

Programmi di calcolo per uscita grafica di dati nella progettazione meccanica interattiva (**)

Sommario: L'articolo discute e confronta vari programmi automatici (analogici-digitali) per uscita grafica dei dati, sviluppati per applicazioni nella progettazione meccanica interattiva, soffermandosi particolarmente sugli aspetti originali.

Ad una descrizione dell'hardware e del software seguono specifici esempi di utilizzazione in campo meccanico.

Abstract: The paper discusses and compares various automatic programs (analog/digital) for graphical output of data, developed for applications of interactive mechanical design, with special reference to the original aspects. A description of hardware and software is followed by specific examples of applications in the mechanical field.

Résumé: L'article discute et compare plusieurs programmes automatiques (analogiques-numériques) pour sortie graphique de données, pour applications dans le projet mécanique interactif, en examinant particulièrement les aspects originaux. La description de l'hardware et du software est suivie par des exemples spécifiques d'utilisation en mécanique.

INTRODUZIONE

Utilizzando un calcolatore analogico è possibile realizzare dei semplici circuiti di interpolazione che, pilotati opportunamente dalla parte digitale dell'installazione, possono essere usati per visualizzare, su un plotter o su un oscilloscopio, oggetti piani la cui disposizione può essere calcolata utilizzando lo stesso calcolatore analogico, il calcolatore digitale o un circuito ibrido.

Un'applicazione di questo genere, oltre a costituire una uscita grafica praticamente gratuita quando dell'installazione ibrida si utilizzi solo la parte digitale, è particolarmente utile quando si debbano studiare sistemi dinamici dotati di più gradi di libertà. Infatti la possibilità di visualizzare istante per istante l'assetto dell'oggetto studiato e di controllare immediatamente la coerenza dei risultati e valutare l'effetto di una variazione dei parametri del sistema senza la necessità di ricostruire le diverse posizioni dai diagrammi degli spostamenti o delle rotazioni in funzione del tempo, può essere in certi casi determinante soprattutto nella fase di verifica del modello matematico.

(*) Istituto di Meccanica Applicata alle Macchine, Università di Genova.

(**) Memoria presentata dall'Accademico del XL A. CAPOCACCIA il 28-3-1974.

In questo articolo vengono illustrati alcuni circuiti che permettono appunto di vedere il calcolatore analogico come una unità grafica periferica della parte digitale dell'installazione; in altri articoli [1] gli autori illustrano alcune applicazioni nel campo dell'analisi cinematica, dello studio di sistemi dinamici con più gradi di libertà e nelle realizzazioni di disegni meccanici.

L'importanza che la visualizzazione grafica delle uscite degli elaboratori automatici va assumendo è ben nota [2] ÷ [6]; in particolare, il circuito di seguito presentato può essere applicato per migliorare le caratteristiche di rappresentazione in vari casi in cui è richiesta un'uscita grafica. A titolo di esempio, la sua applicazione all'analisi di sistemi di controllo [7] consente di realizzare le usuali prestazioni per quanto riguarda il luogo delle radici o la visualizzazione dell'andamento temporale delle variabili di stato, generalizzando e ampliando d'altra parte le possibilità di rappresentazione dell'evoluzione dei sistemi nel caso di simulazione animata.

Lo scopo del lavoro illustrato in questo articolo è la messa a punto di alcuni circuiti che permettono di utilizzare la parte analogica di una installazione ibrida per realizzare una uscita grafica del calcolatore numerico come primo passo di un programma per il calcolo e la visualizzazione di disegni di meccanismi statici o in movimento.

Già di per sé la realizzazione di questi circuiti e dei sottoprogrammi numerici sviluppati per pilotarli è un risultato interessante per chi abbia a disposizione un calcolatore ibrido, permettendo di utilizzare un normale oscillografo e/o un registratore analogico $x-y$ come un display o un plotter digitale, normalmente molto più costosi dei precedenti.

INTERPOLATORE LINEARE

Il primo circuito studiato è stato un interpolatore lineare mediante il quale fosse possibile tracciare qualsiasi disegno formato da segmenti di retta.

Questo circuito permette la realizzazione di un sottoprogramma che, ricevendo in ingresso le coordinate di un punto, piloti i circuiti analogici in modo tale da riportare la penna, o il pennello elettronico nel caso di uscita su CRT, dal punto in cui si trovava al momento del comando al punto specificato nella sequenza di chiamata.

Un ulteriore parametro permette di eseguire il movimento con la penna del plotter alzata o abbassata (o raggio acceso o spento su CRT) in modo tale che con lo stesso sottoprogramma si può realizzare sia il posizionamento della penna sia il tracciamento delle linee rette.

DESCRIZIONE DELLA PARTE ANALOGICA

Per realizzare un circuito che consenta di far variare le coordinate x e y dell'elemento di scrittura, linearmente e contemporaneamente, fra i valori x_0, y_0 e x_F, y_F si scrivono le equazioni parametriche del segmento; detta α la sua inclinazione, si ha:

$$\begin{aligned} x/d &= x_0/d + \xi/d \cos \alpha \\ y/d &= y_0/d + \xi/d \sin \alpha \end{aligned} \quad 0 \leq \xi \leq 1$$

ove d è la lunghezza della massima dimensione lineare rappresentabile ($l/d \leq 1$).

In vista della simulazione delle equazioni, il parametro ξ può essere legato al tempo macchina da una relazione di proporzionalità lineare, cioè si può porre $\xi/d = \omega t$.

Per riconoscere l'istante in cui deve aver termine l'integrazione (cioè quando $x = x_f$ e $y = y_f$), si osserva che, se l è la lunghezza del segmento $P_0 P_f$, sarà $\omega t_f = \frac{l}{d}$.

Il circuito di fig. 1 realizza le equazioni e le condizioni precedenti; la parte inferiore genera i valori x e y desiderati, ammettendo come ingresso $\cos \alpha$ e $\sin \alpha$, mentre la porzione superiore è un semplice « timer » che interrompe l'integrazione quando si sia raggiunto il punto finale, ammettendo come ingresso il valore l/d . Infatti per $\omega t \geq l/d$, risulta $A = 1$ e quindi l'integrazione viene bloccata e il timer rimesso a zero. È ora possibile applicare ai convertitori D/A nuovi valori degli ingressi e ponendo OCL = 1 far ricominciare l'integrazione, con il nuovo angolo α .

Il circuito della fig. 1, secondo quanto descritto, può consentire di rappresentare un segmento utilizzando tre soli parametri (e quindi tre soli convertitori) an-

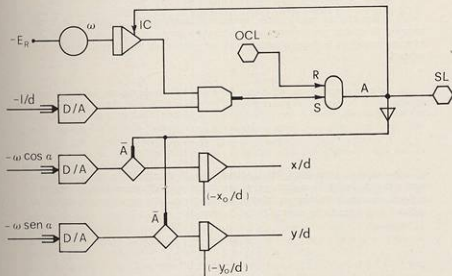


Fig. 1 - Interpolatore lineare in ciclo aperto.

ziché i cinque che sarebbero in generale necessari. Infatti per realizzare le equazioni parametriche precedenti sarebbe in generale necessario fornire all'analogico i valori

$$\frac{x_0}{d}, \frac{y_0}{d}, \operatorname{sen} \alpha, \cos \alpha, \frac{1}{d};$$

i valori di $\operatorname{sen} \alpha$, $\cos \alpha$, $1/d$ verrebbero introdotti secondo lo schema di fig. 1, mentre quelli di x_0/d e y_0/d dovrebbero essere inviati come condizioni iniziali per gli integratori, e questi ultimi dovrebbero essere posti ogni volta nel modo IC. Tuttavia con lo schema della fig. 1 ogni segmento tracciato può utilizzare come punto di partenza quello raggiunto alla fine del segmento precedente se l'integratore è mantenuto nel modo OP, ovvero il punto origine (od altro di riferimento) se l'integratore è posto nel modo IC. Si presentano allora due possibili casi:

a) il segmento da rappresentare è consecutivo a quello appena descritto. In questo caso il circuito può essere utilizzato inviando i valori opportuni di $\operatorname{sen} \alpha$, $\cos \alpha$, $1/d$;

b) il segmento da rappresentare non è consecutivo al precedente: in tal caso occorre inviare all'analogico i valori di $\operatorname{sen} \alpha$, $\cos \alpha$ ed $1/d$ necessari a trasferire l'elemento di scrittura al punto iniziale del segmento che si vuol disegnare (ovviamente inibendo la scrittura) e da qui procedere come nel caso a).

È chiaro che nel caso b) sono necessari un numero di operazioni e un tempo maggiori di quanto non avvenga se si utilizzano cinque convertitori. Si è tuttavia ritenuta preferibile la prima alternativa in vista di un sostanziale risparmio di componenti.

È tuttavia possibile un approccio differente alla realizzazione delle equazioni parametriche, in quanto si può scrivere

$$\begin{aligned} x/d &= x_0/d + \xi/d (x_f - x)/l \\ y/d &= y_0/d + \xi/d (y_f - y)/l \end{aligned}$$

Le equazioni precedenti sono realizzate con il circuito della fig. 2. In questo caso non è in realtà necessario procedere all'arresto dell'integrazione in quanto è a rigore necessario un tempo infinito per descrivere l'intero segmento. Infatti le uscite x e y secondo lo schema di fig. 2 sono date da

$$\begin{aligned} \frac{x}{d} &= \frac{x_f}{d} + \left(\frac{x_0}{d} - \frac{x_f}{d} \right) e^{-t/\tau/d} \\ \frac{y}{d} &= \frac{y_f}{d} + \left(\frac{y_0}{d} - \frac{y_f}{d} \right) e^{-t/\tau/d} \end{aligned}$$

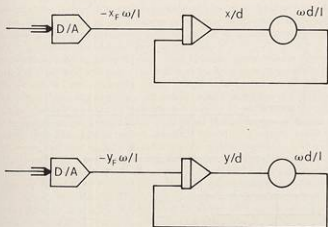


Fig. 2 - Interpolatore lineare in ciclo chiuso.

Ammettendo di raggiungere un punto con un errore preassegnato sulla dimensione l , si ottiene l'integrazione in un tempo finito: per esempio per errori dell'1% e 2% si ha rispettivamente

$$T_{1\%} = 4,605 \frac{l}{\omega d}$$

$$T_{2\%} = 3,912 \frac{l}{\omega d}$$

Questa soluzione è stata realizzata mediante il circuito di fig. 3, in cui ancora la parte superiore realizza i valori delle variabili, mentre quella inferiore produce la necessaria temporizzazione. In questo caso è necessaria una sola coppia di convertitori per il trasferimento delle variabili.

Le soluzioni presentate hanno caratteristiche piuttosto differenti che val la pena di discutere brevemente.

Il circuito di fig. 1 ha due fondamentali caratteristiche: produce l'integrazione a velocità costante e dà pertanto una velocità uniforme nel tracciamento dei segmenti; produce un'uscita in base alle condizioni iniziali e all'inclinazione α : pertanto un errore sulle condizioni iniziali, sull'angolo α , sulla temporizzazione o una deriva degli integratori danno un errato valore di x_f, y_f ; quindi, se non si riportano gli integratori in IC, gli errori commessi in ciascun segmento, si propagano ai segmenti successivi.

Il circuito di fig. 3 produce l'integrazione a velocità variabile nella descrizione di un segmento (decescente secondo un'esponenziale) e fra segmenti di lunghezza differente ($\omega d/l = \text{cost}$) e dà pertanto una velocità di scrittura non uniforme;

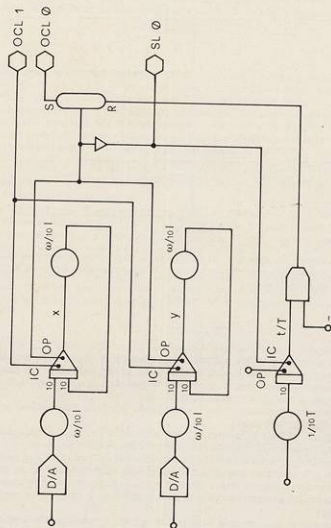


Fig. 3 - Interpolatore lineare in ciclo chiuso e circuito di temporizzazione.

produce un'uscita in base alle condizioni finali che vengono raggiunte con una precisione prestabilita anche se si verificano errori sulle condizioni iniziali, sulla temporizzazione, o derive di integratori; quindi non è necessario riportare in IC gli integratori poiché successivi errori non si sommano.

Le caratteristiche negative esposte sopra possono essere ridotte per entrambi i circuiti. Per il primo è sufficiente reinizializzare gli integratori dopo il tracciamento di tratti prestabiliti, per il secondo si può procedere in due vie, in funzione del dispositivo scrivente su cui si opera: nel caso di uscite su plotter si è rivelato sufficiente (ma raramente necessario) tracciare due volte lo stesso segmento, scambiando fra loro le coordinate del punto iniziale e del punto finale; nel caso di uscita su CRT è parso esteticamente migliore inviare anziché il valore di x_F e y_F un valore maggiorato x_F^* e y_F^* , interrompendo il circuito quando questo raggiunge x_F e y_F ; in tal caso, si utilizza l'esponenziale che dà l'andamento temporale delle uscite x e y solo per un solo tratto iniziale, realizzando quindi una velocità più o meno uniforme a seconda dei valori di x_F^* e y_F^* . Una possibile realizzazione di questo circuito è visibile in fig. 4; ovviamente il vantaggio sulla velocità è pagato a scapito della precisione; tuttavia non si ha propagazione dell'errore fra i successivi tracciamenti. Si noti che si è ritenuto opportuno effettuare un test sia su x , sia su y , per evitare ambiguità di funzionamento nel tracciamento di segmenti a $x = \text{cost}$ e $y = \text{cost}$.

Inoltre si può pensare di suddividere il segmento che si vuol tracciare, in tratti di lunghezza prossima ad un valore minimo prefissato, in modo da avere la velocità effettiva di scrittura praticamente eguale per ogni segmento che si desidera tracciare.

Ovviamente i precedenti circuiti possono essere variamente completati o semplificati ed è possibile applicare a ciascuno anche le soluzioni qui descritte per gli altri.

DESCRIZIONE DEL SOTTOPROGRAMMA NUMERICO

Il sottoprogramma numerico si basa sull'utilizzazione di subroutine Fortran che consentono di calcolare i dati necessari all'analogico e di controllare il funzionamento di quest'ultimo.

Le subroutine necessarie allo scopo sono essenzialmente tre:

- a) per far percorrere all'elemento di scrittura un segmento che abbia origine dal punto in cui esso si trova (noto in base al programma digitale e perciò utilizzabile per il calcolo di $\cos x$, $\sin x$, l) e abbia termine in un punto definito nel programma digitale (o ad esso noto in base a lettura di componenti analogici);
- b) per posizionare l'elemento di scrittura in un punto assegnato: immediatamente ricavabile dalla precedente purché si imponga che, durante il movimento dell'elemento di scrittura, ne sia inibito il funzionamento (pennello del CTR spento o pennino del plotter sollevato);
- c) per far percorrere all'elemento di scrittura un segmento che abbia origine e termine in punti assegnati: ricavabile utilizzando due volte la subroutine a), come già accennato sopra, purché si imponga che durante il tracciamento del primo segmento la scrittura sia inibita.

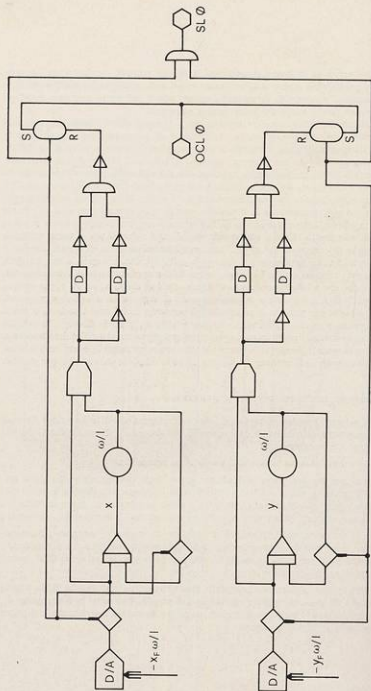


Fig. 4 - Temporizzazione sul valore delle variabili.

Ognuna di queste subroutines richiama una subroutine di conversione che ha la funzione di inviare ai convertitori digitali-analogici i valori già calcolati, di assicurare la regolarità della conversione e del funzionamento dell'analogico stesso. E questa routine a mettere in OPERATE l'analogico una volta terminata la conversione attraverso le OCL e a riconoscere la fine dell'integrazione attraverso la SL.

Esempio

In fig. 5 è riportato il disegno di un cerchio realizzato mediante 20 segmenti con il circuito di fig. 1.

Ovviamente una subroutine digitale calcola le coordinate degli estremi di ogni segmento, in modo da fornirle alle subroutines di disegno.

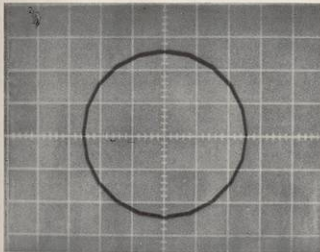


Fig. 5 - Circonferenza interpolata linearmente.

INTERPOLATORE CIRCOLARE

Un altro circuito studiato è stato un interpolatore circolare in modo che utilizzando insieme al precedente fosse possibile disegnare qualsiasi figura composta di rette e circonferenze.

È interessante osservare come il circuito sviluppato possa essere ricavato dai precedenti semplicemente mediante l'aggiunta di due interruttori e di un inversore e che quindi entrambi i tipi di interpolazioni possono essere realizzati utilizzando sostanzialmente gli stessi elementi attivi e la stessa logica.

DESCRIZIONE DELLA PARTE ANALOGICA

Le equazioni parametriche scalate di un arco di circonferenza possono essere espresse in forma differenziale:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{x - x_0}{d} \right) = -\omega' \left(\frac{y}{d} - \frac{y_0}{d} \right) \quad 0 \leq \frac{\omega' t}{\varphi_M} \leq \frac{\varphi}{\varphi_M}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{y - y_0}{d} \right) = \omega' \left(\frac{x}{d} - \frac{x_0}{d} \right) \quad x(0) = x_1, y(0) = y_1$$

ove x_0 e y_0 sono le coordinate del centro del cerchio, x_1 e y_1 le coordinate del primo estremo dell'arco, α l'angolo sotteso, φ_M il valore del massimo arco che si voglia rappresentare con una sola conversione (ad es. $\varphi_M = 2\pi$). Dal valore di ω' dipende la velocità con cui l'arco viene tracciato.

Il circuito analogico è rappresentato in fig. 6 senza gli elementi logici, essendo questi del tutto analoghi a quelli del caso precedente. Si noti che i valori di x_1 e y_1

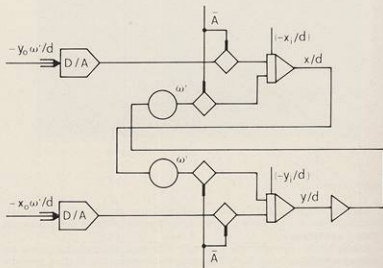


Fig. 6 - Interpolatore circolare.

sono le condizioni iniziali degli integratori 1 e 2 perciò il circuito rappresenta un arco, descritto in senso antiorario a partire dal punto raggiunto alla fine del tracciamento precedente (quindi memorizzato come uscita degli integratori stessi) e con il centro definito attraverso i convertitori.

A questo proposito si possono ripetere i ragionamenti fatti a proposito del circuito di fig. 1: con cinque convertitori si potrebbe anche in questo caso imporre la condizione iniziale (x_i, y_i) agli integratori, anziché dover utilizzare il valore raggiunto in precedenza. Tuttavia anche in questo caso, effettuando due conversioni anziché una, si può ottenere lo stesso risparmio di componenti, come si è ritenuto opportuno fare.

Per quanto riguarda la logica per il controllo dell'analogico, essa funziona ovviamente come nel caso del segmento.

In fig. 7 è riportato il circuito finale per il tracciamento sia di archi di circonferenza sia di segmenti, ottenuto per sovrapposizione dei precedenti.

Il segnale proveniente da OCL2 consente di retroazionare o no il circuito analogico agendo su due interruttori a seconda dell'elemento che si desidera ottenere; tale segnale è fornito a programma dal calcolatore digitale: se è « alto » gli interruttori vengono aperti e verrà pertanto descritto un segmento; se è « basso » gli interruttori vengono chiusi e si ottiene l'arco di circonferenza.

DESCRIZIONE DEL SOTTOPROGRAMMA NUMERICO

Nel caso dell'arco di circonferenza sono state sviluppate due subroutine fondamentali:

a) per far percorrere all'elemento di scrittura un arco di cerchio che abbia origine dal punto in cui esso si trova, abbia centro in un punto assegnato e sottenda un angolo pure assegnato;

b) per far percorrere all'elemento di scrittura un arco di cerchio come il precedente, ma a partire da un punto assegnato qualunque. Questa seconda routine è ottenibile utilizzando la routine segmento a) per posizionare l'elemento di scrittura nel primo punto dell'arco e poi la precedente routine arco. Naturalmente la scrittura deve essere inibita durante la descrizione del segmento.

Oltre a determinare i valori che devono essere inviati ai convertitori in funzione dei dati, queste routines utilizzano la stessa subroutine di conversione e controllo dell'analogico vista per il caso del segmento. Si rimanda ad essa per la spiegazione, rilevando come il programma digitale sia così costituito da un numero limitatissimo di subroutine che consentono di rappresentare i vari casi.

Queste subroutine elementari possono essere utilizzate per costruire programmi più complessi, come può facilmente intendersi.

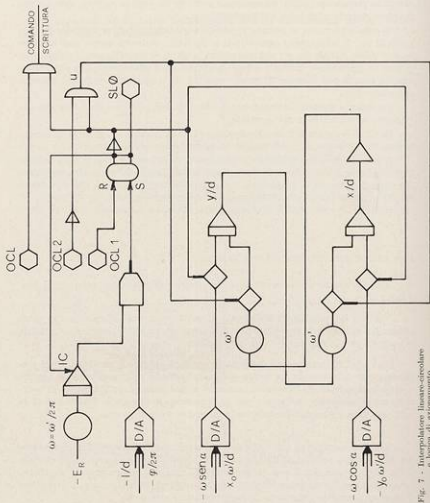


Fig. 7 - Interpolatore lineare-circolare a logica di azionamento.

In fig. 8 è riportato un cerchio realizzato con questo secondo programma: esso è ottenuto con continuità anziché per tratti discreti come quello in fig. 5.

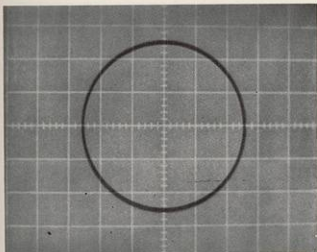


Fig. 8 - Circonferenza interpolata con il circuito della fig. 7.

OSSERVAZIONI

L'utilizzazione di istruzioni FORTRAN ibrido e di parti in ASSEMBLER in line, consente di eseguire il programma digitale a velocità molto elevate; in questo modo la velocità con cui la figura viene disegnata dipende praticamente solo dal tempo di integrazione dell'analogico. La possibilità di variare tale tempo ϵ , come noto, è ottenuta alterando di un fattore costante i guadagni di tutti gli integratori: ciò in sostanza equivale ad alterare i valori di ω e ω' presenti nelle equazioni parametriche. Si può in tal modo, senza modificare né il circuito né il programma digitale, ottenere una velocità di disegno adeguata al dispositivo di scrittura: si utilizzeranno così basse velocità per l'uscita su plotter, velocità intermedie per uscita su CRT a memoria e velocità elevate (con riciclo del programma, onde realizzare il « refreshing ») su CRT senza persistenza. Il tutto è realizzabile con estrema rapidità e per valori discreti del tempo di integrazione se si operi su valori delle capacità in retroazione agli integratori, o finemente agendo su potenziometri di ingresso.

Le precedenti routines per il tracciamento di linee elementari possono essere utilizzate nell'ambito di programmi più complessi non necessariamente puramente digitali [1]. In particolare è stato sviluppato dagli autori un programma digitale

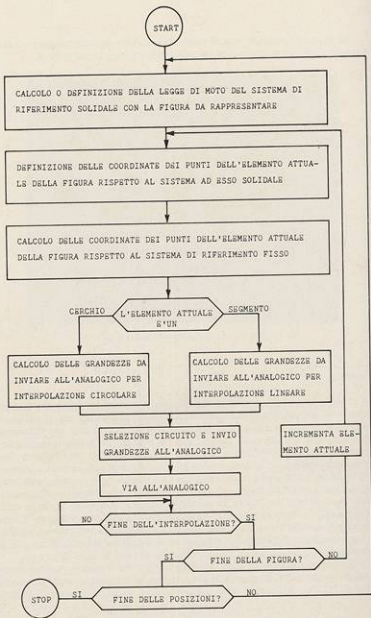


Fig. 9 - Diagramma di massima del programma digitale.

che consente agli utilizzatori di ottenere il disegno di figure qualunque, nelle posizioni da esse desiderate. A tale fine è sufficiente che l'utente definisca la figura che vuole disegnare assegnando le coordinate dei punti (iniziali e finali nel caso di segmenti, iniziali e del centro, nel caso di archi) che definiscono i vari elementi in cui la figura è suddivisa, rispetto ad un sistema di coordinate solidali con la figura stessa; assegnando poi la legge di moto di questo sistema rispetto ad un riferimento fisso, il programma calcola automaticamente le coordinate assolute dei punti sopra definiti e provvede alla loro interpolazione e quindi ad effettuare il disegno voluto. In fig. 9 è riportato un diagramma di massima delle successive operazioni.

Esempi

Meditante un semplicissimo programma digitale che utilizza i sottoprogrammi testé descritti è stato eseguito il disegno di prova in fig. 10, ottenuto come uscita su un plotter X, Y.

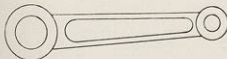


Fig. 10 - Disegno di una bielletta.

È chiaro come qualsiasi figura possa essere composta con una serie di chiamate ai sottoprogrammi descritti, passando come parametri gli elementi che caratterizzano i diversi lati della policontrica di cui è formata, elementi che possono essere prememorizzati nel calcolatore numerico o calcolati dinamicamente sia da un circuito analogico sia da un programma numerico.

Altri esempi di applicazioni in campo meccanico sono presentati nelle figure successive. La fig. 11 mostra la generazione per involuppo del profilo di una camma con cedente piatto.

Le figg. 12, 13, 14 e 15 visualizzano invece un meccanismo a croce di Malta, per la realizzazione di un moto intermittente; in quest'ultimo caso il programma di disegno è stato abbinato ad un programma di analisi cinematica per il calcolo dei successivi assetti dei membri del meccanismo. Si è proceduto innanzitutto alla descrizione matematica delle forme dei due membri costituenti il meccanismo a croce di Malta; tali figure (figg. 12 e 13), ruotate, traslate e dilatate, sono state rese solidali poi ad opportuni segmenti di riferimento, animati da movimento mediante il programma di descrizione cinematica sopra menzionato. Le figg. 14 e 15 rappresentano appunto due posizioni, trascelte fra la successione di quelle assunte dai due membri nel loro moto.

La fig. 16 si riferisce ad un'applicazione ad un problema di sintesi di meccanismi piani; nella sintesi dei quadrilateri articolati è utile poter calcolare e soprattutto visualizzare la regione del piano nella quale, assegnate le dimensioni del

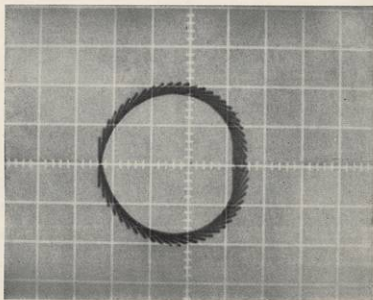


Fig. 11 - Tracciamento di una camma per involuppo.

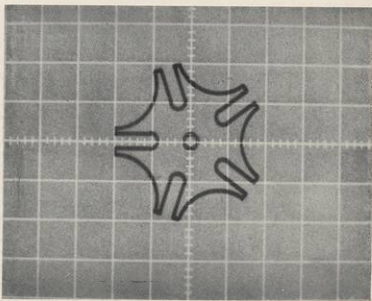


Fig. 12 - Analisi di un meccanismo a croce di Malta.

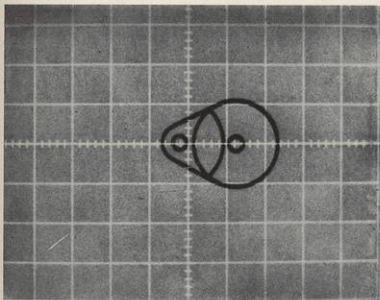


Fig. 13 - Analisi di un meccanismo a croce di Malta.

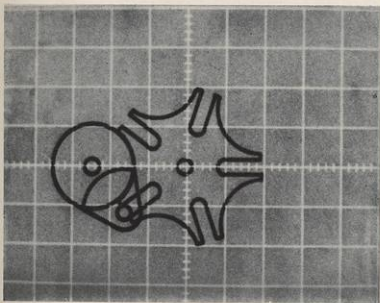


Fig. 14 - Analisi di un meccanismo a croce di Malta.

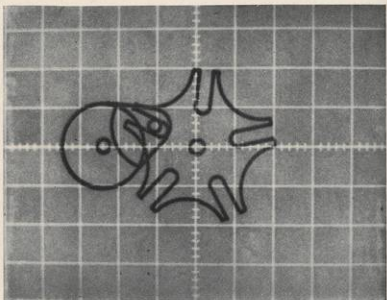


Fig. 15 - Analisi di un meccanismo a croce di Malta.

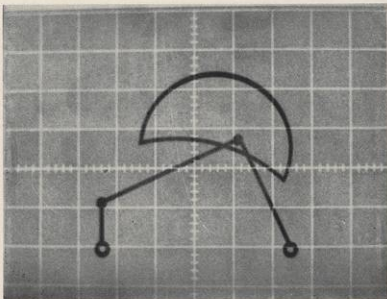


Fig. 16 - Sintesi di un quadrilatero articolato con p ottimo.

telaio e della manovella d'ingresso, può essere disposta la cerniera mobile del membro d'uscita di un quadrilatero soddisfacente la disuguaglianza di Grashof affinché gli angoli μ di trasmissione restino compresi in un prefissato intervallo (tipicamente $\frac{\pi}{4} < \mu < \frac{3\pi}{4}$). Le equazioni dei luoghi cercati sono ricavate in dettaglio in [8] e sommarizzate nell'appendice. La fig. 16 riporta il risultato finale, cioè visualizza la regione cercata ed uno dei possibili quadrilateri utilizzabili.

CONCLUSIONI

I circuiti descritti ai paragrafi precedenti costituiscono circuiti di interpolazione lineare e circolare e presentano tutti i vantaggi ad essi inerenti. Anziché dover utilizzare un plotter incrementale come periferico di uscita per il digitale, è possibile utilizzare un semplice plotter X, Y o un oscilloscopio; essendo questi periferici normalmente disponibili in una installazione analogica o ibrida, il costo di un tale dispositivo è praticamente trascurabile rispetto a quello di un plotter digitale. Anche il numero dei componenti analogici è estremamente limitato, come si vede dagli schemi relativi.

Inoltre la quantità di informazione che deve essere inviata dal digitale al periferico è notevolmente inferiore a quella che sarebbe necessaria utilizzando un plotter digitale, il che comporta una migliore utilizzazione del tempo macchina digitale, senza peraltro interferire sul funzionamento della eventuale porzione residua di analogico; utilizzando gli interrupts ibridi anziché la Sense line segnata per semplicità nelle figure, si ottiene la minimizzazione del tempo che il calcolatore digitale spende nelle operazioni connesse all'output grafico.

APPENDICE

Assunto un sistema di coordinate cartesiane ortogonali avente l'origine O nel punto medio della diagonale del quadrilatero articolato congiungente l'estremo mobile A della manovella d'ingresso z_2 con il perno fisso a telaio O_1 del membro d'uscita O, B fisso al telaio, l'asse delle ascisse disposto secondo A O₁ e orientato da O verso O₁, l'asse delle ordinate orientato in modo tale che la sua intersezione con il telaio abbia ordinata negativa, la regione del piano nella quale può essere scelto il perno B in modo tale che l'angolo di trasmissione μ di un quadrilatero soddisfacente alla disuguaglianza di Grashof rimanga compreso nell'intervallo $\frac{\pi}{4} < \mu < \frac{3\pi}{4}$ è individuata con ottima approssimazione da due archi di circonferenza definiti dalle equazioni che seguono.

Si pongano:

z_1 = lunghezza del telaio

z_2 = lunghezza della manovella d'ingresso

$$l = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$$

$$y_1 = \sqrt{\frac{(x_1 + x_2)^2}{2 + \sqrt{2}} - \frac{l^2}{4}}$$

$$y_2 = \sqrt{\frac{(x_1 - x_2)^2}{2 - \sqrt{2}} - \frac{l^2}{4}}$$

Si chiamano:

y , il maggiore fra y_1 e y_2

y , il minore fra y_1 e y_2

Le coordinate degli estremi degli archi di circonferenza sono:

$$x_{p1} = \frac{1}{2} \cos \gamma$$

$$y_{p1} = \frac{1}{2} \sin \gamma$$

$$y_{p2} = -\frac{1}{2} \cos \gamma$$

$$y_{p2} = \frac{1}{2} \sin \gamma$$

dove γ è la soluzione della $\tan \frac{\gamma}{2} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \frac{8 x_1^2 x_2^2}{l^4}}}{\frac{2 \sqrt{2} x_1 x_2}{l^2}}$ che sta nel primo

quadrante.

Circonferenza inferiore:

centro $C_1 (x_1, y_1)$

$$x_1 = 0$$

$$y_1 = y_M - x_M \tan \phi$$

$$x_M = \frac{1}{4} \cos \gamma$$

$$y_M = \frac{1}{2} \sin \gamma + \frac{y_1 - \frac{1}{2} \sin \gamma}{2}$$

$$\tan \phi = \frac{x_{p1}}{y_1 - y_{p1}}$$

raggio r_1

$$r_1 = y_1 - y_{c_1}$$

angolo ξ di apertura del settore circolare

$$\xi = 4 \operatorname{artan} \sqrt{\frac{(x_M - x_{P_1})^2 + (y_M - y_{P_1})^2}{x_M^2 + (y_M - y_{c_1})^2}}$$

Circonferenza superiore :

centro $C_2 (x_{c_2}, y_{c_2})$

$$x_{c_2} = 0$$

$$y_{c_2} = y_M - x_M \tan \psi'$$

$$x_M = \frac{1}{4} \cos \gamma$$

$$y_M = \frac{1}{2} \sin \gamma + \frac{y_s - \frac{1}{2} \sin \gamma}{2}$$

$$\tan \psi' = \frac{x_{P_1}}{y_s - y_{P_1}}$$

raggio r_s

$$r_s = y_s - y_{c_2}$$

angolo ξ' di apertura del settore circolare

$$\xi' = 4 \operatorname{artan} \sqrt{\frac{(x_M - x_{P_1})^2 + (y_M - y_{P_1})^2}{x_M^2 + (y_M - y_{c_2})^2}}$$

BIBLIOGRAFIA

- [1] GALLETTI C. U., LUCIFREDI A. L., ROSSI A. A., « On the simulation of dynamic system and their graphic display by hybrid computer », *Annales de l'Association Internationale pour le calcul Analogique*, Bruxelles, 1974.
- [2] BONA C., « Possibilità di automazione nel progetto di meccanismi: l'uso di visori grafici come mezzo di comunicazione fra il progettista ed il calcolatore », *Convegno Organizzazione Aziendale Industrie Meccaniche*, Torino, settembre 1971.
- [3] RARE G. A., « Interactive graphics », *Purdue symposium*, 1971.
- [4] CALLAN J. F., « Real time highway display and interaction », *Simulation*, Vol. n. 1, 1971.
- [5] GOLDSTEIN R. A., NAGEL R., « 3-D Visual simulation », *Simulation*, Vol. 16, n. 1, 1971.
- [6] RARE G. A., « Simulation and computer graphics », *Simulation*, Vol. 19, n. 2, 1972.
- [7] STANBURY S. R., HOBBEROCK L. L., THOMPSON J. G., « Multiple terminal hybrid graphics for control-system analysis », *Simulation*, Vol. 18, n. 4, 1972.
- [8] GALLETTI C., LUCIFREDI A., « Su una regione del piano individuata dai vincoli sull'intervallo di variazione dell'angolo di trasmissione nei quadrilateri articolati », *Rapporto interno Istituto di Meccanica Applicata alle Macchine*, Università di Genova, 1972.