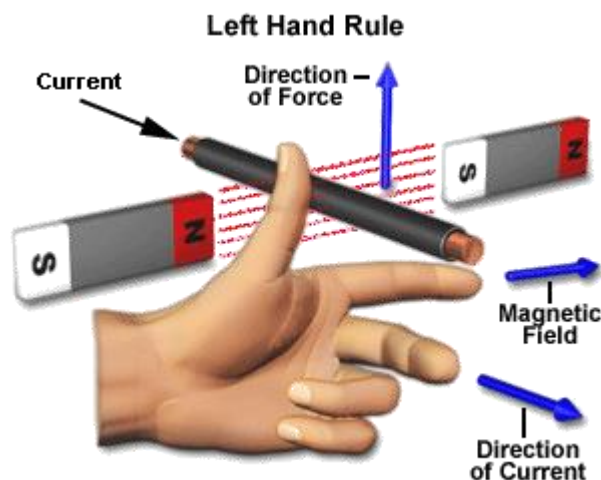


Figura 33 Regola di Fleming

perpendicolare ad essa indicata dall'indice, si sviluppa una forza mutuamente perpendicolare tra il campo magnetico e la corrente, indicata dal pollice. Compreso questo, il più semplice dei motori sfrutta un filo conduttore, immerso in un campo magnetico, connesso tramite 2 spazzole ad un generatore di corrente (figura 34).

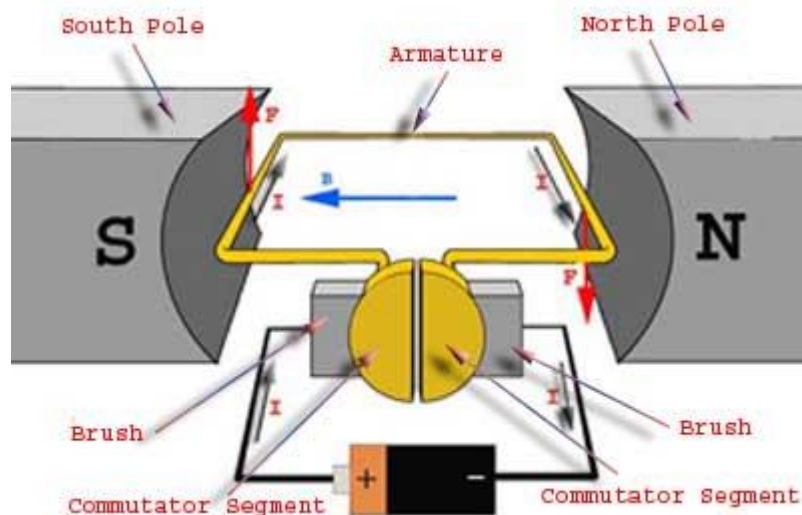


Figura 34 Principio di funzionamento del motore DC a spazzole

La forza in questione segue l'equazione:  $dF = dq(E + vB)$  da cui si ricava che il momento torcente  $M$  è uguale a  $\vec{M} = BIL\omega \cos\alpha$

Dove:

- $B$  = Intensità del campo magnetico
- $I$  = intensità di corrente
- $L$  = Lunghezza del conduttore di carica
- $\omega$  = Spazio fra le armature del conduttore
- $\alpha$  = angolo fra il piano dell'armatura, ed il piano iniziale dell'armatura



All'istante 0, il momento agente sul conduttore è massimo perché  $\cos\alpha = 1 \rightarrow \vec{M} = BIL\omega$  Quando però il conduttore ruota e  $\alpha = 90^\circ$ , il momento risulterà 0 e l'unica forza che farà ruotare il motore è l'inerzia (figura 35). A questo punto però, con  $\alpha > 90^\circ$ , la direzione del momento diverrebbe negativa, fermando il motore; Le spazzole fanno in modo che superata la soglia dei  $90^\circ$  ci sia un'inversione di polarità che cambia il verso di scorrimento delle cariche, mantenendo la direzione del momento desiderata. Forme più

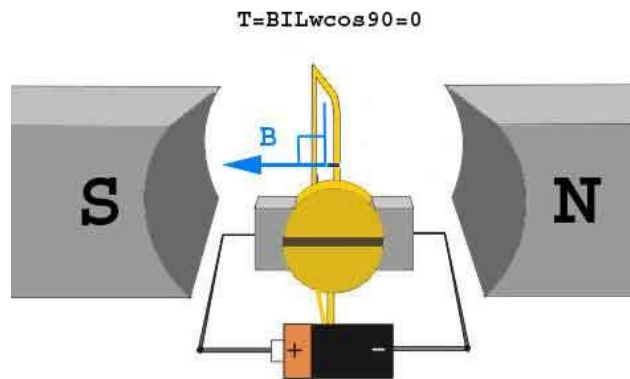


Figura 35 Istante di stallo del momento

avanzate di motori a spazzola consistono di più spazzole per favorire una maggiore linearità di momento durante tutta la rotazione e per ridurre l'usura meccanica dei vari componenti.

Questi motori spesso arrivano ad altissime velocità: spesso dagli 8000 giri/minuto fino ad arrivare a 16-20 mila giri/minuto e oltre. Se le ruote dei robot dovessero raggiungere queste velocità, risulterebbe estremamente difficile riuscire a mantenere stabile il robot. Inoltre i motori non avrebbero abbastanza trazione per poter spostare il robot rendendoli inutilizzabili. Per risolvere



Figura 36 Motoriduttore planetario

questi problemi, si aggiunge un blocco detto **Motoriduttore** agganciato all'asse del motore, che ha il compito di ridurre in uscita i giri del motore, ed aumentarne la trazione. In questo modo è possibile avere motori in grado di fornire dai 500 ai 900 giri/minuto con sufficiente trazione per poter muovere il robot.



Vi sono moltissime case produttrici di motori adatti alla competizione del Soccer, sebbene ne voglia evidenziare 3 in particolare per le loro grandi qualità:

- Pololu
- Maxon
- Faulhaber

La Pololu è la marca di moduli elettronici ed elettromeccanici sicuramente più usata all'interno dei robot, e questo perché i suoi prodotti sono spesso ottimi a prezzi molto convenienti. È proprio il caso dei motori Pololu 37D da 500RPM installati quest'anno sul robot, che garantiscono un'ottima trazione ad una velocità modesta. In più questi motori sono equipaggiati con un encoder a 2 canali ad effetto Hall che restituisce 64 impulsi per rotazione e consente di sapere la posizione o la velocità del robot in un determinato istante.

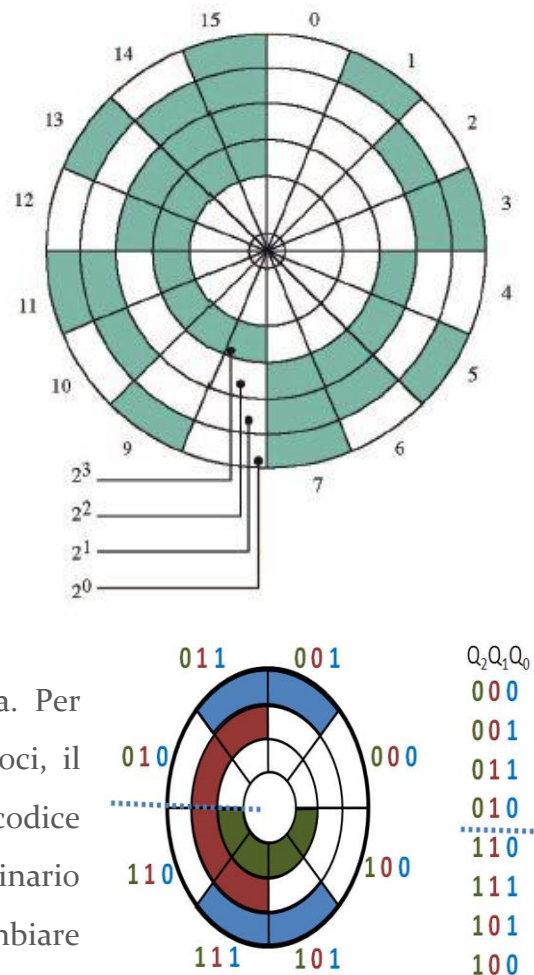
### 2.3.5.1 Encoder

Il trasduttore di posizione angolare (Encoder) è un apparato elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse rotante in un segnale elettrico, nella sua maggioranza dei casi, digitale. Collegato con opportuni circuiti elettronici, esso è in grado di misurare:

- Spostamenti angolari
- Movimenti rettilinei e circolari
- Velocità di rotazione o accelerazioni

Esistono 2 tipologie di encoder:

- **Assoluti:** ha un disco che presenta una serie di tracce concentriche univoche che si associano ad un particolare codice binario. Il disco può essere suddiviso in  $2^n$  volte per avere un determinato numero di settori. Ogni settore poi viene letto da un array di opto sensori che fornisce in uscita un segnale già adattato all'elaborazione digitale e che quindi non necessita di taratura. Per applicazioni particolarmente veloci, il codice binario è sostituito dal codice Gray che differisce dal codice binario standard per la peculiarità di cambiare valore scambiando solamente un bit alla volta, evitando eventuali false letture durante la rotazione del disco



- **Incrementali:** è costituito da un disco trasparente con una sola traccia, sul cui bordo sono stati ricavati dei settori scuri, ugualmente distanziati e da un rilevatore ottico. Quando il disco viene messo in rotazione, si genera una serie di impulsi ottici che vengono rilevati e convertiti da un circuito elettronico montato sullo stesso contenitore della struttura meccanica; è possibile così rilevare lo spostamento rispetto a una posizione fissa assunta come riferimento. Tale rilevazione avviene mediante il conteggio degli impulsi forniti dal fotorilevatore.

Per rilevare il verso di rotazione, si utilizzano due gruppi di lettura posizionati in modo che i due segnali prodotti risultino sfasati di  $\frac{1}{4}$  di periodo.

Il verso di rotazione si desume osservando quale dei due segnali risulta in anticipo (figura 37).

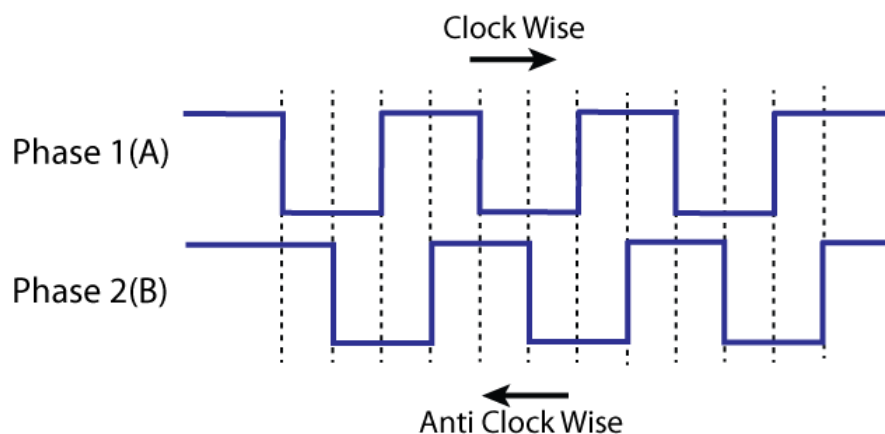


Figura 37 La risposta tipica bi-canale di un encoder incrementale, si desume la direzione di rotazione osservando quale dei due segnali è in anticipo

Esistono in realtà diversi sistemi basati sul sistema incrementale. In campo industriale sicuramente il più usato è l'encoder a banda magnetica, il quale utilizza un sensore magnetico che rileva il campo proveniente da un tamburo ricoperto superficialmente da un materiale per le registrazioni magnetiche, sul quali sono incisi i segnali di



Figura 38 Encoder a banda magnetica presente sull'asse del motore del calciatore

posizione. Questi trasduttori magnetici hanno una risoluzione tripla rispetto a quelli ottici, offrono una migliore risposta in frequenza e soprattutto una maggiore affidabilità dovuta ad una minore usura dei componenti utilizzati.

Sebbene gli encoder attualmente non vengano sfruttati nel robot, lo sviluppo di una scheda a parte, con uno o più microcontrollori dedicati al controllo degli encoder, e conseguentemente dei motori, porterebbe ad un miglioramento nei movimenti, rimuovendo così una causa della rotazione involontaria del robot, data dalla diversa velocità di ogni motore determinata da piccole diversità di produzione. Inoltre sarebbe possibile incrementare la velocità dei motori linearmente piuttosto che istantaneamente, eliminando in parte gli slittamenti causati dalla brusca accelerazione, e nel primo periodo della partita, poter tener traccia della posizione del robot nel campo (questa funzione non può essere utilizzata a lungo termine dato che ad ogni slittamento del robot, anche la posizione slitterebbe rendendola troppo disallineata con la realtà dopo diversi minuti).

#### 2.3.5.2 Motor Driver

Questi motori hanno più bisogno di quanto un microcontrollore possa erogare su un pin (circa 20mA/pin) e i nostri motori in particolare richiedono alimentazioni a 12 V con consumi che oscillano dai 250mA ai 5A durante la fase di stallo. Per cui è necessario ricorrere a dei circuiti particolari, specifici per il controllo di questi attuatori.

Si definisce ponte H il circuito elettronico (figura 39) che permette di applicare una tensione ad un carico in entrambi le direzioni. Il circuito è composto da 4 switch, che spesso sono 2 transistor BJT PNP o 2 MOSFET a canale P connessi al bus di alta tensione, e 2 BJT NPN o MOSFET a canale N connessi al bus di bassa tensione. Questa soluzione è spesso racchiusa in un circuito integrato, come il famoso L298 (Driver motori a 2 ponti H).

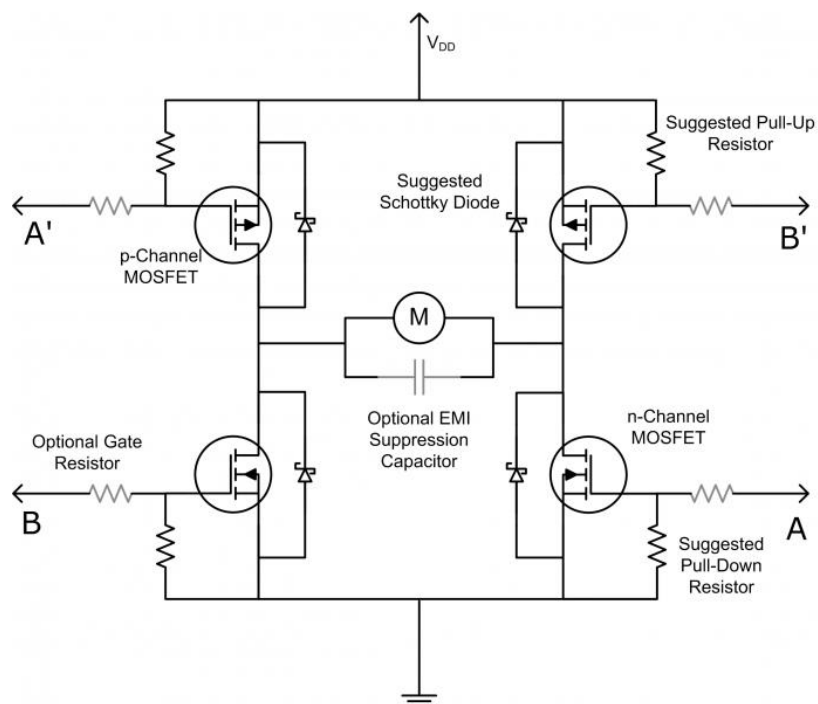
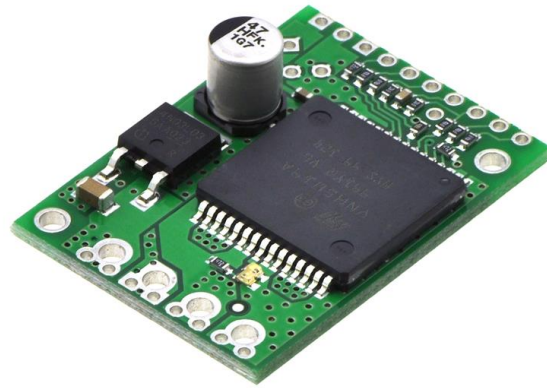


Figura 39 Schema elettrico completo di un ponte H

Un effetto di cui bisogna tener conto quando si usano componenti induttive (in questo caso il motore) è l'effetto Flyback ovvero un picco di tensione altissimo quando viene a mancare la sorgente di tensione (ad esempio quando un transistor smette di condurre). Questo effetto è causato dall'accumulo di cariche rilasciate dal campo magnetico dell'induttanza e spesso, è distruttivo, perché genera tensioni più alte delle tensioni di breakdown dei transistor, danneggiando loro e a volte anche il micro controllore stesso. Per rimediare all'inconveniente si aggiungono dei diodi detti di flyback che permettono all'induttore di assorbire la corrente da lui emessa (ergo flyback o ricircolo) fino a che quell'energia non si dissipi completamente. Circuiti integrati come l'L298 non contengono questi diodi per cui è necessario aggiungerli esternamente.

Il VHN5019A (ponte H singolo) contiene tutti i circuiti di sicurezza quali diodi di flyback, protezioni termiche e da cortocircuiti. Il chip in questione permette di operare a tensioni che variano tra 5.5 e 24V e possono dissipare 12 A continui e fino a 30A di picco. Abbiamo a disposizione anche un pin di diagnostica che ritorna una tensione proporzionale alla corrente assorbita dal motore e che corrisponde a 140mV/Ampere, quindi è possibile capire se un motore è danneggiato o se sotto pressione.

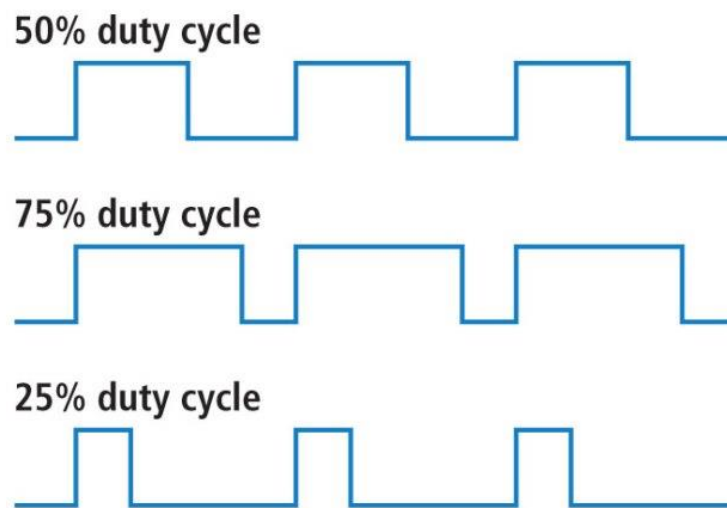


*Figura 40 VHN5019A*

Per pilotare i motori con questa scheda, è necessario fornire tre parametri principali:

- **Direzione A e B**
- **Velocità (PWM)**

Mentre i pin della direzione hanno bisogno di uno stato logico l'uno inverso all'altro (A = VCC e B = GND o viceversa), il pin di velocità necessita di un segnale modulato in larghezza di impulso o PWM (Pulse-Width Modulation).



*Figura 41 Un segnale modulato in PWM con diversi valori di Duty-Cycle*

Il **PWM** è un tipo di modulazione che permette di variare il valor medio di un segnale variando il rapporto fra la durata dell'impulso positivo e dell'impulso negativo (Duty-Cycle) come in figura 41. Questa tecnica permette di ridurre la potenza dissipata dai transistor perché imposta i punti di lavoro in saturazione o interdizione per piccoli istanti. Questa modulazione può servire anche per codificare e decodificare informazioni codificate sotto forma di durata del tempo di ogni impulso.

### 2.3.6 Sensori di linea

Il regolamento del soccer definisce una penalità temporanea di 1 minuto nel quale il robot viene rimosso dal campo, in caso uscisse completamente dal terreno di gioco indicato dalla linea bianca (Out of bounds). Per cui bisogna implementare un sistema che riconosca i bordi del campo e trovi una strategia per cambiare traiettoria e rientrare nell'area di gioco.

È chiaro che per ovviare al lavoro sarà necessario l'uso di un opto sensore in grado di rilevare variazioni di intensità luminosa. Un fenomeno che può essere di aiuto è l'assorbimento e la riflessione di un'onda luminosa che colpisce un materiale di un determinato colore. Sappiamo di vedere un oggetto rosso perché la composizione atomica del materiale fa sì che esso assorba tutto lo spettro visibile meno che il rosso, un oggetto nero assorbe tutta la radiazione luminosa e la converte in energia termica (motivo per cui le macchine nere in estate sono più calde!) mentre un oggetto bianco non assorbe nessuna radiazione luminosa ma le riflette.



Figura 42 Differenti superfici colorate assorbono differenti radiazioni luminose

Inviando un fascio

luminoso bianco sulla superficie del campo e analizzando la luce riflessa da esso, è possibile comprendere se ci sono variazioni di colore sotto il robot. Questo è possibile utilizzando un led per l'emissione dell'impulso luminoso

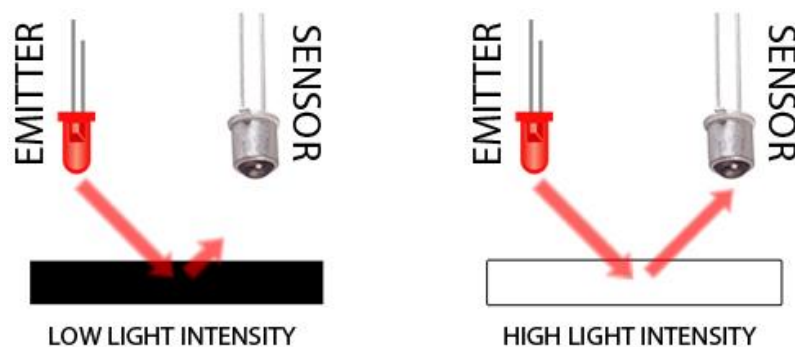


Figura 43 Processo per l'individuazione della linea



(possibilmente bianco o da testare verde) e un foto transistor per la rilevazione della luce riflessa.

Per poter coprire tutta la superficie inferiore del robot e poter calcolare una traiettoria di fuga, sono necessari almeno 4 sensori posti ogni 90° sul perimetro del robot per ricevere immediatamente il segnale di rilevamento della linea. È ovvio che inserendo più sensori sarà possibile avere una percezione migliore della linea. Prima di presentare le opzioni circuitali bisogna dedicare un paragrafo ad un algoritmo per il rilevamento di linea ideato da me (sotto la doccia) e realizzato durante quest'anno:

Il metodo classico per rimanere dentro i bordi del campo, è formato da un semplice algoritmo che, quando rileva una linea bianca su una delle 4 zone del robot, imposta la direzione di movimento in verso opposto alla linea. L'algoritmo risulta perfettamente funzionante quando viene rilevata la linea da un solo sensore alla volta, ma, nelle situazioni dove più di un sensore rileva la linea (in prossimità degli angoli del campo), l'algoritmo non riesce a correggere la direzione, comportando una penalità al robot. Una soluzione potrebbe essere quella di aggiungere più sensori, ma si preferisce non adottarla per la difficoltà di gestione di un numero elevato di sensori. Ed è per questo che è stato sviluppato questo algoritmo che permette la gestione di un maggior numero di sensori (Il sistema è stato sperimentato con 36 sensori).

Considerando un vettore

$$\vec{V} = V(\cos\theta, \sin\theta)$$

Dove  $\theta$  = angolo tra il vettore anteriore del robot e uno dei sensori che rileva la linea.

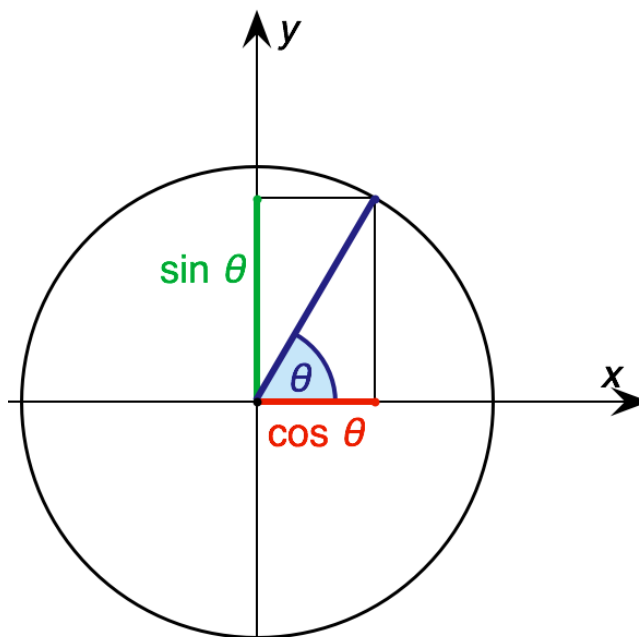


Figura 44 Il sensore viene considerato come l'angolo  $\theta$  tra la posizione del sensore e il robot

Nel momento in cui un sensore rileva la linea, il vettore rappresentante del sensore viene scomposto nelle sue due componenti, ed ognuna di esse viene sommata con quelle di altri sensori che hanno individuato la linea recentemente. Ipotizzando di aver individuato la linea con 3 sensori ad esempio, si avranno le seguenti somme:

$$sommaX = (\cos\alpha + \cos\theta + \cos\beta) \text{ e } sommaY = (\sin\alpha + \sin\theta + \sin\beta)$$

Applicando la somma vettoriale sui 3 vettori trovati, possiamo ricavare un vettore medio e, conoscendo la proprietà della tangente per cui  $\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$  è possibile ricavare la direzione di fuga per allontanarsi dalla linea con la formula

$$DirFuga = 180^\circ + \tan^{-1} \left( \tan \frac{sommaY}{sommaX} \right)$$

Con questo algoritmo il robot è in grado di individuare un angolo di fuga ideale indipendentemente da quanti sensori individuano la linea; pochi giorni dopo l'integrazione di questo algoritmo, è stata sviluppata una scheda prototipo contenente ben 36 sensori che ha permesso al robot di rimanere all'interno del campo di gioco per oltre 10 minuti costanti di stress-test. Nei prossimi anni è in programma un'integrazione migliorata del circuito in figura.

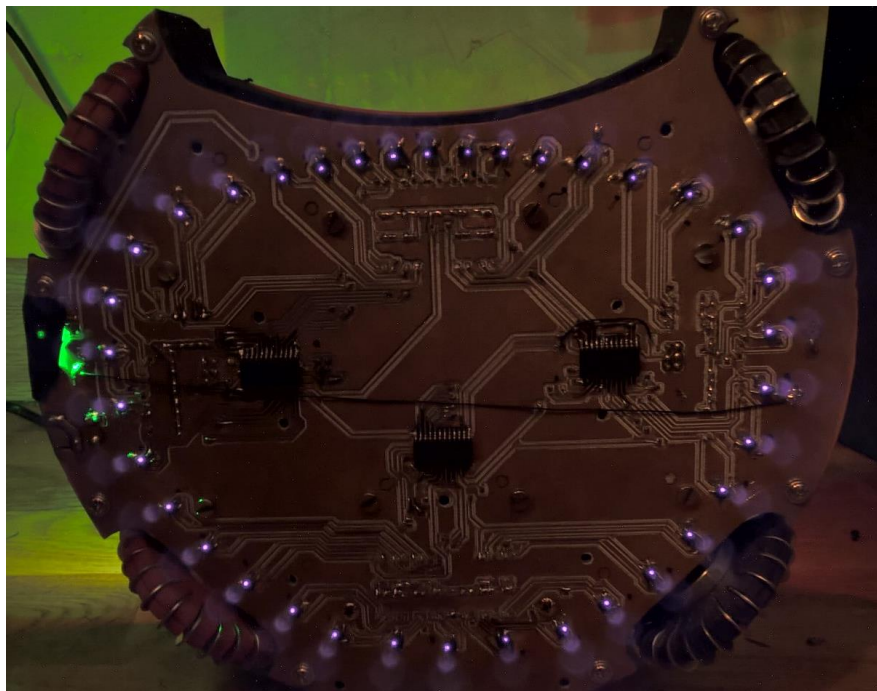


Figura 45 La scheda contenente 36 sensori di palla

Durante l'analisi delle possibili soluzioni circuitali, è stato scelto il circuito in figura 46 come migliore dati gli ottimi risultati empirici testati durante le gare degli ultimi anni:

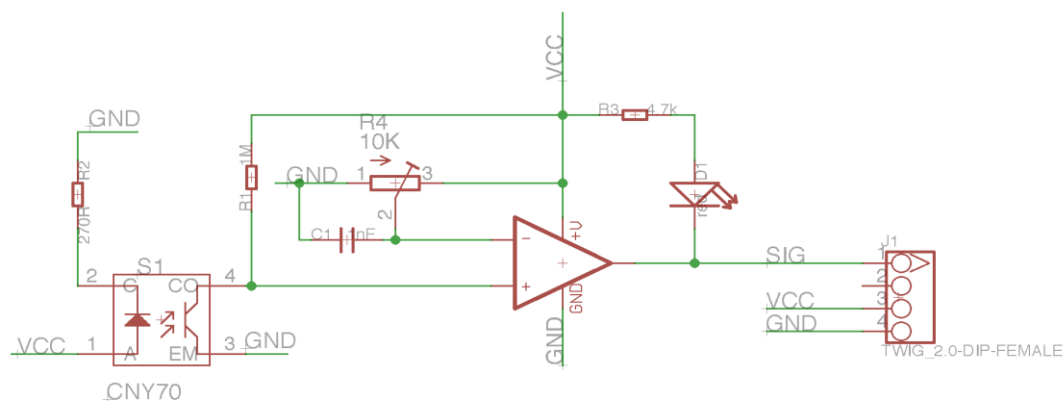


Figura 46 Il circuito di rilevamento della linea sfrutta un amplificatore e l'opto sensore CNY70

Il circuito sfrutta le proprietà foto elettriche della giunzione bipolare per rilevare variazioni di luce riflessa. Considerando il fotone come onda elettromagnetica, è possibile assegnare un'energia ad esso con la formula

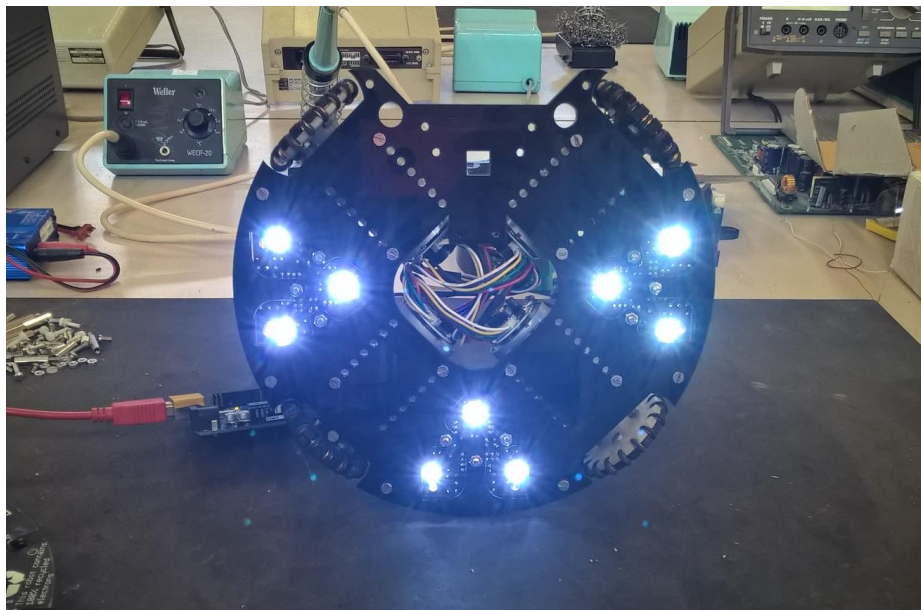
$$E = hf \quad \text{dove } h = \text{costante di Planck} \quad f = \text{frequenza dell'onda}$$

Per lo stesso principio dell'assorbimento di luce precedentemente esposto, adottando un materiale che assorba parte dello spettro luminoso, se la luce colpisce il semiconduttore nella zona di svuotamento base-collettore, si vengono a liberare coppie di elettroni-lacune che vengono spostate dal campo elettrico interno alla giunzione, questo movimento di cariche genera una corrente all'interno della base, che consente agli elettroni di muoversi dall'emettitore al collettore, diminuendo la resistenza Collettore-Emettitore.

Il circuito infatti sfrutta la resistenza variabile del fototransistor, creando un partitore fra essa e una resistenza fissa; la tensione ai capi del fototransistor viene poi comparata con un amplificatore operazionale ad una tensione pilotata da un trimmer. Quando il fototransistor si trova sopra una linea, se la tensione applicata ai suoi capi è maggiore della tensione ai capi del trimmer, il

comparatore commuta l'uscita e genera un impulso che il microcontrollore interpreta come individuazione di linea.

Al fine di poter conoscere con più precisione l'angolo di tangenza rispetto alla linea, e di conoscerne anche il verso (di entrata o di uscita relativamente al robot), sono state progettate delle schede da inserire nel robot contenenti 3 circuiti di rilevazione di linea disposti a triangolo, con la base installata verso l'esterno del robot (figura 47).



*Figura 47 La disposizione dei sensori consente di avere più informazioni sulla linea*

Prima di ogni competizione o allenamento è consigliabile ricalibrare tutti i sensori di linea per assicurarsi che essi siano in grado di rilevare la linea anche nella condizione di luminosità della stanza. Per farlo bisogna decidere quale sensore calibrare, spostare il robot in modo che il sensore sia sopra la linea bianca, e poi ruotare il trimmer fino al commutare dell'amplificatore operativo. Se il robot non ha sensori sporchi o mal funzionanti, l'algoritmo penserà a mantenere il robot all'interno del campo.

Sebbene dalla loro introduzione, i bordi del campo risultino un problema notevole per molte squadre, durante questo anno sono state proposte numerose soluzioni come questo algoritmo o l'utilizzo di una telecamera per potersi orientare e semplificare l'azione del rientro.

### 2.3.8 Solenoide

Una componente aggiuntiva che spesso può risultare vantaggioso all'interno del robot è la presenza di un solenoide che permette al robot di calciare la palla, consentendogli di guadagnare punti senza la necessità di raggiungere la porta avversaria.

Il solenoide (figura 48) è formato da una serie di spire circolari vicine tra loro realizzate con un filo di rame, e un solido ferromagnetico situato all'interno delle spire. Quando scorre una corrente nell'avvolgimento, si viene a



Figura 48 Il solenoide presente all'interno del robot

generare un campo magnetico all'interno e all'esterno della bobina con intensità proporzionale alla corrente e inversamente proporzionale alla lunghezza del solenoide. Il campo magnetico generato influisce sul blocco ferromagnetico presente all'interno del solenoide, facendolo traslare secondo le linee di campo prodotte. Facendo scorrere istantaneamente una grande quantità di corrente all'interno del solenoide, è possibile spingere la palla attraverso il blocco ferromagnetico.

Per controllare, grandi quantità di corrente tramite microcontrollore, è stato scelto di utilizzare un foto accoppiatore per disaccoppiare il circuito di potenza dal circuito logico, per pilotare un MOSFET di potenza che chiuderà il circuito del solenoide. Per

dimensionare il circuito, sarà necessario analizzare il circuito: la resistenza R7 viene fornita dal datasheet del foto accoppiatore, invece per il segmento amplificante bisognerà fare le seguenti considerazioni:

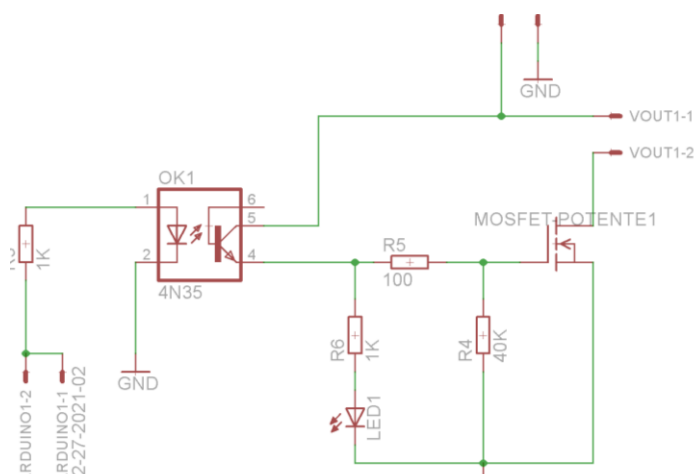


Figura 49 circuito driver del solenoide, accendendo il led del foto accoppiatore, il mosfet lascia passare corrente nel solenoide

Da datasheet del solenoide<sup>iii</sup> indica che a 3V, l'assorbimento è pari a 10W, di conseguenza è possibile dedurre la resistenza dell'avvolgimento, ossia 1  $\Omega$

Collegando la batteria da 12V del robot al solenoide, potranno scorrere quindi 12A, sufficienti per calciare la palla (testato empiricamente). Il datasheet del mosfet indica che a  $V_{gs} = 10V$  è possibile far scorrere nel canale Source-Drain ben 110A a temperatura ambiente. Per sicurezza volendo impostare  $V_{gs} \geq 10$ , si analizza il circuito considerando  $V_{ce} = 0$  da cui si ricava

$$V_{gs} = V_{bat} \left( \frac{R_4}{R_4 + R_5} \right)$$

Impostando  $V_{gs}$  a 10V e  $R_5$  a 10k $\Omega$ , ricavo che  $R_4 = \left( \frac{V_{gs}}{V_{bat} - V_{gs}} \right) R_5$ .

Osservando il regolamento, particolarmente nella sezione solenoide, si nota un test di potenza necessario prima della partita, per cui vi è la necessità di limitare la forza del solenoide durante le partite. Questa operazione viene fatta via software, modificando la durata dell'impulso inviato dal microcontrollore. Infatti è logico pensare che se l'impulso di attivazione per il solenoide è inferiore alla durata di traslazione del blocco ferromagnetico, la forza con cui esso colpirà la palla sarà inferiore.

### 2.3.9 Pixy

Negli ultimi anni è diventato sempre più semplice accedere a un sistema per l'elaborazione grafica. Negli ultimi due anni è nata una piattaforma chiamata Pixy, una soluzione che unisce un sensore da 640x400 pixel a un processore dedicato per l'elaborazione grafica con 50fps. Il vantaggio incredibile fornito da Pixy è un'interfaccia multi canale (UART-USB-I2C,SPI) e diverse modalità per il riconoscimento di colori all'interno del suo campo visivo.



*Figura 50 La Pixy montata sul robot permette di riconoscere colori e pattern nel terreno di gioco*

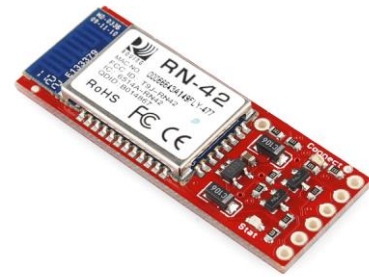
È quindi possibile rilevare forme geometriche colorate all'interno del campo come le porte o le linee di campo.

Durante l'anno sono state sperimentate le funzioni della telecamera come sostituire il punto di riferimento fornito dalla bussola, con la porta avversaria. Un'altra idea particolarmente interessante è quella di inserire nella zona posteriore del robot un codice colorato, in modo che il robot in difesa possa inviare dati sensibili al robot attaccante riguardo alla sua posizione nel campo.

Nella sezione 2.2 si è discusso del prossimo utilizzo di una palla arancione volta a sostituire l'attuale palla ad emissione IR. Per poter individuare velocemente la posizione della palla è necessario avere la telecamera installata con un algoritmo in grado di tracciare e fornire informazioni sulla posizione della palla.

### 2.3.10 Bluetooth

Nel regolamento è consentito l'utilizzo del Bluetooth come via di comunicazione fra i due robot durante le competizioni. A questo scopo è stato installato un modulo trasmettitore/ricevitore RN-42 di classe 2 per la comunicazione fra i robot e per una debug wireless ipotetica durante le fasi di allenamento. L'interfaccia UART fornita dal chip consente al microcontrollore di connettersi e comunicare attraverso esso.



La comunicazione costante fra i robot ha numerosi vantaggi come la possibilità di scambiarsi di ruolo, l'invio della relativa posizione di ogni robot per evitare che i movimenti di uno intralcino l'altro e la possibilità di comprendere quando uno dei robot è uscito favorendo quindi una strategia difensiva.



# Capitolo 3. Comunicazione

## 3.1 I<sup>2</sup>C

I<sup>2</sup>c (Inter-Integrated Circuit) è un protocollo di comunicazione seriale sincrono utilizzata per la comunicazione di più dispositivi posti sulla stessa scheda. I vari dispositivi sono collegati fra loro attraverso un bus formato da due linee bidirezionali:

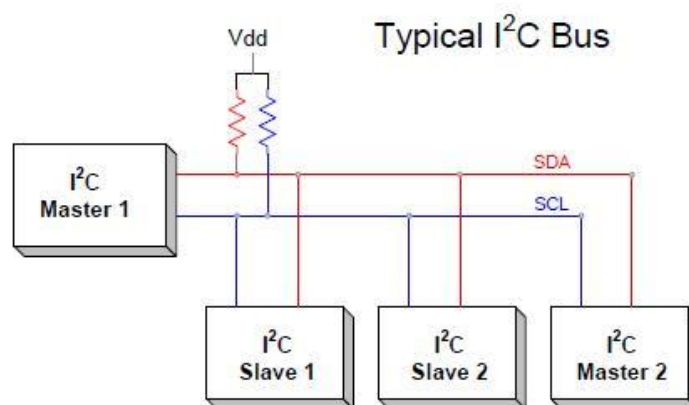


Figura 51 Schema semplificato di un bus I<sup>2</sup>C

- SCL: clock seriale per la sincronizzazione della comunicazione, esso viene generato dal dispositivo master
- SDA: linea di dati per il trasferimento seriale dell'informazione fra i vari dispositivi collegati

Il protocollo viene gestito da uno o più dispositivi detti master, che si occupano di inizializzare la trasmissione e di generare la tempistica del trasferimento, per comunicare con massimo 1008 dispositivi detti slave, ovvero dispositivi che ricevono la richiesta e rispondono di conseguenza al master.

La peculiarità di questo protocollo è quella di non imporre una tensione sulle linee di trasmissione, bensì lasciare che essa venga impostata tramite l'utilizzo di resistenze di pullup esterne al chip, consentendo di avere sulla linea, uno stato logico "alto-debole" facilmente modificabile dai dispositivi. Internamente al dispositivo infatti le linee sono collegate con configurazione "open-drain"

consentendo al chip solamente di imporre lo stato logico basso alla linea e non viceversa (figura 52).

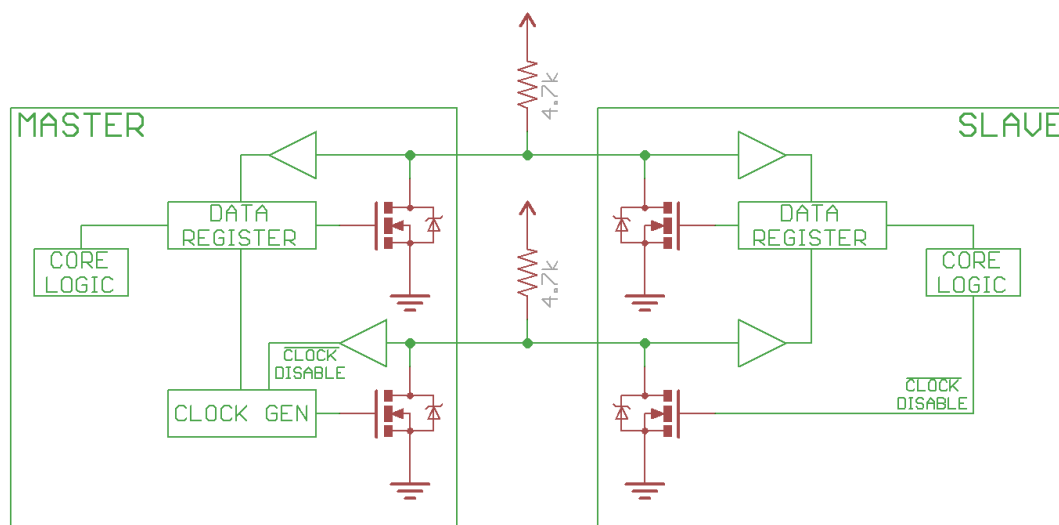
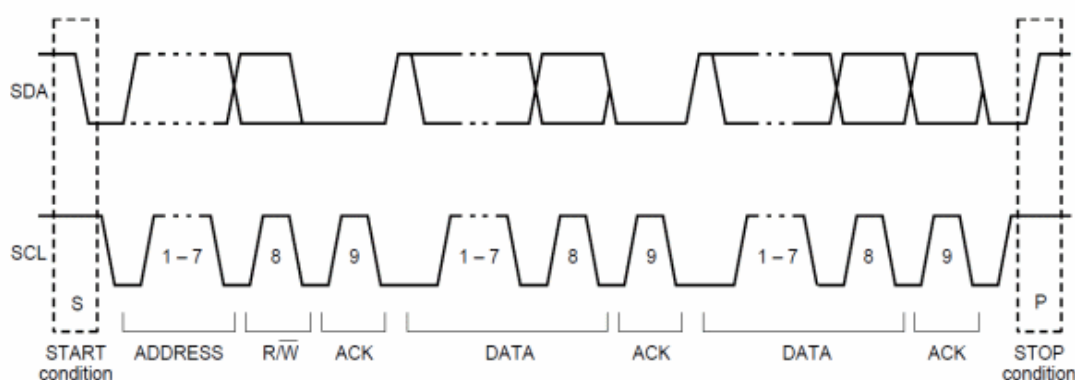


Figura 52 Schema interno dei dispositivi. Si noti i transistor configurati in open drain che necessitano della resistenza di pullup per lo stato logico 1

Ogni dispositivo collegato a queste linee è dotato di un indirizzo univoco, di 7 o 10 bit e può agire sia da master che da slave, secondo le funzioni previste al suo interno. Il master si occupa di iniziare la trasmissione e di generare la tempistica del trasferimento, mentre lo slave si occupa di iniziare la trasmissione e di generare la tempistica del trasferimento. Entrambe le classi possono inviare o ricevere dati secondo le seguenti modalità:

- I) A trasmette dati a B
  1. A(master) spedisce l'indirizzo di B(slave) sul bus
  2. A(master-transmitter) trasmette i dati a B(slave-receiver)
  3. A termina il trasferimento
- II) A vuole ricevere dati da B
  - 1) A(master) spedisce l'indirizzo di B(slave) sul bus
  - 2) B(slave-transmitter) spedisce i dati ad A(master-receiver)
  - 3) A termina il trasferimento

La comunicazione inizia quando il master imposta lo stato della linea SDA basso e lasciando SCL alto, avvertendo tutti i dispositivi sul bus che la trasmissione sta per iniziare. Successivamente, vengono inviati i 7 bit di indirizzo dello slave, seguiti da un bit detto R/W che indica se l'operazione sarà di lettura (alto) o di scrittura (basso). Nell'arco di tempo fra l'ottavo impulso di clock e il nono, il controllo di SDA viene ceduto allo slave interessato che deve abbassare la linea, confermando di aver ricevuto correttamente l'indirizzo. Se ciò accade, il master continuerà a generare impulsi di clock e sulla linea SDA, dipendentemente dallo stato del bit R/W, master o slave cominceranno ad inviare dati.



*Figura 53 i vari pacchetti di informazioni che vengono trasmessi tra il master e lo slave durante la comunicazione*

Al termine del byte di dati, lo slave invierà un altro bit di Acknowledge. Seguirà dunque uno o più byte di dati, oppure il comando di stop, definito dalla transizione di SDA da basso ad alto mentre SCL è alto.

Come detto in precedenza, il protocollo I2C consente di avere più dispositivi master sullo stesso bus, e possono esserci azioni che richiedono dati da più slave per lo stesso master, senza che altri interferiscano con la comunicazione. È quindi possibile attuare un comando di start ripetuto. Finito lo scambio di dati con un dispositivo, e senza impostare una condizione di stop, il master dovrà alzare la linea SDA, poi SCL e abbassare successivamente SDA, come se fosse un nuovo start. Non essendo presente nessuna condizione di stop che chiudesse la comunicazione, il vecchio master resta al comando del bus e può iniziare una nuova comunicazione con un nuovo dispositivo.

Vi possono essere casi in cui lo slave non riesce a soddisfare in tempo la richiesta del master perché il dato richiesto non è ancora pronto (la conversione analogica-digitale di un sensore non è ancora terminata) o perché un'operazione precedente non è stata completata.

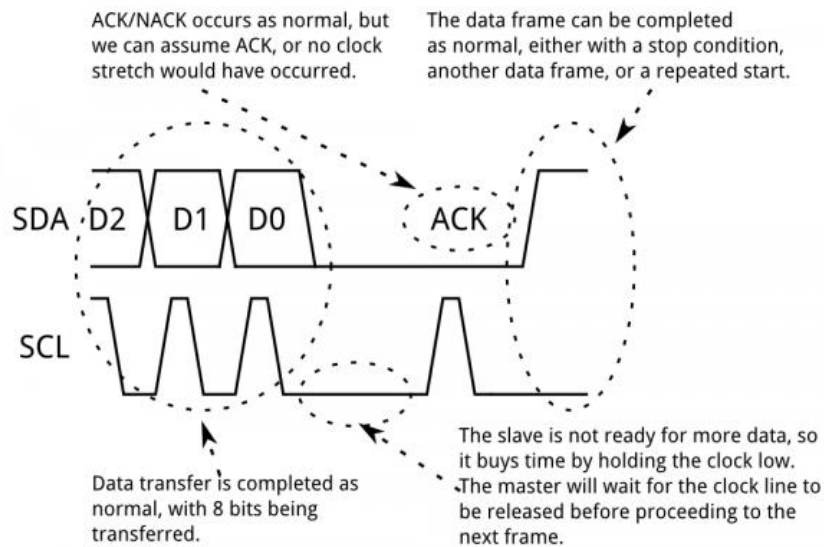


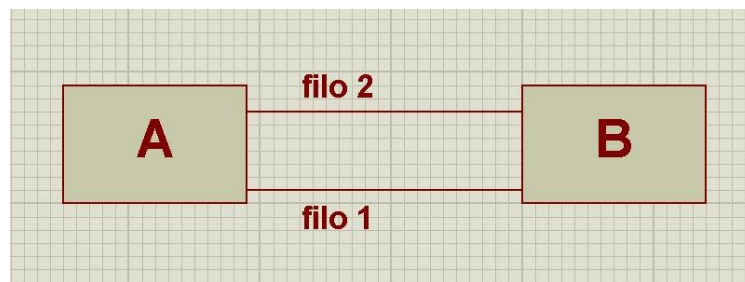
Figura 54 Esempio di clock stretching

Anche se normalmente la linea SCL è gestita dal master, in questi casi lo slave può forzare lo stato basso dell'SCL (**clock stretching**) per il tempo necessario a compiere l'azione.

### 3.2 UART

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) è un modulo elettronico in grado di comunicare in modo asincrono con un altro modulo sia trasmettendo che ricevendo dei dati.

Per “asincrono” si intende la caratteristica di non avere lacuna sincronizzazione fra i due moduli, ovvero nessun segnale particolare che tenga i moduli sincronizzati fra loro. Questo sistema risulta essere molto più semplice di un sistema sincrono, ma riscontra degli aspetti negativi come quelli di deriva in frequenza. Sia definito un dispositivo A e un dispositivo B collegati fra loro semplicemente da due linee elettriche come in figura 55.



*Figura 55 schema di connessione UART*

Ipotizzando che il dispositivo A abbia il ruolo di trasmettitore verso B che invece farà da ricevitore. Una di queste linee (filo 1) fa da riferimento per l'altro (normalmente detto massa), mentre l'altra linea viene posta dal dispositivo A ad una tensione che può essere o oppure una tensione predeterminata dal circuito stesso (3.3V o 5V per esempio); Tali valori sono dunque assimilabili ai due stati logici 0 e 1.

Come è facile pensare, la comunicazione seriale viene effettuata facendo variare lo stato logico sulla linea di dati ad una tempistica precisa, definita da un clock interno del circuito. Infatti, i due dispositivi integrano un clock che scandisce il tempo per la comunicazione e di conseguenza, la durata di ogni singolo bit.

Nella UART, questo clock viene definito come “**baudrate**”. Ogni scatto di clock consente alla linea di dati di trasmettere il bit successivo. I valori standard di baudrate sono: 110, 300, 600, 1200, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600,

76800, 115200, 230400, 460800 e 921600. Essi sono in parte multipli e sottomultipli in quanto ricavati originariamente da un quarzo tagliato ad una frequenza particolare: 14,745,600 Hz.

È utile ricordare che il baudrate differisce dalla quantità di dati inviati al secondo (bit/s). Infatti bisogna tenere a mente che per poter trasmettere 8 bit, sono necessari almeno 2 bit (uno di start e uno di stop) ed un eventuale bit di parità che fornisce un controllo di integrità dell'informazione trasmessa.

Tale protocollo sarà quindi definito dalle seguenti fasi:

1. Si definisce la velocità di trasmissione/ricezione dei dati (baudrate)
2. Si spezza l'informazione da trasmettere in stringhe di bit molto corte (es. 8 bit nel nostro caso) e si creano vari pacchetti.
3. I vari byte vengono impacchettati con un bit di start e con un bit finale detto di stop (possono essere utilizzati più bit di stop)
4. Opzionalmente può essere aggiunto un bit detto "bit di parità" per controllare l'integrità del pacchetto ricevuto.

Tutte queste fasi devono essere conosciute da entrambi i dispositivi prima della comunicazione (in fase di produzione o di configurazione), in quanto la decodifica avvera poi secondo quei parametri.

Ora immaginando di dover comunicare fra 2 Atmega328: Si vuole spedire 1 byte di informazioni ad un baudrate di 9600 baud. Ciò significa che:

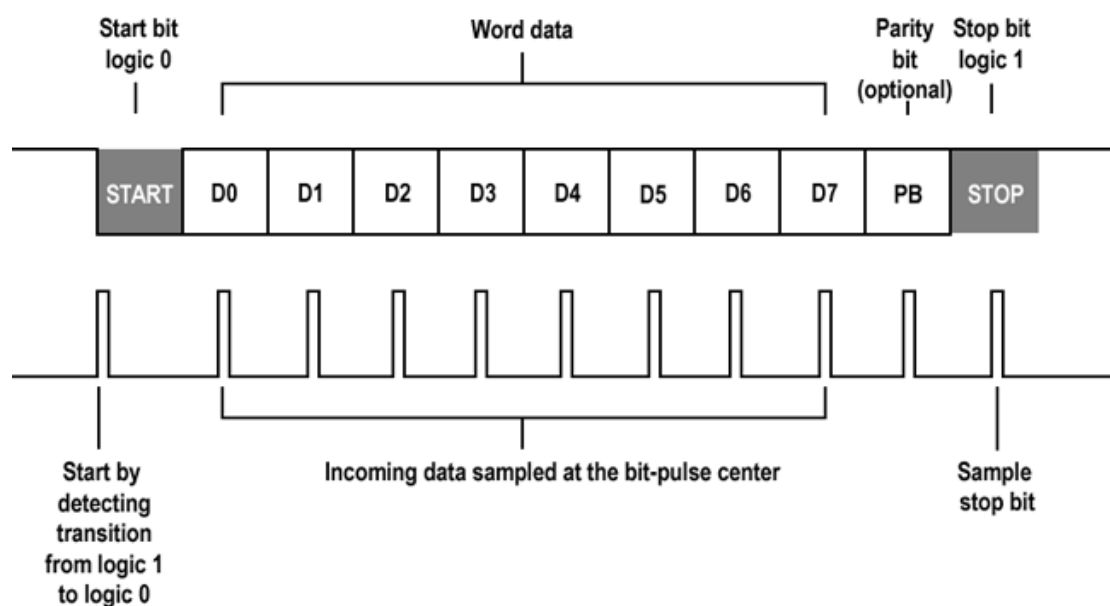
- Ogni "bit" ha lunghezza  $\frac{1}{9600} = 104.2 \mu s$
- Ogni pacchetto ha lunghezza  $104.2 \mu s * 10 = 1042 ms$
- Le informazioni trasmesse ogni secondo saranno quindi:  $\frac{1}{1042ms} = 960 \text{ byte/sec}$

Per analizzare la comunicazione invece, si parte dal bit di start: Esso permette a l'apparato ricevitore (B) di capire quando iniziano ad essere inviati i dati. Per far ciò, tenendo in considerazione che lo stato logico di quiete sulla linea è Vcc, il trasmettitore abbassa il livello di tensione a 0, provocando una variazione che il

ricevitore rileva. Il bit di start infatti, non è altro che un primo bit di contrasto al valore costante della linea.

A questo punto il trasmettitore può cominciare ad inviare i vari bit a cadenza predefinita dal baudrate. Come calcolato in precedenza per esempio, ogni bit avrà una durata pari a 104,2 microsecondi.

Terminati gli 8 bit, il trasmettitore invia il bit di stop, che risulta essere l'opposto del bit di start, quindi uno stato logico 1 permanente sulla linea di trasmissione.



*Figura 56 Trasmissione di 1 byte con UART, si distinguono i bit di start, il bit di conferma e il bit di stop*

Dal punto di vista del ricevitore B invece, esso controlla permanentemente la differenza di tensione fra le 2 linee (di trasmissione e di riferimento). Bisogna evidenziare che questo controllo viene fatto con una frequenza molto maggiore della frequenza di trasmissione, in modo da accorgersi immediatamente della variazione di stato. Quando vi è un cambiamento di stato sulla linea di trasmissione (bit di start):

1. B attende  $\frac{1}{2}$  periodo del bit per poter centrare il suo riferimento al centro del bit (ciò viene fatto per fare la misura quando la linea è stabile e non sta variando)
2. Per otto volte, B attende la durata del bit e salva lo stato logico presente sulla linea
3. Terminato l'ottavo bit, il ricevitore attende un altro bit e si rimette in attesa di un cambio di stato (questo bit infatti è il bit di stop, che ha uno stato logico uguale allo stato della linea in fase di attesa).

Discutendo invece degli svantaggi di questo protocollo, si denotano 2 pecche principali:

1. È necessario un confronto dei due dispositivi prima della comunicazione per decidere il baudrate da usare
2. L'intero processo si basa di fatto su due clock che, nella realtà sono leggermente diversi.

Gli effetti della diversità di clock da ricevitore e trasmettitore sono vari:

- In caso vi sia una grande differenza fra i baudrate, non è possibile effettuare trasmissione in quanto gli istanti di lettura sono completamente sfasati da quelli di trasmissione
- Se la differenza è sottile, o non viene regolato correttamente il flusso di dati al ricevitore, è probabilissimo ottenere dei dati incorretti come quelli in figura 57.

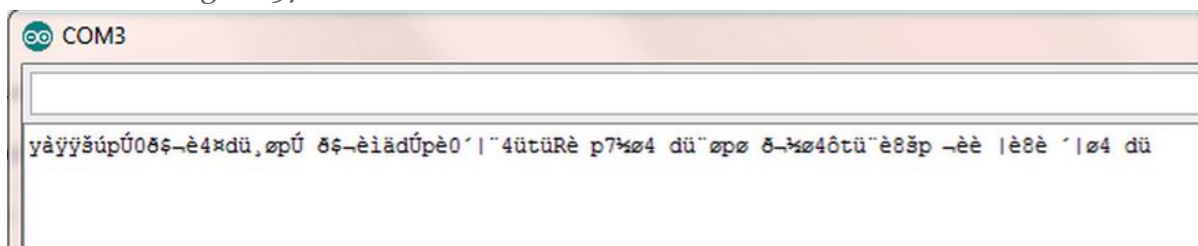


Figura 57 Differenze di baudrate causano l'arrivo di dati incorretti



### 3.3 SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) è un bus di comunicazione full-duplex seriale progettato per la comunicazione di un master con uno o più slave.

Il bus è formato da 4 linee:

1. **SCLK**: il clock seriale del bus che scandisce gli istanti in cui le informazioni vengono lette, ed emesse;
2. **MOSI**: la linea attraverso cui il master trasmette allo slave;
3. **MISO**: la linea attraverso cui lo slave comunica al master;
4. **SS**: (Slave Select) è un pin attivo basso che determina quale dispositivo slave sta comunicando con il master. Il numero di dispositivi che può supportare questo tipo di bus dipende da quanti pin disponibili ha il master per poter connettere gli slave.

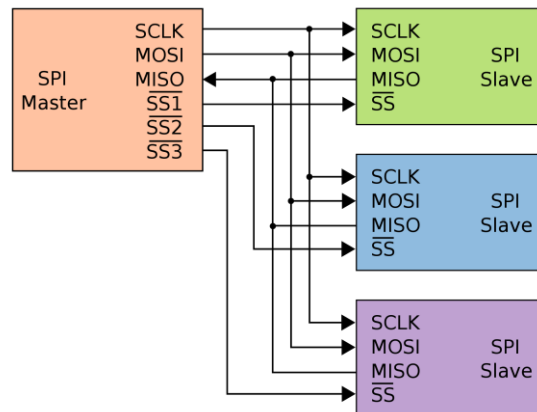


Figura 58 Schema del bus SPI

Come si può immaginare, il master è il dispositivo che comanda il sistema, e molto probabilmente si tratta di un microcontrollore. Esso è in grado di iniziare la sessione di trasmissione e generare il clock necessario per lo scambio di dati.

Lo slave è un dispositivo periferico che può ricevere ed inviare dati ma non può inizializzare una trasmissione. Il clock di comunicazione è fornito dal master che ne determina la velocità di comunicazione, e lo slave non ha accesso di controllo a tale linea.

In ogni caso non è possibile inserire più dispositivi master all'interno del bus, e ciò determina una semplicità nel tipo di protocollo che lo rende molto flessibile e variegato.

Il protocollo impone che il master avvii il clock sulla linea SCLK, e trasmetta una richiesta allo slave tramite la linea MOSI (Master-Out Slave-In).

Dopo un predefinito numero di impulsi, lo slave tramite la linea MISO(Master-in Slave-Out) invia uno o più byte di risposta. Essendo un protocollo full-duplex è possibile inviare e ricevere dati contemporaneamente, rendendo inoltre l'SPI molto veloce.

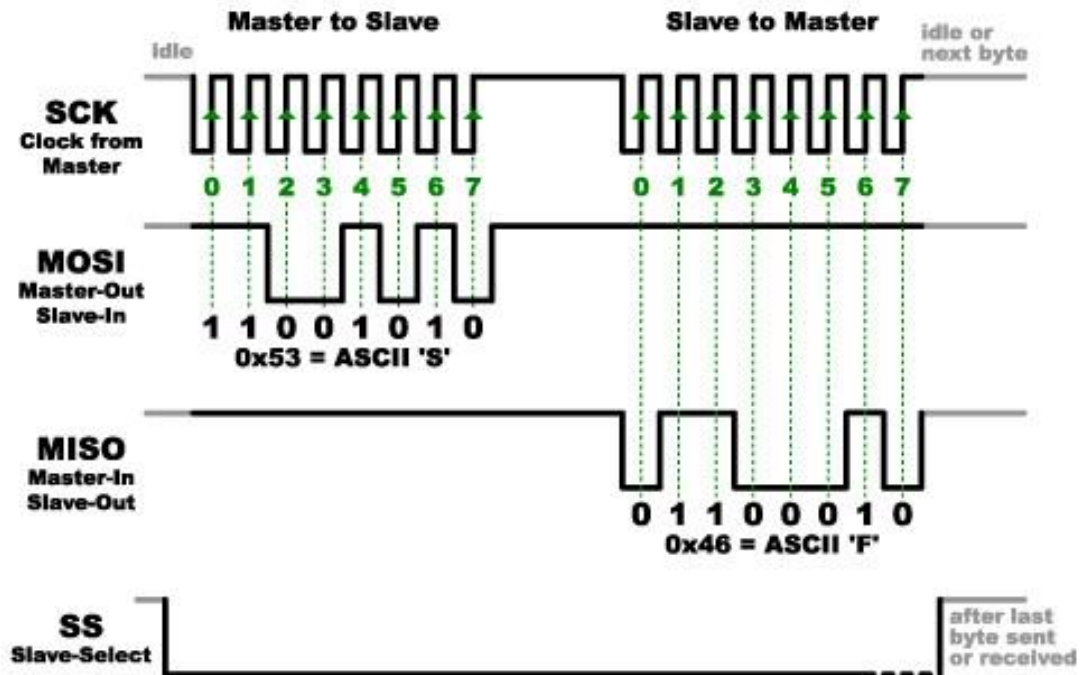


Figura 59 Esempio di comunicazione tramite SPI

# Capitolo 4. Analisi Matematica

## 4.1 RAPPORTO INCREMENTALE

Prima di parlare di derivata, bisogna conoscere la nozione di rapporto incrementale. Si definisce rapporto incrementale della funzione  $y = F(x)$  relativo al punto  $x_0$  e all'incremento  $h$  il rapporto fra l'incremento  $\Delta y$  della funzione  $F$  e l'incremento  $\Delta x$  della variabile indipendente:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} := \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

Il rapporto incrementale consente intuitivamente di misurare “quanto velocemente” sta variando la funzione al variare di  $x$ , attorno ad un punto  $x_0$ . Geometricamente, esso fornisce il valore del coefficiente angolare di una retta secante che passa per il punto  $x+h$  e  $x_0$ .

La derivata è definita come il limite del rapporto incrementale al tendere a 0 dell'incremento. Ossia essa consente di conoscere la velocità di variazione della funzione in ogni suo punto, o geometricamente, di avere la retta tangente ad ogni punto infinitesimo della funzione. La derivata è espressa come in figura:

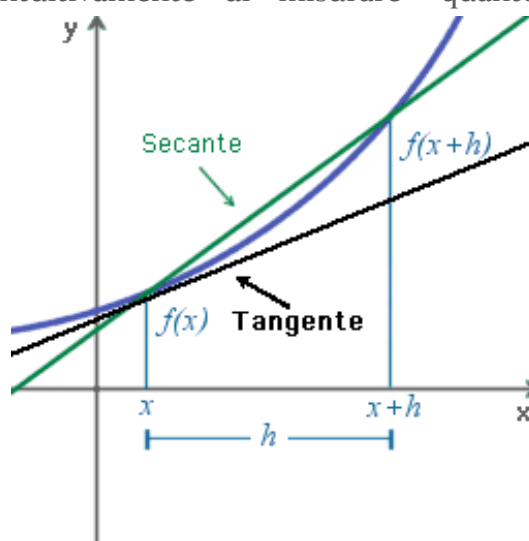


Figura 60 Il rapporto incrementale descrive la funzione secante. La derivata nel punto  $f(x)$  è la tangente

$$F'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}$$

La derivata è uno strumento che, anche nel robot è risultato fondamentale durante lo sviluppo del PID, ma ha enormi implicazioni nel mondo delle differenziali, utili per lo studio di molti fenomeni fisici.

## 4.2 INTEGRALE DI RIEMANN

L'Integrale è un operatore matematico che consente, data una funzione chiusa in un intervallo  $[a;b]$ , di conoscere l'area sottesa al suo grafico. Inoltre grazie al teorema fondamentale del calcolo integrale, si è dimostrato che l'integrale corrisponde esattamente ad una funzione primitiva di  $f(x)$ , quindi esso può

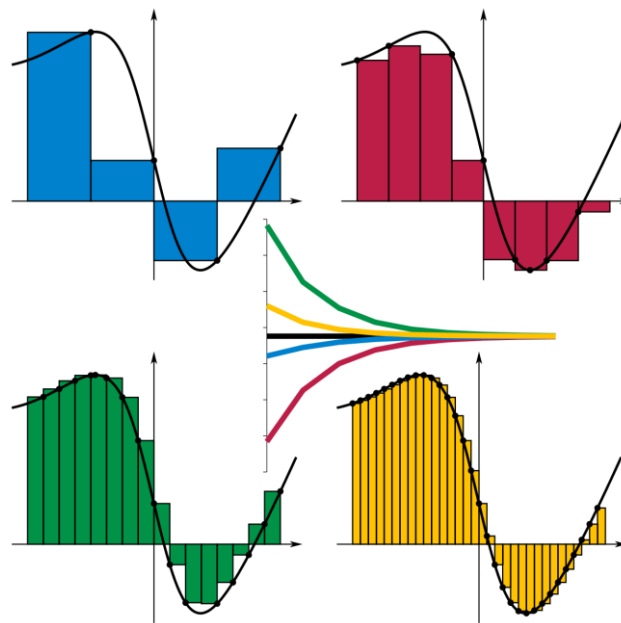


Figura 61 area di una funzione variando la grandezza della base di ogni segmento

essere usato come operatore inverso alla derivata. Per comprendere l'integrale senza passare per il concetto di anti derivata, analizziamo il procedimento più comune per l'integrazione, detto Integrale di Riemann.

Dato un intervallo  $[a;b]$  partizionato in  $n$  parti con ogni sotto intervallo indicato con  $[x_i; x_{i+1}]$  di cui la lunghezza del più lungo è definita come ampiezza della partizione, si definisce **somma di Riemann** la quantità:

$$\sum_{i=0}^{n-1} f(t_i)(x_{i+1} - x_i)$$

Il concetto alla base di questa operazione è quello di scomporre l'area di una funzione in diversi segmenti con base  $(x_{i+1}; x_i)$  e con altezza  $f(t_i)$ . In questo modo è possibile approssimare l'area sottostante alla funzione. Per avere una migliore approssimazione, sarà necessario rendere la base del segmento molto piccola, facendo tendere  $\delta$  a 0. Da ciò si ricava:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \sum_{i=0}^{n-1} f(t_i)(x_{i+1} - x_i) = \int_a^b f(x) dx$$

# Capitolo 5. Conclusioni

Lo sviluppo di questi robot è nato dall'idea di fornire una base evoluta e completa sul quale poter studiare e perfezionare hardware e software negli anni a venire.

Questo lavoro ha l'obiettivo di diventare una fonte di conoscenza per tutti quei ragazzi che, come me, vogliono investire molto del loro tempo per imparare e partecipare a questa fantastica competizione del robot soccer, che non solo regala una soddisfazione enorme a livello personale, ma anche a livello professionale.

Sono passati tre anni da quando vidi per la prima volta un robot calciatore e cominciai a domandarmi come funzionassero quegli "aggeggi", tre anni in cui impegnai mente, anima e corpo per apprendere e realizzare tutti gli obiettivi raggiunti fin qui.

Per cui voglio profondamente ringraziare i miei compagni di squadra di questa bellissima avventura: Fabio Ricci, Andrea Valeri e Alessio Di Brigida con i quali ho avuto la possibilità di maturare sotto ogni aspetto. Ringrazio specialmente la prof.ssa Maria Punturo che in questi tre anni ha fatto moltissimo per la scuola, ma soprattutto per noi studenti, fornendo un supporto fisso e un'area di lavoro ideale per poter lavorare a questo e a molti altri progetti. Un enorme grazie va a tutti i miei professori che si sono dimostrati disponibili e hanno creduto in ciò che facevo, aiutandomi quando potevano e consentendomi di assentarmi dalle loro lezioni per proseguire con il progetto. Un grazie va anche e soprattutto al personale ATA della scuola che mi ha consentito di rimanere a scuola anche oltre l'orario dovuto.

A voi ragazzi che siete arrivati fin qui vi dico, non perdetevi nessuna occasione in questi anni importantissimi.... lavorate duramente senza fermarvi mai e date SEMPRE sfogo alla vostra curiosità di conoscere. Gli altri, ma soprattutto voi lo apprezzerete tanto.

*“Stay hungry, stay foolish”(Steve jobs)*



---

<sup>i</sup> [http://www.robocupjr.it/4/wp-content/uploads/2016/02/soccer\\_2016.pdf](http://www.robocupjr.it/4/wp-content/uploads/2016/02/soccer_2016.pdf)

<sup>ii</sup> [http://maxbotix.com/documents/LV-MaxSonar-EZ\\_Datasheet.pdf](http://maxbotix.com/documents/LV-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf)

<sup>iii</sup> <http://www.tremba.de/zylindermagnete/db-zylindermagnete-ZMF-2551d.002.pdf>