Macchina a Controllo Numerico – CNC

Istituto Superiore E. Fermi Mantova - MN Esame di stato 2014-2015

Luca Bennati
Classe 5°E-ELE
Corso di Elettronica



Sommario

CONTESTO STORICO	3
INTRODUZIONE	6
FUNZIONAMENTO	7
STESURA DEL PROGETTO BASE	8
SCHEMA ELETTRICO	9
REALIZZAZIONE	10
COLLEGAMENTO DEGLI INVERTER	17
Cablaggio	17
PARAMETRI SOFTWARE	17
SOFTWARE DI CONTROLLO	18
CONFIGURAZIONE DEL SOFTWARE	19
EMC2 E IL PRIMO AVVIO	21
IL LINGUAGGIO GCODE	22
Sintassi GCODE	22
Creazione del GCODE	23
Creazione di un circuito stampato con EAGLE	23
Creazione di un oggetto a partire da un disegno 2D	23
Creazione di un oggetto partendo da un immagine	23
Creazione di un oggetto partendo da un modello 3D	23
PROBLEMI COMUNI E CONSIGLI	24
DOCUMENTAZIONE DELLE COMPONENTI:	25
GUIDE LINEARI: BETT SISTEMI LGAG20	25
CINGHIE DI TRASMISSIONE: BANDO SYNCHRONOUS BELT	26
Profilati in alluminio: Bett sistemi M045RL	
Angolari di fissaggio: Bett sistemi 811 e 957L	
GUIDA LINEARE: AC INDUSTRIALE MR-43 (3 RUOTE)	
AC Servo Motor: Panasonic Minas XXV (MSM 400W)	
INVERTER PER AC SERVO: PANASONIC MINAS XXV (MSD)	30
MOTORE STEPPER: SCT HY-200	31
SCHEDA DI CONTROLLO STEPPER: L297/298	32
Schema elettrico:	
Elenco componenti:	33
PCB:	
Breakout Board: 5 Axis Mach3 compatible board	34
NOTE SULLA SICUREZZA	35
SITOGRAFIA	37
RINGRAZIAMENTI	37

Contesto storico

La guerra: tragedia o innovazione?

La macchina utensile a controllo numerico nasce nel 1947 da un piccolo costruttore americano di pale di elicotteri che, preso dal problema di collaudare in maniera precisa ed efficiente le proprie creazioni decide di costruire un macchinario per il collaudo, il quale, posizionandosi su punti determinati della pala possa verificare la corretta realizzazione del prodotto ed evidenziare eventuali difetti all'operatore. L'anno successivo l'USAF (United State Air Force), venuta a conoscenza di questa macchina, commissionò al giovane inventore l'applicazione di una macchina molto simile alla sua ultima creazione ma con qualche variante:



il progetto infatti consisteva in una fresa-alesatrice su tre assi che venne realizzata in 5 anni con la collaborazione dell'Istituto di Tecnologia del Massachusetts.

Ciò che determinò il successo di questa macchina (successivamente riprodotta e riproposta al pubblico in oltre 100 esemplari differenti già nel 1960) fu il momento in cui venne realizzata: la Seconda Guerra Mondiale si era appena conclusa dopo l'attacco atomico dell'America ai danni del Giappone ma il conflitto non si era ancora risolto. Gli Stati Uniti e la Russia non si fronteggiavano più sul campo di battaglia ma era appena partita una competizione internazionale sul piano militare, spaziale, tecnologico, ideologico, psicologico e perfino sportivo destinata a durare quasi mezzo secolo portando ad enormi passi avanti l'industria dell'epoca.



Le macchine a controllo numerico consentivano la realizzazione su larga scala di prodotti sempre più complessi e precisi, facilitando la realizzazione di armi, veicoli civili e militari ma anche oggetti destinati all'uso quotidiano, grazie a queste lavorazioni infatti fu possibile la corsa allo spazio iniziata nel 1957 e la costruzione del primo chip nel 1958, piccole innovazioni che hanno modificato il mondo fino a renderlo come lo conosciamo oggi. Buona parte della tecnologia che utilizziamo quotidianamente infatti nasce proprio tra gli anni 50 e 60 del ventesimo secolo, ad esempio le telecomunicazioni a lunga distanza (internet, radio, telefonia, ...) non sono altro che conversioni civili di tecnologie inventate o migliorate in quegli anni.

La corsa all'innovazione tecnologica venne ampiamente supportata dalla tecnica dello spionaggio, la comunicazione maggiormente utilizzata in quegli anni era la neonata radio che continuava ad essere perfezionata al fine di rendere incomprensibili al nemico le trasmissioni segrete con cui gli stati comunicavano con i propri agenti sotto copertura.



Negli anni 50 si ampliarono a macchia d'olio una serie di stazioni di broadcasting destinate esclusivamente alle comunicazioni segrete, le cosiddette "Numbers Stations", trasmissioni radio in onde corte, in onda nelle più diverse ore del giorno, e con durate variabili, tuttora reperibili su molte frequenze e monitorate e studiate ormai da decenni da radioamatori o semplici appassionati di tutto il mondo. Queste trasmissioni misteriose, consistenti in voci che leggono gruppi di numeri o di lettere in alfabeto fonetico internazionale, o da segnali in codice morse o impulsi sonori, sono precedute spesso da "avvisi" di inizio trasmissione consistenti in brevi brani musicali, sequenze di lettere o scale di note, ciclicamente ripetuti a orari prefissati. Diversi studi, condotti da esperti di telecomunicazioni, hanno concluso che queste trasmissioni erano (e sono tuttora) impiegate da numerosi servizi per trasmettere dei brevi messaggi di testo ai loro agenti sotto copertura, operanti in altre nazioni.

Le origini di questo metodo di trasmissione risalgono alla prima guerra mondiale, quando furono impiegate da parte dell'Imperial Regia Marina Austriaca, mentre, durante la seconda guerra mondiale, fu la BBC a essere coinvolta nell'invio di radiomessaggi in codice, tramite la lettura alla radio di serie di frasi convenzionali ai propri agenti e alle forze della Resistenza nei paesi occupati dalla Germania: messaggi che si riferivano al paracadutare di viveri, armi e uomini, a

spostamenti di unità, ad operazioni belliche. I messaggi erano circondati dal segreto militare più assoluto, venivano consegnati in redazione grazie ad una staffetta motociclistica di funzionari del Ministero della Guerra, l'annunciatore aveva giusto il tempo di dare un'occhiata al lungo foglio prima di darsi alla lettura di decine e decine di messaggi, con il senso di compiere una mansione di vitale importanza. I messaggi, da poco usciti da una telescrivente militare, spesso inviati da partigiani su una radio da campo, giungevano a destinazione scorretti e talvolta incomprensibili, con comunicazioni



enigmatiche e allo stesso tempo affascinanti ("il maggiore con la barba", "la gallina ha fatto l'uovo", "la vacca non da latte") destinate alle forze della resistenza. Il povero annunciatore doveva cercare di correggerli e renderli comprensibili in qualche maniera, con l'incubo che il suo operato potesse causare una catastrofe. Negli anni della Guerra Fredda, questa tecnica di trasmissione fu usata da tutte le grandi potenze, con decine di Numbers Stations in onde corte usate dalla CIA statunitense, il KGB russo, il BND tedesco occidentale, l'StB cecoslovacco, l'MfS tedesco orientale, il MOSSAD israeliano... quello delle Numbers Stations resta tuttora uno dei segreti più gelosamente custoditi della Guerra Fredda. Tutti questi governi, con un solo paio di eccezioni, hanno sempre negato ogni legame con esse.

Al giorno d'oggi, dopo un periodo di riduzione delle attività di queste stazioni in seguito alla caduta del muro di Berlino, altre trasmissioni sono seguite all'emergere dei rispettivi nuovi attori geopolitici mondiali, per la gioia di radioamatori e ricercatori che possono tornare a riempire i loro taccuini di sequenze di numeri e lettere, ora anche in cinese, indiano, coreano...

e, con ogni probabilità, operazioni segrete e manovre di destabilizzazione saranno ancora per molto tempo guidate da aspre voci femminili, sequenze apparentemente casuali di lettere e numeri o inquietanti rumori di carillon distorti trasmessi nell'etere.

Spinti dalla necessità di comunicare quantità sempre superiori di dati nasce insieme agli anni '70 il segretissimo "internet", che consentiva di far comunicare tra loro basi militari poste a grande distanza anche nella malaugurata ipotesi di attacco nucleare o disturbi causati da "jammer" (dispositivi che emettono con grandi potenze dei disturbi al fine di rendere impossibili le comunicazioni tramite etere) costituendo una rete di comunicazioni parallela ed indipendente che non potesse essere danneggiata o intercettata dal nemico, mediante cavi interrati e messaggi codificati. Per portare informazioni a distanze sempre maggiori si pensò di unire le tecnologie implementate nella corsa allo spazio con le necessità



militari, ecco quindi che le tecniche usate per il lancio a lungo raggio di missili e armamenti derivavate da necessità puramente belliche portano allo sviluppo dei satelliti geostazionari. Non è certo un caso se tutti i primi satelliti messi in orbita, erano satelliti spia, per necessità puramente militari.

Per quanto non è, ovviamente, possibile spostare in ogni momento un satellite attorno il nostro pianeta, di sicuro è evidente quanto questo possa essere utile per poter ottenere, a intervalli regolari, fotografie anche estremamente dettagliate, di una porzione del pianeta. Di conseguenza, diventò necessario nascondere agli occhi dei satelliti nemici basi, armamenti e industrie militari: nascono quindi bunker totalmente isolati, scavati nella roccia o nascosti nella vegetazione.



I satelliti, pochi anni più tardi, terminata la paura dello spionaggio vengono modificati e resi funzionali anche per svariati altri utilizzi, e ad oggi sono fondamentali per moltissimi aspetti della vita quotidiana: cellulari, trasmissione di dati a lunga distanza, trasmissioni televisive, GPS, ricezione di immagini da telescopi spaziali e così via. Si potrebbe continuare all'infinito la lista di innovazioni, strumenti, scoperte e tecnologie che, nate per fini militari, hanno contribuito a migliorare la nostra vita. La guerra dunque non si basa unicamente sulla forza bruta, sulla violenza, sul numero di uomini o di armi, ma sul

modo in cui si combatte, nell'organizzazione che si ha, nella precisione riguardo gli obiettivi da colpire e nella capacità di equilibrare intelligenza e forza per risultare in ogni campo un passo avanti al nemico.

Introduzione

Cos'è una macchina CNC?

CNC è l'abbreviazione di "Computer Numeric Control", ossia una macchina per lavorazioni meccaniche, vedi tornio o fresa, che viene comandata da un computer per eseguire particolari lavorazioni o addirittura pezzi finiti.

Oggigiorno molti, se non tutti, i prototipi degli oggetti che ci circondano vengono realizzate con macchine a controllo numerico: automobili, barche, telefoni cellulari, modelli di aeromobili ed aerei veri e propri, schede elettroniche e molto altro. Nel mio caso tale macchina verrà utilizzata per la prototipizzazione di circuiti stampati e per la realizzazione, in alluminio/plastica/legno, di oggetti di vario tipo.

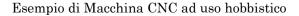
Perché la scelta di una fresa CNC?

La scelta di una macchina fresatrice automatica proviene dalla necessità di avere un utensile multifunzione in grado di realizzare semplici prototipi in maniera completamente autonoma, la macchina è infatti in grado di realizzare sia un oggetto tridimensionale (ad esempio un pezzo meccanico) che un circuito stampato (con tanto di foratura) semplicemente inviandole dei comandi tramite un comune PC, replicando esattamente il modello tridimensionale realizzato con un qualunque software di CAD.

Così, ispirato da un sito web di appassionati di elettronica ho deciso di iniziare a lavorare ad un progetto che fosse utile sia dal punto di vista didattico (contiene un gran numero di azionamenti elettronici e meccanici oltre ai software di controllo) che hobbistico e che potesse consentirmi di realizzare ogni mio progetto in maniera autonoma.

Il progetto è stato pensato per poter essere ampliato in futuro e diventare, ad esempio, una stampante 3D stand-alone in grado di operare senza la necessità di un computer che la controlli, in quanto tutto il lavoro verrebbe egregiamente svolto da un comune microcontrollore.

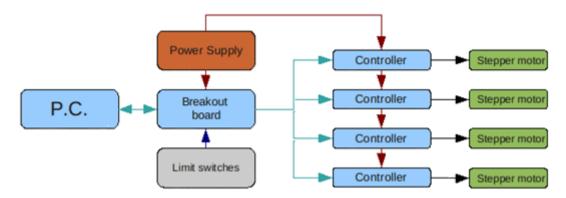






Esempio di CNC ad uso industriale o professionale

Funzionamento



Come suggerito dal nome, la macchina a controllo numerico necessita di un elettronica di controllo che si basa prevalentemente su un computer che consente grande precisione nel controllo della meccanica e, di conseguenza, nella realizzazione del prototipo.

Il PC invia i comandi sotto forma di singoli impulsi elettrici tramite una porta (nel mio caso la porta parallela), questi dati vengono poi raccolti da una scheda elettronica (che prende il nome di breakout board), che ha lo scopo di indirizzarli verso i controller dei motori. La stessa scheda si occupa inoltre di gestire una serie di input, ad esempio dei micro interruttori che avvisano il PC nella malaugurata ipotesi in cui un motore non segua il corretto movimento e porti la macchina in una condizione di errore. Nel caso pratico questa condizione si verifica ad esempio quando l'utensile va oltre il percorso a lui assegnato, rischiando di danneggiare gravemente la meccanica della macchina data la potenza degli azionamenti impiegati.

Per convertire i dati in spostamento è necessaria una apposita scheda di potenza che converta i dati ricevuti dalla scheda di breakout in impulsi di tensione da inviare ai motori, in alcuni casi questa scheda si occupa anche di leggere i dati sulla posizione del motore mediante un encoder collegato ad esso e sapere se il motore ha eseguito correttamente il comando impartito (comando con retroazione).

Quindi per la realizzazione avremo bisogno di:

- Computer
- Breakout board (interfaccia tra macchina e PC)
- Fine corsa (un paio per asse)
- Motori (uno per asse più il mandrino)
- Controller (uno per motore)
- Guide lineari (costituiranno gli assi della macchina)
- Cinghie, pulegge e barre filettate (faranno muovere gli assi)
- Strutture in alluminio (comporranno il telaio della macchina)
- Bulloni, raccordi e cavi.

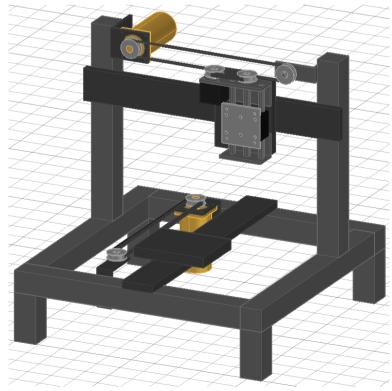
Stesura del progetto base

Per il progetto base si è pensato ad una macchina classica con movimento della testa lungo entrambi gli assi e piano di lavoro fisso (vedi immagine).

Macchina a Controllo Numerico - CNC

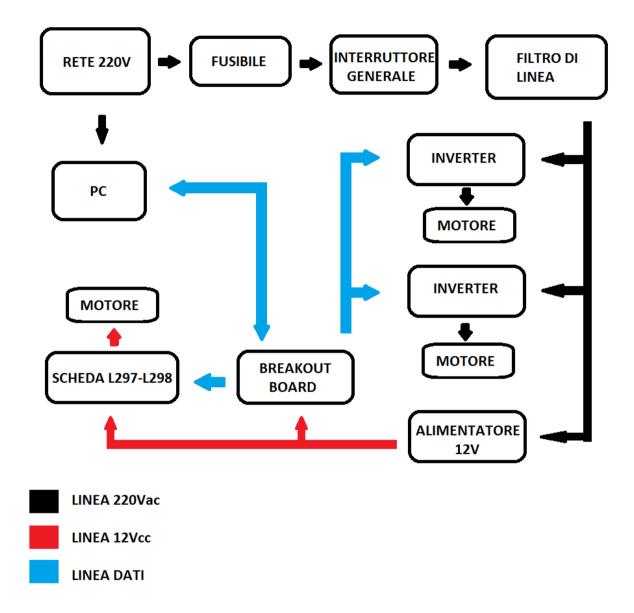


Tuttavia questa realizzazione seppur compatta e funzionale ha dei difetti, dato che durante i movimenti la testa potrebbe oscillare o piegarsi durante la fase di foratura. Per ovviare a questo problema si è pensato ad una macchina che muovesse il piano di lavoro e tenesse fissa la testa con l'utensile, tuttavia la realizzazione di questo modello è molto più complicata, così si è pensato ad un compromesso: piano mobile lungo l'asse Y e testa che si muove lungo gli assi X e Z.



Gli assi X e Y scorrono su delle guide lineari con cuscinetti a sfere, fissate ad una cinghia dentata per assicurare la massima velocità nei movimenti ed azionate da un servo motore in corrente alternata e relativo driver di potenza. L'asse Z invece ha una corsa molto più limitata ed è azionato da un motore stepper applicato su una vite senza fine.

Schema elettrico



Per evitare cortocircuiti sulla rete elettrica è stato previsto un fusibile nell'ingresso d'alimentazione, ulteriore protezione viene dal filtro di linea che toglie ogni disturbo dalla rete elettrica proteggendo gli apparecchi connessi, questo elemento è essenziale in quanto gli inverter spesso immettono nella rete elettrica numerose interferenze ad alta frequenza.

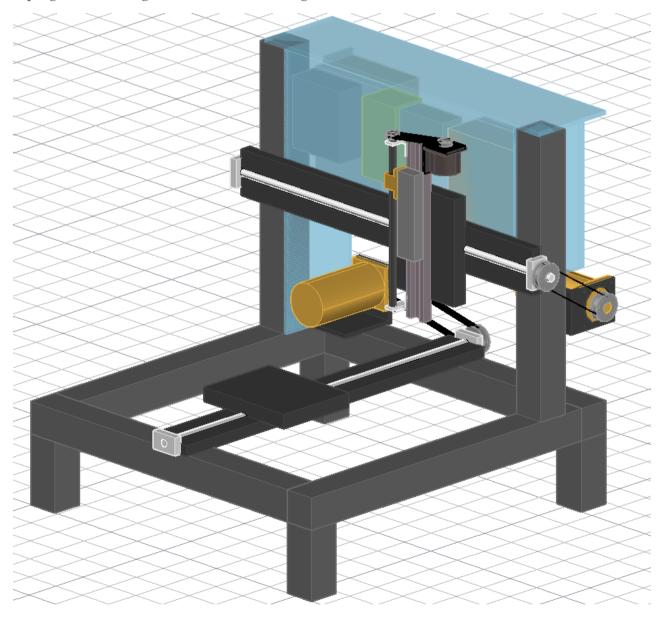
Grande importanza è data anche dall'impianto di messa a terra, ogni collegamento elettrico è stato realizzato mediante cavo schermato la cui calza collegata a terra serve ad isolare i segnali dalle radiofrequenze. Anche il telaio della macchina è stato collegato a terra al fine di evitare il pericolo di folgorazione accidentale dell'operatore. La sezione dei cavi dovrà essere opportunamente scelta in funzione delle potenze in gioco, cavi di sezione troppo ridotta potrebbero creare problemi in quanto si potrebbero surriscaldare causando cortocircuiti o incendi.

Realizzazione

Il montaggio degli assi X e Y non ha comportato particolari problemi, una volta montata la struttura in alluminio infatti le guide lineari sono state avvitate direttamente su di essa. Per fissare i motori si è pensato a due supporti a forma di "L" in alluminio con spessore 10mm in cui sono stati praticati i fori per la testa del motore e le viti di fissaggio.

Dopo aver realizzato il progetto seguendo il prototipo a pagina 8, durante i primi collaudi si sono notati gli sforzi dei motori X e Y nel superare l'inerzia del carrello collegato direttamente al motore, i movimenti inferiori al cm risultavano infatti estremamente sfalsati. Per ovviare a questo problema si è pensato ad una trazione mediante vite senza fine, che consente di avere estrema precisione e minimo sforzo, con le barre filettate di diametro 8mm utilizzate, ad ogni rotazione completa del motore il carrello si sposta di 1,25mm, la precisione massima teorica risulta quindi essere con 2500step/rev di circa 0,5um. Tuttavia per non sovraccaricare l'elettronica della macchina ed il PC ad esso collegato si preferisce utilizzare una configurazione a 500step/rev con precisione di 2,5um.

Il progetto di conseguenza è diventato il seguente:

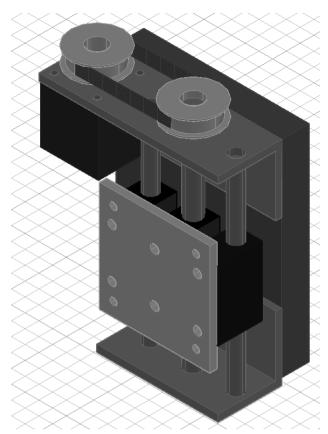


Il montaggio della barra filettata ha portato ad un ulteriore problema: lo spazio a disposizione nella gola delle guide lineari era poco più di 10mm: decisamente troppo pochi per contenere la barra ed il blocco per far muovere il carrello, così mediante una fresa è stato scavato uno spazio nel carrello in cui inserire un blocco di ottone filettato. Ciò ha consentito di sfruttare al massimo il ridotto spazio a disposizione. È stato scelto l'ottone in quanto spostandosi su barre di acciaio evita attriti eccessivi che si verificherebbero nel casso in cui due elementi dello stesso materiale si trovino a diretto contatto comportando a lungo termine una notevole usura delle componenti.



Anche i motori sono stati fissati in modo differente, e fanno ruotare la barra mediante una cinghia dentata ad alte prestazioni:





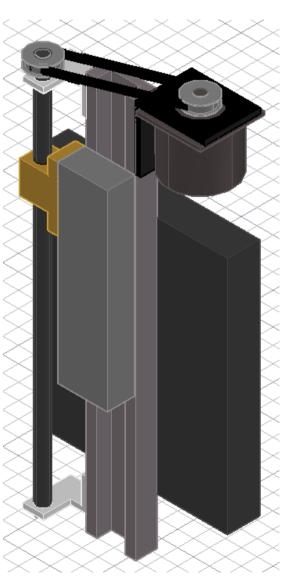
Il lavoro maggiore è stato svolto sull'asse Z, la configurazione iniziale prevedeva un piccolo motore da 5W che mediante una cinghia faceva muovere una barra filettata e relativo piano di lavoro supportato da due guide laterali.

Questa realizzazione però richiedeva lavorazioni di alta precisione e un solo errore anche se inferiore al mm avrebbe reso particolarmente difficile da muovere il piano di lavoro in quanto le due guide e la barra filettata centrale non sarebbero risultate allineate perfettamente. Per semplificare il tutto si è pensato ad una guida lineare simile a quella installata sugli assi X e Y ma di dimensioni inferiori e, anch'essa, mossa da una barra filettata

È quindi stato realizzato un nuovo modello, più semplice da fabbricare e che utilizza una guida lineare della AC Industriale modello MR43, ancora una volta il motore trasmette il moto alla barra filettata mediante cinghia muovendo il carrello attaccato alla barra mediante un supporto di ottone filettato.

Per evitare malfunzionamenti è anche stato sostituito il motore stepper, ora si tratta di un motore da 40W in grado di muovere senza alcun problema qualunque tipo di testa verrà poi applicata sull'asse, per evitare surriscaldamenti è stata limitata la corrente del motore a circa 1A/ph anziché i circa 2A nominali.

In questo caso dati i 200step/rev del motore si ottiene una precisione di circa 6um.



Il risultato una volta montate tutte le componenti è il seguente:



Nella foto si nota la barra filettata sul lato sinistro che, mediante un supporto in ottone filettato sposta il carrello su cui sono fissati il mandrino ed il motore che lo farà ruotare.

Anche per il mandrino la scelta della trazione mediante cinghia è risultata ottimale dato che consente di eliminare ogni vibrazione che potrebbe influire negativamente sulla precisione della fresa durante le lavorazioni, inoltre semplifica la costruzione in quanto se fosse stata utilizzata una trazione ad ingranaggio ne sarebbe risultata una rotazione del mandrino in direzione opposta a quella del motore, a cui sarebbe stato impossibile invertire il senso di rotazione in quanto si tratta di un motore asincrono monofase.

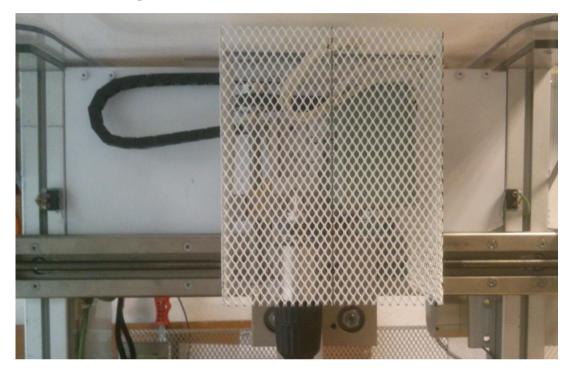
Il motore è stato fissato mediante un supporto ad "L" in alluminio fissato sul carrello.

Una volta fissati gli elementi essenziali della struttura sono stati installati i finecorsa, dispositivi elettro-meccanici che avvertono il computer nella malaugurata ipotesi in cui il motore spinga un asse ad arrivare oltre la soglia stabilita di lavoro. Si tratta di micro-switch collegati come contatto NC (normalmente chiuso), questa scelta è dovuta per motivi di sicurezza in quanto se il cavo di segnale dovesse interrompersi o l'interruttore si dovesse danneggiare, l'elettronica di controllo rileverebbe il contatto aperto e la macchina andrebbe nella condizione di emergenza arrestando i motori.



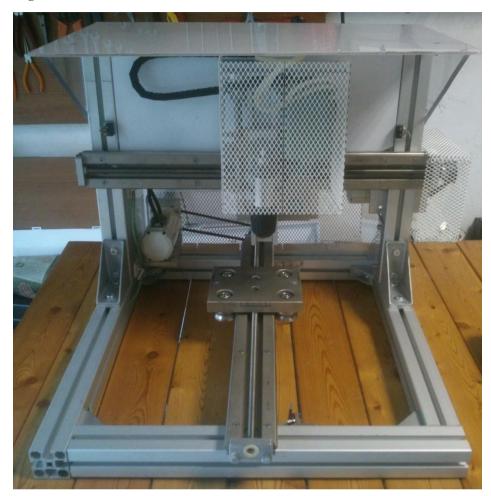
Terminato l'assemblaggo di tutte le componenti si sono perfezionati gli ultimi dettagli relativi prevalentemente alla messa in sicurezza della macchina, in quanto essendoci parti meccaniche in rapido movimento bisogna evitare che l'operatore vi venga a contatto.

Sono stati quindi installate delle protezioni (in gergo: "carter") costituite da una struttura di policarbonato ricoperta da una griglia a maglia fine di alluminio, che consente la pulitura completa della macchina dai residui di lavorazione mediante aria compressa e una notevole attenuazione del rumore generato.



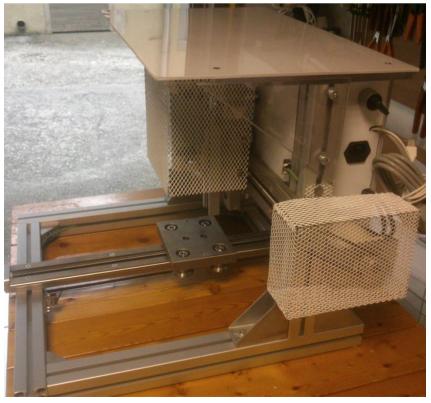


Oltre alle protezioni è stato previsto un pratico supporto che facesse da copertura superiore della macchina su cui poter appoggiare il PC per eseguire le lavorazioni, il risultato finale è il seguente:



Si nota in primo piano l'asse Y ed il motore che lo comanda, mentre al centro si vede l'asse X su cui è montato l'asse Z con il mandrino e la griglia di protezione. Per rinfozare il piano superiore sono stati realizzati due profili triangolari avvitati sulla parte esterna che danno rigidità alla struttura

Sul lato della macchina si può notare la protezione del motore dell asse X, appena sopra la presa di corrente che alimenta la macchina, l'interruttore di accensione e i cavi che vanno collegati al PC per comandarla.



Per informare l'addetto alle lavorazioni riguardo ai rischi che le operazioni di fresatura potrebbero comportare sono state applicate etichette riportanti le precauzioni da seguire duranze le lavorazioni:









Collegamento degli inverter

Cablaggio

Non tutti i segnali dell'inverter sono necessari per la realizzazione della macchina, nel mio caso ne ho usati solo 8 sugli oltre 50 disponibili dato che non si ha la necessità di comandare più inverter in cascata o di utilizzare particolari comandi aggiuntivi.

I pin utilizzati sono:

5 e 6: ingresso impulsi di comando

7 e 8: ingresso comando di direzione

11 e 28: tensioni di alimentazione per i comandi dell'inverter (pin 11: Vcc, pin 28: GND)

12: comando di abilitazione del driver

9: reset impulsi (collegato a GND)

29 e 30: extracorsa (usati come comando di emergenza in quanto tolgono alimentazione al motore, non è consigliabile collegarli ai normali finecorsa della macchina)

Parametri software

La scheda di controllo del motore stepper oltre alla calibrazione della corrente mediante il trimmer non richiede particolari aggiustamenti, gli inverter invece hanno molti più parametri da configurare, i fondamentali sono:

02: modalità di controllo, impostata su 0 (controllo di posizione ad impulsi)

03: guadagno del controllo di posizione, impostato su 100 (più è alto il valore e più starà fermo il motore)

06: limitazione della coppia, impostato su 50 (nella configurazione attuale non è richiesta troppa forza).

0B e 0C: rapporto di moltiplicazione degli impulsi dell'encoder rispetto alla configurazione iniziale (2500 step/rev), lasciato impostato 1:1.

20: velocità del controllo di retroazione, impostato a 100 in modo da avere il motore stabile durante i posizionamenti

25 e 26: rapporto di moltiplicazione degli impulsi di comando (utile per ridurre il numero di passi necessari per compiere una rotazione completa), impostati in modo da avere 500 step/rev

29: tipo di impulsi, impostato su 3 in modo da avere due segnali distinti di step e direzione

Può essere utile modificare la configurazione dei parametri degli inverter in base alle lavorazioni da effettuare, per materiali metallici ad esempio può essere necessario aumentare leggermente la rigidità del motore e la coppia massima disponibile.

Software di controllo

Introduzione

Terminata la realizzazione della macchina è arrivato il momento del collaudo finale, per vedere se tutte le migliorie effettuate si siano rivelate efficaci o meno.

Il software che comanderà la macchina sarà EMC2, un applicativo su piattaforma Linux che consente di gestire ogni genere di macchina utensile come tornio, fresa o addirittura stampanti 3D. Per semplificare il lavoro si è optato per una distro già (quasi) pronta per funzionare che prende il nome di LinuxCNC, il sistema operativo è basato su Ubuntu, una versione di Linux che si adatta senza problemi anche a computer datati e che consente di sfruttare al massimo l'hardware del PC in quanto, a differenza di Windows, implementa per sua natura le RTAPI, una serie di comandi che permettono di gestire un output senza passare per il sistema operativo, rendendo molto brevi i tempi di lettura o scrittura dei dati da periferiche esterne.



linux-cnc

Ubuntu

Rilascio 10.04 (lucid) Kernel Linux 2.6.32-122-rtai GNOME 2.30.2

Hardware

Memoria: 1002,0 MiB

Processore: Mobile Intel(R) Pentium(R) 4 - M CPU 1.80GHz

Stato del sistema

Spazio disco disponibile: 5,1 GiB

Configurazione del software

La configurazione del software di controllo richiede pochi e semplici passaggi, completamente guidati da un programma che come un tutorial ci guida passo a passo nelle impostazioni:



Nella prima schermata vanno inseriti i parametri generali della macchina tra cui il nome, l'unità di misura e i tempi necessari al driver affinché riceva correttamente un comando. I due parametri influenti sul risultato finale sono l'indirizzo fisico della porta parallela a cui è collegata la macchina e la latenza. La latenza è il tempo che intercorre tra quando viene inviato il comando e quando questo viene effettivamente ricevuto ed eseguito, valori alti possono peggiorare le prestazioni della fresa, è bene quindi avere un PC possibilmente fisso (con computer portatili è normale avere valori molto alti) e con poche periferiche collegate.

Occorre poi configurare i pin della porta parallela su cui inviare ciascun comando, questa impostazione dipende dal tipo di breakout board utilizzata e dal tipo di driver che comanderà i motori. Aspetto importante di questa configurazione sono i finecorsa, che vanno impostati nella colonna di destra, possono essere utilizzati come limite massimo/minimo per fermare la fresa nel caso in cui vada oltre la propria corsa oppure riferimento per calcolare punto zero da cui eseguire le

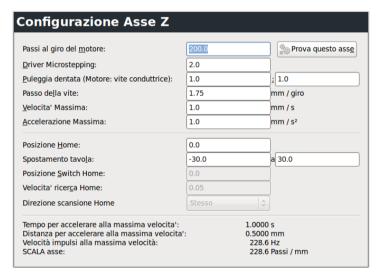


lavorazioni. Nel caso di impostazione HOME la macchina si sposterà in una direzione fino a raggiungere il limite e da esso calcolerà la posizione centrale da cui partire per le lavorazioni.

Una volta impostata la porta su cui inviare i comandi occorre configurare i parametri dei driver che muoveranno gli assi:

Configurazione Asse X			Configurazione Asse Y		
Passi al giro del motore:	500.0	Prova questo asse	Passi al giro del motore:	500.0	% Prova questo asse
<u>Driver Microstepping:</u>	1.0	so riova questo ass <u>e</u>	Driver Microstepping:	1.0	He Flova questo asse
*** *	40.4	: 34.0	•	40.4	: 34.0
Puleggia dentata (Motore: vite conduttrice):		\\	Puleggia dentata (Motore: vite conduttrice):		\
Passo de <u>l</u> la vite:	1.5	mm / giro	Passo de <u>l</u> la vite:	1.5	mm / giro
<u>V</u> elocita' Massima:	5.0	mm / s	<u>V</u> elocita' Massima:	5.0	mm / s
Accelerazione Massima:	10.0	mm / s²	Accelerazione Massima:	10.0	mm / s²
Posizione <u>H</u> ome:	0.0		Posizione <u>H</u> ome:	0.0	
Spostamento tavola:	-155.0	a 140.0	Spostamento tavo <u>l</u> a:	-138.0	a 148.0
Posizione <u>S</u> witch Home:	140.0		Posizione <u>S</u> witch Home:	168.0	
Velocita' ricer <u>c</u> a Home:	5.0		Velocita' ricer <u>c</u> a Home:	5.0	
Direzione scansione Home	Opposta 🗘		Direzione scansione Home	Opposta	
Tempo per accelerare alla massima velocita': Distanza per accelerare alla massima velocita Velocità impulsi alla massima velocità: SCALA asse:	1402.6) mm	Tempo per accelerare alla massima velocita': Distanza per accelerare alla massima velocita' Velocità impulsi alla massima velocità: SCALA asse:	1402.6) mm

Nella prima metà della pagina vanno impostati i parametri del motore, ovvero gli step per rivoluzione, l'eventuale comando in microstepping, il rapporto delle pulegge di trasmissione, il passo della barra filettata, la massima velocità ammessa per il motore e la relativa accelerazione. Oltre ai parametri del driver va impostata la dimensione del piano di lavoro, la posizione di "zero" da cui iniziare le lavorazioni e la velocità con cui andare alla ricerca di quella posizione, in questo parametro è bene inserire un valore non troppo alto in modo da non danneggiare i finecorsa con uno spostamento troppo rapido. In questi due assi il comando microstepping è stato lasciato a 1 in quanto i motori sono dotati di encoder rotativo gestito direttamente dall'inverter e non si possono quindi verificare perdite di passi o mancati posizionamenti.

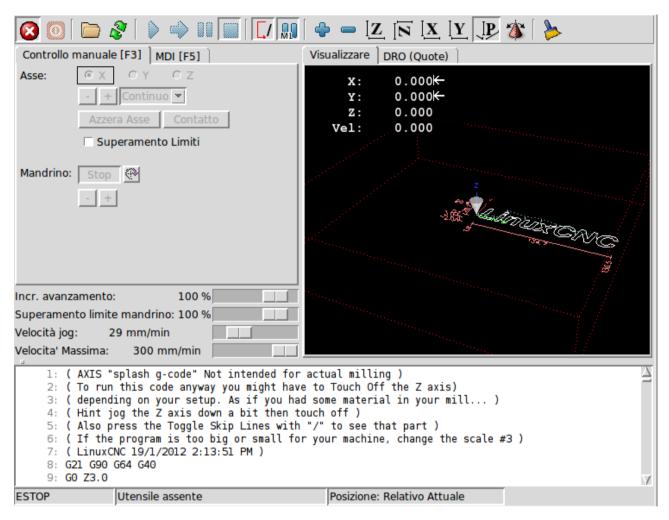


Nel mio caso gli assi X e Y sono identici per cui anche le configurazioni sono uguali, l'unico differente è l'asse Z in cui è stato utilizzato un motore e un asse di tipo differente, in questo caso ho impostato il mezzo passo (microstepping: 2) in modo da avere spostamenti precisi e minori possibilità di errore (nel caso il driver dovesse perdere un passo l'errore nello spostamento sarebbe la metà rispetto al comando full step).

Terminate le configurazioni iniziali è sufficiente eseguire il programma EMC2 per iniziare il collaudo.



EMC2 e il primo avvio



L'interfaccia utente è estremamente semplice: nella parte alta abbiamo i comandi per accendere/spegnere la macchina, il pulsante per selezionare il file contenente il codice da eseguire (che viene poi mostrato nella parte bassa della finestra) e i pulsanti di avvio/pausa/fine lavorazione. Nella parte centrale compaiono le opzioni per il comando manuale e dei cursori con cui selezionare le velocità di lavorazione oltre all'anteprima della lavorazione con evidenziati in rosso i limiti della macchina oltre i quali non è possibile proseguire.

Una volta azzerata la macchina, selezionato il codice contenente la lavorazione (in questo caso un file di esempio contenuto nel programma) si è pronti per iniziare a fresare. Come prima lavorazione è consigliabile disegnare (legando un pennarello sull'asse Z) delle semplici forme geometriche come dei quadrati o dei cerchi in modo da verificare che la lavorazione sia della giusta dimensione, che non ci sia un asse storto o qualche impostazione errata nel software.

Il linguaggio GCODE

Il GCODE è un linguaggio universale che viene utilizzato nella maggior parte delle macchine a controllo numerico, sia che si tratti di un tornio, di una fresa o di una stampante 3D.

Questo linguaggio contiene degli specifici comandi contenenti la posizione che ogni asse deve raggiungere, la velocità a cui muoversi ed altri parametri aggiuntivi quali ad esempio l'accensione del mandrino o il controllo di eventuali fluidi per semplificare le lavorazioni.

Sintassi GCODE

Come suggerito dal nome questo codice è formato da una serie di codici preceduti dalla lettera "G", questi sono i codici maggiormente utilizzati:

G0: movimento a velocità massima

G1: movimento a velocità prefissata

F: scelta della velocità del movimento (ad esempio F150 per muoversi di 150mm/min)

M3: accensione del mandrino (spegnimento con M5 o M9)

M6: cambio utensile (apparirà una finestra con l'utensile da inserire nel mandrino)

M0: pausa nel programma

M2: fine del programma

Ad esempio per disegnare un quadrato con lato 50mm, centro nell'origine e profondo 5mm:

F100 ← imposto la velocità a 100mm/min

G1 X-25.00 Y-25.00 ← mi sposto a X-25.00mm e Y-25.00mm

G1 Z-5.00 ← abbasso la testa a Z-5.00mm

G1 X25.00 Y-25.00 ← disegno i lati del quadrato

G1 X25.00 Y25.00

G1 X-25.00 Y25.00

G1 X-25.00 Y-25.00

G1 Z5.00 ← sollevo la testa

M2 ← fine lavorazione

Creazione del GCODE

Affinché la macchina possa eseguire una lavorazione bisogna aver pronto il GCODE contenente la lavorazione da effettuare, questo codice è possibile generarlo in diversi modi.

Creazione di un circuito stampato con EAGLE

Una volta eseguito lo sbroglio del circuito stampato è possibile mediante un plug-in generare in maniera del tutto automatica il GCODE necessario. Il plug-in si chiama "pcb-gcode" e permette di creare il codice pronto da inviare alla macchina con infinite possibilità di personalizzazione, è possibile ad esempio inserire la dimensione dell'utensile, lo spazio minimo di isolamento tra le piste e la velocità a cui eseguire la lavorazione. Il plug-in inoltre genera anche il file contenente il piano di foratura in modo che semplicemente sostituendo l'utensile quando richiesto la macchina possa creare il circuito pronto da montare e saldare.

L'unico aspetto negativo di questo software (in continua evoluzione) è che genera un GCODE non sempre ottimizzato e che richiede un controllo manuale nel caso si voglia eseguire la lavorazione nel minor tempo possibile riducendo i tempi morti tra una pista e l'altra.

Creazione di un oggetto a partire da un disegno 2D

È possibile realizzare un oggetto solito tridimensionale partendo da un disegno 2D fatto con un qualunque software di CAD, una volta salvato il progetto in formato DXF è sufficiente aprire il programma "DXF2GCODE" il quale lo convertirà automaticamente in file GCODE pronto da inviare alla macchina, è possibile inoltre selezionare l'ordine in cui eseguire ogni singola porzione della lavorazione in modo da ottimizzare i tempi di realizzazione riducendo lo spazio da percorrere tra una sezione e l'altra del disegno.

Creazione di un oggetto partendo da un immagine

Il software EMC2 supporta per sua impostazione nativa la possibilità di importare un immagine in scala di grigi che verrà poi automaticamente convertita in un modello 3D pronto da lavorare, è sufficiente aprire il programma e selezionare l'immagine per avviare automaticamente un wizard che ci guiderà nelle impostazioni necessarie alla lavorazione.

Questa tecnica è molto utile ad esempio nel caso in cui si voglia realizzare una versione tridimensionale di una fotografia.

Creazione di un oggetto partendo da un modello 3D

Per realizzare un oggetto partendo da un modello 3D è necessario una tipologia di software che prende il nome di "CAM", tuttavia questi software sono molto complessi e costosi, essendo prevalentemente pensati per utenze professionali e non hobbistiche.

Problemi comuni e consigli

• Una volta installato e configurato il software potrebbe apparire un avviso nel quale viene riportato l'errore riguardante il mancato permesso di inviare comandi verso la porta parallela, per risolverlo è sufficiente inserire da terminale i seguenti comandi:

sudo -s

gpasswd -a [utente] lp

sudo chmod 666 /dev/lp0

Con i quali si diventa "proprietari" della porta parallela e si acquisiscono i diritti per poterla utilizzare.

- Nel caso in cui i motori stepper dovessero scaldarsi in maniera eccessiva (la temperatura nominale di esercizio è intorno ai 50°C, ma nel caso si arrivasse intorno agli 80°C la situazione diventerebbe pericolosa per il motore) bisogna regolare il trimmer sulla scheda di controllo per limitare la corrente negli avvolgimenti.
- Se durante le prime prove il disegno non dovesse risultare omogeneo o le linee non fossero perfettamente dritte è bene controllare l'allineamento degli assi dato che basta un errore impercettibile ad occhio, protratto per l'intera lunghezza degli assi porta a sfalsare le misure di parecchi millimetri tra un estremo e l'altro della lavorazione
- Se la lavorazione non dovesse risultare sufficientemente precisa si possono valutare parecchie opzioni, tra cui il serraggio delle viti che fissano gli elementi alla struttura (del fluido frena filetti potrebbe essere indispensabile date le vibrazioni a cui è sottoposto il telaio) o eventuali spostamenti dovuti ad imprecisioni nella realizzazione dei supporti. Ulteriore precisione si può ottenere utilizzando motori con più passi per rotazione (o aumentando il microstepping), barre filettate con passo differente (o di tipo differente), guide lineari più precise o cinghie più rigide (a volte basta tenderle leggermente).
- Come già scritto nel paragrafo relativo alle impostazioni software anche il PC che comanda la macchina svolge un ruolo fondamentale nella lavorazione, è possibile utilizzare computer anche datati in quanto non sono richiesti particolari requisiti hardware ma è bene tenere a mente che i computer portatili hanno un maggior numero di componenti interni e hanno una gestione hardware che può portare a numerosi rallentamenti, la scelta migliore è una workstation (anche se vecchia) ma con poche periferiche collegate. Per spremere fino all'ultima goccia le capacità di calcolo si possono anche disinstallare da LinuxCNC tutti i pacchetti non necessari come la gestione dell'audio e delle periferiche di rete.
- Il tipo di punta da utilizzare dipende dal materiale che si desidera lavorare, ad esempio con materiali plastici o alluminio è bene utilizzare una punta particolarmente affilata e un angolo di taglio che consenta di eliminare in maniera immediata i residui generati che altrimenti si scioglierebbero con il calore generato dall'attrito danneggiando la punta e rovinando la lavorazione

Documentazione delle componenti:

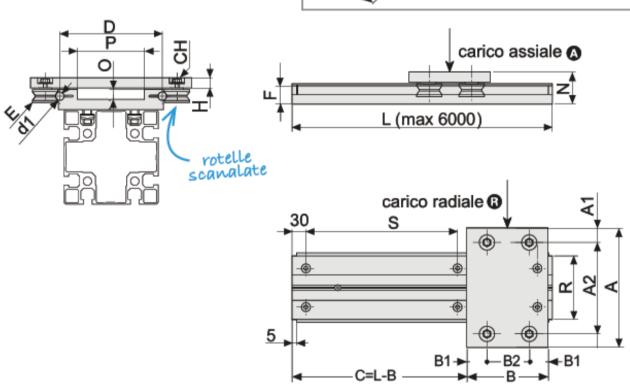
Guide Lineari: Bett Sistemi LGAG20

Impiego: sistema semplice e sicuro da utilizzare sia quando si vuol tenere fissa la guida e far scorrere il carrello portarotelle o quando è fisso il carrello e si fa scorrere la guida.

Materiale alberi di scorrimento in acciaio temprato, cromato e rettificato h6 o acciaio inox AISI 431 temprato e rettificato; profilo e carrello in alluminio anodizzato, rotelle in acciaio.

Confezione standard: 1 pezzo.





Ulteriori dimensioni della guida																			
Tipo di	i d1	Α	В	Н	Αl	A2	В1	В2	D	E	F	N	CH	Р	0	R	S	Cari	ico
rotella									(chiave		(chiave					A[N]	R[N]
416	ø20	275	300	25	40	195	40	220	125	8	30	61,5	24	65	17	130	300	6400	7000
516	ø20	275	300	25	40	195	40	220	125	8	30	61,5	24	65	17	130	300	17200	8600

Cinghie di trasmissione: Bando synchronous belt

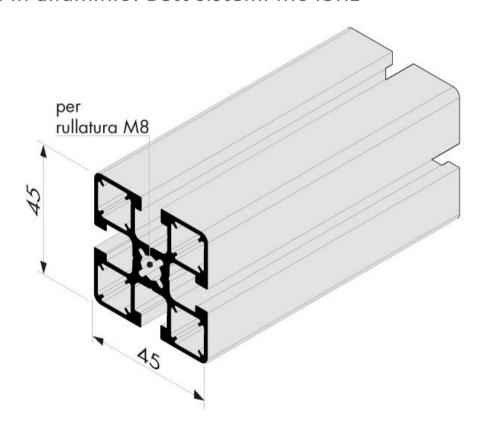
Synchro-Link® HT Timing Belts



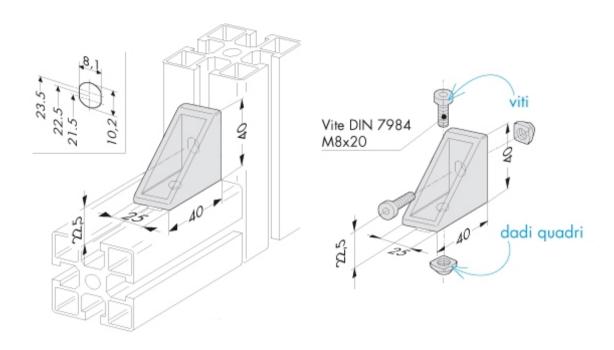
BANDO's Synchro-Link® HT (High Torque Synchronous) belts' curvilinear tooth design improves stress distribution to provide high horse-power ratings over a wide speed range and high torque transmission at low speeds.

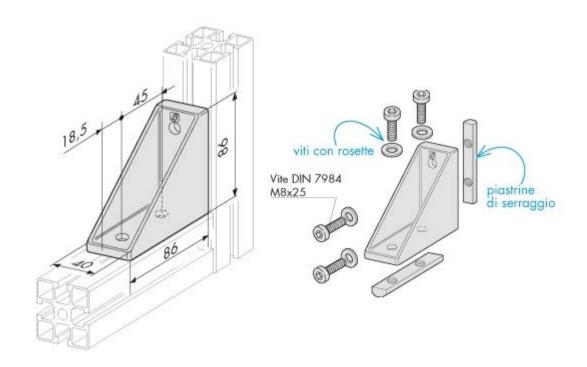
- The rounded tooth profile meshes precisely with matching pulley grooves so there is no belt creep or slip to cause speed variation.
- HT belt drives are 99% efficient, leading to significant energy savings on high horsepower applications.
- HT belts are thin and flexible so they do not generate heat build up, delivering long service life.
- Continuous, helically-wound S and Z oriented fiberglass cord is the load carrying muscle of the belt, resisting elongation and shock loads while providing excellent strength and service life.

Profilati in alluminio: Bett sistemi M045RL

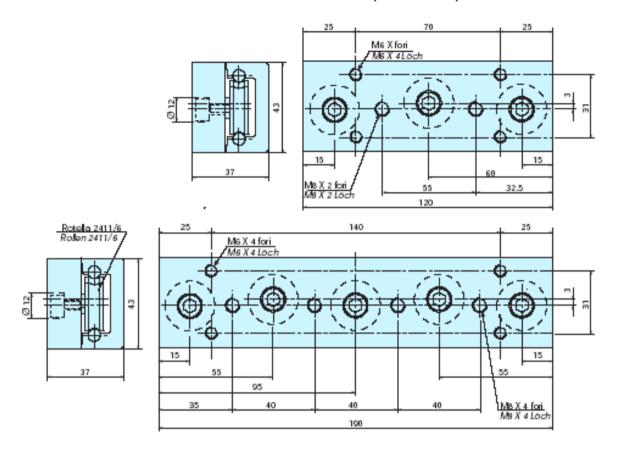


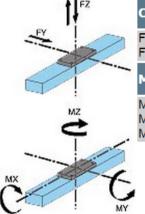
Angolari di fissaggio: Bett sistemi 811 e 957L





Guida lineare: AC Industriale MR-43 (3 ruote)





CARICHI APPLICABILI	MR43C (3 ruote)	MR43/5C (5 ruote)
FZ Max (N) FY Max (N)	0 950	0 1700
	MD 400	MD 40 /F0
MOMENTI AMMISSIBILI	MR43C (3 ruote)	MR43/5C (5 ruote)
MOMENTI AMMISSIBILI Mx Max (N)		

AC Servo Motor: Panasonic Minas XXV (MSM 400W)

■ Servomotori Serie MSM da 30 a 750W

(1) Resistenza al calore Temperatura ambiente permessa: operativa 0°C +40°C stoccaggio -20°C							20°C +80°C		
(2) Resistenz	a umidità	Umidità ambiente permessa 85% o meno non in presenza di condensa							
(3) Resistenz	a d'isolamento	20MΩ ο più							
(4) Rigidità di	elettrica	Resiste AC 1500V per 1 minuto o AC 1800V per 1 secondo. Il freno resiste per 1 secondo con AC 1200V							
(5) Velocità m	assima permessa		uo della veloc						
(6) Resistenza alle vibrazioni 49 m/s² o meno (direzione X, Y, Z; ogni 8 o meno						ore non opera	tivo 24,5 m/s²		
(7) Resistenz	a agli urti	98 m/s² in di	rezione X, Y, Z	Z ogni 3 period	li				
Specifiche elet	triche								
(kW) Potenza	nominale	0.03	0.05	0.1	0.2	0.4	0.75		
Coppia	Nominale	0.095	0.16	0.32	0.64	1.3	2.4		
Nm	Massima	0.28	0.48	0.95	1.91	3.36	6.9		
Inerzia rotore	Senza freno	0.018	0.027	0.063	0.17	0.37	1.33		
10⁴ Kg ⋅ m²	Con freno	0.022	0.032	0.067	0.20	0.4	1.41		
Velocità	Nominale	3000					3000		
(rpm)	Massima		4500						
Costante di c	oppia (Nm/A)	0,103	0,16	0,37	0,42	0,54	0,61		
Corrente A (rr	ns)	1	1	1	1,6	2,5	4,3		
Freno		Alimentazione DC24V							
Encoder			Incremento 2500P/r / assoluto 2048 P/g						
Condizioni ambientali Temperatura di lavoro 0~40°C / Unità di stoccaggio 85% / Vibrazioni					19 m/s² o men				



Inverter per AC Servo: Panasonic Minas XXV (MSD)



Potenza nominale: 400W (0.9KVA)

Alimentazione: 200-230V sia trifase che monofase

Corrente assorbita: 1.8/2.2A

Tensione d'uscita: 106V trifase

Corrente d'uscita: 2.5A

Frequenza d'uscita: 0-333Hz

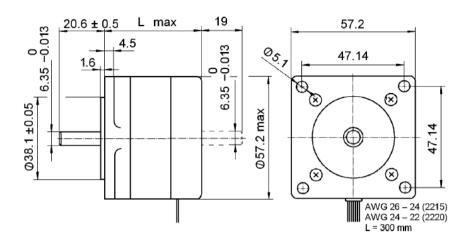
Encoder supportato: 2500step/rev

Tipo di controllo: controllo velocità / controllo coppia / passo a passo

Protezioni: sovratensione, sotto tensione, sovracorrente, sovraccarico

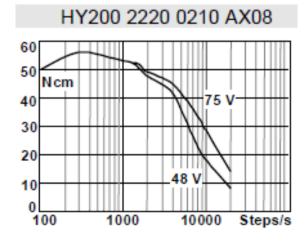
Motore stepper: SCT HY-200





Specifications		
-		0210 AX08
		0210 BX08
step angle		1,8°
step angle accuracy	%	5
rated phase current	Α	2,1
phase resistance	Ω	1,1
phase inductance	mH	1,7
holding torque unipolar *	Ncm	52
holding torque bipolar *	Ncm	64
detent torque	Ncm	5,3
rotor inertia	g cm ²	124
mass	Kg	0,5
max. length	mm	52
max. applicable voltage	V	75
insulation class		В

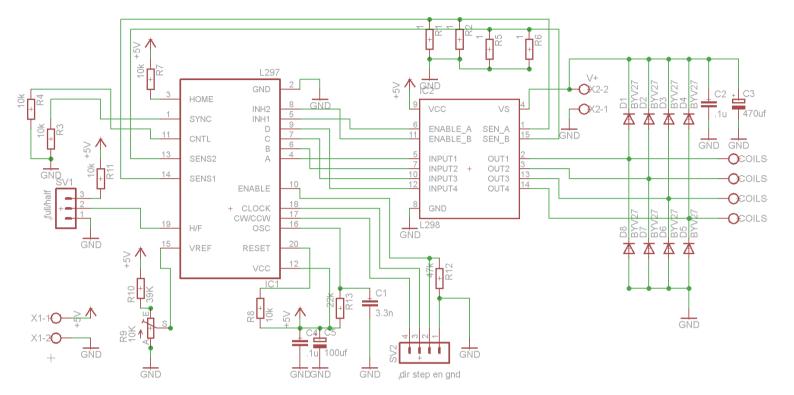
^{*} two phases "ON"



DRIVE: BIP.CHOP. PAR., 3 A/PH

Scheda di controllo stepper: L297/298

Schema elettrico:



La scheda si basa sulla comune coppia di integrati L297 e L298, il primo consente di scomporre i segnali di enable, step e direzione in 4 linee di tensione che mediante un opportuno ponte H (interfaccia di potenza, L298) possa far eseguire i movimenti al motore passo a passo. Nel circuito è stato inserito un controllo di corrente mediante PWM per evitare il danneggiamento del motore, l'intensità della corrente può essere regolata mediante il trimmer R9, l'integrato infatti confronta la tensione sul piedino Vref e sulla coppia Sens1 e Sens2 (le quali, mediante R1 ed R5 forniscono una tensione proporzionale alla corrente in ogni fase del motore) regolando il duty cycle del segnale di comando in modo da variare la corrente che scorre in ciascuna bobina del motore.

Gli ingressi sync e cntl sono stati lasciati volutamente scollegati (collegati a GND) in quanto non si ha la necessità di comandare in parallelo più integrati.

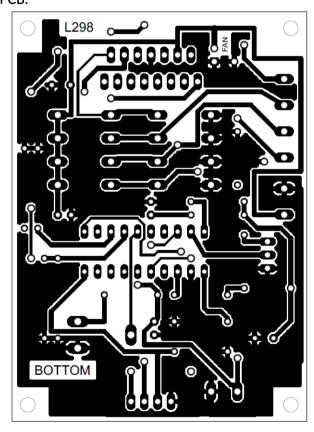
La tensione massima di ingresso è di 32V (nel mio caso il motore viene pilotato a 12V) mentre la frequenza massima di input è di 25Khz.

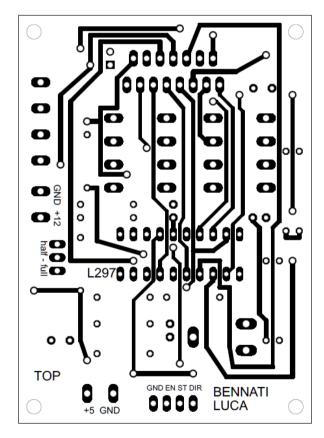
Vicino ai morsetti degli avvolgimenti sono stati inseriti dei diodi di tipo ultra rapido per cortocircuitare le correnti parassite che si vengono a formare nell'istante in cui le induttanze che compongono gli avvolgimenti del motore vengono alimentate.

Elenco componenti:

Riferimento	Valore	Quantità
R1, R2, R5, R6	0,47Ω	4x
R3, R4, R7, R8, R10, R11	10ΚΩ	6x
R9	Trimmer 10KΩ	1x
R12	47ΚΩ	1x
R13	22ΚΩ	1x
IC1	L297	1x
IC1	L298	1x
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8	Diodi schottky ultrafast BYV27 (50V – 2A)	8x
C1	3.3nF	1x
C2, C4	100nF	2x
C3	470uF	1x
C5	100uF	1x
X1, X2	Morsettiere Kress 2 fili	2x
COILS	Morsettiere Kress 4 fili	1x
SV1, SV2	Connettori Strip Maschio 100mils 4 fili	2x

PCB:



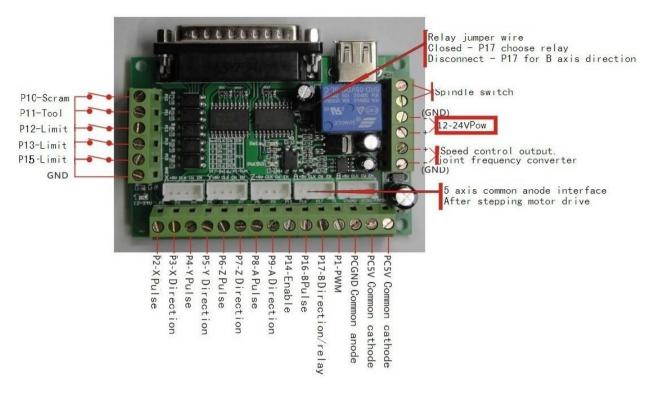


Bottom side

Top Side

Prima di collegare il circuito alla macchina è stato effettuato un meticoloso collaudo al fine di evitare eventuali cortocircuiti accidentali. In base alla corrente per fase del motore collegato andrà regolato il trimmer R9 per erogare una corrente costante e massimizzare il rendimento del motore. A seconda della configurazione andrà poi selezionato mediante un ponticello il funzionamento a passo intero o mezzo passo.

Breakout Board: 5 Axis Mach3 compatible board



Caratteristiche:

- Alimentazione mediante porta usb dell'elettronica di controllo
- Alimentazione esterna 12V o 24V con stabilizzatore integrato
- 12 output e 5 input isolati mediante foto accoppiatori ad alta velocità
- Controllo PWM per la rotazione del mandrino
- Output 0-10V mediante convertitore frequenza/tensione o PWM
- Relè per comando di periferiche esterne (mandrino)
- Controllo mediante porta parallela a 25 pin

Realizzazioni









Note sulla sicurezza

L'attuale normativa in vigore prevede che tutti i macchinari industriali debbano essere approvati mediante marchio CE ai fini di garantire la massima sicurezza dell'operatore. In particolar modo la legge prevede che, tutte le parti in movimento dei macchinari destinati alla vendita o ad uso industriale devono necessariamente essere protette in modo che l'operatore non possa venirne a contatto mentre sono in movimento, per far questo, spesso, si usano speciali micro interruttori montati sulle protezioni che bloccano immediatamente il macchinario non appena queste vengono rimosse (per manutenzione o altro). Dove non è possibile applicare interruttori o protezioni integrali si usano particolari barriere ad infrarossi o tappeti calpestabili con sensori di pressione che rilevano la presenza dell'operatore inviando il comando di emergenza alla macchina ed arrestando ancora una volta il macchinario.



Nel mondo hobbistico è bene tenere a mente queste normative seppur spesso vengono ignorate in quanto è il costruttore stesso che la utilizza e che è pronto ad assumersi la completa responsabilità di eventuali ferite causate a se stesso dalla sua macchina, le attrezzature possono infatti non avere le dovute certificazioni se per uso personale solo nella condizione in cui esso non causi danni a terzi. Caso diverso sarebbe se tale attrezzatura venisse realizzata per conto di un artigiano o di un azienda (in particolare se dietro compenso) dato che in questo caso si risulterebbe dal punto di vista legale costruttore di attrezzature industriali e bisognerebbe necessariamente garantire a chi la compra per lavoro che la macchina rispetti tutte le caratteristiche di sicurezza delle normative UNI, EN e CEI (oltre a tutte le normative locali, le quali riportano ad esempio che bisogna garantire un impianto elettrico a norma con messa a terra funzionante, carter di protezione da schegge e cinghie o organi in movimento, stabilità strutturale dell'attrezzatura e dei vari componenti, sistemi di arresto di emergenza, progetto della macchina da parte di un tecnico specializzato, libretto di uso e manutenzione ecc.). Tale certificazione deve essere rilasciata da personale autorizzato (perito o ingegnere).

Sitografia

- http://www.cuteminds.com/ sito di grande ispirazione gestito da un gruppo di appassionati di fai-da-te contenente innumerevoli consigli pratici e istruzioni per creare la propria CNC a basso costo;
- http://www.linuxcnc.org/ pagina degli sviluppatori di LinuxCNC in cui si trova sempre l'ultima versione del software necessario;
- http://www.linuxcnc.org/docs/ pagina contenente tutta la documentazione relativa ai GCODE utilizzati e supportati da EMC2 oltre alla spiegazione accurata di tutte le opzioni del software;
- http://www.cncitalia.net/forum/ forum contenente centinaia di progetti e realizzazioni di CNC di ogni genere e forma realizzati da appassionati o professionisti, oltre ad un valido punto di riferimento nel caso di problemi con le configurazioni hardware o software;
- http://3dprint.elettronicain.it/ sito da cui ho adattato alle mie necessità i software necessari alla creazione dei GCODE da inviare alla macchina;
- http://sourceforge.net/projects/dxf2gcode/ software scritto in python per la conversione dei file da DXF 2D in GCODE;
- http://www.pcbgcode.org/ plug-in per Eagle per la creazione del GCODE necessario per la realizzazione di un circuito stampato;
- http://www.cadsoftusa.com/ software freemium per la realizzazione di schemi elettrici e circuiti stampati;
- http://www.analisidifesa.it/ sito contenente un gran numero di informazioni sulle Numbers Stations e sulle tecniche di comunicazione durante le guerre.

Ringraziamenti

Un enorme ringraziamento va a mio padre, Bennati Stefano, che nonostante le ore di lavoro quotidiano ha sempre trovato il tempo e la voglia per aiutarmi in ogni parte della realizzazione grazie alla sua esperienza nel campo della meccanica e dell'automazione e ad Antonelli Oreste che mi ha fornito i servomotori, gli inverter e buona parte del materiale utilizzato nella costruzione del telaio oltre ad aver messo a mia disposizione la sua officina ed i suoi macchinari per eseguire ogni genere di lavorazione.

Copyright

Il presente PDF è interamente stato redatto da Luca Benati IU2FRL e non può essere riprodotto nemmeno in parte senza autorizzazione al di fuori dei siti http://www.routerositalia.it, http://www.arimantova.it/

