

STAR – Solare Termodinamico ad Alto Rendimento



Relazione di fine progetto

E. Pace, M. Focardi, M. Pancrazzi, A. Gherardi

Dip. Astronomia e Scienza dello Spazio - UniFI

Sistema di controllo attivo dei moduli di STAR

Il semestre conclusivo del progetto STAR è stato dedicato alla realizzazione delle idee e delle soluzioni individuate durante le ricerche svolte nel secondo semestre, oltre alle calibrazioni indispensabili per il corretto funzionamento del prototipo. Alcune delle soluzioni descritte nel rapporto precedente sono state riviste e modificate in corso d'opera, per adattarle nel migliore dei modi alla fase di montaggio del concentratore solare a vantaggio del miglior funzionamento e della semplicità d'uso.

Le caratteristiche del sistema di controllo attivo

Il sistema di controllo del modulo ad otto pannelli orientabili, consiste nell'insieme dei sistemi hardware e software per l'orientamento degli specchi, che operano al fine di massimizzare il fattore di concentrazione del sistema. L'ottimizzazione della concentrazione si ottiene agendo sul singolo specchio in modo tale da impostare, ad intervalli di tempo significativi, la migliore orientazione del singolo pannello in SMC così che l'involuppo complessivo dei pannelli del concentratore ottimizzi la curvatura dello specchio primario per la posizione corrente del Sole.

Innanzitutto ciò si realizza con un corretto inseguimento in azimut ed in elevazione del Sole, in modo tale da implementare un eliostato, ossia una specie di telescopio per l'osservazione della nostra stella che consenta di mantenere la sua immagine in una posizione stazionaria al trascorrere del tempo (la bocca del corpo nero). In secondo luogo, data la posizione in cielo del Sole, si devono orientare i singoli pannelli in modo da realizzare un sistema ottico *stigmatico* (ossia privo di aberrazioni o, almeno, con aberrazioni ridotte al minimo) per quella precisa posizione.

In realtà, ciò che cambia, man mano che il Sole aumenta la propria altezza sull'orizzonte, è la focale dello specchio primario, che si deve adattare alle mutate condizioni geometriche di osservazione. In pratica ciò si realizza aumentando il raggio di curvatura dell'involuppo degli specchi che costituiscono il primario, mentre il Sole sale sull'orizzonte. Alla culminazione (il

mezzogiorno vero locale) il raggio di curvatura è stazionario e diminuisce man mano che il Sole procede verso il tramonto.

Sia l'inseguimento primario che il sistema di adattamento dell'involuppo dello specchio sono stati realizzati come descritto nella relazione del semestre precedente, apportando opportune correzioni ove ritenute necessarie.

L'inseguimento in azimut

L'inseguimento in azimut è stato implementato attraverso l'impiego di un carrello mobile posizionato su un binario di raggio di curvatura pari a 11 m. Il binario è stato montato sulla terrazza est dell'Osservatorio di Arcetri e centrato sulla verticale dell'asse di rotazione dello specchio secondario, posto a circa 6 metri di altezza rispetto alla superficie della terrazza (v. Foto n. 1).



Foto n. 1

La terrazza est dell'Osservatorio di Arcetri con il binario, lo specchio principale (a sx) e la torre per il supporto del secondario.

Lo specchio primario è montato sul carrello e si muove quindi sul binario descrivendo un arco di cerchio centrato sul corpo nero, in modo tale da seguire il Sole nel suo moto giornaliero in azimuth da est verso ovest. Tale soluzione permette di mantenere durante il giorno condizioni di simmetria rispetto al piano sagittale passante per l'asse verticale di simmetria del prototipo, per il centro del corpo nero e per il centro del Sole. Tali condizioni di simmetria semplificano lo sviluppo della logica di controllo ed inoltre consentono di testare, con un singolo modulo, tutte le posizioni occupate dai vari moduli come lo sarebbero in un intero campo solare.

La struttura tubolare del primario che sostiene gli specchi può inoltre ruotare intorno ad un asse verticale grazie ad un motore passo-passo dotato di controller proprio e un opportuno riduttore (v. Foto n. 2). Questa ulteriore movimentazione permette di testare il prototipo di STAR per le varie posizioni possibili all'interno del campo solare e consente di apportare alcune correzioni al moto di inseguimento, fondamentali per massimizzare l'efficienza di raccolta della radiazione.



Foto n. 2

La colonna di supporto dello specchio primario contenente lo stepper motor.

Lo stepper motor utilizzato per la movimentazione è un α step della serie AS con controllo del passo a loop chiuso, un motore di tipo innovativo che utilizza un controllo ad anello chiuso per eliminare la perdita del passo. Anche per il rilevamento e codifica della posizione del rotore viene utilizzato un sensore di nuova concezione che sfrutta la variazione dell'induttanza causata dal cambiamento della distanza tra i denti dello statore e i denti sul rotore.

L'azionamento è caratterizzato da un posizionatore integrato programmabile, dotato di memoria interna. La funzione integrata di generatore di impulsi consente il pilotaggio del motore direttamente da un controllore esterno, come un PLC o un personal computer. Il posizionatore integrato permette di sviluppare soluzioni semplici ed efficaci per le applicazioni che richiedono l'uso di motori passo-passo. Esso risulta programmabile da PC attraverso interfaccia seriale.

Quando lo specchio primario si trova, all'interno del campo solare, nello stesso piano verticale passante per il Sole e per il secondario, lo stepper motor non è azionato in quanto nessuna correzione si rende necessaria per questa configurazione. Al contrario lo stepper deve intervenire apportando delle correzioni le cui entità sono, in prima approssimazione, funzione del particolare giorno dell'anno. L'azionamento del motore avviene attraverso la comunicazione fra il controller principale (quello relativo ai moti di inseguimento in azimuth e in elevazione) e il controller dello stepper.

L'inseguimento in elevazione

L'inseguimento in elevazione è stato realizzato, invece, attraverso un martinetto a ricircolo di sfere, molto preciso (dell'ordine del centesimo di mm), che consente l'orientamento in altezza del telaio di supporto per gli specchi. Tale martinetto (v. Foto n. 3) è stato acquistato dalla ditta Weingrill di Torino, specializzata nella meccanica di precisione.



Foto n. 3

Il martinetto con vite a ricircolo di sfere di precisione.

Il telaio che supporta gli 8 specchi del modulo è realizzato con tubolari di alluminio ed è controllato in elevazione da un motore brushless Lexium BSH-0552M e relativo azionamento LXM05. La meccanica di precisione è dotata di vite in acciaio INOX e ruota elicoidale in bronzo ad alta resistenza. L'involucro esterno assicura un grado di protezione dagli agenti atmosferici IP65.

La motorizzazione e il controllo remoto

I motori utilizzati complessivamente per la movimentazione del primario sono dunque 3: due per l'azimut (carrello + correzione orizzontale) e uno per l'elevazione verticale del telaio. Il motoriduttore del carrello (v. Foto n. 4) è dotato di motore ed azionamento Lexium della stessa famiglia del motore utilizzato per la movimentazione in elevazione.



Foto n. 4

Il motoriduttore del carrello con la cinghia di trasmissione del moto.

Purtroppo, la tipologia di riduttore necessario e la posizione obbligata del motore all'interno della colonna di supporto, non hanno consentito di impiegare un motore della stessa famiglia per la movimentazione del telaio attorno all'asse verticale (correzione orizzontale), ma siamo stati costretti ad utilizzare il motore stepper precedentemente descritto con il controller dedicato.

Tutti gli azionamenti sono programmati e coordinati per il controllo contemporaneo dei motori attraverso un Lexium Controller LMC20 (v. Foto n. 5), realizzando una configurazione per il motion control denominata Lexium PAC. La soluzione PAC, attraverso il controller LMC20 consente di controllare fino ad un massimo di otto assi contemporaneamente. Il modulo, LMC20 di Lexium, rappresenta una soluzione ottimizzata per il comando e controllo di più assi con funzioni di automazione, grazie anche alla facilità d'integrazione nei sistemi di automazione industriali standard, attraverso i protocolli di comunicazione CANopen, Modbus ed Ethernet.



Foto n. 5

Il controller LMC20 (a dx) e il controller dello stepper motor (a sx).

Il protocollo Ethernet permette di accedere via Internet al web server integrato. Inoltre il pacchetto software in dotazione è caratterizzato da un'ampia libreria di blocchi funzione e dalla possibilità di programmare il controller o di utilizzarlo in modalità Jog (manuale).

L'integrazione del controller con i 2 motori dedicati Lexium è naturale, mentre qualche difficoltà in più la richiede l'interfacciamento del controller dello stepper. Tuttavia, anche se non semplicemente, come nel caso dell'azionamento e del controller Lexium, l'azionamento-controller dello stepper motor può essere interfacciato direttamente al PC di controllo attraverso il controller LMC20. Quest'ultimo si interfaccia al PC o laptop di controllo attraverso cavo Ethernet e protocollo ModBus (*motion control*). La connessione controller-azionamenti (*motion bus*) avviene sempre via cavo Ethernet e connettori RJ45, sfruttando il protocollo CANopen, una evoluzione del protocollo CAN.

I motori per la movimentazione in elevazione e lungo il binario di STAR sono dotati di encoders. In particolare l'encoder del motore del martinetto a ricircolo di sfere è di tipo incrementale e

necessita esternamente di un microinterruttore per la determinazione del finecorsa di azzeramento, (posizione verticale).

L'encoder del motoriduttore del carrello è, invece, di tipo assoluto e consente di mantenere la posizione di riferimento anche in assenza di alimentazione.

Il carrello mobile su cui è installata la colonna di supporto del telaio monta un armadietto della ABB opportunamente protetto dagli agenti atmosferici (grado di protezione IP65) dentro al quale sono stati montati gli azionamenti, il controller dei motori e l'alimentatore a 24V DC per l'alimentazione dei medesimi e delle schede di controllo degli attuatori lineari (v. Foto n. 6).



Foto n. 6

L'armadio sul carrello, contenente i controllers, gli azionamenti, le protezioni e l'alimentatore.

L'alimentazione dei motori e dell'armadietto è del tipo monofase 220V AC, attraverso una catena portacavo, in modo da consentire il movimento del carrello lungo i binari, in andata e in ritorno, senza intralciare il moto. I cavi per il controllo e per l'alimentazione sono quindi passati all'interno della catena (v. Foto n. 7) disposta lungo il percorso dei binari in modo da semplificarne lo

svolgimento e il riavvolgimento. Sull'estradosso inferiore della catena sono state montate delle piccole ruote sferiche in acciaio in modo da facilitarne lo svolgimento e il riavvolgimento sul terrazzo. Il cablaggio della struttura mobile è, invece, in bassa tensione (24V DC), dalla quale vengono derivate tutte le altre tensioni necessarie al funzionamento dell'elettronica di controllo (queste sono generate sulle schede che implementano il microcontrollore PIC e che controllano gli attuatori lineari). Le tensioni DC disponibili sono quindi 24V e 5V.



Foto n. 7

Particolare della catena portacavi.

Inoltre, il carrello, è dotato di due ganci, con altrettanti tenditori per i cavi, che consentono la rotazione dello specchio secondario di pari passo con il primario. Infatti la rotazione dello specchio secondario avviene attraverso due tiranti guidati dal movimento del carrello lungo i binari. I tiranti sono stati realizzati con dei comuni tenditori e filo da pesca.

Lo specchio secondario è sostenuto da una struttura reticolare a tubi Innocenti, al contempo leggera ma non del tutto insensibile alle raffiche di vento. Lo specchio può ruotare intorno ad un asse verticale, la cui meccanica di precisione è stata interfacciata a quella della torre. In particolare

per consentire la rotazione dolce del secondario intorno al suo asse sono stati impiegati due dei medesimi cardani utilizzati per agganciare i pannelli in SMC al telaio di alluminio.

Il software di controllo per la movimentazione primaria

Per il controllo della movimentazione primaria si impiegano i dati tabulati per le posizioni del Sole (azimut ed altezza) che, opportunamente elaborati, forniscono le velocità e le accelerazioni relative ai moti lineari a cui devono essere sottoposti gli organi in movimento del carrello e del telaio. In particolare, i motori brushless devono essere configurati prima del loro utilizzo, tenendo conto dei rapporti di riduzione degli assi di movimentazione. In tal modo è possibile scegliere le unità di misura opportune, relativamente al grado di precisione richiesta. Nel nostro caso le unità di misura sono riportate nella tabella sottostante.

Posizione	mm/10
Velocità	(mm/10)/s
Accelerazione	(mm/10)/s ²

Le posizioni tabulate del Sole vengono fornite al sw di elaborazione dei dati tramite il Solar Position Algorithm (SPA), uno dei migliori algoritmi per inseguitori solari, sviluppato dal National Renewable Energy Laboratory (NREL) statunitense, ed opportunamente modificato per adattarlo efficientemente alla logica di controllo di STAR.

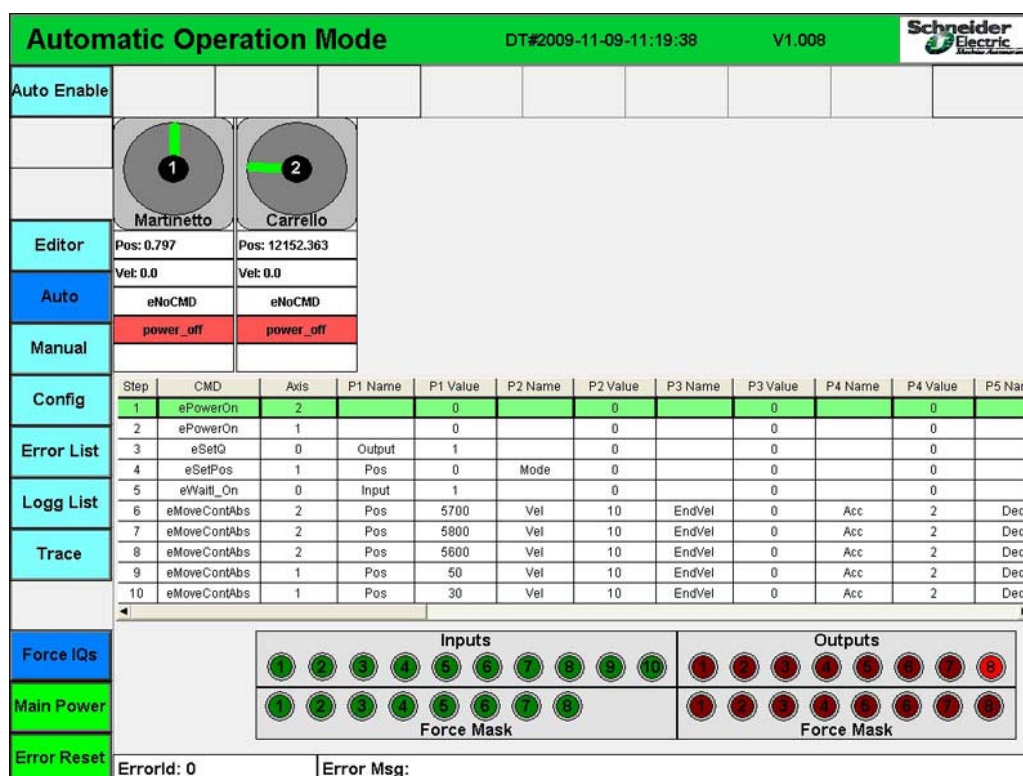


Foto n. 8

Il SW per il controllo dei tre motori principali.

Da tali dati e dalle condizioni geometriche al contorno (raggio del binario, configurazione geometrica del martinetto e del telaio ecc.) si ricavano le velocità e le accelerazioni lineari che caratterizzano i motori istante per istante. Queste ultime vengono impostate nel sw di controllo, realizzato nel linguaggio per PLC CodeSys a partire da una applicazione demo fornita dalla casa costruttrice (v. Foto n. 8).

In particolare i moti in azimut e in elevazione in funzione del tempo, ricavati da SPA, vengono approssimati attraverso opportuni fitting parabolici che forniscono i valori per le velocità iniziali di inseguimento e le accelerazioni, in modo da approssimare il moto apparente del Sole con una precisione dell'ordine del decimo del disco solare. In tal modo è garantita la corretta illuminazione del secondario da parte del primario.

Il sistema di controllo attivo degli specchi

Stabilite le caratteristiche geometriche e la posizione di riferimento dei singoli specchi (assunti come rigidi) nell'array del concentratore, per una data locazione geografica e un dato

giorno ed ora dell'anno, è possibile determinare le inclinazioni che devono assumere nel tempo i singoli specchi rispetto ad un asse verticale ed uno orizzontale di rotazione in modo da convogliare efficientemente la radiazione verso il corpo nero. Questi angoli di inclinazione, nel caso del concentratore sviluppato, possono essere di fatto modificati dall'azione del vento e, in minor misura, dalla gravità. Quindi, attraverso un monitoraggio continuo dei valori di tali angoli e il confronto con le inclinazioni teoriche che dovrebbero assumere gli specchi, è possibile ottenere una informazione di retroazione che ci consente di agire efficacemente sugli specchi di STAR.

Tuttavia, data la rigidità dei supporti in SMC, le correzioni legate alla gravità sono di fatto trascurabili rispetto all'azione del vento, ai giochi meccanici, e soprattutto all'entità delle correzioni relative alla forma che deve assumere lo specchio in un determinato istante, per adattare la sua superficie a quella teorica.

Nella Foto n. 9 è illustrato il retro della struttura di supporto del singolo specchio rigido, progettata dal Dip. di Meccanica e Tecnologie Industriali (UniFI) e realizzato in SMC dalla ditta Ronda HiTech di Vicenza. Ogni pannello SMC è dotato di un cardano di supporto per i due assi (orizzontale e verticale) e da due punti di aggancio su cui si innestano due attuatori lineari. Gli attuatori sono dotati di encoder incrementali e consentono di misurare, indirettamente, gli angoli di rotazione della struttura. Il cardano e gli attuatori lineari sono agganciati a loro volta al telaio di supporto dell'intera struttura ad 8 specchi, come illustrato sempre nella Foto n. 9.

La posizione del cardano è mantenuta ad una distanza di progetto dal telaio da un proprio supporto fisso, uno stelo di alluminio filettato. L'avanzamento e l'arretramento dei pistoni degli attuatori lineari consente la movimentazione dello specchio intorno ad entrambi gli assi. Le caratteristiche meccaniche degli attuatori lineari, combinate con la risoluzione degli encoders, permettono di raggiungere una precisione teorica nel posizionamento degli specchi dell'ordine del decimo di mm.



Foto n. 9

Il pannello in SMC con i punti di aggancio per gli attuatori lineari e il cardano (in basso).

Gli attuatori lineari scelti sono il modello ALI1-F di MecVel, insieme alla scheda di controllo MDC2-24V-10 che permette di pilotare due attuatori contemporaneamente.

Questa scheda è stata interfacciata ad una seconda scheda di controllo progettata e sviluppata dal Dip. di Astronomia e Scienza dello Spazio (v. Foto n. 10).

Il cuore della scheda è costituito da un microcontrollore della famiglia PIC di Microchip (PIC 18F4680), che implementa nel firmware la logica digitale di controllo. Questo micro è

caratterizzato da interfaccia ECAN (Enhanced Controller Area Network) che implementa il protocollo CAN per comunicare con altre periferiche o microcontrollori, PLC e/o PC.

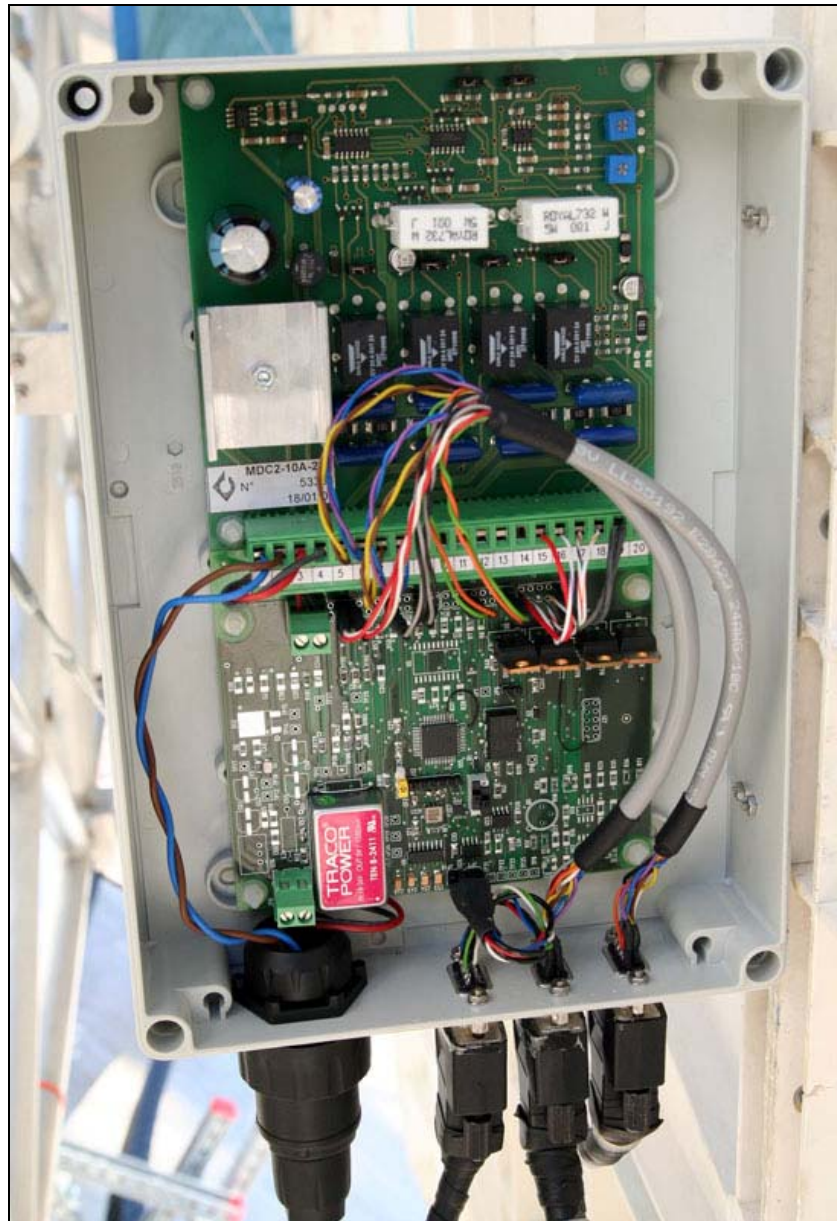


Foto n. 10

La scheda MecVel (in alto) e la scheda realizzata dal DASS (in basso).

Lo standard CAN è un protocollo di tipo seriale ed è stato inizialmente ideato per permettere comunicazioni broadcast in ambienti rumorosi (nell'accezione elettromagnetica del termine), quali quelli industriali o del settore automotive, anche su distanze dell'ordine delle centinaia di metri. Per il progetto STAR avevamo l'esigenza di usare un protocollo di comunicazione commerciale,

resistente alle interferenze e che permettesse la trasmissione, preferibilmente in broadcast, su distanze elevate (~100 m). Adattandosi molto bene il CAN alle esigenze richieste, è stato deciso di utilizzare proprio tale protocollo per il prototipo.

Il firmware del PIC comunica direttamente su bus CAN con il sw di alto livello installato sul laptop di controllo di STAR (v. Foto n. 11). Tutti i comandi di movimentazione degli specchi sono impartiti dalla logica di controllo sulla base della misura degli angoli e del loro confronto con quelli teorici derivanti dalla geometria intrinseca del modulo e dalla posizione del Sole, che viene tabulata e letta dal medesimo sw.

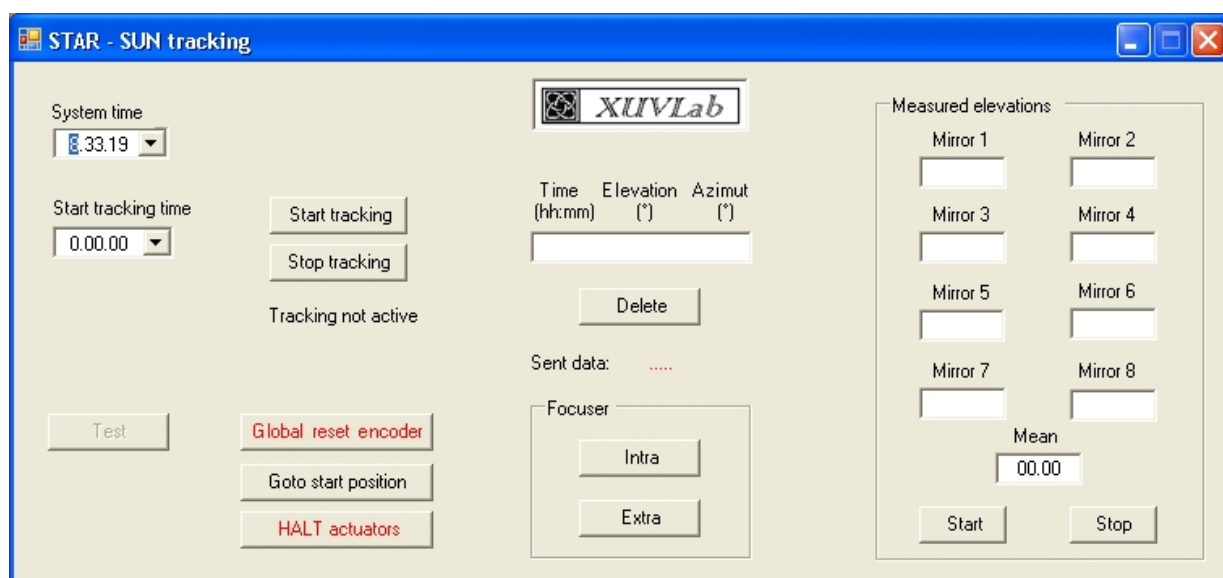


Foto n. 11

Il sw di controllo degli attuatori lineari per la movimentazione degli specchi.

Per la misura degli angoli, oltre agli encoder degli attuatori lineari, viene adoperato anche un vero e proprio inclinometro digitale. Questo consiste in un accelerometro MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) a due assi, ossia un dispositivo elettronico integrato miniaturizzato in grado di misurare accelerazioni statiche e dinamiche. Con tali dispositivi si può misurare, ad esempio la componente di accelerazione statica (l'accelerazione di gravità), funzione dell'inclinazione di uno degli assi dell'accelerometro rispetto alla direzione del filo a piombo

Una volta calibrati, tali dispositivi, se utilizzati in modo corretto, consentono di raggiungere precisioni nella determinazione degli angoli dell'ordine del primo d'arco, che è proprio l'ordine di grandezza richiesta nella misura degli angoli nel progetto STAR. Inoltre sono poco ingombranti,

hanno un peso totalmente trascurabile e da pochissimo tempo sono entrati nel mercato dell'elettronica dei consumabili, il che ha contribuito ad abbatterne drasticamente i costi.

Quindi, l'utilizzo combinato degli accelerometri per la misura degli angoli degli encoder degli attuatori lineari per muovere gli specchi 8v. Foto n. 12), consente di determinare la posizione di ogni specchio in tempo reale e di correggerla nei tempi caratteristici relativi alle variazioni di curvatura o di focale dell'involuppo primario. L'accelerometro serve, inoltre, a dare la posizione di zero agli encoder relativamente alle rotazioni intorno ad un asse orizzontale.



Foto n. 12

Particolare di un attuttore lineare con encoder e relativo interruttore di finecorsa.

Questa informazione viene combinata con l'informazione proveniente da dei micro-switch di finecorsa per l'azzeramento degli encoder incrementali relativamente all'asse di rotazione lungo la verticale. Gli interruttori di finecorsa per l'azzeramento degli encoder sono stati di fatto montati su supporti di alluminio fissati ai medesimi attuatori.

Un inconveniente nella misura degli angoli attraverso l'accelerometro consiste nel fatto che tale dispositivo è sensibile alle variazioni di temperatura e la risposta può quindi variare in funzione delle condizioni ambientali nell'arco diurno e/o stagionale. Tuttavia l'elettronica sviluppata consente di montare anche due dispositivi elettronici integrati (uno fine e uno grezzo) per la misura della temperatura ed, eventualmente, operare le opportune calibrazioni on-board.

Riassumendo, il microcontrollore consente di:

- pilotare gli attuatori lineari;
- leggere gli encoder;
- leggere l'accelerometro;
- leggere la temperatura (opzionale);
- elaborare parte dei dati on-board, attraverso le calibrazioni in temperatura;
- leggere le indicazioni dei finecorsa di azzeramento degli encoder;
- comunicare con il laptop di controllo attraverso il bus CAN;
- eventualmente gestire ulteriori tasks (per questo esistono delle porte di I/O libere).

Il PIC18F4680, grazie alle proprie risorse in termini di porte di I/O, frequenza di clock (40 MHz), e memoria è stato in grado di assolvere a tali compiti.

Durate le calibrazioni e i test di laboratorio abbiamo potuto constatare che la precisione di posizionamento degli attuatori è sensibilmente legata alla tipologia di controllo. Infatti, attualmente, gli attuatori lineari vengono mossi e posizionati in modalità ON-OFF attraverso i segnali di controllo del PIC. Tuttavia, l'inerzia di rotazione del motore (non trascurabile) fa sì che il rotore, non più alimentato (OFF), si trascini dietro il pistone dell'attuatore, portandolo in una posizione non corrispondente a quella dell'impulso di OFF. E' quindi preferibile un controllo con una rampa di accelerazione e decelerazione (in tensione) in modo da posizionare l'attuatore con la massima precisione possibile (idealmente 0.01 mm). Nella modalità ON-OFF, abbiamo raggiunto precisioni di posizionamento dell'ordine di 3-5 decimi di mm, troppo scarsa per i requisiti iniziali del progetto (~0.1 mm), ma i vari contributi all'errore di posizionamento legati alla meccanica e

all'ottica, hanno reso del tutto ininfluente questa limitazione.. Purtroppo il poco tempo a disposizione non ci ha consentito di realizzare comunque una nuova elettronica di controllo, in grado di generare le suddette rampe in tensione.

Conclusioni e sviluppi futuri

A parte il problema legato alla precisione di posizionamento degli attuatori, il sistema di controllo realizzato ha risposto secondo le aspettative, consentendo un inseguimento dell'astro diurno all'interno dell'error budget prefissato.

Al momento non tutte le task relative al controllo sono completamente automatizzate. In particolare i dati di velocità iniziale e accelerazione devono essere impostati manualmente all'interno del sw di controllo e il loro calcolo avviene tramite i fitting parabolici discussi precedentemente. Sarebbe perciò auspicabile, nell'ottica di un prototipo perfettamente funzionante, da un lato correggere il sistema di lettura degli encoder e di posizionamento dei singoli specchi con una elettronica in grado di generare e controllare rampe in tensione, dall'altro rendere il sw di controllo autoconsistente, integrando nella parte in CodeSys, gli algoritmi in C per la determinazione delle coordinate alto-azimutali del Sole e conseguentemente il calcolo delle velocità iniziali e delle accelerazioni da impartire ai motori nelle varie fasi del moto.

La tabella seguente illustra un sunto di stima dei tempi e dei costi (relativi ai materiali, ai servizi, e all'acquisto di sw, escluso quindi il costo del personale) per portare il prototipo attuale nello stato di funzionamento ottimale, come sopra descritto. Ogni task indicata è in realtà composta da diverse sub-tasks, non riportate in questo contesto.

Task	Tempo (gg/uomo)	Costo materiali e servizi (consumabili elettronica, sw) (k€)
Integrazione e test del sw di controllo	80	1.5
Progettazione, realizzazione e test di elettronica di controllo a rampa di tensione	60	3
Aggiornamento fw elettronica di controllo	15	-