

**DOĞADAN ESİNLENEN KOKU VE İKİLİ GÖRÜYE DAYALI
GERÇEK ZAMANLI BİR GÖMÜLÜ SİSTEM TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selman ERGÜNAY

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Elektronik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2013

**DOĞADAN ESİNLENEN KOKU VE İKİLİ GÖRÜYE DAYALI
GERÇEK ZAMANLI BİR GÖMÜLÜ SİSTEM TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Selman ERGÜNAY
(504101223)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Elektronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Müştak Erhan YALÇIN

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504101223 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Selman ERGÜNAY**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“DOĞADAN ESİNLENEN KOKU VE İKİLİ GÖRÜYE DAYALI GERÇEK ZAMANLI BİR GÖMÜLÜ SİSTEM TASARIMI”** başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Müştak Erhan YALÇIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Vedat TAVŞANOĞLU**
Işık Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İlker BAYRAM
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....

Teslim Tarihi : **3 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **3 Haziran 2013**

Eşim Şerife'ye,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesini sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Müştak Erhan Yalçın'a, yardımlarını benden esirgemeyen Gömülü Sistem Tasarım Laboratuvarı ekibinden hocam Yrd. Doç. Dr. Sıddıka Berna Örs Yalçın, araştırma görevlisi Y. Müh. Ramazan Yeniçeri ve Y. Müh. Tuba Ayhan'a teşekkürlerimi sunarım. Tez kapsamında yapılan çalışmaları 36262 numaralı proje kapsamında destekleyen İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ve 2210-Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı ile yüksek lisans çalışmamı destekleyen TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışması boyunca gösterdiği sabır ve verdiği destekten dolayı eşim Şerife'ye, eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan annem ve babama müteşekkirim.

Haziran 2013

Selman ERGÜNAY

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
2. KOKU SİSTEMİ	5
2.1 Motivasyon	5
2.2 Teorik arka plan ve benzer çalışmalar	6
2.2.1 Hücresel Sinir Ağı	6
2.2.2 Hibrit İşlemci Topluluğu	10
2.2.3 Koku işleme.....	15
2.2.3.1 Canlılarda koku duyusu	15
2.2.3.2 Elektronik burun uygulamaları	18
2.3 Algoritma.....	20
2.3.1 Biyolojik sinir ağı algoritması	20
2.3.2 Kemotaksis algoritması	21
2.3.3 Dağılan koku takibi algoritması	21
2.3.4 İz takibi algoritması.....	22
3. İKİLİ GÖRÜ	25
3.1 Giriş	25
3.2 Teori.....	26
3.2.1 Kapsam	26
3.2.2 İkili Görü Problemleri	28
3.2.2.1 Eşleştirme Problemi.....	28
Seyreltik Yöntemler.....	29
Yoğun Yöntemler.....	30
Eşleştirme Maliyet Fonksiyonları.....	31
3.2.3 Yeniden Yapılandırma Problemi.....	33
3.2.3.1 Dahili ve harici parametrelerin bilindiği durum için yeniden yapılandırma çözümü.....	34

Dahili ve harici parametrelerin en az birinin bilinmediği durum için yeniden yapılandırma çözümü.....	35
3.3 İkili Görü Algoritması	35
3.3.1 Algoritma.....	36
1. Renkli görüntüden gri ölçekli görüntüye geçiş	36
2. Blok tabanlı eşleştirme	37
3. Alt-piksel Yaklaşımı	39
4. Derinlik Haritası Çıkarımı.....	39
4. UYGULAMA	41
4.1 Sistem Tasarımı	41
4.2 Donanım Tasarımı	44
4.3 Yazılım Tasarımı.....	44
4.4 Sistem Gerçekleşmesi	46
4.4.1 Teknoloji.....	46
4.4.2 Geliştirme Ortamı.....	47
4.4.3 Sistem Tümlleştirilmesi	50
5. SONUÇ	53
KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ	59

KISALTMALAR

AL	: Antennal Lobe
FPGA	: Field Programmable Gate Array
HYSA	: Hücresel Yapay Sinir Ağı
MB	: Mushroom Bodies

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Hücresel Sinir Ağı ızgara yapısı.....	7
Şekil 2.2 : Doğrusal olmayan fonksiyon.....	8
Şekil 2.3 : Bir hücrenin 1 ve 2 komşulukları	9
Şekil 2.4 : Hibrit İşlemci Popülasyonu	15
Şekil 2.5 : Havada ve suda dağılan koku bulutu [1].....	16
Şekil 2.6 : Kelebeğin havada yayılan koku takibi [1]	17
Şekil 2.7 : Karıncanın iz takibi	18
Şekil 2.8 : Kemotaksis algoritması	22
Şekil 2.9 : Dağılan koku takibi algoritması	23
Şekil 2.10 : İz takibi algoritması	23
Şekil 3.1 : Binoküler Görü	26
Şekil 3.2 : Basit ikili görü sistem şeması: üç boyutlu yeniden yapılandırma	27
Şekil 3.3 : Üçgenleme yöntemi	28
Şekil 3.4 : Sol ve sağ kameradan alınan görüntüler	37
Şekil 3.5 : Blok eşleştirme	39
Şekil 3.6 : Uyuşmazlık haritası	40
Şekil 4.1 : Gajski'nin Y diyagramı	42
Şekil 4.2 : Kombinezonsal devrenin yapı-bağlantı eksenindeki hali	43
Şekil 4.3 : Komşulardan gelen değerlerin hesaplanması	45
Şekil 4.4 : İleri Euler hesaplama birimi	46
Şekil 4.5 : Sistemin blok diyagramı.....	51
Şekil 4.6 : Geliştirme ortamı-bağlantılar	51

DOĞADAN ESİNLENEN KOKU VE İKİLİ GÖRÜYE DAYALI GERÇEK ZAMANLI BİR GÖMÜLÜ SİSTEM TASARIMI

ÖZET

Günümüzde mühendislik problemlerine yönelik çalışmalarda doğadan esinlenen çözümlere eğilim sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Bu eğilim doğadaki canlıların merkezi ve çevresel sinir sistemini yaşamlarındaki karmaşık olaylara karşı yüksek başarımlı olarak kullanabilmelerinden kaynaklanır. Canlıların karar mekanizmalarındaki bu başarısı günümüz teknolojilerinin hem hız hem de doğruluk bazında yakalayamadığı boyutlarda olabilir. Doğadaki bu başarılı örnekler sebebiyle canlıları incelemek ve taklit etmek daha iyi mühendislik sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Bu fikirden yola çıkarak yapılan tez çalışmasında ilk olarak koku bilgisini hızlı algılama ve sınıflandırma özelliğine sahip canlıların veriyi değerlendirmede kullandıkları biyolojik sinir ağı yapısından esinlenen Hücresel Yapay Sinir Ağı tabanlı bir sistem tasarımı yapılması, bunun yanı sıra canlıların koku kaynağını bulmada gösterdiği davranışların incelenerek doğadan esinlenen yönlendirme algoritmaları üzerine tartışılması amaçlanmıştır. Bunun için ilk etapta Hücresel Yapay Sinir Ağı ve Hibrit İşlemci Topluluğu konularına ilişkin teorik bilgi verilmiş, daha sonra canlıların koku karşısında gösterdikleri davranışlar incelenerek mühendislik uygulamalarında bu davranışlardan esinlenen yöntemlerden bahsedilmiştir. Ardından bu kapsamda gerçekleştirilen algoritmalar ele alınmıştır.

Tez kapsamında incelenen diğer konu insandaki *stereopsis* olayından esinlenilen ikili görü yöntemidir. Stereopsis iki gözden gelen görüntülerin değerlendirilerek görülen sahneye ait uzaklık ve derinlik bilgisinin algılanması olayıdır. Buna göre iki gözden alınan dış dünyaya dair görüntüler arasındaki farklılıktan derinlik bilgisi çıkarılabilir. Farklı iki kamera görüntüsü ya da hareket halindeki tek kamera görüntüsü ile görüntülenen sahnenin üç boyut bilgisinin çıkarılması bu kapsamda mümkündür. Bu projede ikili kamera ile derinlik bilgisinin gerçek zamanlı olarak elde edilmesi ele alınmıştır.

Son olarak doğadan esinlenen koku algoritmaları ile ikili görü algoritmalarının birlikte gerçekleştirilebileceği, farklı donanım ve yazılım uygulamalarına elverişli esnek bir gömülü sistem geliştirme ortamı sunmak bu tezin amacı dahilindedir. Bu kapsamda FPGA tabanlı bir sistem önerilmiş ve sistemi oluşturan algoritmaların yazılım-donanım gerçekleştirmeleri incelenmiştir.

A BIO-INSPIRED REAL TIME EMBEDDED SYSTEM DESIGN BASED ON OLFACTION AND STEREO VISION

SUMMARY

The tendency to bio-inspired solutions to current engineering problems is frequently encountered in the literature. This is basically issued from the fact that the living beings are able to use with high performance their central and peripheral neural system in case of complex events they face to. This performance can be far from the capabilities of today's technology in terms of the achieved speed and accuracy.

It can be said that there are two basic factors providing this capability to the living beings. The first factor is that the living beings strengthen their information baseline related to the environment by fusing the data coming from multiple body sensors. An example of this is the target assessment of animals by using their visual sense and olfaction together. In fact, the real-time evaluation of two or more senses in living beings is noteworthy and is crucial to be applied in engineering problems. The second factor is the parallel processing of the data coming to sensors thanks to the neural network structure. This property leads to the ability of giving reaction/decision very quickly even though the neurons are working at very low frequency. The current technology can reach quite high performance if this parallel processing procedure in the living beings can be properly implemented.

The development of algorithms integrating such properties of living beings is important in terms of providing real-time and low-cost solutions to robotic , bio-medical, etc. applications. Accordingly, this project focus on a system design which produces decisions by fusing and processing in parallel visual senses and scents. The proposed system presents a solution to the problem of target assessment of robotic applications by processing in parallel the data coming from stereo or binocular vision and olfaction. Before the design, the odor-detection based on the behavior of olfactory neurons to odors and the depth-detection 3D-grasp of the environment based on stereo vision are examined in detail and the algorithm is developed accordingly. The implementation of the algorithm both in software and hardware platforms is also a part of the project scope.

Although new methods and technologies enables more accurate and faster sensors in odor perception, artificial olfaction systems are far beyond to biological systems. Accomplishment behind the biological systems lie not only performance of biological sensors, but also pre-processing the sensed signal with unique neural networks and behaviour caused by instinct of the living being. For example it is seen that insects use antennal lobe, and mammals use olfactive bulb as pre-processor for odor data. These biological neural network structures enables feature extraction, additionally simplifies and speeds up identification which will be performed by central processing unit.

Speed and accuracy performance of biological odor systems is notable and many engineering systems are inspired from them. In the odor part of this thesis, firstly biological neural structures for odor processing is given. Cellular neural network is one of the techniques that is inspired from biological neural structures, and which combines cellular automata and neural networks. But its network structure connects identical cells unlike in nature. For instance, it is known that neural network structure in retina contains two different kind of neurons which acts inhibitor and excitator. In this thesis Wilson-Cowan neural network model which models retina-like networks examined and a new network model that benefits superior features of CNN and Wilson-Cowan model is introduced. Additionally, an application of this network for odor processing is realized and hardware-software design of implementation on FPGA is given.

Another consideration about bio-inspired odor processing is behavior of animals which interact with odor. In nature, because odor data is very important for surviving for most animals, their ways to find the odor source is interesting and can include some inspiring methods for robot navigation. In this thesis, olfaction based behaviours of some living beings are examined, and their algorithmic expressions are given. Software development of these algorithms are considered within embedded system design methodology.

In addition to the examination and the evaluation of the olfaction system, the evaluation of the information coming from the visual sense is also another issue that this thesis focused on. The 3D-grasp of the environment can be provided by the stereo vision, which is inspired by the event of stereopsis in the human beings. In fact, when two views from different positions of the same scene is available, the third dimension, i.e., the depth can be estimated by the epipolar geometry. Accordingly, one can reconstruct the 3D correspondence of a 2D point by considering its coordinates in each of the scene images. There are, however, two basic issues of the stereo vision systems that need to be solved in order to use epipolar geometry in finding the depth of the scene. The first problem is the correspondence problem and the other one is the reconstruction problem. The correspondence problem is defined as the problem of the finding the matched points in the stereo images. This problem is treated in two different aspects: what points should be matched to each other and which similarity measure should be used to be able to match the points accurately. In the literature, the first aspect leads to different algorithms as they either handle all the pixels or some subset of the all pixels on to find their match. The methods trying to match all the pixels in the image is called as dense methods whereas the others that consider some "interest points" to match is named as sparse methods. The choice of the methods is dependent of the application where the number of the matched points may influence the performance. The second aspect of the correspondence problem is to determine a robust similarity measure that would find the best matching pixels in the dual images. The determination of the similarity measure is critical since the precision in the matched points in the stereo images has a significant influence on the accuracy of 3D reconstruction of the scene. As for the second problem of the stereo vision, i.e. reconstruction problem, one seeks for a solution based on the epipolar geometry which is determined by the intrinsic and extrinsic camera parameters. Accordingly, there appear three different cases for each of which the reconstruction problem is considered differently: the case where the intrinsic and extrinsic parameters are known, the case where only intrinsic parameters

are known, the case where none of the parameters are known. In the first case, a simple triangulation method properly solves the problem whereas the two latter cases needs to more complex approaches in order to find the correct solution. In this thesis, the dense approach is preferred for the correspondence problem because all 3D reconstruction is sought for all the pixels of the scene. Accordingly, the block template matching is used. The sum of absolute differences (SAD) is chosen as a similarity measure. Assuming all the extrinsic and extrinsic camera parameters are known, the third dimension of the scene objects are extracted via the triangulation method. Those steps are implemented in MATLAB and the algorithm is tested via simulations.

To sum up, the main goal of this thesis to build up a bio-inspired real-time embedded system which is based on olfaction and stereo vision. To reach this goal, some bio-inspired structures and algorithms are examined, and a new network model for odor processing is introduced. At the implementation side of this work it is aimed to obtain a flexible hardware-software development platform which enables to design FPGA based embedded systems which use the *Hybrid Processor Population* for odor processing and depth map estimation hardware for visual perception of environment.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Doğadaki canlıların dış dünya ile etkileşimleri ve karşılaştıkları problemlere karşı ürettikleri çözümler teknoloji ile ilgili alanlarda mühendis ve tasarımcılara ilham kaynağı olmuştur. Duyuları ile çevreden gelen verileri eş zamanlı olarak alan canlılar çevresel sinir sistemi yardımıyla merkezi sinir sistemine bu bilgileri elektriksel olarak iletirler. Merkezi sinir sistemi ise ilgili duyu merkezlerinde gerçekleştirilen bir takım hesaplamalar sonucunda bazı kararlar vererek eyleme geçer. Duyu organlarındaki algılamadan başlayıp karmaşık karar verme mekanizmalarına kadar gelen bu yapı canlıların hayatlarını devam ettirebilmeleri için gerekli sistemlerden biridir. Gerçek zaman kısıtları ile yüksek başarılı çalışan bu gelişmiş sistemlerin yapısının incelenmesinin yanı sıra canlıların karar verme mekanizmalarının algoritma açısından değerlendirilmesi ve bunlardan esinlenen elektronik sistemler kurulması mühendislik problemlerine yeni bir bakış açısı kazandırır.

Canlıların bu üstün başarısındaki temel etkenlerden biri sinir ağı yapısı sayesinde paralel işleme konusundaki kabiliyetleridir. Sinir hücreleri eğer eşik şiddetinin üzerinde bir etkiyle uyarılırsa iyonların hücre içerisine dolmasıyla elektriksel olarak yüklenirler ve ardından boşalırlar. Bu olayı takiben mutlak tepkisizlik periyodu adında hücrenin uyarılara cevap vermediği yaklaşık 1 ms süren bir dönem yaşanır. Uyarılma şiddetinin artması sinir hücresinin ulaştığı gerilimi değiştirmez, uyarılma sıklığını artırır [2]. Yani sinir sisteminin iletim yaparken genlik modülasyonunu değil frekans modülasyonunu kullandığı söylenebilir [3]. Elektriksel olarak dolup boşalmayı takiben girilen yaklaşık 1 milisaniyelik tepkisiz dönem sinir hücresinin en büyük çalışma frekansını belirler. Dolayısıyla sinir hücreleri en fazla 1 kHz gibi düşük frekanslarda çalışırken günümüzde sayısal tümdevreler 4 GHz mertebelerine çıkan frekanslarda işlem yapabilmektedir. Fakat aradaki bu büyük hız farkına rağmen biyolojik sinir

sistemleri bazı problemlere çok daha hızlı bir şekilde çözüm üretir. Bunu sistemi oluşturan çok sayıdaki hücrenin paralel çalışması ile sağlar. Sinir hücrelerinin davranışları diferansiyel denklem sistemleri ile matematiksel olarak modellenenir. Matematiksel modeller ve hücrelerin oluşturduğu fiziksel ağ yapıları tez kapsamında ele alınacaktır.

Canlılardaki hücresel sinir ağı yapısına benzer bir yapıya sahip olan Hücresel Yapay Sinir Ağı kavramı ilk defa 1988 yılında Chua ve Yang tarafından ortaya konmuştur [4], [5]. Biyolojik sinir ağına benzer şekilde yerel bağlantılardan oluşan bu yapı paralel işlem yapabilme yeteneği sayesinde gerçek zamanlı bir çok sistemin gerçekleştirilmesinde uygulama alanı bulmuştur. Düzenli ve yerel bağlantılara sahip olması ve tek tip hücrelerden oluşması HYSA'nın temel özellikleridir. Bu özellikleri HYSA'nın kolay gerçekleştirilmesine sağlamıştır. İlk uygulamaları analog olan HYSA yapıları daha sonra yeniden yapılandırılabilir sayısal donanımların da gelişimiyle sayısal olarak gerçekleştirilme imkanı bulmuştur.

Yapısal olarak benzerliklerine rağmen HYSA biyolojik sinir hücrelerini taklit etmede yetersiz kaldığı bazı noktalar vardır. Biyolojik sinir ağları HYSA gibi tek tip hücrelerden değil kuvvetlendirici ve zayıflatıcı karakterlere sahip farklı iki tip hücreden oluşur. Bununla birlikte düzenli bağlantıların yanında rastgele bağlantılar da içermektedir. Bu noktalardan yola çıkarak HYSA'nın kolay gerçekleştirilebilir yapısını korumak suretiyle bir ağ modeli Ayhan ve Yalçın [6] tarafından önerilmiştir. Bu ağ modeli sinir hücrelerinin davranışlarını matematiksel olarak modelleyen Wilson-Cowan ağ modeline [7] dayanmaktadır. FPGA üzerinde sayısal gerçekleştirilmesi yapılan bu model orijinal HYSA modelindeki hücrelere yalnızca bir kimlik girişi ekleyerek kolay gerçekleştirilebilir yapıyı korur [8]. Tez kapsamında bu yapının teorisi, gerçekleştirilmesi ve koku uygulamalarında kullanımı ele alınacaktır.

Canlıların dış dünyayı algılamada kullandığı diğer bir yöntem veri füzyonu olarak karşımıza çıkar. Farklı algılayıcılardan gelen bilgiler merkezi sinir sisteminde eşleştirilerek davranışlardaki doğruluk oranı artırılır. Yırtıcı bir hayvanın besin kaynağı bulmasında görme, koklama ve işitme duyularından gelen bilgileri birlikte kullanarak avlanmaya çalışması buna bir örnektir. Canlılarda algılayıcı hücrelerden alınarak sinir hücreleri vasıtasıyla iletilen bilgiler merkezi sinir sisteminde

değerlendirilir. Bu merkeze çok sayıda ve farklı çeşitlerdeki algılayıcılardan bilgiler gelirken bu bilgilerin gerçek zamanlı olarak değerlendirilmesi kimi zaman hayati önem taşıyabilmektedir.

Bu tez kapsamında canlıların duyularından görme ve koklama duyuları ele alınarak bu konuda gösterdikleri algılama ve hesaplama yöntemleri ile davranışları incelenecek, bunlardan esinlenen elektronik uygulamalar üzerine tartışılarak bir takım algoritmalara ve gerçeklemlere yer verilecektir. Doğadan esinlenen karmaşık bir sistem kurmak için dijital ortamda gerçek zamanlı çalışan, esnek ve düşük maliyetli bir gerçekleştirme platformu sunmak bu tez kapsamında yapılan çalışmaların temel amacıdır. Bu amaç doğrultusunda geliştirilen FPGA tabanlı platform, hem koku hem de ikili kameradan gelen veriyi alarak mikroişlemci yardımıyla değerlendirmekte ve yön konusunda karar vermektedir. FPGA tasarımına eklenen mikroişlemci hem yazılım ve donanımın birlikte tasarlandığı sistemlerin gerçekleştirilmesini kolaylaştırmakta hem de ek bir donanım gerektirmeyerek donanımı sadeleştirmektedir.

Tez metninin ikinci bölümünde canlıların koku algılama ve işlemedeki sinir hücrelerinin kokuya karşı sergiledikleri davranışlar incelenecek ve bu davranışlardan esinlenen algoritmalara yer verilecektir. Üçüncü bölümde canlıların mesafe kestirimi yapmak ve ortamı üç boyutlu kavramak için kullandıkları ikili görü konusu ele alınacak ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen derinlik bulma algoritmasından bahsedilecektir. Koku ve ikili görüye dayalı yapıların gömülü sistem tasarım adımları kullanılarak yapılan donanım ve yazılım tasarımlarından dördüncü bölümde bahsedilecektir. Son bölümde ise tez kapsamında yapılan işler özetlenerek gelecek çalışmalar hakkında fikir verilecektir.

2. KOKU SİSTEMİ

2.1 Motivasyon

Koku canlıların davranışlarında önemli bir rol oynar. Bazı canlılar besin kaynağı bulmada kokuyu diğer duyular ile birlikte veri tümleştirme amaçlı kullanırken, bazıları görme ve işitme yetilerinden yoksun oldukları için veya ortam koşullarından dolayı yalnızca kokuyu rehber edinerek hareket ederler. Besin kaynakları keşfetmenin yanı sıra feromon adı verilen kimyasallar ile eş bulma ve tür içi iletişim kurmada koku kullanılır [9]. Bir hücreliler kemoreseptörleri, böcekler antenlerindeki koku almaçları, daha gelişmiş canlılar ise burunları ile kokuyu algılar. Koklama duyusu gelişmiş canlılar kokunun alınması, sınıflandırılması ve değerlendirilmesi işlemlerini milisaniyeler içinde gerçekleştirirler. Hayvanlar bu başarısı sebebiyle uyuşturucu ve patlayıcı madde tespiti, doğal afetlerde arama kurtarma çalışmaları gibi alanlarda insanlar tarafından kullanılırlar.

Teknolojik sistemler ise hayvanların bu başarısından şu anda çok geridedir. Son yıllarda ses ve görüntüye dayalı algılama sistemleri önemli ölçüde ilerlemeler kaydederken, koku algılaması uygulamada karşılaşılan birtakım güçlükler sebebiyle göreceli olarak daha geri kalmış fakat günümüzde gelişmekte olan bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Algılayıcı teknolojilerinin ve hesaplama birimlerinin gelişmesine paralel olarak ilerleyen bu alan, günümüzdeki bazı problemlerin çözümü için düşük maliyetli alternatif yöntemler sunabilir. Canlılar için tehlikeli ortamlarda robotların kullanılmasının yanı sıra onların ulaşamayacağı yerlere erişmesi, düşük maliyetle üretilibilmeleri gibi avantajları da koku uygulamalarında robotları iyi bir çözüm olarak karşımıza çıkarır.

Doğadaki başarılı örnekler sebebiyle canlıları incelemek ve taklit etmek daha iyi mühendislik sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bu fikirden yola çıkarak, koku bilgisini hızlı algılama ve sınıflandırma özelliğine sahip canlıların

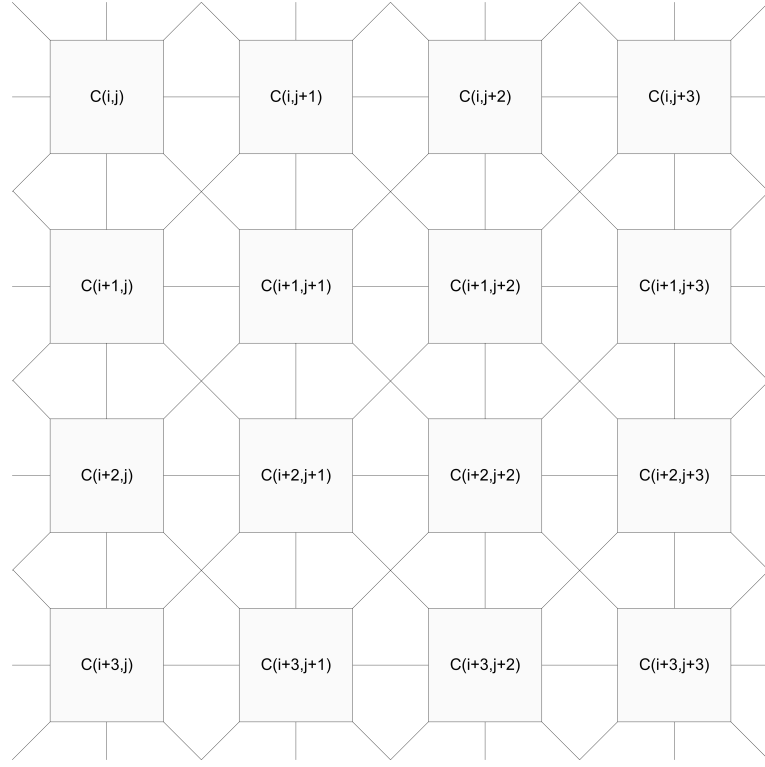
veriyi değerlendirmede kullandıkları biyolojik sinir ağı yapısından esinlenen *Hücreyel Yapay Sinir Ağı* tabanlı bir sistem tasarımı yapılması, bunun yanı sıra canlıların koku kaynağını bulmada gösterdiği davranışların incelenerek doğadan esinlenen yönlendirme algoritmaları üzerine tartışılması bu bölümün temel amacıdır. Bu bölümde ilk etapta *Hücreyel Sinir Ağı* ve *Hibrit İşlemci Topluluğu* konularına ilişkin teorik bilgi verilecek, daha sonra canlıların koku karşısında gösterdikleri davranışlar incelenerek mühendislik uygulamalarında bu davranışlardan esinlenen yöntemlerden bahsedilecektir. Son olarak da bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen algoritmalar ele alınacaktır.

2.2 Teorik arka plan ve benzer çalışmalar

2.2.1 Hücreyel Sinir Ağı

Yerel bağlantıya sahip ağ mimarilerinin tümdevre üzerinde gerçekleştirilebilirlikleri ile sinir hücresi temel alınarak kurulan doğrusal olmayan devrelerin yani yapay sinir ağlarının birleştirilmesi fikri ilk olarak 1988 yılında Chua ve Yang tarafından *Hücreyel Yapay Sinir Ağı* adı ile ortaya konmuştur [4], [5]. Hücreyel sinir ağı yerel komşuluğa sahip hücrelerin düzenli olarak sıralanmasıyla elde edilen yapıdır. Yerel bağlantılar hücreyel sinir ağının temel karakteristiğidir. Yani veriler yalnızca birbirine komşu hücreler arasında paylaşılır. Diğer hücreler ile yayılma etkisi sebebiyle dolaylı bir etkileşim söz konusudur. Bu yapıyı oluşturan her bir hücre, girişi, çıkışı ve dinamik kurallar ile tanımlanan bir durumu olan dinamik bir sistemdir. Hücreyel sinir ağı tek tip hesaplama birimlerinden oluşan yerel bağlantılı bir dinamik sistem olarak ifade edilir. Hücrelerin dizilimi düzlemsel dikdörtgen ızgara şeklinde olabileceği gibi iki boyutlu katmanların oluşturduğu üç boyutlu bir yapı da olabilir. Bu biçimlerden en sık kullanılan iki boyutlu dikdörtgen ızgara yapısındaki $M \times N$ hücreden oluşan hücreyel sinir ağının $C_{i,j}$ hücresine ilişkin durum denklemi ifadesi Denklem (2.1)'de verilmiş ve yapısı Şekil 2.1'de resmedilmiştir.

$$\dot{x}_{ij} = -x_{ij} + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} \mathbf{A}(i,j;k,l)y_{kl}(t) + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} \mathbf{B}(i,j;k,l)u_{kl} + I_{ij} \quad (2.1)$$



Şekil 2.1: Hücresel Sinir Ağı ızgara yapısı

Burada x_{ij} hücrenin durum değişkenini, u_{kl} girişini, y_{kl} ise çıkışını gösterir. $N_r(i, j)$ ise x_{ij} hücresinin komşularını kapsar. $A(i, j; k, l)$ ve $B(i, j; k, l)$ katsayıları iki farklı tip ölçeklemeyi temsil eder. Komşu hücrelerin çıkış ve girişlerini ölçeklemede kullanılan geribesleme ve kontrol ağırlıklarıdır. Hücrelerin dinamik yapısını temsil eden denklemlerde tek doğrusal olmayan kısım çıkış fonksiyonudur:

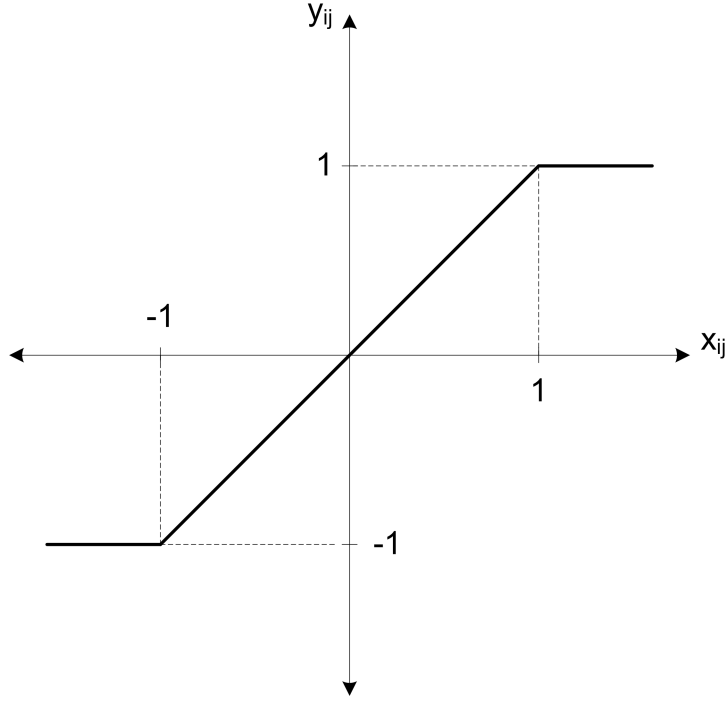
$$y_{ij}(t) = \frac{1}{2} (|x_{i,j}(t) + 1| - |x_{i,j}(t) - 1|) \quad (2.2)$$

Bu ifade Şekil 2.2’de de görüleceği gibi -1 değerinden önce ve +1 değerinden sonra doyuma ulaşan parçalı doğrusal bir fonksiyondur ve (-1 +1) aralığında hücrenin durumu ile çıkış birbirine eşittir:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } \forall x_{ij} \geq 1 \\ x_{ij}, & \text{eğer } \forall |x_{ij}| < 1 \\ -1, & \text{eğer } \forall x_{ij} \leq -1 \end{cases} \quad (2.3)$$

Her hücrenin oluşturduğu yerel bağlantılar ağı karakterini belirler. $I_{i,j}$ ifadesi şablon olarak adlandırılır hücrenin komşularından gelen etkiyi ifade eder:

$$I_{i,j} = g(\mathbf{A}, x_{i,j}, U_{i,j}) \quad (2.4)$$



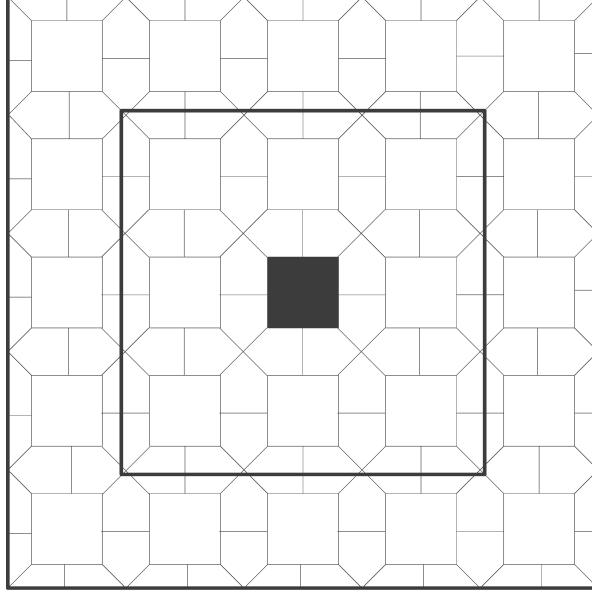
Şekil 2.2: Doğrusal olmayan fonksiyon

Bu ifadede yer alan **A** matrisi hücrenin komşuları ile olan bağlantıların ağırlıklarını temsil eder. Yani I , hücrenin kendi değerine, bağlantı ağırlıklarına ve etki alanındaki komşularının durum ve çıkış değerlerine bağlıdır. Her hücre r yarıçapındaki etki alanı içinde bulunan hücreler ile doğrudan iletişim kurar. Diğer hücreler ile yayılma etkisi sayesinde dolaylı olarak etkileşirler. 2 boyutlu hücresel sinir ağının ızgara yapısında r yarıçapındaki $S_r(i, j)$ etki alanı ele alınan hücrenin r komşuluğu olarak adlandırılır. $C_i(i, j)$ hücrene r uzaklıkta olan bu hücrelerden oluşan alan $r \geq 0$ olmak üzere,

$$N_r(i, j) = \{C(k, l) | \max\{|k - i|, |l - j|\} \leq r, 1 \leq k \leq M, 1 \leq l \leq N\} \quad (2.5)$$

denklemleri ile ifade edilir. Yani $r = 1$ komşuluğu 3×3 komşuluğuna, $r = 2$ komşuluğu 5×5 komşuluğuna karşı gelmektedir. Bir hücrenin bir ve iki komşuluğu Şekil 2.3’de gösterilmiştir.

İlk HYSA hücreleri birinci dereceden analog devre yapıları olarak ifade edilmiştir. Bu hücreler kapasite, direnç, doğrusal ve doğrusal olmayan kaynaklar gibi hem doğrusal hem de doğrusal olmayan devre elemanlarından oluşur. Bu alanda yapılan ilk devre tasarımı Roska ve Chua tarafından 1993 yılında çok kapsamlı HYSA makinesi (CNN-UM) adı ile tasarlanan yapı ile gerçekleştirilmiştir [10]. CNN-UM, hücresel sinir



Şekil 2.3: Bir hücrenin 1 ve 2 komşulukları

ağının programlanabilir analog olmasına dayanır. Tasarlanan CNN-UM yapısı önce ACE4k adıyla 64x64 boyutunda [11], daha sonra ACE16k adıyla 128x128 boyutunda [12] analog tümdevreler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu tümdevreleri ile geliştirilen çok sayıda uygulama ile HYSAs, sayısal bilgisayarlar için çözmesi çok zor olan doğrusal olmayan uzay-zaman dalga denklemlerini mikrosaniyeler içerisinde çözen bir yapı haline gelmiştir [13].

Hücresel sinir ağına ilişkin **2.1** bağıntısında verilen sürekli zaman ifadesi ileri Euler yöntemi ile ayrıklaştırılabilir. Bu durumda **2.6** ifadesi ayrık zamanda hücresel sinir ağı dinamiğini verir.

$$\begin{aligned} \frac{x_{ij}(n+1) - x_{ij}(n)}{T_s} = & -x_{ij}(n) + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} \mathbf{A}(i,j;k,l)y_{kl}(n) \\ & + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} \mathbf{B}(i,j;k,l)u_{kl} + I_{ij} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Burada T_s örnekleme periyodunu temsil eder. Eğer bu deklemler **2.7**'deki gibi düzenlenir ise yazılım/donanım gerçeklemesine uygun döngüsel bir yapı halini alır.

$$x_{ij}(n+1) = (1 - T_s)x_{ij}(n) + T_s \left(\sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} \mathbf{A}(i,j;k,l)y_{kl}(n) + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} \mathbf{B}(i,j;k,l)u_{kl} + I_{ij} \right) \quad (2.7)$$

Analog yapının şimdiye kadar en fazla 128x128 boyutundaki hücresel sinir ağını gerçeklemeye imkan tanınması, gürültü ve sıcaklığa duyarlılıklarının yüksek olması ve üretim maliyetlerinin yüksek olması sebeplerinin yanında yeniden yapılandırılabilir sayısal aygıtların geliştirilmesi ile HYSA'nın sayısal gerçeklemeleri üzerine yapılan çalışmalar artış göstermiştir. FPGA teknolojisi yeniden yapılandırma ve düşük maliyet özellikleri sebebiyle hücresel sinir ağı emülatörü yapılarında sıklıkla kullanılmaktadır. Orijinali analog olarak tasarlanmış olan CNN-UM yapısı da sayısal olarak yeniden tasarlanmış ve FPGA ortamında gerçekleştirilmiştir [14].

Çok miktarda verinin gerçek zamanlı işlenmesine imkan tanıyan HYSA'nın temel uygulama alanları ise görüntü ve video işleme olarak karşımıza çıkmaktadır. Doğadan esinlenen robot yönlendirmesi ve yol planlama algoritmaları da HYSA'nın kullanıldığı alanlara örneklerdir [15]. Hücresel yapay sinir ağı yapısı canlılardaki sinir hücrelerinin oluşturduğu sinir ağı ile bağlantılar ve paralel işlem yapabilme gibi özellikleri açısından benzerlik gösterir. Memelilerdeki retina yapısı bu bağlamda incelenmiş ve HYSA kullanarak retina modellemesine dayanan bir geliştirme ortamı [16] ve [17] numaralı yayınlarda sunulmuştur. Bu çalışmada ise bahsedilen benzerliğin Hibrit İşlemci Topluluğu adıyla daha geliştirilmesinden ve doğadan esinlenen koku algılama/işleme sistemlerinde kullanılmasından bahsedilecektir.

2.2.2 Hibrit İşlemci Topluluğu

Hesaplama açısında karmaşık olan problemlerin çözümü yüksek miktarda ve farklı çeşitlerde işlem birimlerinin birlikte çalışmasını gerektirebilir. Metabolik sistemler, yüzlerce farklı diferansiyel denklem ile matematiksel olarak modellenen karmaşık sistemler olduğu için doğal olarak karmaşık problemleri çözme yeteneğine sahiptirler. Bu metabolizmaları anlamak veya fonksiyonlarını mühendislik sistemlerinde tekrarlamak için biyolojik sistemleri taklit etmek iyi bir çözüm olabilir. Doğadan esinlenen

sistemlerde sıklıkla kullanılan Hücresel Sinir Ağları birim özdeş hücreleri arasındaki düzenli bağlantıları sebebiyle büyük ağların gerçekleşmesine imkan tanısa da bu düzenlilik uygulamada her zaman avantajlı olmayabilir. Canlılar yüksek yoğunluklu ve gerçek zamanlı sinyal işleme problemlerini hem düzenli hem de rastgele bağlantılara sahip ve birden fazla çeşitli sinir hücreleri ile çözerler.

Doğadan esinlenen sistemleri tasarlamada kullanılan HYSA yapısı birim hücreler arasındaki düzenli bağlantılardan oluştuğu için büyük ağların gerçekleşmesine elverişlidir. Fakat bu düzenli yapı rastgele bağlantılara sahip farklı tip hücrelerin gerçekleşmesi istendiğinde yetersiz kalmaktadır. Oysaki ön korteks bölgesinde olduğu gibi sinir ağı hücrelerinin tek tip hücrelerden değil, kuvvetlendirici ve zayıflatıcı karakteristiklere sahip olan hibrit bir yapıdan oluştuğu bilinmektedir [18].

Müezzinoğlu vd. [19] böceklerin koklama sisteminden esinlenerek yapay bir koklama sistemi geliştirmişlerdir. Böceklerde on binlerce koku siniri yavaş ve gürültülü mesajları paralel olarak koklama katmanlarına gönderir. Bu aktarım esnasında koku tanıma performansını artırmak için bir takım hesaplama işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemde AL (Antennal Lobe) ve MB (Mushroom Bodies) adlı iki birim sorumludur. Kuvvetlendirici ve zayıflatıcı karaktere sahip sinir hücrelerinden oluşan AL işaret iyileştirme ve öznitelik çıkarma benzeri işlemler gerçekleştirirken MB sınıflandırmayı yapar. Böceklerin bu şekilde yavaş ve gürültülü sensör problemini çözmesinden esinlenerek Wilson-Cowan yapısı [7] ile AL'yi, Hebbian öğrenmesi ile de MB'yi modellemişler ve 16 sensörlü bir yapı ile sistem başarımını sınamışlardır.

Tez kapsamında yapılan çalışmanın temel alındığı yayında [6], [20] canlılardaki sinir ağı yapısında bulunan rastgelelik ve farklı karakteristiğe sahip hücrelerin bulunması özellikleri, hücresel sinir ağının kolay gerçekleşen yapısına eklemek suretiyle bir ağ modeli önerilmiştir. Bu ağ modelinin temeli de Wilson ve Cowan hücre popülasyon modeline dayanmaktadır.

Wilson-Cowan popülasyon modeli [7] kuvvetlendiren ve zayıflatıcı alt popülasyonları temel alır. $E(t)$ ve $I(t)$ sırasıyla kuvvetlendiren ve zayıflatıcı alt popülasyonların davranışlarını temsil eder ve uyarılmaya duyarlı olup t anında en az eşik değeri kadar uyarılmış sinir hücrelerinin tüm hücrelere oranıdır.

Kuvvetlendiren alt popülasyonun ifadesi Denklem (2.8)'de verilmiştir.

$$E_{(t+\tau)} = \left[1 - \int_{t-r}^t E(\hat{t}) d\hat{t} \right] S^E \{z\} \quad (2.8)$$

Burada $S\{z\}$ alt popülasyon cevap fonksiyonudur. Biyolojik sinir ağı hücreleri eşik değerinin üstünde bir uyarı kendisine ulaştığında elektriksel olarak yüklenir ve daha sonra boşalır. Yük boşaltımını takiben bir süre mutlak duyarsız döneme girer ve bu zaman dilimi içerisinde ne kadar büyük bir uyarıcı gelirse gelsin tepki veremez [3]. O halde r mutlak duyarsızlık periyodu olmak üzere, $((t-r), t)$ zaman aralığında uyarılmış olan hücreler t anında gelen uyarıları algılayamazlar. Dolayısıyla bu hücreler toplamdan çıkarılırsa $\left[1 - \int_{t-r}^t E(\hat{t}) d\hat{t} \right]$ ifadesi t anında duyarlı olan kuvvetlendirici hücrelerin oranını temsil eder.

Alt popülasyon cevap fonksiyonu alt popülasyondaki uyarılma miktarının ortalamasıdır. Kuvvetlendirici bir hücrenin t anında ortalama uyarılma miktarı (2.9)'de yer almaktadır.

$$z = \int_{-\infty}^r \alpha(t-\hat{t}) [c_1 E(\hat{t}) - c_2 I(\hat{t}) - P(\hat{t})] \quad (2.9)$$

Burada $P(\hat{t})$ kuvvetlendiren alt popülasyona olan girişi, daima pozitif olan c_1 ve c_2 ise bağlantı katsayılarını temsil eder. Kuvvetlendirici ve zayıflatıcı alt popülasyonlara ilişkin denklemler Denklem (2.10) ve (2.11)'deki gibi toparlanabilir.

$$E_{(t+\tau)} = \left[1 - \int_{t-r}^t E(\hat{t}) d\hat{t} \right] S^E \left\{ \int_{-\infty}^r \alpha(t-\hat{t}) [c_1 E(\hat{t}) - c_2 I(\hat{t}) - P(\hat{t})] \right\} \quad (2.10)$$

$$I_{(t+\tau)} = \left[1 - \int_{t-r}^t I(\hat{t}) d\hat{t} \right] S^I \left\{ \int_{-\infty}^r \alpha(t-\hat{t}) [c_3 E(\hat{t}) - c_4 I(\hat{t}) - Q(\hat{t})] \right\} \quad (2.11)$$

Bu denklemler türevlenirse Denklem (2.12) ve Denklem (2.13)'deki gibi yeniden yazılabilir. E ve I üst indisleri sırasıyla kuvvetlendirici ve zayıflatıcı hücrelere ilişkin ifadeleri temsil ederken $(1-rE)$ ve $(1-rI)$ duyarlı hücre olasılıklarını verir. $P(t)$ ve $Q(t)$ ise kuvvetlendirici ve zayıflatıcı alt popülasyonlar tarafından alınan harici girişlerdir.

$$\tau^E \frac{dE}{dt} = -E + (1-rE) S^E k^E c_1 E - k^E c_2 I + k^E P(t) \quad (2.12)$$

$$\tau^I \frac{dI}{dt} = -I + (1-rI) S^I \{ k^I c_3 E - k^I c_4 I + k^I Q(t) \} \quad (2.13)$$

Elde edilen ifadeler alt popülasyonun bütüncül davranışına ilişkin denklemlerdir. Kuvvetlendirici alt popülasyonun i . hücresi x_i ve zayıflatıcı popülasyonun i . hücresi

y_i ise aşağıdaki denklemler ile verilmiştir:

$$\beta_i^E \frac{dx_i(t)}{dt} = -x_i(t) + K_i^E \theta^E \left(\sum_j w_{ij}^{EE} x_j(t) - \sum_j w_{ij}^{EI} y_j(t) + g_{in}^E U_i^E \right) + \mu^E \quad (2.14)$$

$$\beta_i^I \frac{dy_i(t)}{dt} = -y_i(t) + K_i^I \theta^I \left(\sum_j w_{ij}^{IE} x_j(t) - \sum_j w_{ij}^{II} y_j(t) + g_{in}^I U_i^I \right) + \mu^I \quad (2.15)$$

Her hücre kendi zaman sabitine (β_i), uyarılma seviyesine (K_i) ve aktivasyon değerine sahip olabilir (θ). A popülasyonunun i . hücresi ile B popülasyonunun j . hücresi arasındaki bağlantının ağırlığı w_{ij}^{AB} ile gösterilir. Eğer bu ağırlık 0 ise iki hücre arasında bir bağlantı olmadığı anlamına gelir. Beyindeki koklama bölümü gibi biyolojik algılama organlarının çoğunda aynı alt popülasyona ait hücreler arasında bağlantı yoktur. Bu durum kuvvetlendirme ve zayıflatmayı doyuma girmekten korur. Buradan yola çıkarak $w_{ij}^{EE} = 0$ ve $w_{ij}^{II} = 0$ alınarak (2.14) ve (2.15) denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\beta_i^E \frac{dx_i(t)}{dt} = -x_i(t) + K_i^E \theta^E \left(- \sum_j w_{ij}^{EI} y_j(t) + g_{in}^E U_i^E \right) + \mu^E \quad (2.16)$$

$$\beta_i^I \frac{dy_i(t)}{dt} = -y_i(t) + K_i^I \theta^I \left(- \sum_j w_{ij}^{IE} y_j(t) + g_{in}^I U_i^I \right) + \mu^I \quad (2.17)$$

Elde edilen denklem çifti gerçeklemeye uygun olması için aşağıdaki biçimde düzenlenebilir:

$$\dot{x}_i = f(x_i, I_i^E, \mu_e) \quad (2.18)$$

$$\dot{y}_i = f(x_i, I_i^I, \mu_i) \quad (2.19)$$

Burada x_i ve y_i durum değişkenlerini, μ_i ve μ_e sistem gürültülerini, I_i^E ve I_i^I ise aktivasyon seviyelerini temsil eder. Kuvvetlendirici ve zayıflatıcı alt popülasyona ait hücrelerin aktivasyon seviyeleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I_i^E = K_i^E \theta^E \left(- \sum_j w_{ij}^{EI} y_j(t) + g_{in}^E U_i^E \right) \quad (2.20)$$

$$I_i^I = K_i^I \theta^I \left(- \sum_j w_{ij}^{IE} y_j(t) + g_{in}^I U_i^I \right) \quad (2.21)$$

Kuvvetlendirici ve zayıflatıcı özelliğe sahip hücrelere ilişkin sinaptik bağlantı ifadesi $I_{i,j}$ aşağıdaki gibi tek bir denklemde toplanabilir:

$$I_{i,j} = \theta(h_{k,l} - h_{i,j}) \left(\sum_{l=-r}^r \sum_{k=-r}^r a_{k,l} x_{i+k,j+l}(t) + g_{in} U_{i,j} \right) \quad (2.22)$$

Eğer $h_{i,j} = h_{k,l}$ ise yani komşusu ile aynı alt popülasyona mensup iki hücre karşılaştırılıyorsa toplama bir katkısı olmaz. Böylece aynı cins hücrelerin birbiri ile bağlantısının olmaması modellenmiş olur. $h_{i,j} = 1$ ve $h_{k,l} = 0$ ise kuvvetlendiren bir hücreye bağlı zayıflatan bir hücre söz konusudur ve bu yüzden toplama negatif olarak etki eder ($h_{k,l} - h_{i,j} = -1$). Tam tersi durumda ise kuvvetlendiren hücreler pozitif katkı sağlar. Bu duruma göre $I_{i,j}$ ifadesi hücresel sinir ağının sinaptik bağlantısını veren (2.4) eşitliği ile benzer hale gelmiştir:

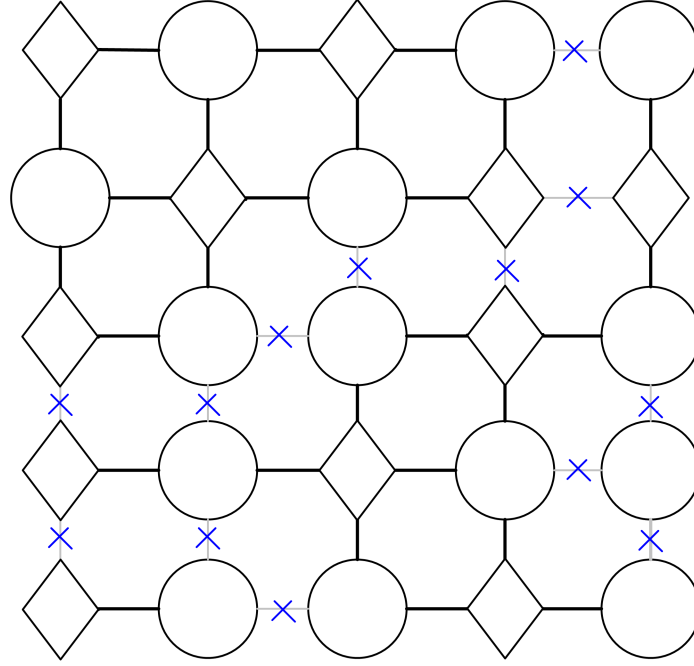
$$I_{i,j} = g(H, A, x_{i,j}, U_{i,j}) \quad (2.23)$$

Burada hücresel yapay sinir ağının standart tanımına ek olarak hücrelerin kimliklerini tutan H matrisi sisteme eklenmiştir. Kuvvetlendirici ve zayıflatıcı hücrelerin olduğu bir ağ popülasyonunda hücreler arası etkileşim üç türlü olabilir. Bir hücrenin diğer bir hücrenin çıkışı tarafından uyarılabilir, sönmümlenebilir veya bu çıkıştan etkilenmeyebilir. Bu davranışlar hücrenin davranışını modelleyen işlem biriminin türünü belirler ve bu sinaptik kurallar tür matrisi ile tutulabilir. Ağ sisteminde yalnızca kuvvetlendirici ve zayıflatıcı olmak üzere iki tip hücre bulunduğu için matris elemanları yalnızca 1 ve 0 değerlerini alabilir. Hücrenin tipini değiştirmek için bu matristeki değerini değiştirmek yeterlidir. Bir başka deyişle tek tip hücrelerden oluşan hücresel sinir ağı yapısı, sinaptik kuralları barındıran tip matrisi yardımıyla farklı türden hücrelerden oluşan bir ağ haline getirilmiştir. Önerilen ağ modeli gerçekleştirme açısından geleneksel hücresel sinir ağı yapısına ek olarak hücrelerde kimlik bilgisi alınacak olan bir girişin olması gerekir. Bu giriş sayesinde hücre kuvvetlendirici veya zayıflatıcı davranışa göre hesaplama yapar. Davranışlar arasındaki tek fark aktivasyon seviyesinin işaretinden kaynaklanmaktadır. Bu bilgi ise tür matrisi olan H ile tutulur. Örnek bir H matrisi aşağıda verilmiştir:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Bu matrisin temsil ettiği Hibrit İşlemci Popülasyonu ise 2.4’de görülmektedir. Standart hücresel sinir ağının resmedildiği Şekil 2.1 ile karşılaştırılacak olursa ızgara yapısının

korunduğu fakat bunun yanında tek tip hücre yerine iki tip hücrenin yer alıp aynı tip hücreler arasında bağlantının bulunmadığı görülür.



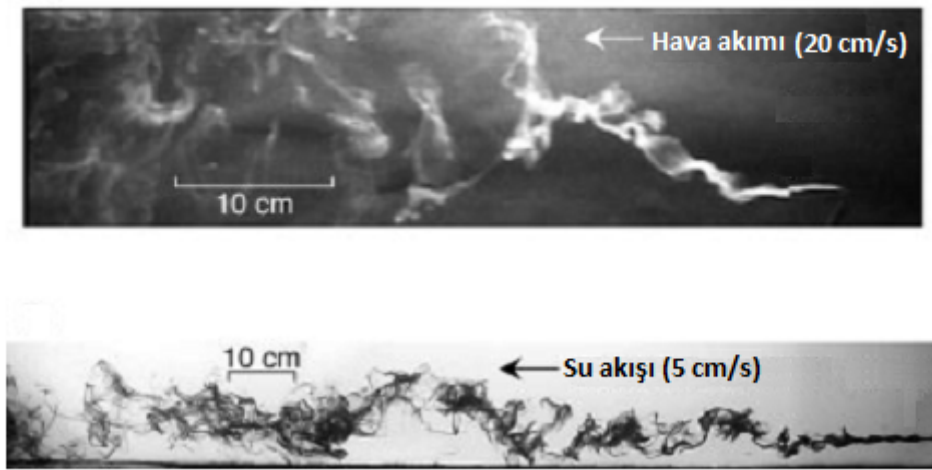
Şekil 2.4: Hibrit İşlemci Popülasyonu

Bu şekilde rastgele bağlantılar ile üretilen ağ yapısı kokunun ön işleminde kullanılacaktır. Her bir koku sensöründen gelen işaret Hibrit İşlemci Popülasyonunu oluşturan hücrelerin girişidir ve dinamik olarak işlenerek hücrelerin davranışları mikroişlemci tarafından gözlenerek yön bulma algoritmalarında kullanılacaktır.

2.2.3 Koku işleme

2.2.3.1 Canlılarda koku duyusu

Katı bir maddeden kopan moleküller fiziki kuvvetlerin etkisiyle ortamda dağılırlar. Bir akışın olmadığı ortamda derişim gradyenti katı maddeye en yakın yerde en büyüktür ve uzaklaştıkça azalır. Molekülün dağılmasında moleküler difüzyonun temel etki olduğu durumda hayvanın algıladığı tek işaret kimyasalın kendisi ve uzay-zaman gradyenti olur. Kimyasal madde yoğunluğunun gradyentine göre yukarı veya aşağı yüzmek mikroorganizmalarda görülen en eski davranışlardan biridir. Kokuya dayalı davranışların en temel formları mikroorganizmalarda bulunur. Bazı tek hücreli ökaryotlar kimyasal çekicinin kaynağına doğru yüzer. Bu

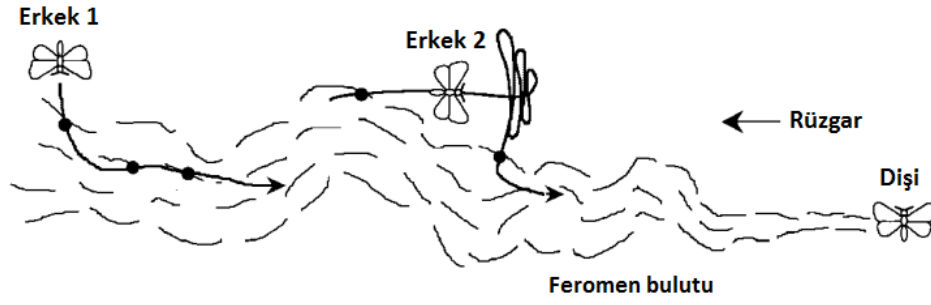


Şekil 2.5: Havada ve suda dağılan koku bulutu [1]

canlıların farklı kemoreseptörlerindeki sinyal farkından yoğunluk gradyentini tespit ettikleri bilinmektedir. Farklı konumlardaki algılayıcıların karşılaştırılarak gradyent hesaplamasına dayanan bu yöntem tropotaksis olarak adlandırılır.

Escherichia Coli gibi bakterilerin ise hacimleri çok küçük olduğu için kemoreseptörlerinden gelen veri farkından gradyent bilgisi elde edilemez. Bu yüzden bu tür küçük bakteriler zamana göre yoğunluğu karşılaştırarak hesaplama yaparlar. Zamana göre örneklemeye dayanan bu davranış *klinokinesis* olarak adlandırılır. Eğer canlı hareket ederken çekici kimyasal yoğunluğunun arttığını tespit ederse aynı yönde gitmeye devam eder. Fakat yoğunluk azalırsa bu yanlış yönde gittiği anlamına gelir. Buradaki problem yanlış yönde gidildiği bilgisinden doğru yönün elde edilememesidir. Bakteri bu yüzden önceki yönünden farklı olmak üzere rastgele bir tarafa yönünü çevirir [21].

Küçük mikroorganizmaların davranışları incelenirken moleküler difüzyonun sebep olduğu yumuşak ve düzenli bir derişim gradyentine sahip ortamlar ele alınmıştır. Mikroorganizmaların kısa mesafeli aramalarında bu durum geçerli olsa da hava ve sudaki kimyasal dağılımları bundan daha karmaşık bir problem olarak ortaya çıkar. Akışın ve yerel girdapların olduğu bir ortamda koku dağılımı kararsız ve heterojendir. Şekil 2.5'te su ve havanın akışının olduğu durumlarda kimyasal koku bulutunun dağılımı gösterilmiştir. Kaynağından ayrılan kimyasal madde akı yönünde ve türbülansların biçimlendirdiği şekilde karmaşık bir dağılım gösterir.

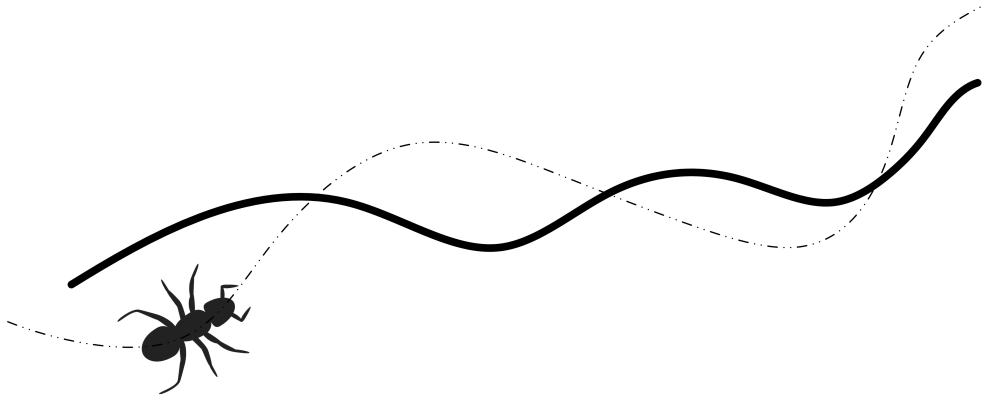


Şekil 2.6: Kelebeğin havada yayılan koku takibi [1]

Bu durumda derişimde düzenli bir derişim gradyenti bulunmaz. Uzun bir süre boyunca hesaplanarak ortalaması alınan gradyent süreklilik gösterse de bu süre pek çok mühendislik uygulaması için çok uzun bir süre olmasının yanında hayvanların başarısının çok gerisinde kalan bir durum olur. Hayvanlar yiyecek, eş, yuva vb. bulma kokusu takip etmede bu zor koşullar altında bile başarı gösterir. Bu konuda literatürde en çok incelenen canlılar deniz kabukluları ve güve kelebekleridir. Örneğin deniz kabukluları hayatta kalmak için suda dağılan besin kokusunu takip ederken erkek güve kelebekleri de dişisine ulaşmak için havada yayılan çekici feromeni izler.

Uçan, yüzen veya yürüyen hayvanlarda akı yönünün tersine olan koku takibinin ortak bir özelliği de hareketin genelde düz bir çizgi halinde olmamasıdır [22]. Bu konuda en çok üzerinde çalışılan hayvanlardan biri erkek kelebeğin dişi kelebeği bulurken izlediği yoldur. Bakterinin davranışının tersine bu durumdaki kelebek dişiden gelen koku ile tetiklenen bir eylem olarak rüzgar akış yönünün tersine gitme stratejisini izler. Eğer erkek kelebek koku bulutundan ayrılacak ve feromen sinyali kaybolacak olursa rüzgar yönüne dik olarak sağa sola uçmaya başlayarak koku izini arar. Kelebeğin koku bulutu içindeki hareketi düz bir çizgi halinde olmayıp farklı yönlerde küçük rastgele hareketleri de içinde barındırmaktadır. Algoritma geliştirirken bu rastgele davranış da değerlendirilecektir.

Farklı sensörlerden alınan bilginin doğrudan gradyent tespitinde kullanılması (tropotaksis) böceklerde simetrik bulunan koku organları olan sağ ve sol antenler vasıtasıyla sağlanır. Koku yayan kimyasal maddeler bölge belirlemek ve iz takibi için hayvanların sıklıkla kullandığı yöntemlerden biridir. Bu konudaki en bilinen örnek karıncaların yiyecek kaynağı bulduktan sonra yuvaya dönüşte bir iz bırakarak



Şekil 2.7: Karıncanın iz takibi

yol almasıdır. Karınca yuvaya döndüğünde yuvadaki diğer karıncaların besin kaynağına ulaşmaları için iz bırakmış olur. Bulunan besini elde etmek için yola çıkan diğer karıncalar tropotaksis davranışı yardımıyla koku izini takip eder. Şekil 2.7’te görüldüğü gibi karınca sol anteninden daha kuvvetli bir veri gelirse sola, sağ anteninden daha kuvvetli bir veri gelirse sağa yönelerek zeminde yer alan kokuyu izini takip etmektedir.

2.2.3.2 Elektronik burun uygulamaları

Elektronik burunlar biyolojik çalışmalarda bilginin elektronik ürünlere başarılı bir transferi olarak görülür. Hastalık teşhisi ve yemek bozulmalarının tespit edilmesine yönelik uygulamaları bulunmaktadır [23]. Bu tür koku tabanlı davranışlardan esinlenerek kimyasal sensör teknolojilerinin robot yönlendirmesi üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Koku rehberliğindeki bu davranışlardan kimyasal iz takibi ve koku bulutu izleme eylemlerini gerçekleştiren robot sistemleri geliştirilmektedir [1].

Temelde koku algılama ve sınıflandırma işlemlerini gerçekleştirmek için algılama ve işleme birimleri olmak üzere iki bölümden oluşurlar. Hareketli robotlar için gerçek zamanlı koku takip etme probleminde karşılaşılan temel sorunlardan biri koku sensörlerinin yavaş çalışmasıdır. Tipik gaz sensörleri kararlı duruma ulaşmak için onlarca saniyeye ihtiyaç duyar. Dakikalara kadar varabilen bu durum gerçek zaman kısıtlarını karşılamaktan çok uzaktır. Koku sensörlerinin aksine hayvanlar bu problemin çözümünde çok daha hızlıdır. Birkaç yüz milisaniyede kokunun algılanması, sınıflandırması ve işlenmesi biter. Bu yüzden hayvanların bu

başarılarını taklit etmek koku ile ilgili problemlerin çözümünde etkili bir yol olabilir. Literatürde yapılan çalışmalar iki grupta toplanabilir. İlki yerdeki koku izini takip eden robotlar, karıncaların feromon iz takibinin modeli olarak düşünülebilir. İkinci grupta ise suda veya havada yayılan kimyasalın kaynağını bulan robotlar yer alır. Bakteriden memelilere kadar birçok canlı bu davranışı gösterir.

Koku sensörlerinin yavaşlığı bu alandaki temel problem olduğu için hız sağlayacak çeşitli algoritmalar üzerinde çalışılmıştır. Bunun için koku sensörlerinin kararlı seviyeye ulaşmasını beklemeden algılama ve sınıflandırma işlemlerini yapmak gereklidir. [24] numaralı kaynakta yer alan çalışmada gerçekleştirilen robot 2 metre uzaklıktaki koku kaynağını, kullanılan koku sensörlerinin cevapları 1 dakikayı aşmasına rağmen 32 saniyede bulmayı başarmıştır. Bu çalışmada robot gaz/koku bilgisine gaz sensörlerinden gelen gaz derişimi bilgisi ve hava akım sensörlerinden alınan rüzgar yönü bilgisini sentezleyerek ulaşır. Buradaki temel fikir gaz sönsör cevabının başladığı yeri belirlemek ve her sensör çıkışındaki bağıl değişimi gözlemlemek, temel strateji ise koku için yerel bir arama yapmak ve bulunduğunda esinti yönünün tersine doğru izi takip etmektir. Robotun hareketinde arama ve takip olmak üzere iki temel mod bulunmaktadır. Arama modunda istenen kokunun tespiti için hareketler yapılırken, takip modunda koku bulunması durumunda esinti yönünün tersine gidilerek koku kaynağına ulaşılmaya çalışılır. Eğer bu esnada koku kaybedilirse tekrar arama moduna geçilir.

Martinez vd. koku algılama ve kaynağa yönelme için doğadan esinlenen yöntemleri robot üzerinde gerçekleştirmişlerdir [25]. Yapılan bu çalışmada koku tanıma sistemi yapay sinir ağı ile tanımlanmıştır. Robotun iki tarafındaki gaz sensörü dizilerinden gelen verinin değerlendirilmesine dayanan bir algoritma kullanılmıştır. Buradaki sensör dizileri beş farklı tip olmak üzere 10 adet sensörden oluşmaktadır.

[26]'de yapılan çalışmada ise robot üzerinde ön ve arkada olmak iki adet gaz sensörü kullanılarak bir boyutlu olarak robotun koku kaynağını bulması denenmiştir. Buradaki temel algoritma, koku kaynağını geçen robotun ön sensöründen gelen veri koku kaynağına yaklaşırken arka sensörden kuvvetli olmasına rağmen hedefi geçince zayıf düşmesidir. Bu durumda robot 180 derece dönerek koku kaynağına yaklaşır.

[27]'deki çalışmada ise bakterilerdeki kemotaksis, kelebeklerdeki koku bulutunda hedef bulma ve bunların yanında koku gradyentine dayalı davranışlar incelenerek algoritmaları üzerinde tartışılmıştır. Kemotaksis algoritmalarının karşılaştırılması ise [28] numaralı kaynaktan incelenebilir.

2.3 Algoritma

Çalışmanın bu kısmında koku ile ilgili olarak bir önceki bölümde bahsedilen canlıların koku takibinde kullandıkları bazı yöntemlerin algoritmaları ele alınacak ve gerçekleştirme yöntemleri tartışılacaktır. Bunun yanında biyolojik sinir ağlarından esinlenen Hibrit İşlemci Topluluğunun koku sisteminde kullanımından bahsedilecektir.

2.3.1 Biyolojik sinir ağı algoritması

Canlılarda sinir ağı yapısından esinlenen hücresel sinir ağı temelli Hibrit İşlemci Topluluğu Bölüm 2.2.2'de tanıtılmıştı. Bu bölümde Hibrit İşlemci Topluluğunun matematiksel ifadesinden yazılım/donanım gerçeklemesine uygun algoritmik ifadesine geçiş yapılacaktır. Ayhan vd. [8] yapının FPGA gerçeklemesini incelemiştir. **2.22** denklemi H matris elemanları yerlerine koyularak aşağıdaki bağıntı elde edilir:

$$I[k] = \theta \left\{ (-1)^{h_{0,0}} [(h_{0,0} \oplus h_{0,-1})x_{0,-1}[k] + (h_{0,0} \oplus h_{-1,0})x_{-1,0}[k] \right. \\ \left. + (h_{0,0} \oplus h_{1,0})x_{1,0}[k] + (h_{0,0} \oplus h_{0,1})x_{0,1}[k] + u_{0,0}[k] \right\} \quad (2.24)$$

$$J[k] = \frac{1}{2} \left\{ (-1)^{h_{0,0}} [(h_{0,0} \oplus h_{0,-1})x_{0,-1}[k] + (h_{0,0} \oplus h_{-1,0})x_{-1,0}[k] \right. \\ \left. + (h_{0,0} \oplus h_{1,0})x_{1,0}[k] + (h_{0,0} \oplus h_{0,1})x_{0,1}[k] + u_{0,0}[k] \right\} \quad (2.25)$$

$$I[k] = \begin{cases} J[k], & \text{eğer } J[k] > 0 \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (2.26)$$

Hücrelerin durum denklemi ifadesi Denklem **2.14**'te elde edilmişti. Sürekli zamandaki bu denklemin sayısal donanım/yazılım gerçeklemesi için ayrık zamana taşınmasında ileri Euler yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem ile ayrıklaştırılmış hali Denklem **(2.28)**'de gösterilmiştir.

$$\beta_i^E \left(\frac{x_i(n+1) - x_i(n)}{T_s} \right) = -x_i(n) + I_i^E + \mu^E \quad (2.27)$$

Eğer $\frac{T_s}{\beta_i E} = \alpha$ alınırsa eşitlik aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$x_i(n+1) = x(n)(1 - \alpha) + \alpha I_i + \alpha \mu \quad (2.28)$$

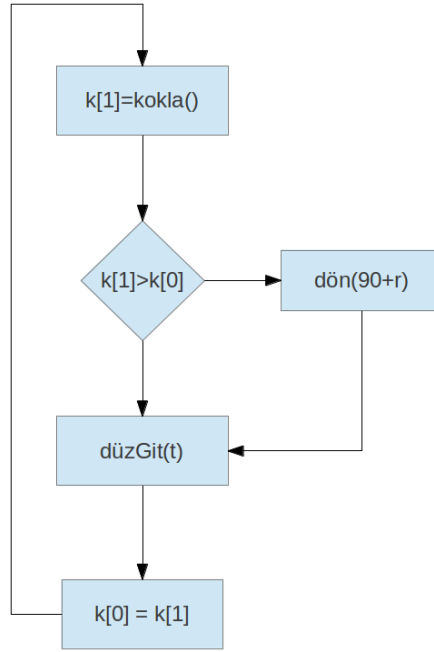
Böylece hücrelerin durum denklemi döngüsel olarak hesaplanabilir bir yapı haline gelmiştir. Yazılım veya donanım olarak gerçekleştirilmesi durumunda $I[k]$ ve $J[k]$ bağlantı değerlerini alarak α parametresi ile hesaplama gerçekleştirilebilir.

2.3.2 Kemotaksis algoritması

Bakterinin zaman içinde aldığı değerleri karşılaştırarak koku dağılım gradyentini kestirmesine dayalı hareket biçimi bu algoritmanın temel çıkış noktasıdır. Tasarlanan sistemde koku algılayıcıları sürekli çalışır, eğer sensörlerden gelen eşik değeri aşılsa bu algoritma işlemeye başlar. Sistemin bir önceki örneklemede belirlenen koku miktarını tutmak için bir bellek elemanına ($k[0]$) ihtiyacı vardır. Her iki değişkenin de ilk değeri koku takibinin başlaması için gerekli olan eşik değeridir. Yeni örnekleme ise $k[1]$ ile tutulur. Akış diyagramı Şekil 2.8’te görülen algoritmada sistem ilk etapta sensörleri ile koku miktarını algılar ve $k[1]$ değişkeninde saklar. Ardından bunu bir önceki örneklemedeki koku miktarını tutan $k[0]$ ile kıyaslar. Eğer $k[1]$ değeri $k[0]$ değerinden büyükse koku kaynağına yaklaşıldığı anlamına gelir ve *ilerle(d)* fonksiyonu ile önceki hareket yönüne devam edilmesi sağlanır. Önceki bölümde canlıların davranışı izlenirken düz bir çizgi hattında gitmek yerinde rastgele hareketler içeren bir ilerlemeden bahsedilmişti. Burada da benzer bir rastgeleliği modellemek için sistemin düz giderken *rastgele(-5,5)* alt fonksiyonu ile yön üretilmesi sağlanır. Bu fonksiyon -5 ile +5 derece arasında, ortalaması 0 olmak üzere değerler üretir. Eğer sistem gittiği yönde koku miktarının azaldığını fark ederse, yani $k[1]$ değerinin $k[0]$ değerinden küçük olduğu durumda ters yöne fakat rastgele bir açıyla dönmesi gerekir. O halde dönme açısı *rastgele(90,270)* fonksiyonu ile üretilir.

2.3.3 Dağılan koku takibi algoritması

Bu algoritmada hava veya su gibi ortamlarda esintinin veya akışın da etkisiyle dağılan kokunun takibi ele alınacaktır. Önceki bölümde bahsedildiği üzere bu konuda en çok incelenen davranış güve kelebeğinin dışından gelen feromonleri takip etmesidir. Kemotaksis algoritmasında olduğu gibi burada da algoritma kokunun eşik değerini

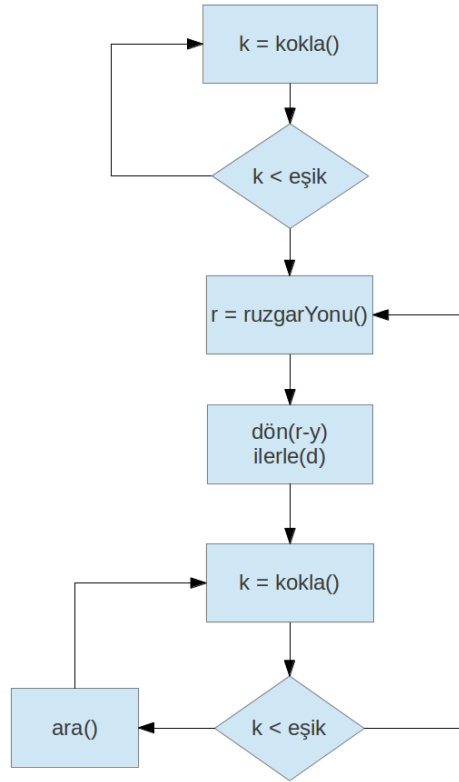


Şekil 2.8: Kemotaxis algoritması

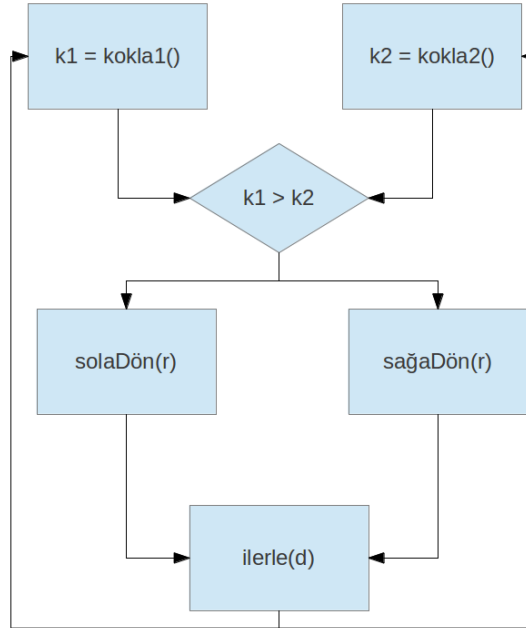
aşmasıyla tetiklenecektir. Farklı olarak akıntının etkisi de burada değerlendirilir ve sistem akıntının tersi yöne yönelir. İlerleme esnasında koku sensörlerinden alınan veri sürekli değerlendirilir. Eğer koku belli bir eşik değerinin altına düşerse koku bulutunun dışına çıkıldığı anlamına gelir ve sistem güve kelebeğinin yaptığı gibi rüzgar yönüne dik olacak şekilde zig-zag çizerek bulutu aramaya başlar. Bulutun içine girdiğinde eşik değeri aşılmış olur ve sistem rüzgar yönünün tersine gitmeye devam eder. Hedefe ulaşıldığında algoritmanın durması ise ikili görüş ile edinilen bilgiye dayandırılabilir. Algoritma Şekil 2.9’te gösterilmiştir.

2.3.4 İz takibi algoritması

Bir yüzeydeki koku izinin takip edilmesinde ise karıncanın davranışı modellenmiştir. Karıncanın antenleri robot sisteminin iki yanına dizilen koku sensörleri ile temsil edilir. Diğer algoritmalarda olduğu gibi bu sistem de kokunun belli bir eşik değerini aşmasıyla tetiklenir. Yüzeydeki koku izi sensörlerden gelen verilerin karşılaştırılmasıyla takip edilir. Hangi koku sensöründen alınan veri daha büyükse o koku sensörünün olduğu yöne doğru dönüş gerçekleştirilir. İz takibi algoritması Şekil 2.10’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Dağılan koku takibi algoritması



Şekil 2.10: İz takibi algoritması

3. İKİLİ GÖRÜ

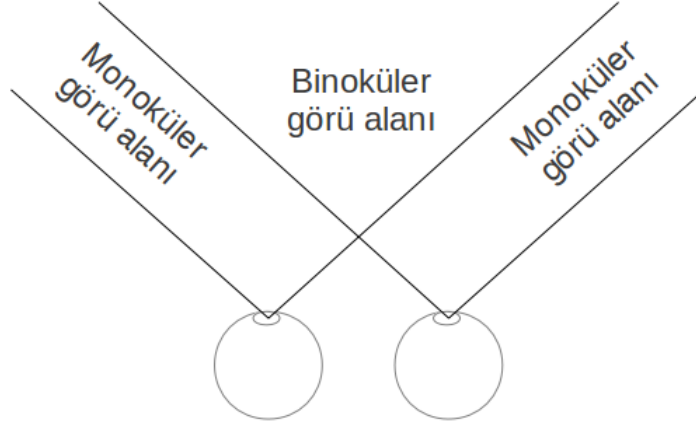
3.1 Giriş

Birinci bölümde canlılardaki sinir sisteminin düşük çalışma frekansına rağmen canlılığa ilişkin özel problemlerin çözümündeki başarısında veri tümleştirmenin öneminden bahsedilmişti. İkinci bölümde bahsedilen koku duyusuna ek olarak bu bölümde canlıların görme duyusu ele alınacak ve bundan esinlenen ikili görü konusu incelenecektir.

Robotik uygulamalarında koku algılamanın yanında görüntü verisinin de işlenmesi robotun dış dünyayı kavrama kabiliyetini artırır. Bunun için robot *gözlerinin* aldığı görsel bilgiden nesnelerin yerlerinin doğru şekilde belirlenmesi gerekir. Bilindiği gibi bu görsel bilgi kameradan iki boyutlu görüntü olarak alınmaktadır ve bu iki boyutlu görüntüden üçüncü boyut bilgisinin yani cisimlerin uzaklık/derinlik bilgisinin çıkarılması birden fazla kamera kullanılması durumunda mümkün hale gelir. Bu probleme yönelik en sık kullanılan yöntemlerden biri ikili görü (stereo vision) yöntemidir [29].

İkili görü insandaki *stereopsis* olayından esinlenilmiş bir yöntemdir. Stereopsis iki gözden gelen görüntülerin değerlendirilerek görülen sahneye ait uzaklık ve derinlik bilgisinin algılanması olayıdır. Buna göre iki gözden alınan dış dünyaya dair görüntüler -binoküler görü adıyla anılmaktadır- arasındaki farklılıktan derinlik çıkarılabilmektedir. Bunun nasıl olduğunu basit bir deneyle anlaşılabilir. Arka planın uzaktaki şekillerden oluştuğu bir ortamda eğer bir parmağa sağ ve sol göz ile teker teker bakılırsa parmağın arka plana göre yer değiştirdiği görülür. Başka deyişle daha uzakta olan arka plan sabit kalırken, daha yakında olan parmak belirgin bir yer değişimi göstermektedir. Buna bakarak iki gözden alınan görüntülerde yakın cisimlerin uzak cisimlere göre fazlaca yer değiştirdiğini ve buradan görelî uzaklık bilgisinin çıkarılabildiği anlaşılır.

İkili görü yöntemi yukarıda bahsedilen prensibe dayanır. Farklı iki kamera görüntüsü ya da hareket halindeki tek kamera görüntüsü ile görüntülenen sahnenin üç boyut bilgisinin çıkarılması olarak tanımlanabilir. Bu projede robotik uygulamalarda iki gözü temsili olarak belli uzaklığa yerleştirilmiş olan iki kamera kullanılacağı için canlılardaki binoküler görü benzetimi gerçekleştirilmeye çalışılacaktır.



Şekil 3.1: Binoküler Görü

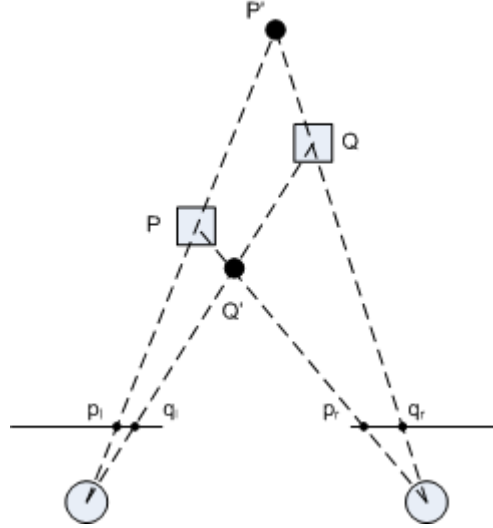
Bu bölümde ikili görü yöntemi kısaca tanıtılacak, problemlerine ve literatürdeki çözümlere değinilecektir. Sonrasında, gerçekleştirilen ikili görü algoritması verilecektir.

3.2 Teori

3.2.1 Kapsam

İkili görü yöntemi bahsedildiği gibi iki boyutlu görüntüdeki üçüncü boyut, yani derinlik/uzaklık bilgisinin çıkarılmasını hedefler. Bu yöntemde aynı sahneye ait farklı iki kameradan alınan görüntünün birbiri ile ilişkilendirilmesi ile derinlik bilgisinin elde edilmesi mümkündür. Yukarıda verilen örnekten çıkarılacağı gibi gerçek dünyadan bir nesneye ait bir noktanın iki görüntü içindeki koordinatlarının değişiminden basit geometrik hesaplar yardımıyla o noktaya ait uzaklık belirlenebilir. Şekil 3.2’de iki iğne deliği kameradan oluşmuş basit bir ikili görü sisteme ait bir şema görülmektedir.

İkili görü yöntemi epipolar geometrisine dayanır. Epipolar geometri, üç boyutlu uzaydaki bir nesnenin farklı iki konumdaki kameralardan alınan iki boyutlu izdüşüm görüntüleri arasındaki geometrik ilişkisini gösterir [30]. İki farklı yoldan epipolar

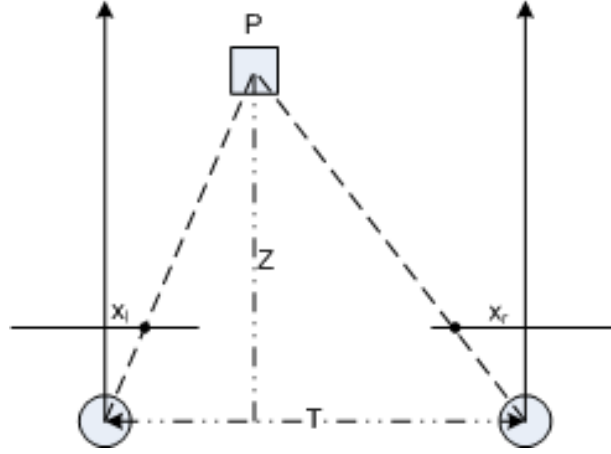


Şekil 3.2: Basit ikili görü sistem şeması: üç boyutlu yeniden yapılandırma

geometrisinden faydalanılabilir [31]. İlkinde kameranın kalibre edilmesi ve sonrasında epipolar geometri yardımıyla *temel matrizen* yararlanılarak üçüncü boyut bilgisi elde edilir. İkincisinde ise kameraların kalibre edilmesine gerek kalmadan görüntü eşleştirmelerinden elde edilen *temel matris* yardımıyla üçüncü boyut bulunur. İki yöntem de temelde *üçgenleme* prensibine dayanır [32], [31]. Bu prensibi Şekil 3.2 inceleyerek anlamak mümkündür.

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, sol ve sağ kameradan alınan görüntülerdeki eşleştirilmiş (p_l, q_l) ve (p_r, q_r) noktalarının projeksiyon merkezinden çıkan ışınların kesiştiği nokta bulunarak (p_l, q_l) ve (p_r, q_r) noktalarının iki boyutlu izdüşümü olduğu üç boyutlu P ve Q noktaları elde edilir. Eğer p_l, q_l eşi q_r, p_r olarak bulunsaydı, P' ve Q' noktaları elde edilecekti. Buradan da anlaşılaacağı gibi, P ve Q noktalarının en doğru şekilde oluşturabilmek için iki kamerada eşleştirilen noktaların koordinatlarının olabildiğince doğru belirlenmesi, başka bir deyişle (p_l, q_l) ve (p_r, q_r) eşleştirmesinin doğruluğunda yüksek hassaslık sağlanması gerekir. Eşleştirmenin doğruluğu ve hassaslığı sağlandığında bu eşleşmeden üçüncü boyut çıkarımı ve böylece yeniden yapılandırma da üçgenleme yöntemiyle Şekil 3.3’ten de anlaşılaacağı gibi, Denklem 3.1 [32] yardımıyla elde edilebilir.

$$\frac{Z}{T} = \frac{Z - f}{T - |x_l| - |x_r|} \quad (3.1)$$



Şekil 3.3: Üçgenleme yöntemi

Burada T ikili görü sisteminin izdüşüm merkezleri arasındaki mesafe, f odak uzaklığı ve Z ise aranan üçüncü boyut yani derinlik/uzaklıktır. Uyuşmazlık miktarı, d için $d = x_l - x_r$ ifadesi kullanıldığında, Denklem 3.1 Z için Denklem 3.2 olarak çözülür.

$$Z = f \frac{T}{d} \quad (3.2)$$

İkili görü yönteminde bu iki problemin çözülmesi sistemin başarımında kritiktir. Bunlar literatürde eşleştirme ve yeniden yapılandırma problemleri olarak geçer. Bir sonraki bölümde bu problemler ve çözümlerine değinilecektir.

3.2.2 İkili Görü Problemleri

3.2.2.1 Eşleştirme Problemi

İkili görü sisteminin iki problemten ilki eşleştirme problemidir. Sistemin teorisinden de anlaşıldığı gibi, üç boyutlu bir noktanın iki farklı piksele denk gelen iki izdüşümü arasındaki kayma miktarını hesaplamak için bu iki piksel konumları eşleştirilmelidir. Bu probleme bir arama problemi olarak bakılabilir. Sol (sağ) görüntüde verilen bir eleman ya da piksel için, sağ (sol) görüntü içinde eşleşen eleman ya da piksel aramak amaçlanmaktadır. Burada karşımıza iki farklı soru karşımıza çıkar:

1. Hangi görüntü elemanları eşleştirilmeli?
2. Hangi benzeme/ eşleştirme ölçütü kullanılmalı?

Literatürde bu konu üzerine yapılan çalışmalar fazlaca olsa da hala eşleştirme problemine tam anlamıyla çözüm bulunabilmiş değildir. Sunulan çözümlerin temel prensibi ise iki piksel arasında bir *eşleştirme maliyet fonksiyonu* ile eşleştirme kurmaktır. Bu yöntemler yukarıdaki iki soruya verdikleri cevaplar açısından literatürde farklı sınıflandırmalar altına yer almaktadır. Bu sınıflandırmalar hem eşleştirilen elemanlar bazında, yani birinci soruya verdikleri cevap açısından hem de kullandıkları eşleştirme ölçütü, yani ikinci soruya verdikleri cevap açısından olabilmektedir. [33], [34] ve [32] kaynaklarında farklı sınıflandırmalara ve metot performanslarına ilişkin bilgiler bulunabilir.

Burada yöntemler seyreltik yöntemler (öznitelik tabanlı) ve yoğun (piksel, blok ya da korelasyon tabanlı) yöntemler olmak üzere iki sınıf altında toplanacaktır.

Seyreltik Yöntemler

Bu yöntemler görüntü içinde belirleyici özniteliklerin eşleştirilmesine dayanır. Bunlar kenar, köşe, çizgi gibi görüntüde yüksek belirginlik içeren piksellerdir. Bu özniteliklerin aralarındaki benzeme ölçütüne göre eşleştirme yapılır. Ayrıca eşleştirme çiftlerinin sayısı belli kısıtlar kullanılarak olasılığı yüksek olan çiftlerin sayısına indirgenir. Bu kısıtlar geometrik ya da analitik kısıtlar¹ olabilir. Belli sayıda piksel için eşleştirme yapıldığından, eşleştirme algoritması hızlı sonuç vermektedir. Yöntemin donanımsal gerçekleminin bazı kaynak problemlerini daha başarımla çözmesinin yanı sıra görüntülerdeki ışık farklılıklarından kaynaklanacak problemlere dayanıklı bir çözüm de oluşturmaktadır [33]. Örneğin herhangi bir kenara ait piksel değerleri aydınlatma farklılıklarına dayanıklı bir özniteliktir ve bu nedenle iki görüntüde de eşleştirilmesi daha kolaydır. Bu tür yöntemlerle ilgili olarak [33] içinde referans gösterilen kaynaklara bakılabilir.

Bu öznitelikler üzerinde eşleştirme yapılırken benzeme ölçütü (S) olarak ağırlıklı ortalama tersi kullanılabilir. Buna göre, eğer bir çizgi için atanabilecek değerler boy, doğrultu, orta nokta koordinatları ve çizgi boyunca ortalama kontrast ise benzeme

¹Geometrik kısıtlara örnek olarak epipolar kısıt (sol ya da sağ görüntüdeki izdüşüm ve izdüşüm merkezleri arası uzaklık bilindiğinde diğer görüntüdeki izdüşüm belli bir epipolar düzlemi üzerinde olmak zorundadır) verilebilir. Analitik kısıtlar ise tekillik kısıtı (her bir öznitelik sadece tek eşe sahip olabilir) ya da devamlılık kısıtı (uyuşmazlık görüntünün her yerinde devamlı şekilde değişir) olarak örneklendirilebilir [32].

ölçütü S şu şekilde hesaplanır:

$$S = 1 / \sum_{i=1}^4 (w_i * f_i), i = 1, \dots, 4 \quad (3.3)$$

Yukarıda w_i ağırlıklandırma katsayıları, f_i ise çizgiye ait i . özneliktir. Burada ağırlıkların belirlenmesi zor bir parametre kestirimi problemine dönüşebilmektedir [32].

Verilen örnekten de görüldüğü üzere burada sadece belli sayıda piksel için eşleştirme yapıldığından işlem yükü daha azdır, ancak edinilen derinlik haritası da buna bağlı olarak seyreltiktir.

Yoğun Yöntemler

Seyreltik yöntemler çeşitli avantaja (düşük işlem yükü gibi) sahip olsa da az sayıda piksel eşleştirmesi yapması nedeniyle bazı uygulamaların isterini karşılayamamaktadır [33]. Örneğin görüntü-bazlı modelleme uygulamalarında yoğun bir derinlik haritasına ihtiyaç duyulduğundan daha fazla sayıda piksel eşleştirmesi gerekmektedir. Bu nedenle yoğun eşleştirme yöntemlerinin geliştirilmiştir. Eşleştirme problemi yoğun yöntemler ile birlikte daha da zorlaşmaktadır; çünkü görüntü içinde belirginleşen noktaları ya da belli bir doku içeren bölgeler dışında herhangi bir dokusu olmayan, sabit renkteki bölgeler için de eşleştirme ve derinlik tespiti yapılması gerekir [33]. Yoğun yöntemler kendi içinde global ve yerel olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Yerel ya da blok tabanlı algoritmalarda uyumsuzluk (disparity) sadece belli bir görüntü çerçevesi içerisindeki piksel değerlerine bağlıdır. Bu tür yöntemler üç temel adıma sahiptir:

1. Eşleştirme maliyeti: Eşleştirme maliyet fonksiyonu ile belli bir uyumsuzluk değeri için maliyet hesaplanır.
2. Toplama: Sabit bir uyumsuzluk değeri için belli boyuttaki çerçeve üzerinde toplama yapılır.
3. Eşleştirme: Seçilen toplama yöntemine göre en uygun (örneğin en düşük) toplama değerini veren pikseller eşleştirilir.

Yerel yöntemlerin bazıları, örneğin normalize çapraz-korelasyon, eşleştirme maliyetini belli bir blok içinde yaptıklarından dolayı 1. ve 2. adımları bir arada gerçeklemektedirler [33].

Global yöntemler ise blok tabanlı ilerlemek yerine, problemi tüm görüntü üzerinde bir global optimizasyon problemine çevirir. Genelde bu yöntemlerde yukarıda verilen toplama adımı atlanır. Global optimizasyon problemi şu şekilde verilebilir:

$$\arg \min_d E(d) = E_{data}(d) + \beta E_{smooth}(d) \quad (3.4)$$

Yukarıda $E_{data}(d)$, uyuşmazlık haritasının giriş görüntüsüne ne kadar uygunluk taşıdığının ölçüsünü belirler; $E_{smooth}(d)$ ise algoritmanın yaptığı yumuşaklık (smoothness) varsayımını formülleştirir. $E_{smooth}(d)$ çoğunlukla $\rho(d_{ij} - d_{kl})$ şeklinde ele alınan pikselin komşularının toplamsal katkısı olarak belirlenir. Birbirine komşu piksellerin benzer uyuşmazlık değerlerine sahip olması beklendiğinden, ρ fonksiyonu monoton-artan fonksiyon olarak belirlenir [35].

Özet olarak, eşleştirme problemine yönelik çözüm üreten yoğun yöntemlerde piksel eşleştirmeleri blok tabanlı ya da piksel-tabanlı yapılmaktadır. Bu eşleştirmeleri yaparken kullanılan eşleştirme fonksiyonları ya da benzeme ölçütü ikili görü sistemi için ayrıca önemlidir. Bir sonraki alt başlık literatürde geçen eşleştirme fonksiyonlarından bahsedecektir.

Eşleştirme Maliyet Fonksiyonları

İkili görü sistemlerinde her algoritma bir eşleştirme maliyet fonksiyonu ya da benzeme ölçütü kullanır. Algoritmaların performansı kullandıkları eşleştirme fonksiyonuna göre değişim gösterir [36]. İkili görü sisteminin belli başlı sorunları mevcuttur: piksel değer bozulmaları, gürültü, dokusal olmayan bölgeler, perspektif etkisi vb. [37]. Eşleştirme fonksiyonları bu tür problemlerin çözülmesi amacıyla çeşitlendirilmiştir. Örneğin, aydınlatma problemine yönelik LCDM (Luminosity-Compansated Dissimilarity Measures) yöntemi [38], perspektif etkisine yönelik FC (Fine Correlation) [37] yöntemi literatürde önerilmiştir.

Literatürde çok sayıda eşleştirme fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlar sınıflandırıldığında belli başlı başlıklar altında toplanabilir: Çapraz-korelasyon tabanlı, klasik istatistik-tabanlı, türev-tabanlı, parametrik olmayan ölçütler, dayanıklı ölçütler [37] sık karşılaşılan ölçütlerdir. Bu başlıklar altında farklı metotlar eşleştirme ölçütü olarak kullanılmaktadır. Burada en çok kullanılanlardan kısaca söz edilecektir.

Tüm diğer eşleştirme fonksiyonları için [37], [33] ve [38] kaynaklarından bilgi edinilebilir ve referanslara ulaşılabilir.

En basit eşleştirme metodu mutlak fark (Absolute Distance, AD) operatörüne dayanır. Piksel-tabanlı yöntemlerde şu şekilde gerçekleşir [29]:

$$AD(x, y, d) = |I_l(x, y) - I(x, y - d)| \quad (3.5)$$

Burada I_l ve I_r , sırasıyla sol ve sağ görüntüleri, (x, y) piksel koordinatlarını ve d ise uyumsuzluk miktarını ifade etmektedir. Karesel fark (Squared Distance, SD) ise Denklem 3.6'de verilmiştir:

$$SD(x, y, d) = (I_l(x, y) - I(x, y - d))^2 \quad (3.6)$$

AD yöntemine göre daha doğru sonuçlar verse de kare işleminin getirdiği maliyet fazladır. Bu iki yöntem piksel-tabanlı işlemlerdir ve yukarıda verilen beş alt sınıf içinden klasik istatistik tabanlı metotlar başlığı altına girerler. SAD (Sum of Absolute Differences) ve SSD (Sum of Squared Distances) ise bu yöntemlerin blok tabanlı versiyonlarıdır:

$$SAD(x, y, d) = \sum_W |I_l(i, j) - I(i, j - d)| \quad (3.7)$$

$$SSD(x, y, d) = \sum_{j=y-W/2}^{y+W/2} \sum_{i=x-W/2}^{x+W/2} (I_l(i, j) - I(i, j - d))^2 \quad (3.8)$$

Yukarıda W , x, y piksel koordinatları çevresinde alınmış belli boyuttaki çerçevedir.

Blok tabanlı eşleştirme fonksiyonuna diğer bir örnek Normalize Çapraz Korelasyon (Normalized Cross-Correlation, NCC) verilebilir:

$$NCC(x, y, d) = \frac{\sum_{j=y-W/2}^{y+W/2} \sum_{i=x-W/2}^{x+W/2} I_l(i, j) I_r(i, j - d)}{\sqrt{\sum_{j=y-W/2}^{y+W/2} \sum_{i=x-W/2}^{x+W/2} I_l^2(i, j) \sum_{j=y-W/2}^{y+W/2} \sum_{i=y-W/2}^{y+W/2} I_r^2(i, j - d)}} \quad (3.9)$$

Bu fonksiyonun başarımı yüksek olsa da işlem yükü fazladır. Aydınlatma farklılığından ileri gelen sorunları gidermek içinse Sıfır-Ortalamalı Normalize Çapraz Korelasyon (Zero-mean Normalized Cross Correlation, ZNCC) ölçütü sunulmuştur [39]. Yine zorlu aydınlatma koşullarına yönelik Aydınlatma-Telafili Uyuşmazlık Ölçütü (Luminosity-Compansated Dissimilarity Measure, LCDM) önerilmiştir [38]. Bu yöntemde RGB renk uzayından HSL uzayına dönüşüm gerçekleştirilir. H ve S (Hue ve Saturation) farklı aydınlatma koşullarında olan iki görüntü için aynı değeri verdiği için iki görüntüdeki piksel karşılaştırması aydınlatmadan bağımsız bir sonuç vermektedir.

Blok tabanlı olan bazı yöntemlerden filtre yardımıyla kolayca gerçekleştirilmektedir. Örneğin parametrik olmayan yöntemlerden olan rank dönüşümü, rank filtre çıkışlarının mutlak farklarının hesaplanması ile kolayca gerçekleştirilmektedir [36]. Benzer şekilde bazı filtreler(bilateral, Laplacian of Gaussian gibi) kullanılarak kamera kazanç ve bias giderimi yapılmaktadır. Yine parametrik olmayan bir diğer yöntem örneği olan Census Dönüşüm [36] metodu büyük ölçekli, durağan olmayan maruz kalma ve aydınlatma değişimlerine dayanıklı sonuçların verdiği belirtilmiştir [33].

Yukarıda bahsedilen yöntemlerin dışında pek çok yöntem bulunmaktadır. Her yöntemin kendince avantajı ve dezavantajı mevcuttur. Bu tezin kapsamı dışında kaldığından bilinen tüm metotlardan ve performanslarından burada bahsedilmeyecektir. Daha detaylı bilgi, yöntemlerin performanslarını karşılaştıran [36] kaynağından elde edilebilir.

3.2.3 Yeniden Yapılandırma Problemi

İkili görü sisteminin ikinci problemi yeniden yapılandırma problemidir. Burada eşleştirme probleminin çözümünde elde edilen eş bölgelerin ve ikili görü sisteminin geometri bilgisinin varlığına dayanarak gözlenen nesnelerin üç boyutlu konum ve yapısı hakkında ne söylenebileceğine dair cevap aranır [32]. Aslında, sağ ve sol görüntülerdeki eşleştirilmiş piksellerdeki konum farklılığı görüntü çiftinin geometrisi ile, yani epipolar geometri ile yakından ilişkilidir [40]. Epipolar geometri kameranın harici ve dahili parametreleriyle belirlenir. Kameranın harici parametreleri kamera koordinat düzlemi ile dünya referans düzlemini, dahili parametreleri ise görüntüdeki

piksel koordinat düzlemi ile kamera referans koordinat düzlemini ilişkilendirir. Buna göre, harici parametreler ile döndürme matrisi ve öteleme vektörü; dahili parametreler ile kameranın optik, geometrik ve dijital karakteristikleri (perspektif projeksiyon, görüntü düzlemi koordinatları ile piksel koordinat dönüşümü arasındaki dönüşüm ve geometrik bozulmalar) belirlenmiş olur [41].

Yeniden yapılandırma probleminin çözümünde üç farklı durum ele alınır. İlk durum kameranın dahili ve harici tüm parametrelerinin bilindiği durumdur. İkinci durum sadece dahili parametrelerin bilindiği durumdur. Üçüncü durum ise dahili ve harici parametrelerin bilinmediği durumdur. Bu üç durum için yeniden yapılandırma problemi çözülebilmektedir [41], [32].

3.2.3.1 Dahili ve harici parametrelerin bilindiği durum için yeniden yapılandırma çözümü

Tüm parametrelerin bilindiği durum üçgenleme yöntemi uygulanarak doğrudan çözülebilir. Şekilde görüldüğü gibi p_l ve p_r noktalarına izdüşümü olan üç boyutlu P noktasının uzaydaki konumu izdüşümlerinden çıkan O_l ve O_r ışınlarının kesiştiği noktadan bulunur. Ancak bu ideal durumdur ve izdüşüm noktalarının, görüntü konumlarının ve parametrelerin tam olarak bilindiği durum için geçerlidir. Gerçek durumda ise gürültü gibi faktörler nedeniyle görüntü koordinatları bozulmaya uğradığından p_l ve p_r noktalarından çıkan ışınlar kesişemez; kesişim noktası iki ışına da en az uzaklıkta olan nokta olarak bulunur [32].

$a \in R$ ve $b \in R$ olmak üzere, ap_l sol görüntüdeki izdüşüm noktasından çıkan ışın (l) olsun. Aynı şekilde, sol görüntüdeki izdüşümden çıkan ışın r , $T + bR^T p_r$ olarak verilsin. Burada sağ görüntü izdüşümü olan p_r noktası, sol görüntü referans alınarak ifade edilmiştir. Ayrıca, bu iki ışına dik olarak w vektörü belirlenmiş olsun. Bu problem düzeneğine göre, çözülmesi gereken problem l ve r ışınlarını birleştiren ve w vektörüne paralel doğru parçasının orta noktasını (P') belirlemeye dönüşür. Bu noktayı belirlemek ise, doğru parçasının l ve r ışınlarına ait bitiş noktaları, yani $a_0 p_l$ ve $T + b_0 R^T p_r$ ifadelerini aşağıda verilen doğrusal denklem sistemlerini belli a_0, b_0 ve c_0 katsayıları için çözmeye dayanır [32]:

$$ap_l - bR^T p_r + c(p_l \times R^T p_r) = T \quad (3.10)$$

Buna göre yeniden yapılandırma algoritması için

1. Doğru parçasının bitiş noktaları **3.10** formülü ile bulunması,
2. Bulunan doğru parçasına ait orta noktası olan P' noktasının belirlenmesi

adımları tüm eşleştirilmiş nokta çiftleri için tekrarlanarak üç boyutlu yeniden yapılandırma elde edilmiş olur.

Dahili ve harici parametrelerin en az birinin bilinmediği durum için yeniden yapılandırma çözümü

Yukarıda bahsedildiği gibi, tüm parametrelerin bilindiği durum dışında daha iki durum için yeniden yapılandırma problemi hala çözülebilir. Sadece dahili parametrelerin bilindiği durumda ikili görü sisteminin geometrisi bilinmediği için görüntülen sahnenin gerçek ölçeği belirlenemez. Bu nedenle çözüm belli bir ölçeklendirme katsayısına kadar bulunabilir. Eğer sahne içindeki iki nokta arasındaki uzaklık biliniyorsa bu ölçeklendirme katsayısı belirlenebilir. Dahili ve harici parametrelerin ikisinin de bilinmediği durum için çözüm daha karmaşıktır ve yeniden yapılandırma belli bir izdüşüm dönüşümüne kadar çözülebilir. Bu iki durumda çözüm, tüm parametrelerin bilindiği durumdaki üçgenleme yöntemine göre daha karmaşıktır ve epipolar geometrisinin temel kavramlarına aşinalık gerektirmektedir. Çözümlere yönelik detaylı teorik ve algoritmik bilgi için [32] kaynağından faydalanılabilir.

3.3 İkili Görü Algoritması

Bu bölümde, önceki bölümlerde ikili görü sistemine ait verilen teorik bilgi ışığında bu sistemin proje kapsamında gerçekleştirilmesi için tasarlanan algoritmaya dair ayrıntılardan bahsedilecektir. Algoritma, donanımsal gerçekleştirilmesinde MATLAB benzetimi ile test edilmiştir. Aşağıda algoritma adımları ve elde edilen görsel sonuçlar verilmiştir.

3.3.1 Algoritma

İkili görü algoritması, temelde eşleştirme ve yeniden yapılandırma problemlerine çözüm adımlarına sahiptir. Önce eşleştirme problemi çözülerek her iki görüntü içinde eşleşen pikseller belirlenir. Sonraki adım ise görüntünün üç boyutlu taslağını çıkarabilmektir. İkinci adımda görüntü üzerinde bir *uyuşmazlık haritası* (disparity map) çıkarılır. Proje kapsamında, robotik uygulamalarda olduğu gibi engel tespiti için uzaklık/derinlik hesabı gerektiğinden bu uyuşmazlık haritasından *derinlik haritası* (depth map)'e geçilmiştir. Aşağıda adımların blok şeması ve ayrıntıları verilmektedir.

1. Renkli görüntüden gri ölçekli görüntüye geçiş
2. Blok tabanlı eşleştirme
3. Uyuşmazlık miktarının hesaplanması
4. Alt-piksel yaklaşımı

Yukarıda verilen blok şemada birinci adım öncesinde, sağ ve sol görüntülerin işlenerek aynı görüntü düzlemine getirilmesi gerekmektedir. Görüntülerin farklı düzlemlerde bulunması kameraların aynı düzlem üzerinde bulunmamlarından kaynaklanmaktadır. Aynı düzlemde bulunan görüntüler için eşleştirme problemi tek boyut içerisinde eş pikseli arama haline dönüşeceğinden görüntülerin rektifiye edilmesi önemlidir. Ancak bu projede, kameralar tamamen aynı düzlem içerisinde hizalanmış olarak kullanıldığından rektifikasyon işlemine gerek duyulmamış ve algorithmada bu adım atlanmıştır.

Algoritmanın adımlarının ayrıntıları ve Şekil 3.4'te verilen ikili görüntüler için çıkan sonuç aşağıda verilmektedir.

1. Renkli görüntüden gri ölçekli görüntüye geçiş

Kullanılan kameralar renkli görüntü almaktadır. Bu da üç bantlı (RGB) görüntü demektir. Bu projede RGB görüntüden gri ölçekli görüntüye geçilerek eşleştirme aşamasına geçilmiştir. Gri ölçekli görüntü (I) basitçe R, G ve B bantlarının değerlerinin ağırlıklı toplamıdır. Dönüşüm formülü şu şekilde verilmektedir:



Şekil 3.4: Sol ve sağ kameradan alınan görüntüler

$$I(x,y) = 0.2989R(x,y) + 0.5870G(x,y) + 0.1140B(x,y) \quad (3.11)$$

Bu ifade donanım gerçeklemesine uygun olması açısından aşağıdaki gibi düzenlenerek yaklaşık bir dönüşüm elde edilebilir:

$$I(x,y) = 2R(x,y) + 4G(x,y) + 1B(x,y) \quad (3.12)$$

Bu ifade ise yalnızca ötelemeli kaydedici ve toplama devresi kullanılarak dijital ortamda gerçekleştirilebilir:

$$I(x,y) = (R(x,y) \ll 1 + G(x,y) \ll 2 + B(x,y)) \gg 3 \quad (3.13)$$

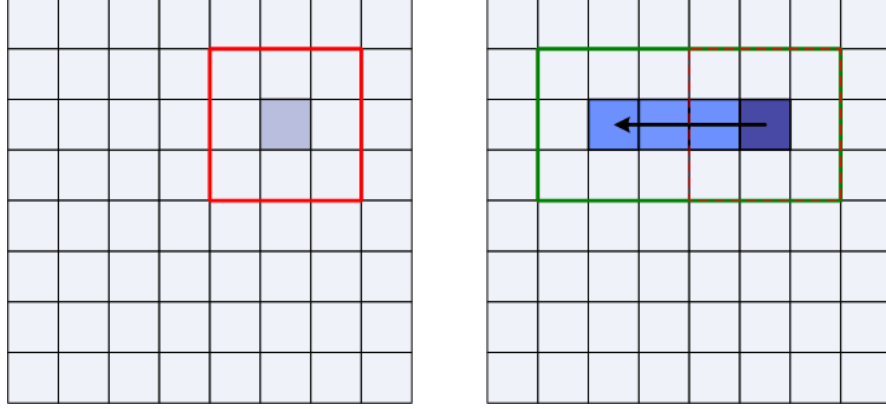
2. Blok tabanlı eşleştirme

Algoritmanın bu aşamasında ikili görü sisteminin birinci problemi olan eşleştirme problemine çözüm aranmaktadır. Bu proje kapsamında yoğun bir derinlik haritası çıkarılmak amaçlandığından her piksel için eşleştirme yapılması gerekir. Bunun için de yoğun yöntemler kullanılmalıdır. Burada uygulanan blok tabanlı eşleştirme olup bir sol (sağ) görüntüde her piksel etrafında belli bir çerçeve için sağ (sol) görüntüde aynı boyuttaki çerçeve eşi bulma prensibine dayanır. Bu çerçeve eşleştirme sırasında daha önce bahsedilen benzerlik ölçütleri (ya da eşleştirme maliyeti fonksiyonları) kullanılarak çerçeveler eşleştirilir ve eşleştirilen çerçevelerin merkez piksellerinin konumlarındaki fark *uyuşmazlık* (disparity) olarak belirlenir.

Algoritmanın bu aşamasını detaylandıracak olursak ilk olarak elde bulunan ikili görü sistemine ait iki görüntüden biri baz alınarak diğer görüntüde piksel eşleri aranır. Burada sol görüntü içindeki pikseller için sağ görüntüde eş aranmaktadır. Bu yapılırken eşi bulunacak piksel etrafında belli boyutta (blockSize) bir çerçeve seçilir. Daha sonra bu çerçeve için diğer görüntüde benzerlik ölçütünü en iyi karşılayan çerçeve eş olarak seçilir. Algoritmada en temel benzerlik ölçütlerinden olan mutlak fark toplam (SAD) kullanılmıştır. Buna göre en düşük SAD değerini veren çerçeve belirlenir; blokların merkezindeki pikseller ise eşleştirilir. Aşağıda kullanılan benzerlik ölçütü yani SAD formülü probleme özgü olarak verilmiştir:

$$SAD(d) = \sum_x \sum_y |t(x,y) - b^d(x,y)| \quad (3.14)$$

Bağıntıda $t(x,y)$ eşleştirilmek istenen çerçeve, $b^d(x,y)$ ise diğer görüntüdeki sınanan d uzaklığındaki ($disparity = d$) çerçevedir. Eşleştirme yapılırken işlem kolaylığı sağlamak ve olası hatalı eşlemeleri önlemek adına arama yapılacak bölge sınırlandırılır. Buna göre, tüm görüntü içinde aramak yerine belli bir bölge (Region of Interest, ROI) içinde arama yapılması tercih edilmektedir. Aranacak bölge, bir pikselin konumunun değişimine makul seviyede getirilecek bir sınırlama ile belirlenir. Daha önce belirtildiği gibi bu projede kameraların düşey konumları aynı olduğundan piksel konumlarındaki farklılık tek boyutta aranabilmektedir: Üç boyutlu noktanın iki görüntüdeki izdüşümleri sadece yatay düzlemde sağa ya da sola kayma olarak bulunabilir. Böylece aranan bölge için boyut üzerinden de bir sınırlama getirilmiş olur. Buna göre piksel eşi pozitif ya da negatif yönde uyumsuzluk aralığı ($\pm disparityRange$) kadarlık bir bölge ($[-disparityRange, disparityRange]$) içinde aranır. Ayrıca sol görüntü içindeki bir pikselin sağ görüntüdeki eşinin sola doğru kayma göstermesi beklenir. O halde ROI $[0, disparityRange]$ şeklinde belirlenerek arama bölgesi daha da kısıtlanabilir. Şekil 3.5’de 3x3’lük çerçeve seçimi ve diğer görüntüde sınanan çerçeve için eşleştirmenin nasıl yapıldığı gösterilmiştir: Sol görüntüde koyu renk ile gösterilen piksel için 3x3 boyutunda bir çerçeve belirlenmiş, sağdaki resimde aynı konumdan başlayarak sola doğru bu bloğa SAD açısından en yakın çerçeve aranmıştır.



Şekil 3.5: Blok eşleştirme

Eşleme yapıldıktan sonra ise SAD değerini en küçük olarak veren d değeri aranan uyumsuzluk miktarı olarak kaydedilir. Aşağıda, uyumsuzluk haritası matrisini ($disparity(i, j)$) veren formül **3.15** görülmektedir:

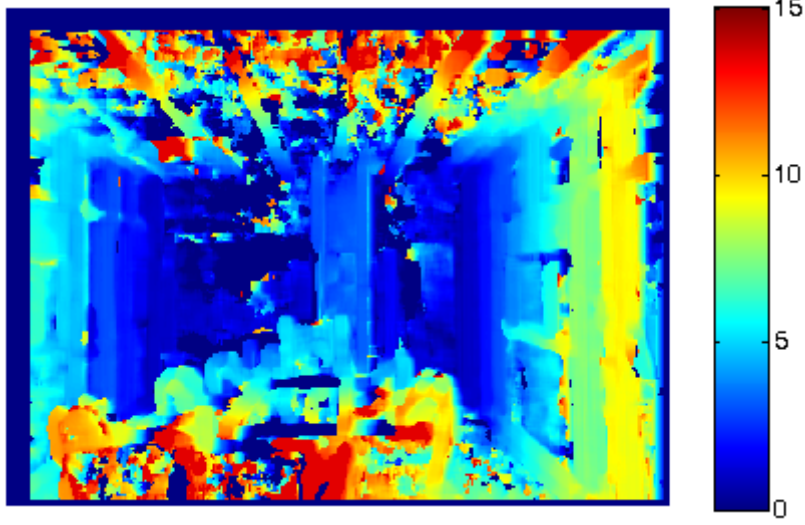
$$disparity(i, j) = \underset{d \in [-D, D]}{\operatorname{argmin}} \sum_{x=i-k}^{x=i+k} \sum_{y=j-k}^{y=j+k} |t(x, y) - b^m(x, y)| \quad (3.15)$$

3. Alt-piksel Yaklaşımı

Yukarıda bahsedilen blok eşleştirme kısmında elde edilen sonuçlar tamsayı olarak elde edilir. Bu da farklı derinliklere sahip kısımlar arasında keskin geçişlerin olmasına neden olmaktadır. Daha yumuşak geçişler eşleştirme kriterine alt-piksel hesabı eklenilerek elde edilebilir. Yukarıda en düşük SAD değerini veren konumu piksel eşleştirmesinde ölçüt olarak alınmaktaydı. Bu kısımda, elde edilen piksel ve komşu iki pikselin verdiği SAD değerlerini de kullanılarak ilk kısımda bulunmuş değerler üzerinde alt-piksel düzeltmesi yapılmaktadır: Üç değere uydurulacak parabolün en düşük noktası analitik olarak bulunur ve tamsayı olarak bulunan değer üzerinde düzeltme yapılır.

4. Derinlik Haritası Çıkarımı

Algoritmanın bir sonraki aşaması uyumsuzluk haritasından derinlik haritasının çıkarımını kapsamaktadır. Bu kısım ikili görü sisteminin yeniden yapılandırma problemine çözüm aramaktadır. Aslında sadece uyumsuzluk haritasına bakılarak da görüntü içindeki nesnelerin derinlik ya da uzaklıkları hakkında yorum yapılabilir:



Şekil 3.6: Uyuşmazlık haritası

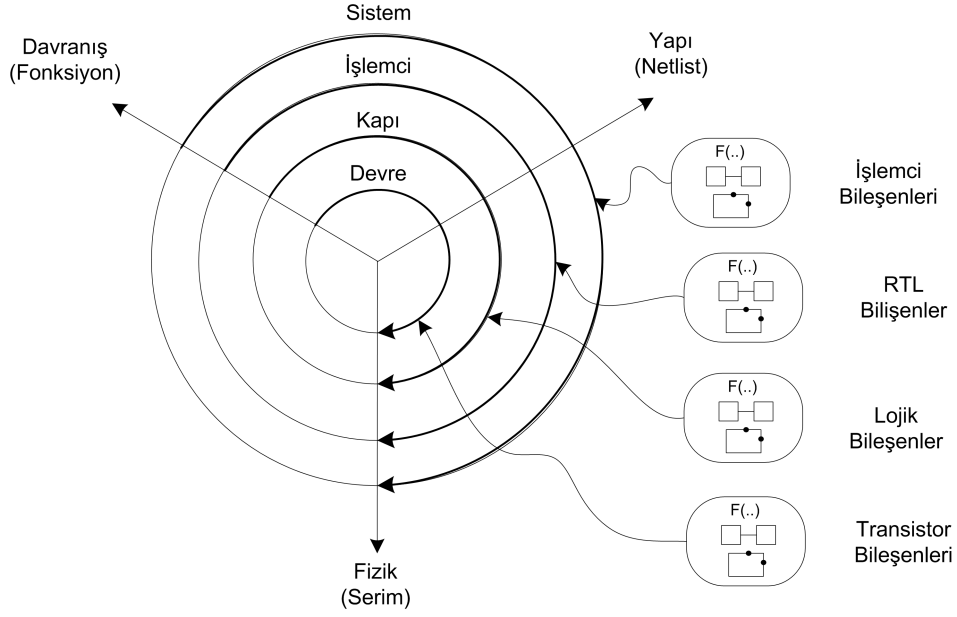
Uyuşmazlığı çok olan yani iki görüntüde konum farkı çok olan eş-pikseller yakın cisimlere, uyuşmazlığı az olan yani iki görüntüde konum farkı az olan eş-pikseller uzak cisimlere aittir. Ancak, proje kapsamında robotik uygulamalarda olduğu gibi, uzaklık için sayısal değerlere ihtiyaç duyulduğundan derinlik haritasını çıkarabilmek önemlidir. Önceden de bahsedildiği gibi kameranın harici ve dahili parametreleri kullanılarak basit bir üçgenleme yöntemiyle uzaklık bilgisi çıkarılabilir. Her piksel için bu değer bulunarak sahnenin derinlik/uzaklık haritası elde edilir.

4. UYGULAMA

4.1 Sistem Tasarımı

Çalışmanın bu bölümünde, daha önce sözü edilen algoritmaların sayısal donanım ve yazılım olarak gerçekleştirilebileceği bir platform tasarımından bahsedilecektir. Buradaki temel amaç, doğadan esinlenen koku algoritmalarının ikili görü verisi ile birlikte değerlendirilebildiği, farklı donanım ve yazılım uygulamalarına elverişli esnek bir gömülü sistem geliştirme ortamı sunmaktır. Üzerinde koku sensörleri, ikili kamera ve hesaplama birimi bulunan bir robot bu geliştirme ortamını kullanabilir. Sensörlerin duyarlı olduğu bir koku kaynağının bulunduğu ve hava akımının sağlandığı, bununla birlikte bir takım engelleri barındıran bir deney ortamında robot tarafından koku kaynağının bulunması örnek bir uygulama olarak gösterilebilir. Bu çalışmada robotun koku kaynağını bulması için ilk etapta koku kaynağından gelen veriyi hızlı bir şekilde çözümleyerek hedeflenen koku olup olmadığını ayırt etmesi gerekir. Hedeflenen kokunun tespit edilmesi durumunda mikroişlemci Bölüm 2.3.3'te bahsedile dağılan koku takibi algoritmasını çalıştırarak rüzgar yön sensörlerinden gelen veriye göre robotun hareketini sağlamalıdır. Bu hareket esnasında robotun karşısına çıkan engellerin mesafesi ikili kamera vasıtasıyla tespit edilerek robotun hareket doğrultusu değiştirilmeli, kokunun kaybedilmesi durumunda ise algoritmaya göre rastgele hareketler ile koku bulutu aranmalıdır. İstenen geliştirme platformunun gömülü sistem tasarımında izlenen yöntem bu bölümde ele alınacaktır.

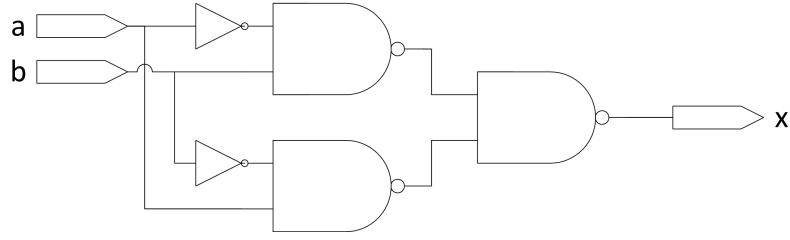
Karmaşıkleşan problemlerin VLSI sistemlerinde çözümü için izlenen yolların Gajski ve Kuhn tarafından üç eksenli bir sistemde gösterilmesi önerilmiştir [42]. Daha sonra üç eksenli bu sistem Şekil 4.1'de görüldüğü gibi dört soyutlama katmanı ile birleştirilerek gömülü sistem tasarımında izlenen metodolojinin gösterilmesinde kullanılan bir diyagram halini almıştır.



Şekil 4.1: Gajski'nin Y diyagramı

Diyagram davranış, bağlantı ve fizik eksenlerinden oluşur. Davranış eksenini sistemin fonksiyonel ifadesini temsil eder. Örneğin $x = a'b + ab'$ ifadesi girişleri a ve b , çıkışı c olan kombinezonsal bir mantık devresinin fonksiyonel ifadesidir. Bu ifadede gerçekleştirme yöntemine, kullanılacak elemanlara veya teknolojiye ilişkin bir bilgi bulunmaz. Sistemin davranış yönünden ifadesi soyutlama katmanlarına göre ikili mantık ifadesi, algoritmik yapı veya sistem modeli olabilir.

Gajski'nin Y diyagramında görülen ikinci eksen yapı-bağlantı eksenidir. Bu eksen sistemin davranış ifadesi ile fiziksel ifadesi arasındaki bir köprü vazifesi görür. Sistemin davranış eksenindeki ifadesi bu ekseninde maliyet, alan ve zaman kısıtları da göz önüne alınarak bileşen modelleri ve bağlantıları ile eşleşir. Örneğin $x = a'b + ab'$ ifadesinin yapı-bağlantı eksenindeki hali 4.2'te gösterilmiştir. Sistemin fonksiyon ifadesi mantıksal VEDEĞİL kapıları cinsinden ifade edilmiş, VEDEĞİL kapıları arasındaki bağlantılar belirlenmiştir. Bu ekseninde sistemde kullanılacak mantıksal yapılar ile bağlantıları belli olsa da kapıların yerleri de dahil olmak üzere herhangi bir fiziksel parametresi veya fiziksel gerçekleştirme ortamına dair bir bilgi yoktur. Bu ekseninde ise soyutlama katmanına göre sistemin RTL ifadesi ve devre çizimi ifadesi bulunabilir.



Şekil 4.2: Kombinezonsal devrenin yapı-bağlantı eksenindeki hali

Y diyagramının son eksenini ise fiziki yapının yer aldığı eksenidir. Yapı-bağlantı ekseninde belirlenen bileşenlerin fiziksel yerleri bu ekseninde belirlenir. Seçilen teknolojiye göre yerleşimi yapılan bu hali fiziksel gerçekleştirme için tasarımın geldiği son aşamadır.

Bu tez kapsamında önceki bölümlerde yapılan çalışmalarda bir takım algoritmalar elde edildi. Fakat bu algoritmaların gerçekleştirme yöntemleri hakkında bir bilgi verilmedi. Dolayısıyla şimdiye kadar yapılan çalışmalar Gajski'nin Y diyagramında sistem seviyesinde ve davranış ekseninde yer aldı. Eğer örnek bir sistem olarak, engeller bulunan bir ortamdaki koku kaynağını ikili görüş kamerası, koku sensörleri ve rüzgar yön sensörü ile bulmaya çalışan bir robot söz konusu ise bu işin gerçekleştirilmesi için temelde 3 algorithmadan bahsedilebilir. Bunlardan ilki koku sensörlerinden gelen verinin ön işleme için hibrit işlemci popülasyonudur. 16 hücreli bir sistemde her bir hücrenin eşzamanlı olarak hücresel sinir ağı hesaplamaları yaptığı bu sistemin işlem yükü fazla olduğu için donanım olarak gerçekleştirilmesi uygundur. Bir diğer donanım olarak gerçekleştirilmesi uygun olan algoritma ise derinlik hesaplama algoritmasıdır. Kameralardan gelen VGA (640x480) çözünürlüklü ve 25 fps saniyedeki görüntü hızına sahip bu verinin tüm pikselleri için blok eşleme algoritmasının çalıştırılması paralel işlemler gerektirdiği için donanıma daha uygundur. Diğer algoritma olan dağılan koku takibi algoritması tabanlı yön tayini ise yazılım olarak gerçekleştirilebilir. Bu algoritma prosedürel rutinlerden oluşur ve diğer donanımlardan gelen verilere göre robotun yön tayininde bulunur.

4.2 Donanım Tasarımı

Bu bölümde sistemin yazılım-donanım ayrıklaştırması sonucunda donanım olarak gerçekleştirilmesi kararlaştırılan hibrid işlemci topluluğuna ait donanım geliştirmesinden bahsedilecektir. Hibrid işlemci topluluğunun fonksiyonel ifadesi Bölüm 2’de verilmişti. Denklem 2.22’te türetilen çevreden gelen ağırlıkların hesaplandığı ifade ile Denklem 2.28’te elde edilmiş olan ileri Euler hesaplama bağıntısı kullanılarak bu bölümde Y diyagramının davranış ekseninden yapı-bağlantı eksenine geçilecektir.

Sistem bu iki denklemin çözüldüğü iki alt devre halinde tasarlanabilir. Denklem 2.22’te elde edilen ifadenin dijital gerçeklemede kolaylık için $a_{i,j} = 0,25$, $g_{in} = 1$ ve $\theta = 1$ alınmıştır. Gösterimi basitleştirmek için ise hücrenin komşularından gelen değerler A, B, C, D , komşularının cinslerini belirten kimlik işaretleri ise h_A, h_B, h_C, h_D ile gösterilmiştir. I ele alınan hücrenin değeri, h_0 ise hücrenin kimlik işaretidir. Bunlara göre bir hücrenin komşuluklarından gelen ağırlıkların hesaplanması için Şekil 4.3’te görülen devre Verilog donanım tanımlama dili ile tanımlanmıştır.

İleri Euler yöntemiyle ayrıklaştırma hesabının yapıldığı alt sistem Denklem 2.28 ile doğrudan gerçekleştirirse 3 adet çarpma devresi kullanılır. Çarpma blokları FPGA içinde sınırlı olduğu için ifade Denklem 4.1’de olduğu gibi basit bir sadeleştirme ile çarpıcı sayısı bire indirilebilir.

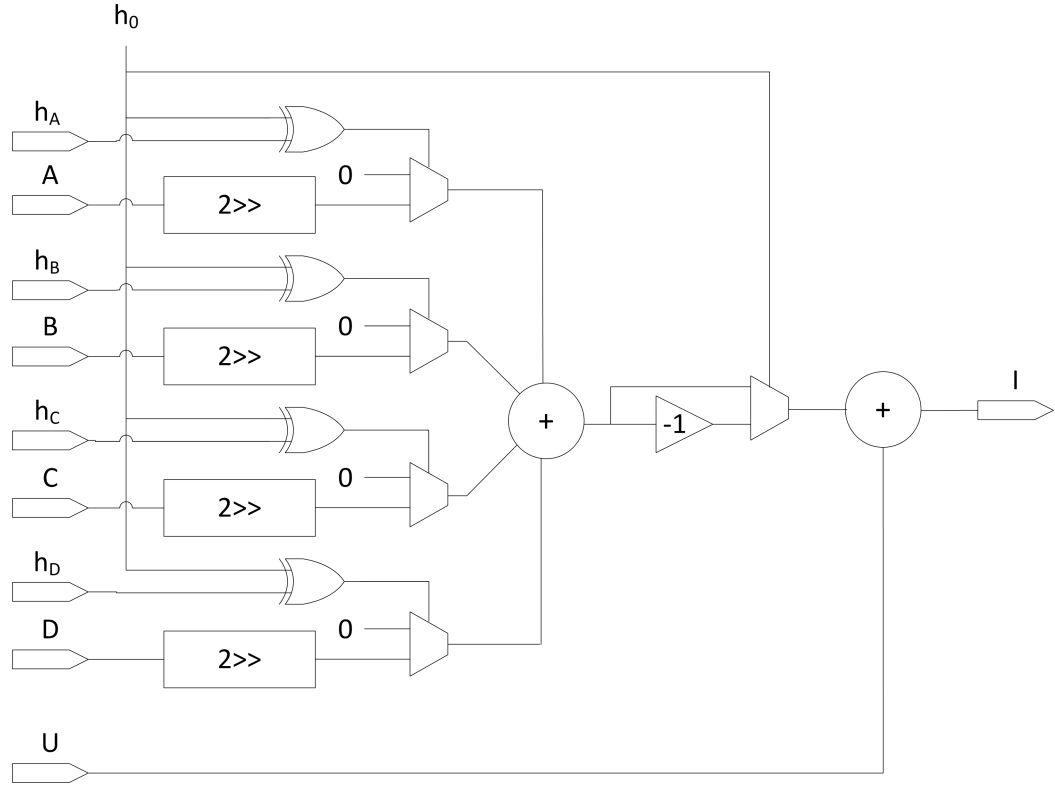
$$x_i[n+1] = -\alpha(x[n] + I_i + \mu) \quad (4.1)$$

Bu denklemin eşdeğeri olan ve Verilog donanım tanımlama dilinde kodlanan devre Şekil 4.4’de gösterilebilir.

Donanım olarak gerçekleştirilmesi uygun görülen diğer algoritma ikili görüntüden mesafe bulmak amacıyla basit blok eşleştirme algoritması kullanılmıştır.

4.3 Yazılım Tasarımı

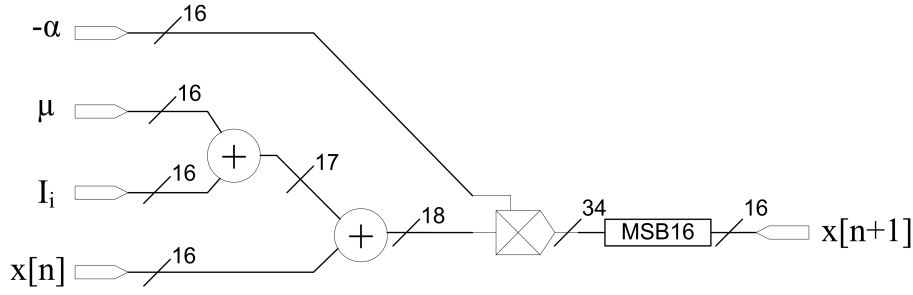
Önceki bölümde, sistemi oluşturan algoritmalarından koku takibine ilişkin dağılan koku algoritmasının yazılım olarak gerçekleştirilmesi uygun görülmüştü. Sistemin



Şekil 4.3: Komşulardan gelen değerlerin hesaplanması

genel kontrolü de mikroişlemci tarafından yürütülen ana yazılım vasıtası ile gerçekleştirilecektir. Bu yazılım sensörlerden alınan ve sayısal donanım ile işlenmiş verileri değerlendirerek robotun hareket yönüne karar verecektir.

Robot bekleme konumunda iken hibrit işlemci topluluğundan gelen veriyi değerlendirir. Eğer aranan koku tespit edilirse dağılan koku takibi algoritması çalışmaya başlar. Hareket yönünün belirlenmesinde rüzgar yön sensöründen alınan veri kullanılır. Bu esnada eş zamanlı olarak ikili kameradan alınan görüntünün derinlik bilgisi de yön belirlemeye yardımcı olur. Yani engel çok yakındaysa keskin bir dönüş yapması gerekirken, uzaktaki bir engel için yönünü az değiştirmesi yeterli olabilir. Dolayısıyla robotun gideceği yön vektörü rüzgar yön sensörü ve ikili kameradan alınan ve derinlik hesaplama birimi ile değerlendirilen mesafe bilgisi ile tespit edilir. Koku bulutunun dışına çıkıldığı ise hibrit işlemci topluluğunun çıkışındaki zayıflama ile anlaşılır ve gidilen yöne dik olarak yapılan aramalar ile koku bulutunun içerisine tekrar girmeye çalışır.



Şekil 4.4: İleri Euler hesaplama birimi

Bu algoritma C programlama dili ile kodlanmıştır. Sistem başladığında Microblaze ana yazılımda bir sonsuz döngünün içerisinde hibrit işlemci topluluğunun çıkışını kontrol eder. Eğer koku tespit edilirse döngüden çıkarak yön vektörü hesaplama fonksiyonu ile üretilen veriye göre robotu hareket ettirir. Yön vektörünü hesaplayan fonksiyon rüzgar sensörü verisi ile ikili görü kameraları ile tespit edilen engelin uzaklığına göre bir sonuç üretir. Yazılım hibrit işlemci topluluğunun çıkışını belirli aralıklarla kontrol eder. Eğer koku sinyali belli bir eşik değerinin altına inerse koku bulutunun dışına çıkıldığı anlamına gelir ve tekrar içeri girebilmek için gidiş yönüne dik hareketleri içeren başka bir fonksiyon çağrılır. Tekrar koku bulutuna girildiğinde ise ana fonksiyon kaldığı yerden döngüsüne devam eder.

4.4 Sistem Gerçeklemesi

4.4.1 Teknoloji

PLA gibi programlabilir cihazlar 1970'lerden beri kullanımda olsa da ilk zamanlar teknolojik sebeplerden ötürü kullanımları oldukça kısıtlı kalmıştır. 1980'lerin başında üretildikten sonra bir kez programlanabilen PAL aygıtları geliştirilmiş fakat yüksek güç tüketimi yaygınlaşmasının önüne geçmiştir [43]. Kapı dizileri tekniğinin G/Ç blokları ile çevrili özel mantık bloğu dizilerinden oluşması ve çok sayıda yeniden programlanabilmesi fikri FPGA kavramının doğmasını sağlamış ve 1984 yılında ilk FPGA tümdevresi Xilinx firması tarafından üretilmiştir.

Düşen maliyetlerine karşın hızla artan yetenekleri ve uygulama alanları günümüzde FPGA teknolojisinin yaygın bir şekilde kullanılmasına imkan tanımıştır. Nanometre ölçeğindeki üretim tekniği sayesinde milyonlarca eşdeğer kapının yanı sıra bellek,

faz kilitlemeli çevrim, gecikme kilitlemeli çevrim, heberleşme arayüzleri aritmetik devreler gibi karmaşık blokların FPGA tümdevresi içerisinde bileştirilmiştir. Donanım açısından yetenekleri bu şekilde artırılan FPGA tümdevreleri, artan IP çekirdekleri, gelişmiş donanım/yazılım geliştirme ortamları ile ürün geliştirme süresini kısalttığından piyasadaki yaygınlığını artırmıştır. ASIC devrelerin aksine yeniden programlanabilmeleri sebebiyle prototip geliştirmede ve düşük hacimlerdeki üretimlerde sıklıkla tercih edilir.

Mikroişlemci mimarilerinin FPGA içine gömülebilmesi, yazılım ve donanımın birlikte tasarımının yapıldığı uygulamalarda avantaj sağlar. Böylece ek bir tümdevreye gerek kalmadan sayısal sistem gerçeklemesi yapılabilir. Tez kapsamında yapılan çalışmada bu özellikten faydalanılmıştır. Xilinx FPGA ürünleri için geliştirilmiş olan Microblaze işlemcisi gerçekleştirilen sistemin yazılım parçalarını çalıştırmak ve sayısal donanımı kontrol etmekle görevli olan parçasıdır. FPGA teknolojisinin paralel çalışan sayısal devrelere imkan tanınması Hücresel Sinir Ağındaki paralel çalışma ile benzerlik gösterir. Bu yüzden Bölüm 2’de bahsedildiği gibi HYSA öykünmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

4.4.2 Geliştirme Ortamı

Xilinx ürettiği FPGA’lar üzerinde mikroişlemci tabanlı sayısal sistemler geliştirmek üzere EDK (Embedded Development Kit) ortamını sunmaktadır. EDK sistemin adreslenmesi, çevre birimlerinin ve FPGA donanımlarının mikroişlemci yollarına bağlanması, iletişim protokollerinin yazılması gibi işlerle uğraşmak yerine yalnızca donanım ve yazılımın tasarımına odaklanmayı sağlar [44]. Tüm araçların bir arada bulunduğu ve araçlar arasındaki uyumun sağlandığı geliştirme ortamları ile çalışmak proje süresini önemli ölçüde azaltır. Bunun için seçilen FPGA kartına uygun olarak kart üzerindeki çevre birimlerinden ve Xilinx tarafından üretilmiş hazır donanımlardan istenenlerin yer aldığı bir taban sistemi BSB (Base System Builder) ile oluşturur. Bu noktadan itibaren geliştiricinin yapması gereken donanımını yazıp bir yola bağlamak ve yazılımı bir bellek alanına yüklemek üzere oluşturmaktır. EDK geliştirme ortamında “soft-core” (Microblaze ve Picoblaze gibi) veya “hard-core” (PowerPC) mikroişlemci merkezli donanım projesine kart üzerindeki çevre ve G/Ç

birimleri eklenebildiği gibi Xilinx tarafından geliştirilmiş veya kullanıcı tarafından yazılmış donanımlar da eklenebilmektedir. Böylece hem mikroişlemci birimi hem de yazılan donanımlar aynı FPGA üzerinde yer alabilmekte ve aralarındaki iletişim yollar sayesinde sağlanabilmektedir [44].

EDK donanım projesinin yapılandırılmasında XPS (Xilinx Platform Studio) programını kullanmaktadır. Bu program ile mikroişlemcinin yollarına çevre birimleri bağlanmakta ve bu birimler mikroişlemci için adreslenmektedir. Sistemin adres haritasının üretilmesinin ardından EDK, ISE araçlarını kullanarak tüm donanımları sentezler. Bu işlemle birlikte yazılım tasarımına geçmeden önce “Generate Libraries and BSPs” programı çalıştırılarak donanımlara erişmek için kullanılacak kütüphaneler üretilir.

Diğer yandan SDK programı yazılım geliştirmesi için kullanılır. Üretilmiş olan kütüphanelerden faydalanarak yazılan C yazılımı hedef mikroişlemci için derlenip bağlandıktan sonra (*compile - link*) hangi bellek alanına yükleneceği seçilip daha önce ISE araçlarıyla elde edilmiş olan bit dizisi yazılım ile güncellenerek sistem tamamlanmış olur. Güncellenen bit dizisi ile FPGA programlandığında mikroişlemcili sistem çalışmaya başlar. Mikroişlemcinin reset vektörünün atandığı bellekteki yazılım çalışarak hedeflenen işlemi gerçekleştirir [44].

Tasarımda, mikroişlemci olarak Xilinx tarafından geliştirilen 32-bitlik ve RISC mimarisine sahip MicroBlaze işlemcisi kullanılmıştır. Bu işlemci hem FPGA içerisindeki blok RAM’leri hem de harici belleği desteklemektedir. Kontrol edilecek blok RAM boyutu sistem oluşturulurken belirlenir ve kullanılan FPGA’da en fazla 64 KB olabilmektedir. Bu durum yalnızca blok RAM’den çalıştırılacak yazılım için bir kısıtlama olarak görülmektedir. Büyük yazılımlar için çözüm harici DDR bellekleri kullanmaktır. Yazılımın program ve veri parçaları DDR belleğe yerleştirilirken blok RAM’e önyükleyici gömülür. Sistem başlatıldığında MicroBlaze önyükleyiciyi çalıştırır, ardından DDR bellekteki yazılım çalışmaya başlar. Bu proje kapsamında oluşturulan bu sistemlerde ise yazılım boyutları küçük olduğundan BRAM kullanılmıştır. Dolayısıyla önyükleyiciye ihtiyaç duyulmamıştır. MicroBlaze Harvard bellek mimarisine sahiptir; program ve veri erişimi ayrı bellek alanlarından sağlanır.

Her bir adres alanı 32 bit ile adreslenir, bu da program ve veri için 4'er GB'lık bellek alanlarına erişim yeteneği anlamına gelir [45].

MicroBlaze FPGA için optimize edilmiş bir mikroişlemcidir ve birçok özelliği sistem oluşturulurken EDK ortamında belirlenebilmektedir. 32 bitlik 32 adet genel amaçlı kaydedicileri ve 32 bit adres yolu gibi özellikleri sabit iken, iş hattı (pipeline) derinliği, veri yolu sayısı ve türleri, kayan noktalı sayı birimi (FPU), bellek idare birimi (MMU) gibi özellikleri tasarım ihtiyaçlarına göre seçilebilmektedir [45]. Tasarlanan sistemlerde MicroBlaze için çalışma frekansı ile işlemci-veri yolu frekansı 50 MHz seçilmiştir. Veri ve program belleği olarak kullanılacak olan BRAM boyutu 64 KB, RS232 biriminin hızı 115200 olarak belirlenmiştir. Standart giriş ve standart çıkış olarak RS232 seçilmiş, böylece yazılımda kodlanacak olan yazdırma komutlarının verileri seri port üzerine aktarmaları sağlanmıştır. Önyükleme belleği olarak BRAM seçimi ise sistem başlatıldığında burada yer alan yazılımın çalışmasına imkân tanımıştır.

Bu yola veri aktarımı ve bu yoldan veri alımı MicroBlaze işlemcisinin PLB denetim birimi tarafından kontrol edilmektedir. PLB'ye bağlanan seri port, MicroBlaze için hem standart giriş, hem de standart çıkış olacak şekilde yapılandırılmıştır. Böylece seri haberleşme programı kullanılarak elde edilen verilerin ana bilgisayar üzerinde görüntülenmesi sağlanmıştır. Microblaze işlemcisi, blok RAM'e erişimde program ve veri bölümleri için ayrı ayrı LMB (Local Memory Bus) veri yolları kullanır. Adı geçen yollar Xilinx tarafından tasarlanmış DLMB (Data side LMB) ve ILMB (Instruction side LMB) denetleyicileri tarafından kontrol edilen 32 bitlik yollardır [46]. Tasarımlarda MicroBlaze'in reset vektörü blok RAM'in başlangıcını göstermektedir. Böylece blok RAM'e koyulacak yazılım, sistem başladığında MicroBlaze tarafından ILMB ve DLMB yolları üzerinden başlatılacaktır.

C programlama dilinde yazılan ana yazılım, Microblaze fonksiyonlarını kullanacak şekilde güncellenmiştir. Bunun yanı sıra koku ve ikili görüye ilişkin donanımları kontrol edebilmesi ve bu donanımlardan gelen verileri alabilmesi sağlanmıştır.

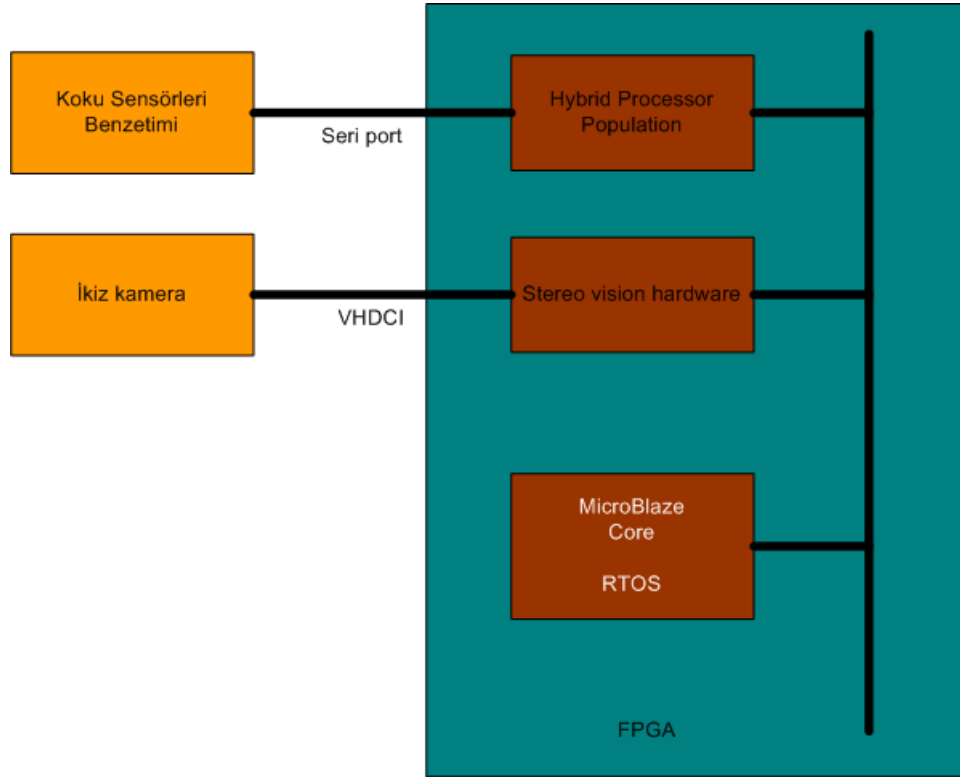
4.4.3 Sistem Tmleştirmesi

Sistemin gerçeklenmesinde Xilinx Spartan-6 LX45 FPGA içeren, HDMI video giriş-ıkışı, USB-UART ve VHDCI bağlantısı bulunan, 128 Mbyte DDR2 bellek alanına sahip Digilent-Atlys geliştirme kartı kullanılmıştır. Bu kartın VHDCI bağlantısına çift kamera bağlanırken koku bilgisine ait değerleri sisteme vermek üzere USB-UART bağlantısı, derinlik haritasının gösterilmesi için ise HDMI bağlantısı kullanılmıştır. Sistemi bağlantı yapısını gösteren blok diyagramı şekil 4.5'te fotoğrafı ise şekil 4.6'de verilmiştir.

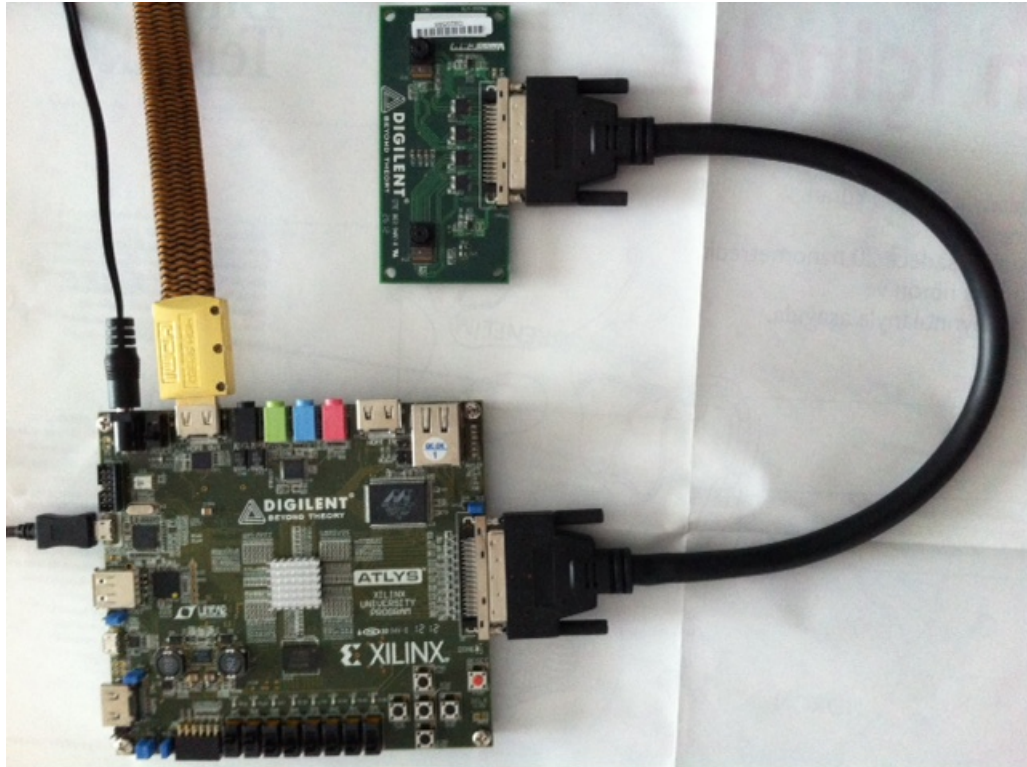
Sistemin görüntü ve koku olmak üzere iki farklı girişi vardır. Görüntü girişi stereo kamera vasıtasıyla VHDCI konnektrnden sağlanırken koku girişi seri port üzerinden PC'den aktarılan benzetim verisiyle sağlanmaktadır. Sisteme gelen veriler FPGA içinde bulunan görüntü ve koku işleme birimlerinde işlenmekte, elde edilen sonuçlar ise mikroişlemci tarafından yürütülen yazılıma aktarılmaktadır. Son olarak da yazılım robotun yönüne karar vermektedir.

şekil 4.6'de kullanılan FPGA geliştirme kartının fotoğrafı verilmiştir. Xilinx Spartan-6 LX45 FPGA tmdevresine sahip olan bu PCB üzerinde, çalışma için ihtiyaç duyulan HDMI ıkışı, UART bağlantısı, 128 MB DDR2 bellek ve Stereo Kameranın bağlanabileceği VHDCI konnektörü bulunmaktadır.

Sonuç olarak bu bölümde doğadan esinlenen koku algoritmaları ile ikili görünün birlikte işlenebileceği bir geliştirme ortamı önerilmiş ve bu ortam kullanılarak gerçeklenebilecek bir robot incelenmiştir. Sistem Xilinx EDK ortamında kurularak FPGA donanım ve yazılım gerçeklemeleri yapılmış, koku ve görüntü verileri ile seri port üzerinden verilerek sistem sınanmıştır. Tüm robot sisteminin gerçeklenmesi ise bu tezin kapsamı dışındadır. Bu çalışmanın ileriki aşamalarında koku ve rüzgar sensörlerini barındıran hareketli bir robot ile bahsedilen uygulama gerçekleştirilebilir. Bunun dışında yazılım ve donanım esnekliğinden faydalanılarak farklı sistemler tasarlamak mümkündür.



Şekil 4.5: Sistemin blok diyagramı



Şekil 4.6: Geliştirme ortamı-bağlantılar

5. SONUÇ

Yapılan çalışmalar kapsamında canlılardaki biyolojik sinir ağının yapısı incelenmiş ve bundan esinlenen Hücresel Yapay Sinir Ağı ve Hibrit İşlemci Topluluğu kavramlarının teorisi verilmiştir. Hibrit İşlemci Topluluğu yazılım ve donanım ortak tasarımı yöntemi ile FPGA üzerinde gerçekleştirilerek koku işleme uygulamalarında kullanılmıştır. Bunların yanı sıra doğadaki canlıların koku karşısında gösterdikleri davranışlar incelenerek algoritmaların benzetimi ve yazılım kodlamaları yapılmıştır. Canlılardan ilham alan bir diğer uygulama alanı olan ikili görü sistemi incelenerek FPGA üzerinde gerçek zamanlı derinlik haritası çıkaran bir donanımın gerçekleştirilmesi tez kapsamında tamamlanmıştır. Bu alt işlerin gerçekleştirilmesi için en iyi yazılım-donanım ayrıklaştırmasını sağlayacak şekilde gömülü sistem tasarım adımları uygulanmış ve tasarlanan sistem FPGA üzerinde mikroişlemci, sayısal donanımlar ve gerçek zamanlı işletim sistemi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda koku ve ikili görü üzerine doğadan esinlenen algoritmaların ve yapıların kolaylıkla uygulanabileceği, gerçek zamanlı ve düşük maliyetli bir geliştirme platformu elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Pearce, T., Schiffman, S., Nagle, H. ve Gardner, J.**, 2006. Handbook of Machine Olfaction, Wiley.
- [2] **Gallistel, C.R., Rolls, E. ve Greene, D.**, 1969. Neuron Function Inferred from Behavioral and Electrophysiological Estimates of Refractory Period, *Science*, **166(3908)**, 1028–1030, <http://www.sciencemag.org/content/166/3908/1028.abstract>, <http://www.sciencemag.org/content/166/3908/1028.full.pdf>.
- [3] **Bayly, E.J.**, 1968. Spectral Analysis of Pulse Frequency Modulation in the Nervous Systems, *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, **BME-15(4)**, 257–265.
- [4] **Chua, L. ve Yang, L.**, 1988. Cellular Neural Networks: Theory, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, **35(10)**.
- [5] **Chua, L. ve Yang, L.**, 1988. Cellular Neural Networks: Applications, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, **35(10)**.
- [6] **Ayhan, T. ve Yalcin, M.**, 2011. Randomly reconfigurable Cellular Neural Network, Circuit Theory and Design (ECCTD), 2011 20th European Conference on, s.604–607.
- [7] **Wilson, H. ve Cowan, J.**, 1973. A mathematical theory of the functional dynamics of cortical and thalamic nervous tissue, *Kybernetik*, **13(2)**, 55–80, <http://dx.doi.org/10.1007/BF00288786>.
- [8] **Ayhan, T., Yeniceri, R., Ergünay, S. ve Yalçın, M.E.**, 2012. Hybrid processor population for odor processing, Circuits and Systems (ISCAS), 2012 IEEE International Symposium on, s.177–180.
- [9] **Wyatt, T.**, 2003. Pheromones and Animal Behaviour - Communication by Smell and Taste, Cambridge University Press.
- [10] **Roska, T. ve Chua, L.**, 1993. The CNN universal machine: an analogic array computer, *Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, IEEE Transactions on*, **40(3)**, 163–173.
- [11] **Linan, G., Espejo, S., Dominguez-Castro, R. ve Rodriguez-Vazquez, A.**, 2002. ACE4k: An analog I/O 64x64 visual microprocessor chip with 7-bit analog accuracy, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, **30(2-3)**, 89–116, <http://dx.doi.org/10.1002/cta.191>.

- [12] **Linan, G., Dominguez-Castro, R., Espejo, S. ve Rodriguez-Vazquez, A., 2001.** ACE16K: An advanced focal-plane analog programmable array processor, Solid-State Circuits Conference, 2001. ESSCIRC 2001. Proceedings of the 27th European, s.201–204.
- [13] **Fortuna, L., Arena, P., Balya, D. ve Zarandy, A., 2001.** Cellular neural networks: a paradigm for nonlinear spatio-temporal processing, *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, **1(4)**, 6–21.
- [14] **Nagy, Z. ve Szolgay, P., 2003.** Configurable multilayer CNN-UM emulator on FPGA, *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on*, **50(6)**, 774–778.
- [15] **Yeniçeri, R. ve Yalçın, M.E., 2009.** Path planning on cellular nonlinear network using active wave computing technique, 736508–736508–8, +<http://dx.doi.org/10.1117/12.821669>.
- [16] **Balya, D., Roska, B., Roska, T. ve Werblin, F.S., 2002.** A CNN framework for modeling parallel processing in a mammalian retina, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, **30(2-3)**, 363–393, <http://dx.doi.org/10.1002/cta.204>.
- [17] **Balya, D., Rekeczky, C. ve Roska, T., 2002.** A realistic mammalian retinal model implemented on complex cell CNN universal machine, *Circuits and Systems*, 2002. ISCAS 2002. IEEE International Symposium on, cilt 4, s.IV–161–IV–164 vol.4.
- [18] **Knight, R.T., Staines, W.R., Swick, D. ve Chao, L.L., 1999.** Prefrontal cortex regulates inhibition and excitation in distributed neural networks, *Acta Psychologica*, **101(2-3)**, 159 – 178, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001691899000049>.
- [19] **Muezzinoglu, M.K., Vergara, A., Huerta, R., Nowotny, T., Rulkov, N., Abarbanel, H.D.I., Selverston, A.I. ve Rabinovich, M.I., 2008.** Artificial Olfactory Brain for Mixture Identification, NIPS, s.1121–1128.
- [20] **Ayhan, T. ve Yalçın, M.E., 2012.** An Application of Small-World Cellular Neural Networks on Odor Classification, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **22(01)**, 1250013, <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218127412500137>.
- [21] **Ferri, G., Caselli, E., Mattoli, V., Mondini, A., Mazzolai, B. ve Dario, P., 2009.** SPIRAL: A novel biologically-inspired algorithm for gas/odor source localization in an indoor environment with no strong airflow, *Robotics and Autonomous Systems*, **57(4)**, 393 – 402, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889008001073>.
- [22] **Vickers, N.J., 2000-04-01.** Mechanisms of animal navigation in odor plumes, *Biol Bull*, **198**, 10, <http://www.biodiversitylibrary.org/part/2453>.

- [23] **Casalinuovo, I.A., Di Pierro, D., Coletta, M. ve Di Francesco, P.**, 2006. Application of Electronic Noses for Disease Diagnosis and Food Spoilage Detection, *Sensors*, **6(11)**, 1428–1439, <http://www.mdpi.com/1424-8220/6/11/1428>.
- [24] **Ishida, H., Nakayama, G., Nakamoto, T. ve Moriizumi, T.**, 2002. Controlling a gas/odor plume-tracking robot based on transient responses of gas sensors, *Sensors*, 2002. Proceedings of IEEE, cilt 2, s.1665–1670 vol.2.
- [25] **Martinez, D., Rochel, O. ve Hugues, E.**, 2006. A biomimetic robot for tracking specific odors in turbulent plumes, *Auton. Robots*, **20(3)**, 185–195, <http://dx.doi.org/10.1007/s10514-006-7157-1>.
- [26] **Loutfi, A. ve Coradeschi, S.**, 2002. Relying on an electronic nose for odor localization, *Virtual and Intelligent Measurement Systems*, 2002. VIMS '02. 2002 IEEE International Symposium on, s.46–50.
- [27] **Marques, L., Nunes, U. ve de Almeida, A.T.**, 2002. Olfaction-based mobile robot navigation, *Thin Solid Films*, **418(1)**, 51 – 58, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004060900200593X>, <ce:title>Proceedings from the International School on Gas Sensors in conjunction with the 3rd European School of the {NOSE} Network</ce:title>.
- [28] **Russell, R., Bab-Hadiashar, A., Shepherd, R.L. ve Wallace, G.G.**, 2003. A comparison of reactive robot chemotaxis algorithms, *Robotics and Autonomous Systems*, **45(2)**, 83 – 97, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889003001209>.
- [29] **Malik, A., Choi, T. ve Nisar, H.**, 2011. Depth Map and 3D Imaging Applications: Algorithms and Technologies, Information Science Reference, <http://books.google.com.tr/books?id=gSgwKQEACAAJ>.
- [30] Epipolar Geometry, http://en.wikipedia.org/wiki/Epipolar_geometry, accessed: 2013-05-01.
- [31] Epipolar Geometry, http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/OWENS/LECT10/node3.html, accessed: 2013-05-01.
- [32] **Trucco, E. ve Verri, A.**, 1998. Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- [33] **Szeliski, R.**, 2010. Computer vision: algorithms and applications, Springer.
- [34] **Zitnick, C.L. Kang, S.B.**, Stereo for Image-Based Rendering using Image Over-Segmentation, <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/larryz/ZitnickKangIJCV07.pdf>, accessed: 2013-05-01.
- [35] **Boesten, D. ve Vandewalle, P.**, 2009. Depth estimation for stereo image pairs.

- [36] **Hirschmuller, H. ve Scharstein, D.**, 2007. Evaluation of cost functions for stereo matching, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007. CVPR'07. IEEE Conference on, IEEE, s.1–8.
- [37] **Chambon, S. ve Crouzil, A.**, 2011. Similarity measures for image matching despite occlusions in stereo vision, *Pattern Recognition*, **44(9)**, 2063–2075.
- [38] **Nalpantidis, L. ve Gasteratos, A.**, 2010. Stereo vision for robotic applications in the presence of non-ideal lighting conditions, *Image and Vision Computing*, **28(6)**, 940–951.
- [39] **Binaghi, E., Gallo, I., Marino, G. ve Raspanti, M.**, 2004. Neural adaptive stereo matching, *Pattern Recognition Letters*, **25(15)**, 1743–1758.
- [40] Stereo Reconstruction, http://www.mia.uni-saarland.de/Research/CV_Stereo.shtml, accessed: 2013-05-01.
- [41] Geometric Camera Parameters, <http://www.cse.unr.edu/~bebis/CS791E/Notes/CameraParameters.pdf>, accessed: 2013-05-01.
- [42] **Gajski, D. ve Kuhn, R.**, 1983. Guest Editors' Introduction: New VLSI Tools, *Computer*, **16(12)**, 11–14.
- [43] **Rose, J., El Gamal, A. ve Sangiovanni-Vincentelli, A.**, 1993. Architecture of field-programmable gate arrays, *Proceedings of the IEEE*, **81(7)**, 1013–1029.
- [44] Embedded System Tools Reference Manual.
- [45] MicroBlaze Processor Reference Guide.
- [46] LMB BRAM Interface Controller.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Selman Ergünay

Doğum Yeri ve Tarihi: Kütahya, 1987

Adres: Doğu Mh. Bilge Sk. SSK Konutları A Blok Da:12 Pendik/İstanbul

E-Posta: ergunay@itu.edu.tr

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Araştırmacı, TÜBİTAK BİLGEM, 03.2011 -

Yayın ve Patent Listesi:

Ayhan T., Yeniçeri R., **Ergünay S.**, Yalçın M.E., “Hybrid Processor Population for Odor Processing,” *2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2012)*, pp. 177-180, Seoul, Korea, May 20-23, 2012.

Ergünay S., Yeniçeri R., Yalçın M.E., “Hardware-Software Co-design of Nonlinear Active Wave Generator with Microblaze Soft Core Processor”, *Proc. of 2010 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2010)*, pp. 157-160, Krakow, Poland, Sept. 5–8, 2010.

Ergünay S., Yeniçeri R., Yalçın M. E., “Hardware-Software Co-design of Relaxation Oscillator with Cellular Neural Network on FPGA”, *Symposium of Innovations in Intelligent Systems and Applications (ASYU 2010)* pp. 192-195, Kayseri, Turkey, June 21-24, 2010. *in Turkish*

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

▪ Ayhan, Tuba; Yeniçeri, Ramazan; **Ergünay, Selman** ; Yalçın, Müştak Erhan, "Hybrid processor population for odor processing," *Circuits and Systems (ISCAS), 2012 IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.177,180, 20-23 May 2012.