



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KARTEZYEN OTOMASYON ROBOTLARI İÇİN KAYNAK İZİ TAKİP
SENSÖRÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali YILDIZ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2025

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KARTEZYEN OTOMASYON ROBOTLARI İÇİN KAYNAK İZİ TAKİP
SENSÖRÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ali YILDIZ
(22434972010)
ORCID: 0009-0007-2957-7048**

**Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR
ORCID: 0000-0001-6888-5755**

TEMMUZ 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 22434972010 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ali YILDIZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "KARTEZYEN OTOMASYON ROBOTLARI İÇİN KAYNAK İZİ TAKİP SENSÖRÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOCAKULAK**
Bursa Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Turgay Eray
Aydın Adnan Menderes Üniversitesi

Savunma Tarihi : **28 Temmuz 2025**

Teslim Tarihi :



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin aboneliği olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Adı Soyadı: Ali YILDIZ

İmzası:





Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans sürecim boyunca gerek manevi desteğiyle gerekse sabır ve anlayışıyla daima yanımda olan, bana her koşulda güven aşılayan ve motivasyon kaynağım olan aileme en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Akademik bilgi birikimiyle yol gösterici olan, araştırma sürecinde her zaman destek veren ve tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR 'na teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında desteklenmiştir. Sağladıkları burs ve destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Temmuz 2025

Ali YILDIZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
2. KAYNAK İZİ TAKİP SENSÖRLERİ.....	8
2.1 Kaynak İzi Takibinin Kullanım Alanları.....	10
2.2 Endüstride Kullanılan Kaynak İzi Takip Teknolojileri.....	11
2.2.1 Yarı otomatik sistemler	12
2.2.2 Dokunmalı algılama yöntemi.....	13
2.2.3 Ark dikişi takibi	15
2.2.4 İki boyutlu kameralar	16
2.2.5 Kontak problemler	16
2.2.6 Lazer tabanlı kaynak izi takibi	17
3. KAYNAK ORTAMI VE ZORLUKLARI	20
3.1 Kaynak Işığı	20
3.2 Çapak ve Duman Etkileri	20
3.3 Parlak Yüzeylerde Yansıma Sorunları	21
3.4 Materyal Yapısı ve Yüzey Formu	22
3.5 Elektromanyetik Parazit ve Titreşim Etkisi	22
3.6 Sensör Kaynak Noktasından Uzaklığı ve Görüş Açısı.....	23
4. GELİŞTİRİLEN KAYNAK İZİ TAKİP SENSÖRÜ	25
4.1 Mekanik Tasarım.....	25
4.2 Lazer Üçgenleme Yöntemi.....	27
4.2.1 Üçgenleme geometrisi ve matematiksel modelleme.....	28
5. KAYNAK İZİ TAKİP ALGORİTMASI	32
5.1 Konum Kontrolü ve Takip Stratejisi	34
5.2 Gürültü Filtreleme Algoritmaları	36
5.2.1 Hareket filtresi.....	36
5.2.2 Otomatik kodlayıcı filtresi	38
6. GERÇEK ZAMANLI TEST SONUÇLARI.....	43
6.1 Eğimli Yüzeylerde Kaynak İzi Takibi.....	44
6.2 Mat Yüzeyli Parçaların Kaynak Uygulamaları	44
6.3 Parlak Yüzeyli Parçaların Kaynak Uygulamaları	45
7. SONUÇ.....	46

KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ.....	50



KISALTMALAR

AE	: Autoencoder
BCE	: Binary Cross Entropy
CDAE	: Convolutional Denoising Autoencoder
CCD	: Charge Coupled Device
CDNN	: Convolutional Denoising Deep Neural Network
CCOT	: Continuous Convolution Operator Tracker
CNN	: Convolutional Neural Network
DAE	: Denoising Autoencoder
DNA	: Deoksiriboz Nükleik Asit
FIFO	: First In First Out
GMAW	: Gas Metal Arc Welding
KCF	: Kernelized Correlation Filters
MAG	: Metal Active Gas
MIG	: Metal Inert Gas
MSE	: Mean Square Error
NL-Means	: Non-Local Means
PD	: Proportional Derivative
PID	: Proportional Integral Derivative
PSNR	: Peak Signal-to-Noise Ratio
RDP	: Ramer Douglas Peucker
RED30	: Residual Encoder Decoder with 30 layers
ROI	: Region of Interest
SSIM	: Structural Similarity Index Measure
TIG	: Tungsten Inert Gas

SEMBOLLER

L	: Çizgi lazer yansıtma merkezi
C	: Görüntü sensörü merkezi
O	: Ölçüm merkezi
A	: Konumu hesaplanmak istenen nokta
B	: Konumu hesaplanmak istenen noktanın görüntü sensörüne izdüşümü
F	: Lens odak noktası
Ch	: Görüntü sensörü yüksekliği
D	: B noktasının görüntü sensörünün merkezindeki yatay eksene izdüşümü
 LC 	: Çizgi lazer ve görüntü sensörü merkezi arasındaki mesafe
 LO 	: Çizgi lazer ve ölçüm merkezi arasındaki mesafe
β	: Görüntü sensörünün açısı
θ	: Lensin odak noktasının, ölçüm merkezi ve ölçüm noktası arasında dikey ekseninde yaptığı açı
α	: Lensin odak noktasının ölçüm merkezi ve ölçüm noktası arasında yatay ekseninde yaptığı açı
 BC 	: Ölçüm noktasının görüntü sensöründeki izdüşümü ve görüntü sensörü merkezi arasındaki mesafe
 FC 	: Lensin odak noktası ve görüntü sensörü merkezi arasındaki mesafe
 FO 	: Lensin odak noktası ve ölçüm merkezi arasındaki mesafe
 OA 	: Ölçüm merkezi ve ölçüm noktası arasındaki mesafe
 FA 	: Lensin odak noktası ve ölçüm noktası arasındaki mesafe
Fp	: Lensin odak noktasının yatay eksendeki projeksiyonu
 FpD 	: Lensin odak noktasının yatay eksendeki projeksiyonu ve D noktası arasındaki mesafe
 BpD 	: Ölçüm noktasının görüntü sensörü üzerindeki izdüşümü ve D noktası arasındaki mesafe
 FpOp 	: Lensin odak noktasının ve ölçüm merkezinin yatay eksendeki izdüşümleri arasındaki mesafe
 OpAp 	: Ölçüm merkezinin ve ölçüm noktasının yatay eksendeki izdüşümleri arasındaki mesafe

|OpFp| : Ölçüm merkezinin ve lensin odak noktasının yatay eksendeki izdüşümleri arasındaki mesafe



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kaynak kanalı izleme kamerası.....	12
Şekil 2.2 : Kaynak torcunun manuel pozisyon kontrolü.....	13
Şekil 2.3 : Dokunma algılama yöntemi	14
Şekil 2.4 : Ark dikiş takibi.....	15
Şekil 2.5 : İki boyutlu kamera ile kaynak izi takibi.....	16
Şekil 2.6 : Kontak prob ile kaynak izi takibi	17
Şekil 2.7 : Lazer tabanlı kaynak izi takibi	18
Şekil 3.1 : Kaynak gürültüleri.....	21
Şekil 3.2 : Kaynak izi takip sensörü yerleşim	24
Şekil 4.1 : Gazaltı kaynak dalga boyu-ışık yoğunluğu grafiği	26
Şekil 4.2 : Kaynak izi takibi sensör tasarımı	26
Şekil 4.3 : Lazer üçgenleme prensibi.....	28
Şekil 4.4 : Lazer üçgenleme derinlik ölçümü	29
Şekil 4.5 : Lazer üçgenleme genişlik ölçümü.....	31
Şekil 5.1 : Kaynak izi takibi akış diyagramı.....	33
Şekil 5.2 : Görüntü işleme adımları.....	34
Şekil 5.3 : Hareket filtresi.....	37
Şekil 5.4 : Eğitim veriseti görüntü çifti	40
Şekil 5.5 : Gürültü engelleyici otokodlayıcı mimarisi.....	41
Şekil 5.6 : Eğitim sonucu.....	42
Şekil 5.7 : Otokodlayıcı modeli gerçek zamanlı test sonucu.....	42
Şekil 6.1 : Kaynak izi takip sistemi	43
Şekil 6.2 : Mat yüzeyli malzeme kaynak sonucu	44
Şekil 6.3 : Parlak yüzeyli malzeme kaynak sonucu.....	45

KARTEZYEN OTOMASYON ROBOTLARI İÇİN KAYNAK İZİ TAKİP SENSÖRÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Günümüzde endüstriyel üretim süreçlerinin otomasyonu, teknolojik gelişmelere paralel olarak hızla yaygınlaşmakta ve daha önce manuel olarak gerçekleştirilen birçok işlem artık robotik sistemler aracılığıyla yürütülmektedir. Bu dönüşümün en belirgin örneklerinden biri kaynak prosesidir. Robotik kaynak sistemleri, insan sağlığına zararlı olabilecek toz, gaz, yoğun ultraviyole ışınım ve yüksek sıcaklık gibi olumsuz çevresel etkilere maruz kalmaksızın 7 gün 24 saat kesintisiz çalışabilme özelliği sayesinde üretim hatlarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu sayede yalnızca üretim hızı ve verimliliği artırılmakla kalmamakta, aynı zamanda kaynak operatörlerinin sağlık riski de önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Ancak her kaynak uygulamasının doğrudan robotik otomasyona entegre edilebilmesi mümkün değildir. Konvansiyonel robot sistemleri, önceden programlanmış sabit rotalar üzerinden hareket ederek kaynak işlemini gerçekleştirmektedir. Fakat üretim toleranslarının düşük olduğu durumlarda veya kaynak işlemi sırasında ortaya çıkan yüksek ısı nedeniyle eriyik metalin ani soğumaya bağlı olarak çekme yapması sonucu parçanın şekilsel olarak deformasyona uğraması, kaynak kanalında konum sapmalarına neden olmaktadır. Bu tür sapmalar, kaynak kalitesini doğrudan etkileyebileceğinden, kaynak torcunun dikiş hattını dinamik olarak takip edebilmesi için kaynak izi takip sensörlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, kartezyen otomasyon robotlarına entegre edilebilecek, kaynak torcunu $\pm 0,1$ mm hassasiyetle kaynak kanalında konumlandırabilen, hem mat hem de parlak yüzeyli malzemelerde güvenilir şekilde çalışabilen lazer tabanlı bir kaynak izi takip sensörü geliştirilmesi hedeflenmektedir. Sensörün mekanik tasarımı; kaynak esnasında oluşan yüksek sıcaklık, ışık parlaması, çapak ve duman gibi dış etkenlerden en az düzeyde etkilenmesini sağlayacak şekilde yapılandırılacaktır. Görüntüde bozulmaya yol açan bu gürültüler, geleneksel görüntü işleme teknikleri ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar ile filtrelenecek; farklı yüzey özelliklerine sahip malzemeler için özelleştirilmiş filtreleme algoritmaları geliştirilecektir.

Sensör, iş parçasına projekte edilen çizgi lazerin yüzeyde oluşturduğu profil kırılımlarını analiz ederek kaynak kanalının geometrik yapısını çıkaracaktır. Bu profil verisi, lazer, kaynak noktası ve kamera arasındaki geometrinin lazer üçgenleme metodu ile çözülmesi ve kartezyen robot sisteminden alınan konum verisiyle entegre edilmesiyle kaynak noktasının üç boyutlu koordinatları hesaplanacaktır. Bu veriler doğrultusunda geliştirilecek kaynak torcunun konum kontrol algoritması, robotun gerçek zamanlı olarak kaynak izi üzerinde hassas şekilde yönlendirilmesini sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Kaynak izi takip sensörü, Mat ve parlak yüzeyli malzemeler, Kartezyen otomasyon robotu, Filtreleme algoritmaları, Lazer üçgenleme, Konum kontrol algoritması.



DEVELOPMENT OF SEAM TRACKING SENSOR FOR CARTESIAN AUTOMATION ROBOTS

SUMMARY

In today's industrial manufacturing processes, automation is rapidly expanding in parallel with technological advancements, and many tasks that were previously performed manually are now carried out through robotic systems. One of the most prominent examples of this transformation is the welding process. Robotic welding systems are widely adopted in production lines due to their ability to operate continuously, 24 hours a day and 7 days a week, without being exposed to harmful environmental conditions such as toxic fumes, ultraviolet radiation, and elevated temperatures. In addition to improving productivity and efficiency, such systems significantly reduce health risks for human operators.

Nevertheless, not every welding application can be directly integrated into robotic automation. Conventional robotic systems generally operate along pre-programmed paths, which makes them vulnerable to deviations arising from thermal deformation of the workpiece, shrinkage of molten metal during rapid solidification, or insufficient production tolerances. These positional deviations directly affect weld quality and therefore necessitate the use of seam tracking sensors that enable the welding torch to dynamically follow the actual joint path.

Within the scope of this thesis, a laser-based seam tracking sensor is developed for integration into Cartesian automation robots. The proposed sensor is capable of positioning the welding torch along the seam with a precision of ± 0.1 mm and operates reliably on both matte and highly reflective metallic surfaces. The mechanical design of the sensor is configured to remain minimally affected by adverse conditions during welding, such as elevated temperature, arc light, spatter, and fumes. Distortions in visual data caused by these interferences are addressed through a hybrid approach that combines traditional image processing techniques with artificial intelligence-based filtering methods, with customized algorithms tailored for different surface properties.

The sensor extracts the geometrical profile of the weld seam by analyzing the deformations of a projected laser line on the workpiece surface. This profile data is processed using the laser triangulation method, and by fusing it with position feedback from the Cartesian robotic system, the three-dimensional coordinates of the weld path are determined. Based on this information, a novel position control algorithm is implemented to guide the robotic torch in real time, enabling accurate seam tracking and consistent weld quality.

Keywords: Seam tracking sensor, Matte and reflective surface materials, Cartesian automation robot, Filtering algorithms, Laser triangulation, Position control algorithm.

1. GİRİŞ

Sanayileşmenin dijitalleşme ile birleştiği günümüzde, üretim süreçlerinde verimlilik, kalite ve esneklik gereksinimleri giderek artmaktadır. Bu çerçevede ortaya çıkan Endüstri 4.0 yaklaşımı, üretim tesislerinde akıllı sistemlerin, sensör teknolojilerinin ve robotik otomasyonun entegre şekilde çalışmasını öngörmektedir. Bu dönüşümün en önemli yapı taşlarından biri, endüstriyel robotların üretim hatlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmasıdır. Endüstriyel robotlar, yüksek hassasiyet, düşük çevrim süresi ve kesintisiz çalışma yetenekleri sayesinde insan gücüne dayalı üretim anlayışında köklü bir değişim yaratmıştır. Bu sayede yalnızca üretim hızı ve standartları yükseltilmemiş, aynı zamanda iş güvenliği ve sürdürülebilir kalite açısından da önemli kazanımlar elde edilmiştir.

Robotikleşmeden en çok etkilenen alanlardan biri kaynak prosesidir. Manuel kaynak yöntemleri, operatörün fiziksel kapasitesine ve deneyimine bağlı değişiklik göstermekte; çevresel koşullardan etkilenebilmekte ve uzun süreli, tutarlı kalite sağlama konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu nedenlerle, kaynak işlemleri robotik otomasyona en erken adapte olan üretim süreçlerinden biri olmuştur.

Bununla birlikte, manuel operasyonların robotik sistemlere entegre edilebilmesi için üretim kalitesinin de artırılması gerekmektedir. Çünkü robotik sistemler, genellikle önceden programlanmış sabit koordinatlar üzerinden çalışmakta ve üretim esnasında oluşabilecek sapmalara karşı sınırlı bir esneklik sunmaktadır. Üretim hassasiyetini artırmak çoğu zaman yüksek maliyetli yatırımlar gerektirdiğinden, sistemin esnekliğini artırmak amacıyla sensör teknolojilerinden faydalanılmaktadır. Özellikle kaynak işlemlerinde; pozisyonel sapmalar, termal deformasyonlar ve fikstürleme hataları gibi faktörler kaynak kanalında kaymalara yol açabilmekte ve bu durum kaynak kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu tür sapmaları tolere edebilmek için geliştirilen kaynak izi takip sensörleri, kaynak torcunun kaynak kanalını gerçek zamanlı olarak takip etmesini sağlayarak, kanal boyunca doğru ve kararlı bir kaynak yapılmasına imkân tanımaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, mat ve parlak yüzey özelliklerine sahip metal parçaların kaynak işlemlerinde kullanılmak üzere, lazer tabanlı bir kaynak izi takip sensörü geliştirmek ve bu sensörü kartezyen yapıda çalışan bir otomasyon robotuna entegre ederek gerçek zamanlı kaynak iz takibi yapabilen bir robotik kaynak sistemi oluşturmaktır.

Geliştirilecek sistem, üretim sırasında ortaya çıkan pozisyon sapmaları, yüzey yansımaları, termal deformasyonlar ve fikstürleme hatalarına rağmen kaynak torcunun kaynak kanalında doğru konumlandırılmasını sağlayacak şekilde yapılandırılacaktır. Bu doğrultuda, kaynak kanalının üç boyutlu profilini çıkarabilecek lazer üçgenleme prensibine dayalı bir sensör tasarlanacak; sensörden elde edilen verilerle kaynak torcunun gerçek zamanlı yönlendirilmesine imkân tanıyan özgün bir kaynak izi takip algoritması geliştirilecektir.

Ayrıca, kaynak işlemi sırasında oluşan parlama, duman, çapak ve yansıma gibi optik gürültülerin ölçüm doğruluğunu olumsuz etkilemesini önlemek amacıyla hem geleneksel görüntü işleme teknikleri hem de yapay zekâ tabanlı filtreleme algoritmaları kullanılacaktır. Bu sayede sistemin hem mat hem de parlak yüzeylerde kararlı çalışması sağlanarak, kaynak kalitesinin sürekliliği ve robotik sistemin çevresel değişkenlere karşı adaptasyonu artırılacaktır.

1.2 Literatür Araştırması

Robotik sistemlerin endüstriyel üretim süreçlerinde giderek daha fazla yer bulmasıyla birlikte, kaynak işlemlerinde de otomasyon önemli ölçüde yaygınlaşmıştır. Kaynak prosesinin otomasyonu yalnızca üretim verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda kaynakçının maruz kaldığı toz, toksik gaz, ultraviyole ışık ve ısı gibi zararlı çevresel etkenlerin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır. Literatürde, kaynak işleminin sağlık üzerinde ciddi olumsuz etkileri olduğu; uzun süreli maruziyetin solunum yolu hastalıkları, DNA (Deoksiriboz Nükleik Asit) hasarı, sinir sistemi bozuklukları gibi sağlık risklerine yol açtığı belirtilmektedir. Bu durum, kaynak uygulamalarında robotik sistemlerin gerekliliğini ve yaygınlaşmasının ardındaki temel motivasyonlardan birini ortaya koymaktadır [1].

Kaynak otomasyonu alanında karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, kaynak sırasında parçalar arasında oluşan pozisyon sapmaları, üretimden kaynaklanan hatalar ve termal deformasyonlar nedeniyle kaynak torcunun kaynak dikişinden sapmasıdır. Geleneksel robot sistemleri sabit programlanmış koordinatlar üzerinden çalıştığı için, bu tür sapmalara karşı esneklik gösteremez. Bu nedenle kaynak torcunun kaynak kanalını gerçek zamanlı olarak takip edebilmesi için kaynak izi takip sensörlerine ihtiyaç duyulmaktadır [2].

Literatürde, farklı prensiplere dayanan çok sayıda kaynak izi takip yöntemi geliştirilmiştir. En temel sistemlerden biri olan dokunma algılama yöntemi, kontak prob ucunun kaynak kanalına fiziksel olarak temas ettirilmesiyle çalışır. Yüzeydeki yüksekliği veya kanalın geometrisini takip etmek amacıyla geliştirilen bu sistemlerde, sensör verileri robot kontrol birimine aktarılır ve torcun yönlendirilmesi sağlanır. Probu üç ekseninde sapması, kaynak kanalının eğimini ve pozisyonunu ortaya koyar. Bu yöntem, karmaşık olmayan lineer yüzeylerde başarılı sonuçlar vermekte ve maliyet açısından avantaj sunmaktadır [3].

Dokunmalı yöntemlerin sınırlı esnekliğine karşılık, temassız çalışan optik sistemler daha gelişmiş çözümler sunmaktadır. Lazer tabanlı görüntüleme sistemleri, kaynak kanalının üç boyutlu profilini lazer üçgenleme yöntemiyle çıkararak torcun yönlendirilmesini sağlar. Huang ve arkadaşları tarafından geliştirilen sistemde, lazer çizgisi üzerinden alınan profil verisiyle kaynak hattı yüksek doğrulukla çıkarılmıştır [4]. Ancak bu sistemlerde karşılaşılan en büyük problem, kaynak işlemi sırasında oluşan ark ışığı, duman ve çapak gibi gürültüler nedeniyle lazer çizgisinin veya kamera görüntüsünün bozulmasıdır. Bu problemi aşmak için çeşitli filtreleme algoritmaları geliştirilmiştir. Li ve ekibi, yapılandırılmış ışık görüşüne dayalı sistemlerde Kalman filtresi ve ağırlık merkezi hesaplama yöntemi ile bu gürültülerin etkisini azaltmayı başarmıştır [5].

Görüntü tabanlı izleme sistemleri içerisinde, şablon eşlemeli yöntemler, kaynak kanalının bir önceki adımda çıkarılan geometrik yapısını sonraki karelerde referans olarak kullanmaktadır. Ding ve arkadaşlarının çalışmasında, FIFO (First In First Out) tabanlı hafıza yapısı ile görüntü işleme gecikmeleri azaltılmış ve sistemin farklı kaynak kanalı tiplerine uyarlanabilirliği sağlanmıştır [6].

Buna ek olarak, ark sensörü tabanlı sistemler de kaynak esnasında torcun konumunu algılamak için kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde, kaynak akımı ve gerilimindeki değişimler analiz edilerek kaynak kanalının merkezi tahmin edilmeye çalışılır. Özellikle MIG (Metal Inert Gas) ve MAG (Metal Active Gas) kaynak yöntemlerinde başarılı sonuçlar veren bu yapı, yüksek sıcaklık ve duman ortamında çalışabilme avantajına sahiptir. Seo ve arkadaşlarının tandem kaynak yöntemi üzerine geliştirdiği sistemde, sinyal ayrıştırma algoritmaları ile kaynak hattını başarıyla takip edilmiştir [7].

Weis ve arkadaşlarının önerdiği sistemde, çevresel parazitlerin etkisini azaltmak için hem fiziksel hem de yazılım temelli filtreleme uygulanmıştır. Görüntüdeki duman, ark ışığı ve çapak gibi gürültülerin bant geçiren filtre ve hava üfleme yöntemleri ile fiziksel olarak azaltılabileceği gösterilmiştir. Böylece sistem, gerçek zamanlı kaynak izi takibini görsel veriler üzerinden gerçekleştirebilmiştir [8].

Yapılan çalışmalarda, klasik çizgi lazer yerine nokta lazer veya dairesel lazer kullanımı da araştırılmıştır. Özellikle dar kaynak kanallarında, nokta lazer ve PID (Proportional Integral Derivative) tabanlı kontrol yapısıyla çalışan sistemlerde 0.05 mm düzeyinde hassasiyetle izleme yapılabildiği gösterilmiştir [9]. Diğer yandan, dairesel lazer tabanlı bir görüntüleme sisteminin kullanıldığı çalışmada, kaynak kanalı etrafındaki tüm yönlerden yansıma verisi elde edilerek 3B profil modellemesi yapılmış ve robot torcu başarıyla yönlendirilmiştir [10].

Yapılandırılmış ışık tabanlı yaklaşımlar, kaynak izi takibinde parazitleri azaltmak amacıyla sıkça kullanılmaktadır. Li ve arkadaşlarının geliştirdiği yöntemde, lazer şeridinden elde edilen profil verileri Kalman filtresi ile izlenmiş, ardından en küçük kareler yöntemiyle çıkarılan merkez noktaları karakter dizileri şeklinde nitel olarak tanımlanarak model tabanlı eşleştirme yapılmıştır. Bu sayede kaynak kanalının konumu yüksek doğrulukla belirlenmiş ve yöntem deneysel çalışmalarla geleneksel tekniklere kıyasla daha kararlı ve hassas bulunmuştur [11].

Rout ve arkadaşlarının yaptığı derleme çalışmasında, kaynak izi takibinde kullanılan farklı sensör tipleri kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Ark sensörlerinin ekonomik ve dayanıklı yapısı, görüş sensörlerinin esnekliği ve lazer tabanlı sistemlerin yüksek doğruluk potansiyeli karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca görüntü ön işleme, kenar tespiti, eşikleme ve kontrol algoritmalarının kaynak sırasında karşılaşılan

gürültü, ışık parazitleri ve yüzey düzensizliklerine karşı nasıl uygulandığı ayrıntılı biçimde tartışılmıştır. Bu çalışma, farklı sensör temelli yaklaşımların avantaj ve sınırlılıklarını bir arada inceleyerek kaynak otomasyon sistemlerinin gelecekteki gelişimine ışık tutmaktadır [12].

Nele ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, GMAW (Gas Metal Arc Welding) sürecine CCD (Charge Coupled Device) kamera tabanlı görüntü alma sistemi entegre edilerek kaynak hattının gerçek zamanlı takibi sağlanmıştır. Geliştirilen yazılım, şablon eşleştirme algoritmaları ve ROI (Region of Interest) tabanlı incelemelerle kaynak başlangıç noktası ile dikiş hattını doğru şekilde belirlemiş, torcun yönlendirilmesini otomatik olarak gerçekleştirmiştir. Deneysel testlerde 0.1 mm'ye kadar hata payı ile kaynak izi başarıyla takip edilmiş ve sistemin pratik uygulanabilirliği ortaya konmuştur [13].

Seo ve arkadaşlarının geliştirdiği asenkron tandem kaynak sistemi, ark sinyallerindeki düzensizliklere rağmen kaynak hattını güvenilir şekilde takip edebilmek için ortalama akım sinyalini temel alan bir algoritma önermiştir. Çalışmada, V-oluklu numuneler üzerinde yapılan deneylerde akım alanı farkına dayalı izleme yöntemi uygulanmış ve kaynak hattının merkezde başarıyla tutulabildiği gösterilmiştir. Böylece, çift tel gazaltı kaynak gibi yüksek verimlilik sağlayan ancak termal deformasyona hassas süreçlerde, ark sensörü tabanlı izleme sistemlerinin uygulanabilirliği doğrulanmıştır [14].

Zou ve arkadaşlarının ardışık çalışmalarında, çizgi lazer tabanlı izleme sistemleri farklı görüntü işleme ve takip algoritmalarıyla geliştirilmiştir. İlk çalışmada KCF (Kernelized Correlation Filters) tabanlı yaklaşım kullanılarak eğrisel kaynak dikişlerinde 0.32 mm'nin altında hata ile izleme yapılabilmektedir [15]. Bunu takip eden çalışmada ise morfolojik görüntü işleme ile CCOT (Continuous Convolution Operator Tracker) algoritması birleştirilmiş, güçlü ark ışığı ve sıçrantı parazitlerinin bulunduğu ortamlarda dahi ± 0.2 mm doğruluk ve 50 Hz izleme frekansı elde edilmiştir [16]. Bu çalışmalar, lazer görüş sistemlerinin yüksek hassasiyet ve dayanıklılıkta gerçek zamanlı kaynak takibi için etkin çözümler sunduğunu göstermektedir.

Kiddee ve arkadaşlarının geliştirdiği sistemde, çapraz işaretli yapılandırılmış ışık kullanılarak kalın plakalarda kaynak izi takip problemi ele alınmıştır. Görüntü işleme tarafında otomatik şablon oluşturma ve değiştirilmiş şablon eşleştirme yöntemleriyle hesaplama maliyeti önemli ölçüde azaltılmış, PD (Propositional Derrivative) ve hız geri

besleme kontrollü hareket sistemiyle kaynak torcunun ± 0.2 mm hassasiyetle kaynak hattını gerçek zamanlı olarak takip edebildiği gösterilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle karmaşık V-oluklu ek yerlerinde kalın plaka kaynak robotları için yüksek doğruluk ve pratik uygulanabilirlik sağlamaktadır [17].

Yasenkov ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, gürültü azaltma amacıyla DAE (Denoising Autoencoder) tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. CNN (Convolutional Neural Network) mimarisi ile desteklenen DAE, gürültülü render görüntülerinden temiz görüntüleri tahmin edebilmiş ve basit AE (Autoencoder) yapılarına kıyasla çok daha düşük hata oranı elde etmiştir. Özellikle MSE (Ortalama Karesel Hata) tabanlı kayıp fonksiyonu ile detayların korunması sağlanmış, eğitilen modelin yeniden kullanılabilirliği sayesinde gürültü azaltma işlemi geleneksel yöntemlere göre 3 kata kadar hızlanmıştır. Bu yaklaşım, kaynak işlemleri sırasında optik sensörlerden elde edilen gürültülü verilerin filtrelenmesinde potansiyel bir yöntem olarak değerlendirilebilir [18].

Gondara'nın gerçekleştirdiği çalışmada, tıbbi görüntülerde gürültü azaltma amacıyla CDAE (Convolutional Denoising Autoencoder) tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir. mini-MIAS ve dental radyografi veritabanları üzerinde yapılan testlerde, CNN DAE'nin performansı SSIM (Structural Similarity Index Measure) tabanlı ölçümlerle değerlendirilmiş ve NL-Means (Non-Local Means) ile medyan filtre yöntemlerinden üstün olduğu gösterilmiştir. Özellikle yüksek seviyeli Gaussian ve Poisson gürültülerinde dahi yapısal bilgiyi koruyarak anlamlı sinyal çıkarabilmesi, yöntemin tıbbi görüntü işleme alanında güvenilir bir ön işleme yöntemi olabileceğini ortaya koymuştur [19].

Bajaj ve arkadaşlarının çalışmasında, görüntü gürültüsünü azaltmak için çok katmanlı CDAE blokları ve atlama bağlantısı yapıları kullanan derin öğrenme tabanlı bir mimari önerilmiştir. Model, STL-10 veri setiyle eğitilmiş ve SET5 standart görüntüleri üzerinde test edilmiştir. Performans değerlendirmesinde PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) ve SSIM metrikleri kullanılmış; sonuçlar, önerilen mimarinin CDDNN (Convolutional Denoising Deep Neural Network) ve RED30 (Residual Encoder Decoder with 30 layers) gibi yöntemlere göre daha yüksek PSNR değerleri sunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, atlama bağlantısı yaklaşımı sayesinde hem ince detayların korunması hem de gradyan kaybolması probleminin azaltılması sağlanmıştır [20].

Literatürdeki bu çalışmalar, kaynak izi takibi alanında önemli ilerlemeler sağlamış; lazer görüş sistemleri, ark sensörleri ve görüntü işleme tabanlı yöntemlerle hassasiyet ve kararlılık büyük ölçüde artırılmıştır. Ayrıca, DAE ve CDAE gibi yapay zeka tabanlı gürültü azaltma yaklaşımlarının, yüksek parazitli ortamlarda görüntülerin daha güvenilir şekilde işlenmesine katkı sunduğu görülmektedir. Ancak, özellikle mat ve parlak yüzeylerde aynı anda çalışabilen, optik parazitlere dayanıklı, lazer üçgenleme esaslı ve yapay zeka destekli filtreleme algoritmalarıyla güçlendirilmiş gerçek zamanlı sistemler henüz sınırlı sayıdadır. Bu tez çalışması, söz konusu boşlukları hedef alarak; hassas, esnek ve endüstriyel ortama uyumlu bir kaynak izi takip sistemi geliştirmeyi amaçlamaktadır.



2. KAYNAK İZİ TAKİP SENSÖRLERİ

Ağır sanayi, otomotiv ve savunma gibi sektörlerde kaynak işlemleri hâlen önemli ölçüde insan gücü ile yürütülmektedir. Bununla birlikte, üretim hızını artırma, kaliteyi standartlaştırma ve iş güvenliğini iyileştirme hedefleri doğrultusunda robotik kaynak uygulamalarına geçiş giderek hız kazanmaktadır. Robotik sistemler özellikle tekrarlı ve yüksek hacimli üretimlerde süreklilik, izlenebilirlik ve maliyet açısından belirgin üstünlükler sunar. Ancak her iki yaklaşımın güçlü ve zayıf yönleri, uygulama gereksinimlerine göre dikkatle değerlendirilmelidir.

Manuel kaynak, karmaşık geometrilerde sunduğu esneklikle işlemin etkin biçimde uygulanmasına olanak tanımaktadır. Operatör, parçanın erişimi zor bölgelerinde dahi kaynak dikişini sürdürebilir ve asgari fikstür gereksinimiyle işlemin kurulumu basitleştirilebilir. Ayrıca, üretimde ortaya çıkan küçük konumlandırma hataları veya parça toleransları operatör deneyimiyle sahada tolere edilebilir. Bununla birlikte manuel uygulamalar; yüksek nitelikli iş gücü ihtiyacı, kaynak dumanı ve ultraviyole ışıyım gibi insan sağlığı olumsuz etkilemesi ve uzun süre kesintisiz çalışmanın mümkün olmaması gibi önemli dezavantajlara sahiptir.

Robotik kaynak, 7/24 kesintisiz üretime uygun yapısı ile ultraviyole ışık, kaynak dumanı ve sıcaklık gibi insan sağlığına zararlı çevresel koşullardan etkilenmeden çalışabilir; bu sayede hem üretim hızını hem de kaynak dikişi kalitesinin artmasının yanı sıra sürecin tekrar edilebilirliğini de yükseltir. Öte yandan, robotik hatların güvenilir çalışması için genellikle yüksek hassasiyette fikstürleme gerekir; bu da ilk yatırım maliyetini artırır. Ayrıca, üretim toleranslarının yüksekliği ya da proses sırasında oluşan termal deformasyonların neden olduğu konum sapmaları karşısında klasik robotik programlar yapıları gereği kırılabilir kalır. Bu kırılabilirlik, dikiş hattının nominal yörüngeden sapması hâlinde kaynak dikişinin kaçırılması, nüfuziyetin yetersiz kalması ya da kaynak dikişinin iç yapısında bozulma gibi kalite sorunlarına yol açabilir.

Bu bağlamda robotik kaynağın kaynak izi takip sistemiyle desteklenmesi kritik bir rol oynamaktadır. Kaynak izi takip sistemleri, dikiş hattının gerçek zamanlı konumunu algılayarak robot yörüngesini anlık olarak düzeltir; böylece üretimden veya termal

etkilerden kaynaklanan konum hatalarına karşı sisteme direnç kazandırır. Sonuç olarak daha basit ve düşük maliyetli fikstürlerle dahi stabil kalite elde edilebilir; kurulum/ayar süreleri kısalmış, parça varyasyonlarına adaptasyon artar ve toplam sistem maliyeti düşer.

Kaynak izi takip sensörleri, kaynak işlemi sırasında kaynak torcunun dikiş hattı boyunca doğru ve kararlı bir şekilde yönlendirilmesini sağlayan algılayıcı sistemlerin genel adıdır. Bu sensör sistemleri, dikişin konumunu belirleyerek sapmalara karşı gerçek zamanlı düzeltme yapılmasına olanak tanır. Temel işlevleri; kaynak kalitesini artırmak, fire ürünlerin sayısını azaltmak ve süreçteki operatör müdahalesi ihtiyacını en aza indirmektir. Kaynak izi takip sensörleri temaslı ve temassız olmak üzere iki farklı grupta incelenmektedir. Mekanik kontak problemler gibi temaslı sistemler dikiş hattını fiziksel temasla izlerken; temassız sistemler çoğunlukla optik veya elektromanyetik prensiplere kaynak izinin takibini gerçekleştirir. Kullanılan teknolojiye bağlı olarak lazer üçgenleme tabanlı sensörler, görüntü işleme yöntemleri, ark karakteristiğinden geri besleme alan sensörler ve diğer görüntü tabanlı yaklaşımlar yaygın uygulama alanı bulmaktadır.

Her bir sensör türünün performansı; malzeme yüzey özellikleri (yansımaya, pürüzlülük, renk), çevresel koşullar (duman, kaynak ışınması, çapak), kaynak tipi (MIG/MAG, lazer, tozaltı) ve üretim toleransı gibi değişkenlere bağlıdır. Örneğin lazer üçgenleme tabanlı çözümler yüksek çözünürlük ve doğruluk sağlayabilirken, ark temelli izleme yöntemleri duman ve ışınma gibi optik parazitlere daha az duyarlı olabilir. Bu nedenle uygun kaynak izi takip sisteminin seçimi; hedef hassasiyet, entegrasyon kolaylığı, çevresel dayanım ve ekonomik kısıtlar birlikte ele alınarak yapılmalıdır.

Özetle, manuel kaynak karmaşık geometri ve esneklik gerektiren durumlarda güçlü bir seçenek olmayı sürdürürken; robotik kaynak, yüksek üretim hızı ve kalite sürekliliği ile endüstriyel ölçekte avantajlıdır. Robotik sistemlerin kaynak izi takip sensörleriyle desteklenmesi ise hem fikstür karmaşıklığını azaltır hem de üretim/termal kaynaklı sapmalara karşı adaptif bir kapalı çevrim kontrol imkânı oluşturarak, modern üretim hatlarında kalite ve verimliliği birlikte maksimize etmektedir.

2.1 Kaynak İzi Takibinin Kullanım Alanları

Kaynak izi takip sistemleri, kaynak torcunun dikiş hattı boyunca doğru konumda ilerlemesini sağlayan kapalı çevrim sensörlerdir. Kaynak sırasında eriyik metalin katılaşması, kaynak parçalarını birbirine çekmesi ve yetersiz fikstürleme kaynak dikiş hattında sapmalara yol açmaktadır. Bu geometrik sapmaların birikimli etkisini telafi edebilmek için sensörler, dikiş konumunu gerçek zamanlı olarak ölçer ve robota düzeltme komutları göndermektedir. Böylece hem üretim verimliliği ve kalite sürekliliği yükselir hem de yeniden işleme ve hurda oranları düşmektedir.

Endüstriyel ölçekte en yaygın kullanım, yüksek hacimli ve tekrarlı üretim yapan otomotiv ve yan sanayi hatlarında görülmektedir. Gövde-şasi elemanları, pil modül kasaları, egzoz sistemleri, koltuk iskeletleri ve süspansiyon braketleri gibi çok parçalı montajlarda, kalıp ve pres süreçlerinden doğan tolerans değişkenlikleri dikiş hattında kaymalara neden olmaktadır. Kaynak izi takip sensörleri bu değişkenliği anlık düzelterek, MIG/MAG, TIG (Tungsten Inert Gas) ya da lazer kaynağında nüfuziyet ve hat geometrisinin tutarlılığını güvence altına almaktadır. Gemi inşa ve ağır imalatta kalın levha birleştirmeleri, gövde blokları, tank ve basınçlı kap imalatları; büyük ısıl deformasyon ve çok geçişli kaynak gerektirdiği için sensör destekli adaptif yörünge planlamasından önemli ölçüde yararlanılmaktadır.

Uygulama kapsamı yalnızca sektör bazında değil, birleştirme tipleri açısından da geniştir. Alın, bindirme ve köşe kaynaklarında; düz hat, eğri dikiş ve dairesel dikişlerin tümünde sensör tabanlı izleme kullanılabilir. Pozisyon değişiminin sık olduğu konumlarda ya da robotun geniş bir çalışma hacminde farklı fikstürlere eriştiği çok istasyonlu hatlarda, sensörler dikiş ofsetini, açıklık değişimini ve kenar konumunu ölçerek robot yörüngesini milimetre altı düzeyde güncellemektedir. Çok geçişli kaynaklarda önceki paso izinin algılanması ve bir sonraki pasonun buna referanslanması; salınlı kaynak hareketlerinde ise örgü genişliğinin kaynak dikişine merkezlenmesi, pratik ve yaygın kaynak izi takip sensörü kullanım örneklerindedir.

Teknoloji açısından, lazer üçgenleme ve görüntü işleme tabanlı temassız sistemler; parlaklık değişimi, duman ve çapak gibi optik parazitlere rağmen yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sunmaktadır. Akım/voltaj geri beslemesine dayalı yöntemler ise optik görüşün kısıtlandığı ortamlarda avantaj sağlar. Uygun sensör seçimi; malzeme türü, malzemenin yüzey özellikler, kaynak türü, hedef hız ve istenen toleransla birlikte

değerlendirilmelidir. Zorlayıcı koşullarda (şiddetli çapak, ağır duman, ayna benzeri yansıtıcı yüzey) sensör füzyonu, koruyucu optikler, uygun filtrasyon ve aydınlatma mimarileri entegrasyonun başarısını belirlemektedir.

Kaynak izi takip sensörleri, robotik kaynak proseslerini esnekleştirerek üretim sürecine katkıda bulunmaktadır. Ürün çeşitliliğinin yüksek, parti büyüklüklerinin düşük olduğu hatlarda karmaşık fikstürlere duyulan ihtiyacı azaltarak devreye alma süresini kısaltmakta ve sistem maliyetlerini düşürmektedir. Yüksek adetli ve hızlı hatlarda ise ekipmanların toplam verimliliğini yükseltmekte, hat duruşlarını azaltmakta ve sürecin güvenli çalışma aralığını genişletmektedir. Kalifiye elemana olan bağımlılığın azalması, nitelikli iş gücünün kısıtlı olduğu durumlarda sürdürülebilirliği desteklemektedir. Ayrıca sensör verilerinin ve anlık yol düzeltmelerinin kaydı, kalite güvence ve izlenebilirlik için doğrulanabilir bir veri zemini oluşturmaktadır. Bütünleşik olarak bakıldığında, kaynak izi takibi; geometrik sapmalar, ısıl deformasyon ve üretim toleranslarından doğan belirsizlikleri kapalı çevrim geri besleme ile telafi ederek farklı sektör ve uygulamalarda kalite, hız ve maliyet dengesini aynı anda iyileştiren temel bir bileşen hâline gelmektedir.

2.2 Endüstride Kullanılan Kaynak İzi Takip Teknolojileri

Endüstriyel kaynak uygulamalarında kullanılan kaynak izi takip sistemleri, kaynak torcunun dikiş hattı boyunca otomatik olarak yönlendirilmesini sağlayan teknolojik çözümler sunmaktadır. Bu sistemler, kaynak işlemi öncesinde ya da kaynakla eşzamanlı olarak dikiş hattını algılayarak, robot sistemlerinin gerçek zamanlı düzeltmeler yapmasına olanak tanır. Böylece kaynak torcunun sapması önlenir, kaynak kalitesi korunur ve operatöre olan bağımlılık azaltılır.

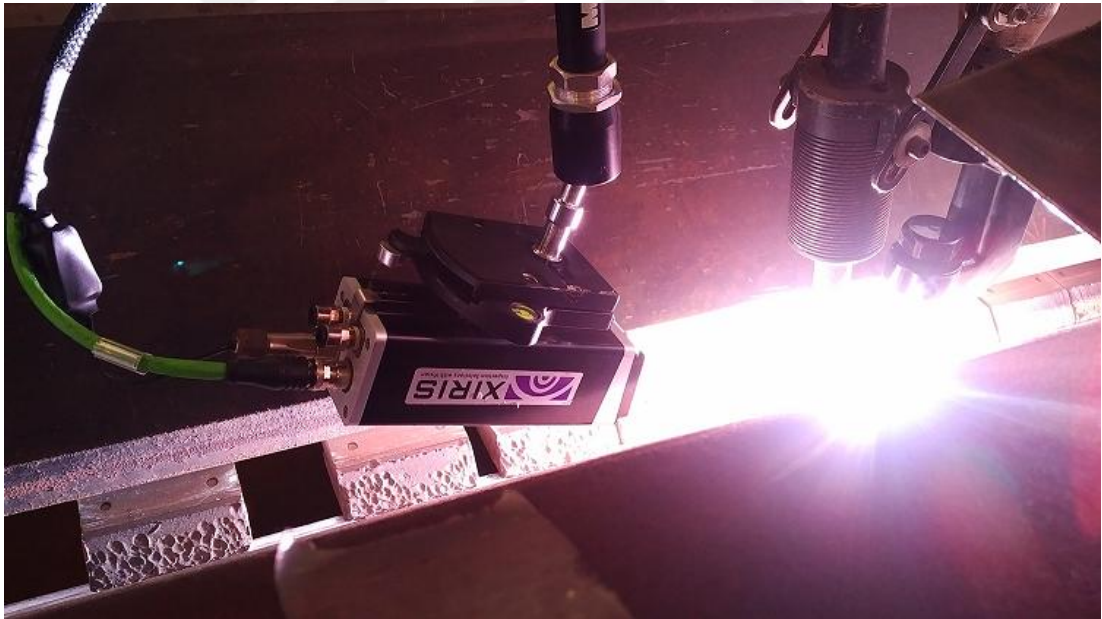
Endüstride çeşitli algılama yöntemlerine dayanan sistemler kullanılmaktadır. Bunlar arasında operatör destekli yarı otomatik sistemler, kaynak telinin iş parçasına teması ile çalışan dokunmalı algılama yöntemleri, kaynak sırasında ark parametrelerini izleyen ark dikişi takibi, yüzey görüntüsünü analiz eden iki boyutlu kamera sistemleri, fiziksel temasla çalışan kontak problemler ve lazer üçgenleme esasına dayanan lazer tabanlı kaynak izi takip sistemleri yer almaktadır.

Her bir yöntemin belirli yüzey koşulları, kaynak türleri ve proses gereksinimlerine göre avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır. Bu nedenle sistem seçimi yapılırken,

kaynak yöntemi, malzeme cinsi, çevresel etkiler ve entegrasyon gereklilikleri dikkatle değerlendirilmelidir.

2.2.1 Yarı otomatik sistemler

Yarı otomatik kaynak izi takip sistemlerinde, kaynak torcunu yöneten bir kartezyen otomasyon robotu ile kaynak yolunu izleyen bir görüntüleme kamerasıyla (Şekil 2.1) birlikte kullanılır. Operatör, kameradan elde edilen görüntü üzerinden kaynak dikişini takip eder ve torcu, otomasyon sistemi (Şekil 2.2) aracılığıyla kaynak hattında tutmaya çalışır. Bu yöntemde izleme ve yönlendirme işlemi doğrudan operatörün yetkinliğine bağlı olduğundan, sistem nitelikli personel gereksinimi doğurur. Ayrıca, operatör müdahalesi manuel olarak gerçekleştirildiği için hassasiyet sınırlıdır ve bu nedenle sistem genellikle yüksek doğruluk gerektirmeyen kaynak uygulamalarında tercih edilmektedir. Bununla birlikte, operatörün uzun süre boyunca sürekli dikkatini kaynak kanalına odaklaması güç olduğundan, takip hataları ve kaynak kalitesinde tutarsızlıklar kaçınılmaz hâle gelmektedir.



Şekil 2.1 : Kaynak kanalı izleme kamerası [21]



Şekil 2.2 : Kaynak torcunun manuel pozisyon kontrolü [22]

2.2.2 Dokunmalı algılama yöntemi

Dokunmalı algılama sistemleri, kaynak torcunun ucundaki tel ile iş parçası arasında fiziksel temas kurularak kaynak dikişinin konumunun belirlenmesini esas alan bir yöntemdir. Bu yöntemde kaynak teline çok düşük seviyede bir gerilim uygulanır. Telin iş parçasına temas etmesiyle düşük güçlü bir kısa devre oluşur; ancak uygulanan gerilim seviyesi kaynak işlemini başlatmayacak kadar düşüktür. Bu sayede ark oluşmadan yalnızca pozisyon tespiti gerçekleştirilir. Temas anındaki konum bilgisi, robot kontrol sistemine iletilerek kaynak başlangıç ve bitiş noktaları belirlenir. Şekil 2.3'te dokunma algılama yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Dokunma algılama yöntemi

Dokunmalı algılama yönteminin en önemli avantajları, düşük maliyetli olması ve ek bir donanıma ihtiyaç duymamasıdır. Mevcut kaynak donanımıyla entegre biçimde çalışabildiğinden sistem kurulum ve işletme maliyetleri minimal düzeydedir. Bu nedenle birçok endüstriyel robot sisteminde tercih edilmektedir.

Ancak yöntemin bazı önemli sınırlamaları da mevcuttur. Öncelikle, ölçüm yalnızca kaynak öncesinde yapılabilir; aktif kaynak işlemi sırasında gerçek zamanlı iz takibi yapılamaz. Kaynak süresine ek olarak yapılan tarama hareketleri nedeniyle çevrim süresi uzamaktadır. Ayrıca, yüzeyin temiz, çapaksız ve iletken olması gereklidir; aksi takdirde temas algılama hatalı olabilir. Yöntem sadece MIG/MAG kaynak sistemlerinde etkili şekilde uygulanabilir ve özellikle 5 mm'nin altındaki ince parçalarda, temas hassasiyeti azaldığı için ölçüm doğruluğu düşmektedir.

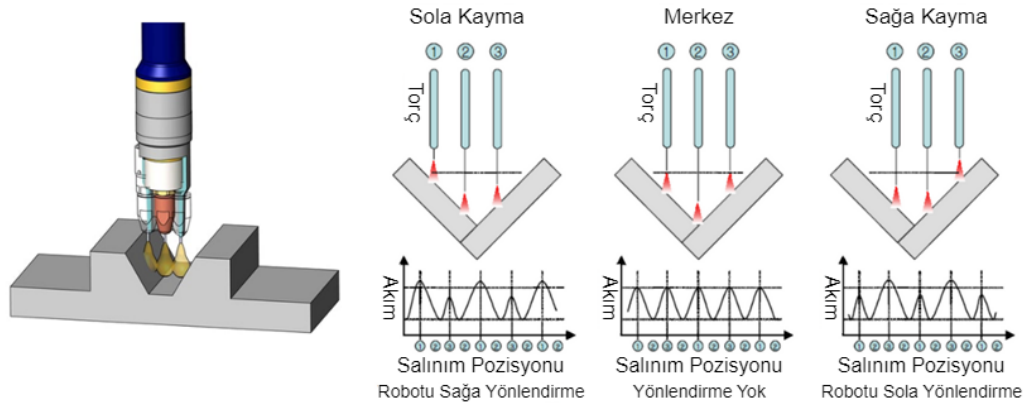
Bu nedenlerle, dokunmalı algılama sistemleri daha çok lineer ve düzlemsel kaynak uygulamalarında tercih edilmekte, yüksek hassasiyet ve gerçek zamanlı iz takibi gerektiren uygulamalarda ise daha gelişmiş sensör teknolojileri ile desteklenmektedir.

2.2.3 Ark dikişi takibi

Ark dikişi takibi, kaynak işlemi sırasında ark akımındaki değişimleri analiz ederek kaynak dikişinin merkezini belirlemeye yönelik bir yöntemdir. Bu yöntemde, kaynak torcu kaynak kanalı üzerinde kontrollü bir salınım hareketi yapacak şekilde programlanır. Torç, iş parçasına yaklaştığında ark boyu kısalır ve buna bağlı olarak kaynak akımı artar. Bu akım dalgalanmaları, kaynak dikişinin her iki kenarında karakteristik olarak farklılık gösterir. Elde edilen veriler analiz edilerek kaynak kanalının merkez hattı belirlenir ve torç bu merkeze göre yönlendirilir. Şekil 2.4'te ark dikiş takibinin çalışma prensibi gösterilmiştir.

Ark dikişi takibi, düşük maliyetli bir çözüm sunması ve herhangi bir ek donanıma ihtiyaç duymadan mevcut kaynak sistemiyle entegre çalışabilmesi açısından avantajlıdır. Ayrıca aktif kaynak işlemi sırasında gerçek zamanlı takip yapılabilmesi, yöntemi özellikle MIG/MAG kaynak süreçlerinde işlevsel kılmaktadır. Dokunmalı algılama sistemleriyle birlikte kullanıldığında daha stabil ve hassas bir kaynak izi takibi sağlanabilmektedir.

Ancak bu yöntemin bazı önemli sınırlamaları bulunmaktadır. Etkin şekilde çalışabilmesi için torcun salınım yapması zorunludur ve bu durum kaynak süresini uzatabilir. Ayrıca yöntem, yalnızca MIG/MAG kaynak yöntemlerinde ve özellikle paslanmaz çelik gibi malzemelerde etkili sonuçlar vermektedir. 5 mm'den daha ince parçalarda, akım değişimleri yeterince belirgin olmadığından algılama kararlılığı düşmekte; çok ince veya alüminyum gibi düşük dirençli malzemelerde ise istenen performans elde edilememektedir. Bu nedenlerle, ark dikişi takibi çoğunlukla belirli malzeme ve kalınlık aralıklarında sınırlı uygulama alanına sahiptir.



Şekil 2.4 : Ark dikiş takibi [7]

2.2.4 İki boyutlu kameralar

İki boyutlu kamera sistemleri, kaynak dikişini düzlemsel görüntü verisi üzerinden algılayarak torcun yönlendirilmesini sağlayan optik izleme çözümleridir. Bu sistemler, görüntü işleme algoritmaları yardımıyla iş parçası üzerindeki kontrast farklarını, kenar hatlarını veya geometrik şekilleri analiz ederek kaynak izi hakkında bilgi üretir. Genellikle düşük maliyetli olmaları, kolay entegre edilebilmeleri ve temas gerektirmemeleri nedeniyle endüstride tercih edilmektedir. Şekil 2.5'te iki boyutlu kamera ile kaynak izi takibi uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : İki boyutlu kamera ile kaynak izi takibi [23]

Ancak 2 boyutlu kamera sistemlerinin temel sınırlılığı, yalnızca X ve Y düzlemlerinde bilgi sağlayabilmeleri; dolayısıyla derinlik bilgisini doğrudan algılayamamalarıdır. Bu eksiklik, özellikle eğimli veya çok girintili-çıkıntılı yüzeylerde torcun doğru konumda kalmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca kaynak işlemi sırasında oluşan ark ışığı, duman ve çapak gibi gürültüler de kamera görüntüsünü olumsuz etkileyerek sistemin kararlılığını düşürebilmektedir. Bu nedenlerle 2 boyutlu kamera sistemleri genellikle homojen yüzeyli, sabit kontrastlı ve düşük parazitli kaynak uygulamalarında kullanılmaktadır.

2.2.5 Kontak problemler

Kontak problemler, kaynak izi takibinde fiziksel temas esasına dayanan basit ancak hassasiyeti sınırlı yöntemlerden biridir. Bu sistemlerde, kaynak dikişi boyunca hareket

eden bir problama ucu, iş parçası yüzeyine sürekli temas hâlinindedir. Probuun yüzeydeki konum değişimleri mekanik veya elektriksel sensörler aracılığıyla algılanır ve bu veriler, kaynak torcunun yönlendirilmesi için kontrol sistemine iletilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 : Kontak prob ile kaynak izi takibi [24]

Kontak problemlerin en belirgin avantajı, karmaşık görüntü işleme algoritmalarına ihtiyaç duymadan doğrudan fiziksel referans üzerinden çalışabilmeleridir. Ancak sistemin temaslı yapısı nedeniyle çeşitli dezavantajlar söz konusudur. Yüzeydeki çapak, kir, düzensizlik ve ısıl deformasyonlar probun takılmasına veya yanlış algılama yapmasına neden olabilir. Ayrıca problemler zamanla aşınmakta, hassasiyet kaybına uğramakta ve bakım ihtiyacı doğurmaktadır. Bu nedenle kontak problemler, genellikle düşük hassasiyet gerektiren uygulamalarda veya manuel kaynak destek sistemlerinde tercih edilmektedir.

Modern otomasyon sistemlerinde temassız ve daha kararlı çözümler yaygınlaştıkça, kontak problemlerin kullanımı giderek azalmaktadır. Yine de düşük maliyetli ve yapısal olarak basit projelerde hâlâ alternatif bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

2.2.6 Lazer tabanlı kaynak izi takibi

Lazer tabanlı kaynak izi takip sistemleri, temassız ölçüm prensibine dayanan ve yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilen modern izleme teknolojileridir. Bu sistemlerde bir lazer çizgi projektörü aracılığıyla iş parçası yüzeyine yansıtılan lazer ışını, yüzey profilindeki değişimlere göre bükülür ve bu deformasyonlar endüstriyel bir kamera tarafından algılanarak üç boyutlu kaynak kanal

profili çıkarılır. Görüntü işleme algoritmaları yardımıyla kaynak kanalının merkez hattı ve geometrisi hassas şekilde belirlenir. Sistem, kaynak robotunun anlık konum bilgisiyle senkronize çalışarak torcun doğru yolda kalmasını sağlar. Şekil 2.7’de kaynak işlemi ile eşzamanlı olarak çalışan lazer tabanlı kaynak izi takip sensörü gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Lazer tabanlı kaynak izi takibi [25]

Lazer takip sistemlerinin en önemli avantajlarından biri, kaynak türünden bağımsız çalışabilmesidir. MIG/MAG, TIG, plazma ve lazer kaynak gibi farklı yöntemlerle uyumlu şekilde entegre olabilir. Aynı zamanda çeşitli kaynak kanal tiplerinde (V tipi, düz, köşe vb.) etkin performans göstererek çok yönlü kullanım imkânı sunar. Gerçek zamanlı izleme kabiliyeti sayesinde torcun konumu kaynak işlemiyle eşzamanlı olarak güncellenebilir ve sapmalar anında düzeltilerek yüksek hızda üretimde bile hassas kaynak yapılması mümkün hâle gelir. Bu teknoloji aktif kaynak izi takibini desteklemesi, yüksek ölçüm doğruluğu sunması ve kartezyen ya da endüstriyel kaynak robotlarına kolayca entegre edilebilmesiyle öne çıkmaktadır.

Bununla birlikte, lazer sistemlerinin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle parlak yüzeyli metallerde lazer ışığının yüzeyde yansıma yapması ve kaynak ışığının yüzeyden kameranın görüş alanını kısıtlaması kaynak izi takibini zorlaştırmaktadır. Ayrıca her kaynak başlangıcında torcunun ilk pozisyonunun belirlenebilmesi için sistemin ön tarama işlemi gerçekleştirmesi, sürece kısa da olsa çevrim süresini uzatmaktadır. Bu nedenle lazer tabanlı sistemlerin kurulumu ve kullanımı, uygulamanın yüzey yapısı ve üretim süresi gibi etkenler dikkate alınarak planlanmalıdır.

Sonuç olarak, lazer tabanlı kaynak izi takip sistemleri; hassasiyet, esneklik ve gerçek zamanlı işlem kabiliyeti açısından günümüz endüstriyel kaynak uygulamaları için en gelişmiş çözümlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

3. KAYNAK ORTAMI VE ZORLUKLARI

3.1 Kaynak Işığı

Kaynak işleminde oluşan yüksek yoğunluklu ark ışığı, sensör sistemlerinin optik algılama kabiliyetini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Özellikle MIG/MAG ve TIG kaynaklarında oluşan parlama, görünür ve kızılötesi bölgede yüksek şiddetli elektromanyetik radyasyon yayar. Bu durum, görüntü işleme temelli sistemlerde (örneğin 2 boyutlu kameralar ve lazer tabanlı sensörler) algılamayı zorlaştırarak sensörün körlenmesine ya da görüntüde parazit oluşmasına neden olabilir.

Ark parlamasının etkisini azaltmak için çeşitli optik filtreleme yöntemleri uygulanmakta; dar bant geçiren optik filtreler, lazer dalga boyuna özel kamera sensörleri ve yazılımsal maskeleye algoritmaları kullanılmaktadır. Ancak bu önlemler, sistemin karmaşıklığını artırmakta ve bazı durumlarda gerçek zamanlı işlem kapasitesini sınırlayabilmektedir.

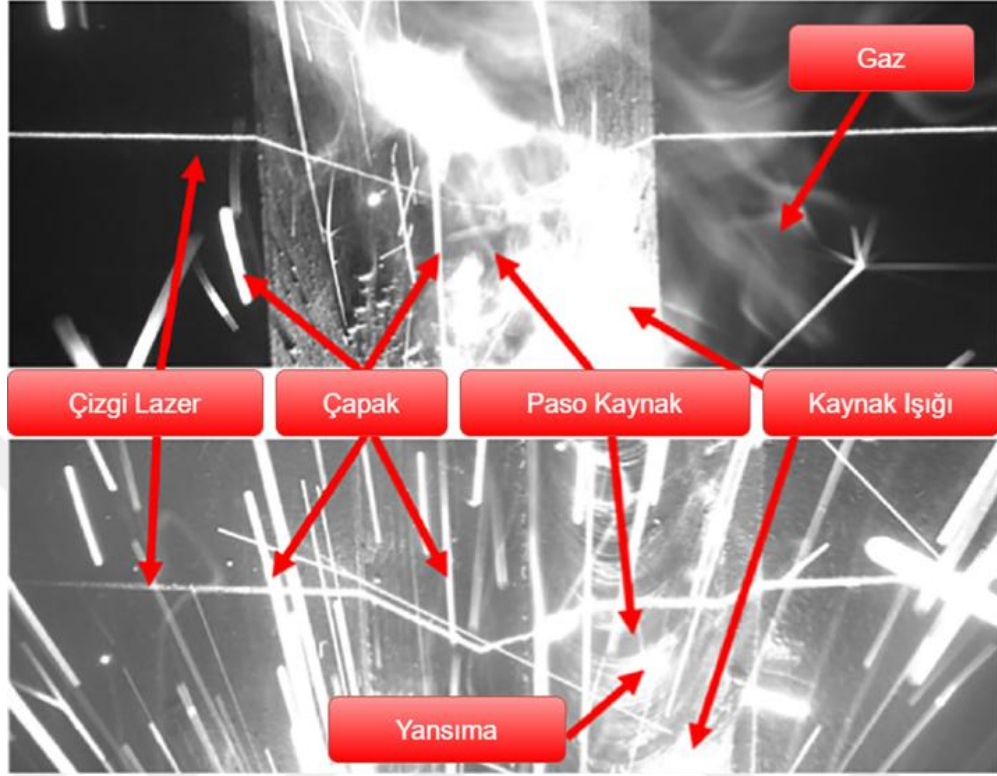
Bu nedenle, kaynak ışığının şiddeti ve oluştuğu spektral bant, sensör seçiminde kritik parametrelerden biridir. Özellikle kaynak torcuna yakın mesafede çalışan sistemlerde, sensörün dinamik aralık kapasitesi ve parlama bastırma yeteneği, takip kararlılığı açısından belirleyici olmaktadır.

3.2 Çapak ve Duman Etkileri

Kaynak işleminde oluşan çapak ve duman, sensör sistemlerinin algılama performansı üzerinde doğrudan etkili olan çevresel etkenlerdir. Özellikle metalin ergimesiyle birlikte ortaya çıkan ince metal partikülleri (çapak) ve yanma ürünlerinden oluşan duman, optik görüş hattını bozarak sensörün hedef yüzeyi net bir şekilde algılamasını zorlaştırmaktadır (Şekil 3.1). Bu durum, özellikle kamera ve lazer tabanlı izleme sistemlerinde görüntü kalitesini düşürmekte ve kaynak izi takip algoritmalarının doğruluğunu olumsuz yönde etkilemektedir.

Ortaya çıkan bu tür fiziksel parazitler; hatalı merkez belirleme, torç yönünde sapma gibi sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle sensör sistemlerinin, kaynak ortamında oluşan

bu zorlu koşullara karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanması ve görüntü işleme algoritmalarının bu tür parazitlere karşı uygun filtreleme ve hata telafi mekanizmaları ile desteklenmesi gerekmektedir.



Şekil 3.1 : Kaynak gürültüleri [26]

3.3 Parlak Yüzeylerde Yansıma Sorunları

Parlak veya yansıtıcı yüzeyler, özellikle lazer tabanlı ve kamera destekli kaynak izi takip sistemlerinde ciddi algılama sorunlarına yol açabilmektedir. Metal yüzeylerin yüksek yansıtıcılığı, çizgi lazer ışığının ve kaynak ışığının yüzeyden yansıyarak kameranın aşırı pozlanmasına sebep olmaktadır. Bu durum, özellikle ayna yüzeyi gibi düzgün ve yüksek yansıma katsayısına sahip malzemelerde kaynak izi takibinin kararlılığını önemli lde düşürür.

Yansıma nedeniyle görüntüde meydana gelen parlamalar, kaynak dikişinin geometrisinin yanlış algılanmasına veya lazer üçgenleme sistemlerinde ölçüm hatalarına neden olabilir. Lazer çizgisinin düzgün algılanamaması hâlinde, kaynak kanalının merkezi sapabilir ve torç yönlendirmesi hatalı yapılabilir. Bu tip sistemlerde, kaynak öncesi yapılan taramalar da yansıma etkilerinden doğrudan etkilenerak kaynağın başlangıç noktasında kaymalara sebep olabilir.

Bu tür yansıma sorunlarını azaltmak amacıyla polarize filtreler, dar bantta çalışan lazer kaynakları veya özel kaplamalı sensör lensleri gibi çeşitli optik önlemler kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüzeyin fiziksel yapısı kaynak izi takibinin doğruluğunu doğrudan etkilediğinden, sistem tasarımında yüzey tipi önemli bir seçim kriteri olarak değerlendirilmelidir.

3.4 Materyal Yapısı ve Yüzey Formu

İş parçasının malzeme yapısı ve yüzey formu, kaynak izi takip sensörlerinin ölçüm doğruluğu ve güvenilirliği üzerinde doğrudan etkilidir. Farklı malzemeler, ışık yansıtma, absorpsiyon ve saçılma özellikleri açısından farklılık gösterdiğinden, özellikle optik temelli sistemlerde algılama performansı bu özelliklerden önemli ölçüde etkilenir. Örneğin, paslanmaz çelik gibi homojen ve parlak yüzeyli malzemeler yoğun yansımaya neden olurken, döküm parçalar gibi pürüzlü yüzeyler ise lazer ışığının düzensiz dağılmasına yol açarak ölçüm hatalarına sebep olabilir.

Bunun yanı sıra, yüzeydeki boya kalıntıları, yağ tabakası, pas, oksitlenme veya farklı renk geçişleri, kameraların kontrast algısını ve lazer ışığının doğru yansıtılmasını olumsuz etkileyebilir. Bu tür yüzey kirlilikleri, özellikle 2 boyutlu kamera ve lazer üçgenleme sistemlerinde kaynak kanalının kenarlarının hatalı algılanmasına ve iz takibinin dengesiz hâle gelmesine neden olur.

Yüzey formu da algılama zorluklarını artıran bir diğer unsurdur. Eğrisel, çok kırıklı veya keskin geometriye sahip yüzeylerde sensör ile kaynak dikişi arasındaki mesafe değişkenlik gösterdiğinden, sistemin ölçüm hassasiyeti azalabilir. Bu gibi durumlarda sensörün montaj açısı, çalışma mesafesi ve görüş alanı dikkatle tasarlanmalı; ayrıca ölçüm algoritmaları yüzey varyasyonlarına karşı toleranslı olacak şekilde yapılandırılmalıdır.

Sonuç olarak, malzeme tipi ve yüzey durumu, kaynak izi takip sisteminin seçimini ve çalışma parametrelerini doğrudan etkileyen kritik faktörlerdendir.

3.5 Elektromanyetik Parazit ve Titreşim Etkisi

Endüstriyel kaynak ortamlarında, yüksek akım ve gerilim altında çalışan ekipmanların oluşturduğu elektromanyetik alanlar, sensör sistemlerinin kararlı çalışmasını olumsuz

yönde etkileyebilmektedir. Özellikle kaynak güç üniteleri, inverter tabanlı sürücüler ve yüksek frekanslı anahtarlama sistemleri, sensörlerin sinyal işleme devrelerinde parazite neden olabilir. Bu durum, görüntüde bozulmalara, sinyallerde parazitlenmeye veya sensör haberleşmesinde hatalarına yol açabilir.

Elektromanyetik parazitin etkisi, özellikle analog sinyal ileten kablolarda, zayıf topraklama sistemlerinde veya sensör-elektronik birimlerinin korumasız yerleşiminde daha belirgin hâle gelir. Bu nedenle, kaynak izleme sistemlerinde sinyal kablolarının elektromanyetik parazitlere dayanıklı olması, sensör-elektronik bileşenlerin elektromanyetik yalıtımlı muhafazalarla korunması önemlidir.

Bunun yanı sıra, kaynak sırasında oluşan mekanik titreşimler de özellikle hareketli parçalara entegre edilen sensör sistemlerinde ölçüm kararlılığını etkilemektedir. Sensörün veya optik bileşenlerin küçük salınımlarla bile konum değiştirmesi, özellikle yüksek hassasiyetli uygulamalarda takip sapmalarına neden olabilir. Bu etki, torç ucuna çok yakın konumlandırılmış sensörlerde daha belirgindir.

Titreşim kaynaklı hata payını azaltmak için, sensör montajının rijit malzemelerle yapılması; ayrıca sensör yazılımının, ani sinyal değişimlerine karşı filtreleme veya ortalama alma algoritmalarıyla desteklenmesi gerekmektedir.

3.6 Sensör Kaynak Noktasından Uzaklığı ve Görüş Açısı

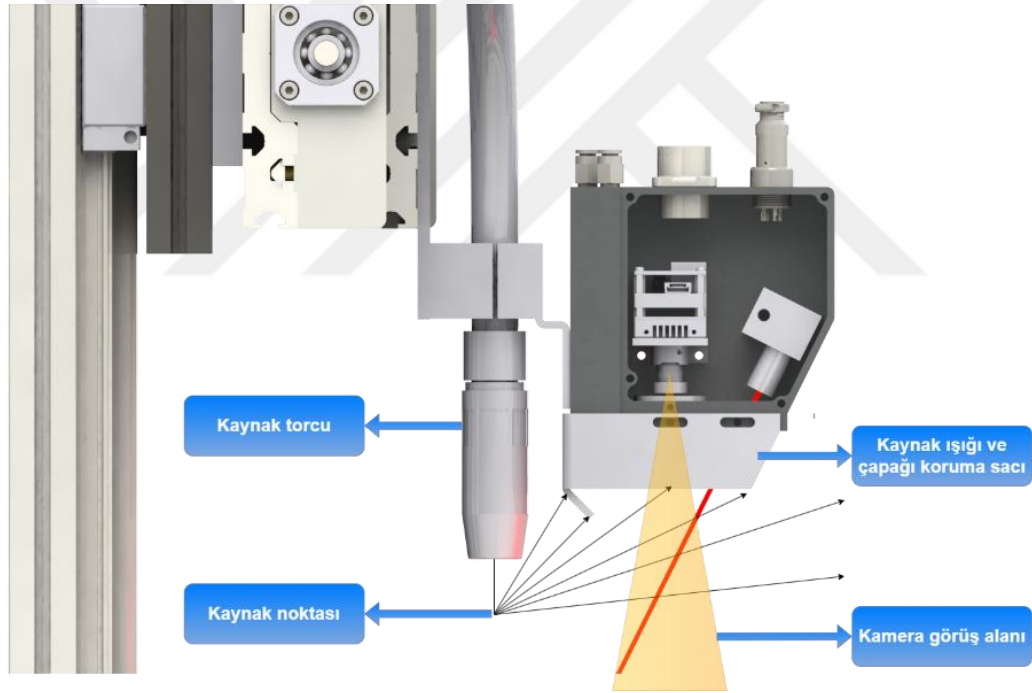
Kaynak izi takip sistemlerinde sensör ile kaynak torcu arasındaki konum ilişkisi ve sensörün görüş açısı, algılama doğruluğu ve kaynak izi takibi kararlılığı üzerinde doğrudan etkili parametrelerdir. Sensörün kaynak bölgesine olan uzaklığı, bakış açısı ve yönelimi; lazer çizgisinin veya kamera görüşünün kaynak dikişini ne kadar net ve sürekli algılayabileceğini belirler. Bu nedenle, sensörün kaynak torcuna göre konumlandırılması, sistemin genel performansını belirleyen kritik bir tasarım aşamasıdır.

Sensör, torç ucuna çok yakın yerleştirildiğinde daha güncel veri sağlayabilir, ancak kaynak ışığı, çapak, duman ve yüksek sıcaklık gibi etkenlere daha fazla maruz kalır. Bu da sensör bileşenlerinin ömrünü azaltabilir veya ölçüm kalitesini düşürebilir. Aksine, sensör torçtan çok uzak yerleştirildiğinde ise ölçüm gecikmesi ve yüzey varyasyonlarından kaynaklı sapmalar artabilir. Bu nedenle optimum mesafe

uygulamaya özel olarak belirlenmeli; hem fiziksel dayanım hem de ölçüm güvenilirliği birlikte değerlendirilmelidir.

Ayrıca sensörün bakış açısı, lazer üçgenleme sistemlerinde ölçüm doğruluğu açısından belirleyicidir. Görüş açısının kaynak kanalına dik olmaması hâlinde, lazer çizgisi yüzeyde düzgün bir şekilde yansımaz ve algılanan profil bozulabilir. Aynı şekilde, kamera tabanlı sistemlerde de eğik görüş açısı kontrast algısını ve kenar tespitini zorlaştırabilir.

Bu nedenle, sensör konumlandırması yapılırken kaynak tipi, parça geometrisi, kanal profili, torç salınımı ve prosesin genel dinamiği dikkate alınmalı; kaynak izi takip sensörünün kaynak noktasından uzaklığı ve görüş açısı optimize edilmelidir. Şekil 3.2’de kaynak ışığından ve çapağında korunmak için kullanılan koruma sacı ve kameranın görüş alanı gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Kaynak izi takip sensörü yerleşim

4. GELİŞTİRİLEN KAYNAK İZİ TAKİP SENSÖRÜ

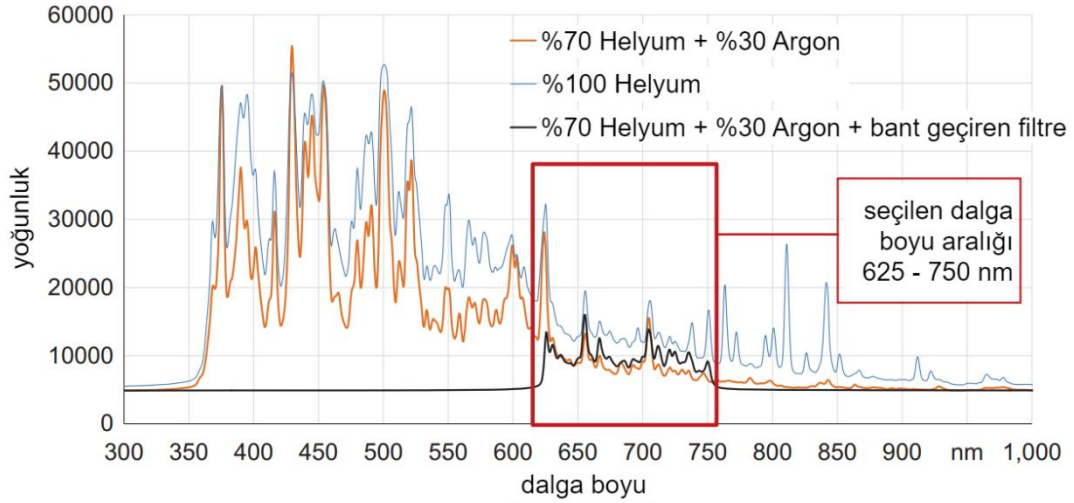
4.1 Mekanik Tasarım

Geliştirilen kaynak izi takip sensörünün mekanik tasarımı, hem optik bileşenlerin hassas konumlandırılmasını sağlamak hem de kaynak ortamının zorlu koşullarına karşı maksimum koruma sunmak amacıyla özel olarak yapılandırılmıştır. Sensör gövdesi, yüksek dayanım ve ısı iletkenliği özelliklerine sahip alüminyum kütükten işlenerek imal edilmiştir. Bu yekpare yapı, titreşimleri minimuma indirgeyerek optik hizalamanın bozulmasını engellemekte ve uzun süreli kararlı kullanım imkânı sunmaktadır.

Sensör içerisinde bir çizgi lazer ve endüstriyel kamera yer almakta olup, bu iki optik bileşen, kaynak kanalının üç boyutlu profilini çıkartmak üzere üçgenleme prensibine göre konumlandırılmıştır. Kamera, kaynak kanalını dik açıyla görecektir şekilde yerleştirilmiş ve aynı zamanda kaynak işlemi sırasında oluşan çapak ve yoğun ışık etkilerinden minimum düzeyde etkilenmesi için özel bir açı ve derinlikte konumlandırılmıştır.

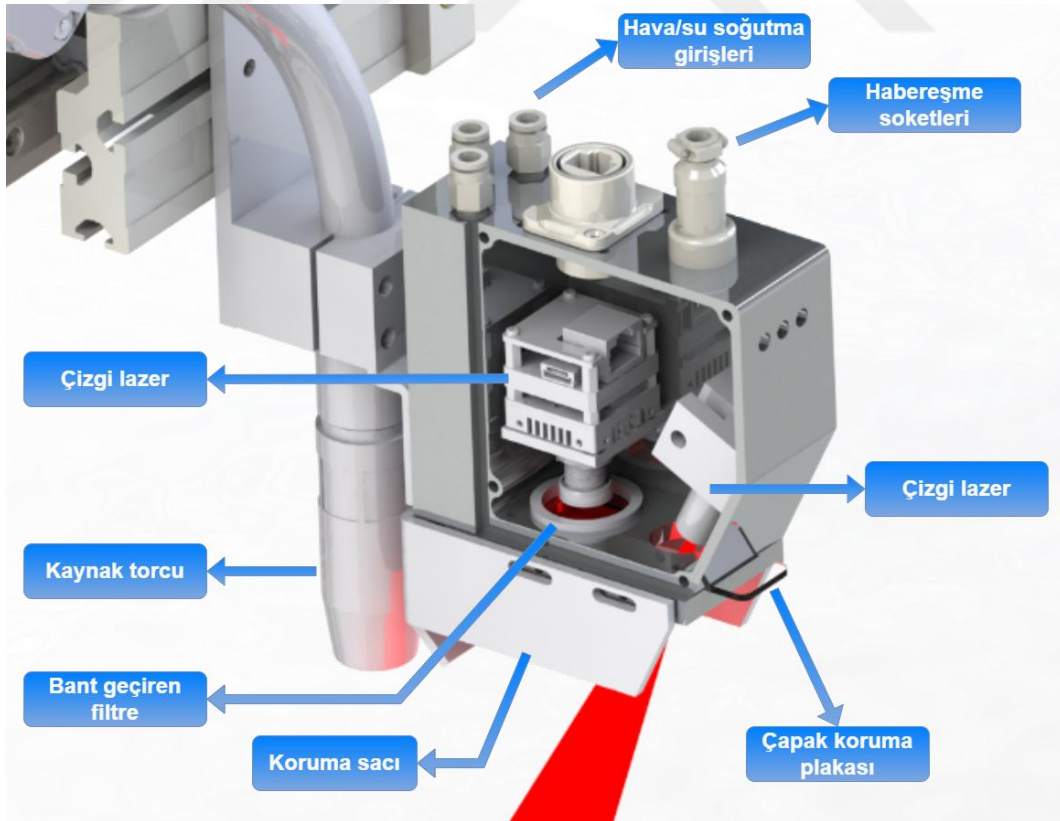
Kamera ve lazerin ön kısmında, toz, duman, çapak ve metal partiküllerinden korunmak amacıyla şeffaf pleksi bir koruma plakasına yer verilmiştir. Ayrıca kameranın önüne, kaynak işlemi sırasında çapak ve dumanın doğrudan lens üzerine gelmesini engellemek amacıyla hem darbelere dayanıklı bir koruyucu cam hem de bu camın ön yüzeyine sürekli olarak yönlendirilen bir hava perdesi entegre edilmiştir. Bu hava perdesi, kamera görüş alanının temiz kalmasını sağlayarak algılama kararlılığını artırmaktadır.

Ek olarak, kamera modülünün önüne 660 nm \pm 10 nm aralığında çalışan bir dar bant geçiren optik filtre yerleştirilmiştir. Bu filtre, özellikle gaz altı kaynak yönteminde ark ışığının en az yoğunlukta olduğu spektral bölgede çalışacak şekilde seçilmiş ve sensörün parlamaya karşı daha dirençli hâle gelmesi sağlanmıştır. Şekil 4.1’de, kullanılan koruyucu gaz türü ve karışımına bağlı olarak ışık yoğunluğunun en düşük olduğu dalga boyu aralığı gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Gazaltı kaynak dalga boyu-ışık yoğunluğu grafiği [27]

Kamera ve lazerin bulunduğu ön bölümde ayrıca, çapak birikimini ve optik yüzeylerin zarar görmesini önlemek amacıyla, çapaklara karşı düşük yapışma özelliği gösteren bakır malzemeden imal edilmiş bir koruma plakası konumlandırılmıştır. Bakırın termal iletkenliği sayesinde, çapakların yüzeye yapışmadan düşmesi sağlanmış ve sensörün uzun süreli temiz çalışması desteklenmiştir. Şekil 4.2’de kaynak izi takip sensörünün mekanik tasarımı verilmiştir.



Şekil 4.2 : Kaynak izi takibi sensör tasarımı

Sensör gövdesi, termal dayanım ve soğutma gereksinimleri göz önünde bulundurularak hem hava hem de su soğutma sistemleriyle uyumlu olacak şekilde içi oyuk kanallarla donatılmıştır. Bu sayede sensör, uzun süreli çalışma koşullarında aşırı ısınmaya karşı korunmakta ve ölçüm kararlılığı sürdürülebilmektedir.

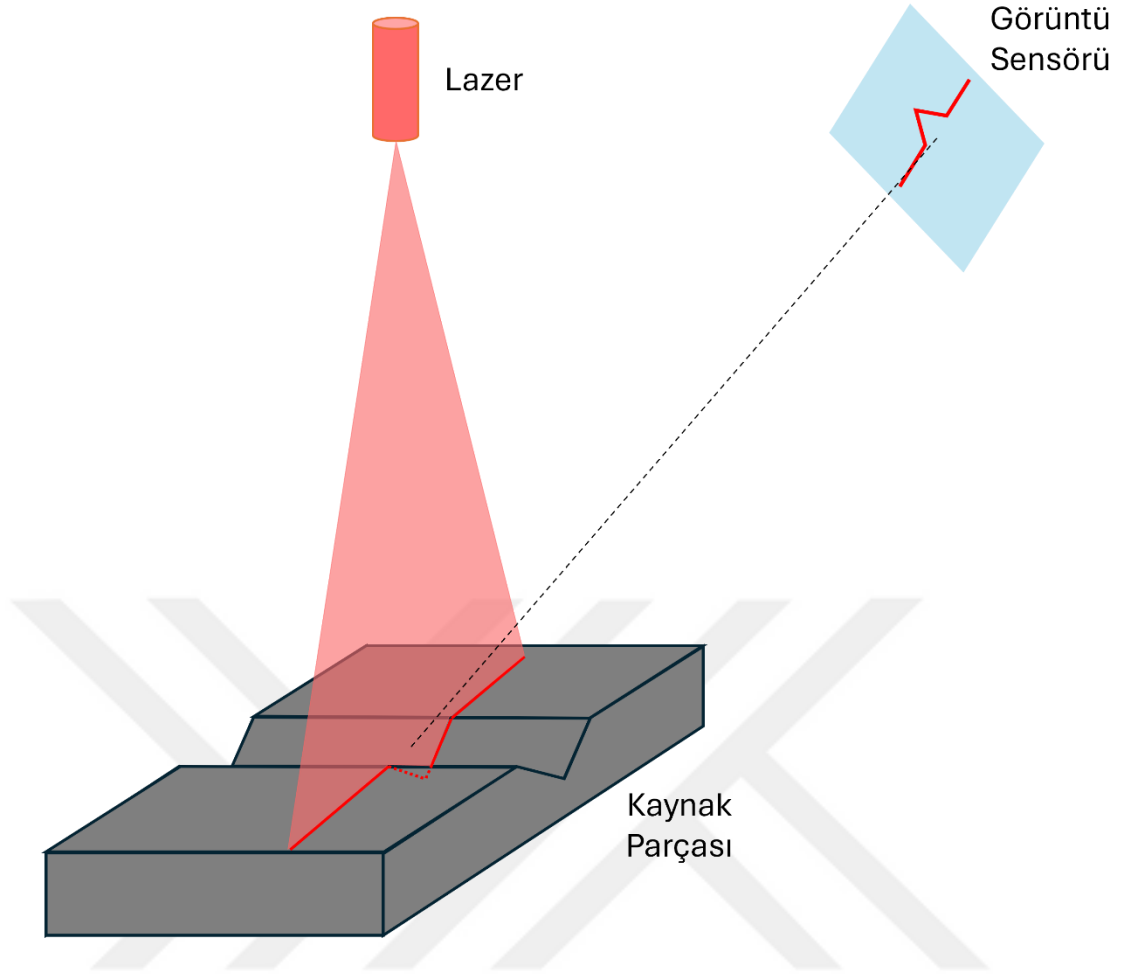
Tüm bu tasarım kararları, sensörün kaynak ortamına karşı dayanımını artırmak, optik algılama kalitesini korumak ve sistemin güvenilirliğini uzun vadede sürdürülebilir kılmak amacıyla bütüncül bir şekilde ele alınmıştır.

4.2 Lazer Üçgenleme Yöntemi

Geliştirilen sensör sistemi, kaynak dikişinin üç boyutlu konum bilgisini temassız olarak elde etmek amacıyla lazer üçgenleme prensibine göre çalışmaktadır. Bu yöntemde, 660 nm dalga boyunda çalışan bir çizgi lazer projektörü, kaynak yüzeyine dar bir lazer çizgisi yansır. Lazer ışınının iş parçası üzerindeki deformasyonu, belirli bir açıyla konumlandırılmış endüstriyel bir kamera tarafından algılanır (Şekil 4.3). Kamera ile lazer arasındaki geometrik ilişki kullanılarak, lazer çizgisinin görüntüdeki konumu ile yüzeyin yüksekliği arasında matematiksel bir bağıntı kurulmakta ve kaynak kanalının profili hassas şekilde hesaplanmaktadır.

Sensörde kullanılan optik sistem, kaynak torcuna yakın konumlandırılmış ancak çapak, duman ve yoğun ışık etkilerinden korunacak şekilde yerleştirilmiştir. Lazer ve kamera optiklerinin önüne yerleştirilen pleksi koruma plakasının yanı sıra, lazer dalga boyuna uygun dar bant geçiren filtre kullanılarak ark parlamasının olumsuz etkileri en aza indirilmiştir. Görüş alanı yaklaşık 20–30 mm genişliğinde olup, sistem ± 0.1 mm mertebesinde konum hassasiyeti sunmaktadır.

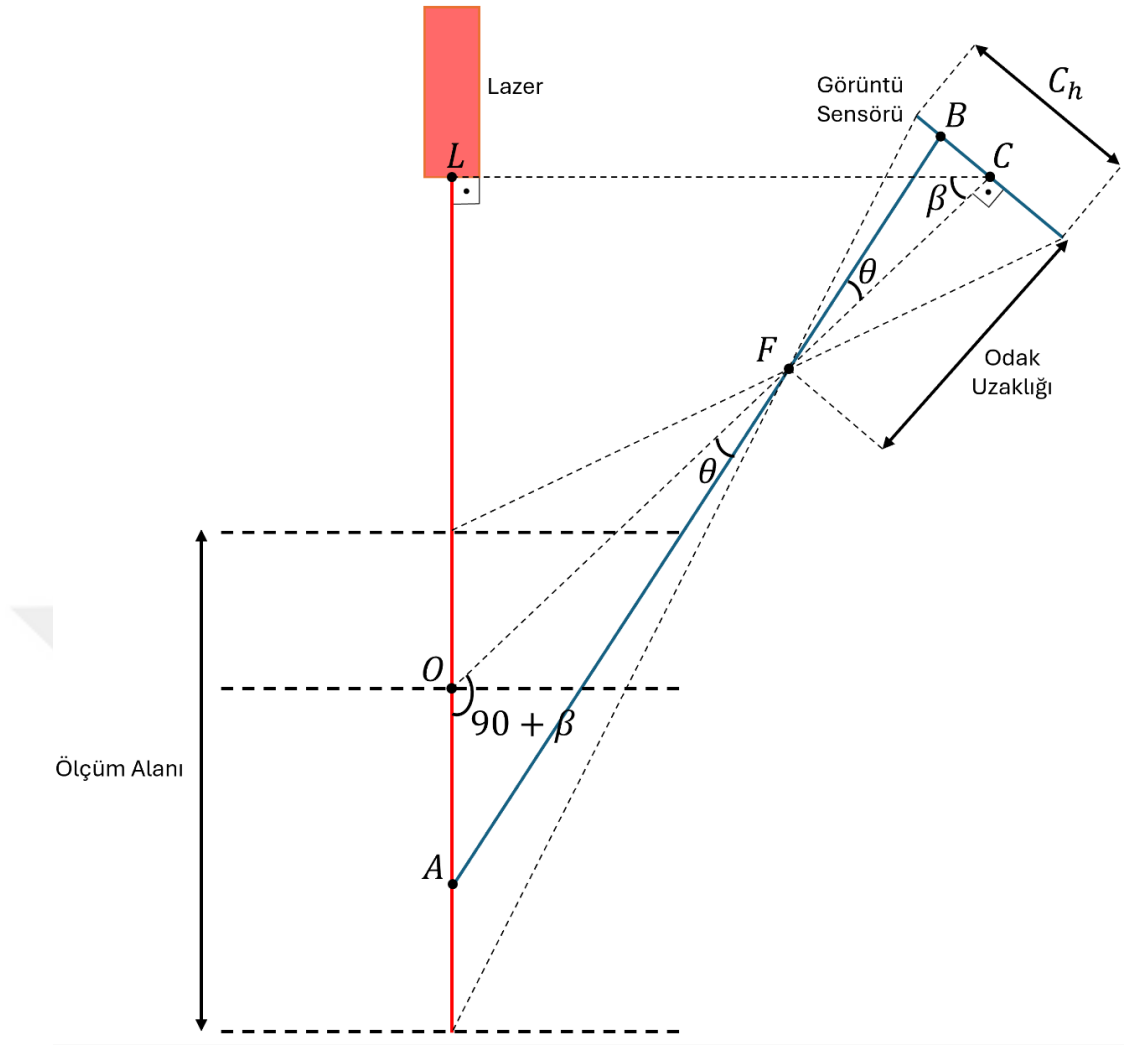
Lazer üçgenleme yöntemi, farklı kaynak tipleri ve yüzey geometrileri üzerinde kararlı şekilde çalışmakta; elde edilen konum bilgisi, robot kontrol sistemine gerçek zamanlı olarak iletilerek torcun yönlendirilmesine imkân tanımaktadır. Böylece kaynak izi, yüksek hızda ve hassasiyetle takip edilebilmektedir.



Şekil 4.3 : Lazer üçgenleme prensibi

4.2.1 Üçgenleme geometrisi ve matematiksel modelleme

Lazer üçgenleme yönteminin prensibi, çizgi lazer projektörü ile kamera arasındaki sabit taban uzaklığı ($|LC|$ ile gösterilir) ve bu iki optik eksen arasında oluşan üçgenleme açısı (β) ile tanımlanır. Çizgi lazerin projeksiyon düzlemi, kameranın görüntü düzlemiyle kesişerek her noktanın görüntü sensörü üzerinde bir (x, y) konumuna karşılık geldiği ortak bir ölçüm düzlemi oluşturur. Sensörün fiziksel boyutları, odak uzaklığı ve kamera ile sensör arasındaki açı, etkin ölçüm aralığını belirler (Şekil 4.4). Bu bölümde önce bu geometrik kavramlar detaylandırılmakta, ardından lazer çizgisi üzerindeki bir noktanın ölçüm düzlemindeki derinlik (Z) ve yanal (Y) bileşenlerine nasıl dönüştürüleceğine dair denklemlerin türetme süreci açıklanmaktadır.



Şekil 4.4 : Lazer üçgenleme derinlik ölçümü

Kamera ile lazer arasındaki açı şu şekilde tanımlanır:

$$\beta = \text{atan}(|LO| / |LC|) \quad (4.1)$$

Burada $|LO|$, lazer ile kamera arasındaki düşey sapmayı, $|LC|$ ise taban uzaklığını ifade eder.

Lazer projeksiyon düzlemi üzerindeki A noktası, kamera sensöründe B noktası olarak görüntülenir. Sensör merkezi C ile B noktası arasındaki mesafe bilindiğinden, θ açısı aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

$$\theta = \text{atan}(|BC| / |FC|) \quad (4.2)$$

$|FO|$ mesafesi, aşağıda gösterildiği şekilde Pisagor teoremi kullanılarak belirlenir.

$$|FO| = \sqrt{|LO|^2 + |LC|^2} - |FC| \quad (4.3)$$

Bilinen θ ve β açılarından yararlanılarak, orijine göre A noktasının derinliği olan $|OA|$, aşağıda gösterildiği şekilde sinüs teoremi kullanılarak hesaplanabilir.

$$\frac{|OA|}{\sin(\theta)} = \frac{|FA|}{\sin(90 - \beta - \theta)} \quad (4.4)$$

$|OA|$ mesafesi için sadeleştirilmiş ifade şöyledir:

$$|OA| = \frac{|FA| \sin(\theta)}{\sin(\beta + \theta)} \quad (4.5)$$

Lazer düzlemi üzerindeki noktanın yanal konumunu belirlemek için sisteme yukarıdan bakılır ve ilgili noktalar projekte edilir (Şekil 4.5).

Görüntü sensörü üzerindeki D ve Fp noktaları arasındaki mesafe, kameranın β açısı kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$|F_p D| = |FC| \cos \beta + |BC| \cos \beta \quad (4.6)$$

Orijin, projekte edilmiş odak noktası Fp ve lazer düzlemi üzerindeki Ap noktası tarafından tanımlanan yatay açı α , aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{|B_p D|}{|F_p D|} \right) \quad (4.7)$$

$|FO|$ uzunluğunun projekte edilmiş hali aşağıdaki şekilde hesaplanır.

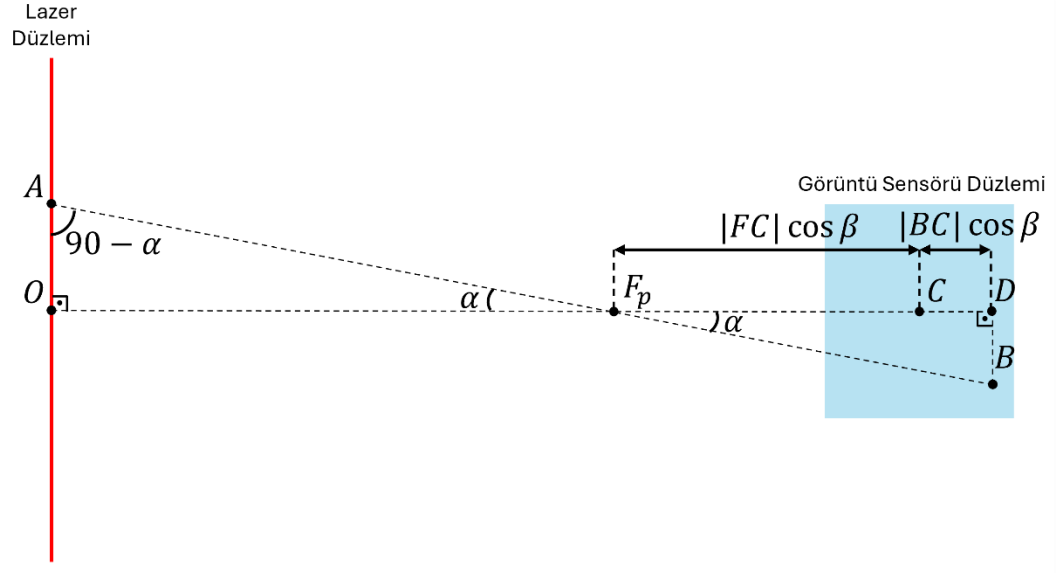
$$|F_p O_p| = |FO| \cos \beta \quad (4.8)$$

Lazer düzlemindeki yatay konumu veren Ap noktası, sinüs teoremi kullanılarak aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$\frac{|O_p A_p|}{\sin \alpha} = \frac{|O_p F_p|}{\sin(90 - \alpha)} \quad (4.9)$$

Son olarak, Ap noktası için sadeleştirilmiş denklem aşağıdaki gibidir:

$$|O_p A_p| = |O_p F_p| \tan \alpha \quad (4.10)$$



Şekil 4.5 : Lazer üçgenleme genişlik ölçümü

5. KAYNAK İZİ TAKİP ALGORİTMASI

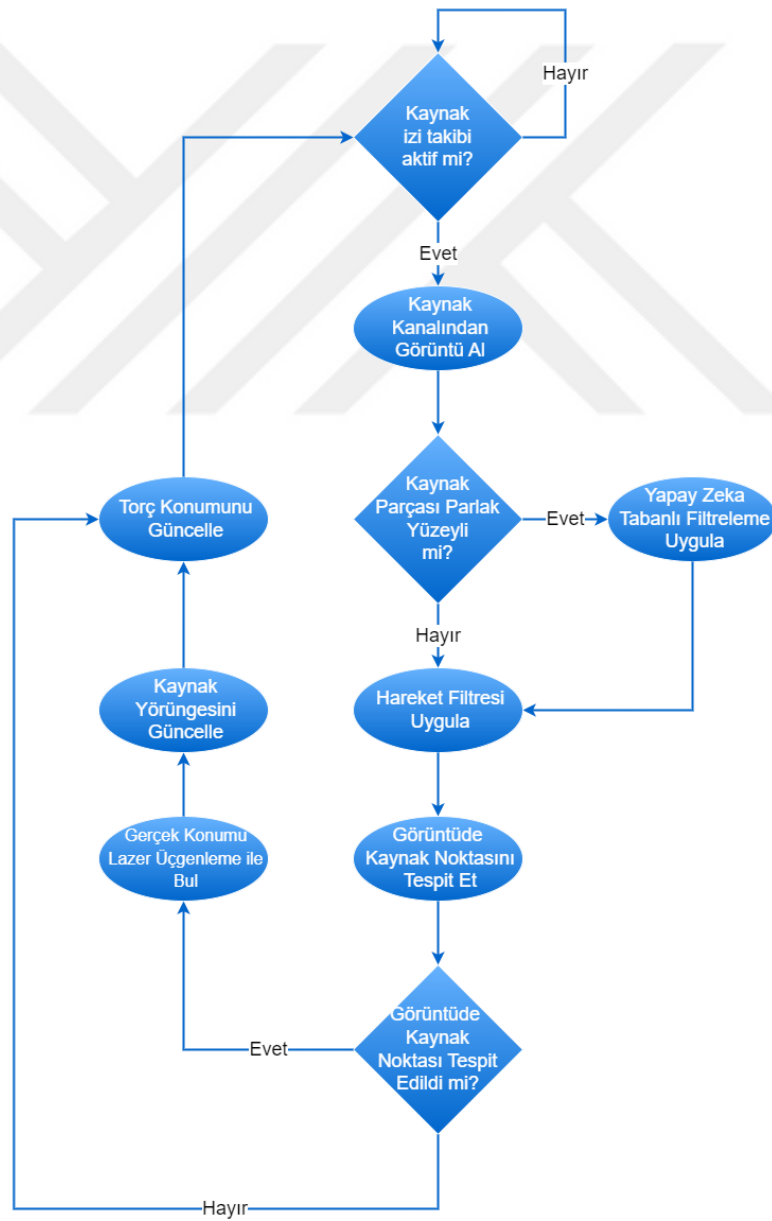
Geliştirilen kaynak izi takip sistemi, sensörden elde edilen profil verilerini kaynak torcunun yönlendirilmesinde kullanmak üzere tasarlanmış özel bir takip algoritmasıyla çalışmaktadır. Algoritma; görüntü temelli veri çıkarımı, gürültü filtreleme ve konum kontrolü olmak üzere üç aşamada işletilir. Amaç, kaynak kanalının profilinden kaynak noktasını güvenilir biçimde belirlemek, bu bilgiyi gerçek zamanlı kaynak izi takibine dönüştürmek ve torcun sapmalara karşı dinamik biçimde yönlendirilmesini sağlamaktır.

Filtreleme aşamasında klasik görüntü işleme tabanlı filtre ve yapay zekâ tabanlı filtre kullanılmaktadır. Mat ve yansısız yüzeylerde görüntü işleme tabanlı filtreleme kullanılırken parlak yüzeylerde ise yapay zekâ tabanlı filtre kullanılmaktadır. Yapay zekâ tabanlı filtreleme kaynak ışığı ve lazer çizgisinin oluşturduğu yansımaları filtrelemede geleneksel görüntü işleme yöntemlerine göre daha iyi çalışmaktadır. Filtreleme katmanı çapak ve duman kaynaklı bozucu etkileri de bastırmaktadır. Geleneksel filtreleme yöntemi ise ard arda alınan görüntüler arasındaki farkları değerlendirerek kaynak kanalı geometrisinin filtrelenmesini sağlamaktadır.

Görüntü işleme temelli veri çıkarımı aşamasında kaynak kanalı görüntülenir ve her bir profil karesinde kaynak noktasının piksel cinsinden konumu hesaplanır. Bu işlem, lazer çizgisinin merkezini veren inceltme ve kanal formuna uygun merkez noktanın belirlenmesi adımlarını içerir. Piksel düzleminde elde edilen koordinat, lazer üçgenleme metodu kullanılarak üç boyutlu koordinata dönüştürülür; böylece kaynak izi noktasının fiziksel konumu milimetre mertebesinde hesaplanır ve anlık kaynak yörüngesi bu değerlerle güncellenir. Koordinat tespitinin yapılamadığı karelerde (örneğin optik görünürlüğü geçici kaybı) algoritma, Şekil 5.1’de gösterildiği üzere sadece konum düzeltilmesi yapılarak döngüyü sürdürülür; bir sonraki karede tespit yeniden denir.

Konum kontrolü aşamasında robotun anlık konumu izlenir ve torcun nominal yörüngeye göre sürekli ofset değerleri hesaplanır. Hesaplanan sapmalar Y ve Z

eksenlerindeki konum düzeltmesine dönüştürülür ve robot kontrolcüsüne gönderilir. Düzeltmeler, sensörün örnekleme frekansı, torcun ilerleme hızı ve robotun hareket çözünürlüğüyle senkron işletilecek biçimde planlanır; böylece ölçüm–karar–uygulama zinciri boyunca tutarlı bir zamanlama korunur. Bu bütünlük yapı sayesinde, parlak veya mat yüzey koşullarında uygun filtre yolu seçilerek ölçüm kararlılığı artırılır; hesaplanan kaynak koordinatları doğrultusunda yörünge ve torç pozisyonu gerçek zamanlı olarak güncellenir ve kaynak işlemi yüksek tekrarlanabilirlikle sürdürülür. Algoritmanın işleyişi ve karar noktaları Şekil 5.1’de verilen akış diyagramında gösterilmektedir.



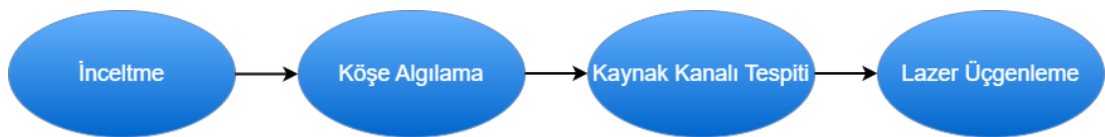
Şekil 5.1 : Kaynak izi takibi akış diyagramı

5.1 Konum Kontrolü ve Takip Stratejisi

Kaynak izi takip algoritmasının temel amacı, kaynak kanalının merkez hattını yüksek hassasiyetle tespit etmek ve bu hattı referans olarak kaynak torcunun yönlendirilmesini sağlamaktır. Bu doğrultuda, sensör sisteminden elde edilen her bir lazer profil verisi görüntü işleme adımlarıyla analiz edilir; kanal merkezi belirlenir ve elde edilen konum bilgisi robot kontrol birimine aktarılır. Süreç, ölçümlerin kararlı ve tutarlı bir referans hâline getirilmesi ilkesine dayanır; böylece torcun kaynak kanalı üzerinde kalması için gerekli yönlendirme süreklilik kazanır.

Her bir görüntü karesinde lazer çizgisi boyunca alınan kesit profili, kanalın geometrik özellikleri gözetilerek değerlendirilir. V-oluk, U-oluk veya düz kanal yapılarında, lazer çizgisindeki deformasyonlar incelenir ve buradan hareketle kanalın simetri eksenini saptanır. Belirlenen merkez noktası dikiş hattının gerçek zamanlı izlenmesini mümkün kılar; bu konum, robot sisteminin tanımlı referans eksenine göre sapma cinsinden hesaplanır ve düzeltme sinyaline dönüştürülür. Kontrol sistemi, hesaplanan sapmaları yorumlayarak kaynak torcunda X, Y ve Z eksenlerinde konum düzeltmeleri uygular. Takip stratejisi robot hareket yörüngesine sürekli biçimde entegre edilmiştir ve kaynak işlemi boyunca konum güncellemeleri kesintisiz sürdürülür. Sistem, torcun ilerleme hızı, sensörün örnekleme frekansı ve robotun hareket çözünürlüğüyle senkron çalışacak şekilde yapılandırılmıştır.

Kaynak izi takip algoritmasının görüntü işleme bölümü, tek bir işlem hattı içinde ilerleyen dört ardışık adımdan oluşur ve bu akış sırasıyla kaynak kanalından alınan görüntünün inceltilmesi, çizgi lazer profilindeki köşe noktalarının belirlenmesi, kaynak noktasının tespiti ve lazer üçgenleme metodu ile kaynak noktasının kartezyen robota göre konumunun hesaplanması şeklindedir. Şekil 5.2’de görüntü işleme adımları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Görüntü işleme adımları

İlk olarak inceltme aşamasında, çizgi lazerin oluşturduğu parlak şerit, Zhang–Suen inceltme yöntemiyle topolojiyi koruyacak biçimde yinelemeli olarak seyreltilir. Bu yöntem 3×3’lük sekiz-komşuluk penceresi üzerinde iki alt-iterasyonla çalışır; her turda

bağlantıyı bozmayacak pikseller seçici olarak kaldırılır, uç noktalar korunur ve artık silinecek piksel kalmayınca kadar süreç sürdürülür. Böylece çizginin merkezini izleyen, tek piksel kalınlığında kararlı bir iskelet elde edilir [28,29]. Bu iskelet, lazer tepesinin geometrik ortasını temsil ettiğinden, sonraki konumlandırma adımlarında hassas bir referans görevi görür.

Bunu izleyen köşe/şekil sadeleştirme aşamasında, inceltilmiş iskelet RDP (Ramer Douglas Peucker) algoritmasıyla ölçeğe bağlı bir tolerans kullanılarak basitleştirilir. RDP, bir parça boyunca baş ve son noktaları birleştirir; bu doğruya en uzak noktayı bulur, toleransın üzerindeyse eğriyi o noktadan ikiye ayırır ve aynı işlemi alt parçalarda yineler; değilse yalnız uç noktaları bırakarak alt parçayı temsil eder. Sonuç, gürültü kaynaklı küçük salınımları bastırıp gerçek şekil kırılmalarını öne çıkaran az sayıda karakteristik noktadan oluşan bir çizgidir [30,31]. Uygun tolerans seçimi, çıktının sadeliği ile şekil ana hatlarını korumak açısından kritik öneme sahiptir. RDP ile sadeleştirilmiş profil üzerinde köşe noktaları, eğim süreksizlikleri ve yerel eğrilik artışları üzerinden belirlenip işaretlenir ve gerçek kırılmaları daha belirgin hale getirir.

Kaynak kanalı tespiti aşamasında, elde edilen çizgi formu önceden tanımlı kanal kriterleriyle karşılaştırılır: V-oluk yapılarında kanal açısı ve iki yanağın simetrisi; U-oluk için yerel eğrilik dağılımı; düz kanal için karşılıklı kenarların doğrultu benzerliği ve plakalar arası açıklık tutarlılığı aranır. Uygunluk koşulları sağlandığında, kanalın simetri eksenini veya ilgili geometrik merkez (örneğin V-oluk dip noktası) piksel cinsinden hesaplanır. Son adımda bu piksel konumu, lazer üçgenleme modeliyle mm cinsine dönüştürülür ve elde edilen kaynak noktası tanımlı kaynak rotasına eklenir. Böylece her karede yinelenen sırasıyla inceltme, sadeleştirme, köşe/merkez çıkarımı ve lazer üçgenlem adımları, kanal merkezinin güvenilir biçimde elde edilmesini ve kaynak torcunun bu referansa dayalı gerçek zamanlı yönlendirilmesini mümkün kılar.

Takip algoritması yalnızca anlık konum düzeltilmesi üretmekle sınırlı değildir; aynı zamanda belirlenen kanal merkezinin sürekliliğini denetler. Ani bozulmalar, yüzey kırıkları veya sensör kaynaklı hatalar karşısında hata eşiği kontrolleri uygulanır; güvenilirlik sınırlarının dışında kalan ölçümlere karşı gerekli tedbirler alınır. Bu yaklaşım, torcun ani yön değişimlerine aşırı tepki vermesini engeller; izleme kararlılığı korunur ve kaynak kalitesi güvence altına alınır.

Sonuç olarak, geliştirilen konum kontrol algoritması; kanal merkezinin hassas biçimde belirlenmesi, bu bilginin robot sisteminde sapma olarak ifade edilmesi ve düzeltme komutlarının eşzamanlı uygulanması sayesinde, gerçek zamanlı ve kararlı bir iz takibi sağlayarak endüstriyel kaynak uygulamalarında yüksek tekrarlanabilirlik sunmaktadır.

5.2 Gürültü Filtreleme Algoritmaları

Lazer üçgenleme temelli ölçüm sistemlerinde elde edilen veriler, kaynak ortamının fiziksel koşulları nedeniyle çeşitli parazitler içerebilir. Çapak, duman, ışık parlaması ve yüzey yansımaları gibi faktörler, sensör tarafından alınan lazer profilinin bozulmasına ve kaynak kanalının konumunun hatalı algılanmasına neden olabilir. Bu tür optik parazitlerin etkisini azaltmak ve kararlı bir izleme performansı elde etmek amacıyla, geliştirilen takip algoritmasına çeşitli filtreleme yapıları entegre edilmiştir.

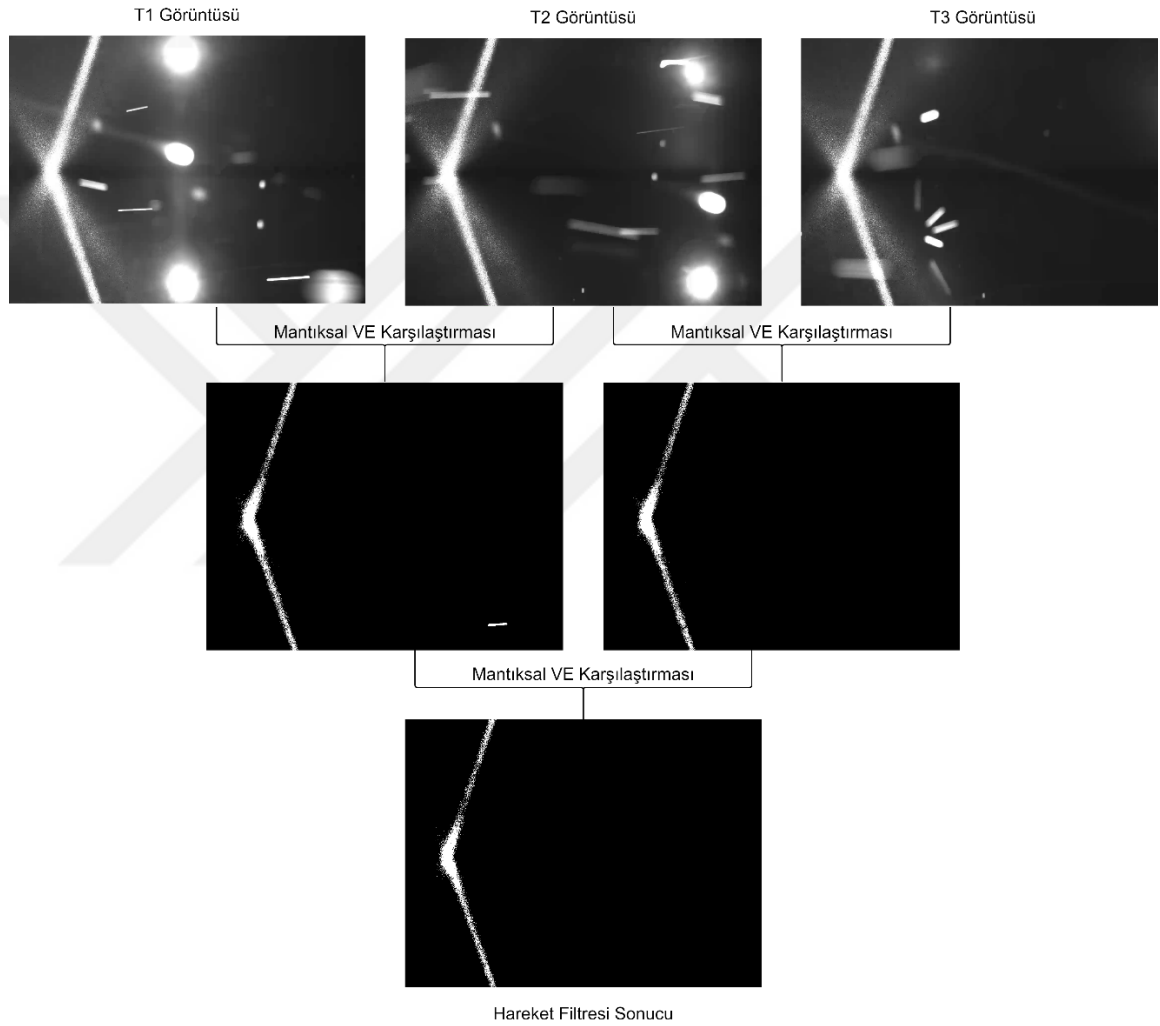
Filtreleme algoritmaları, sensörden gelen ham konum verisi üzerinde istatistiksel ve zamansal işlemler uygulayarak ölçüm kararlılığını artırmayı hedefler. Bu kapsamda, kısa süreli konum sapmalarını yumuşatmak ve robot sistemine gönderilecek verinin kararlılığını sağlamak için hareket filtresi kullanılmıştır. Ayrıca parlak yüzeyli metallere alınan kaynak görüntülerindeki çapak, gaz, ark ışığı ve yansımaların giderilmesi için gürültü filtreleyici otokodlayıcı mimarisi de kullanılmıştır.

Uygulanan bu filtreleme yöntemleri, yalnızca ölçüm gürültüsünü azaltmakla kalmayıp aynı zamanda kaynak torcunun ani yön değişimlerinden korunmasına ve daha düzgün bir kaynak hattı elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Filtreleme algoritmalarının yapısı, sensör örnekleme hızı, robot ilerleme hızı ve yüzey değişkenliği gibi parametrelere bağlı olarak uyarlanabilir biçimde tasarlanmıştır.

5.2.1 Hareket filtresi

Görüntü tabanlı hareket algılama yaklaşımları, ardışık kareleri karşılaştırarak piksel düzeyinde değişimleri saptar ve bu değişimleri “hareket” olarak yorumlar. Kaynak izi takibi bağlamında ise hareket eden öge çoğunlukla izlenmek istenen parça değil; kaynak havuzundan çıkan ışık saçılması, çapak ve gaz gibi bozucu bileşenlerdir. Bu nedenle tasarlanan hareket filtresi, hareketli pikselleri belirleyip görüntüden elemek üzere yapılandırılmıştır. Ancak kaynak kanalı profilinin zamanla biçim değiştirmesi, yanlışlıkla bu profilin de “hareket” olarak sınıflandırılıp bastırılmasına yol açabilmektedir. Bu riski azaltmak için görüntü alma frekansının dikkatle seçilmesi

kritik önemdedir: Frekans çok yüksek olduğunda ardışık kareler arasındaki farklar küçülür, gerçek hareket yavaşlamış gibi görünür ve filtre ayrırımsama gücünü kaybeder; frekans çok düşük olduğunda ise yer değiştirme büyür, gürültü büyük ölçüde elense de profilin ani değişimleri de filtre tarafından bastırılabilir. Bu çalışmada 60 Hz görüntüleme frekansı tercih edilmiş; 5–10 mm/s aralığındaki kaynak hızlarında yapılan deneylerde özellikle mat yüzeyli metallerde filtrenin başarılı şekilde çalıştığı gözlenmiştir.



Şekil 5.3 : Hareket filtresi

Filtreleme akışı üç ardışık görüntü karesi üzerinden işletilir. Öncelikle kaynak kanalından art arda üç görüntü alınır ve her birine eşikleme uygulanarak gri piksel bulutu biçiminde görülen duman bileşeni baskılanır. Ardından orta kare hem bir önceki hem de bir sonraki kare ile mantıksal “VE” işlemiyle karşılaştırılır; bu iki karşılaştırma, değişmeyen (nispeten durağan) piksel kümelerini ayrı ayrı çıkarır. Elde

edilen iki durağanlık maskesi tekrar mantıksal “VE” karşılaştırması ile birleştirilerek, üç kare boyunca konumunu koruyan piksel bölgesi elde edilir. Bu bölge kaynak kanalı profilini temsil eder ve korunur; tamamlayıcı küme ise hareketli gürültü olarak değerlendirilip görüntüden ayıklanır. Böylece, profil bilgisi mümkün olduğunca sabit tutulurken, kaynak noktasından uzaklaşarak kareler arasında yer değiştiren bozucu etkiler bastırılmış olur. Filtrenin çalışma adımları Şekil 5.3’te verilmiştir.

Sonuç itibarıyla, önerilen hareket filtresi ardışık kareler arasındaki durağanlık tutarlılığını ölçüt olarak gürültüyü ayırır; frekans seçimiyle denetlenen gecikme–baskılama ödünleşimi sayesinde, kaynak kanalı profilinin korunması ile gürültünün elenmesi arasında dengeli bir performans elde edilir. Bu yaklaşım, konum ölçümlerinin kararlılığını artırarak torcun gereksiz yön değişimlerini engeller ve iz takip kalitesini yükseltir.

Öte yandan, hareket filtresinin başlıca sınırlandığı konu, görüntüde zamanla değişmeyen gürültü bileşenlerini bastıramamasıdır. Bu durum özellikle parlak metal yüzeylerde belirgindir: kaynak arkının yaydığı ışığın ve çizgi lazerin yüzeyde oluşturduğu yansımalar ardışık kareler boyunca görelî olarak durağan kaldığından, hareket temelli ayrıştırma ölçütü bu bileşenleri gürültü olarak eleyemez. Bu nedenle parlak yüzeylerde kaynak izi tespitin kararlılığı olumsuz etkilenebilmektedir. Söz konusu yansımaların bastırılması amacıyla, hareket filtresine tamamlayıcı bir katman olarak yapay zekâ tabanlı filtreleme mimarisi tercih edilmiştir.

5.2.2 Otomatik kodlayıcı filtresi

Parlak yüzeyli metallerin kaynağı sırasında ortaya çıkan ark yansımaları, çizgi lazer parlamaları, çapak ve duman gibi bozucu bileşenlerin klasik hareket temelli filtrelerle yeterince bastırılmadığı durumlar için tek kanallı 1080×1440 çözünürlükte giriş–çıkış boyutları eş olan bir CDAE modeli tasarlanmıştır. Filtreleme ölçütü, bozulmuş girdiden temiz girdiyi yeniden kurmayı hedefleyerek dayanıklı temsillerin öğrenilmesini teşvik eder; evrimsel otokodlayıcılar ise bu filtreleme hedefini uzamsal yerellik ve ağırlık paylaşımı sayesinde verimli biçimde gerçekleştirir [32-34]. Tasarlanan CDAE mimarisi Şekil 5.5’te gösterilmiştir.

Konvolüsyon işlemi, $k \times k$ boyutlu çekirdeklerin (filtrelerin) tüm görüntü üzerinde kayan bir pencere ile dolaştırılması ve her konumda yerel alıcı-alan üzerinde ağırlık-paylaşımli doğrusal bir cevabın üretilmesine dayanır. 3×3 çekirdekler, bir piksel kenar

dolgusuyla birlikte hem kenar/sınır bilgilerini koruyup hem de parametre verimliliği sağlar; tipik CDAE kurulumlarında 3×3 çekirdekler ve 1×1 dolgu ile öznitelik haritalarının çözünürlüğü korunurken, katmanlar derinleştikçe daha karmaşık örüntüler yakalanır [33, 35].

Alt örnekleme çoğu zaman maksimum havuzlama ile uygulanır. Örtüşmeyen 2×2 pencereler üzerinde en yüksek cevabın seçilmesi, uzamsal boyutu her katmanda düzenli olarak $1/2$ ölçekte azaltırken yerel değişimlere karşı kısmi değişmezlik sağlar ve yüksek frekanslı gürültüleri zayıflatır. Uygulamada 2×2 havuzlama adımı, konvolüsyon katmanlarıyla ardışık bloklar halinde düzenlenir [35].

Kodlayıcı katmanları, konvolüsyon ve havuzlama blokları ile giriş görüntüsünü daha düşük çözünürlüklü fakat kanal boyutunda zenginleşmiş öznitelik haritalarına dönüştürür. 3×3 çekirdek, 1 piksel kayan pencere adımı ve uygun dolgu ile ayrıntı korunurken; 2×2 maksimum havuzlama, uzamsal boyutu sistematik biçimde yarıya indirerek temsil yoğunluğunu artırır. CDAE'lerin, aynı eğitim verisetinde tam-bağlantılı otokodlayıcılara göre daha düşük MSE kaybına sahiptir ve daha hızlı yakınsama sağladığı deneysel olarak rapor edilmiştir; bu, gürültü engelleme işlemlerinde kodlayıcı tarafında gürültü/desen ayrışımını güçlendirir [34,35].

Darboğaz katmanı, uzamsal boyutu indirgenmiş ve semantik açıdan yoğunlaştırılmış kodu barındırır. Gürültü engelleyici otokodlayıcı yaklaşımı, kısmen kirletilmiş girdilerden temiz temsillerin elde edilmesini zorlayarak bu ara kodu bozulmalara karşı kararlı hale getirir; böylece darboğazda, kaynak kanalı profilinin topolojisi ve çizgi sürekliliği gibi göreve özgü yapısal bilgiler korunur [32,36].

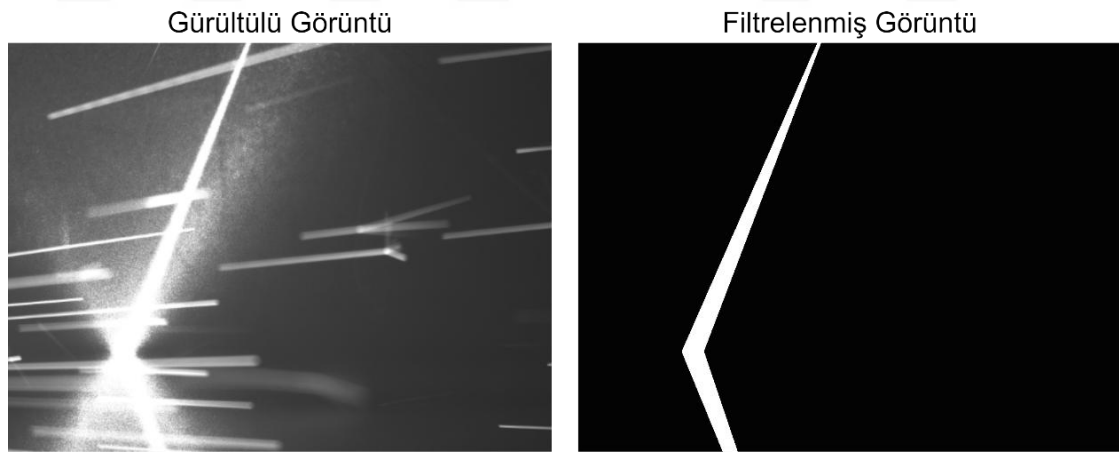
Çözücü katmanları, darboğazdan gelen temsili tekrar görüntü uzayına eşleyerek rekonstrüksiyonu sağlar. CDAE tasarımlarında çözücü, konvolüsyonel çözücü blokların yanı sıra transpozlanmış konvolüsyon katmanlarıyla çözünürlüğü kademe kademe artırır ve giriş boyutuna ulaşır. Tipik bir yapılandırmada kodlayıcı tarafında konvolüsyon ve havuzlama blokları bulunurken çözücü tarafında bir dizi transpozlanmış konvolüsyon katmanı yer alır. Şekil 5.5'te tasarlanan gürültü engelleyici otokodlayıcı mimarisin katman bilgileri verilmiştir.

Transpozlanmış konvolüsyon, standart konvolüsyonun indirgeme etkisini tersine çeviren öğrenilebilir bir yukarı-örnekleme mekanizmasıdır. İşlemsel olarak düşük çözünürlüklü öznitelik haritası daha seyrek bir ızgaraya yerleştirilir (sıfır

serpiştirme/boşluk ekleme) ve öğrenilmiş çekirdeklerle katlanarak (konvolüsyon) üst üste binen katmanlar toplanır; sonuçta yeni piksel konumlarında ara değerler üretilir ve uzamsal boyut katman katman büyütülür. Bu yaklaşım, simetrik kodlayıcı-çözücü düzenlerinde giriş boyutuna geri dönüş için yaygın biçimde kullanılır [34].

Bu çalışmanın veri kümesi 1.500 tek kanallı görüntüden oluşmaktadır; 1.200 görüntü eğitim, 300 görüntü doğrulama için ayrılmıştır. Çıkış haritası sigmoid ile 0-1 aralığına indirgenerek “geçir/bastır” olasılık yorumu yapılabildiğinden, BCE (Binary Cross Entropy) kaybı bu senaryoya uygundur; yoğunluk farklarını doğrudan minimize etmek hedeflendiğinde MSE kullanımı yaygındır. Literatürde CDAE eğitimi ve model/hiper-parametre seçimi, doğrulama MSE’sine göre yapılmakta; 3×3 çekirdek ve 1×1 dolgu ile giriş/çıkış boyutlarının korunması tavsiye edilmektedir [33,35].

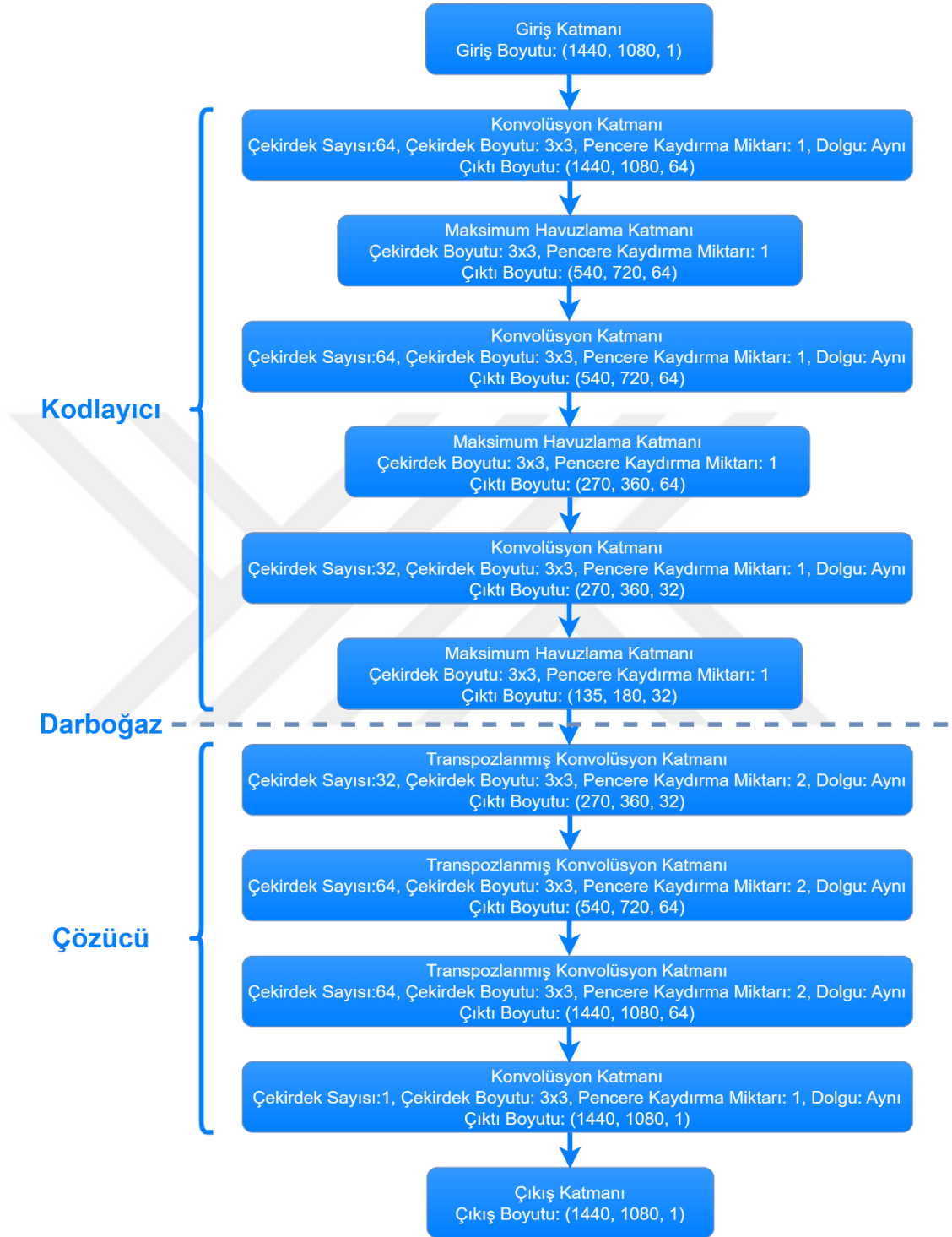
Eğitim 30 çevrim boyunca yürütülmüştür; ilk çevrim sonunda eğitim/doğrulama kayıpları 0.0792/0.1064, 14. çevrimde doğrulama kaybı 0.0613 ve 30. çevrimde 0.0591 olarak kaydedilmiş; eğitim kaybının 0.0547’ye gerilemesi öğrenmenin etkinliğini teyit etmiştir. Eğitim ve doğrulama eğrileri Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Örnek giriş-çıkış çifti Şekil 5.4’te, mimari şema Şekil 5.5’te ve gerçek zamanlı test sonucu Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



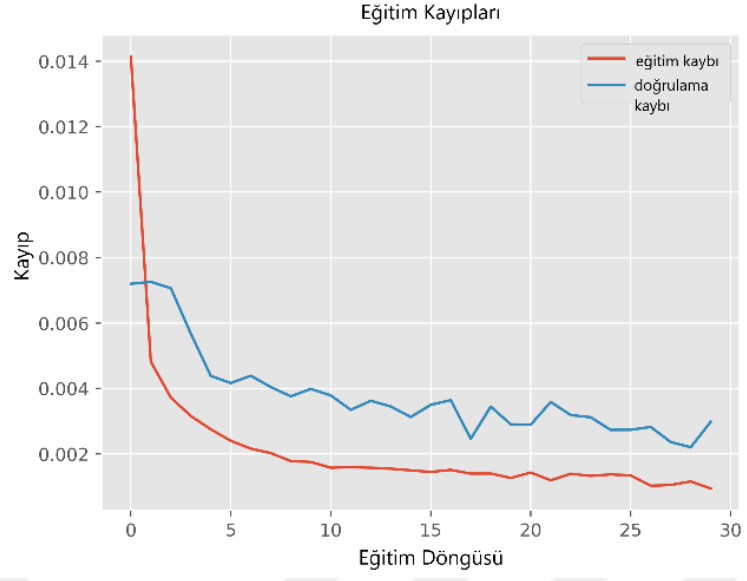
Şekil 5.4 : Eğitim veriseti görüntü çifti

Sonuç olarak, üç kademeli konvolüsyon-havuzlama ile sıkıştırma, darboğazda bozulmaya dayanıklı temsil, ve transpozlanmış konvolüsyon katmanlarıyla giriş boyutuna geri yayılım birleşimi; parlak yüzeyli kaynak görüntülerindeki yansımaya ve ark parlamalarının etkin biçimde bastırılmasını ve hat geometrisinin korunmasını sağlamaktadır. CDAE mimarilerinin gürültü filtreleme ve yeniden-oluşturma

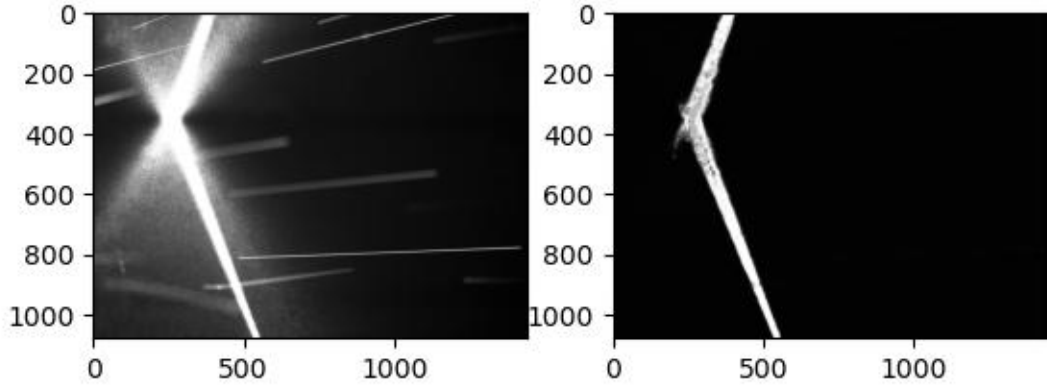
kalitesinde klasik otokodlayıcılara kıyasla üstünlük sağladığı, karşılaştırmalı deneylerce raporlanmıştır [33,34,35].



Şekil 5.5 : Gürültü engelleyici otokodlayıcı mimarisi



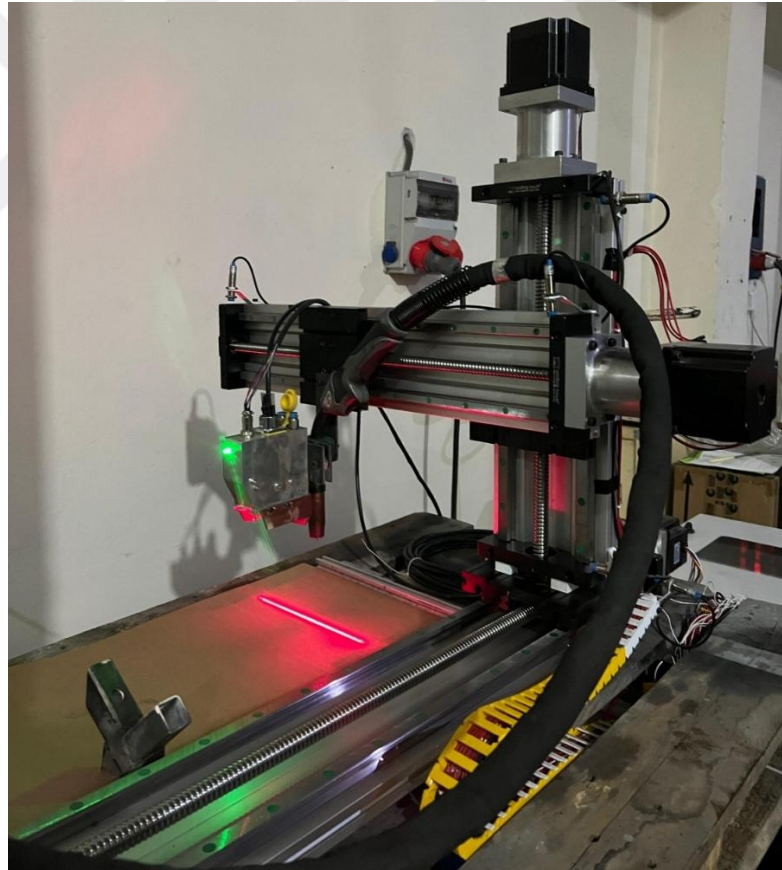
Şekil 5.6 : Eğitim sonucu



Şekil 5.7 : Otokodlayıcı modeli gerçek zamanlı test sonucu

6. GERÇEK ZAMANLI TEST SONUÇLARI

Geliştirilen kaynak izi takip sensörü, üç eksenli Kartezyen robot sistemine entegre edilerek kaynak izi takip algoritmalarının test edilmesi sağlanmıştır. Kartezyen robotun konum kontrolü, sensörden alınan görüntülerin öncelikle çeşitli filtreleme algoritmalarından geçirilmesiyle başlamakta, ardından uygun V kanal tipinin belirlenmesi ve kaynak kanalına ait koordinatların lazer üçgenleme yöntemiyle hesaplanmasıyla devam etmektedir. Hesaplanan bu koordinatlar, gerçek zamanlı olarak robot kontrol sistemine iletilmekte ve böylece robotun kaynak kanalını doğru bir şekilde takip etmesi sağlanmaktadır. Bu yapı, hem görüntü işleme algoritmalarının doğruluğunu hem de robot hareketinin hassasiyetini test etmek amacıyla başarıyla kullanılmıştır. Şekil 6.1’de gerçek zamanlı kaynak izi takip testlerinin yapıldığı kartezyen otomasyon robotu gösterilmektedir.



Şekil 6.1 : Kaynak izi takip sistemi

6.1 Eğimli Yüzeylerde Kaynak İzi Takibi

Gerçek zamanlı testler, V kanal tipine sahip numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test sürecinde, kaynak kanalına hem yukarı yönde eğim verilmiş hem de yanal yönde çeşitli açılar uygulanarak sistemin performansı değerlendirilmiştir. Bu testlerin temel amacı, geliştirilen kaynak izi takip sensörünün tolere edebileceği maksimum eğim ve açı değerlerinin belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlara göre, sistem yanal açılarda 40°'ye kadar, eğimli yüzeylerde ise 30°'ye kadar olan kanal açılarını ± 1 mm toleransla başarılı bir şekilde takip edebilmiştir. Bu durum, önerilen sistemin farklı geometrik şartlara sahip kaynak yüzeylerinde de kararlı çalışabildiğini göstermektedir.

6.2 Mat Yüzeyle Parçaların Kaynak Uygulamaları

Kaynak izi takip testleri, hem parlak hem de mat yüzeyle metal parçalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Mat yüzeyle parçalarda yapılan testlerde, kaynak sırasında oluşan görüntü gürültüleri hareket filtresi kullanılarak başarıyla filtrelenmiş ve ardından kaynak izi takip algoritmaları uygulanmıştır. Gerçekleştirilen takip testleri sonucunda, özellikle eğimli yüzeylerde dahi kaynak kalitesinin bozulmadan korunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, hareket filtresinin mat yüzeylerde etkin bir şekilde çalıştığını ve sistemin kaynak sürecine olumsuz bir etkide bulunmadan doğrulukla takip gerçekleştirebildiğini ortaya koymaktadır. Şekil 6.2'de, mat yüzeyle bir malzeme üzerinde elde edilen kaynak sonucu gösterilmektedir.



Şekil 6.2 : Mat yüzeyle malzeme kaynak sonucu

6.3 Parlak Yüzeyle Parçaların Kaynak Uygulamaları

Parlak yüzeyle malzemelerin kaynağı sırasında, yüzeyle kaynaklanan yansımalar, oluşan çapaklar ve kaynak ışığının yoğunluğu, geleneksel görüntü işleme yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olmuştur. Bu sebeple, yapay zeka tabanlı bir filtreleme yaklaşımı benimsenmiş ve otokodlayıcı mimarisi kullanılarak gürültüden arındırılmış görüntüler elde edilmiştir. Filtrelenen bu görüntüler üzerinden kaynak kanalının tipi tespit edilmiş, lazer üçgenleme yöntemi ile hesaplanan kaynak koordinatları robota iletilerek kaynak izi takibi gerçekleştirilmiştir. Eğimli olarak yerleştirilen parlak yüzeyle plakalar üzerinde yapılan testlerde, kaynak torcunun kaynak kanalında başarılı bir şekilde konumlandırıldığı ve takip sürecinin kararlılıkla sürdürülebildiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.3'te, parlak yüzeyle bir malzeme üzerinde gerçekleştirilen testin sonucu gösterilmektedir.



Şekil 6.3 : Parlak yüzeyle malzeme kaynak sonucu

7. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, üç eksenli Kartezyen robot üzerine entegre edilen bir kaynak izi takip sensörü geliştirilmiş ve bu sistemin hem yazılım hem de donanım bileşenleri ayrıntılı şekilde tasarlanarak test edilmiştir. Lazer üçgenleme prensibiyle çalışan sistem, sensörden elde edilen görüntüler üzerinden kaynak kanalının doğru bir şekilde tespit edilmesini ve robotun bu kanalı izleyerek kaynak işlemini hatasız gerçekleştirmesini amaçlamıştır.

Gerçek zamanlı uygulamalar için geliştirilen filtreleme altyapısı kapsamında, mat yüzeyli parçalarda hareket filtresi kullanılmış ve kaynak sırasında oluşan görüntü gürültülerinin başarıyla giderildiği gözlemlenmiştir. Parlak yüzeyli parçalarda ise geleneksel filtrelerin yetersiz kaldığı durumlar için derin öğrenme tabanlı otokodlayıcı mimarisi tasarlanmış ve bu mimariyle görüntülerden yüksek doğrulukla kaynak hattı çıkarımı yapılabilmektedir.

Yapılan deneysel testlerde sistemin, V kanal tipi örneklerde ± 1 mm toleransla kanal takibi yapabildiği ve yanal açı değişimlerinde 40° 'ye, eğimli yüzeylerde ise 30° 'ye kadar olan sapmaları başarıyla tolere edebildiği tespit edilmiştir. Ayrıca parlak ve mat yüzeyli plakalar üzerinde gerçekleştirilen testlerde, kaynak torcunun kanal içinde kararlı şekilde ilerlediği ve kaynak kalitesinin korunduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, geliştirilen sistem hem klasik görüntü işleme yöntemlerini hem de yapay zeka tabanlı yaklaşımları bir araya getirerek farklı yüzey koşullarında güvenilir kaynak izi takibi sağlamıştır. Bu yönüyle sistem, endüstriyel robotik kaynak uygulamalarında kullanılabilecek esnek, yüksek doğruluklu ve gerçek zamanlı bir çözüm sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Chadha, P., Singh, Z.** (2013). Health concerns in welding industry. *Health*, 2(1).
- [2] **Zou, Y., Chen, X., Gong, G., Li, J.** (2018). A seam tracking system based on a laser vision sensor. *Measurement*, 127, 489-500.
- [3] **Upadhyay, S. O.** (2023). Robotic Tactile Sensor Probe used for Contour plotting of Weld Joint in Seam Tracking System.
- [4] **Huang, W., Kovacevic, R.** (2012). Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(1), 235-248.
- [5] **Li, X., Li, X., Khyam, M. O., Ge, S. S.** (2017). Robust welding seam tracking and recognition. *IEEE Sensors journal*, 17(17), 5609-5617.
- [6] **Ding, Y., Huang, W., Kovacevic, R.** (2016). An on-line shape-matching weld seam tracking system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 42, 103-112.
- [7] **Jaeschke, B.** (2015). Seam Tracking With Arc Sensors Using Welding Power Sources for Gas Metal Arc Welding (GMAW) With Consumable Electrodes. *Technical Documentation No. Y*, 0110-1.
- [8] **Weis, Á. A., Werhli, A. V., Filho, N. L. D., Soares, L. B., Steffens, C. R., Frantz de Faria, M., Silva da Costa Botelho, S.** (2017, April). Automated seam tracking system based on passive monocular vision for automated linear robotic welding process. In *Proceedings of the Symposium on Applied Computing* (pp. 300-302).
- [9] **Fan, J., Deng, S., Jing, F., Zhou, C., Yang, L., Long, T., Tan, M.** (2019). An initial point alignment and seam-tracking system for narrow weld. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(2), 877-886.
- [10] **Xu, P., Xu, G., Tang, X., Yao, S.** (2008). A visual seam tracking system for robotic arc welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37, 70-75.
- [11] **Li, X., Li, X., Ge, S. S., Khyam, M. O., Luo, C.** (2017). Automatic welding seam tracking and identification. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 64(9), 7261-7271.
- [12] **Rout, A., Deepak, B. B. V. L., Biswal, B. B.** (2019). Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review. *robotics and computer-integrated manufacturing*, 56, 12-37.
- [13] **Nele, L., Sarno, E., Keshari, A.** (2013). An image acquisition system for real-time seam tracking. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9), 2099-2110.

- [14] **Seo, B. W., Kim, D. Y., Kim, C., Kim, S., Cho, Y. T.** (2022). Development of seam tracking device in asynchronous tandem welding with arc sensing. *Scientific reports*, 12(1), 18637.
- [15] **Zou, Y., Wang, Y., Zhou, W., Chen, X.** (2018). Real-time seam tracking control system based on line laser visions. *Optics & Laser Technology*, 103, 182-192.
- [16] **Zou, Y., Chen, T.** (2018). Laser vision seam tracking system based on image processing and continuous convolution operator tracker. *Optics and Lasers in Engineering*, 105, 141-149.
- [17] **Kiddee, P., Fang, Z., Tan, M.** (2016). An automated weld seam tracking system for thick plate using cross mark structured light. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(9), 3589-3603.
- [18] **Yasenko, L., Klyatchenko, Y., Tarasenko-Klyatchenko, O.** (2020). Image noise reduction by denoising autoencoder. In *2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)* (pp. 351-355). IEEE.
- [19] **Gondara, L.** (2016). Medical image denoising using convolutional denoising autoencoders. In *2016 IEEE 16th international conference on data mining workshops (ICDMW)* (pp. 241-246). IEEE.
- [20] **Bajaj, K., Singh, D. K., Ansari, M. A.** (2020). Autoencoders based deep learner for image denoising. *Procedia Computer Science*, 171, 1535-1541.
- [21] **Url-1** <<https://blog.xiris.com/blog/xiris-automation-more-than-just-an-innovative-product/>>, erişim tarihi 23.06.2025
- [22] **Url-2** <<https://www.hardfacingfty.com/what-is-welding-manipulator/>>, erişim tarihi 23.06.2025
- [23] **Url-3** <<https://korean-machinery.com/2023/11/27/weld-camera-2/>>, erişim tarihi 23.06.2025
- [24] **Url-4** <<https://www.ljwelding.com/beam-welding-gantry-hubdb-content/>>, erişim tarihi 23.06.2025
- [25] **Url-5** <<https://www.thefabricator.com/thefabricator/product/automationrobotics/laser-sensor-designed-for-robotic-arc-welding/>>, erişim tarihi 23.06.2025
- [26] **Xiao, R., Xu, Y., Hou, Z., Chen, C., Chen, S.** (2021). A feature extraction algorithm based on improved Snake model for multi-pass seam tracking in robotic arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 72, 48-60.
- [27] **Halisch, C., Radel, T., Tyralla, D., Seefeld, T.** (2020). Measuring the melt pool size in a wire arc additive manufacturing process using a high dynamic range two-colored pyrometric camera. *Welding in the World*, 64(8), 1349-1356.
- [28] **Zhang, T. Y., Suen, C. Y.** (1984). A fast parallel algorithm for thinning digital patterns. *Communications of the ACM*, 27(3), 236-239.

- [29] **Song, T., Pang, S., Hao, S., Rodriguez-Paton, A., & Zheng, P.** (2019). A parallel image skeletonizing method using spiking neural P systems with weights. *Neural Processing Letters*, 50(2), 1485-1502.
- [30] **Wang, X., Yang, W., Liu, Y., Sun, R., Hu, J., Yang, L., Hou, B.** (2020). Segmented Douglas-Peucker algorithm based on the node importance. *KSI Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, 14(4), 1562-1578.
- [31] **Zhao, L., Shi, G.** (2018). A method for simplifying ship trajectory based on improved Douglas–Peucker algorithm. *Ocean Engineering*, 166, 37-46.
- [32] **Vincent, P., Larochelle, H., Lajoie, I., Bengio, Y., Manzagol, P. A., Bottou, L.** (2010). Stacked denoising autoencoders: Learning useful representations in a deep network with a local denoising criterion. *Journal of machine learning research*, 11(12).
- [33] **Nishio, M., Nagashima, C., Hirabayashi, S., Ohnishi, A., Sasaki, K., Sagawa, T., ... Yamashita, T.** (2017). Convolutional auto-encoder for image denoising of ultra-low-dose CT. *Heliyon*, 3(8).
- [34] **Zhang, Y.** (2018, March). A better autoencoder for image: Convolutional autoencoder. In *ICONIP17-DCEC*. Available online: http://users.cecs.anu.edu.au/Tom.Gedeon/conf/ABCs2018/paper/ABCs2018_paper_58.pdf (accessed on 23 March 2017) (p. 34).
- [35] **Saponara, S., Elhanashi, A., & Zheng, Q.** (2021). Recreating fingerprint images by convolutional neural network autoencoder architecture. *IEEE Access*, 9, 147888-147899.
- [36] **Roy, S. S., Hossain, S. I., Akhand, M. A. H., & Murase, K.** (2018). A robust system for noisy image classification combining denoising autoencoder and convolutional neural network. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 9(1), 224-235.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ali YILDIZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2025, Bursa Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yıldız, A., Adar, N. G.** (2025, June). Development of Seam Tracking Sensor in ROS Environment. *In 2025 9th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS) (pp. 1-5). IEEE.*