

KAMERA HATA ENJEKSİYON ARACI İLE KAMERA TABANLI ROBOTİK DENETLEME SİSTEMİNİN DOĞRULANMASI VE ONAYLANMASI

Alim Kerem ERDOĞMUŞ^{1*}, Uğur YAYAN²

¹ 1 Araştırma ve Geliştirme Departmanı, Inovasyon Muhendislik Ltd.Şti., Eskişehir, Türkiye,
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-5111-5965>

² Yazılım Mühendisliği, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye,
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-1394-5209>

Anahtar Kelimeler	Öz
Robotik Doğrulama&Onaylama Hata Enjeksiyonu Robot İşletim Sistemi Kamera Tabanlı Alg	<i>Günümüzde, gelişen görüntü işleme teknikleri ile birlikte kamera tabanlı robotik inceleme sistemleri oldukça popülerlik kazanmıştır. Bu tür sistemler gıdadan, askeriye birçok sektörde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler geliştirilirken gerekli olan doğrulama ve onaylama süreçleri oldukça uzun ve maliyetli olmaktadır. Bu çalışma, kamera tabanlı endüstriyel robotik sistemler üzerinde doğrulama ve onaylama faaliyetlerini gerçekleştirmek ve iyileştirmek amacıyla geliştirilmiştir. RGB ve TOF kameralara farklı türlerde (Open, Close, Dilation, Erosion, Gradient, Motionblur, Tuz&Biber, Gaussian ve Poisson) hata enjeksiyon yöntemleri kullanılmasını mümkün Kamera Hata Enjeksiyon Aracı (CamFITool) ile gerçekleştirilmiş testler ve sonuçlar açıklanmıştır. Yapılan çalışma, VALU3S projesi kapsamında, OTOKAR'ın ROKOS robotik sistemine, CamFITool ile gerçek ortamdan alınmış kamera görüntülerinden oluşan kitaplıklara, çeşitli konfigürasyonlarda hatalar enjekte edilip, bu enjeksiyonun sisteme etkilerinin incelenmesine odaklanmıştır. Bu kapsamda 49 farklı test konfigürasyonunda hata enjeksiyonu gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, kamera tabanlı endüstriyel robotik sistemlerin daha güvenli ve stabil çalışmalarının sağlanması için, bu sistemlerin hataya dayanıklı olup olmadıklarını test eden açık kaynaklı bir hata enjeksiyon aracı olan CamFITool önerilmiştir.</i>

VERIFICATION AND VALIDATION OF CAMERA-BASED ROBOTIC INSPECTION SYSTEM WITH CAMERA FAULT INJECTION TOOL

Keywords	Abstract
Robotics Verification&Validation Fault Injection Robot Operating System Camera-based Perception	<i>Nowadays, camera-based robotic inspection systems have gained popularity with the developing image processing techniques. Such systems are used extensively in many sectors from food to military. The verification and validation processes required during the development of these systems are quite long and costly. This study was developed to perform and improve verification and validation activities on camera-based industrial robotic systems. The tests and results are explained with the Camera Fault Injection Tool (CamFITool), which enables the use of different types of fault injection methods (Open, Close, Dilation, Erosion, Gradient, Motionblur, Salt & Pepper, Gaussian and Poisson) to RGB and TOF cameras. Within the scope of the VALU3S project, the study focussed on OTOKAR's ROKOS robotic system by injecting faults in various configurations into libraries consisting of camera images taken from the real environment with CamFITool and analysing the effects of this injection on the system. In this context, fault injection was performed in 49 different test configurations. As a result, CamFITool, an open-source fault injection tool that tests the fault tolerance of camera-based industrial robotic systems, is proposed to ensure safer and more stable operation of these systems.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 23.08.2023

Submission Date : 23.08.2023

Kabul Tarihi : 23.08.2023

Accepted Date : 23.08.2023

* Sorumlu yazar: kerem.erdogmus@inovasyonmuhendislik.com

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1348531>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Sanayi alanında, endüstriyel robotlar tehlikeli ve tekrarlayan görevler için sıklıkla tercih edilmektedir. Bu robotlar, bir operatörün sürekli kontrolü olmaksızın bağımsız bir şekilde çalışabilirler. Endüstriyel robotların bu yaygın kullanımı, özellikle üretim verimliliğini artıracak iyileştirmeler ve geliştirmeler açısından endüstriyel robotik alanında önemli bir konu haline gelmiştir. Bu iyileştirmeler arasında, robotların kamera sistemlerinin düzgün ve etkin bir şekilde çalışmasını sağlamak da yer almaktadır.

Robotik kamera sistemleri, robot-insan etkileşimi, en kısa yol hesaplama, ortam ve ürün kontrolü gibi hususlarda kullanılan en önemli bileşenlerdir. Bu bileşenlerde ortaya çıkabilecek hatalar da aynı derecede kritik sonuçlar doğurabilmektedir. Robotik sistemlerde yazılımın önemi çok daha kritik hale geldiğinden ve sistemlerde oluşabilecek anormalliklerin çoğunlukla yazılım tarafından fark edilmesi mümkün olduğundan, sistemin hata enjeksiyonu ile test edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Gerçekleştirilen testler ve sistemlere uygulanan hata enjeksiyonları ile sistemlerin hata toleransları, çalışma verimlilikleri ve çalışma süreleri gibi bazı unsurlar üzerinde doğrulama yapılabilmektedir. Endüstriyel robotik sistemlerin doğrulanması, oluşabilecek hatalara karşı sistemin vereceği tepkilerin ölçülmesi ve bu hatalara karşı önlem alınması açısından önem arz eder (Fisher ve diğ., 2021). Buna istinaden yapılan çalışmada, Kamera Hata Enjeksiyon Aracı (CamFITool) (Yayan ve Erdogmus, 2022; CamFITool ROS Wiki, 2023) kullanılarak, bir endüstriyel robot sistemi olan ROKOS'un (Yayan ve Erdogmus, 2021) robot kameralarına hata enjeksiyonları gerçekleştirilip (Erdogmus ve Karaca, 2021), sistemin bu hata enjeksiyonlarına verdiği tepkiler analiz edilmiştir. Böylece endüstriyel robotik sensör verilerinin manipülasyonunun yaratacağı etkiler araştırılmıştır.

CamFITool kullanılarak örnek bir endüstriyel kameralı robotik inceleme sisteminin (ROKOS) (Yayan ve Erdogmus, 2021) yaptığı otobüs şasesi incelemesinde topladığı şase resimlerine, dokuz farklı görüntü hatası, farklı oranlar ve miktarlarda enjekte edilerek hatalı resim kütüphaneleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kütüphaneler, normal ortamdaki alınan resimlerin analiz edildiği inceleme yazılımına koyularak, analiz sisteminin otobüs şase parçalarını normal resim kütüphanesindeki incelemesinde görebildiği gibi görüp görmediğine bakılmıştır. Çalışmanın sonunda normal resim kütüphanesi ile hatalı resim kütüphanelerinin incelenmesi sonucu oluşan parça tespit farklılıkları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda hata enjeksiyonlarının tespit sistemini yanılttığı, bazı hata tiplerinde fazla parça tespit edilirken bazılarında eksik

parça miktarının fazla çıktığı, bazı hata türlerinin ise incelemeye etkisinin olmadığı görülmüştür.

Bu çalışma ile ilgili temel literatür bilgisi Bölüm 2'de, çalışmanın gerçekleştirildiği CamFITool yazılımı ve yapılan testler Bölüm 3'te, yapılan testlerin sonuçları ile ilgili analizler Bölüm 4'te açıklanmıştır.

2. Literatür

Hata enjeksiyonu, yazılımların ve sistemlerin güvenilirliğini değerlendirmek için önemli bir metodolojidir. Yazılıma aşına olan araştırmacılar, mühendisler vb. İlgili sistemlerde yazılım hatalarına neden olabilecek enjeksiyonlara hem donanım hem de yazılım olarak uygulanabilecek birçok yeni yöntem geliştirmektedir. Geliştirilmekte olan bu donanım ve yazılım yöntemleri arasında görülen durumlar şu Figürdedir: Yazılım geliştiricilerin ve araştırmacıların erişebildiği hata enjeksiyon siteleri, enjeksiyon maliyeti, sistemde vs. oluşan arızanın neden olduğu bozulma düzeyi gibi faktörlerdir. Donanıma hata enjeksiyonu ile devreler ve yazmaçlar gibi yazılımla düzeltilmeyen çip pinlerinde ve dahili bileşenlerde hatalar oluşturulabilir. Öte yandan, yazılıma hata enjeksiyonunda, yazılımın genel durumu düzeyinde doğrudan bir değişiklik üretmek mümkündür. Bu durumlar göz önüne alındığında, düşük seviyeli arıza tespit ve maskeleye mekanizmalarını değerlendirmek için donanım yöntemlerini ve daha yüksek seviyeli mekanizmaları test etmek için yazılım yöntemlerini kullanmak mümkündür (Everingham, Van Gool, Williams, Winn ve Zisserman, 2010; Kendall, Grimes ve Cipolla, 2015; Park ve Mu Lee, 2017; Sciforce, 2019; OpenCV, 2023; Quigley ve diğ., 2009).

Endüstriyel robotik alanında robot kameralarına hata enjeksiyonu yöntemiyle doğrulama sistemleri henüz yeni gelişmekte olan bir konudur. AVFI sistemi endüstriyel alanda olmasa da otonom araç kameralarına hata enjeksiyonu ile doğrulama yapılması üzerinde çalışan bir yazılım örneği olarak gösterilebilir (Jha, Banerjee, Cyriac, Kalbarczyk ve Iyer, 2018). AVFI ekibi, Unreal Engine ve CARLA simülasyonu kullanarak oluşturdukları sanal ortamdaki otonom araç kameralarının kameralarına hata enjeksiyonları gerçekleştirerek doğrulama üzerinde çalışmalar yürütmektedir. Kamera hatalarını genel olarak sensör hataları olarak ele alan ekip, kameraların gerçek hayatta karşılaşılabileceği gürültü, su damlası ya da tıkanıklık (occlusion) gibi sorunları simule ederek enjeksiyon yapmaktadır. CamFITool ise endüstriyel robotik kameralara özelleştirilmiş, ROS destekli hem simülasyon hem de gerçek ortam senaryolarına uygulanabilir bir hata enjeksiyon aracı olmak konusunda örnek teşkil edecek bir çalışmadır.

Camera Fault Injection Tool (CamFITool), bu tür robotik sistem hataları oluşmadan önce önlem alabilmek için robot kameralara gerekli hata enjeksiyonlarını yapan

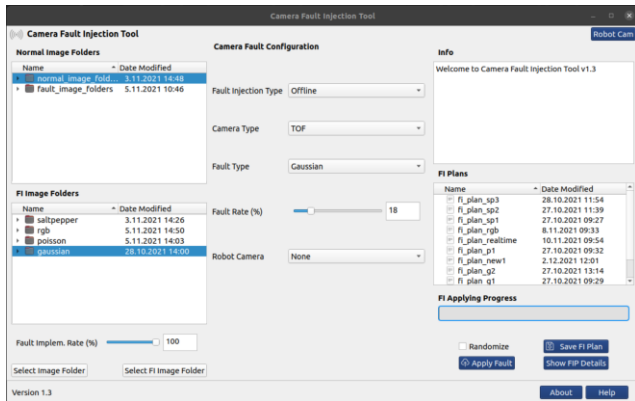
açık kaynaklı bir araçtır. Python tabanlı CamFITool, ROS Noetic sisteminde çalışan bir robotik sistem olan Simulation Based Robot Verification Tool (SRVT) üzerinde test edilmiştir (Erdogmus ve Karaca, 2021; Yayan ve Erdogmus 2021). Bu testler, SRVT'de simüle edilen ROKOS sisteminin robot kameralarında gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, ROS ortamında böyle bir hata yerleştirme test aracının eksikliğini gidermek için açık kaynaklı olmuştur.

3. Yöntem

Bu bölümde CamFITool yazılımının teknik detaylarından ve yapılan çalışmanın yöntemlerinden bahsedilmiştir. Yapılan çalışmalarda araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3.1. Kamera Hata Enjeksiyon Yazılımı (CamFITool)

Bu çalışma, robotik sistemlerde doğrulama ve onaylama faaliyetlerini gerçekleştirmek için RGB ve TOF kameralara, son teknoloji hata enjeksiyon yöntemlerinin kolaylıkla uygulanabilmesini sağlayan, açık kaynaklı bir yazılım aracı olarak CamFITool'u önermektedir. Bu araç Python3 temelli, arayüzü ise Qt5'te oluşturulmuş bir yazılım aracıdır. Ayrıca robotik paketler üzerinde doğrudan testler yapılabilmesi için ROS Noetic uyumlu versiyonu da mevcuttur (CamFITool ROS Wiki 2023).



Şekil 1. CamFITool Arayüzü

CamFITool arayüzünde, istenen hata enjeksiyon türlerinin ayarlandığı, girdi/çıkış klasörlerinin belirlendiği ve uygulanan testlerin çıktılarının görüntülediği çeşitli menü ve pencereler bulunur. Bu menülerden biri olan "Kamera Hatası Yapılandırma" menüsü (arayüzün merkezinde - Şekil 1'de), uygulanmak istenen hataların konfigüre edildiği kısımdır. Menüdeki bölümlerin açıklamaları aşağıdaki gibidir:

- **Hata Enjeksiyon Yöntemi (Fault Injection Type):** Bu kısımda, kullanıcı hata enjeksiyon türünü seçer. Offline ve Realtime olmak üzere iki seçenek vardır. Offline seçildiğinde son iki

seçenek ekrandan silinir (ROS Camera Topic ve Camera Stream Frequency kısımları).

- **Kamera Türü (Camera Type):** Bu kısımda hata enjeksiyonu yapılacak kamera türü (RGB veya TOF) seçilebilir. Her iki seçenek için de Hata Tipi (Fault Type) kısmında farklı hata tipleri sunulmaktadır.
- **Hata Türü (Fault Type):** Bu kısımda, kullanıcı uygulanacak hata türünü seçer. RGB kamera için Open, Close, Dilation, Erosion, Gradient ve Motion-blur hata türleri, TOF kamera için Tuz&Biber, Gaussian ve Poisson hata türleri mevcuttur.
- **Hata Oranı (Fault Rate):** Hata enjeksiyon oranını kullanıcının belirlediği kısımdır. Oranın etkisi, görüntünün bozulmasıyla doğru orantılıdır.
- **Robot Kamerası (Robot Camera):** Bu kısım, kullanıcının hata uygulanacak kamera akışının türünü seçtiği özelliktir. RGB ve TOF olmak üzere iki farklı kamera türü tanımlanmıştır.
- **ROS Kamera Konusu (ROS Camera Topic):** Kullanıcının hata enjekte etmek için ROS kamera akışının ilgili konusunu seçtiği özelliktir. Sadece Realtime modunda kullanılabilir.
- **Kamera Yayın Frekansı (Camera Stream Frequency):** Bu kısım, ROS kamera yayın frekansının belirlendiği kısımdır. Realtime modunda kullanılabilir.

CamFITool, TOF kameralar için üç, RGB kameralar için altı farklı hata türünde enjeksiyon gerçekleştirebilmektedir. Uygulanabilir hatalar ve bu uygulamanın türleri hakkında bilgiler Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. CamFITool hata tipi listesi

Hata Türü	Kamera Türü	CamFITool Hata Enjeksiyon Yöntemi
Dilation	RGB	Realtime/Offline
Erosion	RGB	Realtime/Offline
Open	RGB	Realtime/Offline
Close	RGB	Realtime/Offline
Gradient	RGB	Realtime/Offline
Motion-blur	RGB/TOF	Realtime/Offline
Gaussian	TOF	Offline*
Poisson	TOF	Offline*
Tuz&Biber	TOF	Offline*

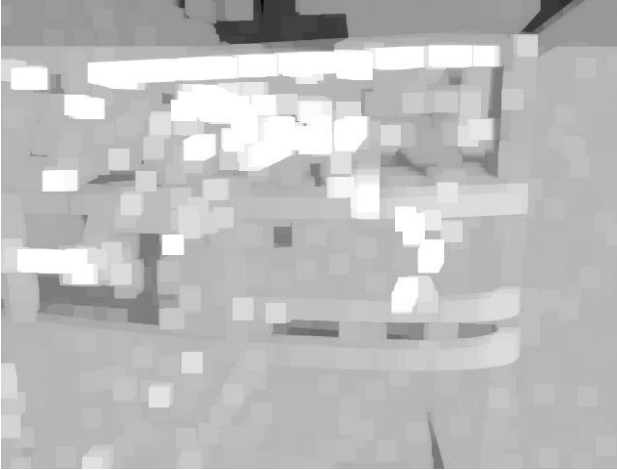
* Realtime Modu sonraki güncellemelerde eklenecek.

3.2. CamFITool ile Uygulanan Hata Tipleri

CamFITool kullanılarak kamera sistemlerine ya da resim veritabanlarına dokuz farklı hata tipinde enjeksiyon yapılabilmektedir. Bu çalışma için,

bahsedilen her hata türünde enjeksiyon, gerçek endüstriyel kamera tabanlı robotik sistemden (ROKOS) [Bölüm 3.3'te açıklanmıştır] alınmıştır. Bu hatalar aşağıda sıralandığı gibidir:

Dilation: Bir görüntünün vurgulanan kısımlarını büyüten/genişleten bir hata türüdür (Jankowski, 2006). CamFITool içinde RGB kamera türü görüntülere Realtime ve Offline modlarında uygulanabilir (Şekil 2).



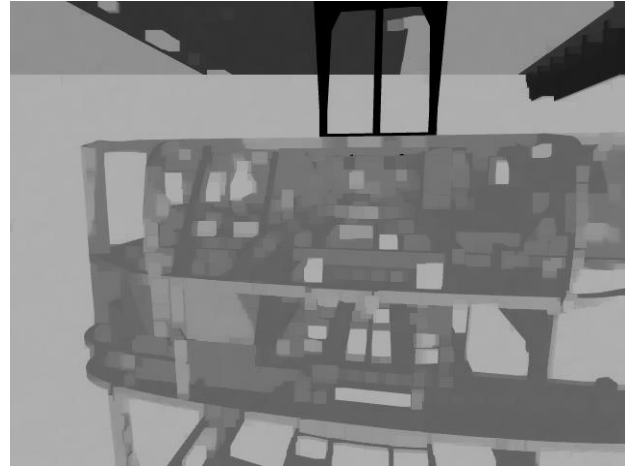
Şekil 2. Dilation Hata Enjeksiyon Örneği

Erosion: Bir görüntünün vurgulanan kısımlarını küçülten/daraltan bir hata türüdür (Jankowski 2006). CamFITool içinde RGB kamera türü görüntülere Realtime ve Offline modlarında uygulanabilir (Şekil 3).



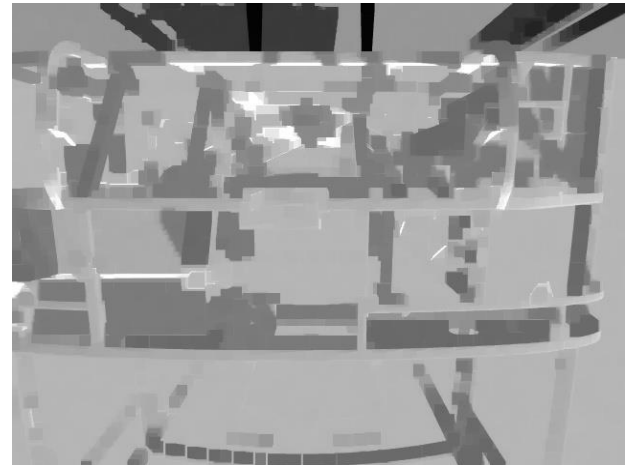
Şekil 3. Erosion Hata Enjeksiyon Örneği

Open: Bir görüntünün önce dağlanıp, ardından yayılmasıyla oluşan hata türüdür (Acton ve Mukherjee 2000). CamFITool içinde RGB kamera türü görüntülere Realtime ve Offline modlarında uygulanabilir (Şekil 4).



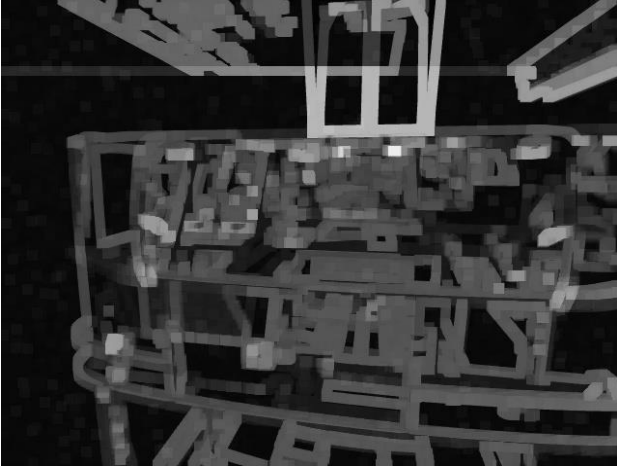
Şekil 4. Open Hata Enjeksiyon Örneği

Close: Bir görüntünün önce yayılıp, ardından dağlanması ile oluşan hata türüdür (Open türünün tam tersi) (Acton ve Mukherjee, 2000). CamFITool içinde RGB kamera türü görüntülere Realtime ve Offline modlarında uygulanabilir (Şekil 5).



Şekil 5. Close Hata Enjeksiyon Örneği

Gradient: Bir görüntünün lekeli versiyonundan kazanılmış versiyonun çıkarılmasıyla ortaya çıkan hata türüdür (Larnier, Fehrenbach ve Masmoudi, 2012). CamFITool içinde RGB kamera türü görüntülere Realtime ve Offline modlarında uygulanabilir (Şekil 6).



Şekil 6. Gradient Hata Enjeksiyon Örneği

Motion-blur: Bir görüntüde bulanıklık sağlanarak oluşturulur (Ji ve Liu, 2008). CamFITool içinde RGB kamera türü görüntülere Realtime ve Offline modlarında uygulanabilir (Şekil 7).



Şekil 7. Motion-blur Hata Enjeksiyon Örneği

Gaussian: Gauss gürültüsü, Gauss dağılımı olarak da bilinen, normal dağılıma eşit bir olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip istatistiksel gürültüdür. Diğer bir deyişle gürültünün alabileceği değerler Gauss dağılımıdır (Şekil 8) (Barbu, 2013). CamFITool içinde TOF kamera türü görüntülere Offline modunda uygulanabilir.



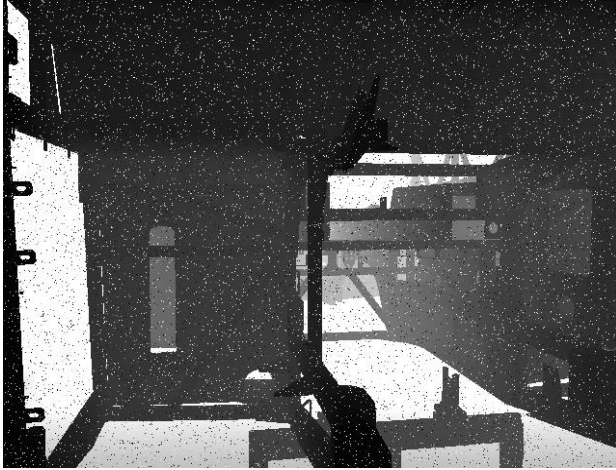
Şekil 8. Gaussian Hata Enjeksiyon Örneği

Poisson: Atış gürültüsü veya Poisson gürültüsü, Poisson süreci ile modellenebilen bir gürültü türüdür. Elektronikte, yarıiletken gürültüsü, elektrik yükünün ayrık doğasından kaynaklanmaktadır. Atış gürültüsü ayrıca, atış gürültüsünün ışığın parçacık yapısıyla ilgili olduğu optik cihazlarda foton sayımında da oluşur (Şekil 9) (Blanter ve Büttiker, 2000; Schottky 2018). CamFITool içinde TOF kamera türü görüntülere Offline modunda uygulanabilir.



Şekil 9. Poisson Hata Enjeksiyon Örneği

Tuz&Biber: Tuz&Biber gürültüsü, sistemlerde genellikle gözlemlenebilen bir gürültü türüdür. Darbe gürültüsü olarak da bilinir. Bu gürültü, görüntü sinyalindeki keskin ve ani bozulmalardan kaynaklanabilir. Seyrek olarak oluşan beyaz ve siyah pikseller olarak kendini gösterir. (Şekil 10) (Rosin ve Collomosse, 2012). CamFITool içinde TOF kamera türü görüntülere offline olarak uygulanabilir.



Şekil 10. Tuz&Biber Hata Enjeksiyon Örneği

İleride eklenmesi muhtemel hata tipleri:

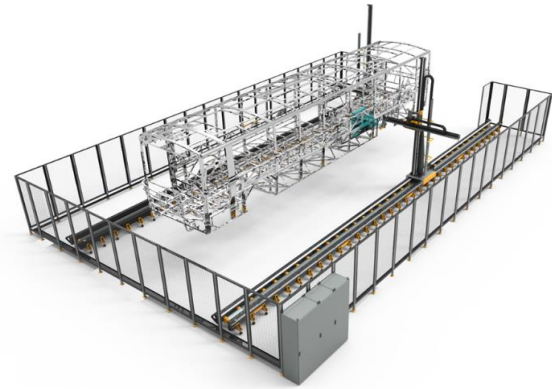
- **Partialloss (RGB/TOF - Realtime/Offline):** Resimlerin bir kısmının yatay veya dikey düzleminden kesilerek parçalı yayın alınmasına neden olan bir hata türüdür.
- **Freeze (RGB/TOF - Realtime):** Bir görüntü akışının donmasıyla kaydedilen her resmin, donma anındaki resim olmasına neden olan hata türüdür.
- **Slow (RGB/TOF - Realtime):** Bir video akışının yavaşlamasıyla, resmin kaydedilmesi gereken noktalarda kaydedilmemesini ve kayıtlarda sapmaların oluşmasına neden olan hata türüdür.
- **Random (RGB/TOF - Realtime):** Bir görüntü akışındaki görüntü piksellerinin rastgele değişmesi ile görüntüde parazit oluşmasına neden olan hata türüdür.

4. Bulgular

Bu bölümde CamFITool'un doğrulama testlerinin yapıldığı test ortamı ve test bulguları açıklanmıştır.

4.1. Realtime Fault Injected Image Dataset from SRVT Simulation Environment

CamFITool hata enjeksiyon testleri, ROKOS robot kameraları tarafından kaydedilen 293 şase görüntüsü üzerinde gerçekleştirilmiştir (Erdogmus ve Karaca, 2021; Yayan ve Erdogmus, 2021) (Şekil 11). Enjeksiyon sonrasında elde edilen hatalı resimler, şasede eksik parça olup olmadığını tespit etmek için geliştirilen OTOKAR'ın Kamera Kalite Kontrol Sistemi yazılımı ile incelenmiş (Şekil 12), test sonuçları bu bölümde analiz edilmiştir.



Şekil 11. Test Ortamı Olan ROKOS Kameralı Robotik Kontrol Sistemi

Kameralı kalite kontrol sistemi, ROKOS'un sistemdeki otobüs şasesinin çeşitli konumlardan fotoğraflanması ve bu fotoğrafların yazılım tarafından incelenerek eksik parça olup olmadığı bilgisinin alınmasını sağlayan bir sistemdir. Derinlik kameralarından (TOF) alınan görüntüler, derinliklerine göre farklı renklerle parçaların analiz edilmesi ile parça sayısı bilgisinin edinilmesini sağlar. Elde edilen sonuçları arayüzde gösterir. Ayrıca arayüz, görüntülen parçalar ışığında otobüs şasesinin modelini inşa ederek, görsel bir geribildirim de vermektedir.

4.2. Test Sonuçları

Bu testler kapsamında, ROKOS kameralarından alınan normal görüntülere, dokuz farklı hata tipi, farklı oran ve miktarlarda enjekte edilerek hatalı resimler oluşturulmuştur. Daha sonra kamera kalite kontrol yazılımına girdi olarak hata enjekte edilmiş görüntülerden oluşan bu görüntü kitaplıkları verilmiş ve yazılımın normal görüntü kitaplığı incelenerek elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Testlerde uygulanan hata enjeksiyon yöntemleri ve hata uygulama oranları Tablo 2'de verilmiştir.

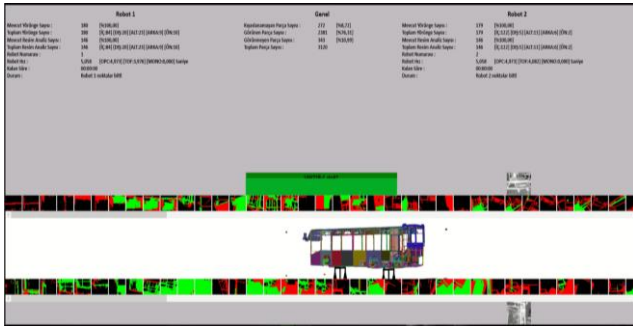
Tablo 2. CamFITool ile uygulanan hata yöntemleri ve hata oranları

Kamera Türü	Hata Yöntemi	Test Kodu	Uygulanan hata yüzdesi (%)	Kütüphanedeki hatalı resim oranı (%)	Hatalı Resim Sayısı
TOF	Tuz&Biber	SP	5%	10%	29
	Gaussian	G	20%	30%	88
	Poisson	P	40%	100%*	293*
RGB	Open	O	5%	10%	29
	Close	C	20%	30%	88
	Dilation	D	40%	100%*	293*
	Erosion	E			
	Gradient	GR			
	Motionblur	MB			

*Yalnızca %20 hata oranı tüm resimlere tek seferde uygulanmıştır. Diğer hatalı görüntü miktarları her hata oranında test edilmiştir.

Tablo 2'de görüldüğü gibi, iki farklı kamera türü tarafından desteklenen dokuz farklı kamera hatası, ROKOS kameralar tarafından alınan normal bir görüntü kitaplığına enjekte edilmiştir. ROKOS kameradan çekilen resimler TOF kamera tipi olmasına rağmen RGB kameralara uygulanan hata tiplerinin yazılıma etkisi de incelenmiştir. Her hata için %5, %20 ve %40 hata oranları ile üç farklı uygulama testi belirlenmiştir. Bu hata oranları, görüntü kitaplığının %10 ve %30'una uygulanacak Figürde değiştirilerek uygulanmıştır. Ek olarak tüm görüntü kitaplığına %20 oranında hata enjeksiyonu da uygulanarak, yedi farklı hata enjeksiyon planı test edilmiş oldu. Dolayısıyla bu çalışmada toplam 49 farklı hata enjeksiyon planı uygulanmış ve sonuçları analiz edilmiştir.

Tablo 3'te kalite kontrol tespit yazılımında ROKOS sisteminden elde edilen normal görüntü veri tabanının çıktıları verilmiştir. Hata testleri uygulandıktan sonra elde edilen yeni veriler ile Tablo 3'teki standart durumda elde edilen veriler karşılaştırılarak çıkarımlar yapılmıştır.



Şekil 11. OTOKAR Kamera Kalite Kontrol Sistemi arayüzü.

Tablo 3. ROKOS'un normal görüntü veritabanı kullanılarak elde edilen kalite kontrol sistemi yazılım çıktısı

	Görüntülenen Parça Say.		Görüntülenemeyen Parça Say.		Kıyaslanamayan Parça Say.		Toplam
	%	Miktar	%	Miktar	%	Miktar	
Normal Görüntü Veritabanı	76.31	2381	10.99	343	8.72	272	2996

CamFITool kullanılarak yapılan hata enjeksiyonları sonucunda elde edilen hatalı görüntü kütüphaneleri tek tek kalite kontrol sistem yazılımından geçirilmiştir. Her bir hata enjeksiyon testinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki alt bölümlerde analiz edilmiştir.

4.2.1 Tuz&Biber Hata Enjeksiyon Testleri

Tuz&Biber hatasının uygulandığı görüntü kitaplıklarının kalite kontrol yazılımından

geçirilmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Tuz&Biber hata enjeksiyon test sonuçları

Test Kodu	Uygulanan hata yüzdesi (%)	Küt. hatalı resim oranı (%)	Görüntülenen Parça Sayısı		Görüntülenemeyen Parça Sayısı	
			%	Miktar	%	Miktar
SP-1	5%	10%	77.82%	2428	9.49%	296
SP-2	20%		77.82%	2428	9.49%	296
SP-3	40%		78.97%	2464	8.33%	260
SP-4	5%	30%	80.77%	2520	6.54%	204
SP-5	20%		81.25%	2535	6.06%	189
SP-6	40%		81.15%	2532	6.15%	192
SP-7	20%	100%	87.08%	2717	0.22%	7

Tuz&Biber hatası enjekte edilen görüntü kitaplıklarında hata oranı arttıkça kalite kontrol sisteminin daha fazla "görünür parça" çıktısı verdiği gözlemlendi. Bu türden bir hata, kalite kontrol sisteminin eksik parça tespitini etkilemiştir. Aynı Figürde hatalı görüntü sayısı arttıkça "görünür parça" sayısı da artmıştır. Tüm görüntülere hatalar uygulandığında, sistem neredeyse tüm parçaların bulunduğunu ve eksik parça olmadığını bildirmiştir.

4.2.2 Gaussian Hata Enjeksiyon Testleri

Gaussian hatasının uygulandığı görüntü kitaplıklarının kalite kontrol yazılımından geçirilmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 5'te gösterilmektedir.

Tablo 5. Gaussian hata enjeksiyon test sonuçları

Test Kodu	Uygulanan hata yüzdesi (%)	Küt. hatalı resim oranı (%)	Görüntülenen Parça Sayısı		Görüntülenemeyen Parça Sayısı	
			%	Miktar	%	Miktar
G-1	5%	10%	77.95%	2432	9.36%	292
G-2	20%		79.13%	2469	8.17%	255
G-3	40%		78.81%	2459	8.49%	265
G-4	5%	30%	81.67%	2548	5.64%	176
G-5	20%		81.15%	2532	6.15%	192
G-6	40%		81.44%	2541	5.87%	183
G-7	20%	100%	87.28%	2723	0.03%	1

Gaussian hatası enjekte edilen görüntü kitaplıklarında hata oranı arttıkça kalite kontrol sisteminin daha "görünür parçalar" çıkardığı gözlemlenmiştir. Bu türden bir hata, kalite kontrol sisteminin eksik parça tespitini etkilemiştir. Aynı Figürde kusurlu görüntü sayısı arttıkça "görünür parça" sayısı da artmıştır. Tüm görüntülere hatalar uygulandığında, sistem neredeyse

tüm parçaların bulunduğunu ve eksik parça olmadığını bildirmiştir.

4.2.3 Poisson Hata Enjeksiyon Testleri

Poisson hatasının uygulandığı görüntü kitaplıklarının kalite kontrol yazılımından geçirilmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 6'da gösterilmektedir.

Tablo 6. Poisson hata enjeksiyon test sonuçları

Test Kodu	Uygulanan hata yüzdesi (%)	Küt. hatalı resim oranı (%)	Görüntülenen Parça Sayısı		Görüntülenemeyen Parça Sayısı	
			%	Miktar	%	Miktar
P-1	5%	10%	77.92%	2431	9.39%	293
P-2	20%		78.33%	2444	8.97%	280
P-3	40%		78.21%	2440	9.10%	284
P-4	5%	30%	80.54%	2513	6.76%	211
P-5	20%		81.92%	2556	5.38%	168
P-6	40%		82.92%	2587	4.39%	137
P-7	20%	100%	87.31%	2724	0.00%	0

Poisson hata enjeksiyonu testlerinde, Gaussian ve Tuz&Biber enjeksiyonları ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

4.2.4 Open Hata Enjeksiyon Testleri

Open hatasının uygulandığı görüntü kitaplıklarının kalite kontrol yazılımından geçirilmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 7. Open hata enjeksiyon test sonuçları

Test Kodu	Uygulanan hata yüzdesi (%)	Küt. hatalı resim oranı (%)	Görüntülenen Parça Sayısı		Görüntülenemeyen Parça Sayısı	
			%	Miktar	%	Miktar
O-1	5%	10%	76.31%	2381	10.99%	343
O-2	20%		76.28%	2380	11.03%	344
O-3	40%		76.15%	2376	11.15%	348
O-4	5%	30%	76.31%	2381	10.99%	343
O-5	20%		76.12%	2375	11.19%	349
O-6	40%		75.67%	2361	11.63%	363
O-7	20%	100%	75.26%	2348	12.05%	376

Open hata türü enjekte edilen görüntü kitaplıklarındaki hata oranındaki artış, çıktıyı çok az etkilemiştir (etki ~%0,3). Aynı Figürde hatalı resimlerin sayısı da bu durumu pek değiştirmemiştir. Kalite kontrol sisteminde incelenen görüntülerde bu hata türünün, sisteme herhangi bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

4.2.5 Close Hata Enjeksiyon Testleri

Close hatasının uygulandığı görüntü kitaplıklarının kalite kontrol yazılımından geçirilmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 8'de gösterilmektedir.

Tablo 8. Close hata enjeksiyon test sonuçları

Test Kodu	Uygulanan hata yüzdesi (%)	Küt. hatalı resim oranı (%)	Görüntülenen Parça Sayısı		Görüntülenemeyen Parça Sayısı	
			%	Miktar	%	Miktar
C-1	5%	10%	76.31%	2381	10.99%	343
C-2	20%		76.35%	2382	10.96%	342
C-3	40%		76.38%	2383	10.93%	341
C-4	5%	30%	76.31%	2381	10.99%	343
C-5	20%		76.22%	2378	11.09%	346
C-6	40%		76.35%	2382	10.96%	342
C-7	20%	100%	76.15%	2376	11.15%	348

Close hata türü enjekte edilen görüntü kitaplıklarındaki hata oranındaki artış, çıktıyı çok düşük oranda etkilemiştir. Aynı Figürde hatalı resimlerin sayısı da bu durumu pek değiştirmemiştir. Dolayısıyla bu hata türünün kalite kontrol sisteminde incelenen görüntülere herhangi bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

4.2.6 Dilation Hata Enjeksiyon Testleri

Dilation hatasının uygulandığı görüntü kitaplıklarının kalite kontrol yazılımından geçirilmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 9'da gösterilmektedir.

Tablo 9. Dilation hata enjeksiyon test sonuçları

Test Kodu	Uygulanan hata yüzdesi (%)	Küt. hatalı resim oranı (%)	Görüntülenen Parça Sayısı		Görüntülenemeyen Parça Sayısı	
			%	Miktar	%	Miktar
D-1	5%	10%	76.31%	2381	10.99%	343
D-2	20%		77.12%	2406	10.19%	318
D-3	40%		77.37%	2414	9.94%	310
D-4	5%	30%	76.31%	2381	10.99%	343
D-5	20%		77.88%	2430	9.42%	294
D-6	40%		79.20%	2471	8.11%	253
D-7	20%	100%	80.42%	2509	6.89%	215

Dilation hatası enjekte edilen görüntü kitaplıklarındaki hata oranındaki artış, çıktıyı çok düşük oranda etkilemiştir. Aynı Figürde hatalı resimlerin sayısı da bu durumu pek değiştirmemiştir. Ancak hata oranı %40 civarındayken etkilemeye başladığı gözlemlendi. Tüm görüntüler hatalı olduğunda bile "görünür parça" sayısında bir artış elde edildi (etki ~%4). Burada hatalı görüntü miktarının etkisinin hata oranından daha büyük olduğu görülmüştür.

4.2.7 Erosion Hata Enjeksiyon Testleri

Erosion hatasının uygulandığı görüntü kitaplıklarının kalite kontrol yazılımından geçirilmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 10'da gösterilmektedir.

Tablo 10. Erosion hata enjeksiyon test sonuçları

Test Kodu	Uygulanan hata yüzdesi (%)	Küt. hatalı resim oranı (%)	Görüntülenen Parça Sayısı		Görüntülenemeyen Parça Sayısı	
			%	Miktar	%	Miktar
E-1	5%	10%	76.31%	2381	10.99%	343
E-2	20%		75.19%	2346	12.12%	378
E-3	40%		74.62%	2328	12.69%	396
E-4	5%	30%	76.31%	2381	10.99%	343
E-5	20%		74.46%	2323	12.85%	401
E-6	40%		72.63%	2266	14.68%	458
E-7	20%	100%	62.50%	1950	24.81%	774

Erosion hatası enjekte edilen görüntü kitaplıklarında hata oranı arttıkça kalite kontrol sisteminin daha "görünmez parçalar" çıkardığı gözlemlenmiştir. Bu tür bir arıza, kalite kontrol sisteminin eksik parça tespitini etkilemiştir. Aynı Figürde hatalı resim sayısı arttıkça "görünmeyen parça" sayısı da artmıştır. Tüm görüntülere bir hata uygulandığında, sistem görünmez parça sayısının normalden iki kat daha fazla olduğunu vermektedir.

4.2.8 Gradient Hata Enjeksiyon Testleri

Gradient hatasının uygulandığı görüntü kitaplıklarının kalite kontrol yazılımından geçirilmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 11'de gösterilmektedir.

Tablo 11. Gradient hata enjeksiyon test sonuçları

Test Kodu	Uygulanan hata yüzdesi (%)	Küt. hatalı resim oranı (%)	Görüntülenen Parça Sayısı		Görüntülenemeyen Parça Sayısı	
			%	Miktar	%	Miktar
GR-1	5%	10%	73.65%	2298	13.65%	426
GR-2	20%		75.54%	2357	11.76%	367
GR-3	40%		75.64%	2360	11.67%	364
GR-4	5%	30%	70.42%	2197	16.89%	527
GR-5	20%		73.75%	2301	13.56%	423
GR-6	40%		74.39%	2321	12.92%	403
GR-7	20%	100%	61.09%	1906	26.22%	818

Gradient hataları enjekte edilen görüntü kitaplıklarında hata oranı arttıkça kalite kontrol sisteminin daha "görünmez parçalar" çıkardığı gözlemlenmiştir. Bu tür bir arıza, kalite kontrol sisteminin eksik parça tespitini etkilemiştir. Ancak hata oranı arttıkça değerler normal çıkışa yaklaşmıştır. Hatalı resim sayısındaki artış, "görünmeyen parça" sayısının arttığına dair bir çıktı vermiştir. Hata oranı ile ters orantılı ve hatalı resim sayısı ile doğru orantılı bir etkisi tespit edilmiştir.

4.2.9 Motion-blur Hata Enjeksiyon Testleri

Motion-blur hatasının uygulandığı görüntü kitaplıklarının kalite kontrol yazılımından geçirilmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo 12'de gösterilmektedir.

Motion-blur hatası enjekte edilen görüntü kitaplıklarındaki hata oranındaki artış, çıktıyı çok düşük oranda etkilemiştir. Aynı Figürde hatalı resimlerin sayısı da bu durumu pek değiştirmemiştir. Hareket

bulanıklığı hatasının kalite kontrol sisteminde incelenen görüntülere etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 12. Motion-blur hata enjeksiyon test sonuçları

Test Kodu	Uygulanan hata yüzdesi (%)	Küt. hatalı resim oranı (%)	Görüntülenen Parça Sayısı		Görüntülenemeyen Parça Sayısı	
			%	Miktar	%	Miktar
MB-1	5%	10%	76.31%	2381	10.99%	343
MB-2	20%		76.28%	2380	11.03%	344
MB-3	40%		76.31%	2381	10.99%	343
MB-4	5%	30%	76.35%	2382	10.96%	342
MB-5	20%		76.38%	2383	10.93%	341
MB-6	40%		76.38%	2383	10.93%	341
MB-7	20%	100%	76.09%	2374	11.22%	350

4.2.10 Test Bulguları

Gerçekleştirilen hata enjeksiyon testlerinin sonuçları Tablo 13'te gösterilmiştir.

Tablo 13. CamFITool Test Sonuçları

Hata Türü	Görünen Parça Sayısına Etkisi	Ortalama Değişim Oranı*
Tuz&Biber	Arttı	4.38%
Gaussian	Arttı	4.75%
Poisson	Arttı	4.71%
Open	Etkisiz	-0.30%
Close	Etkisiz	-0.01%
Dilation	Düşük Etkili	1.49%
Erosion	Azaldı	-3.16%
Gradient	Azaldı	-4.24%
Motionblur	Etkisiz	-0.01%

* Her hata türü için uygulanan yedi testin ortalama değişim oranı

5. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

CamFITool hata enjeksiyon aracı kullanılarak ROKOS robot kameralardan elde edilen 293 şase görüntünden oluşan resim kitaplığına çeşitli hatalar, çeşitli oranlarda enjekte edilmiş ve OTOKAR kamera kalite kontrol sistemi yazılımının bu görüntülere verdiği yanıtların test ve sonuçları derlenmiştir. Dokuz farklı hata tipi, farklı hata oranları ve yanlış görüntü miktarları ile 49 farklı hata enjeksiyon test planı ile hangi hata enjeksiyonunun sistemi etkilediği araştırılmıştır. Bu testler sonucunda kusur tiplerinin "görünür parça sayısı" üzerindeki etkileri Tablo 13'te (bkz. Bölüm 4.2.10) gösterilmiştir.

Bu çalışmada, hataya dayanıklı sistemlerin emniyet ve güvenliğini değerlendirmek için kritik bir araç olan açık kaynaklı bir hata enjeksiyon aracı olan CamFITool önerilmiştir. Sonuç olarak, robotik sistemlerde kamera tabanlı algılama çalışmaları ve sistemlerin hata toleranslarının belirlenmesine yardımcı olmak için hata enjeksiyon test planları sunulmuş, bu test planlarının uygulama sonuçları açıklanmıştır.

CamFITool, açık kaynak kodlu bir Figürde geliştirilmeye ve yeni özellikler eklenmeye devam edilmektedir (CamFITool Github Sayfası, 2021).

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Acton, S. T., & Mukherjee, D. P. (2000). Scale space classification using area morphology. *IEEE Transactions on Image Processing*, 9(4), 623-635. <http://dx.doi.org/10.1109/83.841939>.
- Barbu, T. (2013). Variational image denoising approach with diffusion porous media flow. In *Abstract and Applied Analysis* (Vol. 2013). Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2013/856876>.
- Blanter, Y. M., & Büttiker, M. (2000). Shot noise in mesoscopic conductors. *Physics reports*, 336(1-2), 1-166. [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(99\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(99)00123-4).
- Erdogmus, A. K., & Karaca, M. (2021). Manipulation of Camera Sensor Data via Fault Injection for Anomaly Detection Studies in Verification and Validation Activities For AI. arXiv preprint arXiv:2108.13803. <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2108.13803>.
- Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C. K., Winn, J., & Zisserman, A. (2010). The pascal visual object classes (voc) challenge. *International journal of computer vision*, 88(2), 303-338. <https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4>.
- Fisher, M., Cardoso, R. C., Collins, E. C., Dadswell, C., Dennis, L. A., Dixon, C., ... & Webster, M. (2021). An overview of verification and validation challenges for inspection robots. *Robotics*, 10(2), 67. <https://doi.org/10.3390/robotics10020067>.
- Jankowski, M. (2006). Erosion, dilation and related operators. Department of Electrical Engineering University of Southern Maine Portland, Maine, USA.
- Jha, S., Banerjee, S. S., Cyriac, J., Kalbarczyk, Z. T., & Iyer, R. K. (2018). Avfi: Fault injection for autonomous vehicles. In 2018 48th annual IEEE/IFIP international conference on dependable systems and networks workshops (dsn-w) (pp. 55-56). IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/DSN-W.2018.00027>.
- Ji, H., & Liu, C. (2008). Motion blur identification from image gradients. In 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 1-8). IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2008.4587537>.
- Kendall, A., Grimes, M., & Cipolla, R. (2015). PoseNet: A convolutional network for real-time 6-dof camera relocalization. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 2938-2946).
- Larnier, S., Fehrenbach, J., & Masmoudi, M. (2012). The topological gradient method: From optimal design to image processing. *Milan Journal of Mathematics*, 80, 411-441. <https://doi.org/10.1007/s00032-012-0196-5>.
- Park, H., & Mu Lee, K. (2017). Joint estimation of camera pose, depth, deblurring, and super-resolution from a blurred image sequence. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (pp. 4613-4621).
- Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., ... & Ng, A. Y. (2009). ROS: an open-source Robot Operating System. In *ICRA workshop on open source software* (Vol. 3, No. 3.2, p. 5).
- Rosin, P., & Collomosse, J. (Eds.). (2012). *Image and video-based artistic stylisation* (Vol. 42). Springer Science & Business Media.
- Schottky, W. (2018). On spontaneous current fluctuations in various electrical conductors. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 17(4), 041001. <https://doi.org/10.1117/1.JMM.17.4.041001>.
- Yayan, U. & Erdoğan, A. (2021). Endüstriyel Robot Hareket Planlama Algoritmaları Performans Karşılaştırması. *Journal of Scientific, Technology and Engineering Research*, 2 (2), 31-45. DOI: 10.53525/jster.979689.
- Yayan, U., & Erdoğan, A. K. (2022). Development of A Fault Injection Tool & Dataset for Verification of Camera Based Perception In Robotic Systems. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(3), 328-339. <https://doi.org/10.31796/ogummf.1054761>.
- CamFITool ROS Wiki Sayfası. (2021). Erişim adresi: <http://wiki.ros.org/camfitool/>.
- Sciforce, (2019). Anomaly Detection, A Key Task for AI and Machine Learning, Explained. Erişim adresi: <https://www.kdnuggets.com/2019/10/anomaly-detection-explained.html>
- OpenCV, (2021). Morphological Transformations. Erişim adresi: https://docs.opencv.org/4.5.3/d9/d61/tutorial_py_morphological_ops.html.
- CamFITool Github Sayfası, (2021). Erişim adresi: <https://github.com/inomuh/Camera-Fault-Injection-Tool>.