

154383

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HIZ AYARLI SÜZGEÇLER VE HAREKET ALGILAMA

Elektronik ve Haberleşme Müh. Ahmet SERBES

**FBE Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Vedat Tavşanoğlu

Prof. Dr. Vedat Tavşanoğlu
Prof. Dr. Oruç Bilgiç *Bilgiç*
Prof. Dr. Oya Kalipsiz *Alaburcu*

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TEŞEKKÜR	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1 GİRİŞ	1
1.1 Paralel İşleme.....	1
1.2 Uzay, Zaman ve Uzam-Zaman Kavramları Üzerine... ..	2
1.3 Difüzyon Ağları	3
1.4 Yönelimli Filtreler	4
1.5 Tezin İçeriği.....	5
2 UZAMSAL (SPATIAL) ve UZAM ZAMANSAL (SPATIO-TEMPORAL) FONKSİYONLARI ÜZERİNE... ..	6
2.1 Hareketli Görüntüler için Basit Bir Model	7
2.1.1 Sıfırlayıcı Filtreler.....	10
2.2 Hız Ayarlı Filtreler.....	12
2.2.1 Hız Ayarlı Analog Ağ.....	14
2.3 Biyolojik Görme Sistemi	21
2.3.1 Elektronik Yayılım	23
2.3.2 İki Boyutlu Retina.....	26
2.3.3 Retina ve Doğal Görüntüler	32
2.4 Sonuç	32
3 HAREKET KESTİRİMİ İÇİN BİR ANALOG AĞ MODELİ	34
3.1 Hız Ayarlı Filtre'ye Hareketli Görüntü Girişi	34
3.1.1 Tek Boyutlu HAF'ın Uzamsal Darbe Cevabı	36
3.1.2 İki Adet Hız Ayarlı Filtre ile Hız Bileşen Kestirimi	39
3.1.3 Shunting İnhibition Mekanizması.....	40
3.1.4 Yerel Çıkış Gücü Kestirimi.....	44
3.2 'Aperture' Problemi ve Bu Problemin Azaltılması.....	46
3.3 Sınırlar	51
3.4 Sonuç	53
4 SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR.....	55
4.1 Simülasyon Sonuçları ve Değerlendirmeler	55

4.2	Hız Kestirimi	58
4.3	Sonuç	67
KAYNAKLAR		69
EKLER		71
Ek 3	Simülasyon için yazılan Matlab programı.....	72
ÖZGEÇMİŞ		76



SİMGE LİSTESİ

$F\{.\}$	Fourier Dönüşümü
$\otimes$	Uzamsal katlama (konvolüsyonu) operatörü
$\tilde{\mathbf{a}}$	Vektör gösterimi. $\tilde{\mathbf{a}}_s = (a_x \ a_y)^T$
$(.)^T$	Transpoze
$\Delta(.)$	Uzamsal gradient operatörü.
$\nabla(.)$	Uzamsal Laplasyen operatörü.
$\Re$	Reel sayılar kümesi.
$\in$	Elemanıdır.



KISALTMA LİSTESİ

HAF	Hız Ayarlı Filtre
CNN	Hücrel Sinir Ağları – Cellular Neural Networks
VLSI	Çok Yüksek Ölçekli Tümlleştirme – Very Large Scale Integration



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Difüzyon ağları. a)Sinir ağı yapısı b)İki boyutlu direnç, kapasite ve tampon vasıtasıyla gerçekleşmesi	4
Şekil 2.1 Hareket eden üçgen şeklindeki bir cisim $t=0$ anına göre x ve y yönlerinde hızlarıyla doğru orantılı bir şekilde ötelenmiştir. Bu şekilde (x_1, y_1) , $t=0$ anında karenin sağ alt köşesinin koordinatıdır	8
Şekil 2.2 Hareket eden cisimlerin uzam-zamansal Fourier dönüşümleri a)Hareket eden kare b) hareket eden bir çizgi.....	10
Şekil 2.3 C.Mead'in sunduğu uzam-zamansal alçak geçiren R-C devresi.....	14
Şekil 2.4 $w_y=0$ iken Hız Ayarlı Filtre'nin uzam-zamansal frekans karakteristiği.a)Kontür diyagramı b) HAF'ın genliği	18
Şekil 2.5 Hız ayarlı asimetrik devre.	21
Şekil 2.6 Omurgalı retina hücrelerinin kesiti. Bu kesitte hücrelerin dizilişi ve birbiriyle bağlantı şekli gösterilmiştir. C: Konik Hücreler (Cones), R: Çubuk Hücreler (Rods), H: Yatay Hücreler, B: Bipolar Hücreler, A:Amacrine Hücreleri, G: GanglionHücreleri	22
Şekil 2.7 Fotoreseptör (çubuk hücre), yatay hücre ve bipolar hücre arasındaki ilişkinin blok diyagramı	23
Şekil 2.8 Elektronik yayılımın sinirsel süreçte direnç ağıyla modellenmesi.....	25
Şekil 2.9 Direnç ve kapasiteyle oluşmuş iki boyutlu uzam-zamansal R-C filtresi.....	26
Şekil 2.10 Retinanın 'Outer Plexiform' denen kısmının iki boyutlu modeli	28
Şekil 2.11 Retinanın 'Outer Plexiform' katmanının modelinin $w_y=0$ için transfer fonksiyonu. ($\gamma_h^2=40$, $\gamma_c^2=0.9$, $\tau_c=1$, $\tau_h=0.1$ seçilmiştir).....	29
Şekil 2.12 Fotoreseptör ve yatay hücrelerin (2.57) denklemiyle verilen alçak geçiren karakteristiği	30
Şekil 2.13 Yatay hücre'nin bipolar hücre ile etkileşmesi sonucu yüksek geçiren bir hapının ortaya çıkması ((3.56'daki $1-H_h$ karakteristiği).....	31
Şekil 3.1 Değişik hızlarla hareket eden bir kaç noktaya sahip bir giriş görüntüsünün bir Hız Ayarlı Filtre'den çıkışı. Görsellik açısından a) b) ve c) seçeneklerindeki görüntüler 0 ve 1 arası normalize edilmiştir. a)Giriş görüntüsü. b) $v_{0x}=0$ ve $v_{0y}=1$ hızına ayarlı bir HAF'tan çıkışı. Her bir noktanın bulanıklaşması o cismin ayarlanan hızdan farklı bir hızda hareket ettiğini göstermektedir. c) Çıkışın karesi. d) Çıkışın karesinin üç boyutlu grafiği ve gerçek genlik değerleri.....	37

- Şekil 3.2 $v_0=1$ hızına ayarlı bir HAF'ın değişik hızlarla hareket eden Dirac darbelerine cevabı. a) $v_x=1$ hızıyla hareket eden bir Dirac. b) $v_x=3$. c) $v_x=0$38
- Şekil 3.3 Hız kestirimi algoritmasının tek boyutlu olanının diyagramı. a) Retinal diyagramı ön filtreleme. b) İki adet hız ayarlı filtre. Birisi v_0 diğeri ise $-v_0$ hızına ayarlıdır. c) Filtre çıkışının karesini alıp daha sonra bu çıkışı rezistif bir analog ağ ile filtreleyerek güç integratörü. d) 'Shunting inhibition' mekanizmasıyla hız kestirimi.....41
- Şekil 3.4 Shunting inhibition' mekanizması. a) Gösterim şekli ve giriş çıkış ilişkisi. b) Mekanizmaya HAF çıkışı verilmesi durumunda çıkış ile giriş hızı arasındaki ilişki 42
- Şekil 3.5 Ünlü 'Hamburg Taxi' hareketli görüntüsünün $(128) \times (128) \times (32)$ 'lik bir bölümü için yerel ortalama güç kestirimi. (görsellik açısından görüntü 0 ile 1 arası normalize edilmiştir. a) Orijinal görüntünün ilk karesi. b) Orijinal görüntünün son karesi. c) 0, $\pi/2$, π , ve $3\pi/2$ derecelere $[(v_{x0}=0, v_{y0}=1), (v_{x0}=0, v_{y0}=-1), (v_{x0}=-1, v_{y0}=0)$ ve $(v_{x0}=1, v_{y0}=0)$ hızlarına ayarlı] ait HAF'ların yerel ortalama güç kestirimleri.....45
- Şekil 3.6 Hareket eden bir çember için elde edilen hareket vektörü kestirimlerinin polar koordinatlarda çizimi. (Hem gerçek hem de kestirilen hız görsellik açısından büyük çizilmiştir.) a) Küçük bir integrasyon aralığı için yapılan kestirimlerde kestirimler bir elips çizmiştir. b) Büyük integrasyon aralığı alınarak yapılan kestirimde daha doğru sonuçlar elde edilmiş, daireye daha yakın kestirimler elde edilmiştir.....51
- Şekil 3.7 a) Giriş görüntüsü. Bu görüntüde araba ve gölgesi hareket etmektedir. Arka plan hareketsizdir. b) Retinal ön filtreleme sonucu pipolar hücrelerin çıkışı. c) Zamansal türev.53
- Şekil 4.1 'Hamburg Taxi' hareketli görüntüsünün $(128 \times 128 \times 32)$ 'lik bir kısmı. Hareketli olan cisimler kırmızı çember içinde gösterilmiştir. a) Görüntünün ilk karesi b) Görüntünün son karesi.....56
- Şekil 4.2 Şekil 4.1'de görülen 'Hamburg Taxi' hareketli görüntüsünün $128 \times 128 \times 64$ 'lük kısmının zamansal türevi.57
- Şekil 4.3 Şekil 4.2'de görülen zamansal türevi alınmış hareketli görüntünün belli bir eşik değerinden geçirilmiş hali.....58
- Şekil 4.4 (3.25) kullanılarak kesitirilen v_θ (Görsellik açısından piksel değerleri $[+1 -1]$ arası normalize edilmiştir.).....59
- Şekil 4.5 (3.14) kullanılarak elde edilen V_{out} (Görsellik açısından piksel değerleri $[+1 -1]$ arası normalize edilmiştir.).....60
- Şekil 4.6 Şekil 4.4'te gösterilen v_θ 'nın genliğinin üç boyutlu grafiği.61
- Şekil 4.7 Şekil 4.5'te gösterilen V_{out} 'un genliğinin üç boyutlu grafiği.....61
- Şekil 4.8 v_θ 'nın Şekil 4.3'te görülen zamansal türev'in belli bir eşikten geçirilmiş haliyle

çarpımının üç boyutlu genlik diyagramı.....	62
Şekil 4.9 Şekil 4.8'in üstten gösterilişi. Şekilde görülen beyaz ok, kestirilen hız bileşeninin yönünü göstermektedir	63
Şekil 4.10 HAF'ın ayarlı olduğu hızlar $v_0=(3,-3)^T$ ve $-v_0$ seçilmesi durumunda kestirilen v_0 değeri	64
Şekil 4.11 Kestirilen v_0 değerlerinin üstten görünüşü	64
Şekil 4.12 Kartezyen koordinatlarda hız bileşenlerinin toplanması.	65
Şekil 4.13 Hız vektör alanının, zamansal türevi alınmış hareketli görüntünün belli bir eşik değerinden geçirilmiş hali üzerinde gösterilişi	66
Şekil 4.14 Hız vektör alanının hareketli görüntünün bir çerçevesi üzerinde gösterilişi.....	67



ÖNSÖZ

Bu tezi hazırlamamda büyük katkıları bulunan, bana yön gösteren çok değerli hocam, Sayın Prof. Dr Vedat Tavşanoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

Bana ilham kaynağı olan hocam, Doç. Dr. Ünal Küçük'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan, bana her zaman destek veren ve bundan sonra da destek vereceğini bildiğim aileme en içten sevgilerimi sunarım.



ÖZET

Günümüzde gelişen teknoloji sonucu görüntü işleme çok önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Hareketli görüntü işleme ve optik akışın belirlenmesi konuları görece olarak yeni konular olmakla birlikte uygulama alanlarının çok fazla olması dolayısıyla da ilgi çekicidir.

Biyolojik canlıların bir takım özelliklerini taklit eden sinir ağları ve özellikle bu ağların analog VLSI yapıları gerçek zamanlı olmalarından dolayı çok hızlı işlem kabiliyetine sahiptirler ve sayısal işlemcilerle göre bu bakımdan oldukça üstündürler.

Bu tezde optik akış, daha sonra da asimetrik difüzyon ağlarıyla gerçekleştirilen hız ayarlı filtre yapıları incelenmiştir. Omurgalılarıdaki retina yapısından esinlenerek gerçekleştirilen hız ayarlı filtreler aktif direnç yayılım ağlarıyla gerçekleştirilmiştir. Daha sonra hız vektörü tayini için yeterli olan bir analog ağ, fotoreseptör seviyesinden, hız vektörü tayini seviyesine kadar incelenmiş ve sonuçları üzerinde tartışılmıştır. Hız ayarlı filtrelerin basitliğine karşın oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Lineer CNN devreleriye kolaylıkla gerçekleştirilebilecek yapıda olan hız ayarlı filtre yapıları analog VLSI teknolojisiyle kolaylıkla tümleşik devre biçiminde üretilebilmektedir.

Anahtar kelimeler: Hız ayarlı filtreler, Retina, Hareket algılama, Optik akış.

ABSTRACT

Image processing, with developing technology, has been a very important field for research. Being relatively new topics, video processing and determining of optical flow are interesting topics, because there are plenty of applications of them.

For neural networks that can mimic some characteristics of biological beings and especially their implementations on analog VLSI are real-time, they have very fast operation rates and they are, with this property, superior than digital processors.

In this thesis, optical flow, afterwards velocity tuned filters implemented with asymmetrical diffusion networks are studied. Velocity tuned filters, inspired by retinal structure in the vertebrates are realised with active resistive diffusion networks. Afterwards, an analog network sufficient for motion detection is studied from photoreceptor level to velocity estimation. Velocity tuned filters yields efficient results despite its simplicity.

Velocity tuned filters can be realised easily with CNN circuits or as an integrated circuit analog VLSI technology.

Keywords: Velocity tuned filters, retina, perception of motion, optical flow.



1. GİRİŞ

Gözün yapısı ve gözdeki yüksek seviyedeki ve doğruluktaki işaret işleme algoritmaları, bu organın incelenmesi sırasında ve sonrasında bilim adamlarını bir çok yönden etkilemiştir. Günümüzde, gözdeki rekn işleme, hareket algılama ...vs gibi algoritmaları gözün kendisinden ilham alınarak gerçekleştirilmesi için bir çok çalışma yapılmaktadır. Şüphesiz ki bu çalışmaların içinde en çok ilgi çekenlerden birisi de gözdeki hareket algılama yapısı ve bunun paralel bir şekilde koşmasıdır.

1.1 Paralel İşleme

Robot uygulamaları, savunma sanayi, güvenlik sistemleri, motorlu taşıtlarda kazayı önleme sistemleri ...vs gibi burada sayılan ve sayılamayacak kadar fazla uygulama alanları olan hareket algılama, üç boyutlu doğasından dolayı hesaplamalarda çok büyük bir yük teşkil etmektedir.

Beyinde yapılan ve çok yüksek hesaplama hızı ve yükü gerektiren karakter tanıma, hareket algılama, ...vs gibi işlemlerin çok hızlı yapılması sinir ağları üzerine bir çok çalışma yapılmasını sağlamıştır.

Hareket algılamanın, örneğin çarpışma zamanı hesaplanmasında, gerçek zamanlı olması istendiğinde böyle bir yükün hesaplanmasını beklemek durumun aciliyetine ters düşen bir olaydır. Bu olayı engellemek için genellikle paralel çalışan analog yapılar kullanılır. Bu yapıların içinde belki de en meşhur olanı Hücresel Sinir Ağları (Cellular Neural Networks – CNN) olarak bilinen analog devredir. Bu ağın devre yapısı ve çalışma prensibi (Chua et. al., 1988a), (Chua et. al., 1988b) ve (Chua et. al., 2002)'ta açıkça anlatılmıştır ve bu tezde CNN yapısı anlatılmayacak, fakat yoğun bir şekilde kullanılacaktır.

Paralel işaret işleme yapan CNN tipi yapılarda işlem kapasitesi Terraİşlem/s'ler seviyesindedir ve gerçek zamanlı olarak kabul edilebilir. Bu tip paralel işleyiciler beyindeki paralel işlemeye benzerlikleriyle dikkat çekicidirler. Hareket algılama algoritmalarının hemen hemen hepsinde rastlanılan yüksek hesaplama yükü paralel çalışan analog ağlarla anında hesaplanabilmektedir. CNN yapılarının bir çok duyu organının anatomisini ve fizyolojisini taklit etme özelliği bulunmaktadır (Chua et. al., 2002). Bu da bilim adamlarının çalışmaları

için bir baz teşkil etmektedir ve etmelidir. Bunun en büyük nedeni modern görüntü işlemede ‘kısmi türev denklemleri’ bazlı tekniklerin önem kazanması ve bu denklemlerin çözümünde yaşanan zorluklardır. CNN yapıları için kısmi türev denklemleri çözmek bir dijital bilgisayar için XOR, OR, AND gibi kapı işlemlerini yapmak kadar kolaydır (Chua et. al., 2002).

1.2 Uzay, Zaman ve Uzun-Zaman Kavramları Üzerine...

Uzay ve zaman, Einstein’ın görelilik kuramını ortaya atmasından sonra üzerine en çok tartışılan, en çok makale yayınlanan ve en çok kitap yazılan konulardan biri haline gelmiştir. Dünya üzerinde bir an için zamanın durduğu varsayılırsa bu, dünyanın üç boyutlu fotoğrafını çekmekle aynı şeydir. Bu fotoğrafın üzerinde bir gözlemci olduğu varsayılırsa, gözlemci dünya üzerinde bir takım girintiler, çıkıntılar, renkler görecektir. Bu girintiler, çıkıntılar ve renkler hareket etmedikleri için sadece bir uzayı belirtirler. Bu uzaydaki renklerin ve cisimlerin durumu, konumu ve dizilişi onların uzamsal özelliklerini belirler. Böyle bir üç boyutlu uzamsal durum çok uç bir örnektir. Daha gerçekçi bir yaklaşım yapılırsa fotoğraflar uzamsal fonksiyonların bir fonksiyonudurlar. Aslında düşünülürse, bir fotoğraf da zamanın bir anının bir kareye hapsedilmesi olarak ele alınabilir. Zamandan arındırılmış böyle fonksiyonlara ait bir çok örnek verilebilir.

Zaman kavramı da Einstein’ın görelilik kuramı ortaya atmasından sonra temel bir değişikliğe uğramıştır. Işık hızına yakın hızlarda hareket ederken zamanın daha yavaş geçmesi kuramı, daha önce ortaya atılan fizik kurallarını derinden sarsmış, bilim adamlarını daha farklı düşünmeye itmiştir. Bundan önce Newton’un fizik kurallarından yararlanan bilim, zamanın hızla bağlı olduğunu keşfetmiştir.

Pratikte halen görelilik kuramı kullanılsa da zamanın hızla bağlı olduğu gösterilebilir. Bir örnek vermek gerekirse sabit bir hızla hareket eden bir cismin konumu, pratikte, herkesin bildiği $x=vt$ denklemiyle yazılabilir. Aynı denklem $t=x/v$ olarak yazılırsa, zaman hem hızla hem de konuma bağlı bir değişken olarak gösterilebilir. Bu denklemde hız da konum ve zamanın fonksiyonu olarak gösterilebilir.

Daha gerçekçi düşünülürse zaman-uzay ikilisi birbirinden ayrılmayan yapışık ikizler durumundadır. Bu durumda uzay-zaman kavramı üzerine yapılan çalışmalar daha yüksek anlam kazanmaktadır. Evrendeki hemen hemen bütün olaylar uzay-zamansal kavramlardır.

Örneğin, gezegenlerin hareketleri, diğer gezegenlerin ve yıldızların o andaki konumlarından doğan çekim kuvveti (uzamsal durumları) ve bunun zamana göre türevinin fonksiyonudur.

Zaman ve uzay kavramı birbirinden ayrılamayacak gibi görünmektedir. Ayrılamayacak olan zaman ve uzay birleştirilerek uzam-zaman kavramı ortaya atılmıştır. Hareketli görüntü işleme algoritmalarının oldukça yoğun bir şekilde kullandığı uzam-zamansal fonksiyonlar genellikle üç boyutlu, hem zamana hem de uzamsal ışık yoğunluğu fonksiyonuna bağlı olan fonksiyonlara verilen isimdir. Sinemada veya televizyonda izlenen hareketli görüntüler uzam-zamansal fonksiyonlardır.

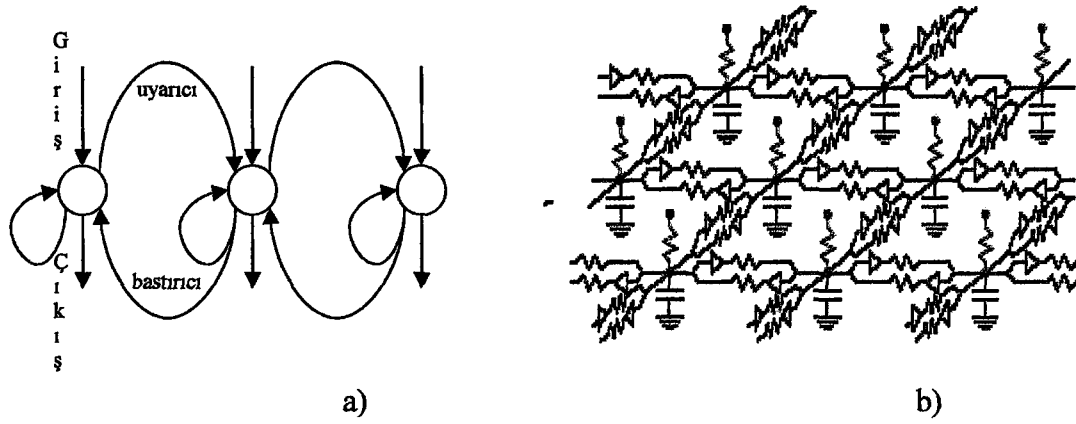
1.3 Difüzyon Ağları

Difüzyon ağlarının belki de en önemli özelliklerinden birisi de, sinir ağlarında olduğu gibi uyarıcı ve bastırıcı bağlantıları iyi kullanmasıdır. Difüzyon ağlarında herhangi bir uçtan giren giriş, sadece o piksele ait olan çıkıştan değil, diğer piksellere de yayılarak diğer çıkışlardan da çıkış üretir.

Difüzyon ağlarının belki de en önemli özelliği bir uçtan gelen giriş komşu uca yayılırken uyarıcı bir etki gösterir. Fakat uyarıcı etki yaptığı komşu hücresi, bu hücreye bastırıcı etkidedir. Bunun tam tersi de geçerlidir: bastırıcı etki yaptığı komşu hücresi, bu hücreye uyarıcı etki yapmaktadır. Şekil 1.a'da bu yapı tek boyutlu haliyle gösterilmektedir.

Şekil 1.b'de difüzyon ağlarının iki boyutlu gerçekleşmesi verilmiştir. Bu ağın en büyük özelliği uyarıcı etkisiyle bastırıcı etkisinin katsayılarının birbirinden farklı olmasıdır. Yani Şekil 1.b'de görülen devrede dirençlerin değerlerinin birbirinden farklı olmasıdır. Bu sayede bir takım filtreleme özellikleri elde edilebilir.

Difüzyon ağlarında dirençlerin değerleri birbirinden farklıdır, fakat bütün hücreler birbirine özdeştir. Demek o dur ki, bir hücre yukarıdaki komşusuna nasıl bağlandıysa bir diğer hücre de yukarıdaki hücrelerine öyle bağlanmalıdır. Fakat, bir hücre yukarıdaki komşusuna nasıl bağlandıysa yandaki hücrelerine farklı direnç değerleriyle bağlanmıştır.



Şekil 1.1 Difüzyon ağları. a) Sinir ağı yapısı. b) İki boyutlu olarak direnç, kapasite ve tampon vasıtasıyla gerçekleştirilmesi. (Torralba, 1999b)

Bütün hücrelerin birbirine özdeş yapıda olmaları bu hücrelerin CNN yapısına uygun olmasını sağlar. Bu sayede oldukça iyi bilinen bir yapı, biraz farklı bir şekilde incelenmiş olacaktır.

Bu tezde difüzyon ağları hıza ayarlı filtre olarak kullanılmıştır. Bu filtreler hız ayarlı filtre olarak kullanılırken yönelimli filtreler olma özelliklerinden faydalanılmıştır.

1.4 Yönelimli Filtreler

Hareket algılama, özellik çıkarma, şekil analizi, doku (örüntü) analizi ...vs gibi görüntü işleme uygulamaları yönelimli filtreler kullanılan alanlardan bir kaçıdır. Yönelimli filtreler frekans domeninde orijine göre simetrik fakat eksenlerle belli bir açıyla yönelmiş filtrelerdir. Bu tip filtreler, genellikle, belli bir yöne yönelmiş uzamsal içeriğe duyarlıdır ve karakter analizinde çok kullanılırlar.

Hareket algılama algoritmalarında belki de en fazla kullanılan yönelimli filtre tipi Gabor filtreleridir. Gabor tipi filtrelerin kullanılmasındaki belki de en önemli neden kedi retinasında ‘basit’ hücre olarak adlandırılan bir hücre türünün lineer bir filtre özelliği göstermesi ve bu filtrenin de yaklaşık olarak Gabor dalgacığının olmasıdır (Mallat, 2001).

Yönelimli filtreler hakkında bir çok araştırma yapılmış ve analog bir çok yönelimli filtre geliştirilmiştir (örn. (Shi, 1996)). Bu analog filtrelerin tasarlanmasında en çok dikkat edilmesi gereken konulardan biri, bir çok uygulama için bu filtrelerden bir set olarak faydalanılmasının

gerekliliği ve bu filtrelerin karmaşık bir yapıda olmasıdır. Analog VLSI gerçeklemelerinde bunun büyük bir sorun olacağı aşıkardır.

1.5 Tezin İçeriği

2. bölümde hareketli görüntüler için optik akışın formülü ve ispatı verilmiş, daha sonra hız ayarlı filtrenin tanımı yapılmıştır. Bu tanımdan sonra basit R-C analog alçak geçiren ızgara devresi verilmiş, daha sonra analog, alçak geçiren, yönlü ve hız ayarlı filtre yapısıyla bunun frekans domeninde ve uzam-zamansal domende karakteristiği tartışılmıştır.

Daha sonra da bu bölümde C.Mead tarafından ortaya atılan (Mead, et. al., 1988), (Mead, 1989) ve daha sonra geliştirilen retinal n filtreleme devresi, bunun frekans ve uzam-zamansal karakteristiği anlatılmıştır.

3. bölümde ise difüzyon ağlarının hız ayarlı filtre olarak kullanılması sonucu hız kestiriminin nasıl yapılacağı anlatılmıştır. Hız kestirimi algoritmasının devre şeması verilmiş, bu devre şeması ve bu devrenin çalışma prensibi anlatılmıştır. Daha sonra da hız kestirilirken ortaya çıkabilecek olası hatalar ve problemler üzerinde durulmuştur. Bu algoritma enerji-bazlı bir algoritma olduğu ve hareket eden görüntülerin enerjilerinin uzam-zamansal domende ne biçimde olduğu üzerinde durulmuştur. Hareketli giriş görüntüsü için yönelimli hız ayarlı filtrelerde ne gibi algoritmalar kullanılarak giriş görüntüsünün spektral frekans karakteristiğinden bağımsız olarak hız kestirilmeye çalışılmıştır.

2. UZAMSAL (SPATIAL) VE UZAM-ZAMANSAL (SPATIO-TEMPORAL) FONKSİYON KAVRAMLARI ÜZERİNE:

Mühendislerin yüz yıllardır inceledikleri fonksiyonlar ve işaretler genellikle zamanın bir fonksiyonu olmuştur. Doğada belki en çok rastlanılan fonksiyonlar zamanın fonksiyonudurlar. Örneğin hava sıcaklığı, günlerin ve gecelerin uzunluğu, med – cezir zamanları ...vs gibi fonksiyonlar zamansal fonksiyonlardır. Mühendisler ve bilim adamları zamansal fonksiyonların yanında uzamsal ve uzam-zamansal fonksiyonları da incelemişlerdir.

Uzamsal fonksiyonlar, zamansal fonksiyonların aksine zamanın bir fonksiyonu değildirler. Mesela, herhangi bir fotoğraf karesine bakıldığında onun bir takım figürlerden oluştuğu görülür. Bu fotoğraf karesine bir süre sonra bakıldığında gene aynı figürlerden oluştuğu, yani fotoğrafın zamanla herhangi bir değişime uğramadığı açıkça görülür.

Bu da demektir ki fotoğraf karesi uzamsal bileşenlerden oluşmaktadır. Bu fotoğraf karesinin yüzeyi, örneğin siyah beyaz bir fotoğraf için, $e(x,y)=I$ gibi bir fonksiyonla tanımlanabilir. Burada I , ışık yoğunluğunu temsil etmektedir ve genellikle $[+1, -1]$ arası değer alabilmektedir. Anlatılan bu I fonksiyonu x ve y ‘yönlerinin’ bir fonksiyonudur ve zamanın bir fonksiyonu değildir. x ve y değişkenleri uzamsal değişkenler olarak da adlandırılır.

Kısacası sadece uzamsal bileşenlerden oluşan ve zamana bağlı olmayan fonksiyonlara uzamsal fonksiyon denmektedir. Bu fonksiyonlar zamanla değişmemektedir. Fotoğraflar uzamsal fonksiyonlara ait en güzel örneği temsil etmektedir.

Uzam-zamansal fonksiyonların uzamsal fonksiyonlardan farkları, bu tip fonksiyonların zamana da bağlı fonksiyonlar olmalarıdır. Bu tip fonksiyonlar hem zamana hem de uzamsal değişkenlere bağlıdır. Örneğin video görüntüleri uzam-zamansal fonksiyonlara en güzel örneklerden birini temsil etmektedir. Bu arada unutulmamalıdır ki aslında dünyada seyredilen her görüntü bir uzam-zamansal fonksiyondur.

Uzam-zamansal fonksiyonları incelemek ve işlemek aslında hareketli görüntüleri incelemek ve işlemekle eşdeğerdir. Doğadaki her türlü hareketli görüntü bir uzam-zamansal fonksiyondur.

2.1 Hareketli Görüntüler için Basit Bir Model

Bir önceki bölümde de bahsedildiği gibi siyah beyaz bir fotoğraf karesinin yüzeyi $e(x,y) = I$ gibi bir fonksiyonla tanımlanabilmektedir. Burada I , x ve y noktasındaki ışık yoğunluğudur. Eğer hareketli bir görüntüyü tanımlamak istersek, bu fonksiyon zamanın da bir fonksiyonu olduğu için:

$$e(x, y, t) = I \quad (2.1)$$

Hareketin temel bir modeli, ışık yoğunluğu fonksiyonunun sabit bir $(v_x, v_y)^T$ hızında ve sabit bir yönde değiştiğidir (Torralba et. al. 1999a), (Torralba 1999b), (Barron et. al. 1994), (Belfor et. al 1993):

$$e(x, y, t) = e(x - v_x t, y - v_y t, 0) \quad (2.2)$$

Bu modele göre bir görüntü sabit bir hızla sabit bir yönde doğru hareket ederse aslında bu, $t=0$ anına göre cismin koordinatlarının x ve y yönlerinde sırayla $v_x t$ ve $v_y t$ kadar ötelenmesi anlamındadır (bkz. Şekil 2.1.).

Sabit hızla ve sabit bir yönde ilerleyen bir görüntü için yazılmış olan (2.2) denklemini yeniden yazmak istersek, $\otimes$ uzamsal katlama (konvolüsyon) işlemini göstermek üzere (Meyering et. al. 2000):

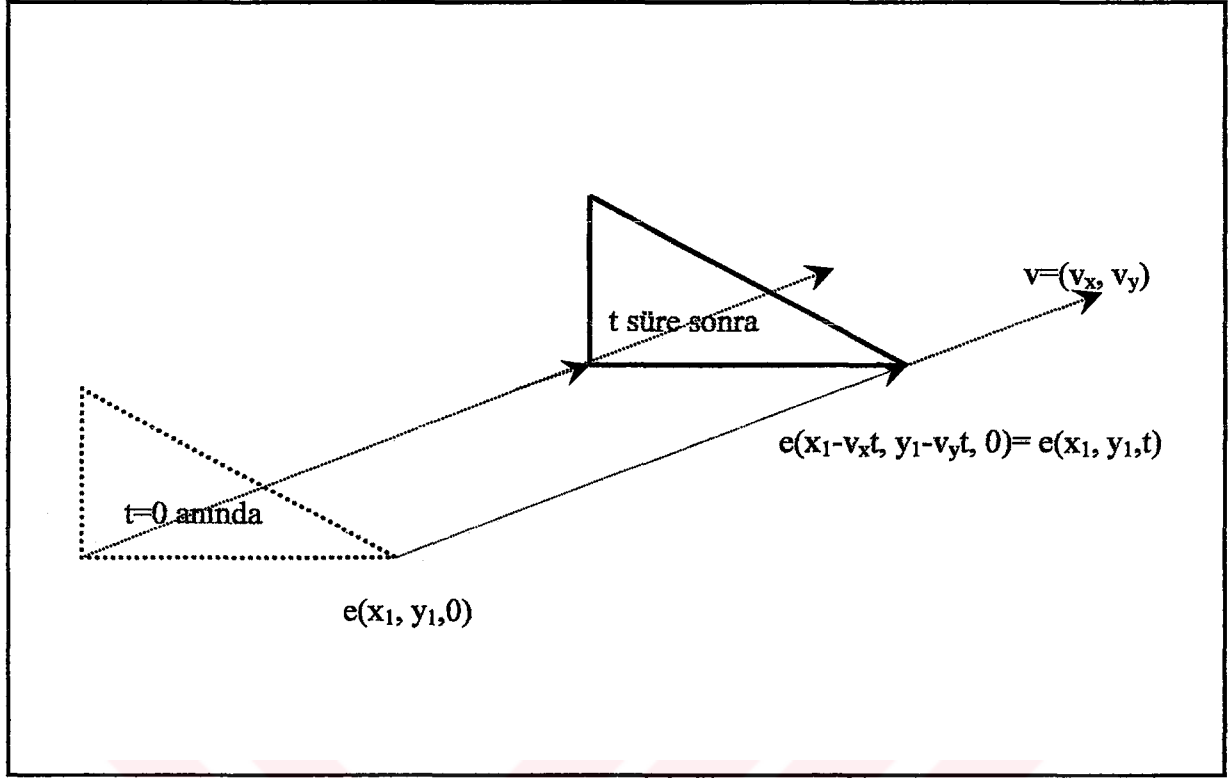
$$e(x - v_x t, y - v_y t, 0) = e(x, y, 0) \otimes \delta(x - v_x t, y - v_y t) \quad (2.3)$$

(2.3) denkleminin x , y ve t 'ye göre üç boyutlu Fourier dönüşümü alınırsa:

$$E(w_x, w_y, w_t) = F \{ e(x, y, 0) \otimes \delta(x - v_x t, y - v_y t) \} \quad (2.4)$$

Konvolüsyon işlemi Fourier domeninde çarpım işlemine karşılık düşer:

$$E(w_x, w_y, w_t) = F \{ e(x, y, 0) \} F \{ \delta(x - v_x t, y - v_y t) \} \quad (2.5)$$



Şekil 2.1 Hareket eden üçgen şeklindeki bir cisim $t=0$ anına göre x ve y yönlerinde, hızlarıyla orantılı bir şekilde ötelenmiştir. Bu şekildeki (x_1, y_1) , $t=0$ anındaki karenin sağ alt köşesinin koordinatıdır.

(2.5) denklemi açık şekilde yazılırsa (Belfor et. al., 1993):

$$E(w_x, w_y, w_t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e(x, y, 0) e^{-jw_x x} e^{-jw_y y} dx dy \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - v_x t, y - v_y t) e^{jw_x x} e^{jw_y y} e^{jw_t t} dx dy dt \quad (2.6)$$

$E_0(w_x, w_y)$, $e(x, y, t)$ 'nin $t=0$ anındaki görüntüsünün iki boyutlu uzamsal Fourier olmak üzere:

$$E(w_x, w_y, w_t) = E_0(w_x, w_y) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jw_x v_x t} e^{-jw_y v_y t} e^{-jw_t t} dt \quad (2.7)$$

$$E(w_x, w_y, w_t) = E_0(w_x, w_y) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(w_x v_x + w_y v_y + w_t) t} dt \quad (2.8)$$

Bu fonksiyonun sağdan ve soldan limitleri birbirine eşittir:

$$E(w_x, w_y, w_t) = E_0(w_x, w_y) \delta(w_x v_x + w_y v_y + w_t) \quad (2.9)$$

bulunur. (2.9) denklemi şu şekilde yeniden yazılabilir:

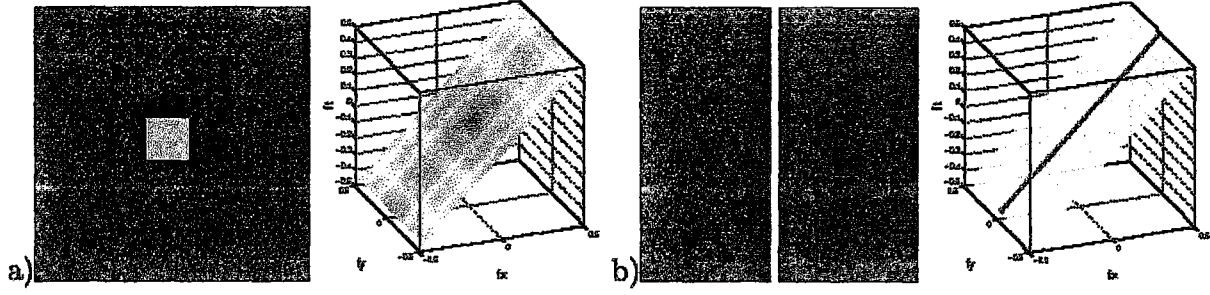
$$E(w_x, w_y, w_t) = \begin{cases} E_0(w_x, w_y) & , w_t + w_x v_x + w_y v_y = 0 \\ 0 & , \text{dışında} \end{cases} \quad (2.10)$$

Yukarıdaki denkleme bakılırsa işaretin enerjisi $w_t + w_x v_x + w_y v_y = 0$ düzlemi üzerinde toplanmıştır. Yani hareketli görüntüler için $w_t = -w_x v_x - w_y v_y$ yazılabilir. Bu da demektir ki bir hareketli görüntünün zamansal frekans bileşeni hem hareketli görüntünün hızına hem de o hareketli görüntünün uzamsal frekans bileşenlerine bağlıdır. Uzamsal frekans bileşenleri ne kadar yüksek olursa zamansal frekans bileşeninin mutlak değeri de ona bağlı olarak yüksek olacaktır. Aynı zamanda hareket eden görüntü ne kadar hızlı hareket ederse o oranda zamansal frekans bileşeninin mutlak değeri yüksek olacaktır:

$$w_t = -v_x w_x - v_y w_y \quad (2.11)$$

(2.11) denkleminin anlattığı bir diğer şey ise zamansal ve uzamsal bileşenlerinin aslında birbirinden tamamen bağımsız olmadığıdır. Yani zamansal ve uzamsal frekans bileşenleri aslında birbirleri ve hız vektörleri cinsinden yazılabilmektedir. Bu da hareket algılama algoritmalarında en çok kullanılan özelliklerden birisidir.

Şekil 2.2.'de hareket eden iki görüntünün uzam-zamansal Fourier dönüşümleri gösterilmiştir (Torralba, 1999b). Hareketli cisimlerin enerjisinin sadece bir düzlem üzerinde bulunduğu daha önce de söylenmişti. Eğer görüntüde hareket eden bir cisim yoksa enerji düzlemi $w_t = 0$ düzlemidir. v_x ve v_y hız değerlerine bağlı olarak enerji düzlemi dönmeye başlar. Hareketin hangi hızla ve hangi yönde yapıldığını kestirmek bu enerji düzleminin yönelimini kestirmekle eşdeğerdir. Enerji bazlı (energy based) metot da denen bu yöntemde frekans domenini örnekleyen hız ayarlı filtre takımı kullanılarak enerji düzleminin yönelimi kestirilmeye çalışılır (Torralba, 1999b).



Şekil 2.2.: Hareket eden cisimlerin uzam-zamansal Fourier dönüşümleri. a) Hareket eden kare. b) Hareket eden bir çizgi. (Torralba, 1999b)

2.1.1 Sıfırlayıcı Filtreler

(2.10) denkleminin sonucu olarak ortaya çıkan (2.11) denklemi optik akışın temel kuralıdır.

(2.11) denkleminin iki tarafı da $j = \sqrt{-1}$ ile çarpılırsa:

$$jw_t + v_x(jw_x) + v_y(jw_y) = 0 \quad (2.12)$$

Bu denklemin her iki tarafı da $E(w_x, w_y, w_t)$ giriş işaretiyle çarpılırsa:

$$(jw_t + v_x(jw_x) + v_y(jw_y))E(w_x, w_y, w_t) = 0 \quad (2.13)$$

Her iki tarafın da ters Fourier dönüşümü alınır:

$$\left(v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial t} \right) e(x, y, t) = 0 \quad (2.14)$$

Aynı denklem şu şekilde de yazılabilir:

$$\tilde{v}^T \nabla e(x, y, t) + \frac{\partial e(x, y, t)}{\partial t} = 0 \quad (2.15)$$

(2.15) yeniden düzenlenirse:

$$\frac{\partial e(x, y, t)}{\partial t} = -\tilde{v}^T \nabla e(x, y, t) \quad (2.16)$$

Optik akış denklemi olarak da bilinen bu denklem Horn ve Schunk tarafından geliştirilmiştir (Barron et. al., 1994). Bu denklem, aslında (2.10) ile aynıdır.

Hız, yolun zamana göre türevidir; yani $v_x=dx/dt$ ve $v_y=dy/dt$ olarak yazılabilir. $dt/dt=1$ denklemini de kullanarak, bunlar (2.14)'te düzenlenirse:

$$\frac{\partial(e(x,y,t))}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial(e(x,y,t))}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial(e(x,y,t))}{\partial t} \frac{dt}{dt} = 0 \quad (2.17)$$

elde edilir. Matematikte oldukça sık kullanılan 'zincir kuralı' tersine işletilirse:

$$\frac{d(e(x,y,t))}{dt} = 0 \quad (2.18)$$

bulunur. Yukarıdaki denklem şu şekilde açıklanabilir: $x(t)=(x(t), y(t))$ 'nin görüntüde, zamanla hareket eden bir nokta olduğu düşünülün. Tanım olarak, o hareket eden noktanın gri seviye değeri sabit kalmaktadır. Yani optik akışın bu denkleminde hareket eden cisimlerin gri seviye değerinin korunması, ana hareket noktasıdır. Diğer bir deyişle, hareketli görüntüdeki hareket eden cismin gri değeri korunduğundan dolayı toplam görüntüdeki toplam gri değeri değişimi sıfır olmaktadır. Bu varsayımda arka planın sabit olduğu düşünülmektedir. Aksi takdirde optik akış denklemi hata verecektir.

Hemen hemen diğer bütün yöntemlerin ve enerji bazlı yöntemlerin temel denklemi olarak kullanılan bu denklemler, önceden ayarlanmış belli bir hız için sıfır cevap verecek bir filtre üretmek için kullanılabilir. (2.12) denklemini kullanarak:

$$H(\tilde{w}_s, w_t) = j(\tilde{v}_0^T \tilde{w}_s + w_t)G(\tilde{w}_s, w_t) \quad (2.19)$$

$$h(x,y,t) = v_{x0} \frac{\partial g(x,y,t)}{\partial x} + v_{y0} \frac{\partial g(x,y,t)}{\partial y} + \frac{\partial g(x,y,t)}{\partial t}$$

burada $g(x,y,t)$ Gauss fonksiyonunu olarak seçilebilir. Sıfırlayıcı filtre olarak da kullanılabilen bu filtrenin çıkışı, giriş işareti (v_{x0}, v_{y0}) hızıyla hareket ettiğinde sıfırdır. Çıkış işaretinin

genliği ve ortalama gücü, görüntü $\tilde{v}$ hızıyla hareket ediyorsa, $|\tilde{v} - v_0|$ değeri arttıkça artmaya başlar.

Optik akışın temel denklemi olan (2.16) denkleminin sağ tarafı $\tilde{v}$ 'nin $\nabla e(x, y, t)$ 'nin üzerindeki projeksiyonu ifade etmektedir. Fakat bu projeksiyon $\tilde{v}$ 'nin ortogonal bileşeni hakkında hiç bir bilgi içermemektedir. Bu sorun genellikle 'aperture*' problemi olarak adlandırılır (Mallat, 2001).

(2.16) denklemi Maxwell'in denklemine benzerliğiyle dikkat çeker.

Hız ayarlı filtrelerde de sıfırlayıcı filtreler ayrı hızlarda hareket eden iki tane cisim varsa, bu cisimlerden birini yok etmek için kullanılabilir.

2.2 Hız Ayarlı Filtreler

Enerji bazlı metotların kullandığı filtre takımlarından biri de hız ayarlı filtrelerdir (Delbrück, 1993). Hız ayarlı filtrelerin yanında Gabor tipi filtreler ve uzay-zaman ayrılabilir filtreler (Shi, 1996) gibi değişik filtre tipleri de kullanılabilir. Bu çalışmada hız ayarlı filtrelerden bahsedilecektir.

Bir uzam-zamansal $H(w_x, w_y, w_t)$ filtresi; $\tilde{w}_s = (w_x, w_y)^T$ uzamsal frekans vektörünü, $\tilde{v} = (v_x, v_y)^T$ hız vektörünü ve $(.)^T$ operatörü transpoze işlemini göstermek üzere şöyle ifade edilebilir:

$$H(w_x, w_y, w_t) = H(\tilde{w}_s, -\tilde{v}^T \tilde{w}_s) \quad (2.20)$$

Hareket eden bir uzam-zamansal $E(\tilde{w}_s, w_t)$ örüntüsünün (2.20) filtresinden çıkışı $S(\tilde{w}_s, -\tilde{v}^T \tilde{w}_s)$ olmak üzere:

$$\begin{aligned} S(\tilde{w}_s, w_t) &= H(\tilde{w}_s, w_t) \cdot E(\tilde{w}_s) \cdot \delta(w_t + \tilde{v}^T \tilde{w}_s) \\ &= H(\tilde{w}_s, -\tilde{v}^T \tilde{w}_s) \cdot E(\tilde{w}_s) \end{aligned} \quad (2.21)$$

* aperture: Ing. Kelime anlamı olarak fotoğraf makinalarındaki "kamera açıklığı süresi" anlamına gelmektedir.

Yerel ortalama gücü kesitirmek için integrasyon aralığının çok yüksek tutulduğu varsayımı altında yerel ortalama güç, toplam ortalama güce yakınsayacaktır. Sonsuz büyüklükteki integrasyon aralığı için çıkışın gücü Parseval teoremi kullanılarak:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(x, y, t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |H(\tilde{\mathbf{w}}_s, -\tilde{\mathbf{v}}^T \tilde{\mathbf{w}}_s) \cdot E(\tilde{\mathbf{w}}_s)|^2 d\tilde{\mathbf{w}}_s \quad (2.22)$$

$$P(\tilde{\mathbf{v}}) = \int \Gamma_e(\tilde{\mathbf{w}}_s) |H(\tilde{\mathbf{w}}_s, -\tilde{\mathbf{v}}^T \tilde{\mathbf{w}}_s)|^2 d\tilde{\mathbf{w}}_s$$

Burada Γ_e giriş işaretinin güç spektral yoğunluğunu ifade etmektedir. Ortalama toplam güç P , (2.22)'den de anlaşılabileceği gibi zamana bağlı değildir. Bunun nedeni de zamansal ve uzamsal frekans bileşenlerinin birbirlerine hız vektörü ile bağlı olmalarıdır.

Çıkışın gücü şaşırtıcı bir şekilde hızın bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır. A. Torralba ve J. Héroult (Torralba et. al, 1999a) Hız Ayarlı Filtre tanımını şöyle vermektedirler: “ $\tilde{\mathbf{v}}_0$ hızına ayarlı bir *Hız Ayarlı Filtre*, $\tilde{\mathbf{v}} = \tilde{\mathbf{v}}_0$ hızında hareket eden bir giriş görüntüsü için, giriş görüntüsünün spektral bileşeninden bağımsız olarak, $P(\tilde{\mathbf{v}})$ çıkış gücünün maksimuma ulaştığı uzam-zamansal filtredir.” (Torralba et. al, 1999a). Diğer bir deyişle, $P(\tilde{\mathbf{v}})$ çıkışının gücünü sadece giriş görüntüsü $\tilde{\mathbf{v}} = \tilde{\mathbf{v}}_0$ hızında hareket ederken, işaretin spektral içeriğinden bağımsız olarak maksimuma ulaştıran uzam zamansal filtre, $\tilde{\mathbf{v}}_0$ hızına ayarlı bir uzam-zamansal hız ayarlı filtredir.

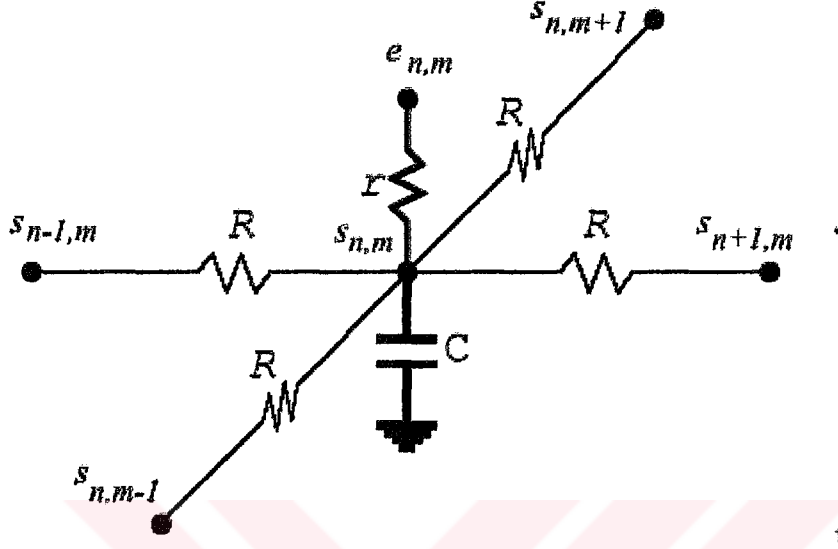
$\tilde{\mathbf{v}}_0$ hızına ayarlı bir Hız Ayarlı Filtre (HAF) şöyle tanımlanmıştır (Torralba et. al, 1999a):

$$H_{v0}(\tilde{\mathbf{w}}_s, \mathbf{w}_t) = H_0(\tilde{\mathbf{w}}_s, \tilde{\mathbf{w}}_t + \tilde{\mathbf{v}}_0^T \tilde{\mathbf{w}}_s) \quad (2.23)$$

Yukarıdaki denklemde $H_0(\tilde{\mathbf{w}}_s, \tilde{\mathbf{w}}_t)$, sıfır hızına ayarlı bir HAF olarak tanımlanmıştır (Torralba et. al, 1999a). Bu filtre, statik girişler için en yüksek çıkış gücünü verir. Hareketli girişler için hız arttıkça çıkışın ortalama gücü düşmeye başlar.

2.2.1 Hız Ayarlı Analog Ağ

Hareketli görüntü işlemlerinde en çok kullanılan devrelerden birisi de C. Mead'ın sunduğu (Mead et. al., 1988) Şekil 2.3'te görülen direnç ve kapasiteden oluşan devredir.



Şekil 2.3 C. Mead'ın sunduğu uzam-zamansal alçak geçiren R-C devresi

Şekil 2.3'teki R-C devresi alçak geçiren bir uzam-zamansal filtredir. Her bir çıkış düğümü komşu düğümlere R direnciyle, girişe r direnciyle ve toprağa ise C kapasitesiyle bağlanmıştır. Çıkış düğümünde Kirchoff'un akım yasası bu devre için uygulanırsa:

$$\frac{e_{n,m}(t) - s_{n,m}(t)}{r} = \frac{s_{n,m}(t) - s_{n-1,m}(t)}{R} + \frac{s_{n,m}(t) - s_{n+1,m}(t)}{R} + \frac{s_{n,m}(t) - s_{n,m-1}(t)}{R} + \frac{s_{n,m}(t) - s_{n,m+1}(t)}{R} + C \frac{ds_{n,m}(t)}{dt} \quad (2.24)$$

(2.24) yeniden düzenlenirse:

$$e_{n,m}(t) = s_{n,m}(t) + \frac{r}{R} [4s_{n,m}(t) - s_{n-1,m}(t) - s_{n+1,m}(t) - s_{n,m-1}(t) - s_{n,m+1}(t)] + rC \frac{ds_{n,m}(t)}{dt} \quad (2.25)$$

Uzamsal domende ayırık olan (2.25) denklemi, sürekli bir denklemin ayırık yaklaşıklığı olarak düşünülebilir (Torralba et. al, 1999a). Bu yaklaşıklıkta:

$$\Delta s(x, y, t) \approx -4s_{n,m}(t) + s_{n-1,m}(t) + s_{n+1,m}(t) + s_{n,m-1}(t) + s_{n,m+1}(t) \quad (2.26)$$

Yukarıdaki denklemde Δ uzamsal Laplasyen operatörüdür. (2.26), $s_{n,m}(t)$ 'nin x ve y yönlerinde bir kere ileri Euler yaklaşıklığıyla, bir kere de geri Euler yaklaşıklığıyla türetilmesiyle edilir. (2.25) denkleminde ayırık domenden sürekli domene (2.25) yaklaşıklığı kullanılarak:

$$e(x, y, t) = s(x, y, t) - \gamma^2 \Delta s(x, y, t) + \tau \frac{\partial s(x, y, t)}{\partial t} \quad (2.27)$$

elde edilir. Yukarıda, $\gamma^2 = \tau/R$, $\tau = rC$ olarak tanımlanmıştır. (2.27)'in Fourier dönüşümü alınır:

$$H_0(\tilde{w}_s, w_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2 |\tilde{w}_s|^2 + j\tau w_t} \quad (2.28)$$

(2.28) filtresinin alçak geçiren karakteristiğinden dolayı statik girişler için çıkışın ortalama gücü maksimum olacaktır. Bu filtreler, bu özelliğinden dolayı sıfır hızına ayarlı Hız Ayarlı Filtre tanımını sağlamaktadır. (2.28) denklemi (2.26) yaklaşıklığı kullanılarak elde edilmiştir, fakat bu yaklaşıklık alçak uzamsal frekanslar için geçerlidir. Alçak uzamsal frekanslar için yapılan bu yaklaşıklığın, yüksek uzamsal frekans bileşenlerine sahip bir giriş için bir takım bozulmalara yol açacağı muhakkaktır.

Hız ayarlı filtre tanımının sonucu olarak ortaya çıkan (2.23) denklemi (2.28) denkleme uygulanırsa:

$$H_{v_0}(\tilde{w}_s, w_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2 |\tilde{w}_s|^2 + j\tau(w_t + \tilde{v}_0^T \tilde{w}_s)} \quad (2.29)$$

Bu alçak geçiren filtre, uzam-zamansal frekans uzayında v_0 hızıyla alakalı bir şekilde yönelimlidir. Bu nedenle (2.29) filtresi $\tilde{v}_0$ hızında hareket eden giriş görüntüleri için

maksimum çıkış gücü üretir. Hareket eden giriş görüntüsünün hızı ile $\tilde{v}_0$ ayarlı hız arasındaki fark ne kadar büyürse çıkış gücü düşmeye başlayacaktır. (2.29) denklemi şu şekilde yeniden düzenlenebilir:

$$H_{v_0}(\tilde{w}_s, w_t) = \frac{1}{1 - \gamma^2((jw_x)^2 + (jw_y)^2) + \tau(jw_t + v_{x0}(jw_x) + v_{y0}(jw_y))} \quad (2.30)$$

(2.30)'in sürekli domende ters Fourier dönüşümü alınır:

$$e(x, y, t) = s(x, y, t) - \gamma^2 \left(\frac{\partial^2 s(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + \tau \left(v_{x0} \frac{\partial s(x, y, t)}{\partial x} + v_{y0} \frac{\partial s(x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial s(x, y, t)}{\partial t} \right) \quad (2.31)$$

Δ uzamsal Laplasyen operatörü ve ∇ uzamsal gradient operatörünü göstermek üzere:

$$e(x, y, t) = s(x, y, t) - \gamma^2 \Delta s(x, y, t) + \tau \left(\tilde{v}_0^T \cdot \nabla s(x, y, t) + \frac{\partial s(x, y, t)}{\partial t} \right) \quad (2.32)$$

Yukarıdaki denklemde parantez içindeki kısım ile (2.15) bir arada değerlendirildiğinde giriş görüntüsünün hızı $\tilde{v}_0$ ayarlı hıza eşit olduğunda maksimum çıkış gücü üretileceği tekrar görülebilir.

Uzamsal değişkenlerin sürekli domende yazıldığı yukarıdaki denklemi bir devre ile gerçeklemek için, uzamsal değişkenleri örnekleyerek ayrık domende yazmak gerekir. Uzamsal türev ifadeleri yaklaşık olarak:

$$\frac{\partial s(x, y, t)}{\partial x} \approx \frac{s_{n+1,m} - s_{n-1,m}}{2} \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial s(x, y, t)}{\partial y} \approx \frac{s_{n,m+1} - s_{n,m-1}}{2}$$

Şeklinde de yazılabilir. (2.33) yaklaşıklığı (2.31)'te yerine yazılıp (2.26) yaklaşıklığı ters yönde işletilirse:

$$e_{n,m}(t) = s_{n,m}(t) + \gamma^2 [4s_{n,m}(t) - s_{n-1,m}(t) - s_{n+1,m}(t) - s_{n,m-1}(t) - s_{n,m+1}(t)] + \\ j\frac{\tau}{2} [v_{x0}(s_{n+1,m}(t) - s_{n-1,m}(t)) + v_{y0}(s_{n,m+1}(t) - s_{n,m-1}(t))] + j\tau \frac{\partial s_{n,m}(t)}{\partial t} \quad (2.34)$$

Bu denklem şu şekilde yeniden düzenlenebilir:

$$e_{n,m}(t) = s_{n,m}(t) + \gamma^2 [4s_{n,m}(t) - a_x s_{n-1,m}(t) - b_x s_{n+1,m}(t) - a_y s_{n,m-1}(t) - b_y s_{n,m+1}(t)] \\ + \tau \frac{\partial s_{n,m}(t)}{\partial t} \quad (2.35)$$

Burada:

$$a_x = 1 + \frac{v_{x0}\tau}{2\gamma^2}, \quad a_y = 1 + \frac{v_{y0}\tau}{2\gamma^2}, \quad a_x + b_x = a_y + b_y = 2 \quad (2.36)$$

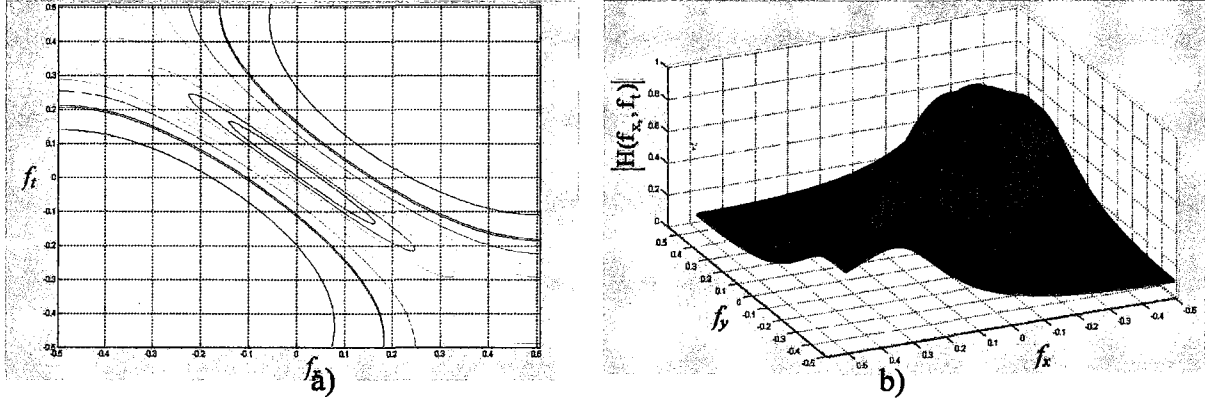
olarak tanımlanmıştır.

(2.35) denkleminin elde edilmesinde alçak uzamsal frekanslar için geçerli olan yaklaşıklıklar kullanılmıştır. Bu yaklaşıklık alçak uzamsal frekanslar için iyi sonuç vermesine karşın yüksek uzamsal frekanslar için bozulmalara sebep olacaktır.

Ayrık domenden sürekli domene yapılan bu yaklaşıklığın yüksek uzamsal frekanslar için geçerli olmayacağı açıktır. Eğer bu yaklaşıklık yapılmazsa (2.25) denkleminin Fourier dönüşümü daha farklı bir biçimde olacaktır (Beaudot, 1994), (Herault, 1996):

$$H_0(\tilde{w}_s, w_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2 (4 - 2\cos(w_x) - 2\cos(w_y)) + j\tau w_t} \quad (2.37)$$

Yukarıdaki denklemde ω_x ve ω_y , 2π ile periyodik uzamsal frekans bileşenleridir. w_t ise periyodik değildir. (2.26)'te yapılan yaklaşıklık sonucu elde edilen (2.28) denklemi, (2.37)'te alçak ω_x ve ω_y frekansları için $1 - \cos(\omega_x) \approx 0.5\omega_x^2$ yaklaşımı yapılarak elde edilebilir. Bu yaklaşıklık yapılmazsa (2.29) denklemi şu hale gelir:



Şekil 2.4. $w_y=0$ iken Hız Ayarlı Filtre'nin uzam-zamansal frekans karakteristiği. a)Kontür diyagramı. b) HAF'ın genliği.

$$H_{v0}(\tilde{w}_s, w_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2 (4 - 2\cos(w_x) - 2\cos(w_y)) + j\tau(w_t + v_0^T \tilde{w}_s)} \quad (2.38)$$

Şekil 2.4'te bir HAF'ın uzam-zamansal frekans karakteristiği verilmiştir. Görüldüğü gibi bu filtre frekans uzayında belli bir hıza yönelimlidir. Alçak uzamsal frekanslar için oldukça iyi sonuç verekte olan bu filtrenin yüksek uzamsal frekanslar için bozulmalara uğradığı şekilden de görülmektedir.

(2.38) denkleminde de görülebileceği üzere uzamsal frekanslar periyodik değildir. Oysa ki, uzamsal bileşenler ayrıktır ve periyodik olması gerekmektedir, çünkü Şekil 2.5'ten de görülen devre uzamsal olarak ayrık çalışmaktadır. (2.38) denklemi şu şekilde de yazılabilir:

$$H_{v0}(\tilde{w}_s, w_t) = \frac{1}{P(w_x, w_y) + j\tau(w_t + v_0^T \tilde{w}_s)} \quad (2.39)$$

Bu denklemin ters Fourier dönüşümünü alınırsa:

$$e(x, y, t) = F^{-1} \left\{ P(w_x, w_y) S(\tilde{w}_s, w_t) \right\} + \tau \left(\frac{\partial s(x, y, t)}{\partial t} + v_{x0} \frac{\partial s(x, y, t)}{\partial x} + v_{y0} \frac{\partial s(x, y, t)}{\partial y} \right) \quad (2.40)$$

(2.34) denklemi (2.25) denkleminde çok benzemektedir ve onun yaklaşıklığıdır. Yukarıdaki denklemde $S(\tilde{w}_s, w_t)$, $s(x,y,t)$ 'nin Fourier dönüşümüdür. Uzamsal olarak sürekli domende olan (2.34) denklemi ayrık bir denklemin sürekli yaklaşıklığı olarak da düşünülebilir. (2.40) denklemi, uzamsal olarak ayrık çalışan bir devre ile gerçekleştirileceğinden (2.29) denkleminde göre bozulmalara uğrayacaktır.

Uzamsal türevler için literatürde bir çok yaklaşıklık metodu vardır. Bu metodların içinde 'bilineer transformasyon' yönteminin en iyi sonucu vermesine karşın burada basitlik amacıyla bilineer transformasyon yerine (2.33) yaklaşıklığı kullanılacaktır. Bu yaklaşıklığın yüksek uzamsal frekans bileşenleri için bozulmalara yol açacağı muhakkaktır. Yine de uzamsal türevler için (2.33) yaklaşıklığı kullanılırsa (2.35) denklemi elde edilir. (2.35) denkleminin Fourier dönüşümü ise şöyledir (Torralba, 1999b):

$$H_{v0}(\tilde{w}_s, w_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2(4 - 2\cos(\omega_x) - 2\cos(\omega_y)) + j\tau(w_t + v_{x0}\sin(w_x) + v_{y0}\sin(w_y))} \quad (2.41)$$

Yukarıdaki denklem şu şekilde yeniden düzenlenebilir:

$$H_{v0}(\tilde{w}_s, w_t) = \frac{1}{P(\tilde{w}_s) + jQ(\tilde{w}_s, w_t)} \quad (2.42)$$

Yukarıdaki denklemde:

$$P(\tilde{w}_s) = 1 + \gamma^2[4 - (a_x + b_x)\cos(w_x) - (a_y + b_y)\cos(w_y)] \quad (2.43)$$

$$Q(\tilde{w}_s, w_t) = \tau w_t + \tau[(a_x - b_x)\sin(w_x) + (a_y - b_y)\sin(w_y)]$$

(2.41) denklemini sağlayan devre Şekil 2.5'te verilmiştir. Bu devrede Kirchoff'un akımlar yasası uygulanırsa (2.35) denklemi kolaylıkla elde edilebilir ve gerekli düzenlemeler sonucu da (2.43) rahatlıkla elde edilir. (2.43)'te:

$$\gamma^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{r}{R_1} + \frac{r}{R_2} + \frac{r}{R_3} + \frac{r}{R_4} \right), \quad \tau = rC \quad (2.44)$$

Uzamsal w_x ve w_y frekansları devir/piksel cinsinden ve zamansal w_t frekans bileşeni devir/saniye cinsinden verilmiştir.

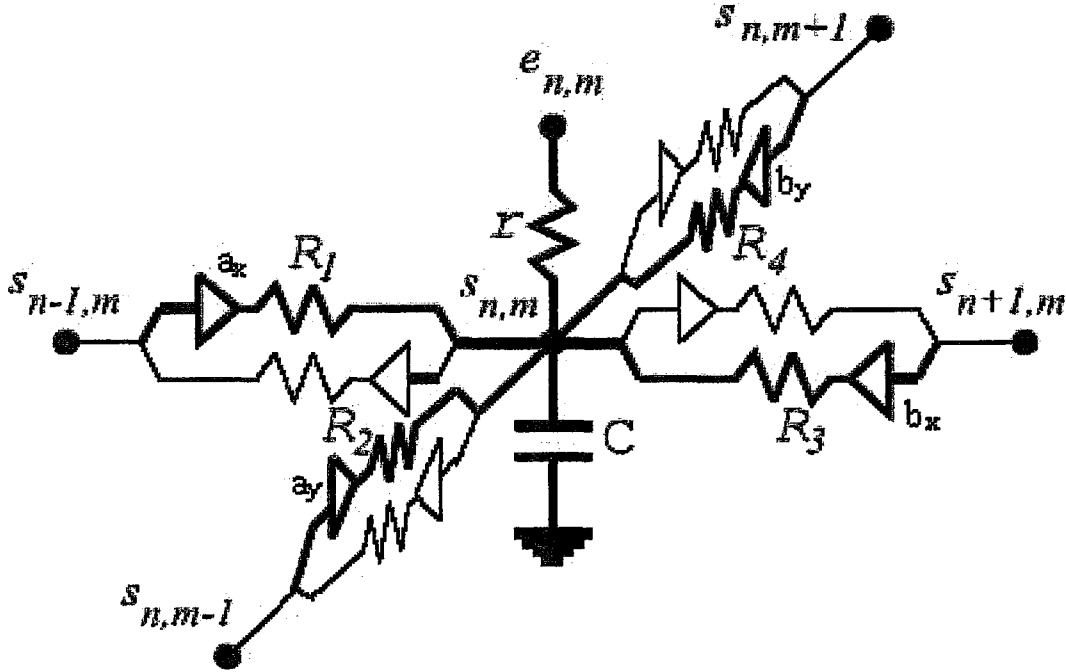
(2.36) denkleminde verilen Q fonksiyonu filtrenin hız ayarından sorumludur. Şekil 2.5'te görülen devrede her bir çıkış düğümü kendisine komşu 4 adet çıkış düğümüne bağlanmıştır. Eğer bağlanan komşu sayısı arttırılırsa daha iyi sonuçlar alınır. Fakat bu, filtrenin kompleksliğini arttıracaktır. Günümüzdeki teknolojik ilerlemeler sayesinde uzamsal örnekleme frekansları arttırılmıştır. Bu nedenle de alçak frekanslar için yapılan yaklaşıklıklar genellikle doğru olarak kabul edilebilir. Alçak uzamsal frekanslar için Q ve P fonksiyonları:

$$Q(\tilde{w}_s, w_t) \approx \tau(w_t + \tilde{v}_0^T w_s) \quad (2.45)$$

$$P(\tilde{w}_s) \approx 1 + \gamma^2 |\tilde{w}_s|^2$$

Şekil 2.5'te görülen devre bir asimetrik analog ağ'dır. Bu devredeki asimetrik bağlantılar filtrenin hız ayarından sorumludurlar. Bu filtre hız ayarlı alçak geçiren filtredir ve ayarlanan hıza bağlı olarak uzam-zamansal frekans uzayında yönelimlidirler.

Optik akışı ölçmek için kullanılan bu algoritmanın yanında bir çok algoritma daha geliştirilmiştir (Barron et. al., 1994). Fakat bu algoritmanın iyi sonuç vermesinin belki en önemli nedeni memelilerin göz yapısı ve çalışma prensibi üzerine yapılan araştırmalarda görmeyle ilgili bir çok sinir hücresinin (örneğin fotoreseptörler ve yatay (horizontal) hücrelerin) Şekil 2.3'te verilen R-C devresine benzer uzam-zamansal karakteristikte olmasıdır.

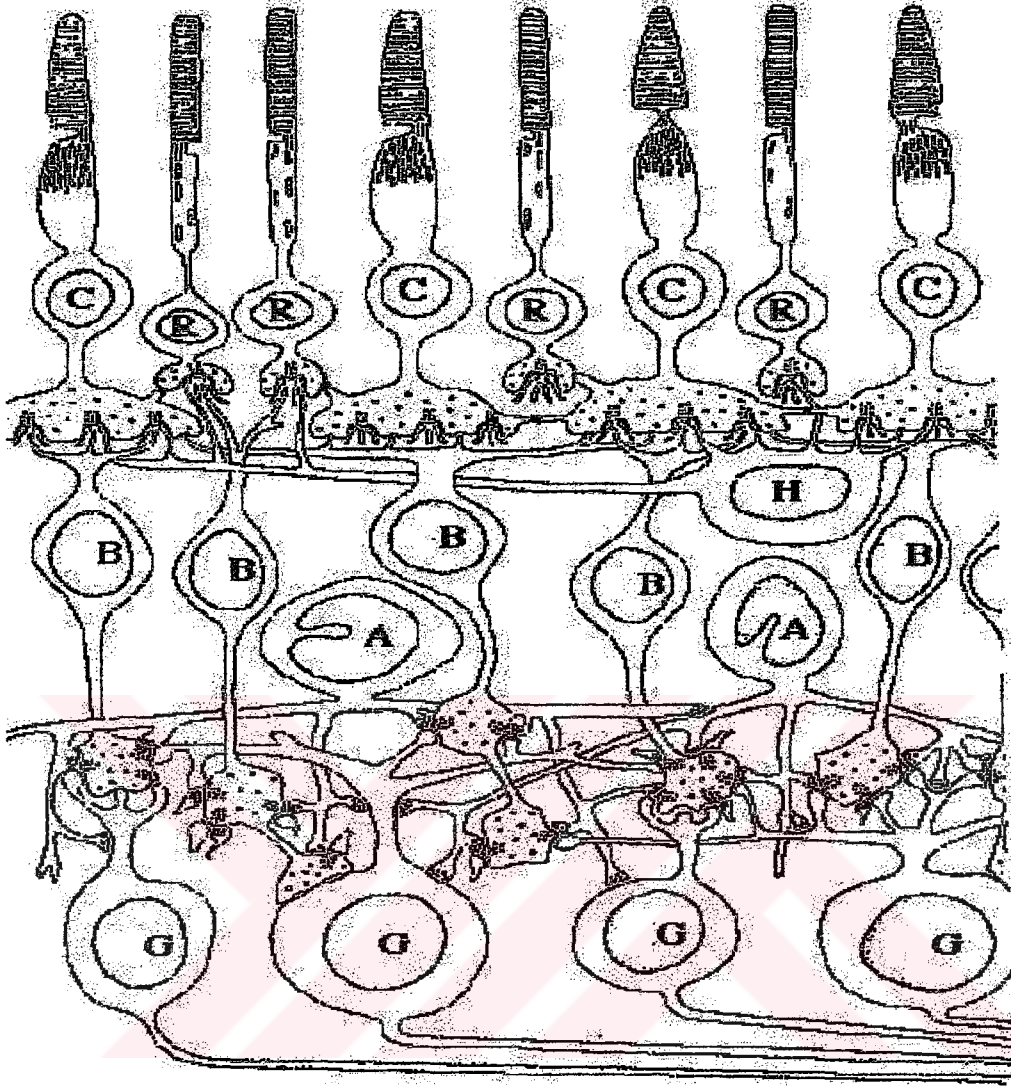


Şekil 2.5 Hız ayarlı asimetrik devre.

2.3. Biyolojik Görme Sistemi

Omurgalılarda görme organları genellikle iki tane olup vücudün baş kısmındadır. Göz, biraz incelendiğinde görmeyi sağlayan yerin retina olduğu anlaşılıştır. Retina, göze gelen bütün ışık ışınlarının elektriksel işarete çevrilerek beyne gönderilmesinden sorumludur. Retina, vücuttaki bir tür ön işleme organıdır. Bu organ, yüksek hassasiyette, doğrulukta ve hızda görüntü işleme algoritmaları koşturur.

Retinanın görevleri arasında uzamsal ve zamansal kenar belirleme, renk işleme, hareket algılama ... vs bulunmaktadır (Mead et. al., 1988), (Herault, 1996), (Beaudot, 1994), (Torralba, 1999b). Retinanın hareket algılama özelliğinden hareket ederek bu özelliğini ilk olarak modellemeye çalışanlardan biri de C Mead'dir (Mead et. al., 1988). Mead retinanın her bir sinir hücresinin bir diğeriyle bağlantısını bir dirençle, bu hücrenin hücrelerarası sıvıyla olan kapasitesini de bir kapasitansla modellemiştir. Retinada alt alta tek sıra halinde dizilen bu hücrelerin bir kaç tipi vardır: Fotorseptörler, yatay (horizontal) hücreler, bipolar hücreler, amacrine ve ganglion hücreleri.



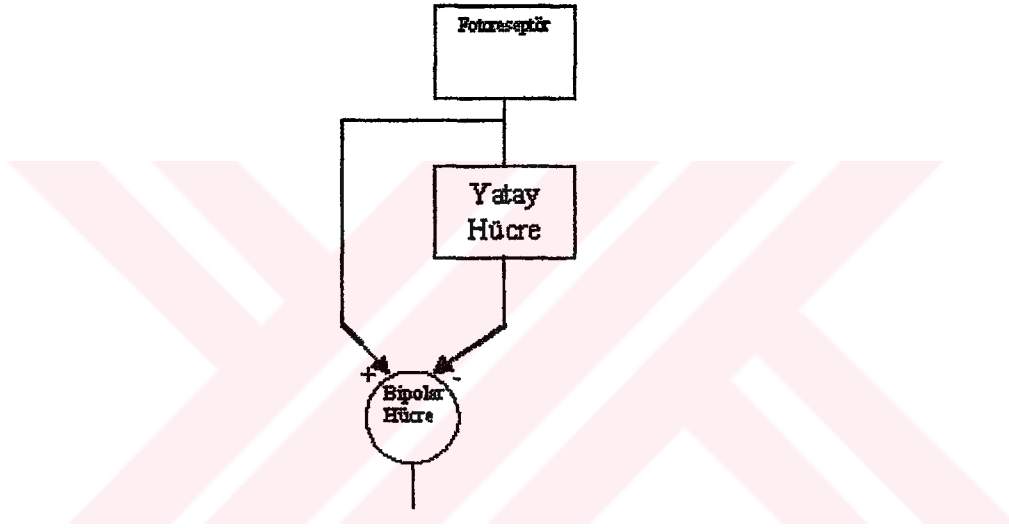
Şekil 2.6 Omurgalı retina hücrelerinin kesiti. Bu kesitte hücrelerin dizilişi ve birbiriyle bağlantı şekli gösterilmiştir. C: Konik Hücreler (Cones), R: Çubuk Hücreler (Rods), H: Yatay Hücreler, B: Bipolar Hücreler, A: Amacrine Hücreleri, G: Ganglion Hücreleri

Yukarıda ismi sayılan her bir hücrenin görevi ve birbiriyle bağlantıları farklıdır. Fotoreseptörler, yatay hücreler ve bipolar hücreler retinanın dış bölümünde bulunur. Daha aşağılara geldikçe amacrine ve ganglion hücreleri bulunur (Bkz Şekil 2.6)

Memeli retinasındaki fotoreseptörler Şekil 2.6'de de görüldüğü gibi iki türdür: Konik ve çubuk hücreler. Konik hücreler temel olarak retinanın merkezinde bulunurlar ve renk duyarlıdırlar. Çubuk hücreler ise merkezin yanında sık bulunan ve ışık yoğunluğuna

duyarlıdırlar. Konik hücreler daha çok gün ışığında, ışık yoğunluğunun fazla olduğu yerlerde kullanılır. Çubuk hücreler ise daha çok loş ışıkta kullanılırlar. Çubuk, konik ve yatay hücreler birbirlerine “boşluk bağlantıları” adı verilen bir tür bağla bağlıdırlar.

Bir çubuk hücre, bir bipolar hücre için uyarıcı etkiye sahipse, yatay hücre için de uyarıcı etkiye sahiptir. Fakat bu yatay hücre bipolar hücre için bastırıcı etkiye sahiptir. (Bkz. Şekil 2.7). Tam tersini de söylemek mümkündür: Bir çubuk hücre bir yatay hücre için bastırıcı etkiye sahipse aynı zamanda bipolar hücre için de bastırıcı etkiye sahiptir. Yatay hücre ise bipolar hücre için uyarıcı etkiye sahip olacaktır (Herault, 1996).



Şekil 2.7 Fotorseptör (çubuk hücre), yatay hücre ve bipolar hücre arasındaki ilişkinin blok diyagramı.

2.3.1 Elektronik Yayılım

Memeli retinasının fotorseptörlerinin ve yatay hücrelerinin kendi türündeki hücrelerle ‘boşluk bağlantıları’ da denen bir tür yapıyla bağlı oldukları bir önceki bölümde söylenmişti. Bu yapı iki boyutlu, sürekli ve pasif bir ızgara yapısıdır. Bu ızgara yapısı direnç ve kapasiteden oluşmaktadır. Bu ızgara yapısındaki dirençler uzamsal işlemleri görmekte, kapasite ise zamansal türev işlemini uygulamaktadır.

Şekil 2.8'teki gibi tek boyutlu ve sürekli bir ızgara yapısı ele alınsın. Sadece dirençlerden oluşan bu ızgara yapısı, memelilerin retinasındaki uzamsal işlemleri oldukça iyi bir şekilde modellemektedir (Mead, 1989). Bir önceki kısımda da söylendiği gibi gözde birbirine yakın iki sinir hücresinin birbiriyle olan bağlantıları bir direnç yardımıyla modellenebilmektedir.

Bu ızgara yapısında bir tür uzamsal ortalama alma işlemi yapılmaktadır. Yani bir uçtan verilen giriş işareti diğer bir ucu etkilemektedir. Literatürde 'elektronik yayılım' diye de bilinen, işaretlerin direnç ağındaki yayılımı (difüzyonu) sayesinde ortalama alma işlemi gerçekleşebilmektedir.

Bir V_0 gerilimi Şekil 2.8'te gösterilen ağın sol ucuna ($x=0$) uygulansın. Herhangi bir x konumu için r direncindeki gerilim $V(x)$ ve o direncin üzerinden geçen akım $I(x)$ olmak üzere ve $x+dx$ konumu için yine r direnci üzerindeki gerilim $V(x+dx)$ ve o direncin üzerinden akan akım $I(x+dx)$ olmak üzere (Mead, 1989):

$$V(x) = V(x + dx) + I(x + dx) r dx \quad (2.46)$$

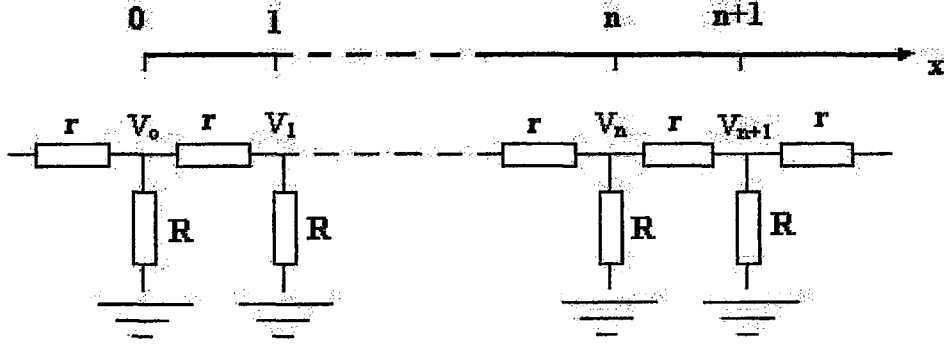
$$I(x) = I(x + dx) + \frac{V(x)}{R} dx \quad (2.47)$$

dx 'in yeterince küçük seçildiği durumlar için yukarıdaki denklemlerdeki I ve V fonksiyonları x 'in sürekli bir fonksiyonu olarak yazılabilir. Bu durumda (2.46) denkleminin limiti, türevin genel tanımından:

$$\frac{dV}{dx} = -Ir \quad (2.48)$$

(2.47) denklemini aynı durumda:

$$\frac{dI}{dx} = -\frac{V}{R} \quad (2.49)$$



Şekil 2.8 Elektronik yayılımın sinirsel süreçte direnç ağıyla modellenmesi ((Mead, 1989)'dan yeniden çizilmiştir.)

(2.48) denkleminin x 'e göre türevi alınıp denklem (2.49) yerine yazılırsa:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -r \frac{dI}{dx} = \frac{r}{R} V \quad (2.50)$$

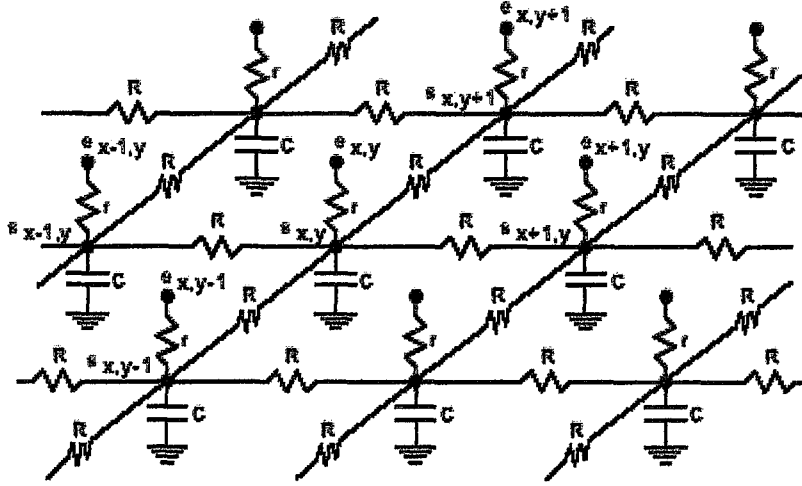
r ve R değerleri sabit olduğundan (2.50) denkleminin çözümü şu şekildedir:

$$V = V_0 e^{-\gamma x} \quad (2.51)$$

γ sabiti uzay sabiti olarak bilinir ve:

$$\gamma = \sqrt{\frac{r}{R}} \quad (2.52)$$

Bir işaret oldukça uzun bir ağına ortasına uygulanırsa hem $+x$ hem de $-x$ yönünde difüzyona uğrayacaktır. Bu durumda $-x$ yönüne olan difüzyon, $+x$ yönüne olan difüzyonun simetriği olacaktır. Şekil 2.8'te yapılan uzamsal filtrelemeye ek olarak zamansal filtreleme de yapılmak istenirse, bu uzamsal filtreye kapasite eklenmek durumunda kalınacaktır. İki boyutlu böyle bir filtre Şekil 2.9'te gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Direnç ve kapasiteyle oluşmuş iki boyutlu uzam-zamansal R-C filtresi (Torralba, 1999b).

2.3.2 İki Boyutlu Retina

Retinanın ‘Outer Plexiform’ denilen yukarı kısmı, fotoreseptörler (konik ve çubuk hücreler), yatay hücreler ve bipolar hücrelerden oluşmaktadır. Bu hücrelerden fotoreseptörlerin ve yatay hücrelerin modellenmesi Şekil 2.10’daki gibi yapılabilir. Bir önceki kısımdan da hatırlanırsa retinadaki hücreler tek sıra halinde ve alt alta dizilmişlerdir. Retinanın dış kısmını modelleyen Şekil 2.10’da da her bir katman tek sıra halinde ve alt alta dizilmiştir.

Retinanın dış kısmının bu modelinde, fotoreseptör hücrelerinin ve yatay hücrelerin iki boyutlu yapısı Şekil 2.10’daki görülmektedir. Bu yapı Şekil 2.3’teki yapıyla aynıdır.

Hatırlatma amacıyla (1.17) denklemi yeniden yazılsın:

$$e_{n,m}(t) = s_{n,m}(t) + \gamma^2 (4s_{n,m}(t) - s_{n-1,m}(t) - s_{n,m-1}(t) - s_{n+1,m}(t) - s_{n,m+1}(t)) + \tau \frac{ds_{n,m}(t)}{dt} \quad (2.53)$$

Burada $\gamma = \sqrt{\frac{r}{R}}$ uzay sabiti ve $\tau = rC$ zaman sabitidir. Bu uzam-zamansal denklemin uzamsal değişkenlere göre z-dönüşümü, zamansal değişkene göre de Fourier dönüşümü alınırsa (Beaudot, 1994):

$$E(z_x, z_y, w_t) = S(z_x, z_y, w_t) + \gamma^2 \left(4S(z_x, z_y, w_t) - z_1^{-1}S(z_x, z_y, w_t) - z_2^{-1}S(z_x, z_y, w_t) - z_1S(z_x, z_y, w_t) - z_2S(z_x, z_y, w_t) \right) + j\tau w_t S(z_x, z_y, w_t) \quad (2.54)$$

Buradan da giriş çıkış arasındaki transfer fonksiyonu olarak:

$$H(z_1, z_2, w_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2 (4 - z_x^{-1} - z_x - z_y^{-1} - z_y) + j\tau w_t} \quad (2.55)$$

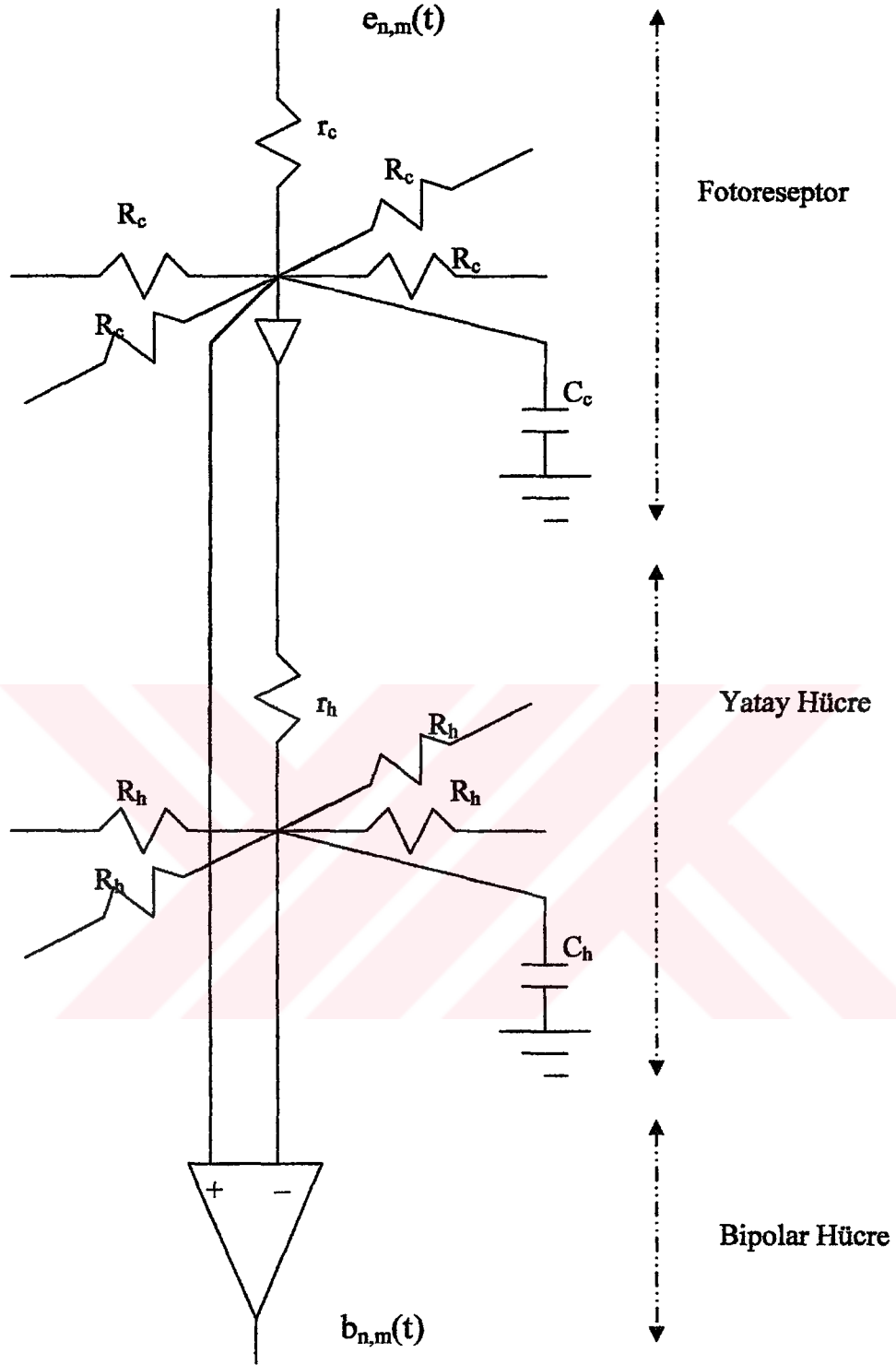
elde edilir. Burada $H(z_1, z_2, w_t) = \frac{S(z_x, z_y, w_t)}{E(z_x, z_y, w_t)}$ olarak verilmiştir. Uzamsal değişkenler ayrık olduğundan dolayı $z_1 = e^{jw_x}$ ve $z_2 = e^{jw_y}$ olarak alınabilir. Bu durumda $z_x + z_x^{-1} = \cos(w_x)$ ve $z_y + z_y^{-1} = \cos(w_y)$ olur. Bunlar (2.55)'te yerine yazılırsa (2.37) denklemi elde edilir.

(2.37) denklemi fotoreseptör hücrelerinin veya yatay hücrelerin her birinin transfer fonksiyonudurlar. Şekil 2.10'teki devreye göre:

$$H_{opl} = H_c - H_c H_h = H_c (1 - H_h) \quad (2.56)$$

Burada H_{opl} fotoreseptörler, yatay hücreler ve bipolar hücrelerden oluşan retinanın dış tabakasının, H_c fotoreseptörlerin, H_h ise yatay hücrelerin transfer fonksiyonunu temsil etmektedir. H_c ' transfer fonksiyonu (2.37) fonksiyonudur:

$$H_c(w_x, w_y, w_t) = \frac{1}{1 + \gamma_c^2 (4 - 2\cos(w_x) - 2\cos(w_y)) + j\tau_c w_t} \quad (2.57)$$



Şekil 2.10: Retinanın 'Outer Plexiform' denen kısmının iki boyutlu modeli.

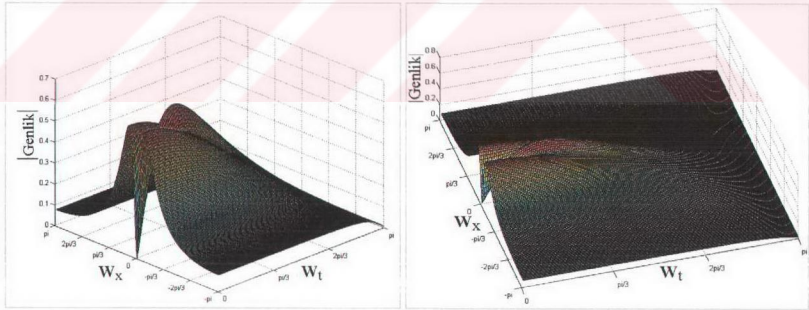
Bir önceki kısımda, bir fotoreseptör bir bipolar hücre için uyarıcı etkiye sahipse o hücrenin yatay hücre için de uyarıcı etkiye sahip olduğunu, fakat bu yatay hücrenin bipolar hücre için bastırıcı etkiye sahip olduğu söylenmişti. İşte bu bastırıcı etki (2.56)'teki parantez içindeki terimdir:

$$(1-H_h) = \frac{\gamma_h^2(4-2\cos(w_x)-2\cos(w_y))+j\tau_h w_t}{1+\gamma_h^2(4-2\cos(w_x)-2\cos(w_y))+j\tau_h w_t} \quad (2.58)$$

(2.57) alçak geçiren bir filtre iken (bkz. Şekil 2.12), (2.58) yüksek geçiren (bkz. Şekil 2.13) karakteristiğindedir. Bu iki filtrenin çarpımı bir bant geçiren filtre vermektedir (bkz. Şekil 2.11):

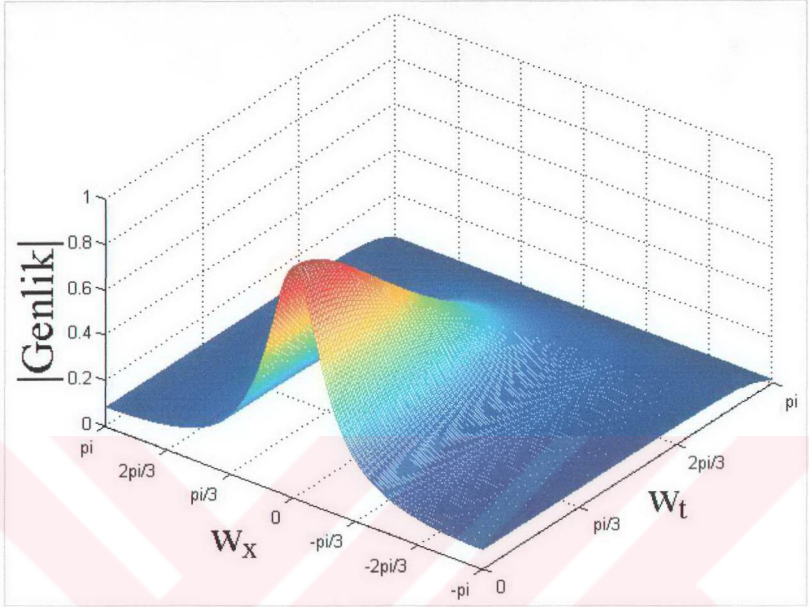
$$H_{opl} = \frac{\gamma_h^2(4-2\cos(w_x)-2\cos(w_y))+j\tau_h w_t}{(1+\gamma_c^2(4-2\cos(w_x)-2\cos(w_y))+j\tau_c w_t)(1+\gamma_h^2(4-2\cos(w_x)-2\cos(w_y))+j\tau_h w_t)} \quad (2.59)$$

H_{opl} transfer fonksiyonunun grafiği Şekil 2.11'de verilmiştir.

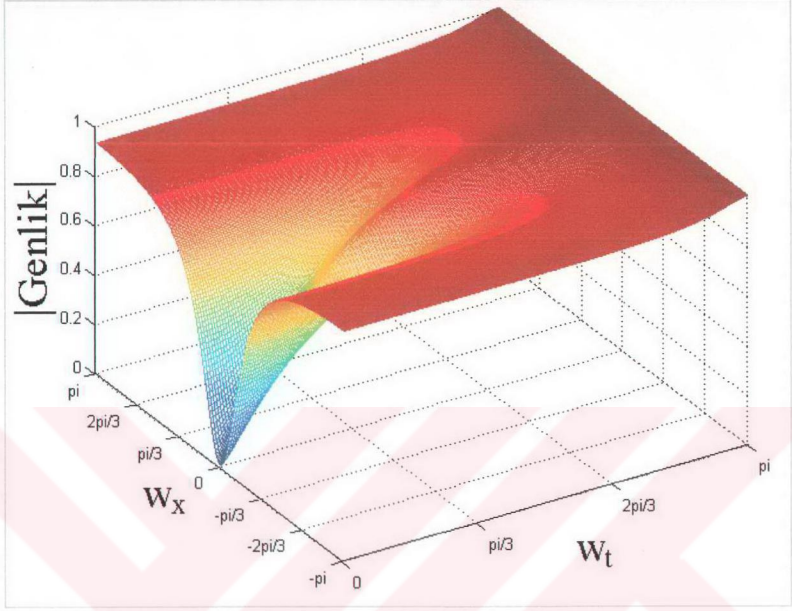


Şekil 2.11 Retinanın 'Outer Plexiform' katmanının modelinin $w_y=0$ için transfer fonksiyonu.

($\gamma_h^2=40$, $\gamma_c^2=0.9$, $\tau_c=1$, $\tau_h=0.1$ seçilmiştir.)



Şekil 2.12 Fotoresptör ve yatay hücrelerin (2.57) denklemiyle verilen alçak geçiren karakteristiği.



Şekil 2.13 Yatay hücre'nin bipolar hücre ile etkileşmesi sonucu yüksek geçiren bir yapının ortaya çıkması ((3.56)'teki $1-H_h$ karakteristiği)

Tekrarlamak gerekirse, retinanın 'Outer Plexiform' denilen bu bölgesindeki fotoreseptörlerin ve yatay hücrelerin transfer fonksiyonlarının şekli aynıdır ve (3.11)'deki gibidir. Bu transfer fonksiyonu alçak geçiren bir filtrenin transfer fonksiyonudur (bkz. Şekil 2.11). Şekilde de görüldüğü üzere uzam-zamansal alçak geçiren bu özellik bipolar hücrelerin bir tür uzam-zamansal çıkarma işlemi yapması sayesinde yatay hücrelerin bipolar hücre ile etkileşerek yüksek geçiren bir özelliğe sahip olması etkisini oluşturur (bkz. Şekil 2.12). Sonuçta (3.15)'te de elde edilen bir yüksek ve bir de alçak geçiren filtrenin çarpımından bir bant geçiren filtre ortaya çıkmaktadır.

Retinanın hareket algılamak için fotoreseptörler, yatay hücreler ve bipolar hücrelerden oluşan bant geçiren bu yapısı nedeniyle yüksek frekanslı gürültüler süzülür. Yine bu bant geçiren yapısı nedeniyle hareket eden cisimler için kenarlar belirginleştirilir.

2.3.3 Retina ve Doğal Görüntüler

Atick ve Redlich, doğal görüntülerin uzamsal karakteristiğinin $1/|\tilde{w}_s|^\alpha$, zamansal karakteristiğinin ise $1/|w_t|$ şeklinde olduğunu göstermişlerdir (Atick, et. al., 1992). Retinal filtrelemenin ise, uzamsal olarak, bu karakteristiğin tersini karşılayacak, yani uzamsal spektrumu beyazlatacak şekilde davrandığı ortaya konmuştur (Atick, et. al., 1992).

Retinal ön filtrelemenin hareket algılama açısından belki de en önemli özelliği de bu beyazlatma işlemidir. Retinanın renk işleme gibi bir çok görüntü işleme algoritması koştugu bilinmesine rağmen bu tezde sadece hareket algılamayla alakalı yönleri ele alınmıştır.

Şekil 2.11’de de görüldüğü gibi retinanın ‘Outer Plexiform’ denilen dış katmanı bir uzam-zamansal bant geçiren filtre gibi davranır. Böylece uzam-zamansal kenarlar daha da belirginleştirilmiş olur. Alçak frekanslar için ön filtreleme $1/|\tilde{w}_s|^\alpha$ karakteristiğini karşılayacak şekilde davranırken yüksek frekanslar için gürültüyü süzecek şekilde davranır.

2.4 Sonuç

Sonuçta (2.10) ve (2.53) eş denklemleri hareketli görüntülerin enerjilerinin bir düzlem üzerinde bulunduğu ve bu düzlemin, hareketli görüntünün hız vektörleriyle orantılı olarak dönmekte olduğu anlaşılmaktadır.

Seçilen hız ayarlı filtreler ise yine filtre parametreleriyle ($\tilde{v}=(v_{x0}, v_{y0})^T$) orantılı olarak uzam-zamansal domende dönmektedir. Bu tip hız ayarlı filtreler (2.23) denklemiyle tanımlıdır. Yönelimli olan bu filtreler aslında bir tür uzam-zamansal karakteristiği ortaya çıkarmak için kullanılır. Literatürde ‘Feature Extraction’ olarak bilinen özellik çıkarma işleminde ‘hız’ özelliği çıkarılmaya çalışılmaktadır.

Tanımlanan hız ayarlı filtreler ile bu filtreyi gerçeklemeyi sağlayan analog devre yapısı vermiştir. Bu analog devre yapısı asimetrik yayılım ağıdır ve asimetrik bağlantıları hız ayarlı olmasını sağlamaktadır. Bu ağ yapısında giriş görüntüsünün hızı HAF’ın ayarlı olduğu hıza ne kadar yakın olursa o kadar yüksek çıkış gücü elde edilir. Bu iki hız birbirine eşit ise maksimum çıkış hızı elde edilir.

Sunulan bu asimetrik yapı tipi Hücresel Sinir Ağlarıyla (CNN) (Chua, et. al., 1988a), (Chua, et. al., 1988b) kolaylıkla gerçekleştirilebilir türündendir

Retinal ön filtrelemede ise $w_x, w_y, w_t=0$ noktası süzülür ve atılır. Bundan dolayı $w_t=-v_x w_x - v_y w_y$ düzlemi belirginleşmiş olur. Yani (2.11) denklemini sağlayan bir çözüm elimine edilmiş olur. Ayrıca retinal ön filtreleme, doğal hareketli görüntüler için uzamsal frekans karakteristiğini karşılayacak şekilde davranmaktadır. Dolayısıyla da retinal ön filtrelemeden geçmiş bir doğal bir hareketli görüntünün uzamsal güç spektrumu sabit olarak kabul edilebilmektedir (Torralba, et. al., 1999a).

Retinanın bant geçiren karakteristiğiyle hareket algılamasının yanı sıra yüksek frekanslı gürültüleri süzme, uzam-zamansal kenar belirginleştirme gibi özellikleri de mevcuttur. Bu şöyle açıklanabilir: Fotoreseptörler, gelen ışık yoğunluğu bilgisinin uzam-zamansal ortalamasını alarak yüksek frekanslı gürültü bileşenlerini süzer. Yatay hücreler ise bipolar hücreler ile birlikte bir uzam-zamansal yüksek geçiren filtre özelliği gösterir. Bu da uzam-zamansal kenar belirleme olarak yorumlanabilir. Bu alçak geçiren filtre ile bu yüksek geçiren filtrenin çarpımı ise retinanın 'Outer Plexiform' da denilen ve fotoreseptörler, yatay hücreler ve bipolar hücrelerden oluşan dış kısmını modeller.

Retinanın bu bant geçiren modelinde yatay fotoreseptörler ve yatay hücreler, her biri ayrı ayrı lineer Hücresel Sinir Ağlarıyla (Cellular Neural Networks) modellenebilmektedir (Chua, et. al., 2002), (Chua, et. al., 1988b). (2.9) denklemi de bir CNN denklemidir.

3. HAREKET KESTİRİMİ İÇİN BİR ANALOG AĞ MODELİ

Bu bölümde bahsedilecek olan analog ağ, Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Bu analog ağ modeli kabaca dört kısımdan oluşmaktadır: Retinal ön filtreleme, hız ayarlı filtreler, her bir filtre için çıkışın ortalama yerel gücünün kestirimi ve hız kestirimi. Bahsedilecek analog ağ Torralba ve Herault tarafından sunulmuştur ve hız kestirimi için farklı bir modeldir (Torralba et. al 1999a), (Torralba et al 1997).

Sunulan bu modelde önce giriş işareti retinal ön filtrelemeye tabi tutulmaktadır. Retinal ön filtrelemede işlenen hareketli görüntü, eğer doğal bir görüntü ise uzamsal spektrumu beyazlatacak, zamansal kenarları ise belirginleştirecek şekilde davranmaktadır. Literatürde bir çok retinal ön filtreleme devresi bulunmaktadır. Bunlardan bir kısmı analog VLSI devresi olarak (Harrison, et. al., 2001), (Boahen, et. al., 1991), (Mead et. al., 1988) bir kısmı ise CNN devresi olarak sunulmuştur (Balya, et. al., 2002).

Analog ağ’ın ikinci bölümünde ise birden fazla hız ayarlı filtre kullanılmaktadır. Düşük hızlarda hareket eden cisimler için iyi sonuç veren hız ayarlı filtrelerden 1. bölümde bahsedilmiştir.

Üçüncü kısımda bir kare alıcı ve alçak geçiren bir uzamsal filtre ile çıkışın yerel ortalama gücü kestirilmeye çalışılmaktadır.

Dördüncü ve son kısımda bir ‘shunting inhibition’ mekanizması kullanılarak ayrı hızlara ayarlanmış filtrelerin ortalama yerel çıkış güçleri karşılaştırılarak hız kestirimi yapılmaktadır.

3.1 Hız Ayarlı Filtre’ye Hareketli Görüntü Girişi

(2.23) denkleminde Hız Ayarlı Filtre’nin uzam-zamansal frekans cevabı verilmiştir. $\tilde{v}_0$ hızına ayarlı bir filtreye bu hızdan farklı sabit bir $\tilde{v} = (v_x, v_y)^T$ hızıyla hareket eden giriş uygulanırsa:

$$H_{v0}(\tilde{w}_s, w_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2 |\tilde{w}_s|^2 + j\tau(-v_x w_x - v_y w_y + v_{0x} w_x + v_{0y} w_y)} \quad (3.1)$$

HAF, hareket eden bir girişin varlığı durumunda $G(\tilde{\mathbf{w}}_s) = H_{v_0}(\tilde{\mathbf{w}}_s, -\tilde{\mathbf{v}}^T \tilde{\mathbf{w}}_s)$ (bkz (2.21)) şeklindedir. (3.1) yeniden düzenlenirse:

$$G(\tilde{\mathbf{w}}_s) = \frac{1}{1 + \gamma^2 |\tilde{\mathbf{w}}_s|^2 + j\tau \Delta \tilde{\mathbf{v}}^T \tilde{\mathbf{w}}_s} \quad (3.2)$$

elde edilir. Bu denklemde $\Delta \tilde{\mathbf{v}} = \tilde{\mathbf{v}}_0 - \tilde{\mathbf{v}} = |\Delta \tilde{\mathbf{v}}|(\cos \beta, \sin \beta)^T$ değeri ayarlanmış hız büyüklüğü ile giriş hızı arasındaki farktır. Bu filtre $\Delta \tilde{\mathbf{v}}$ yönünde yönelimli bir uzamsal filtredir (Torralba, 1999b). $\Delta \tilde{\mathbf{v}}=0$ olduğunda bu filtre simetrik özelliklere sahiptir ve yönelimsizdir. $|\Delta \tilde{\mathbf{v}}|$ değeri arttıkça bu filtrenin, β açısı yönünde bant genişliği düşmeye başlar. Bunun sonucu olarak da çıkışın gücü düşer.

Ortalama çıkış gücü:

$$P(\Delta \mathbf{v}) = \int \Gamma_e(\tilde{\mathbf{w}}_s) |G(\tilde{\mathbf{w}}_s)|^2 d\tilde{\mathbf{w}}_s \quad (3.3)$$

şeklindedir. Çıkışın ortalama gücünün $\Delta \tilde{\mathbf{v}}$ 'nin bir fonksiyonu olacağı açıktır. (3.2) filtresi, bir uzamsal filtre olarak düşünülecek olursa $\Delta \tilde{\mathbf{v}}=0$ olduğu zaman en yüksek uzamsal bant genişliğine sahip olacaktır. Bunun sonucu olarak da $\Delta \tilde{\mathbf{v}}=0$ olduğu zaman çıkışın ortalama gücü maksimum olacaktır.

Çıkışın ortalama gücünün maksimize olduğu bir diğer olay ise $\Delta \tilde{\mathbf{v}}$ 'nin sıfırdan farklı fakat, $\Delta \tilde{\mathbf{v}}^T \tilde{\mathbf{w}}_s = 0$ olduğu zamandır. Bu olay, İngilizce fotoğraf makinalarındaki kamera açıklığı süresi anlamına gelen 'aperture' problemiyle alakalıdır. $\Delta \tilde{\mathbf{v}}^T \tilde{\mathbf{w}}_s = 0$ ise:

$$\Delta \tilde{\mathbf{v}}^T \tilde{\mathbf{w}}_s = |\Delta \tilde{\mathbf{v}}|(\cos \beta, \sin \beta) \cdot (w_x, w_y)^T = 0 \quad (3.4)$$

$$w_x = -w_y \tan \beta \quad (3.5)$$

Bu durumda 'aperture' problemi ortaya çıkar. Yukarıdaki denkleme bakıldığında giriş işareti tek yönlü spektral içeriğe sahip olduğu zaman bu problemin ortaya çıktığı görülür. Bunun nedeni şudur: Şekil 2.2'nin b) seçeneğinde hareket eden bir çizgi bulunmaktadır. Burada

çizginin hareket yönü tek yönlüdür ve yataydır. Çizgi yukarı doğru hareket etse bile bu hareket bileşeni algılanmayacak, sanki yukarı yönde hiç hareket etmiyor gibi görünecektir. Giriş görüntüsünün tek yönlü içeriğe sahip olduğu durumlarda bu, 'aperture' problemi, görüntünün hangi yöne hareket ettiğinin tam olarak kestirilemeyeceğinden mevcut bulunacaktır. Ya da hareket eden sonlu bir çizgiye küçük bir aralık içinde bakıldığında bu çizgi sanki tek yönlü bir içeriğe sahipmiş gibi görünür ve gerçek hareket vektöründen farklı bir hareket vektörüyle hareket ediyormuş gibi görünür.

Kısacası giriş görüntüsünün değişiminin olduğu doğrultu HAF'ın ayarlı olduğu hıza ortogonalse, yani yönelimin doğrultusu HAF'ın ayarlı olduğu hızla aynı doğrultudaysa, çıkışın gücü maksimum olur. 'Aperture' problemi bir sonraki kısımda ayrıntılarıyla ele alınacaktır.

3.1.1 Tek Boyutlu HAF'ın Uzamsal Darbe Cevabı

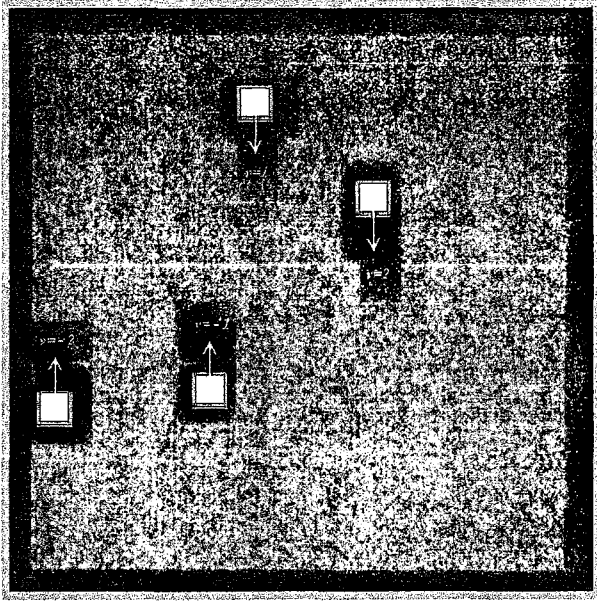
Şekil 3.1'de bir HAF'ın girişine hareketli bir görüntü verilmiş ve onun ürettiği çıkış gözlenmiştir. Sadece tek bir uzamsal boyut ele alınarak (3.2) denkleminde verilen uzamsal filtrenin eşdeğer darbe cevabının yaklaşıklığı bulunabilir. Bu filtrenin uzamsal darbe cevabı bulunabilir (bkz. (2.21) denklemi):

$$g(x) = F^{-1} \{H_{v_0}(w_x, -v_x w_x)\} \quad (3.6)$$

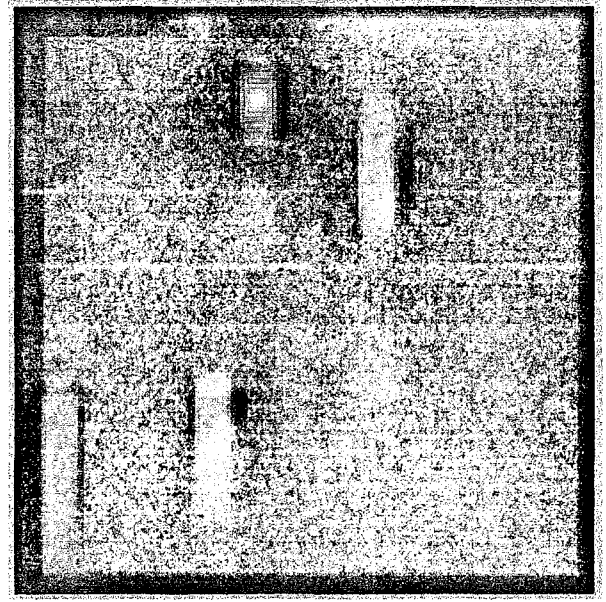
Eşdeğer uzamsal HAF için çıkış şu şekilde yazılabilir (Torralba, 1999b):

$$s(x - v_x t) = e(x - v_x t) \otimes g(x) \quad (3.7)$$

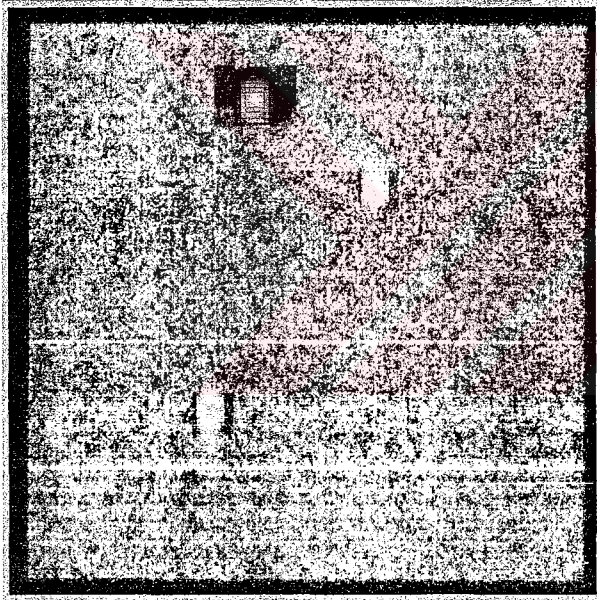
Burada $\otimes$ uzamsal konvolüsyonu temsil etmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus şudur: $g(x)$ fonksiyonu v_x hızıyla hareket eden Dirac darbesine karşı üretilen darbe cevabıdır. Bu darbe cevabı şu şekildedir (Torralba, 1999b):



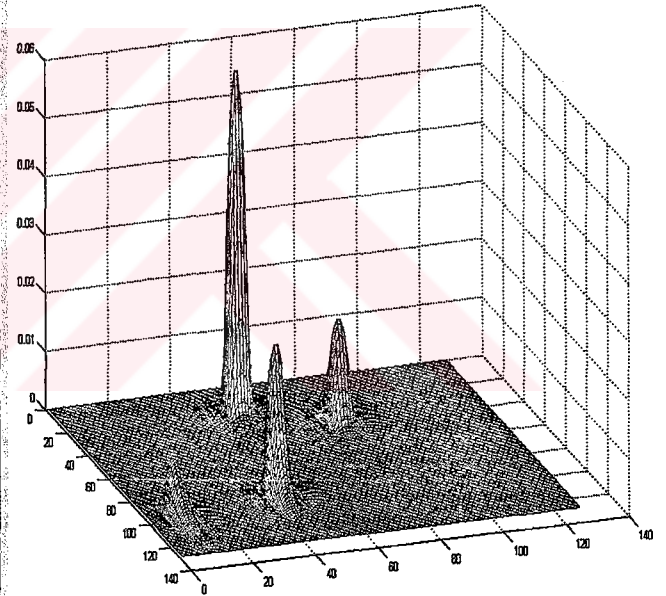
a)



b)



c)



d)

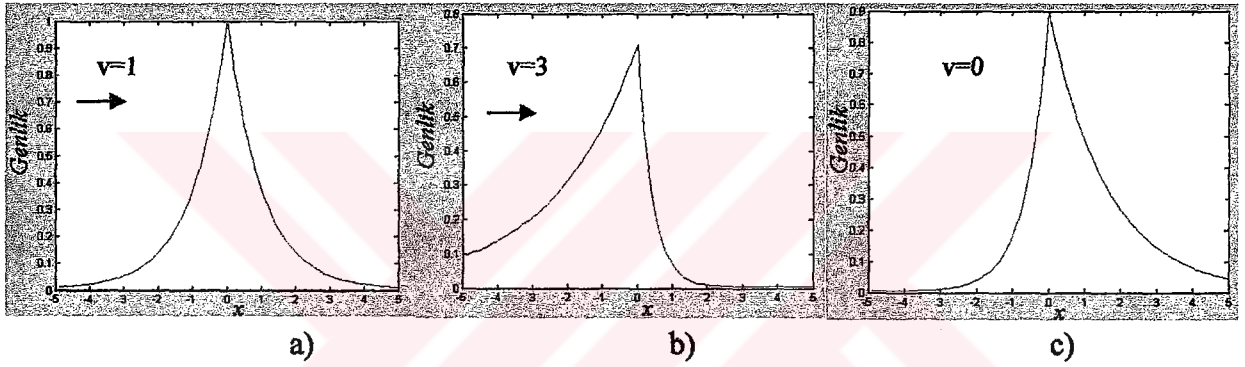
Şekil 3.1 Değişik hızlarla hareket eden bir kaç noktaya sahip bir giriş görüntüsünün bir Hız Ayarlı Filtreden çıkışı. Görsellik açısından a), b) ve c) seçeneklerindeki görüntüler 0 ve 1 arası normalize edilmiştir. a) Giriş görüntüsü. b) $v_{0x}=0$ ve $v_{0y}=1$ hızına ayarlı bir HAF'tan çıkışı. Her bir noktanın bulanıklaşması o cismin ayarlanan hızdan farklı bir hızda hareket ettiğini göstermektedir. c) Çıkışın karesi. d) Çıkışın karesinin üç boyutlu grafiği ve gerçek genlik değerleri.

$$g(x) = \frac{1}{\gamma \sqrt{1 + \tau^2 (v_0 - v_x)^2 / 4\gamma^2}} \begin{cases} e^{p_1 x}, x < 0 \\ e^{-p_2 x}, x \geq 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

Burada p_1 ve p_2 değerleri (Torralba, 1999b):

$$p_1 = \frac{1}{\gamma} \left(\tau(v_0 - v_x) / 2\gamma + \sqrt{\tau^2 (v_0 - v_x)^2 / 4\gamma^2 + 1} \right) \quad (3.9)$$

$$p_2 = \frac{1}{\gamma} \left(-\tau(v_0 - v_x) / 2\gamma + \sqrt{\tau^2 (v_0 - v_x)^2 / 4\gamma^2 + 1} \right)$$



Şekil 3.2 $v_0=1$ hızına ayarlı bir HAF'ın değişik hızlarla hareket eden Dirac darbelerine cevabı.

a) $v_x=1$ hızıyla hareket eden bir Dirac. b) $v_x=3$ c) $v_x=0$.

Şekil 3.2'de, (3.7) denkleminde verilen tek boyutlu bir Hız Ayarlı Filtre'nin değişik hızlarla hareket eden girişlere karşı ürettiği uzamsal darbe cevabı gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere $v_x=v_0$ olduğunda filtrenin çıkışının şekli simetriktir ve çıkışın gücü en yüksek değerine ulaşır. Aynı uzamsal frekans karakteristiğine sahip hareketli iki görüntüden v_0 hızına yakın hızda hareket eden görüntünün filtre çıkışında üreteceği ortalama güç daha yüksek olacaktır. $|v_0-v_x|$ değeri büyüdükçe çıkışın genliği ve ortalama gücü düşmeye başlar. Bu genlik ve ortalama güç değeri ne kadar düşerse $|v_0-v_x|$ değeri o kadar yüksektir. Hız kestirimi yapılırken bundan faydalanılır. $|v_0-v_x|$ 'in yönünü ise Şekil 3.2.b ve Şekil 3.2.c'den de görüldüğü gibi çıkışın şekli belirler. Örneğin, kabaca söylemek gerekirse, (v_0-v_x) negatifse Şekil 3.2.c'deki gibi, pozitifse Şekil 3.2.b'deki gibi bir çıkış görülür.

3.1.2 İki Adet Hız Ayarlı Filtre İle Hız Bileşen Kestirimi

Bu bölümde iki adet zıt yöne ayarlı HAF'ın çıkış güçlerini kullanarak giriş hızının bileşenleri kestirilmeye çalışılacaktır. Hız bileşenleri kestirilmeye çalışılırken giriş hızıyla alakalı olan ölçüm, girişin uzamsal biçiminden ve ışık yoğunluğu bilgisinden bağımsız olmalıdır. HAF'ın çıkışı her ne kadar giriş işaretinin hızına bağlı olsa da konvolüsyon operatörünün lineerliğinden dolayı giriş işaretinin uzamsal biçimine ve ışık yoğunluğu bilgisine de bağlıdır (Torralba, 1999b). Çıkışın gücü hesaplanırsa yapılan ölçüm uzamsal biçimden ve ışık yoğunluğu bilgisinden bağımsız olabilir. Bunun nedeni ise uzamsal integrasyondur:

$$P = \iint s^2(x, y, t) dx dy \quad (3.10)$$

Burada $s(x, y, t)$ HAF'ın çıkışıdır. Basitlik amacıyla önce tek boyutlu bir HAF'ın çıkışı ele alınsın. Retinal ön filtrelemeden sonra düz bir güç spektrumuna, $\Gamma_e(f_x) = \Gamma$ sahip olduğu farzedilirse (2.22) kullanılarak:

$$P = \int \Gamma_e(f_x) |G(f_x)|^2 df_x = \Gamma \int |G(f_x)|^2 df_x = \Gamma \int |g(x)|^2 dx \quad (3.11)$$

Yukarıdaki denklemin son kısmı Parseval teoremi kullanılarak elde edilebilir. Burada $g(x)$, (3.8) denkemiyle verilmiş olan v_0 hızına ayarlı tek boyutlu bir HAF'ın v_x hızıyla hareket eden bir Dirac darbesine karşı ürettiği uzamsal darbe yanıtıdır. (3.8) ve (3.9) denklemleri (3.11)'de yerine yazılırsa (Torralba, 1999b):

$$P = \frac{\Gamma}{\gamma^2 (1 + \tau^2 (v_x - v_0)^2 / (4\gamma^2))} \frac{P_1 + P_2}{2P_1P_2} = \frac{\Gamma}{2\gamma \sqrt{1 + (v_x - v_0)^2 / (\Delta v^2)}} \quad (3.12)$$

Burada $\Delta v^2 = (4\gamma^2) / \tau^2$ sabiti filtrenin hız seçiciliğiyle alakalı bir parametredir. Görüldüğü üzere güç ifadesi giriş hızıyla v_0 hızı arasındaki farkın bir fonksiyonudur. v_0 , HAF'ın bir parametresi olduğuna göre ve diğer parametreler de birer sabit olduğuna göre çıkışın gücü girişin hızının fonksiyonudur denilebilir.

İki boyutlu HAF filtre için çıkışın gücü analitik olarak hesaplanamamaktadır. $\tilde{v}_0 = (v_{x0}, v_{y0})^T$ hızına ayarlı bir HAF için çıkışın yerel ortalama gücü yaklaşık olarak (Torralba, et. al., 1999a):

$$P(\tilde{v} - \tilde{v}_0) \approx \frac{\Gamma}{\pi\gamma^2 \sqrt{8}} \frac{1}{\sqrt{1 + |\tilde{v} - \tilde{v}_0|^2 / \Delta v_0^2}} \quad (3.13)$$

Burada $\tilde{v} = (v_x, v_y)^T$ giriş işaretinin hızıdır. Bu yaklaşıklıkta hatanın %5 oranında kaldığı nümerik olarak sağlanabilir. $\Delta v_0^2 = 8\gamma^2 / \tau^2$ sabiti filtrenin hız seçiciliğiyle alakalıdır ve P fonksiyonunun şeklini belirler. Örneğin küçük Δv_0^2 değeri keskin bir yükseliş vermektedir.

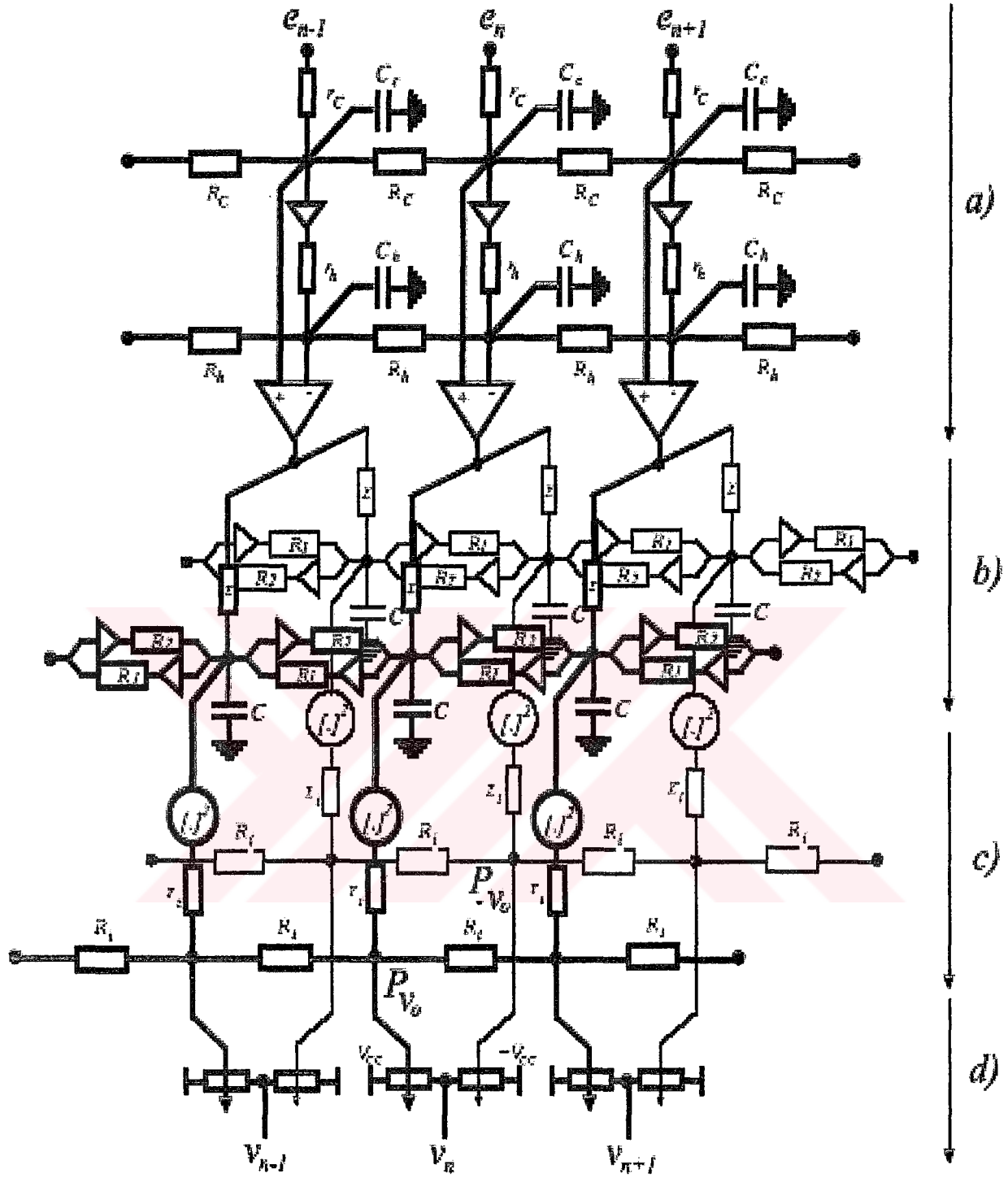
3.1.3 Shunting Inhibition Mekanizması

Şekil 3.3'te HAF'larla hız kestirimi için gerekli olan devre şemasının tamamı verilmiştir. Bu devre şemasının c) kısmında HAF'ın çıkışı önce bir kare alıcıdan geçmektedir. Daha sonra da alçak geçiren bir direnç ağından geçmektedir. Alçak geçiren bu direnç ağı düşük uzamsal frekanslar için bir integratör devresi olarak çalışmaktadır (bkz. (2.46) ve (2.47)).

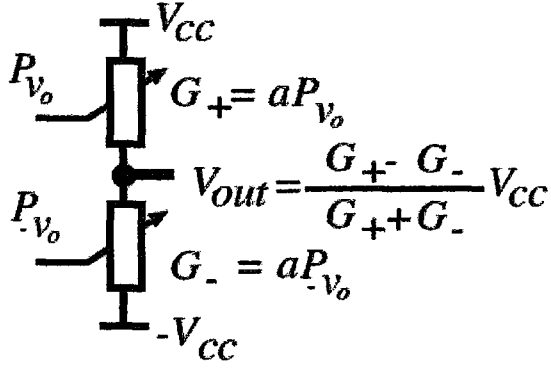
Şekil 3.3'de verilen hız kestirimi algoritmasının şemasında, Şekil 3.3.c'de görülen kare alıcı ve alçak geriren integratör devresi yerel ortalama güç almaya yarar. HAF çıkışının karesi alınır ve bunun da integrali alınarak (3.10) gerçekleştirilmeye çalışılır. Şekil 3.3.c'de ise 'shunting inhibition' mekanizması kullanılarak birbirine zıt hızlara ayarlı HAF'ların yerel ortalama çıkış güçleri karşılaştırılır ve hız kestirimi için daha basit bir yaklaşım sağlanır.

$v_0 = |v_0|(\cos\theta, \sin\theta)^T$ ve $-v_0$ hızlarına ayarlı iki adet HAF filtresinin çıkışı hız bileşenini ölçmek için bir kare alıcıdan, daha sonra bir integratör devresinden daha sonra da bir 'shunting inhibition' mekanizmasından geçer. θ yönündeki hız bileşeni 'shunting inhibition' mekanizması kullanılarak kestirilmektedir. G_+ uyarıcı bağlantısı v_0 hızına ait güç bileşeni ile orantılıdır. G_- bastırıcı bağlantısı ise bastırıcı bağlantıdır ve $-v_0$ hızına ayarlı filtrenin çıkış gücüyle orantılıdır (Şekil 3.4). Çıkış düğümündeki gerilim:

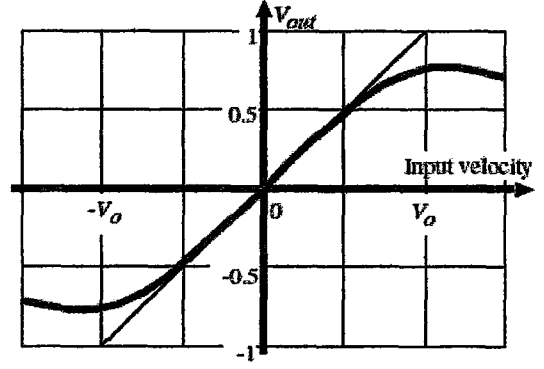
$$V_{out} = \frac{G_+ - G_-}{G_+ + G_-} V_{cc} = \frac{P_{v0} - P_{-v0}}{P_{v0} + P_{-v0}} V_{cc} \quad (3.14)$$



Şekil 3.3 Hız kestirimi algoritmasının tek boyutlu olanının diyagramı. a) Retinal ön filtreleme. b) İki adet hız ayarlı filtre. Birisi v_0 diğeri ise $-v_0$ hızına ayarlıdır. c) Filtre çıkışının karesini alıp daha sonra bu çıkışı rezistif bir analog ağ ile filtreleyerek güç integratörü. d) 'Shunting inhibition' mekanizması ile hız kestirimi.



a)



b)

Şekil 3.4 ‘Shunting inhibition’ mekanizması. a) Gösterim şekli ve giriş çıkış ilişkisi. b) Mekanizmaya HAF çıkışı verilmesi durumunda çıkış ile giriş hızı arasındaki ilişki (Torralba, 1999b).

Burada V_{cc} sabit besleme gerilimi, V_{out} ise çıkış gerilimidir. Pay değeri hızla orantılıyken payda değeri normalizasyon görevini üstlenmektedir. Pay ve payda değerleri (iki boyutlu için) (3.13) kullanılarak yerine yazılırsa:

$$V_{out} = \frac{\frac{\Gamma}{\pi\gamma^2\sqrt{8}} \frac{1}{\sqrt{1+|\tilde{v}-\tilde{v}_0|^2/\Delta v_0^2}} - \frac{\Gamma}{\pi\gamma^2\sqrt{8}} \frac{1}{\sqrt{1+|\tilde{v}+\tilde{v}_0|^2/\Delta v_0^2}}}{\frac{\Gamma}{\pi\gamma^2\sqrt{8}} \frac{1}{\sqrt{1+|\tilde{v}-\tilde{v}_0|^2/\Delta v_0^2}} + \frac{\Gamma}{\pi\gamma^2\sqrt{8}} \frac{1}{\sqrt{1+|\tilde{v}+\tilde{v}_0|^2/\Delta v_0^2}}} V_{cc} \quad (3.15)$$

Gerekli sadeleştirmeler yapılırsa:

$$V_{out} = \frac{\sqrt{1+|\tilde{v}+\tilde{v}_0|^2/\Delta v_0^2} - \sqrt{1+|\tilde{v}-\tilde{v}_0|^2/\Delta v_0^2}}{\sqrt{1+|\tilde{v}+\tilde{v}_0|^2/\Delta v_0^2} + \sqrt{1+|\tilde{v}-\tilde{v}_0|^2/\Delta v_0^2}} V_{cc} \quad (3.16)$$

Yukarıdaki denklem lineer olmayan bir denklemdir. Bu denklem, Şekil 3.4.b’de de görüldüğü gibi düşük hızlar için lineer sayılabilecek bir bölgede çalışmakta, hız arttıkça da nonlineer bölgeye girmektedir. Tabii ki düşük hızlarda lineer bölgede çalıştığı durumlar incelenecektir ve nonlineer bölgeye giresi istenmeyen bir durumdur.

Taylor serilerinde $\sqrt{1+x} \approx 1+x/2$ yaklaşıklığı yapılabilmektedir. Düşük hız değerleri için bu (3.16)'ya uygulanırsa:

$$V_{out} = \frac{\left(1 + \frac{((v_x + v_{0x})^2 + (v_y + v_{0y})^2)}{2\Delta v_0^2}\right) - \left(1 + \frac{((v_x - v_{0x})^2 + (v_y - v_{0y})^2)}{2\Delta v_0^2}\right)}{\left(1 + \frac{((v_x + v_{0x})^2 + (v_y + v_{0y})^2)}{2\Delta v_0^2}\right) + \left(1 + \frac{((v_x - v_{0x})^2 + (v_y - v_{0y})^2)}{2\Delta v_0^2}\right)} \quad (3.17)$$

elde edilir. Gerekli düzenlemelerden sonra:

$$V_{out} = \frac{\tilde{v}^T \tilde{v}_0}{\Delta v_0^2 + |\tilde{v}_0|^2 + |\tilde{v}|^2} V_{cc} \quad (3.18)$$

elde edilir. Fakat gerçekte yüksek $\tilde{v}$ hızları için Taylor serilerinde bu terimin yüksek mertebeden terimleri de ortaya çıkacaktır. Bu da (4.9) denkleminde işin içine katılacak olursa (Torralba, 1999b):

$$V_{out} = \frac{\tilde{v}^T \tilde{v}_0}{\Delta v_0^2 + |\tilde{v}_0|^2 + O(|\tilde{v}|^2)} V_{cc} \quad (3.19)$$

$|\tilde{v}| < |\tilde{v}_0|$ olduğu durumda V_{out} değeri Şekil 3.4.b'de de görüldüğü üzere giriş hızına lineer olarak bağlıdır. Burada $O(|\tilde{v}|^2)$ giriş hızının yüksek mertebeden değerleridir. Düşük giriş hızları için $O(|\tilde{v}|^2)$ sıfıra gidecektir. Bu yaklaşıklık kullanılarak:

$$v_\theta = \frac{\tilde{v}^T \tilde{v}_0}{|\tilde{v}_0|} = |\tilde{v}| \cos(\theta - \alpha) \quad (3.20)$$

Burada v_θ , θ yönündeki giriş hızıdır. θ 'nın değişik değerleri için kestirilen hız değerleri bir dairenin üzerinde gezinir. Düşük giriş hızları için (3.19) ve (3.20) kullanılarak:

$$v_\theta = \left(\frac{\Delta v_0^2 + |\tilde{v}_0|^2}{|\tilde{v}_0|} \right) \frac{V_{out}}{V_{cc}} \quad (3.21)$$

elde edilir. Yukarıdaki denklemden de görüldüğü gibi v_0 , V_{out} değerine lineer olarak bağlıdır. Düşük hızlar için yapılan bu yaklaşımların geçerli olduğu durumlarda Şekil 3.4'de görülen lineer bölgede çalışılmakta ve V_{out} 'un değerine bakılarak oldukça yüksek doğrulukta hız kestirimleri yapılabilmektedir.

$|\tilde{v}| \geq |\tilde{v}_0|$ değerleri için paydadaki $O(|\tilde{v}|^2)$ değerinden dolayı V_{out} değeri sıfıra doğru düşmeye başlayacaktır (bkz. (3.19)). Şekil 3.4.b'den de görüldüğü gibi bu durumda nonlineer karakteristik $|\tilde{v}| \geq |\tilde{v}_0|$ için hataya neden olacaktır. Bu durumda (3.20) ve (3.21) geçerli olmayacaktır.

Şimdiye kadar yapılan işlemler ile hız bileşeninin tek yöndeki bileşeni kestirilmektedir. Giriş hız vektörünün iki boyutlu değerini vermek için hız bileşeninin iki ortogonal yönde kestirilmesi yeterli olacaktır. Bu da, dört adet HAF'ın $\tilde{v}_0 = |\tilde{v}_0|(\cos \theta, \sin \theta)^T$, $\theta = \beta, \beta + \pi/2, \beta + \pi$ ve $\beta + 3\pi/2$, ($\beta \in \mathbb{R}$) gibi birbirine ortogonal yönlerde seçilmesi yeterli olur. Şekil 3.3, tek boyutlu hız kestirimi için gerekli olan analog devreyi eksiksiz vermektedir. Doğal görüntüler üzerine yapılan simülasyon sonuçları bu yöntemin basitliğine karşın oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir (Torralba, 1999b).

3.1.4 Yerel Çıkış Gücü Kestirimi

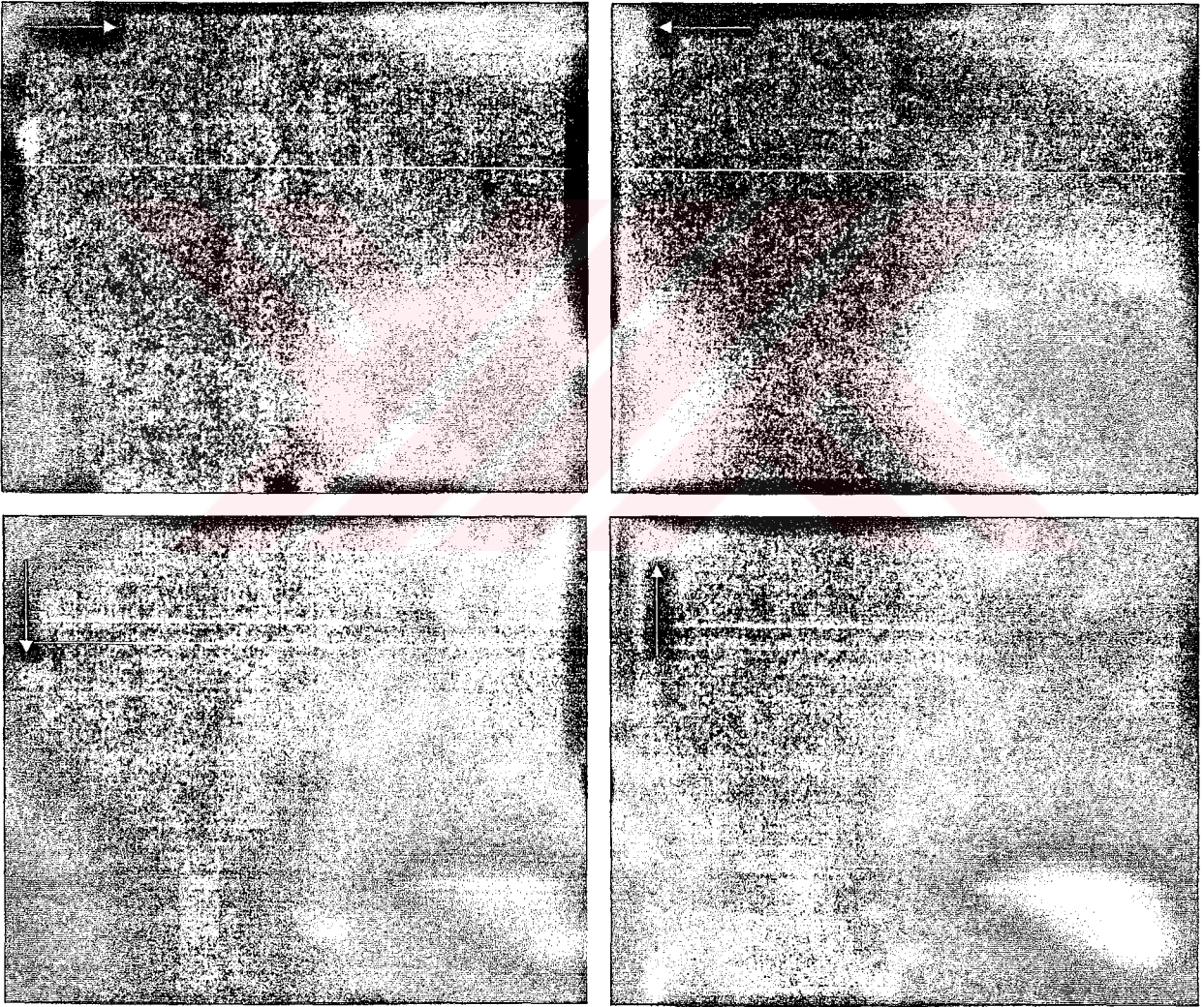
Bölüm 1'de hareketin temel kuralı anlatılırken görüntünün sabit bir hızla ve sabit bir yöne hareket ettiği varsayılmıştı. Hareketin hızı ve yönü her zaman sabit olmayabilir, çünkü birden fazla cisim aynı görüntü içinde birbirinden farklı hızlarla ve farklı yönlerde hareket edebilirler. Hareketli görüntüde, hız vektörlerinin değişimine karşı olumlu sonuç alınabilmesi için yerel çıkış gücünün hesaplanması gerekir. Her bir HAF'ın yerel gücünü kestirmek için yeterince büyük bir alan üzerinde yerel integrasyonu gerekir.

İntegrasyon penceresi, 'aperture' problemini azaltmak için büyük olmalıdır. Yani aslında integrasyon penceresinin büyüklüğü hareket eden cisme bakıldığındaki 'aperture' olayını temsil eder. Pencere büyüklüğü küçültülürse bütün hareket vektörleri görülebilmeye karşın önemli bilgiler kaybedilir. Pencere büyüklüğü büyütülürse de yumuşatılmış hız vektörleri elde edilir, fakat küçük cisimlerin hareketi algılanamaz (Torralba, 1999b).



a)

b)



c)

Şekil 3.5 Ünlü ‘Hamburg Taxi’ hareketli görüntüsünün $(128) \times (128) \times (32)$ ’lik bir bölümü için yerel ortalama güç kestirimi. (görsellik açısından görüntü 0 ile 1 arası normalize edilmiştir. a) Orijinal görüntünün ilk karesi. b) Orijinal görüntünün son karesi. c) $0, \pi/2, \pi$, ve $3\pi/2$ derecelere $[(v_{x0}=3, v_{y0}=0), (v_{x0}=-3, v_{y0}=0), (v_{x0}=0, v_{y0}=3)$ ve $(v_{x0}=0, v_{y0}=-3)$

hızlarına ayarlı] ait HAF’ların yerel ortalama güç kestirimleri.

$\gamma_i^2 = r_i/R_i$ değeri integrasyon penceresinin büyüklüğünü kontrol etmektedir. (Torralba, 1999b). Bu uzamsal filtrenin -3dB uzamsal bant genişliği ise $W = (3\pi\gamma_i)^{-1}$ 'dir (Torralba et. al., 1999a) Buradan da görüldüğü gibi γ_i değerini azaltmak integratör devresinin bant genişliğini ve dolayısıyla integrasyon aralığını küçültmek demektir. γ_i değerini arttırmak da bant genişliğini ve dolayısıyla da integrasyon aralığını büyületecektir.

İntegrasyon aralığını HAF'ın darbe cevabından yüksek tutmak gerekir. Aksi takdirde HAF'ın çıkışının önemli olabilecek bir kısmı alçak geçiren bu filtreden geçemez ve yanlış sonuç elde edilebilir. Bunu önlemek için $\gamma_i \gg \gamma$ seçilmelidir. Şekil 3.5'te hızları değişik yönlere ayarlı HAF'ların kestirilen yerel ortalama çıkışları görülmektedir.

Denklem (3.10)'da görülen uzamsal integrasyon, kapasitörsüz bir analog rezistif ağla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3.c). Bu uzamsal alçak geçiren rezistif ağa HAF'ın çıkışının karesi verilmiştir. Her bir pikseldeki yerel güç, ait olduğu düğümdeki gerilim değeridir

Retinal ön filtrelemenin spektrumu yeterice düz hale getiremediği bazı durumlarda veya gürültünün etkin olduğu bazı durumlarda kestirilen hareket vektörleri gerçek hareket vektöründen farklı olabilir. Örneğin, kestirilen hareket vektörü hareket eden cisimden büyük olabilir, veya görüntü hareket etmezken gürültü nedeniyle bazı hız vektörleri ortaya çıkabilir. Zamansal türev alan bir mekanizma ile hız vektörünün hareket eden cisimden büyük olması veya gürültü nedeniyle yalancı hız vektörlerinin ortaya çıkması engellenebilir (Torralba, 1999b). Zamansal türev işlemi yüksek geçiren karakteristiğinden dolayı $w_i=0$ düzlemini atar ve bir kapasite yardımıyla gerçekleştirilebilir.

3.2 'Aperture' Problemi Ve Bu Problemin Azaltılması

Bazı durumlarda hareket kestirimi için kullanılabilecek bu basit yöntem doğru hareket vektörlerini vermeyebilir. Bunun sebebi, retinal ön filtrelemeden sonra dahi düz bir spektruma sahip olamayacak bazı görüntülerdir. Bu durumun uç bir örneği olarak tek yönlü uzamsal karakteristiğe sahip, yani tek bir yöne yönelimli görüntüler verilebilir. Bu durumda (3.5) denkleminde de görüldüğü gibi bir yöndeki uzamsal frekans diğer yöndeki uzamsal frekansın belli bir katı şeklindedir. Yani tek bir yöne yönelimli görüntülerin uzamsal frekans karakteristiği de tek bir yöne yönelimlidir. Bu durumda retinal ön filtreleme, en iyi ihtimalle, sadece tek bir yönde spektrumu beyazlatacak, diğer yönde ise beyazlatma söz konusu

olmayacaktır. Bu iyi ihtimal göz önüne alınırsa ve bu yöndeki güç spektral yoğunluğu sabit bir Γ değeri olduğu farzedilirse çıkış gücü tam olarak:

$$P(\tilde{v} - \tilde{v}_0) = \frac{\Gamma \pi^2 \gamma}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{1 + (\mathbf{v}_n - \tilde{v}_0^T \tilde{\mathbf{n}})^2 / \Delta v_0^2}} \quad (3.22)$$

Yukarıdaki denklemde $\mathbf{v}_n = \mathbf{v}^T \tilde{\mathbf{n}}$ giriş hızı, $\tilde{v}_0 = (v_{x0}, v_{y0})^T$ HAF'ın ayarlı hızı ve $\tilde{\mathbf{n}} = (\cos\beta, \sin\beta)^T$ da yönelimli giriş görüntüsünün yönelimine dik olan, yani giriş görüntüsündeki değişimin yönündeki birim vektördür. Yukarıdaki denklem, (3.14)'te yerine konulursa:

$$V_{out} = \frac{\sqrt{1 + (\mathbf{v}_n + \tilde{v}_0^T \tilde{\mathbf{n}})^2 / \Delta v_0^2} - \sqrt{1 + (\mathbf{v}_n - \tilde{v}_0^T \tilde{\mathbf{n}})^2 / \Delta v_0^2}}{\sqrt{1 + (\mathbf{v}_n + \tilde{v}_0^T \tilde{\mathbf{n}})^2 / \Delta v_0^2} + \sqrt{1 + (\mathbf{v}_n - \tilde{v}_0^T \tilde{\mathbf{n}})^2 / \Delta v_0^2}} V_{cc} \quad (3.23)$$

Bu denklemde düşük hızlar için Taylor yöntemini kullanarak yaklaşıklık yapılırsa (Torralba, 1999b):

$$V_{out} = \frac{|\tilde{v}_0| v_n \cos(\theta - \beta)}{\Delta v_0^2 + |\tilde{v}_0|^2 \cos^2(\theta - \beta) + O(v_n^2)} V_{cc} \quad (3.24)$$

elde edilir. Burada θ , HAF'ın ayarlı olduğu hızın yönü; β ise yönelimli giriş görüntüsünün yönelimine dik olan, yani giriş görüntüsündeki değişimin yönüdür. v_n , β yönündeki hız bileşeni, $O(v_n^2)$ ise v_n 'in yüksek mertebeden terimlerini temsil etmektedir. $O(v_n^2)$ değeri v_n 'in küçük değerleri için sıfır olarak alınabilir.

θ 'nın değişik değerleri için kestirilen hız değerleri bir elipsin üzerinde gezinecektir. Bu da doğaldır, çünkü sadece θ 'nın β 'ya eşit olduğunda (3.24)'ün (3.19)'a eşit olması ve kestirimin doğru olması beklenir. Yani yönelimli giriş görüntüsünün yönelimi doğrultusunda bir hız bileşeninin kestirilmesi beklenemez. Bunun nedeni de şudur: Yönelimi doğrultusunda hareket eden bir hareketli görüntü, görüntüdeki ışık yoğunluğu bilgisini değiştirmez. Bu nedenle de birinci bölümde anlatılan optik akışın temel kuralları geçerli olmaz.

Kısacası yönelimli görüntülerde, sadece yönelime dik olan doğrultuda hız bileşeni kestirilebilir. Bu da demektir ki, görüntünün bazı bölgelerinde yönelim olmamasına rağmen

küçük integrasyon penceresi alınrsa sanki yönelim varmış gibi doğru hız bileşenleri kestirilmeyecektir. ‘Aperture’ problemi de denen bu problemi azaltmak için integrasyon penceresi büyük tutulmalıdır. Gerçekte ‘aperture’ problemini engellemek için her görüntü için farklı büyüklükte integrasyon penceresi alınması gerekir. Çok büyük integrasyon penceresi alınrsa da küçük cisimlerin hareketleri görünmeyecektir ve iki adet birbirine yakın hareket eden cisim varsa bunların hareketleri birbirine karışacaktır. Bu nedenle bir önceki bölümde de söylendiği gibi zamansal türev işlemiyle hareket vektörlerinin büyüklüğü sağlama yoluyla elde edilebilir.

Hareket eden görüntü hareket eden tek bir sinüzoidten oluşuyorsa gösterilebilir ki V_{out} değeri aynı anda hem görüntünün uzamsal frekansına hem de hızına bağlıdır. Burada sadece hız değeriyle ilgilenildiği için bu, istenmeyen bir durumdur. Fakat sinüzoidal giriş, doğal görüntülerle ilgilenildiğinde pek de karşılaşılmayan bir olaydır.

İki adet HAF ile yapılan bu kestirimin karşılaştığı bu gibi sorunlar sıfır hızına ayarlı üçüncü bir HAF kullanılarak hafifletilebilir. Bu üçüncü filtrenin kullanılması kestirimin lineerliğini arttırmaktadır (Torralba, 1999b). Torralba ve Herault tarafından (Torralba, et. al., 1999a) ortaya atılan bu yöntem ‘aperture’ problemini hafifletici ve sinüs dalgalarında frekansa bağıllığı ortadan kaldıracak şekilde davranmaktadır. HAF’ların çıkışının daha karmaşık bir kombinasyonu olan bu yöntem VLSI uygulamaları için gerçekleştirilmesi daha zor olsa da hız vektörlerinin kestiriminde doğruluğu önemli ölçüde arttırmaktadır (Torralba et. al., 1997).

Bu yöntemde ‘shunting inhibition’ mekanizması kullanılmamakta onun yerine şu yöntem ileri sürülmektedir (Torralba, et. al., 1997):

$$v_{\theta} = \frac{|\tilde{v}_0|}{2} \frac{P_{v_0}^2 - P_{-v_0}^2}{P_{v_0}^2 + P_{-v_0}^2 - 2P_{v_0}^2 P_{-v_0}^2 / P_0^2} \quad (3.25)$$

v_{θ} , $\tilde{v}^T = |\tilde{v}|(\cos \alpha, \sin \alpha)$ giriş görüntüsünün θ yönündeki hız bileşenidir. P_0 sıfır hızına ayarlı bir HAF’ın çıkış gücüdür. (3.13) denkleminin geçerli olduğu koşullar altında bu denklem (3.25)’te yerine konulursa:

$$v_{\theta} = \frac{|\tilde{v}_0|}{2} \frac{\left(\frac{\Gamma}{\pi \gamma^2 \sqrt{8}} \right)^2 \left(\frac{1}{1 + |\tilde{v} - \tilde{v}_0|^2 / \Delta v_0^2} - \frac{1}{1 + |\tilde{v} + \tilde{v}_0|^2 / \Delta v_0^2} \right)}{\left(\frac{\Gamma}{\pi \gamma^2 \sqrt{8}} \right)^2 \left(\frac{1}{1 + |\tilde{v} - \tilde{v}_0|^2 / \Delta v_0^2} + \frac{1}{1 + |\tilde{v} + \tilde{v}_0|^2 / \Delta v_0^2} - 2 \frac{\left(\frac{1}{1 + |\tilde{v} - \tilde{v}_0|^2 / \Delta v_0^2} \frac{1}{1 + |\tilde{v} + \tilde{v}_0|^2 / \Delta v_0^2} \right)}{\frac{1}{1 + |\tilde{v}|^2 / \Delta v_0^2}} \right)} \quad (3.26)$$

Yukarıdaki denklem düzenlenirse:

$$v_{\theta} = \frac{|\tilde{v}_0|}{2} \frac{(1 + |\tilde{v} + \tilde{v}_0|^2 / \Delta v_0^2) - (1 + |\tilde{v} - \tilde{v}_0|^2 / \Delta v_0^2)}{(1 + |\tilde{v} + \tilde{v}_0|^2 / \Delta v_0^2) + (1 + |\tilde{v} - \tilde{v}_0|^2 / \Delta v_0^2) - 2(1 + |\tilde{v}|^2 / \Delta v_0^2)} \quad (3.27)$$

Görüldüğü gibi Δv_0^2 gidecek ve:

$$v_{\theta} = \frac{|\tilde{v}_0|}{2} \frac{|\tilde{v} + \tilde{v}_0|^2 - |\tilde{v} - \tilde{v}_0|^2}{|\tilde{v} + \tilde{v}_0|^2 + |\tilde{v} - \tilde{v}_0|^2 - 2|\tilde{v}|^2} \quad (3.28)$$

Gerekli sadeleştirmeler yapılırsa:

$$v_{\theta} = \frac{|\tilde{v}_0|}{2} \frac{4\tilde{v}^T \tilde{v}_0}{2|\tilde{v}|^2 + 2|\tilde{v}_0|^2 - 2|\tilde{v}|^2} \quad (3.29)$$

Elde edilecektir. Yeniden düzenlenirse:

$$v_{\theta} = \frac{\tilde{v}^T \tilde{v}_0}{|\tilde{v}_0|} = |\tilde{v}| \cos(\theta - \alpha) \quad (3.30)$$

Burada $\tilde{v}^T = |\tilde{v}|(\cos \alpha, \sin \alpha)$ giriş görüntüsünün hızı, $\tilde{v}_0^T = |\tilde{v}_0|(\cos \theta, \sin \theta)$ HAF'ın ayarlı olduğu hızdır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken husus bu denklemin geçerliliğinin (3.13) denkleminin geçerliliğine bağlı olduğudur. (3.13) denkleminin geçerliliği giriş gürültüsü ve giriş görüntüsünün retinal ön filtrelemeden geçtikten sonra gerçekten beyaz bir spektruma

sahip olup olmadığıyla alakalıdır. Ayrıca (3.13) denklemi $|\tilde{v}| - |\tilde{v}_0|$ değeri büyüdükçe daha iyi bayaslanır (Torralba, 1999b). $|\tilde{v}| > |\tilde{v}_0|$ olduğu zaman HAF'ların ortalama çıkış güçleri düşer ve ölçümler gürültüden etkilenmeye ve yaklaşıklıklar geçerli olmamaya başlar.

v_θ değeri değişik yönlerde hesaplanırsa geometrik yerinin bir çember olduğu görülür. Bu sonuç, iki adet HAF kullanılarak yapılan sonuçla aynıdır, fakat burada paydadaki $O(|\tilde{v}|^2)$ ve $\Delta v_0^2 = 8\gamma^2/\tau^2$ terimleri kalkmış ve daha iyi bir lineerlik sağlanmıştır.

Tek boyutlu giriş görüntüleri için bu yöntem daha iyi bir sonuç vermektedir. Bu yöntem kullanılırsa (4.15) denkleminin paydasındaki $O(|\tilde{v}|^2)$ ve Δv_0^2 kalkacak ve sonuç olarak:

$$v_\theta = \frac{v_n}{\cos(\theta - \beta)} \quad (3.31)$$

bulunacaktır. Polar koordinatlarda bu denklem bir doğru denklemdir (Torralba, 1999b).

Giriş işareti $e(x,y)=\sin(w_0x)+A\sin(w_0y)$ şeklinde bir sinüzoid girdiğinde (2.29) ve (3.11) kullanılarak gösterilebilir ki çıkışın gücü:

$$P_{v_0} = \frac{1}{(1 + \gamma^2 w_0^2)^2 + \tau^2 (v_x - v_0 \cos(\theta))^2 w_0^2} + \frac{A^2}{(1 + \gamma^2 w_0^2)^2 + \tau^2 (v_y - v_0 \sin(\theta))^2 w_0^2} \quad (3.32)$$

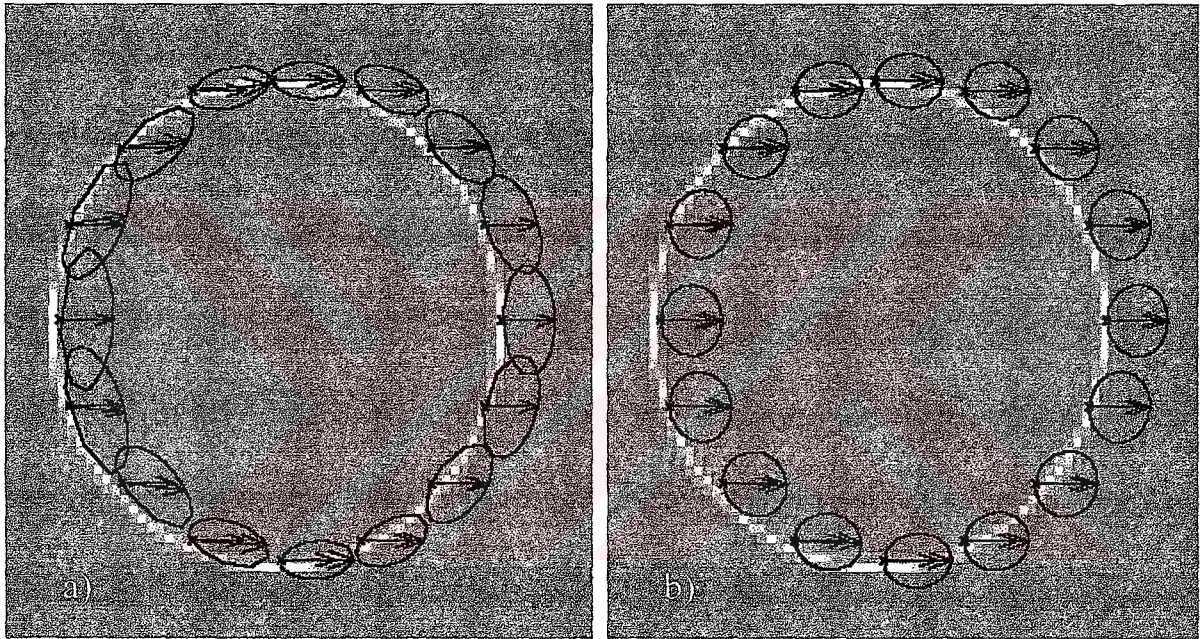
şeklinde. Bu durumda düşük uzamsal w_0 frekansı için v_θ :

$$v_\theta = \frac{\cos(\theta)v_x + A^2 \sin(\theta)v_y}{(1 - A^2)\cos^2(\theta) + A^2} \quad (3.33)$$

Yukarıdaki denklem polar koordinatlarda merkezi $(v_x/2, v_y/2)$ olan bir elipsin denklemdir (Torralba, 1999b). $A=1$ olduğu zaman bir çemberin denklemi, $A=0$ olduğu zaman da bir doğru denklemi elde edilmektedir. Düşük w_0 frekansı için yapılan bu yaklaşıklıkta (3.33) denkleminin w_0 frekansına bağlı olmadığı görülür. Bu da hız kestirimi için kullanılan (3.25)

denkleminin ‘shunting inhibition’ mekanizmasından daha iyi sonuçlar verdiğinin bir diğer göstergesidir.

Şekil 3.6’te ağı doğru hareket eden bir çemberin değişik yönlerde kestirilen hız alanı görülmektedir. Küçük bir integrasyon alanı seçildiğinde ‘aperture’ problemi açıkça ortaya çıkmaktadır. Bu problem özellikle hareket yönüne hemen hemen paralel olan, çemberin altında ve üstünde daha büyük bir bozucu etkiye sahiptir. Büyük integrasyon alanı seçildiğinde ise ‘aperture’ problemi önemli ölçüde azaltılmıştır. Yine de en yüksek hata oranı hareketin olduğu yöne hemen hemen paralel olan çemberin alt ve üst kesimlerindedir.



Şekil 3.6 Hareket eden bir çember için elde edilen hareket vektörü kestirimlerinin polar koordinatlarda çizimi. (Hem gerçek hem de kestirilen hız görsellik açısından büyük çizilmiştir.) a) Küçük bir integrasyon aralığı için yapılan kestirimlerde kestirimler bir elips çizilmiştir. b) Büyük integrasyon aralığı alınarak yapılan kestirimde daha doğru sonuçlar elde edilmiş, daireye daha yakın kestirimler elde edilmiştir. (Torralba, 1999b)

3.3 Sınırlar

HAF’ların uzam-zamansal darbe cevabı (2.29) denkleminin ters Fourier dönüşümü alınarak yaklaşık olarak bulunabilir. Bu uzam-zamansal darbe cevabı, pratikte, görüntünün (0, 0) koordinatındaki (genellikle ortadaki piksel seçilir) piksele zamansal bir Dirac uygulanması

sonucu ortaya çıkan uzay-zaman fonksiyonudur. Bu darbe cevabı yaklaşık olarak (Torralba, et. al., 1999a):

$$h_{v0}(\tilde{x}, t) \approx A(t) e^{-|\tilde{x}-\tilde{v}_0 t|^2 / \sigma^2(t)} U(t) \quad (3.34)$$

Bu denklemde $A(t) = e^{-t/\tau} / (4\pi\tau t)$, $\sigma^2(t) = 4\tau t / \tau$ ve $U(t)$ birim basamak fonksiyonudurlar. Bu yaklaşıklık düşük hıza ayarlı ve bant genişliği 0.2 devir/piksel'den küçük HAF'lar için geçerlidir.

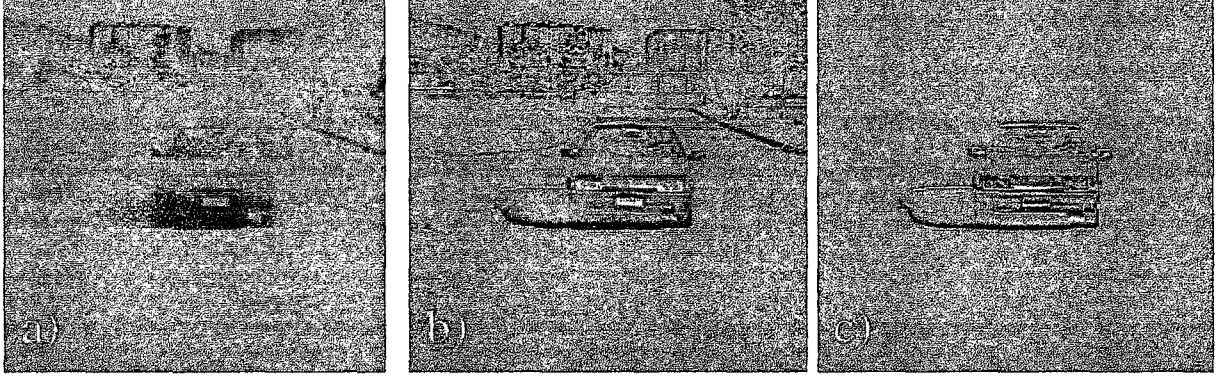
Buraya kadar anlatılanlarda (2.2) denkleminin sağlandığı varsayılmıştır. Bu varsayıma göre hareketli görüntü sabit bir yönde ve sabit bir hızda hareket etmelidir. Yine de bu algoritmanın geçerli olabilmesi için en azından integrasyon aralığında ve HAF'ın uzam-zamansal darbe cevabı süresince görüntü, sabit bir hızda ve yönde hareket etmelidir.

Fakat, kabaca söylemek gerekirse, hareket eden cismin sınırlarında iki adet hız bulunur. Yani bu sınırlarda güç, iki adet enerji düzlemi üzerinde dağılmıştır. Bu düzlemler:

$$\begin{aligned} w_t + \tilde{v}_1^T \tilde{w}_s &= 0 \\ w_t + \tilde{v}_2^T \tilde{w}_s &= 0 \end{aligned} \quad (4.26)$$

düzlemleridirler. Burada $\tilde{v}_1$ ve $\tilde{v}_2$ hızları sınırda var olan iki adet hız vektörleridir. Bu durumda, şimdiye kadar anlatılan bu algoritma sınırlarda iyi kestirimler vermekten uzaktır. Kısacası sınırlarda maksimum hata elde edilmesi beklenir.

Kullanılan bir çok uygulamada kamera hareketsizdir. Böyle uygulamalarda sınırlar $\tilde{w}_t = 0$ (arka plan) ve $w_t + \tilde{v}^T \tilde{w}_s = 0$ (cisim) enerji düzlemlerini içermektedir. Bu gibi bir durumda basit bir çözüm, ön filtrelemeye zamansal bir türev operatörü eklemektir (Torralba, 1999b). Zamansal türev yüksek geçiren karakteristiktir ve bir adet kapasite yardımıyla kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Türev operatörü $\tilde{w}_t = 0$ düzlemini süzüp atacaktır, böylece sabit kamera uygulamalarında iki düzlem arasında meydana gelen hatalardan kurtulmak mümkündür (Şekil 3.7). Bunun sayesinde çıkışın ortalama gücü sadece hareket eden cisimle alakalı olacak ve algoritma daha doğru sonuçlar vermeye başlayacaktır.



Şekil 3.7 a) Giriş görüntüsü. Bu görüntüde araba ve gölgesi hareket etmektedir. Arka plan hareketsizdir. b) Retinal ön filtreleme sonucu pipolar hücrelerin çıkışı. c) Zamansal türev.
(Torralba,1999b)

3.4 Sonuç

Bu bölümde hareket algılama için geliştirilmiş analog mimari ve algoritma tanıtılmıştır. Tanıtılan bu algoritma ve mimaride büyük ölçüde Torralba ve Hérault'un geliştirdiği (Torralba, 1999b), (Torralba et al., 1999a), (Torralba et. al., 1997) yapıya sadık kalınmış ve yine büyük ölçüde bu çalışmalardan alıntı yapılmıştır.

Şekil 3.3'de de görülen bu mimari yapı sayesinde giriş işaretinin uzamsal spektral içeriğinden bağımsız olarak hareketli görüntünün hız bileşenlerinin kestirilmesi için gerekli olan sistemde iki ve üç adet HAF kullanılarak nasıl sonuca gidildiği açıklanmıştır.

Bir önceki bölümde anlatılan retinal ön filtreleme sonucu doğal görüntüler için uzamsal frekans içeriği beyazlatılmış, böylece çıkışın ortalama gücü giriş işaretinin spektral içeriğinden bağımsız hale gelmiştir.

Daha sonra bir kare alıcı, basit bir uzamsal integratör devresi ve bir 'shunting inhibition' mekanizmasından faydalanılarak giriş görüntüsünün hızı kestirilmeye çalışılmıştır.

Ortaya çıkan sonuç şaşırtıcı şekilde giriş görüntüsünün hızı ve filtrenin ayarlanabilir parametrelerine bağlı olarak kestirilebilen giriş hızını vermektedir. En son olarak da giriş hızı kestirilirken ortaya çıkabilen 'aperture' problemi ve hareket eden cismin sınırlarında oluşabilecek hatalar tartışılmıştır.

Sonuç olarak tanıtılan bu yapı, analog VLSI uygulamaları için oldukça kolay şekilde gerçekleştirilebilir bir yapıdır. Bu yapı basit olmasına rağmen oldukça iyi sonuçlar vermekte, savunma sanayi ve robot uygulamaları için de (yerine göre) yeterli doğrulukta kestirimler yapmaktadır.



4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde nümerik simülasyon vasıtasıyla elde edilen sonuçlar verilecek ve bu sonuçlar üzerinde tartışılacaktır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.3'te verilen devre şemasının MATLAB® programı kullanılarak sayısal olarak çözümlenmesi sonucu bulunmuştur. Simülasyonların oldukça büyük bir kısmı Fourier domeninde yapılmıştır.

4.1. Simülasyon Sonuçları ve Değerlendirmeler

Kullanılan hız ayarlı filtrenin karakteristiği (2.35) denklemiyle verilmiştir. Bu denklemin Fourier dönüşümü olarak da (2.41) denklemi alınmıştır.

Türev işlemini karakterize etmek için:

$$\frac{ds_{n,m}(t)}{dt} \approx \frac{1}{\Delta t} (1.5s_{n,m}(t) - 2s_{n,m}(t - \Delta t) + 0.5s_{n,m}(t - 2\Delta t)) \quad (4.1)$$

olarak alınmıştır.

Şekil 4.1'de meşhur 'Hamburg Taxi' hareketli görüntüsünün simülasyon için kullanılan kısmı verilmiştir. Şekil 4.1'deki görüntüde hareketli beyaz taksi ok yönünde ilerlemektedir. Şekil 4.1.c'de ise görüntünün ilk çerçevesiyle son çerçevesi arasındaki fark gösterilmiştir. Burada hareket eden beyaz taksinin hareketi açık açık görünmesine rağmen hareket eden diğer aracın hareketi fazla belli olmamaktadır.

Şekil 4.2'de ise yine aynı görüntünün zamansal türevi görülmektedir. Zamansal türevde yine hareket eden taksi ve gölgesi açıkça görülmektedir. Yine Şekil 4.2'de gürültü nedeniyle ortaya çıkan ve sanki o bölgelerde hareket varmış izlenimi veren görüntü de görülmektedir. Yüksek frekanslı bu gürültü bileşenleri alçak geçiren bir filtre yardımıyla temizlenebilir. Retinal ön filtrelemeden geçtikten sonra bu yüksek frekanslı gürültü bileşenlerin süzülmesi beklenmektedir.

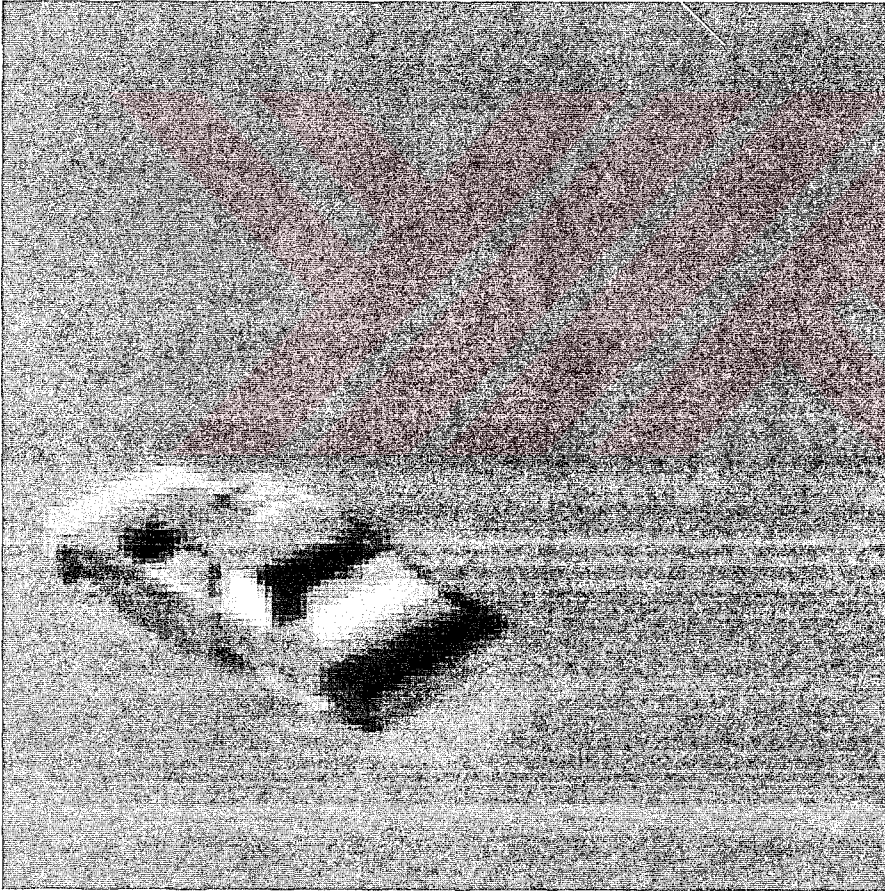
'Hambug Taxi' görüntüsünde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da bu görüntüde kameranın çok yavaş da olsa hareket ettiğidir. Hareket eden kamera, çok yavaş hareket etse de hız tayininde hatalara sebep olmaktadır.



a)



b)



c)

Şekil 4.1: 'Hamburg Taxi' hareketli görüntüsünün (128x128)'lik bir kısmı. a) Görüntünün ilk çerçevesi b) Görüntünün son çerçevesi. Hareket eden arabanın hareketinin yönü kırmızı ok ile gösterilmiştir. c) Görüntünün son çerçevesi ile ilk çerçevesinin farkı

Şekil 4.3'te ise aynı görüntünün zamansal türevi alındıktan sonra belli bir eşik değerinden geçirilmesi işleminden sonra elde edilen görüntü görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi gürültü süzölmüştür. Bu eşikten geçirme işlemi şöyle yapılmaktadır: eğer türevi alınmış görüntünün herhangi bir pikselinin mutlak değeri eşik değerinden büyükse o piksel '1', değilse '0' olarak alınmaktadır.



Şekil 4.2 Şekil 4.1'de görülen 'Hamburg Taxi' hareketli görüntüsünün 128x128x64'lük kısmının zamansal türevi.



Şekil 4.3 Şekil 4.2’de görülen zamansal türevi alınmış hareketli görüntünün belli bir eşik değerinden geçirilmiş hali.

4.2. Hız Kestirimi

Hız kestirimi için kullanılan HAF filtre parametreleri şunlardır: $|v_0| = \Delta v = 3\sqrt{2}$ olarak alınmıştır. İntegrasyon bölgesinin (bkz Şekil 3.3.c) uzay sabiti $\gamma_i = 100\gamma$ şeklinde alınmıştır (Burada γ HAF’ın uzay sabitidir). Şekil 4.4’te, (3.25) kullanılarak kestirilen v_θ gösterilmiştir. Şekil 4.5’te ise (3.14) kullanılarak elde edilen V_{out} değeri verilmiştir. Bu iki şekil için de $v_{x0} = -3$, $v_{y0} = -3$ olarak alınmıştır. x ve y yönleri şekillerde çizildiği gibidir. Şekil 4.6’da ve

Şekil 4.4'te görülen v_θ 'nın genliği, Şekil 4.7'de ise V_{out} 'un genliği üç boyutlu olarak çizilmiştir.

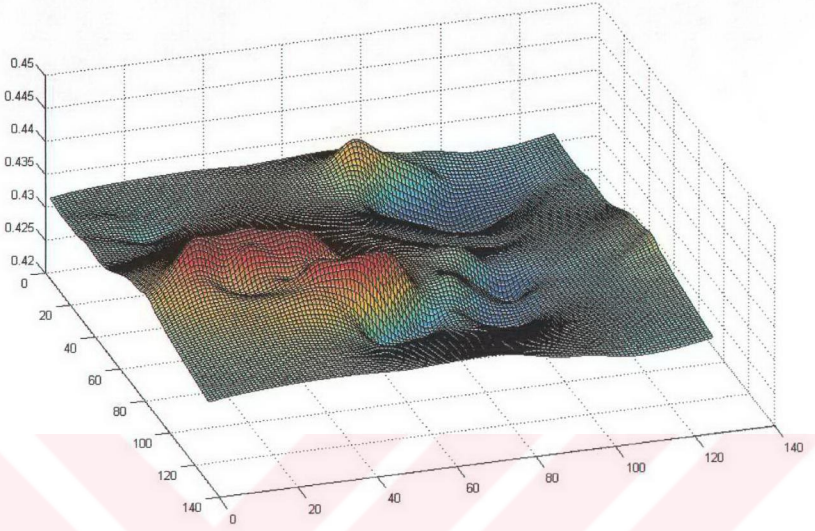
Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 birlikte karşılaştırıldığında görülür ki gerçekten de düşük giriş hızları için v_θ , V_{out} 'a lineer olarak bağlıdır.



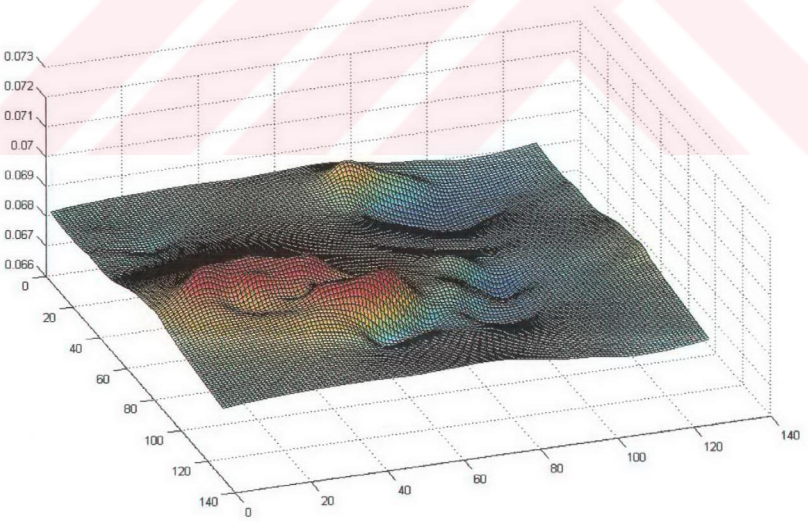
Şekil 4.4 (3.25) kullanılarak kestirilen v_θ (Görsellik açısından piksel değerleri $[+1 -1]$ arası normalize edilmiştir.).



Şekil 4.5 (3.14) kullanılarak elde edilen V_{out} (Görsellik açısından piksel değerleri $[+1 -1]$ arası normalize edilmiştir.).

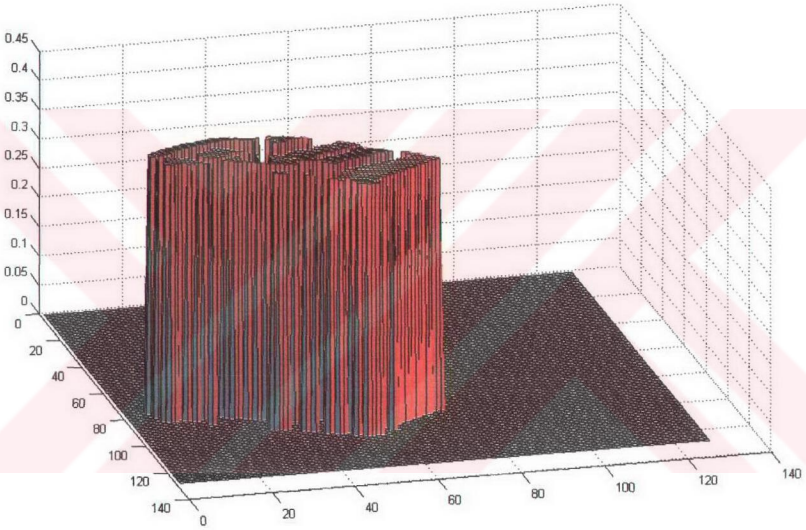


Şekil 4.6 Şekil 4.4'te gösterilen v_0 'nın genliğinin üç boyutlu grafiği.

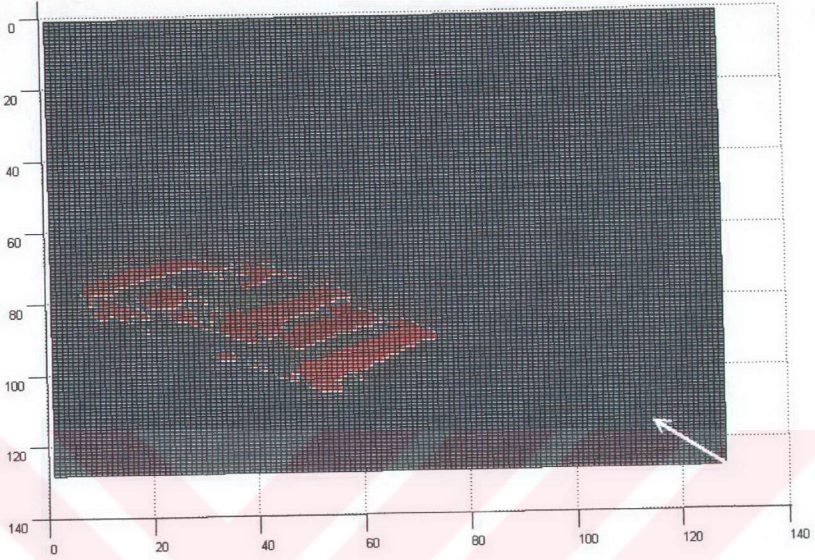


Şekil 4.7 Şekil 4.5'te gösterilen V_{out} 'un genliğinin üç boyutlu grafiği.

Bir önceki bölümde kestirilen hız vektör alanının hareketli cisimden büyük olabileceği anlatılmıştı. Bu gibi durumların nedeni, retinal ön filtrelemenin spektrumu yeterince beyazlatamamış olması ve/veya bir takım gürültüler olabilmektedir [Torralba]. Bu gibi durumlarda zamansal türev işlemiyle hareket eden cisimler belirlenebilir ve bu zamansal türev işlemi yardımıyla hareket eden cismin hareket vektörlerinin kendisinden büyük olması engellenebilir. Şekil 4.8'de v_0 'nın Şekil 4.3'te görülen zamansal türev'in belli bir eşikten geçirilmiş haliyle çarpımının üç boyutlu genlik diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.8 v_0 'nın Şekil 4.3'te görülen zamansal türev'in belli bir eşikten geçirilmiş haliyle çarpımının üç boyutlu genlik diyagramı.

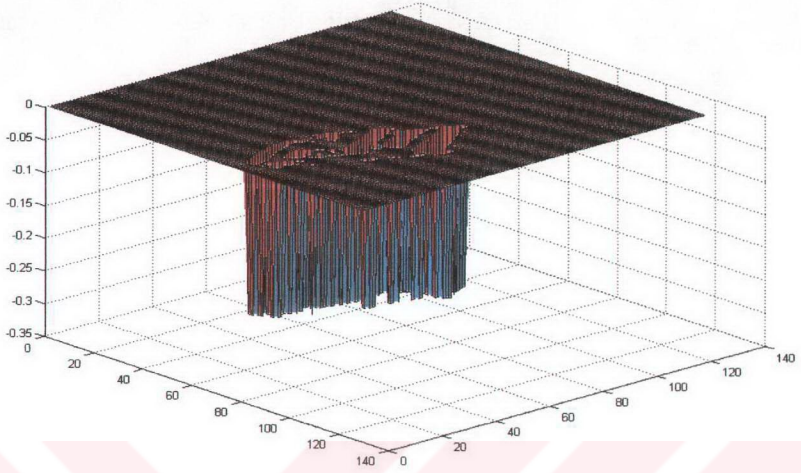


Şekil 4.9 Şekil 4.8'in üstten gösterilişi. Şekilde görülen beyaz ok, kestirilen hız bileşeninin yönünü göstermektedir.

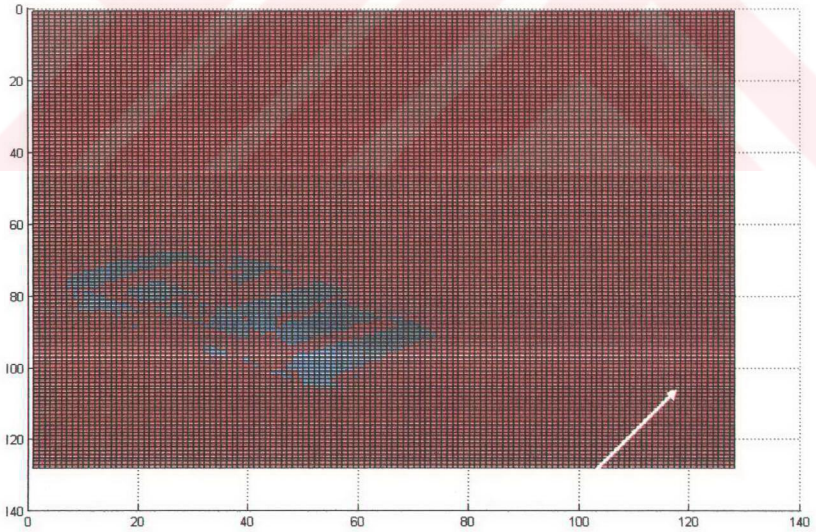
Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da görülen v_0 'nın kestirilmiş değerleri hareket eden cismin $y=x$ doğrultusundaki ve Şekil 4.9'daki beyaz ok ile gösterilen yöndeki hız bileşenidir. Bu yöndeki hız bileşenine ortogonal bir başka yönde hız bileşeni kestirimi yapılırsa gerçek hız kestirilebilir.

Şekil 4.9'daki ok yönünde, hareket eden cismin hız bileşeni yaklaşık olarak 0.44 olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.10'da ise HAF'ın ayarlı olduğu hızlar $v_0=(3, -3)^T$ ve $-v_0$ seçilmiş ve çıkış (v_0) elde edilmiştir. Burada ayalı olan hız bundan önce kullanılan hıza ($v_0=(-3, -3)^T$ hızına) ortogonaldır.



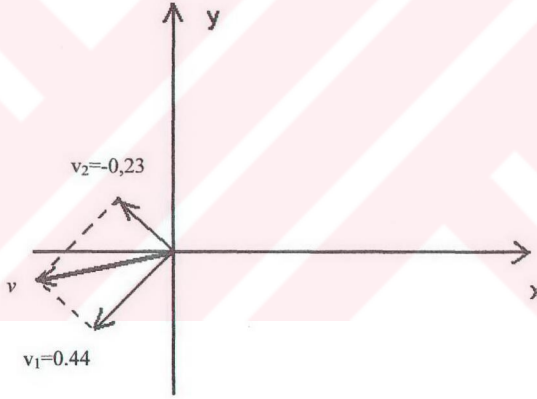
Şekil 4.10 HAF'ın ayarlı olduğu hızlar $v_0=(3,-3)^T$ ve $-v_0$ seçilmesi durumunda kestirilen v_0 değeri



Şekil 4.11 Kestirilen v_0 değerlerinin üstten görünüşü

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de de görüldüğü üzere kestirilen v_0 değeri yaklaşık olarak -0.23 olarak alınabilir. Şekil 4.11’de ise Şekil 4.10’da görülen üç boyurlu grafiğin üstten görünüşü verilmektedir. Beyaz ok ile gösterilen yön ise HAF’ın ayarlı olduğu yönü göstermektedir.

Şimdiye kadar yapılan işlemlerle hareket eden cismin iki ortogonal yönde kestirilen hız bileşenleri bulunmuştur. Bu hız bileşenleri kartezyen koordinatlarda yerlerine yerleştirilirse gerçek hızı bulunabilir. Şekil 4.12’de bu hız bileşenlerinin kartezyen koordinatlarda yerlerine yerleştirilmeleri ve toplanması görülmektedir. Bu işlemde ilk olarak bulunan hız bileşeni 0.44 ve ikinci bulunan ve birincine ortogonal olan hız bileşeni -0.23 toplanmıştır.



Şekil 4.12 Kartezyen koordinatlarda hız bileşenlerinin toplanması

Tukarıdaki şekilde yapılan toplama işlemi, v_1 ve v_2 hız bileşenlerinin x ve y eksenleriyle 45°'lik açı yapması sebebiyle kolaylıkla şöyle bulunabilir:

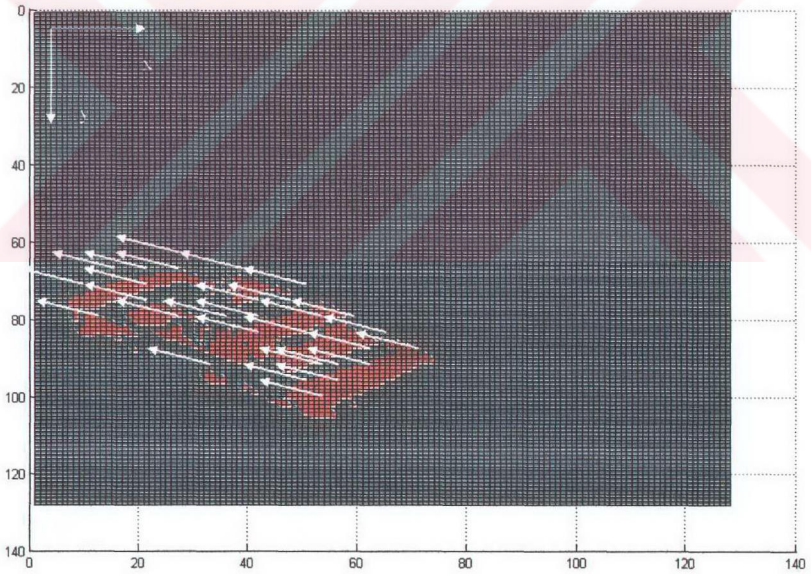
$$\vec{v} = \left(-\frac{0.44}{\sqrt{2}}\vec{u}_x - \frac{0.44}{\sqrt{2}}\vec{u}_y \right) + \left(-\frac{0.23}{\sqrt{2}}\vec{u}_x + \frac{0.23}{\sqrt{2}}\vec{u}_y \right) \quad (4.2)$$

$$\vec{v} = -\frac{0.67}{\sqrt{2}}\vec{u}_x - \frac{0.21}{\sqrt{2}}\vec{u}_y \quad (4.3)$$

Burada $\vec{u}_x$ ve $\vec{u}_y$, x ve y yönlerindeki birim vektörlerdir. Hız vektör alanı, zamansal türevi alınmış hareketli görüntünün belli bir eşik değerinden geçirilmiş hali üzerinde Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Yine aynı alan, orijinal fotoğrafın üzerinde ise Şekil 4.14'deki gibi gösterilmiştir. Şekil 4.12'deki hızın yönü ile Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'teki gösterilen hız vektörlerinin yönlerinin farklı olmasının nedeni, bu şekillerdeki x ve y yönlerinin birbirinden farklı olmasıdır. (4.3) denklemi şu şekilde de yazılabilir:

$$\vec{v} = |\vec{v}|(\cos \alpha, \sin \alpha)^T \quad (4.4)$$

Yukarıdaki denklemde $|\vec{v}|=0.4965$, $\alpha=1.0967\pi$ olarak bulunur.



Şekil 4.13 Hız vektör alanının, zamansal türevi alınmış hareketli görüntünün belli bir eşik değerinden geçirilmiş hali üzerinde gösterilişi



Şekil 4.14 Hız vektör alanının hareketli görüntünün bir çerçevesi üzerinde gösterilişi

4.3. Sonuç

Bu bölümde iki adet HAF filtre ve bir adet türev alıcı kullanılarak Hamburg Taxi hareketli görüntüsünün bir kısmı için hız vektörü alanı elde edilmiştir. Türev alıcı kullanılmasının sebebi bir önceki bölümde de ifade edildiği üzere, hız vektörü alanının hareket eden cisimden büyük olmasıdır. Hız vektörü alanının hareket eden cisimden büyük olmasının sebebi de, yine bir önceki bölümde ifade edildiği üzere, yerel integrasyon penceresinin büyük olması ve bir takım gürültü nedeniyledir. Yapılan simülasyonun büyük ölçüde Fourier domeninde olması da bunun sebepleri arasında sayılabilir.

Burada beyaz Taksi 0.5 piksel/çerçeve hızı ile hareket etmektedir. Bulunan sonuç ise 0.4965 piksel/çerçeve'dir. Görüldüğü gibi yapılan bu simülasyonda kestirilen hızın mutlak değerinde oluşan hata oranı çok düşük çıkmıştır. Fakat Şekil 4.14'te de görüldüğü gibi hız vektörlerinin yönü konusunda yüksek hata ortaya çıkmıştır. Torralba (Torralba 1999b) yaptığı simülasyon sonuçlarında sırasıyla, 4 adet HAF ve bir komşuluk, 9 adet HAF ve bir komşuluk ve 9 adet HAF ile 2 komşuluk kullanarak çok iyi sonuçlar elde ettiğini bildirmiştir. Yine de yapılan bu simülasyonda hızın doğrultusu ve yönü büyük bir doğrulukla elde edilmiştir. Simülasyon için kullanılan program Ek 1'de verilmiştir.

Bir önceki bölümde verilen analog devre gerçek zamanlı çalıştığından dolayı yapılan simülasyon sonuçlarından çok daha iyi sonuç verecektir.

KAYNAKLAR:

Alleyson, D. ve Hérault, J. (1996), "Modèle de Rétine Bidimensionnel Pour la Traitement de la Couleur" ACTES Neurosciences et Sciences de l'ingénieur NSI, Mary-Le-Roi

Atick, J. ve Redlich A. (1992), "What Does the Retina Know About Natural Scenes?" Neural Computation, 4:196-210

Balya, D., Rekeczky, C. ve Roska, T. (2002) "A Realistic Mammalian Retinal Model Implemented on Complex Cell CNN Universal Machine" IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 2002, 4:161-164

Barron, J. L., Fleet D. J. ve Beauchemin, S. S. (1994), "Performances of Optical Flow Techniques" International Journal of Computer Vision, 12:43-77

Beaudot, W. (1994), "Le Traitement Neuronal de L'Information Dans la Rétine des Vertébrés" INGP Laboratory TIRF, Ph.D. Thesis, Grenoble-France

Belfor, R. A. F., Legendijk, R. L. ve Biemond J. (1993) "Subsampling of Digital Image Sequences Using Motion Information" Motion Analysis and Image Sequence Processing, In Sezan, M. I. and Legendijk ed., R. L., Kluwer Academic Press, Boston 1997, pp: 189-223

Boahen, A. K. ve Andreu, A. G. (1991), "A Contrast Sensitive Silicon Retina with Reciprocal Synapses", Advances in Neural Information Processing Systems 4, In Moody, J.E. and Lippmann R.P. ed., California

Chua, L. O. ve Roska, T. (2002), "Cellular Neural Networks and Visual Computing" Cambridge University Press, Cambridge.

Chua, L. O. ve Yang, L. (1988a), "Cellular Neural Networks: Theory" IEEE Transactions on Circuits and Systems, Oct. 1988, 35:1257-1272

Chua, L. O. ve Yang, L. (1988b), "Cellular Neural Networks: Theory" IEEE Transactions on Circuits and Systems, Oct. 1988, 35:1273-1290

Delbrück, T. (1993), "Silicon Retina with Correlation-Based, Velocity-Tuned Pixels" IEEE Transactions on Neural Networks, 4:529-541

Harrison, R. R. ve Koch C. (2001), "A Neuromorphic Analog Visual Motion Sensor for Real-World Robots" K-Lab Report, California Institute of Technology, California

Hérault, J. (1996), "A Model of Colour Processing in the Retina of Vertebrates. From Photoreceptors to Colour Opposition and Colour Constancy Phenomena" Neurocomputing, 12:113-129

Mallat, S. (2001), "A Wavelet Tour of Signal Processing" Academic Press, New York

Mead, C. (1989), "Analog VLSI and Neural Systems" Addison-Wesley Publishing Company, Reading-Massachusetts

Mead, C. ve Mahowald, M. A. (1988), "A Silicon Model of Early Visual Processing" Neural Networks, 1:91-97

Meyering, W. I., Gutierrez, M. A., Furie, S. S., Rebelo, M. S. ve Melo C. P. (2000) "Spatiotemporal Frequency Analysis Applied to Motion Detection" Proceedings of the 22nd Annual EMBS International Conference, 23-28 July, Chicago

Shi, B. E. (1996), "Spatio-Temporal Image Filtering with Cellular Neural Networks" IEEE International Conference on Neural Networks, June 1996, 3:1410-1415

Torralba A.B. ve Héroult (1997) "From Retinal Circuits to Motion Processing: A Neuromorphic Approach to Velocity" In Verleysen, M. ed. ESANN'97, Brüksel-Belçika, April 1997, pp.47-54

Torralba, A. B. ve Héroult, J. (1999a) "An Efficient Neuromorphic Analog Network for Motion Estimation" IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Special Issue on Bio-Inspired Processors and CNNs for Vision, February 1999, 46:269-280

Torralba A.B. (1999b) "Analogue Architectures for Vision: Cellular Neural Networks and Neuromorphic Circuits" INGP Laboratory TIRF, Ph.D. Thesis, Grenoble-Fransa

EKLER

Ek 1 Simülasyon için yazılan Matlab bilgisayar programı



Ek 1 Simülasyon için yazılan matlab bilgisayar programı

```
%-----+
%
%      ** Ana Program **
% Programın adı:vtf.m
% Bu program MATLAB için yazılmıştır.
% Not: vx0 ve vy0 hızları, HAF'ın ayarlı
%      olduğu hızlardır
%
%-----+
```

HareGor; %HareGor adlı program dışarıdan çağırılmaktadır.
%Bu program sayesinde hareketli görüntü girilmektedir.

m=1; n=1; t=1; %Bazı sabitler

Gc=0.9; Gh=10; Tc=1; Th=10; %Retinal ön filtreleme parametreleri
Gint=90000; Gvtf=9; Tvtf=2; %Yerel integratör ve HAF parametreleri

vx0=-3; vy0=3; %HAF'ın ayarlı olduğu hızlar
HAREGOR=fftn(hareGor, [128 128 64]); %Giriş hareketli görüntüsünün Fourier dönüşümü

for wt=0:pi/32:2*pi-pi/32
for wy=0:pi/64:2*pi-pi/64
for wx=0:pi/64:2*pi-pi/64

Hc(n,m,t)=1/(1+Gc*(4-2*cos(wx)-2*cos(wy))+... % (2.55) denklemindeki Hc
Tc*(3-2*exp(-i*wt)+0.5*exp(-2*i*wt)));

Hh(n,m,t)=1/(1+Gh*(4-2*cos(wx)-2*cos(wy))+... % (2.54) denklemindeki Hh
Th*(1.5-2*exp(-i*wt)+0.5*exp(-2*i*wt)));

HvtfP(n,m,t)=1/(1+Gvtf*(4-2*cos(wx)-2*cos(wy))+... %vx0 ve vy0 hızlarına
Tvtf*(1.5-2*exp(-i*wt)+... %ayarlı HAF
0.5*exp(-2*i*wt)+vx0*i*sin(wx)+vy0*i*sin(wy)));

HvtfN(n,m,t)=1/(1+Gvtf*(4-2*cos(wx)-2*cos(wy))+... % -vx0 ve -vy0 hızlarına
Tvtf*(1.5-2*exp(-i*wt)+... % ayarlı HAF
0.5*exp(-2*i*wt)-vx0*i*sin(wx)-vy0*i*sin(wy)));

Hvtf0(n,m,t)=1/(1+Gvtf*(4-2*cos(wx)-2*cos(wy))+... %Sıfır hızına ayarlı HAF
Tvtf*(1.5-2*exp(-i*wt)+0.5*exp(-2*i*wt)));

Htemp(n,m,t)=i*wt; %Zamansal türev alıcı

Hint(n,m,t)=1/(1+Gint*(4-2*cos(wx)-2*cos(wy))); %Yerel integratör

n=n+1;
end

```

n=1; m=m+1;

end

m=1; t=t+1;

end

Sret=HAREGOR.*(Hc-Hc.*Hh); %Retinal ön filtreleme çıkışı (Fourier Domeninde)

SvtfP=fft((real(ifftn(Sret.*HvtfP))).^2); %Kare alıcı çıkışı (Fourier domeninde)
SvtfN=fft((real(ifftn(Sret.*HvtfN))).^2); %Kare alıcı çıkışı (Fourier domeninde)
Svtf0=fft((real(ifftn(Sret.*Hvtf0))).^2); %Kare alıcı çıkışı (Fourier domeninde)

SintP=SvtfP.*Hint; %Yerel integratör çıkışı (vx0 ve vy0 hızına ayarlı HAF için)
SintN=SvtfN.*Hint; %Yerel integratör çıkışı (-vx0 ve -vy0 hızına ayarlı HAF için)
Sint0=Svtf0.*Hint; %Yerel integratör çıkışı (sıfır hızına ayarlı HAF için)

Pv0P=real(ifftn(SintP)); %Yerel integratör çıkışı (t domeninde)
Pv0N=real(ifftn(SintN)); %Yerel integratör çıkışı (t domeninde)
Pv00=real(ifftn(Sint0)); %Yerel integratör çıkışı (t domeninde)

Vout=(sqrt(vx0^2+vy0^2)/2).*... %((3.25) denkleminin gerçekleşmesi
    ((Pv0P.^2-Pv0N.^2)./...
    (Pv0P.^2+Pv0N.^2-...
    (2*Pv0P.^2.*Pv0N.^2./(Pv00.^2))));

Vout2=(Pv0P-Pv0N)./(Pv0P+Pv0N); %Shunting inhibition mekanizması çıkışı

stemp=real(ifftn(HAREGOR.*Htemp)); %Türev alıcı çıkışı (t domeninde)
stemp=stemp/(max(max(max(stemp)))); %Türev alıcı çıkışının normalize edilmesi

for n=1:64
    bw(:,n)=im2bw(abs(real(stemp(:,n))),0.22); %Bu çıkışın eşik değerinden geçirilmesi
end

bw=double(bw); %Double formatına geçilmesi

Vout3=Vout.*bw; %Eşik değerinden geçirilmiş türev alıcı çıkışının
                %kestirilen hız değerleriyle çarpımı
Vout4=Vout2.*bw; %Eşik değerinden geçirilmiş türev alıcı çıkışının
                %Shunting inhibition mekanizması çıkışıyla çarpımı

Sekiller; %Sekiller adlı program dışarıdan çağırılmaktadır.
          %Bu program sonucu şekiller görsel olarak çizilmektedir.

%-----+
%      Program burada bitmektedir.      |
%-----+

```

```
%-----+
%
%          ** Alt Program **
% Programın adı:HareGor.m
%
%-----+
```

```
ahmet=aviread('taxi.avi');           %Hamburg Taxi görüntüsünün okutulması
m=size(ahmet);                      %Bu görüntünün boyutlarının bulunması
m=m(1,2);                           %Görüntü uzunluğunun bir değere atanması
for n=1:m
    a=ahmet(1,n).cdata;
    hareGor(:,n)=double(a(:,1))+double(a(:,2))+double(a(:,3));
                                     %Bu döngü ile hareketli görüntü oluşturulmaktadır
end
hareGor=hareGor(20:180,70:200,:);   %Hareketli görüntünün bir kısmı kesilmektedir.
clear ahmet                         %Gereksiz bir ara değer silinmektedir.
```

```
%-----+
%          Program burada bitmektedir.
%-----+
```

```
%-----+
%
%          ** Alt Program **
% Programın adı: Sekiller.m
%
%-----+
```

```
figure, imshow(Pv0P(:,12),[],'notruesize');
title('v0 hizina ayarli HAF için yerel integrator cikisi (Gorsellik acisindan degerler [-1 +1] arasi normalize edilmistir);
```

```
figure, imshow(Pv0N(:,12),[],'notruesize');
title('v0 hizina ayarli HAF için yerel integrator cikisi (Gorsellik acisindan degerler [-1 +1] arasi normalize edilmistir);
```

```
waitforbuttonpress;
close all
```

```
figure, imshow(Vout(:,12),[],'notruesize');
title('(2.55) denkleminin cikisi (Gorsellik acisindan degerler [-1 +1] arasi normalize edilmistir);
```

```
figure, surf(Vout(:,12));
```

```
title('(2.55) denkleminin cikisi');
```

```
figure, imshow(Vout2(:,12),[],'hotruesize');  
title('Shunting inhibition cikisi (Gorsellik acisindan degerler [-1 +1] arasi normalize  
edilmistir)');
```

```
figure, surf(Vout2(:,:,12));  
title('Shunting inhibition cikisi');
```

```
waitforbuttonpress;  
close all;
```

```
figure, imshow(bw(:,12),[],'notruesize');
title('Zamansal turevi alinmis hareketli goruntunun belli bir esik degerinden gecirilmis hali.');
```

```
figure, surf(bw(:, :, 12));  
title('Zamansal turevi alinmis hareketli goruntunun belli bir esik degerinden gecirilmis hali.');
```

```
waitforbuttonpress;  
close all;
```

```
figure, imshow(Vout3(:,:,12),[], 'notruesize');  
title('(2.55) denkleminin cikisinin zamansal turevin belli bir esikten gecirilmis haliyle carpimi.  
(Gorsellik acisindan degerler [-1 +1] arasi normalize edilmistir));
```

```
figure, surf(Vout3(:,12));  
title('(2.55) denkleminin cikisinin zamansal turevin belli bir esikten gecirilmis haliyle  
carpimi.');
```

```
figure, imshow(Vout4(:, :, 12), [], 'notruesize');
title('Shunting inhibition cikisinin zamansal turevin belli bir esikten gecirilmis haliyle
çarpimi. Gorsellik acisindan degerler [-1 +1] arasi normalize edilmistir');
```

```
figure, surf(Vout4(:,12));  
title('Shunting inhibition cikisinin zamansal turevin belli bir esikten gecirilmis haliyle  
çarpimi.');
```

```

%-----+
%      Program burada bitmektedir.
%-----+

```

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 08.04.1981

Doğum yeri Adana

Lise 1991-1997
1997-1998

Ümraniye Anadolu Lisesi
Özel H. Kasımoğlu Lisesi (Burslu)

Lisans 1998-2002

İstanbul Teknik Üniv. Elektrik-Elektronik Fak.
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2002-2004

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme. Anabilim Dalı,
Haberleşme Programı

