

# SULLA RETTIFICA DEGLI STRUMENTI DI MISURA

MARIANO CUNIETTI

Istituto di Geodesia, Topografia e Fotogrammetria del Politecnico di Milano

## I) PREMESSE E DEFINIZIONI

### 1 - *Introduzione*

La gamma degli strumenti di misura, le loro differenze somatiche, la molteplicità delle loro applicazioni e delle modalità operative sono così grandi ed evidenti che può sembrare a prima vista giustificato l'atteggiamento di coloro che ritengono ogni strumento una individualità indipendente, nell'insieme e nelle sue parti diverso da ogni altro. In tal caso risulterebbe inutile ogni tentativo di catalogare e classificare gli strumenti in un sistema che nella diversità sappia scorgere l'omogeneità, che, nelle disparate funzioni adempiute, individui modalità organiche comuni.

Questa molteplicità inclassificata degli strumenti porta come conseguenza la molteplicità delle definizioni. Termini identici del linguaggio ricevono a volte specificazioni operative diverse in dipendenza del settore scientifico o tecnico nel quale vengono usati.

Mi sembra sia possibile superare questo pluralismo mediante un ritorno allo studio dello schema logico-operativo dello strumento di misura. Da questo studio delle origini si può sperare di derivare una classificazione degli strumenti non solamente basata sulla diversità delle cose misurate come avviene attualmente.

Anche le definizioni dei termini del linguaggio potrebbero così risultare unificate od unificabili e soprattutto divenire più semplici e di accezione più immediata.

Tale è il senso più vasto del ristretto tentativo che in questa nota cerco di sviluppare, limitandolo ad uno dei tanti termini di uso comune ma di significato incerto « la rettifica di uno strumento di misura ».

La definizione così ottenuta del termine pur nella sua generalità non rimane sterile. Essa facilita la comprensione dello strumento e della sua funzionalità e porta ad una serie di osservazioni a carattere pratico alle quali è dedicata la seconda parte del presente lavoro.

### 2 - *Schema generale della operazione di misura*

L'operazione di misura diretta ridotta alla sua originaria schematicità, consiste nel confrontare due grandezze una delle quali di misura già nota<sup>1</sup>. Questa operazione elementare si viene via via complicando nella evoluzione strumentale.

---

<sup>1</sup> M. CUNIETTI, *Corso teorico e pratico sulle misure*, Milano, 1959.

L'esecuzione del confronto dapprima affidata direttamente ai soli sensi dell'operatore, in seguito per acuitizzarne la sensibilità, ha richiesto l'introduzione di amplificatori di vario tipo e di varia complessità. Siano essi mezzi ottici di osservazione o sistemi di zero, è sempre possibile ridurli a particolari fenomeni fisici schematizzandoli mediante relazioni per lo più analitiche.

Le grandezze di misura già nota cui viene confrontata la grandezza da misurare, o sono già tutte presenti nello strumento o vengono di volta in volta appositamente costruite dall'esecutore della misura. In molti casi però la presenza concreta della serie di grandezze di confronto viene sostituita con un fenomeno fisico cui è affidato il compito di generare, a richiesta, la grandezza di misura necessaria al confronto. Anche questi fenomeni vengono schematizzati con relazioni per lo più analitiche.

In questi strumenti i tre elementi costitutivi: grandezza da misurare, fenomeno amplificatore del giudizio di uguaglianza, fenomeno generatore delle grandezze di confronto, sono ben separati l'uno dall'altro e costituiscono tre parti strumentali distinte. Ma in altri strumenti tutte e tre queste parti vengono assorbite in un più generale fenomeno che compie tutte le funzioni autonomamente. Introdotta in essi la grandezza da misurare, all'operatore non resta da fare altro che eseguire la lettura di un indice su una scala graduata. Quest'ultima operazione è ancora un confronto, ma ridotto alla sua più elementare struttura ed applicato a grandezze di tutt'altro genere di quella cui appartiene la grandezza da misurare. La misura stessa perciò è divenuta indiretta.

Il fenomeno fisico che sintetizza in se, ora, tutta intera la misura e lo strumento, sarà ancora schematizzabile in una relazione analitica che prende il nome di legge fisica.

Ma la misura può farsi ancora più indiretta; ciò avviene quando lo strumento come organo unico realizzatore di un fenomeno fisico scompare per frantumarsi in tanti strumenti particolari non organicamente collegati, che misurano a volte anche indipendentemente, le grandezze presenti e partecipanti ad un fenomeno naturale, tranne una. La legge fisica che rappresenta quel fenomeno permette allora di ricavare algebricamente la misura di quell'unica grandezza non misurata, per mezzo di tutte le altre grandezze del fenomeno.

Gli esempi che per chiarire quanto sopra esposto ora citerò, seguono nella loro successione questo graduale complicarsi della operazione schematica iniziale.

La lunghezza di un oggetto viene misurata per confronto con una riga millimetrata. Il confronto viene eseguito direttamente a vista; la riga stessa è l'insieme di tutte le grandezze di lunghezza già misurate che vengono usate per il confronto.

Nella bilancia la massa dell'oggetto che vogliamo misurare posta su un piatto viene confrontata con una massa di riferimento ottenuta ponendo sull'altro piatto una combinazione conveniente di elementi della massiera. Il confronto fra le masse avviene indirettamente per mezzo dei due momenti da esse generati: si ha equilibrio quando l'indice rimane sullo zero della scala.

Nella stadera, tutto è analogo alla bilancia, fuorché il fatto che la massiera

non esiste piú e le masse di confronto vengono ottenute indirettamente variando la posizione del romano, di massa costante, lungo la sua asta.

La misura di una massa con il dinamometro sfrutta il fenomeno dell'elasticità delle molle. Appesa la massa al dinamometro l'indice segna direttamente su di una scala, la misura corrispondente. L'esecutore della misura non deve fare altro che leggere la scala.

Il fenomeno indicato come oscillazione libera di un pendolo, lega fra loro le seguenti grandezze: la gravità nel punto di oscillazione, la lunghezza del pendolo, il periodo di oscillazione, l'ampiezza della oscillazione, la temperatura ambiente, ecc. Se si misurano con opportuni strumenti queste grandezze ad eccezione della gravità in quel punto, il valore di questa può ricavarsi mediante il calcolo numerico della relazione algebrica che rappresenta il fenomeno della oscillazione del pendolo nella quale si sono introdotti i valori numerici delle misure delle altre grandezze.

### 3 - Schema analitico di uno strumento

Da quanto detto nel precedente paragrafo, che vuole essere solo un sommario richiamo alla casistica degli strumenti in uso, si ricava una indicazione fondamentale sulla piú generale struttura di uno strumento.

Prima di eseguire una misura, prima di costruire uno strumento, l'uomo ne studia il progetto nella sua essenziale schematicità. Sceglie innanzitutto i fenomeni che vuole usare, analizza le grandezze che in essi sono presenti, fissa i legami fra le varie parti, stabilisce le modalità operative. Il progetto dello strumento che esce da questa descrizione ancora simbolica, è rappresentabile in generale mediante una relazione di tipo algebrico ma nella maggior parte dei casi coincidente con una funzione analitica di tipo esplicito, come la seguente:

$$x = f(x_1 \dots x_n / k_1 \dots k_r / G_1 \dots G_s / C_1 \dots C_t) \quad (1)$$

La 1) dice che la misura  $x$  della grandezza  $X$ , o determinata, risulta funzione delle misure e dei valori che assumono un gruppo di grandezze e di parametri che chiameremo determinanti. La suddivisione in quattro gruppi delle grandezze e dei parametri determinanti corrisponde ad una disparità di comportamento in seno alla funzione, che viene fissata in sede di progetto ed alla quale corrisponderà anche una differente realizzazione in seno allo strumento reale.

Si precisa ora successivamente le caratteristiche peculiari di ciascuno dei gruppi di variabili contenuti nella 1).

Le  $x_1 \dots x_n$  sono le misure di  $n$  grandezze dette determinanti che variano al variare delle condizioni operative sperimentali. Questi  $n$  valori debbono essere ottenuti mediante operazioni di misura, in generale, ma non necessariamente, dirette. Per esempio: si voglia misurare un segmento per confronto con una riga graduata. Le grandezze  $x_i$  determinanti si riducono ad una sola costituita dalla lettura sulla scala, eseguita, con mezzi opportuni, in corrispondenza di un

estremo del segmento, quando l'altro estremo viene accostato al tratto zero della scala stessa. Se si desidera una misura piú precisa, si dovrà tener conto anche della temperatura sia della riga sia del segmento. La temperatura deve venir misurata e deve comparire nella 1). Le grandezze  $x_i$  che determinano attraverso la  $f$  la misura della lunghezza del segmento sono ora diventate due: la lettura sulla scala e la temperatura.

Le  $k_1 \dots k_r$  sono i valori numerici di  $r$  parametri presenti nella equazione generale, essi possono essere: grandezze fisiche di riferimento, equivalenti di conversione, coefficienti di proporzionalità, ecc. Il valore numerico di questi parametri ricavato in generale per via sperimentale rende determinata la funzione. Nell'esempio semplice che sopra ho citato della misura di un segmento metallico, sono parametri numerici del tipo  $k_i$  il coefficiente di dilatazione termica della sbarra campione e quello del segmento da misurare. Ma gli esempi di strumenti moderni di misura nei quali sono presenti parametri  $k$  di questo tipo sono numerosissimi: l'origine della scala di lettura di un galvanometro e la sua costante di scala; la sensibilità di una livella; il passo di una vite; il coefficiente di taratura di un dinamometro, ecc. L'operazione che serve a determinare il valore numerico di questi parametri prende il nome di « taratura dello strumento ». In generale questi parametri di taratura per la loro funzione nella espressione 1) e per la loro natura fisica in seno allo strumento, non sono misurabili o non è conveniente misurarli in maniera indipendente; essi vengono perciò determinati contemporaneamente con operazioni di misura a volte assai complesse.

Le  $G_1 \dots G_s$  rappresentano  $s$  grandezze fisiche che nello strumento sintetizzato nella 1) debbono essere presenti con un ben determinato valore della misura. Determina questo valore lo schema logico secondo il quale è stato progettato lo strumento; esso non dipende perciò da misure eseguite od eseguibili sugli strumenti, ma viene imposto dal progettista. Negli strumenti basati su schemi geometrici queste grandezze imposte sono in generale angoli di valore prefissato, per lo piú retto o piatto (normalità fra assi, parallelismo fra piani o fra assi, ecc.); piú generalmente possono essere rappresentate dai valori prefissati delle grandezze corrispondenti ai valori di zero o di fondo scala di uno strumento a scala. Ad esempio nel calibro, strumento di misura assai semplice, le grandezze  $G$  presenti sono tre: l'angolo fra la direzione dell'asta e quello della faccia interna della guancia fissa deve essere di  $90^\circ$ ; ugual valore deve avere l'angolo fra l'asta su cui corre il cursore e il bordo della guancia mobile; infine lo zero del nonio di lettura deve coincidere con lo zero della scala quando il segmento misurato ha lunghezza nulla ovvero quando le due guancie si toccano lungo tutto il loro bordo interno. In un livello moderno deve essere nullo l'angolo fra l'asse di collimazione del cannocchiale e la tangente centrale della livella. In un microscopio con lettura a scala, la lunghezza della scala posta sul reticolo deve essere uguale alla lunghezza dell'immagine dell'intervallo della graduazione generata dall'obbiettivo. In un galvanometro lo zero della scala deve coincidere con la posizione dell'indice per corrente nulla, mentre la graduazione 100 deve coincidere con la posizione dell'indice quando nel circuito passa una corrente, per esempio, di 100 ma.

L'operazione che ha lo scopo di far sí che queste grandezze abbiano entro lo strumento la misura voluta, prende il nome di « rettifica dello strumento »; lo strumento nel quale queste particolari condizioni di progetto sono state ottenute, si dirà perciò rettificato.

Le  $C_1 \dots C_t$  sono grandezze fisiche la cui presenza nello strumento è prevista dallo schema, senza che lo schema ne imponga il valore; esse perciò debbono rimanere costanti nel tempo. Questi tipi di grandezze sono assai frequenti soprattutto negli strumenti per misure variometriche o differenziali. In un comparatore di lunghezza a microscopi, l'angolo fra l'asse di collimazione del microscopio e il segmento da comparare, può avere valore qualunque, in generale abbastanza prossimo a  $90^\circ$ ; è necessario però che questo angolo si mantenga costante al variare della posizione del microscopio. Nell'apparato per la misura delle differenze di gravità per mezzo della oscillazione dei pendoli, deve rimanere costante la lunghezza ridotta dei pendoli. Negli amperometri deve mantenersi inalterata la costante elastica della molla che contrasta il momento torsionale della bobina dell'equipaggio. Alle variazioni che queste grandezze subiscono con il passare del tempo è soprattutto legato quel fenomeno che prende il nome di deriva strumentale ed in generale da queste grandezze e dalla loro reale costanza dipende in gran parte la stabilità degli strumenti.

Poiché vi è libertà nella scelta della misura di queste grandezze  $C$ , in molti casi essa viene fissata in sede di progetto in base al seguente criterio generale che le sue eventuali variazioni nel tempo abbiano influenza minima sui risultati delle misure. L'imposizione nello strumento delle grandezze  $C$  così prefissate richiede però solamente una operazione grossolana. Rientra in questo schema per esempio la condizione di minimalità dei pendoli nella misura delle differenze di gravità.

#### 4 - *Struttura di uno strumento reale*

Lo schema analitico dello strumento, sinteticamente racchiuso nella funzione generica 1), di qualunque natura esso sia (geometrico, dinamico, ottico, elettrico, ecc.) e qualunque numero e tipo di grandezze o parametri determinanti esso comprenda, per divenire operante ed adempiere concretamente al suo scopo deve venire realizzato nello strumento reale. In questo strumento ogni elemento dello schema si concretizza e perde la scarna essenzialità del corrispondente simbolo analitico.

Dal punto di vista strutturale e costruttivo si possono distinguere in uno strumento reale questi tre momenti che si identificano quasi con le tappe successive del processo di sintesi degli elementi analitici disuniti.

Indicheremo perciò: con *elementi dello schema* le parti semplici che compongono lo schema e che in generale sono delle grandezze concretamente realizzate; con *organi dello schema* l'insieme di piú elementi legati fra loro da vincoli strutturali prefissati che di essi fanno una parte organica, ben individuabile entro lo strumento e con preciso e limitato compito funzionale; con *fun-*

zione dello schema l'insieme di piú organi che operando coordinatamente permettono di raggiungere il risultato finale, scopo dello strumento, cioè la misura di una certa classe di grandezze.

In un goniometro ad esempio alcuni degli elementi dello schema sono: il reticolo, l'obbiettivo, la livella di base, l'asse di rotazione primario, l'asse di rotazione secondario, ecc.

Il reticolo, l'obbiettivo, l'asse di rotazione secondario, ed altri elementi entrano a far parte dell'organo chiamato cannocchiale dello strumento. La livella di base, l'asse di rotazione primario, ed altri, sono elementi che nel loro insieme formano l'organo chiamato alidada. Cannocchiale ed alidada sono due organi della funzione strumentale propria del goniometro: misura degli angoli azimutali. Un altro esempio: in un ohmetro sono elementi dello schema, la scala, la molla di contrasto, l'alimentazione, ecc. Sono organi l'insieme dell'equipaggio, il campo magnetico, ecc. La funzione è quella di misurare le resistenze dei circuiti.

La realizzazione concreta negli elementi dello schema delle grandezze che costituiscono lo strumento secondo il progetto logico-analitico, non può essere ottenuta sempre in maniera perfetta.

In alcuni casi le proprietà richieste all'elemento si possono in esso realizzare, ma si raggiungono solo al limite di una serie di operazioni concrete.

Si pensi ad un piano geometrico; esso può venire realizzato fisicamente da una superficie metallica solo come limite di una serie di operazioni opportune di politura. Questa estrapolazione è lecita purché si trascuri l'impossibilità teorica di realizzare un piano in senso geometrico a causa della discontinuità della struttura della materia.

In altri casi invece gli elementi realizzano una parte dello schema logico strumentale solamente in maniera consapevolmente approssimata.

Un obbiettivo per esempio non può realizzare appieno l'immagine di un punto e quindi una direzione geometrica poiché il suo limitato potere risolutore è dovuto solo parzialmente ai difetti costruttivi, ma soprattutto alla impossibilità teorica dal punto di vista ondulatorio di avere un obbiettivo privo di aberrazioni. La costante elastica di una molla, per citare un altro esempio, solo in via approssimata è veramente costante al variare dell'allungamento; di conseguenza le deformazioni della molla sono proporzionali alla forza applicata solo entro gli stessi limiti di approssimazione.

Per migliorare uno strumento con elementi del primo tipo occorre migliorare la loro realizzazione pratica. Quando invece uno strumento comprende elementi del secondo tipo un miglioramento può essere ottenuto solo modificando sostanzialmente il criterio di realizzazione dell'elemento dello schema.

Ciò che si è detto per gli elementi dello schema vale necessariamente anche per gli organi e le funzioni. Cioè essi possono realizzare una parte o l'intero complesso dello strumento analiticamente rappresentato nella 1) in maniera imperfetta o in maniera approssimata. Si prenda ad esempio un barometro: usato come misuratore della pressione i suoi organi possono risultare imperfetti per errori costruttivi; usato come altimetro la sua funzione è approssimata perché le superfici isobariche non sono coincidenti con le superfici equipotenziali.