

OPTİK BİLGİ İŞLEME

Mete SEVERCAN

ODTÜ, Elektrik ve Elektronik Müh. Bölümü

ÖZET

Bu yazıda tutarlı (coherent) aydınlanma altında çalışan optik bilgi işleme dizgeleri tanıtılacak, istenilen bir transfer işlevinin ne şekilde gerçekleştirileceği verilecektir. Daha sonra uygulamadan iki örnek, görüntü netleştirme ve biçim tanıma dizgeleri, tartışılacaktır. Optik dizgelerin bugünkü sorunu, bilgi işleme hızlarının çok yüksek olmalarına rağmen, bilgi giriş ve çıkış hızlarının henüz sayısal dizgelerden düşük olmasıdır. Yazının sonunda gerçel zamanda optik bilgi işleme alanında günümüzdeki çalışmalardan söz edilecektir.

GİRİŞ

İki boyutlu dizilerin veya işlevlerin ışık kullanılarak işlenmesi optik bilgi işleme olarak bilinmektedir. Optik bilgi işleme dizgeleri günümüzde daha çok görüntü işleme amaçları için kullanılmakla birlikte, elektriksel işaretleri optik işaretlere dönüştüren çevirgeçlerin gelişmesi ile elektriksel bilgilerin de işlenmesinde faydalı olabilecektir. Sayısal elektronik bilgi işleme dizgelerinin bugünkü gelişmiş düzeyi yanında, optik bilgi işleme dizgelerine neden bir gereksinme olabileceği düşünülebilir. Optik dizgelerin çekiciliğinin nedeni bir düzlem üzerinde bulunan bilgi dağılımını aynı anda paralel olarak ve ışık hızı ile işleyebilir olmalarından, yani bilgi işleme kapasitelerinin büyük olmasından dolayıdır.

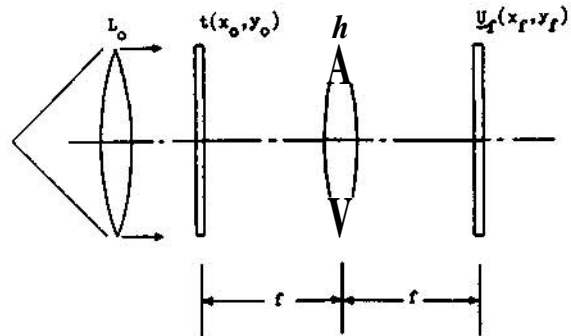
Optik işlemenin başlangıcı yaklaşık bir yüz yıl öncesine gider. Ancak bu konuda asıl ilerleme, 1950'li yıllarda iletişim kuramı ile arasındaki bağın kurulması daha sonra 1960'lı yıllarda güçlü ve tutarlı (coherent) bir aydınlanma kaynağı olan Laser'in uygulama alanına girmesi ile oldu. Bu yazıda tutarlı aydınlanma kullanılan, doğrusal matematiksel işlemleri gerçekleştirebilen optik dizgelerin tanıtılması amaçlanmaktadır. Şunu özellikle belirtmelidir ki, bu dizgelerin yanında, tutarsız (incoherent) aydınlanma (beyaz ışık veya darba ntlı ışık) kullanan optik dizgeler de bulunmaktadır. Ancak tutarlı dizgeler, kullanılan işaretler ve gerçekleştirilebilen işlemler yönünden daha büyük bir zenginlik gösterirler. Ayrıca, tutarlı optik dizgeleri ile, bu yazıda kısaca değineceğimiz doğrusal olmayan işlemler ve mantık işlemleri de gerçekleştirmek mümkündür.

Sözü edilen dizgelerin tanıtılmasından önce, kullanacağımız matematiksel gösterimi kabaca tanıtmak yerinde olacaktır. Tek renkli, ν frekansında aydınlanma-

dan dolayı uzayda bir P noktasında t anındaki ışık genliği $u(P,t) = U(P) \cos \{ \nu t + \phi(P) \}$ biçiminde yazılabilir, $u(P,t)$ Maxwell denklemlerini ve dalga denklemini sağlayan skalar bir nicelik olup, dalganın elektrik veya manyetik bileşenlerinden herhangi birisi olarak alınabilir. İşlemleri basitleştirmek için $u(P,t)$ yerine $\underline{U}(P) = U(P) e^{i \phi(P)}$ karmaşık genliğini (evrek = phasor) kullanabiliriz. Göz veya herhangi bir optik kayıt aygıtı ışığın yeğinliği olan $|\underline{U}(P)|^2 = U^2(P)$ 'ye duyarlıdır.

DOĞRUSAL OPTİK DİZGELER

Tutarlı optik dizgelerinde gerçekleştirilebilen en önemli işlemlerden birisi iki boyutlu Fourier dönüşümüdür. Kırınım kuramı kullanılarak, yakınsak bir merceğin bir odak uzaklığı önündeki ışık genliği dağılımının iki boyutlu Fourier dönüşümünün, merceğin bir odak uzaklığı arkasında elde edilebileceğini göstermek mümkündür. Şekil 1'de görüldüğü gibi L, merce-



(a)



(b)

ŞEKİL 1. a) Mercek kullanılarak Fourier dönüşümü bulunması
b) "3" şekli ve Fourier dönüşümü

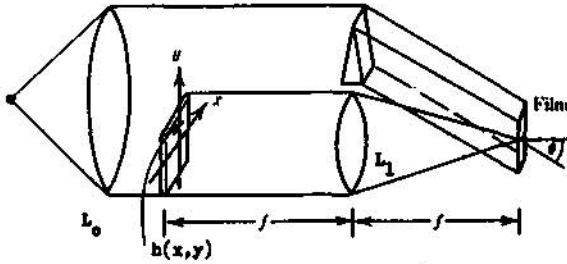
ğinin ön odak düzlemine Fourier dönüşümü bulunacak $t(x_0, y_0)$ işlevi, örneğin bir film biçiminde, konulur. Bir L_0 merceği yardımıyla elde edilen düzlem dalga bu film üzerine düşürülürse filmin hemen arkasında $t(x_0, y_0)$ genlik dağılımı elde edilir. L_1 merceğinin arka odak düzlemindeki genlik dağılımı, $(1/ Af)$ gibi bir sabit çarpan dışında,

$$U_i(x_i, y_i) = \int \int t(x_0, y_0) \exp(-j2\pi r(f_x x_0 + f_y y_0))$$

$$dx_0 dy_0 = F^{-1} t(x_0, y_0) \quad (1)$$

Fourier dönüşüm integrali biçiminde yazılabilir. Buradaki f_x, f_y sıklıkları ile x^*, y^* arasındaki ilişki $f_x = (x^*/Xf)$, $f_y = (y^*/Yf)$ olup X ışığın dalga boyudur, örnek olarak "3" rakamının Fourier dönüşümü Şekil 1b'de görülmektedir.

İkinci bir yakınsak mercek kullanarak, Şekil 2'de olduğu gibi ardarda iki Fourier dönüşümü elde edilebilir.



ŞEKİL 2. İki boyutlu konvolusyon ve korrelasyon işlemlerini gerçekleştiren bir doğrusal optik dizge

(x_i, y_i) koordinat eksenlerinin ters çevrilmesiyle ikinci Fourier dönüşümü ters Fourier dönüşümü biçimini alacağından,

$$U_i(x_i, y_i) = \int \int t(x_0, y_0) \exp(+j2\pi J(\frac{x_i x_0}{f} + \frac{y_i y_0}{f})) dx_0 dy_0 = F^{-1}(U_i(x_i, y_i)) =$$

$$F^{-1} F t(x_0, y_0) = t(x_0, y_0) \quad (2)$$

olarak yazılabilir. Görüldüğü gibi (XJ, y_i) düzleminde (x_0, y_0) düzlemindeki nesnenin görüntüsü gerçel, ve ters çevrilmiş olarak çıkmış bulunur.

Merceğinin arka odak düzleminde, ön odak düzlemine konan nesne işlevinin Fourier dönüşümü ortaya çıktığından bu düzlemdeki dağılımın genliğini ve fazını istenilen biçimde değiştirmek mümkündür. Böylece

uzayda konvolusyon veya korrelasyon işlemleri gerçekleştirilebilir, örneğin Şekil 2'de D_p düzleminde $I(f_x, f_y) = F(t(x_0, y_0))$ dağılımı, bu düzleme konulan ve geçirgenliği $H(f_x, f_y) = |H(f_x, f_y)| \exp(j\langle j \rangle(x, y))$ olan bir filmin arkasından $T(f_x, f_y) H(f_x, f_y)$ olarak çıkar. L_2 merceği D_r düzleminde bu dağılımın ters Fourier dönüşümünü vereceğinden,

$$U_i(x_i, y_i) = \int \int t(x_0, y_0) h(x_i - x_0, y_i - y_0) dx_0 dy_0 \quad (3)$$

biçiminde bir konvolusyon integrali olarak bulunur. Burada $h = F^{-1}[fj]$ 'dir. Eğer D_r düzleminde

$H^*(f_x, f_y) = |H(f_x, f_y)| \exp(-j\langle j \rangle(x, y))$ işlevini gerçekleştiren bir film olursa, D_j düzleminde,

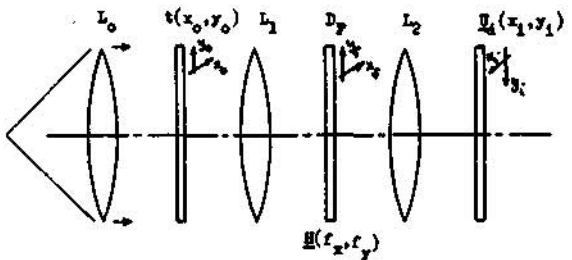
$$U_i(x_i, y_i) = \int \int t(x_0, y_0) h^*(x_0 - x_i, y_0 - y_i) dx_0 dy_0 \quad (4)$$

korrelasyon integrali elde edilir.

Böyle bir düzenek ile D_p düzleminin belli bölgelerini kapatarak, alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren veya bant durduran süzgeçleri kolayca yapmak mümkündür. Bunun yanında ışığın hem genliğini hem evresini biçimlendirerek daha karmaşık süzgeçler yapılabilme olanakları vardır.

SÜZGEÇLERİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Karmaşık (transfer) işlevlerini gerçekleştirecek süzgeçlerin yapımında iki temel yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan birisi Vander Lugt süzgeci diye bilinen holografik (veya interferometrik) süzgeçtir. Şekil 3'de bu yöntemle bir süzgecin nasıl elde edildiği gösterilmektedir, istenen dürtü tepkisi $h(x, y)$ 'nin bir saydamı üzerinde elimizde olduğunu varsayalım. Bu saydamı yakınsak bir merceğin ön odak düzlemine konur ve dikine bir düzlem dalga ile aydınlatılırsa merce-



ŞEKİL 3. Uzaysal süzgeçlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan Vander Lugt yöntemi

ğin arka odak düzleminde Fourier dönüşümü $H(f_x, f_y)$ belirir. Bu düzleme konan bir film ile, film ışık şiddetine duyarlı olduğundan yalnız $|H(f_x, f_y)|^2$ kaydedilebilir. $H(f_x, f_y)$ 'nin evresini de kaydetmek için film üzerine $H(f_x, f_y)$ ile birlikte z eksenine d açısı yapan bir düzlem dalga, $A e^{j\beta f_y}$, daha düşürülerek bir girişim örtüsü elde edilir. Film uygun bir işlemle geçirilirse, film geçirgenliği,

$$S(f_x, f_y) \propto |H(f_x, f_y) + A e^{j\beta f_y}|^2 \quad (5)$$

$$= |H(f_x, f_y)|^2 + A^2 + 2A \operatorname{Re}\{H(f_x, f_y) e^{-j\beta f_y}\}$$

$$e^{j\beta f_y}$$

olarak elde edilir. Böyle bir film Şekil 2'de gösterilen optik dizgede Dp Fourier düzlemine yerleştirilirse, bu düzlemin hemen arkasındaki genlik dağılımı şöyle yazılabilir :

$$S(f_x, f_y) \cdot I(f_x, f_y) = 1 \cdot |H|^2 + TA^2 + AT$$

$$H e^{-j\beta f_y} + A T H^* e^{j\beta f_y} \quad (6)$$

L_2 merceği bu dağılımın Fourier dönüşümünü vereceğinden D_j düzleminde elde edilecek genlik dağılımı,

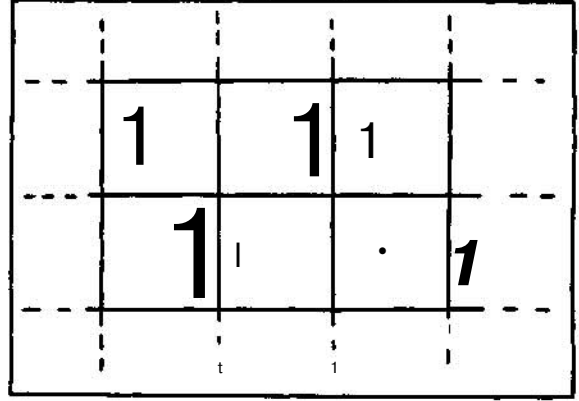
$$U_j(x_i, y_j) = F[S \cdot I] = t(x_j, y_j) \cdot h(x_i, y_j) \cdot h^*(-x_i, y_j) + t(x_i, y_i) \cdot A^2 \quad (7)$$

$$+ A(t(x_j, y_j) \cdot h(x_j, y_j) \cdot A^2)$$

$$+ A(t(x_i, y_i) \cdot h^*(-x_i, -y_i)) \cdot 6(x_j, y_j + 0)$$

biçiminde bulunur. Görüldüğü gibi üçüncü terim konvolüsyon, dördüncü terim ise korrelasyon işlemini gerçekleştirmektedir. Eğer β yeteri kadar büyük seçilirse bu iki terim diğer terimlerden y_j ekseninde fiziksel olarak ayrı yerlerde oluşabilirler.

Süzgeçlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan ikinci yöntem BİLGİSAYAR yöntemidir. Bu yöntemin diğerine göre üstün yanı, dürtü tepkesinin fiziksel olma zorunluluğu olmamasıdır. Matematiksel olarak ifade edilebilen dürtü tepkelerinin de bu yöntemle gerçekleştirilme olanağı vardır. Bu yöntemin temeli, küçük açıklıkların optik kırınım özelliğine dayanır. Böyle bir süzgeç Şekil 4'de görüldüğü gibi yanyana pek çok gözeden oluşur. Her göze bilgisayar ile bulmuş Fourier bileşenlerinden birisini gerçekleştirmek için kullanılır. Her göze içinde oluşturulacak açıklığın göze merkezine olan uzaklığı o Fourier bileşeninin evresini, açıklığın alanı ise o bileşenin genliğini verir. Bilgisayarla bir transfer işlevini oluşturan Fourier bileşenleri bulunduktan sonra yukarıdaki biçimde bulu-



ŞEKİL 4. Bilgisayarla gerçekleştirilen bir süzgecin büyütülmüş biçimi. Her göze içindeki açıklıkların yeri ve büyüklüğü ve göze ait Fourier bileşenini belirlemektedir.

nacak süzgeç bir çizdirici ile büyük boyda elde edilir, daha sonra fotografik olarak istenen boyda küçültülür.

UYGULAMALARDAN ÖRNEKLER

1. Görüntü netleştirme veya düzeltme (Ters Süzgeç)

İyi odaklanmamış bir kamera ile, veya hareketli bir kamera ile (ya da hareketli bir nesneden) elde edilen görüntüleri, çoğu zaman orijinal görüntünün doğrusal bir sistemin çıktısı olarak modellemek mümkündür. Bir başka deyişle, bozulmamış görüntü $o(x, y)$, eldeki görüntü $i(x, y)$ ise,

$$i(x, y) = o(x, y) \cdot h(x, y) \quad (8)$$

biçiminde yazılabilir. Buradaki $h(x, y)$ görüntünün bozulmasına neden olan dizgenin nokta dağılım işlevidir. Yukarıdaki denkemin Fourier dönüşümü alınır,

$$I(f_x, f_y) = O(f_x, f_y) H(f_x, f_y) \quad (9)$$

bulunur. $O(f_x, f_y)$ 'yi $I(f_x, f_y)$ 'den elde etmek için transfer işlevi $H(f_x, f_y)$ 'nin tersi yani $1/H(f_x, f_y)$ gibi bir dizge kullanmak gerekir, yani

$$O(f_x, f_y) = \frac{I(f_x, f_y)}{H(f_x, f_y)} \quad (10)$$

olur. Bu nedenle $1/H(f_x, f_y)$ 'ye ters süzgeç de denir. Bu süzgeç interferometrik veya bilgisayar yöntemleri ile elde edilebilir. Uygulamada, görüntünün de varlığı nedeniyle ters süzgeç yerine Wiener süzgeci gibi süzgeçler kullanılmaktadır.

2. Biçim Tanıma (pattern recognition)

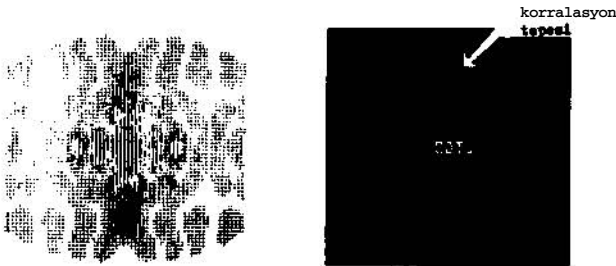
İletişim kuramından da bilindiği gibi beyaz gürültü içerisinde $s(x, y)$ gibi bir işareti sezme için kullanılacak olan dizgenin dürtü tepkisi $h(x, y) = s^*(-x, -y)$, ya da transfer işlevi $H(f_x, f_y) = S^*(f_x, f_y)$ olması ge-

rekmedir. Bu tür süzgeçler uygun süzgeç diye bilinmektedir. Buna benzer bir problem optik bilgi işleme biçim tanıma olarak ortaya çıkmaktadır.

Bir bilgi işleme dizgesinin girişinde S_1, S_2, \dots, S_N gibi N değişik şekilden birisi olsun. Dizgeden istenen, bu şekilleri tanıyabilmesi, bir başka deyişle girişte hangi şekillerin olduğunu bifebilmesidir. Böyle bir dizge harf okumak, röntgen filmlerinden belli hastalıkların varlığını belirlemek, parmak izi sınıflandırması yapmak, hava fotoğraflarından yerdeki biçimleri, belli hedefleri belirlemek gibi çok değişik amaçlar için kullanılabilir. Böyle bir dizge temel olarak transfer işlevi $S_1^*, S_2^*, \dots, S_N^*$ olan N uygun süzgeçten oluşur. Girişteki işaret, örneğin s^* , sırasıyla bu süzgeçlerden geçirilirse görülecektir ki, s^* 'ya ait süzgecin çıkışında ışık şeklin merkezinde şiddetli bir nokta olarak belirecektir. Bu, süzgecin dürtü tepkisi ile girişteki işaret arasında büyük bir korelasyon olduğunu gösterir (yapılan işlem aslında bir korelasyon işlemidir). Değişik biçimlerdeki enerji miktarı değişik olacağından karar verme aşamasında, her süzgecin çıkışı, o

süzgece ait işaretteki toplam enerji, $\int_{-\infty}^{+\infty} |S_j|^2 dx dy$ ile normalize edilir. Daha sonra ölçülen çıkışlar karşılaştırılır ve hangi çıkış en büyükse girişte onun olduğuna karar verilir.

örnek olarak Şekil 5'de "T" harfi için gerçekleştirilen bir süzgecin büyütülmüş biçimi ve dört harf arasından "T" nin olduğu yerde oluşan korelasyon tepesi görülmektedir.



ŞEKİL 5. "T" harfine uyumlanmış bir süzgeçten büyütülmüş biçimi ve dizge çıkışında "ODTÜ" yazısı içinde "T" nin yerini belirleyen korelasyon tepesi.

3. Aritmetik İşlemler

Fourier düzlemine, uygun "grating" konularak, giriş düzleminin iki yarısına konacak iki şeklin toplamlarını ve farklarını elde etmek mümkündür. Yine, karmaşık gratingler kullanarak belli yönlerde türevler, Laplacian işlemleri gibi işlemler gerçekleştirilmek mümkündür.

GERÇEL ZAMANDA İŞLEME

Pek çok uygulamada dizgenin gerçel zamanda çalışması istenmektedir. Bu amaç için henüz çoğu araştırma düzeyinde olan ışık modülatörleri kullanmak gerekmektedir. Bazı modülatörler elektro-optik etkileşime (sıvı kristaller, KDP, LiNbO₃ kristalleri gibi), bazıları magneto-optik etkileşime (MnBi, NiFe, EuO gibi), bazdan akusto-optik etkileşime (cam, LiNbO₃, TeO₂) yine bazı modülatörler ise yüzey deformasyonları ile faz kontrolundan (elastomer, termoplastik gibi) yararlanmaktadır. Bazı modülatörler doğrudan elektriksel işaretlerle, bazıları ise optik işaretlerle modüle edilebilmektedir. Optik işaretlerle modülasyon bir başka dalga boyunda bir laserden veya beyaz ışıkla elde edilmiş bir görüntünün modülatör üstüne düşürülmesinden ya da bir sayısal bilgisayarla kontrol edilen bir elektron demetinden yararlanılarak elde edilebilmektedir. Opti dizgenin girişindeki görüntünün gerçel zamanda kontrolü yanında, sayısal b_i bilgisayar kullanılarak Fourier düzlemindeki optik süzgeci de gerçel zamanda modüle edilebilen dizgeler gerçekleştirilmiştir. Dizge çıkışları çoğu zaman bir vidikon TV kamerası veya optik dedektör dizisi olmaktadır.

DOĞRUSAL OLMAYAN OPTİK BİLGİ İŞLEME

Görüntü işleme uygulamalarında doğrusal olmayan işlemler arasında en çok yararlı olanlar logaritma ve üstel işlemler, karekök, kare alma, eşyoğunluk çizgileri elde etme, eşikten geçirme (thresholding) örnekselden sayısal geçirme (A/D) işlemleridir. A/D çevirme işlemi gerçekleştirilebilirse sayısal tekniklerin kullanılması ile ikili "bit" düzlemleri paralel mantık kullanılarak işlenebilecektir. Böyle bir işlemin faydası, tutarlı aydınlanma kullanan sistemlerde görülen lekeli görüntülerin ("speckle noise") temizlenmesi ve işlemedeki doğruluğun artırılması olacaktır. Şu anda VE, VEYA, VE DEĞİL, VEYA DEĞİL (NEGATION) gibi mantık işlemlerini paralel olarak yapan optik cihazlar gerçekleştirilmiştir.

Doğrusal olmayan optik işlemede şu ana kadar teta modülasyonu ve yarım-ton işleme gibi iki yöntem kullanılmaktadır. Ancak, bunlar gerçel zamanda işleme için uygun yöntemler değildir. Gerçel zamanda doğrusal olmayan işleme yapabilmek için bazı optik materyaller üzerinde araştırmalar sürdürülmektedir.

KAYNAKLAR

- (1) W.T. Cathey: "Optical Information Processing and Holography" John Wiley and Sons, New York, 1974.
- (2) J.W. Goodman: "Introduction to Fourier Optics" McGraw Hill, New York, 1965.
- (3) S.H. Lee: "Review of Coherent Optical Processing" Applied Physics Vol, 10, pp. 203-217 (1976).