

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Informatica e dell'Automazione



TESI DI LAUREA

Sistema di rammollimento di un bordo co-estruso tramite tecnica di incollaggio "filo colla ZERO"

System for softening a co-extruded edge by "ZERO joint" bonding technique

Relatore

Prof.ssa Silvia Maria Zanolì

Correlatore

Ing. Michele Mazza

Candidato

Andrea Pizzuto

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Introduzione	1
1 Scopo del progetto	3
1.1 Scm Group	3
1.2 Progetto 'Filo Colla Zero'	4
1.3 Industria 4.0	4
2 Descrizione del processo di bordatura	8
2.1 Macchina bordatrice	8
2.1.1 Materiali principali per la bordatura e l'incollaggio	9
2.2 Processo di bordatura	10
2.3 Problematiche del processo di bordatura tradizionale	13
3 Descrizione setup sperimentale	14
3.1 Diodo Laser Diretto (DDL) ad alta potenza	14
3.1.1 Diodo laser Jenoptik	15
3.2 Array di sensore termico	15
3.2.1 Sensore di temperatura Melexis	16
3.3 RST-5000-24	21
3.4 STM32H7 Nucleo-144 boards	22
4 Descrizione macchina bordatrice a raggio laser	23
4.1 Materiali utilizzati per la costruzione del bordo	23
4.2 Principio di funzionamento	24
4.3 Incidenza del raggio laser	26
4.4 Applicazioni e prospettive future	27
5 Sistema implementato	28
5.1 Software EVBMLX90621	29
5.2 Frequenza di lavoro del sensore di temperatura	30
5.3 Configurazione Hardware	31
5.4 I ² C	32
5.4.1 Funzionamento del protocollo	33
5.4.2 Operazioni I ² C del sensore MLX90621	35
5.5 Programmazione microcontrollore	36
5.5.1 Libreria MLX90621 I2C DRIVER	36

5.5.2	Codice Main	39
6	Sviluppi futuri: Implementazione di un controllore	41
6.1	Sistema di controllo	41
6.2	Regolazione raggio laser	43
6.3	Implementazione futura del microcontrollore	44
7	Conclusioni	45
	Ringraziamenti	46
	Bibliografia e Sitografia	47

L'Industria 4.0 ¹ rappresenta una rivoluzione nell'ambito della produzione industriale, caratterizzata dall'integrazione avanzata di tecnologie digitali, automazione, connettività e analisi dei dati.

Questo paradigma industriale, è concepito per portare a una trasformazione profonda nei processi produttivi, migliorando l'efficienza, la flessibilità e la personalizzazione delle attività manifatturiere. L'Industry 4.0 ha reinventato il modo in cui le aziende progettano, fabbricano e distribuiscono i loro prodotti.

Tecnologie come l'Industrial Internet of Things (IIoT), la connettività cloud, l'AI e il machine learning sono ora profondamente intrecciate nel processo di produzione.

Questo approccio unificato e integrato alla produzione si traduce in prodotti, fabbriche e asset connessi e intelligenti.

La tendenza dell'evoluzione della tecnologia verso reti più sofisticate, architetture multicore e architetture di microprocessori sempre più complesse pone formidabili sfide alle attuali piattaforme dei PLC (acronimo di Programmable Logic Controller).

Il modello di programmazione specializzato utilizzato nei PLC rende difficile adattarsi e sfruttare queste nuove tecnologie, e i tentativi in tal senso spesso, allo stato attuale tendono a compromettere la capacità di garantire la sicurezza.

Tuttavia questo strumento resta fondamentale per l'automazione industriale di conseguenza in futuro potrà evolversi tecnologicamente rimanendo così al passo delle nuove tendenze.

Nel contesto specifico della lavorazione del legno, l'Industria 4.0 ha introdotto una serie di innovazioni che stanno rivoluzionando i processi produttivi, migliorando l'efficienza e consentendo una maggiore personalizzazione dei prodotti.

Diverse lavorazioni del legno hanno ricevuto un grande miglioramento grazie alla Industria 4.0, tra le tante: fresatura, modellatura, sbucciatura, pressatura, essiccazione, incollaggio, verniciatura.

Nella presente tesi, si è rivolta particolare attenzione a delineare con precisione l'impatto sostanziale e trasformativo innescato dall'emergere dell'Industria 4.0, in particolar modo sul settore industriale della lavorazione del legno.

Il progetto legato a questa tesi si pone sfide e obiettivi nel settore dell'Automazione Industriale come la sostenibilità ambientale eliminando l'uso della colla e quindi riducendo notevolmente l'impatto ambientale.

Di conseguenza, in sostituzione della colla, viene introdotto l'utilizzo di un raggio laser che consente una maggiore precisione nel riscaldamento del bordo, migliorando la qualità del prodotto finito.

¹Maci L.

Tra i vantaggi dell'applicazione della nuova tecnologia risulta il fatto che non sarà più necessario pulire e gestire attrezzature associate all'applicazione di colla, questo potrebbe semplificare la manutenzione della macchina bordatrice.

Infine eliminare l'utilizzo della colla evita che dopo anni di vita del prodotto la qualità diminuisca, infatti al momento la giunzione bordo-pannello "filo colla zero" è della migliore qualità estetica possibile.

La tesi è composta da sei capitoli strutturati come di seguito specificato: nel primo capitolo viene presentata l'azienda ospitante del tirocinio e il progetto svolto.

Nel secondo capitolo è descritto il processo classico di bordatura tramite colla, mentre nel terzo è illustrato il setup sperimentale del nuovo progetto e quindi gli strumenti principali utilizzati.

Nel quarto capitolo viene spiegato il principio di funzionamento della macchina bordatrice a laser, invece nel quinto è mostrato il sistema implementato tramite il sensore di temperatura. Nel sesto capitolo è presente una riflessione su una possibile implementazione futura di un controllore a livello teorico.

Il settimo capitolo è riservato alle conclusioni.

Scopo del progetto

Lo scopo del progetto è concepire una macchina che, sfruttando le potenzialità della tecnologia laser, vada oltre la mera funzionalità di bordatura, proponendosi come un'unità di produzione intelligente in grado di garantire giunti ottici con alta qualità estetica, precisione millimetrica e un impatto ambientale ridotto.

Nell'ambito della lavorazione del legno, innovazioni che hanno rivoluzionato i processi produttivi sono state introdotte dall'Industria 4.0, con lo scopo di automatizzare i processi produttivi e consentire una maggiore personalizzazione dei prodotti.

Il lavoro è stato incentrato sulla sinergia tra l'automazione, il controllo numerico e l'uso strategico del laser per ottenere non solo una maggiore efficienza produttiva, ma anche una qualità estetica dei bordi senza precedenti.

Il lavoro di tesi è legato ad un tirocinio, che è stato interamente svolto presso il CSR, Consorzio Scienze e Ricerche, dove l'opportunità di collaborare con un significativo numero di ingegneri altamente qualificati ha arricchito l'esperienza, attraverso la partecipazione attiva del progetto in questione.

1.1 Scm Group

Scm Group nasce dalla visione strategica propria di SCM, fondata nel 1952 a Rimini, con la missione di offrire la più ampia gamma di soluzioni nel settore del legno.

Scm Group è una solida impresa familiare con una visione di lungo termine che mette al centro la persona, le sue professionalità, la qualità di vita e l'attenzione al territorio, non solo di origine, ma in tutti i luoghi in cui il Gruppo si è sviluppato negli anni.

Nel tempo il Gruppo sviluppa tecnologie e acquisisce marchi leader, a completamento di tutti i processi della seconda lavorazione del legno e, successivamente, di materiali compositi, plastica, vetro, metallo e marmo.

Gli stabilimenti produttivi sono sette in Italia, uno a San Marino e uno in Brasile, tra questi le principali sedi si trovano a Villa Verucchio e a Rimini.

In particolare, nella sede di Rimini, il tirocinio si è sviluppato nel CSR, laboratorio che si è prefissato come obiettivo il miglioramento della conformità alle norme nazionali ed internazionali, sia tecniche per le procedure di prova, sia tecnico/gestionali, con attento riguardo alla conformità di attrezzature e preparazione di personale operativo.

1.2 Progetto 'Filo Colla Zero'

In un contesto in cui l'innovazione tecnologica assume un ruolo sempre più determinante, questa tesi si concentra sul progetto "Filo Colla Zero", un progetto che ha lo scopo di ridefinire il processo di bordatura mediante l'utilizzo di una tecnica innovativa in sostituzione della tradizionale colla.

Questa tecnica si basa sull'utilizzo della tecnologia di riscaldamento dei materiali e il loro conseguente incollaggio tramite raggio laser.

Questa tecnica di bordatura ha rivoluzionato il panorama industriale, e solleva domande cruciali sull'efficienza, la sostenibilità e le implicazioni pratiche di tale approccio.

Attraverso un'analisi approfondita di questa tecnologia all'avanguardia, la ricerca si propone di esplorare le potenzialità e le sfide connesse, contribuendo così a un dibattito informato sull'evoluzione delle pratiche manifatturiere.

1.3 Industria 4.0

Il termine, Industria 4.0,¹ è stato usato per la prima volta nel 2011 alla Fiera di Hannover, in Germania.

Inizialmente nato da un'ipotesi progettuale di un gruppo di lavoro che nel 2012 ha presentato al governo federale tedesco una serie di raccomandazioni per l'implementazione del Piano Industria 4.0.

L'8 aprile 2013, sempre alla Fiera di Hannover, è stato diffuso il report finale con una previsione degli investimenti necessari su infrastrutture, scuole, sistemi energetici, enti di ricerca e aziende.

Il modello doveva servire ad ammodernare il sistema produttivo tedesco e riportare la sua manifattura ai vertici mondiali, rendendola competitiva a livello globale.

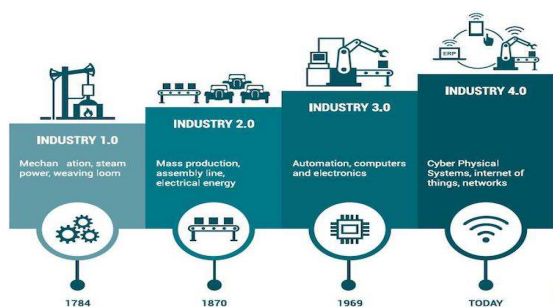


Figura 1.1: Evoluzione industriale negli anni

La figura 1.1 riassume alcune tappe fondamentali dell'evoluzione industriale, l'Industria 4.0² si basa su nove pilastri tecnologici, queste innovazioni collegano il mondo fisico e digitale e rendono possibili sistemi intelligenti e autonomi.

I Big Data si riferiscono alla gestione, all'analisi e all'utilizzo di grandi quantità di dati generati dai processi industriali e dai dispositivi connessi all'interno dell'ambiente di produzione e vengono raccolti da un'ampia gamma di fonti, ciò include l'acquisizione di dati da risorse, apparecchiature e dispositivi abilitati all'IoT.

Grazie all'integrazione orizzontale, invece, i processi sono strettamente integrati nell'area di produzione, mentre con l'integrazione verticale, tutti gli strati di un'organizzazione sono legati tra loro.

¹SAP e Zanotti L.

²Martinelli A., Mina A., Moggi M.

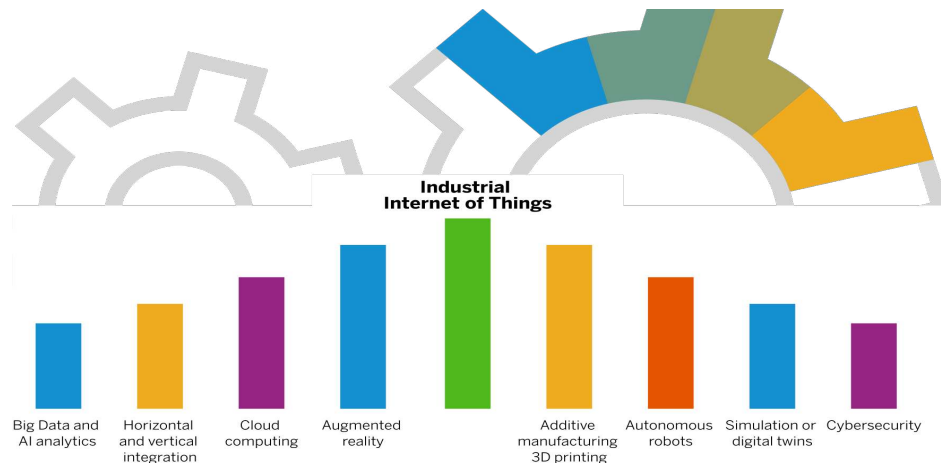


Figura 1.2: Pilastri della quarta rivoluzione industriale

Il cloud computing è il "grande motore" dell'Industria 4.0 e della trasformazione digitale, la tecnologia cloud di oggi costituisce la base per la maggior parte delle tecnologie avanzate, dall'AI all'apprendimento automatico fino all'integrazione con l'IoT.

La Realtà Aumentata è una applicazione emergente in campo industriale non ancora molto diffusa.

La sua applicazione è improntata verso la manutenzione, il servizio e la garanzia di qualità, così come la formazione e la sicurezza dei tecnici.

L'Internet of Things (IoT) è centrale per l'Industria 4.0 tanto che i due termini sono spesso usati in modo intercambiabile, essa consente alle aziende di gestire supply chain più agevoli, progettare e modificare rapidamente i prodotti.

Con la stampa 3D, i componenti e i prodotti possono essere archiviati come file di progettazione in inventari virtuali e stampati su richiesta al momento del bisogno, riducendo inoltre i costi.

A pari passo dell'Industria 4.0 sta emergendo una nuova generazione di robot autonomi programmati per svolgere compiti con un minimo intervento umano.

Il digital twin è la simulazione virtuale di una macchina, di un prodotto, di un processo o di un sistema reale, creata sfruttando i dati dei sensori IoT.

Con l'aumento della connettività e l'uso dei Big Data nell'Industry 4.0, un'efficace sicurezza informatica fa parte dei nove pilastri dell'Industria 4.0.

La produzione³ di prodotti ha subito sviluppi legati all'automazione, alla produzione di massa e alla globalizzazione.

La produzione e la manifattura future saranno trainate dalla "Smart Manufacturing".

Fino a oggi, i controllori logici programmabili (PLC) rimangono molto diffusi per applicazioni di automazione industriale.

La continua evoluzione della produzione di prodotti, guidata dall'automazione, produzione di massa e globalizzazione, è destinata a essere plasmata dallo "Smart Manufacturing" in futuro.

Un ruolo importante nello sviluppo di sistemi industriali è rivestito dai protocolli di comunicazione, i quali forniscono una base robusta per la creazione di macchine intelligenti e per la condivisione di dati essenziale per i processi decisionali dei gestori di fabbrica.

In figura 3 vengono riportati i protocolli maggiormente utilizzati.

Come anticipato, il PLC riveste un ruolo importante nell'automazione industriale e con l'industria 4.0 e quindi la venuta di nuove tecnologie, anch'esso ha subito evoluzioni signifi-

³Chen J., Tai K., Chen H.

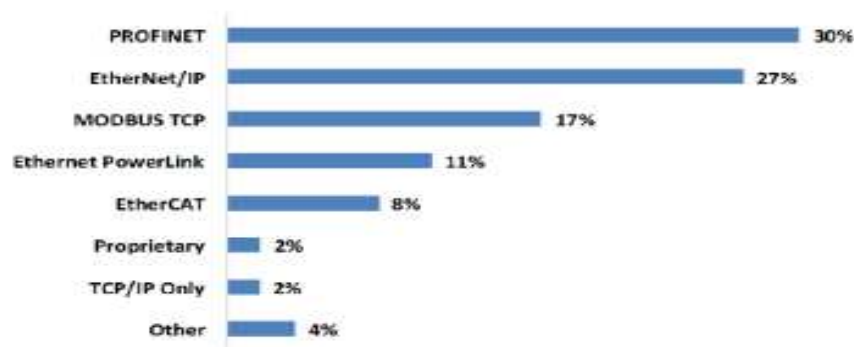


Figura 1.3: Statistiche del mercato Ethernet

cative, come il PLC-IoT.

Il PLC-IoT⁴ è concepito come un PLC per l'Industria 4.0, includendo una varietà di interfacce wireless per la connettività a livello di campo con sensori e attuatori, come si può notare in figura 4.

Inoltre,⁵ contiene internamente un modulo di filtraggio per il pre-processamento dei flussi di dati e un database locale per l'analisi di tendenza a breve termine e la visualizzazione tramite la sua interfaccia uomo-macchina (HMI).

Per la connettività ad alto livello, sono contenute due interfacce, ovvero, un'interfaccia dedicata per la connettività cloud in grado di fornire un modello di informazioni standardizzato e un'interfaccia per la connettività orizzontale con altri IoT-PLC visualizzati sul campo.

Per implementare le due interfacce vengono utilizzati diversi protocolli, tra cui OPC-UA per la connettività, mentre per la seconda viene scelto CoAP (constrained application protocol) come protocollo nominale.

L'interfaccia CoAP è utile quando un IoT-PLC deve formare un circuito chiuso con un sensore o attuatore wireless al di fuori della sua portata wireless e utilizza un secondo IoT-PLC come punto di ricezione.

Questa soluzione di connettività orizzontale riduce potenzialmente la latenza rispetto a una soluzione di integrazione verticale in cui il cloud agisce come ponte.

⁴Mellado J., Núñez F.

⁵Sehr M.A.

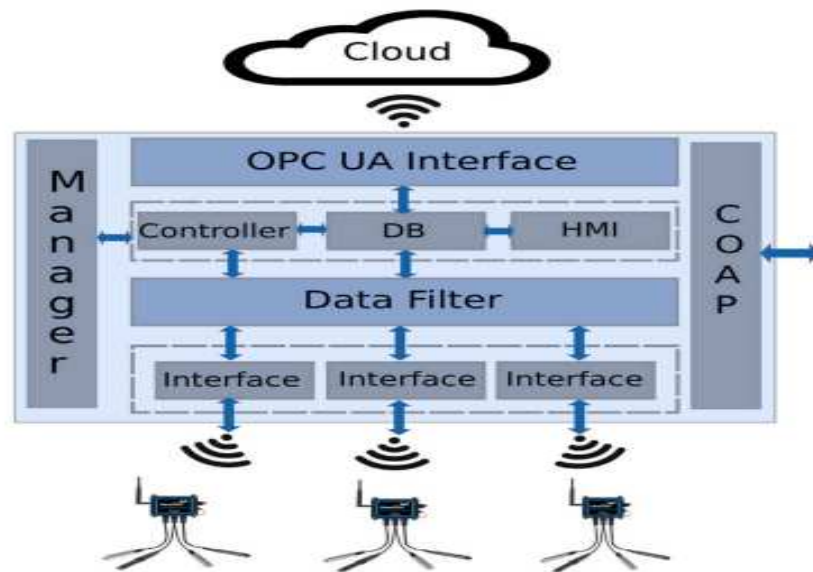


Figura 1.4: Struttura interna del PLC-IoT

Il sistema PLC proposto soddisfa le funzionalità richieste per operare all'interno di un paradigma dell'Industria 4.0, ovvero soddisfa le tipiche restrizioni del mondo OT, includendo al contempo la moderna connettività cloud e gli strumenti di amministrazione tipici del mondo IT.

Descrizione del processo di bordatura

In questo capitolo sarà descritto il processo di bordatura con le diverse tecniche esistenti dando particolare spazio alla bordatura tramite colla per un confronto con il progetto svolto che invece utilizza una bordatura a laser.

2.1 Macchina bordatrice

La bordatura¹ nel settore del legno è il processo che applica sottili strisce di materiale plastico o di legno a bordi grezzi di pannelli o, genericamente a componenti di mobili. Il bordo agisce come uno strato protettivo dall'umidità e dal possibile deperimento dovuto all'umidità atmosferica, contribuendo alla resistenza e durabilità del mobile. I bordi di legno vengono misurati e tagliati nelle dimensioni adeguate in modo da adattarsi perfettamente al pannello di legno, sembrando parte di esso. Esistono diverse modalità per la bordatura come ad esempio la bordatura a colla calda, con nastro adesivo tramite pressione o ancora la bordatura a laser.



Figura 2.1: Esempio di bordatura

¹David J.

2.1.1 Materiali principali per la bordatura e l'incollaggio

È essenziale utilizzare la rifinitura giusta per un determinato tipo di legno per garantirne longevità e resistenza.

Principalmente, le rifiniture di bordo in PVC (Polivinilcloruro) vengono utilizzate per coprire i pannelli di legno dei mobili modulari.

È il materiale più popolare per la rifinitura dei bordi grazie al suo basso costo e alla resistenza aggiuntiva, inoltre non richiede un processo di finitura complesso.

Il principale svantaggio del materiale per rifiniture in PVC è che non è biodegradabile e non è possibile riciclarlo.

Diversamente, le rifiniture per bordi in ABS (Acrilonitrile Butadiene Stirene) rappresentano un'ottima e ecologica alternativa alle rifiniture in PVC inoltre presentano un'elevata resistenza agli urti, una densità inferiore, buone proprietà adesive e sono riciclabili.

Un altro materiale utilizzato nel bordo è il polipropilene che può resistere a condizioni di calore estreme, rendendolo un'ottima opzione per aree ad alta temperatura.



Figura 2.2: Esempio di bordi in PVC

Come il bordo, anche la scelta della colla dipende da vari fattori, tra cui il tipo di materiale, il processo di produzione, la velocità di asciugatura desiderata e le proprietà specifiche richieste per l'applicazione finale.

Le colle generalmente utilizzate per il processo di bordatura sono a base di PA (Poliammide) e PVA (Polivinilacetato).

In questo caso la colla viene riscaldata fino a diventare liquida, poi applicata sui bordi del materiale, è rapida, efficiente e offre una buona adesione. La colla comunemente utilizzata per la bordatura di materiali come il legno prende il nome di colla EVA (etilene-vinil acetato), perché è resistente all'umidità e offre una buona adesione. Tuttavia a seguito di alcuni esperimenti è preferibile per la lavorazione del legno la colla PUR (Poliuretano Reattivo), nota per la sua forte adesione, resistenza alle condizioni ambientali e flessibilità.

Abbiamo infine la colla PSA (Pressure Sensitive Adhesive), una colla autoadesiva e attiva solo quando viene applicata pressione.



Figura 2.3: Esempio di colla EVA

2.2 Processo di bordatura

Il primo passo nel processo di bordatura tramite colla² è la configurazione della macchina tramite pannello di controllo, un momento critico per garantire la qualità del prodotto finale. Questa fase è fondamentale poiché eventuali scelte errate in questa fase influenzeranno negativamente l'aspetto e la durabilità del prodotto finale.

Tipicamente le moderne macchine bordatrici sono dotate di un'interfaccia uomo-macchina (HMI: Human-Machine Interface) che agevola all'operatore le operazioni di settaggio. Infatti possiamo vedere in figura 2.4 come l'operatore grazie alla HMI imposta la macchina per il processo di bordatura scegliendo accuratamente il materiale del bordo, la densità e il tipo di colla.



Figura 2.4: Pannello di controllo

Una volta impostata la macchina, dovrà essere preparata la colla, come visto in precedenza, la scelta della tipologia di colla può essere vasta, tipicamente la colla utilizzata si trova in uno stato liquido. Dopodiché la colla, attraverso dei tubi, viene portata al punto di applicazione del bordo dove verrà utilizzata.



Figura 2.5: Colla allo stato liquido

²Blue Elephant CNC

Successivamente il processo di bordatura coinvolge l'utilizzo di un nastro trasportatore, una componente chiave per la movimentazione fluida e continua del pannello attraverso le fasi successive del processo.

Questa fase è cruciale per mantenere l'efficienza e la sincronizzazione con le altre fasi della produzione.

Il nastro trasportatore deve essere configurato in modo da garantire una movimentazione stabile e precisa del pannello durante tutto il processo di bordatura.

Questo include la regolazione della velocità del nastro, l'allineamento accurato e l'implementazione di meccanismi di trattenuta per evitare slittamenti indesiderati.

Come vediamo nella figura 2.6, il sistema di trasporto prevede dei rulli superiori e inferiori; questo garantisce una movimentazione stabile e controllata del pannello durante il trasporto. Inoltre possono essere integrati dei sensori di sicurezza per monitorare il movimento del pannello e rilevare eventuali anomalie o blocchi.



Figura 2.6: Nastro trasportatore

A questo punto il pannello di legno grezzo viene trasportato fino al punto dove la colla viene applicata.

Un dosaggio preciso della colla è essenziale per evitare eccessi o carenze, infatti possono essere impiegati sistemi di dosaggio automatici per garantire una distribuzione uniforme della colla sulla superficie del pannello.

Inoltre il controllo della quantità di colla applicata è fondamentale per evitare sprechi e assicurare una connessione solida tra il pannello e il bordo.



Figura 2.7: Applicazione della colla

In seguito il bordo viene avvicinato al sistema e anch'esso viene rivestito di colla in modo da garantire una forte adesione tra il bordo e il pannello durante il processo di incollaggio. La figura 2.8 rappresenta proprio quest'ultimo processo, come vediamo viene applicata una pressione da dei rulli laterali oltre che ai rulli superiori e inferiori per permettere una bordatura precisa ed efficace.



Figura 2.8: Incollaggio del bordo

Negli ultimi anni le macchine industriali sono diventate sempre più precise, per questo è importante comunicare l'ultimo passo del processo di bordatura che avviene tramite una lamina inclinata e che permette al bordo di essere rifinito da eventuali eccessi di colla o sbavature.



Figura 2.9: Rifinitura

2.3 Problematiche del processo di bordatura tradizionale

La bordatura a colla ha rappresentato una svolta importante rispetto alle tecniche precedenti, soprattutto la nascita delle macchine bordatrici automatiche a colla ha permesso di automatizzare processi e tecniche che in precedenza venivano eseguiti in maniera artigianale. L'uso della colla ha consentito una maggiore precisione e un aspetto più pulito nei prodotti finiti.

L'introduzione delle macchine bordatrici a colla ha notevolmente migliorato l'efficienza del processo di bordatura, riducendo il tempo necessario e aumentando la capacità produttiva. Tuttavia il processo di bordatura del legno tramite colla è soggetto a diverse problematiche che richiedono attenzione e risoluzione per garantire la qualità del prodotto finito.

Una delle sfide principali è rappresentata dalla scelta e dall'applicazione della colla stessa, poiché la sua adesione efficace è essenziale per la durabilità e la solidità del bordo.

La variabilità delle condizioni ambientali, come l'umidità e la temperatura, può influenzare significativamente il processo di incollaggio, richiedendo l'implementazione di sistemi di controllo precisi.

Un'altra criticità riguarda la gestione delle fughe di colla durante il processo di bordatura.

Le fuoriuscite eccessive possono compromettere l'aspetto estetico del prodotto finito e richiedono interventi aggiuntivi per la pulizia, aumentando i costi e riducendo l'efficienza produttiva.

La ricerca di soluzioni per minimizzare o prevenire tali fughe rappresenta un obiettivo cruciale per ottimizzare il processo.

Inoltre, la selezione di legni con caratteristiche diverse può generare disomogeneità nella capacità di assorbire la colla, creando potenziali discontinuità o debolezze nel bordo.

Affrontare questa varietà di materiali richiede una personalizzazione dell'approccio di incollaggio per garantire risultati uniformi e affidabili.

Infine, l'aspetto ambientale gioca un ruolo sempre più importante nelle considerazioni di produzione.

La scelta delle colle e la gestione dei sottoprodotti chimici derivanti dal processo richiedono un'attenzione particolare per garantire la sostenibilità e la conformità normativa.

Il progetto "Filo Colla Zero" ha quindi l'obiettivo di risolvere queste problematiche grazie allo sviluppo tecnologico concretizzato soprattutto dall'Industria 4.0.

Descrizione setup sperimentale

Il presente capitolo si propone di offrire una dettagliata panoramica del setup sperimentale impiegato nel contesto di questo progetto.

Attraverso una chiara esposizione degli strumenti e delle apparecchiature utilizzate, sarà possibile comprendere la struttura fondamentale che rende possibile l'esecuzione della sperimentazione del progetto.

3.1 Diodo Laser Diretto (DDL) ad alta potenza

I diodi laser¹ (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) rappresentano una forma di tecnologia laser che sfrutta i principi della luce coerente e della stimolazione dell'emissione.

La loro invenzione negli anni '60 ha portato a una rivoluzione nelle tecnologie ottiche, trovando una vasta gamma di applicazioni in settori come le telecomunicazioni, la medicina, il trattamento dei materiali, e molti altri.

Un diodo laser è essenzialmente un dispositivo semiconduttore che converte l'energia elettrica in luce laser coerente attraverso un processo noto come emissione stimolata.

Come sappiamo, il cuore di un diodo laser è una giunzione a semiconduttore che connette materiali semiconduttori di tipo p e n.

Applicando una tensione alla giunzione, si iniettano portatori di carica (elettroni e lacune) nella zona attiva del diodo.

Gli elettroni che si ricombinano con le lacune rilasciano energia sotto forma di fotoni.

Per la tecnica di incollaggio "filo colla 0" il diodo laser assume un ruolo fondamentale, tuttavia in questo caso parliamo di un DDL ad alta potenza che presenta quindi alcune differenze.

Questi diodi sono progettati per fornire intensità luminosa elevata, amplificando il fascio laser in maniera efficiente.

La costruzione di un diodo laser ad alta potenza è simile a quella di un diodo laser standard, ma con alcune caratteristiche e progettazioni specifiche per gestire potenze ottiche più elevate. Nei diodi laser ad alta potenza, spesso si utilizzano configurazioni a barre, che consistono in un array di diodi laser posti su un singolo substrato, questa configurazione consente di aumentare la potenza complessiva del dispositivo, combinando quindi l'uscita di diversi diodi.

¹Ditmire T.

3.1.1 Diodo laser Jenoptik

Il diodo laser utilizzato per riscaldare il bordo è stato acquistato dalla casa Jenoptik ed ha alcune caratteristiche molto importanti.

Il diodo in questione ha una potenza in uscita pari a 1.2kW ottici, ed un sistema di raffreddamento molto particolare che richiede l'utilizzo di un chiller.



Figura 3.1: Diodo Laser Jenoptik

3.2 Array di sensore termico

I sensori a matrice infrarossi² (IR) sono dispositivi all'avanguardia che hanno rivoluzionato varie industrie, dai sistemi di sicurezza alla diagnostica medica.

Questi sensori rilevano e misurano la radiazione infrarossa emessa dagli oggetti, consentendo misurazioni di temperatura senza contatto, rilevamento del movimento e imaging termico. I sensori a matrice infrarossi operano basandosi sul principio della rilevazione e misurazione della radiazione infrarossa invisibile emessa da tutti gli oggetti con una temperatura superiore allo zero assoluto.

La radiazione emessa dall'oggetto di destinazione viene focalizzata sull'array di rilevatori mediante ottiche specializzate, come lenti o specchi.

Ogni elemento del rilevatore nell'array genera un segnale elettrico proporzionale alla radiazione infrarossa incidente. Successivamente sarà il microcontrollore che ricevendo i dati ottenuti dal sensore, li elabora ed infine li memorizza.

Esistono inoltre sensori di temperatura a infrarossi a termopila: tale sensore utilizza una termopila per rilevare e misurare la radiazione termica. Il sensore funziona assorbendo la radiazione infrarossa e convertendola in un segnale elettrico che può essere letto e interpretato da un computer o altro dispositivo elettronico.

Quando una termopila è esposta alla radiazione infrarossa, genera una piccola corrente proporzionale alla quantità di radiazione che assorbe. Questa corrente viene quindi utilizzata per misurare la temperatura dell'oggetto o dell'area monitorata. I sensori a termopila IR sono comunemente usati nelle applicazioni industriali e scientifiche per la misurazione della temperatura, termografia, e altre applicazioni che richiedono il rilevamento della radiazione termica.

²Karaki H., Polyzoov V.

Un sensore di temperatura a termopila a infrarossi è composto da diversi termocoppie collegate in serie che hanno i loro giunti "caldi" collegati a un sottile assorbitore di infrarossi. Lo scambio di radiazioni infrarosse tra l'assorbitore e l'oggetto di fronte ad esso fa aumentare o diminuire la temperatura dell'assorbitore, a seconda della differenza di temperatura tra esso e l'oggetto. Questo processo è regolato dalla legge di Plank sulla radiazione del corpo nero e dalla legge di Stefan-Boltzmann sul trasferimento di calore radiativo. La piccola massa dell'assorbitore garantisce un rapido equilibrio termico con l'oggetto mentre lo spessore fine fornisce un isolamento termico dal materiale principale del chip.

3.2.1 Sensore di temperatura Melexis

Il sensore MLX90621 è un dispositivo avanzato di rilevamento termico sviluppato da Melexis, progettato per misurare la temperatura di una matrice di punti in una scena o su una superficie.

Il MLX90621 ha mostrato un notevole miglioramento in termini di velocità e risoluzione della temperatura (quattro volte superiore) rispetto ai prodotti della generazione precedente.

Questo sensore lavora ad alta velocità, aggiorna e amplia ulteriormente il potenziale di applicazione dell'imaging termico a basso costo.

Contiene 64 pixel infrarossi con un amplificatore stabilizzato mediante la tecnica del chopper e un convertitore analogico-digitale integrato, inoltre un sensore PTAT (Proporzionale alla Temperatura Assoluta) è integrato per misurare la temperatura ambiente del chip.

Le uscite sia del sensore infrarosso che del PTAT sono memorizzate nella RAM interna e sono accessibili tramite I2C.



Figura 3.2: Sensore di temperatura Melexis MLX90621

Il sensore MLX90621 differisce di alcune caratteristiche per tre diversi modelli, eccone le caratteristiche principali del sensore che è stato utilizzato per il progetto 'Filo Colla Zero'.

Parametri	Valore
Tensione di alimentazione	2.6V
Numero di pixels	16x4
Campo di Visione	60°x16°
Frequenza di aggiornamento	0.5Hz...512Hz
Range di temperatura di lavoro	-40...+85°C
Range di temperatura di salvataggio	-40...+125°C

Tabella 3.1: Caratteristiche tecniche MLX90621

Come vediamo di seguito nella figura 2.1, il sensore utilizza una memoria RAM, dove a seguito di un filtraggio digitale il valore dei vari sensori vengono salvati. Inoltre la memoria

RAM si interfaccia tramite la comunicazione³ I²C (abbreviazione di Inter-Integrated Circuit, tale protocollo di comunicazione verrà descritto più dettagliatamente nel paragrafo 5.4) ad un microcontrollore (nel caso del progetto si tratta di STM32H7 Nucleo-144) che ottenendo i valori del sensore salvati nella memoria EEPROM può sviluppare tutti i calcoli utili per acquisire le temperature dei 16x4 pixels e la temperatura ambiente.

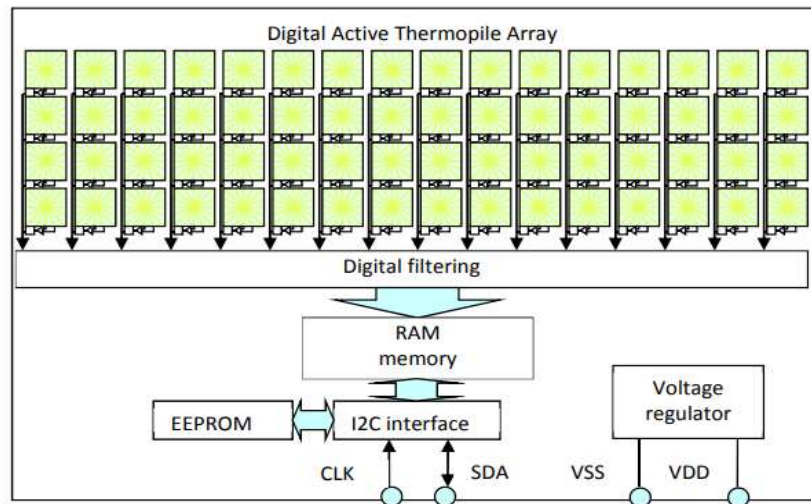


Figura 3.3: Struttura del funzionamento del sensore MLX90621

Nel contesto del progetto, è cruciale determinare la distanza ottimale a cui posizionare il sensore di temperatura in modo da coprire efficacemente il bordo sul quale dobbiamo misurarne la temperatura.

La scelta della distanza di montaggio del sensore è fondamentale per garantire una rilevazione accurata e completa dell'oggetto di interesse.

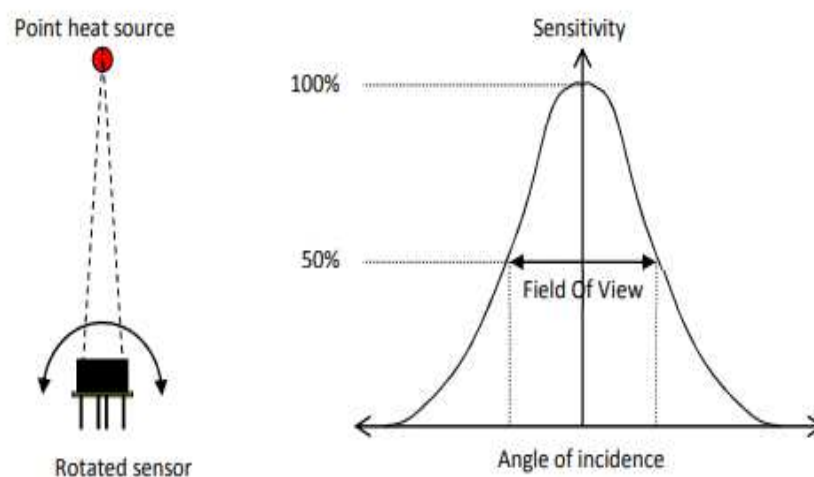


Figura 3.4: Campo di visione del sensore MLX90621

Considerando la geometria del FOV del sensore, il quale copre un angolo di 60° orizzontalmente e 16° verticalmente, possiamo calcolare la distanza necessaria utilizzando la trigonometria.

³Campbell S.

Considerando, ad esempio, un bordo di un'area di circa 10cm^2 possiamo determinare la distanza ottimale (d) mediante la relazione trigonometrica:

$$d = \tan\left(\frac{\text{FOV}}{2}\right) \cdot A$$

dove A è la dimensione dell'area che vogliamo coprire e $\text{FOV}/2$ è la metà dell'angolo di visione. Applicando questa formula, otteniamo:

$$d = 10 \tan(30^\circ) \approx 17.32 \text{ cm}$$

Quindi, per coprire un'area massima di 10cm^2 , è consigliabile posizionare il sensore a una distanza di circa 17.32 cm dall'oggetto di interesse. Questa distanza massimizzerà l'efficacia del sensore nel rilevare oggetti nell'area desiderata, garantendo al contempo una copertura ottimale all'interno del FOV specificato.

Come anticipato, il sensore comunica tramite I²C e viene configurato via hardware tramite 4 pin, i quali vengono descritti nella figura 3.5 e nella tabella 3.2.

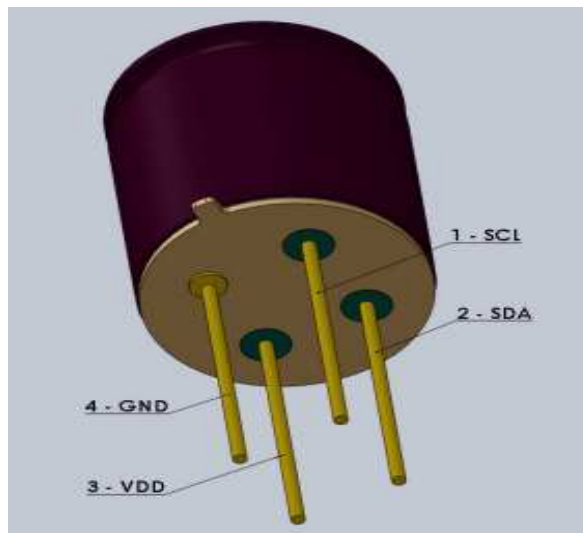


Figura 3.5: Descrizione dei pin del sensore MLX90621

Nome del pin	Funzione del pin
SDA	Ingresso/uscita digitale per il protocollo di comunicazione I ² C
SCL	Ingresso di clock seriale per il protocollo di comunicazione I ² C
VDD	Tensione di alimentazione esterna
GND	Ground

Tabella 3.2: Caratteristiche tecniche MLX90621

Successivamente vedremo l'importanza di questo protocollo di comunicazione all'interno del progetto garantendo la possibilità di comunicare in maniera rapida ed efficace con il microcontrollore.

Riproponendo lo schema di funzionamento mostrato in figura 3.3, l'interfaccia I²C ci permette di comunicare con la memoria EEPROM del sensore e di ottenere i risultati digitalmente filtrati e memorizzati all'interno della memoria RAM del sensore.

Per comprendere al meglio il codice sviluppato per il microcontrollore è importante anticipare il principio di funzionamento del sensore che comprende anche il procedimento di calcolo per elaborare i dati ottenuti in temperature.

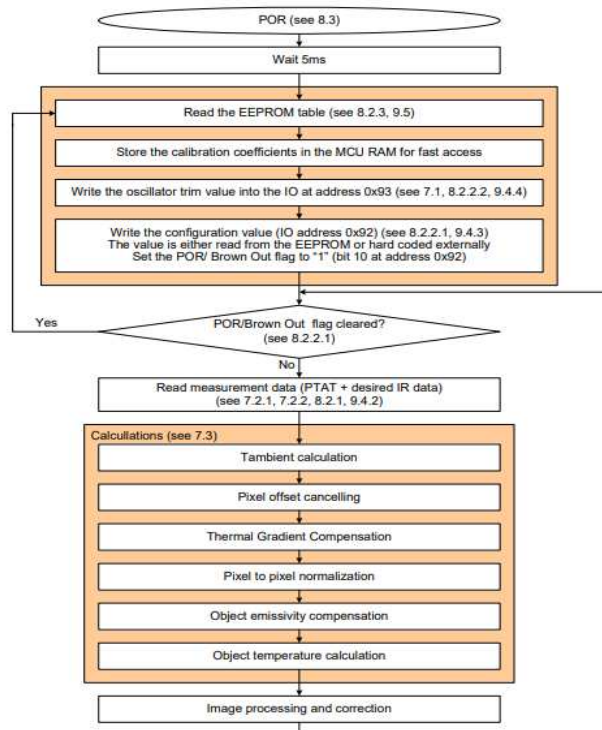


Figura 3.6: Principio di funzionamento del sensore MLX90621

Il Power On Reset (POR) è collegato all'alimentazione VDD. Il dispositivo si avvierà circa 5 millisecondi dopo il rilascio del POR. Dopo il rilascio del POR, il microcontrollore esterno deve eseguire un processo di inizializzazione.

L'output dei pixel infrarossi e del sensore di temperatura assoluta vengono esaminati in base alla frequenza di aggiornamento programmata.

Utilizzando i dati di output insieme alle costanti di calibrazione scritte nell'EEPROM, è possibile calcolare la temperatura assoluta del chip e la temperatura dell'oggetto "osservato" da ciascun pixel.

Per raggiungere questo obiettivo, devono essere eseguiti diversi calcoli sequenziali come vediamo dal diagramma di flusso illustrato nella Figura 3.6.

Introduciamo ora in dettaglio la parte del calcolo della temperatura.

Per questo tipo di sensore di temperatura è necessario calcolare prima la temperatura del chip (T_a , temperatura del sensore) utilizzando la seguente formula:

$$T_a = -\frac{KT1 + \sqrt{KT1^2 - 4KT2[VTH(25) - PTATdata]}}{2KT2} + 25[^\circ\text{C}]$$

dove $VTH(25)$, $KT1$ e $KT2$ sono costanti ricavabili dalla memoria EEPROM del sensore, mentre $PTATdata$ è un parametro integrato al sensore utile per ottenere la temperatura ambiente del sensore stesso.

Successivamente, la temperatura percepita da ciascun pixel può essere calcolata utilizzando la formula:

$$T_O(i, j) = \sqrt[4]{\frac{\text{VIR}(i, j)\text{COMPENSATED}}{\alpha_{\text{comp}}(i, j) \cdot (1 - Ks4) + Sx(i, j)}} + T_{\text{ak}}^4 - 273.15 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Dove:

- $\text{VIR}(i, j)\text{COMPENSATED}$ è il segnale infrarosso compensato da disturbi
- $\alpha_{\text{comp}}(i, j)$ è il coefficiente di sensibilità compensato per ogni pixel
- $Ks4$ è il fattore di compensazione per la sensibilità
- $T_{\text{ak}}^4 = (T_a + 273.15)^4$ dove T_a è la temperatura ambiente
- $Sx(i, j) = Ks4 \cdot \sqrt[4]{\alpha_{\text{comp}}(i, j)^3 \cdot \text{VIR}(i, j)\text{COMPENSATED} + \alpha_{\text{comp}}(i, j)^4 \cdot T_{\text{ak}}^4}$

Il termine $\text{VIR}(i, j)\text{COMPENSATED}$ è una combinazione di tre tipi di compensazioni: compensazione dell'offset, compensazione del gradiente termico (TGC) e compensazione dell'emissività.

La compensazione dell'offset compensa il rumore di non uniformità (NU) nell'array del sensore IR, causato dalla variazione da pixel a pixel nella risposta dei rilevatori.

Viene ridotto il rumore a modello fisso (FPN) sovrapposto all'immagine reale.

La formula di compensazione è la seguente:

$$\text{VIR}(i, j)\text{OffsetCompensated} = \text{VIR}(i, j) - (A_i(i, j) + B_i(i, j) \cdot (T_a - T_{a0}))$$

Dove:

- $\text{VIR}(i, j)$ è l'uscita di dati IR di un singolo pixel (lettura RAM).
- $A_i(i, j)$ è l'offset individuale ripristinato dall'EEPROM utilizzando la formula:

$$A_i(i, j) = \frac{A_{\text{common}} + \delta A_i(i, j) \cdot 2^{\delta A_{\text{scale}}}}{2^{3-\text{ConfigReg}[5:4]}}$$

- $B_i(i, j)$ è il coefficiente di pendenza dell'offset individuale per pixel.
- T_a è la temperatura ambiente calcolata precedentemente.
- $T_{a0} = 25^\circ\text{C}$ è una costante.

La compensazione del gradiente termico (TGC) è utilizzata per compensare gli errori dovuti agli "effetti termoelettrici".

Gli errori termoelettrici si verificano quando più di un tipo di metallo è utilizzato nella costruzione dell'elemento sensibile e del corpo e dei fili associati.

La formula di compensazione è:

$$\text{VIR}(i, j)\text{TGCCompensated} = \text{VIR}(i, j)\text{OffsetCompensated} - \text{TGC} \cdot \text{VIRcpOffsetCompensated}$$

Dove:

- $\text{VIRcpOffsetCompensated}$ è il segnale IR compensato dell'offset del pixel di compensazione del gradiente termico.
- $\text{TGC} = \text{TGCEEPROM}/32$ è un coefficiente memorizzato nell'EEPROM.

Conforme alla legge di Stefan-Boltzmann, la potenza emissiva di un corpo nero è $E_b = \sigma T^4$, dove $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^2 \text{ K}^4$ e la temperatura è misurata in Kelvin. Per un corpo non nero, la potenza emissiva è $E_b = \varepsilon \sigma T^4$, dove ε è l'emissività della superficie considerata.

La formula che ci permette di considerare questo parametro è la seguente:

$$\text{VIR}(i,j)\text{COMPENSATED} = \frac{\text{VIR}(i,j)\text{TGCCCompensated}}{\varepsilon}$$

Questi calcoli sono stati dettagliatamente descritti per spiegare successivamente il codice principale sviluppato per il microcontrollore all'interno del presente progetto.

3.3 RST-5000-24

L'alimentatore utilizzato per alimentare il raggio laser è RST-5000-24, proveniente dalla casa Meanwell.

La serie RST-5000 è un alimentatore di tipo AC/DC con singola uscita e potenza di 5 kW (kilowatt) che offre una vasta flessibilità di progettazione dotandosi di varie funzioni integrate come la programmazione dell'uscita, la condivisione attiva della corrente, il controllo ON-OFF remoto e l'alimentazione ausiliaria.

Nel caso di RST-5000-24 l'alimentatore ha una tensione di uscita a 24V.



Figura 3.7: Alimentatore RST-5000-24

3.4 STM32H7 Nucleo-144 boards

Le schede STM32 Nucleo, estremamente convenienti, consentono a chiunque di sperimentare nuove idee e di creare rapidamente prototipi con qualsiasi microcontrollore STM32. Condividendo gli stessi connettori, le schede STM32 Nucleo possono essere facilmente estese con molti accessori hardware specializzati.

In questo progetto la scheda assume un ruolo fondamentale per comunicare con il sensore di temperatura tramite il protocollo I2C ed essere programmata per salvare i dati in modo da post-processarli.

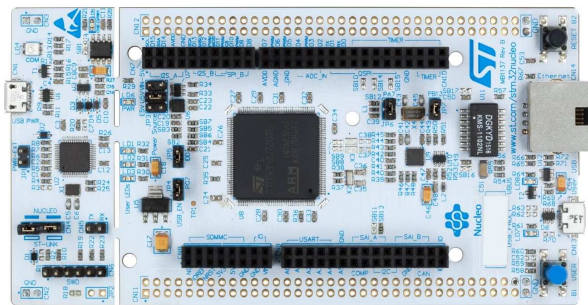


Figura 3.8: Stm32-h743-zi2

Descrizione macchina bordatrice a raggio laser

Questo capitolo è riservato alla descrizione specifica della macchina bordatrice a raggio laser, i tipi di bordi utilizzati e quindi il processo di bordatura "zero joint" o "filo colla 0". In particolare sarà mostrato il confronto con la tradizionale macchina bordatrice a colla e quindi le prospettive future.

4.1 Materiali utilizzati per la costruzione del bordo

Nell'introduzione della presente tesi è stato anticipato come questa macchina abbia l'obiettivo di produrre dei bordi esteticamente migliori e soprattutto contribuendo alla questione ambientale.

Per questo è importante descrivere le differenze che troviamo tra un bordo alla quale deve essere applicata e poi pressata della colla rispetto ad un bordo che sarà soggetto a un processo di bordatura tramite raggio laser.

Generalmente in questi casi il bordo può essere prodotto con un sottile strato di colla già applicata che sarà poi riscaldata dal raggio laser.

La categorizzazione dello strato interno¹ con funzione adesiva si articola principalmente in due tipologie:

- Spread (Spalmato): un adesivo termofusibile a base di poliolefine viene uniformemente steso sul retro di uno spigolo adeguatamente preparato. Il processo successivo prevede la riattivazione di tale adesivo attraverso il riscaldamento, il quale è indotto dal diodo laser
- Coestruso: un polimero con caratteristiche adeguate viene coestruso insieme al bordo in plastica, costituendo il suo strato interno. Durante la fase di bordatura, questo polimero è riattivato grazie al riscaldamento del retro dello spigolo, operato mediante una fonte di energia appropriata

Queste diverse modalità di trattamento dello strato interno delineano l'approccio multifattoriale adottato nella realizzazione degli spigoli, fornendo soluzioni versatili e adatte alle esigenze specifiche del processo di bordatura.

¹Forth K.

4.2 Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento² della bordatrice con tecnologia laser è fondato sull'utilizzo di un laser retroazionato da un sistema di controllo.

Il bordo viene posizionato sul nastro trasportatore, il laser viene indirizzato verso l'area del bordo che si vuole riscaldare.

Il laser emette una radiazione ad alta intensità focalizzata su una piccola area.

Questa intensa fonte di energia provoca il riscaldamento e l'evaporazione controllata del materiale lungo il bordo del pannello.

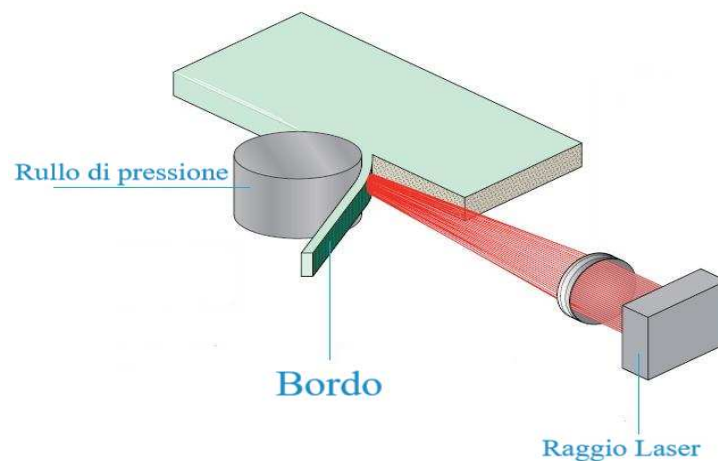


Figura 4.1: Esempio di funzionamento di una bordatrice automatica

Questo processo viene automatizzato dal sistema di controllo che ha il compito di gestire con precisione la potenza del laser, la quale deve variare a seconda di diversi parametri.

Questa precisione consente di modulare la profondità e l'estensione della fusione del materiale, garantendo una lavorazione uniforme e una finitura di alta qualità.

La capacità di controllare in modo accurato la temperatura e la profondità di fusione è fondamentale per evitare danni al pannello e per ottenere bordi perfettamente rifiniti.

Un aspetto significativo della tecnologia laser in bordatura è la sua capacità di gestire una varietà di materiali, inclusi legni duri e materiali compositi.

La versatilità del laser consente di adattarsi a diversi spessori e tipologie di bordo, offrendo una soluzione efficiente e precisa per una vasta gamma di applicazioni nell'industria del mobile e della falegnameria.

Nel progetto svolto durante il tirocinio il sistema di controllo è costituito dal sensore di temperatura MLX90621 e dal microcontrollore STM32H7.

Il sensore viene posizionato immediatamente dopo al raggio laser, in questo modo non si hanno misure del materiale durante la fase di riscaldamento effettuata dal raggio laser ma attraverso il calcolo dell'errore che esiste tra la temperatura prefissata e la temperatura misurata a valle del processo di riscaldamento si può comunque tarare l'emissione di potenza del raggio laser.

Questa informazione in feedback, anche se ritardata, permette di correggere l'errore rendendo il processo automatico e quindi in grado di creare dei bordi esteticamente della migliore qualità possibile.

²Slupe E.

Chiaramente all'avvio la macchina deve già conoscere alcune caratteristiche principali del bordo come:

- spessore, materiali più spessi richiedono più tempo e più energia per essere riscaldati uniformemente durante il processo di bordatura laser
- colore, i materiali più scuri tendono ad assorbire più luce laser rispetto ai materiali più chiari e questo avviene perchè hanno una maggiore capacità di assorbire una vasta gamma di lunghezze d'onda, convertendo più efficacemente l'energia luminosa in calore.
- densità del materiale, è legata alla quantità di massa presente in un dato volume, materiali più densi possono richiedere una maggiore quantità di energia per riscaldarsi, influenzando l'efficacia dell'assorbimento del calore.
- conducibilità termica, materiali con una bassa conducibilità termica possono trattenere meglio l'energia termica, contribuendo così a un aumento dell'assorbimento durante il processo.
- emissività, è una proprietà di un materiale che indica quanto è efficiente nell'emettere radiazione termica rispetto a un corpo nero ideale, è un valore compreso tra 0 e 1, dove 0 indica una scarsa emissione di radiazione termica e 1 indica una perfetta emissione. Materiali con un'alta emissività assorbono meglio l'energia del laser e si riscaldano più facilmente, facilitando la fusione o l'evaporazione controllata del materiale sulla superficie del pannello di legno.

La scelta accurata di questi parametri è cruciale per ottenere un controllo preciso della fusione del materiale durante la bordatura laser.

L'ottimizzazione del colore, dello spessore e degli altri fattori menzionati precedentemente consente di massimizzare l'efficienza energetica e di conseguire giunti senza discontinuità visibili, garantendo una qualità estetica e funzionale del prodotto finale.

4.3 Incidenza del raggio laser

Nel processo di bordatura laser, l'incidenza del raggio laser comporta diverse interazioni fondamentali con il materiale del bordo.

Tra queste, l'incidenza riflessa, l'incidenza refratta e l'assorbimento della luce giocano ruoli chiave nel calcolo dell'assorbimento del calore del materiale.

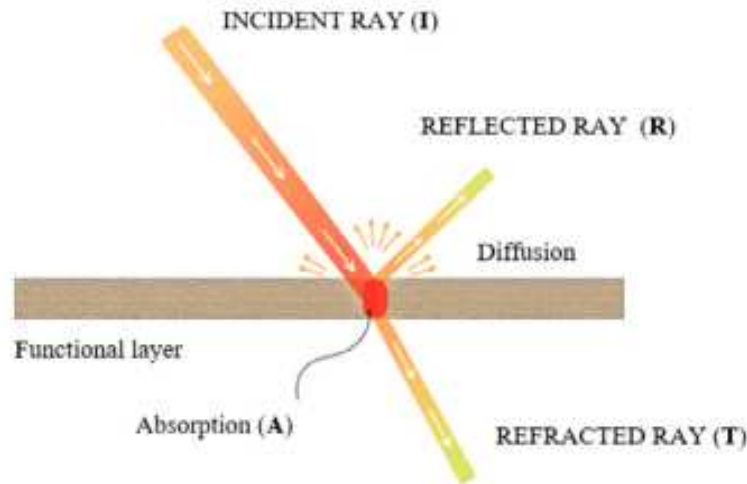


Figura 4.2: Incidenza del raggio laser sul materiale

L'incidenza refratta è il risultato del cambiamento della direzione del raggio laser mentre attraversa il materiale del bordo.

Questo fenomeno è influenzato dall'indice di rifrazione del materiale e può contribuire alla distribuzione dell'energia all'interno del bordo.

La comprensione di come il raggio laser si comporti durante l'incidenza refratta è cruciale per modellare la profondità e la precisione del processo di fusione.

L'assorbimento della luce rappresenta la chiave del processo.

Quando il raggio laser colpisce il materiale del bordo, una parte significativa della sua energia viene assorbita, causando un aumento locale della temperatura.

Questo incremento termico stabilisce una connessione solida con il pannello.

La gestione accurata dell'assorbimento della luce è essenziale per ottenere giunti senza visibili discontinuità e garantire la qualità estetica del prodotto finito.

La comprensione dettagliata di queste interazioni ottiche e termiche è cruciale per padroneggiare la bordatura laser e sfruttarne appieno i vantaggi nella produzione di bordi di alta qualità.

4.4 Applicazioni e prospettive future

Le applicazioni della tecnologia di bordatura laser, con la sua capacità di creare giunti senza visibili discontinuità, si estendono in vari settori dell'industria del mobile, dell'arredamento e oltre.

Questa innovazione è particolarmente adatta per progetti in cui l'estetica svolge un ruolo cruciale, come mobili di design e superfici di alta qualità.

Le prospettive future di applicazione della bordatura laser sono promettenti e indicano una crescente adozione in un'ampia gamma di applicazioni industriali.

La tecnologia offre non solo un notevole vantaggio estetico ma anche vantaggi pratici, come la riduzione della dipendenza da adesivi tradizionali e la semplificazione dei processi di produzione.

L'eliminazione dei problemi legati alla colla e la diminuzione dei costi di manutenzione contribuiranno a rendere la bordatura laser una scelta sempre più attraente per le aziende del settore.

L'integrazione di sensori avanzati e sistemi di controllo potrebbe migliorare ulteriormente la precisione del processo, garantendo risultati sempre più affidabili e consistenti.

Man mano che le applicazioni di tale tecnologia diventano più diffuse e le competenze nella sua implementazione si diffondono, è ragionevole attendersi una riduzione dei costi associati, rendendo la bordatura laser un'opzione più accessibile per un numero crescente di aziende.

In definitiva, la bordatura laser si prospetta come un'ottima alternativa alla bordatura tradizionale nel settore della lavorazione del legno e dei materiali compositi, rivoluzionando il modo in cui concepiamo e realizziamo i bordi nei prodotti finiti.

Sistema implementato

Durante il periodo di tirocinio, l'obiettivo posto è stato quello di creare un sistema di controllo sia dal punto di vista hardware che software, il quale, grazie al sensore di temperatura, potesse regolare la potenza ottica del raggio laser.

A questo scopo, sono state adottate soluzioni hardware per garantire un corretto interfacciamento al microcontrollore.

Successivamente, attraverso l'implementazione software del microcontrollore, è stato possibile monitorare le variazioni di temperatura.

Tuttavia, nonostante il successo raggiunto, persiste una sfida significativa: la regolazione efficace della potenza ottica del laser in risposta alle letture del sensore di temperatura.

La complessità di questa operazione richiede un approfondimento delle conoscenze sia nel dominio hardware che in quello software, al fine di stabilire una connessione efficace tra le due componenti del sistema di controllo.

In questo capitolo mostrerò il circuito sviluppato per collegare il microcontrollore al sensore di temperatura parlando in particolare della comunicazione i2c che avviene tra questi due dispositivi.

Infine verrà mostrato la parte di programmazione sviluppata sul microcontrollore per elaborare i dati letti dal sensore.

5.1 Software EVBMLX90621

Nel corso della prima fase del tirocinio, l'attenzione è stata rivolta all'utilizzo del software per la scheda EVBMLX90621.

La scheda EVBMLX90621 è uno strumento versatile progettato per ospitare il sensore di temperatura MLX90621 di Melexis.

Nella figura 5.1 possiamo vedere il display principale del software della scheda EVBMLX90621.

Qui, una volta collegata la scheda al PC, è possibile tramite il software regolare i parametri principali come la frequenza di campionamento, la risoluzione ed inoltre scegliere la modalità di lavoro del sensore.

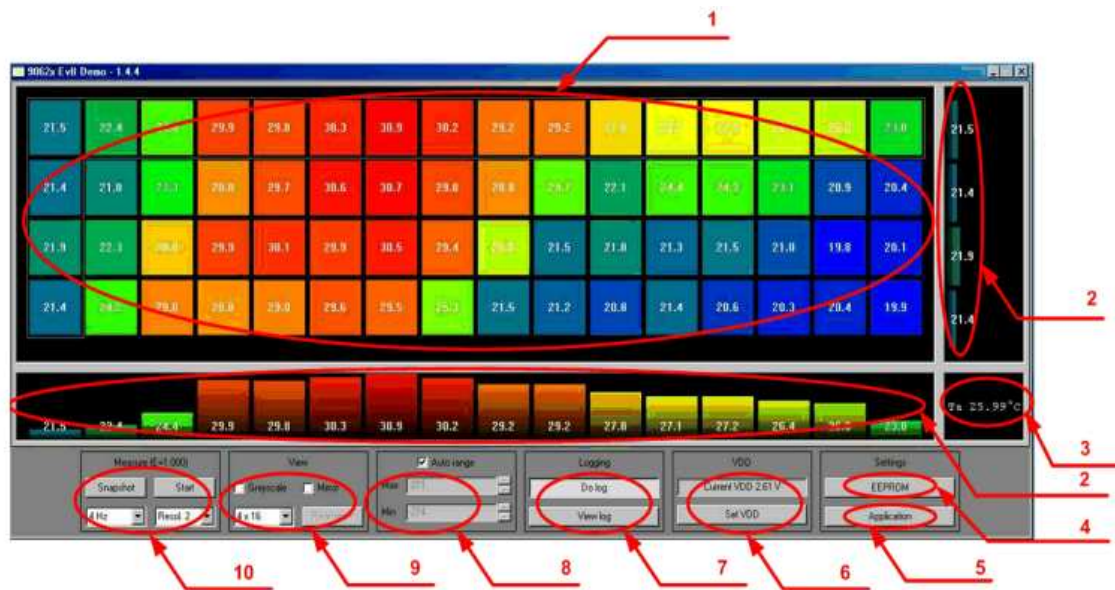


Figura 5.1: Display del software per la scheda EBVMLX90621

1. Lettura dei pixel.
2. Grafici a barre di righe e colonne;
3. Lettura del sensore di temperatura ambiente;
4. Pulsante di dump della EEPROM.
5. Impostazioni dell'applicazione.
6. Tensione di funzionamento.
7. Abilita o disabilita la registrazione dei dati;
8. Configura i limiti massimi e minimi della scala dei colori;
9. Imposta la visualizzazione e la risoluzione;
10. Imposta i parametri relativi alla misurazione: frequenza di aggiornamento (da 0.5Hz a 512Hz); singola acquisizione (istantanea) o operazione continua.

5.2 Frequenza di lavoro del sensore di temperatura

Un altro aspetto che è stato considerato nella progettazione del sistema di controllo è la scelta della frequenza di lavoro del sensore di temperatura.

Infatti come vediamo nella tabella 2.1 del Capitolo 2.4, il sensore MLX90621 può lavorare a un range di frequenza che va da 0.5Hz a 512Hz, è quindi un valore che va scelto a priori e che si definisce cruciale nella progettazione di sistemi di controllo.

La velocità del nastro trasportatore rappresenta un parametro fondamentale, è necessario quindi definire una frequenza di aggiornamento sufficientemente alta per catturare le variazioni di temperatura lungo il bordo con la precisione richiesta.

Chiaramente la velocità del nastro trasportatore influenza la dinamica termica del processo di bordatura.

Frequenze di aggiornamento più elevate possono migliorare la precisione fornendo un feedback tempestivo per eventuali regolazioni necessarie, ma è importante bilanciare questa esigenza con le risorse di elaborazione disponibili.

Concludendo l'analisi, la relazione tra la velocità del nastro trasportatore (V) e la frequenza di aggiornamento (f) può essere approssimata considerando il tempo che impiega il bordo per attraversare la zona di misurazione del sensore:

$$f = \frac{V}{L}$$

dove L è la lunghezza della zona di misurazione. Questa formula fornisce una stima iniziale della frequenza necessaria. Ipotizzando la velocità del nastro trasportatore a 15 metri al minuto, e scegliendo una frequenza del sensore di temperatura di 128 Hz, ogni 7 cm avremo una nuova misura che ci rende possibile la successiva e tempestiva regolazione della temperatura del bordo.

5.3 Configurazione Hardware

L'utilizzo del sensore tramite la scheda e il suo software è risultato limitato alle richieste del progetto dato che i dati letti dal sensore dovevano essere elaborati e processati da un microcontrollore.

E' risultata quindi la necessità di integrare il sensore MLX90621 con il microcontrollore STM32H743 che opera a 3.3V, mentre il sensore richiedeva un'interfaccia a 2.6V.

Per risolvere questo problema, è stata progettata e implementata una configurazione hardware personalizzata che permettesse una corretta comunicazione tra il microcontrollore e il sensore di temperatura.

Tale configurazione ha coinvolto l'uso di resistenze e condensatori per adattare la tensione del segnale.

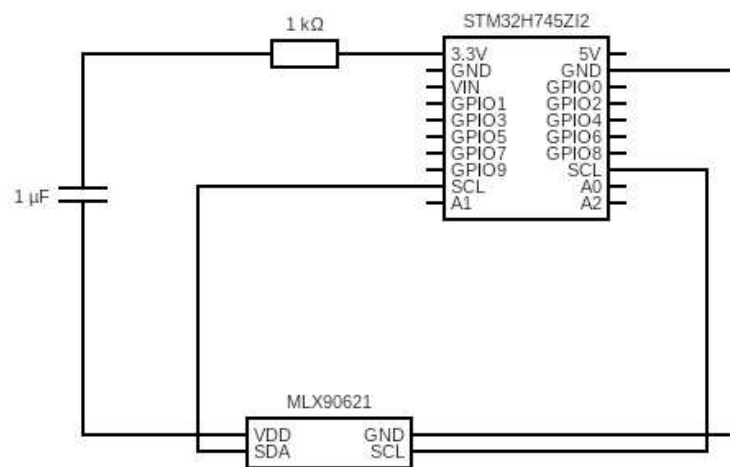


Figura 5.2: Circuito Hardware del sistema implementato

Come possiamo notare dalla figura 5.2, il filtro RC è stato introdotto per adattare la tensione del segnale proveniente dal sensore di temperatura, il quale richiede un'interfaccia a 2.6V, al microcontrollore, che opera a 3.3V.

La scelta di una resistenza e di un condensatore appropriati è essenziale per garantire una corretta comunicazione tra i due componenti.

La frequenza di taglio è stata fissata a 150 Hz in considerazione della scelta effettuata di far lavorare il sensore di temperatura ad una frequenza al massimo di 128 Hz.

Mantenere la frequenza di taglio al di sopra della frequenza operativa del sensore è essenziale per garantire che il filtro non attenni significativamente il segnale desiderato proveniente dal sensore.

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (5.3.1)$$

Assumendo una capacità di 1 μF, il calcolo indica:

$$R \approx \frac{1}{2\pi \cdot 150 \cdot 1 \times 10^{-6}} \approx 1.06 \text{ k}\Omega \quad (5.3.2)$$

La resistenza di 1 kOhm rappresenta una scelta coerente per garantire che la frequenza di taglio sia sufficientemente al di sopra della frequenza operativa del sensore, mantenendo allo stesso tempo un valore pratico e facilmente ottenibile.

La scelta del condensatore da 1 μF rimane invariata, fornendo una capacità adeguata per il

passaggio delle frequenze desiderate attraverso il filtro. Questo valore di capacità consente una risposta efficace alle variazioni di tensione, mantenendo comunque il filtro adatto alle esigenze del sistema.

La selezione della frequenza di taglio a 150 Hz è stata motivata dalla necessità di preservare il segnale operativo del sensore di temperatura a 128 Hz.

La combinazione di una resistenza da 1 kOhm e un condensatore da 1 µF offre una soluzione bilanciata per garantire un'efficace interfacciamento tra il sensore e il microcontrollore.

5.4 I²C

La comunicazione¹ I²C, acronimo di "Inter-Integrated Circuit", è un protocollo seriale sincrono a due fili che consente il trasferimento di dati tra dispositivi elettronici su una singola scheda di circuito o tra schede diverse.

Questo protocollo è comunemente utilizzato per collegare microcontrollori, sensori, EEPROM, display LCD e altri dispositivi a circuito integrato all'interno di un sistema elettronico.

Nel 1982, Philips Semiconductors (ora NXP) introdusse il protocollo I²C come soluzione per semplificare la comunicazione tra componenti all'interno di apparecchiature elettroniche complesse.

L'I²C fu progettato con l'obiettivo di ridurre il numero di pin necessari per la comunicazione tra dispositivi e semplificare l'implementazione dei circuiti.

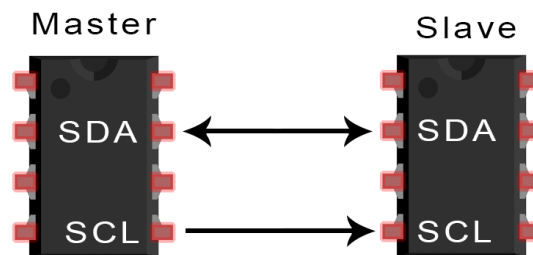


Figura 5.3: Diagramma master-slave I²C

Una delle caratteristiche chiave di I²C è la sua semplicità e flessibilità.

Con solo due linee di dati (SDA e SCL), il protocollo consente la comunicazione tra un master e più dispositivi slave, creando un sistema di comunicazione a bus che poteva essere facilmente ampliato.

Di conseguenza l'I²C ha rapidamente guadagnato popolarità nel settore elettronico grazie alla sua efficienza e al basso numero di pin richiesti.

Si è affermato come uno standard di comunicazione comune per una vasta gamma di dispositivi, inclusi sensori, EEPROM, microcontrollori, display e altri componenti integrati. Nel corso del tempo, il protocollo I²C è stato oggetto di varie implementazioni e adattamenti, tuttavia molte caratteristiche di base sono rimaste costanti.

L'I²C è ora supportato da diverse aziende e ha visto l'adozione in molte specifiche industriali e standard.

¹Campbell S.

5.4.1 Funzionamento del protocollo

Come detto precedentemente il protocollo I²C è composto da due linee diverse di dati:

- SCL (Serial Clock Line): Questo è il segnale di clock generato dal master e utilizzato per sincronizzare il trasferimento dei dati.
- SDA (Serial Data Line): Questa è la linea di dati bidirezionale usata per la trasmissione dei dati tra i dispositivi.

Grazie a questo tipo di comunicazione, i dati vengono trasferiti in messaggi. Inoltre i messaggi sono suddivisi in frame di dati e ogni messaggio ha un frame di indirizzo che contiene l'indirizzo binario dello slave e uno o più frame di dati che contengono i dati trasmessi.

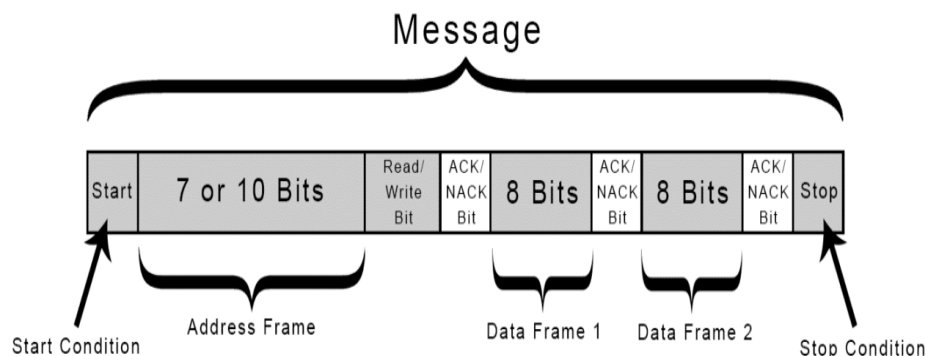


Figura 5.4: Suddivisione di bit del messaggio

Come vediamo, la comunicazione tramite I²C è più complessa rispetto a una soluzione UART o SPI.

Il segnale infatti, deve seguire un certo protocollo affinché i dispositivi sul bus lo riconoscano come comunicazione I²C valida.

Fortunatamente, la maggior parte dei dispositivi si occupa di tutti i dettagli complicati, consentendo di concentrarsi sui dati che si desidera scambiare.

Analizziamo ora la struttura di un messaggio e il comportamento quindi dei due canali SDA e SCL:

- **Start Condition:** Per avviare Address Frame, il controller mantiene SCL alto e SDA a basso. Questo avvisa tutti i dispositivi periferici che sta per iniziare una trasmissione. Se due controller desiderano prendere il controllo del bus contemporaneamente, il dispositivo che imposta per primo SDA al valore basso vince la priorità e ottiene il controllo del bus. È possibile emettere start ripetuti, avviando una nuova sequenza di comunicazione senza rinunciare al controllo del bus agli altri controller.
- **Address Frame:** è sempre il primo in qualsiasi nuova sequenza di comunicazione. Per un indirizzo a 7 bit, l'indirizzo viene trasmesso partendo dal bit più significativo (MSB), seguito da un bit R/W che indica se si tratta di un'operazione di lettura (1) o scrittura (0). Il 9° bit del frame è il bit di NACK/ACK, questo vale per tutti i frame (dati o indirizzo). Una volta inviati i primi 8 bit del frame, il dispositivo ricevente assume il controllo

della linea SDA.

Se il dispositivo ricevente non setta la linea SDA al valore basso prima del 9° impulso di clock, si può dedurre che il dispositivo ricevente non abbia ricevuto i dati o non sappia come interpretare il messaggio.

In tal caso, lo scambio si interrompe, e spetta al controller del sistema decidere come procedere.

- **Read/Write Bit:** un singolo bit che specifica se il master sta inviando dati allo slave (livello di tensione basso) o richiedendo dati da esso (livello di tensione alto).
- **ACK/NACK Bit:** ogni frame in un messaggio è seguito da un bit di acknowledge/non-acknowledge.
Se un frame di indirizzo o un frame di dati è stato ricevuto con successo, un bit di ACK viene restituito al mittente dal dispositivo ricevente.
- **Data Frame:** dopo che il frame di indirizzo è stato inviato, i dati possono iniziare a essere trasmessi.
Il controller continuerà semplicemente a generare impulsi di clock a intervalli regolari, e i dati saranno posizionati su SDA dal controller o dal dispositivo esterno(periferico) a seconda che il bit R/W indichi un'operazione di lettura o scrittura.
Il numero di frame di dati è arbitrario, e la maggior parte dei dispositivi periferici incrementerà automaticamente il registro interno, il che significa che letture o scritture successive provengono dal registro successivo
- **Stop Condition:** la linea SDA passa da un livello di tensione basso a un livello di tensione alto dopo che la linea SCL passa da basso a alto.
Una volta inviati tutti i frame di dati, il controller genererà una condizione di fine messaggio.
La Stop Condition è definita da una transizione 0->1 su SDA dopo una transizione 0->1 su SCL, con SCL rimasto alto.
Durante un'operazione normale di scrittura dei dati, il valore su SDA non dovrebbe cambiare quando SCL è alto, per evitare falsi Stop Condition.

5.4.2 Operazioni I²C del sensore MLX90621

Nel capitolo 3.2.1 ho parlato delle operazioni che il sensore deve compiere per ottenere le temperature dei 64 pixels, nel datasheet del sensore troviamo i comandi utili per l'inizializzazione.

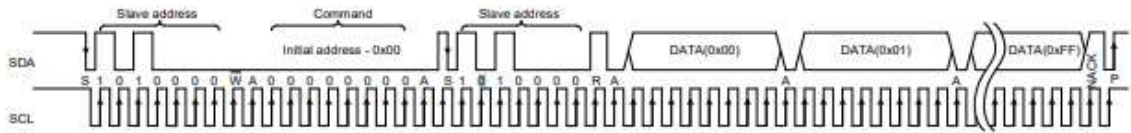


Figura 5.5: Operazione di lettura dell'intera EEPROM

Ad esempio per la lettura dell'intera memoria EEPROM viene indicato il lo Slave Address(in questo caso 0x50) e il comando(in questo caso 0x00).

La struttura è effettivamente quella di un messaggio che abbiamo spiegato in precedenza, in questo modo sia il controller che il dispositivo possono creare una comunicazione efficace e sicura.

Durante il tirocinio per verificare queste tipo di operazioni è risultato molto utile uno strumento come l'oscilloscopio in grado di captare i segnali I²C e di tradurli direttamente in indirizzi o comandi.

In figura 5.6 possiamo vedere i due canali SDA e SCL che inviano segnali e creano quindi le operazioni sopra descritte come Start Condition, l'invio di bit ed infine Stop Condition.

Questi segnali vengono tradotti automaticamente dall'oscilloscopio nei messaggi e quindi scrive direttamente i dati di bit(come possiamo notare in alto).

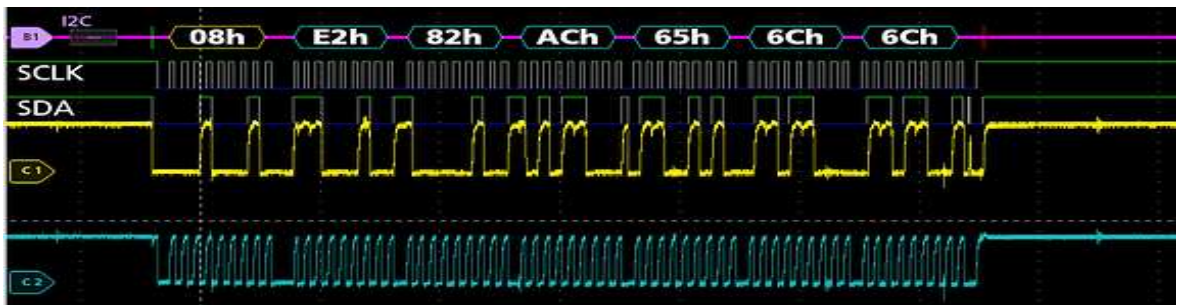


Figura 5.6: Esempio di decodifica di un messaggio I²C

Altre operazioni fondamentali per l'inizializzazione del sensore sono le operazioni di scrittura(eseguite con comando 0x04) e le restanti operazioni di lettura come ad esempio la lettura dei 64 pixels e la lettura della temperatura ambiente.

E' importante precisare che queste operazioni vengono effettuate dal microcontrollore e che quindi da codice è stata implementata una libreria in grado di inviare segnali i2c.

5.5 Programmazione microcontrollore

Il microcontrollore STM32H743ZI2 è stato programmato tramite il proprio ambiente di sviluppo STM32CubeIDE.

STM32Cube semplifica il processo di configurazione dei pin, dei periferici e delle impostazioni del clock su dispositivi STM32, riducendo il tempo necessario per avviare progetti basati su questi microcontrollori.

Infatti qui ho potuto configurare due pin per la comunicazione I²C, rispettivamente SDA e SCL.

5.5.1 Libreria MLX90621 I2C DRIVER

Dopo aver configurato il microcontrollore è stata creata una libreria di nome MLX90621 I²C DRIVER (contenente file header e file di implementazione) la quale implementa tramite codice le operazioni viste in precedenza.

```
typedef union{
uint16_t val;
struct{
uint16_t refresh_rate:4;
uint16_t resolution:2;
uint16_t continuos_off:1;
uint16_t power_mode_off:1;
uint16_t unused_0:1;
uint16_t unused_1:1;
uint16_t forced_bor:1;
uint16_t fast_i2c:1;
uint16_t disable_eeprom:1;
uint16_t unused_2:1;
uint16_t adc_low_res:1;
uint16_t unused_3:1;
};
}config_reg_t;

void MLX90621_I2CInit();
int MLX90621_I2CReadEEPROM(uint8_t slaveAddr, uint8_t startAddress,
uint16_t nMemAddressRead, uint8_t *data);
int MLX90621_I2CRead(uint8_t slaveAddr, uint8_t command, uint8_t
startAddress, uint8_t addressStep, uint8_t nMemAddressRead,
uint16_t *data);
int MLX90621_I2CWrite(uint8_t slaveAddr, uint8_t command, uint8_t
checkValue, uint16_t data);
void MLX90621_I2CFreqSet(int freq);
#endif
```

Come possiamo vedere dal codice, nel file header è stata definita una struttura di dati chiamata "config reg t" utilizzando un'unione (union) e una struttura annidata (struct). La struttura "config reg t" è progettata per rappresentare il registro di configurazione del sensore di temperatura.

Quando si manipolano o si leggono le impostazioni del registro, è possibile accedere direttamente a ciascun campo utilizzando la struttura definita.

Vediamo ora l'implementazione della funzione MLX90621 I2CREAD per mostrare come questa funzione riesce a inviare un messaggio di lettura tramite comunicazione I²C.

```
int MLX90621_I2CRead(uint8_t slaveAddr, uint8_t command,
uint8_t startAddress, uint8_t addressStep, uint8_t nMemAddressRead,
uint16_t *data) {
uint8_t sa;
int ack = 0;
int cnt = 0;
int i = 0;
char cmd[4] = {0, 0, 0, 0};
char i2cData[132] = {0};
uint16_t *p;
p = data;
sa = (slaveAddr << 1);
cmd[0] = command;
cmd[1] = startAddress;
cmd[2] = addressStep;
cmd[3] = nMemAddressRead;
i2c_driver_stop();
i2c_dly(5);
ack = i2c_driver_write(sa, cmd, 4, 1);
if (ack != 0x00)
{
i2c_driver_stop();
return -1;
}
sa = sa | 0x01;
ack = i2c_driver_read(sa, i2cData, 2*nMemAddressRead, 0);
if (ack != 0x00)
{
i2c_driver_stop();
return -1;
}
i2c_driver_stop();
for(cnt=0; cnt < nMemAddressRead; cnt++)
{
i = cnt << 1;
*p++ = (uint16_t)i2cData[i+1]*256 + (uint16_t)i2cData[i];
}
return 0;
}
```


Notiamo innanzitutto come la funzione accetta diversi parametri, tra cui l'indirizzo del dispositivo I²C (`slaveAddr`), il comando da inviare al dispositivo (`command`), l'indirizzo di inizio della lettura (`startAddress`), il passo dell'indirizzo (`addressStep`), il numero di indirizzi di memoria da leggere (`nMemAddressRead`), e un puntatore a un array di dati (`data`) in cui memorizzare i risultati.

Dopo aver dichiarato ogni struttura utile, viene effettuato una condizione di stop, si attendono 5 millisecondi (usando la funzione `i2c dly`), quindi viene inviato il comando al dispositivo. Il parametro 1 all'interno della funzione di scrittura, indica che dovrebbe essere ricevuto un ACK dopo la trasmissione del comando.

Dopo ogni operazione presente nel messaggio I²C, verifichiamo che i dispositivi abbiamo inviato o ricevuto correttamente il messaggio, infatti viene verificato se l'ACK ricevuto è diverso da 0 (errore).

Se sì, viene eseguito uno stop I²C e la funzione restituisce -1 indicando un errore.

Successivamente si prepara l'indirizzo I²C per la lettura (set del bit di lettura) e vengono letti i dati dal dispositivo.

Il parametro 0 indica che dovrebbe essere inviato un ACK dopo la lettura.

Dopodiché, un ciclo `for` legge dati contenuti dal array `i2cData` e li converte in valori a 16 bit, memorizzandoli in un altro array (`data`).

Questo processo si ripete per un numero di iterazioni pari a `nMemAddressRead`, ovvero le letture richieste.

Alla fine del ciclo, l'array `data` conterrà i dati letti convertiti nel formato appropriato.

Una volta implementata questa libreria è il momento di mostrare il codice principale ricordando la procedura di inizializzazione del sensore e l'obiettivo di ottenere i dati dai 64 pixels ed elaborarli in temperature.

5.5.2 Codice Main

All'interno del codice principale (main.c) sono state implementate diverse funzioni e il principio di funzionamento del sensore scritto a codice.

Per brevità saranno presentate e descritte solo alcune delle funzioni principali.

```
void setConfig() {
    cfg.val = 0;
    cfg.forced_bor = 1;
    cfg.refresh_rate = MLX90621_REFRESH_RATE_128HZ;
    cfg.continuos_off = 0;
    cfg.resolution = MLX90621_REFRESH_RESOLUTION_18_BIT;
    MLX90621_I2CWrite(0x60, 0x03, 0x55, cfg.val);
}
```

Modificando la funzione setConfig possiamo configurare il sensore come ad esempio la risoluzione, la frequenza di aggiornamento e la modalità di campionamento.

Questa funzione deve essere svolta ogni volta che il sensore viene attivato e tramite la funzione di scrittura, come vediamo nell'ultima riga di codice, impostiamo le configurazioni scelte. La memoria EEPROM del sensore MLX90621 ha un ruolo fondamentale per l'elaborazione dei dati e infatti abbiamo visto nel capitolo 5.3.2 quale messaggio inviare tramite comunicazione I²C per leggere l'intera memoria.

```
void readEEPROM() {
    MLX90621_I2CReadEEPROM(0x50, 0x00, 256, buf);
}
```

In questa funzione richiamiamo una delle funzioni della libreria vista nel precedente capitolo. E' infatti indicato lo SlaveAddress (0x50), il comando (0x00), il numero di letture (256) ed infine un vettore che possa contenere questi dati (buf).

Quello che avviene dopo l'utilizzo di questa funzione è quindi il riempimento del vettore buf in modo tale che nel momento in cui i dati dovranno essere elaborati e serviranno alcuni parametri contenuti all'interno della memoria EEPROM del sensore non sarà necessario fare ulteriori letture.

Nel capitolo 3.2.1 sono stati mostrati i calcoli utili per elaborare i dati emessi dal sensore ed ottenere le temperature desiderate.

Nel codice principale dunque dopo aver letto l'intera memoria EEPROM, aver salvato i dati all'interno di un vettore e aver ottenuto la lettura grezza dal sensore è stato possibile elaborare i dati e compiere i calcoli utili ai fini dell'obbiettivo.

Vediamo ora ad esempio la funzione *calculateTA* che ci permette di calcolare la temperatura ambiente del sensore.

```
void calculateTA() {
Vth_L = buf[0xDA];
Vth_H = buf[0xDB];
Kt1_L = buf[0xDC];
Kt1_H = buf[0xDD];
Kt2_L = buf[0xDE];
Kt2_H = buf[0xDF];
Kt_scale = buf[0xD2];

Kt1_scale = (Kt_scale >> 4) & 0x0F;
Kt2_scale = Kt_scale & 0x0F;

Vth_25 = (256*Vth_H) + Vth_L;
if (Vth_25 > 32767) {
Vth_25 = Vth_25 - 65536;
}
Vth_25 = Vth_25 / pow(2, (3-cfg.resolution));

Kt1 = (256*Kt1_H) + Kt1_L;
if (Kt1 > 32767) {
Kt1 = Kt1 - 65536;
}
Kt1 = Kt1 / pow(2, Kt1_scale) * pow(2, (3-cfg.resolution));

Kt2 = (256*Kt2_H) + Kt2_L;
if (Kt2 > 32767) {
Kt2 = Kt2 - 65536;
}
Kt2 = Kt2 / pow(2, Kt2_scale+10) * pow(2, (3-cfg.resolution));

readPTAT_Vir();

TA_data = ((-Kt1+sqrt(pow(Kt1,2)-4*Kt2*(Vth_25-Vir[64])))/(2*Kt2))+25;
}
```

Inizialmente salvo alcuni parametri contenuti nella memoria EEPROM utili ai calcoli futuri, per ogni parametro verifico che il valore sia correttamente "shiftato", dopodiché tramite la funzione *readPTATVir()* ottengo la temperatura ambiente grezza dal sensore. Infine viene calcolata la temperatura ambiente tramite la propria formula precedentemente descritta.

Sviluppi futuri: Implementazione di un controllore

6.1 Sistema di controllo

Come accenato nel capitolo 4 riguardante il principio di funzionamento di una macchina bordatrice a laser, affinché la macchina sia automatica e possa raggiungere una bordatura esteticamente ad alti livelli è fondamentale un sistema di controllo.

Infatti il sensore di temperatura e il microcontrollore dovranno essere integrati alla macchina bordatrice per creare un sistema di controllo automatico ed efficiente per regolare la potenza ottica del raggio laser.

Tuttavia, a causa di limitazioni di tempo, non è stato possibile completare integralmente questa componente.

Questo capitolo esplorerà le difficoltà e le potenzialità che una piena implementazione del sistema avrebbe comportato descrivendo anche la teoria riguardante i controllori PID.

Un possibile sviluppo significativo del sistema di controllo prevede l'implementazione di un algoritmo di controllo a retroazione proporzionale-integrativo-derivativa (PID)¹.

Implementando un controllo PID, il sistema può adattarsi dinamicamente alle variazioni della temperatura, regolando efficacemente la potenza ottica del raggio laser.

Questo approccio permette di ottenere una risposta più rapida ed efficiente del sistema, garantendo contemporaneamente la stabilità del processo di bordatura laser.

Il controllo Proporzionale-Integrativo-Derivativo (PID) è l'algoritmo di controllo più comune utilizzato nell'industria ed è universalmente accettato nel controllo industriale.

La popolarità dei regolatori PID può essere attribuita in parte alle loro prestazioni robuste in una vasta gamma di condizioni operative e in parte alla loro semplicità funzionale, che consente agli ingegneri di utilizzarli in modo semplice e diretto.

Come suggerisce il nome, l'algoritmo PID è composto da tre coefficienti di base: proporzionale, integrale e derivativo, che vengono variati per ottenere una risposta ottimale.

Prima di definire i parametri di un regolatore PID, vediamo cos'è un sistema a circuito chiuso (anello chiuso) e alcune delle terminologie associate.

In un sistema di controllo ad anello chiuso, la variabile di processo è il parametro di sistema che deve essere controllato, come in questo caso la temperatura del bordo (°C).

Un sensore viene utilizzato per misurare la variabile di processo e fornire un feedback al sistema di controllo.

Il set point è il valore desiderato per la variabile di processo, nel caso di questo progetto

¹Aström K.J., Hägglund T. A

quindi si riferisce alla temperatura obiettivo.

Periodicamente, la differenza tra la variabile di processo e il set point viene utilizzata dall'algoritmo di controllo del sistema (compensatore) per determinare l'uscita desiderata dell'attuatore.

Questo è chiamato un sistema di controllo a circuito chiuso, perché il processo di lettura dei sensori per fornire un feedback costante e il calcolo dell'uscita desiderata dell'attuatore viene ripetuto continuamente e ad un tasso di ciclo fisso.

In molti casi, l'uscita dell'attuatore non è l'unico segnale che ha un effetto sul sistema.

Ad esempio, nel caso della temperatura potrebbe esserci una fonte di aria fredda che disturba la temperatura, questo termine è chiamato disturbo, è solito cercare di progettare un sistema di controllo minimizzando l'effetto dei disturbi sulla variabile di processo.

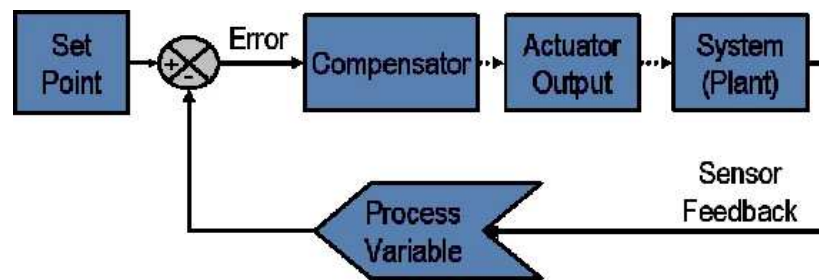


Figura 6.1: Sistema a circuito chiuso

6.2 Regolazione raggio laser

Nel contesto della bordatrice a laser, il componente chiave per la regolazione della potenza ottica del raggio laser è l'alimentatore RST-5000-24, dotato di una funzione di "Current Adjustment".

Questa caratteristica innovativa consente al sistema di adattare dinamicamente la corrente in uscita in base alla tensione interna fornita.

L'alimentatore risponde prontamente alle variazioni di tensione, offrendo un meccanismo flessibile per regolare la potenza del laser.

Questo approccio, basato sull'adattamento della corrente in risposta a variazioni specifiche di tensione, offre un controllo più preciso e personalizzabile del raggio laser.

Come vediamo nell'immagine 3.2, l'alimentatore RST-5000, ci permette di applicare una tensione esterna variabile da 1V a 5V, per regolare la corrente in uscita dal 20% al 100% fornita al laser.

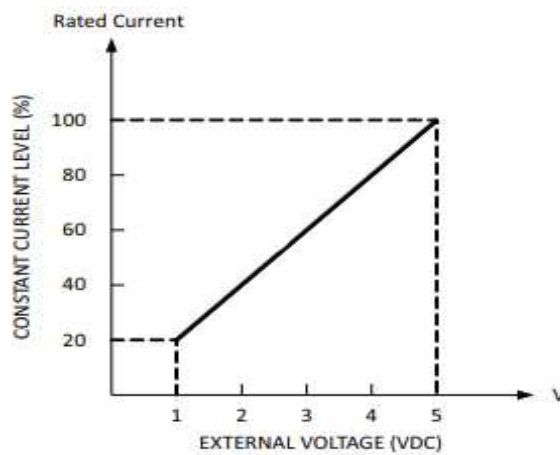


Figura 6.2: Regolazione corrente in uscita dall'alimentatore al raggio laser

Il diodo laser in ingresso può ricevere fino a una corrente fino a 128.9A, quindi è importante non permettere di fornire una corrente superiore.

La tensione esterna dell'alimentatore verrà fornita direttamente dal microcontrollore STM32 che conoscendo l'errore potrà aumentare o diminuire direttamente la corrente del raggio laser e quindi la potenza ottica applicata al bordo.

6.3 Implementazione futura del microcontrollore

Un possibile sviluppo significativo del sistema di controllo prevede l'implementazione di un algoritmo di controllo a retroazione proporzionale integrativo derivativa (PID).

Questo può essere ottenuto calcolando l'errore tra la temperatura misurata dalla bordatrice laser e la temperatura obiettivo desiderata.

Il microcontrollore può elaborare questo errore e utilizzarlo per determinare i parametri del controllore PID, tra cui il guadagno proporzionale (K_p), il guadagno integrale (K_i) e il guadagno derivativo (K_d).

Una tecnica per ottenere questi parametri potrebbe includere la valutazione della risposta del sistema mediante il metodo di Ziegler-Nichols.

In particolare, è possibile applicare un segnale a gradino al sistema di controllo, monitorando la risposta e analizzando la curva di risposta per determinare il periodo di oscillazione critico e l'ampiezza massima.

Successivamente, calcolando il guadagno (K_u), è possibile utilizzare le regole empiriche di Ziegler-Nichols per ottenere i valori ottimali di K_p , K_i e K_d .

Implementando un controllo PID basato su questa analisi, il sistema può adattarsi dinamicamente alle variazioni della temperatura, regolando efficacemente la tensione in ingresso all'alimentatore.

Questo approccio permette di ottenere una risposta più rapida ed efficiente del sistema, contribuendo a migliorare ulteriormente la precisione e l'affidabilità delle operazioni di bordatura laser.

In vista di un possibile sviluppo futuro del sistema il microcontrollore deve essere implementato a livello di codice per ottenere le informazioni utili al sistema di controllo.

Nella tesi è stato presentato il progetto 'Filo Colla Zero', sviluppato durante un mese di tirocinio nell'azienda SCM Group, esplorando i vari successi ottenuti e descrivendo le possibili implementazioni future.

Il progetto è stato proposto dall'azienda e mi ha particolarmente incuriosito in primis per le possibilità di crescita in un ambito industriale del quale sono fortemente interessato ed in secondo luogo per l'opportunità di poter lavorare a stretto contatto con ingegneri esperti nel settore.

Grazie a ciò, sento di aver acquisito alcune competenze tecniche in ambito informatico e anche abilità nel comunicare e collaborare insieme ai colleghi.

Durante questo periodo ho potuto aumentare le mie capacità riguardanti soprattutto la programmazione in linguaggio C per sistemi embedded, lo studio di MATLAB e in generale competenze anche a livello di comunicazione I²C e hardware per permettere al sensore di temperatura di funzionare correttamente.

Gli obiettivi, posti all'inizio, sono stati parzialmente ottenuti, tuttavia, il periodo di un solo mese e le competenze tecniche iniziali non hanno reso possibile il completamento del progetto che però può certamente avere degli sviluppi futuri e nuove implementazioni riguardanti soprattutto il controllore.

Concludendo, ho considerato questo tirocinio utile per intraprendere una strada nel mondo del lavoro, contribuendo positivamente sia allo sviluppo di formazione personale che professionale permettendomi di applicare quello che in questi anni di studi universitari è stato appreso.

Ringraziamenti

Mi sento in dovere di dedicare questa pagina del presente elaborato alle persone che mi hanno supportato nella redazione dello stesso.

Innanzitutto, ringrazio la Prof.ssa Zanolì, sempre pronta a darmi le giuste indicazioni in ogni fase della realizzazione dell'elaborato.

Grazie a lei ho accresciuto le mie conoscenze e le mie competenze.

Un ringraziamento speciale va all'Ing. Mazza e a tutti i colleghi che mi ha aiutato durante il mese di tirocinio presso l'azienda SCM Group per l'ospitalità e per le skills acquisite sul campo.

Grazie a mia madre, a mio padre e alle mie sorelle per avermi sempre incoraggiato fin dall'inizio del percorso universitario.

Ringrazio la mia fidanzata Alina per avermi trasmesso la sua immensa forza e il suo coraggio, grazie per tutto il tempo che mi hai dedicato e perché ci sei sempre stata.

Ringrazio tutti i miei compagni di università Marcò, Die, Mazza, Seghi, Eze, Giamp, Spina, Ticchia, Trust, Cracovia, Piccia e anche i miei coinquilini Alessandro e Francesco.

Un ringraziamento speciale va anche ai miei amici Nico, Monte, Giuro, Angi, Cate, Fede, Matteo Z., Matteo B., Samu, Robi, Ale e Luca che mi hanno sempre sostenuto e aiutato nei momenti di difficoltà.

Bibliografia e Sitografia

- Åström K.J. and Hägglund T. Advanced pid control. *ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society*, 2006.
- Åström K.J. and Hägglund T. Pid controllers: theory, design and tuning. *Research Triangle Park*, 1995.
- BIESSE. What-is-edge-banding, 8-03-2022. URL <https://www.biesse.com/in/wood/magazine/blog/what-is-edge-banding>.
- Blue Elephant CNC. E70jds automatic edge bander double gluepot edge banding machine for wood furniture, 8-11-2023. URL <https://www.youtube.com/watch?v=SdFyIVS2050>.
- Campbell S. Basics of the i2c communication protocol, 2016. URL <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol>.
- Chen J., Tai K., and Chen H. Application of programmable logic controller to build-up an intelligent industry 4.0 platform. *ScienceDirect*, 2017.
- David J. How an edgebander works everything else you need to know, 30-11-2021. URL <http://www.landmarktools.com/blogs/guides/what-is-an-edgebander>.
- Ditmire T. High-power lasers, 2022. URL <http://www.americanscientist.org/article/high-power-lasers>.
- Forth K. New edgebanding technology uses lasers, not glue, 10-09-2011. URL <https://www.woodworkingnetwork.com/magazine/fdmc-magazine/new-edgebanding-technology-uses-lasers-not-glue>.
- Karaki H. and Polyzoev V. Demystifying thermopile ir temp sensors, 26-02-2019. URL <https://www.fierceelectronics.com/components/demystifying-thermopile-ir-temp-sensors-0>.
- Maci L. Che cos'è l'industria 4.0 e perché è importante saperla affrontare, 24-10-2023. URL <https://www.economyup.it/innovazione/cos-e-l-industria-40-e-perche-e-importante-saperla-affrontare/>.
- Martinelli A., Mina A., and Moggi M. The enabling technologies of industry 4.0: examining the seeds of the fourth industrial revolution. *Industrial and Corporate Change*, pages 1–28, 2021.

Mellado J. and Núñez F. Design of an iot-plc: A containerized programmable logical controller for the industry 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 2022.

SAP. Che cos'è l'industry 4.0?, 2023. URL <http://www.sap.com/italy/products/scm/industry-4-0/what-is-industry-4-0.html>.

Sehr M.A. et al. Programmable logic controllers in the context of industry 4.0. *Research Triangle Park*, XVII(5), may 2021.

Shinskey F.G. *Process Control Systems: Application, Design, and Tuning*. McGraw-Hill Education, 4° ed., 1996.

Slupe E. Zero-joint, 2018. URL <https://www.rehau.com/us-en/reasons-to-choose-zero-joint>.

Zanotti L. Industria 4.0: storia, significato ed evoluzioni tecnologiche a vantaggio del business, 6-03-2023. URL <http://www.digital4.biz/executive/industria-40-storia-significato-ed-evoluzioni-tecnologiche-a-vantaggio-de>

Zhuge S. Pid control theory, 24-08-2020. URL <https://www.crystalinstruments.com/blog/2020/8/23/pid-control-theory>.