## Stima dell’orientamento di un dispositivo

(Fonte: materiale Professore)

L’orientamento di un corpo rigido può essere definito sia nello spazio tridimensionale, ovvero in , che su un piano bidimensionale, ovvero in .

Due corpi possono condividere la *stessa posizione ma differire nell’orientamento*; pertanto, è fondamentale comprendere come valutare l’orientamento di un corpo per determinarne lo *stato*.

### Stima dell’orientamento

Per stimare l’orientamento di un corpo sul piano, è richiesta una variabile reale .

Per stimare l’orientamento di un corpo nello spazio, invece, sono necessarie tre variabili a valori reali .

Ci concentreremo, nel seguito, sull’orientamento in

In particolare, è possibile raggiungere qualsiasi orientamento target partendo da un orientamento di riferimento noto, mediante l’applicazione di una sequenza specifica di rotazioni, le cui grandezze sono gli angoli di rotazione dell’orientamento del target.

*3 angoli opportunamente scelti definiscono in modo inequivocabile l’atteggiamento di un corpo, ma dato un corpo, ci sono diversi gruppi di 3 angoli (opportunamente scelti) che ne definiscono l’orientamento*.

### Orientamento di un corpo

Da un punto di vista generale, definire l’orientamento di un corpo implica stabilire l’orientamento di un sistema di riferimento attaccato al corpo {O’, x’, y’, z’} in relazione a un sistema di riferimento di interesse {O, x, y, z}

Da un punto di vista formale, ci sono tre modi principali per definire l’orientamento di un corpo:

* Matrici di rotazione
* Angoli di Eulero
* Quaternioni

Scegliere il formalismo appropriato rappresenta uno dei task principali in un sistema di posizionamento.

#### Matrici di rotazione

Le matrici rotazionali, spesso denominate *matrici direzione coseno* (DCMs), descrivono come un sistema di riferimento attaccato al corpo è orientato rispetto a un altro sistema di riferimento di interesse, in o in .

Funzionamento in

Consideriamo due sistemi di riferimento , entrambi centrati nello stesso punto, ma con il secondo ruotato di un angolo rispetto al primo.

Sia P un punto espresso come in riferimento ad A e come in riferimento a B.

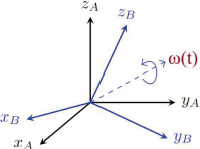
Il punto P2 può essere referenziato rispetto al sistema di riferimento A:

|  |  |
| --- | --- |
| Ovvero: |  |
|  |
| In forma matriciale: |
|  |
| Matrice di rotazione: |
| (ruota un punto in B in un punto in A) |
| Proprietà di : |
| 1. , cioè è una *matrice ortogonale* | |
|  | |
|  | |
| 1. Le colonne di sono i versori che definiscono una base per B, espressa nel sistema di riferimento A. In altre parole, è una matrice di cambiamento di base, da B ad A. | |
|  | |

Funzionamento in

Una matrice di rotazione è tale che , dove è il particolare gruppo ortogonale di matrici reali in , cioè:

Proprietà:

1. Ogni matrice è una **matrice dei coseni direttori** (vedi più avanti)
2. A causa del vincolo , nonostante R abbia voci, solo parametri liberi sono ammessi; le voci sono funzioni di tali parametri liberi. In particolare:
3. , dove è tale che , cioè è una *matrice antisimmetrica* (vedi dopo).
4. , dove è una funzione tempo – variante. Inoltre, se è una rotazione tempo – variante con **velocità costante**, allora:
5. Considerando due sistemi di riferimento: A fisso e B che ruota intorno ad A con velocità , dove:
   1. è l’asse di rotazione
   2. è la velocità di rotazione attorno a ω(t)
   3. e definiscono in A e in B rispettivamente

Allora, saranno soddisfatte le seguenti relazioni:

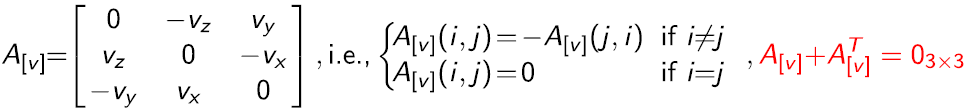
|  |  |
| --- | --- |
| Immagine che contiene Carattere, testo, calligrafia, bianco  Descrizione generata automaticamente | Immagine che contiene Carattere, testo, linea, calligrafia  Descrizione generata automaticamente |

Ricorda queste ultime formule perché serviranno nello studio dei quaternioni in relazione alla velocità angolare.

L’operatore antisimmetrico

Analizziamo il caso di

Sia , allora l’operatore antisimmetrico è , definito come:



L’operatore antisimmetrico rappresenta un prodotto incrociato:



Rotazione e traslazione

Consideriamo due sistemi di riferimento:

* A =
* B =

In cui è rappresentato dal vettore nel sistema di riferimento A.

Un punto in A si indica con:

Oppure, in forma matriciale:

è una **matrice di trasformazione** e

Matrice dei coseni direttori

(Fonte: D. Titterton, J. Weston, Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Peregrinus Ltd, 1997) (*Ho praticamente copiato il paragrafo dal libro*)

Un generico vettore V, riferito ad una terna cartesiana (a) di assi x, y, z, può essere definito come la somma di tre vettori:

dove ciascuno dei termini rappresenta il vettore ottenuto proiettando sugli assi della terna (a) di versori i, j, k.

Lo stesso vettore, riferito ad una seconda terna (b) avente la stessa origine e di assi x', y', z', può essere rappresentato in modo analogo dall'espressione:

dove ciascuno dei tre termini può essere ottenuto proiettando rispettivamente sugli assi x', y', z' della terna (b) di versori i', j', k'.

Si ha pertanto:

dove, per esempio, rappresenta il coseno dell'angolo che l'asse x' della terna (b) forma con l'asse y della terna (a) ed è indicato come **coseno direttore**.

Si può anche scrivere:

o, più sinteticamente:

dove è la matrice dei cosenti direttori che ci permette di passare dalla terna (a) alla terna (b):

L'elemento della matrice rappresenta, quindi, il coseno che l'asse i della terna (b) forma con l'asse j della terna (a).

Il passaggio da una terna all'altra può avvenire anche attraverso una o più terne intermedie come, ad esempio:

Il prodotto delle matrici non è commutativo, pertanto:

Se le due terne sono ortogonali, l'inversa della matrice è uguale alla sua trasposta e si ha:

avendo indicato con l'apice T la trasposta.

La stessa matrice può anche essere ottenuta tenendo presente che è possibile passare dalla terna (a) alla terna (b) mediante tre successive rotazioni rispetto a ciascun asse.

Per esempio, la rotazione intorno all’asse z di un angolo , indicata con , lascia invariata la direzione dell’asse z mentre gli assi x, y (e quindi i versori i, j) ruotano di un angolo . Si ha, per la relazione , che:

O più sinteticamente

Pertanto:

Analogamente, una rotazione di un angolo intorno all’asse x ed una rotazione di un angolo intorno all’asse y si possono rappresentare rispettivamente con le matrici:

Gli angoli vengono detti **angoli di Eulero**.

La matrice dei coseni direttori può ricavarsi effettuando il prodotto delle tre matrici ora definite nell’ipotesi di conoscere gli angoli di rotazione e la successione di essi in quanto il prodotto delle matrici non è commutativo.

(Fine matrice dei coseni direttori – libro “Navigazione inerziale e integrata”)

#### Angoli di Eulero

Immaginiamo di prendere il frame (= sistema di riferimento) A in mano e di ruotarlo finché non appare proprio come il frame B. Il **teorema di rotazione** **di Eulero** afferma che qualsiasi rotazione può essere considerata come una sequenza di rotazioni attorno a diversi assi di coordinate.

Teorema di rotazione di Eulero

Due sistemi di coordinate ortonormali indipendenti possono essere collegati da una sequenza di rotazioni (non più di tre) attorno agli assi di coordinate, dove non ci possono essere due rotazioni successive attorno allo stesso asse.

Rotazioni elementari (standard)

Una rotazione elementare è una rotazione intorno ad un asse (x, y o z) che coinvolge solo un angolo, cioè l’angolo di rotazione attorno all’asse scelto.

* Rotazione attorno all’asse x (primo asse):
* Rotazione attorno all’asse y (secondo asse):
* Rotazione attorno all’asse z (terzo asse):

Una generica matrice di rotazione può essere ottenuta componendo un'opportuna sequenza di tre rotazioni elementari, garantendo che non vengano effettuate due rotazioni successive attorno ad assi paralleli.

La rotazione finale dipende dall'ordine in cui vengono applicate le rotazioni.

Si noti che le rotazioni non sono commutative in : ruotando attorno a X di e poi attorno ad Y di porta ad un risultato diverso rispetto ad una rotazione attorno all’asse Y di e poi attorno all’asse X di .

Esistono due classi di sequenze di rotazione: le *rotazioni di Eulero* e le *rotazioni di Cardano*.

Rotazioni di Eulero

Implicano la ripetizione, ma non successiva, di rotazioni attorno ad un asse particolare.

Sei triplette di angoli: *XYX, XZX, YXY, YZY, ZXZ, ZYZ*

Rotazioni di Cardano

Sono caratterizzati da rotazioni attorno a tutti e tre gli assi.

Sei triplette di angoli: *XYZ, XZY, YZX, YXZ, ZXY, ZYX*

Nell'uso comune tutte queste sequenze sono chiamate **Angoli di Eulero** e, attenzione, ce ne sono un totale di 12 tra cui scegliere.

Rotazioni Estrinseche ed Intrinseche

Dato l'insieme delle rotazioni elementari da compiere, come devono essere composte queste rotazioni per ottenere la matrice di rotazione completa?

La domanda che sorge è se la seconda, la terza, … rotazioni si riferiscono tutte al nostro sistema di coordinate globale (estrinseco) o all'ultimo sistema di coordinate ruotato (intrinseco).

Esistono due modi possibili per ruotare:

1. Rotazioni intrinseche: le tre rotazioni elementari sono gli assi del sistema di coordinate rotante solidale con il corpo in movimento, che cambia la sua orientazione dopo ogni rotazione elementare.
2. Rotazioni estrinseche: le tre rotazioni elementari riguardano gli assi xyz del sistema di coordinate originale, che si assume rimanga immobile.

Si può dimostrare che *eseguire una sequenza di tre rotazioni intrinseche equivale ad eseguire la sequenza INVERSA di rotazioni estrinseche*.

COME SUGGERIMENTO PRINCIPALE: NON PENSARE AI SISTEMI DI RIFERIMENTO ROTANTI MA PENSARE A COME RUOTANO I VETTORI.

In altre parole, se si ha un vettore ed espresso nel sistema di riferimento che si vuole esprimere in passando attraverso la sequenza di rotazioni (solitamente rotazioni standard) e quindi

Ne segue che, indipendentemente dalle rotazioni estrinseche ed intrinseche,

Roll – Pitch – Yaw

Roll-Pitch-Yaw sono probabilmente le triplette di angoli di Eulero più famose.

Intrinseche:

1. Rotazione intorno a x di *roll*
2. Rotazione attorno a y’ di *pitch*
3. Rotazione attorno a z’’ di *yaw*

Estrinseche:

1. Rotazione attorno a z di *yaw*
2. Rotazione attorno a y di *pitch*
3. Rotazione attorno a x di *roll*

Questa matrice va dal frame fisso a quello rotante.

Per ottenere *r, p, y* da *R*, ci sono due possibili soluzioni:

|  |  |
| --- | --- |
| In questo caso | In questo caso |

Blocco cardanico

Un problema fondamentale con le rappresentazioni a tre angoli sono le **singolarità**.

Una singolarità si verifica quando l’asse di rotazione del temine medio della sequenza diventa parallelo all’asse di rotazione del primo o del terzo termine.

La singolarità più famosa negli angoli di Eulero è il blocco cardanico. Il blocco del giunto cardanico è la perdita di un grado di libertà in un meccanismo tridimensionale a tre giunti cardanici che si verifica quando gli assi di due dei tre giunti cardanici vengono guidati in una configurazione parallela, bloccando il sistema in rotazione in uno spazio bidimensionale degenerato.

Si consideri la situazione in cui l'angolo di rotazione dell’asse centrale è di 90 gradi; allora gli assi interno ed esterno sono allineati e condividono lo stesso asse di rotazione. Invece dei tre assi di rotazione originali, poiché due sono paralleli, ora ci sono solo due assi di rotazione effettivi. Un grado di libertà è andato perduto!

Da un punto di vista matematico, nel caso di RPY, il blocco cardanico avviene quando

Il che significa che cambiando *roll* o *yaw* si ottiene una rotazione lungo lo stesso asse. Abbiamo 3 angoli ma solo due gradi di libertà.

Le singolarità non possono essere evitate. Il meglio che si possa sperare è che la singolarità si verifichi per un orientamento che non si verifica durante il normale funzionamento del veicolo. Le singolarità sono una conseguenza dell'uso di una rappresentazione minima. Per eliminare questo problema, è necessario adottare una diversa rappresentazione dell'orientamento. Per questo motivo studieremo i QUATERNIONI.

Derivata temporale di RPY

L'obiettivo è ottenere la derivata temporale degli angoli r, p e y rispetto alla velocità di rotazione nel sistema di riferimento rotante.

Considerando e guardando l’ordine delle matrici

1. La prima matrice esprime una rotazione attorno a z di un angolo y con una velocità . La velocità di rotazione è e nel sistema rotante si esprime come:
2. La seconda matrice esprima una rotazione attorno a y di un angolo p con una velocità . La velocità di rotazione è e nel sistema rotante si esprime come:
3. La seconda matrice esprima una rotazione attorno a x di un angolo r con una velocità . La velocità di rotazione è e nel sistema rotante si esprime come:

La velocità complessiva del sistema rotante sarà quindi:

Che può essere scritta come:

**Equazioni di giunto cardanico:**

RPY da accelerometro e magnetometro

Ricaviamo roll e pitch da accelerometro, mentre yaw dal magnetometro.

Consideriamo che:

1. gli assi dei sensori siano allineati
2. il sistema di riferimento *xyz* sia centrato su tali assi (sistema di riferimento del sensore)
3. il sistema di riferimento globale sia l’ENU (si veda più avanti)

Descrivendo l’orientamento del sensore rispetto all’ENU mediante:

Roll e pitch (assumendo ) si ottengono come segue:

Dove  sono i dati estratti dall’acceletometro

Sia il campo magnetico di riferimento, nel sistema di riferimento ENU, nella posizione di interesse, e il campo magnetico misurato nel sistema di riferimento del sensore. Siano rispettivamente . Yaw si ottiene come segue:

Dove:

Nota principale: le equazioni che forniscono *rpy* a partire dall'accelerometro e dal magnetometro possono essere utilizzate come equazioni di output in un processo di fusione dei sensori in cui le equazioni di giunto cardanico vengono utilizzate per il modello.

### Quaternioni

Sono vettori di quattro dimensioni, cioè .

Un quaternione è un numero ipercomplesso, che è un concetto matematico che estende l’idea di numero complesso a quattro dimensioni. Si rappresenta come:

Dove:

* è la parte scalare reale.
* è la parte immaginaria rispettivamente lungo le unità immaginarie *i, j,* e *k*.

I vettori base soddisfano le seguenti relazioni:

( 1. )

I quaternioni offrono un modo compatto ed efficiente per rappresentare rotazioni in , evitando alcuni inconvenienti associati agli angoli di Eulero.

Operazioni con i quaternioni

Siano , , allora:

* *SOMMA*:
* *NORMA*:
* *CONIUGATO*:
* *PRODOTTO*: , che si può scrivere sotto forma di matrice come:

Dove l’operatore antisimmetrico è

(Fonte del pezzo seguente: D. Titterton, J. Weston, Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Peregrinus Ltd, 1997, paragrafo 3,6)

Due quaternioni sono uguali soltanto se tutti i loro componenti sono uguali; la somma (o la differenza) di due quaternioni si esegue come se questi fossero due polinomi, sommando (o sottraendo) i termini simili. Analogamente il prodotto di due quaternioni si esegue come un ordinario prodotto di polinomi tenendo presente la relazione (1.1). Il prodotto tra quaternioni non è commutativo

Alcune proprietà e definizioni

Siano , allora:

* Dato un vettore , il quaternione associato è , cioè un quaternione con e
* Considerando un terzo quaternione ,

Quaternioni come rotazioni

Consideriamo il sottoinsieme dei **quaternioni unitari** .

Tutti i quaternioni in possono essere scritti come:

Dati e , cos’è ?

Svolgendo alcuni calcoli otteniamo che:

Immagine che contiene testo, Carattere, schermata, linea

Descrizione generata automaticamente

Analizzando separatamente le due parti ricaviamo che:

Ancora non sappiamo classificare ma vedrai subito dopo che rappresenta la rotazione del vettore attorno ad un determinato asse.

Punto di vista geometrico

Consideriamo un piano ortogonale ad e passante attraverso .

Immagine che contiene triangolo, linea

Descrizione generata automaticamenteIl vettore che è diretto lungo e tocca il piano è la **proiezione** di su . Considerando il triangolo rettangolo verde e :

E quindi il vettore diretto lungo e che tocca il piano è:

Consideriamo ora il vettore :

Immagine che contiene triangolo, linea

Descrizione generata automaticamente

Immagine che contiene linea, triangolo

Descrizione generata automaticamenteE il vettore tale che e :

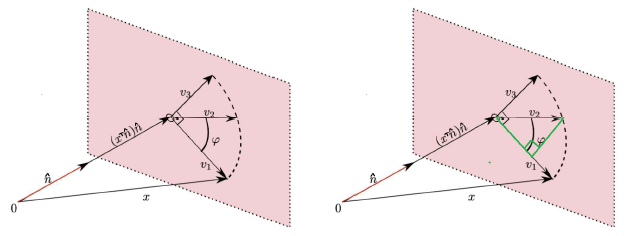
e

Così come è sul piano ortogonale ad :

Dato che è ortogonale ad per definizione.

**I vettori e sono una base per il piano ortogonale a .**

Consideriamo ora il vettore , corrispondente al vettore ruotato di un angolo intorno a :



Dove:

* è la componente di parallela a
* è la componente di ortogonale a , cioè la componente parallela a

,

Immagine che contiene linea, diagramma, triangolo

Descrizione generata automaticamenteConsideriamo ora il vettore , ovvero il vettore ruotato di un angolo attorno all’asse .

Sviluppando i calcoli, risulta che:

ovvero la parte immaginaria di è la versione ruotata di attorno all’asse di un angolo .

Quindi, **un quaternione unitario rappresenta una rotazione**

Rotazioni di interesse

1. Rotazione nulla:

se allora il quaternione unitario è e quindi:

è il quaternione nullo in termini di rotazioni

1. Rotazione inversa:

partendo da e moltiplicando per e per entrambi i membri ottengo, dopo una serie di passaggi, che:

Quaternioni e velocità angolare

Consideriamo due sistemi di riferimento: A fisso e B che ruota rispetto ad A con velocità , dove:

* è l’asse di rotazione
* è la velocità di rotazione attorno a
* e definiscono in A e in B rispettivamente

Sia un vettore e la rappresentazione di questo vettore rispettivamente in A e in B.

Si noti che, dato che B ruota mentre A è fermo, allora è fisso () mentre si muove.

Poiché stiamo considerando una rotazione, esiste un quaternione unitario tale che:

Iniziando da , la derivata temporale risulta essere:

Concentriamoci ora su e . Sviluppando alcuni calcoli risulta che:

Con

sono rispettivamente le parti reali e immaginarie di e .

Otteniamo quindi:

e sono legati dalla rotazione , quindi:

Ricordando che:

|  |  |
| --- | --- |
| Immagine che contiene Carattere, testo, calligrafia, bianco  Descrizione generata automaticamente | Immagine che contiene Carattere, testo, linea, calligrafia  Descrizione generata automaticamente |

Allora:

(Se qui non ti torna qualche passaggio, rivedi "orientamento di un corpo -> matrici di rotazione -> funzionamento in -> proprietà").

A questo punto, paragonando il risultato ottenuto con , risulta che:

Moltiplicando ambo i lati per :

Seguendo lo stesso procedimento, possiamo ricavare che:

Quaternioni e velocità angolari: forma matriciale

Siano , allora:

Con:

## Studio sensori inerziali

Sensori locali

I sensori locali forniscono informazioni che non sono legate al valore dello stato (posizione) ma al valore delle relative variazioni di stato (velocità). Questi sensori svolgono un ruolo cruciale nell'analisi del movimento e nei sistemi di tracciamento, fornendo informazioni sui movimenti locali di utenti, oggetti e veicoli. Di solito forniscono un'informazione differenziale, non legata alla posizione dell'utente ma al movimento relativo dell'utente. I sensori locali comuni includono accelerometri e giroscopi.

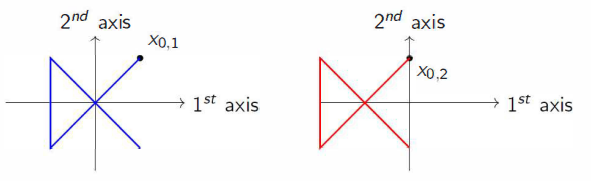
Nell'attività di fusione dei sensori questi sensori vengono, nella maggior parte dei casi, utilizzati per definire *l'equazione basata sulla transizione*:

Consideriamo un punto cinematico che si muove in come:

,

E supponiamo di avere un sensore di velocità capace di misurare in ogni istante di tempo .

Integrando la velocità misurata, il percorso risultante è ottenuto solo in termini di movimento relativo.



Serve una stima della condizione iniziale di .

Sensori globali

I sensori globali forniscono informazioni strettamente correlate al valore dello stato (posizione). Raccolgono dati da un'ampia area geografica o in tutto il mondo. Misure tipiche sono: posizione geografica, informazioni temporali, dati ambientali, ecc.…

Esempi di sensori globali sono: GNSS, wi-fi, reti cellulari, …

Nell'attività di fusione dei sensori questi sensori vengono, solitamente, utilizzati per definire *l'equazione di uscita*:

### Accelerometro

È uno strumento che misura *l’accelerazione corretta*. L’accelerazione corretta indica l’accelerazione (il tasso di variazione della velocità) di un corpo nel suo sistema di riposo istantaneo; ciò è diverso dall’accelerazione delle coordinate, che è l’accelerazione in un sistema di coordinate fisso. Ad esempio, un accelerometro fermo sulla superficie della Terra misura un’accelerazione dovuta alla gravità terrestre, diretta verso l’alto (per definizione) di . Al contrario, un accelerometro in caduta libera (che cadono verso il centro della Terra con un’accelerazione di circa ) misurerà zero.

L'accelerometro misura l'accelerazione che agisce sul sensore stesso.

#### Meccanica

Immagine che contiene diagramma, linea, Rettangolo, Parallelo

Descrizione generata automaticamenteL’accelerometro è formato da un sistema massa-molla-smorzatore dove.

* è la posizione della massa
* è la posizione dell’alloggiamento dell’accelerometro
* è la posizione relativa della massa rispetto alla scatola
* è la rigidità della molla
* è la costante di smorzamento
* è l’accelerazione dell’alloggiamento (non è una forza!)

Ipotizziamo di saper misurare .

La posizione della massa all’equilibrio è .

L’obiettivo è ottenere informazioni su come funzione di .

Nel sistema di riferimento centrato su , per mezzo delle equazioni di Newton, l’evoluzione della posizione della massa risulta essere:

Ricordando che , allora:

dato che

Risulta che può essere visto come l'uscita di un sistema dinamico forzato dall'accelerazione .

Partendo da e applicando la trasformata di Laplace otteniamo:

Di conseguenza,

* se , allora
* se , la misura sarà associata ad , cioè al valore combinato di e , ma non fornisce alcuna informazione specifica sui singoli valori di o .

Se una forza è applicata all’alloggiamento dell’accelerometro, allora:

Se l’accelerometro è in caduta senza forze esterne, allora:

* perché il corpo cade secondo l’accelerazione gravitazionale
* perché la forza gravitazionale è applicata al corpo

#### Elettronica

Analizziamo sensori MEMS perché sono quelli più diffusi.

(Fonte: tesi di Michele Murgia)

I dispositivi MEMS, ovvero Micro – Electro – Mechanical Systems, sono sistemi elettro-meccanici miniaturizzati ottenuti tramite processi di microfabbricazione. Questi dispositivi integrano circuiti microelettronici, strutture, attuatori e sensori, che convertono energia da una forma all'altra. I sistemi MEMS sono utilizzati per raccogliere, memorizzare, processare e scambiare informazioni per il controllo e il monitoraggio dell'ambiente esterno, offrendo dimensioni ridotte, prestazioni elevate e costi unitari bassi grazie ai processi di produzione simili a quelli dell'industria dei circuiti integrati.

Esistono diverse tipologie di accelerometri, ma sono tutte riconducibili al sistema massa – molla – smorzatore visto in precedenza.

Accelerometri capacitivi

Gli accelerometri capacitivi sono dispositivi sensori che misurano l'accelerazione utilizzando un piccolo condensatore. In questo tipo di accelerometri, una delle piastre del condensatore è solidale all'involucro dello strumento, mentre l'altra si muove rispetto alla prima grazie a un elemento elastico. La piastra mobile funge da massa inerziale, e la misura dell'accelerazione avviene valutando lo spostamento di questa massa.

Tale spostamento si ottiene da … [qui le formule varie]

Accelerometri estensimetrici

Gli accelerometri estensimetrici sono dispositivi sensori che misurano l'accelerazione attraverso la variazione di resistenza di un estensimetro, un sensore che cambia la sua resistenza in risposta a deformazioni meccaniche. In questi accelerometri, l'estensimetro è posizionato in punti strategici dove si verifica la massima deformazione a causa dell'accelerazione. Quando l'accelerometro subisce un'accelerazione, la deformazione meccanica provoca una variazione nella resistenza dell'estensimetro, permettendo di misurare l'accelerazione applicata.

Accelerometri piezoelettrici

Gli accelerometri piezoelettrici sono dispositivi sensori che sfruttano materiali piezoelettrici per misurare l'accelerazione. Questi materiali generano una tensione elettrica proporzionale alla forza applicata quando vengono sottoposti a uno sforzo meccanico. Nei accelerometri piezoelettrici, la forza dell'accelerazione viene convertita in un segnale elettrico attraverso la variazione della polarizzazione interna del materiale piezoelettrico, consentendo la misurazione dell'accelerazione.

Accelerometri magnetici

Gli accelerometri magnetici sono dispositivi sensori che utilizzano un'asta connessa a una massa mobile che può muoversi all'interno di una bobina. Il movimento della massa mobile è misurato attraverso variazioni nell'induttanza della bobina o utilizzando un sensore a effetto Hall. Questi accelerometri sfruttano il campo magnetico per rilevare l'accelerazione e sono caratterizzati da una struttura che include una molla per contrastare il movimento della massa mobile.

Accelerometri termici convettivi

Gli accelerometri termici convettivi sono sensori che sfruttano la variazione di temperatura causata da una forza fluidica o da una parte mobile all'interno di un sistema fluido per misurare l'accelerazione. Questi accelerometri valutano l'accelerazione termicamente, utilizzando il cambiamento di temperatura in un punto fisso del sistema disturbato come indicatore dell'accelerazione applicata. Sono dispositivi robusti che possono sopportare forti urti poiché non hanno parti meccaniche mobili all'interno.

Altri tipi di accelerometri

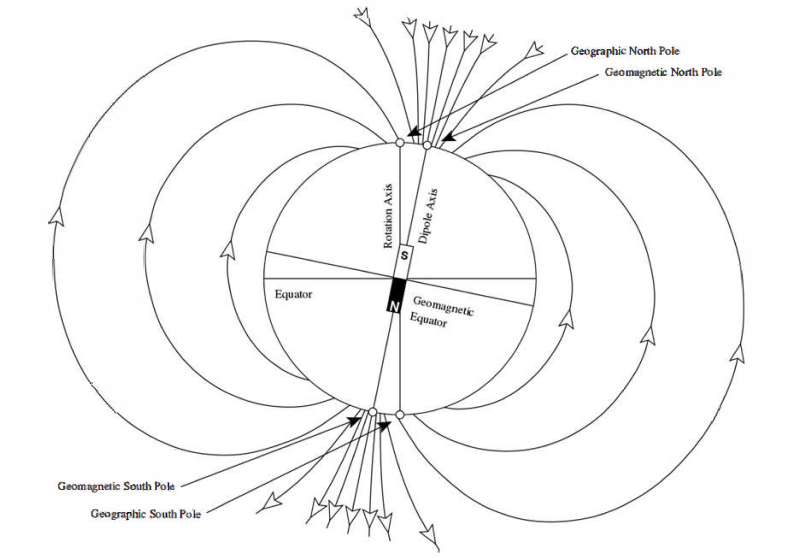
* **Accelerometri a effetto tunnel**: Sfruttano l'effetto tunnel quantistico tra due conduttori per misurare l'accelerazione tramite variazioni nella corrente tunnel, sensibile alla distanza tra i conduttori, offrendo una sensibilità elevata e una facile integrazione con sistemi digitali.
* **Accelerometri risonanti**: Utilizzano elementi vibranti in condizioni di risonanza per rilevare l'accelerazione attraverso variazioni nella frequenza di risonanza, garantendo una misurazione precisa e affidabile.
* **Accelerometri ottici**: Sfruttano la modulazione dell'intensità luminosa o l'interferometria per misurare l'accelerazione con elevata linearità, risoluzione e immunità al rumore elettromagnetico.

### Magnetometro

Un magnetometro è un dispositivo che misura il campo magnetico o il momento di dipolo magnetico. Diversi tipi di magnetometri misurano la direzione, la forza o il cambiamento relativo di un campo magnetico in una posizione particolare. Una bussola è uno di questi dispositivi, che misura la direzione di un campo magnetico ambientale, in questo caso, il campo magnetico terrestre.

Il magnetometro misura il campo magnetico che agisce sul sensore stesso

La Terra funziona come un gigantesco dipolo magnetico inclinato rispetto all'asse di rotazione terrestre:



Il campo magnetico sulla Terra è un vettore **localmente costante** e **tabulato/calcolato** mediante modelli matematici opportunamente definiti per la superficie terrestre. Vedere <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>