Bilgisayar Grafiğinde Donanım

Bir doktora öğrencisinin Massachusetts Institute of Technology'de 1960 yılında bir radar sisteminden yararlanarak yapmış olduğu bilgisayar grafiği terminali, etkileşimli iletişim ortamını grafiksel anlatım biçimine dayayarak geliştirilmiş ilk yazılım-donanım uygulaması olarak kendisini dünyaya tanıttı. Bunu izleyen yaklaşık on yıl, donanım yeteneğinin rekabeti konusunda birçok firmanın parlamasına, bir o kadarının da batmasına sahne oldu. Ancak, gelişmeleri kamçılayan gereksinimlerin temel tanımları ortaya açıkca konuldukça, araştırmaların önemi daha kuvvetle vurgulanıp, bilgisayar grafiği bir amaçtan çok, bir araç olma özelliğiyle de benimsenmeye başlandı. Bu gelişmelerden sonra, kendi çerçevesi içinde hızla büyüyen bu bilim dalı, sadece grafik konularında değil, kullanıcı arabirimlerinden, dizgi-baskı sistemlerine kadar bilgisayar yaşantısının ayrılmaz bir parçası oldu. Bugün, özellikle yetenekli kişisel bilgisayarlardan, her türlü iş istasyonlarında; nokta matrisli yazıcılardan, lazerlerde kullanıcıya görsel olarak iletilen her türlü bilgi, grafik yöntemleriyle üretilmektedir. Kolumuzdaki değişik elektronik saatlerden, mikrodalga denetim panosuna kadar yaşamımıza girmiş olan grafik gösterim aygıtları, bilgileri bize bilgisayar grafiği yöntemleriyle iletmektedir. Bu tür aygıtların işleyiş prensiplerini okurlarımıza anlatmakta yarar görerek bu yazıyı hazırladık. Burada anlatılmayan daha birçok donanım öğesi olmasına rağmen, bunların çok özel amaçlı kullanılmaları nedeniyle, biz günlük yaşamımızda daha çok rastladığımız aygıtları inceledik.

Bülent Özgüç
Bilkent Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

BİLGİSAYARLARDA grafik görüntüler elde etmek amacıyla, çok sayıda etkileşimli aygıt ve grafik yazılımı kullanılabilmektedir. Daha gelişmiş bilgisayarlarda, özel olarak geliştirilmiş grafik sistem ve teknolojilerinden yararlanılabilir.

Video Gösterim Araçları

Grafik sistemlerinde en temel araçlardan birisi olarak video monitörünü verebiliriz. Video monitörlerinin çoğu işleyiş biçimi bakımından birbirlerine çok benzer. Bunlar, bir standart katod ışınlı tüp (CRT) aracılığı ile görüntü elde

ederler. Gelişmekte olan birçok farklı teknoloji sonucu, zamanla katod ışınlı tüp monitörlerde güncelliğini kaybedecektir.

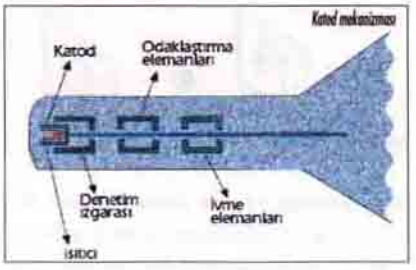
Katod Işınlı Tüp

Elektronlar, odaklaştırma ve yönlendirme sistemlerinden geçer, bu sistemler, elektron demetini fosforlu yüzeydeki belli bir noktaya düşürür. Fosforun parlaması ile bu nokta görünür bir konuma geçecektir. Fosfor tarafından yayılan ışık dalgaları çok çabuk kaybolduğu için, ekranda kalıcı bir görüntü sağlayacak yöntemlere gereksinim vardır. Fosforun devamlı parlamasının bir yolu, aynı noktaya sürekli elektron düşürmektir. Bu tip gösterime tazelemeli CRT denir.

CRT içerisindeki elektron kaynağının en temel parçaları, ısıtılmış metal katod ve denetim ızgarasıdır. Katod içinde ısı, silindirik katod yapısının içinde bulunan ve filament diye adlandırılan, elektrik tellerinden akımın geçmesiyle oluşur. Bu işlem elektronların sıcak olan katod yüzeyini bırakmalarına neden olur. CRT zarfının içerisindeki vakumlu bölgede serbest negatif elektronlar, yüksek bir pozitif voltaj sayesinde fosforla kaplı yüzeye doğru yönelirler.

Ivme voltajı, tüp içinde pozitif yüklenmiş metal kaplamayla veya ivme anodu ile elde edilebilir. Bazen ivme anodu ve odaklaştırma sisteminin tümü elektron kaynağı ile birlikte tek bir elektronik birim olarak çözülür. Elektron demetinin yoğunluğu, katodun etrafına oturtulan silindir şeklinde olan, denetim ızgarası üzerinde voltaj seviyesini belirleyerek ayarlanabilir. Denetim ızgarasına verilen yüksek negatif voltaj elektron demetini geri iterek, çıkmalarını önler. Denetim ızgarasında daha küçük negatif bir voltaj, bazı elektronların geçmelerine engel olamaz. Fosfor kaplı yüzeyin ışığı yayma oranı ekrana çarpan elektron sayısına bağlıdır. Denetim ızgarasındaki voltajı değiştirerek, görüntünün parlaklığını ayarlayabiliriz.

CRT içerisindeki odaklaştırma sistemine, elektron demetinin fosfor tabakasına çarptığı zaman çok ufak bir noktada birleşmesini sağlamak için gereksinim vardır. Aksi takdirde, elektronlar birbirini iterler ve dalga ekrana yaklaştıkça dağılabilir. Odaklaştırma elektrik veya manyetik alanlarda olabilir. Elektrostatik odaklaştırma genellikle televizyon ve bilgisayar grafiği monitörlerinde kullanılır. Elektrostatik odaklaştırma, elektron demetinin pozitif



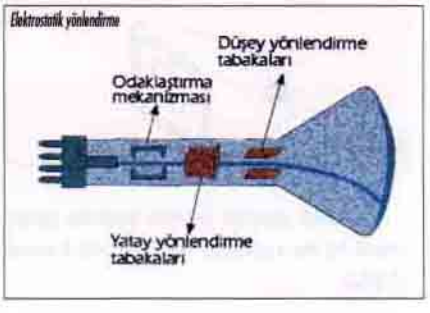
yüklü metal silindirin içerisinden geçmesiyle oluşur. Elektrostatik mercek, optik merceklerde olduğu gibi, elektron demetini ekranın istenilen yerine odaklar. Manyetik odaklaştırma, ekranda en duyarlı ve küçük odaklaşmayı oluşturur ve özel amaçlı laboratuvar aygıtlarında kullanılır. Bu sistemlerde, elektrostatik plakalar yerine, elektromıknatıs gereçleri kullanılır.

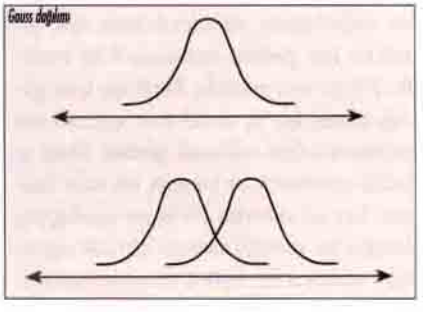
Yüksek duyarlığı olan sistemlerde, bütün ekran noktalarında demeti odakta tutabilmek için ek odaklama donanımları kullanılır. Ekranın üzerinde parlaması gereken noktanın konumuna göre, elektron demetinin katetmesi gereken uzaklıklar değişkendir. Bu nedenle elektron demeti ekranın merkezinden ekranın dış köşelerine hareket ettikçe, görüntüler bulanıklaşacaktır. Bu durumu giderebilmek için, demetin ekran pozisyonuna bağlı olarak çalışan odaklaştırma sistemleri geliştirilmiştir.

Elektron demetinin yönlendirilmesi elektrik veya manyetik alanlarla kontrol edilebilir. Katod ışınlı tüpler, günümüzde genellikle manyetik alan aracılığı ile yönlendirilirler. Bu işlem için iki çift elektro mıknatıs kullanılır. Bir çift, tüpün boynunun altına ve üstüne, diğeri de boynun karşı köşelerine yerleştirilir. Bu çiftler halinde yerleştirilmiş elektro mıknatıslar sayesinde oluşan manyetik alan yön değiştirme gücü oluşturur; bu güç de, hem manyetik alana hem de elektron demetinin hareket yönüne diktir. İstenilen yön değiştirme miktarları elektro mıknatıslardan geçirilen akım ile sağlanır. Elektrostatik yönlendirme kullanıldığı zaman, CRT zarfının içerisine, elektro mıknatıslar yerine, iki çift paralel elektrostatik metal plaka yerleştirilir.

Elektronlar fosfora çarptıkları zaman dururlar ve kinetik enerjileri fosfor tarafından emilir. Enerjinin bir kısmı sürtünmeyle ısı enerjisine dönüşür, geriye kalan da, fosfor atomlarındaki elektronların, kuvantum enerjilerinin çok yüksek bir seviyeye çıkmasına neden olur. Kısa bir zaman sonra, "hareketli" fosfor elektronları durağan zemin seviyelerine, fazla enerjilerini ışık enerjisi olarak dışarıya vererek, geri dönmeye başlarlar. Bizim ekranda gördüğümüz de tüm elektron ışık emisyonlarının ortak etkisidir: bütün hareketli elektronların temel enerji seviyelerine dönüşlerinden sonra çabucak kaybolan parlak bir noktadır. Fosfor tarafından yayılan ışığın frekansı (veya rengi), hareketli kuvantum hali ile temel hali arasındaki enerji farkına doğru orantılıdır.

CRT'de kullanılabilecek çok farklı fosforlar vardır. Rengin yanında fosforlar arasında en büyük değişiklik, kalıcılıklarıdır. Başka bir deyişle, elektron akını durduktan sonra ışığı daha ne kadar yaymaya devam edebildikleridir. Kalıcılık, ekrandan yayılan ışığın gerçek yoğunluğunun 1/10'una kadar düşmesi için gereken zamana denir. Düşük kalıcılık özelliği olan fosforların, ekranda titreşimsiz görüntü meydana getirebilmeleri için daha yüksek tazeleme oranlarına gereksinimleri vardır. Bu tür fosforlar animasyon için elverişlidir. Bunun nedeni, hareket sağlamak için saniyede en az 30 kere tazelenmesi gereken ekranın, bir görüntüden diğerine geçerken eski görüntünün hemen kaybolup, istenmeyen izler bırakmamasıdır. Yüksek kalıcılık özelliği olan fosforlar da, oldukça karmaşık, statik resimlerin gösteriminde kullanışlıdır. Bazı fosforların kalıcılık değerlerinin 1 saniyeden büyük olmasına rağmen, grafik monitörlerinde 10 ila 60 mikrosaniye arasında değişen değerlere sahip fosforlar kullanılmıştır.





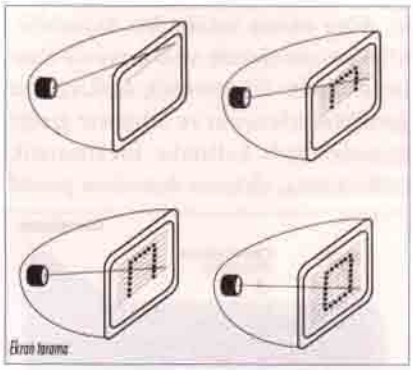
Parlayan noktanın ekrandaki yoğunluğu Gauss dağılımı şekildeki gibidir. Noktanın merkezinde yoğunluk en büyüktür ve kenarlara gidildikçe düşer. Ekranda, en çok sayıda noktanın birbiri üzerine binmeden görüntülenmesi olayına çözünürlük denir. Çözünürlüğün daha net bir tanımı ise, yatay veya düşey yönde, bir uzunluk biriminde bulunan nokta sayısıdır. Noktanın büyüklüğü de yoğunluğa bağlıdır. Fosfora düşen elektron miktarı birim zaman içinde artarsa, parlayan noktanın çapı büyür. Bunlara ek olarak artan hareket enerjisi komşu atomlara dağılma eğilimi gösterir ve böylece noktanın çapını daha da artırır. CRT'nin çözünürlüğü fosforun türüne, elektron enerjisinin miktarına, odaklaşma ve yönlendirme mekanizmalarına bağlıdır.

Video monitörlerinin diğer bir özelliği ise yatay ve düşey yönde eşit uzunlukta çizgi elde edebilmek için, yatay noktaların düşey noktalara olan oranlarıdır.

Nokta Tarayan Katod Işınlı Tüp: CRT'nin kullanıldığı en yaygın grafik aygıtı, nokta tazeleyen ve televizyon tekniğine göre yapılmış olan monitördür. Nokta tazeleme sisteminde, elektronlar fosforu belirli bir noktada parlatmak amacı ile değil, tüm ekranı belirli bir düzende ve sürekli olarak taramak amacı ile hareketlendirilirler. Bu tarama sırasında, eğer bir nokta parlatılacaksa, sıra o noktaya geldiği zaman, elektron enerji düzeyi ayarlanarak bu sağlanır. Ekrandaki görüntünün tanımı, görüntü tazeleme belleği veya döngülü çerçeve bellek diye adlandırılan birimde saklanır. Bu bellek, yoğunluk değerlerini ekrandaki her nokta için saklar. Saklanan yoğunluk değerleri bir döngü içinde ekranda sırayla çizilir. Herbir ekran noktasına görüntü (resim) elemanı, "pixel" veya "pel" adı verilir.

Evlerimizde kullandığımız televizyonlar ve yazıcılar bu yöntemle çalışan diğer örneklerdir.

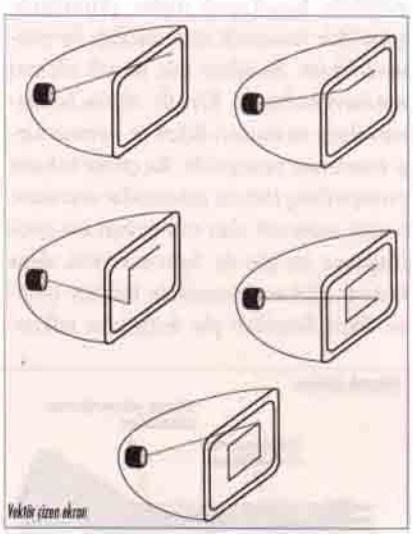
Görüntü elemanı için saklanması gereken değerler, sistemden beklenen kapasiteye bağlıdır. Örneğin basit bir siyah beyaz sistemde, her bir ekran noktası kapalı veya açıktır, böylece her görüntü elemanı için bir bit'e gereksinim duyulur. Ekran konumlarının yoğunluğunu denetleyebilmek için, genellikle her görüntü elemanına 8 bit ayrılır. Bu 256 gri tonu verebilir. Renk işin içine girdiği zaman, her üç temel renk için ayrı ayrı yoğunluk bilgisi saklamak gerekir. Daha az bellek gerektiren bir yöntem ise, renk haritası diye adlandırılan bir birim aracılığıyla, örneğin her görüntü elemanı için 256 yoğunluğu olabilen bir bellek düzenlemesinde,



her yoğunluğu bir renk olarak yorumlar. Basit siyah beyaz sistemlerde görüntü tazeleme belleğine bit haritası (bitmap), gri tonu veya renk veren sistemlerde de bu belleğe pixharitası (pixmap) denir.

Nokta tazeleyen sistemlerde, ekran yukarıdan aşağı doğru, satır satır taranır. Bu sıra, bazen ilk geçişte tek numaralı satırlar, ikinci geçişte çift numaralı satırlar şeklinde iki parça halinde olabilir. Ekranın tarama yöntemi ne olursa olsun, asıl amaç, tarama hızının tüm ekran için saniyede en az 30 kere tekrar etmesini sağlamaktır. Daha yavaş olacak bir tarama, görüntünün sabit kalmasını etkileyecek ve ekranı izleyen göz, tarama aralıklarını farketmeye başlayacaktır.

Rassal Tarayan Katod Işınlı Tüp: Rassal tarayan katod ışınlı tüp gözterim birimi olarak işletildiği zaman, CRT'nin elektronları ekranda resmin çizileceği yere yöneltilir. Bu tür monitörler, resmi çizerken, bir defada bir vektör çizer, bu nedenle, vektör tazeleyen monitör olarak da adlandırılırlar. Bu aygıtlarda tazelenen, belirli bir düzende ekranın tümü değil, çizimi oluşturan sırada vektörlerin kendileridir.



Kalemli çiziciler de aynı sistemle çalışır ancak bu tür aygıtlarda tazeleme söz konusu değildir.

Rassal taramada tazeleme oranı, gösterilecek olan vektör sayısına bağlıdır. Bu sistemde, görüntünün bellekte saklanışı çok daha karmaşıktır. Sadece ekranı oluşturacak noktalar değil, çizilecek şeklin bir tür geometrik tanımı gereklidir. Bu tanımı içeren görüntü belleklerine tazelenen görüntü kütüğü adı verilir. Tazelenen bu bellekler, basit bir veri kütüğünden çok, bir program görünümüne sahiptir. Bu nedenle, görüntü listesi veya görüntü programı olarak da adlandırılırlar. Bu liste içinde kısa vektör, uzun vektör, çizmeden atla, eğer donanım destekliyorsa renk değiştir gibi komut sözcükleri bulunur.

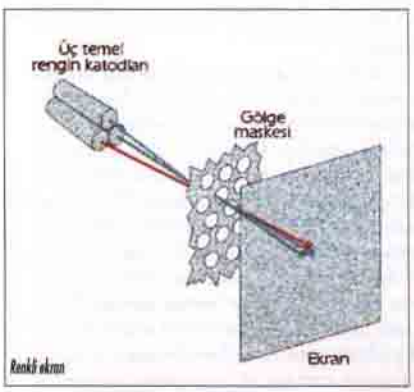
Yüksek kalitedeki vektör sistemleri, yaklaşık 100 000 kısa vektörü saniyede 30 kere çizebilme yeteneğine sahiptir. Küçük bir çizgi kümesinin gösterimi söz konusu olduğunda, 60 çerçeve/saniye'den büyük olan tazeleme oranlarına yakalanmamak için herbir tazeleme döngüsü yavaşlatılır. Aksi takdirde, çizim tazeleme hızı fosforun yanmasına neden olabilir.

Bu sistemler, çizgi çizme uygulamaları için düzenlenmiştir ve gerçek gölgeli manzaralar, renk oyunları gösterilemez, ancak vektör gösterimleri pürüzsüz ve çok kalitelidir, çünkü sanki bir kalemle kağıda çizim yapılıyormuş gibi doğrudan istenen vektörü çizerler. Bir nokta tarayan sistem, tersine, vektörü sonlu nokta kümeleri olarak çizer, bu da 'merdiven basamağı' diye adlandırılan olumsuz etkilere neden olabilir.

Renkli CRT Monitörleri: Farklı renklerdeki ışıkları yayan fosforlar bir arada kullanılarak, bir CRT monitörü renkli resimler gösterir. Değişik fosforlardan yayılan ışınlar birleştirilerek, farklı renkler elde edilebilir. CRT ile renkli görüntü sağlayabilmek için kullanılan temel iki yöntem, ışın geçirgenliği ve gölge maskelemedir.

Renkli resimlerin gösteriminde kullanılan ışın geçirgenliği yöntemi rassal tarayan monitörlerde kullanılır. İki değişik tür fosfor, iki kat olarak ekranın içine kaplanır. Bunlar genellikle yeşil ve kırmızı renk verirler. Yavaş elektron demeti sadece dış kırmızı katmanı harekete geçirir. Çok hızlı elektronlardan oluşan bir ışın ise kırmızı katmandan geçerek iç yeşil katmanı haraketlendirebilir. Orta hareketli ışınlarda, kırmızı ve yeşil ışık birleşiminde emilerek sarı ve turuncu olmak üzere ek iki rengin daha gösterilmesini sağlar. Rassal taramalı monitörlerinde, ışın geçirgenliği ile renk üretmek, pahalı olmayan bir yoldur. Fakat bu yöntemle sadece dört renk üretmek olasıdır. aynı zamanda kalite de diğer yöntemlerle olduğu kadar yüksek değildir.

Nokta tarayan sistemlerinde (renkli televizyonlarda dahil olmak üzere) genellikle gölge maskeleme yöntemleri kullanılır. Bu yöntemle, üç ana rengin birleşiminden elde edilebilecek tüm renkler üretilebilir. Bir CRT gölge maskesinde, her bir görüntü elemanı pozisyonunda, üç renkli fosfor noktası vardır. Bunlardan birisi kırmızı ışığı emer. Bir diğeri yeşil, üçüncüsü de mavi ışığı emer. Bu tür CRT'de üç elektron katodu ve fosforla kaplı ekranın hemen arkasında bir gölge maskeleme ızgarası vardır. Elektron katod mekanizmalarının her biri, ayrı bir renkli nokta içindir. Üç elektron ışını, gölge maskesi üzerine grup olarak yönlendirilip odaklaştırılır. Bu üç ışın gölge maskesi deliklerden geçerken, bir nokta üçgeni oluştu-



rurlar, bu da ekranda küçük bir renk noktası olarak yansır. Bu üçgenlerdeki noktalar, gölge maskesinden geçerken, herbir elektron ışını kendisi ile eşlenen renkteki noktayı harekete geçirebileceği şekilde düzenlenmiştir.

Bu üç elektron katodunun diğer bir düzenlemesi de doğrusal olarak yapılabilir. Bu düzenlemede, ekrandaki eşlenen kırmızı, yeşil ve mavi renk noktaları, üçgen şekli yerine bir tarama çizgisi boyunca sıralanmıştır. Elektron katodunun bu doğrusal düzenlemesi, yüksek çözünürlü renkli CRT'lerde çok yaygın bir şekilde kullanılır.

Üç elektron ışınındaki yoğunluk seviyelerini farklılaştırarak, gölge maskesi CRT'sinde renk değişiklikleri elde edebiliriz. Kırmızı ve yeşil ışınları söndürerek, mavi fosfordan gelen rengi elde edebiliriz. Işın yoğunluklarının diğer birleşimleri, bizim gözlerimiz üç rengi bir bütün olarak algılamaya meyilli olduğundan, herbir görüntü elemanı pozisyonu için küçük ışık noktası oluştururlar. Bizim gördüğümüz renk, kırmızı, yeşil ve mavi fosforun parlama miktarına bağlıdır. Bir beyaz (veya gri) alan, üç noktanın eşit miktarda yoğunluğu ile aktif hale getirilmesinin sonucudur. Sarı sadece yeşil ve kırmızı noktalardan; magenta, mavi ve kırmızı noktalardan meydana gelir. Cyan ise mavi ve yeşil noktaların eşit miktarda aktif hale getirilmesiyle gözükür. Bazı ucuz sistemler, elektron ışınının açılıp, kapatılmasıyla görüntüyü sekiz renkle sınırlar. Daha gelişmiş sistemler, elektron ışınları için orta kademede yoğunluk seviyelerini uygulayarak, milyonlarca rengin ortaya çıkmasını sağlar.

Renkli grafik sistemleri, değişik birçok CRT gösterim aygıtlarında kullanılmak üzere tasarlanabilirler. Bazı ucuz ev bilgisayar sistemleri ve video oyunları, renkli televizyonlarda ve RF (Radio-frequency) modülatörleriyle kullanılmak üzere tasarlanmışlardır. RF modülatörlerinin amacı, televizyon yayın istasyonundan gelen sinyalleri simüle etmektir.

Grafik sistemlerindeki renkli CRT'ler RGB monitörleri olarak tasarlanırlar. Bu monitörler, gölge maskesi yönetimini kullanırlar ve yoğunluk seviyesini her bir katod için (kırmızı, yeşil ve mavi) doğrudan bilgisayar sisteminden, ara aşamalardan geçmeksizin alırlar. Yüksek kalitedeki sistemlerde her bir görüntü elemanı için 24 veya daha fazla bit vardır ve böylece herbir elektron tabancası için 256 volt verilir. Bu, her bir görüntü elemanı için yaklaşık 17 milyon renk seçeneği yaratır. Her bir görüntü elemanında 24 bit depolanan RGB renkli sistemlerine genellikle tam renkli sistemler veya gerçek renkli sistemler denir.

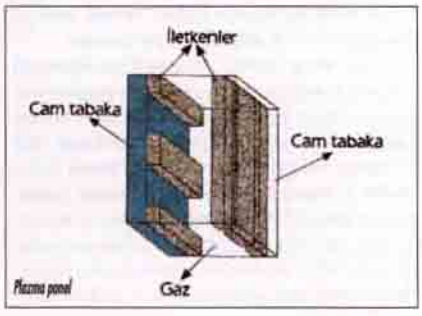
Doğrudan Görüntü Depolama Sistemleri: Ekran görüntüsü sağlamanın diğer bir yolu da, resim bilgisini ekranı tazelemek yerine CRT'de depolamaktır. Resim bilgisini, fosforla kaplı ekranın hemen arkasında yer alan, doğrudan görüntü depolama tüpü (DTVST) depolar. DVST'de iki elektron katodu vardır. Bunlardan biri şekil çizerek depolamak için kullanılır; ikinci akış katodu ise resim görüntüsünün parlayan fosfor noktalarını sürekli elektronlarla besleyerek sabit kalmasını sağlar.

Tazelemeli CRT ile karşılaştırıldığında, DVST monitörlerinin hem olumlu hem de olumsuz yönleri vardır. Tazelemeye gereksinim olmadığı için çok karmaşık resimler bile yüksek çözünürlülükte görüntülenebilir. DVST sistemlerinin olumsuz yönü ise, bir renkli olmaları ve resmin seçilen parçalarının silinememesidir. Resmin bir kısmını silebilmek için, bütün ekranın silinip seçilen resmin tekrar gösterilmesi gerekmektedir. Silinmesi ve tekrar gösterilmesi işlemleri karmaşık resimler için saniyeler alabilir. Bu nedenlerden, tazelemeli sistemler depolama monitörlerinin yerini almıştır.

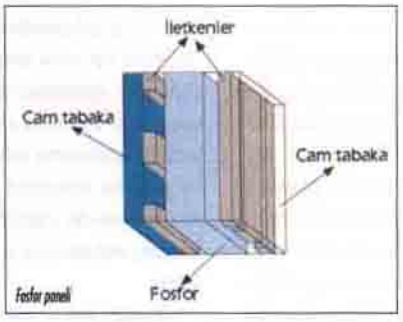
Düz-Panel Monitörleri

Grafik monitörlerinin çoğunluğunda CRT'lerin kullanılmasına rağmen yakında CRT monitörlerinin yerini alacak yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Düz-panel monitör terimi CRT ile karşılaştırıldığında, hacim, ağırlık ve güç bakımından daha az gereksinimi olan video araç grubudur. Düz-panel monitörlerinin önemli bir özelliği CRT'lerden daha ince olmalarıdır. Duvarlara asabiliriz veya göğsümüzde taşıyabiliriz. Düz-panel monitörlerinin bazılarının üzerlerine yazılabildiğinden, yakında onları cep not defteri olarak bile kullanmak olası olabilecek. Bu monitörlerin bir kısmı saydam malzemeden oluştuğu için, arka yüzden yansıtılan bir projeksiyon veya film makinası ile birlikte kullanılabilir. Düz-panel gösterim aygıtları, şu anda küçük televizyon monitörlerinde, hesap makinalarında, cep video oyunlarında, diz üstü bilgisayarlarında, uçaklardaki film gösterilerinde, asansörlerdeki ilan tahtalarında, sağlam ve taşınabilen monitörlere gereksinim duyulan grafik gösterimlerinde kullanılmaktadır. Düz-panel monitörleri yayan ve toplayan olarak ikiye ayırabiliriz. Yayan monitörler elektrik enerjisini ışığa çeviren araçlardır. Bunlara örnek olarak plazma panellerini ve LED'leri verebiliriz. Düz CRT'lerde elektron ışınları ekrana paralel olarak ivme kazandırılır ve daha sonra ekrana 90o'lik açıyla yansıtılır. Fakat düz CRT'ler diğer yayan aygıtlar kadar başarılı olamamışlardır. Toplayan monitörler, güneş ışığını veya bir başka kaynaktan gelen ışığı grafik şekline dönüştürmek için optik kurallar kullanırlar. Toplayan düz-panel monitörlerinin en önemli örneği sıvı-kristal (LCD) araçlardır.

Plasma panelleri, gaz-boşaltım monitörleri diye de adlandırılırlar. İki cam tabaka arasındaki boşluğun içerisinde genellikle neon bulunan bir gaz karışımıyla doldurulmasıyla yapılmıştır. Bu cam panellerden birisine bir seri düşey, diğerine ise yatay olarak iletkenler takılmıştır. Yatay ve düşey olarak bir çift iletkene akım verilmesi halinde, bu iki iletkenin kesiştiği noktadaki gazın elektronik ve iyon olarak parlayan plazmaya bölün-



mesine neden olur. Resim tanımı, görüntü tazeleme belleğinde depolanır. Görüntü elemanı konumlarını tazelemek için yükselen voltajlar uygulanır. Yükselen voltajın hızlı uygulanmasını sağlamak için alternatif akım yöntemleri uygulanır ve böylece daha parlak gösterimler elde edilir. Görüntü elemanları arasındaki ayırım, iletkenlerdeki elektrik alanlarıyla sağlanır. Plazma panellerinin bir olumsuz yönü, tek renkli aygıtlar olmalarıdır. Günümüzde, yavaş, yavaş renkli ve gri seviyeli monitörler de geliştirilmektedir.



Cam plakalar arasındaki boşluğun gaz yerine, içinde manganez bulunan bir fosfor bileşimiyle doldurulmuş olması ile de değişik panel monitörler yapılabilmektedir. Bir çift çapraz elektroda yeterli miktarda yüksek voltaj verildiğinde, iki elektrodun kesişme noktasında fosfor iletken görevini görür. Sonra elektrik enerjisi manganes atomları tarafından emilir ki bu daha sonra, plazma panelindeki plazma olgusuna benzer bir şekilde enerjiyi ışık noktası olarak geri verir.

Bilgisayar Grafiğinin Tarihçesi

Veysi İşler
Bilkent Ün. Bilgisayar ve Enformatik Müh.Böl.

Bilgisayar grafiğinin tarihi, bilgisayarların ortaya çıkması ile başlar. Yazıcılardan alınan çıktılar, bilgisayar grafiğinin ilk ürünleri olarak kabul edilebilir. Bilgisayarın ilk yıllarında, bilgisayar yazıcısının karakter kümesindeki harfleri ve sembolleri kullanarak oldukça karmaşık resimler elde edilmekteydi. Bu yıllarda, kullanıcı ve bilgisayar arasındaki iletişim, yazıcılar ve delgili kartlarla sağlandığından, oluşturulan resimlerle etkileşim mümkün olmamaktaydı. Kullanıcı ve bilgisayar arasındaki etkileşimi sağlayan ilk çıktı cihazı (output device), 1950 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Bu cihaz televizyonlarda bulunan CRT (Cathode Ray Tube)tasarımını kullanan monitörden başka birşey değildir. CRT monitör ilk kez MIT'in Whirlwind I bilgisayarına bağlanmıştır. Bilgisayar grafiğinin ilk kullanım uygulamalarından biri, SAGE hava - savunma komut ve kontrol sistemi olmuştur. 1950'lerin ortalarında gerçekleşen bu projede bilgisayar grafiği açısından en önemli olaylar, radardan alınan bilgilerin bir CRT monitörde görüntülenmesi ve ışık kaleminin (light pen) etkileşimli girdi cihazı (interactive input device) olarak ilk kullanımıdır. Işık kalemi, ekran üzerinde etkileşimli hedef belirleme işlemini kullanıcıya dost ve rahat bir ortamda sağlamaktaydı. 1950'li yıllarda, etkileşimli bilgisayar grafiğinin çok az bir ilerleme sağlaması, o dönemde kullanılan bilgisayarların etkileşimli kullanıma uygun olmamaları ile açıklanabilir. Bu sıralar, bilgisayar grafiğinin en önemli unsuru olan CRT monitörler, yüksek maliyetleri ve eksiklikleri nedeniyle yaygın değillerdi. Bilgisayarlar daha çok fizikçiler ve füze tasarımcıları tarafından çok karmaşık hesaplamalar yapmak için kullanılmaktaydılar. 1950'lerin sonlarında, MIT'de geliştirilen TX-0 ve TX-2 bilgisayarlarının kullanıcı bilgisayar etkileşimi açısından üstün olmaları bilgisayar grafiğindeki araştırmaların artmasına neden olmuştur.

Bilgisayar grafiğinin önemli bir kilometre taşı, 1960'ların başında Ivan Sutherland tarafından MIT'de yapılan doktora çalışmasının bir ürünü olan Sketchpad ile konmuştur. Kullanıcı ve bilgisayar arasında grafiksel bir iletişim sistemi olan Sketchpad'de yer alan önemli veri yapıları ve etkileşim yöntemleri günümüzde de kullanılmaktadır. 1963 yılında yayınlanan bu doktora tezi, bilgisayar grafiğinin kullanışlı, önemli ve geleceğin bir bilim dalı olabileceğini ortaya koymuştur.

1963 yılında yine MIT'den Steve Coons bilgisayarda modelemeye uygun yüzey-parça tekniklerinin geliştirilmesi ile uğraşmaya başladı. Bu sıralar, bilgisayar, otomobil ve havacılık sektörlerindeki üreticiler Bilgisayar Destekli Tasarım CAD (Computer Aided Design) ve Bilgisayar Destekli Üretim CAM'in (Computer Aided Manufacturing) önemini gördüler. General Motors (GM) bilgisayar grafiği tarihinin bir başka kilometre taşını DAC/1 (Design Augmented Computer) yazılımı ile koydu. DAC/1 yazılımı, GM tarafından üretilen otomobil ve kamyonların tasarımında anahtar unsurdu. Lockheed Şirketi bilgisayar grafiğinin kullanımını CAM'de incelemeye başladı. Itek Şirketi'nin Digitek Grafik sistemi bilgisayar grafiğinin ilk uygulamalar arasında olmuştur. Bilgisayar grafiği alanındaki bu uygulamaları, Boeing, Mc Donnell-Douglas ve North American Rockwell gibi dev havacılık firmaları da kısa sürede keşfetmeye başladılar.

Bilgisayar grafiği ile ilgili kurulan ilk topluluk, 1963 yılında The Society for Information Display olmuştur. Günümüzün en ünlü ve önemli bilgisayar grafiği topluluğu olan ACM SIGGRAPH (Special Interest Group on Computer Graphics of the Association for Computing Machinery) ise 1969 yılında kurulmuştur. Aslında SIGGRAPH'ın kurulma çalışmaları ACM içinde oluşturulan bir komite tarafından 1966 yılında başlamıştır. 1960'ların ilk yarısı bilgisayar grafiğinin gelişimi açısından çok verimli olmuştur. Öyle ki Wall Street Journal bu gelişmeyi ve hareketliliği kavramış, ve 1966 Ekim'inde bilgisayar grafiği ve bilgisayar destekli tasarım hakkında yazı yayınlamıştır.

1960'lı yılların ortalarında, bilgisayar grafiği alanında pek çok donanım ve yazılım ürünleri ortaya çıkmıştır. Yirmiden fazla şirket CRT tasarımını kullanan grafik terminalleri üretip satmaktaydılar. Bu şekilde bilgisayar grafiğinin en önemli itici gücü olan CRT monitörler ucuzlayıp yaygınlaştılar. Günümüzde yaygın olarak kullanılan fare de (mouse) bu dönemde bulunmuş bir girdi cihazıdır.

1960'lı yıllarda monitördeki titremeyi önlemek için gerekli olan 30 Hz'lik tampon bellek (memory buffer) ve işlemci oldukça pahalıydılar. 1960'ların sonlarında DVST'nin (Direct View Storage Tube) geliştirilip piyasaya sunulması ile daha ucuz, kaliteli ve titremeyen görüntü üreten monitörler kullanıcılara ulaşmıştır. DVTS sayesinde birçok kullanıcı ve programcı etkileşimli bilgisayar grafiği ile tanışma fırsatı buldular. 1960'ların sonlarındaki bir başka önemli gelişme, grafik işlemcilerinin ortaya çıkmasıdır. Grafik işlemcileri, grafik yazılımları tarafından yapılan birçok işlemi (dönüşümler, kırpma, paralel ve perspektif gösterim v.s.) ve ekranı tazeleme (refreshing) işlevini yerine getirmekteydiler. Bu sayede ana işlemcinin yükü büyük ölçüde azalmaktaydı.

1970'lerin başında, günümüzde de çok yaygın olarak kullanılan ucuz taramalı (raster) grafik sistemlerinin geliştirilmesi, bilgisayar grafiği tarihinin en önemli kilometre taşı olmuştur. Taramalı grafik sistemlerinin etkin olmalarının başlıca nedeni, 1970'lerin başında ortaya çıkan ucuz katı-hal bellek (solid-state RAM) teknolojisi olmuştur. Taramalı grafik sistemlerinde ekranda gösterilen resimler pixel (picture element) denen çok küçük ekran bölgelerinden (kare ve dikdörtgen) oluşmaktadırlar. Ekranın iki boyutlu bir matris gibi kabul edilmesi durumunda matris elemanlarının herbiri bir pixele karşılık gelmektedir. Taramalı grafik sistemleri öncesinde kullanılan sistemlerde (vektör grafik sistemleri) resimler doğru parçacıklarından (vektörlerden) oluşmaktadırlar.

Taramalı grafik sistemlerinin en önemli üstünlüğü tazeleme işleminin, resimlerin karmaşıklığına bağlı olmamasıdır. Diğer bir üstünlük ise bu tür sistemlerle elde edilen resimlerde, tonlama (shading), doku eşleme (texture mapping) ve gölgeleme (shadowing) gibi gerçeğe uygunluk sağlayan etkilerin bulunmasıdır. Vektör sistemlerinde bu tür gerçeğe uygun resimleri elde etmek pek mümkün değildir.

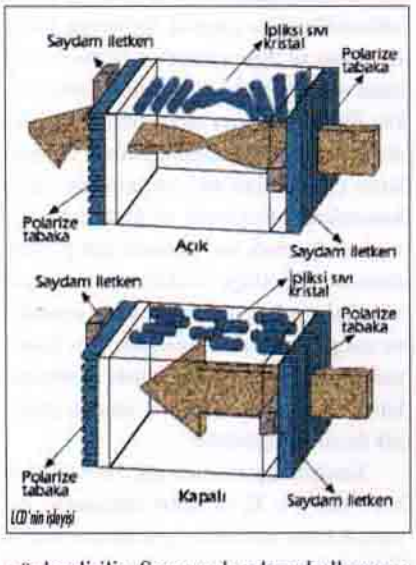
Taramalı sistemlerinin bir standart donanım olarak kabul görmesiyle, bilgisayar grafiği alanında yapılan araştırmalarda büyük bir artış olmuştur. Bu araştırmalar taramalı grafik sistemlerine uygun yöntemler üzerinde yoğunlaşmışlardır. Bu araştırmalar sonucunda tonlama (shading), doku eşleme (texture mapping) ışın izleme (ray tracing) ve ışıma (radiosity) gibi görüntülere gerçeğe uygunluk katan yöntemler geliştirilmiştir.

Taramalı grafik sistemlerinde kullanılan bilgisayar grafiği yöntemleri, önceleri Fortran gibi yüksek düzeydeki dillerle gerçekleştirilmekteydi. Bu sırada gerçekleştirilen paket programların cihaz-bağımlı (device-dependent) oldukları için maliyet yüksekliği ve başka bilgisayarlara taşınabilme (portability) gibi sorunları vardı. Bu sorunlara karşı 1970'lenn ortalarında cihaz-bağımsız (device-independent) yazılım standartlarının gerekli olduğu görüldü. 1977 yılında bir ACM SIGGRAPH komitesi 3D Core Graphics System adında bilgisayar grafiğindeki ilk standart önerisini ortaya attı. İlk resmi grafik standardı, 1985 yılında 3D Core kullanılarak geliştirilen GKS (Graphical Kernel System) olmuştur. 1988 yılında iki boyutla sınırlı olan GKS'in geliştirilmesiyle ortaya çıkan üç boyutlu GKS-3D sistemi resmi bir standart olarak kabul edildi. GKS'deki eksiklikleri ortadan kaldıran bir başka resmi standart PHIGS (Programmer's Hierarchical Interactive Graphic System) olmuştur. PHIGS, içiçe geçen hiyerarşik üç boyutlu nesne gruplamasına izin veren daha karmaşık bir grafik standardıdır. 1988 yılında, PHIGS'e ileri düzey işlemlerinin eklenmesiyle PHIG+ standardı ortaya çıkmıştır.

Türkiye'de bilgisayar grafiğinin başlangıcı 1970'lerin ilk yıllarındadır. Bilgime göre Türkiye'deki ilk bilgisayar grafiği araştırmaları, ODTÜ Mimarlık Bölümünde İbrahim Canbulat ve Bülent Özgüç tarafından yüksek lisans çalışmaları sırasında yapılmıştır. Canbulat'ın 1974 yılında sunduğu yüksek lisans tezinde, perspektif çizimin bilgisayarla yapılması ile ilgili kuramsal çalışmalar ve geliştirilen bilgisayar programları yer almaktadır. Özgüç ise, 1975 yılındaki yüksek lisans tezinde mimarlık çizimleri için geliştirdiği bir sistemi ve etkileşimli bir yöntemi sunmaktadır. 1979 yılında, Bülent Özgüç tarafından ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde ilk bilgisayar grafiği dersi açılmıştır. Bu açılan ders bilgisayar grafiğinin bir bilgisayar bölümünde açılması yönünden anlamlıdır. Çünkü bilgisayar grafiği bu tarihe kadar bu alanda uygulamaların yapıldığı Makina, Elektrik-Elektronik ve Mimarlık Bölümlerinde ele alınmıştı. Halen Bilkent Üniversitesi, Bilgisayar ve Enformatik Mühendisliği Bölümünde bilgisayar grafiği konusunda yüksek lisans ve doktora düzeyinde araştırmalar yapılmakta ve sonuçlar uluslararası bilimsel dergilerde yayınlanmaktadır. Ayrıca TÜBİTAK ve İntel'in desteklediği bir proje yakın zamanda sonuçlanmıştır. 1993 yılında Bilkent Üniversitesi'nde düzenlenen ve TÜBİTAK tarafından da desteklenen ATARV'93 (Advanced Techniques in Animation, Rendering and Visualisation) bilgisayar grafiği konferansı, bu konuda önemli bilim adamlarının katılması açısından kayda değerdir. Başkanlığını Özgüç'ün yaptığı konferansa katılan bilim adamları arasında Andrew Witkin, Norman Badler, Alain Fournier, Kees van Overlend, Derek Paddon, Scott Whitman ve Thierry Priol bulunmaktadır.

Sıvı kristal monitörleri (LCD) genellikle hesap makinaları, taşınabilen, diz üstü bilgisayarlar gibi küçük sistemlerde kullanılır. Bu toplayıcı aygıtlar, çevrede veya içerideki bir ışık kaynağından polarize edilmiş ışığın sıvı kristal materyalden geçmesiyle görüntüyü oluştururlar.

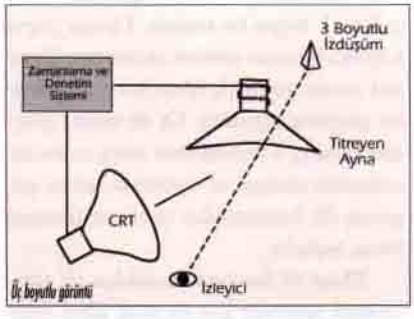
Sıvı kristal deyimi, bu bileşiklerin kristal bir yapıya sahip moleküllerden olduğu halde sıvı gibi akmalarını anlatmaktadır. Bu tür üz-panel monitörlerde genellikle ipliksi sıvı kristal bileşikleri kullanılır. Bu bileşiklerdeki çubuk şeklindeki kristallerin uzun eksenleri aynı yönde dururlar. Birbirine dik açıyla polarizeli iki cam tabakanın arasına sıvı kristal maddesi sıkıştırılır. Düşey iletken sıraları bir şeffaf plakaya, yatay iletkenler ise diğer şeffaf plakaya konmuştur. İki iletkenin kesiştiği nokta, görüntü elemanı pozisyonunu belirler. Normal olarak, moleküller, şekildeki 'açık konum' pozisyonundaki gibi yerleştirilmiştir. Materyalden geçen polarize ışık, karşı polarizerden geçebilsin diye



yönlendirilir. Sonra ışık tekrar kullanıcıya yansıtılır. Görüntü elemanını parlayan konumdan görünmez konuma çevirebilmek için kesişen iki iletkene voltaj uygulanarak moleküller ışığı döndüremeyecek şekilde ayarlanır. Bu tür düz panel aygıtlar edilgen matris LCD diye adlandırılır. Görüntü tanımları, görüntü tazeleme belleğinde depolanır ve yayan aygıtlarda olduğu gibi, ekranda 60 kare/saniye hızında tazelenir. Katı hal elektronik aygıtlar kullanılarak arkadan aydınlatma yapılması oldukça yaygındır. Böylece sistem, sadece dış ışık kaynaklarına bağımlı olmamış olur. Renkler, değişik yöntemler kullanılarak gösterilebilir. LCD yönteminin başka bir yapım biçimi ise, her bir görüntü elamanı pozisyonuna bir transistör yerleştirilip, ince film transistör teknolojisi kullanılmasıyla olur. Transistörler, voltajın görüntü elemanı noktasında kontrolu ve şarjın azalıp kaybolmasını engellemek için kullanılırlar. Bu aygıtlara etken matris monitörleri denir.

Üç Boyutlu Görüntüleyen Aygıtlar

Üç boyutlu görüntüleri gösteren grafik monitörler CRT görüntülerini titreşimli, esnek aynalardan yansıtan bir teknik kullanılarak geliştirilmiştir. Değişken odak noktalı ayna titrerken odak uzunluğu ayarlanır. bu titreşimle nesnenin CRT üzerinde görüntü-

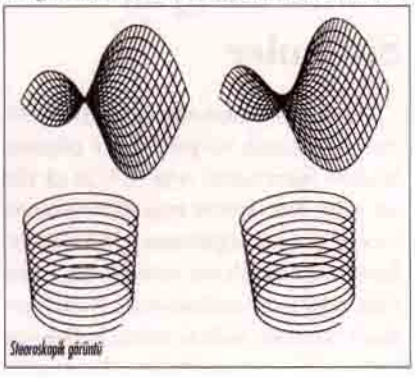


lenmesi aynı zamanda oluşur. Nesnenin üstündeki her nokta belirlenmiş bakış uzaklığına göre aynadan uzamsal bir pozisyona yansıtılır. Bu bize nesnenin etrafında dolaşabilmeyi ve onu değişik açılardan görebilmeyi sağlar. Böyle sistemler, tıbbi alanlarda ultrasonografi ve CAT tarayıcı aygıtlarındaki veri çözümlemelerinde, jeolojik uygulamalarda topolojik ve sismik veri çözümlemelerinde, katı nesnelerin tasarım uygulamalarında kullanılmaktadır.

Steroskopik ve Sanal Gerçek Sistemleri

Steroskopik görünüm nesneleri üç boyutlu olarak gösteren başka bir tekniktir. Bu yöntem gerçek bir üç boyutlu görüntü yaratmaz. Fakat gözlemcinin her gözü için değişik görüntüler oluşturarak çok inandırıcı üç boyutlu bir etki sağlar. Steroskopik görünüm elde etmek için ilk önce ekranda her bir (sağ ve sol) göze göre olan bakış yönünden elde edilen iki görüntü gereklidir. İki görüntüyü değişik pozisyonlarda bilgisayarda oluştururuz veya bazı nesneleri fotoğraflamak için stereo kamera çifti kullanabiliriz. Sürekli olarak sağdaki görüntüye sağ gözümüzle, soldaki görüntüye de sol gözümüzle baktığımızda belli bir süre sonra iki görüntü tek bir görüntü haline gelir ve belli bir derinliğe sahip olarak algılanır.

Steroskopik etki yaratmanın bir yolu, iki görüntünün her birinin ard arda tazele-



nerek görüntülenmesidir. Bu yöntemde ekrana özel amaçlı bir gözlük ile bakmak gerekir. Her lens hızlı açılıp kapanabilen kamera diyaframı gibi tasarlanmış ve görüntülerden birini senkronize bir şekilde örtmektedir. Ekrandaki görüntüyü gözlük ile senkronize eden kırmızı ötesi yayıcı ve sıvı kristal diyafram ile yapılmış bir steroskopik gözlük şekilde gösterilmektedir.

Steroskopik görüntü sanal gerçek sisteminin bir parçasıdır. Steroskopik görüntü yaratmak için kullanılan ve optik bir sistem içeren başlık genellikle ekrandaki nesneyi yerleştirmek ve ayarlama yapmak için etkileşimli girdi aygıtla birleştirilerek kullanılır. Bu duyarlı sistem kullanıcının konumunu izler, böylelikle nesnenin önü ve arkası hareket eden izleyiciye bağımlı olarak görüntülenebilir. Bu amaçla, sağ elde bir veri eldiveni ile, başta da sanal gerçek başlığı taşınmaktadır.

Etkileşimli sanal gerçek ortamı, başlık yerine steroskopik gözlük ve video monitörü kullanılarak da görüntülenebilir. Bu daha

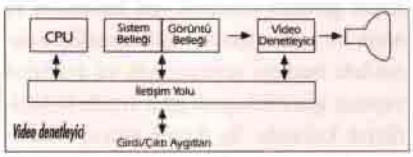
az maliyetli bir sanal gerçek sistemidir. İzleme aygıtı videonun üstüne yerleştirilir ve başlığın hareketini izleyerek, görüntünün değişmesini sağlar.

Nokta Tarayan Sistemler

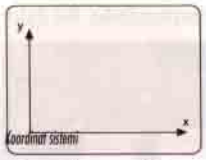
Etkileşimli nokta adresleyen grafik sistemi tipik olarak bir çok işlemci çalıştırır. Merkezi işlem birimi veya CPU'ya ek olarak video denetleyicisi veya görüntü denetleyicisi görüntü sağlanması için kullanılır. Basit nokta adresleyen sistemin organizasyonu şekilde gösterilmektedir. Burada görüntü tazeleme belleği sistem belleğinde herhangi bir yerde olabilir ve video denetleyici bu bilgilere erişerek ekranı tazeler. Video denetleyiciye ek olarak, gelişmiş nokta tarayan sistemler, grafik amaçlı işlemler için ek hızlandırıcı ve işlemciler de kullanırlar.

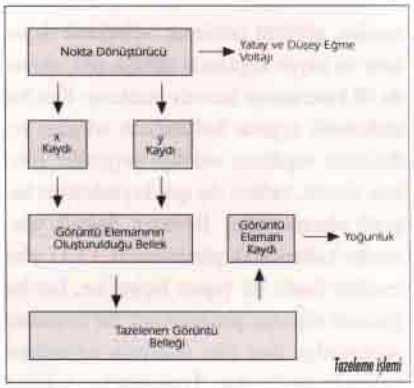
Video Denetleyici

Sistemin sabit belleği görüntü tazeleme belleğinden ayrılır, video denetleyicisi ise doğrudan görüntü tazeleme belleğine bağlıdır.



Görüntü tazeleme belleği konumu ve uygun ekran konumları kartezyen koordinat sistemine göre adreslenir. Bir çok grafik monitörleri için koordinat merkezi ekranın sol alt köşesindedir. Ekran yüzeyi iki boyutlu kartezyen sistemin x ve y değerlerinin artı olduğu ilk parçada gösterilir. Ekranda artan x değerleri sağa doğru, artan y değerleri ise aşağıdan yukarıya doğru yer alır (Bazı kişisel bilgisayarlar ve iş istasyonlarında merkez sol üst köşede yer alır, bu yüzden y değerlerinin yönü ters çevrilir). Tarama çizgisi sayısı Ymax'dan 0'a kadar tanımlanır ve her tarama çizgisi boyunca ekran görüntü elemanı pozisyonları 0'dan Xmax'a kadar tanımlanır. Ekran görüntü elemanının koordinatlarını





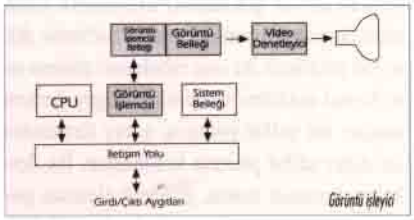
depolamak için iki kaydedici kullanılır. Başlangıçta Y değeri Ymax, X değeri ise 0'a kaydedilir. Bu görüntü elemanı pozisyonu için görüntü tazeleme belleğindeki değere erişilir ve CRT ışın yoğunluğunu ayarlamak için kullanılır. Daha sonra x değeri 1 olarak artırılır ve tarama çizgisinde bir sonraki görüntü elemanı için bu işlem tekrarlanır. Tarama çizgisi boyunca bu işlem her görüntü elemanı için tekrarlanır. Tarama çizgisi üzerindeki son görüntü elemanı için de bu işlem yapıldıktan sonra X değeri yeniden 0 yapılıp, Y değeri bir azaltılır. Tarama çizgisi boyunca bulunan görüntü elemanları işleme tabi tutulur ve sırayla işlem her ardışık tarama çizgisine uygulanır. En alt tarama çizgisine kadar (y = 0) inildikten sonra, video denetleyicisi ekranın en üstündeki tarama çizgisinin ilk konumundan tazeleme işlemine tekrar başlarlar.

Ekran 60 kare/saniye aralıkta bir tazelenmesi gerektiği için bu basit işlem standart RAM devreleri ile yapılamaz. Tazeleme hızı çok yavaştır. Görüntü elemanı işlemlerini hızlandırmak için görüntü tazeleme belleğinden birkaç görüntü elemanı değeri video denetleyicisi tarafından birlikte okunur. Birkaç görüntü elemanı yoğunluğu ayrı bellekler içinde depolanır ve ardışık görüntü elemanları için CRT ışın yoğunluğunu denetlemek için kullanılır. Bu görüntü elemanı gurubuna gerekli görüntü işlemi uygulandıktan sonra, bir sonraki ardışık görüntü elemanı grubu görüntü tazeleme belleğinden okunur.

Basit tazeleme işleminin yanısıra video denetleyicisi ile yapılan başka işlemler de vardır. Farklı uygulamalar için video denetleyicisi değişik tazeleme döngülerinde bulunan değişik bellek alanlarından görüntü elemanı yoğunlukları okuyabilir. Yüksek kaliteye sahip sistemlerde, birden fazla görüntü tazeleme belleği bulunabilir ve böylelikle bir bellek tazeleme için kullanılırken diğeri yoğunluk değerleri ile doldurulur. Daha sonra iki görüntü tazeleme belleğinin görevleri değişir. Bu, gerçek zamanlı animasyonlarda hızlı bir mekanizma sağlar çünkü değişik görüntülere sahip hareketli nesneler görüntü tazeleme belleği içine başarıyla yüklenebilirler. Bazı geometrik değişimler video denetleyicileri tarafından da gerçekleştirilebilir. Tazeleme döngüsü sırasında ekran alanı genişletilebilir, daraltılabilir veya bir konumdan bir diğerine aktarılabilir. Bunlara ek olarak video denetleyicileri renk haritaları içerebilirler; böylelikle görüntü tazeleme belleğindeki görüntü elemanı değerleri doğrudan CRT ışın yoğunluğunu denetlemek yerine renk haritalarına erişmek için kullanılırlar. Bu ekran yoğunluk değerlerini değiştirmede hızlı bir yöntem oluşturur. Son olarak, bazı sistemler video denetleyicilerinin, görüntü tazeleme belleği ile girdi video sinyallerini karıştırabilmek için tasarlanmışlardır.

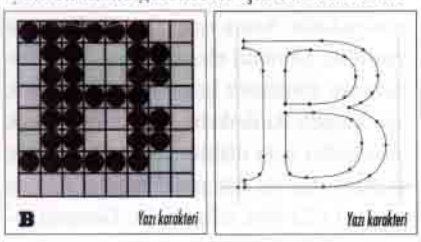
Nokta Tarayan Görüntü İşlemcileri

Gösterim sisteminin amacı CPU'yu grafik yüklerden bağımsız hale getirmektir. Sistem belleğine ek olarak ayrı bir gösterim



bellek alanı da oluşturabilir. Gösterim sisteminin en büyük işlevi uygulama programlarındaki resim tanımlarını sayısal hale getirmektir ve bu işlem tarama dönüşümü olarak adlandırılır. Düz çizgileri belirleyen grafik komutları ve diğer geometrik nesneler taranarak sonlu noktalar kümelerine dönüştürülür. Bir düz çizginin taranarak sayısal hale dönüştürülmesinin anlamı, görüntü elemanlarını çizginin cebirsel tanımına en yakın konumlara yerleştirmek ve görüntü tazeleme belleği içinde her pozisyon için görüntü elemanı yoğunluğu biriktirmektir Benzer yöntemler, eğri çizgiler, yuvarlak nesneler ve çokgenler için de kullanılır. Yazı karakterleri diktörtgen ızgaralar içinde tanımlanabilir. Veya, yazı karakterleri sınırları çizilerek de tanımlanabilirler.

Karakter ızgaralarının alan büyüklükleri 5 x 7'den 9 x 12'ye kadar değişebilir, bu yüksek kalite görüntüler için daha da artabi-



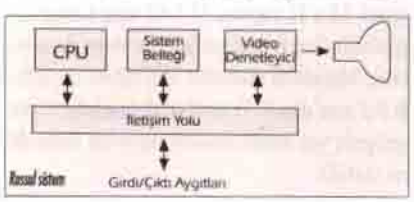
lir. Yazı karakterleri, ait olduğu dikdörtgen ızgara biriminin görüntü tazeleme belleğinde gerekli konuma yazılması ile ekrana yansıtılmış olur. Görüntülenecek karakterler eğer geometrik veya Postscript gibi işlevsel bir dil ile tanımlandı ise, taranarak sayısal hale dönüştürülmesinin sonucu görüntü tazeleme belleği içine aktarılır.

Monitörler birçok ek işlemi sağlayabilmek amacı ile de tasarlanmıştır. Bu işlevler çeşitli çizgi türleri (tire, nokta veya kesiksiz) oluşturulmasını, renkli alan taramalarını ve belirli dönüşümlerin sağlanmasını içermektedir. Monitörler, fare gibi, etkileşimli girdi aygıtlarıyla birlikte kullanılabilmek için de tasarlanmışlardır.

Nokta tarama sistemlerindeki bellek gereksinimini azaltmak için yapılan çalışmalardaki yöntemlerden biri, görüntü tazeleme belleğini bağlı liste olarak düzenlemek ve yoğunluk bilgilerini kodlamak şeklinde uygulamaktır. Kodlamanın bir yolu, herbir tarama çizgisini ikişer tamsayıdan oluşan bir küme olarak saklamaktır. Her çiftteki ilk numara yoğunluk değerini, sonraki numara ise ardışık şekilde o yoğunluk değerinden kaç tane olduğunu belirtir. Bu yönteme ardışık eşdeğer görüntü elemanı kodlaması adı verilir. Eğer görüntü aynı renklerdeki uzun ardışık görüntü elemanı dizileri içeriyorsa, bu yöntem görüntü için daha az bellek gerektirir. Eğer görüntü elemanı yoğunluğu doğrusal olarak değişir ise benzer bir yaklaşım uygulanabilir. Nokta tazelemeyi dikdörtgen bölgelerin kodlanması (alan kodlama) olarak yapmak ise başka bir yaklaşımdır. Bu tür kodlamalar bellek gereksinimlerini azaltmakla beraber, hem ek işlemler getirdikleri, hem de çok değişiklik gösteren görüntülerde ekonomi sağlamadıkları için fazla kullanılmamaktadır.

Rassal Tarayan Sistemler

Uygulama programlarındaki grafik komutları, sistemin grafik paket programları sayesinde, sistem belleğinde veya görüntü tazeleme belleğinde saklanan görüntü listesine çevrilir. Bu görüntü listesi daha sonra gösterim işlemcisi ile ekranı tazelemek için kullanılır. Gösterim işlemcisi, görüntü listesini bir sonsuz döngü içinde tarayarak, her komutu gereği gibi işletir. Bu işlemciye grafik denetleyicisi veya görüntü işlem birimi (DPU) adı da verilir.



Nokta taramalı sistemlerin tersine, rassal tarayan sistemler doğrudan şekli oluşturan çizgileri (vektörleri) çizerler. Vektörler, kendilerini sınırlayan (x1, y1) ve (x2, y2) koordinatları ile tanımlanıp; elektronlar vektörün başlangıç noktasına odaklandırıldıktan sonra, çizim yön ve uzunluğuna göre hareketlendirilerek görüntünün oluşumunu sağlar. Bütün görüntü bu şekilde birbirlerine bağlı veya serbest çizgi parçacıklarının saniyede en az 30 kere tazelenmesiyle oluşur.

Grafik Monitörler ve İş İstasyonları

Grafik monitörlerinin çoğu nokta taramalı görüntü birimleri ile çalışmaktadır.

Grafik sistemleri, grafik yetenekli ufak genel amaçlı kişisel bilgisayarlarından, özellikle grafik uygulamalar için tasarlanmış karmaşık tam renkli sistemlere kadar geniş bir yelpazede yer almaktadır. Tipik bir kişisel bilgisayarın ekran çözünürlüğü, 640 x 480 görüntü elemanıdır. Bununla beraber ekran çözünürlüğü ve diğer özellikleri sistemin büyüklüğü ve maliyetine bağlıdır. Genel amaçlı kişisel bilgisayar sistemlerinin çapraz ekran boyutu 12-21 inç arasında, renk seçimi ise 16-32000 renk arasında değişmektedir.

Grafik amaçlı iş istasyonları ekran çözünürlüğü 1280 x 1024, çapraz ekran boyutu 16 inç ve üstüdür. Grafik iş istasyonları 8-24 bit/görüntü elemanı şeklinde düzenlenmekte, uç noktalarda yüksek ekran çözünürlüğü ve duyarlığı, hızlı işlemci ve diğer seçenekler yer almaktadır.

Bazı sistemler çapraz ekran boyutu 27 inç, ekran çözünürlüğü 2048 x 1536 ile 2560 x 2048 arasında ve 80 Hz çakışımsız yenileme hızına sahiptir.

MediaWall (Medya Duvarı) diye adlandırılan çok ekranlı sistem "duvar boyutu" görüntü sağlamaktadır. Bu sistem, fuarlar, konserler, spor karşılaşmaları, perakende satış yapan dükkanlar, müzeler, yolcu terminalleri gibi geniş ve çok parlak ışıklı alanlardaki gösterimlerde kullanılmak için tasarlanmıştır. Medya Duvarı, gösterilecek görüntünün birçok ardışık parçaya ayrılarak, aynı düzende yerleştirilmiş ekranlara özel bir grafik işlemci aracılığıyla görüntü parçalarını senkronize bir şekilde dağıtılması ile gerçekleşir.

Bazı grafik iş istasyonları iki monitör içerirler. İkinci ekran resmin bir kısmındaki ayrıntıları görüntülerken, diğeri, nesnenin tümünü göstermek için kullanılabilir. Bu iki monitörlü sistemlerin bir başka kullanım şekli, monitörlerden birinde resmi görüntülerken, diğerinde resmin parçalarını etkileşimli olarak değiştirmek, dönüştürmek için gereken grafik işlemlerin menüsü bulunmasıdır.

Girdi Aygıtları

Çeşitli aygıtların grafik iş istasyonlarına veri gönderebilme özellikleri vardır. Özellikle etkileşimli girdiler için düzenlenmiş sistemler, klavyeye ek olarak bir ya da birkaç tane daha girdi aygıtına sahiptirler. Bunlar fare, izleme top veya küresi, oyun çubuğu, sayısallaştırıcılar, değişik tür düğme ve/veya potansiyometre içeren kutulardır. Belirli uygulamalarda kullanılan bazı girdi aygıtları ise veri eldivenleri, dokunmaya duyarlı yüzeyler, görüntü tarama ve ses algılama düzenleridir.

Klavyeler

Grafik sistemi üzerindeki alfa-sayısal klavyeler öncelikle dahili yazı dizileri için kullanılan aygıtlardır. Klavyeler, resim etiketleri gibi grafiksel olmayan verilerin yüklenmesinde yeterli aygıtlardır. Klavyeler ekran koordinatlarının girişini, menü seçimle-

rini ve grafik işlemlerin kolaylaştırılmasını sağlamak için de kullanılabilir.

Genel amaçlı kullanılan klavyelerde izleç denetim ve fonksiyon tuşları ortak özellikli tuşlardır. Fonksiyon tuşları sık kullanılan işlemlerde tek bir tuşlama ile giriş yapmayı sağlar, izleç denetim tuşları ise daha evvel belirlenmiş ekran bölgelerini ve görüntülenen nesnelerin seçiminde kullanılabilir. Başka tür izleç denetim aygıtları bazı klavyelere doğrudan eklenebilir. Bunlara ek olarak, sayısal tuşların yer aldığı bir bölüm hızla sayısal verilerin girişinde kolaylık sağlamak için eklenebilir.

Bazı özel uygulamalarda, örneğin müşteriye yönelik grafik uygulamalarda, veriler

düğme ve/veya potansiyometreler kullanılarak girilebilir. Düğme ve potansiyometreler genellikle daha önce tanımlanmış işlemlerin ve sayıların yüklenmesinde kullanılır.

Fare

Fare ekrandaki izleçi denetleyen ve el ile kullanılan bir çeşit kutudur. Farenin altındaki tekerleklerle hareket miktar ve yönü kaydedilebilir. Fare hareketlerini kaydetmenin bir başka yolu da optik algılayıcıdır. Bu tip sistemlerde fare, yatay ve düşey çizgilerden oluşmuş bir ızgara olan 'fare yüzeyi' üzerinde hareket ettirilir. Optik algılayıcıda bu ızgaradaki çizgiler arasındaki hareketleri kaybeder.

Fare, ekran izleçinde bir değişim olmadan yukarı kaldırılıp tekrar yerine konulabilir. İzleç konumunu kaydetmek veya hareketi başlatmak için genellikle farenin üstünde bir iki veya üç düğme bulunur. Birçok genel amaçlı grafik tasarım sistemlerinde fare ve klavye veri göndermede kullanılan temel araçlar sayılmaktadır.

Uygulanabilir parametreleri artırmak için basit fare modellerine ekler yapılabilir. Z-fare üç ayrı düğme içermektedir. Kenarda ayrıca başparmakla kullanılacak potansiyometre ve yukarı bölümde izleme topu yer almaktadır. Bu tasarım konum seçiminde, dönmede ve diğer parametrelerde altı değişik hareket serbestliği sağlamaktadır. Z-fare ile ekrandaki herhangi bir nesneyi

seçip yerinden kaldırıp, kendi ekseni etrafında döndürebiliriz, çevirebilir ve herhangi bir yere yerleştirebiliriz veya görüntünün konumun ve yönünü üç boyutlu ekrana kaydırabiliriz. Z-fare, sanal gerçek, CAD ve animasyonlarda kullanılmaktadır.

İzleme Topu ve Uzay Topu

İzleme topu, parmak ya da avuç içi ile döndürülebilen ve izleçin hareketini sağla-

yan bir aygıttır. Topa bağlı olan potansiyometreler dönmenin yönünü ve miktarını ölçer. İzleme topu genellikle klavyenin veya Z-fare gibi diğer aygıtların üzerine monte edilir.

İzleme topu iki boyutlu işlevi olan bir aygıt iken uzay topu altı hareket serbestliği sağlar. Uzay topu, izleme topu gibi kendisi hareket etmez. Top çeşitli yönlerde itilirken ya da çekilirken uzamsal pozisyonlarda ve yönlerde girdi elde edebilmek için uzay topuna uygulanan güç, basınç ölçerler tarafından ölçülür. Uzay topu sanal gerçek sistemlerinde, modellemede, animasyon, CAD ve diğer uygulamalarda işlem seçiminde ve üç boyutlu şekillerin konumlarının değiştirilmesinde kullanılmaktadır.

Oyun Çubuğu

Oyun çubuğu tabana yerleştirilmiş küçük, düşey bir çubuk içermektedir. Bu, ekran izleçinin çeşitli yönlerde hareket etmesini sağlar. Birçok oyun çubuğu üstündeki çubuğun oynatılması ile hareket sağlar, diğerleri ise çubuğa belli bir güç uygulama ile hareket sağlar. Bazı oyun çubukları klavyenin üstüne monte edilmiştir.

Ekran izleçi, çubuğun hareket ettiği yönde ve miktarda hareket eder. Oyun çubuğu üzerine monte edilen potansiyometreler hareket miktarını ölçer ve çubuk serbest bırakıldığı zaman yay sayesinde merkezi pozisyonuna geri döner. Bir veya birkaç düğme ek girdi sinyalleri için kullanılabilir.

Veri Eldiveni

Eldiven, el ve parmak hareketlerini ortaya çıkaran bir çok algılayıcıdan oluşmaktadır. Alıcı ve verici antenler arasındaki elektromanyetik eşleme elin konumu ve yönü hakkında daha çok bilgi sağlamak için kullanılır. Alıcı ve verici antenler üç boyutlu kartezyen sistemi oluşturmak üzere, üçlü karşılıklı dikey bobinler kümesi olarak yerleştirilebilirler. Eldivenden alınan girdiler nesneleri sanal ekran içinde yerleştirmek veya oynatabilmek için kullanılabilirler. İki boyutlu izdüşüm video monitöründe görüntülenebilir, veya üç boyutlu izdüşümler başlık kullanılarak görüntülenebilirler.

Sayısallaştırıcılar

Sayısallaştırıcılar iki veya üç boyutlu nesnelerdeki koordinatların yüklenmesinde kullanılabilir. Sayısallaştırıcı, çizim veya nesnelerin köşelerini işaretleyerek sonlu x ve y koordinat kümelerinin oluşmasını sağlar. Ardışık koordinatlar düz çizgiler ile birleştirilerek, sınırlar elde edilebilir.

Bir çeşit sayısallaştırıcı olan grafik tablet, özel fare veya kalemini kullanarak iki boyutlu koordinatları yüklemek için kullanılır. Özel fareler mercek, ışık ve iyi yerleşim sağlamak için çapraz ince çizgiler içerebilirler. Tabletler, ses veya elektrostatik algılayıcılar kullanarak üç boyutlu girdi elde etmek için de kullanılabilir. Bu tür tabletlerde, x, y ve z yönünde algılayıcı çubuklar bulunmaktadır. Tablet yüzeyindeki değişik basınçları algılayabilen sistemler de geliştirilmiştir. Masaüstü modelleri için tablet ölçüleri 12 x 12 inçden 44 x 60 ince kadar değişebilir. Yer modelleri için bu daha da artabilir. Masaüstü modeller için tablet duyarlığı 0.2 mm'den 0.05 mm'ye değişebilir; daha gelişmiş yer modellerinde duyarlık daha da iyi olabilir.

İki boyutlu tabletler genelde yüzeylerine yerleştirilmiş tel ızgaralardan sinyallerini elektrik prensiplerine göre alırlar. Akustik veya sonik tabletler ise işaret kalemi ucu konumunu belirleyebilmek için ses dalgaları kullanırlar. Bir elektrik kıvılcımı yaratılarak işaret kalemi ucundan çıkarılan sesi belirleyebilmek için hem doğrusal, hem de nokta mikrofonlar kullanılabilir. İşaret kalemi konumları çeşitli mikrofonlardaki seslerin çıkış zamanlarına göre hesaplanabilir. İki boyutlu akustik tabletlerin bir yeteneği, tablet yüzeyi oluşturmak için çerçevelere monte edilmiş mikrofonlar herhangi bir cismin etrafına yerleştirilebilirler.

Görüntü Tarama

Çizimler, grafikler, renkli ve siyah-beyaz fotoğraflar veya yazılar, üzerlerinden optik tarayıcı ile geçilerek bilgisayar işlemleri için sonlu bir noktalar kümesine dönüştürülebilir. Gri tonları veya renk belirli bir kodlama içinde kaydedilir ve saklanır. Elde edilen bu sayısal resim üzerinde her türlü görüntü işleme yöntemleri uygulanabilir. Tarayıcılar değişik boy ve biçimlerde olabilir. En yaygınları, üstü cam olan ve bir fotokopi makinasını andıran türdür.

Görüntü tarayıcı

Dokunmaya Duyarlı Yüzeyler

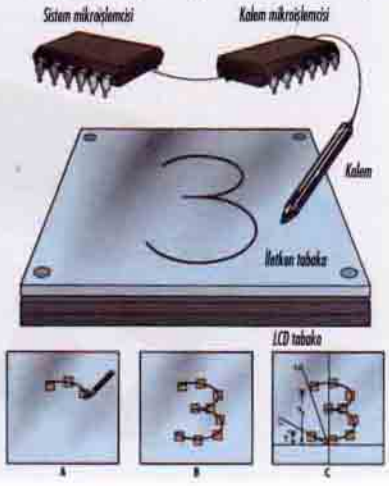
Dokunmaya duyarlı yüzeylere, nesne veya ekran görüntülerini seçebilmek için parmakla dokunmak yeterlidir. Dokunmaya duyarlı yüzeylerde uygulamalar genelde ekran üzerinden bir ikon veya işaret seçmek için ekrana dokunmak biçiminde olur. Diğer sistemler, şeffaf dokunmaya duyarlı yüzeyleri video monitör ekranları üzerine yerleştirirler. Dokunmaya duyarlı girdi optik, elektrik veya ses yöntemleri kullanılarak sağlanır.

Dokunmatik ekran

Optik dokunmaya duyarlı yüzeyler, çerçevenin yatay ve düşey kenarları boyunca kırmızı ötesi ışık veren LED dizilerini kullanır. Karşıt yatay ve düşey köşelerde ışık algılayıcılar bulunmaktadır. Bu dikdörtgen panel, dokunulduğu zaman hangi ışınların kesildiğini kaydetmek için kullanılır. Elektrik dokunmaya duyarlı yüzey birbirinden az bir aralıkla ayrılmış iki iletken plakadan yapılmıştır. Plakalardan biri iletken, diğeri dirençli iletken olan bir materyal ile kaplanmıştır. Dıştaki plakaya dokunulduğunda içerdeki plakaya elektrik akımı uygulanmış olur. Bu iletişim dirençli plaka boyunca voltaj düşüklüğü meydana getirir ve bu şekilde dokunulan nokta hesaplanabilir. Akustik dokunmaya duyarlı yüzeylerde yüksek frekanslı ses dalgaları yatay ve düşey yönlerde karşılıklı üretilip, algılanır. ekrana dokunarak bir dalganın alıcı ile arası kesilir ve konum bu şekilde belirlenir. Sadece bir yatay ve bir düşey elemanı bulunan akustik dokunmaya duyarlı yüzeylerde, araya parmak veya başka bir nesne girip dalgayı yansıtma durumundayken, ekran pozisyonu, dalganın hemen verici yanındaki alıcıya yansıması sırasındaki zaman aralığı saptanarak hesap edilir.

Işığa Duyarlı Kalemler

Kalem biçiminde tasarlanmış bu aygıtlar CRT ekranındaki noktalardan gelen ışığı kullanarak ekran konumlarını seçmek için kullanılırlar. Bunlar fosfor yüzeylerinin üzerine düşen elektron ışınlarının bazı noktalara çarpmasıyla dışarı verilen kısa ışık



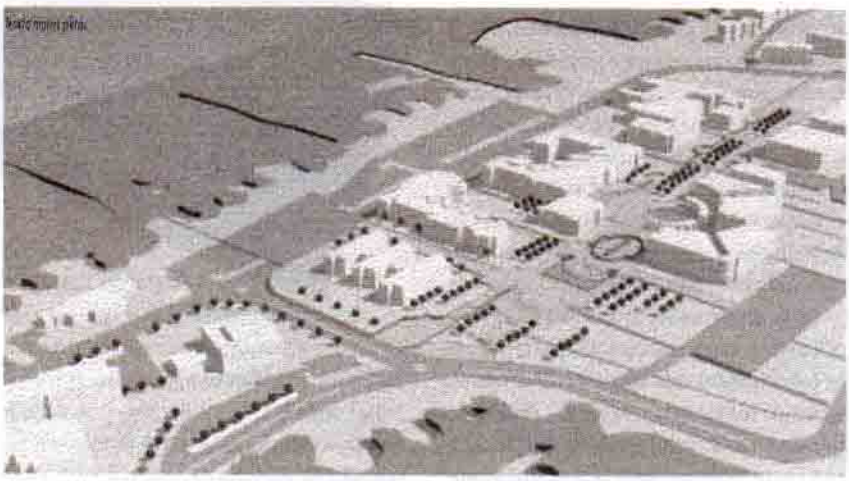
patlamalarına karşı çok duyarlıdırlar. Öbür ışık kaynakları, örneğin odadaki zemin ışıkları ışığa duyarlı kalem tarafından algılanmaz. Işın algıladığı anda bir sinyal üreten ışığa duyarlı kalem, o anda hangi görüntü elemanının tazelendiğini yakalayarak, ekran konumunun kaydedilmesini sağlar. Nesnelerin konumların ve işlem seçmek için kullanılabilir.

Işığa duyarlı kalem halen kullanılan bir aygıt olmasına rağmen bazı olumsuz yönleri nedeniyle diğer aygıtlar kadar yaygın değildir. Bu olumsuz yönlerden biri, ışığa duyarlı kalem ekran üzerine yaklaştırıldığı zaman, görüntü elemanı tam olarak anlaşılmayabilir. Işığa duyarlı kalemi çok uzun kullanım kol yorgunluğuna neden olmaktadır. Bazı uygulamalarda karanlık bölgelerin bulunması gerekirse, bu tam olarak uygulanamaz. Bazen ışığa duyarlı kalemler, oda içindeki zemin ışıkları çok parlak olabilirse, yanlış okuma verebilir.

Ses Sistemleri

Bazı grafik iş istasyonlarında ses komutlarının kabul edilmesi için girdi aygıtı olarak ses tanıyıcıları kullanılır. Ses tanıyıcı girdi aygıtları grafik işlemleri başlatmak veya verilerin girişini yapmak için kullanılabilir. Bu sistem, girdilerin daha önce tanımlanmış kelime ve sözcüklerden oluşan sözlükle karşılaştırılması ile işler. Bu sözlük operatör tarafından komut olarak kullanılacak kelimelerin sisteme tanımlanmasıyla oluşturulur. Her kelime defalarca sisteme okunur, sistem bu kelimeleri inceler ve kelimenin frekans örüntüsünü oluşturulur. Ses komutları sisteme verildiği zaman, frekans örüntüleri araştırılır, en yakın bulunan örüntünün gereği yerine getirilir. Ses girdileri başa yerleştirilen mikrofona doğru okunur. Mikrofon dışardan gelen diğer sesleri en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır. Eğer değişik kullanıcılar bu sistemi kullanacaksa bu sözlük tekrar kul-

Ses giriş sistemi



lanıcının ses örneğine göre düzenlenmelidir. Ses sistemlerinin diğer aygıtlara göre bazı olumlu yönleri vardır. Örneğin, komutları girebilmek için operatör dikkatini bir aygıttan öbürüne çevirmek durumunda değildir veya elleri başka bir nedenle dolu iken de komut ve/veya girdi girebilir.

Çıktı Aygıtları

Görüntülerin çıktılarını çeşitli biçimlerde elde edebilmek için çıktı aygıtları kullanılır. Görüntüleri kalıcı bir ortama aktarmak için çok değişik yöntemler kullanılabilir. En basit olarak, bir fotoğraf makinası aracılığı ile, ekrandaki görüntü filme alınabilir.

Çıktı aygıtlarından alınan resmin kalitesi, görüntüyü oluşturan sonlu noktaların boyutlarına ve x ile y yönlerindeher birim uzunluğa düşen nokta sayısına bağlıdır. Düzgün yazı karakterleri oluşturmak için, yüksek kalite yazıcılar noktaların konumlarını kaydırarak karakter sınırlarını olabildiğince doldurmağa çalışırlar.

Yazıcılardan çıktılar vurmalı veya mürekkep zerreciklerini başka bağlayıcı yöntemlerle kağıt üzerine aktarmakla elde edilir.

Vurmalı yazıcılar, mürekkep şeridinin üzerine basınç yaparak karakterleri kağıt üzerine aktarırlar. Satır yazıcılar, matris yazıcılar bu şekilde çalışırlar.

Diğer yazıcılarda lazer, mürekkep püskürtme, fotokopide olduğu gibi elektrostatik aktarılan mürekkebin ısıtılarak kağıda sabitleşmesi, doğrudan ısı ile yazı elde etme gibi teknikler kullanırlar.

Vurmalı yazıcılar nokta matrisi yazıcı başlığını içerirler. Bu başlık, bir mıknatıs aracılığı ile öne vuruş yapabilen küçük tel parçacıklarını dikdörtgen bir matris düzeninde içerir. Herbir karakter veya grafik şekil, tel parçacıklarını belirli bir düzen içinde mürekkepli şeride vurdurmakla oluşur.

Lazer yazıcılarda, selenyum gibi foto elektrik materyal ile kaplı, dönen merdaneler üzerinde lazer ışınlar yük dağılımı oluştururlar. Merdane, toz mürekkep zerrelerini bu yük dağılımına göre çeker ve kağıda aktarır. Lazer yazıcılarda her inçe 300 veya daha çok nokta basılabilir.

Mürekkep püskürtme yöntemi, merdane üstüne sarılmış kağıt boyunca yatay yönde hareket eden yazıcı başının mürekkep zerreleri fışkırtması ile çıktı elde eder. Elektrik yüklü mürekkep elektromıknatıs veya elektrostatik alan ile yönlendirilip, nokta matrisi vurmasız elde edilir.

Mürekkep püskürtmeli çizici

Elektrostatik yazıcı kağıt üzerine negatif yükler yerleştirir. Bu kağıt uzunluğu boyunca tamamlanır. Sonra kağıt toz veya sıvı mürekkep ile yüz yüze gelir. Mürekkep pozitif yüklüdür, böylelikle negatif yüklü olan alan tarafından çekilir ve tutulur. Böylelikle belirlenmiş çıktılar elde edilir. Renkli elektrostatik yazıcılar, bu işlemi üç temel renk ve siyah için ayrı ayrı yaparlar.

Isı ile yazma yönteminde, ısıya duyarlı kağıt üzerine çıktı alabilmek için nokta matrisi ısı elamanları ile oluşturulur.

Vurmalı yazıcılarda renkli çıktılar belli oranda, değişik renkli şeritler kullanılarak elde edilebilir. Diğer aygıtlarda renkli bir çıktı oluşturabilmek için üç temel renk ve ek olarak siyah mürekkep kullanılır. Bunların kullanılış biçimleri temelde, renkli monitörlerde olduğu gibi,temel renk noktalarının yan yana gelmeleri ile, gözün birleşik tek renk algılamasını sağlamaktır.

Kalemli çiziciler kağıdı bir merdane üzerinde döndürürken yüzeyine bir yönde hareketli kalem dokunduran, veya kağıdı düz bir zeminde sabit tutarken üzerinde iki yönde kalem dolaştıran mekanik aygıtlardır ve bir veya bir kaç tane kalemi aynı anda kullanabilirler. Çeşitli renklerde ve kalınlıklarda kalemler değişir gölgelemeler ve çizgi sitilleri yapmak için kullanılır. Akıcı mürekkep, tükenmez veya keçe uç kalemlerin hepsi kullanılabilir.

Bilgisayar grafiği ile ilgili temel donanım öğeleri kullanılarak, çok karmaşık üst sistemler geliştirilmiştir. Amaç, fotoğraf gerçekciliğinde görüntüler elde etmektir.

Kaynaklar

Hearn, D. ve Baker, M.P., Computer Graphics, ikinci baskı, Prentice Hall, New Jersey, 1994.

Foley, J.D. ve van Dam, A., Computer Graphics: Principles and Practice, Addison-Wesley, 1990.

Watt, A., Fundamentals of Three-Dimensional Computer Graphics, Addison-Wesley, 1989.

Burger, P. ve Gilles, D., Interactive Computer Graphics, addison-Wesley, 1989.

Rogers, D.F., Procedural Elements of Computer Graphics, McGraw-Hill, 1985.