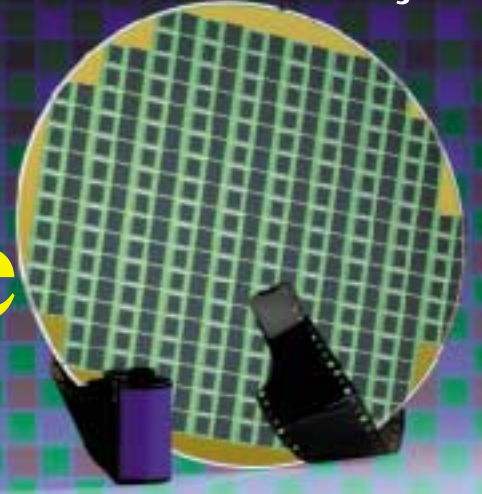


CCD'ler, CMOS'lar ve Mükemmel Göz Düşü

Sayısal Görüntüleme Teknolojisi



Görmek için göz kapaklarımızı kaldırmamız yetiyor. Görmek, çaba gerektirmediği için, aştığımızın nasıl olup da fotonları yakaladığı, bunu yeterince iyi yapıp yapmadığı üzerine düşünmemize bile gerek yok. Aslına bakarsanız, bir görüntüleme aygıtının, gelen fotonları hangi yüzdeyle yakalayıp görüntü bilgisine çevirdiğinin, "kuantum verimliliği" denen bir ölçütü var. Böyle olunca, mükemmel gözün, tek bir fotonu bile atlamaması beklenir. Bu bir ön bilgi. Şimdi, basit görünen bir soru sorabiliriz. "Şu görüntüleme aygıtları, kuantum verimliliklerine göre nasıl sıralanır: İnsan gözü, fotoğraf filmi ve sayısal fotoğraf makinesi?.." Hemen herkes, evrim harikası insan gözünün kusursuz, fotoğraf filmlerinin olabildiğince iyi, sayısal fotoğraf makinelerininse ancak umut verici olduğunu söyleyecek. Başka ölçütlerle bakıldığında bu doğru olabilir. Evrimin ortaya çıkardığı göz, olağan insan gereksinimleri ve alışıldık aydınlatma koşulları çerçevesinde yeterli. Görmeyi mekanik bakış açısıyla değerlendirdiğimizde ortaya çıkan tabloysa acımasız: %1 dolaylarında kuantum verimliliğiyle insan gözü açık farkla sınıfta kalıyor. %3-%5 verimliliğe sahip fotoğraf filminin de fazla yol aldığı söylenemez. Oysa, %80'i aşan verimlilikleriyle, sayısal fotoğraf makinelerinde kullanılan CCD ve CMOS yongaları, mükemmel göz beklentilerimize en çok yaklaşan aygıtlar.

GÜNLÜK YAŞAMDA, gözümüzün foton yakalama becerisinden yakılabileceğimiz koşulların sayısı son derece kısıtlı. Oysa bazıları, sözgelimi uzak yıldızlara bakan gökbilimciler için tek bir foton bile gözden kaçırılmayacak kadar değerli. Görüş alanımızda kuramsal olarak sayılamayacak kadar yıldız varken, dünyanın en iyi gözlem noktasından en uygun zamanda bakıyor olsak bile, çıplak gözle topu topu ancak 9000 kadar yıldız görebiliyoruz. Bundan fazlasını görebilme, teleskop kullanmayı gerektiriyor. Ancak, arkasında kuantum verimliliği düşük olan insan gözü bulunduğu sürece, teleskoplardan da yeterince yüksek verim alabilmek olası değil. Gökbilimcilerin ürettikleri yaygın çözüm, teleskopu bir fo-

toğraf makinesi gibi kullanıp, bir fotoğraf filmi karesini çok uzun sürelerle pozlamak. Bu yolla, çıplak göze belli belirsiz bulanık bir disk olarak görünen andromeda gökadasının aslında neye benzediğini öğrenebiliyoruz. Ancak, bu işlem gerçek zamanlı olmadığından makine ölçütleriyle bile "görmek" olarak nitelenemez...

Gökbilimcilerin yaklaşık 10 yıldır yaygın olarak kullanageldikleri en verimli görme yöntemi, teleskopun arkasına, CCD (Charge-Coupled Device: Yükten Bağlı Ayrıştırıcı) yongalı bir kamera yerleştirmek. Bu yöntemle hem gerçek zamanlı, hem de yüksek kuantum verimliliği görüntüler elde edilebiliyor. CCD yongalarının geçmişi 1969'a dayansa da, gökbilimde ancak son yıllarda yoğun olarak kullanılmaya başlandı. Bunun da nedeni, ilk

örneklerinin düşük çözünürlüklü ve pahalı olması. Üstün çözünürlüklü ve ucuz CCD'ler, gökbilim ve diğer ileri uygulama alanlarının sınırlarını aşmış, ucuz sayısal fotoğraf makinelerine kadar yayıldı. Son bir-iki yıldır piyasaya üstün sayısal fotoğraf makineleri çıktı. Bunlar ortaya çıkınca, CCD teknolojisinin, hem teknolojik uygulamaları, hem de görmeye ilişkin kuramsal bilgilerimiz açısından böylesine çığır açıcı nitelikte olduğunun farkına varabilen insan sayısı azdı. Bu yüzden bu teknoloji, hak ettiği ilgi ve hayranlığa ancak son günlerde kavuşabildi.

Bell Laboratuvarları'ndan Willard Boyle ve George Smith'in, 17 Ekim 1969'da buldukları CCD yongası, geçtiğimiz yıl sonlarında iki önemli teknoloji ödülü aldı. Bunu da, bu teknolo-

jinin getirdiği atılımın ancak ucuz sayısal fotoğraf makineleri sayesinde anlaşılabilir olmasına bağlayabiliriz. Bilgisayar ve iletişim alanlarında verilen ünlü C&C Ödülü ve Uluslararası Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Organizasyonu IEEE'nin verdiği Atılım Ödülü'nün sonuncuları, 30 yıl gecikmeyle de olsa Boyle ve Smith'e verildi. İkisinin buluşlarını eşsiz kılan bir boyut da, ilk fikrin akıllarında oluşmasıyla, uygulanabilir projenin biçimlenmesi arasında geçen toplam "buluş" süresinin bir saat olması. CCD, gerçek anlamıyla bir anda bulunan ender önemli buluşlardan biri...

CCD ve onu izleyen CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor: Tümleş Metal Oksit Yarıiletken) teknolojilerine gelen atılım niteliğindeki en son uygulamalar, yine Bell Laboratuvarları kökenli transistör kadar süksel yapıyor. En son, bu yılın Mart ayında, bir İsrail firması, bir kapsülün içine sığdırdıkları, kendi kendine yeterli kamera-verici sistemini tanıttı. Bele bağlanan kemer biçimli bir anten sayesinde, kapsül sindirim sistemi boyunca ilerlerken, geçtiği her yerin gerçek zamanlı ve renkli video görüntüsünü yayımlayabiliyor. Kapsüle kumanda edebilmek için, mikromotor düzenekleri geliştirmeye de başlamışlar. Böyle bir muayenenin maliyeti, fiberoptik kablolar kullanılan geleneksel yönteminkinden daha fazla da değilmiş.

Elektronik görüntülemenin son zaferiyse, en yaygın körlük türlerine çözüm getirebilecek yapay ağtabaka (retina) üretimi olacak. Yapay ağtabaka araştırmaları yapan belli başlı 3-4 konsorsiyum, teknoloji yaklaşımlarının temel bileşenlerini ayrı ayrı başarıyla sınamışlar. Bunların biraraya getirilip, çalışır durumda ilk yapay ağtabaka aktarımının gerçekleştirilmesi için birkaç yıl sabretmek gerekiyor.

Yapay ağtabakalar, fotoğraf makinelerinde kullanılan CCD ve CMOS teknolojilerinden çok farklı ürünler değil. Ağtabakaya yerleştirilen bu yongalar, göz sinirlerini elektrikle uyurarak, görüntüyü beyine iletecekler. Yöntem, ağtabakanın doğal işleyişini taklit ediyor. Araştırmacıların doğayı taklit edemedikleri tek nokta, yapay ağtabakanın dışarıdan bir güç kaynağına gereksinim duyması. Bunun için ge-



Bell Laboratuvarları'ndan Willard Boyle ve George Smith, 17 Ekim 1969'da buldukları CCD teknolojisini, bir kamera prototipi üzerinde deniyor.

liştirilen çözüm, ağtabaka üzerine bir güneş pili eklemek. Göze giren doğal ışık bu pili beslemek için yeterli olmayacağından, göze zarar vermeyen görünmez bir lazer demeti kullanılacak. Araştırmacılar, böyle bir lazer kaynağını, pilleriyle birlikte, normal görünen bir gözlük çerçevesine gizlemeyi başarmışlar.

CCD ve CMOS

CCD'ler, ışığa duyarlı silikon noktacıklardan oluşan matrislerdir. Bir foton, yarıiletken kristal yapısındaki noktacıklardan birine çarptığında, bir miktar elektronu serbest bırakır. O noktacığa ne kadar çok foton denk gelirse, serbest kalan elektron sayısı o kadar fazla olur. Elektron miktarı, yani yük ölçülerek, o noktacığın aydınlanma düzeyini veren görelî sayısal bir değer elde edilebilir.

CCD matrisindeki noktacıklar aslında renk körüdürler. Komşu noktacıkların her biri, üç ana renk olan kırmızı, yeşil ve sarıdan sadece birini geçirecek renk filtreleriyle örtülmüştür. Renkler, yaygın olarak, Kodak firmasınınca bulunmuş "Bayer" motifine uygun olarak dizilirler. Şematik olarak:

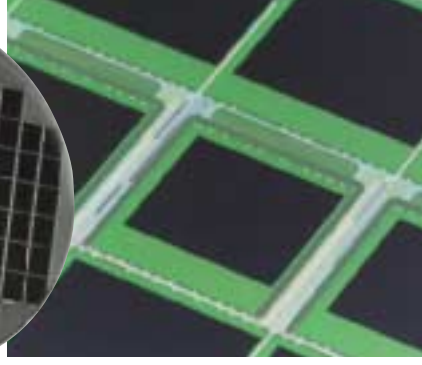
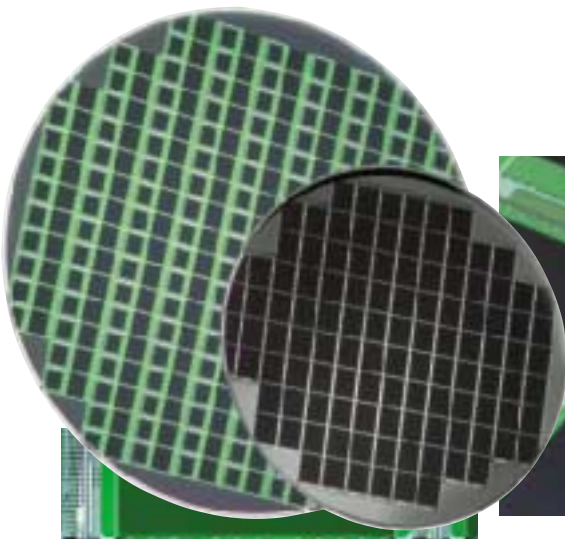
```

K Y K Y K Y K Y K Y
Y M Y M Y M Y M Y M
K Y K Y K Y K Y K Y
Y M Y M Y M Y M Y M

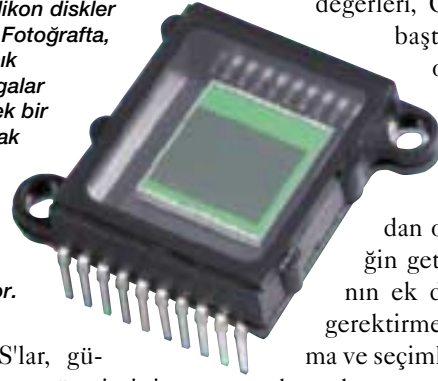
```

Donanım ya da yazılım düzeyindeki bir algoritma, her noktacığın kendine ait renginin şiddetine, komşu noktacıklara ait renklerin şiddetlerinin ortalamasını ekleyerek, standart RGB (kırmızı-yeşil-mavi) kodlamasına uygun noktacığın değerini elde eder. Zayıf aydınlatma koşullarında, renkli CCD kullanılması verimli değildir. Aslına bakarsanız, insan gözü de geceleri farklı algılayıcı hücreleri kullandığı siyah-beyaz kipe geçer.

Uygulamada, bir CCD yongası, sözünü ettiğimiz toplayıcı katmanın yanı sıra, elektrik yükünü saklayan ve aktaran ek öğeler içerir. Fotoğraf kalitesinde bir görüntü yakalayabilmek için, tüm sistemin hızlı ve eşgüdümlü çalışması gerekir. Elektron yük değerleri hızla saptanıp korunmalıdır. CCD'lerde, noktacığın değeri satır satır okunur. Bu okuma işlemi sırasında ışık düşmeyi sürdürürse, görüntü bulanıklaşacaktır. Bunu önlemek için bazı sayısal fotoğraf makineleri, geleneksel makinelerde olduğu gibi, hızla açılıp kapanan perde düzenekleri içerir. Yine de, sayısal fotoğraf makinelerinin en çok üzerinde durulan üstünlüklerinden biri olarak hareketli parça içermemeleri beklenir. Bunu sürdürmek için geliştirilen bir başka yaklaşım, kısa süre için etkinleştirilip yeniden kapatılabilen bir yük bilgisi katmanı eklemek. Bu yöntemde, algılayıcı katmandaki yük, hızla saklayıcı katmana aktarılır ve görece uzun süren asıl okuma süreci bu katman üzerinden işletilir.



IBM'in mikroelektronik laboratuvarlarında CCD yongaları ilk olarak 8 ya da 5 inçlik silikon diskler halinde üretiliyor. Fotoğrafta, 1,3 milyon noktacık çözünürlükte yongalar grup halinde ve tek bir yonga ayrıntı olarak gösterilmiş. Son olarak, koruyucu katmanları ve iletken bacakları eklenmiş ürün görülüyor.



CCD teknolojisindeki yaklaşım, uygulamada, özellikle amatör sayısal fotoğraf makineleri söz konusu olduğunda iki önemli olumsuzluk getiriyor: Yüksek maliyetli oluşları ve hızlı pil tüketmeleri... Bu olumsuzlukları ortadan kaldıran daha yeni bir görüntüleme yongası tipi olan CMOS'lar üzerindeki öncü çalışmaları 1990'larda NASA yapmış ve ilk ticari ürünler 1998'den itibaren pazar bulmaya başlamış. CMOS'lar, ileri uygulamalarda henüz CCD'ler kadar başarılı sonuç vermesede, düşük beklentili amatör uygulamalarda CCD'nin 10'da birine kadar inen fiyatları ve 100 kez düşük enerji tüketimleri nedeniyle yeğlenmeye başladılar. CCD'ler tümüyle bu alana özgü üretim yöntemleri gerekti-

riyorken, CMOS'lar, günümüzde yonga üretiminin %90'ını oluşturan temel tekniklerle, genel tesislerde üretiliyor.

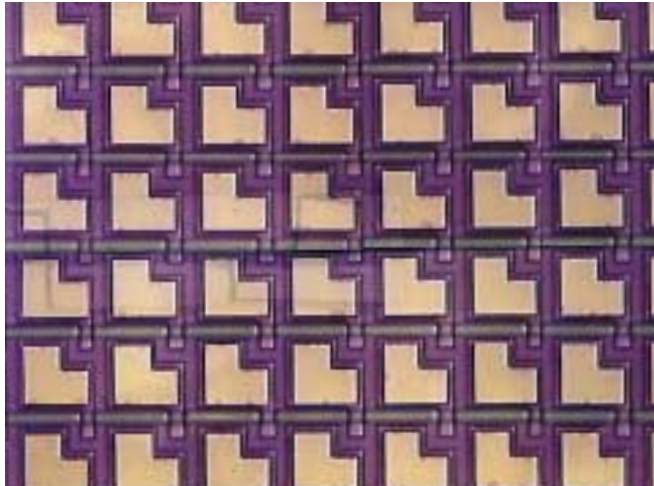
CMOS'lar, işlemci ve bellek yongalarına çok benziyor. Özellikle, DRAM (Dynamic Random Access Memory: Dinamik Rastgele Erişimli Bellek) bellek yongalarıyla benzeşen yönleri fazla. Üretim maliyetlerindeki düşüklük sayesinde, ünlü avuç içi bilgisayar serisi Palm'lar, GameBoy oyun aletleri ve cep telefonlarına eklenmek için üretilen küçük boyutlu, düşük çözünürlüklü CMOS kameralarının fiyatları 50 ABD doları ve altına kadar düştü.

CCD'li sayısal fotoğraf makinelerinin çok güç sarf etmelerinin en önemli nedeni, 5 volt ile 15 volt arasında

farklı güç kaynağı gereksinimine sahip birden fazla bileşen içeriyor olmaları. CMOS teknolojisindeyse, algılayıcılar, depolayıcılar, güçlendiriciler, hatta karmaşık görüntü algoritmaları gerçekleştiren bileşenler bile aynı yonga içinde birarada üretiliyor. Her şeyi bünyesine alan bu yongaların elektrik gereksinimi de genelde 3.3, ya da en çok 5 volt ile sınırlı. Özdeş özellikteki iki sistemden CCD seçeneği 2-5 watt güç tüketirken, CMOS, 20-25 miliwattla yetiniyor. Üstelik CMOS noktacık değerleri, CCD'lerde olduğu gibi baştan sona, satır satır okunmak zorunda değil. Rastgele erişim özelliğiyle, herhangi x,y koordinatındaki değer doğrudan okunabiliyor. Bu özelliğin getirilerinden biri, yonganın ek donanım ya da yazılım gerektirmeden, görüntü kadrajlama ve seçimli büyütme özelliklerini barındırması...

Peter Denyer, bundan 11 yıl önce Edinburgh Üniversitesi'nde elektronik mühendisliği profesörüyken, bir bilgisayar bellek yongasının tepesini binbir zahmetle koparıp, açığa çıkan çıplak yarıiletken yüzeyi odaklanmış görüntüye tutarak ekranda kaba bir sayısal görüntü elde etmeyi başarmış. O sıralarda NASA, Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü gibi birçok yerde üç aşağı beş yukarı aynı yöntemle benzer deneyler yapıyordu. CMOS görüntü yongalarının bu emekleme aşamasında Denyer, konunun dikkate değer ekonomik gelecek vadinin farkına varan ilk insanlardan biri olmuş. Vision Group adı altında kurduğu şirket geçen yıl, dünyanın 7. en büyük yonga üreticisi ST Microelectronics bünyesine katılınca, CMOS alanındaki öncü kuruluşlardan biri haline gelmiş. ST Microelectronics, bugün birkaç yüz dolar mertebesine satılan kaliteli CCD'lerin yerini almak üzere, bugünün bellek yongaları kadar ucuz, yani birkaç dolarlık CMOS'lar üretmeye uğraşiyor. Başını SONY, Matsushita gibi, çoğunluğu Japonya kökenli devlerin çektiği CCD pazarına rakip olarak, CMOS pazarının başını, ST Microelectronics'in yanısıra Motorola, Agilent, Hewlett-Packard, Photobit, Conexant ve Y-Media gibi batılı firmalar çekiyor.

CMOS yongaları en yaygın olarak, masaüstü bilgisayarlara eklenen web kameraları için, CCD'lere göre daha düşük çözünürlükte üretiliyorlar. Mikrofotoğrafta, 640x480 çözünürlük ve 1,25 mikrometre noktacık büyüklüğüne sahip bir VGA kamera yongası yüzeyinden ayrıntı görülüyor.





Dairesel noktacı dizimli bir CMOS yongasına ait ayrıntı mikrofotografı. Noktacıklar 0,7 mikrometre çaplı. Bayer CFA renk motifinin, dairesel dizilime nasıl uyarlandığını örneklemesi açısından ilginç bir fotoğraf. Dairesel dizilim, özellikle, göz için yapay ağtabaka üretimi çalışmaları için önemli.

Sayısal fotoğraf makinesi pazarının çoğunu elinde tutan Japon fotoğraf makinesi üreticileri ve Kodak, şimdilik yaklaşık 500 dolara satılan CCD tabanlı makineler üretiyor. Şimdilik CMOS pazarı kişisel bilgisayarlara takılan masaüstü kameralar ve diğer küçük uygulamalarla sınırlı olsa da, Polaroid, 200 doların altına satılan bir CMOS tabanlı fotoğraf makinesini piyasaya sürdü bile. Er ya da geç, diğer üreticilerin de, daha ucuz olan CMOS teknolojisini yeğlemek zorunda kalacakları öngörülüyor.

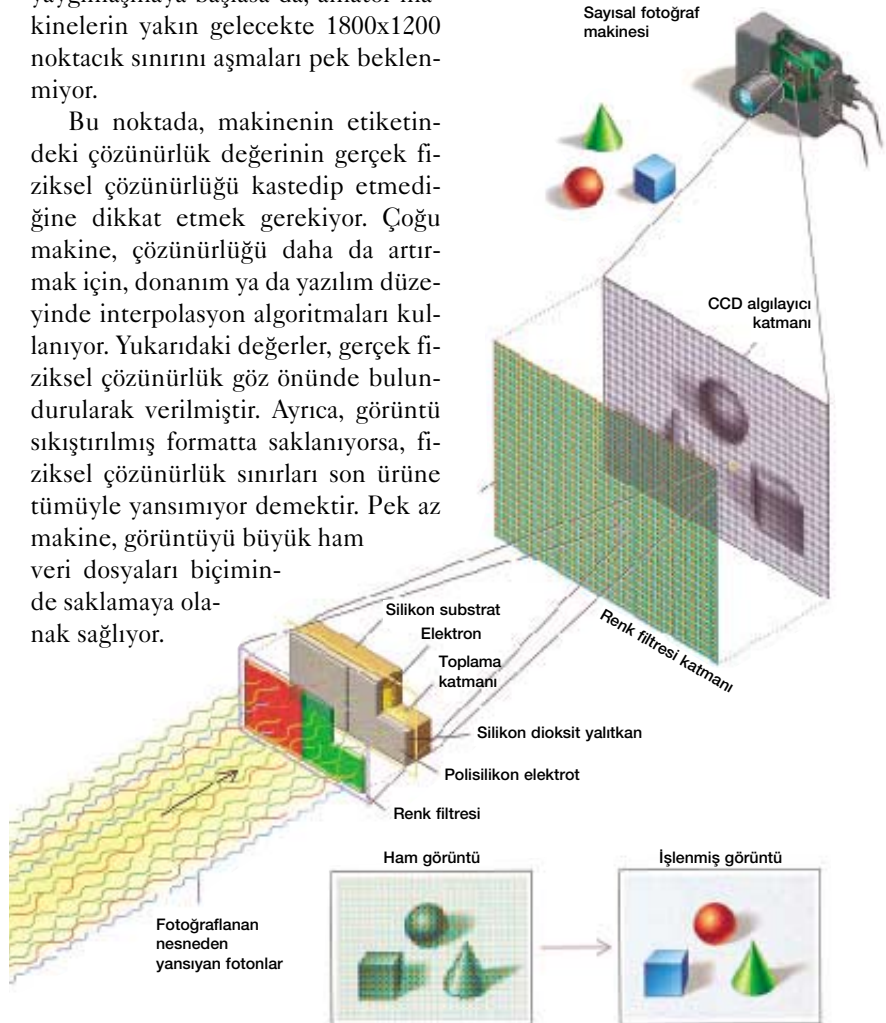
Sayısal Fotoğraf Makineleri

Sayısal fotoğraf makineleri de film kullanan atarınıninkine benzer biçimde görüntüyü duyarlı bir yüzeye yansıtırlar. Farklı olarak, duyarlı yüzey film değil, CCD matrisidir. CCD, noktacılarına düşen ışık parlaklığı niceliğini analog akıma dönüştürdüğünde işini tamamlar. Bu aşamada, ayrı bir bileşen olan analog-sayısal dönüştürücü devreye girer. Dönüştürücü, CCD'den aldığı sinyali, ikilik tabanda sayısal ham görüntü verisine dönüştürüp, sayısal görüntü işlemcisi olarak adlandırılan üçüncü bir bileşene aktarır. İşlemci, renk değerlerini, gözün algıladığı olağan dengeye kavuşturur, kontrast bozukluklarını düzeltir, interpolasyon algoritmalarıyla çözünürlüğü yükseltir ve işlenmiş görüntü verisini JPEG ya da başka bir formatla sıkıştırıp depolama birimine iletir. Farklı üreticiler farklı tasarım yaklaşımları geliştirmiş olsalar da, yapılan işin özü budur.

Sayısal fotoğraf makinelerini karşılaştırırken kullanılan en önemli ölçüt, görüntü çözünürlüğüdür. 1997'de tek

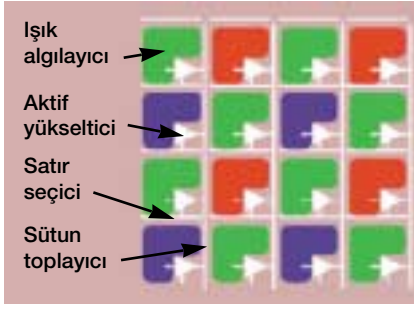
tük görülmeye başlayan ilk ticari modeller, 640x480 noktacı çözünürlükteydi. 1998'de, aynı fiyata 1024x768 noktacı çözünürlüklü modeller yaygın standart oldular. 1999'un başlarında, 1536x1024 noktacı makineler piyasadayken, 1999'un sonlarından bugünlere kadarki ticari ürünler 2 megapiksel çözünürlük sınırını biraz aşmış, görece kararlı bir hale geçtiler. Aslında, genel bilimsel amaçlı, 16 megapiksellek (örn. 4000x4000) modeller yaygınlaşmaya başlasa da, amatör makinelerin yakın gelecekte 1800x1200 noktacı sınırını aşmaları pek beklenmiyor.

Bu noktada, makinenin etiketindeki çözünürlük değerinin gerçek fiziksel çözünürlüğü kastedip etmediğine dikkat etmek gerekiyor. Çoğu makine, çözünürlüğü daha da artırmak için, donanım ya da yazılım düzeyinde interpolasyon algoritmaları kullanıyor. Yukarıdaki değerler, gerçek fiziksel çözünürlük göz önünde bulundurularak verilmiştir. Ayrıca, görüntü sıkıştırılmış formatta saklanıyorsa, fiziksel çözünürlük sınırları son ürüne tümüyle yansımıyor demektir. Pek az makine, görüntüyü büyük ham veri dosyaları biçiminde saklamaya olanak sağlıyor.

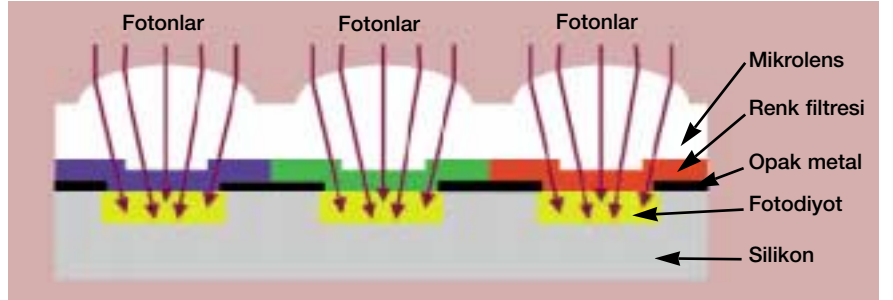
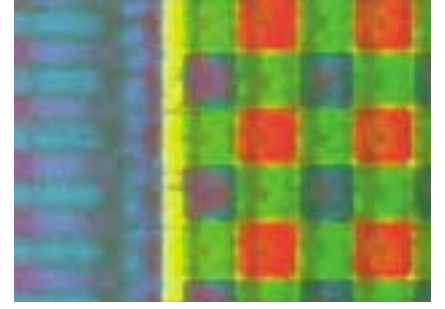
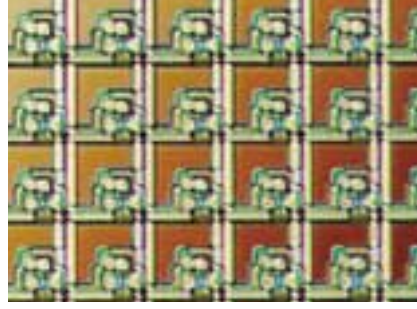


Filmin Sonu mu?

Reklam ve moda fotoğrafçılığı gibi üstün kalite beklentisi içeren alanlarda, geleneksel filmli makineler hâlâ sayısal makinelere yeğleniyor. Aslına bakarsanız, kuantum verimliliğinin ön plana çıktığı uç uygulamalar dışında tutulacak ve kuruluşlar için, çok pahalıya, az sayıda üretilen astronomik CCD matrisleri yok sayılacak olursa, bugün için geleneksel fotoğrafların kalitesinin daha üstün olduğunu teslim etmek gerek. Bu, bütünüyle CCD ve CMOS'ların çözünürlüklerindeki sınırlılığa dayanan bir durum ve yarıiletken teknolojisindeki yeniliklerle ve pazar baskısının artmasıyla aşılabacağı umuluyor. Standart bir sayısal makinenin çözünürlüğü bugün için yaklaşık 2 milyon noktacıyla sınırlıdır. Oysa, standart bir 100 ASA'lık 35 mm negatif film kabaca kare başına 34 milyon noktacı çözünürlüğe sahiptir. Amatör fotoğrafçılıkta bu kuramsal çözünürlük üst sını-



Bir CMOS yongasının yapısı. Bayer CFA renk motifine göre dizilmiş noktacıkların üstten şematik görünümünde, noktacıklardaki değerlerin, satır ve sütun koordinatlarına göre nasıl okunduğu da izlenebiliyor. Bu şemayı, renk filtresi eklenmiş ve eklenmemiş gerçek birer CMOS yongasına ait mikrofotograflarla karşılaştırabilirsiniz. Yanal kesit şemasında, yongaların katman yapıları görülüyor.



rına asla yaklaşamadığı için, kaliteli sayısal fotoğraf makineleriyle sadece profesyonel fotoğrafçılar yetinmiyor.

Renk çeşitliliği ve doğallığı bakımından, sayısal makineler lider. 16,7 milyon renk sunan 24 bitlik bir makinenin çektiği fotoğraflar, düzeltici algoritmaların da yardımıyla son derece doğal görünen renk paletleri sunar. Saydam filmlerse, filmlerin kimyasal yapıları ve filmin zemin rengi nedeniyle şu ya da bu yönde doğaldan sapmalar içerir.

CCD ve CMOS'ların renk algıları da aslında insan gözü ve beynininkinden dikkate değer ölçüde sapar. Bir yonganın maviyi nasıl gördüğü, kullanılan mavi filtrenin ve silikon noktacıkların fiziksel özellikleriyle ilintilidir. Ancak, filmlerdeki küçük bir sapmayı düzeltmek için, karmaşık kimyasal çalışmalar gerekirken, sayısal yongalar-daki büyük sapmalar bile, algoritmalar yardımıyla kolayca düzeltilebiliyor.

Yonganın renk hataları, standart bir renk tablosuyla, bu tabonun elektronik fotoğrafı karşılaştırılarak elde edilen katsayılarla düzeltilebiliyor. Örneğin, mavi için kabaca şöyle bir formül kullanılıyor: $M' = m_1 \cdot X + m_2 \cdot Y + m_3 \cdot M$. Burada, m_1 , m_2 ve m_3 , kırmızı, yeşil ve eski mavileyle doğal mavinin şiddetlerinin ilişkisini belirleyen katsayılardır. Benzer ilişkiler diğer temel renkler, kırmızı ve yeşil için de yazılınca, matris fonksiyonları elde edilir.

Bir başka sorun daha çözünürlükle ilgili ama tam olarak değil... Geleneksel makinelerle çekilen, aslen düşük

çözünürlüklü ve bozuk renkli fotoğrafların sayısal fotoğraflara göre üstünmüş gibi algılanmalarının önemli nedenlerinden biri, film noktacıklarının, yani grenlerin, sayısal görüntülerin aksine, boyut ve diziliş bakımından herhangi bir düzenlilik göstermemeleri. Eş noktacık büyüklükleri ve kusursuz matris dizilimiyle sayısal görüntüler, çözünürlük sorunlarını ilk bakışta ele veriyorlar. Son zamanlarda bunu önlemek için geliştirilen yaklaşım, baskı aşamasında stoastik tramlama denen bir teknikle noktacıkların rastgeleliği ni artırmak.

Sorun eninde sonunda gelip çözünürlük zayıflığına dayanıyor. Bu sorunun 2-3 yıla kalmadan çözülmesi işten bile değil. Üreticileri, yongaların noktacık çözünürlüğünü alabildiğine yükseltmekten alıkoyan asıl etmen, teknolojik yetersizlik değil, işin ekonomik boyutu: Noktacıklar ne kadar iri tutulursa, noktacık başına o kadar çok foton toplanır; iri noktacıklı algılayıcılar da, zayıf aydınlatma koşullarında bile o kadar mükemmel çalışırlar. Aynı büyüklükte matris için daha iri noktacıkları yeğlemek, daha büyük yonga üretmeyi gerektiriyor, yani maliyeti artırıyor. Hatta, daha büyük objektif kullanılmasını gerektirdiğinden, maliyeti fazladan bir kat daha artırıyor. Küçük noktacıklı yongalar, hem yonga üretimi, hem de objektif maliyeti bakımından daha ekonomik.

Gelgelelim, noktacıkları küçültmenin de bir sınırı var. CMOS'larda yaygın olarak 5-10 mikron aralığında çapa

sahip noktacıklar kullanılıyor. Noktacıkları, 0,5 mikron çapa indirmek bugünün teknolojiyle işten bile değilken, 5 mikron sınırının altına inmek, yaygın uygulamalar için ekonomik değil. Bunun en önemli nedeni, bu sınırın altındaki noktacık büyüklüğünü anlamlı kılacak duyarlılıkta objektiflerin üretim maliyetinin, çözünürlükle birlikte birden bire astronomik boyutta artması. Ancak, objektif teknolojisinde maliyetler, aynı yarıiletken teknolojisinde olduğu gibi, eninde sonunda gelip piyasanın arz-talep dengelerine dayanıyor. Bilgisayar mikroişlemcilerinde benzer dengelerin çitasının nasıl ilerledi teknoloji yönünde aşamalı olarak başarıyla yukarı çekildiğini örnek alarak, görüntüleme piyasasından da benzer stratejik başarı bekleyebiliriz.

Saydam film teknolojisi tarih mi oluyor? Bu sorunun yanıtlanması farklı tüketici gruplarının gelir düzeyleri, elektronik görüntü basma ve saklama olanaklarının varlığı ya da yokluğu gibi toplumsal-ekonomik boyutların tartışılmasından geçiyor. Soruya yalnızca teknolojik verimlilik açısından bakarsak yanıt yine de net: Evet, film tarih olacak. Sayısal görüntüleme şimdiden lider oldu. Mükemmel göz düşünüyü neredeyse başarmış olmanın sembolik önemiyle birlikte...

Özgür Kurtuluş

Kaynaklar:
<http://www.apogee-ccd.com>
<http://www.foveon.net>
<http://www.imaging-resource.com>
<http://www.lucant.com>
<http://www.photobit.com>
<http://www.siliconfilm.com>