



6 Serbestlik Dereceli Sualtı Aracı ve Manipülatör Sistemi ile Görüntü İşleme Uygulamaları

Serhat YILMAZ¹ , Sadettin Burak KILCI² 

¹Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, 41100, Türkiye

²Beykent Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34398, Türkiye

Araştırma Makalesi, Geliş Tarihi: 10.09.2020, Kabul Tarihi: 18.11.2020

Özet

Endüstriyel ve askeri alanlarda, akıllı sistemler ve robotik uygulamaları giderek önem kazanmaktadır. Deniz robotiği ve sualtı araçları üzerine olan araştırmalar, robot kolu ve bunun sualtında bize sağladığı pozitif etkiler üzerine yoğunlaşmaktadır. Örneğin, batık araştırması, çevresel analizler, arkeolojik araştırmalar, sualtında örnek toplama işlemleri, gemi altı incelemesi ve tamiratında sualtı araçları kullanılmaktadır. Bu çalışmada, insanın ulaşamayacağı ya da ulaşmakta güçlük çektiği sualtı işlemlerinde kullanılması amaçlanan sualtı araçları için 2 eksenli robot kol (manipülatör) prototipi tasarlanmıştır. Prototip, Rotasyonel-Rotasyonel (RR) hareketi yapmaktadır. 4 serbestlik dereceli bir sualtı aracına entegre edilmiştir ve uçta bulunan kısıkaç ile cisimi kavrayabilmektedir. Manipülatör hareketi, kavranacak nesneyle uç işlevci arasındaki mesafenin kameradan görsel geri bildirim aracılığıyla yapılmaktadır. Bunun için gerekli görüntü işleme yazılımı, Raspberry Pi 3 geliştirme kartı üzerinde C Programlama dilinde OpenCV kütüphaneleri kullanılarak hazırlanmıştır. Kameradan alınan görüntü, RGB-HSV dönüşümü ile üzerinde görüntü işleme yapılacak formata dönüştürülmüştür. Aracın kameradan alınan gerçek zamanlı veriler ışığında, verilen bir görevi otonom olarak yerine getirmesi hedeflenmiştir. Arama, bulma ve cisim kavrama süreçleri için uygun algoritmalar hazırlanmıştır. Su üstü testlerinde kameradan alınan gerçek zamanlı görüntü ile renk bilgisine dayalı olarak nesne ve konum tespiti yapılmıştır. Manipülatör, oransal denetim yöntemi ile otomatik olarak ilerleyerek kendinden 20 cm uzaktaki bir nesneyi 20 sn içinde yakalamıştır. Sualtı testlerinde nesne yakalamada sorunlar yaşanmıştır. Ancak hazırlanan sistem altyapısı üzerinde daha uygun kameralar kullanılarak başarıyı arttırmak mümkündür.

Anahtar Kelimeler: RGB-HSV dönüşümü, Sualtı robotları, İki eksenli manipülatör.

Image Processing Applications for 6 Degrees of Freedom (DOF) Underwater Vehicle and Manipulator System

Abstract

Robotics applications have been gaining considerable prominence in military and industrial fields. Researches on marine robotics and underwater vehicles focus on the benefits of use of the robot arm and its underwater applications. For instance; underwater vehicles can be used for shipwreck research, environmental analysis, archaeological research, underwater specimen collection and sub-ship inspection. In the study, the 2-axis robot arm (manipulator) prototype has been implemented for underwater vehicles that are intended to be used in underwater operations that people cannot

¹Sorumlu yazar serhaty@kocaeli.edu.tr, ²burakkilci1@gmail.com

reach or have difficulty in reaching. The prototype performs Rotational-Rotational (RR) movement. It is integrated into a 4 degree of freedom underwater vehicle and can grasp by the gripper end effector located in front of the vehicle. The manipulator movement is fulfilled by visual feedback of the error from the target to be grasped to the end-effector with a camera. The image processing software required for this process has been prepared by using OpenCV libraries in the C programming language on the Raspberry Pi 3 development board. The image taken from the camera has been converted by RGB-HSV conversion into the format on which the image will be processed. The vehicle is aimed to perform an assigned task autonomously refer to real-time data from the camera. Appropriate algorithms have been prepared for searching, discovering and gripping an object. In surface tests, an object and its location were determined based on color information with real time image taken from the camera. The manipulator moved automatically with the proportional control method and capture the object 20 cm away from itself within 20 seconds. There have been problems with object capturing during underwater tests. However, it is possible to increase the performance by using more suitable cameras on the prepared system infrastructure.

Keywords: RGB-HSV transformation, Underwater vehicles, Biaxial manipulator.

1. GİRİŞ

İnsan hareketlerini tekrar edebilen ve benzer mekanik yapıları olan robotların üretimi ve geliştirilmesi günümüzün en önemli çalışma konularından biri olmuştur (Adar, Ören ve Kozan, 2013). Endüstriyel ve insansız robotlar üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları sayesinde, üretim kalitesi, verimliliği ve üretim robotlarının kontrol hassasiyeti her geçen gün artmaktadır (Conker ve Karaca, 2019). Robot manipülatörlerin yapısı ve hareket kabiliyeti insan kol hareketlerine giderek yaklaşmaktadır ve bu konu üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı gözlemlenmektedir (Michalec, 2011). Robotlara insan duyularına benzer özellikler kazandırabilmek için algılayıcılar kullanılmıştır (Kanda vd., 2002). Bu şekilde robotlar giderek daha yetenekli hale gelmektedir. Endüstri 4.0 ve Nesnelerin İnterneti (IOT) gibi gelişmelerle beraber evlerde, sokaklarda, fabrikalarda yani hayatımızın çoğu yerinde akıllı nesnelere ve bu nesnelere haberleşebilen mobil cihazlar olacaktır. Bununla beraber sanayideki insan gücüne duyulan ihtiyaç azalarak yerlerini robotlara bırakacaktır.

Sualtı aracı ile robot kolunun entegrasyonu sualtında yapılan işleri oldukça kolaylaştırmıştır (Aras vd., 2017). Örneğin batık araştırması, çevresel ve arkeolojik araştırmalar, sualtında örnek toplama işlemleri ve gemi altı tamirati gibi insan kabiliyetlerinin kimi zaman yetersiz kaldığı durumlarda sualtı araçları kullanılabilir. Günümüzde, çok derinlerde kullanılabilen, bir veya daha fazla manipülatörle donatılmış Uzaktan Kumandalı Araçlar (ROV) üzerinde çalışılmaktadır (Antonelli, 2014). Robot manipülatörler, giriş gerilim ve akımlarını eşgüdümli olarak ayarlayarak istenen açı, hız veya yönelim çıkışlarını sağlayan birden fazla motor ve sürücü sistemine sahiptir. Bu nedenle çok girişli-çok

çıkışlı (Multi Input-Multi Output -MIMO) sistemlerdir. Bu tip sistemlerin, doğrusal bir modeli oluşturularak kontrol edilmesi oldukça güçtür (Boughdiri vd., 2012; Katibeha, Egthesadb ve Bazargan-Laric, 2016). Bu konuda yapılan bir çalışmada, sualtındaki nesnelerin takibini yapmak ve konumlarını hassas bir şekilde tespit etmek için, sualtı aracı ve robot kolundan oluşan otonom bir sistem tasarlanmıştır. Görüntü işleme ile nesne tespit edilmekte ve araç bulanık mantık yöntemi ile nesneye yaklaşmaktadır. Eklemlerin hızı ve konumu, ters kinematik hesaplamalarla, uç işlevci tam nesneyi tam kavrayacak konuma gelene kadar ayarlanmaktadır (Cai vd., 2020). ROV'lar genellikle gemi ve uçak batıklarının, sualtı tünel ve mağaralarının araştırılmasında kullanılır. Bu nedenle dar alanlarda geniş dönüş açısına sahip olmaları gerekir. Klasik ROV'lar bu şartlarda çalışamaz. Bunun önüne geçebilmek için yapılan bir çalışmada, yazarlar ağırlık merkezini ayarlayarak yüksek manevra kabiliyetine ulaşan küçük boyutlu yeni tip bir ROV tasarlamıştır (Tolstonogov vd., 2019). Başka bir çalışmada, sualtındaki nesne görüntüsü karadaki operatöre yollanmaktadır. Operatörün kol hareketi görüntü işleme metodları ile algılanıp manipülatör eklemlerindeki açı hareketleri ile eşleştirilmekte ve nesne kavranmaktadır (Hu vd., 2019).

Araçların daha bağımsız çalışabilmesi ve ROV operatörlerinin, sualtında kaynak yapmak, vana açıp kapamak gibi tekrarlayan görevlerini azaltmak için sualtı aracı ve robot kolundan oluşan otonom sistemlere ihtiyaç artmıştır. Otonom sualtı aracı (OSA) ve manipülatörden oluşan bir sistemin dinamik modeli ve benzetimi, OSA ve manipülatörün ayrı ayrı modüller şeklinde modellenip birleştirilmesi ile elde edilebilir. Yerçekimi, sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri ile yalpa, yunuslama ve yönelme momentlerinin araç ve kol

kütlelerinin hızlarına etkisi bilgisayar ortamında gözlenerek aracın yaklaşık dinamik davranışı kestirilebilir. Büyük sualtı araçlarında bağlantı etkileri önemsiz olabilir. Ancak küçük araçlarda denetleyici geliştirirken kol hareketinin ana gövde üzerine etkileri dikkate alınmalıdır (Periasamy, Asokan ve Singaperumal, 2012).

Sualtı aracından görüntü alma, akustik olarak iletme ve görüntü işleme işlemleri bu alanda yer bulan diğer bir çalışma konusudur. Örnek olarak bir çalışmada sualtı aracından alınan görüntüler, Canny Kenar Bulma, Hue, Luma ve Saturasyon algoritmaları kullanılarak iyileştirilmiştir (Manu ve Karthik, 2020). Manipülörlerin belirli bir çalışma uzayı ve izlemesini istediğimiz bir yörüngesi vardır. İstenenleri yerine getirebilmek için eklemlerin ters kinematik hesaplamaları gerekebilir. Bazı çalışmalarda bu hesaplamalar için karmaşık geometrik yöntemleri ve işlem yükü getiren sayısal yöntemleri birleştiren yöntemler önerilmiştir (Routray vd., 2019). Görüntü işleme uygulamalarına yönelik yapılan örnek bir çalışmada ise denizden 100 m derinlikte görüntü işleme yöntemleri ile deniz kabukları tespit edilip araca monte edilen sabit bir kolun vakum sistemiyle toplanmıştır. Burada kol hareket etmemektedir. Bu nedenle aracın, nesnenin tam üstüne gelip sabit kalması zorunludur (Nishida vd , 2019). Benzer bir çalışmada sualtı aracı farklı renkte üç nesneyi referans olarak kendi konumunu tespit etmektedir. Ardından hedefe en küçük kareler yöntemiyle yaklaşarak üzerine monte edilmiş sabit kol ile nesneyi yakalamaktadır (Mangipudi ve Li, 2019).

Bu çalışmada; 4 serbestlik dereceli bir sualtı aracına monte edilmiş 2 serbestlik dereceli manipülör sistemi (SAMS) tasarımı verilmiştir. Manipülör aslında 3 serbestlik derecesine sahiptir ama bu çalışmada kontrol için iki eksen (x-y) kullanmış, yukarı aşağı eksen (z) belirli bir değere ayarlanıp sabit tutulmuştur. SAMS üzerindeki kameradan bir nesnenin tespiti ve manipülör ile nesneye ulaşarak onu yakalama süreçleri kullanılan görüntü işleme ve eksenel denetim algoritmaları üzerinden açıklanmıştır. Manipülörün hareketli olması, sualtı aracının serbestlik derecesini idealde 2 derece daha artırarak nesneye yaklaşma koşullarını daha esnek hale getirmektedir. Araç gövdesi, kontrol kartı ve üzerindeki yazılımlar tasarlanan SAMS'ne özgün olarak hazırlanmıştır. SAMS, üzerinde yeni uygulamalar ve kontrol yöntemleri geliştirmeye açık olarak tasarlanmıştır. Nesnenin sualtında algılanması kısıtlıdır. Suyun kırıcılığı, konum tespitini zorlaştırmaktadır. Stereo kamera kullanılması başarımı arttıracaktır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Lucky Fin İnsansız Sualtı Aracı

Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde geliştirilen Lucky Fin isimli İnsansız Sualtı Aracı iki sephiye, buna ek iki itiş ve manevra motoruna sahip dört serbestlik dereceli sualtı aracıdır. Üzerindeki manipülör ise sağ-sol (y) ve ileri-geri (x) olmak üzere 2 serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 1). Araç kontrol kartı üzerindeki Raspberry Pi mini bilgisayarı kameradan gelen görüntüyü işleyerek hedefle uç işlevci arasındaki mesafeyi hesaplamaktadır. Servo motorlar bu mesafe her eksende sıfır olana kadar ileri yönde çalışır ve kol nesneye uzanır. Uç işlevci nesneyi yakalar (Şekil Ek.1)



Şekil 1. Lucky Fin İnsansız SAMS

2.2. Raspberry Pi 3 Model B+

Önerilen sistemde görüntü işleme ve denetim süreçleri, öğrencilerin gömülü sistemler üzerinde yazılım geliştirmeleri için tasarlanmış bir mini bilgisayar olan Raspberry Pi 3 Model B+ (Choy vd., 2020) üzerinde yürütülmektedir (Şekil 2). Bu çalışma kapsamında Raspberry Pi, görüntü geribildirim verisini işleyerek, sualtı aracı üzerine monte edilmiş 2 serbestlik dereceli robot kolunu denetlemiştir. Arduino, kullandığı yüksek seviyeli programlama dili nedeniyle gerek kodlama, gerek uygulama açısından Raspberry Pi'ye göre daha kullanışlı bir geliştirme platformudur. STM tabanlı geliştirme kartları ise değiştirilebilir giriş çıkış adresleri ve düşük maliyeti nedeniyle tercih edilmektedir.

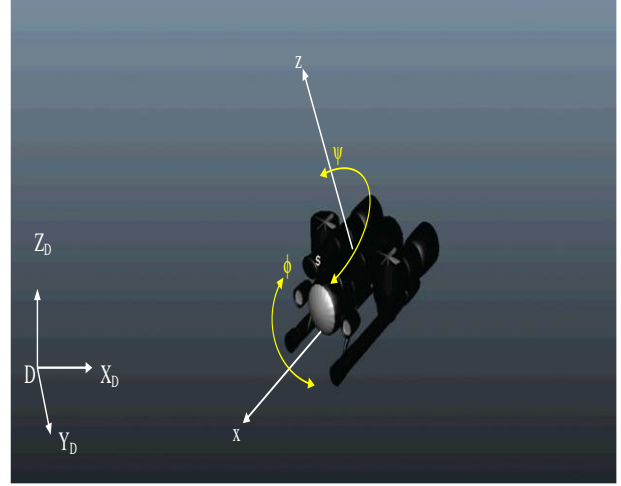


Şekil 2. Raspberry Pi 3 Model B+

Bu uygulamada çok fazla giriş çıkış birimi bulunmamaktadır. PWM adreslerinin sabit olması bir sorun oluşturmamaktadır. Buna karşılık, işlem kapasitesi yüksek bir mini bilgisayar olması, OpenCV kütüphanelerinin kurulabilmesi, bu kütüphane üzerindeki görüntü işleme kütüphanelerine erişim sağlanabilmesi, kameradan alınan verilerin gecikmesiz işlenmesine ve görüntü işleme algoritmalarının kolay yazılmasına olanak sağlamaktadır. 2 eksenli manipülâtörün gerçek zamanlı kontrolü için gerekli yazılım kodları Python dilinde hazırlanmış ve kullanılmıştır.

2.3. Dört Serbestlik Dereceli Sualtı Aracı

Dünya (D) referans çerçevesi ve aracın hareket edebildiği yerel eksenler Şekil 3'te verilmiştir. Araç yatay motorlar aynı hızda çalıştığında x doğrultusunda düzlemsel olarak ilerlemektedir. Farklı hızlarda veya ters yönlerde çalıştığında ise z eksenini etrafında ψ açısız hızıyla ve ψ açısız yer değıştirmesiyle dönmektedir. Aracın dikey motorları aynı hızda çalıştığında z doğrultusunda batmaktadır. Farklı hızlarda veya ters yönlerde çalıştığında ise ρ açısız hızıyla ve ϕ açısız yer değıştirmesiyle x eksenini çevresinde dönmektedir (Tablo. Ek.1).



Şekil 3. Sualtı Aracının Serbest Hareket Ettiği Yönlere

2.4. İki eksenli RR (Rotasyonel-Rotasyonel) Robot Kolu

RR eksenli (eklemlı) robot kolu, 2 ekseninde açısız dönüş yapan bir manipülâtör sınıfıdır. Hareket eksenleri sırasıyla insanın omuz ve dirsek hareketlerine benzer (Şekil 4). Elin kavrama işlevi ise uç işlevci tarafından yapılır (Ataman, 2017). Bu rotasyonel hareketler robot koluna esneklik sağlar, çalışma uzayını genişletir ve hedefe ulaşma süresini kısaltır. Buna karşılık eklemleri harekete geçiren servo motorların her birinin hata payları denetleyicilerden alınan geribildirimlerle düzeltilmelidir (Şahbaz, 2018). Ayrıca her bir eklemin kendi referans çerçeveleri üzerinden birbirine göre bağılı dönüşüm hesaplamaları oldukça karmaşık olduğundan RR tipi robot kollarının etkin olarak denetimi oldukça önemlidir.

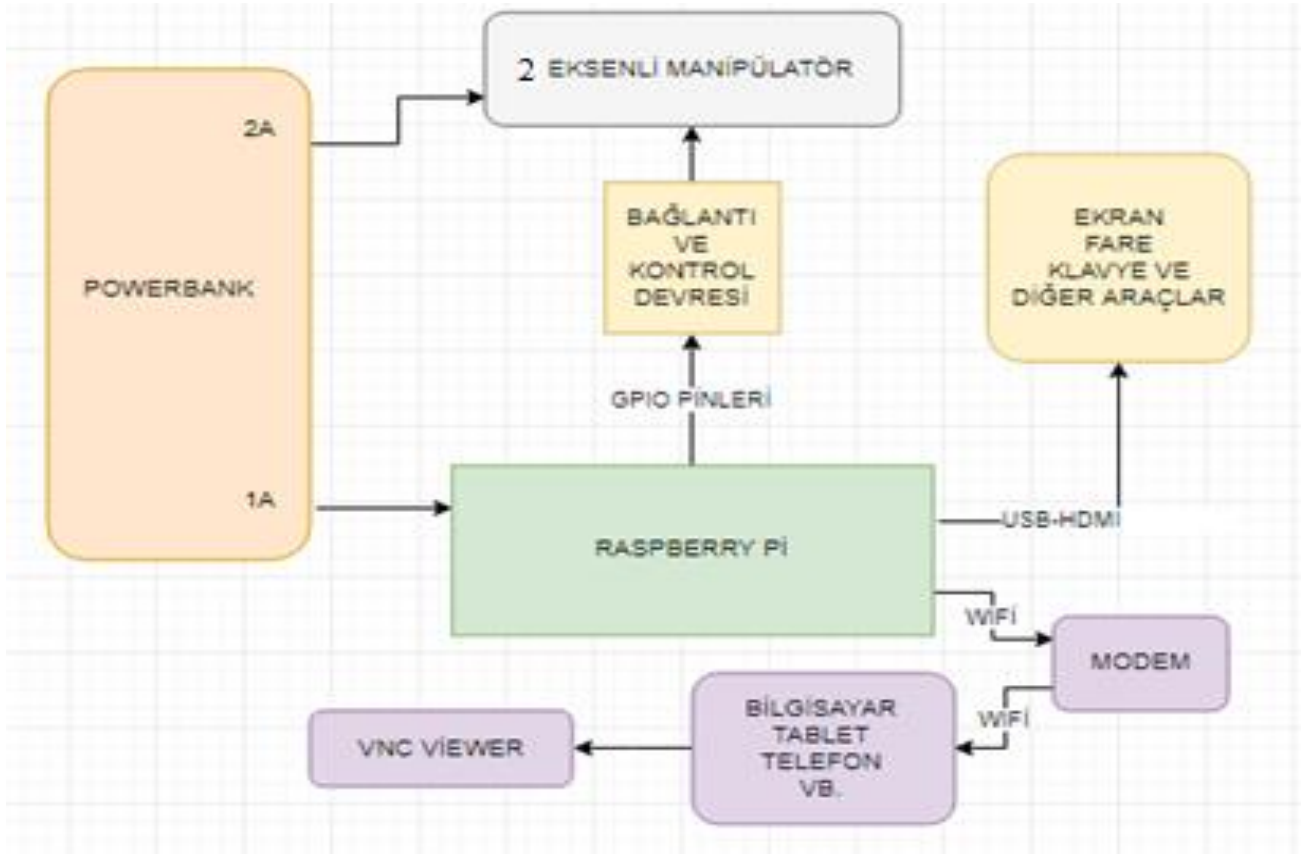


Şekil 4. İki eksenli manipülâtör (Çalışmada 3. eksen kontrol edilmemiştir)

2.5. Manipülâtörün Denetim Şeması

Uygulama aşamasında ilk olarak Raspberry Pi yapılandırılmıştır. Robot kolunda her bir eklemin sırayla hareketini gözlemlemek için servo motorlar önce kademeli biçimde kontrol edilmiştir (Şekil Ek.1). Denetim ve haberleşme işlemleri için üzerinde algılayıcıların, mini bilgisayarın, haberleşme

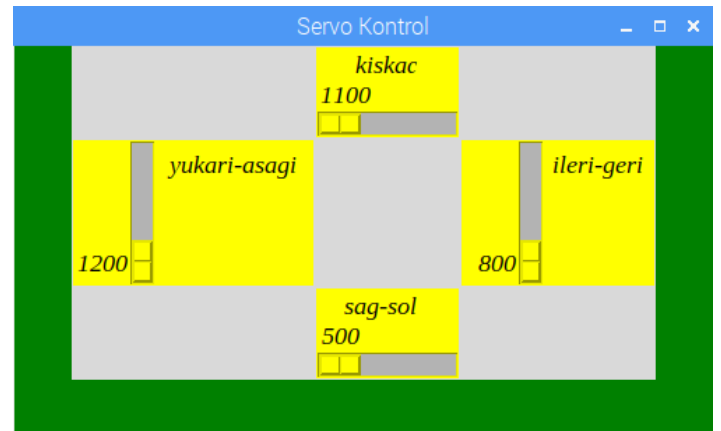
bağlantılarının, motor ve sürücülerinin bulunduğu bir kontrol kartı tasarlanmıştır. VNC Viewer yazılımı ile mikrodenetleyiciye uzaktan erişilebilmektedir. Raspberry Pi 1 A, manipülâtör ise 2 A ile güç kaynağı üzerinden beslenmektedir. Robot Kolu, mikrodenetleyici, güç katı ve bilgisayar bağlantılarının prensip şeması Şekil 5.'te verilmiştir.



Şekil 5. İki eksenli manipülâtör denetim sisteminin şeması

2.6. Sualtı Aracı ve Manipülâtör Sistemi için Grafik Arayüzü Tasarımı

Arayüz, Python dilinde, Tkinter arayüz modülü kullanılarak hazırlanmıştır. Arayüz üzerinde yukarı-aşağı, sağ-sol, ileri-geri ve uç işlevcinin açılıp-kapanmasını sağlayan motor işlevleri oluşturulmuştur. Manuel kontrolde, nesnenin yüksekliği gözle tespit edilebildiği için otomatik kontrolde kullanmadığımız yukarı aşağı eksenini de kullanılmıştır. Yapılandırmalar sonucunda oluşturulan GUI ekranı Şekil 6.'da verilmiştir. Bu arayüz ile araç, kullanıcı tarafından el ile yönlendirilebilmektedir.



Şekil 6. Robot kolu için hazırlanan el ile denetim arayüzü

2.7. Gerçek Zamanlı Görüntü İşleme ile Manipülâtör Denetimi

USB kameradan alınan görüntü üzerinde; kırmızı etiketli kısıkaç ile mavi etiketli nesne arasındaki mesafe, 2 boyutlu imge uzayında piksel bazlı hesaplanmıştır. Bu çalışmada nesne olarak genelde kalem, çubuk gibi, robot uç işlevcisi hangi yükseklikte olursa olsun z (yukarı aşağı) doğrultusunda yakalanabilecek uzunlukta nesnelere seçilmiştir. Kameradan alınan görüntü bir çerçeveye kaydedilir. RGB'den HSV uzayına dönüştürülür. Nesne ve Uç İşlevci önceden tanımlanan renk aralıkları içinde tespit edilir. Nesnenin merkezi ve uç işlevcinin merkezinin konumları arasındaki fark hesaplanır. Aralarındaki mesafe hata olarak kabul edilmiştir. Bu hata oransal olarak azaltılarak belli bir mesafeye gelindiğinde cisim kavranmıştır. Programın PseudoCode'u Şekil 7'de verilmiştir. Görüntüde renklerin HSV renk uzayındaki eşik değerleri belirlenmiştir. Pikseller arası mesafe (Denklem 1)'deki gibi hesaplanabilir (Ataman,2017);

$$|AB| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

Burada mavi ile işaretlenmiş hedefin x eksenindeki koordinatı x_2 ile, kırmızı ile işaretlenmiş uç işlevcinin bu eksenindeki koordinatı x_1 ile ifade edilmiştir. Benzer şekilde mavi hedefin y eksenindeki koordinatı y_2 , kırmızı ile işaretlenmiş uç işlevcinin bu eksenindeki koordinatı y_1 'dir. Kamera, uç işlevci ve nesne arasındaki konum hatasını geri bildirir. Denetleyici, robot kolu uç işlevcisini hareket ettirmek için hata ile orantılı olarak servo motoru çalıştırır. Uç işlevci ilerleyerek referans konum olan, nesneye ulaşır. Hassasiyet ve kesinlik gerektiren kontrol uygulaması yapılmak istendiğinde kapalı çevrim oransal kontrol yöntemi kullanılır. Kullanılan görüntünün köşegen uzunluğunun hesaplanması ve

köşegenin piksel uzaklığına bölünmesi ile 1 pikselin uzunluk değeri hesaplanabilmektedir. Şekil 8.'de bulunan imgeler gösterilmiştir. Bu işlem ile beraber konumu bilinen manipülâtörün nesneye olan gerçek uzaklığı hesaplanabilmektedir. Nesnenin yakalanmasında; hesaplanan mesafe üzerinden iki eksende oransal kontrol yapılır. Öncelikle kolun ana gövdesini taşıyan gövde servo motoru (yazılımda gövde değişkeni ile temsil edilmiştir) z eksenini etrafında ϕ açısıyla sağ-sol (y) yönünde oransal hareket eder. Yer değiştirme ise z'ye dik olan x-y düzleminde olur.


```

//Kütüphaneleri projeye dahil et
import RPi.GPIO , cv2, time , math...
// Projede kullanılacak kamera kaynağı ve GPIO pinlerini tanımla ve görüntü
// boyutlarını ayarla
cap=cv2.VideoCapture(0)...
Camera 320x240 ayarla
pi=pigpio()// servomotorları sürmek için gerekli kütüphane

// Projede kullanılacak değişkenleri tanımla ve ilk değerlerini ata
Kiskac(uçışlevci servomotorunun içeriği), govde (y ekseninde nesnenin karşısına gelmeyi
sağlayan servomotorun verisi), yukariasagi (bir kez kullanılacak), AB(karesel ortalama hata,
ilerigeri (x ekseninde nesneye ilerleme sağlayan
servomotorun verisi), mesafe2 (y eksenindeki hata), mesafe1 (x eksenindeki hata),
kazanc(oransal kazanç)...

// Kolu başlangıç konumuna getir: GPIO pinlerine bağlı
7. pindeki servo motora kiskac değerinin darbe genişliğinde PWM ver.
11. pindeki servo motora ilerigeri darbe genişliğinde PWM ver.
8. pindeki servo motora yukariasagi değerinin darbe genişliğinde PWM ver.Daha sonra hep
bu yükseklikte kalacak, değişmeyecek),
9. pindeki servo motora govde degerinin darbe genişliğinde PWM ver.

// Programın çalışacağı döngüyü başlat
WHILE AB<1
//Görüntünün güncel karesini (opencv2 ile) yakala
// ve frame değişkenine kaydet
// Görüntüyü orjinal hali ile göster
cv2.imshow('original', frame)
// 25 milisaniye boyunca klavye girdisi bekle
// imgeyi BGR (Blue Green Red) den
// HSV (Hue Saturation Vibrance) renk uzayına dönüştür
hsv=cv2.cvtColor (frame, cv2.Color_BGR2HSV)
//Belirli bir Mavi Eşik değeri belirleyerek hedefin merkez konumunu
//bul, ilgili pixelleri mavi ile maskele
IF BETWEEN lower blue, upper blue, maskblue
ELSE PRINT ('Nesne bulunamadı') ; EXIT
//Belli Kırmızı Eşik değeri belirleyerek uç işlevcinin merkez konumunu bul
lower red, upper red, maskred
// orta noktalarını nokta olarak işaretle
redpoint, bluepoint

//y eksenini boyunca redpoint ve bluepoint in frame içindeki y koordinatlarını bul.range(1:319)
y1=KoordinatRedpoint_y ; y2=KoordinatBluepoint_y
//x eksenini boyunca redpoint ve bluepoint in frame içindeki x koordinatlarını bul.range(1:239)
x1=KoordinatRedpoint_x; x2=KoordinatBluepoint_x
Mesafe2= y2-y1;
Mesafe1= x2-x1;
AB= sqrt(sqr(Mesafe2)+sqr(Mesafe1))
//y ve x eksenindeki servomotorların konumunu oransal kontrolle güncelle (döngüde hata sıfıra
//yaklaşana kadar
Govde=Govde+kazanc*Mesafe2
ilerigeri=ilerigeri+kazanc*Mesafe1

END WHILE

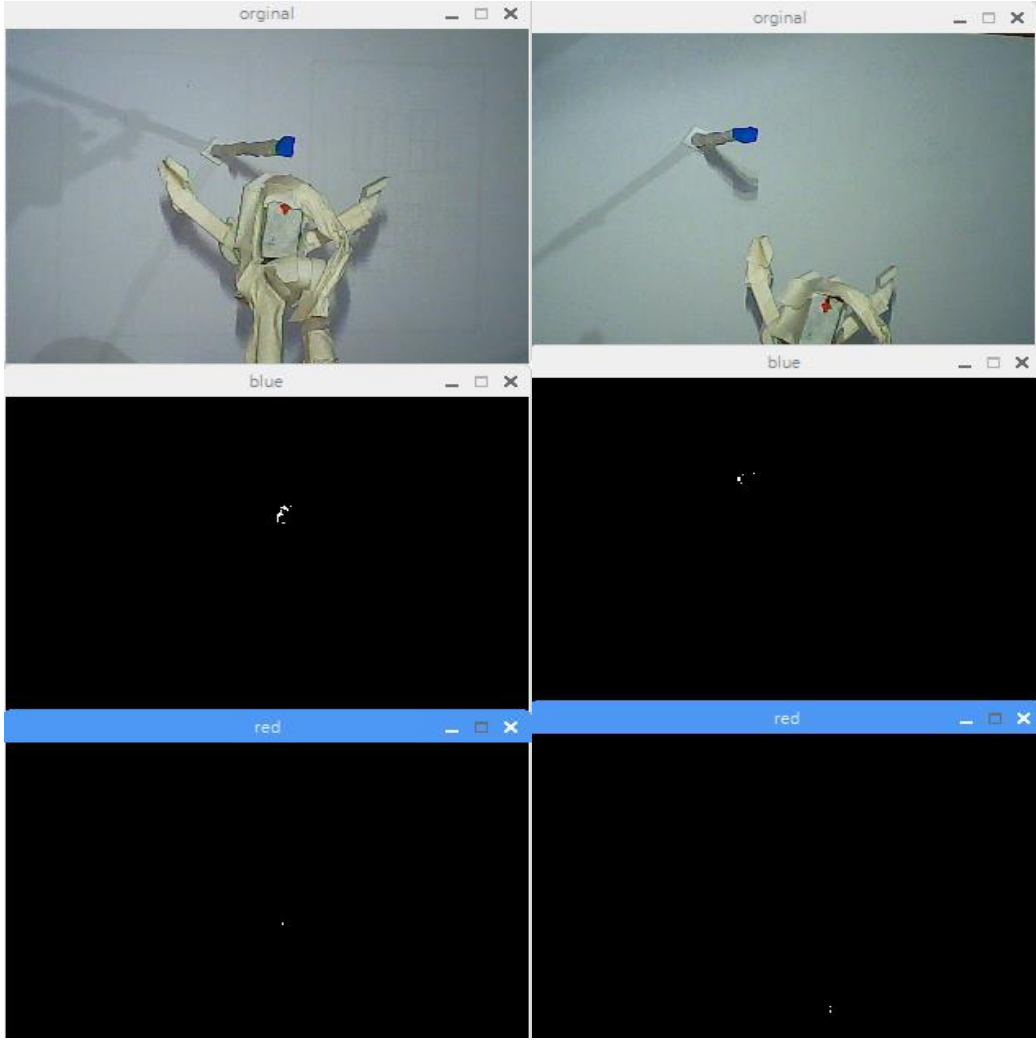
WHILE Akim<Eşik Akım Değeri
Kiskac=kiskac+1
END

```

Şekil 7. Görüntü İşleme ve Oransal Kontrol Programı (Pseudo Code)

Hatanın y bileşeni oransal olarak azalır ve sonunda ortadan kalkar. Diğer yandan dirsek servo motoru (yazılımda ileri-geri değişkeni ile temsil edilmiştir) x doğrultusunda oransal kontrol ile ilerleyerek uç işlevciyi nesneye ulaştırmıştır (Şekil Ek.1). Artık bileşke mesafe

$|AB| = 0$ 'a çok yakın bir değerdir. Burada geri besleme ile oransal kontrol yapılarak nesneye ulaşılmıştır.



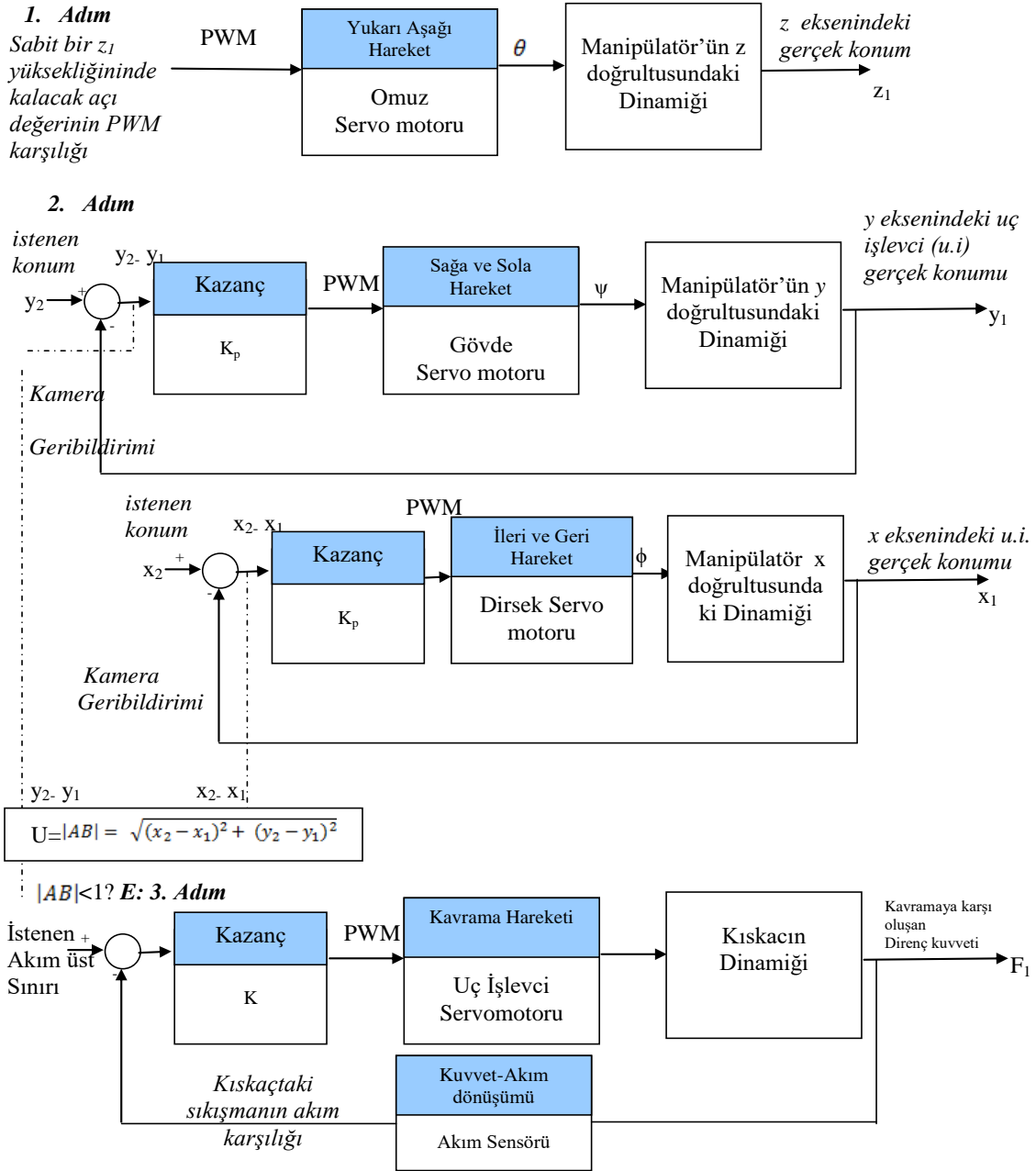
Şekil 8. Tespit edilen imgeler

Uç işlevci bu aşamadan sonra nesneyi yakalar. Bu çalışmada, sualtı aracının kendisi nesne yakalarken hareket halinde değildir. Operatör tarafından getirildiği noktada sabit durmaktadır. Manipülatorün denetim blok şeması Şekil 9 'da verilmiştir:

- 1. Adımda, manipülator z doğrultusunda belirli bir yüksekliğe ayarlanır.
- 2. Adımda kameradan alınan geribildirim göre y ve x eksenlerinde ilerlenir. x eksenindeki ilerleme için en uygun kazanç değeri, deneme yanılma yolu ile $K_p=0.7$

seçilmiştir. Yüksek K_p değerlerinde uç işlevci nesneye çarpıp düşürmüştür. Düşük değerlerde ise ilerleme yavaş olmuştur. Gövdenin sağ ve sol hareketinde kazanç daha yüksek seçilebilir. Ancak bu çalışmada aynı seçilmiştir.

- $|AB|$ mesafesi 1 pixelin altına inince 3. Adıma geçilir ve kısa nesneyi kavrar. Belirli bir akım sınır değerine ulaşınca hata sıfır olur ve kısa servo motoru son PWM değerini korur.



Şekil 9. Sisteme ait kapalı çevirim kontrolü

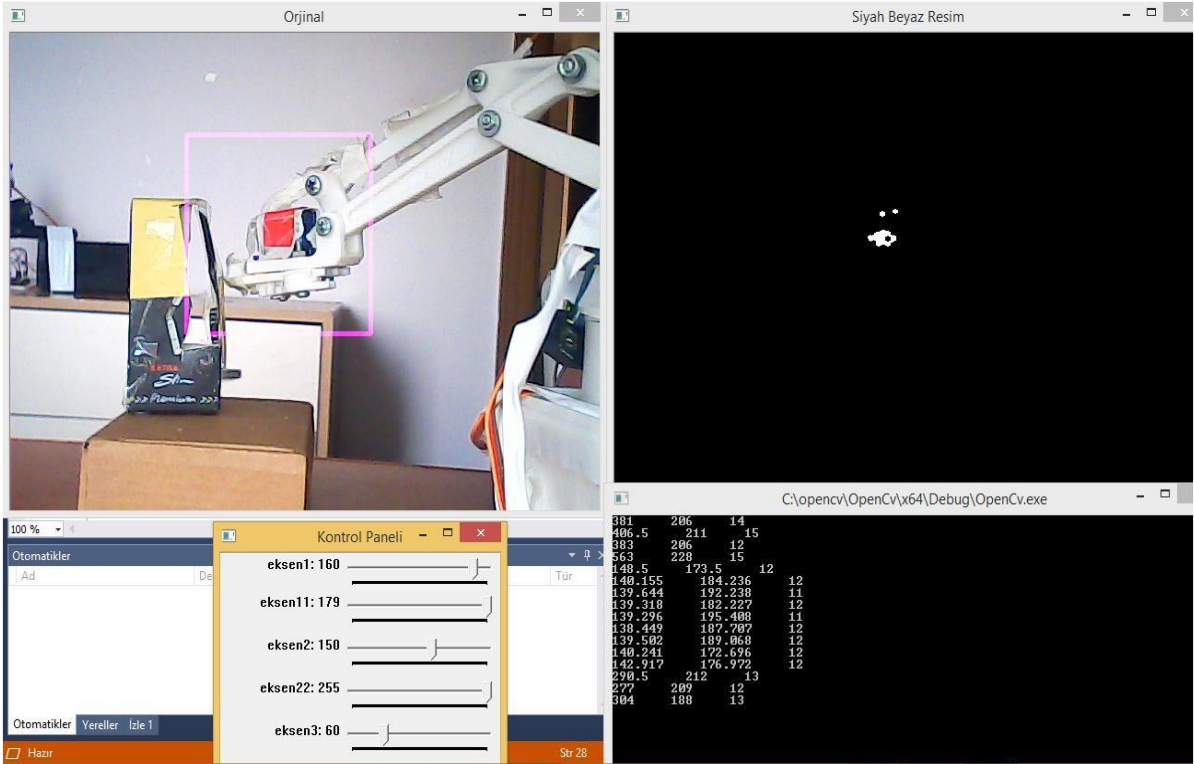
3. BULGULAR

Aynı algoritmayı farklı renkte nesnelere tespit ve yakalama için kullanabilir, aranacak rengi önceden tanımlayarak farklı nesne tespit uygulamaları yapabiliriz. Renk kontrol paneli üzerinden hangi rengin aranacağı ayarlanabilmektedir (Şahbaz,2018). Tespit edilen renkli nesnenin siyah beyaz görüntüsü ekranın sağ üstünde gösterilir. Nesnenin etrafında otomatik olarak pembe bir çerçeve oluşur ve x, y, z koordinatları ise sağ altta gösterilir. Şekil 10'da uç işlevcinin tespiti, Şekil 11'de ise nesnenin tespiti verilmiştir. Uç işlevci ve

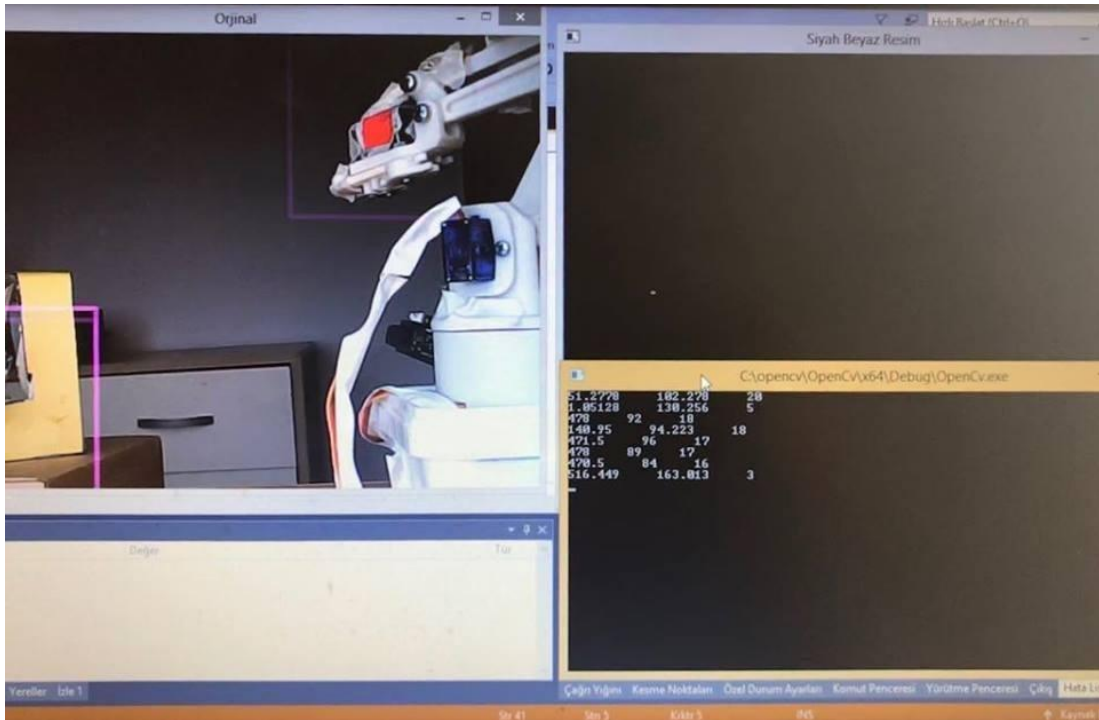
nesne hareket ettirilerek koordinatlarındaki değişim ekranda sayısal olarak raporlanmıştır.

SAMS, uzanabileceği bir mesafe olan 20 cm'e kadar nesneye müdahale etmez. Bu mesafeye kadar sadece ölçüm (tarama) yapar. Bu mesafenin altında, manipülör nesneye yaklaşmaya başlar ve kavrama hareketini gerçekleştirir. x, y, z verileri tespit ettikleri rengin merkezinin o anki koordinatlarını vermektedir. Kontrolde z_1 ve z_2 kullanılmamaktadır. Uç işlevci den alınan x_1 , y_1 ile nesneden alınan x_2 , y_2 koordinatları arasındaki fark denetim sürecini belirlemektedir.

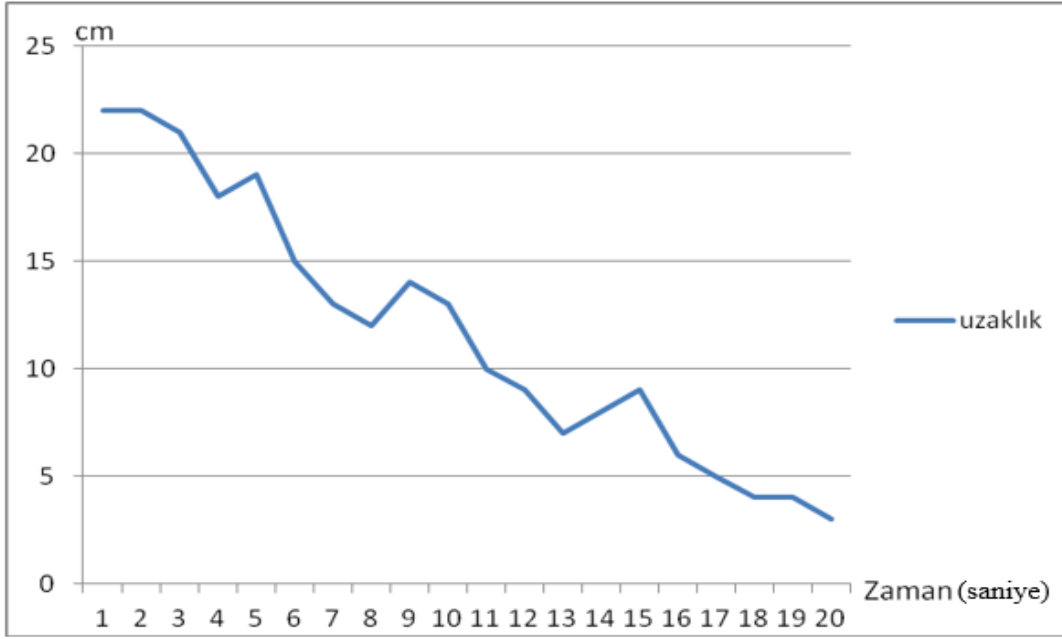
Testler su altında tekrarlanmıştır. Nesne algılanmış, manipülatör tepki vermiş ancak su üstündeki başarı elde edilememiştir.



Şekil 10. Manipülatör uç işlevcinin tespiti ve koordinat bilgileri



Şekil 11. Hedef nesnenin tespiti ve koordinat bilgileri



Şekil 12. Manipülâtörün konumunun zamana bağılı olarak cisme olan $|AB|$ uzaklık değişimi

3.1. Deneysel Sonuçlar

Kameradan alınan görüntünün işlenmesi sonucu elde edilen uzaklık işlemciye aktarılmış ve bu uzaklık verisi kullanılarak cisme otomatik yaklaşım sağlanmıştır. Şekil 12’de işlemciye aktarılan $|AB|$ bileşke uzaklık bilgisinin zamana göre değişimi gözlenmektedir.

Hazırlanan yazılım, hesaplanan mesafe üzerinden y ekseninde robot kolu gövdesine sağ-sol hareketi yaptırırken diğer yandan x doğrultusundaki dirseği ileri-geri doğrultusunda ilerletmektedir (Şekil Ek.1). Burada geri bildirim ile oransal kontrol yapılarak nesneye ulaşılmıştır. Kavrama hareketi, kısıkaç üzerindeki servo motorun çektiği akım belirli bir değeri geçene kadar devam etmiştir. SAMS, dip akıntıları, suyun kaldırma kuvveti gibi akışkan etkilerin bulunduğu sualtı ortamlarında hassas görevleri yerine getirebilmek için hava ortamına göre daha yavaş hareket etmelidir (Şekil Ek.2). Uç işlevimiz olan kısıkaç, kendinde 20 cm kadar uzakta olan bir nesneyi, görüntü işleme ve kontrol algoritmalarını kullanarak su üstü testlerde 20 sn.’de yakalamıştır. Su altında ise kırılmanın farklı olması nedeniyle yakalayamamıştır.

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

2 eksenli manipülâtör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Manipülâtör sualtı aracına entegre edilmiştir. Görsel

arayüz ekranından manipülâtörün otomatik ilerlemesi izlenmiştir. Sabit bir kameradan alınan gerçek zamanlı görüntü ile nesne tespiti ve yakalanması sağlanmıştır.

Tek kamera kullanılarak yapılan hesaplamalar yerine, paralel konumlandırılmış iki kameradan stereo görüntü oluşturularak derinlik analizi yapılabilir. Böylece nesnenin 3 boyutta konumu hakkında daha sağlıklı sonuçlar alınabilir. Literatür çalışmalarında ağırlıklı olarak şekil bilgisi referans alınarak nesne tespit edilmektedir. Kontrol yöntemi olarak ise bulanık mantık, yapay sinir ağıları (YSA) gibi daha yeni kontrol yöntemleri denenmektedir. Bu çalışmada, renk bilgisine dayalı nesne tespiti yapılmıştır. Bu durum, sualtında nadir bulunan ve ayırt edici bir renge sahip nesnenin tespitini kolaylaştırmaktadır. Ancak yöntem, yosun gibi doğal bir örtü ile kaplanmış nesnelere etkin biçimde çalışmayacaktır. Manipülâtör eksenleri PWM girişi ile orantılı açı değerleri veren doğrusal bir yapıya sahiptir. PWM girişi ile itici motorlar arasında da doğrusala yakın bir ilişki vardır. Doğrusal sistemlerde bulanık veya YSA denetleyicilerin oransal denetleyicilere göre belirgin bir üstünlükleri bulunmamaktadır. Eklemlerin hızı ve konumu bazı çalışmalarda ters kinematik hesaplamalarla yapılmaktadır. Oransal kontrolün iteratif yapısına göre, eksen konumlarının doğrudan hesaplanması ve ayarlanması önemli bir üstünlüktür.

İleride yapılacak çalışmalarda eksen konumları kinematik hesaplamalarının yapılması planlanmaktadır.

Daha önceden örnek verdiğimiz Nishida vd. (2019)'nin çalışmasında, görüntü işleme yöntemleri kullanılarak sualtı aracı deniz kabuklarının tam üzerine getirilmeye çalışılmıştır. Çünkü yapılan çalışmada nesnelere sabit bir vakum kolu ile toplanmak istenmiştir. Nesneye yaklaşma ve kavrama aşamalarında manipülatörün eksenel açılarının ayarlayabilmesi, sualtı aracına esneklik sağlamaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda, operatörün kol hareketleri görüntü işleme veya giyilebilir sanal gerçeklik eldivenleri ile manipülatöre bildirilmektedir. Bu çalışmalar, gelişmiş birer ROV uygulaması olmakla birlikte, operatöre bağımlılığı devam ettirmektedir. Ancak bu çalışmada örüntü işleme ile nesnenin uç işlevciye olan uzaklığının tespit edilmiştir. Buna göre manipülatör uç işlevcisinin otomatik olarak nesneye yaklaşması sağlanmıştır. Bu da sualtı aracının otonomluğunun artmasına katkı sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmaya katkılarından dolayı Halit ATAMAN ve Ali ŞAHBAZ'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Adar, G., Ören, H., ve Kozan, R. (2013). 5 serbestlik dereceli robot kolunun modellenmesi ve kontrolü, SAÜ. Fen Bil. Der. 17(1), 155-160.

Antonelli, G. (2014). Underwater Robots, 3rd ed., Springer International Publishing, Switzerland.

Aras, M.S.M., Aripin, M.K., Nor Azmi, M. W., Khamis, A., Zambri, M. K. M., and Ab Halim, M. F. M. (2017). 3 DOF small scale underwater manipulator-Gripper for unmanned underwater vehicle, Proceedings of the IEEE 7th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS), Kuala Lumpur, 123-126.

Ataman, H. (2017). Sualtı Aracı İçin 3 Eksenli Manipülatör Tasarımı, Lisans Bitirme Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Bölümü, 3-4, Kocaeli.

Boughdiri, R., Nasser, H., Bezine, H., M'Sirdi, N. K., Alimi, A. M., and Naamane, A. (2012). Dynamic modeling and control of a multi-fingered robot hand for grasping task, Procedia Engineering, 41, 923- 931.

Cai, M., Wang, Y., Wang, S., Wang, R., Ren, Y., and Tan M (2020). Grasping Marine Products With Hybrid-Driven Underwater Vehicle-Manipulator System, IEEE Transactions On Automation Science And Engineering, 17(3), 1443-1454.

Choy, J. L. C., Wu, J., Long, C., and Lin, Y.-B. (2020). Ubiquitous and Low Power Vehicles Speed Monitoring for Intelligent Transport Systems, IEEE Sensors Journal, Early Access, 1-10.

Conker, Ç., ve Karaca, A. (2019). Bulanık Mantık Esaslı Karar Destek Sistemi ile Robot Elin Kuvvet Kontrolü, DEU FMD 21(62), 433-447.

Çölgeçen, M. C. (2019). Sualtı Aracında Bulanık Mantık Yöntemiyle Derinlik Kontrolü Uygulamaları, Lisans Bitirme Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Bölümü, 21-22, Kocaeli.

Ergan, A. F. (2014). Sualtı Deney Platformu İçin Donanım Ve Kullanıcı Arayüzünün Tasarlanarak Gerçeklenmesi, Y.Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi FBE Elektronik ve Haberleşme AD, 69-70, Kocaeli.

Fossen T. I. (1991). Nonlinear Modelling and Control of Underwater Vehicles, Norwegian Institute of Technology.

Hu, Z., Zhu, X., Tu, D., Zhang, X., and Wang, M. (2019). Manipulator Arm Interactive Control in Unknown Underwater Environment, Proceedings of the 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM), 494-497, Shanghai, China.

Kanda, T., Ishiguro, H., Ono, T., Imai, M., and Nakatsu R. (2002). Development and Evaluation of an Interactive Humanoid Robot "Robovie", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics Automation, USA, 1848-1855.

Katibeha, F., Eghtesadb, M., and Bazargan-Laric, Y. (2016). Dynamic modeling and control of a 4 DOF robotic finger using adaptive-robust and adaptive-neural controllers, International Journal of Robotics, 4(4), 51-61.

Kılıcı, S. B., (2020). Dört Serbestlik Dereceli Sualtı Aracının Dinamik Modellenmesi ve Benzetim Çalışmaları, Y.Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi FBE Elektronik ve Haberleşme AD, 36, Kocaeli.

Kulaç, O. (2019). STM32 ile Otonom Araç Kontrolü, Lisans Bitirme Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Bölümü, 14-23, Kocaeli.

Manu, D. K., and Karthik, P. (2020). Development and Implementation of AUV for Data Acquisition and Image Enhancement, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 9(4), 2088-2093.

Mangipudi, C. P., and Li, P. Y. (2019). Vision based Passive Arm Localization Approach for Underwater ROVs Using a Least Squares on SO(3) Gradient Algorithm, Proceedings of the American Control Conference (ACC), 5798-5803, Philadelphia.

Michalec, R. (2011). Modeling and control of multifingered dextrous manipulation for humanoid robot hands. PhD Thesis, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, Paris, 588.

Nishida, Y., Ahn, J., Sonoda, T., Watanabe, K., Ura, T., Yasukawa, S., and Ishii, K. (2019). Benthos Sampling by Autonomous Underwater Vehicle Equipped a Manipulator with Suction Device, IEEE Underwater Technology (UT), 1-4, Kaohsiung.

Periasamy, T., Asokan, T., and Singaperumal, M. (2012). Investigations on the dynamic coupling in AUV-manipulator system and the manipulator trajectory errors using bond graph method, International Journal of Systems Science, 43(6), 1104-1122.

Routray, S., John, A. T., Syed, A., and Jadhavi P. (2019). Inverse Kinematics Solution for a Robotic Arm Through Geometric and Iterative Fusion Based Modelling, IEEE International Conference on Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER), 1-7, Manipal.

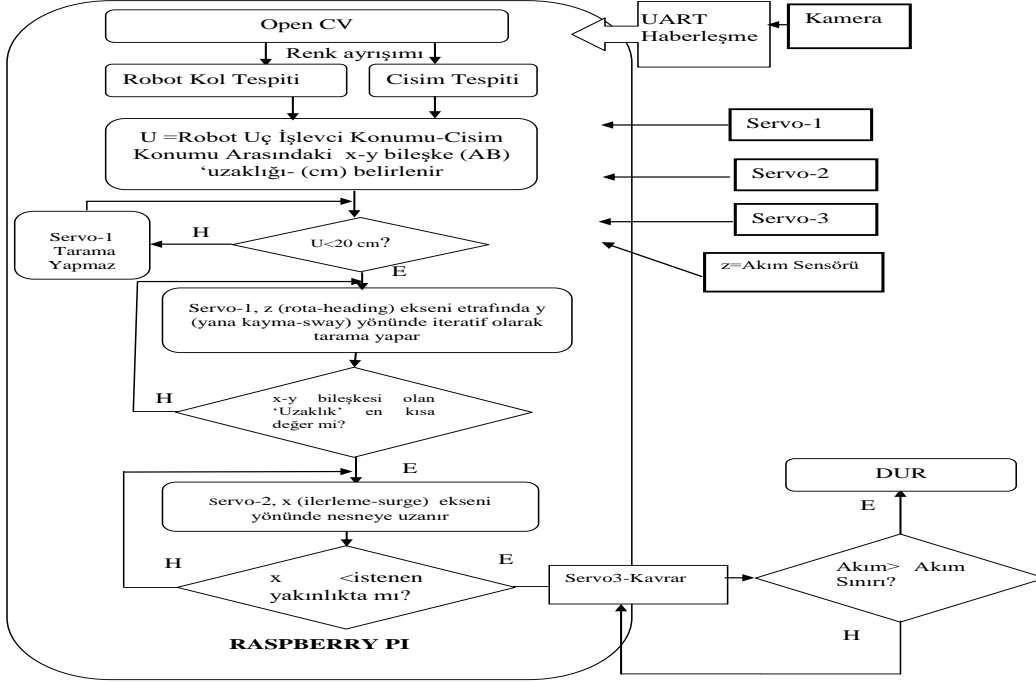
Şahbaz, A. (2018). Sualtı Aracı İçin Manipülâtör Tasarımı, Lisans Bitirme Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Bölümü, 45-52, Kocaeli.

Tolstonogov, A.Y., Dzyaman, M. A., Sebto, A.Y., Filonov, I.V., and Chemezov, I. A. (2019). The compact ROV with Variable Center of Gravity and its Control, IEEE Underwater Technology (UT), 1-7, Kaohsiung, Taiwan.

Yılmaz, S., ve Kılıcı, S.B. (2019). İnsansız Sualtı Araçlarının Kinematik Modellenmesi, Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi, Kocaeli, 550-557.

EKLER

EK A



Şekil Ek 1. Sisteme ait akış şeması



Şekil Ek 2. Kocaeli Üniversitesi Lucky Fin Sualtı Aracı + Manipülatör sisteminin sualtı testleri

EK B

Deneysel çalışmalar sırasında Lucky Fin aracından elde edilen en yüksek hızlar Tablo Ek.1'de verilmiştir (Çölgeçen, 2019; Kulaç, 2019; Kılıcı, 2020; Ergan, 2014).

Tablo Ek 1. Dört Serbestlik Dereceli Lucky Fin Sualtı Aracının Hareket Eksenleri ve Araçtan Elde Edilen En Yüksek Hızlar

Serbestlik Derecesi (DOF)	Hareketin Tanımı	Doğrusal Yer Değiştirme ve Euler açıları	Doğrusal ve açısal hızlar
1	x yönünde doğrusal	x	u=0.12 m/s
2	z yönünde doğrusal	z	w=0.2 m/s
3	x ekseninde çevresinde açısal yalpa	ϕ	p=Ölçülemedi
4	z ekseninde çevresinde açısal rota	ψ	r= 5°/sn

EK C**Jacobiyen Matrisinin Elde Edilmesi**

Jacobiyen matrisi; dünya, sualtı aracı ve manipülatör eklemlerinin kendi referans çerçeveleri arasında dönüşüm ilişkilerini ifade etmek için genel bilgi olarak verilmiştir:

Deniz ve hava araçlarının konumlarını belirlemek için Euler Açılımları tercih edilir. Araç gövdesinin koordinat sistemi $X_0Y_0Z_0$ koordinat sistemi ile gösterilebilir. Benzer şekilde Dünyanın koordinat sistemi XYZ ile gösterilir (Yılmaz & Kılıcı, 2019). Aşağıdaki denklemler, bir aracın doğrusal hız vektörünü Dünya koordinat sistemindeki hız vektörüne, Dünya koordinat sistemindeki hız vektörünü de, araç doğrusal hız vektörüne dönüştürür;

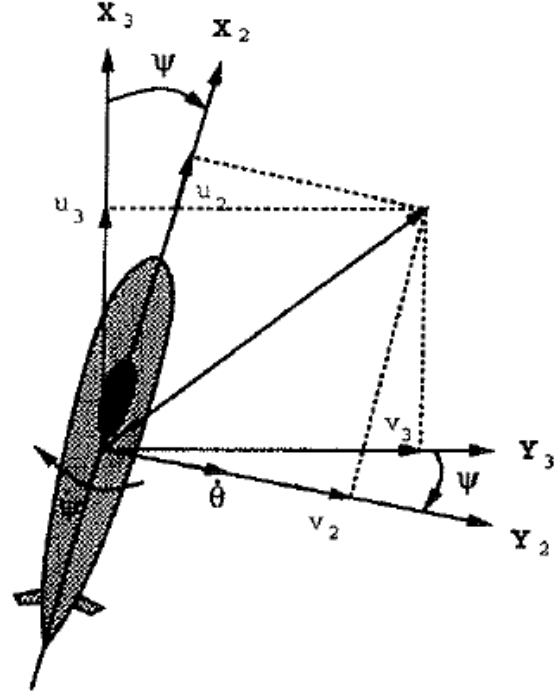
$$v_e = J_1(\phi, \theta, \varphi)v_o \quad (\text{Ek.1})$$

$$v_e = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T \quad (\text{Ek.2})$$

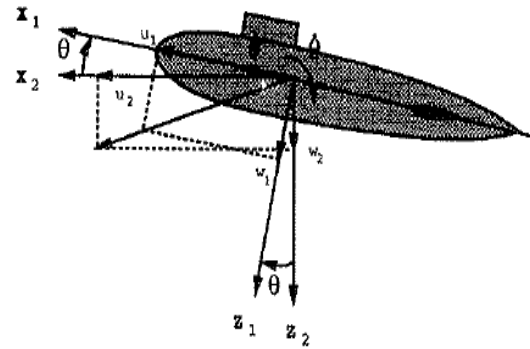
$$v_o = (u, v, w)^T \quad (\text{Ek.3})$$

J1 koordinat dönüşüm matrisi, Euler yalpa (roll), yunuslama (pitch) ve rota (yaw) açıları ile ilişkilidir. J1 koordinat dönüşüm matrisi ortogondur. Bu nedenle aşağıdaki denklem yazılabilir;

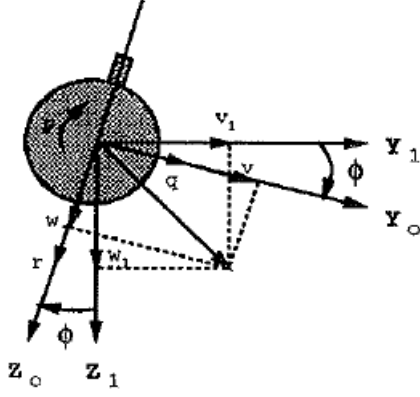
$$v_o = J_1^{-1}(\phi, \theta, \varphi)v_e = J_1^T(\phi, \theta, \varphi)v_e \quad (\text{Ek.4})$$



Şekil Ek 4.1. Z₃' e göre ψ açısal konumu (Fossen,1991).



Şekil Ek 4.2. Y₂' e göre θ açısal konumu (Fossen, 1991).



Şekil Ek 4.3. \$X_1\$' e göre \$\phi\$ açısız konumu (Fossen, 1991).

Aracın koordinat sisteminin merkezi, Dünya koordinat sisteminin merkezi (XYZ) ile eşleşene kadar döndürülür.

\$X_3 Y_3 Z_3\$ koordinat sistemi, yalpa açısı vasıtasıyla \$Z_3\$ ekseninin etrafında döndürülür ve \$X_2 Y_2 Z_2\$ koordinat sistemi elde edilir. Daha sonra \$X_2 Y_2 Z_2\$ koordinat sistemi, \$Y_2\$ eksenini etrafında yunuslama açısı kadar döndürülür ve \$X_1 Y_1 Z_1\$ koordinat sistemi elde edilir. \$X_1 Y_1 Z_1\$, \$X_1\$ eksenini etrafında yalpa açısı ile döndürüldüğünde, bu \$X_0 Y_0 Z_0\$ koordinatları elde edilir. Döndürme sırası aşağıdaki gibidir (Antonelli, 2014);

$$J_1^{-1}(\phi, \theta, \psi) = C_{x,\phi} C_{y,\theta} C_{z,\psi} \quad (\text{Ek.5})$$

Burada \$C_{i,j}\$: \$i\$ eksenini etrafında \$j\$ rotasyon açısı ile dönüşü ifade eden Rotasyon Matrisidir. Temel olarak;

$$C_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.6})$$

$$C_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.7})$$

$$C_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.8})$$

Burada, \$s\$;sinüs, \$c\$;kosinüs ve \$t\$; tanjant'tır. Koordinat dönüşüm matrisi \$C_{ij}\$ ortogonal olduğu için \$J_1\$;

$$J_1(\phi, \theta, \psi) = (C_{x,\phi} C_{y,\theta} C_{z,\psi})^T \quad (\text{Ek.9})$$

$$J_1(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -s\psi c\phi + s\theta s\theta c\psi & s\psi s\phi + c\theta s\theta c\psi \\ c\theta s\psi & c\psi c\phi + s\theta s\theta s\psi & -c\psi s\phi + c\theta s\theta s\psi \\ -s\theta & s\theta c\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.10})$$

Aracın açısal hız vektörü \$w_0\$ ile Dünya referans çerçevesine göre Euler açısal hız vektörü \$w_e\$ arasındaki ilişki \$J_2\$ dönüşüm matrisi ile bulunur.

$$w_0 = (p, q, r)^T \quad (\text{Ek.11})$$

$$w_e = (\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T \quad (\text{Ek.12})$$

$$w_e = J_2(\phi, \theta, \psi) w_0 \quad (\text{Ek.13})$$

Sadece aracın koordinat sistemini tanımladığı ve referans çerçevesine göre sadece yönelimini gösterdiği için, \$J_2\$ dönüşüm matrisi ortogonal dönüşüm matrisi özelliği taşımaz.

$$w_0 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\psi} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + C_{x,\psi} C_{y,\theta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J_2^{-1}(\phi, \theta, \psi) w_e \quad (\text{Ek.14})$$

Kinematik denklemlerin kompakt gösterimi şu şekilde olur;

$$\begin{bmatrix} v_e \\ w_e \end{bmatrix} = J(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} v_0 \\ w_0 \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.15})$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1(\phi, \theta, \psi) & 0 \\ 0 & J_2(\phi, \theta, \psi) \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.16})$$

$$J = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -s\psi c\theta + s\theta s\theta c\psi & s\psi s\theta + c\theta s\theta c\psi & 0 & 0 & 0 \\ c\theta s\psi & c\psi c\theta + s\theta s\theta s\psi & -c\psi s\theta + c\theta s\theta s\psi & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta & s\theta c\theta & c\theta c\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & s\theta t\theta & c\theta t\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\theta & -s\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s\theta/c\theta & c\theta/c\theta \end{bmatrix} \quad (\text{Ek.17})$$

Gemi İnşaatı Mimarları ve Gemi Mühendisleri Derneği (SNAME) notasyonunda hızlar arası dönüşüm Ek.18'deki gibidir (Antonelli,2014):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(x_2) & 0 \\ 0 & J_2(x_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad \dot{x} = J(x)\dot{q} \quad (\text{Ek.18})$$

Dünya referans sisteminde $x_1 = (x, y, z)^T$ konum vektörü ve $x_2 = (\theta, \theta, \varphi)^T$ Euler açı vektörüdür. Aracın doğrusal ve açısal hızları ise aşağıdaki gibidir;

$$\dot{q}_1 = (u, v, w)^T, \quad \dot{q}_2 = (p, q, r)^T \quad (\text{Ek.19})$$