

Gli strumenti giroscopici

Camilla Castellani & Nicola Morganti

2 marzo 2004

Indice

1	Il giroscopio	1
1.1	Introduzione	1
1.2	I limiti del giroscopio	3
2	L'orizzonte artificiale	7
2.1	Utilizzo e funzionamento	7
2.2	Indicazioni di rollio	9
2.3	Indicazioni di beccheggio	10
2.4	Le tipologie costruttive dell'orizzonte artificiale	10
2.5	I problemi e i limiti dell'orizzonte artificiale	11
3	Il girodirezionale	14
3.1	Utilizzo e funzionamento	14
3.2	I problemi del girodirezionale	16
4	Virosbandometro	19
4.1	Utilizzo e funzionamento	19
4.1.1	Il rate gyroscope	19
4.1.2	Il bank indicator	21
4.2	Turn Coordinator	21

Capitolo 1

Il giroscopio

Indice del capitolo

1.1	Introduzione	1
1.2	I limiti del giroscopio	3

Figure

1.1	Struttura di un giroscopio	2
1.2	Effetti dovuti alla rotazione della Terra	4
1.3	Effetti dovuti alla curvatura terrestre	5
1.4	Scomposizione del vettore velocità lungo le tangenti al meridiano e parallelo locale	6

1.1 Introduzione

Il giroscopio è un dispositivo meccanico assialsimmetrico costituito da un rotore universalmente montato, tale da avere 3 gradi di libertà:

- *spinning freedom*: ruota liberamente attorno all'asse di spin;
- *tilting freedom*: ruota liberamente cambiando l'inclinazione;
- *veering freedom*: ruota liberamente cambiando la direzione;

In figura 1.1 abbiamo schematizzato gli assi principali del giroscopio. I tre gradi di libertà sono ottenuti con due anelli impernati concentricamente, che prendono

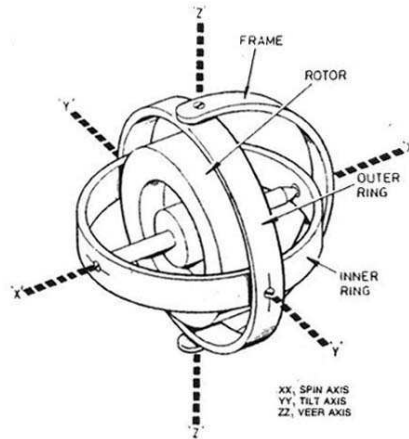


Figura 1.1: Struttura di un giroscopio

il nome di *inner e outer ring*. Dalla figura 1.1 si evince che l'inner ring è quello che ruota attorno all'asse y , mentre l'outer attorno all'asse z . Il terzo grado è la rotazione libera del rotore attorno all'asse di spin x .

Se portiamo il rotore ad una velocità angolare elevata, questo mostrerà le sue caratteristiche principali:

- *rigidezza*
- *precessione*

entrambe si basano sul principio di conservazione della quantità di moto angolare.

- La rigidezza H è definita come:

$$H = J_{spin} \cdot \omega_{spin} \quad (1.1)$$

e dipende da tre fattori:

1. la massa del rotore, da cui dipende J_{spin} ;
2. il raggio giratore d'inerzia¹, da cui dipende J_{spin} ;
3. la velocità di rotazione ω_{spin}

¹ovvero la distanza alla quale agisce la massa dal centro

- La precessione \vec{P} è definita come:

$$\vec{P} = \vec{\omega}_{spin} \wedge \vec{M}_a \quad (1.2)$$

dove $\vec{\omega}_{spin}$ è il vettore velocità angolare, mentre \vec{M}_a è il vettore momento dato dalla forza applicata al giroscopio e dal braccio di questa rispetto al baricentro del rotore, entrambi vengono individuati con la regola della mano destra. La precessione è quindi il cambiamento della giacitura del piano di rotazione del giroscopio. Questa può avvenire sia in tilting che in veering o come combinazione di entrambe. Il tutto è dovuto a come è diretta la forza applicata al giroscopio. La precessione dura fino a quando il piano di rotazione non coincide con il piano di giacitura della forza.

Definiamo infine:

- *asse di input*: l'asse attorno al quale si genera il momento precessionante;
- *asse di output*: l'asse attorno al quale il rotore gira;

In campo aeronautico, poichè l'asse di spin non da alcuna indicazione sulla variazione di assetto, i giroscopi vengono declassati di un grado di libertà, perciò si parlerà di giroscopi a uno o due gradi di libertà indicando strumenti in grado di fornirci una o due variazioni d'assetto. Avremo quindi:

- strumenti giroscopici a un grado di libertà: l'indicatore di virata;
- strumenti giroscopici a due gradi di libertà: l'orizzonte artificiale e girodirezionale;

1.2 I limiti del giroscopio

Prendiamo in considerazione 3 limiti:

1. *La deriva reale*

É causa principalmente da attriti e sbilanciamenti del sistema rispetto a quello ideale. Queste imperfezioni provocano precessioni indesiderate che possono essere minimizzate applicando tecniche di precisioni ingegneristiche al progetto e alla realizzazione.

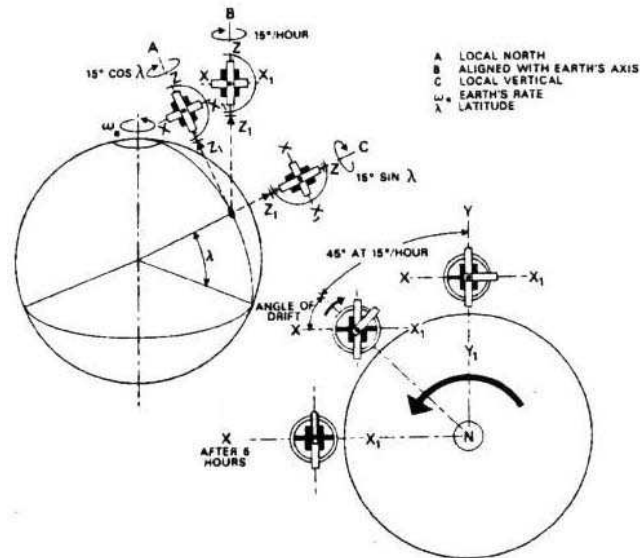


Figura 1.2: Effetti dovuti alla rotazione della Terra

2. La deriva apparente

Indicando con ω_e la velocità angolare della Terra ($15^\circ/\text{hour}$), si definisce deriva apparente la precessione dovuta all'azione di ω_e su giroscopio posto ad una certa latitudine λ . Possiamo quindi distinguere diversi casi (Figura ??):

- (a) ASSE DI SPIN PARALLELO ALLA NORMALE LOCALE (CASO A). In questo caso il momento precessionante apparente che agisce sull'asse di input del nostro giroscopio è funzione solo di $\omega_e \cos \lambda$, avendo scomposto il vettore ω_e rispetto alla normale e tangente locale in corrispondenza della latitudine λ .
- (b) ASSE DI SPIN PERPENDICOLARE ALLA NORMALE LOCALE (CASO C). In questo caso il momento precessionante apparente che agisce sull'asse di input del nostro giroscopio è funzione solo di $\omega_e \sin \lambda$, avendo scomposto il vettore ω_e rispetto alla normale e tangente locale in corrispondenza della latitudine λ .
- (c) ASSE DI SPIN PERPENDICOLARE AL VETTORE ω_e (CASO B). In questo caso il momento precessionante apparente che agisce sull'asse di input del nostro giroscopio è funzione solo di ω_e . La precessione coincide esatta-

mente con la rotazione terrestre, ovvero se dopo 3 ore la Terra è ruotata di 45° in senso antiorario, anche il nostro giroscopio avrà precessionato di 45° ma in senso orario.

3. La deriva da trasporto

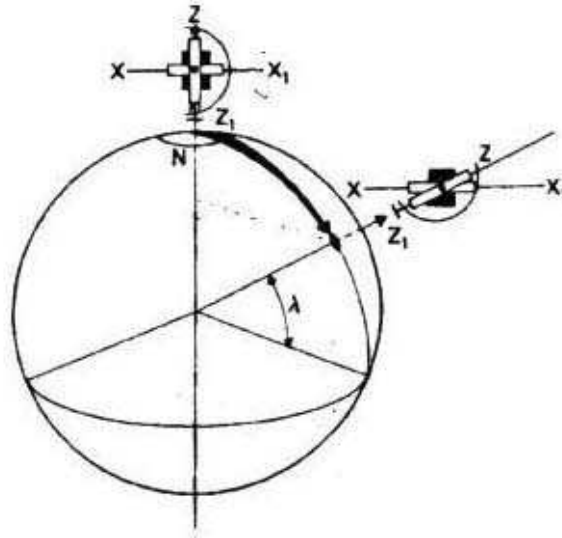


Figura 1.3: Effetti dovuti alla curvatura terrestre

Consideriamo un giroscopio posto al polo nord con asse di spin orizzontale e asse di input allineato con l'asse di rotazione della terra. In questa posizione la deriva apparente varrà ω_e . Se invece lo trasportiamo ad una latitudine inferiore con l'asse di input allineato con la verticale locale, a un osservatore posto sulla Terra sembrerà che l'asse di spin sia ruotato come in figura 1.3. Questo è dovuto al fatto che la Terra è una superficie sferica e la tenacia del giroscopio tende a fargli mantenere la direzione di partenza.

Notiamo inoltre che i giroscopi vengono utilizzati principalmente come strumenti di navigazione, quindi se consideriamo un punto materiale di velocità \vec{V} , possiamo scomporre questa lungo le tangenti al meridiano e parallelo locale (Figura 1.4). Chiameremo V_N la componente $V \cos \psi$ e V_E la componente $V \sin \psi$. Se trasportiamo il punto ad una qualsiasi latitudine λ lungo lo stesso meridiano notiamo che la componente V_N non varia in quanto ci stiamo sempre muovendo su una circonferenza di raggio massimo, mentre la componente V_E varia in funzione di λ poichè è la velocità

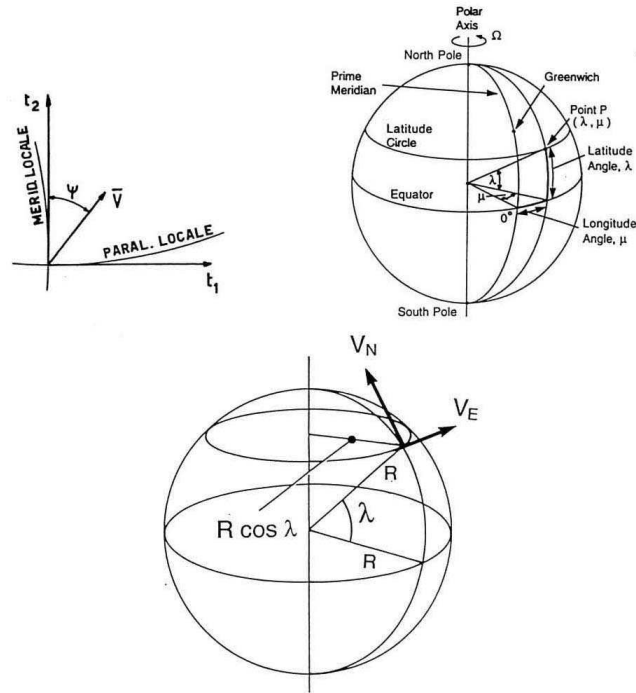


Figura 1.4: Scomposizione del vettore velocità lungo le tangenti al meridiano e parallelo locale

tangente a una circonferenza di raggio $R \cos \lambda$. Paradossalmente se ci ponessimo al polo nord spazzeremmo tutti i 360° in un tempo nullo.

Per concludere possiamo scrivere la ω_p totale che agisce su un giroscopio avente l'asse di spin tangente alla superficie terrestre come:

$$\omega_p = \left(\omega_e \pm \frac{V \sin \psi}{R \cos \lambda} \right) \sin \lambda \quad (1.3)$$

il \pm è dovuto al fatto che V_E possa essere concorde o meno con ω_e . Inoltre la velocità che fa tombolare il giroscopio sarà

$$\omega_p = \frac{V \cos \psi}{R} \quad (1.4)$$

ovvero la velocità angolare di un corpo con velocità V_N che percorre il meridiano.

Capitolo 2

L'orizzonte artificiale

Indice del capitolo

2.1	Utilizzo e funzionamento	7
2.2	Indicazioni di rollio	9
2.3	Indicazioni di beccheggio	10
2.4	Le tipologie costruttive dell'orizzonte artificiale	10
2.5	I problemi e i limiti dell'orizzonte artificiale	11

Figure

2.1	Quadranti tipici di un orizzonte artificiale	8
2.2	Quadrante di una virata di 30° a sinistra	8
2.3	Struttura di un orizzonte artificiale	9

2.1 Utilizzo e funzionamento

E' uno strumento giroscopico a 2 gradi di libertà che indica gli assetti di rollio e beccheggio del velivolo, per questo motivo l'asse di spin è disposto verticalmente (l'imbardata non viene misurata). L'eventuale assetto di beccheggio viene visualizzato con un moto relativo tra una sagomina fissa, raffigurante il velivolo visto frontalmente, e una linea marcata che rappresenta l'orizzonte e che divide lo strumento in due zone: una di colore azzurro (il cielo) e una di colore marrone (il terreno). L'assetto di rollio, invece, viene rappresentato con un moto relativo tra

una ghiera graduata fissa e un indicatore mobile. Al pilota lo strumento si presenta solitamente come in figura 2.1.

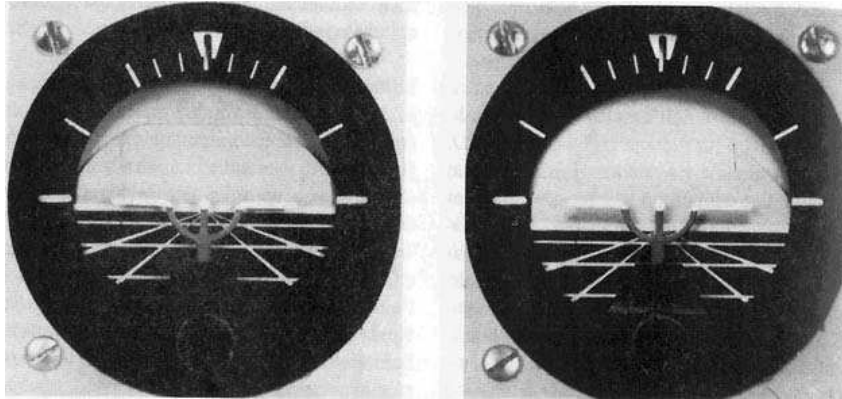


Figura 2.1: Quadranti tipici di un orizzonte artificiale

In quella di destra l'assetto del velivolo è leggermente a cabrare, in quella di sinistra invece la manovra risulta notevolmente accentuata. Per quel che riguarda una virata a sinistra, ad esempio, di 30° il pilota vedrà lo strumento posizionarsi come mostrato nella figura 2.2.

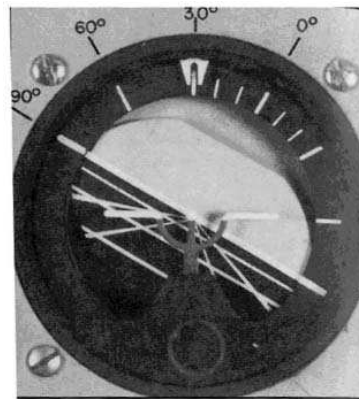


Figura 2.2: Quadrante di una virata di 30° a sinistra

Brevemente descriviamo il funzionamento di questo importantissimo strumento, facendo riferimento alla figura 2.3.

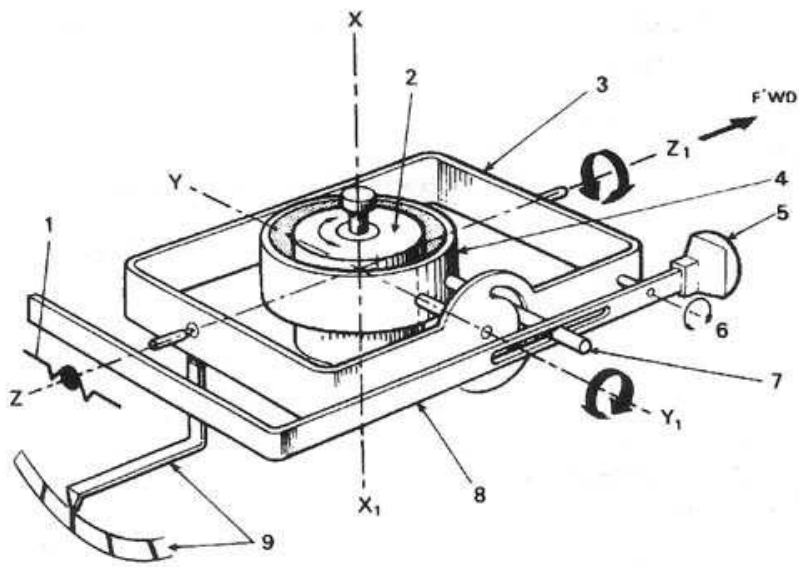


Figura 2.3: Struttura di un orizzonte artificiale

1. sagoma velivolo a questo solidale
2. rotore
3. outer ring
4. inner ring
5. contrappeso
6. perno attorno al quale ruota la barra dell'orizzonte
7. piolo solidale con la gabbia interna (inner ring)
8. barra rappresentante la linea dell'orizzonte
9. indicatore mobile e scala dell'orizzonte

2.2 Indicazioni di rollio

L'outer ring è incernierato al velivolo parallelamente all'asse longitudinale zz' ed è quindi in grado di indicare l'angolo di rollio in maniera diretta: la lettura viene

eseguita sulla scala graduata di cui si è accennato in precedenza e indicata col numero 9.

2.3 Indicazioni di beccheggio

Per il beccheggio invece il meccanismo è leggermente più complesso: durante una salita o una discesa l'outer ring si muove solidalmente al velivolo ruotando attorno all'asse yy' (e quindi attorno all'inner ring), la barra 8 ruota anch'essa ma nella direzione opposta, attorno al piolo 6, grazie al sistema cinematico per il quale il piolo 7, vincolato all'inner ring, scorre nell'outer ring in una fessura a mezza luna. In questo modo il braccio 8 trascina con sé la linea dell'orizzonte che, movendosi rispetto alla sagoma 1, fornisce al pilota la visione dell'assetto cabrato o picchiato del velivolo. Si fa notare come questo cinematismo sia stato introdotto solo per fornire indicazioni di tipo istintivo, infatti in sua assenza nel caso, ad esempio, di una salita, la sagoma del velivolo scorrerebbe al di sotto della linea dell'orizzonte e non al di sopra. Ricordiamo che la libertà di rotazione attorno all'asse di rollio è di 85° per prevenire il gimbal lock; quello attorno all'asse di beccheggio è anch'esso limitato da i cosiddetti fine corsa, che impediscono il sovrapporsi di due assi; tuttavia è anche possibile fare in modo che l'asse di spin venga scavalcato durante la rotazione: in questo modo si garantisce una libertà di rotazione completa di 360° .

2.4 Le tipologie costruttive dell'orizzonte artificiale

Le tipologie costruttive dell'orizzonte artificiale sono principalmente due:

Pneumatico: una pompa a vuoto provvede a creare una depressione nella cassa dello strumento e l'aria passando attraverso un filtro convoglia in getti rotanti. Uscendo da questi ultimi urta delle scanalature nel rotore, dette *rotor buckets*, tali da impartirgli una velocità di rotazione che si aggira attorno ai 15000 giri/min. Dopo aver fatto ruotare il disco del rotore l'aria viene incanalata in un vano a pendolo posto, nella parte inferiore della cassa dello strumento, ed è poi nuovamente spillata dalla pompa a vuoto.

Elettrico: questi strumenti presentano più o meno gli stessi elementi di quelli pneumatici, fatta eccezione per il giroscopio che è un motore a gabbia di scoiattolo

operante in corrente alternata a 115 V, 400 Hz. Si è detto che la caratteristica principale di ogni giroscopio che si rispetti è avere la massa del rotore il più possibile concentrata verso la periferia in modo da incrementare il momento di inerzia e il raggio giratore. Per raggiungere questo specifico scopo è quindi necessario prendere un particolare provvedimento che consiste nel porre il rotore all'esterno dello statore. Il motore è racchiuso in una cassa che costituisce l'inner ring, il quale a sua volta è come al solito supportato dall'outer ring, la barra dell'orizzonte è montata nel modo classico descritto all'inizio del capitolo. Quando è applicata potenza si stabilisce un campo magnetico rotante nello statore il quale a sua volta induce corrente nel rotore. I vantaggi prevedibili sono principalmente due:

1. si possono raggiungere velocità di rotazione paria $20000 \div 23000$ giri/min;
2. il funzionamento non è legato a quello del motore del velivolo bensì all'accensione dell'impianto elettrico (MASTER ON e BATTERIA inserita).

2.5 I problemi e i limiti dell'orizzonte artificiale

I problemi tipici sono quelli legati alla natura del giroscopio, ovvero la precessione reale e apparente. Vediamo alcune metodologie di correzione.

- La *precessione reale* fa sì che il nostro giroscopio perda la direzione della verticale locale: il sistema di recupero è quindi basato essenzialmente sul principio pendolare secondo il quale un corpo pesante può avvertire in qualunque momento la forza peso. Esistono tre fondamentali sistemi di erezione :
 1. il vano pendolare a palette: è presente nei giroscopi di tipo pneumatico. Abbiamo infatti accennato nel relativo capitolo come al di sotto della cassa dello strumento sia presente un vano cilindrico cavo nel quale convoglia l'aria aspirata dalla pompa a vuoto; poste a 90° le une dalle altre ci sono delle fessure parzialmente coperte da tendine, vincolate al cilindro nella parte superiore, le quali si spostano a seconda degli assetti del velivolo che tendono a far allontanare l'asse di spin dalla verticale locale.
 2. l'unità cosiddetta a biglie: è un sistema adottato in alcune tipologie di giroscopi elettrici e utilizza la forza precessionante derivante dall'azione

del campo gravitazionale agente su un gruppo di piccole sfere d'acciaio contenute in un piatto rotante a circa 30 giri/min sospeso al di sotto della cassa dello strumento. Quando l'asse di spin si discosta dalla verticale locale le sfere, sotto il loro peso, scorrono verso la parte inclinata del sistema erettore infilandosi in particolari anse ricavate sulla circonferenza del piatto. L'effetto continua finché l'asse di spin non viene riallineato con la verticale locale: a quel punto le sfere si riportano nella posizione iniziale al centro dell'unità.

3. motori di coppia a goccia di mercurio: vengono anch'essi adottati in giroscopi elettrici e dal nome è facile intuire come in questo sistema siano presenti due motori di coppia azionati in modo del tutto indipendente da interruttori a goccia di mercurio. Quando il giroscopio avverte una rotazione attorno a uno dei due assi anche la goccia di mercurio si muove nella direzione in cui lo strumento si è inclinato e va quindi a chiudere il circuito corrispondente alla messa in moto del motore che ha il compito di riallineare l'asse di spin del giroscopio.
- Per quanto riguarda la *precessione apparente* sappiamo che i sistemi pendolari risentono, oltre che della forza di gravità, anche della forza d'inerzia quindi la tendenza è quella di disporsi secondo la verticale apparente individuata dalla risultante delle forze sopra accennate, non verso la verticale vera locale. Esistono ulteriori false indicazioni sempre dovute alla presenza di accelerazioni, infatti se il pilota di un velivolo posto in V.O.R.U. per qualche motivo decidesse di accelerare mantenendo l'assetto invariato lo strumento darebbe una falsa indicazione di cabrata e lo stesso fenomeno si avrebbe nel caso di decelerazione solo che in questo caso l'orizzonte artificiale darebbe una falsa indicazione di assetto picchiato. Nel caso di una virata combinata ad un cambiamento di quota (in salita o discesa) la forza d'inerzia presente sarebbe quella centrifuga: ancora quindi il giroscopio tenderebbe a indicare la verticale apparente e ciò impedirebbe al pilota di apprezzare l'effettivo angolo di bank. Principalmente si hanno tre rimedi:

1. il primo è dovuto alle caratteristiche intrinseche del giroscopio (in particolare la sua tenacia) il quale ha quindi una precessione irrisoria, ossia pari

- a $2^\circ - 3^\circ$ /min verso la verticale apparente; ciò si traduce in una variazione di $5^\circ - 6^\circ$ dopo aver effettuato una virata di 360° in 2 minuti;
2. il secondo consiste nell'attribuire una inclinazione iniziale all'asse di spin in modo da avere un errore costante lungo i 360° ;
 3. il terzo, che costituisce la vera correzione, sta nel mettere fuori uso il sistema erettore nel momento in cui si esegue una manovra. Poiché lo scopo è quello di riferire gli assetti alla verticale locale, se si imposta la manovra partendo da una posizione la cui verticale vera è nota, si può escludere il sistema erettore facendo così in modo che il giroscopio non venga influenzato dalle forze d'inerzia relative alla manovra stessa. Sui velivoli dotati di giroscopi elettrici vengono spesso installati dei sensori sulle ali che, se avvertono un'inclinazione maggiore di 10° (per la quale effettivamente il pilota sta impostando una virata), escludono gli interruttori che azionerebbero il sistema correttivo di erezione. Una modalità di funzionamento simile è propria di quei sensori che misurano l'accelerazione (misurare quest'ultima piuttosto che l'inclinazione alare è identico: la forza centrifuga infatti è funzione dell'inverso del raggio di virata e della velocità al quadrato e, a parità di velocità, dipende direttamente dall'inclinazione delle ali) e che in base al suo valore escludono il sistema erettore.
- L'ultimo limite di cui parliamo in questa sede è dato dai **tempi di attesa** all'avviamento del rotore, questo infatti dovrebbe raggiungere la sua velocità di regime in tempi brevi. Per ottenere tale scopo esistono due metodi:
 1. sbaricentrando il giroscopio e azione del sistema pendolare per un rapido allineamento con la verticale locale;
 2. inizializzazione del giroscopio attraverso un pulsante che attira l'asse di spin verso la verticale locale.

Capitolo 3

Il girodirezionale

Indice del capitolo

3.1	Utilizzo e funzionamento	14
3.2	I problemi del girodirezionale	16

Figure

3.1	Struttura di un girodirezionale	15
3.2	Impianto di funzionamento del giroscopio del girodirezionale	16
3.3	Un moderno giroscopio direzionale	18

3.1 Utilizzo e funzionamento

E' un giroscopio a due gradi di libertà con asse di spin orizzontale. Questo strumento ormai è presente unicamente su aerei da turismo dell'aviazione generale ed esiste praticamente solo nella versione di alimentazione pneumatica; lo scopo cui è destinato è quello di indicare la prua in modo da fornire al pilota informazioni complementari a quelle della bussola magnetica, infatti è noto come il girodirezionale sia affidabile nel corto periodo (quindi nelle manovre), mentre la bussola nel lungo periodo. Ciò comporta, per non commettere gravi errori di valutazione nella posizione, un riallineamento del direzionale con quanto visualizzato dalla bussola all'incirca ogni 15 minuti. Schematicamente si presenta come in figura 3.1.

Esso è costituito da:

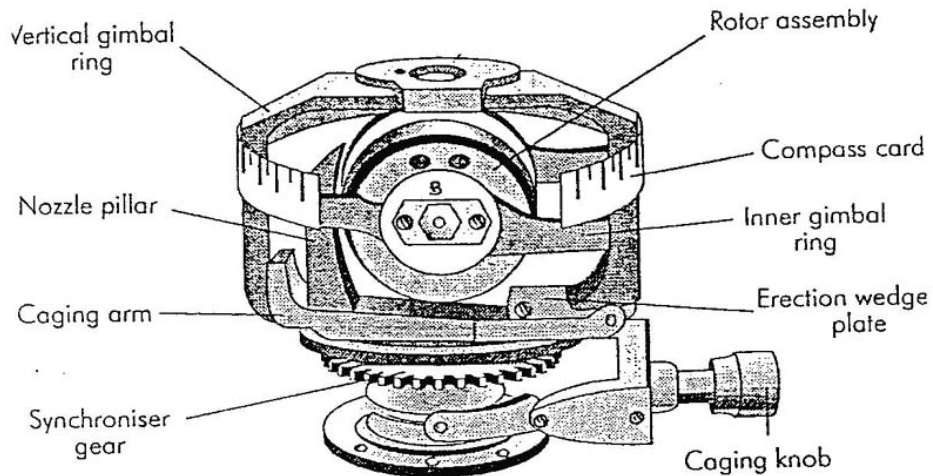


Figura 3.1: Struttura di un girodirezionale

- un frame (cassa) solidale al velivolo;
- un telaio esterno (che può ruotare rispetto al frame) al quale è vincolata e solidale una scala graduata circolare con valori da 0° a 359° ;
- un telaio interno mobile rispetto a quello esterno e che sostiene il disco del rotore;
- un pomello azionabile dal pilota che se premuto blocca l'inner e l'outer ring ad angoli retti ed è così possibile allineare il direzionale con le indicazioni della bussola.

A questo punto prendiamo in considerazione la fondamentale proprietà del giroscopio, ovvero la sua tenacia: questa lo indurrà a mantenere invariata la direzione indicata dall'asse di spin. Se ad esempio allineiamo quest'ultimo con la direzione del nord magnetico e lo inizializziamo correttamente in modo da renderlo parallelo alla superficie terrestre, quando il velivolo si muove l'asse di spin mantiene la direzione primitiva mentre la scala graduata, solidale col telaio esterno, fornisce una lettura diversa sotto la linea di fede perché la cassa si muove mentre l'insieme dei due telai e del rotore rimane fermo.

Il giroscopio funziona con un impianto pneumatico ad hoc, distinto da quello dell'aereo, che crea, tramite una pompa a vuoto, una depressione di circa 10 inch-Hg aspirando aria attraverso un filtro (idealmente potremmo creare una depressione

massima di -1 atmosfera, corrispondente a 29.92 inchHg). Una volta convogliato all'interno della cassa dello strumento, il fluido in questione è costretto a battere sulle palette ricavate dal rotore che funziona come una piccola turbina. La potenza necessaria a tale impianto viene prelevata direttamente dal motore tramite ingranaggi e le velocità di rotazione si aggirano attorno ai $14000 \div 15000$ giri/min. Il motivo per il quale si è scelto un impianto a vuoto è dovuto alla presenza di minori problemi di tenuta e di integrità dell'apparato; in figura 3.2 è rappresentato schematicamente il circuito dell'aria.

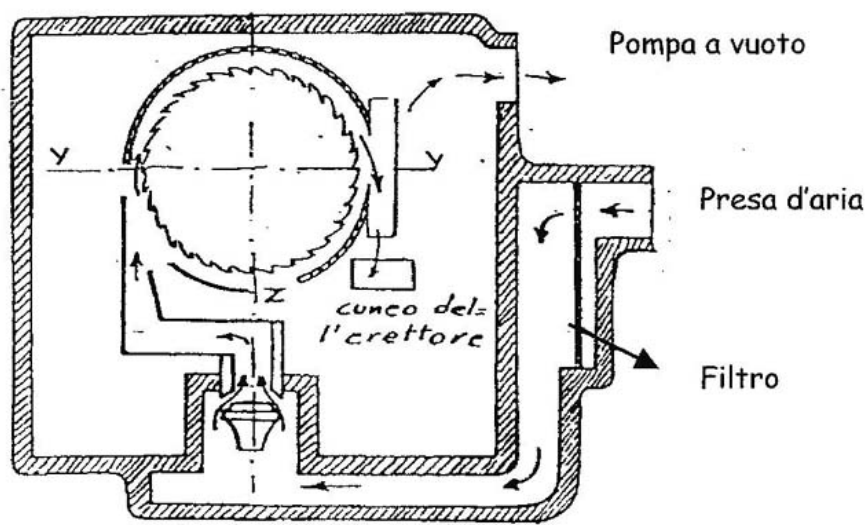


Figura 3.2: Impianto di funzionamento del giroscopio del girodirezionale

3.2 I problemi del girodirezionale

La *precessione reale* è dovuta al fatto che il baricentro in realtà è scostato dal punto ideale di intersezione dei tre assi; per cui un disallineamento è sempre presente, anche se si cerca di bilanciare il più possibile il rotore. Se ad esempio si effettua una virata, l'asse spin grazie alla tenacia non cambia direzione e, se si suppone che il telaio esterno sia contenuto nel piano di simmetria del velivolo parallelo all'asse longitudinale, compare una rotazione attorno all'asse di sospensione del telaio esterno Z e si genera un momento di attrito per il quale l'asse di spin perde la direzione

iniziale e tende a seguire la prua dell'aereo. Questo è ovviamente un errore che si può contenere curando la costruzione e prestando particolare attenzione alle caratteristiche inerziali del giroscopio. Inoltre possiamo affidarci ai sopra citati sistemi erettori, tipici dei giroscopi pneumatici, per cui l'aria, dopo aver colpito le palette del rotore, va a battere su un cuneo che non è altro che una sezione del braccio del telaio esterno opportunamente sagomato: quando l'asse di spin non si mantiene perpendicolare all'asse di sospensione del telaio esterno Z , il flusso d'aria non è più simmetrico rispetto al cuneo e quindi nasce una forza di reazione che genera un momento precessionante reale che obbliga l'asse di spin a recuperare **la perpendicolarità** con l'asse Z , infatti la funzione primaria del sistema erettore consiste nel mantenere questi due assi perpendicolare fra loro. In questo modo però l'asse di spin non si mantiene più tangente alla superficie terrestre a meno che l'asse Z del velivolo non sia parallelo alla verticale locale. Se infatti si esegue una manovra di salita, il sistema erettore tende a far allineare l'asse di spin con quello longitudinale dell'aereo. Da ciò si deduce che il sistema erettore è perturbante in quanto individua le *false directions*, tuttavia il giroscopio precessiona con velocità talmente ridotta in modo tale da non creare grossi problemi nel corto periodo se non dopo una serie di manovre, dopo le quali si dovrà per forza di cose riallineare lo strumento con la bussola.

Per quanto riguarda la *precessione apparente*, distinguiamo i soliti due problemi:

1. durante uno spostamento dall'equatore al polo nord sarà utile il sistema erettore perché man mano che ci si sposta aiuta ad allineare l'asse di spin con la superficie terrestre, evitando di incappare nel famoso fenomeno di sovrapposizione di due assi chiamato *gimbal lock*;
2. la velocità di rotazione della Terra influisce in funzione della latitudine, per ovviare a questo problema si può:
 - (a) con un computer di bordo calcolare la precessione apparente relativa a ciascuna latitudine e fare di volta in volta le correzioni opportune;
 - (b) sbaricentrare con un piccolo peso il giroscopio che, grazie a una precessione indotta intorno all'asse Z , recupera l'errore. L'unico inconveniente

è che il dadino è lo stesso per tutte le latitudini per cui è necessario calibrarlo in funzione di una latitudine intermedia (45°);

- (c) affidare direttamente al pilota il recupero delle indicazioni dalla bussola; questa integrazione di informazioni andrebbe eseguita all'incirca ogni 15 minuti.

Ulteriori errori derivano dal cosiddetto fenomeno del *gimballing error* che si verifica quando i tre telai non sono mutuamente perpendicolari.

I moderni giroscopi direzionali sono fatti come mostrati in figura 3.3: la freccia sta a indicare che in una virata a destra di 30° la corona graduata ruoterebbe fino a far coincidere la linea di fede con l'indicazione di una prua di 330° .

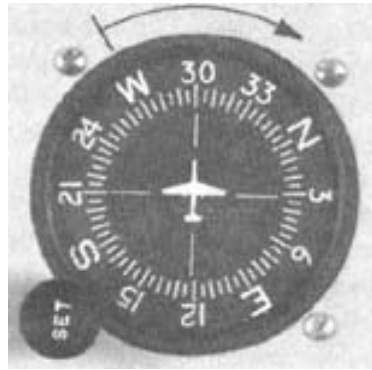


Figura 3.3: Un moderno giroscopio direzionale

Capitolo 4

Virosbandometro

Indice del capitolo

4.1	Utilizzo e funzionamento	19
4.1.1	Il rate gyroscope	19
4.1.2	Il bank indicator	21
4.2	Turn Coordinator	21

Figure

4.1	Struttura di un rate gyroscope	20
4.2	Comportamento del bank indicator durante una virata	21
4.3	Il virosbandometro	22
4.4	Il Turn Coordinator	22

4.1 Utilizzo e funzionamento

Questo strumento è composto da due meccanismi, uno giroscopico per indicare il rateo di virata e l'altro pendolare per verificare che quest'ultima venga effettuata in maniera corretta. Vediamo quindi come vengono realizzati.

4.1.1 Il rate gyroscope

Per misurare il rateo di virata è usato un giroscopio ad un grado di libertà come quello mostrato in figura 4.1.

4.1.2 Il bank indicator

Oltre all'indicazione del rateo di virata è bene sapere anche se questa viene effettuata in modo corretto o meno, ovvero se la risultante delle forze di massa è allineata con la portanza (Figura 4.2).

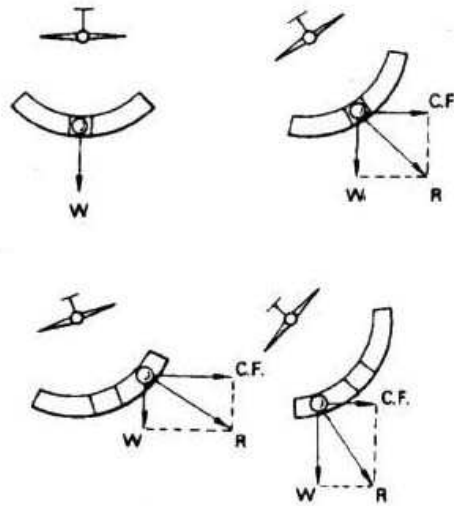


Figura 4.2: Comportamento del bank indicator durante una virata

Il metodo più usato è quello di introdurre una sfera in un tubicino trasparente curvilineo riempito di un fluido piuttosto viscoso. Questo è un sistema pendolare, quindi in volo livellato la sfera sarà posizionata nel centro del tubicino. Nel momento in cui l'aereo vira non correttamente, la sfera si sposterà dal centro del tubo, in particolare se tende ad andare verso l'interno vuol dire che stiamo eseguendo una *virata in scivolata* altrimenti si parlerà di una *virata in derapata*. Per correggere la virata basta che il pilota dia pedale dalla parte in cui vede spostarsi la sfera.

La combinazione dei due meccanismi appena descritti ci dà il virosbandometro, che in cabina si presenta come in figura 4.3.

4.2 Turn Coordinator

Una evoluzione del virosbandometro è dato da questo strumento, che serve al pilota per coordinare la virata. La caratteristica che lo distingue è data dal fatto che il

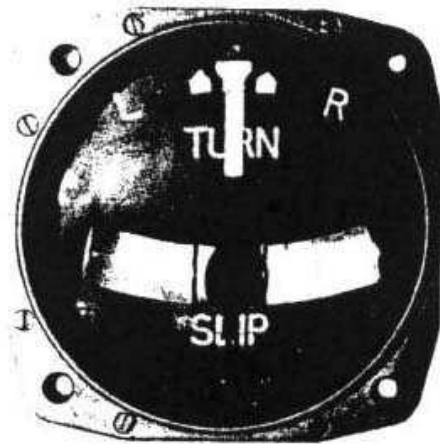


Figura 4.3: Il virosbandometro

vincolo del suo telaio con quello dell'aereo giace su un piano inclinato di 30° rispetto all'asse longitudinale.

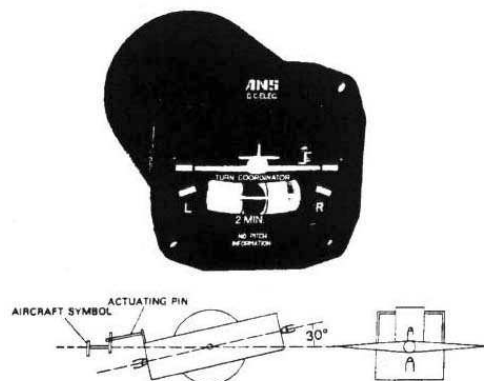


Figura 4.4: Il Turn Coordinator

Non da un'informazione di angolo di bank, bensì di velocità di virata infatti quando l'ala va a coincidere esattamente con la tacca di left o right, noi sappiamo che per effettuare una virata di 360° impiegheremmo il tempo indicato sullo strumento stesso sotto lo sbandometro (Figura 4.4). Il valore standard è di 2 minuti ovvero viriamo a 3 gradi al secondo.

Elenco delle figure

1.1	Struttura di un giroscopio	2
1.2	Effetti dovuti alla rotazione della Terra	4
1.3	Effetti dovuti alla curvatura terrestre	5
1.4	Scomposizione del vettore velocità lungo le tangenti al meridiano e parallelo locale	6
2.1	Quadranti tipici di un orizzonte artificiale	8
2.2	Quadrante di una virata di 30° a sinistra	8
2.3	Struttura di un orizzonte artificiale	9
3.1	Struttura di un girodirezionale	15
3.2	Impianto di funzionamento del giroscopio del girodirezionale	16
3.3	Un moderno giroscopio direzionale	18
4.1	Struttura di un rate gyroscope	20
4.2	Comportamento del bank indicator durante una virata	21
4.3	Il virosbandometro	22
4.4	Il Turn Coordinator	22