

1

Strumentazione giroscopica

1.1 La necessità di una strumentazione giroscopica

Durante il volo, per mantenere il controllo del mezzo, è necessario conoscere, istante per istante, l'assetto dell'aeromobile e la sua direzione rispetto alla superficie terrestre.

Volando in condizioni di buona visibilità il pilota può facilmente verificare l'assetto del velivolo osservando all'esterno l'orizzonte, mentre in condizioni di volo strumentale è indispensabile affidarsi ad una idonea strumentazione non potendo più contare sulle proprie percezioni sensoriali che, addirittura, potrebbero dare informazioni errate.

L'uomo è, infatti, dotato di organi ed apparati (*recettori*) destinati ad entrare in eccitazione sotto l'azione di stimoli provenienti dal mondo esterno. Per mezzo di detti recettori è in grado di percepire l'ambiente in cui vive e di avvertire le modificazioni di stato.

Tra i recettori sensoriali che sovrintendono all'equilibrio si possono distinguere quelli per i quali l'equilibrio non è la funzione primaria (recettori visivi, recettori tattili della pianta dei piedi, recettori situati nei muscoli e nelle articolazioni) ed i recettori specializzati che si trovano nell'orecchio interno. Sono soprattutto questi ultimi che forniscono al pilota informazioni relative alle variazioni di moto e che, pertanto, è utile descrivere in modo abbastanza dettagliato.

L'orecchio interno contiene gli organi dell'equilibrio e dell'udito; i recettori dell'equilibrio sono i *canali semicircolari* e l'*organo statico*; insieme compongono l'*apparato vestibolare* (fig. 1.1).

L'*organo statico* è formato da una cavità (*utricolo*) a pareti sottili delle quali una porzione (*macula*) è più spessa ed è rivestita da cellule ciliate ricoperte da una massa gelatinosa contenenti piccoli organi calcarei (*otoliti*) tenuti assieme da una membrana. L'altra estremità delle cellule invia fibre nervose sensitive al sistema nervoso centrale attraverso il *nervo vestibolare*.

Quando la testa è in posizione eretta la macula è orizzontale e, in presenza della sola accelerazione di gravità, le fibre nervose sono percorse da impulsi a fre-

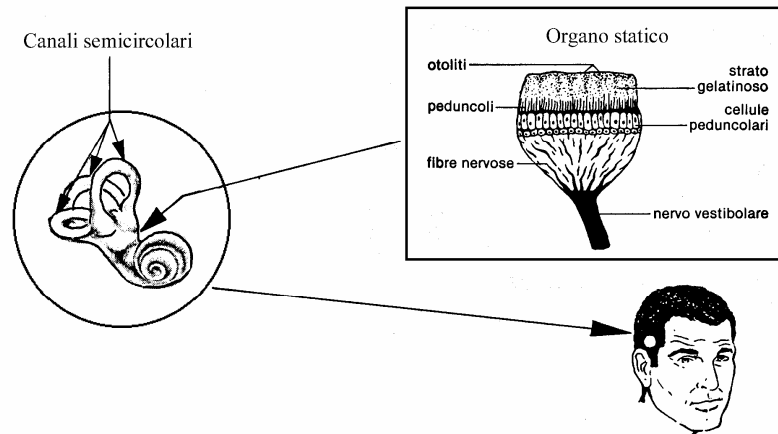


Figura 1.1 – Apparato vestibolare

quenza assegnata. L'inclinazione della testa, o l'azione di una accelerazione lineare, provoca lo spostamento degli otoliti e una conseguente deformazione delle ciglia dando luogo ad un valore diverso della frequenza degli impulsi nervosi a seconda della direzione dell'accelerazione o dell'inclinazione della testa.

L'organo statico, nel riconoscere i cambiamenti di orientamento della testa, dà origine a riflessi che tendono a mantenere o a ripristinare una corretta postura. Naturalmente tale organo di senso non può distinguere tra accelerazione di gravità ed altre accelerazioni né riesce a percepire piccole variazioni di velocità.

I *canali semicircolari* sono tre: uno è orizzontale mentre gli altri due sono verticali e a 90° l'uno dall'altro. Ciascun canale è ripieno di un liquido viscoso (*endolinfa*) il cui movimento va ad eccitare la struttura sensoriale posta in un rigonfiamento (*ampolla*) situata all'estremità di ciascun canale. Nell'ampolla vi è una sporgenza (*cresta ampollare*) in cima alla quale vi è una massa gelatinosa (*cupola*).

Se la testa viene fatta ruotare in una data direzione il liquido contenuto in uno o più canali resterà fermo per la propria inerzia mentre i canali ruoteranno assieme alla testa; si ha, di conseguenza, un moto relativo del liquido verso un lato.

Nella massa gelatinosa si proiettano centinaia di fibre nervose (*ciglia*) disposte sulla cresta ampollare che verranno stimulate dal moto del liquido e trasmetteranno un messaggio al sistema nervoso centrale attraverso il nervo vestibolare.

In conclusione l'apparato vestibolare avverte il cervello di ogni variazione di velocità (accelerazione) e di ogni rotazione angolare.

Ogni organo di senso gioca un ruolo importante ma non esclusivo; per esempio un individuo il cui sistema vestibolare non è più funzionante può mantenere

una corretta postura, in condizioni normali, se ha gli occhi aperti mentre con gli occhi chiusi non riesce a restare in piedi. E infatti uno dei test medici per accertare l'idoneità al volo consiste nel porre il soggetto in posizione eretta con gli occhi chiusi; in caso di compromissione dell'organo statico il soggetto inizierà a oscillare da una parte all'altra fino a perdere l'equilibrio.

Purtroppo gli organi di senso, efficienti in condizioni normali, non riescono a dare informazioni attendibili in ambiente di volo. In assenza di visibilità esterna, infatti, possono aversi sensazioni illusorie capaci di indurre al disorientamento e a manovre errate.

Per esempio, se il pilota riduce bruscamente la potenza generando una notevole decelerazione, gli otoliti si spostano in avanti dando al pilota l'impressione di essere in forte picchiata. La reazione immediata è quella di portare l'aeromobile in cabrata nel tentativo di livellarlo.

Se, invece, l'aeromobile è in virata a rateo costante e per un motivo qualsiasi il pilota fa un brusco movimento con la testa in modo da portare il liquido a circolare in più di uno dei canali semicircolari si ha la sensazione di essere in virata e di accelerare in direzioni completamente diverse da quelle reali. Il pilota che dà credito a tali sensazioni potrebbe portare l'aeromobile in assetti dai quali difficilmente potrebbe rimetterlo.

In altri casi, invece, può aversi un sovraccarico sensoriale di alta intensità che può provocare vertigini. Per esempio se il pilota, nel corso di una virata, inclina la testa in avanti si manifesta un elevato livello di attività elettrica lungo i collegamenti nervosi che uniscono l'occhio all'apparato vestibolare e la stessa eccitazione nervosa può interessare il nervo vago, situato nei pressi dell'orecchio interno, il quale la trasmette allo stomaco provocando un senso di nausea.

In conclusione, quando si è in presenza di un riferimento visivo esterno (volo in condizioni *VFR*), per esempio l'orizzonte, le sensazioni illusorie non si formano in quanto lo stimolo nervoso generato dalla vista cancella gli stimoli più deboli prodotti dall'organo dell'equilibrio, mentre in assenza di riferimenti visivi (volo notturno o, comunque, in condizioni *IFR*) le sensazioni illusorie possono diventare intensissime; esse sono provate da ogni individuo normale ed è impossibile prevenirle.

È quindi indispensabile che in questo caso il pilota possa ritrovare per via indiretta il perduto senso dell'equilibrio affidandosi interamente ad indicazioni strumentali e abituandosi in pari tempo a respingere i suggerimenti fornitigli dalle sue sensazioni che saranno sempre illusorie e pertanto pericolose.

Oltre agli strumenti per il controllo della quota e della velocità dell'aeromobile è indispensabile, quindi, disporre di una nuova serie di strumenti idonea a fornire al pilota indicazioni sulla posizione spaziale del velivolo.

Tali strumenti sfruttano le proprietà dei giroscopi.

1.2 Il giroscopio

Si è vista la necessità di una strumentazione in grado di controllare l'assetto dell'aeromobile rispetto all'orizzonte in modo da sottrarsi alle false illusioni che il pilota può provare nelle varie condizioni di volo.

È anche noto come la bussola magnetica ordinaria non sia di sicuro affidamento ogniqualvolta l'aeromobile viene sottoposto ad accelerazioni longitudinali o trasversali e come nelle regioni prossime ai poli magnetici essa perda di efficacia per l'esiguità della forza direttiva dovuta alla forte diminuzione della componente orizzontale H del campo magnetico terrestre. Si rendono quindi necessari strumenti in grado di indicare la direzione seguita dall'aeromobile basati però su altri principi.

Nel 1852 il fisico francese Léon Foucault inventò un apparato meccanico in grado di mettere in evidenza alcuni effetti della rotazione terrestre e che chiamò, per tale motivo, *giroscopio* (dal greco *rivelatore di rotazione*). L'elemento principale era il *rotore*, corpo solido di rivoluzione capace di ruotare ad elevata velocità angolare intorno al proprio asse conservando, quest'ultimo, un certo grado di libertà in funzione dell'esperienza da realizzare. Tale apparato, tuttavia, non trovò all'epoca altre applicazioni pratiche per le difficoltà connesse al mantenimento di una velocità di rotazione sufficientemente elevata.

L'avvento delle navi in ferro mise in crisi l'impiego delle bussole magnetiche e stimolò, all'inizio del ventesimo secolo, alcuni industriali (Anschutz, Sperry, Brown) a sfruttare le proprietà del giroscopio per realizzare una bussola in grado di ricercare il nord geografico (*girobussola*).

Un'altra applicazione, sempre marina, fu quella di impiegare, a bordo delle grandi navi per il trasporto dei passeggeri, grossi giroscopi con lo scopo di smorzare il rollio e rendere più confortevole la permanenza a bordo.

Nel 1923, ad esempio, la ditta Sperry installò con successo, sul transatlantico *Conte di Savoia* di 41 000 tonnellate di stazza lorda, un sistema costituito da tre grossi giroscopi (fig. 1.2) che consentiva di smorzare il rollio riducendolo da 15° a 2.5° . Tuttavia il grosso peso del sistema (660 t) e la potenza richiesta (1900 CV pari all'1.5% della potenza motrice necessaria per mantenere una velocità di crociera di 27 kt) fecero abbandonare tali sistemi per altri più efficienti.

Risalgono al 1929 le prime applicazioni dei giroscopi sugli aerei finalizzate al controllo della direzione e dell'assetto del velivolo.

Un *giroscopio* è costituito da un corpo solido di rotazione (*rotore*) dotato di elevata velocità angolare rispetto ad un asse (*asse di spin*) coincidente con l'asse di simmetria del rotore. Questo è montato su una sospensione cardanica avente la funzione di permettere al suo asse di assumere tutti gli orientamenti possibili nello spazio con il vincolo che il centro di gravità del rotore coincida con l'intersezione dei tre assi della sospensione cardanica.

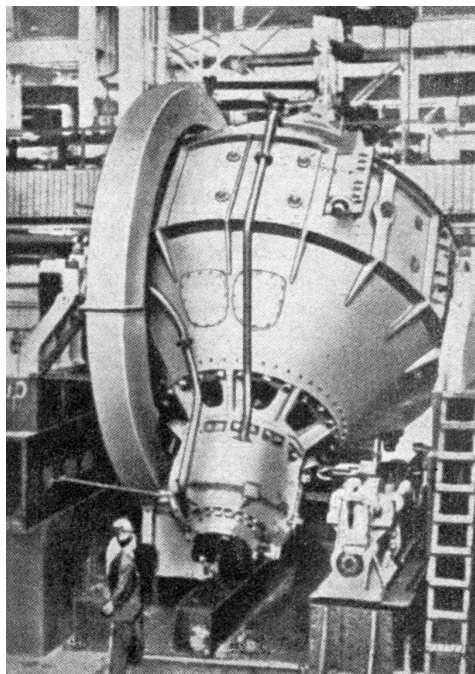


Figura 1.2 – Stabilizzatore di rollio della Sperry

Quest'ultima è costituita da un anello interno che porta l'asse di spin xx' , un anello intermedio che permette al giroscopio di ruotare intorno all'asse yy' e da un anello esterno che consente la rotazione intorno all'asse zz' (fig. 1.3). Il giroscopio, in tal modo, è completamente libero; esso è detto a *due gradi di libertà* non tenendosi conto della rotazione del rotore attorno all'asse di rotazione che costituirebbe il terzo grado di libertà.

Dal momento che gli assi si intersecano rigorosamente nel centro di gravità del rotore, quest'ultimo può ruotare in tutti i modi intorno a tali assi e, in tutte le posizioni che assume, è sempre in equilibrio indifferente comportandosi cioè come un solido avente un punto fisso e sottratto completamente all'azione della gravità.

Di conseguenza se il rotore è fermo, il giroscopio, disposto in una direzione qualsiasi, la conserva, cioè l'asse di spin punta su una direzione fissa rispetto alla Terra presa come sistema di riferimento. Se poi, sempre a rotore fermo, si dispone l'asse di spin orizzontale e si applica ad una delle sue estremità un pesetto, si nota come l'asse si inclina raggiungendo una posizione di equilibrio nell'istante in cui il rotore assume la posizione orizzontale. Nasce, infatti, una coppia intorno all'asse yy' che si annulla soltanto quando l'asse del rotore si dispone lungo la verticale.

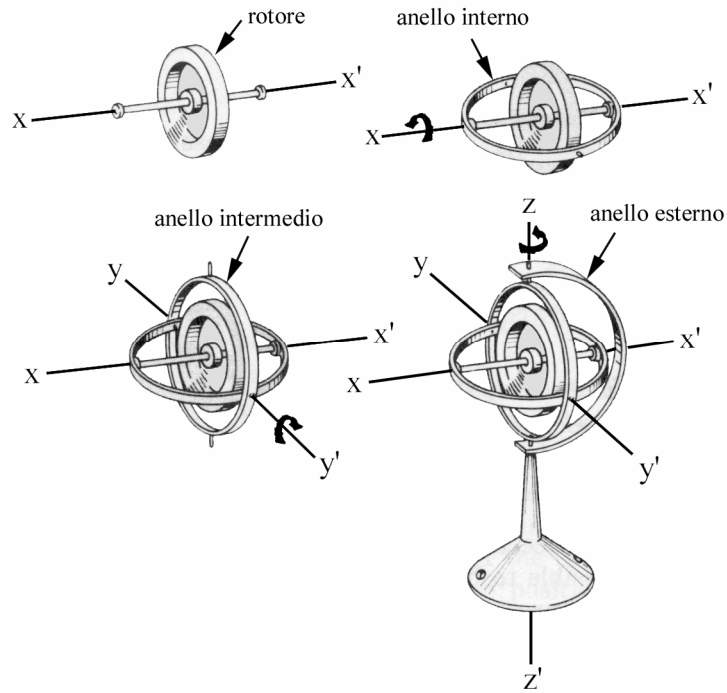


Figura 1.3 – Genesi di un giroscopio

1.3 Analisi dei fenomeni giroscopici

Per la comprensione dei fenomeni giroscopici è utile premettere alcune nozioni di Fisica.

Si abbia un corpo solido (*rotore*) ruotante ad elevata velocità intorno ad un asse ad esso simmetrico (fig. 1.4a). Immaginiamo di scomporre il rotore in tante masse elementari m_1, m_2, \dots, m_n . Nella figura 1.4b viene rappresentata una generica massa m posta ad una distanza r dall'asse di rotazione.

Si definisce *velocità angolare* Ω (omega maiuscola) della massa m , l'angolo che il raggio della circonferenza relativo alla massa descrive nell'unità di tempo.

L'unità di misura è il radiante al secondo (sistema SI) anche se, spesso, la velocità angolare viene espressa dal numero dei giri n che la massa compie in un minuto. La velocità angolare in radianti al secondo si può ottenere dalla relazione:

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}$$

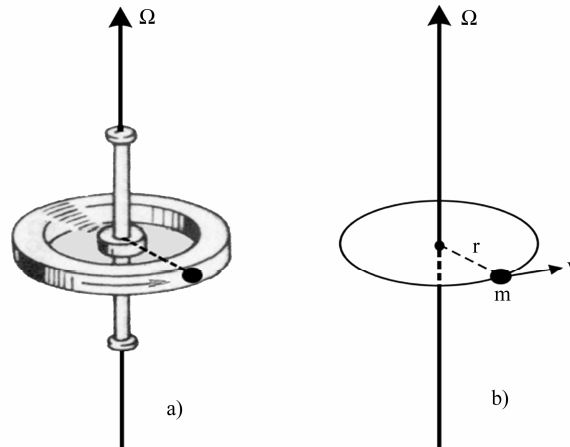


Figura 1.4 – Scomposizione del rotore in masse elementari

La velocità angolare è una *grandezza vettoriale*; essa, infatti, non può essere definita soltanto da un valore numerico (come, per esempio, il tempo, la massa che sono grandezze scalari) ma anche da una *direzione* e da un *verso*. La velocità angolare viene quindi indicata con un segmento orientato (*vettore*) avente come direzione quella dell'asse intorno a cui ruota il corpo, come grandezza il valore della velocità angolare espressa in unità SI, come verso quello tale che una persona con la testa all'estremità del vettore vede ruotare la massa nel senso contrario alle lancette di un orologio (senso *diretto* o *antiorario*). Da questo momento le grandezze vettoriali verranno simbolicamente indicate con carattere in grassetto (ad esempio $\mathbf{\Omega}$ rappresenta la velocità angolare mentre Ω soltanto la sua grandezza).

La *velocità lineare* \mathbf{v} della massa elementare m è, invece, la misura dell'arco percorsa nell'unità di tempo; essa è legata alla velocità angolare dalla relazione:

$$\mathbf{v} = \mathbf{\Omega} r \quad (1.1)$$

Il prodotto della massa m per la velocità \mathbf{v} viene definita *quantità di moto* \mathbf{q} :

$$\mathbf{q} = m\mathbf{v} \quad (1.2)$$

mentre il prodotto di \mathbf{q} per il raggio r definisce il *momento angolare* o *momento della quantità di moto* e si indica con il simbolo \mathbf{L} :

$$\mathbf{L} = m\mathbf{v}r$$

che può anche essere scritto, tenendo conto della (1.1) ed indicando con I la quantità $m r^2$, con:

$$\mathbf{L} = I\boldsymbol{\Omega} \quad (1.3)$$

Il parametro I esprime il *momento di inerzia* che, per un rotore di forma e dimensioni assegnate, è tanto maggiore quanto più grandi sono le masse dei diversi punti che lo costituiscono e, per un rotore di massa data, tanto più grande quanto maggiori sono le distanze delle diverse parti del rotore dall'asse di rotazione. Per tale motivo si preferisce dare al rotore la forma *toroidale* di cui alla figura 1.4a.

Il rotore, nel suo assieme, una volta messo in rotazione intorno al proprio asse, acquista un momento della quantità di moto \mathbf{L} , rappresentato da un vettore avente la stessa direzione e lo stesso senso di $\boldsymbol{\Omega}$, e come momento di inerzia la sommatoria delle masse elementari che costituiscono il rotore per il quadrato delle loro rispettive distanze:

$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots + m_n r_n^2$$

Dalla Fisica è noto che il momento della quantità di moto di un sistema, al quale non sia applicata alcuna coppia esterna, è costante. Per esempio se una persona posta su uno sgabello girevole viene fatta ruotare, la velocità di rotazione diminuisce se il soggetto allarga le braccia, al contrario aumenta se porta le braccia il più vicino possibile all'asse di rotazione. Infatti nel primo caso, allargando le braccia, aumenta il momento di inerzia I e, affinché \mathbf{L} rimanga costante, deve diminuire $\boldsymbol{\Omega}$; il contrario si ha nel caso opposto.

Le proprietà dei giroscopi, una volta che il rotore è messo in rapida rotazione, dipendono dal *principio di conservazione del momento della quantità di moto* e possono così riassumersi.

- *Inerzia o rigidità giroscopica*

Disponendo l'asse di spin in una data direzione, in assenza di coppie esterne, o anche di coppie interne al sistema dovute, per esempio, a resistenze di attrito dei perni o alla non coincidenza del centro di sospensione con il centro di gravità, esso conserva tale direzione rispetto a una terna di assi orientati sulle stelle fisse (*terna inerziale*).

Per esempio, se il rotore viene diretto su una stella, l'asse di spin, a causa della rotazione terrestre, si muoverà apparentemente seguendo esattamente il moto apparente della stella (fig. 1.5a). In particolare, se inizialmente, in una località di latitudine φ , l'asse di spin viene disposto verticalmente, cioè puntato verso lo zenit, nel tempo impiegato dalla Terra a ruotare intorno al proprio asse (un giorno sidereo uguale a 23 h 56 min 04 s pari a 86 164 s), si vedrà l'asse del rotore descrivere, intorno alla direzione del polo celeste elevato, un cono la cui semiapertura è uguale esattamente al complemento della latitudine del luogo (fig. 1.5b). Se poi l'asse di spin è diretto sul polo elevato, esso rimarrà in una posizione fissa sia rispetto alla Terra sia rispetto alla terna inerziale.

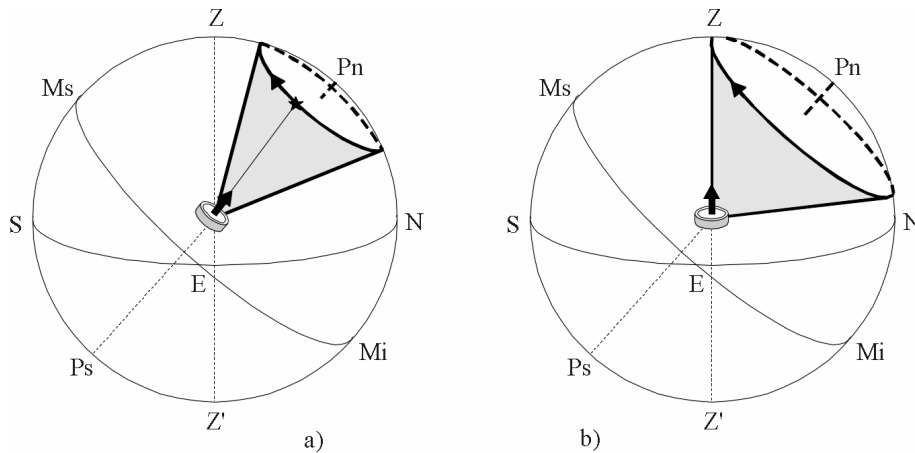


Figura 1.5 – Inerzia giroscopica

- *Precessione libera*

Se all'asse di spin, posto in posizione orizzontale, viene applicata una coppia C rispetto all'asse y appendendo una massa m all'estremità dell'asse del rotore, contrariamente a quanto avviene a rotore fermo, esso non obbedisce all'azione della forza peso p (uguale ad mg , essendo g l'accelerazione di gravità) ma si mette a ruotare intorno all'asse z con una velocità angolare ω (omega minuscola) – uniforme nel caso in cui il modulo di C è costante – fino a quando la massa rimane applicata. Il senso della rotazione ω è tale che il vettore L tende a sovrapporsi al vettore C (*tendenza al parallelismo delle rotazioni*) (fig. 1.6).

Per spiegare tale fenomeno, apparentemente strano, si osservi che sotto l'azione della massa m , l'asse del giroscopio tenderebbe a ruotare verso il basso imprimendo al sistema una velocità angolare diretta lungo l'asse y . Tale velocità componendosi con la velocità propria del rotore diretta lungo l'asse x , darà luogo ad una nuova velocità angolare risultante diretta sempre nel piano xy .

La proprietà ora descritta si esprime attraverso la seguente relazione vettoriale:

$$C = \omega \times L \quad (1.4)$$

dove il segno \times indica un *prodotto vettoriale*. La predetta notazione, infatti, a differenza di una comune moltiplicazione, indica, nel caso di un giroscopio, che i tre vettori C , ω , L sono diretti ciascuno lungo gli assi di una terna ortogonale e precisamente, disponendo la mano destra in modo che l'indice risulti parallelo al momento angolare L e il medio parallelo alla coppia C , il pollice, disposto normalmente alle due dita precedenti, indicherà il vettore relativo al moto di precessione ω .

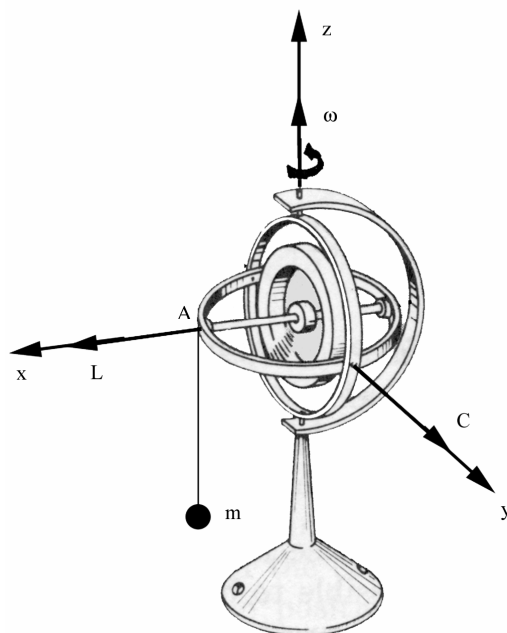


Figura 1.6 – Precessione in seguito all'azione di una coppia **C**

Al moto dell'asse di spin viene dato il nome di *precessione libera* se essa è prodotta applicando al giroscopio opportune coppie, oppure di *deriva* quando essa è dovuta a coppie parassite. Per esempio, nel caso di un giroscopio in cui $L = 10^5$ unità cgs, se si vuole che esso subisca un moto di precessione di $10^\circ/\text{h}$, occorre applicare una coppia pari a circa 5 unità cgs mentre, se si vuole che lo stesso giroscopio non subisca una *deriva* superiore a $0.1^\circ/\text{h}$, è necessario che non vi siano coppie parassite superiori a 5×10^{-2} unità cgs.

Un esempio di moto di precessione si può facilmente verificare andando in bicicletta: la ruota anteriore può essere assimilata al rotore di un giroscopio a due gradi di libertà. Infatti essa può ruotare: intorno alla verticale, ruotando il manubrio, e intorno all'asse longitudinale, inclinando la bicicletta lateralmente. Pertanto, se si ruota il manubrio a sinistra, la bicicletta tende ad inclinarsi lateralmente verso destra, mentre se si inclina la bicicletta lateralmente sulla destra, il manubrio ruota verso destra.

Da quanto finora detto risulta che quando l'asse del rotore è sottoposto all'azione di una coppia, esso non obbedisce a tale azione, ma si sposta in un piano normale al piano contenente la coppia stessa.

- *Precessione forzata*

Se, infine, si trascina il rotore in un moto di precessione ω intorno all'asse z , cioè lo si sottopone ad una *precessione forzata*, si sentirà l'asse sfuggire dalla mano in quanto nasce una coppia di reazione uguale e contraria alla coppia esterna che produrrebbe la precessione libera ω . Il senso di azione di questa coppia risulta tale da tendere a portare l'asse del rotore a coincidere con l'asse della precessione forzata (*tendenza al parallelismo delle rotazioni*) e può essere definito con la medesima regola descritta precedentemente sostituendo però la mano sinistra alla destra.

La predetta coppia C_r , essendo una coppia di reazione, è data da:

$$C_r = -C = L \times \omega \quad (1.5)$$

nella quale, a differenza della (1.4), a causa del segno meno, sono invertiti i fattori del prodotto vettoriale.

1.4 Giroscopio a un solo grado di libertà

Se al giroscopio della figura 1.3 limitiamo un grado di libertà impedendogli, per esempio, di ruotare intorno all'asse zz' , il giroscopio può ruotare soltanto intorno all'asse yy' che assume, pertanto, la denominazione di *asse di uscita*.

Un tale giroscopio è rappresentato schematicamente nella figura 1.7a; se si fa ruotare l'intero apparato con velocità angolare ω intorno all'asse verticale z , indicato come *asse di ingresso*, si osserverà l'asse del rotore ruotare intorno all'asse di uscita y fino a disporsi verticalmente (fig. 1.7b).

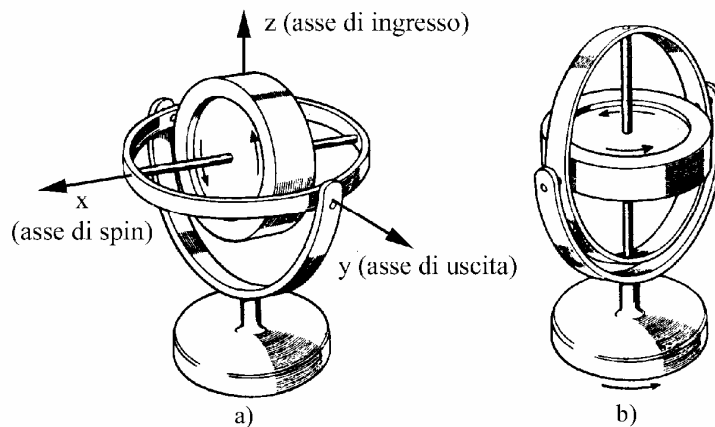


Figura 1.7 – Giroscopio ad un grado di libertà

All'asse del rotore non verrà consentito di raggiungere l'asse z in quanto su di esso si faranno agire coppie tali da farlo allontanare dal piano orizzontale soltanto di pochi gradi.

Ciò può essere conseguito, per esempio, per mezzo di una molla in grado di produrre una coppia di richiamo verso la posizione iniziale tanto maggiore quanto maggiore sarà l'angolo di deflessione α .

In definitiva, a seguito di una velocità angolare ω diretta lungo l'asse z , sul giroscopio agiranno due coppie:

- la coppia di precessione forzata $L\omega$;
- la coppia di richiamo elastica $K_m\alpha$.

L'equilibrio si ha quando le due coppie sono uguali e di segno opposto, cioè per:

$$L\omega = K_m\alpha$$

da cui si ricava:

$$\alpha = \frac{L}{K_m}\omega \quad (1.6)$$

Pertanto l'angolo di deflessione α dell'asse del rotore è proporzionale alla velocità angolare di precessione forzata a cui è sottoposto l'asse di ingresso.

Il giroscopio testé descritto è noto come *girometro* o *rate gyro* ed è un misuratore di velocità angolare (fig. 1.8).

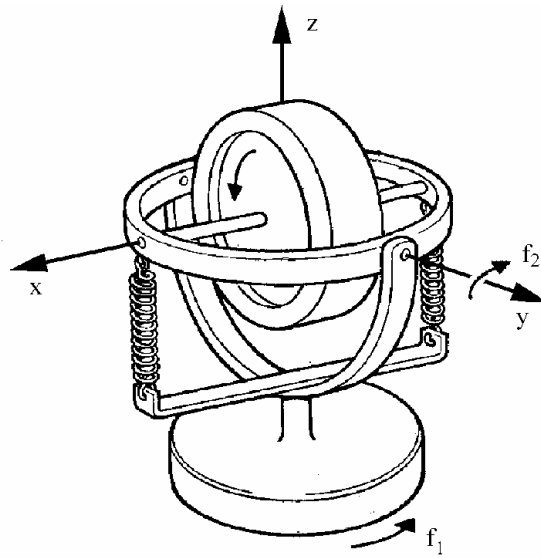


Figura 1.8 – Girometro