



UNIVERSITÀ DI BRESCIA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Dipartimento di Elettronica per l'Automazione

Laboratorio di Robotica Avanzata
Advanced Robotics Laboratory

Corso di Robotica
(Prof. Riccardo Cassinis)

M.A.R.M.O.T. Robot
omnidirezionale

Elaborato di esame di: **Simone Foglio, Michele Meneghello**

Consegnato il: **29 maggio 2001**

Sommario

Il lavoro proposto si inserisce nell'ambito dei robot autonomi omnidirezionali. In particolare è stata curata la costruzione della struttura meccanica di un robot che utilizza ruote di tipologia detta "svedese". Non è stato possibile trovare in commercio componenti già realizzati adatti alla particolare applicazione richiesta, per cui, escludendo i motori e gli ingranaggi di trasmissione, tale robot è stato interamente realizzato partendo da materiali grezzi o semilavorati.

1. Introduzione

M.A.R.M.O.T. (Mobile Autonomous Robot for Multiple Office Tasks) è un progetto di robot omnidirezionale pensato per esperimenti di navigazione presso l'Università di Brescia.

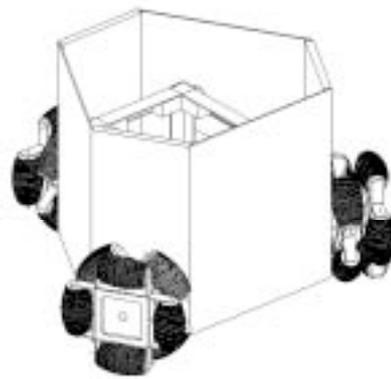


Figura 1: M.A.R.M.O.T.

Un robot omnidirezionale ha una conformazione tale da potersi muovere, indifferentemente, in tutte le direzioni del piano su cui appoggia. Nel caso di un robot a ruote, ciò è reso possibile dall'utilizzo di ruote particolari, che abbiano, cioè, gradi di libertà aggiuntivi rispetto a quelli di una ruota nella sua accezione più classica.

Per questo progetto sono state impiegate ruote di tipo "svedese" sono caratterizzate da un profilo costruito mediante rulli con capacità di rotazione lungo l'asse perpendicolare a quello della ruota vera e propria. Tale conformazione aggiunge un grado di libertà nella direzione ortogonale a quella del movimento della ruota.

2. Il problema affrontato

Il lavoro svolto comprende il progetto e le lavorazioni meccaniche necessarie alla costruzione della struttura fisica del robot, partendo dalle specifiche richieste.

Tale struttura deve sostenere le batterie, i motori, il sistema di trasmissione e, inoltre, deve essere adatta ad accogliere gli azionamenti dei motori, i sensori, l'elettronica di controllo e eventuali dispositivi di uso futuro, quali, ad esempio, sistemi di visione.

Deve essere possibile, quindi, aggiungere eventuali strutture su cui disporre tutta la parte elettronica, che verrà sviluppata in futuro.

Lo studio di fattibilità ha sostanzialmente riguardato le ruote, che costituiscono l'aspetto peculiare del robot. In particolare dovevano essere soddisfatti determinati vincoli, quali:

- altezza da terra, fissata a 30 mm in modo da permettere il superamento di piccoli ostacoli;
- ingombro massimo, in modo da permettere un agevole passaggio attraverso le porte (dato che la luce delle porte, tipicamente, è di circa 800 mm si è optato per un diametro di ingombro inferiore a 500 mm);
- impiego di motori step ("passo-passo") per la motorizzazione, in modo da poter realizzare un controllo interamente digitale senza la necessità di impiegare complessi azionamenti che richiederebbero un complesso controllo in doppio anello chiuso (per quel che riguarda le velocità e la posizione) costosi da acquistare;
- architettura basata su robot a tre ruote anziché a quattro, poiché la quarta ruota risulterebbe ridondante rispetto ai gradi di libertà possibili nel piano e ciò comporterebbe un problema ulteriore di controllo.

3. La soluzione adottata

Una volta che sono stati definiti i requisiti fondamentali, si è passati alla fase progettuale vera e propria.

In questa fase sono state operate le principali scelte, sulle dimensioni, le masse e i dettagli delle ruote, il tutto considerando le possibili ripercussioni sulla complessità della realizzazione pratica, sacrificando, se necessario, la soluzione ottima a vantaggio della semplicità di realizzazione. Si è tenuto conto, inoltre, dei limiti delle attrezzature, che sarebbero state impiegate nella lavorazione, e del fatto di essere noi ad utilizzarle e non operatori altamente specializzati.

La progettazione del robot si è sviluppata in modo incrementale, sviluppando i vincoli iniziali e sottoponendo a revisioni successive la bozza di progetto ottenuta.

È stato adottato questo modo di procedere in quanto ci si è resi conto che le scelte iniziali condizionavano la soluzione dei problemi successivi, obbligandoci a scelte troppo elaborate. In questi casi è risultato più efficiente operare delle revisioni al progetto, valutando le possibilità alternative.

3.1. Progetto iniziale

3.1.1. Architettura generale

L'architettura impone che le ruote vengano a trovarsi disposte ai vertici di un triangolo equilatero. Questa sarebbe la soluzione "ideale", in pratica l'esigenza di avere una struttura che supporti l'albero della ruota, il motore e la trasmissione impone di sostituire la forma triangolare con una esagonale.

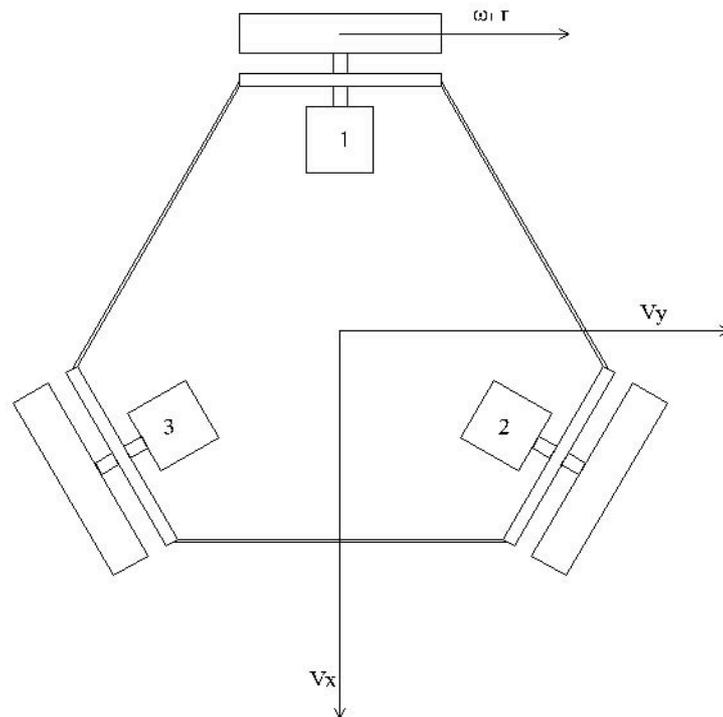


Figura 2: Schema architettura generale.

A questo punto le equazioni che descrivono la soluzione del problema cinematico risultano essere le seguenti:

$$V_x = \frac{\sqrt{3}}{3} r (\omega_2 - \omega_3)$$

$$V_y = \frac{1}{3} r (2\omega_1 - \omega_2 - \omega_3)$$

$$\omega_T = \frac{1}{3} r \left(\frac{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3}{R} \right)$$

3.1.2. Ruote

In letteratura si può trovare, per una ruota svedese, il seguente schema:

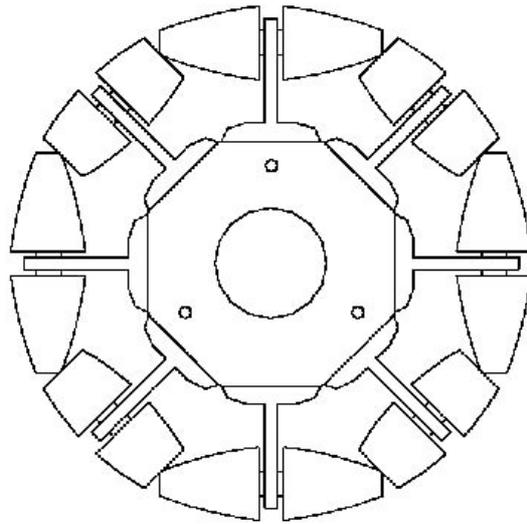


Figura 3: Ruota “svedese” classica.

Una ruota di questo tipo, quindi, è caratterizzata dal fatto di essere composta da una corona di rulli, liberi di ruotare attorno ad un asse ortogonale a quello della ruota.

Un problema che si presenta nell’utilizzo pratico di una ruota di questo tipo, consiste nella scarsa rigidità e robustezza dei supporti dei rulli, vista la loro sezione così ridotta. Per ovviare a questo problema si è optato per un supporto “a forcella”.



Figura 4: Schema semiruota con supporti “a forcella”.

Per poter disporre di un profilo perfettamente circolare, in modo da garantire continuità di appoggio, la ruota è stata realizzata accoppiando due semiruote identiche.

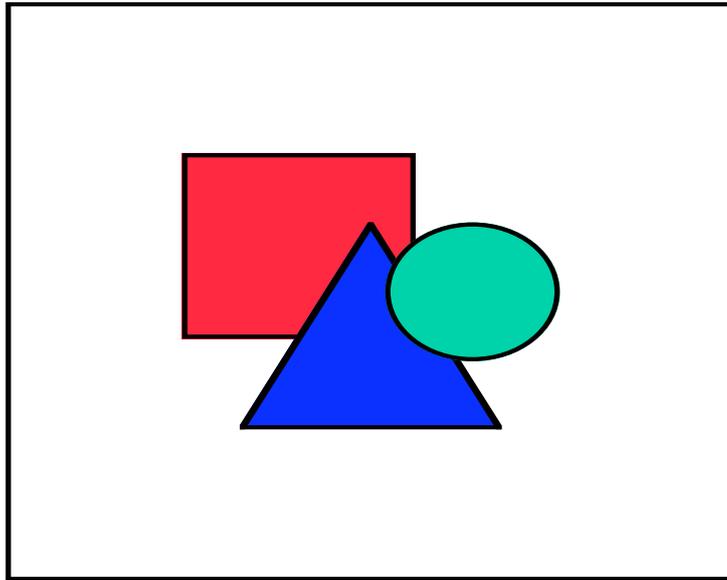


Figura 5: Schema delle due semiruote accoppiate.

La scelta di supportare i rulli con delle forcelle di piccolo spessore (per questioni di ingombro) ci ha costretti a far ruotare il rullo su un perno passante attraverso il rullo stesso. In questo modo, considerando che le forcelle sono solidali con il mozzo, è necessario poter disporre dello spazio adeguato per infilare e sfilare tale perno.

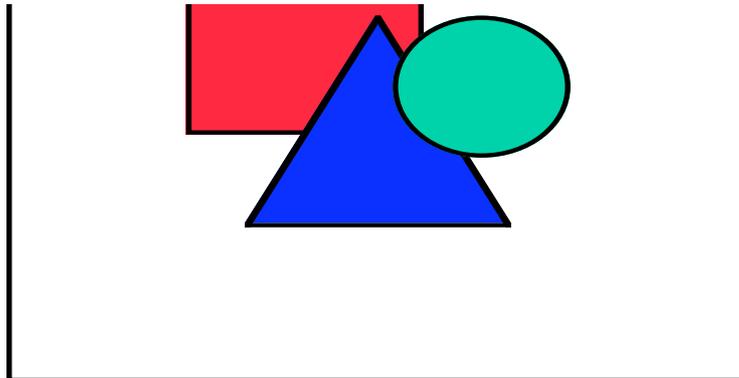


Figura 6: Sezione rullo completo di perno e boccole.

A seguito di questa particolare esigenza, il numero di rulli da impiegare per ogni semiruota è stato limitato a quattro. È stata, invece, scartata la soluzione con tre rulli, in modo da semplificare la costruzione del mozzo (quadrato anziché triangolare).

Lo schema finale, quindi, risulta costituito da due semiruote, con mozzo quadrato, montate affiancate l'una all'altra con uno sfasamento di 45° , in modo che i rulli della seconda semiruota coprano le discontinuità del profilo lasciate dalla prima.

Per quanto riguarda il problema relativo all'attrito dei perni dei rulli, dopo aver scartato i cuscinetti a sfera, per motivi di costo, di ingombro e di peso, la scelta è caduta su bussole flangiate in lamiera rivestita in teflon (o materiale plastico simile), che sono disponibili, in commercio, a partire da un diametro interno di 6 mm (10 mm il diametro esterno).

Questi rulli sono progettati per ruotare su pavimentazioni lisce, tuttavia, per permettere il superamento delle piccole discontinuità che si possono incontrare, è stato necessario valutare il diametro minimo del rullo.

$$F \cdot (r - h) = \frac{m \cdot g}{3} \cdot \sqrt{r^2 - (r - h)^2} =$$

$$= \frac{m \cdot g}{3} \cdot \sqrt{r^2 - r^2 + 2 \cdot r \cdot h - h^2} = \frac{m \cdot g}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot h - h^2}$$

$$\frac{F}{m} = \frac{g}{3} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot r \cdot h - h^2}}{r - h}$$

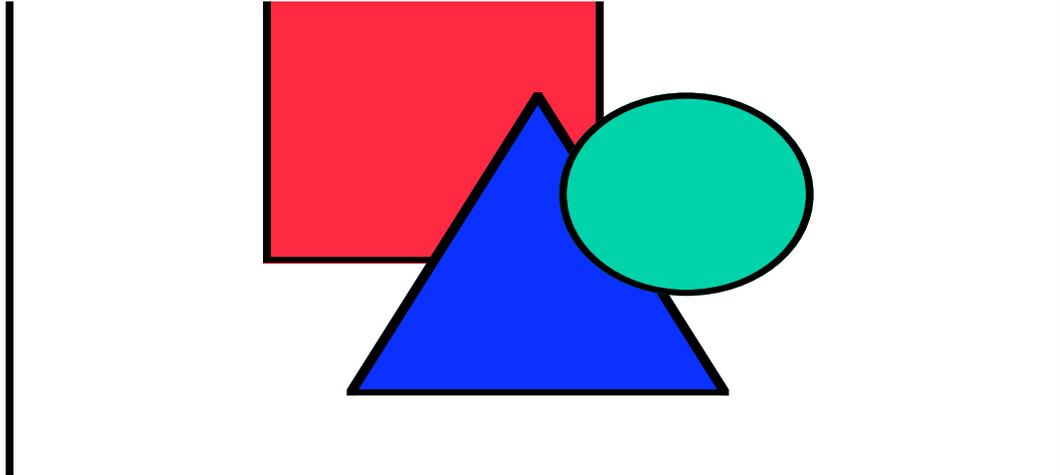


Figura 7: Valutazioni diametro rullo in funzione degli ostacoli da superare.

Queste considerazioni ci hanno indotto a utilizzare un diametro minimo del rullo pari a 20 mm.

Il raggio della ruota è stato invece stimato partendo dal vincolo dell'altezza da terra (30 mm), considerando l'ingombro del motore, montato in asse sulla ruota, pari a 60÷80 mm, arrivando quindi ad un diametro di 150 mm, che permette di soddisfare anche il vincolo, precedentemente calcolato, sul raggio minimo del rullo.

Non sarebbe stato possibile raggiungere l'obiettivo di ottenere un sufficiente coefficiente d'attrito tra i rulli e il pavimento, realizzando i rulli in maniera integrale.

L'utilizzo di una gomma, anche di durezza elevata, sarebbe risultato improponibile, a causa di una difficile lavorabilità. Al contrario, la scelta di un materiale plastico, facilmente lavorabile, non avrebbe garantito un sufficiente coefficiente d'attrito.

La soluzione scelta, quindi, è stata quella di realizzare un rullo in materiale plastico e, successivamente, aumentarne l'aderenza mediante un rivestimento in gomma (tubo di silicone).

Tale scelta ha condizionato il progetto del profilo del rullo stesso, in quanto la forma geometrica richiesta dalla conformazione della ruota andava ritoccata per tenere conto dello spessore della gomma, spessore che varia lungo l'asse del rullo, assottigliandosi in corrispondenza del centro, dove il raggio di curvatura è più elevato che non ai bordi.

Tale fase del progetto, quindi, è stata caratterizzata da una parte di calcolo della deformazione della gomma, che ci ha permesso di determinare dei coefficienti approssimativi, che sono poi stati 'tarati' tramite la realizzazione fisica di prototipi di rullo.

A questo punto la ruota è stata riprogettata, per quanto riguarda mozzo e forcella, in modo da poter utilizzare materiali disponibili su un catalogo di Al, tenendo presente che l'angolo di circonferenza coperto dal rullo doveva essere maggiore di 45°. Il materiale è stato scelto in base a leggerezza, lavorabilità e robustezza.

Alla fine di questa prima fase abbiamo capito che le scelte fatte non erano appropriate, poiché:

1. i materiali scelti non erano facilmente reperibili in commercio nelle misure da noi scelte;
2. la lunghezza decisa per i rulli avrebbe reso problematico il rivestimento in gomma, a causa dell'eccessiva differenza tra il diametro minimo e quello massimo;
3. sarebbe stato necessario effettuare delle lavorazioni aggiuntive sul profilato d'alluminio, di altezza eccessiva rispetto alle nostre esigenze.

Queste tre motivazioni hanno portato alla riduzione della dimensione del mozzo da 70 mm a 66 mm.

3.1.3. Telaio

Conoscendo il diametro delle ruote e un ingombro di massima di motori + giunto montati in asse, abbiamo deciso di optare per una struttura esagonale, interamente in alluminio, costituita da 3 piastre portanti di spessore 10 mm, larghezza 150 mm e altezza sufficiente per contenere le batterie (circa 220 mm) e 3 piastre di lamiera che le congiungessero.

Si è ottenuto, quindi, un esagono non regolare, con tre lati lunghi alternati a tre lati più corti, in modo che montando le ruote sui lati più corti queste si trovano ad essere ai vertici di un triangolo equilatero.

Il tutto viene chiuso nella parte superiore e inferiore da due lamiere debitamente sagomate (esagonale inferiore e circolare superiore).

3.1.4. Motori e batterie

La scelta dei motori è caduta sul modello di taglia più grossa, tra quelli aventi una f.c.e.m. tale da consentire un'alimentazione direttamente a batteria (senza step-up)..

Tenendo presente la necessità di avere una capacità elevata e, allo stesso tempo, un ingombro contenuto (in modo da rientrare nella pianta del robot), si è optato per una configurazione a due batterie da 12V – 12 Ah collegate in serie.

3.2. Progetto definitivo

Allo scopo di ridurre la massa, che risultava eccessiva (più di 40 Kg), e allo stesso tempo predisporre la struttura per accogliere un alloggiamento estraibile per le batterie, è stata necessaria una pesante revisione del progetto.

In particolare sono state riviste le seguenti caratteristiche:

- alloggiamento batterie
- dimensioni meccaniche della pianta del robot;
- differente disposizione dei motori ed introduzione di una trasmissione indiretta con riduzione;

- differente materiale per le piastre portanti.

3.2.1. Alloggiamento batterie

Necessario per:

- maggiore facilità di inserimento-estrazione delle batterie (in modo da avere il pacchetto di scorta carico) ;
- indispensabile tenerle unite (sono due e bisogna considerare il peso).

È stato progettato un supporto in alluminio che rispondesse ai requisiti di:

- robustezza, in modo da reggere il peso delle due batterie (8,2 Kg);
- compattezza, in modo da avere lunghezza e larghezza (il problema dell'altezza risulta secondario) tali da poter essere alloggiato all'interno della struttura;
- facilità di inserimento-estrazione;
- assenza di cablaggi elettrici / facilità di realizzazione del contatto elettrico.

Poggia su due binari mediante due cuscinetti a sfera.

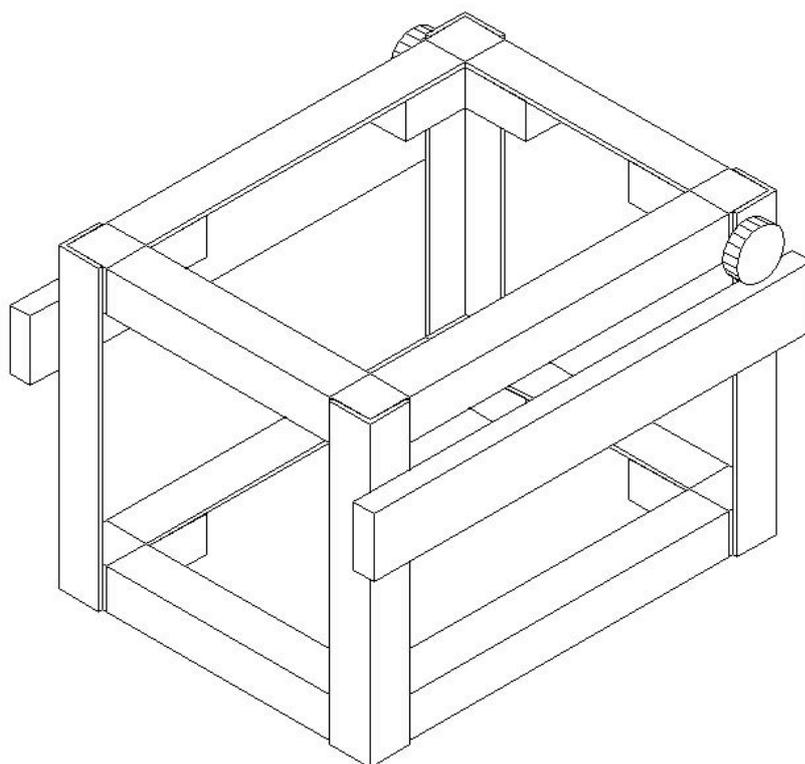


Figura 8: Vista schematica 3D dell'alloggiamento batterie poggiate sui binari

I due binari sono ancorati ai lati della struttura esagonale del robot mediante staffe di sostegno.

È, inoltre, previsto un coperchio montato sulla slitta stessa che si va ad incastrare con un'apertura ricavata su una delle facce della struttura esagonale.

Il contatto è stato ricavato da un contatto elettrico per portelli di automobile, mentre il funzionamento del circuito è sorvegliato da un fusibile alloggiato in un sezionatore.

3.2.2. Architettura

Dopo aver fissato la posizione del pacco delle batterie al centro della pianta del robot, si è proceduto al ritocco delle dimensioni dei lati dell'esagono.

Siamo giunti alla forma esagonale con i lati diseguali in quanto le piastre portanti strette garantivano maggiore leggerezza e rigidità, fornendo sostegno all'apparato motore-trasmissione-ruota. Allo stesso tempo le piastre di congiunzione, in lamiera d'alluminio, venivano ad avere una larghezza sufficiente per permettere di ricavare la finestra di inserimento-estrazione delle batterie.

Complessivamente la dimensione del robot risultava contenuta in quella massima, stabilita nei vincoli.

3.2.3. Posizione motori

Considerando il fatto che la massa delle batterie corrisponde a circa il 50% della massa complessiva, per posizionare il più in basso possibile il baricentro del robot, è necessario installare le batterie nella parte inferiore della struttura.

Allo stesso tempo, questa soluzione ha reso possibile inserire una trasmissione indiretta con rapporto di riduzione.

3.2.4. Trasmissione

La trasmissione a cinghia dentata è stata scelta per le sue peculiarità, dato che questo tipo di trasmissione è in grado di trasmettere elevate coppie a qualsiasi ω , non richiedendo elevate forze di tensionamento, inoltre essa presenta un ingombro decisamente ridotto.

La componentistica base standard (pulegge e cinghie) è facilmente reperibile in commercio a costi ridotti, e richiede lavorazioni di poco conto per essere adattata alla particolare applicazione.

Particolare di non poca importanza, inoltre, consiste nel peso dei componenti, che è compatibile con applicazioni di questo tipo (una riduzione meccanica ad ingranaggi, o a catena, avrebbe comportato un peso decisamente superiore).

Il passo della cinghia è stato, invece, scelto tenendo in considerazione l'esiguità degli spazi disponibili (passo grande implica puleggia condotta grande, a parità di Z) e l'esigenza di realizzare un rapporto di trasmissione discretamente ridotto.

Il rapporto di trasmissione di circa $1/3$ è stato scelto in modo da:

- massimizzare la coppia trasmessa all'albero della ruota;
- garantire che alla velocità massima prevista per il robot (circa 1 m/s) la ω dei motori non fosse tanto elevata da non consentire ai motori di erogare una coppia sufficiente.

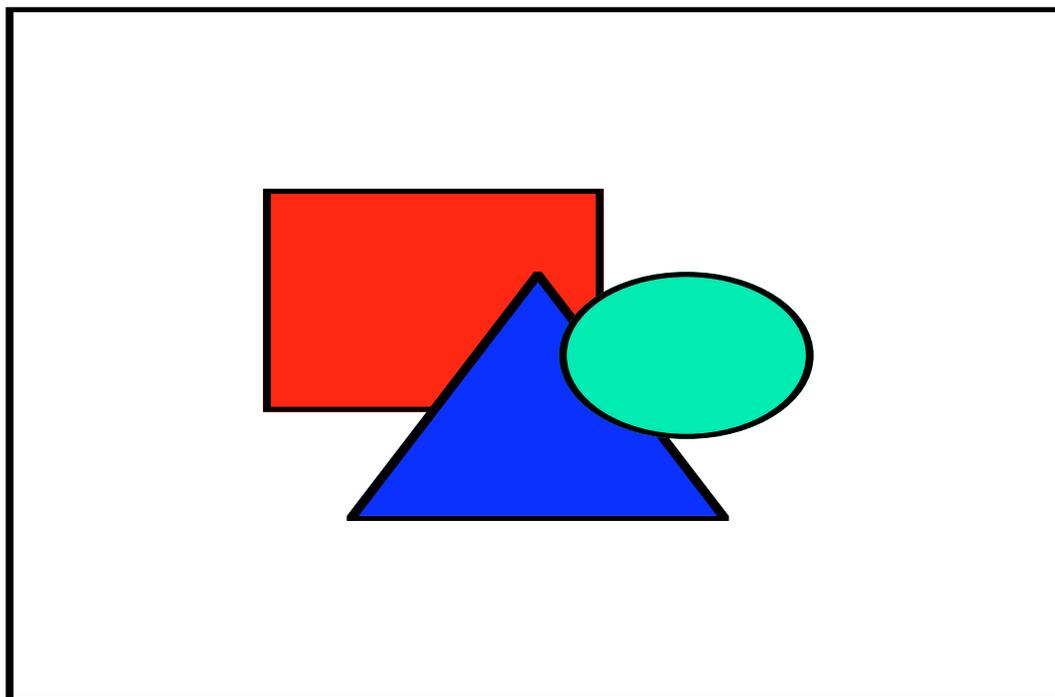


Figura 9: Curve coppia potenza dei motori installati (con azionamento RTA).

Dato che la dimensione minima del pignone sul motore non poteva essere arbitrariamente piccola si è optato per un rapporto 11:34.

In modo da sveltire le operazioni di selezione delle cinghie è stato realizzato un piccolo programma di calcolo in MATLAB che dati gli Z delle due pulegge scelte e l'interasse che si vorrebbe realizzare restituisce la cinghia più appropriata e l'interasse effettivo che si avvicina di più a quello scelto. Per il listato fare riferimento alla documentazione allegata.

3.2.5. Telaio

Il telaio del robot è costituito da tre elementi fondamentali

- piastre portanti
- piastre di congiunzione
- rinforzi

Le piastre portanti devono sopportare il peso del apparato motore-trasmissione-ruota. Le ruote, montate a sbalzo, richiedono una piastra di fissaggio sufficientemente rigida per evitare flessioni macroscopiche. Lo stesso vale per i motori, non tanto per il loro peso o per la coppia sviluppata, quanto per la tensione della cinghia che collega la puleggia posta sull'albero motore a quella posta sull'albero ruota.

Nelle piastre in materiale plastico sono state effettuate delle forature in modo da ricavare:

- una sede per il cuscinetto della ruota (con precisione sufficiente da garantire il centraggio);
- asole per la regolazione della posizione dei motori (in modo da regolare la tensione della cinghia);

- scanalature di appoggio per le lamiere laterali (in modo da garantire un montaggio preciso senza richiedere continue misurazioni) senza presentare un'antiestetica sovrapposizione tra la lamiera e la piastra.

Le lamiere di congiunzione, sagomate con 2 labbri (di angolo opportuno) vengono fissate alle piastre portanti con 5 viti (il numero è stato scelto in modo che non si verificassero deformazioni nella zona di contatto).

La disposizione su due assi è invece legata alla necessità di conferire rigidità all'intera struttura, dato che fori allineati avrebbero costituito una sorta di "cerniera".

La struttura finale risulta, quindi, dotata di una buona rigidità torsionale ma non dimensionale. Per ovviare a questo inconveniente sono stati introdotti, in fase di progetto, dei rinforzi superiori e inferiori.

3.2.6. Albero ruote

La scelta dei cuscinetti a sfera per l'albero ruota è stata quasi obbligata a causa della massa elevata e del montaggio a sbalzo.

Per avere una buona rigidità era necessario affiancare due cuscinetti a sfera oppure optare per un altro tipo di cuscinetto (per esempio a rullo o a botte).

Per questioni di economicità, dimensioni e peso, la scelta è caduta su cuscinetti a sfera a doppia corona.

L'ancoraggio di questi alla struttura è realizzato mediante una flangia che li comprime nella sede ricavata nella piastra.

Questa flangia (di forma particolare per questioni di peso) ha un foro del diametro del cuscinetto, con tolleranza H7, di profondità pari all'altezza del cuscinetto (meno un decimo) e 3 fori attraverso i quali le viti lo ancorano alla struttura.

Viste le ridotte coppie in gioco, l'ancoraggio della puleggia alle 2 semiruote è effettuato mediante grani M5 con sede nell'albero. In modo da garantire il trascinarsi ma, soprattutto, di evitare problemi di in-out..

Per quanto riguarda il movimento lungo l'asse del cuscinetto, sono stati previsti dei distanziali calibrati (in materiale plastico) tra ruota e cuscinetto e tra cuscinetto e puleggia, in modo da mandare il tutto a pacco.

3.2.7. Supporto batterie

Come già detto in precedenza, l'alloggio delle batterie scorre su due guide in materiale plastico (per motivi di leggerezza), sagomate in modo da garantire l'appoggio ed evitare lo sfilamento trasversale.

Il fissaggio al telaio è realizzato mediante supporti progettati in modo tale da garantire la regolazione verticale mediante una vite e controdado di bloccaggio. Per consentire questa regolazione i fori di fissaggio delle guide al supporto sono assenti.

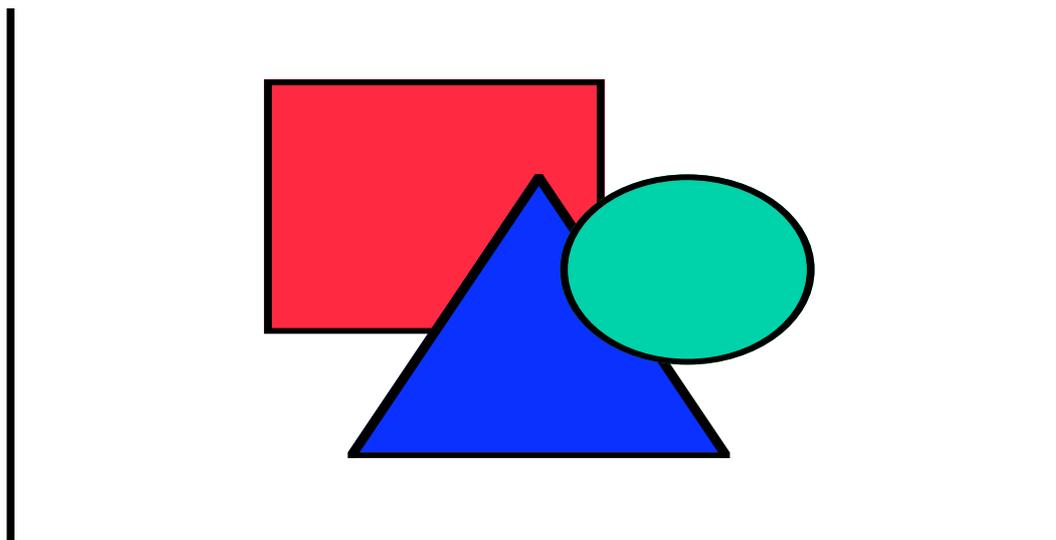


Figura 10: Vista in sezione binario batterie e supporto. Dettaglio dell'asola sul binario.



Figura 11: Vista dei supporti anteriori e posteriori.

I supporti posteriori delle guide sono ancorati in modo scorrevole rispetto alle piastre di congiunzione. Queste, essendo divergenti, consentono di realizzare una regolazione di larghezza e un'orientazione delle due guide.

A causa di questa doppia regolazione, la guida è dotata, nella parte posteriore, di un'asolatura di grandi dimensioni, nella quale si inserisce una piastra asolata, in modo da garantire la regolazione in entrambe le direzioni.

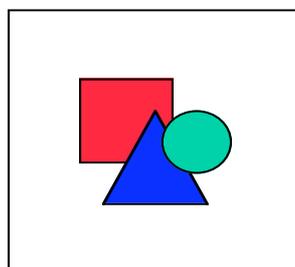


Figura 12: Asolatura binario.

3.3. Fase costruttiva

3.3.1. Attrezzatura

I paragrafi seguenti costituiscono una breve descrizione delle principali attrezzature da noi utilizzate per la realizzazione del robot. Tutte le macchine sono di tipo tradizionale (non CN) senza l'ausilio di visualizzatori di quota.

3.3.1.1 Tornio

Macchinario per ricavare superfici cilindriche o di tronco di cono, che possono essere interne o esterne, a seconda del tipo di utensile utilizzato. L'oggetto da lavorare (in gergo meccanico "il pezzo") ruota, mentre l'utensile (che ha una forma simile a quella di una lama) lo lavora da fermo.

Il pezzo viene chiuso in un mandrino autocentrante, assimilabile a quello di un qualsiasi trapano, ma di dimensioni maggiori (fino ad un diametro di 250 mm) che può essere di tipo a 3 o a 4 griffe. I pezzi cilindrici possono essere lavorati con entrambi (anche se nella norma è preferito quello a 3), mentre i pezzi poligonali devono avere un numero di lati multiplo intero del numero di griffe del mandrino.

Il carrello portautensili può essere mosso dall'operatore in 2 direzioni ortogonali fra loro (la prima lungo l'asse di rotazione del pezzo, mentre la seconda lungo l'asse ortogonale a quest'ultima). Il carrello viene mosso mediante viti e cremagliere comandate da volantini, che riportano una graduazione (5 centesimi di millimetro nel nostro caso).

Attrezzature, non convenzionalmente associate a questa macchina ma che si sono rese necessarie per poter effettuare le lavorazioni a noi necessarie, sono state le seguenti:

- smerigliatrice dritta, associata ad una mola sottile di grande diametro e piccolo spessore, per ricavare le sedi degli anelli d'arresto nei perni dei rulli;
- utensile speciale, per ricavare il profilo di arco di circonferenza dei rulli.

3.3.1.2 Fresatrice

Macchinario per ricavare superfici piane, asole e forature di precisione. In questo caso il pezzo è staffato (ancorato) ad un piano apposito (banchina) che può essere mosso rispetto all'utensile lungo i tre assi cartesiani, con l'impiego di indicatori graduati.

L'utensile di forma cilindrica dotato, di uno o più taglienti, viene mantenuto in rotazione.

A seconda della configurazione della macchina, esso può essere montato con l'asse di rotazione parallelo o ortogonale al piano di staffaggio, permettendo lavorazioni di diverso genere. L'unico utensile particolare da noi utilizzato è stato un mandrino speciale, dotato di regolazione di ampiezza del foro, necessario alla realizzazione delle sedi dei cuscinetti, all'interno delle piastre portanti.

3.3.1.3 Trapano a colonna (maschiatore)

Del tutto simile ad un trapano convenzionale (portatile) si differenzia da quest'ultimo poiché permette lo staffaggio del pezzo. Il vantaggio è dato dal fatto che l'operatore può facilmente regolare la profondità di foratura, in quanto il mandrino è montato su un canotto scorrevole e rigido, che garantisce l'allineamento permanente della punta con il pezzo.

La flessibilità delle punte da trapano e del sistema canotto-mandrino non permette di ottenere forature di precisione (peculiarità che spetta a macchinari più robusti, pesanti e costosi, quali la fresatrice o l'alesatrice).

Il trapano a nostra disposizione era dotato, inoltre, di un sistema di controllo della profondità di foratura con inversione di moto del mandrino. Utilizzando questa modalità operativa in associazione ad un maschio (al posto della punta) è stato possibile filettare i fori.

3.3.1.4 Sega a nastro

Questa macchina è costituita essenzialmente da una morsa, da due ruote metalliche e da una bandella d'acciaio. Quest'ultima da un lato è dotata di denti (simili a quelli di una sega per il legno), che gira mantenuta in tensione dalle due ruote.

È in grado di troncare barre di qualsiasi forma e dimensione (fino ad alcune decine di millimetri) costituite da materiali relativamente teneri (in questo caso sono considerati "teneri" tutti i materiali che permettono la lavorazione per asportazione di truciolo, quali ad esempio i materiali plastici, l'alluminio e le leghe del ferro non sottoposte a trattamenti termici o non contenenti elevate percentuali di cromo) senza precisione eccessiva e con un basso grado di finitura ma in maniera estremamente veloce rispetto al taglio manuale.

3.3.1.5 Mola a disco con supporto

Sopperisce alla impossibilità di troncare barre di materiali duri (problema che si presenta con l'utilizzo della sega a nastro) anche se il suo utilizzo comporta una limitazione nella dimensione delle barre (possono arrivare fino a 8-10mm).

Questo attrezzo non è altro che una smerigliatrice angolare, montata su di un supporto mobile, dotato di un basamento con morsa. L'elemento tagliente è costituito da un disco in materiale abrasivo, che ruota con velocità periferica attorno a 50 m/s ed è in grado di tagliare materiali di durezza molto elevata (anche se ne esistono alcuni che essa non è in grado di intaccare).

Anche con l'utilizzo di questo strumento non si riescono ad ottenere risultati soddisfacenti in termini di precisione (lunghezza ottenuta) e di finitura.

Il suo utilizzo si è reso necessario per la troncatura del tondo di diametro 6 cromato e rettificato, che è stato utilizzato per la realizzazione dei perni dei rulli. A causa del rivestimento di cromo, infatti, quest'ultimo non si prestava al taglio con le seghe a denti (sia manuali che motorizzate).

3.3.2. Realizzazione dei particolari

L'elenco dei pezzi da noi lavorati è il seguente:

- | | |
|-----------------------|---|
| 1. Rullo | 8. Piastra portante |
| 2. Mozzo ruota | 9. Supporto motore |
| 3. Angolare forcilla | 10. Puleggia motore |
| 4. Perno rullo | 11. Lamiera congiunzione |
| 5. Perno ruota | 12. Rinforzi telaio (inferiore e superiore) |
| 6. Flangia cuscinetto | 13. Elementi angolari supporto batterie |
| 7. Puleggia ruota | |

- | | |
|---|--|
| 14. Elementi lineari supporto batterie | 18. Staffa fissaggio portafusibile batterie |
| 15. Perno cuscinetti supporto batterie | 19. Coperchio alloggiamento batterie |
| 16. Binari guida supporto batterie | 20. Staffe ancoraggio binari al telaio |
| 17. Staffa fissaggio contatto mobile batterie | 21. Supporto contatto fisso batterie |
| | 22. Staffe ancoraggio supporto contatto fisso batterie al telaio |

Per i pezzi dei quali descriveremo le fasi di lavorazione ci limiteremo a elencare le fasi e per ognuna daremo una breve descrizione ponendo l'accento sui problemi eventualmente incontrati.

3.3.2.1 Rullo

Il materiale, da cui è partita la lavorazione, consiste in due barre di tondo in polipropilene nero di diametro 40 mm. Le fasi, preliminari, di lavorazione a cui è stato sottoposto sono state le seguenti:

- utilizzando la sega a nastro le barre sono state tagliate per ottenere dei piccoli cilindri lunghi circa 2 mm in più rispetto al rullo finito;
- bloccando il rullo nel mandrino del tornio, è stata effettuata la spianatura di una delle due superfici di base di ogni cilindro, una prima sgrossatura della superficie esterna, la foratura ed infine l'alesatura (un allargamento del foro di pochi decimi di mm al fine di ottenere un foro preciso);
- la seconda fase di lavorazione dei cilindri sul tornio ha comportato la finitura della seconda superficie di base del cilindro, svolta prendendo nel mandrino la superficie esterna precedentemente tornita;
- è stato inserito un perno di traino, bloccato nel mandrino, ad una delle due estremità del foro passante, mentre nell'altra estremità del foro è stato inserito un perno di sostegno (retto dalla contropunta); tutto ciò ci ha permesso di poter tornire in una sola passata (senza bisogno di riprendere il pezzo nel mandrino) tutta la superficie esterna del cilindro, che, alla fine della lavorazione, risultava avere un diametro esterno pari a quello massimo del rullo finito;
- bloccando nuovamente rullo con il mandrino, è stata effettuata una nuova spianatura delle due superfici di base (la prima a misura libera e la seconda con un fermo) in modo da ottenere rulli della stessa lunghezza (al centesimo di millimetro).

Le operazioni precedentemente elencate, svolte nell'ordine indicato, avevano il solo scopo di ottenere un cilindro retto con un foro perfettamente concentrico. Non è stato possibile fare diversamente, in quanto una foratura di diametro 8 mm e profondità 64 mm non avrebbe garantito la concentricità.

Riprendendo il pezzo con la tecnica dei due perni e montando sul tornio l'attrezzatura speciale per la realizzazione dei profili di circonferenza (precedentemente descritta), si è provveduto a dare ai cilindri la forma di botte.

Per ottenere il profilo desiderato sono state necessarie svariate "passate" con raggio ogni volta minore. A questo livello si sono presentati i principali problemi di lavorazione, infatti, a causa della tipologia dell'attrezzatura e del tipo di materiale il truciolo che veniva staccato dal pezzo non si rompeva e si riavvolgeva attorno al pezzo stesso

rendendo impossibile (a causa della sua estrema resistenza alla trazione) l'effettuazione di più "passate" in sequenza.

Alla fine di ognuna di queste, infatti, era necessario smontare il pezzo e rimuovere il truciolo.

Va, infine, sottolineato, che è stato necessario realizzare diversi prototipi (con piccole correzioni) prima di ottenere un profilo tale per cui il rullo, rivestito dalla gomma, presentasse il profilo di arco di circonferenza desiderato.

Una volta ottenuti i rulli a forma di botte si è provveduto al rivestimento, mediante un tubo di silicone.

Per rendere possibile questa operazione il rullo è stato infilato da un'estremità su di un perno, fissato in una morsa da banco, mentre sull'altra estremità è stato posizionato un cono di invito per il tubo, munito di piolo, in modo da mantenerlo bloccato al foro del rullo.

Da un'estremità del tubo è stata pompata aria compressa (ad una pressione di circa 4 bar) dopodiché è stato possibile spingere ed infilare il tubo, espanso dalla pressione dell'aria, sul rullo.

I rulli sono stati, quindi, rifiniti, tagliando le estremità sporgenti del tubo in silicone (operazione eseguita manualmente) e inserendo delle boccole nelle due estremità del foro.

3.3.2.2 Perno rullo

Il materiale, da cui è partita la lavorazione, consiste in una barra d'acciaio C40, tondo, cromato e rettificato, del diametro di 6 mm. Le lavorazioni effettuate sono le seguenti:

- taglio in spezzoni di lunghezza circa 66-67 mm, utilizzando la mola a disco con supporto (necessaria a causa dell'elevata durezza del rivestimento);
- tornitura delle due teste del rullo (utilizzando utensili in materiali sinterizzati) in modo da migliorare il grado di finitura delle estremità ed avere tutti i perni della stessa lunghezza;
- realizzazione delle scanalature per gli anelli d'arresto, montando sul tornio la smerigliatrice dritta (con installato un disco abrasivo del diametro di circa 100 mm e con spessore di 0.7-0.8 mm)

Effettuando il taglio con la mola a disco si è ottenuto l'effetto, indesiderato, di rendere estremamente duri i perni nella zona del taglio, a causa dello shock termico dovuto prima al surriscaldamento per il taglio mediante abrasione e poi al veloce raffreddamento in aria. Tale durezza ha reso estremamente problematiche le lavorazioni di finitura delle due estremità.

Un'altra operazione che ha presentato difficoltà è stata la realizzazione delle scanalature, a causa dell'estrema fragilità del disco e della velocità alla quale si consumava (ne è stato utilizzato uno svariato numero per portare a termine la lavorazione).

3.4. Fase di testing

Una volta completata la struttura meccanica il prototipo è stato equipaggiato con semplici dispositivi elettronici di controllo, in modo da poter operare dei test che verificassero il funzionamento delle parti meccaniche e, allo stesso tempo, permettessero di valutare la qualità della movimentazione, in base alla coppia fornita dai motori step acquistati.

3.5. Modifiche successive ai test

Vengono riportate, di seguito, le lavorazioni, effettuate da altri operatori, successivamente alla fase di testing, in modo da fornire una documentazione più completa.

Sono stati in particolare aggiunti: interruttori, spie e un connettore per effettuare la ricarica della batteria, al pannello di copertura dell'alloggiamento batterie.

Sono state modificate le pulegge dell'albero ruota (Z44 in sostituzione delle Z34) e relative cinghie (Z190 in sostituzione delle Z180).

È stata operata una sostituzione dei motori, le cui caratteristiche sono riportate nella documentazione allegata.

4. Note tecniche

4.1. Materiali utilizzati

4.1.1. Ruote

4.1.1.1 Rulli

Descrizione	Quantità	Utilizzo	Fornitore
Tondo polipropilene nero diametro 40 mm	2 m	Nucleo rullo	SARGOM s.r.l.
Tubo silicone diametro 14x18 mm	4m	Rivestimento rullo	SARGOM s.r.l.
Tondo cromato e rettificato diametro 6 mm	2 m	Perno rullo	Ferramenta NEW FER
Anelli d'arresto 6RS	n. 60	Arresto perno	MINETTI Brescia s.r.l.
Boccole flangiate GLY-PGB 6x8x8 mm	n. 60	Boccole	MINETTI Brescia s.r.l.

4.1.1.2 Mozzi ruota

Descrizione	Quantità	Utilizzo	Fornitore
Quadro alluminio 80 mm	250 mm	Nucleo mozzo	Maestri & Figli
Angolare alluminio 30x30x2 mm	1 m	Supporti "a forcella"	Maestri & Figli
Viti testa bombata M4x8	n. 96	Fissaggio forcelle al quadro	Dado s.p.a.
Grano a punta M5x8	n. 6	Fissaggio perno ruota	Ferramenta Simonini
Tondo C40 diametro 12 mm	400 mm	Perno ruota	SIDER Import s.r.l.
Tondo alluminio diametro 60 mm	100 mm	Flange cuscinetti	Maestri & Figli
Cuscinetto a sfera doppia corona 4200 ATN9 SKF	n. 3	Cuscinetti ruota	MINETTI Brescia s.r.l.

4.1.2. Telaio

Descrizione	Quantità	Utilizzo	Fornitore
Lista DELRIN/POM bianco 120x10 mm	1 m	Piastre portanti	SARGOM s.r.l.
Lamiera alluminio 250x2 mm	1 m	Piastre laterali	COMPOSTELLA alluminio
Lamiera alluminio 60x2 mm	2 m	Piastre di rinforzo	COMPOSTELLA alluminio
Angolare alluminio 20x20x2 mm	1 m	Congiunzione rinforzi	COMPOSTELLA alluminio
Boccole filettate M5	n. 24		COMAFER
Rivetti 3,8x9	n. 60		COMAFER
Viti TB M5x10	n. 30	Fissaggio piastre	Dado s.p.a.
Viti TB M5x15	n. 30	Fissaggio rinforzi	Dado s.p.a.

4.1.3. Slitta batterie

Descrizione	Quantità	Utilizzo	Fornitore
Angolare alluminio 20x20x2 mm	4 m	Listelli gabbia	COMPOSTELLA alluminio
Viti TB M5x10	n. 30	Fissaggio listelli	Dado s.p.a.
Quadro alluminio 50 mm	300 mm	Congiunzione listelli	Maestri & Figli
Cuscinetto a sfera 609 SKF	n. 2	Cuscinetti slitta	MINETTI Brescia s.r.l.

4.1.4. Motori, batterie e trasmissione

Descrizione	Quantità	Utilizzo	Fornitore
Motori step SANYO 103-G770-2241	n. 3	Motorizzazione robot	MINETTI Brescia s.r.l.
Batterie Pb 12V 12Ah Hitachi HB641212	n. 2	Alimentazione robot	OB s.r.l.
Puleggia dentata alluminio 34XL037	n.3	Puleggia albero ruota	MINETTI Brescia s.r.l.
Puleggia dentata acciaio 11XL037	n.3	Puleggia albero motore	MINETTI Brescia s.r.l.
Cinghia dentata 180XL037	n.3	Trasmissione	MINETTI Brescia s.r.l.
Grano a punta M4x6	n. 3	Fissaggio puleggia perno motore	Ferramenta Simonini

Grano a punta M5x8	n. 3	Fissaggio puleggia perno ruota	Ferramenta Simonini
Piatto alluminio 12x30	300 mm	Supporto motori	Maestri & Figli
Viti TS M5x20	n. 12	Fissaggio supporti	Ferramenta Simonini
Viti TC M4x15	n. 12	Fissaggio motori	Ferramenta Simonini

4.2. Modalità di assemblaggio

L'assemblaggio del telaio va fatto su una superficie perfettamente piana, prestando attenzione al fatto che la lamiera deve combaciare con l'apposita battuta.

Va posta attenzione nel non bloccare troppo energicamente le viti alloggiare nei pannelli in materiale plastico, in modo da evitare danneggiamenti nella filettatura.

La struttura è stata realizzata in modo completamente artigianale; ciò comporta la non ripetitività delle lavorazioni (ogni pezzo ha dimensioni differenti da quelli simili). Nelle operazioni di smontaggio e rimontaggio, quindi, è necessario tenere sempre presente la posizione dei pezzi e non modificarla (per agevolare tali operazioni, alcuni di questi sono numerati).

Lo smontaggio delle lamiere di congiunzione può essere fatto agevolmente anche senza rimuovere le viti dei supporti dei binari delle batterie. A tale scopo è sufficiente rimuovere le viti di fissaggio del binario al supporto stesso. Il vantaggio che se ne trae è quello di non dover effettuare ogni volta l'allineamento dei binari, in quanto i loro supporti, per come sono costruiti, lo garantiscono già.

I perni ruota sono montati con un'interferenza di un centesimo di millimetro nei fori cuscinetti in modo da ridurre il gioco tipico del cuscinetto stesso.

L'operazione di montaggio e smontaggio può essere fatta solamente con l'ausilio di una pressa (pressa a bilanciere o idraulica) oppure con il martello e dei supporti adeguati. Questo genere di operazioni comportano un notevole stress meccanico per i cuscinetti e per l'albero (che potrebbe deformarsi) specialmente se effettuate da operatori non preparati.

L'architettura consente di effettuare tutte le operazioni non richiedendo il disassemblaggio del complesso perno-cuscinetto. Inoltre, in virtù di questo tipo di montaggio, non è stato ritenuto necessario l'ausilio di un sistema d'arresto per il perno all'interno del foro del cuscinetto.

4.3. Avvertenze

Le ruote sono molto rigide (sono in materiale plastico e non sono ammortizzate) e quindi è opportuno prestare attenzione nell'appoggio al suolo o nell'eventuale urto con ostacoli.

È opportuno evitare far girare inutilmente a vuoto i motori step, in quanto tendono a smagnetizzarsi e, quindi, a perdere coppia.

5. Conclusioni

Il nostro elaborato è composto sostanzialmente da tre fasi.

Una progettazione preliminare, svolta quasi interamente con l'ausilio di un software di CAD bidimensionale (con una piccola estensione 3D). I principali problemi incontrati in questa fase sono stati causati principalmente dalla nostra scarsa dimestichezza con le tecniche di progettazione meccanica in ambiente CAD, specialmente per quanto riguarda l'utilizzo delle caratteristiche 3D. L'uso di un vero CAD 3D avrebbe, probabilmente, reso meno laboriosa la progettazione.

La seconda fase ha interessato il reperimento, in commercio, dei materiali necessari al progetto e disponibili su cataloghi. Successivamente è stata operata una revisione del progetto stesso.

La terza e ultima fase ha riguardato la realizzazione vera e propria del robot, utilizzando le attrezzature di un'officina meccanica.

6. Ringraziamenti

Il lavoro sopra descritto è stato reso possibile anche grazie alla disponibilità dimostrataci da persone anche esterne all'ambito dell'Università di Brescia.

Per questo motivo vogliamo ringraziare il sig. Corvaglia Alvaro, il sig. Betella Giancarlo (German Tool), i sig.ri Bogarelli, il sig. Alberto Sandrini (Benders Italia Srl – Montirone BS), i sig.ri Brumana, il prof. Faglia Rodolfo, il prof. Legnani, le ditte Minetti Brescia Srl, RTA di Travacò Siccomario (PV) ed E.F.P.S. di Gussago (BS). Un ringraziamento particolare per il sig. Alessandro Uberti (Pubbliese Studio Srl) per aver gentilmente provveduto all'acquisto di buona parte dei materiali utilizzati ed al sig. Valerio Foglio per aver concesso l'uso delle attrezzature, aver dispensato preziosi consigli e contribuito effettuando alcune lavorazioni troppo complesse per le nostre capacità.

Indice

SOMMARIO	3
1. INTRODUZIONE.....	3
2. IL PROBLEMA AFFRONTATO.....	3
3. LA SOLUZIONE ADOTTATA.....	4
3.1. Progetto iniziale	4
3.1.1. Architettura generale	4
3.1.2. Ruote.....	5
3.1.3. Telaio	9
3.1.4. Motori e batterie	9
3.2. Progetto definitivo	9
3.2.1. Alloggiamento batterie	10
3.2.2. Architettura.....	11
3.2.3. Posizione motori.....	11
3.2.4. Trasmissione.....	11
3.2.5. Telaio	12
3.2.6. Albero ruote.....	13
3.2.7. Supporto batterie.....	13
3.3. Fase costruttiva	15
3.3.1. Attrezzatura.....	15
3.3.2. Realizzazione dei particolari.....	16
3.4. Fase di testing	18
3.5. Modifiche successive ai test	20
4. NOTE TECNICHE.....	21
4.1. Materiali utilizzati	21
4.1.1. Ruote.....	21
4.1.2. Telaio	22
4.1.3. Slitta batterie.....	22
4.1.4. Motori, batterie e trasmissione.....	22
4.2. Modalità di assemblaggio	23
4.3. Avvertenze	23
5. CONCLUSIONI.....	24
6. RINGRAZIAMENTI.....	24
INDICE	25