

Classe L8: Ingegneria dell'informazione

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Monografia di tirocinio

Sviluppo e valutazione di piattaforme a microcontrollore dotate di sensori di campo magnetico in tecnologia MEMS.



Tutore Accademico:

Prof. Matteo Sonza
Reorda

Tutore Aziendale:

Ing. Salvatore Rinaudo
Ing. Michelangelo Grosso



life.augmented

Candidato:

Matteo Bertolino

Settembre 2014

Sommario

1 Introduzione

1.1 L'azienda.....	34
1.2 Scopo del tirocinio.....	34
1.3 Organizzazione dell'elaborato	34

2 Background

2.1 Prospezione geofisica e pacometria	45
2.2 Campo magnetico e magnetometri	89
2.2.1 Campo magnetico	89
2.2.2 Magnetometri	810
2.3 Tecniche di calibrazione	1112
2.3.1 Prima idea di calibrazione	1112
2.3.2 Seconda idea di calibrazione	1213
2.4 Microcontrollore e sensori.....	13
2.5 Le interfacce I2C e SPI	1617
2.5.1 Caratteristiche tecniche protocollo I ² C:	1617
2.5.2 Sequenza di operazioni con il bus I ² C:.....	1617
2.5.3: Il protocollo SPI	1617
2.5.4 Caratteristiche tecniche SPI:	1618
2.5.5 Sequenza di operazioni con il bus SPI:	1718
2.5.6: Confronto I ² C - SPI.....	1819

3 Progettazione del sistema

3.1 Il progetto in generale.....	1920
----------------------------------	-----------------

4 Realizzazione del sistema

4.1: Software e Hardware utilizzati.....	2122
4.2: Scelta comunicazione: interfaccia I ² C	23
4.3 Calcolo del massimo Output Data Rate (ODR).....	25
4.4 Dettagli implementativi a livello Hardware	27
4.5 Programmazione del microcontrollore	28
4.6 Risultato Calibrazione	3233

5 Elaborazione dei risultati

6 Conclusione

7 Bibliografia

1 - Introduzione

1.1 L'azienda

St-Polito è una joint venture tra STMicroelectronics, al 75%, e Politecnico di Torino, al 25%, nata per lo sviluppo di sensoristica, smart system e circuiti integrati eterogenei di nuova generazione. St-Polito punta allo sviluppo di soluzioni complete e prototipi pre-commerciali che fanno uso di dispositivi elettronici intelligenti per indirizzare applicazioni nei settori dell'efficienza energetica, della mobilità sostenibile, della salute, e in generale di progetti riguardanti la ricerca per diversi temi.

1.2 Scopo del tirocinio

Il tirocinio riguarda la progettazione, lo sviluppo e la valutazione di piattaforme a microcontrollore dotate di sensori di campo magnetico in tecnologia MEMS (Micro Electro - Mechanical System). Le attività svolte coprono un ampio spettro interdisciplinare, che include la definizione dell'architettura di sistema da un punto di vista hardware, lo sviluppo di appositi firmware, l'elaborazione dei dati grezzi ottenuti e le relative considerazioni, strettamente correlate al campo della geofisica, il tutto accompagnato da apposita documentazione.

Il progetto si configura nell'ambito della prospezione geofisica, una particolare tecnica di indagine non distruttiva, per poter rilevare internamente ad alcuni oggetti, anche di grandi dimensioni, la presenza e la posizione di oggetti metallici: questo tema sarà ampiamente spiegato e discusso nel prossimo capitolo.

L'obiettivo è la progettazione di un sistema provvisto di sensori MEMS che, fatto ruotare attorno a un oggetto in marmo o cemento, che nasconde al suo interno un oggetto ferroso, raccolga informazioni sulle perturbazioni del campo magnetico circostante, nelle tre componenti radiale, tangenziale e verticale; dall'elaborazione dei dati è possibile stimare la posizione e l'orientamento dell'oggetto metallico interno. La quantità e la qualità delle informazioni possono essere aumentate utilizzando una coppia di sensori allineati, in grado di fornire un gradiente, o la composizione di quattro sensori, che determinano un tensore.

Per la realizzazione del sistema tensoriale sono stati usati quattro magnetometri MEMS triassiali, collegati appositamente a una scheda a microcontrollore che permette l'interfacciamento alla porta seriale di un PC. Ciascun sensore invia le misure rilevate sui 3 assi; i dati ricevuti sono elaborati quindi mediante l'ambiente MATLAB per una visione grafica dei risultati, molto intuitiva ed esplicativa; grazie alle sue funzioni, con MATLAB è stato possibile visualizzare i vettori di campo magnetico misurato, con le loro possibili variazioni per la presenza dell'oggetto metallico, le mappe di ciascuna componente, del modulo, e analogamente con il gradiente.

Tutto questo lavoro è preceduto da un'apposita e necessaria calibrazione dei sensori, al fine di ridurre la variabilità tra le rilevazioni effettuate con i diversi strumenti di misura e di avere un risultato quanto più conforme alla realtà.

1.3 Organizzazione dell'elaborato

La trattazione seguente sarà così organizzata: il capitolo 2, di background, approfondirà i temi della prospezione geofisica e della pacometria, strettamente correlati; segue una rapida panoramica sul campo magnetico e sui numerosi strumenti per la sua misura, analizzando anche come sia possibile calibrare sensori triassiali; lo stesso capitolo cercherà di dare una introduzione al microcontrollore e ai sensori che verranno utilizzati, e per mezzo di quali interfacce possano

interagire. Il capitolo 3 verterà sulla descrizione, a grandi linee, del progetto affrontato: essendo una discussione concettuale, questo capitolo non avrà contenuti che riguardano l'implementazione, che sarà ampiamente trattata nel capitolo successivo: il capitolo 4 tratta appunto degli strumenti utilizzati, della struttura hardware del sistema e di come sono stati fatti i collegamenti con l'interfaccia scelta; saranno discussi i punti salienti della programmazione del microcontrollore, citando del codice che possa favorirne la comprensione; un paragrafo sarà dedicato a esporre i risultati della calibrazione già discussa teoricamente. Il quinto capitolo descriverà come sono stati elaborati i dati grezzi acquisiti, e mostrerà i risultati ottenuti, fornendone una possibile interpretazione. Il capitolo 6 riporta le conclusioni.

2 - Background

2.1 Prospezione geofisica e pacometria

Esistono diverse tecniche per determinare la presenza e la posizione di componenti metallici all'interno di terreni o oggetti: nel caso dei terreni, è particolarmente significativa la prospezione geofisica, ovvero un metodo di indagine non distruttiva del sottosuolo, atto a misurarne alcune proprietà fisiche e rivelare la presenza di eventuali oggetti in esso sepolti; ovviamente, le applicazioni sono molto numerose: archeologiche, civili, ambientali, minerarie, petrolifere e geotecniche. In particolare, queste tecniche di testing non distruttivo stanno giocando un ruolo sempre maggiore nell'ambito della conservazione dei beni culturali.

Il rilevamento magnetico del terreno è uno dei numerosi metodi utilizzati nell'archeologia: registrando le variazioni spaziali del campo magnetico, e sfruttando il fatto che ogni materiale (specie quelli usati per realizzare oggetti preistorici) ha proprietà magnetiche uniche, si possono localizzare e mappare i manufatti archeologici, sia in un contesto terrestre sia marino. Nel primo caso, le esplorazioni fatte con magnetometri hanno dato un contributo determinante per localizzare da piccoli centri a più grandi centri urbani preistorici (Fig. 2); nel caso marino, i magnetometri vengono frequentemente utilizzati per ritrovare relitti oppure per determinare la composizione del fondale.

Per i terreni esiste una tecnica chiamata **georadar**, nota anche come GPR (*Ground Penetrating Radar*), ed è una metodologia non invasiva utilizzata in geofisica, nello studio del primo sottosuolo, che si basa sull'analisi delle riflessioni di onde elettromagnetiche trasmesse nel terreno. Tale metodo fornisce, a partire da una profondità di alcuni metri fino al limite di alcune decine di metri, una "sezione" del terreno indagato dalla superficie. Il metodo si basa sull'immissione di brevi impulsi elettromagnetici ad alta frequenza, ripetuti con continuità ed emessi da un'antenna posta in prossimità della superficie da indagare. Quando l'impulso elettromagnetico nel propagarsi in profondità incontra una superficie che separa due mezzi aventi caratteristiche fisiche diverse, una parte dell'energia incidente viene riflessa ed una parte prosegue nel secondo mezzo. Le onde riflesse dalla superficie di discontinuità ritornano in superficie e vengono rilevate dall'antenna ricevente, mentre la parte di energia trasmessa che procede oltre la discontinuità stessa è disponibile per altre riflessioni su eventuali discontinuità più profonde.

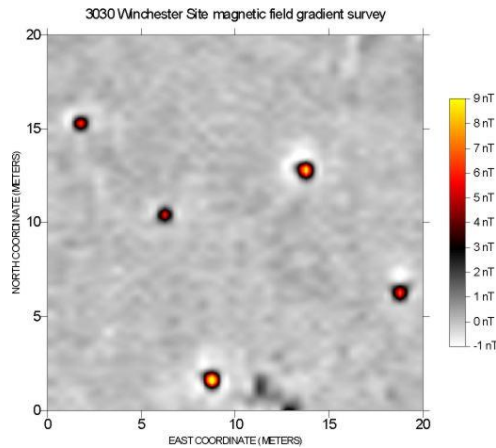


Figura 12: mappa magnetica del gradiente che identifica focolai preistorici

Il rilevamento di oggetti metallici nascosti all'interno di elementi in calcestruzzo armato o in marmo è affrontato dalla **pacometria**, una tecnica di analisi non distruttiva che consente di scoprire non solo la presenza di tali oggetti, ma anche la loro direzione e diametro, nel caso di materiali simil-cilindrici. Lo strumento su cui si poggia questa tecnica si chiama pacometro, un dispositivo digitale attivo che utilizza metodi magnetici, nel senso che sfrutta le proprietà magnetiche del ferro per la localizzazione. Il pacometro è classificato come strumento "attivo", in quanto è composto da una sonda emettitrice di campo magnetico, e da una serie di unità di elaborazione digitale; la prova pacometrica consiste nel far scorrere le sonde emettitrici lungo la superficie del manufatto campione: esse, durante il percorso, genereranno il campo magnetico; infine, le unità ricevitrici, che possono eventualmente coincidere con le emettitrici, rilevano il campo magnetico totale; sulla base di queste informazioni, l'unità di elaborazione determinerà la posizione più probabile di eventuali oggetti metallici.

Di solito l'analisi **pacometrica** è strettamente legata all'uso di tecniche a ultrasuoni e Georadar (GPR), che, opportunamente combinate, permettono di ricavare informazioni riguardo la presenza di fratture interne al manufatto analizzando la continuità del materiale, restituendo così una analisi più approfondita della struttura interna del campione.

A titolo di esempio, la tecnica **tomografica** a ultrasuoni è stata utilizzata per analizzare il busto di Eleonora D'Aragona (Fig. 1), scolpito nel 1468 da Francesco Laurana, necessaria per meglio capire la natura di una venatura che partiva dalla porzione centrale del collo e che si estendeva fino al volto della donna, scoperta a seguito di un restauro; sono stati quindi decisi 157 punti di misurazione, ognuno distanziato dall'altro da pochi centimetri, nei pressi dei quali una serie di sonde trasmettevano e acquisivano segnali, che sono stati in seguito processati per ricavare un modello; in questo caso, il modello non ha evidenziato possibili rischi derivanti dalla venatura presa in oggetto, e il busto di Eleonora d'Aragona ha continuato a viaggiare di museo in museo senza problemi. [1]



Figura 21 - Eleonora D'Aragona

Il museo archeologico di Roma ha svolto una ricerca riguardo la consistenza fisica di una lastra di marmo, risalente al II-III secolo DC, che era caduta accidentalmente durante il trasporto per una manifestazione. Il gruppo di ricerca del museo decise di combinare due tecniche: è stato infatti usato un **pacometro** per rivelare l'eventuale presenza di componenti metallici interni alla lastra, oggetti che potenzialmente potrebbero svolgere un ruolo critico nell'incrinatura del manufatto, e un'indagine **tomografica** mediante GPR (2000 MHz, lunghezza d'onda di 0.15 m) e ultrasuoni (55 kHz, lunghezza d'onda di 6.25 mm), rispettivamente per scoprire l'estensione interna di tutte le fratture visibili e per trovare tutte quelle nascoste.

Nell'ambito della conservazione dei beni culturali, restringendo la trattazione al solo ambito delle statue, si può notare che molte statue di epoca romana nel Rinascimento sono state restaurate, inserendo talvolta dei sostegni in ferro al loro interno, oggi invisibili.

La presenza di questi sostegni è indispensabile per l'integrità del reperto artistico, ma se essi sono posizionati in punti critici come braccia, gambe, collo e in posizione obliqua, possono seriamente compromettere la sicurezza del referto in caso di trasporto: infatti, prendere e sollevare queste statue in punti in cui è celato un sostegno metallico potrebbe essere fatale.

Per questo motivo, si vuole trovare un modo per sapere a priori se un sostegno in ferro fosse presente in una determinata sezione dell'opera artistica e in caso affermativo conoscerne indicativamente la posizione.



Figura 3: Possibile presenza di pin metallici



Figura 4: Statua di Kongo Rikishi

Per questo problema, esistono diverse tecniche, che trovando applicazione nella salvaguardia del trasporto di un bene culturale, anche piuttosto grande, devono essere necessariamente portatili; le più significative sono le seguenti, non distruttive:

Sfruttare **tecniche di tomografia computerizzata** a raggi X, es Tac, o altre onde in grado di penetrare in profondità negli oggetti

Servirsi di **tecniche micro - geofisiche**, per esempio particolari magnetometri.

La **prima tecnica** è stata applicata nel 2008 sulla statua denominata **Kongo Rikishi**, sita al museo di arte orientale MAO di Torino: essa è alta 230 cm, risale alla seconda metà del XIII

secolo e proviene dal Giappone; poggia su una base rocciosa, ma è realizzata interamente in legno di cipresso giapponese, successivamente dipinto, come si vede nella figura 4.

La tomografia computerizzata a raggi X è una tecnica in grado di visualizzare in maniera tridimensionale la struttura interna degli oggetti investigati grazie alla differente radiopacità dei materiali costituenti; la tac applicata al Kongo Rikishi è abbastanza complessa, tanto da superare un limite della radiografia tradizionale, ovvero la sovrapposizione nell'immagine di più piani dell'oggetto, che implica la perdita di informazione nella direzione parallela alla propagazione del fascio di raggi X. La TAC è nata sicuramente in ambito medico, ma trova una crescente applicazione per verificare la struttura interna e lo stato di un manufatto, al fine di fare un corretto restauro. [2]

I risultati della tomografia sulla statua di Kongo Rikishi sono stati molto soddisfacenti, come si può vedere nelle figure 5 e 6, in cui sono evidenziati gli oggetti nascosti al suo interno:

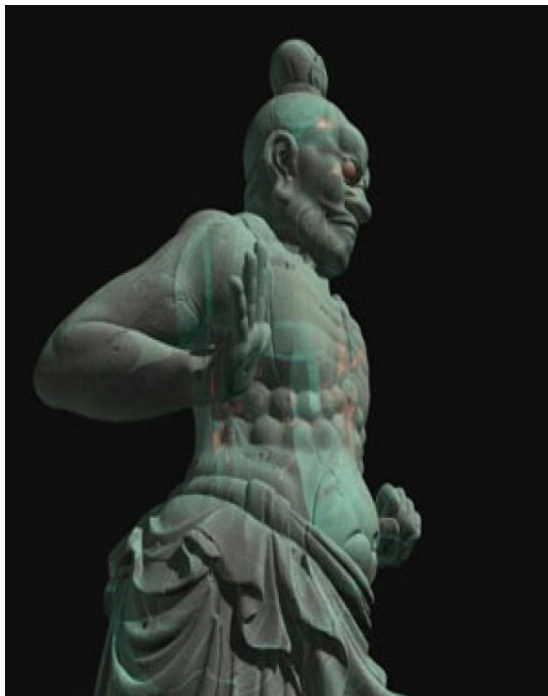


Figura 5: TAC su Kongo Rikishi (I)



Figura 6: TAC su Kongo Rikishi (II)

Tuttavia, questa tecnica presenta alcune limitazioni, in quanto è applicabile solo a oggetti composti da un certo tipo di materiale, quali statue lignee o simili; infatti, provando ad applicare la stessa metodologia a strutture in marmo o in cemento, la TAC non ha dato alcuna informazione utile. Questo è stato dimostrato dal dipartimento di ingegneria dell'ambiente, del territorio e delle infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino, prendendo una carota in cemento (Fig. 7) dentro la quale era presente un chiodo in ferro, dritto il più possibile ma in posizione obliqua: sono state fatte alcune scansioni mediante un apparecchio veterinario a raggi X, per rivelarne, senza esito il contenuto interno; il risultato è visibile nelle figure 8 e 9, sottostanti.



Figura 7: Carota in cemento con chiodo

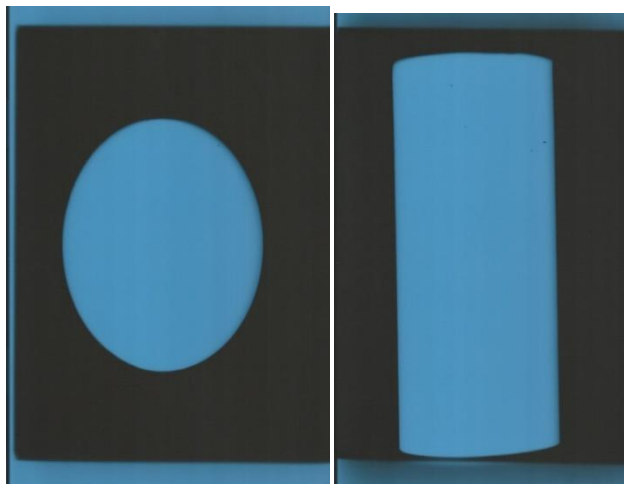


Figure 8 e 9: Risultato della TAC

A fronte di problemi di questa natura, abbiamo osservato l'inefficienza della tecnica radiografica; occorre quindi cercare qualche altra metodologia per poter identificare un manufatto in maniera abbastanza precisa, e una possibile riguarda l'applicazione di micro sensori alla geofisica, tema centrale dell'esperimento. [3]

2.2 Campo magnetico e magnetometri

2.2.1 Campo magnetico

I campi magnetici sono prodotti da cariche elettriche in movimento e quindi da correnti che scorrono in conduttori; se la corrente varia nel tempo, alla stessa maniera varia il campo magnetico. Questo vale anche per la magnetite e per tutte le sostanze che possono convertirsi in calamita, dette ferromagnetiche, quali ferro, acciaio, cobalto, nichel ecc: allo stesso modo, il campo magnetico ha origine dal moto di elettroni che crea correnti elettriche al loro interno. Per il campo magnetico terrestre l'origine è sempre dovuta al movimento, ma le teorie sono varie: tra esse, citiamo quella del fisico britannico P.M.S Blackett, che ritiene sia una conseguenza della rotazione del nostro pianeta, e quella dei fisici W.M. Elsasser ed E.C Bullard, secondo la quale sarebbe dovuto a correnti elettriche che si genererebbero in seno al nucleo terrestre, in quanto visto come un fluido e dotato di movimento rotatorio: la differenza di velocità tra la parte esterna e quella interna sarebbe la causa di queste correnti elettriche.

I campi magnetici possono essere inoltre statici o variabili. Si definiscono statici i campi magnetici costanti nel tempo, come il campo magnetico terrestre o quello prodotto dalle calamite, variabili quelli che variano più o meno rapidamente provocando il fenomeno dell'induzione magnetica, ovvero inducendo una corrente elettrica nei conduttori soggetti al campo. Un campo magnetico statico provoca, invece, l'orientamento di sostanze ferromagnetiche evidenziando una polarità Nord-Sud; in realtà, anche le sostanze non ferromagnetiche sono orientate più o menodebolmente da un campo magnetico statico. Il campo magnetico si misura in gamma, tesla o gauss: 1 gamma vale 1 nT (nanotesla), mentre 1 gauss vale 100 uT (microtesla).

2.2.2 Magnetometri

La tipologia di strumenti utilizzabili per la misura del campo magnetico è normalmente legata alla natura del campo stesso e in particolare alla sua differenziazione in statico o variabile. In passato erano utilizzati magnetometri a bilancia magnetica, che sfruttavano il principio della bussola: in

pratica, si utilizzava un ago magnetizzato vincolato nel piano verticale, leggendo direttamente dallo scostamento dell'ago l'intensità del campo che ne bilanciava il peso; questo metodo era utilizzato per misurare campi statici.

Il magnetometro a induzione è invece il tipico strumento di misura per i campi magnetici variabili: detto a bobina cercatrice (o search coil), è basato sulla misura della tensione indotta, dal campo in osservazione, sulla bobina del magnetometro. Un ottimo strumento per la misura dei campi statici o lentamente variabili è il magnetometro *fluxgate*. Questo tipo di strumento è costituito, nella sua forma elementare, da due avvolgimenti posti su di un nucleo magnetico, ad esempio ferrite; facendo scorrere una corrente alternata su uno degli avvolgimenti si crea un campo magnetico variabile, per cui anche questo è uno strumento attivo. Sull'altro avvolgimento si avrà quindi, come in un normale trasformatore, una corrente indotta, che in condizioni normali conterrà la fondamentale e le armoniche dispari; in presenza di campo magnetico si creeranno effetti di distorsione di seconda armonica, sempre più evidenti al crescere del campo: in sostanza, da queste distorsioni possiamo avere una informazione quantitativa sull'intensità del campo magnetico perturbante.

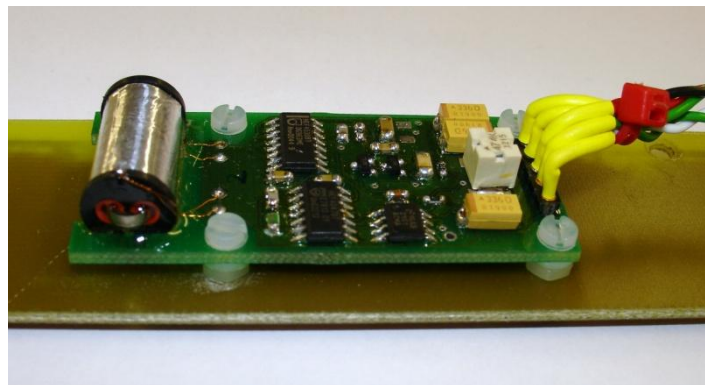


Figura 10 – Magnetometro Fluxgate

Altri magnetometri esistenti sono quelli a protoni, più professionali, i magnetometri a effetto Hall che misurano campi sia statici sia dinamici, anche di discreta intensità, e i magnetometri in tecnologia MEMS.

MEMS sta per, come già detto, *Micro Electro-Mechanical System*, una tecnologia sempre più diffusa e sfruttata in diversi ambiti, dalla ricerca scientifica (strumenti di laboratorio) alla vita quotidiana (ad esempio, accelerometri e giroscopi nei telefoni cellulari). Questi microsistemi sono composti da sottosistemi di varia natura, tutti integrati in un substrato in silicio, che coniugano proprietà elettriche tipiche dei semiconduttori a proprietà opto-meccaniche. Le applicazioni sono molto varie, e vanno dalla sensoristica all'ambito chimico, biomedico e fisico; in particolare, sono stati sviluppati sensori MEMS di campo magnetico.

Due sono le tecniche principali alla base del funzionamento dei magnetometri MEMS: l'effetto Hall e la magnetoresistenza anisotropa.

L'effetto Hall può essere dimostrato nel seguente esperimento: ponendo un foglio d'oro in un forte campo magnetico perpendicolare al suo piano e facendo scorrere una corrente tra due lati opposti di esso, si osserva una differenza di potenziale tra gli altri due lati, dovuta al fatto che un elettrone in movimento immerso in un campo magnetico libera una forza, detta forza di Lorentz, perpendicolare sia alla direzione della corrente sia a quella del campo. La differenza di potenziale viene creata perché il moto rettilineo dei portatori che si verificherebbe in assenza di campo magnetico subisce una deviazione, e alcuni portatori di carica vengono accumulati in un lato adiacente a quello di iniezione (figura 11).

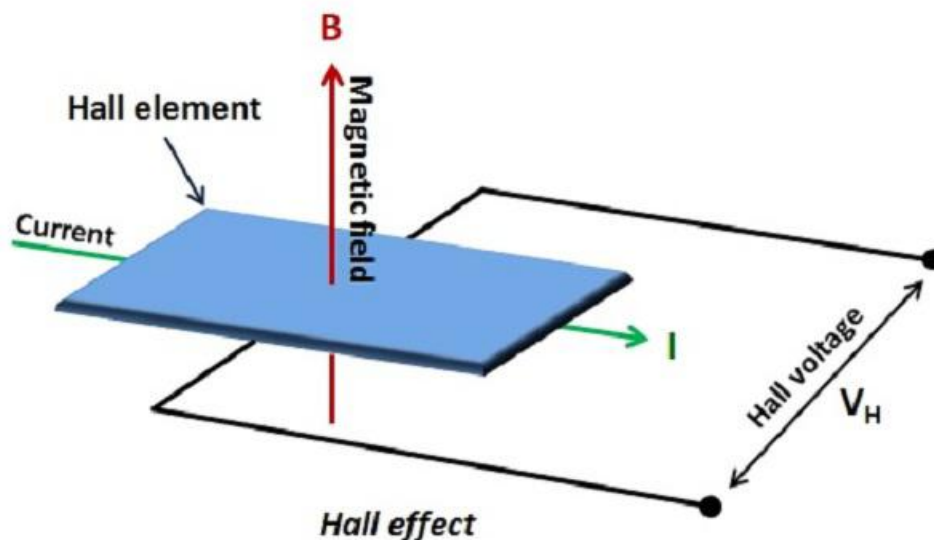


Figura 11 - Rappresentazione effetto Hall

L'intensità della differenza di potenziale è determinata anche dalla velocità dei portatori, e per questo motivo ad oggi i sensori integrati di questo tipo sono realizzati con materiali semiconduttori appartenenti al terzo e al quinto gruppo, caratterizzati dall'elevata mobilità che presentano elettroni e lacune al loro interno.

I sensori a magnetoresistenza anisotropa (AMR), invece, sono costruiti con materiali aventi una proprietà chiamata magnetoresistenza anisotropa, presentano cioè una variazione della resistenza se immersi in un campo magnetico: un esempio è il materiale denominato permalloy, composto da una particolare lega di Nichel e Ferro. Il vettore magnetizzazione di questi materiali ruota verso la direzione del campo magnetico in cui sono immersi, e l'angolo di rotazione è proporzionale all'intensità di questo campo; l'angolo tra il vettore magnetizzazione e la direzione in cui fluisce la corrente con cui è alimentato determina in modo inversamente particolare la resistenza del permalloy (figura 12).

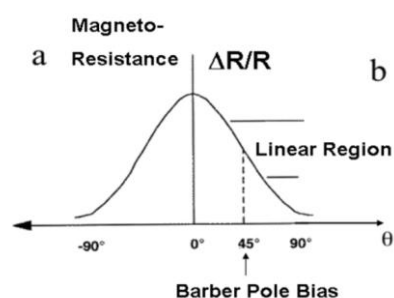


Figura 12 - Andamento della magnetoresistenza

A causa della forma a campana della curva che rappresenta l'andamento della magnetoresistenza, i sensori realizzati in questa tecnologia lavorano nella zona lineare evidenziata in figura 12; a causa di errori sul valore della resistenza, solitamente questo tipo di sensore viene utilizzato in configurazione a ponte di Wheatstone: vengono depositi quattro strati lunghi e sottili di permalloy sul medesimo substrato, e connessi ad esempio come schematicamente mostrato in figura 13. Poiché invertendo il verso del vettore magnetizzazione la tensione ai capi del ponte cambia segno, si effettuano due misure: la prima con il vettore magnetizzazione in un verso, al variare del campo magnetico, e la seconda con il vettore magnetizzazione nel verso opposto (questo si ottiene applicando un campo magnetico molto forte per periodo di tempo breve) ancora al variare del

campo magnetico. Sottraendo punto per punto i valori di tensione ottenuti si ottiene l'annullamento dell'offset dovuto agli errori intrinseci di resistenza; il valore di tensione ottenuto in uscita rappresenta il doppio rispetto a quello dovuto al campo magnetico applicato per via della configurazione a ponte di Wheatstone. [4]

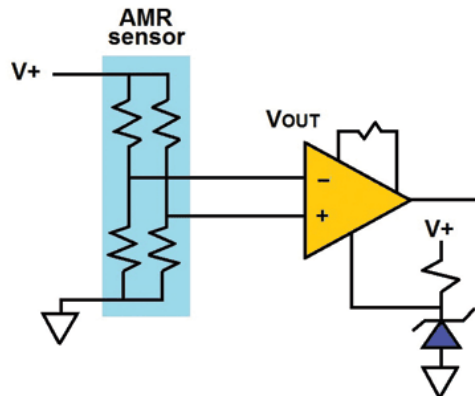


Figura 13 - Connessione a ponte di Wheatstone di 4 sensori AMR

2.3 Tecniche di calibrazione

Prima di usare un qualunque strumento o dispositivo di misura, è sempre necessario effettuarne una calibrazione, per migliorare l'attendibilità dei valori letti; questo procedimento è sempre consigliato, anche se in fase di produzione, in fabbrica, viene comunque effettuata una calibrazione. Per calibrare opportunamente i sensori di campo magnetico, sono state testate due strade: la trattazione immediatamente seguente illustrerà queste due tecniche, mentre nella fase implementativa verrà fatta una scelta, tenendo in considerazione le difficoltà implementative di ciascuna di esse.

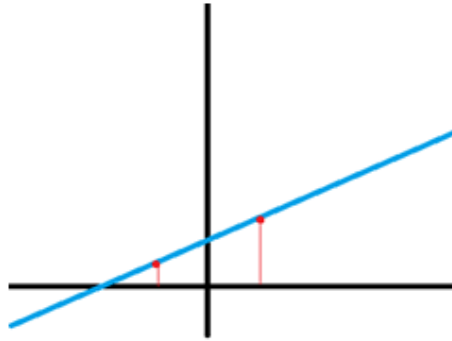
2.3.1 Prima idea di calibrazione

Un primo metodo di calibrazione è basato sulla stimolazione dello strumento di misura con un campo magnetico di intensità e orientamento noto.

Sotto l'ipotesi di linearità della transcaratteristica del sensore, la misurazione corretta m_c può essere rappresentata come una retta, quindi nella forma: $m_c = G \cdot m_1 + \text{Bias}$, dove G è il guadagno, m_1 la misurazione effettuata, e Bias rappresenta l'errore di offset. Operando una serie di acquisizioni con campo magnetico noto, è possibile determinare il valore del guadagno e dell'errore di bias minimizzando l'errore.

Tuttavia, risulta complicato generare un ben preciso valore di campo magnetico nello spazio. Pertanto, si può utilizzare come stimolo il campo magnetico terrestre, nell'ipotesi che sia spazialmente e temporalmente costante in un ambiente limitato. Supponiamo di prendere due misurazioni con lo stesso sensore, una in una certa posizione e l'altra capovolta o ruotata di 180° lungo un asse trasversale alla misura: nel primo caso, non sappiamo quanto sia di preciso il modulo del campo magnetico, ma sappiamo per certo che le due misurazioni sull'asse Z devono dare un valore complementare, qualunque esso sia. Detta m_i la misurazione in una certa posizione, si può scrivere:

$$\begin{cases} m_c = G \cdot m_1 + \text{Bias} \\ -m_c = G \cdot m_2 + \text{Bias} \end{cases}$$



Con un'ulteriore semplificazione, per calcolare il valore degli errori di bias, possiamo porre a 1 il valore di G, e, semplificando m_c e $-m_c$ tra di loro poiché uguali e opposti, otteniamo:

$$\begin{cases} m_c = m_1 + \text{Bias} \\ -m_c = m_2 + \text{Bias} \end{cases} \longrightarrow \text{Bias} = (m_1 + m_2) / 2$$

Utilizzando un magnetometro triassiale, il metodo va ripetuto per ciascun asse.

2.3.2 Seconda idea di calibrazione

Per stimare con più precisione i parametri di calibrazione, nella stessa ipotesi di campo spazialmente e temporalmente costante, è possibile definire un'altra metodologia, direttamente applicabile ad un magnetometro triassiale. Eseguendo delle misurazioni a vuoto per un certo intervallo di tempo, ruotando ripetute volte il sensore in modo da massimizzare la variabilità della misura, quando si disegna la distribuzione dei valori acquisiti in un grafico 3D si dovrebbe ottenere un solido molto simile a una sfera. In realtà questo è vero se i sensori fossero calibrati, per cui si ottiene un solido affine a un ellissoide; i motivi sono i più svariati: errori di guadagno, di bias, di sfasamento, effetti indesiderati quali disturbi e presenza di materiali "soft iron" (materiali che smettono di essere magnetici alla rimozione del campo magnetico), "hard iron" (viceversa), ecc.

Mediante un metodo chiamato "algoritmo dell'ellissoide", andiamo a trovare i parametri correttivi delle nostre misure; applicando in ingresso a questo algoritmo i valori di misurazione del campo sui 3 assi, possiamo ottenere una serie di valori correttivi, volti a correggere il set di errori precedentemente elencato [6].

2.4 Microcontrollore e sensori



Figura 14 - STM32VLDISCOVERY



Figura 15 - Sensore LD303D

Il microcontrollore è l'elemento attivo che gestisce i sensori; il suo compito è quello riconfigurare ciascun sensore e quindi di prelevare i valori acquisiti, e di passarli alla macchina che li elabora, ad esempio mediante un'interfaccia seriale. Un microcontrollore consono per questa attività appartiene alla famiglia Cortex, ed è il STM32F100RBT6B, mostrato in figura 14: esso comprende una flash memory di 128 KB, una RAM di 8 KB e 64 pin; supporta la comunicazione USB, è presente

per il resto della trattazione, ma bisogna tenere in conto fin da subito che esso effettua misurazioni triassiali. L'orientamento degli assi del sensore, sia per la componente accelerometrica sia per quella del magnetometro, è rappresentata in figura 18.

Figure 1. Block diagram

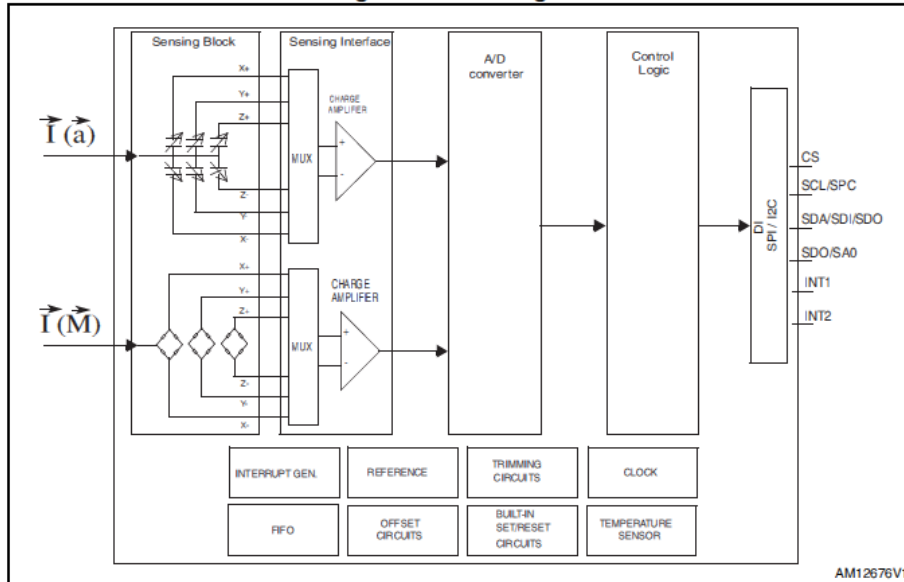


Figura 17 - Schema a blocchi Sensore

Figure 2. Pin connections

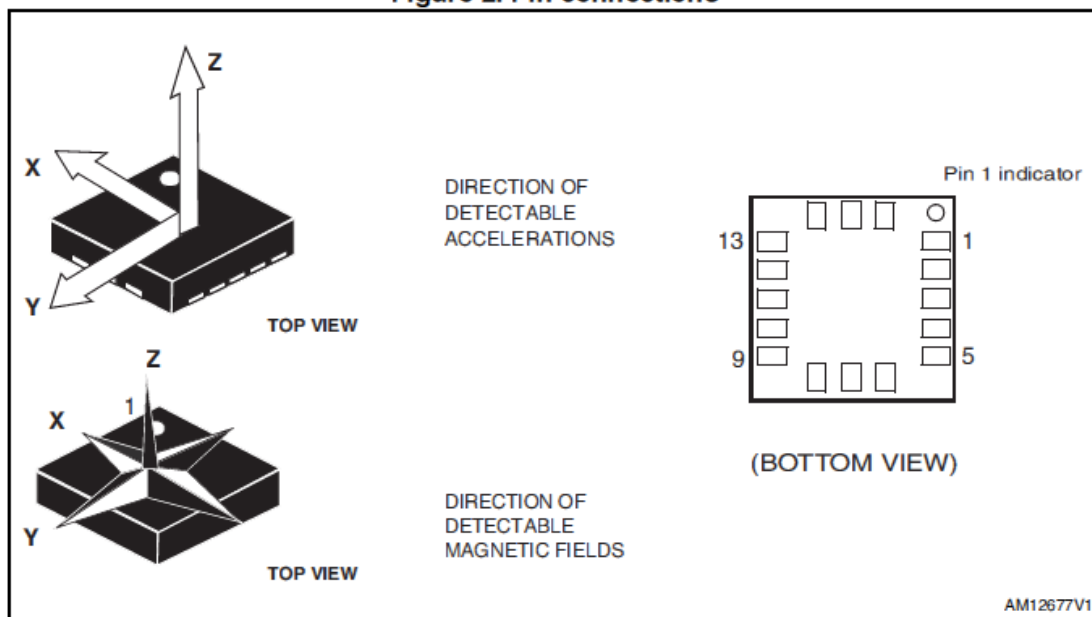


Figura 18 - Assi e pin del sensore

2.5 Le interfacce I2C e SPI

2.5.1 Caratteristiche tecniche protocollo I²C:

È un sistema di comunicazione seriale, basato su un'architettura master-slave; trattandosi di un protocollo seriale, ha il vantaggio di usare solo due linee, ma un suo limite è dato dalla velocità di comunicazione.

Le due linee di comunicazione si chiamano SDA (serial data line, bidirezionale) e SCL (serial clock line), alle quali vanno aggiunte una connessione di riferimento GND e una tensione di alimentazione V_{dd} ; tra essa e le linee I²C sono necessarie delle resistenze di pull-up. L'indirizzamento può essere a 7 o 10 bit, e le velocità si aggirano sui 10 kbit/s per la modalità low-speed, 100 kbit/s per la standard, 400 kbit/s per la fast mode e 3,4 Mbit/s per la high speed mode. Il numero massimo di dispositivi che possono essere connessi a I²C è limitato sia dal numero di bit di indirizzo, sia dalla somma delle capacità parassite introdotte da ciascun dispositivo: in particolare, le linee SDA e SCL non devono presentare più di 400 pF; sulla base delle capacità parassite e sulla massima corrente assorbibile dal dispositivo si dimensionano le resistenze di pull-up [6].

2.5.2 Sequenza di operazioni con il bus I²C:

Il master inizia lo scambio di informazioni inviando lo start bit, che corrisponde a una transizione alto - basso del bus dati SDA mentre SCL è alto: seguono successivamente 7 bit (o 10) di indirizzo della periferica con cui si vuole comunicare; dopo questi, viene mandato un bit che indica se si vuole trasferire informazioni allo slave oppure leggere: nel primo caso, il bit sarà basso, mentre nel secondo caso il master rilascerà la linea dati, e il bit sarà alto.

Se lo slave indirizzato esiste, manda un bit di conferma, denominato ACK, forzando SDA basso al successivo impulso alto di SCL, e, successivamente, risponderà. Il ricevente che è stato indirizzato dovrà mandare un ACK a ogni byte ricevuto; al termine della comunicazione viene inviato uno stop bit, che è una transizione basso altro mentre la linea SCK è alta. Infine, se il master vuole leggere, invia un ACK a ogni byte ricevuto, tranne l'ultimo, a cui può seguire uno stop o uno start bit.

I 7 bit di indirizzo rappresentano il registro, uniti a un MSB che dice quale interfaccia I²C utilizzare [6].

2.5.3: Il protocollo SPI

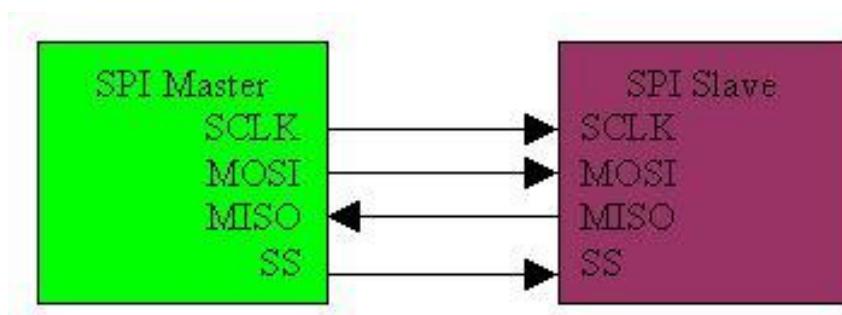


Figura 19 - collegamento tra dispositivi mediante il bus SPI

2.5.4 Caratteristiche tecniche SPI:

SPI è un bus a 4 fili, seriale, sincrono e full duplex, in quanto la comunicazione può avvenire contemporaneamente in entrambe le direzioni. **SCLK** è la linea di temporizzazione, controllata dal

dispositivo master e che scandisce la comunicazione in entrambe le direzioni, e quindi è un ingresso per tutti gli slave; **MOSI** significa Master Output Slave Input, e porta i dati dal master allo slave; viceversa la linea **MISO**, Master Input Slave Output, trasferisce l'output dallo slave verso il master; infine, la linea **CS** seleziona lo slave a cui trasferire i dati.

Non vi è un limite minimo di velocità, ma vi è un limite massimo determinato dalle capacità parassite dei singoli dispositivi connessi (fino alle decine di MHz); non sono necessarie resistenze di pull up.

Il sistema di comunicazione di solito serve per lo scambio di dati tra dispositivi montati "sulla stessa scheda elettronica" (o comunque tra schede elettroniche vicine tra di loro) in quanto non prevede particolari accorgimenti hardware per trasferire informazioni tra dispositivi lontani connessi con cavi soggetti a disturbi.

I dispositivi slave possono essere controllati singolarmente o essere connessi in catena: nel primo caso (Fig.18) , si ha una comunicazione più rapida tra master e slave, ma bisogna avere un pin CS per ogni dispositivo da connettere. Nel secondo caso (Fig. 19), si usa un solo pin per selezionare i dispositivi, ma si introduce una latenza nella comunicazione. [6]

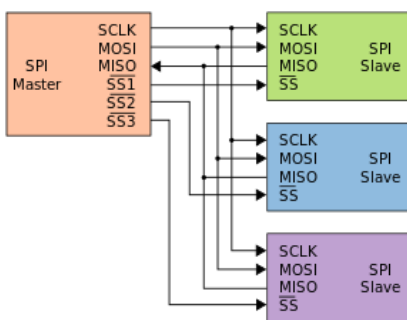


Figura 18 - Slave controllati singolarmente

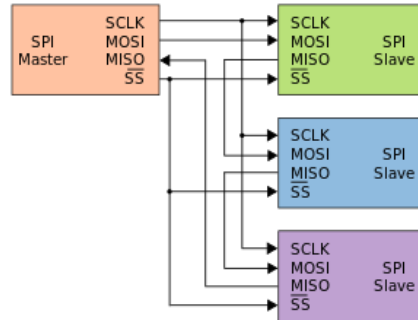


Figura 19- Slave controllati in catena

2.5.5 Sequenza di operazioni con il bus SPI:

CS rappresenta l'abilitazione della comunicazione seriale ed è controllato dal master SPI: esso va a un livello basso all'inizio della trasmissione, e torna alto alla fine. Gli altri pin in gioco sono SPC (clock), che è mantenuto alto quando CS è alto (no trasmissione), SDI e SDO, rispettivamente serial data input e serial data output: queste linee sono pilotate al fronte di discesa del clock e il loro valore dovrebbe essere catturato non appena SPC sale.

Entrambi i comandi di lettura e scrittura sono completati in 16 colpi di clock, o in multipli di 8 in caso di lettura/scrittura di più byte.

Il primo bit (bit 0 = MSB) viene trasmesso al primo fronte di discesa del clock, che si verifica appena dopo il fronte di discesa di CS. Questo si verifica al termine della precedente trasmissione, quando il clock va alto, l'ultimo bit viene trasmesso (bit 15, 23, ...) e CS torna alto. Di seguito i bit che vengono trasmessi durante una normale comunicazione, msb first:

bit 0: RW bit. A 1 per operazioni di lettura, a 0 per la scrittura.

bit 1: MS bit. In caso di comandi multipli di lettura e scrittura, vengono aggiunti blocchi di 8 clock. Se il bit MS è a 0, l'indirizzo usato per leggere/scrivere rimane lo stesso per ogni blocco. Se MS è a 1, l'indirizzo viene incrementato a ogni blocco di operazioni.

bit 2-7: Bit di indirizzo

bit 8-15:data DI (write mode): ciò che verrà scritto nel dispositivo indirizzato.

bit 8-15:data DO (read mode): ciò che verrà letto dal dispositivo indirizzato.

2.5.6: Confronto I²C - SPI

Essendo caratterizzato da due fili, I²C usa meno piedini per interfacciarsi a un dispositivo, ma SPI non prevede l'uso di resistenze di pull up, il che si traduce in un minor costo di energia. SPI supporta comunicazioni full duplex a differenza di I²C, e il throughput è maggiore: rispetto a I²C, la comunicazione SPI non è limitata a parole di 8 bit, così da poter mandare ogni genere di messaggio.

Quando si comunica con più di uno slave, I²C ha il vantaggio di avere indirizzamento logico (senza richiedere linee dedicate per l'abilitazione dei dispositivi slave), senza passare dal CS, e supporta lo slave ACK, per essere certi del dispositivo con il quale si sta comunicando: invece, c'è la possibilità che un SPI lavori senza nessun dispositivo slave in ricezione. L'interfaccia I2C presenta, almeno in via teorica, una maggiore sensibilità al rumore. A differenza dell'interfaccia SPI, infatti, l'I2C opera sul livello (o stato) anziché sul fronte del segnale. Ne consegue che un elevato livello di rumore potrebbe modificare il bit di operazione (quello successivo all'indirizzo), modificando l'operazione da lettura a scrittura o viceversa. [6]

3 - Progettazione del sistema

3.1 Il progetto in generale

L'obiettivo del progetto è lo sviluppo di un sistema per la determinazione della posizione di un oggetto metallico all'interno di un manufatto in pietra o cemento. Per tale scopo, è utilizzato un insieme di magnetometri in grado di rilevare l'intensità del campo magnetico nello spazio circostante il manufatto. Il sistema utilizzato sfrutta il principio della magnetizzazione indotta: un oggetto metallico di per se non è magnetico, ma si magnetizza per induzione se esposto a un campo magnetico esterno, quale quello terrestre; questa magnetizzazione, sebbene piccola, disturba in modo visibile il normale andamento del campo esterno.

Il sistema realizzato è dotato di quattro sensori che misurano il campo magnetico ruotando attorno al manufatto contenente un eventuale oggetto metallico. Questo sistema a 4 sensori poggia su un sostegno, costruito in modo da consentire rotazioni di 360° attorno al manufatto, e di poter variare l'altezza di misura; naturalmente, questo sostegno deve essere realizzato in modo da garantire una certa precisione di rotazione, e in modo che non includa componenti metallici che potrebbero alterare ulteriormente il campo magnetico terrestre, come mostrato in figura 20. L'obiettivo è quindi di misurare in punti dello spazio noti il campo magnetico attorno al manufatto all'interno del quale si suppone sia presente l'oggetto metallico, nelle tre componenti radiali, tangenziali e verticali e, sulla base di queste misurazioni, elaborare i dati in modo opportuno per poter fare ragionevoli considerazioni sulla posizione effettiva dell'oggetto stesso. In ogni punto di misura i sensori acquisiscono una serie di valori che sono poi opportunamente mediati per ridurre ulteriormente l'errore.

La progettazione del sistema è stata fatta usando 4 sensori triassiali; è stato scelto il numero di 4 sensori perché, se disposti opportunamente, dalle loro misurazioni è possibile ricavare una informazione tensoriale, oltre a quella sul gradiente già ricavabile da un sistema con due sensori. Il concetto di tensore trova applicazione, ad esempio, nel campo della meccanica dei continui, per descrivere le sollecitazioni e le deformazioni subite dai corpi estesi, ma anche nella relatività, nell'elettromagnetismo, nella meccanica dei solidi e dei fluidi e nelle scienze delle costruzioni; nel nostro caso, volendo osservare come un componente metallico possa influenzare il campo magnetico terrestre, l'informazione tensoriale è sicuramente utile: in letteratura, è stato spesso usato per studiare appunto le deformazioni di campo magnetico.

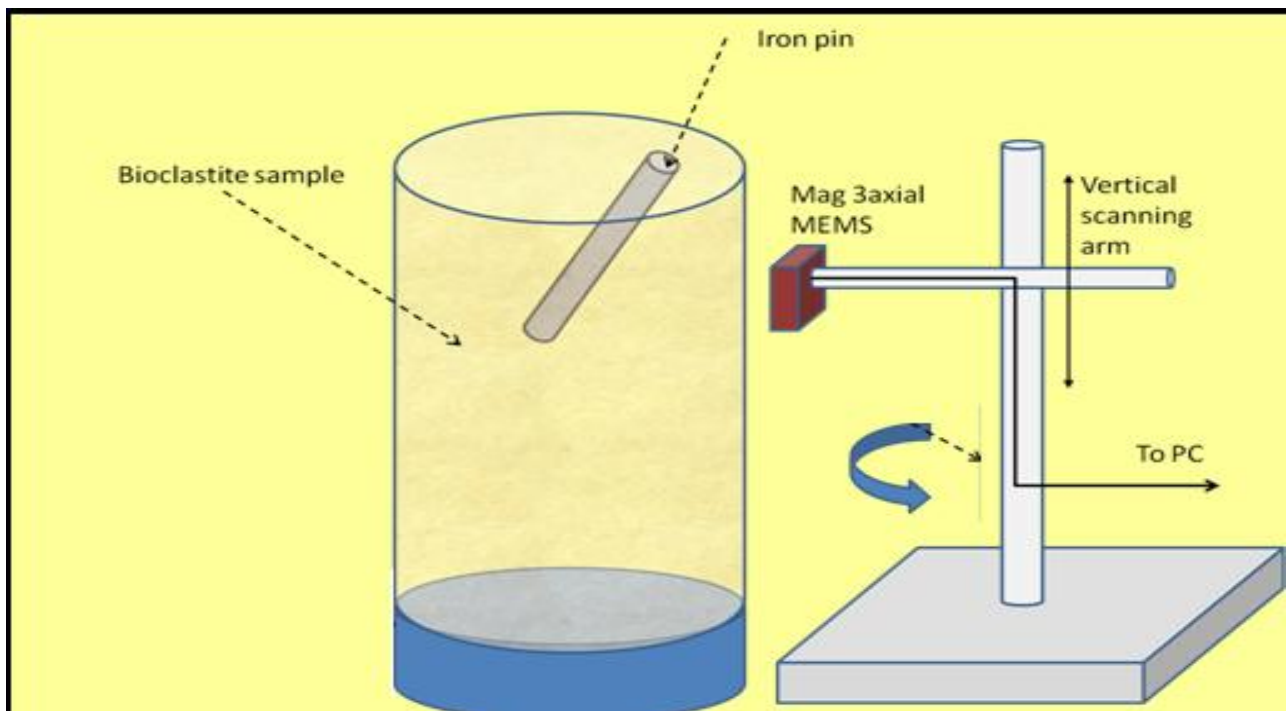


Figura 20 - Sistema di prova

Tutti i sensori sono connessi a un microcontrollore montato su una scheda; il microcontrollore verrà programmato in modo tale da ricevere le informazioni dai 4 sensori mediante i bus, organizzarle, e passarle a un PC mediante un collegamento seriale.

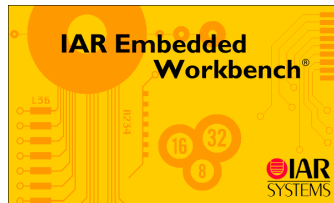
Lo stesso firmware che esegue queste azioni dovrà preventivamente configurare ciascun piedino del microcontrollore, ad esempio settando il tipo di uscita, o impostando frequenza del bus, della porta seriale USART, ecc.

In ogni sistema è necessario trovare la frequenza di lavoro necessaria, che deve avere un margine in eccesso sufficientemente grande in modo tale da non perdere dati, ma non eccessivamente per non far lavorare il sistema inutilmente ad alte frequenze; a tal proposito, il capitolo 4.3 sarà dedicato al calcolo del massimo Output Data Rate (ODR), nel quale si analizzano le operazioni di lettura e scrittura sul bus a basso livello, con l'ausilio dell'oscilloscopio per verificare la correttezza dei conti.



Iar Embedded Workbench

E' l'ambiente di sviluppo usato per programmare e impostare i vari parametri della scheda; dal menù si sceglie il microcontrollore sul quale vogliamo lavorare, successivamente, una volta scaricate le librerie, si procede alla stesura del codice, alla compilazione, e al debug.



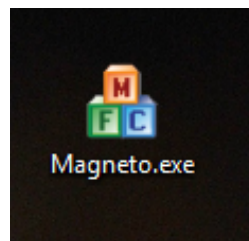
Matlab

Il noto software di calcolo verrà utilizzato per molteplici ragioni: una di esse è l'acquisizione dei dati dalla porta seriale; poi per l'elaborazione dei dati di ingresso, e infine per visualizzare graficamente le informazioni su modulo, gradiente, e componenti del campo magnetico sui tre assi.



Magneto

Software usato per la calibrazione dei sensori di campo magnetico: ricevendo in ingresso le misurazioni sui 3 assi, implementando un algoritmo detto algoritmo dell'ellissoide restituisce 12 valori di calibrazione (guadagni e bias).



4.2: Scelta comunicazione: interfaccia I²C

Alla luce dei precedenti confronti, è stata scelta l'interfaccia I²C, sia per semplicità sia per il fatto che il datasheet sconsiglia l'uso di SPI per collegamenti lunghi: in questo caso, il cavo di collegamento sensore - microcontrollore che useremo ha una lunghezza di qualche metro, per evitare che la vicinanza del PC possa turbare il campo magnetico misurato in modo non trascurabile.

I sensori sono dunque collegati al microcontrollore mediante il bus I²C: una singola board supporta fino a due interfacce I²C, ognuna delle quali può indirizzare al più 2 sensori: questo perché i sensori MEMS utilizzati possono avere soltanto due indirizzi, definiti dal valore logico sul piedino SDO (figura 21); di conseguenza, per gestire 4 MEMS ci siamo serviti di entrambe le interfacce presenti sulla discovery board.

I piedini utilizzati per ciascun sensore sono 6:

SDA: I²C serial data.

SCL: I²C serial clock.

SDO: Bit meno significativo del dispositivo indirizzato dall'I²C.

CS: 1 se vogliamo usare I²C, 0 per SPI

Vcc: Alimentazione.

VddIO: Alimentazione per i pin di I/O.

Gnd: Massa

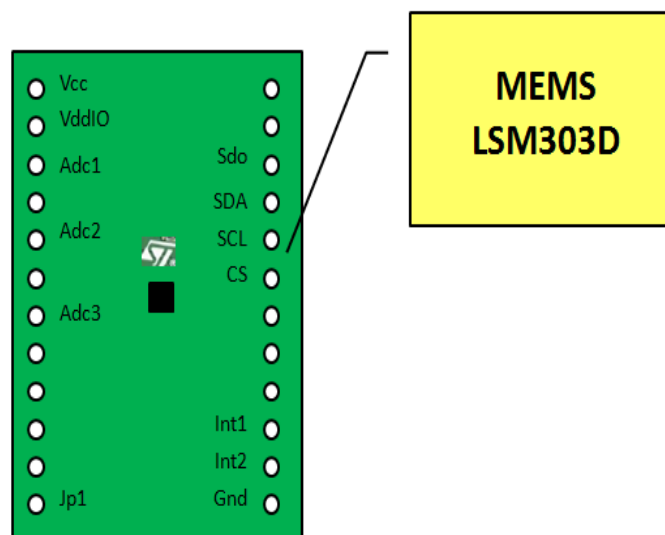


Figura 21 - Scheda con sensore

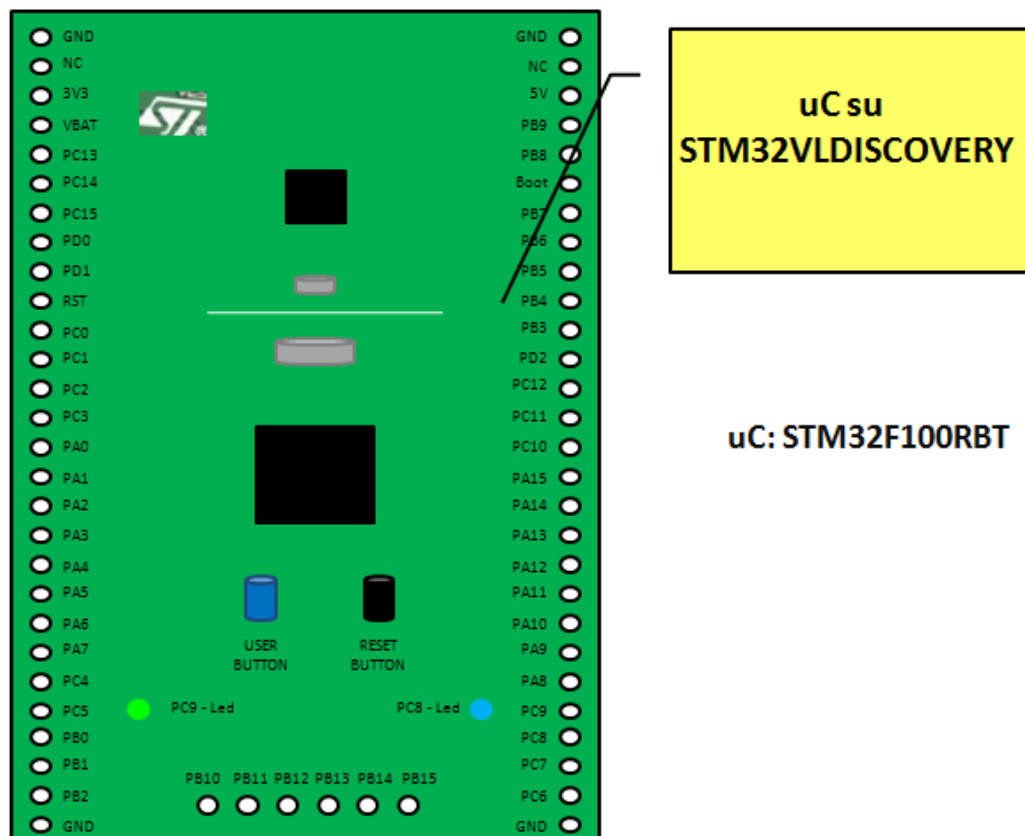


Figura 22 - Scheda con microcontrollore

Analizzando questo elenco, si nota la presenza del pin SDA, che permette il trasferimento di dati vero e proprio, bit per bit; il pin SCL per il clock, temporizza la comunicazione; invece, il pin CS serve per discernere tra l'uso dell'I²C e dell'SPI; i pin di GND e Vcc/VccIO per l'alimentazione.

Dalla lista sopra riportata è stato volutamente tralasciato il pin SDO, poiché merita una trattazione più approfondita, essendo uno dei cardini per quel che riguarda l'indirizzamento dei sensori: l'indirizzo slave associato al generico sensore LSM303D ha la forma 00111xxb, dove i bit xx sono modificati dal PIN SDO per caratterizzare l'indirizzo del dispositivo destinatario. Se il PIN SDO è connesso all'alimentazione, l'indirizzo sarà 0011101b, che in esadecimale è 3A, mentre se il PIN SDO è connesso a massa, l'indirizzo risultante sarà 0011110b, che in esadecimale corrisponde a 3C. Ed è proprio grazie al meccanismo appena descritto se è possibile il fatto che una sola interfaccia possa gestire fino a due periferiche sensoriali.

Una possibile alternativa a questa soluzione è quella di utilizzare una sola interfaccia I²C, anziché due: con questa configurazione si associano tre sensori all'indirizzo 3A e uno solo all'indirizzo 3C (o viceversa); dopodiché si esegue una prima lettura all'indirizzo 3A (3C), e via software si va a modificare il pin SDO, per cambiare l'indirizzo al secondo sensore. Una volta fatto questo, si rileggerà nuovamente l'indirizzo 3A per acquisire i dati del secondo sensore, e si ripete questo procedimento di lettura-cambio indirizzo finché non vengono letti i dati da tutti i MEMS.

Sebbene questa soluzione occupi qualche piedino in meno nella discovery board, per ragioni di praticità è stata scelta la prima idea di progetto; seguiranno i collegamenti e i dettagli implementativi.

4.3 Calcolo del massimo Output Data Rate (ODR)

Un fattore importante del progetto riguarda il calcolo della frequenza di comunicazione necessaria, che dipende dalla frequenza di acquisizione impostata per il sensore (output data rate o ODR); tutto ciò al fine di utilizzare la frequenza minima sufficiente a garantire il trasferimento dei dati in modo da aumentare l'affidabilità del collegamento. I risultati riportati di seguito sono stati ricavati facendo varie operazioni di lettura e scrittura con il bus I²C, e osservando attentamente il risultato passo dopo passo con un oscilloscopio digitale.

Sebbene l'elaborazione dei dati riguardi solo i valori ottenuti dal magnetometro, vengono riportati e salvati anche i valori letti dall'accelerometro, che potrebbero essere utili in future elaborazioni (per esempio, per l'allineamento dell'orizzontale); dobbiamo quindi tenere conto di questo fattore nel calcolo dell'ODR. Il valore preso in oggetto consiste in una serie di letture di registri contigui, così per questi MEMS esiste la possibilità di non scrivere ogni volta l'indirizzo completo della locazione in cui leggere il dato, ma di ricavarlo di volta in volta a seconda di quanti byte desidero leggere: questa modalità prende il nome di auto-increment.

Le verifiche sperimentali fatte con l'oscilloscopio hanno portato ai seguenti risultati:

Massimo ODR per un accelerometro: 1600 Hz (da datasheet)

Massimo ODR per un magnetometro: 100 Hz (da datasheet)

Durata di 1 colpo di clock: 6.8 uS

Senza auto-increment:

Colpi di clock necessari a leggere 1 byte: 38

Colpi di clock aggiuntivi tra 2 istruzioni I2C_Read consecutive: 4

Con auto-increment:

Colpi di clock per la prima lettura dell'accelerometro/magnetometro: 38

Colpi di clock per le letture successive: 9

Overhead tra una lettura e l'altra: 0

Overhead da lettura accelerometro a lettura magnetometro: 4 (quelli di prima; visto che i registri di lettura accelerometro / magnetometro non sono contigue, servono 2 istruzioni I2C_Read distinte).

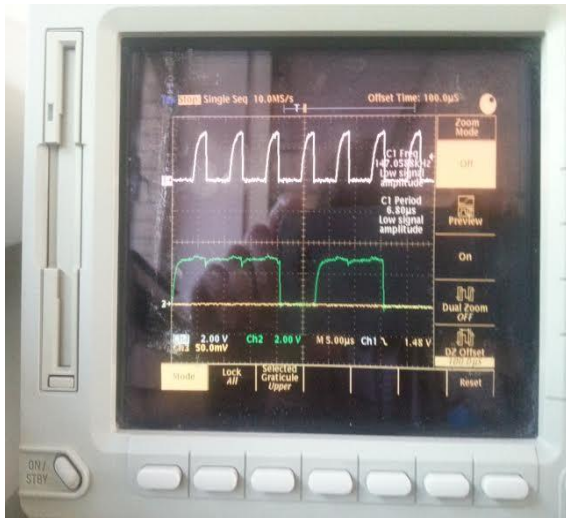


Figura 23 - Ciclo di lettura: in bianco i clock, in verde i dati

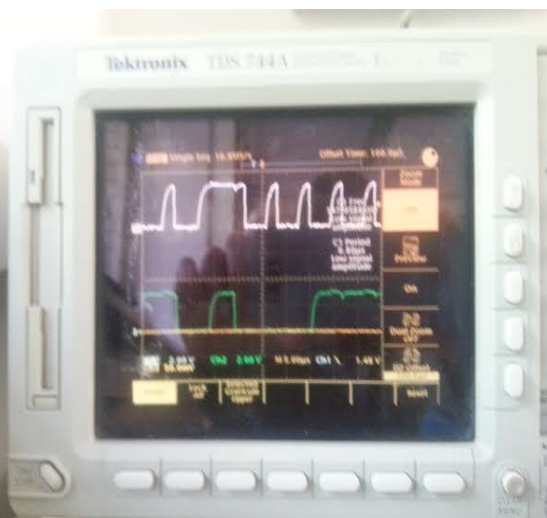


Figura 24 - Overhead di 2 colpi di clock

Di seguito alcuni calcoli fatti per avere un'idea di come cambi la velocità di lettura dati dai registri a seguito delle variazioni di ODR:

1 sensore, massimo ODR sia per accelerometro (1600 Hz) sia per magnetometro (100 Hz), **senza** auto-increment, per la lettura di tutti i registri: la prima lettura dell'accelerometro impiega 38 bit, mentre le successive 42, considerando i 4 di overhead. Quindi, il numero di clock da garantire in 1 secondo è:

$$n_{\text{clock}} = (38 \cdot 1 \cdot 1600 + 42 \cdot 5 \cdot 1600) + (38 \cdot 1 \cdot 100 + 42 \cdot 5 \cdot 100) = 421600 \text{ colpi di clock.}$$

2 sensori per interfaccia, massimi ODR, **senza** auto-increment, per la lettura di tutti e quattro i registri: $n_{\text{clock}} = 2 \cdot \text{risultato precedente} = 2 \cdot 421600 \text{ colpi di clock} = 843200 \text{ colpi di clock}$, corrispondenti a **0.9 MHz**.

2 sensori, massimi ODR, **con** auto-increment: con questo meccanismo, la lettura del primo registro occupa 38 colpi di clock, mentre le successive 5 soltanto 9. Come prima, devo sommare i contributi di accelerometro e magnetometro, considerando i 4 bit di overhead tra i due:

$$n_{\text{clock}} = 2 \cdot [(1600 \cdot 38 + 1600 \cdot 9 \cdot 5) + 4 + (100 \cdot 38 + 100 \cdot 9 \cdot 5)] = 225 \text{ kHz (112.5 kHz per sensore).}$$

Abbiamo visto che, nella peggiore delle ipotesi, la modalità di incremento automatico ci permette di ottenere gli stessi risultati viaggiando con una frequenza inferiore di un fattore 3.

Infine, calcoliamo la frequenza a cui viaggiare con l'ODR scelto per il progetto, ovvero 50 Hz sia per accelerometri sia per magnetometri:

$$\text{Senza auto-increment: } 2 \cdot [(50 \cdot 38 + 50 \cdot 42 \cdot 5) + (50 \cdot 38 + 50 \cdot 5 \cdot 42)] = 48100 \text{ colpi di clock in un secondo} = \mathbf{50 \text{ kHz}}$$

$$\text{Con auto-increment: } 2 \cdot [(50 \cdot 38 + 50 \cdot 5 \cdot 9) + 4 + (50 \cdot 38 + 50 \cdot 5 \cdot 9)] = 16800 \text{ colpi di clock in un secondo} = \mathbf{20 \text{ kHz}}$$

Come si vedrà nel codice della funzione di lettura "transfer_data", è stata scelta la lettura con auto-increment.

4.4 Dettagli implementativi a livello Hardware

In questo paragrafo verranno rapidamente mostrati i dettagli implementativi riguardanti soprattutto i collegamenti hardware. Nel paragrafo seguente essi verranno approfonditi da un punto di vista più ad alto livello, in cui saranno spiegate le configurazioni che sono state impostate via software.

Il collegamento PC - microcontrollore avviene tramite porta seriale, che vede nei suoi parametri un baud rate di 230400 bit per secondo, 8 bit di dato e 1 di stop.

In figura 25 viene mostrato lo schema a blocchi del sistema complessivo.

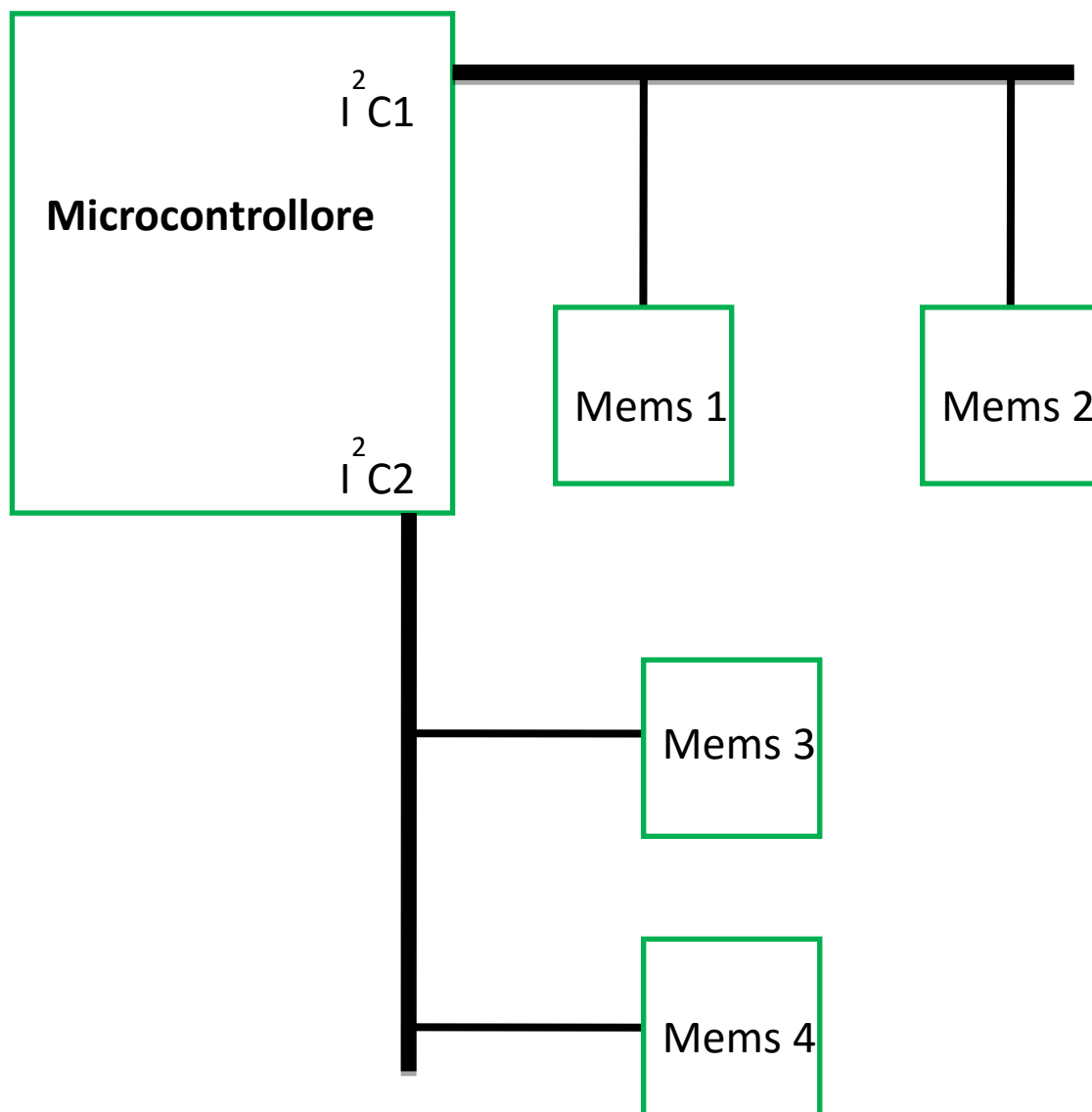


Figura 25 - Schema a blocchi del sistema

La seguente tabella riassume quindi i collegamenti nel dettaglio, per I²C1:

GND board —→ GND sensore 1 e 2.

PB9 —→ Vcc sensore 1.

PB8 —→ Vcc sensore 2. CS sensore 1 e CS sensore 2.

PB7 —→ SDA sensore 1 e SDA sensore 2
PB6 —→ SCL sensore 1 e SCL sensore 2
PB5 —→ SDO sensore 1 (reset, indirizzo 0x3C)
PB4 —→ SDO sensore 2 (set, indirizzo 0x3A)

Per completezza, sono riportati anche i collegamenti Microcontrollore - Sensore per l'interfaccia I²C2:

GND board —→ GND sensore 1 e 2.
PB14 —→ Vcc sensore 1.
PB14 —→ Vcc sensore 2. CS sensore 1 e CS sensore 2.
PB11 —→ SDA sensore 1 e SDA sensore 2
PB10 —→ SCL sensore 1 e SCL sensore 2
GND —→ SDO sensore 1 (reset, indirizzo 0x3C)
PB12 —→ SDO sensore 2 (set, indirizzo 0x3A)

4.5 Programmazione del microcontrollore

In questa sezione verrà mostrato come avviene la programmazione del microcontrollore; in particolare, verrà chiarito come vengono configurati i piedini, permettendo così il corretto indirizzamento secondo le modalità accennate precedentemente, e come viene gestita la comunicazione tramite il bus I²C.

Bisogna premettere che le nostre misure sono perciò effettuate mantenendo la componente Z **radiale** alla carota in cemento, la componente Y **tangenziale**, e la X **verticale**. E' un fattore importante, per il quale si dovrà prestare attenzione nella scrittura del codice.

Le operazioni preliminari svolte sono state quelle di inizializzazione: in ordine vediamo l'abilitazione di clock, led, pulsanti, porta seriale, bus e timer. La funzione `azzerPinI2C` serve per scaricare eventuali capacità parassite prima della comunicazione.

```
int main(void) {
    int i; u8 mychar;
    /* Enable GPIOx Clock */
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_PWR, ENABLE);
    /* Initialise LEDs LD3&LD4, both on */
    STM32vldiscovery_LEDInit(LED3);
    STM32vldiscovery_LEDInit(LED4);
    azzerPinI2C ();
    STM32vldiscovery_LEDOn(LED3);
    STM32vldiscovery_LEDOn(LED4);
    /* Initialise USER Button */
    STM32vldiscovery_PBInit(BUTTON_USER, BUTTON_MODE_GPIO);
    init_USART1();
    while (USART_GetFlagStatus(USART1, USART_FLAG_TXE) == RESET);
        USART_SendData(USART1, 'Z');
    init_I2C1(); //Inizializza il BUS I2C1
    init_I2C2();
    TIM1_Interrupt_Configuration();
```

Di seguito, compare il codice per l'inizializzazione dei magnetometri:

```
#ifdef MAGNET
    mychar = 0x70; // 01110000 enable magnetometer (high resolution, 50 Hz)
    I2C_Write(&mychar, 0x24, LSM303D_ADD_1, 1, I2C2); // CTRL0
    I2C_Write(&mychar, 0x24, LSM303D_ADD_2, 1, I2C1); // CTRL0
```

```

I2C_Write(&mychar, 0x24, LSM303D_ADD_2, 1, I2C2); // CTRL0
mychar = 0x00; // 00000000 +/-2 2 gauss full scale
I2C_Write(&mychar, 0x25, LSM303D_ADD_1, 1, I2C1); // CTRL6
I2C_Write(&mychar, 0x25, LSM303D_ADD_1, 1, I2C2); // CTRL6
I2C_Write(&mychar, 0x25, LSM303D_ADD_2, 1, I2C1); // CTRL6
I2C_Write(&mychar, 0x25, LSM303D_ADD_2, 1, I2C2); // CTRL6
mychar = 0x00; // 00000000 enable magnetometer (continuous conversion)
I2C_Write(&mychar, 0x26, LSM303D_ADD_1, 1, I2C1); // CTRL7
I2C_Write(&mychar, 0x26, LSM303D_ADD_1, 1, I2C2); // CTRL7
I2C_Write(&mychar, 0x26, LSM303D_ADD_2, 1, I2C1); // CTRL7
I2C_Write(&mychar, 0x26, LSM303D_ADD_2, 1, I2C2); // CTRL7
#endif

```

Nelle prime 6 righe viene scritta la parola *01110000* nel registro 0x24, per ogni sensore, in ogni interfaccia: il primo valore, 0, significa che disabilitiamo il sensore di temperatura incluso nel MEMS, 11 indica che usiamo il magnetometro in "high resolution mode", 100 indica la selezione dell'output data rate (ODR) a 50 Hz: nel capitolo 3.4 verranno esplicitati i calcoli svolti per arrivare a questo risultato. Gli ultimi due 0 riguardano parametri dei quali non siamo interessati, e lasciamo i valori di default.

Nel registro 0x25 viene invece inserita la parola *00000000*: di questi, 6 zeri sono obbligatori, mentre il secondo e il terzo (a sinistra il msb) selezionano un fondo scala di + 2 gauss o - 2 gauss; altri valori di fondo scala possibili sono, in modulo, 4, 8 e 12 gauss.

Infine, la parola *00000000* scritta nel registro 0x26 imposta parametri più avanzati, tra cui la possibilità di lavorare in "continuous conversion mode" piuttosto che "power down mode" o "single conversion mode".

Qui sotto è riportato il frammento di codice più significativo per l'inizializzazione della prima interfaccia I²C; a parte il nome dei pin diverso, la funzione `init_I2C2()` è analoga.

```

void init_I2C1(void) // I2C2 usa i piedini b10 (clk) e b11 (data)
{
    I2C_InitTypeDef my_i2c;
    GPIO_InitTypeDef my_gpio;

    my_gpio.GPIO_Pin = GPIO_Pin_5; // VDD: prendi alimentazione da pin 8 e 9
    my_gpio.GPIO_Mode = GPIO_Mode_Out_PP;
    my_gpio.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
    GPIO_Init(GPIOB, &my_gpio);
    GPIO_SetBits(GPIOB, GPIO_Pin_5);

    for (int k1=0; k1<1000000; k1++);

    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOB, ENABLE);
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_I2C1, ENABLE);

    /* Configure I2C pins: SCL and SDA */
    my_gpio.GPIO_Pin = GPIO_Pin_6 | GPIO_Pin_7; // il 6 è il piedino per il clock, il
    // 7 quello per i dati
    my_gpio.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
    my_gpio.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF_OD;
    GPIO_Init(GPIOB, &my_gpio);

    /* I2C1 Reset */
    RCC_APB1PeriphResetCmd(RCC_APB1Periph_I2C1, ENABLE);
    RCC_APB1PeriphResetCmd(RCC_APB1Periph_I2C1, DISABLE);
}

```

```

I2C_StructInit(&my_i2c);
/* I2C configuration */
my_i2c.I2C_Mode = I2C_Mode_I2C;
my_i2c.I2C_DutyCycle = I2C_DutyCycle_2;
//my_i2c.I2C_OwnAddress1 = 0;
my_i2c.I2C_Ack = I2C_Ack_Enable;
my_i2c.I2C_AcknowledgedAddress = I2C_AcknowledgedAddress_7bit;
my_i2c.I2C_ClockSpeed = 30000; //150000

/* Apply I2C configuration after enabling it */
I2C_Init(I2C1, &my_i2c);

/* I2C Peripheral Enable */
I2C_Cmd(I2C1, ENABLE);
}

```

In questo codice, inizialmente inizializziamo la struttura dati che contiene tutti i parametri di configurazione dell'interfaccia I²C1; successivamente, in accordo con i collegamenti hardware descritti nella sezione 3.2, i piedini PB8 e PB9 vengono posti in uno stato logico alto con l'istruzione *GPIO_SetBits*; in questo modo possono fornire l'alimentazione necessaria ai sensori. In seguito, è stato posto a 1 il piedino PB4 e a 0 il piedino PB5; ciò è fondamentale per il corretto indirizzamento dei sensori: infatti, il primo sensore connesso all'interfaccia avrà il proprio pin SDO connesso a PB5 (e quindi risponderà all'indirizzo 0x3C), mentre il secondo, il cui SDO sarà connesso a PB4, risponderà a 0x3A.

Per completezza, è riportato anche il codice che configura il collegamento microcontrollore - PC mediante porta USART, che riceve in ingresso i parametri già presentati nella sezione di collegamento hardware; come vediamo, i pin coinvolti sono PB9 e PB10, che, in accordo con il datasheet, hanno l'uscita Push Pull e sono configurati in modalità Alternate Function.

```

void init_USART1(void)
{
    GPIO_InitTypeDef my_gpio;
    USART_InitTypeDef my_usart;

    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_USART1, ENABLE);
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOA, ENABLE);

    my_gpio.GPIO_Pin = GPIO_Pin_9 | GPIO_Pin_10; // SPI1_SS1
    my_gpio.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF_PP;
    my_gpio.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
    GPIO_Init(GPIOA, &my_gpio);

    USART_DeInit(USART1);
    USART_StructInit(&my_usart);
    my_usart.USART_BaudRate = 115200;
    USART_Init(USART1, &my_usart);
    USART_Cmd(USART1, ENABLE);
}

```

Prima di mostrare la funzione di trasferimento dati vera e propria, è conveniente mostrare i protocolli di lettura del protocollo I²C; in questo caso, noi dobbiamo leggere i valori che ci vengono forniti di volta in volta dal sensore, per cui è valido uno schema di questo tipo, nel caso di lettura di un solo byte:

Table 14. Transfer when master is receiving (reading) one byte of data from slave

Master	ST	SAD + W		SUB		SR	SAD + R			NMAK	SP
Slave			SAK		SAK			SAK	DATA		

In questo schema, il microcontrollore, che è il master, legge i valori misurati dai sensori e che si trovano nei registri 0x08h, 0x09h, 0x0Ah, 0x0Bh, 0x0Ch, 0x0Dh; leggendo ogni coppia di questi registri, è possibile ricostruire il valore di campo magnetico letto su un asse.

Ad esempio, il registro 0x08h contiene la parte bassa del valore di campo magnetico sull'asse X, mentre 0x09h la parte alta: affiancando i due valori, si ottiene la parola da 16 bit in complemento a 2 contenente la componente X del campo magnetico misurato sul fondo scala scelto; analogamente, la componente Y si ha ricostruendo l'informazione data dai registri 0x0Ah e 0x0Bh, mentre la componente Z avrà la sua parte più significativa nel registro 0x0Dh e la meno in 0x0Ch.

Il protocollo di comunicazione per leggere un byte è il seguente: il master invia uno start bit ST, a cui segue lo slave address (l'indirizzo del dispositivo slave indirizzato) e il bit che segnala l'intenzione di fare una scrittura; il sensore risponde con un acknowledgement SAK; dopodiché il master invia allo slave l'indirizzo del registro sul quale si vuole effettuare la lettura (SUB address) e segue un SAK dello slave; a questo punto il master ripete lo start bit, e rimanda sull'I²C lo slave address con un bit che questa volta esprime la volontà di compiere una lettura. A questo punto, lo slave è a conoscenza del fatto che il microcontrollore vuole leggere il registro esplicitato nel SUB address, e quindi invia un ACK e i dati su 8 bit; volendo leggere un solo byte, il master non invierà un ACK al termine della ricezione (NMAK), bensì uno stop bit SP.

Quindi, per leggere l'informazione di una misurazione dovremmo fare 6 istruzioni consecutive di read, ognuna delle quali prenda un byte da ciascun registro. In realtà, lo standard I²C prevede un meccanismo di auto-increment, che consente di aggiornare il SUB address dopo ogni byte letto: l'istruzione di lettura rimane sostanzialmente invariata, solo che il programmatore dovrà specificare il numero di byte intenzionato a leggere; a fronte di questo dato, dopo ogni byte letto il SUB address viene incrementato di una unità. In questo modo, con una sola istruzione è possibile leggere tutti e sei i registri. A fronte di questo meccanismo, al posto di replicare 6 volte il meccanismo sopra descritto, si può utilizzare un protocollo così modificato:

Table 15. Transfer when master is receiving (reading) multiple bytes of data from slave

Master	ST	SAD+W		SUB		SR	SAD+R			MAK		MAK		NMAK	SP
Slave			SAK		SAK			SAK	DATA		DATA		DATA		

In accordo con quanto detto, dopo i primi 8 bit di dato il master invierà un MAK di avvenuta lettura, il SUB address viene incrementato e segue la lettura di altri 8 bit di dato, e così via fino all'ultima lettura alla quale seguirà lo stop bit.

Quindi, a seguito di questa premessa, risulta più chiaro il seguente codice che descrive il trasferimento dei dati dai sensori al microcontrollore tramite I²C:

```
void transfer_data(void)
{
    s16 my_int[3];
    char mystring[100];
    int i;
    static int contatore = 0;
    mystring[0]='\0';
```

```

STM32vldiscovery_LEDToggle(LED3);
/*****
    /*OPERAZIONI DI LETTURA I2C1*/
*****/
#ifdef MAGNET
for (i=0; i<3; i++)
{
    my_int[i]=0;
}
// read magnetometer X value, Y value, Z value
I2C_Read((u8 *)my_int, 0x08, LSM303D_ADD_1, 6, I2C1);
sprintf(mystring, "%d M1: %8d %8d %8d ", contatore, my_int[0]*8,
        my_int[1]*8, my_int[2]*8);

for (i=0; mystring[i]!='\0'; i++)
{
while (USART_GetFlagStatus(USART1, USART_FLAG_TXE)==RESET);
    USART_SendData(USART1, mystring[i]);
}
// read magnetometer X value, Y value, Z value
I2C_Read((u8 *)my_int, 0x08, LSM303D_ADD_2, 6, I2C1);
sprintf(mystring, "%d M2: %8d %8d %8d\n", contatore, my_int[0]*8,
        my_int[1]*8, my_int[2]*8);
for (i=0; mystring[i]!='\0'; i++)
{
while (USART_GetFlagStatus(USART1, USART_FLAG_TXE)==RESET);
    USART_SendData(USART1, mystring[i]);
}
#endif

```

Il vettore `my_int` è quello in cui memorizziamo le nostre letture, mentre `mystring` sarà la stringa che manderemo al PC tramite la porta USART; `my_int` è di tipo `signed` a 16 bit poiché i valori di campo magnetico rilevati possono essere indifferentemente positivi o negativi. Dopo le varie dichiarazioni e inizializzazioni, vediamo l'istruzione di lettura vera e propria: la `I2C_READ` riceve come parametri la struttura dati dove memorizzare i valori letti, il SUB address di partenza (in questo caso il registro `0x08` per la parte bassa del valore sull'asse X), lo slave address (`0x3Ah` oppure `0x3C`) rappresentato da una define, il numero di byte da leggere che coincide con il numero di registri dal quali prelevare l'informazione, e infine l'interfaccia da cui vogliamo l'informazione, in questo caso `I2C1`.

Il risultato verrà poi messo nella stringa `mystring`, e inviato al PC tramite la USART; in questo passaggio, si nota che il valore letto dal magnetometro su ciascun asse viene moltiplicato per 8: questo perché, da datasheet, un LSB corrisponde a una misura di 0.08 mgauss, ovvero 8 nT, unità di misura con cui verranno espressi i successivi risultati.

La funzione `transfer_data` ha anche una parte analoga per l'interfaccia `I2C2`, e ulteriore codice per l'acquisizione dei dati da accelerometro, concettualmente uguale a quella già vista, a meno del fattore moltiplicativo imposto dal fondo scala considerato.

4.6 Risultato Calibrazione

Nel capitolo 2.3 sono state analizzate due tecniche di calibrazione: la prima era basata sull'acquisizione di valori campione e, confrontando ciascun asse con gli altri, si potevano ricavare

dei valori correttivi. Tuttavia, questo primo tentativo non è andato a buon fine, poiché ripetendo una nuova misurazione in condizioni nominalmente uguali alla misurazione precedente, i valori di bias calcolati variavano anche considerevolmente. Tutto ciò avviene a causa della sensibilità dei sensori: infatti, è stato verificato che a piccole variazioni fisiche della posizioni del sensore corrispondevano variazioni non trascurabili del valore letto. Pur garantendo una buona precisione nell'effettuare le misurazioni, non è stato possibile calibrare i sensori in questo modo.

Il secondo metodo analizzato si basava sull'algorithmo dell'ellissoide: questo algoritmo, nelle sue numerose varianti tra cui l'algorithmo dell'ellissoide di Li [7], usato da noi, riceve in ingresso le misure effettuate dal singolo sensore sui 3 assi, e restituisce un set di valori correttivi, dei quali alcuni vengono usati per correggere gli errori di bias, altri per correggere i restanti contributi di errore.

Esiste un software, chiamato "Magnet.exe"(Fig. 26), che si occupa di applicare proprio questo algoritmo: in particolare, ricevuti i valori in ingresso, restituisce un vettore di 3 elementi con i valori correttivi su ciascun asse, e una matrice di 12 elementi, volta a cercare di riparare gli errori di scala, di disallineamento e di filtrare, per quanto possibile, eventuali errori dovuti alle condizioni ambientali, in particolare alla presenza di qualche oggetto estraneo alla misurazione ma influente in modo più o meno significativo [7].

Le immagini seguenti mostrano le misurazioni pre e post calibrazione: come già detto nel capitolo 2.3, se il sensore non è calibrato il disegno in 3 dimensioni di un certo numero di misurazioni a vuoto risulterà ellissoidale anziché sferico: come mostrato dalle figure successive, le correzioni effettuate rispettano queste idee, e il metodo può considerarsi soddisfacente.

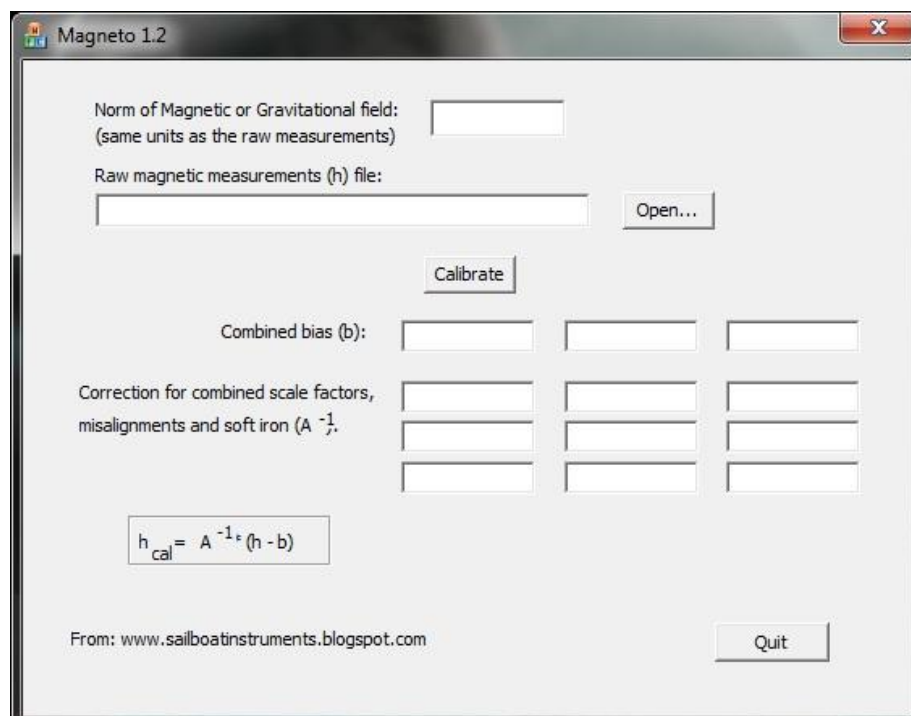


Figura 26 - Interfaccia "Magnet.exe"

In conclusione, essendo h le nostre misure, b il vettore per la correzione degli errori di bias, e A la matrice per gli altri errori, la formula per la correzione del singolo sensore è:

$$h_{cal} = A^{-1} * (h - b)$$

Per ciascun sensore sono stati seguiti i seguenti passi:

Inizialmente sono state prese 12000 misurazioni in uno spazio lontano da disturbi elettromagnetici, mantenendo fissa la posizione ma facendo ruotare il sensore in varie direzioni. Tutto ciò occupa un tempo di circa 2 minuti. Dopodiché, abbiamo plottato su Matlab questi valori, ottenendo ragionevolmente un solido molto simile a un ellissoide. Abbiamo disegnato nello stesso grafico anche una sfera di riferimento, con raggio pari al valore medio di intensità del campo magnetico rilevato (figura 27).

Servendoci di "Magneto.exe" abbiamo calcolato i 12 valori di calibrazione (figura 28), e, sempre con l'ausilio di Matlab, abbiamo modificato le misurazioni a vuoto implementando la formula correttiva vista precedentemente. Ottenuti i nuovi valori, li abbiamo ridisegnati in Matlab: se tutto è andato a buon fine, ora il solido disegnato a partire da questi valori corretti e la sfera di riferimento dovrebbero quanto più possibile coincidere, come mostrato in figura 29.

Si deve notare che nei grafici ottenuti con Matlab, le misurazioni sono state riportate a confronto con una sfera. Disegnando le misure pre-calibrazione, il raggio della sfera di riferimento è pari alla media dei raggi di ogni misurazione. Nel plottaggio delle misure post-calibrazione, il raggio della sfera di riferimento è l'intensità del campo magnetico terrestre fissato a 47000 nT.

Sempre in figura, ci sono punti più chiari e punti più scuri: i più chiari sono quelli con raggio minore della sfera di riferimento, viceversa i punti con colorazione blu scuro.

Le operazioni di calibrazione sono state ripetute nell'arco di 3 giorni diversi, in condizioni operative quanto più possibile inalterate. I valori di calibrazione ottenuti per ciascun sensore sono stati molto simili, anche a distanza di giorni.

Sono riportati i risultati di uno qualsiasi dei 4 sensori sottoposti all'intervento di calibrazione: i risultati sono tutti graficamente simili tra loro, nonostante i diversi valori di calibrazione.

Plottaggio PRE - CALIBRAZIONE

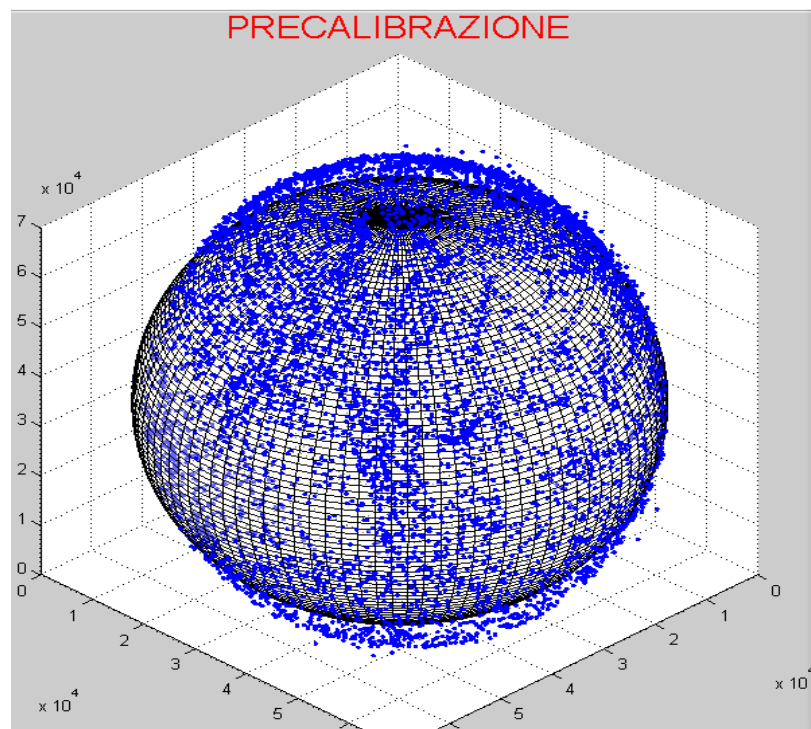


Figura 27 - Distribuzione campioni pre calibrazione

Valori di Calibrazione

Magneto 1.2

Norm of Magnetic or Gravitational field:
(same units as the raw measurements)

Raw magnetic measurements (h) file:

Combined bias (b):

Correction for combined scale factors, misalignments and soft iron (A^{-1}):

<input type="text" value="1.299904"/>	<input type="text" value="-0.010883"/>	<input type="text" value="-0.002127"/>
<input type="text" value="-0.010883"/>	<input type="text" value="1.299032"/>	<input type="text" value="0.006147"/>
<input type="text" value="-0.002127"/>	<input type="text" value="0.006147"/>	<input type="text" value="1.108466"/>

$$h_{cal} = A^{-1} \cdot (h - b)$$

Combined scale factors, misalignments and soft iron (A):

<input type="text" value="0.769344"/>	<input type="text" value="0.006439"/>	<input type="text" value="0.001441"/>
<input type="text" value="0.006439"/>	<input type="text" value="0.769878"/>	<input type="text" value="-0.004257"/>
<input type="text" value="0.001441"/>	<input type="text" value="-0.004257"/>	<input type="text" value="0.902174"/>

From: www.sailboatinstruments.blogspot.com

Figura 28 - Funzionamento "Magneto.exe"

Plottaggio POST - CALIBRAZIONE

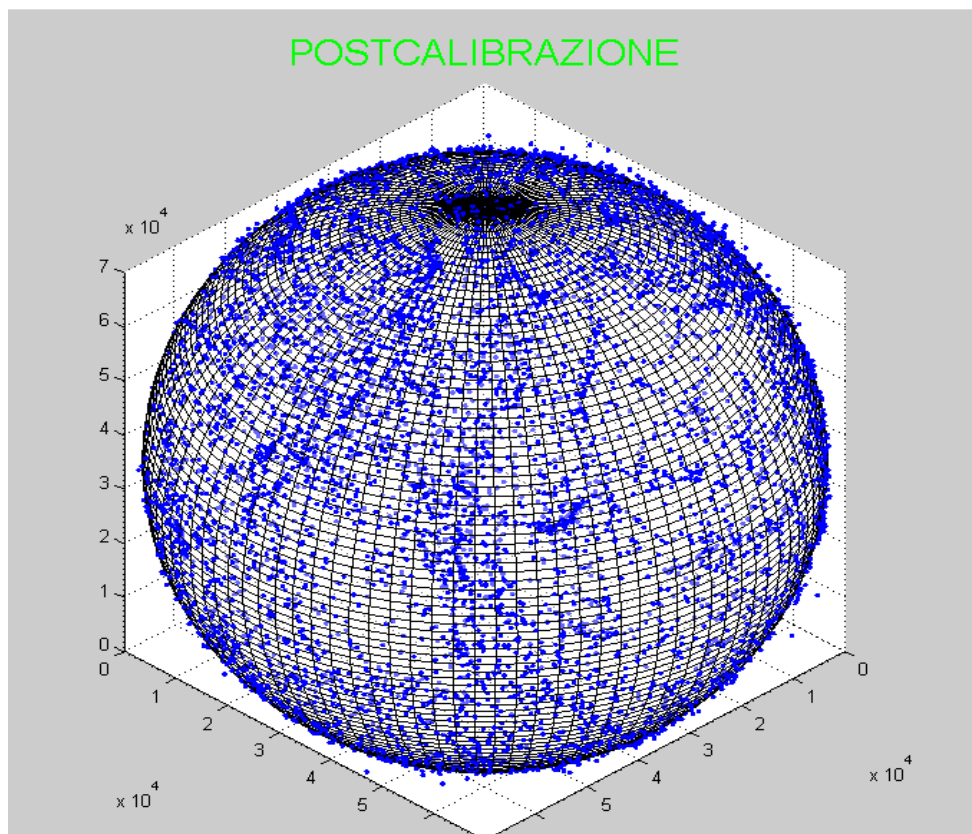


Figura 29 - Distribuzione campioni postcalibrazione

Confronto tra i diversi vettori di Bias dei 4 sensori

	X	Y	Z
Sensore 1	541.939306	-1254.555030	-2516.492847
Sensore 2	-400.788406	-1197.978755	-1355.240257
Sensore 3	82.957111	-228.885240	-1737.720371
Sensore 4	-21.858778	1761.660885	287.108173

Confronto le diverse matrici A dei 4 sensori

1.136035	-0.009181	-0.000519
-0.009181	1.152451	0.025753
-0.000519	0.025753	1.188879

Sensore 1

1.133206	-0.013114	0.003843
-0.013114	1.124497	0.026063
0.003843	0.026063	1.170941

Sensore 2

1.109726	-0.012046	0.006649
-0.012046	1.129565	0.024946
0.006649	0.024946	1.128310

Sensore 3

1.122041	-0.019593	0.004165
-0.019593	1.112173	0.025286
0.004165	0.025286	1.184625

Sensore 4

5: Elaborazione dei dati grezzi e risultati

Le misurazioni preliminari sono state effettuate facendo misure a singolo punto e di gradiente, allineando due sensori a una certa distanza.

L'acquisizione tramite i 4 sensori avviene mediante un software che preleva i dati direttamente dalla porta seriale, e li mette in appositi file in formato testuale; ragionevolmente, si avrà un file per ogni posizione angolare e per ogni altezza. Il codice può essere realizzato in C e in Matlab; questa seconda soluzione risulterà più semplice, e sarà quindi quella qui presentata:

```
numeroFile = input ('Quanti file vuoi fare? ');
numeroElem = input ('Quante misurazioni per file devo acquisire? ');
numeroElem = numeroElem*2;
serialPort = input ('A quale porta seriale sei connesso? (es. COM13) ', 's');
nomeStartA = 'MEAS_00';
nomeStartB = 'MEAS_0';

s = serial(serialPort);
set(s, 'BaudRate', 230400, 'Databits', 8, 'Parity', 'none', 'StopBits', 1,
'FlowControl', 'none');
fopen(s);

for i=1:20 %prime 20 misurazioni a vuoto
    string = fscanf(s);
end

for i=1:numeroFile
    %Calcolo nome file
    num=i-1;
    if i<=10
        nomeEff = strcat(nomeStartA, num2str(num), '.txt');
    else
        nomeEff = strcat (nomeStartB, num2str(num), '.txt');
    end
    fp = fopen (nomeEff, 'w');
    for j=1:numeroElem
        string=fscanf(s);
        fprintf(fp, string);
    end
    fclose (fp);
    fprintf ('File %d acquisito. Premere un tasto per continuare\n', i);
    pause;
end

fprintf('Fine\n');
fclose(s);
```

Come si vede all'inizio di questo primo estratto, viene data all'utente la possibilità di scegliere il numero di file da creare, e quante misurazioni per file prendere; viene scelta la porta seriale, inizializzata con il comando 'serial' e aperta con 'fopen' e vengono settati i parametri di comunicazione; in particolare, i dati sono trasferiti alla velocità di 230400 baud. Successivamente,

vengono presi i valori di campo magnetico con 'fscan()' e scritti su file con 'fprintf()'; si avrà un file diverso per ogni magnetometro, così ad ogni iterazione è necessario calcolare il nome del nuovo file.

I dati così acquisiti e posizionati nei rispettivi file vengono quindi processati da un secondo script Matlab; esso prende tutti i valori presenti in ciascun file, ad altezza e posizione angolare fissata, ne fa la media, e li mette in un altro file, quello su cui effettivamente lavoreremo. Inoltre, a scopo puramente statistico, vengono scritti anche i valori di deviazione standard e precisione della misurazione, ovvero di quanto ogni misura si scosta dalla media delle precedenti.

Il frammento di codice sottostante realizza quanto precedentemente spiegato.

```
M = M';
X = M (:, 1);
Y = M (:, 2);
Z = M (:, 3);

%Calcolo delle medie di X, Y, Z
mx = mean (X);
my = mean (Y);
mz = mean (Z);

%Calcolo delle deviazioni standard di X, Y, Z
devX = std (X);
devY = std (Y);
devZ = std (Z);

%Calcolo dell'errore standard
errX = devX / sqrt (i);
errY = devY / sqrt (i);
errZ = devZ / sqrt (i);
```

I grafici nelle figure 31 e 32 presentano il risultato della prova sperimentale, descrivendo il luogo dei punti di misura a cui è stata data una colorazione dipendente dal valore del modulo del campo magnetico misurato localmente.

Con questa tecnica possiamo facilmente vedere le zone della carota in cui il campo magnetico è più intenso, correlate alla vicinanza al chiodo; per avere una panoramica più completa, abbiamo disegnato le mappe delle tre componenti (radiale, verticale, tangenziale) oltre che del modulo. Inoltre, sfruttando la funzione quiver, è stato possibile disegnare i vettori associati alle misurazioni, che simulano bene le linee di campo magnetico; in particolare, questo è stato utile per verificare come un chiodo magnetizzato per induzione, in posizione obliqua, vada a influenzare il normale andamento delle linee di campo magnetico terrestre.

Ogni mappa e ogni grafico delle linee di campo è stato replicato per ciascun sensore del sistema, e anche per il gradiente derivato da due misure allineate radialmente: infatti, la differenza di valori tra un sensore più vicino all'oggetto misurato e uno più lontano ci dà una informazione molto significativa. Inoltre, per tutte, è stata rimossa la componente continua, per visualizzare solo le variazioni di campo più interessanti.

Per una rappresentazione vettoriale del campo magnetico è stata usata la funzione `quiver`, che come ingressi richiedeva le coordinate del punto di applicazione dei vettori da disegnare e il valore delle loro componenti per sapere quanto farli lunghi: il problema è stato quello che il sistema di riferimento del cilindro non coincideva con quello dei magnetometri, e questa è una conseguenza della rotazione. Quindi, prima di passare alla funzione i valori sui 3 assi, è necessaria una rotazione per rendere quelle componenti compatibili con il sistema di riferimento del cilindro. L'applicazione di quanto descritto è nel codice sottostante:

```
%Rotazione di assi per quiver
uq= v.*sin(thetaq) - w.*cos(thetaq);
vq=-v.*cos(thetaq) - w.*sin(thetaq);
wq=-u;
%uq = componente radiale
%vq = componente tangenziale
%wq = componente verticale
um= mean(uq);
vm= mean (vq);
wm = mean (wq);

figure('Name', 'Componenti quiver')
hold on
grid on
quiver3 (x(1), y(1), z(1), 0, 0, z(ndscan*hscan)-z(1), 'k')
hold on
grid on
quiver3 (x, y, z, uq-um, vq-vm, wq-wm, scalaq) %Rimuovo la componente
                                                continua

title(['Componenti per sensore ', num2str(i)])
axis equal
axis square
```

Il codice sottostante mostra le principali funzioni precedentemente introdotte, che rendono possibile la presentazione grafica dei risultati; ogni funzione richiede un particolare formato dei dati in ingresso, e per questo sono utilizzate alcune funzioni quali `'reshape'` e `'repmat'`.

```
cucu = repmat(x0, hscan, 1);      cucu(:,nth+1)=cucu(:,1);
cucv = repmat(y0, hscan, 1);      cucv(:,nth+1)=cucv(:,1);
cucz = repmat(z0', 1, nth);       cucz(:,nth+1)=cucz(:,1);
modm = reshape(m3d',nth,hscan)'; modm(:, nth+1) = modm(:, 1);
% la reshape incolonna la riga, per cui devo avere un vettore riga
u=u1;
v=v1;
w=w1;
uMap = reshape (w', nth, hscan)'; uMap(:, nth+1) = uMap(:, 1);
% componente radiale per la mappa
vMap = reshape (v', nth, hscan)'; vMap(:, nth+1) = vMap(:, 1);
% componente tangenziale per la mappa
wMap = reshape (u', nth, hscan)'; wMap(:, nth+1) = wMap(:, 1);
% componente verticale per la mappa
figure('Name', 'Modulo')
hold on
grid on
plot3(x(1),y(1),z(1), 'ro', 'Linewidth', 4)
surf (cucu, cucv, cucz, modm, 'FaceColor','interp', 'EdgeColor','none',
'FaceLighting', 'phong');
axis equal
axis square
title(['Modulo per sensore ', num2str(i)])
```


Le figure 31, 32, 33 presentano in forma grafica i risultati ottenuti: il punto rosso simboleggia il punto di partenza delle misure, che coincide con la posizione indicativa della testa del chiodo. Nella figura 32, che rappresenta la componente verticale del sensore più lontano, probabilmente, le macchie rosse e blu rappresentano i due estremi del chiodo, polarizzati inversamente. Nella figura 31 si ha la mappa del modulo del gradiente: serviranno analisi più approfondite, ma le dimensioni e la forma della macchia di colori caldi può rappresentare l'oggetto metallico con una buona approssimazione.

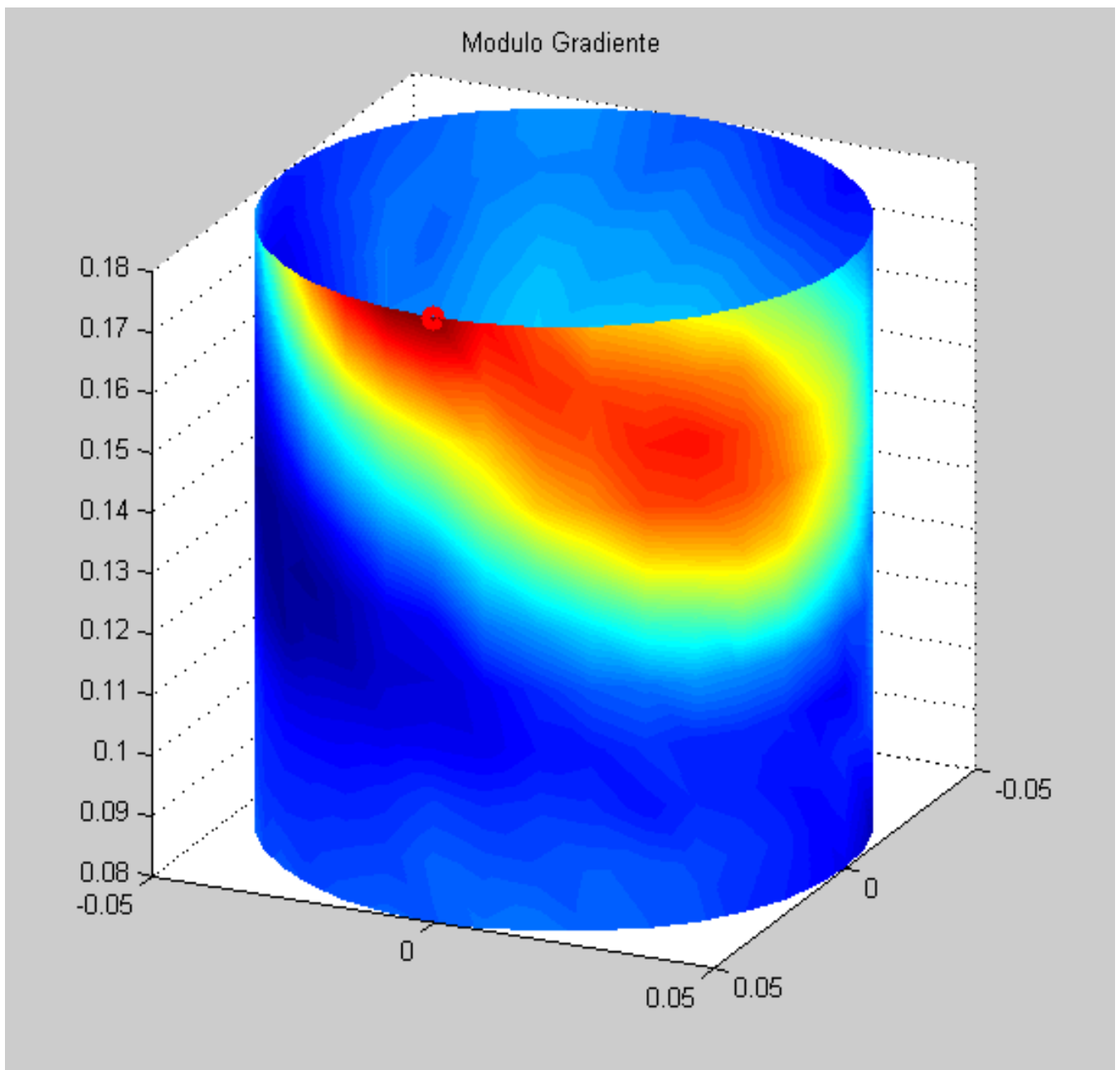


Figura 31 - Modulo del gradiente

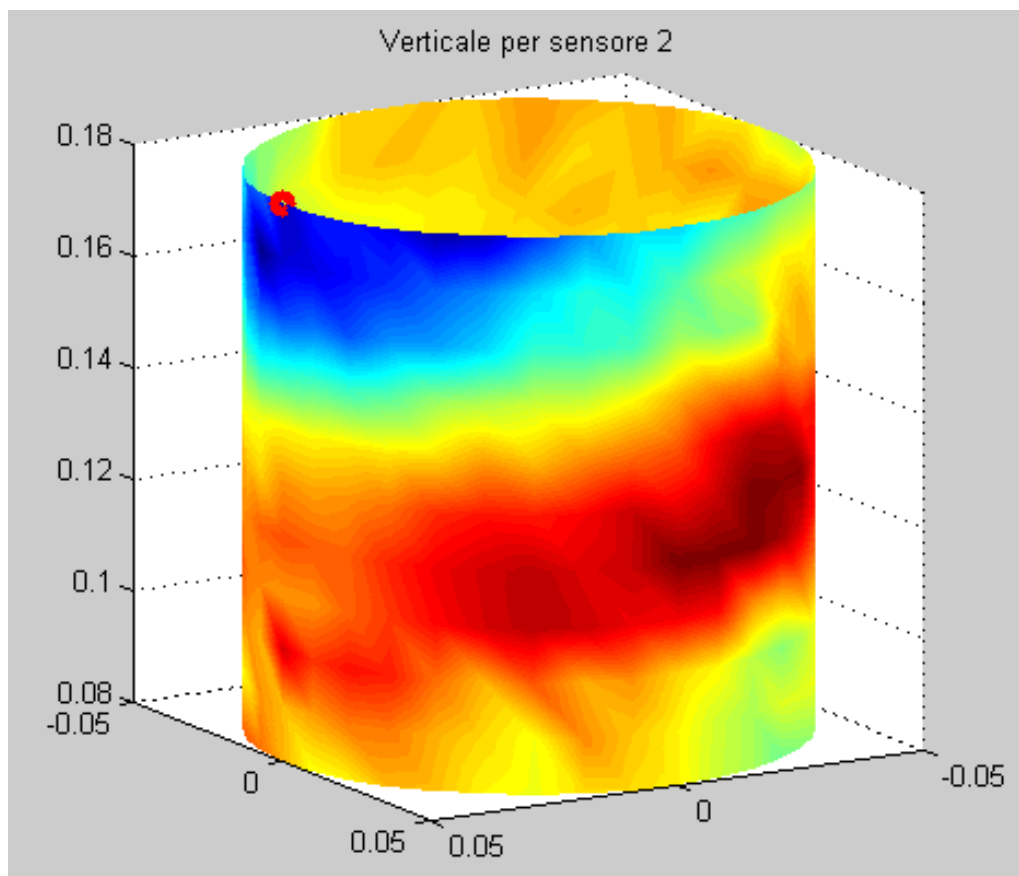


Figura 32 -Mappa componente verticale

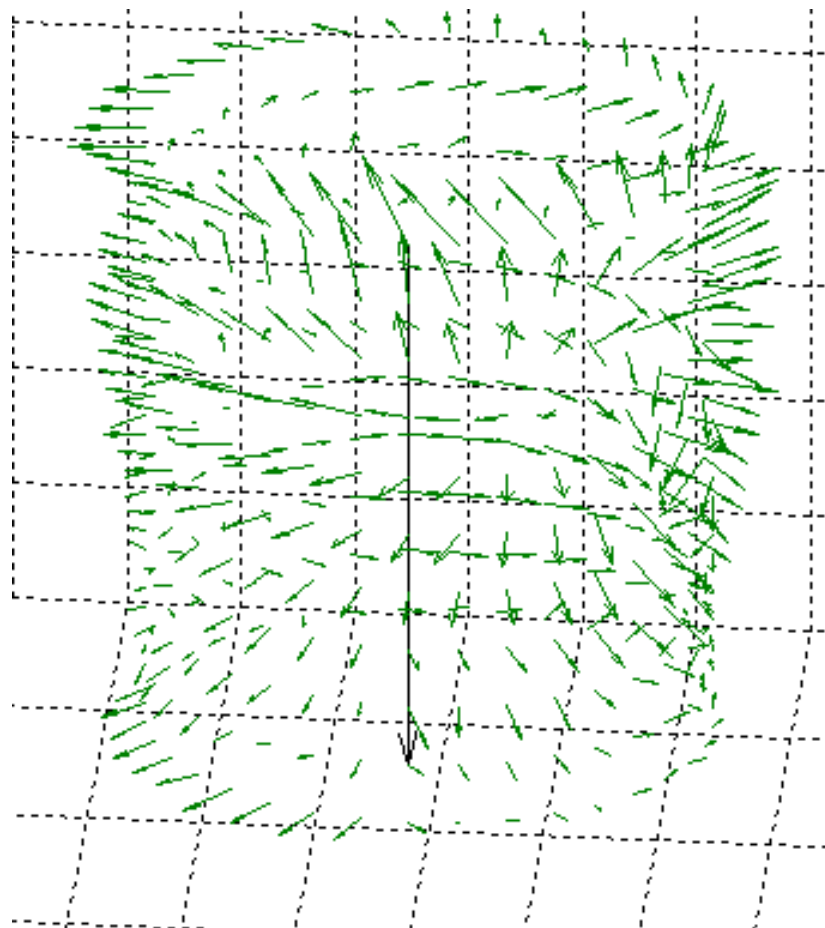


Figura 33 - Distorsione linee di campo (modulo)

6 - Conclusioni

Il sistema realizzato comprende una scheda a microcontrollore, che riceve i dati da quattro sensori MEMS e li manda al PC per l'elaborazione; i sensori sono montati su una struttura che consente rotazioni attorno a un manufatto; le misurazioni vengono quindi elaborate al fine di ottenere informazioni sul campo magnetico circostante; sulla base della distorsione del campo esterno, si possono fare ipotesi sulla presenza e sulla posizioni di oggetti metallici interni al manufatti.

I risultati ottenuti dimostrano la possibilità di usare questo tipo di approccio per lo studio della struttura interna di manufatti.

Il sistema sul quale si è lavorato è naturalmente solo una versione preliminare del progetto completo, poiché gli aspetti da migliorare sono ancora tanti; innanzitutto, i lavori futuri di maggiore priorità sono quelli che riguardano l'interpretazione esatta dei dati ottenuti. Inoltre, sarebbe conveniente estendere il software di presentazione dati in modo da visualizzare una figura di riferimento più complessa di una carota in cemento, la quale è approssimabile a un solido ideale, cosa che non avviene se il nostro oggetto da misurare è, ad esempio, una statua: dovremmo infatti suddividere ciascuna parte in qualcosa approssimabile a un cilindro, e unire i risultati ottenuti.

Infine, sarebbe conveniente un sistema per consentire le misurazioni anche in un ambiente turbato da disturbi magnetici, quale può essere una qualsiasi stanza di un museo. I miglioramenti futuri vano dunque in questa direzione e, una volta attuati, permetteranno di avere un sistema completo che identifichi perfettamente la presenza di componenti metallici; un'idea può essere quella di utilizzare algoritmi genetici per ridurre l'errore e permettere una localizzazione più precisa degli eventuali oggetti metallici individuati.

Oltre agli scopi precedentemente descritti, questo sistema rappresenterebbe un ulteriore tassello nel campo delle tecniche non distruttive, e i suoi sviluppi futuri possono abbracciare le aree più disparate, dalla geofisica alla conservazione dei beni culturali.

Il lavoro descritto in questa monografia ha permesso di esplorare vari campi dell'ingegneria dell'informazione, spaziando dall'elettronica fino alla programmazione, toccando il mondo dei microcontrollori e della sensoristica; inoltre, sono stati approfonditi i campi della geofisica e del magnetismo, che mostrano la multidisciplinarietà del progetto.

Capitolo 7 - Bibliografia

- [1] La tomografia ad ultrasuoni per lo studio diagnostico dei beni culturali
<http://www.ndt.net/article/aipnd2011/files/IDN9-capizzi.pdf>

- [2] Tomografia computerizzata a raggi X:
<http://aperto.unito.it/handle/2318/124833?mode=full#.VBL9kWOgbKQ>

- [3] A Preliminary Test On The Feasibility Of Locating An Iron Restoration Pin In A Statue By Measuring The Tmf Anomaly With A Triaxial Mems Magnetometer di *L. Sambuelli, S. Gallinaro, M. Grosso*
<http://www2.ogs.trieste.it/gngts/gngts/convegniprecedenti/2013/Presentazioni/3.2/Sambuelli.pdf>

- [4] Ottimizzazione della geometria e delle prestazioni di magnetometri mems tramite innovative tecniche di pilotaggio della corrente
<https://www.politesi.polimi.it/>

- [5] Metodo dell'ellissoide:
http://en.wikipedia.org/wiki/Ellipsoid_method

- [6] Elettronica Open-Source:
<http://it.emcelettronica.com/comunicazione-seriale-i2c-o-spi-quale-usare>

- [7] Sainboalts Instruments
<http://sailboatinstruments.blogspot.it/2011/09/improved-magnetometer-calibration-part.html>