

Kısa Mesafelerde Aktif Kızılötesi Sensörle Hareketsiz Cisimlerin Tanımlanması

Abdülkadir ÇILDIR^{1*}, Mesud KAHRİMAN¹, Mesut TIĞDEMİR²¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Isparta²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Isparta

Geliş Tarihi (Received): 13.10.2021, Kabul Tarihi (Accepted): 20.02.2022

✉ Sorumlu Yazar (Corresponding author*): kadircildir@gmail.com

☎ +90 246 2111371 📠 +90 246 2111072

ÖZ

Teknolojik gelişmeler ile birlikte çoğu alanda otonomlaşan makineler kullanılır hale gelmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan sensörler, çok büyük önem taşımaktadır. Sensörler vasıtasıyla cisimlerin tanımlanması, sayılması, konumlarının tespit edilmesi ve sınıflandırılması yapılabilmektedir. Kızılötesi sensörler bu faaliyetler içerisinde kendine yer edinmiş sensör çeşitlerindedir. Bu çalışmada, kapalı bir oda ortamında aktif kızılötesi sensör ile yakın mesafedeki modellerin tanımlanabilmeleri için sayıları, boyutları, konumları ve sınıflandırmaları gerçekleştirilmiştir. Tek-boyutlu çalışan aktif kızılötesi sensör ile üç-boyutlu çalışabilen bir aktif kızılötesi sensör sistemi oluşturulmuştur. Bu sensör sistemi verimliliği ve maliyeti ile öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tek-boyutlu aktif kızılötesi sensör, cisim tanımlama, yakın mesafe, üç-boyut

Recognition of Immobile Objects with an Active Infrared Sensor at Short Distances

ABSTRACT

With the technological developments, autonomous machines have become used in most areas. The sensors used in these studies are of great importance. By means of sensors, objects can be identified, counted, positioned and classified. Infrared sensors are among the types of sensors that have taken their place in these activities. In this study, their numbers, areas, positions and classifications have been carried out in order to recognize the models at close range with the active infrared sensor. A three-dimensional infrared sensor system has been created with a unidimensional active infrared sensor. This sensor system stands out with its efficiency and cost.

Keywords: Unidimensional active infrared sensor, object recognition, close ranging, three-dimension

GİRİŞ

Çoğu sistemin akıllı hale geldiği ve otonomlaştığı günümüzde, cisimleri tanımlayabilmek oldukça önem taşımaktadır. Endüstride ve akıllı sistemlerin olduğu çoğu alanda cisimlerin tanımlanabilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanda cisimlerin tanımlanabilmesi için birçok sensör kullanılmaktadır. Manyetik sensör, piezo elektrik sensör, mikrodalga radar, kızılötesi sensör, ultrasonik sensör, VIP (video görüntü işleme), lidar sensör gibi dedektör ve sensörler cisimlerin tanımlanmasında kullanılagelen başlıca sensörlerdir (Klein, 2001; Martin ve ark., 2003). Bu sensörler farklı alanlarda, farklı amaçlar için de kullanılabilirlerdir.

Çevredeki cisimleri tanımlayabilmek için kullanılan mikrodalga radar (Zhao ve Su, 2017), lidar (Tiaprasert ve ark., 2015; Zhao ve Su 2017; Zhao ve ark., 2019; Wu ve ark., 2020a; Wu ve ark., 2020b) ve VIP gibi dedektörler ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu dedektörlerin menzil görüş mesafesi ve özellikleri arttıkça maliyeti aynı oranda artış göstermektedir.

Literatürde cisimleri tanımlayabilmek ve konum bilgilerini elde edebilmek için düşük maliyetli kızılötesi sensörler kullanılmıştır (Besl, 1989; Klein, 2001; Ruser, 2005). Açık alanda yoldaki araçların geçişlerine engel olabilen geyikleri tespit etmek amacıyla 3D lidar çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada 30 m menzilli olan lidar sensör ile yeni bir algoritma sunularak arka plan filtreleme, cisim nokta kümesi oluşturma ve sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir (Chen ve ark., 2019). Açık alanda lidar sensör ile yapılan bir başka çalışmada karlı, rüzgarlı ve yağmurlu hava şartlarında araçların varlığını daha net bir şekilde gerçekleştirilebilmek için sunulan bir algoritmada arka plan filtrelemesi ve nokta kümeleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu sert hava koşullarında gerçekleştirilen çalışmada 22 m'ye kadar araçlar daha net bir şekilde tespit edilmiştir (Wu ve ark., 2020b).

Literatürde kızılötesi başlıklı çalışmalar daha çok pasif kızılötesi sensörleri içine almaktadır. Pasif kızılötesi sensör, tespit edilecek cisim yaydığı enerjiden ve ısıdan tespit etmekte ve genel olarak termal görüntüleme için kullanılmaktadır (Mambou ve ark., 2018; Wang ve ark., 2020; Wu ve ark., 2021). Aktif kızılötesi sensörler ise hedef cismin konumunu, yerini ve mesafesini tespit için kullanılmaktadırlar. Literatürde kullanılan lidar sensörlerin bir kısmı hedef nesneyi tespit için kızılötesi ışınlarını kullanmaktadır (Filliat ve ark., 2012; Csaba ve ark., 2018; SICK, 2022). Bununla beraber lazer ışınlarını kullanıp yine hedef cismin konumunu, yerini ve mesafesini tespit etmeye çalışan çalışmalar da mevcuttur (Chen ve ark., 2019; LiDAR, 2019).

Literatürde çalışma yapılan ortamlar farklılık gösterebilmektedir. Kapalı ortamlarda yapılan çalışmalardan bazıları ev ortamında gerçekleştirilmektedir (Suryadevara ve Mukhopadhyay, 2012; Klavestad ve ark., 2020). Ortalama büyüklükteki bir ev odasının 40 m² olduğu kabul edilirse (Filliat ve ark., 2012) eşyalar ve duvarlar arası yaklaşık 1-2 m mesafe aralığını aşmayacaktır. Bu şartlarda bir oda ortamı yakın veya kısa mesafe olarak kabul edilebilir.

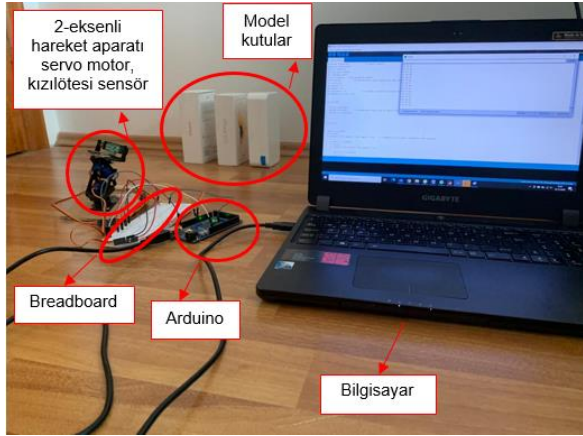
Bu çalışma kapalı bir ortamda 20 m² büyüklüğündeki bir odada yaklaşık 1 m²'lik bir alan içerisinde gerçekleştirilmiştir. Normal bir ev oda ortamının şartları düşünüldüğü takdirde mesafe aralığı açık alanda gerçekleştirilen uygulama alanlarına göre daha kısa olmasından dolayı bu makaledeki oda ortamı kısa mesafe olarak kabul edilebilir. Bunun yanında akıllı araçlar için insan eli tanımlama çalışmasında kullanılan FMCW radar ile 1 m ve altındaki mesafeler için kısa menzilli çalışma olarak geçmiştir (Molchanov ve ark., 2015).

Bu çalışma, model cisimlerin yansıtıcı olmayan duvarların ve tahta zeminin olduğu bir oda ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, yakın mesafede tek-boyutlu aktif kızılötesi sensör ile cisimlerin sayıları, boyutları ve konumları belirlenmek istenmiştir. Tek boyutlu sensöre 3D (boyutlu) hareket kazandırılmak istenmiştir. Kızılötesi sensöre, 3-boyutlu hareket: Servo motorlar ve hareket aparatı ile kazandırılmıştır. Yapılan çalışmalar sırasıyla anlatılacaktır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamı, iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım, sistemin donanım malzemelerinden olan mesafe ve açı verilerini elde edebilmek için kullanılan Arduino programlayıcı kartı, kızılötesi sensör ve servo motorlardan oluşmaktadır. İkinci kısım ise elde edilen mesafe ve açı bilgilerinin işlenmesinden oluşmaktadır. Veri işleme kısmı Matlab (Mat Laboratory) programı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kızılötesi sensör sisteminde kullanılan malzeme ve algoritmalar sırasıyla verilecektir.

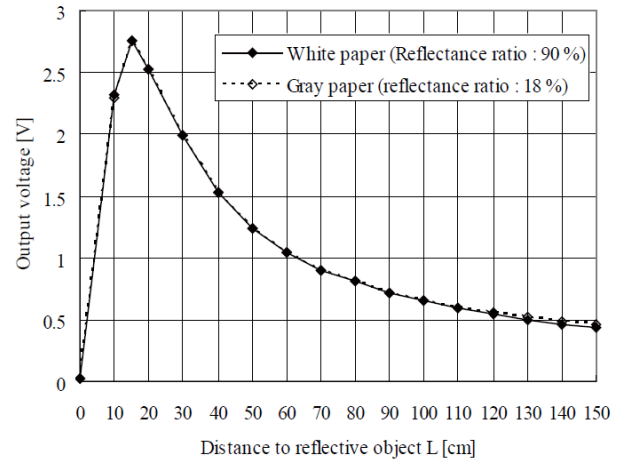
Kısa Mesafelerde Aktif Kızılötesi Sensörle Hareketsiz Cisimlerin Tanınması



Şekil 1. Ölçüm düzeneği ve ortamı

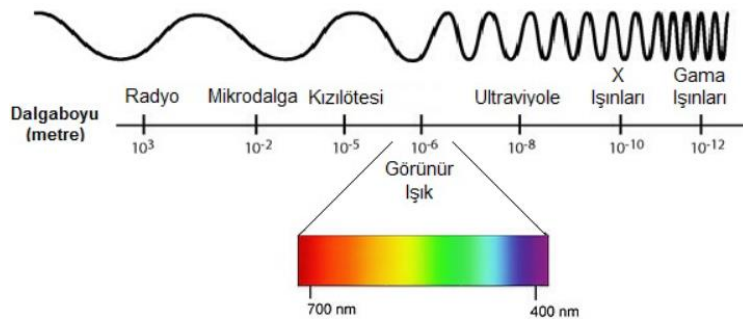
Şekil 1 ile çalışmada kullanılan 16 girişli Arduino AT-mega2660 kartı, kablo bağlantıları için kullanılan breadboard, model kutular ve verileri toplamak ve işlemek için kullanılan bilgisayar yer almaktadır. Aynı zamanda Şekil 1'de, ölçümlerde kullanılan Sharp kızılötesi sensör, servo motor ve 2-eksenli hareket aparatı birlikte verilmiştir. Servo motorlar, verilen komuta göre dönüş yapabilen motor türlerindedir. Bu çalışmada SG-90 mini servo motoru kullanılmıştır. Bu servo motor, 60 dereceyi 0.12 saniyede alabilmektedir (SG90, 2014). Servo motorun iç yapısı; dc motor, dişli mekanizması, motor sürücü kartı ve potansiyometreden oluşmaktadır. Motorun sürücü kartı Arduino ile kontrol edilmiştir. Bu motorların beslemesi ise Arduino kartı üzerinden 5V verilerek gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında servo motorlar 2-eksenli hareket aparatı içerisine kızılötesi sensör ise en üst kısma yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. 2-eksenli hareket aparatı ve servo motorlar ile çevre taraması yapılarak ile tek-boyutlu kızılötesi sensöre iki hareket daha kazandırılıp 3-boyutlu hareket yapması istenmiştir.

Kızılötesi sensörler genel anlamda aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılabilir (Jost, 2022). Bu çalışmada 20 ile 150 cm arası mesafe ölçer aktif Sharp GP2Y0A02YK0F (SHARP, 2006) kızılötesi sensör kullanılmıştır. Bu kızılötesi sensör, hedef nesneye ışığın gidip gelme süresiyle, hedefin uzaklığını tespit edebilen bir aktif uzaklık sensörüdür. Kullanılan Sharp kızılötesi sensör, analog gerilim çıkış vermektedir. Şekil 2'de çıkış gerilimine göre değişen mesafe bilgisi verilmiştir. Kullanılan sensör, Arduino kartı ile kontrol edilmiştir.



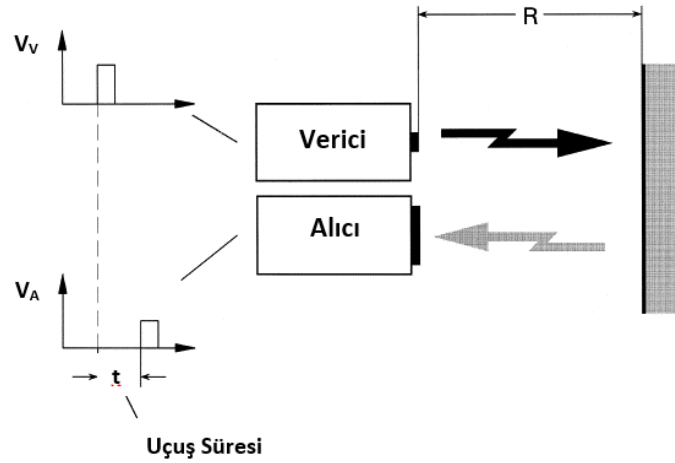
Şekil 2. Sharp GP2Y0A02YK0F kızılötesi sensör gerilim-mesafe grafiği (SHARP, 2006)

Şekil 3 ile elektromanyetik spektrumda yer alan ışıkların dalga boylarının bölgeleri gösterilmiştir. Kullanılan kızılötesi sensör 850 nm dalga boyunu kullanmaktadır.



Şekil 3. Elektromanyetik spektrum (Aykaç, 2005)

Kısa Mesafelerde Aktif Kızılötesi Sensörle Hareketsiz Cisimlerin Tanınması



Şekil 4. Kızılötesi sensor çalışma sistemi (Wehr ve Lohr, 1999)

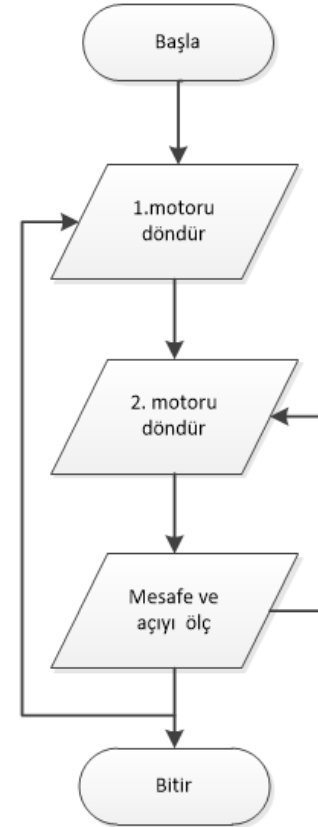
Şekil 4'de "t" ile ifade edilen uçuş süresi: Hedef nesneye sensörden gelen darbelenmiş sinyalin, faz değişiminden elde edilen zaman süresidir (Wehr ve Lohr 1999).

$$R = \frac{c \times t}{2} \quad (1)$$

Formül 1 ile gösterilen c, ışık hızını; t, iletilen ve gelen sinyal arasındaki süre farkını; R, kızılötesi sensörün hedef nesneye olan mesafesini ifade etmektedir.

Bu çalışmada kızılötesi sensörün açı ve mesafe bilgileri Arduino Mega kartı ile elde edilmiştir. Arduino, C++ dilinin alt yazılımlarıyla programlanabilen fiziksel programlanabilir bir karttır (Badamasi, 2014). Arduino hazır kütüphanelere sahip bir donanım kartıdır ve kullanımı oldukça yaygındır. Arduino Mega kartı, bu sensör sistemini yönetmek ve verileri bilgisayara aktarmak için kullanılmıştır. Hazır kütüphane barındırmasından dolayı çalışmada bu kart kullanılmıştır. Arduino kart çeşitlerinden ise çıkış portlarının fazla olmasından dolayı da Arduino Mega modeli tercih edilmiştir.

Arduino'da kullanılan mesafe ve açı bilgileri algoritması Şekil 5'de akış diyagramı biçiminde verilmiştir. 1. motorun hareket etmesiyle kızılötesi sensör yatay ekseninde dönüşler yapabilmekte; 2. motorun hareket etmesiyle ise kızılötesi sensör dikey ekseninde hareket edebilmektedir. 2. motorun dikey ekseninde yaklaşık 120 derecelik açı yapmasından sonra 1. motor bir derece yatay ekseninde hareket etmektedir. 1. motorun toplamda 120 derece hareket etmesiyle tarama tamamlanmaktadır. Kızılötesi sensörden alınan mesafe bilgisi ve motorlardan elde edilen açı bilgileri ile tarama bilgisi oluşturulmaktadır.



Şekil 5. Arduino sistem algoritması akış diyagramı

Veri İşleme ve Algoritması

Matlab sayısal hesaplama programıdır. Az kodla çok işlem yapabildiği için kullanımı kolaydır. Görüntü ve veri işlemede sıkça kullanılmakta ve bu işlemler için

Kısa Mesafelerde Aktif Kızılötesi Sensörle Hareketsiz Cisimlerin Tanınması

hazır kodlar içermektedir. Arduino kartından elde edilen mesafe ve açı verileri bu programda işlenmiştir.



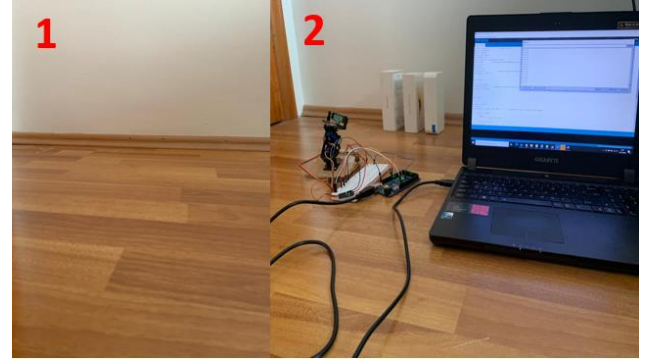
Şekil 6. Matlab veri işleme akış diyagramı

Arduino kartından gelen verilerin işlenmesi için Matlab programında oluşturulan algoritma akış diyagramı Şekil 6 ile gösterilmiştir. Arduino'dan gelen veriler Matlab

programında matrise dönüştürülmüştür. Oluşturulan matris verisinden resim oluşturulmuştur. Tanımlanmak istenen cismin arka planında kalan kısım filtrelenmiştir. Ardından cisimlerin adet, piksel alan ve koordinatlarını bulabilmek için etrafı çevrenmiştir.

BULGULAR

Gerçekleştirilen ölçüm düzeneği genel gösterimi ile referans bölgesi Şekil 7'deki gibidir. Şekilde görüldüğü üzere ölçüm düzeneği bir kapalı bir oda içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 7'de yer alan model cisimlerinin olmadığı referans bölgesi kızılötesi sensör ile taranmıştır. Ardından model cisimlerinin bu kısma yerleştirilmesiyle tarama tekrar yapılmıştır. Modellerin olduğu verilerden referans bölgesi çıkartılarak veri işlem basamaklarına geçilmiştir.



Şekil 7. Tasarımı gerçekleştirilen kızılötesi sensör sistemi genel gösterimi ve referans bölgesi

Şekil 8'de iki adet aynı boyuttaki ve bir adet farklı boyuttaki modellerin görüntüsü ve sensörden alınan verilerin Matlab programında işlenmiş görüntüsü gösterilmektedir. Şekil 8'de görüldüğü üzere modellerin piksel alan tespitlerinde doğruluk sağlanmıştır.

Şekil 8'de kızılötesi sensör ile ölçümü alınan yer ve Matlab çıktısı beraber verilmiştir. Veri işlemesi yapılan üç model doğru bir şekilde tespit edilmiştir. Aynı zamanda bu üç modelin sensöre olan uzaklıkları farklı olduğu için tespit edilen alanlar arasında bir oranlama yapılarak modellerin aynı boyutta olduklarının tespiti yapılmaya çalışılmıştır. Şekil 8 ile gösterildiği gibi çok küçük farklılıklar ile tespitler doğru gerçekleştirilmiştir. Bütün modeller aynı boyuttadır.

Kısa Mesafelerde Aktif Kızılötesi Sensörle Hareketsiz Cisimlerin Tanınması



Şekil 8. Farklı boyuttaki modellerin ölçüm düzeneği ve Matlab çıktısı

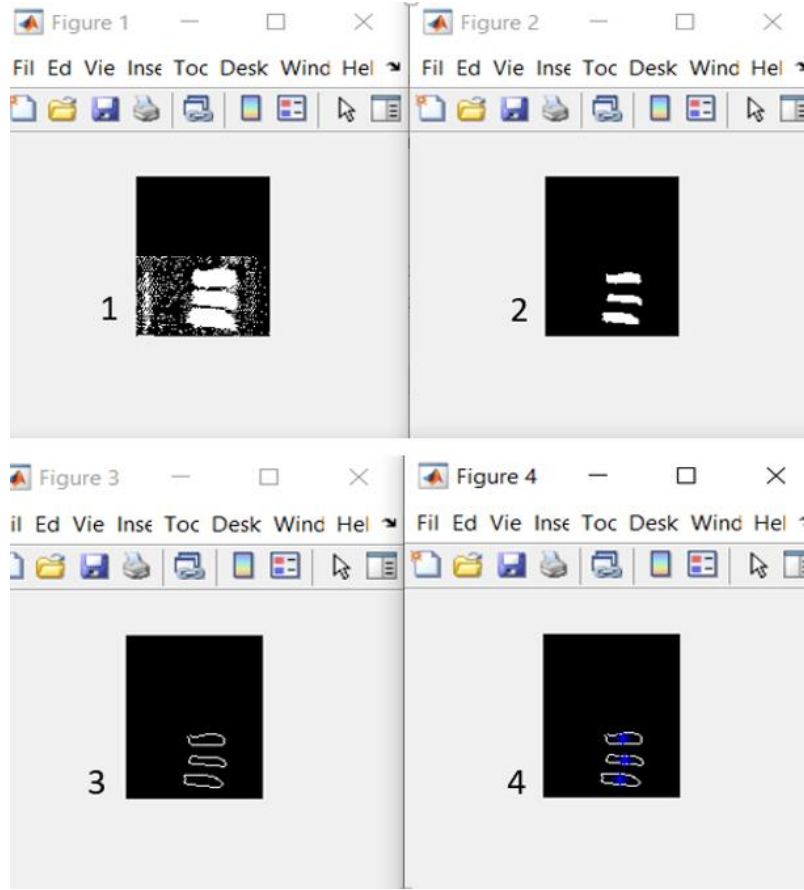


Şekil 9. Benzer boyuttaki modellerin ölçüm düzeneği ve Matlab çıktısı

Şekil 9'da görüldüğü üzere aynı boyuttaki cisimler arka plandaki duvara eşit mesafede yerleştirilmiştir. Model cisimlerin her ne kadar duvara olan uzaklıkları eşit olsa da sensöre olan uzaklıkları; Model 1 ve Model 3'ün aynı, Model 2'nin ise daha kısadır. Şekil 9'da model cisimlerin sırasıyla piksel alanları ve oranlamaları verilmiştir. Modellerin merkez koordinatları bulunarak sensöre olan uzaklıkları piksel olarak bulunmak istenmiştir. Böylece modellerin sensöre olan uzaklıkları farklı olsa da aynı boyutta oldukları tespit edilebilmiştir.

Şekil 9'a ait ölçümlerin veri işleme basamakları sırasıyla Şekil 10'da verilmiştir. Bu veri basamaklarında sırasıyla: Arka plan filtreleme, model cisimlerinin sayılarını bulma, etraflarını çevreleme, merkezi koordinatlarını bulma adımları gösterilmiştir.

Kısa Mesafelerde Aktif Kızılötesi Sensörle Hareketsiz Cisimlerin Tanınması



Şekil 10. Benzer boyuttaki modellerin Matlab veri işleme basamak çıktıları

SONUÇ

Gerçekleştirilen bu çalışmada; Servo motorlarla hareket ettirilebilen 2-eksenli hareket aparatına yerleştirilen kızılötesi sensör ile 3-boyutlu çevre taraması yapılmıştır. Böylece cisimlerin sayıları, konumları, piksel alanları ve büyüklük küçüklük bakımından sınıflandırmaları yapılmak istenmiştir. Bu sensörle kapalı yansımaz oda ortamında yapılan çalışmalar başarılı olmuş ve farklı cisim modellerine ait konum, boyut bulma, saydırma ve sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Kızılötesi sensör kendi çıkışında analog bir gerilim vermektedir. Arduino ile bu gerilim, mesafe bilgisine dönüştürülmüştür. Servo motorlardan alınan açı bilgileri ve mesafe bilgileri Matlab programı üzerinde işlenmiştir. Tarama yapılacak olan alan ilk olarak boş bir şekilde taranmış ve ardından modeller yerleştirilerek tekrar taranmıştır. Matlab programında, dolu alan mesafe bilgisinden boş alan mesafe bilgisi çıkartılarak veri işleme kısmına geçilmiştir. Böylece ortama sonradan dahil edilen cisimlerin varlığı tespit edilmek istenmiştir. Bu çıkarma işleminden sonra elde edilen veriler matris

biçimine dönüştürülerek resim oluşturulmuştur. Modelleri tespit edebilmek için arka plan filtresi gerçekleştirilmiştir. Ardından modellerin, çevresi çizilerek merkezi koordinatları bulunmuştur. Etrafı çerçevelenmiş modellerin piksel alanları bulunmuş ve kızılötesi sensöre olan uzaklıklarından faydalanılarak modellerin boyutları birbirleriyle kıyaslanarak sınıflandırma yapılmıştır. Böylece resimde farklı boyutlarda görünebilecek olan aynı boyuttaki iki modelin, boyutlarının aynı olduğu tespit edilmek istenmiş ve gerçekleştirilmiştir. Merkezi koordinat bulma yöntemi ile modellerin, sensöre olan uzaklıkları farklı olmasına rağmen gerçek piksel alanları tespit edilebilmiştir.

Sensörlerin arka plandaki duvara olan uzaklıkları eşittir. Bu çalışmada duvara farklı uzaklıklarda bulunan modellerin tespiti gerçekleştirilmemiştir. Modellerin duvara olan uzaklıkları farklı olsa da merkezi koordinat bulma yöntemi ile bu modellerin gerçek piksel uzunlukları tespit edilebilir.

Kısa mesafelerde gerçekleştirilen bu sensör sistemi, endüstri sektöründe rahatlıkla kullanılabilir. 3-boyutlu

Kısa Mesafelerde Aktif Kızılötesi Sensörle Hareketsiz Cisimlerin Tanımlanması

sensörlerin gerçekleştirebildiği işi yapabilen bu kızılötesi sensör sistemi, mali açıdan ise 3-boyutlu sensörlere nispeten çok daha uygundur. Aynı zamanda bu sensör sistemi, menzili daha yüksek kızılötesi ve lidar sensörler için bir prototip çalışması olarak düşünülebilir.

Gerçekleştirilen bu çalışmanın devamı olarak ilerleyen çalışmalarda çözünürlüğü daha yüksek kızılötesi sensörlerle bu çalışma gerçekleştirilebilir. Açık alanlarda daha uzak alan taraması ve tanımlanması için daha uzun menzilli sensörler kullanılabilir. Böylece kavşaklardaki duran araçlar için yoldaki araç yoğunluğu, araç sayıları, araçların konumları tespit edilebilir, sınıflandırılmaları yapılabilir. Farklı algoritma ve sensörlerle mağara ve tarım arazileri haritalandırmalarından otonom araçların yönetimine kadar birçok alanda kullanılabilir. Ortama sonradan dahil olan cisimlerin yanında, ortamdaki bütün cisimlerin tespiti yapılmak isteniyorsa farklı algoritmalar kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Badamasi, Y.A. (2014). The working principle of an Arduino. The 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), Abuja, Nigeria, 1-4.
- Besl, P.J. (1989). Active optical range imaging sensors. In: *Advances in machine vision*, Springer, 1-63.
- Chen, J., Xu, H., Wu, J., Yue, R., Yuan, C., Wang, L.J.I.A. (2019). Deer crossing road detection with roadside LiDAR sensor. *IEEE Access*, 7: 65944-65954.
- Csaba, G., Somlyai, L., Vámosy, Z. (2018). Mobil robot navigation using 2D LIDAR. The 2018 IEEE 16th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII), Kosice and Herlany, Slovakia, 143-148.
- Filliat, D., Battesti, E., Bazeille, S., Duceux, G., Gepperth, A., Harrath, L., Jebari, I., Pereira, R., Tapus, A., Meyer, C. (2012). RGBD object recognition and visual texture classification for indoor semantic mapping. The 2012 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), Woburn, MA, USA, 127-132.
- Jost, D. (2022). What is an IR sensor: Retrieved from. [https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-ir-sensor#:~:text=There are two types of,\(LED\) and a receiver.&text=Passive infrared \(PIR\) sensors only,emit it from an LED \(Erişim Tarihi: 05.02.2022\)](https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-ir-sensor#:~:text=There are two types of,(LED) and a receiver.&text=Passive infrared (PIR) sensors only,emit it from an LED (Erişim Tarihi: 05.02.2022))
- Klavestad, S., Assres, G., Fagernes, S., Grønli, T.-M.J.I. (2020). Monitoring activities of daily living using UWB radar technology: A contactless approach. *IOT*, 1(2): 320-336.
- Klein, L.A. (2001). Sensor technologies and data requirements for ITS. 685 Canton Street Norwood, MA, United States, 02062: Artech House Publishers.
- LiDAR, V. (2019). The VLP-16 LiDAR.
- Mambou, S.J., Maresova, P., Krejcar, O., Selamat, A., Kuca, K.J.S. (2018). Breast cancer detection using infrared thermal imaging and a deep learning model. *Sensors*, 18(9): 2799; DOI 10.3390/s18092799
- Martin, P., Feng, Y., Wang, X.J.U.o.U.T.L. (2003). Final Report. Detector Technology Evaluation, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Molchanov, P., Gupta, S., Kim, K., Pulli, K. (2015). Short-range FMCW monopulse radar for hand-gesture sensing. The 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon), Arlington, VA, USA, 1491-1496.
- Ruser, H. (2005). Object recognition with a smart low-cost active infrared sensor array. The 1st International Conference on Sensing Tech., 494-499.
- SG90, S.M. (2014). TowerPro SG90 - Micro Servo
- SHARP (2006). GP2Y0A02YK0F.
- SICK (2022). 2D LIDAR SENSORS.
- Suryadevara, N.K., Mukhopadhyay, S.C.J.I.s.j. (2012). Wireless sensor network based home monitoring system for wellness determination of elderly. *IEEE Sensors Journal*, 12(6): 1965-1972.
- Tiapraser, K., Zhang, Y., Wang, X. B., Zeng, X. (2015). Queue length estimation using connected vehicle technology for adaptive signal control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(4): 2129-2140.
- Wang, C., Zhang, X., Hu, W.J.C.S.R. (2020). Organic photodiodes and phototransistors toward infrared detection: materials, devices, and applications. *The Royal Society of Chemistry*, 49(3): 653-670.
- Wehr, A., Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3): 68-82.
- Wu, J., Xu, H., Tian, Y., Pi, R., Yue, R.J.S. (2020a). Vehicle detection under adverse weather from roadside LiDAR data. *Sensors*, 20(12), 3433; DOI: 10.3390/s20123433
- Wu, J., Xu, H., Zhang, Y., Tian, Y., Song, X. (2020b). Real-time queue length detection with roadside LiDAR data. *Sensors*, 20(8), 2342; DOI: 10.3390/s20082342
- Wu, J., Wang, N., Yan, X., Wang, H.J.N.R. (2021). Emerging low-dimensional materials for mid-infrared detection. *Nano Research*, 14(6): 1863-1877.
- Zhao, J., Xu, H., Liu, H., Wu, J., Zheng, Y., Wu, D. (2019). Detection and tracking of pedestrians and vehicles using roadside LiDAR sensors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 100: 68-87.
- Zhao, Y., Su, Y. (2017). Vehicles detection in complex urban scenes using Gaussian mixture model with FMCW radar. *IEEE Sensors Journal*, 17(18): 5948-5953.