

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİFT SENSÖRLÜ X-IŞINI TARAYICI
TASARIMI VE BİLGİSAYARLA GÖRME
İNCELEMESİ

Abdullah AKAY
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2012

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİFT SENSÖRLÜ X-IŞINI TARAYICI
TASARIMI VE BİLGİSAYARLA GÖRME
İNCELEMESİ

Abdullah AKAY
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DANIŞMANI
Doç. Dr. Y. Sinan AKGÜL

GEBZE

2012

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: ÇİFT SENSÖRLÜ X-IŞINI TARAYICI TASARIMI VE BİLGİSAYARLA GÖRME İNCELEMESİ YAZAR ADI : ABDULLAH AKAY

Nesnelerin içeriklerini tahribatsız şekilde denetleme sistemleri günümüz dünyasında oldukça yoğun şekilde kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerin kullandığı en yaygın, ucuz ve taşınabilir olan teknoloji X-ışını tabanlıdır. Tahribatsız içerik denetleme sistemlerinin kullanım alanları çok fazla olup bunlardan başta gelenleri tıbbi görüntüleme, endüstriyel muayene, askeri ve güvenlik amaçlı paket tarama sistemleridir.

Bu çalışmada güvenlik amaçlı paket denetleme sistemlerine odaklanılmıştır. Bu doğrultuda iki ana hedef gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki için alışveriş merkezi türü alanlara girişlerde kullanılan X-ışın tabanlı tarama cihazları için gerekli donanım ve yazılım teknolojisi üretilerek ortaya bir prototip paket tarama sistemi çıkarılmıştır.

İkinci hedef ise akademik çerçevededir. Bu hedef kapsamında stereoskopik kaynaklardan elde edilen görüntülerin, bilgisayarla görme alanında son zamanlarda elde edilen bilgilerin geliştirilerek elde edilen probleme uygulanması bulunmaktadır. Bunun sonucu olarak, BT (Bilgisayarlı Tomografi) sistemleri kadar başarılı olmasa da belli ölçülerde 3 boyutlu (3B) bilginin çıkarılması ve taranan paketlerin 3B içeriği hakkında bilgi üretilmesi mümkün olmuştur.

Son olarak yukarıda bahsedilen ilk hedef biraz daha ilerletilerek, tek X-ışını sensörü ve stereo X-ışını sensöründen elde edilen verilerle yapılan malzeme sınıflandırma sonuçları karşılaştırılmış ve stereo X-ışını sensörü kullanılarak yapılan sınıflandırmanın daha üstün olduğu gözlemlenmiştir.

Bu tez sonucuna ülkemizin ihtiyaçlarına paralel olarak çift enerjili X-ışını sensörleri ile malzeme sınıflandırması yapabilen, denetlediği paketlerin 3B yapısı hakkında bilgi verebilen bir X-ışınli paket denetleme sistemi geliştirilmiştir.

SUMMARY

**THESIS TITLE: THE DESIGN OF STEREO X-RAY SCANNER
AND ITS ANALYSIS IN COMPUTER VISION
AUTHOR : ABDULLAH AKAY**

Noninvasive content viewing systems have found many applications in today's world including medical imaging, industrial inspection, military applications, and package scanning for security applications. X-ray based scanning systems are the most common due to their relatively low cost and high transportability.

In this thesis, we focus on package inspection systems for security purposes. Two main objectives are implemented. Our first purpose was to develop hardware and software technology necessary for the X-ray based package scanning system.

The second goal is on academic perspective. In this context we applied recent techniques in computer vision field on the problem of inferring 3D information from stereoscopic X-ray images grabbed from X-ray based scanning systems. As a result, although not as successful as computed tomography(CT), 3D content extraction of the inspected packages has been possible.

Finally, the experimental results showed that material classification using stereo X-ray sensor gave better results than using single X-ray sensor.

In line with our country's demand an X-ray package inspection system capable of classifying material with dual-energy X-ray sensors, providing information about the 3D structure of the packages under inspection was developed.

TEŞEKKÜR

Bu tezin bütün süreçlerinde yol gösterici olan Sayın Doç. Dr. Y. Sinan AKGÜL hocama, bu çalışmayı destekleyen Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ne, bu süreçte araştırmacı burs programı ile bana destek olan TÜBİTAK'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca eğitimim süresince bana her konuda tam destek veren annem Selma AKAY'a, babam Lütfullah AKAY'a ve bana hayatlarıyla örnek olan tüm hocalarıma saygı ve sevgilerimi sunarım.

Bu çalışma SAN-TEZ kapsamında "00754-STZ-2010-2" kodlu proje ile T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	IV
SUMMARY	V
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ	XII
1. GİRİŞ	1
1.1 X-IŞINI TABANLI TEKNİKLER İLE PAKET DENETLEME	3
2. X-IŞINI TARAYICI EMULATÖRÜ	6
2.1 İĞNE DELİKLİ KAMERA MODELİ	7
2.2 SÜPÜRGE KAMERA MODELİ	9
3. TEK ENERJİLİ X-IŞINI SENSÖRÜ İLE BÖLÜTLEME	12
4. TEK SENSÖRLÜ ÇİFT ENERJİLİ X-IŞINI SİSTEM MEKANİĞİ	16
4.1 ENTEGRASYON	18
5. STEREO ÇİFT ENERJİLİ X-IŞINI SİSTEM MEKANİĞİ	21
6. GÖRÜNTÜ ÜRETİLMESİ	24
7. MALZEME SINIFLANDIRMASI	30
7.1 ÇİFT X-IŞINI SENSÖRÜ KULLANARAK MALZEME SINIFLANDIRMA	35
8. STEREO GÖRÜNTÜ ANALİZİ MODÜLÜ	38
8.1 3B VOKSEL DOLDURMA	40
8.2 ENERJİ FONKSİYONU	41
8.2.1 VERİ TERİMİ	41
8.2.2 DÜZGÜNLÜK TERİMİ	41
8.2.3 KATMAN SAYISI TERİMİ	42
8.3 3B VOKSEL DOLDURMA DEĞİŞKEN KOMŞULUK ARAMA MODİFİKASYONU	44
9. SONUÇ	46
KAYNAKLAR	48

ÖZGEÇMİŞ

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BG	: Bilgisayarla Görme
BT	: Bilgisayarlı Tomografi
SVM	: Support Vector Machine
2B	: 2 Boyutlu
3B	: 3 Boyutlu
SAN-TEZ	: Sanayi Tezleri Programı
VNS	: Variable Neighborhood Search

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1-1 Stereo X-ışını görüntüleme sisteminin genel yapısı	4
1-2 Efektif atom numarasına göre malzeme sınıflandırma	4
2-1 Geleneksel x-ışınli paket tarama cihazı modeli	6
2-2 İğne delikli kamera modeli geometrisi.	7
2-3 İğne delikli kamera modeli izdüşümü.	8
2-4 Süpürge kamera modeli	9
2-5 Süpürge kamera modeli geometrisi	9
2-6 Benzetim modülünden elde edilen örnek görüntüler	10
3-1 X-ışını görüntüsünün yoğunluk histogramı	13
3-2 X-ışınli paket denetleme sistemi için bir test paketi oluşturulmuştur.	14
3-3 Şekil 3-2'de gösterilen test paketinin x-ışını görüntüsü	15
4-1 X-ışınli paket görüntüleme cihazının üç boyutlu tasarım resimleri	16
4-2 X-ışınli paket tarama cihazının genel görüntüsü.	17
4-3 X-ışını sensörlerinin cihazın mekanik aksamı üzerindeki görüntüleri	17
4-4 Kullanılan Linx x-ışını sensör kutusunun iç görünüşü	18
4-5 Farklı nesnelerin Linx sensör kutusu ile elde edilen görüntüleri	19
4-6 X-ışını sensör dizilerinin seri olarak bağlanması	20
5-1 X-ışınli paket görüntüleme cihazının üç boyutlu tasarım resimleri	21
5-2 Stereoskopik L-tipi sensörlerin yerleştirilmesi.	22
5-3 Stereo çift enerjili x-ışını sistem görünümü	23
5-4 Stereo çift enerjili X-ışını sistem görünümü	23
6-1 Gerçeklenmiş X-ışını cihazı	24
6-2 Tek X-ışını sensöründen elde edilen ham veri	25
6-3 Düşük(sol) ve yüksek(sağ) ham verinin ayrılması	25
6-4 Filtrelenmiş görüntü	26
6-5 Piksel normalizasyonu için hesaplanan y_i doğrusu	28
6-6 Normalize edilmiş görüntü	29
7-1 H_2 nokta uzayını en iyi şekilde ayıran doğrudur	30
7-2 Doğrusal ayrılabilen bir problem için optimum hiperdüzlem	32
7-3 Özniteliklerin dağılımı	33
7-4 Organik-Turuncu, İnorganik-Yeşil, Metal-Mavi	34

7-5 İki sensörden elde edilen görüntüler	35
8-1 Voksel doldurma algoritmalarının RGB görüntülere uygulaması	38
8-2 Sol ve sağ sensörlerden elde edilmiş ham görüntüler	39
8-3 Düzgünlük terimi	42
8-4 Katman sayısı terimi	43
8-5 VNS kullanılarak elde edilen 3B voksel konfigürasyonu	44
8-6 VNS kullanılarak elde edilen 3B voksel konfigürasyonu	45

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3-1 Histogram tabanlı bölütleme algoritması	14
4-1 Sistemde kullanılan cihazlar	20
6-1 Bilgi taşımayan sütunları filtreleme algoritması	26
6-2 Normalizasyon algoritması	27
7-1 Tek ve çift sensör kullanarak yapılan sınıflandırma sonuçları.	36
7-2 Tek ve çift sensör kullanan yöntemlerin test verisi hata oranları	36
8-1 3B voksel doldurma algoritması	40

1. GİRİŞ

X-ışını tabanlı paket denetleme sistemleri pratik, ucuz ve taşınabilir olması sebebiyle günümüzde güvenlik başta olmak üzere, tıbbi görüntüleme, endüstriyel muayene, askeri uygulama alanlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu sistemler özellikle, havaalanı ve alışveriş merkezleri gibi kamuya açık alanların güvenliğinin sağlanmasında büyük rol oynamaktadır. Bu nedenle bu tür sistemler için oluşmuş büyük bir ARGE sektörü ve bu sektörden beslenen büyük bir pazar oluşmuştur. Bu tür sistemler için oluşmuş olan pazarın Türkiye içerisinde de oldukça büyük olmasına rağmen, paket tarama sistemleri için Türkiye'de yapılan ARGE yok denecek kadar azdır. Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen soruna kısmen de olsa çözüm getirmek adına SANTEZ projesi kapsamında geliştirilen X-ışınlı tabanlı paket denetleme cihazının gelişim evreleri detaylı olarak anlatılmıştır.

Yapılan çalışmanın ana başlıklarından bir tanesi, alışveriş merkezi türü alanlara girişlerde kullanılan X-ışın tabanlı tarama cihazları için gerekli donanım ve yazılım teknolojisini üreterek ortaya bir prototip paket tarama sistemi çıkarmaktır.

Diğer başlık ise daha çok akademik hedefleri kapsamaktadır. Genel olarak bu hedefler geliştirilen X-ışınlı paket denetleme cihazı ile denetlenen paketlerin 3B yapıları hakkında bilgi sahibi olmayı içermektedir. Bu amaç için hali hazırda kullanılan benzer yöntemlerden olan Bilgisayarlı Tomografi (BT), aynı nokta üzerinden birden fazla ışın geçirilerek noktaların hacimsel özellikleri hakkında bilgi edinilmesini sağlamaktadır [1, 5, 51, 52]. BT paket tarama sistemlerinin 1980'li yıllara göre daha ucuz olmasına rağmen, her türlü durum için kullanılması fiyat ve cihaz kurulum ihtiyaçları bakımından uygun değildir. Bu nedenle, BT gibi aynı nokta üzerinden onlarca ışın geçirmek yerine sadece iki ışın geçirerek bilgi elde etme prensibine dayanan stereoskopik görüntüleme yöntemleri geliştirilmiştir [9, 10]. Bu yöntemlerde, tarama operatörüne doğrudan verilen ikili görüntü bir derinlik algılama hissi verse de, bilgisayar analizine elverişli otomatik bilgi edinme teknikleri henüz geliştirilmemiştir.

Bu çalışmada, stereoskopik kaynaklardan elde edilen görüntülerin, bilgisayarla görme alanındaki modern çözümlerin geliştirilerek eldeki probleme uygulanması gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucu olarak, BT sistemleri kadar başarılı olmasa da belli

ölçülerde 3 boyutlu (3B) bilginin çıkarılması ve taranan paketlerin 3B içeriği hakkında bilgi üretilmesi mümkün olmuştur.

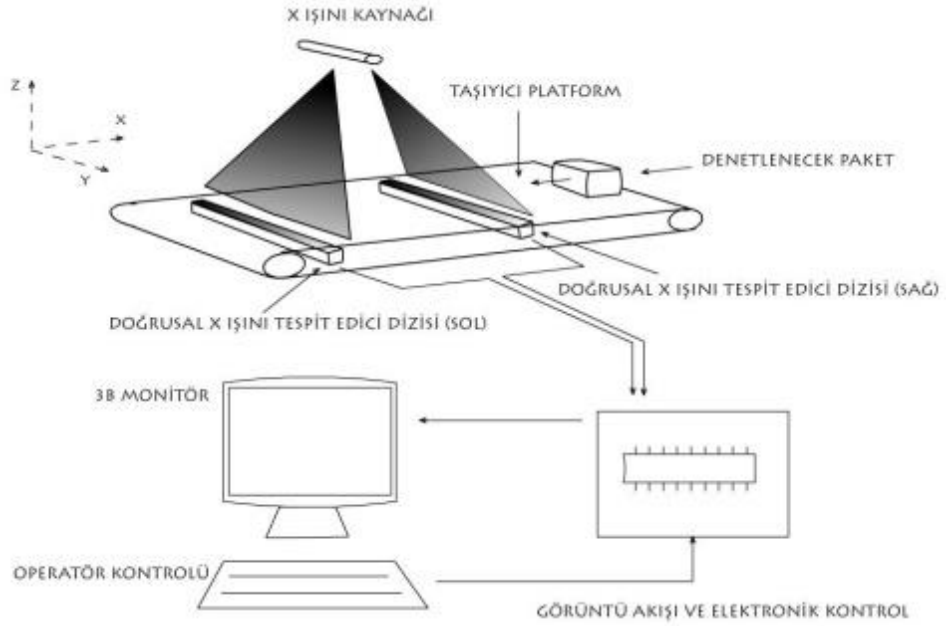
1.1 X-IŞINI TABANLI TEKNİKLER İLE PAKET DENETLEME

X-ışınlı paket görüntüleme cihazların çalışma prensipleri genel olarak 3 farklı yöntemi temel alırlar:

Geleneksel X-ışın İletimi: Bu yöntem günümüze kadar birçok sektörde yoğun olarak kaçak eşya, silah, tehlikeli madde tespitinde kullanılmıştır [3,7]. Standart X-ışını iletiminde, sistem X-ışını fotonlarının paketin belli bölgelerinde ne kadar azaldığını ölçmektedir. Geleneksel X-ışın iletimi maddelerin yoğunluklarıyla ters orantılı parlaklığa sahip 2B resimler üreterek incelenen nesne hakkında genel bilgiler verir. Standart havalimanı bagaj tarama sistemlerinde, pervane şeklinde veya doğrusal şekilde yerleştirilmiş, X-ışınının emilimine göre ölçüm yapıp yüksek kaliteli görüntüler üreten sensörler mevcuttur [7,8]. Fakat bu sistemler ince ama güçlü bir emici katman ile kalın ama zayıf bir emici levha arasındaki farkı tespit edememektedirler [1, 7, 9]. Bu yöntem patlayıcı ve uyuşturucu madde tespitinde yeterince başarılı olamamıştır [1, 7, 9].

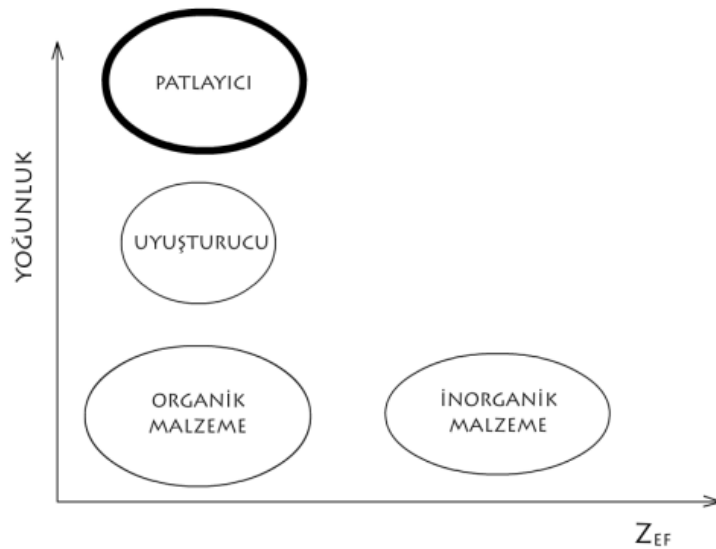
Çift Enerjili X-ışın Görüntüleme: Çift enerjili analiz tekniği taranan nesnenin yoğunluk ölçümünün yanında atom numarası ölçümünü de sunmaktadır [9,10]. Bu yöntemde kullanılan temel prensip iki farklı enerji seviyesine sahip (yüksek, düşük) X-ışınını aynı malzemedan geçirerek sönümlenme oranlarının analizi sonucu malzemenin atom numarasının tahminidir. Fakat burada atom numarası yerine genelde, ölçülecek bileşik veya karışımın vereceği sönüm değerinin aynısını verecek varsayımsal bir elementi temsilen “efektif atom numarası” terimi kullanılmaktadır [1, 2, 4, 7, 9]. Efektif atom numarası taranan malzemenin fiziksel özelliklerini sınıflandırmak için yoğunluk ölçümüne ek bir boyut sağlamaktadır (Şekil 1-2). Bir nesnenin malzeme tipi sadece yoğunluk değeri yerine hem yoğunluk hem de efektif atom numarası değerleri kullanılarak daha iyi tespit edilebilmektedir. Örneği su ve ANFO (amonyum nitrat ve fueloil) aynı fiziksel yoğunluğa sahip olabilmektedir. Diğer yandan efektif atom numarası bakımından oldukça farklılaşmaktadırlar. Böylelikle su ve ANFO çift enerjili X-ışını yöntemleri kullanılarak birbirlerinden daha iyi ayırt edilebilmektedirler. Günümüzde kullanılan çoğu ticari sistemler bagajlardaki malzemelerin atom numaralarını tahmin etmek için çift enerjili analiz yapmaktadır [7,8,11]. Tek enerjili bir sistem için ince ve yüksek Z(atom numarası)’li bir malzeme ile kalın ama düşük Z’li bir malzeme aynı sönüm değerine sahiptir. Fakat çift enerjili sistemlerde farklı enerji seviyelerinde yapılan ölçümler

bu iki durumu birbirinden ayırabilir.



Şekil 1-1 Stereo X-ışını görüntüleme sisteminin genel yapısı

Stereo X-ışını Görüntüleme: Bu yöntemler incelenen nesnenin 3 boyutlu yapısını operatöre yansıtmak için kullanılmaktadırlar [1,2,12] (Şekil 1-1). Bu yöntem bazı durumlarda etkili sonuçlar üretmesine rağmen tarayıcı operatörleri üzerinde aşırı yorgunluğa yol açtıkları gözlemlenmiştir.



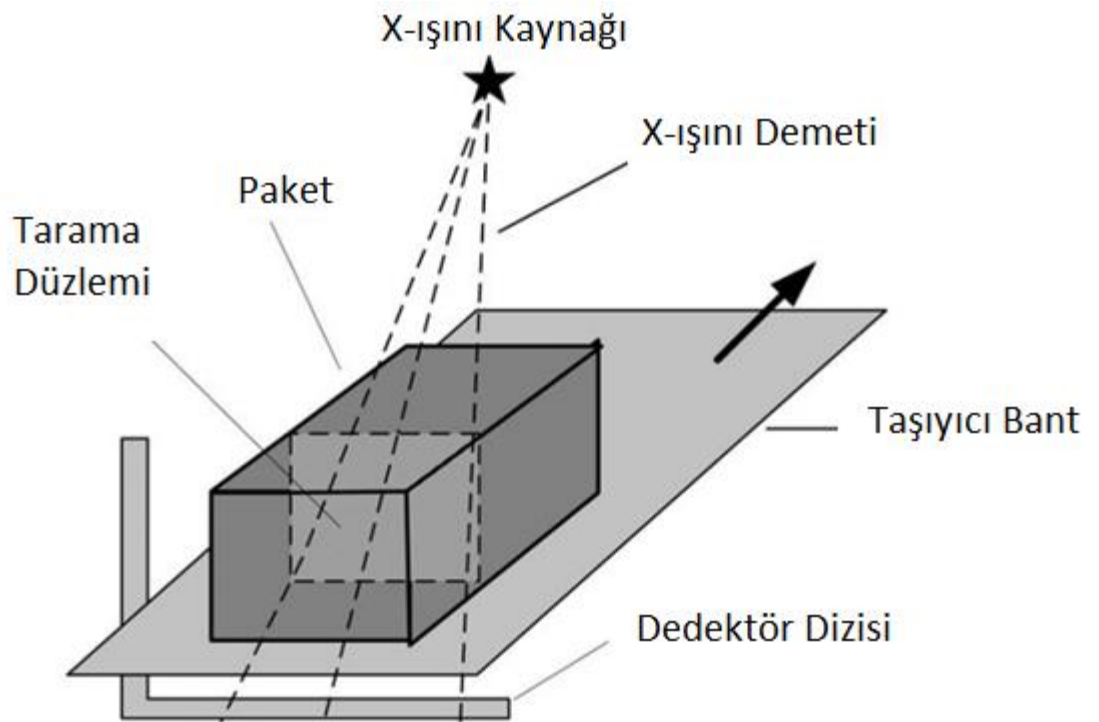
Şekil 1-2 Efektif atom numarasına göre malzeme sınıflandırma

Bu tezin akışı aşağıdaki gibidir.

- Emulatör(Benzetim) Modülü
- Tek Enerjili X-ışını Sensörü İle Bölütleme
- Tek Sensörlü Çift Enerjili X-ışını Sistem Mekanığı
- Stereo Çift Enerjili X-ışını Sistem Mekanığı
- Görüntü Üretilmesi
- Malzeme Sınıflandırması
- Stereo Görüntü Analizi Modülü

2. X-IŞINI TARAYICI EMULATÖRÜ

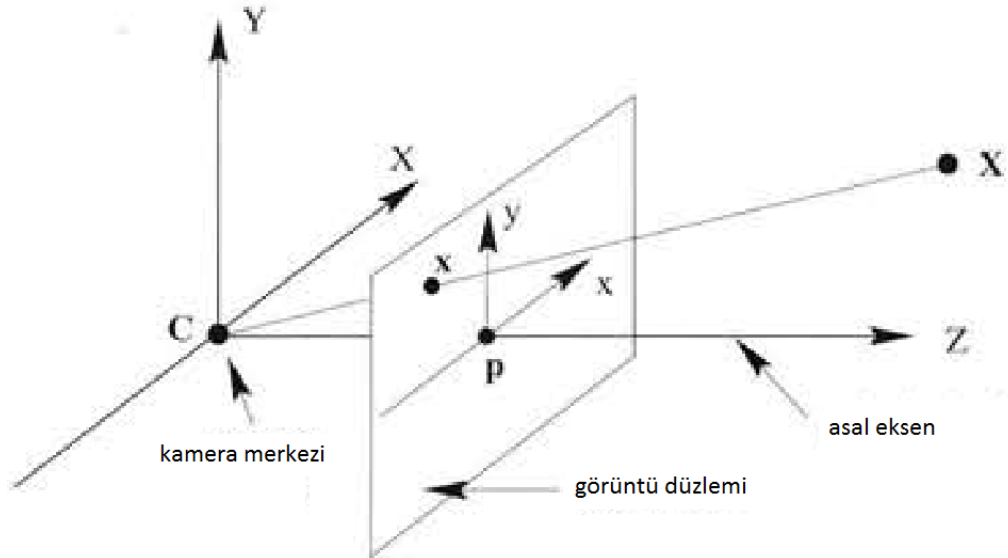
X-ışınılı sistemler üzerinde algoritma geliştirmek için öncelikle bir X-ışınılı paket denetleme cihazı vasıtasıyla veri toplamak gerekmektedir. X-ışınılı paket denetleme cihazının geliştirilip görüntü alma aşamasına getirilmesi görece uzun bir süre alacağından, bu süre zarfında Bilgisayarla Görme algoritmalarını geliştirmek ve test etmek için bir X-ışınılı paket denetleme cihazı emulatörü geliştirilmiştir. Geliştirilen emülator Şekil 2-1'de gösterilen geleneksel X-ışınılı görüntüleme sisteminin genel yapısına benzemektedir. Bu sistemde yıldız ile gösterilen nokta normal kameralardaki projeksiyon merkezi olarak düşünülebilir. Burada kamera konveyörün hareketi doğrultusunda ortogonal, konveyörün hareketine dik doğrultuda ise perspektif projeksiyon davranışı göstermektedir [53]. Bu davranış ise Süpürge (Pushbroom) kamera modeliyle bire bir örtüşmektedir. Süpürge kamera modelini kullanarak bu X-ışınılı paket görüntüleme sistemini modellemek mümkün olmuştur.



Şekil 2-1 Geleneksel x-ışınılı paket tarama cihazı modeli

2.1 İĞNE DELİKLİ KAMERA MODELİ

Kamera 3B dünya ile 2B görüntü arasında bir eşlemedir. Bunun sonucu olarak 3B dünyadaki nesnelere belli bir matematiksel modele (İğne delikli kamera modeli) göre 2B görüntü üzerine düşerler. Bu kamera modelinde uzay içerisindeki noktaların merkezi iz düşümü bir düzleme düşer. İzdüşüm merkezi, öklid uzayının orijini ve $z = f$ düzlemi *görüntü düzlemi* olarak belirlenmiştir. İğne delikli kamera modeline göre koordinatları $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$ olan uzaydaki bir noktanın eşlemesi, \mathbf{X} 'den izdüşüm merkezine giden bir doğrunun görüntü düzlemini kestiği noktada oluşur (Şekil 2-2). Üçgen benzerliği kullanılarak $(X, Y, Z)^T$ noktasının $\left(f \frac{X}{Z}, f \frac{Y}{Z}, f\right)^T$ noktasına eşlendiği kolaylıkla bulunabilir (Şekil 2-3).

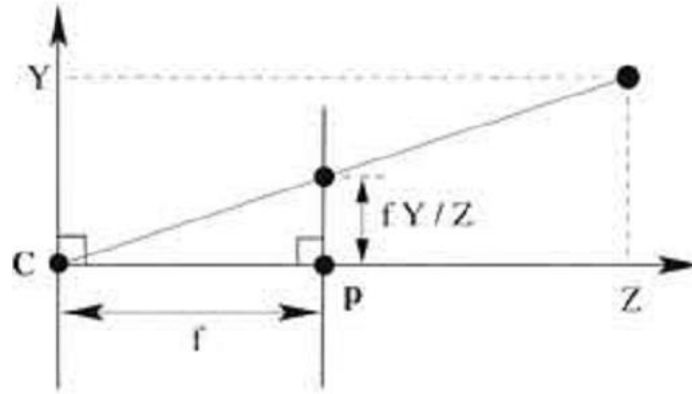


Şekil 2-2 İğne delikli kamera modeli geometrisi.

Son görüntü koordinatı ihmal edildiğinde,

$$(X, Y, Z)^T \rightarrow \left(f \frac{X}{Z}, f \frac{Y}{Z}\right)^T$$

ortaya çıkan formül dünya koordinatlarından görüntü koordinatlarına merkezi izdüşüm eşlemesini tanımlar. Bu 3B Öklid uzayından, 2B Öklid uzayına bir eşlemedir.



Şekil 2-3 İğne delikli kamera modeli izdüşümü.

İzdüşüm merkezi *kamera merkezi* veya *optik merkez* olarak adlandırılır. Kamera merkezinden çıkıp görüntü düzlemini dik kesen doğru kameranın *asal eksen*i, asal eksenin görüntü düzlemini kestiği nokta *asal nokta* ve kamera merkezinden geçip görüntü düzlemine paralel olan düzlem *kameranın asal düzlemi* olarak adlandırılır.

Dünya ve görüntü koordinatları homojen vektörler olarak temsil edilirse, merkezi izdüşüm sözkonusu homojen koordinatlar arasında bir lineer eşleme olarak kolaylıkla ifade edilebilir. Şekil 2-3'den elde edilen formül matris çarpımı formuna getirilip aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & & 0 \\ & f & 0 \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

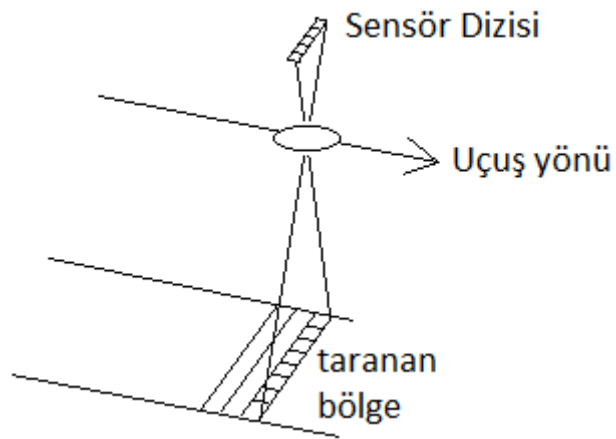
X dünya nokta koordinatını ifade eden homojen $(X, Y, Z, 1)^T$ 4-vektördür. x görüntü noktasını ifade eden homojen 3-vektördür. P ise 3×4 boyutlarında homojen *kamera matrisidir*. Yukarıdaki eşitlik daha derli toplu olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$x = PX$$

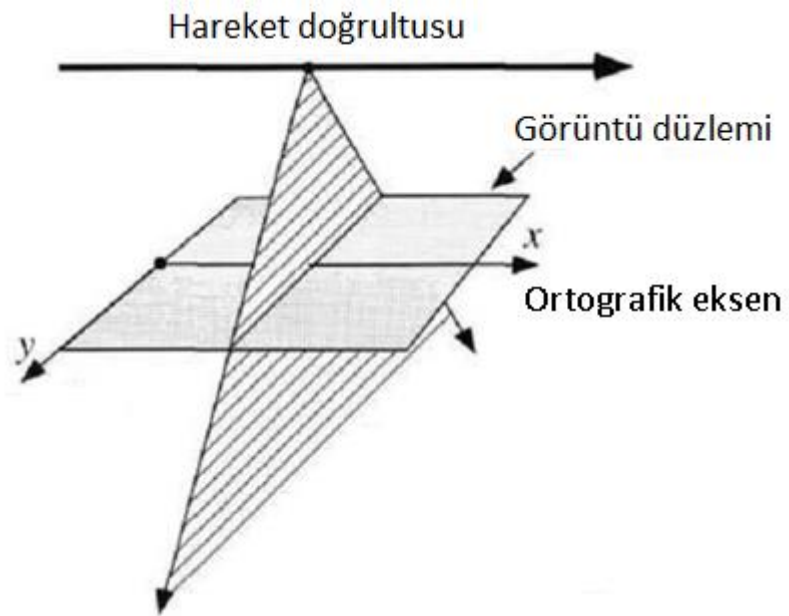
Buradaki eşitlik iğne delikli kamera modelini tanımlayan kamera matrisidir.

2.2 SÜPÜRGE KAMERA MODELİ

Süpürge kamera modeli uydularda kullanılan sensörlerin soyutlaştırılmış halidir. Böyle bir kamerada anlık resim çekmek için bir doğrusal sensör dizisi kullanılır. Sensör bir düzlem boyunca hareket ettikçe her seferinde tek bir satır resim çekerek belli bir bölgeyi tarar (Şekil 2-4). Böylelikle görüntünün ikinci boyutu sensörün hareketi sayesinde elde edilir. Doğrusal süpürge kamera modelinde sensörün düz bir çizgide, yere göre sabit hızla hareket ettiği varsayılır (Şekil 2-5).



Şekil 2-4 Süpürge kamera modeli uydusu sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Sensörler tek satırlık bir görüntü elde ederlerken resmin ikinci boyutu sensörlerin hareketiyle elde edilir.



Şekil 2-5 Süpürge kamera modeli geometrisi

Nesne uzayından görüntü üzerine izdüşüm alma genel projektif kamerada olduğu gibi bir 3x4 kamera matrisiyle ifade edilebilir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken bir nokta vardır, şöyle ki:

- $X = (X, Y, Z, 1)^T$ gerçek dünyada bir nesne noktası olsun, ve P Lineer süpürge kameranın kamera matrisi olsun. $PX = (x, y, w)^T$ ise karşılık gelen görüntü noktası (inhomojen 2-vektör) $\left(x, \frac{y}{w}\right)^T$ olur.

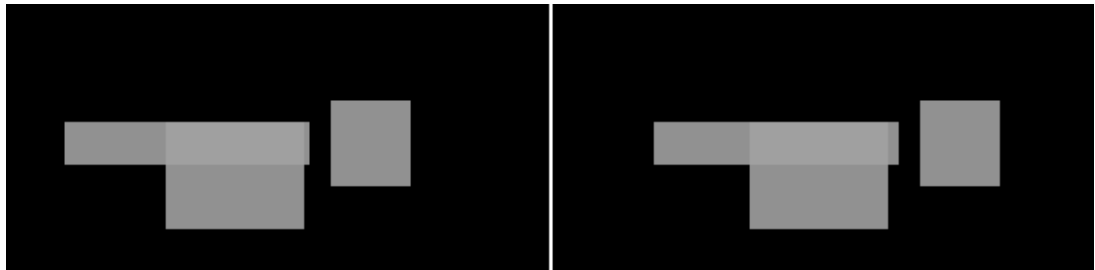
Genel projektif kamera modelinde bu sonuç $\left(\frac{x}{w}, \frac{y}{w}\right)^T$ olacaktır. Burada süpürge modelinde x , w ya bölünmemelidir. Bunun sebebi başta açıklandığı gibi x koordinatının ortogonal projeksiyon özelliği göstermesidir.

Görüntü noktaları alternatif olarak aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}\check{x} &= x = \frac{P^{1T}X}{P^{3T}X} \\ \check{y} &= \frac{y}{z} = \frac{P^{2T}X}{P^{3T}X}\end{aligned}$$

Burada P^{1T}, P^{2T}, P^{3T} sırasıyla *kamera matrisinin* 1, 2 ve 3. satırlarının transpozlarıdır.

Benzetim (Emulator) modülünde yukarıda anlatılan lineer süpürge kamera modeli esas alınarak bir X-ışınlı paket denetleme sistemi benzetimi gerçekleştirilmiştir. Sözkonusu benzetim modülü kullanılarak 2 tanesi birbiriyle örtüşen 3 adet dikdörtgenler prizması şeklinde nesneden oluşan sahnenin elde edilen X-ışını görüntüsü Şekil 2-6'daki gibidir.



Şekil 2-6 Benzetim modülünden elde edilen örnek görüntüler

Bu paket çıktısı, mekanik aksam tamamlanıncaya kadar, projenin görüntü analizi kısmında kullanılmıştır.

3. TEK ENERJİLİ X-IŞINI SENSÖRÜ İLE BÖLÜTLEME

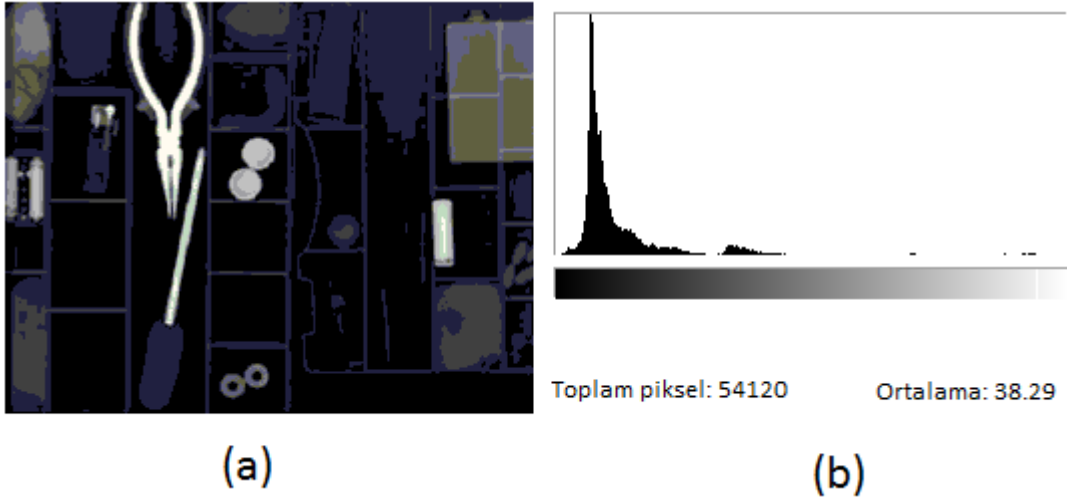
Geliştirilen X-ışınlı paket denetleme cihazı emulatörü belli başlı BG algoritmalarının test edilmesine olanak sağlamıştır. Ancak malzeme sınıflandırma gibi gerçek hayat nesnelere fiziksel ve kimyasal yapısıyla çok daha fazla ilişki problemlere çözüm getirmede yetersiz kalmaktadır. Bunun için bir sağlık merkezinin tıbbi görüntüleme cihazları kullanılarak çeşitli malzemelerden oluşan bir çantanın tek enerjili X-ışını görüntüleri çekilmiş ve malzeme sınıflandırma problemine çözüm getirilmeye çalışılmıştır.

X-ışınlı paket denetleme cihazları en basit haliyle içlerine konulan nesnelere x-ışını geçirgenliklerini yansıtan bir görüntü üretirler. Bu görüntülerin güvenlik operatörleri tarafından incelenmesiyle tehlikeli olabilecek maddeler belirlenirler. Bir başka deyişle, sistemin son karar mercii görüntüleri izleyen operatörlerdir. Kalabalık ortamlarda çalışan X-ışınlı paket denetleme operatörlerinin dikkatleri dağılabilmektedir. Ayrıca operatörler genellikle yoğun bir iş yükü altında ve uzun süreler çalıştılarından algı seviyeleri kararlı değildir. Bu sistemlerin, genel güvenlik gereksinimlerini karşılaması ve hızlı bir şekilde çalışabilmesi için operatörleri desteklemeleri gerekmektedir.

X-ışınlı paket denetleme cihazından elde edilen görüntüler siyah-beyaz olduğundan nesnelere arka plandan ya da diğer yakın nesnelere ayırt edilmesi operatörleri zorlayabilmektedir. Ayrıca sadece siyah beyaz tek bir resme bakarak nesnelere kimyasal özellikleri ayırt edilememektedir. Tehlikeli olabilecek tüm nesnelere bilgisayar sistemleriyle belirlenmesi mümkün değildir ama nesnelere kimyasal özelliklerini yansıtan x-ışını görüntüleri işlenerek tehlikeli olabilecek maddelerin operatörler tarafından daha kolay seçilmesi sağlanabilir. Operatörlerin görüntüleri daha rahat analiz edebilmesi için farklı kimyasal özelliklere sahip olan kısımların farklı renklerle belirtilmesi sağlanmıştır. Bunun için x-ışını görüntüleri üzerinde renk bölütleme (segmentasyon) algoritması çalıştırılmıştır.

Bu amaçla siyah-beyaz görüntü üzerinde yoğunluk histogramı çıkarılmıştır. Yoğunluk histogramı, bir pikselin alabileceği bütün değerler için, o değerdeki

pikselde X-ışını görüntüsü üzerinde kaç tane bulunduğu bilgisini barındıran bir yapıdır. Şekil 3-1'de örnek bir X-ışını yoğunluk histogramı görünmektedir.



Şekil 3-1 (a) orjinal X-ışını görüntüsü, (b) X-ışını görüntüsünün yoğunluk histogramı

Elde edilen histogramın herbir tepe noktası ve yamaçları ayrı bir malzeme sınıfını temsil etmektedir. En yüksek tepe noktası genellikle arkaplan olmaktadır. Ardından histogram üzerinde tepe noktası oluşturan diğer malzemeler teker teker yeni birer sınıf olarak tanınır. Sınıfların öğrenilmesinden sonra X-ışını görüntüsü üzerindeki pikseller hangi sınıfın piksel değerine yakınsa o sınıfa atanıp o sınıfın rengiyle temsil edilir. Bu işlemin sonucu Şekil 3-3'de görünmektedir.

Tablo 3-1 Histogram tabanlı bölütleme algoritması

Girdi olarak siyah-beyaz bir görüntü al.

Girdi görüntüsünün yoğunluk histogramını hesapla.

Yoğunluk histogramındaki her bir tepe noktasını farklı sınıf olarak belirle.

Her bir görüntü pikselini yoğunluk değerine denk gelen sınıfa ata.

Sınıflandırılmış piksellere ait olduğu sınıfın rengini atayarak nihai görüntüyü oluştur.

Şekil 3-2'deki gibi farklı türde maddeler içeren bir test senaryosu hazırlanmıştır. Bu paketlerin içerikleri bir tıbbi X-ışınli tarama sistemi tarafından görüntülenmiştir (Şekil 3-3). Tıbbi sisteme erişim bir sağlık merkezi üzerinden sağlanmıştır.



Şekil 3-2 X-ışınli paket denetleme sistemi için farklı kimyasal özellikte sahip maddelerden oluşan bir test paketi oluşturulmuştur.



Şekil 3-3 (a) Şekil 3-2'de gösterilen test paketinin x-ışını görüntüsü, (b) x-ışını görüntüsü üzerinde renk bölütlemesi kullanılmasıyla elde edilen deneme analizi.

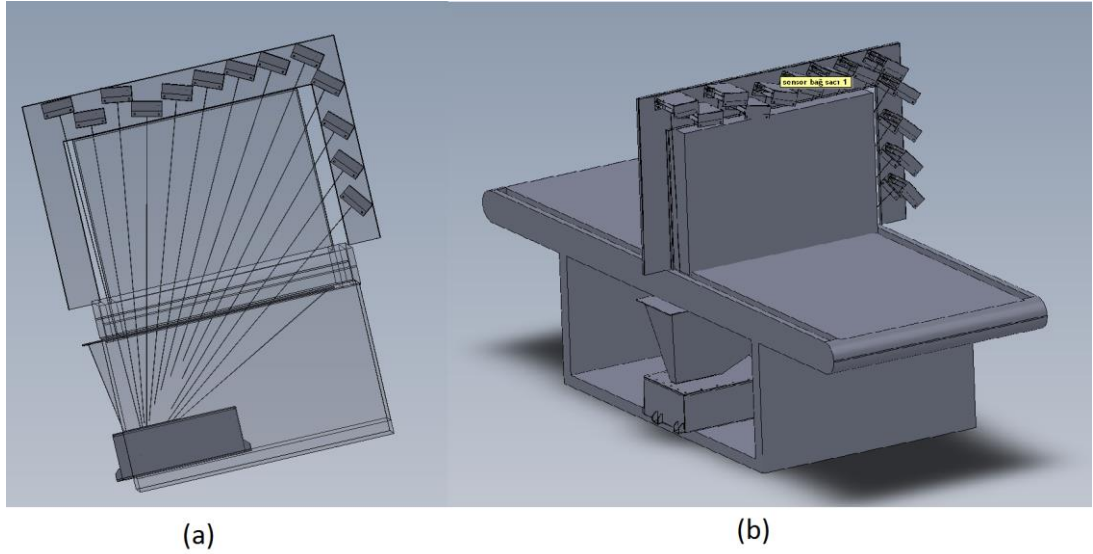
Açıkça görüldüğü gibi siyah-beyaz görüntüde ilk bakışta nesnelere ayırmak yorgun bir operatör için oldukça zorlayıcı olacaktır. Burada öncelikle operatörü gereksiz yere meşgul eden arkaplan önplan ayrımı yapılmıştır. Ayrıca farklı nesnelere görüntüdeki yoğunluklarının farklı olacağı gerçeğinden yola çıkarak nesne bölütlemesi yapılmıştır. Aynı nesnelere benzer yoğunluk değerlerine sahip olacağından dolayı, bütün görüntünün histogramı çıkartılıp, incelendiğinde oluşan zirvelerin bir nesneyi temsil ettiği gerçeği ortaya çıkacaktır. Bu şekilde elde edilen her bir zirve farklı bir nesne olarak atanıp farklı bir renk ile ifade edilmesiyle bölütlenmiş görüntü elde edilir.

Renk bölütlemesi sonunda metal özelliği taşıyan kısımlar eflatun renkle belirginleştirilmiştir. Operatör bu renkle işaretlenmiş kısımlara daha çok dikkat edecektir. Şekil 3-3.(a)'da çok açık görünmeyen tornavidanın baş kısmındaki plastik bölge belirginleştirilmiştir. Bunun dışında renk bölütleme algoritmasının eşik değerinin doğru seçilmesi gerekmektedir. Arka alanla renk farkı eşik değerin altında kalan nesnelere tamamen ihmal edilebilir.

Çalışmanın bu kısmında sadece tek bir dalga boyu kullanılmıştır. X-ışınının farklı dalga boylarını kullanılarak elde edilen resimlerin bir arada kullanılmasıyla, renk bölütleme algoritmasının daha doğru bir şekilde boyanması sağlanacaktır.

4. TEK SENSÖRLÜ ÇİFT ENERJİLİ X-IŞINI SİSTEM MEKANİĞİ

Geliştirilen X-ışınlı paket denetleme cihazının ilk aşaması tek sensörlü çift enerjili X-ışını sistemidir. Bu sistemin 3B yapısı Şekil 4-1'de gösterilmiştir. X-ışını jeneratörü cihazın alt kısmında görünmektedir. Üst kısımda ise L şeklinde dizilmiş çift enerjili sensör dizisi bulunmaktadır.



Şekil 4-1 X-ışınlı paket görüntüleme cihazının üç boyutlu tasarım resimleri: (a) L-tipi sensörlerin yerleştirilmesi, (b) cihazın genel görüntüsü.

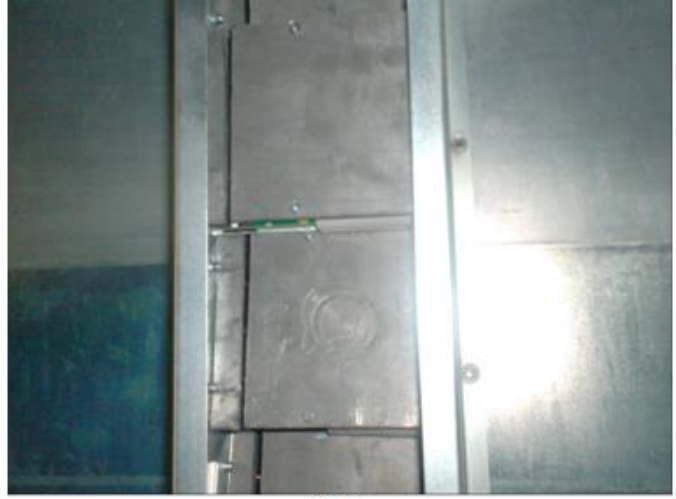
Yapılan tasarımın mekanik aksamının genel bir görüntüsü Şekil 4-2'de verilmiştir. Şekil 4-1(a)'da üç boyutlu çizimi verilen L-tipi sensörlerin cihaz üzerindeki görüntüleri ise Şekil 4-3'de gösterilmiştir.



Şekil 4-2 X-ışını paket tarama cihazının genel görüntüsü.



(a)



(b)

Şekil 4-3 X-ışını sensörlerinin cihazın mekanik aksamı üzerindeki görüntüleri: (a) X-ışını sensörlerinin seri bağlanması, (b) X-ışını sensörlerinin diğer bir açıdan yerleşimi

4.1 ENTEGRASYON

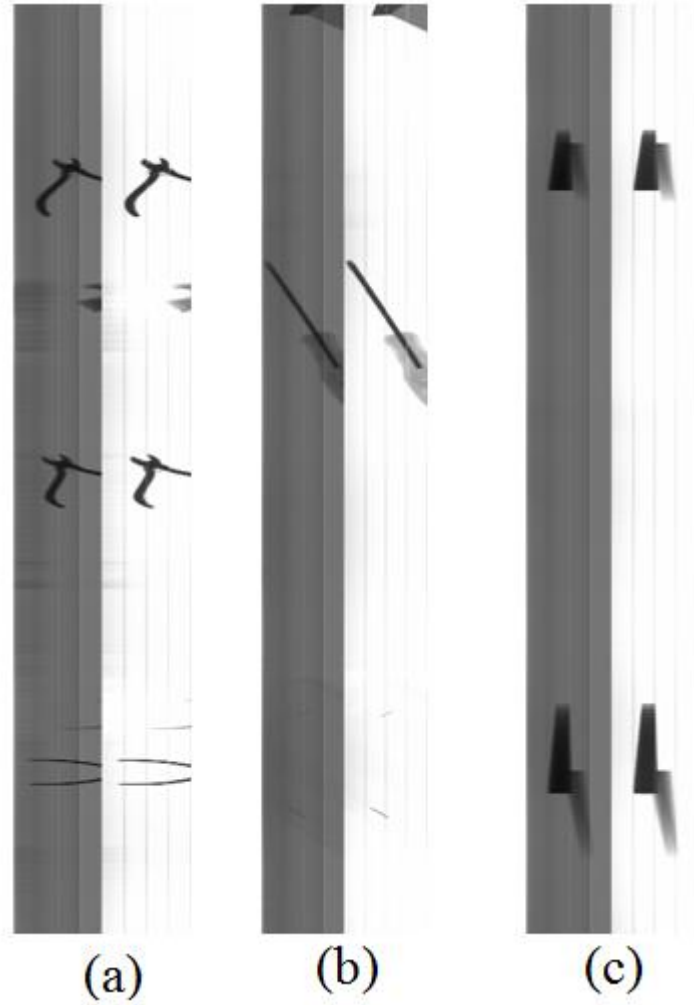
X-ışını sensörleri bir dizi halinde bağlı olarak bulunmaktadır ve her bir sensör dizisinde sınırlı sayıda sensör yer almaktadır. Bir X-ışını paket denetleme cihazında çok sayıda sensör dizisinin bir arada kullanılması gerekmektedir. X-ışını sensör dizilerinin ışın kaynağına göre doğru bir şekilde konumlandırılması ve bu sensörlerden verilerin okunması için hassas bir şekilde birbirlerine bağlanmaları gerekmektedir. Bu işlemlerin hatalara açık olması nedeniyle ilk deneyler Linx sensör kutusu üzerinde yapılmıştır. Linx sensör kutusu içerisinde her biri 64 x-ışını sensöründen oluşan iki sensör dizisi barındırmaktadır ve kutu üzerinde bilgisayarla haberleşme için seri ve USB bağlantı noktaları içermektedir [54] (Şekil 4-4). Linx sensör kutusu aşağıdaki belirtildiği şekilde çalıştırılmıştır:

1. Bilgisayarla iletişim için USB bağlantı noktası kullanılmıştır. USB bağlantısı hassas olduğu için bilgisayarın ön kısmındaki bağlantı noktaları tercih edilmemelidir.
2. Linx sensör kutusunun internet sitesinden güncel yazılımlar ve uygulama geliştirme arabirimi indirilmiş ve kurulmuştur [55].
3. Uygulama geliştirme arabirimi kullanılarak bir kontrol yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılımla sensör kutusu üzerinden öncelikle sisteminin donanım özellikleri elde edilmiştir. Sistemin veri okuma hızı yazılımsal olarak kontrol edilmiş ve verilerin alınması sağlanmıştır.



Şekil 4-4 Kullanılan Linx x-ışını sensör kutusunun iç görünüşü

Linx sensör kutusu sistemin kalibrasyonu için de tercih edilmiştir. Konveyör ve x-ışını üreticinin bağlı olduğu sisteme ilk olarak Linx sensör kutusu yerleştirilerek sistem denenmiştir. Bu denemeler sonucunda bazı nesnelere için elde edilen ilk görüntüler Şekil 4-5'de görülmektedir.



Şekil 4-5 Farklı nesnelere Linx sensör kutusu kullanılarak elde edilen görüntüleri: (a) Yen keski, (b) tornavida, (c) kalibrasyon merdivenleri. Kalibrasyon merdivenlerinin biri demir diğeri ise alüminyumdan üretilmiştir. Demir merdiven alüminyumdan daha koyu görünmektedir ve basamak yüksekliği arttıkça resim koyulaşmaktadır.

Sistemin son halinde Linx sensör kutusu yerine, 13 adet sensör dizisi L-şeklinde cihaz üzerine yerleştirilmiştir. Bu sensör dizilerinin bağlantılarının yapılması için özel kablolar ve iletişim için gerekli olan kart tedarik edilmiştir. Sensör dizileri seri olarak bağlanmıştır (Şekil 4-6). Bu bağlantılar oldukça dikkatli bir şekilde yapılmalı ve kablo yönlerine dikkat edilmelidir. Sistem içerisinde kullanılan cihazların listesi Tablo 4-1'de verilmiştir [54, 55, 56, 57, 58].

Tablo 4-1 Sistemde kullanılan cihazlar

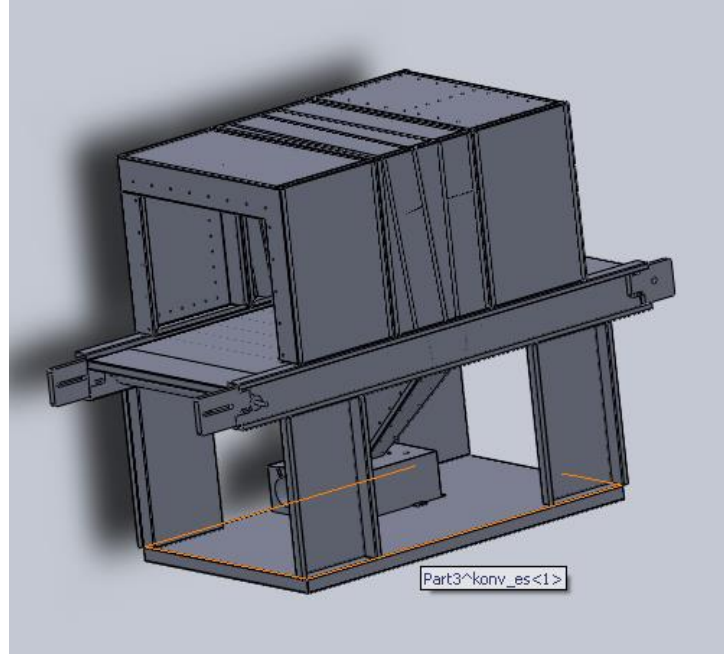
Cihaz Modeli	Adedi
XDAS-DH2-02	45
XDAS-SP2-02	2
EM250	2
XDAS-PSU6	2
CABLE-USB2-AB-5M	2
LINXPOWER3M-08	1
XDAS-SOFTWARE	1
LINX1402-02	1
CABLE-SET	2
XRB301 MONO BLOCK160KV 320 W X-ray generator	2



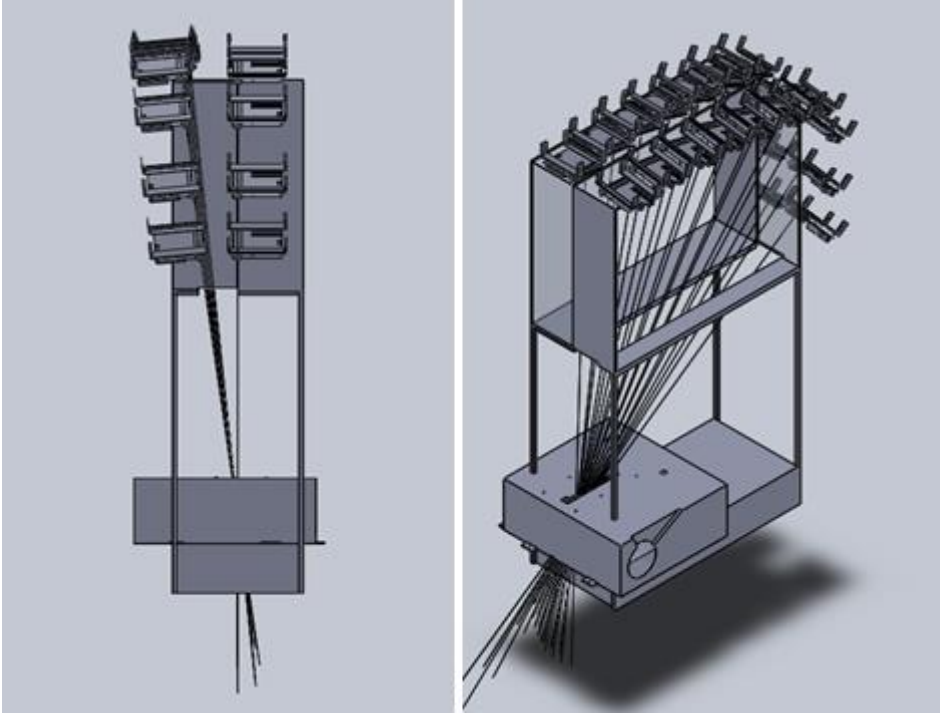
Şekil 4-6 X-ışını sensör dizilerinin seri olarak bağlanması

5. STEREO ÇİFT ENERJİLİ X-IŞINI SİSTEM MEKANİĞİ

Yapılan çalışmalar sonrasında tek sensörlü çift enerjili sistemde kullanılan mekanik sistemin stereoskopik görüntü için yeterli olmadığı gözlemlenmiş bu nedenle mekanik tasarımı yenilenmiştir. Yapılan son tasarımın üç boyutlu çizimleri Şekil 5-1'de gösterilmiştir.



Şekil 5-1 X-ışınli paket görüntüleme cihazının üç boyutlu tasarım resimleri Sensör yerleşimi ve kolimatör tasarımı yenilenmiştir. Stereoskopik görüntü için gerekli olan mekanik sistemin kolimatör ve sensör yerleşimi Şekil 5-2'de gösterilmiştir.



Şekil 5-2 Stereoskopik L-tipi sensörlerin yerleştirilmesi.

Yapılan tasarımın mekanik aksamının genel bir görüntüsü Şekil 5-3'de verilmiştir. Tek sensörlü çift enerjili sistemde kullanılan mekanik tasarımdaki görüntü kalitesini etkileyen eksiklikler düzeltilerek yeni bir sistem tasarlanmıştır. Bu sisteme uygun olacak özelliklerde X- ışını sensörleri kullanılmıştır. Ayrıca X-ışını kaynağının gürültüsünü en aza indirecek şekilde sistemin tasarımı ve kalibrasyonu yapılmıştır.

Aşağıdaki resim sistemin genel yapısını göstermektedir.



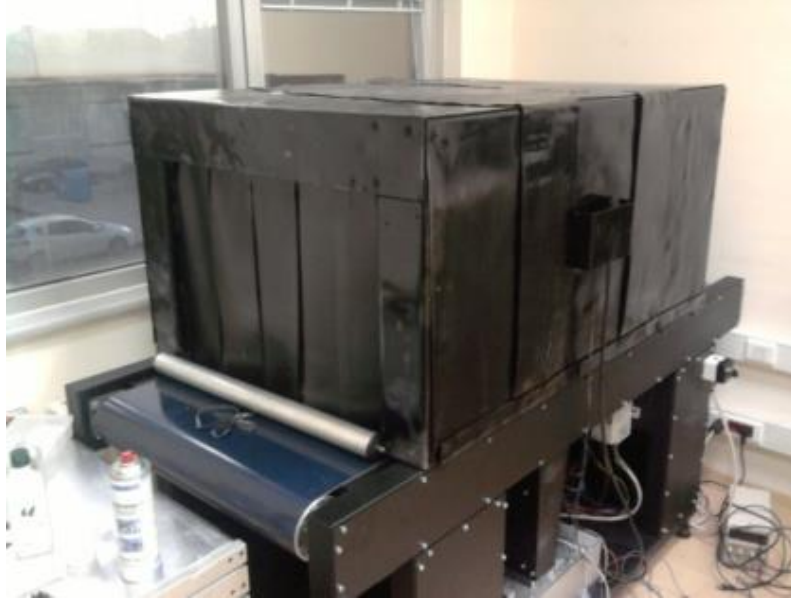
Şekil 5-3 Stereo çift enerjili x-ışını sistem görünümü



Şekil 5-4 Stereo çift enerjili X-ışını sistem görünümü

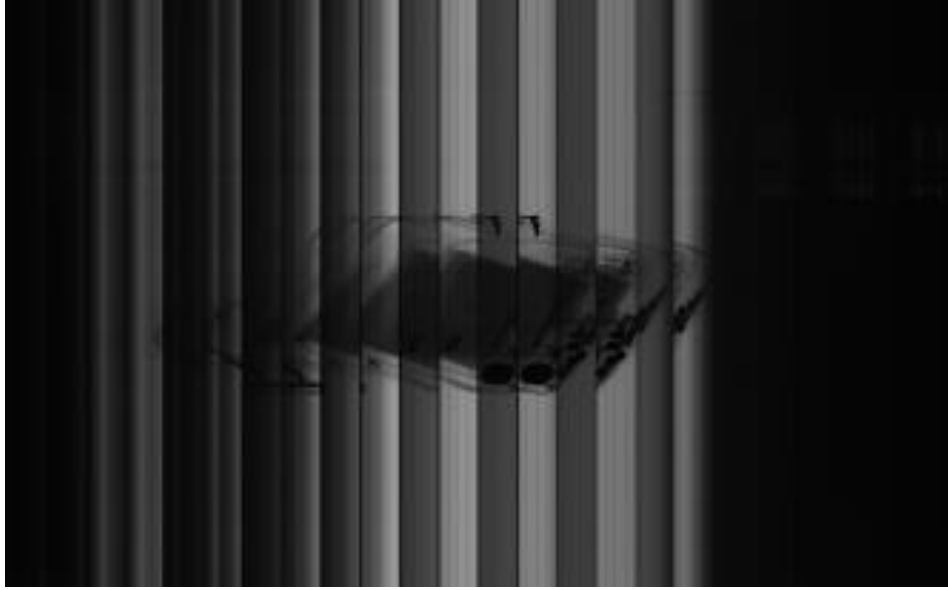
6. GÖRÜNTÜ ÜRETİLMESİ

Şekil 6-1'de gösterilen sistemde X-ışını kaynağından çıkan ışınlar yürüyen bant üzerinde bulunan nesnelere içinden geçerek ilerlerler ve X-ışını sensörleri tarafından algılanırlar. Ardından kontrol devresi aracılığıyla sayısal veriye dönüştürülüp bilgisayara gönderilirler. Daha sonra elde edilen görüntüler operatörün incelemesi için monitöre yansıtılır.



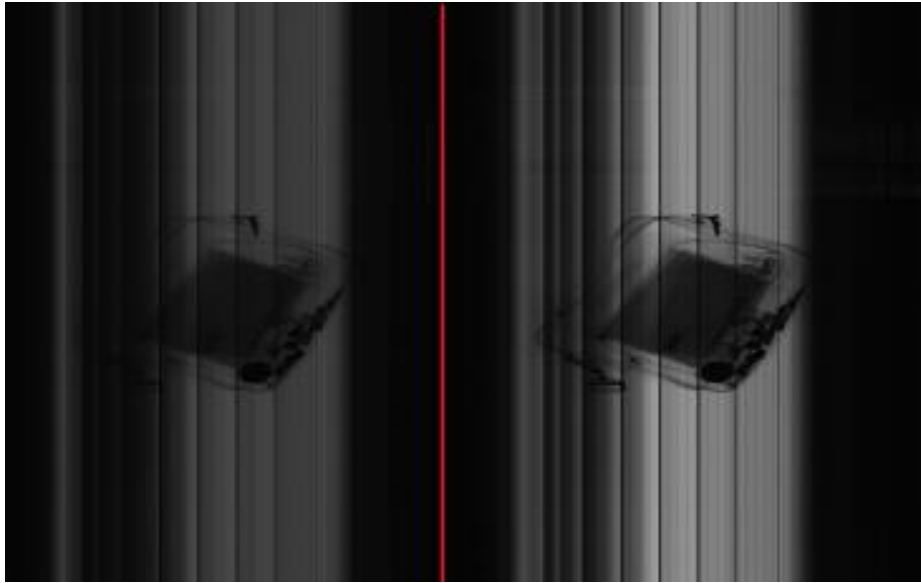
Şekil 6-1 Gerçekleşmiş X-ışını cihazı

Sadece bir X-ışını sensöründen elde edilen ilk görüntüler Şekil 6-2'deki gibidir. Söz konusu görüntüler her bir pikseli 1 byte büyüklüğünde olan, 0(Siyah)-255(Beyaz) arası değer alabilen, yüksekliği ekran boyu, genişliği sensör sayısı olan veriyapılarıdır. Burada her biri (64 düşük, 64 yüksek enerjili olmak üzere) 128 adet pikseli olan 13 tane sensörün görüntüsü verilmiştir. Düşük ve yüksek enerjili piksellerden gelen veriler yan yana yerleştirilerek Şekil 6-2'deki resim oluşturulur.



Şekil 6-2 Tek X-ışını sensöründen elde edilen ham veri

Önceki aşamada elde edilen veri parçalanarak düşük ve yüksek enerjili görüntüler çıkartılır (Şekil 6-3).



Şekil 6-3 Düşük(sol) ve yüksek(sağ) ham verinin ayrılması

Çıkartılan düşük ve yüksek enerjili görüntülerde herhangi bir bilgi taşımayan bölgeler vardır. Bu bölgelerin filtrelenmesi için herhangi bir sütun boyunca yeterli varyansa sahip olmayan sütunlar her iki görüntüden de çıkarılır (Tablo 6-1) ve sonuç olarak Şekil 6-4'deki görüntüler elde edilir.

Tablo 6-1 Bilgi taşımayan sütunları filtreleme algoritması

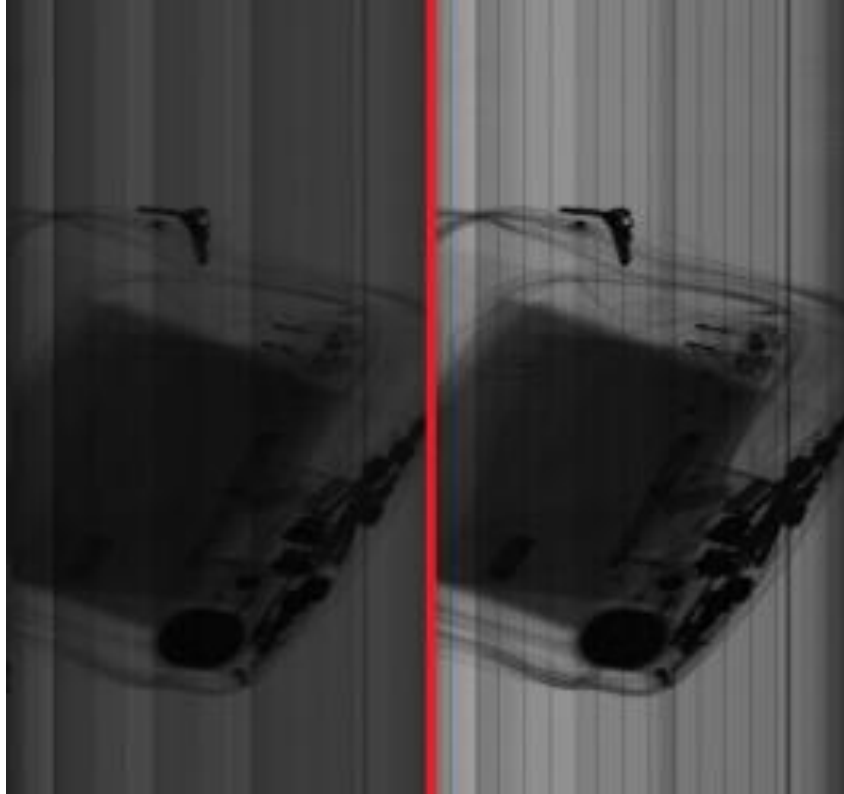
X-ışını görüntüsünün her bir sütunu için

Sütun içerisindeki bütün pikselleri kontrol et

En düşük ve en yüksek değerli pikselleri bul

Bu iki piksel arasında farkın mutlak değeri belirli bir sabitten düşük ise sözkonusu sütunu ele

Elenmemiş sütunları birleştirerek filtrelenmiş çıktı görüntüsünü oluştur



Şekil 6-4 Filtrelenmiş görüntü

Arkaplan farklarını gidermek için her bir sütun kendi içerisinde normalize edilir

(Şekil 6-6).

Tablo 6-2 Normalizasyon algoritması

Kalibrasyon aşaması:

Yürüyen bant genişliğindeki bir kurşun plakanın '*g*'
X-ışını görüntüsünü girdi olarak al

g'nin her bir '*sü*' sütunu için

sü'nün bütün piksellerini kontrol et

En düşük '*ed*' ve en yüksek '*ey*' değerli
pikselleri bul

Başlangıç noktası (*ed*, 0) ve bitiş noktası (*ey*,
255) olan bir '*y_i*' doğrusu hesapla

y_i doğrusunu '*f*' dosyasına kayıt et

Normalizasyon aşaması:

Kalibrasyon safhasında hesaplanan *y* doğrular
dizisini *f* dosyasından yükle

X-ışını sensörlerinden alınan her '*sa*' satırı için

sa'nın her bir '*sü_i*' sütunu için

sü_i pikselinin '*d*' değerini $y_i = mx + b$
doğrusundaki *x* yerine koyup *y_i* değerini
hesapla

y_i değerini, $s_{ü_i}$ pikselinin normalize edilmiş hali olarak sakla

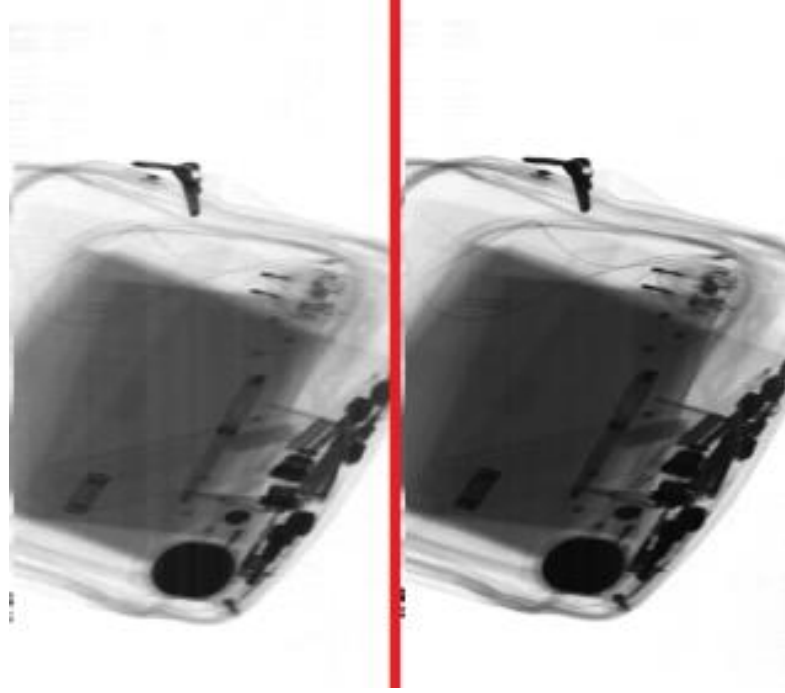
Normalize edilen pikselleri birleştirip çıktı görüntüsünü oluştur

Yukarıdaki algoritmada kullanılan *2B doğru* metodunu daha iyi açıklamak için şöyle bir örnek verilebilir. Kalibrasyon aşamasında X-ışını cihazından elde edilen görüntüdeki bir sütunda en düşük ed piksel değeri 50, en yüksek ey piksel değeri 100 olsun. Toplamda kullanılacak değer aralığı 255(1 byte) olmasına rağmen buradaki aralık 50 ile sınırlandırılmıştır. Dolayısıyla 50 - 100 aralığını 0 - 255 aralığına eşleyerek bütün aralığın kullanılmasını sağlayan bir yöntem ihtiyacı duyulmuştur (Şekil 6-5). Söz konusu probleme çözüm getiren metod bütün ayrıntılarıyla anlatılmıştır (Tablo 6-2).



Şekil 6-5 Piksel normalizasyonu için hesaplanan y_i doğrusu

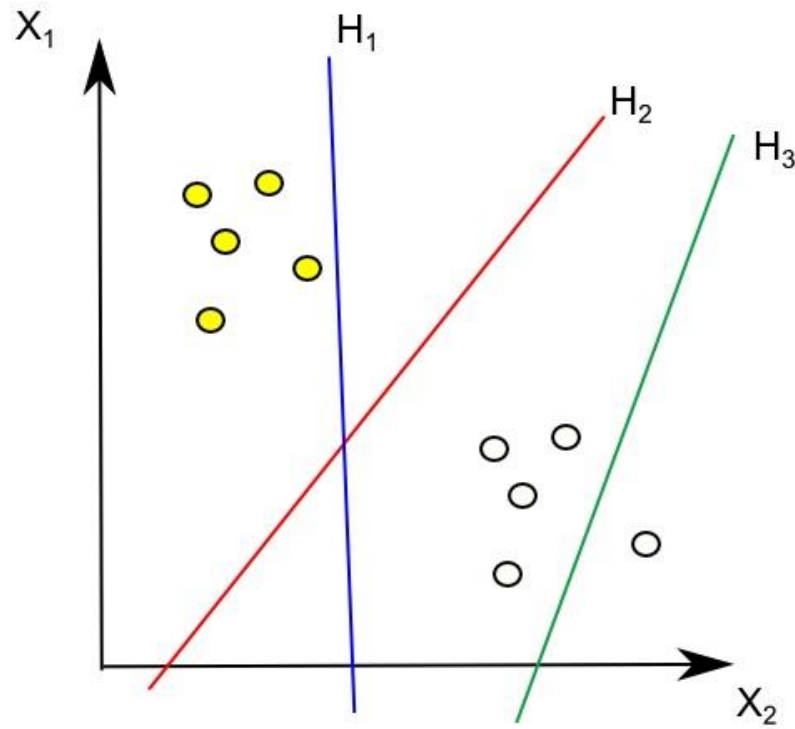
Normalize edilen görüntüler malzemelerin sınıflandırılmasında kullanılmaktadır.



Şekil 6-6 Normalize edilmiş görüntü

7. MALZEME SINIFLANDIRMASI

SVM (Destek Vektör Makinesi) veri analizi ve şablon tanıma algoritmalarıyla gerçekleştirilen, sınıflandırma ve regresyon analizi için kullanılan bir denetimli öğrenme modelidir. Temel olarak SVM, iki sınıftan oluşan girdi verisi alıp eğitilir ve test verisinin sınıflarını tahmin eder. Esasen iki sınıftan hangisine ait olduğu etiketlenmiş eğitim kümesi verilip SVM eğitim algoritmalarıyla test verilerini iki sınıftan biriyle etiketleyen bir model oluşturulur. SVM modeli eğitim verilerinin uzayda noktalar olarak temsilidir. Model bahsedilen noktalardan farklı kategoriye ait olanlarını aralarındaki mesafe mümkün olduğunca fazla olacak şekilde (optimum hiperdüzlem) doğrusal olarak ayırmayı amaçlamaktadır (Şekil 7-1). Doğrusal sınıflandırmaya ek olarak, SVM çekirdek(kernel) değişiklikleriyle etkili bir şekilde doğrusal olmayan sınıflandırma da yapabilmektedir.



Şekil 7-1 H₂ nokta uzayını en iyi şekilde ayıran doğrudur

Doğrusal olarak ayrılabilen bir veri setine ait n adet eğitim örneği $\{x_i, y_i\}$, $i = 1, \dots, n$ için veriyi en iyi şekilde ayıran hiperdüzlem aşağıdaki formüllerle ifade edilir,

$$w \cdot x_i + b \geq +1 \quad \forall x_i \in \text{Sınıf 1} \quad (7.1)$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1 \quad \forall x_i \in \text{Sınıf 2} \quad (7.2)$$

(7.1) ve (7.2)'de $y \in \{-1, +1\}$ sınıf etiketlerini, x N -boyutlu bir uzayda öznitelikler vektörünü, w ağırlık vektörünü (hiperdüzlemin normali) ve b eğim değerini göstermektedir. Eğitim verisini en iyi şekilde ayıran hiperdüzlemin hesaplanabilmesi için hiperdüzleme paralel olan ve eğitim kümesindeki iki sınıfa sınır olan iki hiperdüzlem hesaplanmalıdır (Şekil 7-2). Bu iki hiperdüzlemin sınır olduğu bu noktalar destek vektörleri olarak adlandırılır (Şekil 7-2'deki kalın sınırlı noktalar). Bu hiperdüzlemler $w \cdot x_i + b = \pm 1$ şeklinde formülize edilirler.

Optimum hiperdüzlemin sınırının maksimuma çıkarılması için $\|w\|$ ifadesinin minimum hale getirilmesi gerekmektedir. Eğitim verisini en iyi şekilde ayıran hiperdüzlemin bulunması için (7.3)'deki optimizasyon problemi (7.4)'e bağlı olarak çözümlenmelidir.

$$\min \left[\frac{1}{2} \|w\|^2 \right] \quad (7.3)$$

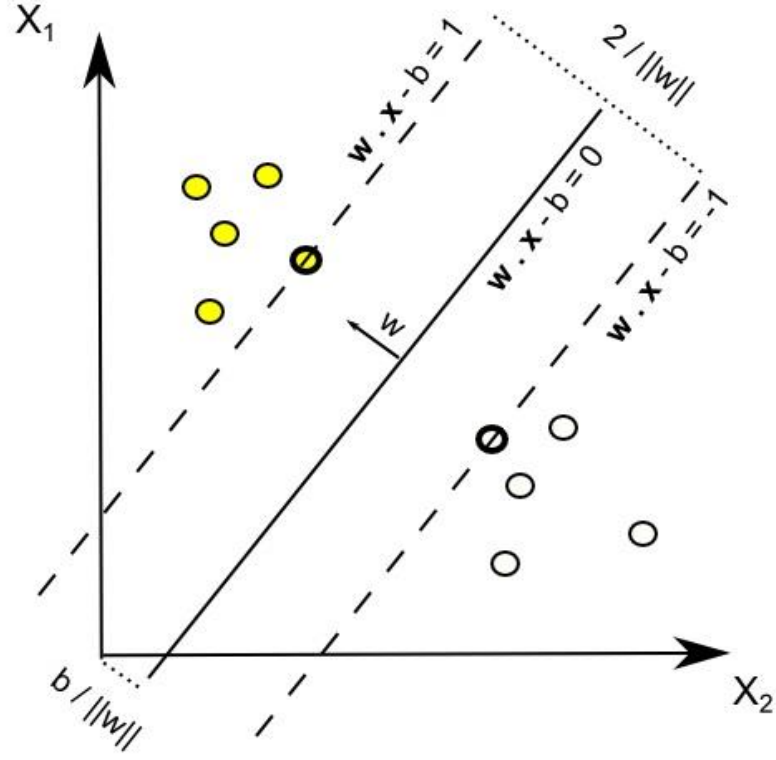
$$y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 \quad (7.4)$$

Bu optimizasyon problemi Lagrange denklemleri kullanılarak çözülebilmektedir. Ardından;

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i(w \cdot x_i + b) + \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (7.5)$$

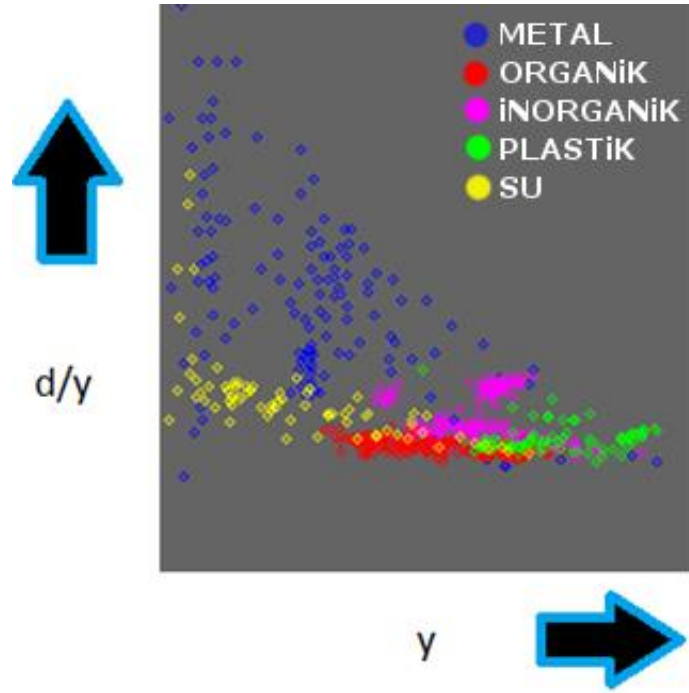
Lagrange formu kurulur. Nihayet, eğitim veri kümesi doğrusal olarak ayrılabilen iki sınıflı bir problem için karar fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazılabilir [63].

$$f(x) = \text{sign}(\sum_{i=1}^n \lambda_i y_i (x \cdot x_i) + b) \quad (7.6)$$



Şekil 7-2 Doğrusal ayrılabilen bir problem için optimum hiperdüzlem

X-ışını görüntülerinde sınıflandırma yapılırken çoğunlukla SVM kullanılmıştır [60, 61, 62]. SVM ile görüntü sınıflandırma yöntemi kusurlu kaynak tespitinde [60], mamografi görüntüleri üzerinden göğüs kanseri teşhisinde [61] ve genel tıbbi görüntü analizinde [62] oldukça başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu çalışmada da normalize edilen görüntülerin her bir pikselinin organik, inorganik ve metal sınıflarına atanması için SVM kullanılmıştır. Bunun için öncelikle elimizdeki görüntülerden eğitim verisi çıkartılıp SVM'in eğitilmesi gerekmiştir. Şekil 7-3'deki grafikte iki özneliğe göre verilerin sınıfları görünmektedir.



d: Düşük enerji
y: Yüksek enerji

Şekil 7-3 Özniteliklerin dağılımı

Normalize edilmiş görüntülerin her bir pikseli, t , için iki elemanlı (düşük ve yüksek enerji) bir öznitelik vektörü, x^t , mevcuttur.

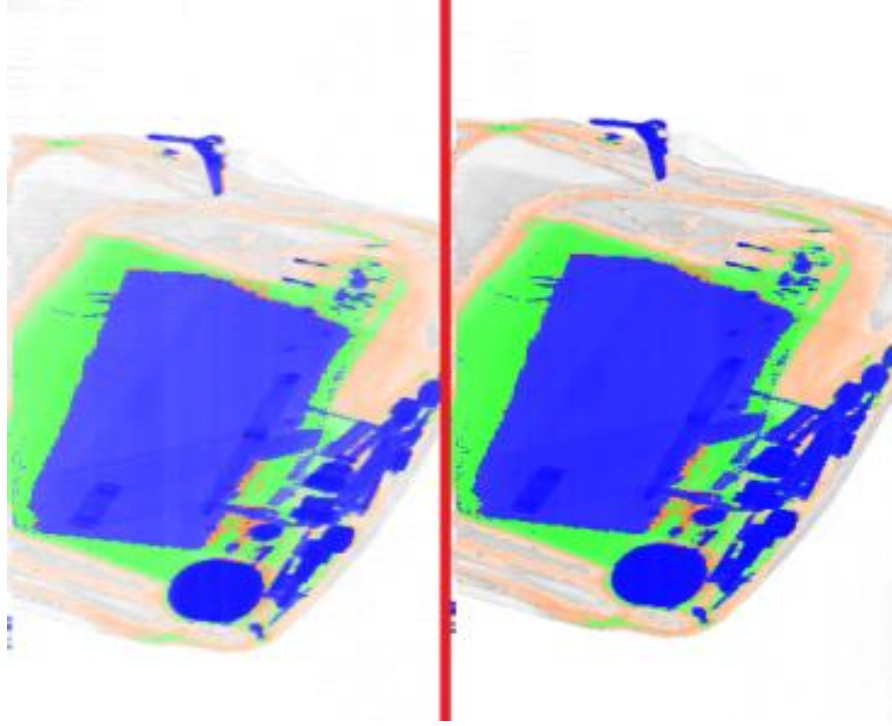
$$X = \{x^t, r^t\}_r \quad (1)$$

Öyle ki;

$$r^t = \begin{cases} 1, & \text{eğer } x^t \in \text{Metal} \\ 2, & \text{eğer } x^t \in \text{Organik} \\ 3, & \text{eğer } x^t \in \text{İnorganik} \end{cases} \quad (2)$$

X $k \times 2$ boyutlarında öznitelikler matrisi, k eğitim örneği sayısıdır. Her bir özneliğin etiketi r^t ile ifade edilir. Her öznitelik etiketi hangi sınıfa ait ise o sınıfın numarasını alır.

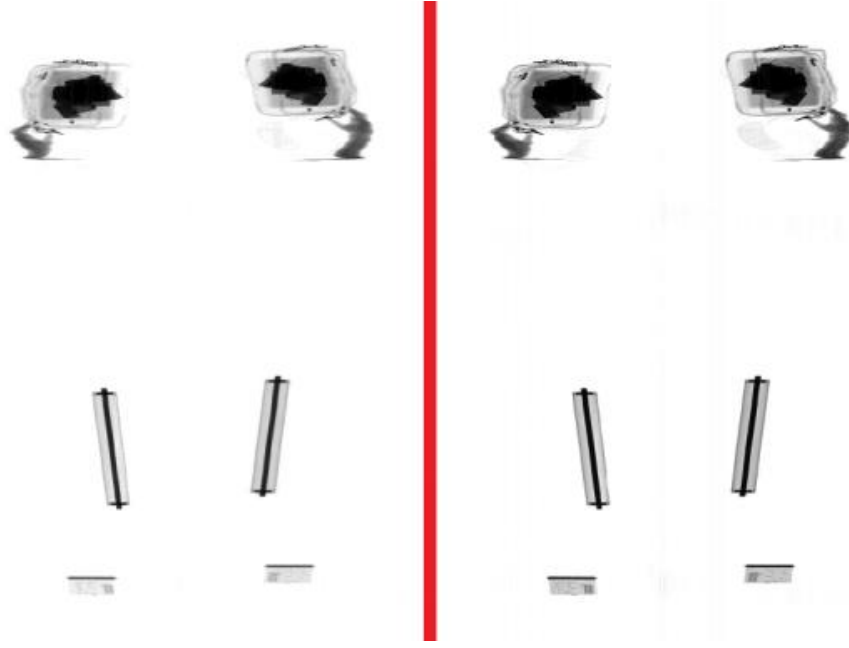
Eğitilen SVM kullanılarak normalize edilmiş X-ışını görüntüsü sınıflandırıldığında ise Şekil 7-4'deki görüntü elde edilmiştir. Görüntü incelendiğinde anahtar gibi metal cisimlerin mavi, deri çanta gibi organik cisimlerin turuncu, batarya gibi inorganik cisimlerinde yeşil ton ile renklendirildiği görülmektedir.



Şekil 7-4 Organik-Turuncu, İnorganik-Yeşil, Metal-Mavi

7.1 ÇİFT X-IŞINI SENSÖRÜ KULLANARAK MALZEME SINIFLANDIRMA

Yukarıda anlatılan süreç tek sensör dizisinden görüntü elde etmek içindir. Laboratuvarımızda geliştirdiğimiz stereo X-ışını sistemin sınıflandırma yöntemi ise yukarıdaki yöntemle oldukça benzerdir [26] (Şekil 7-5). Stereo sensörde x^t öznelik vektörü 2 yerine 4 elemana sahiptir. Oluşturulan yeni X öznelikler matrisi benzer şekilde SVM eğitimden geçirilerek yeni bir sınıflandırıcı elde edilir.



Şekil 7-5 İki sensörden elde edilen görüntüler




Eğitilen SVM, X-ışını cihaz tarafından çekilen görüntüleri sınıflandırmak için kullanılmaktadır. Çekilen görüntülerin her bir pikseli malzeme sınıfı tahmin edilmek üzere SVM'e girdi olarak verilmektedir. Sonrasında ilgili piksel SVM'in tahmin ettiği sınıf etiketine göre organik ise turuncu, metal ise mavi tonlarına boyanır.

Sistemi eğitmek için gereken veri kümesi daha önce elde edilen X-ışını görüntülerinden manüel olarak oluşturulmuştur. Test veri kümesi için yapılarında organik ve metal özellikli malzemeleri bir arada bulunduran ahşap veya plastik saplı çekiç ve dış yapısı plastik olup içerisinde simit şeklinde kıvrılmış metal bulunan metre gibi nesnelere seçilmiştir.

Ortaya konulan sınıflandırma sistemini test etmek için hem görsel hem de rakamsal

sonuçlar içeren deneyler yapılmıştır. Tablo 7.1 'de gösterilen görsel sonuçlarda iki X-ışını sensörü kullanarak yapılan sınıflandırmanın daha doğru sonuçlar verdiği, üstteki nesnenin simit şeklinde olan metal bölgesi incelendiğinde daha iyi görülebilir.

Tablo 7-1 Tek ve çift sensör kullanarak yapılan sınıflandırma sonuçları.

		
Taranan nesnelere	Tek sensörlü sınıflandırma	Çift sensörlü sınıflandırma

Geliştirilen sistemi sayısal olarak doğrulamak amacıyla 115 adet örneğin bulunduğu eğitim kümesine dahil olmayan 182 adet test örneğinin sınıflandırması yapılarak, manüel sınıflandırma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda çift sensör kullanılarak yapılan sınıflandırmanın, tek sensör kullanılarak yapılan sınıflandırmada ulaşılan hata oranını %14'den %7'ye kadar azalttığı görülmüştür. (Tablo 7.2)

Tablo 7-2 Tek ve çift sensör kullanan yöntemlerin test verisi üzerindeki hata oranları

Yöntem	Hatalı Örnek Sayısı	Test Verisi Hata Oranı
Tek Sensör Sınıflandırması	25	%14
Çift Sensör Sınıflandırması	12	%7

Geliştirilen sistem malzeme sınıflandırmak için gerekli bütün görüntü işleme aşamalarını gerçek zamanlı yapabilmektedir.

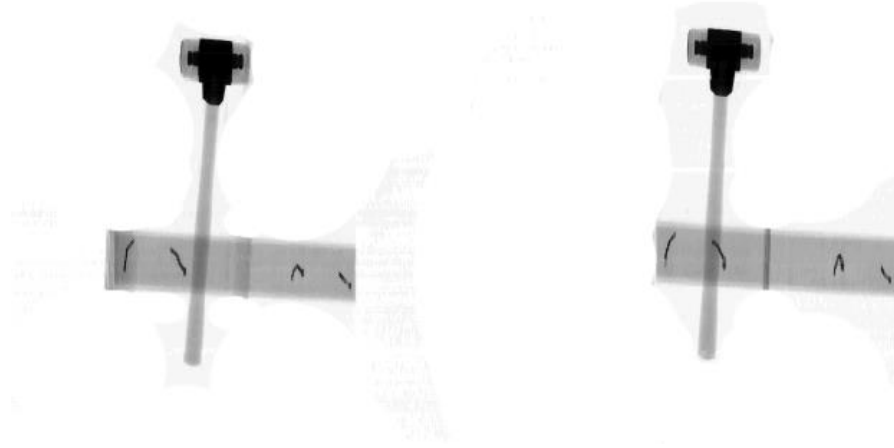
8. STEREO GÖRÜNTÜ ANALİZİ MODÜLÜ

İki veya daha fazla farklı açıdan görüntüsü alınmış bir sahnenin 3B şeklini tahmin etmek, voksel doldurma, üzerinde çalışılan bir problemdir [17, 18, 28, 29, 30]. Voksel doldurmada amaç, verilen görüntülerle uyumlu olacak şekilde vokselleri dolu veya boş olarak etiketlemektir. Bu probleme kısmen de olsa çözüm getirmek adına RGB kameralar üzerinde çeşitli yöntemler sunulmuştur. Bu çözümler genellikle veri ve düzgünlük terimlerini içeren bir enerji fonksiyonunun çizge kesme algoritmasıyla minimizasyonunu baz alır. Şekil 8-1'de bahsedilen çözümlerin sonuçları görünmektedir.



Şekil 8-1 Voksel doldurma algoritmalarının RGB görüntüler üzerinde uygulaması

Gerçeklenen X-ışınlı paket denetleme sistemin ile aralarında yaklaşık 7 derece açı olan iki farklı sensör dizisi kullanılarak gerçek dünyada farklı derinlikteki cisimlerin stereo X-ışını görüntüleri elde edilir. Bu görüntüler stereo görüntü analizi için hazır hale getirilip stereo görüntü analizi modülüne girdi olarak verilir.



Şekil 8-2 Sol ve sağ sensörlerden elde edilmiş ham görüntüler

Bu modül sağ ve sol olarak verilen iki görüntüyü kullanarak (Şekil 8-2) X-ışını ile görüntüsü çekilmiş sahne hakkında mümkün olduğunca fazla 3B bilgi elde etmeyi amaçlamaktadır. Aşağıda anlatılan 3B voksel doldurma algoritmasıyla izdüşümü alındığında verilen referans görüntüleri verecek olan bir voksel konfigürasyonu elde etmeyi hedeflemektedir. Bu voksel konfigürasyonu hem referans görüntülerle uyumlu olması hemde X-ışını görüntüsü çekilen sahneyi mümkün olduğunca iyi temsil etmelidir. Bu kısıtlar 3 terimli bir enerji fonksiyonu ile temsil edilmiştir.

8.1 3B VOKSEL DOLDURMA

3B vksel doldurma algoritması Tablo 8-1'de anlatılmıştır.

Tablo 8-1 3B vksel doldurma algoritması

```
3B uzayın voksellerini rastgele doldur

iterasyon_sayısı'nı kullanıcıdan al

i = 0 dan iterasyon_sayısı'na kadar

    Enerji fonksiyonu ile uzayın şu anki konfigürasyonun
    e1 hatasını hesapla

    Uzaydaki her bir v vokseli için:
        v vokseli dolu ise boşalt, boş ise doldur
        Enerji fonksiyonu ile yeni vksel
        konfigürasyonunun e2 hatasını hesapla
        Eğer e2 > e1 ise
            Değişiklikleri geri al

Uzay konfigürasyonunun hatasını hesapla, izdüşüm
görüntülerini üret, vksel konfigürasyonu ile beraber
çıktı olarak kaydet
```

8.2 ENERJİ FONKSİYONU

Yukarıdaki algoritmada kullanılan enerji fonksiyonunun 3 terimi vardır;

$$E(f_x, f_s, v) = E_{veri}(f_x, f_s) + E_{düzgünlük}(v) + E_{katman}(v)$$

Burada f_x X-ışını görüntüsünü, f_s voksel uzayının izdüşüm görüntüsünü, v ise voksel uzayındaki vokselleri temsil etmektedir.

8.2.1 VERİ TERİMİ

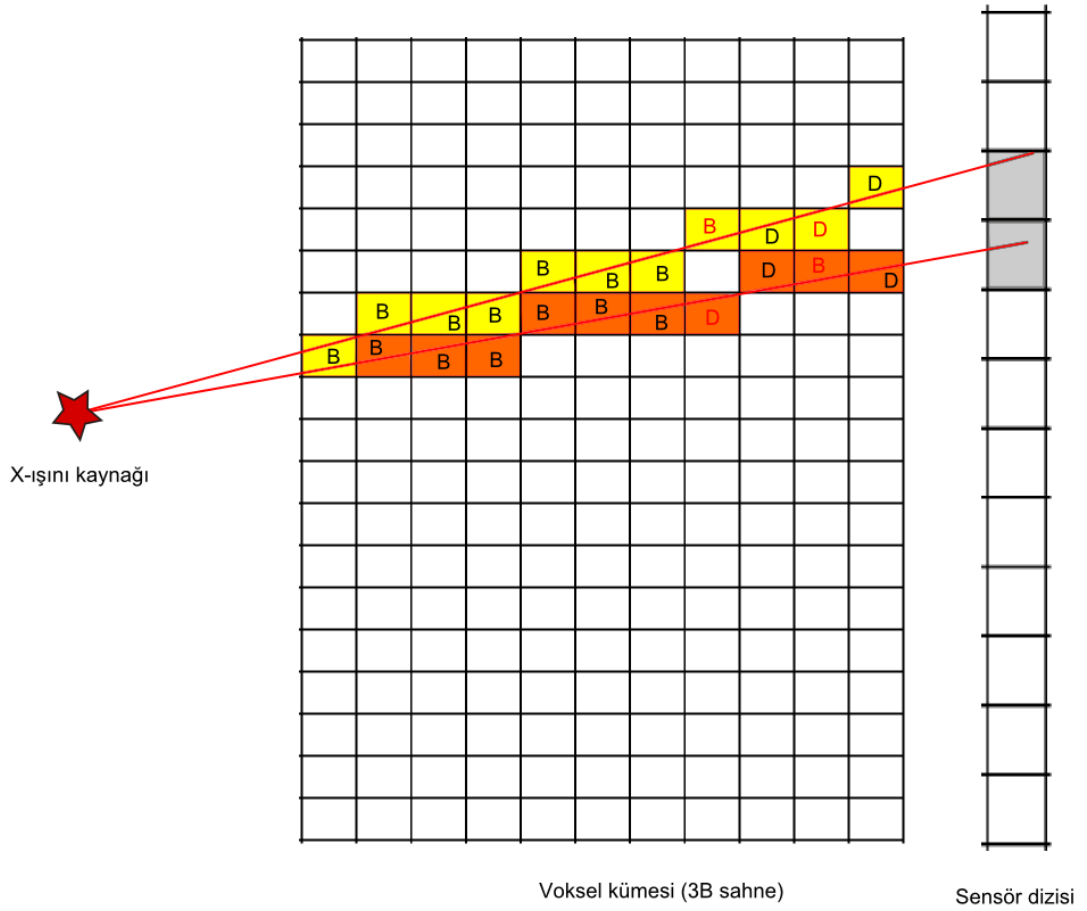
Bu terim referans görüntülerle, uzay konfigürasyonunun sentetik izdüşümü görüntüleri arasındaki piksel tabanlı benzerlik oranıdır. İki görüntü arasındaki fark bu görüntülerdeki eş piksellerin belirli bir pencere içerisindeki yoğunluk tabanlı benzerliğiyle hesaplanır.

$$E_{veri}(f_x, f_s) = \sum_0^h \sum_0^w \left(\sum_0^i \sum_0^j |f_x[h+i, w+j] - f_s[h+i, w+j]| \right)$$

Burada f_x X-ışını görüntüsünü, f_s voksel uzayının izdüşüm görüntüsünü, h ile w bu görüntülerin boy ve en büyüklüklerini, i ile j ise karşılaştırma penceresinin boy ve en büyüklüğünü belirtmektedir

8.2.2 DÜZGÜNLÜK TERİMİ

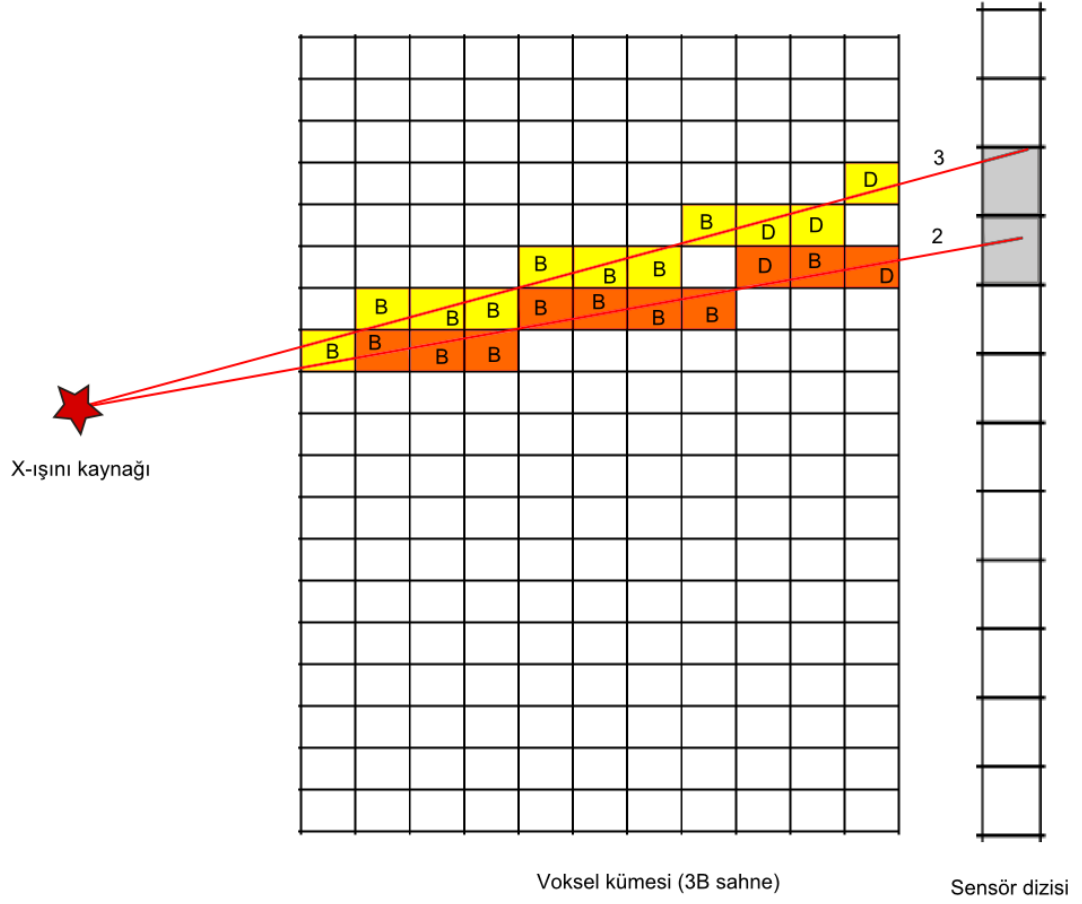
3B uzayı oluşturan voksellerin mümkün olduğunca doluluk boşluk olarak komşularıyla benzer olması düzgünlük terimi olarak adlandırılır. Gerçeklenen sistemde düzgünlük terimi, komşu piksellere izdüşen voksellerin 3B'de doluluk cinsinden benzer olmasıdır. Bunun için çıkış noktası üretilen görüntü üzerindeki piksel olan ve kendi üzerine izdüşen vokselleri kesecek şekilde 3B uzaydan geçen ışınlar oluşturulur. Bu ışınlar göre komşu olan voksellerin düzgünlük hataları hesaplanıp toplam enerjiye eklenir (Şekil 8-3).



Şekil 8-3 Düzgünlük terimi, B boş, D doluyu temsil etmektedir. Kırmızı ile gösterilmiş vokseller düzgünlük terimi tarafından cezalandırılmışlardır.

8.2.3 KATMAN SAYISI TERİMİ

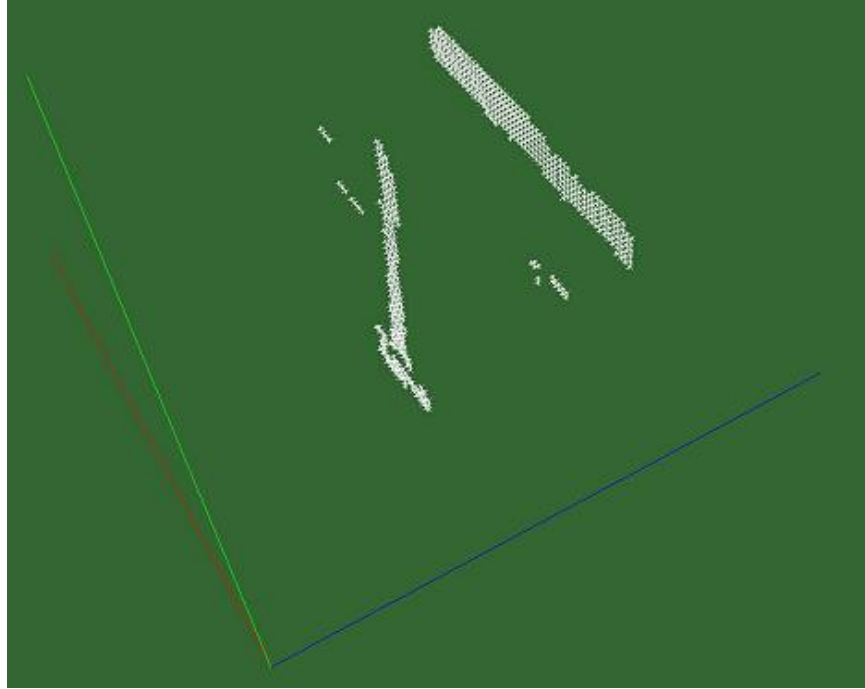
3B uzayın Z eksenini boyunca belirlenen sayıda katman içermeye zorlanması katman sayısı terimi olarak adlandırılır. Düzgünlük terimi için üretilen ışınlar katman sayısı teriminde de kullanılır. Bu ışınlar boyunca dolu olan piksel sayısı arzu edilen katman sayısını aştığında, bu aşma oranı kadar ceza enerji terimine eklenir (Şekil 8-4).



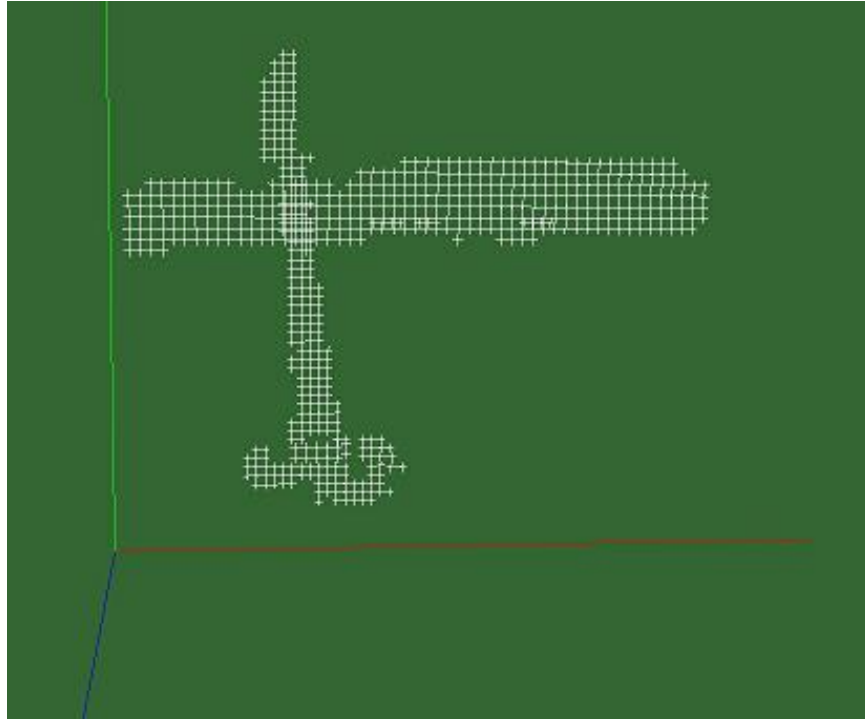
Şekil 8-4 Katman sayısı terimi, B boş, D doluyu temsil etmektedir. Katman sayısı teriminden üstteki ışın 3, alttaki ışın 2 ceza almıştır.

8.3 3B VOKSEL DOLDURMA DEĞİŞKEN KOMŞULUK ARAMA (VARIABLE NEIGHBORHOOD SEARCH) MODİFİKASYONU

Sadece yukarıdaki enerji fonksiyonu ile yapılan optimizasyonun sahnenin 3B yapısını açıklamada yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu soruna çözüm getirmek için bir önceki bölümde verilen algoritmaya yerel minimuma karşı dirençli olan VNS modifikasyonu yapılmıştır [64]. Bu modifikasyon ile her iterasyonda voksel konfigürasyonun %10'luk kısmını rastgele değiştirerek yerel minimum problemini aşmak hedeflenmiştir. Yapılan deneylerde yerel minimum probleminin büyük ölçüde aşıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 8-5, Şekil 8-6).



Şekil 8-5 VNS kullanılarak elde edilen 3B voksel konfigürasyonu



Şekil 8-6 VNS kullanılarak elde edilen 3B voksel konfigürasyonu

9. SONUÇ

Bu çalışmada iki ana hedef gerçekleştirilmiştir. İlk hedef kapsamında ülkemizin ilk milli, çift enerjili, otomatik patlayıcı, silah, tehlikeli madde tespiti yapabilen X-ışınli paket denetleme sistemi geliştirilmiştir ve başarıyla test edilmiştir. SANTEZ proje ortağı firma sözkonusu sistemi yurt içi ve yurt dışı piyasalara pazarlamak amacıyla ciddi bir çalışma içerisine girmiştir. Bu çalışmalar sonucunda ülkemiz ekonomisine katma değer sağlamak suretiyle proje teklifinde öngörülen milli hedefler gerçekleştirilmiş olacaktır.

Geliştirilen X-ışınli paket denetleme sisteminin X-ışını jeneratörü, X-ışını sensörleri ve diğer elektronik aksam yurtdışından ithal edilip kullanılmıştır. Gelecekteki planlar arasında yurtdışından ithal edilen bu cihazların üretici firma bünyesinde tamamen yerli sermaye ve işgücüyle üretimi de bulunmaktadır. Bunun için gerekli maddi kaynağı, sözkonusu X-ışınli paket denetleme sisteminin ticari başarısının sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen X-ışınli paket denetleme sistemi öncelikle havaalanı, alışveriş merkezi gibi yerlerin güvenliğine katkı sağlaması amacıyla motive edilse de, proje süresince birçok yan kullanım alanları görülmüştür. Bahsedilen sistemin uygulanabilir olduğu diğer alanların başında tarım sektörü gelmektedir. Dünya genelinde X-ışınli denetleme sistemlerinin bir çok tarım ürünün otomatik kalite tespitinde başarıyla uygulanabilir olduğu görülmüştür. Örneğin geliştirilen X-ışınli paket denetleme sistemi fındık, ceviz, fıstık gibi hali hazırda fabrikasyon süreçlerinden geçen kabuklu yemişlerin sınıflandırılmasında hem kurulumu kolay ve maliyeti düşük olacağından hem de ürüne zarar vermeden işlem yapıp kesin bir kalite tespiti yapacağından, oldukça yaygın bir şekilde kullanılacağı düşünülmüştür. Ülkemizin bir tarım ülkesi olduğu gerçeği ve tarım sektörünü Türkiye için stratejik önemi düşünüldüğünde geliştirilen sistemin ülkemizin kalkınma hedefleri kapsamında büyük bir potansiyel içerdiği görülmüştür.

Geliştirilen sistemin, son yıllarda ülke çapındaki adli soruşturmalar kapsamında toprak altında bulunan, hangi türe ait olduğu belirsiz kemik kalıntılarının insana mı

yoksa hayvana mı ait olduğunun tespit edilmesi alanında da kullanılabilceği belirlenmiştir.

Akademi odaklı ikinci hedef kapsamında ise literatürde az çalışılan bir konu olan stereo X-ışını ile 3B görüntüleme oldukça umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Stereo X-ışını ile 3B görüntü elde etmek için, stereoskopik kaynaklardan elde edilen görüntülere, bilgisayarla görme alanında son zamanlarda geliştirilen yeni teknikler uygulanmıştır. Bunun sonucu olarak, BT sistemleri kadar başarılı olmasa da belli ölçülerde 3B bilginin çıkarılması ve taranan paketlerin 3B içeriği hakkında bilgi üretilmesi mümkün olmuştur.

Son olarak malzeme sınıflandırma problemi için farklı sayıda sensörler kullanılarak geliştirilen çözümler deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Bunun için tek X-ışını sensörü ile stereo X-ışını sensöründen elde edilen verilerle yapılan malzeme sınıflandırma sonuçları karşılaştırılmış ve stereo X-ışını sensörü kullanılarak yapılan sınıflandırmanın daha üstün olduğu gözlemlenmiştir.

Bu tez sonucuna ülkemizin ihtiyaçlarına paralel olarak çift enerjili X-ışını sensörleri ile malzeme sınıflandırması yapabilen, denetlediği paketlerin 3B yapısı hakkında bilgi verebilen bir X-ışını paket denetleme sistemi geliştirilmiştir. İlişkili Santez projesi ise bitme aşamasına getirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Zhengrong Ying, Ram Naidu and Carl R. Crawford, *Dual energy computed tomography for explosive detection*, Journal of X-Ray Science and Technology 14 (2006) 235–256
- [2] K. R. Peschmann and J. Harmann, *Automatic Concealed Object Detection System Having a Pre-Scan Stage*, US Patent 5, 182, 764, January 26, 1993.
- [3] K. D. Krug, J. A. Stein and L. A. Taylor, *Device and method for inspection of baggage and other objects*, US Patent 5, 319, 547, June 7, 1994.
- [4] K. D. Krug, W. F. Aitkenhead, R. F. Eilbert, J. H. Stillson and J. A. Stein, *Identifying explosives or other contraband by employing transmitted or scattered x-rays*, US Patent 5, 974, 111, October 26, 1999.
- [5] C. R. Crawford and C. Ruth, *Computed tomography scanning target detection using target surface normals*, US Patent 5, 901, 198, May 4, 1999.
- [6] S. Singh and M. Singh, *Explosives detection systems (EDS) for aviation security*, Signal Processing 83 (2003), 31–55.
- [7] R. R. Eilbert and K. D. Krug, *Aspects of image reconstruction in Vivid Technology's dual-energy x-ray system for explosives detection*, in Proceedings of SPIE 1824 (1992), 127–143.
- [8] X. Shi, *Improving object classification in x-ray luggage inspection*, Ph. D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, February 2000.
- [9] P. Evans, M. Robinson, H. W. Hon, *Multiple view dual-energy X-ray imaging*, 35th International Carnahan Conference on Security Technology, 16- 19 Oct. , pp. 103–107, 2001.
- [10] T. W. Wang, J. P . O. Evans, *Stereoscopic dual energy X-ray imaging for target materials identification*, IEEE Proceedings of Vision, Image and Signal Processing, Vol. 150, pp. 122 –130, 2003.
- [11] S. Singh and M. Singh, Review: *Explosives detection systems (EDS) for aviation security*, Signal Processing, Elsevier, Vol. 83, 2003.

- [12] I. D. Jupp, et al. , *The non-invasive inspection of baggage using coherent X-ray scattering*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 47, pp. 1987–1994, 2000.
- [13] J. P. O. Evans, M. Robinson, S. X. Godber, *Pseudotomographic X-ray imaging for use in aviation security*, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 13, pp. 25–30, 1998.
- [14] H. A. Kramers, *On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum*, Philos. Mag. 46 (1923)836–871.
- [15] Europ Scan Inc. , *Xcalibur, an innovative multi-energy X-ray explosive device detection systems*, Proceeding of the Second Explosives Detection Symposium and Aviation Security Conference, 1996, pp. 230–235.
- [16] A. G. Michette, C. J. Buckley, *X-ray Science and Technology*, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1993, pp. 1–44.
- [17] Vladimir Kolmogorov and Ramin Zabih , *Multi-camera Scene Reconstruction via Graph Cuts*. May 2002
- [18] Dan Snow. Paul Viola. Ramin Zabih, *Exact Voxel Occupancy with Graph Cuts*.
- [19] Unay, D., Soldea, O., Ekin, A., Cetin, M., Ercil, A., “*Automatic Annotation of X-ray Images: A Study on Attribute Selection*”, Proc. of Medical Content-based Retrieval for Clinical Decision Support (MCBR-CDS) Workshop in conjunction with MICCAI’09, London – UK, 2009
- [20] H. Strecker, *Automatic detection of explosives in airline baggage using elastic X-ray scatter*, Medicamundi 42 (2)(1998) 30–33.
- [21] Ghylin, K. M. , Schwaninger, A. , Drury, C. G. , Redford, J. , Lin, L. & Batta, R. , *Screening Enhancements: Why don't they enhance performance*, PROCEEDINGS of the HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY 52nd ANNUAL MEETING—2008
- [22] Kase, K, *Effective Use of Color in X-ray Image Enhancement for Luggage Inspection*, Masters Degree Thesis, The University of Tennessee, Knoxville, 2002
- [23] Klock, B. A.). *Test and evaluation report for X-ray detection of threats using different X-ray functions*. IEEE ICCST Proceedings, 182-184. (2005)

- [24] Schwaninger, A. . *Computer based training: A powerful tool to the enhancement of human factors*. Aviation Security International, Feb/2004, 31-36.
- [25] C. G. Drurya; Y. L. Hsiaoa; C. Josepha; S. Joshia; J. Lappa; P. R. Pennathura, *Posture and performance: sitting vs. standing for security screening*, Ergonomics, Vol. 51, No. 3, March 2008, 290–307
- [26] Abdullah Akay, Umut Öndin ve Yusuf Sinan Akgul, "*İki X-Işını Sensörü İle Malzeme Sınıflandırması*", 5. Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu (ASYU), Trabzon, Temmuz 2012
- [27] Ulas Vural, Abdullah Akay ve Yusuf Sinan Akgul, "*Stereo İçin Güvenilirlik Tabanlı Çizge-Kesme Algoritması*", IEEE 20. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, Muğla, Nisan 2012
- [28] Marcel Alcoverro and Montse Pard, "*Voxel Occupancy With Viewing Line Inconsistency analyis And Spatial Regularization*", VISAPP 2009
- [29] Franco, J., Monthonnot Boyer, E., "*Fusion of multiview silhouette cues using a space occupancy grid*", Computer Vision and Pattern Recognition, 2005.
- [30] Vogiatzis, G., Torr, P.H.S., Cipolla, R., "*Multi-view stereo via volumetric graph-cuts*", Computer Vision and Pattern Recognition, 2005.
- [31] Ravindra K. Ahuja, Thomas L. Magnanti, and James B. Orlin. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, 1993.
- [32] Yuri Boykov, Olga Veksler, and Ramin Zabih. *Markov random fields with efficient approximations*. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 648–655, 1998.
- [33] B. V. Cherkassky and A. V. Goldberg. *On implementing push-relabel method for the maximum flow problem*. In 4th Integer Programming and Combinatorial Optimization Conference, volume 920 of LNCS, pages 157–171, 1995.
- [34] R. Cipolla and A. Blake. *Surface shape from the deformation of apparent contours*. International Journal of Computer Vision, 9(2):83–112, November 1992.
- [35] J. DeBonet and P. Viola. *Roxels: Responsibility weighted 3D volume reconstruction*. In International Conference on Computer Vision, pages 418–

425, 1999.

[36] L. Ford and D. Fulkerson. *Flows in Networks*. Princeton University Press, 1962.

[37] D. Greig, B. Porteous, and A. Seheult. *Exact maximum a posteriori estimation for binary images*. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 51(2):271–279, 1989.

[38] H. Ishikawa and D. Geiger. *Segmentation by grouping junctions*. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 125–131, 1998.

[39] K. Kutulakos and S. Seitz. *A theory of shape by space carving*. In International Conference on Computer Vision, pages 307–314, 1999.

[40] A. Laurentini. *The visual hull concept for silhouette-based image understanding*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16(2):150–162, February 1994.

[41] W.N. Martin and J.K. Aggarwal. *Volumetric descriptions of objects from multiple views*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 5(2):150–158, March 1983.

[42] Tomaso Poggio, Vincent Torre, and Christof Koch.

Computational vision and regularization theory. Nature, 317:314–319, 1985.

[43] Peter Rander, P.J. Narayanan, and Takeo Kanade.

Virtualized reality: Constructing time-varying virtual worlds from real events. In IEEE Visualization '97, volume 552, pages 277–283, October 1997.

[44] S.M. Seitz and C.R. Dyer. *Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring*. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 1067–1073, 1997.

[45] Jean Serra. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, 1982.

[46] S. Sullivan and J. Ponce. *Automatic model construction and pose estimation from photographs using tri-angular splines*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(10):1091–1096, October 1998.

- [47] R. Szeliski. *Rapid octree construction from image sequences*. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 58(1):23–32, July 1993.
- [48] Olga Veksler. *Efficient Graph-based Energy Minimization Methods in Computer Vision*. PhD thesis, Cornell University, July 1999.
- [49] J.Y. Zheng. *Acquiring 3-D models from a sequence of contours*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16(2):163–178, February 1994.
- [50] V. Kolmogorov and R. Zabih, “What Energy Functions Can Be Minimized via Graph Cuts” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 26, no. 2, pp. 147-159, Feb. 2004.
- [51] Harding G., “X-ray scatter tomography for explosives detection” (2004) Radiation Physics and Chemistry, 71 (3-4), pp. 869-881.
- [52] Wells, K., Bradley, D.A., “A review of X-ray explosives detection techniques for checked baggage” Applied Radiation and Isotopes 70 (8), pp. 1729-1746 2012
- [53] Richard Hartley and Andrew Zisserman, “Multiple View Geometry in Computer Vision” Cambridge University Press, June 2000
- [54] LINX sensör bilgileri , <http://www.sens-tech.com/assets/media/files/Data%20Sheets/LINX.pdf>
- [55] LINX sensör yazılımı indirme adresi , <http://download.sens-tech.com/xdas/>
- [56] XDAS-DH2-02 ve XDAS-SP2-02 bilgileri <http://www.sens-tech.com/assets/media/files/Data%20Sheets/XDAS-V2%2016%20dual.pdf>
- [57] EM250 bilgileri <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/EM250.pdf>
- [58] XRB 301 MONO BLOCK bilgileri <http://www.spellmanhv.com/~media/Files/Products/XRB301.ashx>
- [59] Kavzoğlu, T. ve Çölkesen, İ., “Destek vektör makineleri ile uydu görüntülerinin sınıflandırılmasında kernel fonksiyonlarının etkilerinin incelenmesi”, Harita Dergisi, 144(7), 73-82, (2010)

- [60] Xiao-Guang Zhang Inst. of Appl. Phys., Nanjing Univ., China, "*Defects recognition on X-ray images for weld inspection using SVM*", Machine Learning and Cybernetics, 2004. Proceedings of 2004
- [61] J.C. Fua, S.K. Leeb, S.T.C. Wongc, J.Y. Yeha, A.H. Wanga, H.K. Wud, "*Image segmentation feature selection and pattern classification for mammographic microcalcifications*", Machine Learning and Cybernetics, 2004. Proceedings of 2004
- [62] Mueen A, Sapiyan Baba M, Zainuddin R, "*Multilevel feature extraction and X-ray image classification*". J Appl Sci 7(8):1224–1229, 2007
- [63] Osuna, E.E., Freund, R., Girosi, F., 1997, "*Support Vector Machines: Training and Applications*", A.I. Memo No. 1602, C.B.C.L.Paper No. 144, Massachusetts Institute of Technology and Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts
- [64] N. Mladenović, P. Hansen "*Variable neighborhood search*", Computers and Operations Research, 24 (1997), pp. 1097–1100 1997

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Ankara'da doğan Abdullah AKAY ilk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2010 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Ardından GYTE Bilgisayar Mühendisliğinde Yüksek Lisans eğitimine başlayıp aynı bölümde Araştırma Görevlisi oldu. 2012 yılında Yüksek Lisans'tan mezun olup Doktora eğitimine başladı. Halen GYTE'de Araştırma-Geliştirme çalışmalarını sürdürmektedir.