

Guida, Navigazione e Controllo: dalla Terra alla Luna

di Fabrizio Bernardini

I superlativi si sprecano quando si racconta la più grande avventura del XX secolo: l'esplorazione umana della Luna che culminò tra gli anni '60 e '70 con il programma Apollo. Tra i tanti "miracoli" tecnologici sviluppati nell'ambito del programma e nel ristretto intervallo temporale di un decennio, si deve annoverare senza dubbio il sistema di Guida, Navigazione e Controllo sviluppato sia per il Modulo di Comando e Servizio che per il Modulo Lunare, i due veicoli abitati del progetto Apollo. Sebbene in quest'ambito gli aspetti di interesse siano molteplici ("in primis", lo sviluppo del computer di bordo), ci limiteremo in questo articolo a spiegare quali furono i metodi ideati per viaggiare dalla Terra alla Luna in maniera indipendente ed autonoma.

Introduzione

Il problema che gli specialisti del MIT, Massachusetts Institute of Technology, dovettero affrontare all'inizio degli anni '60 era senza precedenti. Nonostante le formulazioni necessarie per realizzare un sistema di Guida, Navigazione e Controllo fossero note, la necessità di dotare gli astronauti dell'Apollo di un sistema *completamente autonomo* dai sistemi a terra (per scongiurare che la perdita dei collegamenti radio potesse avere conseguenze tragiche) impose un contesto di progetto di portata quasi irraggiungibile. Ma l'inventiva di quegli anni, difficilmente riscontrabile oggi, risolse brillantemente il problema; e lo risolse ricorrendo ad una versione avanzata dello strumento simbolo stesso della navigazione, il sestante, coadiuvato da sensori e da un computer così avanzato per l'epoca da suscitare ancora interesse oggi.

Navigazione: sistema in grado di determinare la posizione e la velocità attuali e di mantenerne aggiornata la conoscenza per mezzo di diversi sensori.

Guida: sistema che genera i comandi necessari per passare dalla posizione (e velocità) attuali alla posizione (e velocità) desiderate.

Controllo: sistema che interpreta i comandi di guida e agisce sugli organi di moto del veicolo per effettuare le variazioni di moto comandate.

La missione

Per andare dalla Terra alla Luna e ritorno, la missione venne divisa in fasi:

- il lancio, fino all'orbita terrestre
- l'immissione in una traiettoria translunare
- la navigazione tra la Terra e la Luna
- l'immissione in orbita lunare
- la permanenza in orbita lunare (durante la quale il Modulo Lunare scende sulla superficie per poi ripartire per riagganciarsi al Modulo di Comando)
- l'uscita dall'orbita lunare verso la Terra
- la navigazione tra la Luna e la Terra
- il rientro nell'atmosfera terrestre.

Ognuna di queste fasi fu caratterizzata da precisi requisiti di Guida, Navigazione e Controllo

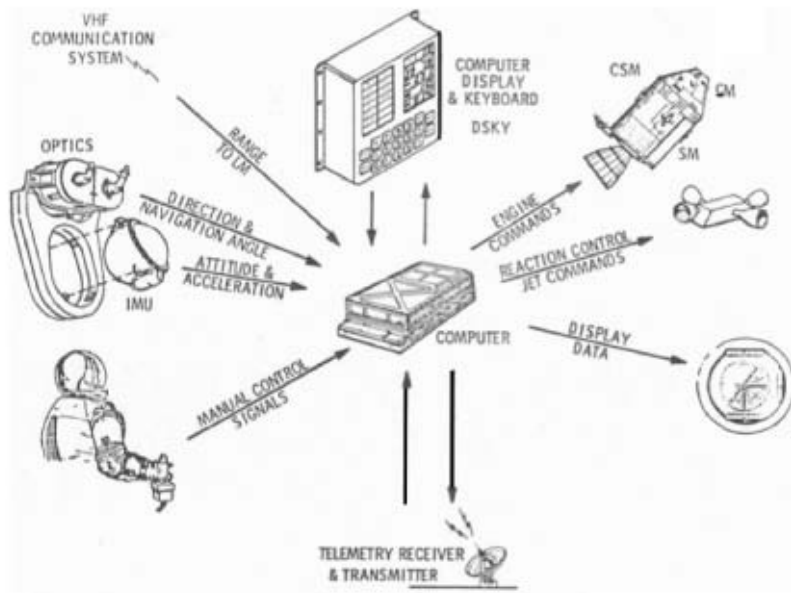
Nel termine composito di Guida, Navigazione e Controllo (Guidance, Navigation and Control, o GN&C) è racchiusa l'essenza stessa del problema antico come l'uomo della gestione dello spostamento di un veicolo da un luogo ad un altro. In questa moderna interpretazione il problema viene diviso in tre parti: la Navigazione (per determinare dove ci si trova e che percorso seguire), la Guida (per determinare le azioni necessarie a seguire il percorso stabilito) ed il Controllo (per mettere in pratica le decisioni di guida). In un sistema tecnologico queste tre parti operano concorrentemente e continuamente fino al raggiungimento della meta.

In questa breve serie ospitata da "Terra e Spazio" vogliamo descrivere per sommi capi alcuni aspetti di Guida, Navigazione e Controllo relativi a diverse esigenze di "trasporto" concentrandoci soprattutto sulla parte di Navigazione.

corrispondenti ad almeno altrettanti programmi all'interno del computer di bordo. Volutamente abbiamo tralasciato le fasi del volo del Modulo Lunare, per non appesantire troppo l'argomento. Per ridurre ulteriormente la complessità del discorso trascureremo pure i dettagli delle fasi "propulsive", come il lancio, l'entrata e l'uscita dall'orbita, concentrandoci dunque sull'essenza del problema della navigazione spaziale.

Il problema dell'assetto

Poiché il volo spaziale non ha vincoli di riferimento (come invece succede, ad esempio, nella navigazione marittima, vincolata alla superficie del mare) il problema di determinare la propria posizione richiede prima di risolvere il problema di determinare (e mantenere aggiornato) il proprio assetto, ovvero l'orientamento del veicolo rispetto al sistema di riferimento delle stelle fisse (un sistema di riferimento cosiddetto inerziale). Determinare l'assetto è un po' come dire, sulla superficie, in che direzione si sta guardando rispetto al Nord geografico (o magnetico), solo che nello spazio il "Nord" può essere, ad esempio, quello celeste oppure l'asse di rotazione di un pianeta o ancora la verticale locale rispetto alla superficie che si sta sorvolando. Tutti i



riferimenti sono comunque, in un modo o nell'altro, riconducibili alla sfera celeste.

La determinazione dell'assetto è concettualmente facile: utilizzando un piccolo telescopio solidale con il veicolo si osserva prima una stella nota, poi si ruota il veicolo fino ad osservare un'altra stella nota, a circa 90 gradi dalla prima. Le due misure danno, senza ambiguità, il rilevamento dell'assetto del veicolo. L'assetto così determinato deve essere poi mantenuto aggiornato, per non dover ripetere continuamente la procedura. Per questo si ricorre ad un dispositivo giroscopico denominato IMU (Inertial Measurement Unit) altrimenti noto anche come Piattaforma Inerziale. Questo è costituito da tre giroscopi, montati rigidamente a 90 gradi uno rispetto all'altro ed individuanti un sistema di riferimento cartesiano. L'insieme dei tre giroscopi è libero di ruotare rispetto al veicolo perché vincolato alla struttura mediante tre assi di rotazione.

La posizione intorno ai tre assi è rilevata dal computer di bordo per determinare l'assetto del veicolo rispetto alla piattaforma inerziale.

Poiché i tre giroscopi mantengono fisso l'orientamento della piattaforma rispetto alle stelle fisse, è possibile legare l'assetto del veicolo alla sfera celeste in ogni istante.

In altre parole, la procedura di determinazione dell'assetto serve allora a stabilire il legame tra la piattaforma e la sfera celeste, mentre la misura degli angoli tra il veicolo e l'IMU offre il legame tra questo e la piattaforma.

Una volta effettuata la procedura di cui sopra, l'assetto del veicolo spaziale è sempre noto con una semplice trasformazione di angoli.

La navigazione stellare

Per un veicolo spaziale navigare con le stelle dovrebbe essere una cosa naturale, tuttavia per poter determinare la propria posizione nello spazio le stelle solamente non sono utili perché troppo lontane (infatti sufficientemente lontane da poterle considerare un sistema di riferimento indipendente dalla posizione).

Il problema si risolve in maniera classica. Come sul mare si ricorre al sestante per misurare con precisione

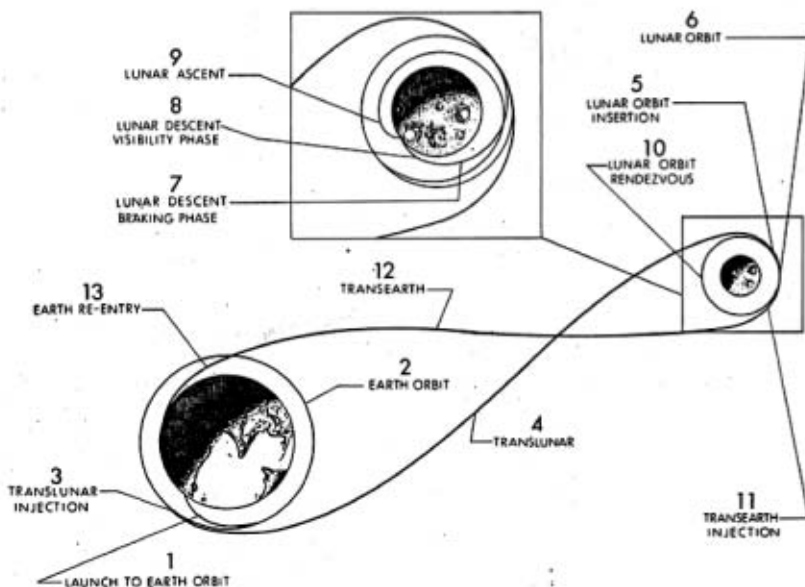
l'altezza di un astro dall'orizzonte (relativamente vicino), così i veicoli del progetto Apollo usavano un sestante per determinare la distanza tra una stella ed un corpo celeste (relativamente vicino).

Durante il volo tra la Terra e la Luna, è possibile triangolare la posizione del veicolo nello spazio dall'intersezione di due circonferenze non complanari, usando anche qui due misure, una rispetto alla Terra ed una rispetto alla Luna.

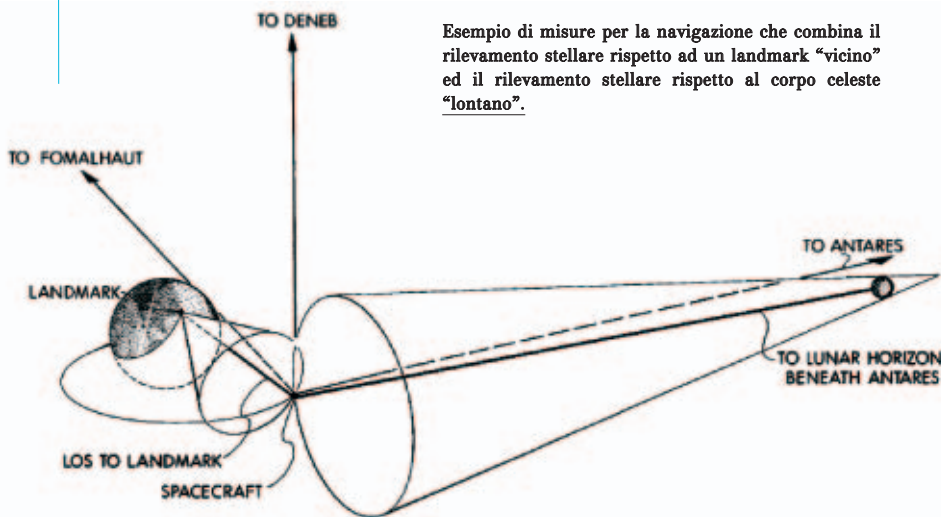
In considerazione della precisione richiesta dalle misure non è ovviamente possibile usare la Terra o la Luna come "punti" perché relativamente troppo grandi. Si usa allora, come riferimento, l'orizzonte del corpo celeste e, più precisamente, il punto dell'orizzonte che si trova proprio "sotto" la stella usata per la misura.

Il "sestante spaziale", anch'esso montato solidale alla struttura del veicolo, e vicino al telescopio menzionato nel paragrafo precedente, veniva allora usato ruotandolo al fine di allineare una scala graduata con la retta che congiunge la stella con l'orizzonte prescelto e misurando l'angolo orizzonte-stella. La misura era mediata dal computer di bordo che mediante sensori determinava l'angolo richiesto nell'istante preciso in cui l'astronauta-navigatore pigiava un pulsante di "mark". Effettuata la misura, per esempio tra una stella e la Terra, si modificava l'assetto del veicolo per eseguire una misura analoga tra un'altra stella e la Luna. Dalle due misure il software di bordo era in grado di desumere accuratamente la posizione del veicolo nello spazio. Con misure successive, anche dopo poco tempo, era possibile registrare altre posizioni e, dalla successione di queste, si ricavava anche la velocità del veicolo.

La misura dell'angolo tra una stella e l'orizzonte poneva, nel caso della Terra, un problema non indifferente: quello della determinazione dell'orizzonte nonostante la presenza dell'atmosfera. L'errore introdotto era infatti sensibile se non si adottavano accorgimenti particolari che andavano dall'utilizzo, nel sistema di navigazione, di un sensore elettronico di orizzonte (che lavorando nell'infrarosso non "vede" l'atmosfera) e l'addestramento degli astronauti per una buona stima ottica dell'orizzonte reale. In casi estremi, per misure di



Esempio di misure per la navigazione che combina il rilevamento stellare rispetto ad un landmark "vicino" ed il rilevamento stellare rispetto al corpo celeste "lontano".



emergenza, era anche possibile definire come misura anche l'istante di tempo in cui una determinata stella veniva ad essere occultata dall'orizzonte della Terra o della Luna. Misure di questo tipo, che richiedevano solo la misura del tempo anche per mezzo dei cronografi da polso degli astronauti, potevano essere inviate a terra via radio, dove la posizione del veicolo veniva subito calcolata.

La navigazione in orbita

Quando in orbita intorno alla Terra o alla Luna, il metodo preferito di determinazione della posizione (e della velocità) era simile al precedente ed analogo alle tecniche di triangolazione usate in navigazione costiera. In pratica il sestante spaziale veniva usato per determinare la direzione precisa di un oggetto chiaramente identificato sulla superficie, un 'landmark'. I 'landmark' erano predefiniti in base alle esigenze di missione e se per la Terra si potevano usare caratteristiche geografiche in un certo senso familiari, sulla Luna si dovettero definire punti su un territorio alieno e dai pochi riferimenti utili per l'orientamento. In pratica furono molto spesso considerati come 'landmark' lunari i pinnacoli formati al centro dei crateri di più grandi dimensioni ovvero alcune montagne particolarmente riconoscibili.

Da misure successive effettuate sullo stesso 'landmark', o da misure effettuate su 'landmark' diversi, il computer di bordo era in grado di "raffinare" la posizione del veicolo fino alla precisione richiesta. Per queste misure l'astronauta-navigatore operava

con il telescopio, orientando il veicolo alla ricerca del 'landmark' e con il sestante per misurare l'angolo lungo una direzione di riferimento. Un livello superiore di precisione si otteneva includendo anche misure stellari. In particolare era possibile combinare misure stellari che usando la Terra (se in orbita intorno alla Luna, o viceversa) come riferimento, oppure utilizzare misure stellari direttamente con riferimento ad un 'landmark'.

Il vettore di stato

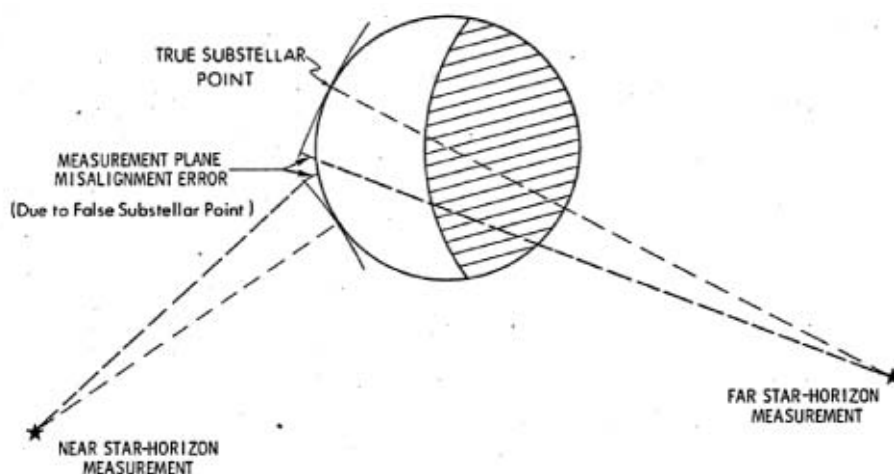
Di un veicolo spaziale, per poter espletare le diverse funzioni di Guida, Navigazione e Controllo, occorre allora conoscere il cosiddetto "vettore di stato". Questo termine racchiude semplicemente la nozione della Posizione e della Velocità del veicolo in un preciso istante di Tempo. In condizioni "nominali" (termine gergale per dire "quando tutto va come previsto") è l'infrastruttura di terra che determina posizione e velocità del veicolo e comunica il vettore di stato al computer di bordo dello stesso. All'astronauta rimane solo il compito di verificare, di tanto in tanto, il

corretto riferimento di assetto. Altrimenti abbiamo visto come sia possibile determinare posizione e velocità autonomamente. Una volta noto il vettore di stato è possibile aggiornarlo, o meglio "propagarlo" nel tempo, per mantenere una stima attuale di posizione e velocità e per calcolare nuove traiettorie o altre manovre. Il computer di bordo dei veicoli Apollo effettuava questo compito in tre modi diversi. Quando in orbita intorno ad un pianeta, il vettore di stato veniva aggiornato applicando "semplicemente" le formule kepleriane del moto intorno ad un corpo celeste. Quando in volo tra la Terra e la Luna le stesse formule dovevano essere applicate con riferimento al corpo "gravitazionalmente" più vicino, ma tenendo conto anche degli effetti perturbativi dell'altro corpo e del Sole. In pratica si definiva una zona di confine, detta "sfera di influenza", che definiva se usare la Terra o la Luna come corpo di riferimento primario. Quando ci si trovava nella "sfera di influenza" della Terra, si usavano la Luna ed il Sole nei calcoli perturbativi, altrimenti (nella sfera di influenza della Luna) si usavano la Terra ed il Sole. Per questi due modi di "propagazione" le imprecisioni di "propagazione" del vettore di stato si accumulavano però nel tempo ed era sempre possibile "correggere" la stima attuale mediante qualche osservazione di stelle o di 'landmark' fatte con il sestante.

Il terzo modo per propagare il vettore di stato veniva usato durante le manovre propulsive.

Le manovre

Una volta noti in ogni istante l'assetto del veicolo, la sua posizione e la sua velocità, è possibile calcolare nuove traiettorie utilizzando diverse funzioni del sistema di guida. Se si escludono il lancio dalla Terra ed il





L'astronauta Jim Lovell durante l'esecuzione di misure di navigazione alla postazione di lavoro del sestante e del telescopio. Notare a destra, in alto, il pannello di controllo del computer di bordo.

rientro nell'atmosfera, le manovre più critiche erano le immissione nelle traiettorie trans-lunare e trans-terrestre, e le manovre orbitali per il 'rendezvous' tra il Modulo Lunare ed il Modulo di Comando e Servizio.

Ogni manovra veniva precalcolata a Terra e a bordo si verificava che il computer del veicolo arrivasse alla stessa "soluzione". Ovviamente era possibile calcolare le manovre in maniera del tutto autonoma. Con "calcolare una manovra" si intende sostanzialmente la determinazione dell'istante di tempo di accensione del motore di manovra, della durata della spinta e la direzione della stessa. L'esecuzione della fase di spinta era di solito effettuata dal computer di bordo che, oltre a rispettare i tempi, si preoccupava di rispettare anche le direzioni di spinta al fine di ottenere le variazioni di velocità necessarie.

Durante le fasi di spinta le leggi kepleriane per l'aggiornamento del vettore di stato non sono più applicabili e si utilizzava un terzo modo che faceva tesoro delle accelerazioni misurate mediante appositi sensori e dalla nozione della forza gravitazionale impartita dal pianeta nel punto in cui ci si trovava. Integrando tali informazioni secondo le leggi della dinamica era possibile aggiornare continuamente il vettore di stato del veicolo al punto tale da poter calcolare, per certe manovre, una correzione di spinta in tempo reale. In questo senso le funzioni di Navigazione e di Guida operavano concorrentemente fino al termine della manovra. Al termine della stessa si riprendeva la "propagazione" convenzionale del vettore di stato e se necessario se ne raffinava la conoscenza con qualche misura di navigazione.

Conclusioni

Non è possibile descrivere in poco spazio tutti gli aspetti di questo affascinante argomento. E' interessante però ricordare che quando, nel Dicembre del 1968, tre astronauti lasciarono per primi l'orbita terrestre alla volta della Luna (Apollo 8), il sistema di navigazione non era mai stato dimostrato a distanze lunari. I risultati dimostrarono che era possibile affrontare in modo indipendente tutte le fasi critiche della missione inclusi l'inserimento in orbita lunare (errore inferiore alle 2 miglia nautiche nella stima del perilunio) ed il rientro nell'atmosfera terrestre (errore intorno agli 0.1 gradi nel corridoio di rientro).

Autore

FABRIZIO BERNARDINI

ANTAS

CAD TERRITORIALE INTEGRATO

ANTAS OFFICE

L'unico applicativo integrato che comprende TUTTE le funzioni indispensabili per i calcoli, la restituzione, la gestione, la progettazione del territorio

ANTAS MOBILE

Il cad territoriale per palmare, ovvero come portarsi l'ufficio in campagna

Leonardo
Laboratori

Leonardo Software House S.r.l.
Via Turati, 4/d - 09045 Quartu Sant'Elena (CA)

Sede commerciale ed assistenza:
Viale Colleoni, 5 - 20041 Agrate Brianza (MI)
Tel. 039 60.91.763 - Fax 039 60.91.782
www.leosh.com - e-mail: leonardoab@leosh.com