

Velocità di decollo di un aereo misurata con CBL™

Contributo al 2° Congresso Nazionale ADT, Montesilvano, 20-22 ottobre 2000

L'accelerometro Vernier per CBL

L'accelerometro Vernier, che può essere usato con CBL o con altre interfacce (Coach, ULI...) è un sensore analogico che fornisce una tensione proporzionale alla forza esercitata su una piccola massa, sospesa nel sensore stesso.

Per effetto della sua inerzia la massa, sospesa ad un supporto flessibile solidale con l'involucro del sensore, applica al supporto con una forza proporzionale alla accelerazione ad essa impressa, e questo trasforma il sensore di forza in un sensore di accelerazione.

Ovviamente il sensore è direzionale: quando esso è tenuto fermo con la freccia marcata sull'involucro puntata verso il basso, la massa sente nel campo gravitazionale una forza verso il basso che fornisce all'uscita un valore tra 0 e 5V: in questo caso l'accelerometro misura l'accelerazione di gravità. Se lo si capovolge, esso sente la medesima forza ma di segno opposto: a questa corrisponde un diverso valore di tensione all'uscita. Se infine il sensore viene tenuto con la freccia orizzontale la tensione all'uscita è quella che corrisponde a forza nulla esercitata sulla massa inerziale, e cioè ad accelerazione nulla.

Queste considerazioni fanno capire come si può eseguire una calibrazione sfruttando l'onnipresente accelerazione di gravità: si tiene fermo il sensore con la freccia in giù e si attribuisce il valore $+9.8 \text{ m/s}^2$ alla misura, poi lo si capovolge e si attribuisce a questa seconda misura il valore -9.8 m/s^2 . Si verifica infine che, una volta tarato, la misura con il sensore orizzontale dia il valore zero.

Per CBL esistono tre tipi di accelerometri: due monoassiali, che si distinguono solo per il fondo scala (rispettivamente 5g e 50g), e uno triassiale composto da tre distinti sensori che misurano l'accelerazione lungo tre assi ortogonali. Tutti sono ottenuti impiegando circuiti integrati prodotti dalla Analog Devices (i monoassiali impiegano gli integrati ADXL05 e ADXL50).

Misura della velocità di un aereo di linea al momento del decollo

L'idea di questo esperimento mi è stata fornita da Lars Jakobsson, che insegna Matematica presso l'Università di Lund (Svezia), e che lo ha illustrato nel Meeting dei coordinatori di T³-Europa questo agosto a Chantilly (Francia). Dato che mi è sembrato facile da eseguire e interessante, ho deciso di provarlo, durante un volo da

Venezia a Barcellona, in occasione del congresso GIREP-2000 sulla didattica della fisica.

L'idea è la seguente: si misura l'accelerazione orizzontale dal momento della partenza fino a pochi secondi dopo il distacco da terra; dato che l'aereo, quando prende il volo, si inclina bruscamente con il muso verso l'alto (aumentando drasticamente la portanza delle ali), l'accelerometro (che viene tenuto con la freccia orizzontale) sente oltre all'accelerazione orizzontale anche una componente dell'accelerazione di gravità, da quel momento in poi. Quindi l'istante del distacco viene segnalata da un aumento brusco della accelerazione misurata.

Per ricavare la velocità in quell'istante basta integrare l'accelerazione (area racchiusa dalla curva nel grafico accelerazione tempo). Infatti in un moto genericamente accelerato lungo una retta si ha:

$$v(t) = v(0) + \int_0^n a(t) dt$$

e nel nostro caso, dato che l'aereo parte da fermo si ha $v(0)=0$, e la velocità all'istante t_1 del distacco è proprio il valore dell'integrale.

Alternativamente, dato che l'accelerazione a_i viene misurata in modo discreto (in istanti separati t_i tra loro dall'intervallo di tempo Dt), si può ottenere l'andamento della velocità verso il tempo disegnando il grafico $v_j(t_j)$, ove $v_j = \sum_{i=1}^j (a_i Dt)$. In questo grafico la velocità al decollo è quella del punto in cui la pendenza della curva aumenta bruscamente (i valori successivi sono affetti da un errore sistematico dovuti all'effetto dell'accelerazione di gravità già accennato).

Un'altra informazione che è possibile estrarre dai dati è la lunghezza della corsa a terra dell'aereo: essa è misurata dall'area sottostante alla curva $v(t)$, dato che lo spazio percorso all'istante t_j è definibile come

$$s_j = \sum_{i=1}^j (v_i Dt)$$

Dati acquisiti durante il decollo di un Fokker 100

In partenza dall'aeroporto Marco Polo di Venezia, non sapevo se avrei trovato hostess e pilota ragionevoli, cui spiegare che ciò che volevo fare (anche se coinvolgeva "dispositivi elettronici") era assolutamente privo di interferenze con la strumentazione di bordo. Per questo motivo mi sono legato al polpaccio l'accelerometro con due elastici, facendo scorrere il cavo nel pantalone: in tal modo avrei potuto agevolmente

fare la mia misura con la piccola TI-89 connessa alla CBL2™ senza suscitare curiosità nei vicini. Prima di salire avevo preparato un SETUP con il sensore¹ nel canale 1, accuratamente tarato come sopra spiegato, e a bordo ho cercato l'inclinazione della gamba che forniva valore nullo di accelerazione in modalità MONITOR INPUT del programma PHYSICS: quella era la posizione in cui il sensore aveva la freccia posta lungo la orizzontale (i pavimenti degli aerei al suolo non sono sempre ben orizzontali). Ho atteso che l'aereo rullasse fino alla posizione di partenza e, quando ho sentito che il pilota dava potenza ai motori, ho fatto partire l'acquisizione. Questa era stata predisposta per un intervallo di campionamento di 0.5s e per 100 punti (avevo fortunatamente stimato correttamente che non ci voleva più di un minuto per decollare).

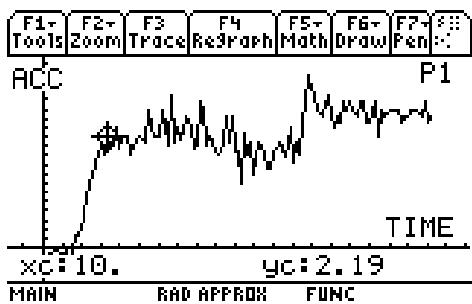


Fig.1 – Valori dell'accelerazione misurata verso il tempo

Elaborazione dei dati

Questa misura può essere eseguita facilmente utilizzando il programma PHYSICS oppure il programma DataMate: entrambi consentono di calibrare il sensore, di scegliere tempo di campionamento e durata della acquisizione, di disegnare il grafico dell'accelerazione in funzione del tempo e di calcolare l'integrale della curva tra due punti scelti a piacere. Tuttavia PHYSICS, nella versione sviluppata in Italia, offre il vantaggio di poter analizzare senza presenza di CBL anche dati acquisiti con DataMate, e non viceversa: quindi in queste note preferisco mostrare una elaborazione ottenuta con PHYSICS.

Selezionando il menu 3:ANALYZE e poi 3:STATS/INTEGRAL e infine 2:INTEGRAL, ho integrato la curva prodotta dal CHANNEL 1 tra l'istante di partenza e quello di distacco. In tal modo ho ottenuto le schermate di figura 2.

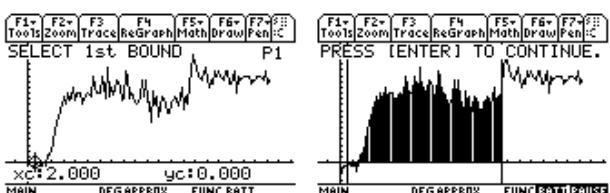


Fig.2 – Calcolo dell'area racchiusa sotto curva $a(t)$

1 Il modello LG-CBL, monoassiale a sensibilità maggiore.

Il risultato del calcolo è mostrato in Figura 3 e dà come velocità (68.9 ± 0.5) m/s, ovvero (248 ± 2) km/h. L'errore qui è stimato per difetto assumendo come incertezza solo 0.5 secondi sul tempo ($t_1 = 40 \pm 0.5$ s). Se si aggiunge una incertezza dell'1% sulla calibrazione dell'accelerometro si ottiene $v = (248 \pm 4)$ km/h.

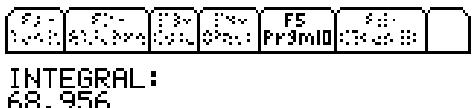


Fig.3 – La velocità al decollo in m/s

Questo valore, nonostante la rumorosità del segnale mostrata in figura 2, è abbastanza accurato: lo ho controllato chiedendo una stima della velocità al decollo al pilota (che a cose fatte mi sono permesso di disturbare, e che si è dimostrato gentilmente interessato alla cosa confermando la legittimità del mio comportamento) e questi, dai valori noti del peso dell'aereo (c'erano pochi passeggeri) mi ha dato la stima di circa (245 ± 10) km/h.

La rumorosità del segnale influisce poco sul valore calcolato, piuttosto è importante la determinazione dell'istante del distacco da terra. Questo è dimostrato da una procedura di calcolo equivalente alla prima, che utilizza il grafico della velocità v verso il tempo. Per ottenere tale grafico è sufficiente calcolare la lista dei valori $v_j = \Delta t S_{i=1,j} (a_i)$ che si possono ottenere semplicemente in ambiente DataMatrix Editor con il comando `cumsum()`, come mostrato in figura 4, ove $\Delta t = 0.5$ s.

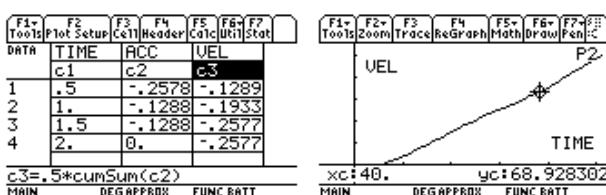


Fig.4 – Calcolo della velocità e determinazione del suo valore al decollo

Il grafico $v(t)$ ricavato in questo modo dai valori di $a(t)$ risulta straordinariamente lineare, per cui non è difficile individuare il punto in cui la pendenza cambia (per effetto della brusca variazione del valore misurato provocato dalla impennata dell'aereo). Nel nostro caso la velocità al tempo del distacco $t_1 = 40$ s risulta ancora ovviamente 68.9 m/s.

Circa la distanza percorsa a terra dall'aereo essa può venire calcolata come $L = \Delta t S (v_i)$, con la somma che

corre dall'istante iniziale al tempo t_1 , come mostrato in figura 5. Qui la conoscenza del valore di t_1 è necessaria, dato che non è facile individuare nella curva $s(t)$ il cambiamento di curvatura della parabola.

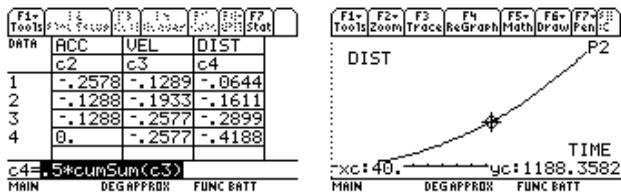


Fig.5 – Calcolo dello spazio percorso a terra e determinazione del suo valore massimo

Spostando il cursore (in modalità TRACE) lungo la curva $s(t)$ fino a raggiungere il tempo $t_1 = 40$ s si ottiene il valore $L = (1.2 \pm 0.1)$ km, ben compatibile con la lunghezza totale delle piste dell'aeroporto Marco Polo (la più lunga è 3.3 km e la più corta 2.9 km) e con il fatto che l'aereo su cui mi trovavo era abbastanza piccolo e poco carico.

Principio di funzionamento del sensore

Forse qualcuno è curioso di sapere come sia "fatto dentro" questo sensore. Nell'introduzione, per semplificare la spiegazione del suo comportamento si è detto genericamente che si tratta di un sensore di forza; più esattamente si tratta di una capacità variabile costituita da un elettrodo mobile (massa inerziale) posto tra due armature fisse: quindi la misura della accelerazione (in caso di movimento del sensore) ovvero della forza applicata (in caso di sensore fermo) che provoca lo spostamento dell'elettrodo centrale, si riduce ad una misura di variazione di capacità.

Un oscillatore pilota, in controfase alla frequenza di 1MHz, le due capacità in serie costituite dai tre elettrodi che formano il sensore (Figura 6). Le due capacità sono ricavate mediante microlitografia da un chip di silicio ritagliando l'elettrodo centrale (l'elemento sensibile che si muove per effetto dell'accelerazione) come doppio pettine i cui denti si affacciano ai due pettini che costituiscono le altre due armature fisse. La direzione in cui l'accelerometro è sensibile è quindi l'asse di simmetria del pettine centrale, che è tenuto in posizione da 4 sottili leve alle estremità.

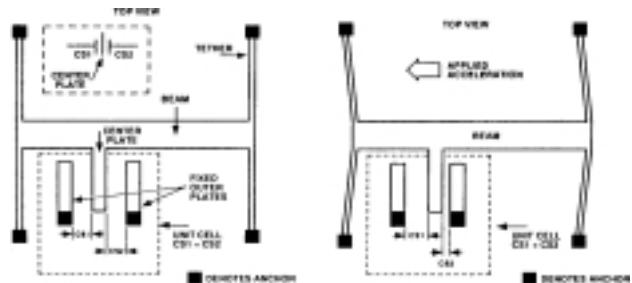


Fig.6 – Schema dell'elemento sensibile dell'accelerometro

Il segnale prelevato all'elettrodo centrale viene rivelato da un amplificatore a sensibilità di fase (synchronous demodulator) che rimuove i segnali spuri e guida un amplificatore che insieme fornisce il segnale di uscita e forza elettrostaticamente l'elettrodo centrale nella posizione di bilanciamento delle capacità (Figura 7).

Questo sistema di rivelazione del segnale e di retroazione garantisce una buona immunità al rumore e una buona linearità, e consente di discriminare tra le componenti positive o negative della accelerazione rispetto all'asse del sensore.

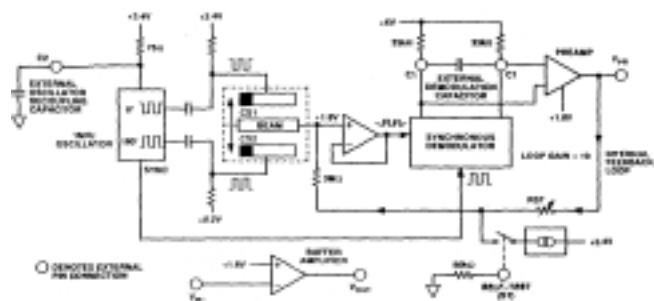


Fig. 7 – Schema dell'elettronica interna al sensore

Giacomo Torzo

INFN e Dip. Fisica dell'Università di Padova,
torzo@padova.infn.it