

L'evoluzione della computer-graphics Nuove frontiere per l'interazione uomo-computer

I sistemi grafici

Introduzione

Con questo secondo articolo si entra nel vivo della materia. Punto di partenza: le periferiche grafiche. La loro importanza sta nel fatto che senza di esse la grafica al computer non sarebbe esistita. A loro si deve la possibilità di creare le immagini e da loro quindi si deve partire.

Le periferiche grafiche possono essere suddivise in due grandi categorie: periferiche di output e di input, a seconda che la loro funzione sia di visualizzare le informazioni oppure di introdurre nel computer. Non necessariamente però queste ripartizioni — originate da considerazioni di carattere teorico/classificativo — vengono rispettate. Si pensi per esempio al classico terminale video grafico; verrebbe naturale considerarlo una periferica di output, in quanto permette la creazione di disegni, ma il fatto che sia dotato di una tastiera indica che può essere utilizzato anche come periferica di input.

Anzi accade talvolta che la capacità di visualizzazione venga utilizzata per integrare le funzionalità di input. È questo il caso della funzione di Echo: quando si introducono dei dati da tastiera, appaiono anche sul video; questo fatto non ci deve però ingannare. Il computer — o meglio il sistema operativo — non sta visualizzando delle informazioni richieste dall'utente (output) ma sta facendo comparire sul video ciò che l'utente sta introducendo (input). Ciò viene fatto per facilitare l'utilizzatore nel controllare i dati che sta introducendo, limitando quindi le possibilità di errore.

Questo tipo di periferica, che racchiude sia le funzionalità di output, che quelle di input, viene detto terminale interattivo, in quanto permette una vera e propria interazione tra l'utente che introduce i dati, ed il computer che li fa vedere immediatamente, permettendone quindi un'eventuale modifica diretta.

Perciò la classificazione non fa riferimento necessariamente ad oggetti esistenti sul mercato; si tratta più che altro di una classificazione funzionale che permette di stabilire quali siano le funzioni che una periferica di output (oppure di input) deve possedere. Vedremo poi che questa bipartizione tornerà molto utile soprattutto nello sviluppo di software grafico, permettendo di separare le primitive di output da quelle di input.

Periferiche di output

Le periferiche di output sono dunque dei dispositivi che permettono di rappresentare su di un certo supporto, detto superficie di

visualizzazione, informazioni o immagini generate col computer.

Ve ne sono di svariati tipi, e spesso il loro funzionamento si basa su principi significativamente differenti. Possiamo comunque suddividerli in due tipi: quelli che producono un'immagine temporanea (i cosiddetti terminali video) e quelli che producono un'immagine permanente (periferiche per la stampa grafica). L'immagine permanente può essere riprodotta su diversi supporti, come per esempio la carta o la pellicola fotografica.

Terminali video

Vi sono principalmente tre tipi di terminale grafico: i terminali stroke, i DVST e i terminali raster. L'ordine in cui vengono elencati corrisponde grossomodo al loro ingresso nel mondo della grafica computerizzata. Da ciò non deriva necessariamente che uno sia meglio dell'altro; ciascuno è stato realizzato per risolvere problemi particolari o per integrare funzionalità non presenti nel modello precedente, magari perché non ritenute utili.

Val comunque la pena vedere brevemente i principi su cui si basa il loro funzionamento, anche perché ogni modello innovativo

ha sempre tra le sue caratteristiche quella di essere in grado di simulare tutte le funzionalità dei suoi predecessori.

Terminali Stroke: i vettori vengono rappresentati dalle coordinate dei loro estremi dalle istruzioni per la visualizzazione. Queste istruzioni vengono utilizzate per deflettere un fascio di elettroni generato da un emettitore, che così illumina alcune porzioni della superficie. Un vettore può essere mosso o ruotato molto velocemente, semplicemente ricalcolando le coordinate dei suoi estremi. Inoltre si possono ottenere risoluzioni molto elevate (è comune avere risoluzioni dell'ordine 409x4096). Il costo di questi terminali è elevato, soprattutto per i circuiti di deflessione.

Altri svantaggi sono che risulta complicato rappresentare superfici e che il terminale risulta sensibile alla complessità dell'immagine. Poiché il fosforo utilizzato è a bassa persistenza, l'immagine deve essere continuamente ripristinata e più linee sono presenti più lenta sarà questa operazione.

Terminali DVST: Questi terminali (Direct View Storage Tube) sono stati sviluppati per ovviare ai problemi del ritracciamento di immagini complesse. La differenza principale rispetto ai terminali Stroke sta nell'utilizzare un fosforo ad alta persistenza che non obbliga quindi il refresh dell'immagine. Lo svantaggio sta però nel non permettere la cancellazione selettiva di parti dell'immagine, se non ritracciandola completamente. Perciò questi terminali non possono essere utilizzati nella grafica di tipo interattivo.

Terminali Raster Scan: in questi terminali l'immagine non è più composta da coordinate di vettori, ma da una matrice X-Y di pixels (o picture elements), memorizzati in una particolare area detta frame-buffer. L'immagine viene ripristinata, una linea alla volta. Il principale vantaggio sta nel fatto che la velocità di refresh è indipendente dalla complessità dell'immagine. Il successo di questi terminali dipende principalmente dalla diminuzione dei costi delle memorie — il frame-buffer fa parte infatti del terminale e contiene l'immagine — e la loro diffusione è ormai assodata, basti pensare ai personal e home computers.

D'altra parte i terminali di tipo stroke hanno l'indubbio vantaggio di essere più vicini al modello geometrico delle immagini da rappresentare. Vedono cioè l'immagine composta da vettori geometrici. Per questo motivo i più recenti terminali raster uniscono le capacità e la flessibilità del frame-buffer con la facilità d'uso dei terminali stroke: sono cioè dotati al loro interno di un Scan-Converter che permette la traduzione di un vettore geometrico, espresso come

Figura 1
Pietre miliari nella storia della
Computer Graphics

- 1952 Primo video collegato ad un calcolatore (il Whirlwind del MIT) per produrre semplici disegni.
- 1962 La tesi di Ph.D. di Ivan Sutherland (*Sketchpad - A man-machine graphical communication system*) pone i fondamenti per la grafica interattiva.
- 1967 Steve Coons sviluppa il primo algoritmo per la costruzione di superfici sculturate.
- 1967 La Tektronix lancia sul mercato il monitor grafico 611, un terminale DVST a 11 pollici.
- 1968 I plotter CalComp, dotati di routine chiamabili da Fortran, stabiliscono uno standard grafico de facto. Esce il terminale T4002 della Tektronix, con un costo di 8.000 dollari (un quinto del costo di sistemi simili).
- 1970 I sistemi operativi Time-sharing forniscono potenza di calcolo a basso costo.
- 1974 Prima conferenza dell'ACM SIGGRAPH (gruppo speciale di interesse sulla grafica).
- 1980 Inizia l'era dei Personal Computer.

oppia di coordinate (i due estremi), in un insieme di pixels.

sono naturalmente altre tecnologie per visualizzazione temporanea di immagini, come in fase di sperimentazione, altre già in commercio; la loro diffusione, però, rimane ancora relativamente limitata, anche se in via di espansione. Tra queste vanno ricordate le tecnologie flat-panel, che permettono di realizzare video piatti, riducendo quindi sia l'ingombro che il consumo di energia. Terminali che utilizzano il flat-panel sono quelli a cristalli liquidi, quelli elettroluminescenti, quelli a LED e quelli a plasma.

Non sono stati costruiti anche dei CRT piatti, il problema principale legato alla realizzazione di terminali di questo tipo sta nella difficoltà — dovuta al consumo elevato di energia — di flettere il fascio di elettroni ad angoli molto grandi.

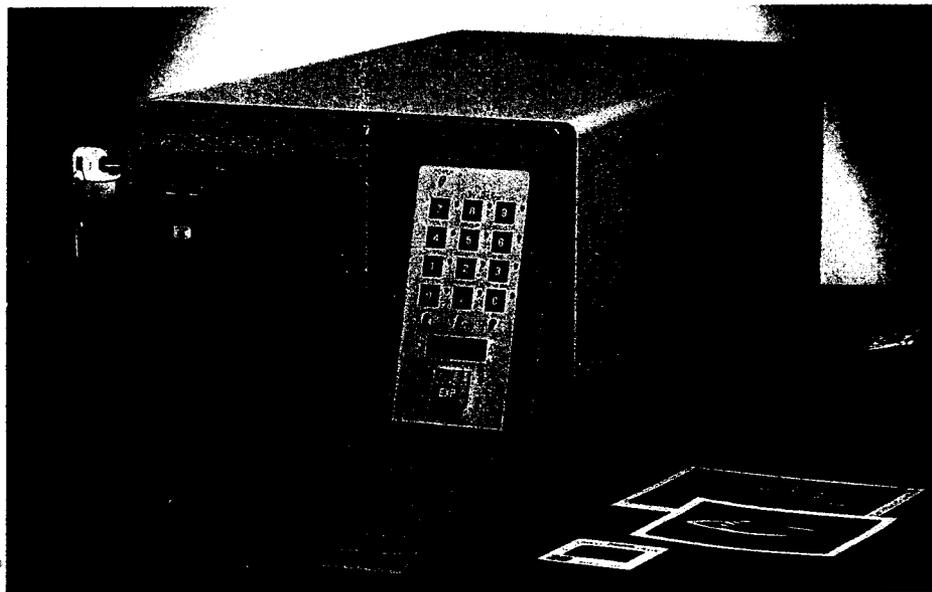


Fig. 3 - Periferica grafica per la generazione di diapositive.

mente per generare diapositive, utilizzate poi in presentazioni o seminari. È grazie a questi dispositivi che l'«era dei lucidi e delle lavagne luminose» sta tramontando (figura 3).

Elettrostatiche: la tecnica è simile a quella impiegata dai dispositivi elettrofotografici, con l'unica differenza che non si usa la luce, ma dei fili che hanno alle estremità degli elettrodi utilizzati per appoggiare delle cariche elettriche su della carta speciale (dielettrica), che viene poi passata attraverso un toner. Il toner viene attratto dalle zone caricate elettricamente e si fonde con la carta.

Termiche: sono simili alle elettrostatiche solo che i fili non utilizzano degli elettrodi, ma riscaldano una carta sensibile termicamente. Il calore rompe delle microcapsule presenti sulla carta che fanno fuoriuscire un liquido che genera l'informazione grafica.

A impatto dot-matrix: l'impatto è molto simile ai due precedenti, ma i fili sono dei piccoli martelletti che premono leggermente (come nella macchina da scrivere) su di un nastro inchiostroato. Cambiando il colore del nastro, si cambia il colore dell'immagine rappresentata.

A getto di inchiostro: l'approccio è simile ai tre precedenti, solo che i fili emettono delle goccioline di inchiostro che vengono gettate sulla carta utilizzando un campo elettrico (figura 4).

Periferiche in input

La tastiera del terminale, periferica di input per antonomasia, non è riuscita a stare al

passo con le evoluzioni tecnologiche della Computer Graphics. La sua capacità di introdurre rapidamente nel computer informazioni di tipo testuale si è rivelata di scarso utilizzo in applicazioni di tipo grafico interattivo, dove si richiede la possibilità di selezionare oggetti rappresentati sul termi-

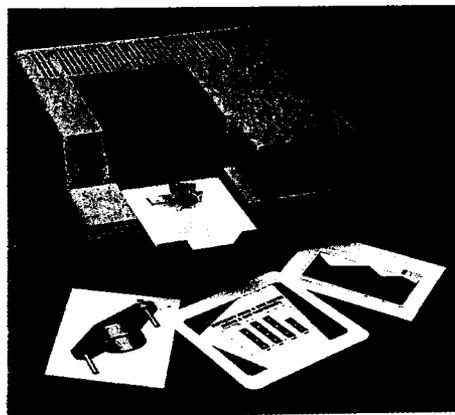


Fig. 4 - Stampante grafica a colori che utilizza la tecnologia Ink-jet (a getto di inchiostro).

Tecnologie per la stampa grafica

Andiamo rapidamente (si rischia un elenco infinito) le principali tecnologie utilizzate per «stampare» i disegni generati con il computer:

Impatto elettromeccanico: il più diffuso è senz'altro il Plotter che utilizza dei pennini per rappresentare il disegno. Cambiando i

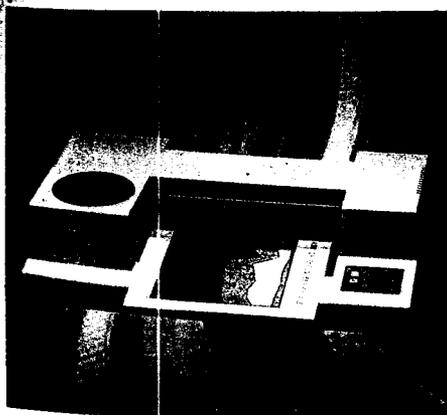


Fig. 2 - Plotter della Hewlett-Packard con i pennini intercambiabili disposti in cerchio sulla sinistra.

pennini si possono variare il colore e lo spessore della linea, ma non si possono rappresentare colori intermedi (come differenti livelli di grigio) (figura 2).

Elettrofotografico: un raggio di luce espone un mezzo fotosensibile, che viene successivamente sviluppato. Le periferiche più diffuse sono le stampanti laser.

Elettro-ottiche: si utilizza un'apposita macchina fotografica che fotografa il disegno visualizzato su un terminale. Queste apparecchiature vengono impiegate principal-

nale — per esempio indicandoli —, oppure di muoverli da un punto all'altro dello schermo.

Infatti il «Pointing» (indicare un oggetto) ed il «Positioning» (posizionare un oggetto facendolo muovere) costituiscono i tipi base dell'interazione grafica; devono quindi avere a disposizione degli strumenti «ad hoc». Vi sono stati dei tentativi di estendere le funzionalità della tastiera; per esempio Hewlett-Packard ha dotato alcune tastiere di una rotella piatta, detta Knob, che

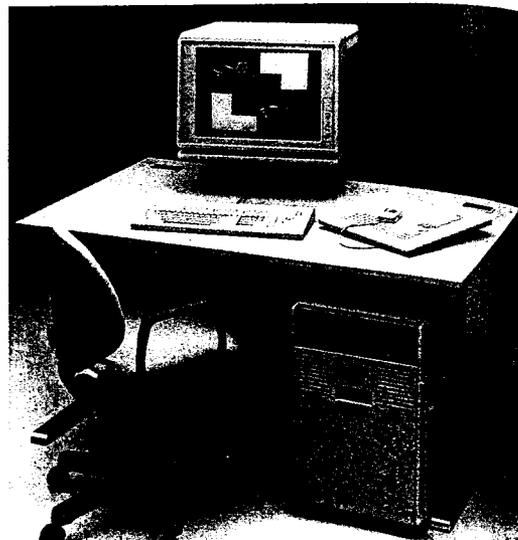
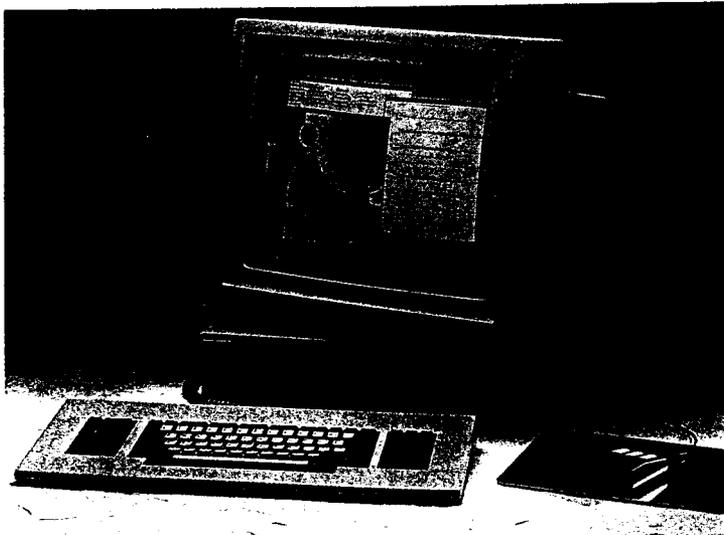


Fig. 5 - Terminale raster SUN/2 ad alta risoluzione equipaggiato con una tastiera ed un Mouse ottico. - Fig. 6 - Stazione grafica Tektronix che utilizza come periferiche di input una tastiera e una tavoletta digitalizzatrice.

permette di spostare rapidamente il cursore sul video in due direzioni, una opposta all'altra. Si tratta comunque di uno strumento inadeguato per applicazioni di grafica interattiva.

La più classica periferica di input è la penna ottica (light pen). Viene utilizzata direttamente sul video ed è composta da una fotocellula ed un sistema ottico, il tutto racchiuso in un involucro a forma di penna (per poter essere utilizzato con facilità), un cavo di collegamento con il computer ed un pulsante per comunicare la selezione. La penna ottica viene posizionata sull'oggetto da selezionare, si preme il pulsante, la luce dell'immagine entra nella penna, viene amplificata, passa per la fotocellula, la quale manda al computer un segnale. Con questo segnale è possibile risalire all'oggetto selezionato. La penna ottica, pur

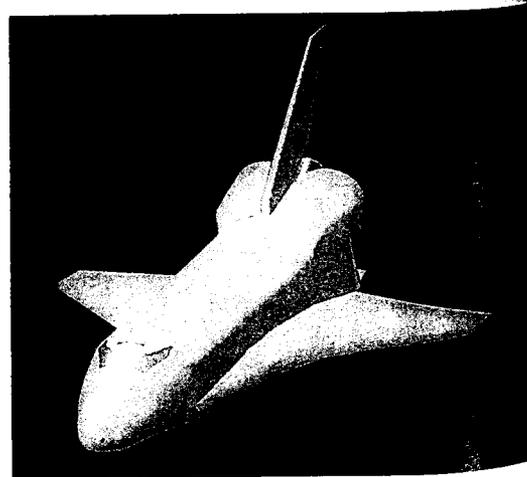
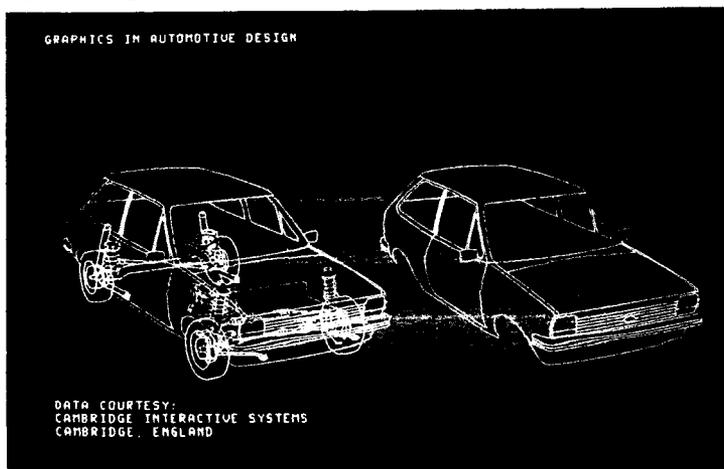
essendo economica, è recentemente caduta in disuso soprattutto perché poco ergonomica. Obbliga infatti il suo utilizzatore a tenere il braccio sollevato dalla scrivania, tendendo quindi ad affaticare chi ne fa un uso frequente.

Il Mouse, invece, risolve questo problema. È composto da una piccola scatola con uno o più pulsanti e un cavo di collegamento al computer. Viene usato facendolo muovere su una superficie piana (per esempio una scrivania), in una posizione quindi comoda. Ve ne sono sostanzialmente due tipi: quello meccanico, che si utilizza su una qualsiasi superficie liscia, e quello ottico, che ha bisogno invece di una particolare lastra metallica — dove sono tracciate delle righe di riferimento — per registrare il movimento (figura 5).

Il problema principale legato a questo tipo

di periferica (ve ne sono tanti tipi che funzionano secondo lo stesso principio logico, come per esempio Joystick, Tracker Ball, Tablet, (figura 6) è che richiede del software aggiuntivo che realizzi il cosiddetto Visual Feedback: alla periferica viene associato sul video un simbolo (per esempio una piccola croce, oppure una freccina), che indica all'operatore la posizione correntemente «puntata» dal Mouse. Ogniqualvolta viene spostato, il Mouse manda al computer le coordinate della nuova posizione (in forma assoluta o relativa). Sarà quindi compito del software aggiornare sul video la posizione del simbolo, coerentemente con lo spostamento effettuato. Il Visual Feedback è molto utile perché informa sempre l'utilizzatore su ciò che sta facendo, riducendo al minimo le operazioni indesiderate.

Fig. 7 - Immagine Wire-frame e immagine realistica.



Architetture grafiche speciali

Per concludere questa breve rassegna sulle periferiche utilizzate dalla Computer Graphics, è necessario volgere per un momento lo sguardo alle nuove tendenze.

L'evoluzione delle tecnologie grafiche, in particolare l'avvento della raster graphics, ha fornito nuovi e potentissimi strumenti per la rappresentazione grafica di oggetti con l'ausilio del computer. L'utilizzo della tecnica Wire-Frame (figura 7), che per molto tempo è stato il simbolo delle immagini generate da computer, tende a scomparire in favore di metodi rappresentativi molto più realistici. Viene usato il colore, si generano gli effetti di ombreggiatura e si riesce perfino a simulare l'aspetto esteriore dell'oggetto facendolo sembrare ora di plastica, ora di ferro, ora di vetro.

Questa aggiunta di realismo nella rappresentazione dell'immagine si deve soprattutto allo sviluppo di speciali architetture. Il principale problema da risolvere è il tempo per la cosiddetta Scan-Conversion, e cioè il passaggio dal modello tridimensionale

Le Look-up Table

La Look-up Table o «Tavolozza di colori» è una tecnica usata nei più recenti terminali grafici per estendere il numero di colori rappresentabili. Merito principale è quello di migliorare il rapporto costo/prestazioni nella rappresentazione di immagini colorate. Nei video tradizionali, ad ogni pixel (picture element) del video corrispondono un certo numero di bit; il loro numero determina il numero massimo di colori differenti utilizzabili. Se per esempio si dispone di 8 bit per ogni pixel, si possono rappresentare al più 256 (2^8) colori ed il valore di questi 8 bit corrisponderà ad un'opportuna combinazione dei 3 colori fondamentali, per generare il colore voluto. Utilizzando la Look-up Table, invece, il valore di quei bit corrisponde ad un indirizzo che punta ad una tabella (la Look-up Table appunto) che contiene le combinazioni dei tre colori fondamentali.

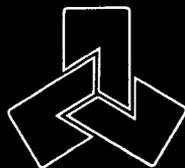
Il vantaggio di avere introdotto questo secondo livello di indirizzamento sta nel po-

ter avere a disposizione molto più di 256 colori. In questo caso il numero massimo di colori rappresentabili dipenderà esclusivamente dalla dimensione della tavolozza. Però con 8 bit si possono indirizzare al massimo 256 elementi, per cui sul video potranno essere presenti sempre al massimo 256 colori contemporanei, scelti però da una tavolozza che ne contiene molti di più. Questo spiega affermazioni del tipo «128 colori contemporanei scelti fra 1.000.000», sempre più frequenti sulle schede che accompagnano i terminali grafici. Se vorremo utilizzare un nuovo colore non presente tra i 256 correntemente utilizzati, dovremo sceglierlo nella tavolozza e sostituire il suo indice con uno degli indici utilizzati precedentemente. In questo modo tutti gli oggetti presenti sul video col vecchio colore, verranno immediatamente «dipinti» col nuovo colore. Questo mutamento è istantaneo, tanto è che sono state sviluppate delle tecniche di animazione che utilizzano la Look-up Table (per esempio per simulare lo scorrere di un ruscello).

carte plastiche

Carte plastiche per ogni esigenza

- tessere per sportelli automatici (bancomat)
- carte di credito, carte assegni
- tessere per controllo d'accesso
- tessere di identificazione
- tessere per la distribuzione di beni e servizi
- tessere per associazioni e clubs
- tessere sconto e di garanzia



pikappa srl

via confalonieri, 6 - 20060 masate (mi)
tel. (02) 950.800.1 - 95.761.001
telefax (02) 950.827.0 - 95.761.270
telex 352088 pikappa i

Nuovo service

A completamento della nostra produzione, siamo in grado di offrire ai nostri Clienti un servizio di personalizzazione delle carte plastiche, completamente automatico.

Le operazioni di codifica, punzonatura, indirizzatura e imbustamento, sono eseguite da un sistema che utilizza il floppy disc o il nastro magnetico del Cliente, garantendo così la riservatezza dei dati immessi.

l'oggetto ad una sua rappresentazione di un terminale raster (cioè ad un insieme di pixels). Questa operazione richiede altissime risorse di calcolo. Per ovviare a questo problema sono state sviluppate speciali architetture di tipo sia parallelo che a pipeline e sono stati sviluppati nuovi algoritmi che ben si adattano alle nuove architetture.

La maggior parte di questi sistemi esplora il parallelismo offerto dall'algoritmo «Buffer», utilizzato per la rimozione delle linee nascoste. Questo algoritmo si presta molto bene ad una parallelizzazione, quanto è costituito da una serie di operazioni molto semplici e ripetitive, che si applicano a piccole parti dell'immagine (i pixels). La difficoltà sta però nel fatto che nella «versione parallela» di questo algoritmo non si possono introdurre operazioni

addizionali, come l'antialiasing o lo shadowing, fondamentali per una rappresentazione realistica dell'oggetto.

Un'altra tecnica utilizzata per aumentare la velocità di calcolo — e di conseguenza di generazione dell'immagine — è il cosiddetto Pipelining. In questo caso alcune operazioni eseguite dal sistema vengono sovrapposte temporalmente migliorando la resa complessiva (il cosiddetto throughput) del sistema. Un tipico esempio di pipeline viene applicato in alcuni elaboratori di uso generale, in cui mentre la cpu sta eseguendo un'istruzione, è già disponibile la prossima istruzione da eseguire. In questo modo il cosiddetto «ciclo di fetch» di un'istruzione non è più rigidamente sequenziale, ma ha delle sovrapposizioni temporali. ■

Andrea Granelli

(2 - continua)

Funzionamento di un CRT

Il Tubo a Raggi Catodici (CRT) è sostanzialmente un oggetto di vetro a forma di bottiglia con del fosforo all'estremità più allargata (la superficie di visualizzazione) ed una sorgente di elettroni — detta Electron Gun — nella parte più stretta (figura 8). Il fosforo, colpito da un fascio di elettroni, libera radiazioni luminose. In questo modo la combinazione di zone illuminate sulla superficie di visualizzazione genera l'immagine.

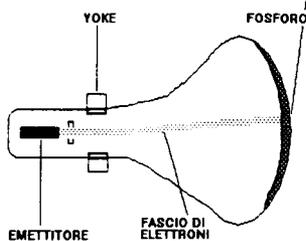
L'Electron Gun utilizza dei campi elettrostatici per mettere a fuoco ed accelerare gli elettroni, generati da un catodo composto da filamenti elettrici. Il catodo è circondato da un involucro metallico, detto Griglia di Controllo (Control Grid), con un foro nell'estremità rivolta verso il fosforo. Poiché questo involucro è tenuto ad un potenziale inferiore a quello del catodo, gli elettroni vengono attratti all'esterno e fuoriescono dal foro. Variando il potenziale della Griglia di Controllo, si può controllare la velocità del flusso di elettroni — e di conseguenza la «brightness» dell'immagine generata.

Una volta fuori dall'involucro, gli elettroni entrano in un'altra struttura metallica, che ha lo scopo di accelerare ulteriormente il fascio e di metterlo a fuoco. Per poter generare un'immagine, si deve però poter controllare esattamente quali punti della superficie ricoperta di fosforo verranno eccitati dal fascio di elettroni, in modo da illuminare soltanto la parte interessata. Perché questo accada, il fascio di elettroni deve essere controllato con grande precisione; a questo scopo viene predisposto un sistema di elettromagneti (detto Yoke) che permette di flettere il fascio verso qualsiasi

punto della superficie di visualizzazione. Poiché generalmente il fosforo utilizzato dai CRT è a bassa persistenza, l'immagine tende a perdere luminosità molto rapidamente; per questo motivo deve essere continuamente ripristinata, generalmente ciò accade almeno 30 volte al secondo. Se la frequenza di questa operazione, detta Refresh, è però inferiore a 30 volte al secondo, l'immagine appare traballante generando quel fenomeno noto come Flickering e dipendente dal meccanismo percettivo dell'occhio umano.

Nel caso dei terminali a colori, invece, il dispositivo si complica leggermente. Viene frapposto, tra il fosforo e gli emettitori del fascio (che adesso sono 3, uno per ogni colore fondamentale e cioè rosso, verde e blu), una lastra di metallo, detta Shadow Mask, con dei piccoli buchi rotondi, raggruppati a tre a tre. Il sistema di deflessione fa muovere solidalmente i tre emettitori, in modo che in ogni punto dello schermo ciascun emettitore «punti» ad uno dei tre fori. Sotto di questi vi sarà del fosforo del colore corrispondente a quello controllato dall'emettitore. In questo modo è possibile rappresentare un colore come combinazione di tre pigmenti colorati, ciascuno con una certa intensità.

Fig. 8 - Schema del CRT.



BIBLIOGRAFIA RAGIONATA

[CARL80] I.B. Carlborn: *System Architecture for High-Performance Vector Graphics*. PhD thesis, Dept. of Computer Science, Brown University, Providence, R.I., 1980.

[CZEC57] J. Czech: *The Cathode Ray Tube Oscilloscope*. Interscience, 1957, New York.

[DAV169] S. Davis: *Computer Data Display*. Prentice Hall, Englewood Cliff, 1969, New Jersey.

[FOLE84] J.D. Foley, A. Van Dam: *Fundamental of Interactive Computer Graphics*. Addison Wesley, 1984.

[FOXW84] D. Fox, M. Waite: *Computer Animation Primer*. McGraw-Hill Byte Books, 1984, New York.

[KAPL79] M. Kaplan, D.P. Greenberg: *Parallel Processing Technique for Hidden Surface Removal*. Siggraph '79 Proceedings, ACM Computer graphics, vol. 13, n. 2, Agosto 1979.

[KNOW75] K.C. Knowlton: *Virtual Pushbuttons as a Means of Person-machine Interaction*. Proceedings of IEEE Conference on Computer graphics, Pattern Recognition and Data Structure, Maggio 1975.

[NEWM68] W.M. Newman: *A System for Interactive Graphical Programming*. SJCC 1968, Thompson Books, Whashington.

[NEWM81] W.M. Newman, R.F. Sproull: *Principles of Interactive Computer Graphics*. Second Edition, McGraw-Hill, 1981, Tokyo.

[POBG71] P.J. Pobjee, J.R. Parks: *Application of a Low Cost Graphical Input Tablet*. IFIP 1971, North-Holland, 1971, Amsterdam.

[ROSE84] A. Rosenfeld Editor: *Multiresolution Image Processing and Analysis*. Springer Verlag, 1984, Berlino.

[SHAP78] H.D. Shapiro: *Theoretical Limitations on the Efficient use of Parallel Memories*. IEEE Transactions on Computers, vol. C-27, n. 5, Maggio 1978.

[SHOU79] R. Shoup: *Color Table Animation*. Siggraph '79 Proceedings, ACM Computer Graphics, vol. 13, n. 2, Agosto 1979.

[SLOA79] K. Sloan, C. Brown: *Color Map Techniques*. Computer Graphics and Image Processing, vol. 10, n. 4, Agosto 1979.

Per approfondire la parte sulle periferiche di output, con particolare riferimento ai terminali si veda [DAV179] e [NEWM81]. [CZEC57], invece, descrive i principi fisici su cui si basa il funzionamento del tubo a raggi catodici (CRT) utilizzato dai terminali.

Per i dispositivi di input, invece, si può vedere per la parte teorica su dispositivi logici di input [NEWM68] e [NEWM81], mentre per alcuni esempi pratici [KNOW75] e [POBG71].

Per la parte riguardante le architetture speciali, è difficile consigliare del materiale, data la diversità di realizzazioni. Un articolo molto interessante sulla teoria del parallel-processing e sulle sue limitazioni, è [SHAP78], mentre [FOLE84] prende in esame, nel capitolo «Advanced Display Architecture», alcuni sistemi presenti in commercio. Articoli più specifici su architetture esistenti si possono trovare in [ROSE84], [KAPL79] e [CARL80].

Infine sull'utilizzo delle Look-up Table e sulle sue applicazioni alla generazione del colore, si può vedere [SHOU79] e [SLOA79]. Per chi fosse interessato invece all'utilizzo della Look-up Table nelle tecniche di animazione, può consultare [FOXW84].