

KİVİ HASATI İÇİN ROBOTİK TUTUCU TASARIMI

Erhan KAHYA*

Özet

Robotik hasat sistemleri üç önemli bölümden oluşmaktadır. Bunlar robotik kol, görüntü işleme ve tutucu (gripper) dur. Üç bölümden oluşan robotik hasat sistemi içinde en son hareketi sağlayan tutucu (gripper) meyvenin dal üzerinden kopartılmasını sağlayan en önemli parçadır. Bu çalışmada robotik sistem ile meyve hasadı için en önemli girdi olan görüntü işleme yardımıyla meyvenin dal üzerindeki konumunun belirlenmesi ve kesme işleminin yapılması sağlanmıştır. İki boyutlu ve gerçek zamanlı olarak görüntüler dijital ortama aktarılmıştır. Dijital ortama aktarılan meyveye ait görüntüler, kameranın programı yardımıyla şekil özelliği esas alınarak gerçek zamanlı işleme tabi tutulmuştur. İşlenen veriler robotik kontrol kartı vasıtasıyla robotik sisteme aktarılmıştır. Robotik sistemin hareketi görüntü işleme vasıtasıyla gelen x ve y koordinat değerlerine göre sağlanmıştır. Tasarımı yapılan pnömatik makas sistemi, robotik kolun ucuna monte edilmiştir. Dal üzerinde değişik konumlarda bulunan 100 adet kivi meyvesi üzerinde denemeler yapılmıştır. Denemeler sonucunda meyvenin sap kalınlığının ve sap kopma direncinin meyvenin hasadında etkili olduğu gözlenmiştir. Kesme başarısı istatistiksel olarak analizi edilmiştir. Sistemin %72 lik başarı oranı ile meyvenin dal üzerinden kesme işlemini yapabildiği görülmüştür. %28 lik başarısızlık oranlarının nedenleri araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarında; meyve sapının makasın ucunda olması, makasın meyvenin sapına değil meyve yumrusuna gelmesi, meyve ile meyve sapı başlangıç noktasına gelmesi ve saptaki budağa gelmesi koparma işlemi için hata oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Yapılan denemelerde alınan sonuçlara göre pnömatik makas sisteminin uygun olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Robotik hasat, Kesme, Tutucu(gripper), kivi

ROBOTIC GRIPPER DESIGN FOR KIWI HARVESTING

Abstract

Robotic harvesting systems consist of three important parts. These are; robotic arm, image processing and gripper. Within robotic harvesting systems, consisting of three parts, gripper, which ensures the last motion is the most important part, ensuring plucking the fruit from tree branch. In this study, the determination of location of fruit on the branch was done through the use of image processing, the most significant input for the robotic system and fruit harvesting, and the shearing process was applied. In processing the images in two-dimensional form, the fruit images transferred into the digital media were processed with the help of the camera program by grounding on the shape features of the fruit. The processed data were transferred into the robotic system by means of a robotic control card. The movement of the robotic system was provided according to the x and y coordinate values coming through the image processing. Pneumatic scissors system, design of which has been completed, has been mounted on the end of robotic arm. Tries have been carried out on 100 kiwis, which are on different positions. As the result of these tests, it was observed that the stem thickness of the fruit and stem ultimate strength were effective in harvesting the fruit. Cutting performance has been analyzed systematically. It has been observed that system could achieve the cutting of the fruit from tree branch, with a success rate of 72%. The reasons of 28% failure rate have been studied. According to study results, the fact that fruit rib is in the end of scissors, that scissors hold head of fruit, instead of fruit rib and that scissors hold beginning point of fruit and

* Namık Kemal Üniversitesi, Teknik Bil. MYO., Tekirdağ

E-posta: ekahya@nku.edu.tr

fruit rib and snag within rib cause failure for plucking process. According to the results obtained from the tries it has been observed that, pneumatic scissors system is appropriate.

Keywords: Robotics Harvest, Cutting, Gripper, kiwi

1. Giriş

Robot teknolojisi günümüzde büyük atılım içindedir. Tıp alanından ziraat alanına kadar birçok alana girmiş olan robot teknolojisinin amacı insan hayatını kolaylaştırmak, işleri hızlandırmak ve aynı özelliğe sahip standart üretim yapmaktır. İnsan elinde daha hassas yapıya sahip robotlar günümüzde teknolojinin gelişmesine paralel olarak hızla ilerlemekte ve birçok alanda kullanılmaktadır. Ameliyatlarda, uzay çalışmalarında, nükleer enerji üretim santrallerinde, biyolojik çalışmalarda, sanayide, tarımsal ve teknolojik üretim sistemlerinde robotların kullanıldığını görmekteyiz. Robot denildiğinde akla ilk gelen; insan gibi düşünen, karar veren insan davranışlarını ve hareketlerini taklit eden makineler gelmektedir. Robotların gelişimi ve tasarlanması, canlıların yaşama uyum sağlamak için geliştirdikleri karakteristiklerden ilham alınarak yapılmaktadır. Buna verilecek en güzel örnek, robot kolun çalışma alanı ile insan kolunun çalışma alanları arasında benzerliktir.

Tüm robotik sistemlerin genel özelliği bir platform üzerinde çalışmalarını ve en uçtaki son-etkileyicilerin (end-effector) işlere uygun bir şekilde tanımlanmış olmasıdır. Robot teknolojisinde tanımlanan işlevlerin yerine getirilmesi için özel tasarlanmış tutucu(gripper) ünitelerine ihtiyaç vardır. İnsan elinin yapabileceği hareketleri taklit edebilen sistemler robot uygulamalarında büyük önem taşımaktadır. Bu ünitelerin tasarımında ve çalışma fonksiyonlarında en hünerli el olan insan elinin özelliklerine ve şeklini örnek almaktadır.

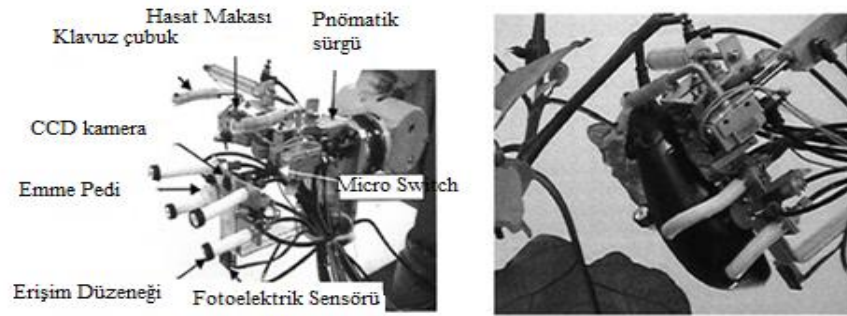
Robot tasarımı yaparken gerekli olan ana parçalar şu şekilde sıralanabilir:

1. Manipülâtör: Yapı içinde hareket serbestliğini sağlayan bir kol, el becerisini sağlayan bir bilek ve tanımlanmış görevin tamamlanmasını sağlayan son etkileyiciden son-etkileyici(end-effector) oluşmaktadır.
2. Hareketlendiriciler: Robot eklemlerinin hareketini sağlayan motorlardan oluşmaktadır.
3. Algılayıcılar: Robotun çalışması sırasında dış ortamdan gelen uyarıları saptayan sensörlerden oluşmuştur.
4. Kontrol sistemi: Robotun tüm hareketlerini kontrol eden ve yöneten sistemdir.

Sayılan parçalar robotik sistemlerin çalışmasını etkileyen en önemli unsurlarıdır. Kullanılacak her alan için farklı tasarımlar yapılsa da değişmeyecek parçalardır. Bunlar içinde en önemlisi; sistemin en son hareketini yapan son-etkileyici(end-effector) ucuna takılan

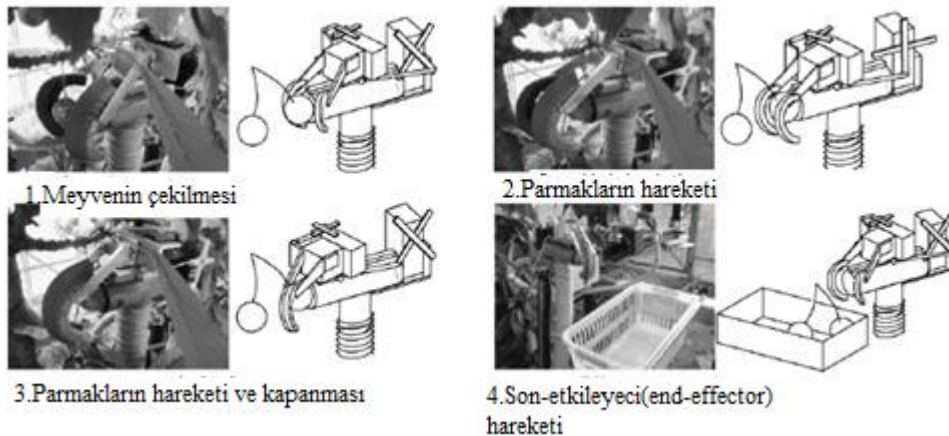
tutucular(gripper)dır. Robotik sistemde tutucu (gripper) tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta istenen işleve göre elin fonksiyonel ve çalışmaya uygun olmasıdır. Tarımsal alanda kullanılan robotik sistemlerde, hasat için tutucu(gripper) tasarımı hasatın başarısını arttıran faktörlerin en önemlisidir. Meyvenin dal üzerinden kesilmesi için tutucunun (gripper) en üst düzeyde kesme işlemini gerçekleştirmesi gerekmektedir. Tutucu (gripper) tasarımında dikkat edilmesi gereken faktörlerden biride hasadı yapılacak meyvenin fiziko mekanik özelliğine uygun olmasıdır. Meyvenin dal üzerinden kesimi yapılırken tutucunun (gripper) içine tam girmesi ve sap kopma direncini yenmesi gerekmektedir.

Patlıcan hasadı için robotik sistem yaklaşımı üzerine yapılan bir araştırmada 3 temel bileşen olması gerektiği vurgulanmıştır. İlki bir renk parça çalışmasının birleştirilmesi için bir makine görüş algoritması gerekliliği, ikincisi farklı algoritma koşullarında meyveleri bulabilme, son olarak da sap kırıcı mekanizmadır. Bu 3 gerekli bileşen ile %62.5 bir başarı elde edilmiştir (Hayashi et al 2002). Şekil 1’de robotik patlıcan hasadı gösterilmiştir.



Şekil 1. Robotik patlıcan hasadı (Hayashi et al 2002).

Çilek hasadı için robotik uygulamada oluşturulan sistem çengel tip sonlandırıcı, bir görüş algılayıcısı ve hareketli bir platformdan oluşmaktadır. Renk algılayıcısı olarak bir CCD kamera ve çilek hasadını yapabilmek için özel tutucu (gripper) tasarımı kullanmışlardır. Şekil 2 ‘de kurulan sistem gösterilmiştir (Arima et al 2003).



Şekil 2.Çilek hasat robotu (Arima et al 2003).

Robot çilek hasadı için alan test değerlendirmesi üzerine yapılan çalışmada silindirik bir manipülatör, son-etkileyici (end-effector), yapay görme ünitesi, taşıyıcı sistem ve depolama biriminden oluşan bir robot kullanmışlardır. Daha önceki çalışmalarında karşılaştıkları düşük iş verimi, düşük başarı oranı, kararsız aydınlatma gibi sorunları aşmak için hasadı gece yapmak üzere bir aydınlatma ünitesi geliştirmişlerdir. Meyvenin tanımlanması için meyve olgunluk derecesinin tanımı yapılmıştır. Yapay görme ünitesi ile meyve sapı tespitinde başarı oranını %60 olarak tespit etmişlerdir. Sistemin toplam başarı oranı %34.9 'dur (Hayashi et al 2010).

Tüm çalışmaların ortak noktası her meyve hasadı için özel tutucu (gripper) tasarımıdır. Robotik sistem yapıları benzerlik gösterse de tutucular (gripper) her meyvenin fizikomekanik özelliğine göre yapılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Materyal

Yapılan araştırmada sistemin oluşturulması için özgün bir sistem tasarımı yapılmıştır. Bu sistem için aşağıdaki elemanlar kullanılmıştır. Bunlar;

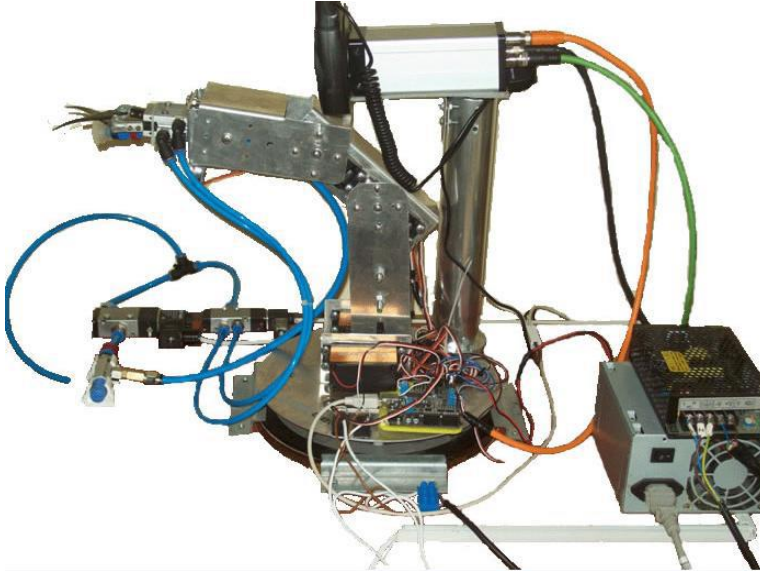
1. 2D kamera
2. Robotik kol
3. Gripper (Kesici)
4. Ultrasonic sensör.
5. Robotik Kontrol Kartı
6. Pnömatik Sistem Kontrolü

2.1.1. 2D Kamera

2D Kamera, 640x380 piksel siyah beyaz sensörle 30 FPS görüntü yakalama oranına sahiptir. Görüntü işleme 1 GHz işlemcide çalışan uzatılmış SDRAM bellekle yapılır. Kameranın flash belleği ile görüntüler hafızada tutulmaktadır. Ayrıca FPGA piksel işlemeyi optimize etmektedir. Bilgisayarla iletişim kurmak için 10/100 Mb Fast Ethernet ile TCP/IP ve UDP/IP protokollerini kullanır. Kamera bu bağlantılar dışında RS-485 seri port ile iletişim kurma özelliğine sahiptir. Tetikleme özelliği standart fotoelektrik anahtarlama ile yapılmaktadır. Kendine ait yazılım ile kontrol sağlanmaktadır.

2.1.2. Robotik Kol

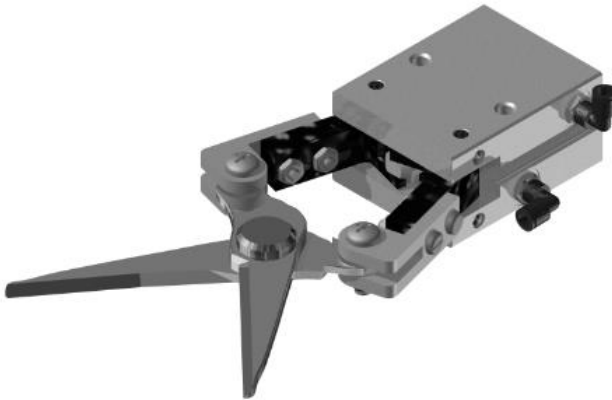
Görüntü işleme ile gelen koordinatlara göre meyveye doğru hareket eden 4 serbestlik dereceli (DOF) 'lu bir robot kullanılmıştır. 4 eksenin robotun hareketini sağlamak için 3 adet Springrc SM-8166B , 2 adet Savöx SV-0236 MG modeli servo motorlar kullanılmıştır. Kol uzunlukları $L_1=20$ cm, $L_2=17$ cm, $L_3=15$ cm 'dir. Robot kolun parçaları Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Robot kol tasarımı(orjinal)

2.1.3. Gripper(Tutucu)

Yapılan çalışmada robot kolun ucuna pnömatis sistemle kontrol edilen gripper(tutucu) tasarımı yerleştirilmiştir. Meyvenin dal üzerinden yakalanıp kopartılması için 1 adet paralel tutucu ve 1 adet budama makasının birleştirilmesi ile pnömatis makas sistemi tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımın resmi Şekil 4'de gösterilmiştir. Çizelge 1' de kullanılan paralel tutucunun özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Pnömatis sistem ile kontrol ve kesme sistem(orginal)

Çizelge 1. Paralel tutucunun özellikleri

	Paralel tutucu
Hareket Tipi	Çift hareket
Boru tipi (mm)	16
Port boyutu	M5x0.8
Çalışma ortamı	Hava
Ortalama basınç oranı (kgf cm ²) ⁻¹	1.5~ 7 (0.15~0.70 MPa)
Çalışma sıcaklığı (C°)	-5 ~ +60
Mak. Frekans (Devir, d ⁻¹)	180
Mak. Kol uzunluğu(mm)	30
Serbest açılma açısı	-10° ~ 30°
Teorik momenti(kgf cm) ⁻¹	Kapalı 0.4 x P /Açık 0.5 x P.
Kelepçe Kuvveti(F) (kgf)	F=M / L x 0.85
Sensör anahtarı	RCE, RCE1
Ağırlık(gr.)	53

2.1.4.Ultrasonik Sensör

Robotik kolun dal üzerinde bulunan meyveye belli bir yaklaşma mesafesinde durması için Parallax Ping Ultrasonik sensör kullanılmıştır. Kullanılan sensör uzaklığı ses sinyallerinin işlenmesi şeklinde hesaplamaktadır. Sensör 2 ile 3 metre arasındaki mesafeyi taramakta ve önündeki engelleri algılamaktadır. Ping sensöründe bir I/O pini ve bir durum LEDi bulunmaktadır. Kartın üzerinde iki adet sensör ve 3 pin(5V, GND ve sinyal) bulunmaktadır. Yazılan program içindeki sensör yazılımı aşağıdaki program parçasında verilmiştir.

```
pinMode(pingPin1, OUTPUT);
digitalWrite(pingPin1, LOW);
delayMicroseconds(20);
digitalWrite(pingPin1, HIGH);
delayMicroseconds(60);
digitalWrite(pingPin1, LOW);
pinMode(pingPin1, INPUT);
duration1 = pulseIn(pingPin1, HIGH);
cm1 = microsecondsToCentimeters(duration1);
Serial.print("Yatay uzaklik= ");
//*****ULTRASONIC SENSOR FONKSİYONU*****//
long microsecondsToCentimeters(long microseconds)
{ return microseconds / 29 / 2; }
```

2.1.5. Robotik Kontrol Kartı

Robotik kontrol kartı olarak Arduino Uno kullanılmıştır. ATmega 328 tabanlı bir mikroişlemci geliştirme kartıdır ve 14 adet dijital giriş/çıkış bağlantısına, 6 analog girişe, 16 Mhz kristal osilatöre, USB bağlantısına, güç bağlantısına, ICSP bağlantısına ve reset tuşuna sahiptir. Çizelge 2’de devrenin teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. Arduino Uno teknik özellikleri

Mikroişlemci	ATmega328
Çalışma Voltajı(V)	5
Besleme Voltajı (önerilen)(V)	7-12
Besleme Voltajı (limit) (V)	6-20
Dijital G/Ç bağlantıları	14 (6 tanesi PWM çıkışı sağlayabilir)
Analog Giriş Bağlantıları	6
G/Ç bağlantısı başına DC Akım(mA)	40
3.3V bağlantısı için DC Akım(mA)	50
Flash Bellek(kb)	32 (ATmega328)
SRAM(kb)	2 (ATmega328)
EEPROM(kb)	1 (ATmega328)
Hızı(mHz)	16

2.1.6. Pnömatik Sistem Kontrolü

Oluşturulan sistemdeki pnömatik sistemin kontrolü amacıyla 2 adet Solenoid Valf MVSO-180-4E1 kullanılmıştır. Çizelge 3’de genel özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3. Solenoid Valf Özellikleri

	MSVA-180-4E1
Çap Numarası	6A
Port boyutu	1/8
Port	5
Konum numarası	2
Ortam	Hava
Çalışma Basıncı(kgf/cm)	1.5 ~ 8
Temel Basıncı(kgf/cm)	10
Etkili delik çapı(mm)	12
Tepki zamanı(ms)	30
Çalışma sıcaklığı(°C)	-5 ~ + 50
Voltaj(V)	AC 110 V, 220 V (50/60) Hz, DC 24 V.
Ağırlığı (gr)	100

2.2. Yöntem

Denemeler kivi ağacından kopartılmış üzerinde meyveleri bulunan bir dal ile laboratuvar koşullarında yapılmıştır. Meyveli dal doğala benzer koşullarda robot karşısına sabit olarak yerleştirilmiştir. Yöntem iki bölümden oluşmaktadır.

- 1.Meyvenin yerinin belirlenmesi
- 2.Robot kolun hareketi ve kesme işlemi

2.2.1. Meyvenin Yerinin Belirlenmesi

Robotik sistem ile meyve hasadı yapılabilmesi için gerekli olan en önemli değişken meyvelerin uzay koordinat eksenlerinin bilinmesidir. Koordinat eksenlerinin bulunması için görüntü işleme tekniği uygulanmıştır. Meyvenin dal üzerinde yerinin tespiti için 2D kamera ve ultrasonik sensör kullanılmıştır. Kameranın maksimum görüş alanı 640 x 380 mm'dir. Meyvenin yerden maksimum yüksekliği 28.5 cm'dir. Meyvenin robot kolun merkezinde uzaklığı 28 cm olarak ayarlanmıştır. Meyvenin robot kolun merkezine olan uzaklık 28 cm ayarlanmasından dolayı kameranın görüş alanı ölçütü 170 x 130 mm olmuştur. Bu kamera yardımıyla dijital ortama aktarılan görüntüler görüntü işleme programı yardımıyla işlenmiştir. Aktarılan görüntü içinde meyvenin dal üzerindeki yerinin dijital ortamda bulunması sağlanmıştır. Bu işlem için meyvenin özgün şeklinin sisteme tanıtılması yazılan program vasıtasıyla yapılmıştır. Şekil analizi ile meyvelerin uzay koordinat eksenindeki yatay eksen (x) ve dikey eksen (y) değerleri bulunmuştur. Şekil 5 'de meyvenin görüntü işleme yatay eksen(x) ve dikey eksen(y)' nin bulunması gösterilmiştir.



Şekil 5.Tanıma ekranı(orijinal)

Robotik Kontrol kartındaki işlemciye kameradan gelen koordinata göre yapılan hesaplamalardan sonra robot kolun hareketi sağlanmıştır. Şekil 6'de kameradan işlemciye gelen koordinat değerleri gösterilmiştir.

Index	DB Value	Value	Description
994	0	0	
995	0	0	
996	0	0	
997	0	0	
998	0	0	
999	0	0	
1000	160,402...	160,40225...	X KOORDINAT
1001	76,8049...	76,804977...	Y KOORDINAT
1002	0	0	
1003	0	0	
1004	0	0	
1005	0	0	
1006	0	0	
1007	0	0	
1008	0	0	

Şekil 6. İşlemciye giren koordinat değerleri(orijinal)

2.2.2. Robot Kolun Hareketi ve Kesme işlemi

Robotun hareketi için gerekli olan düz ve ters kinematik hesaplamalar yapılarak C# dilinde robot kol için program yazılmıştır. Robotik kol için ters ve düz kinematik hesapları Matlab programında kontrol edilerek hareket şekli kontrol edilmiştir.

Görüntü işleme ile gelen yatay eksen(x) ve dikey eksen(y) yanında gerekli olan üçüncü koordinat eksen olan uzaklık (z) için ultrasonik sensör kullanılmıştır. Bu sensörün kullanımı için C# dilinde kod yazılmış, robot kolun meyveye 10 cm yaklaştığında ileri gitmesi önlenmiştir. Robotun ileri ve ters hareketi için gerekli olan ileri kinematik(formül1) ve ters kinematik (formül2) hesaplamaları Formül1 ve Formül2 'deki eşitlikler kullanılarak yapılmıştır(B.Zafer et al 2009).

$$\begin{aligned}
 P_x &= I_1 C\theta_1 + I_2 C(\theta_1 + \theta_2) + I_3 C(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
 P_y &= I_1 S\theta_1 + I_2 S(\theta_1 + \theta_2) + I_3 S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ =Düzlemsel robotun eklem değişkenleri

I_1, I_2, I_3 =Bağ uzunlukları

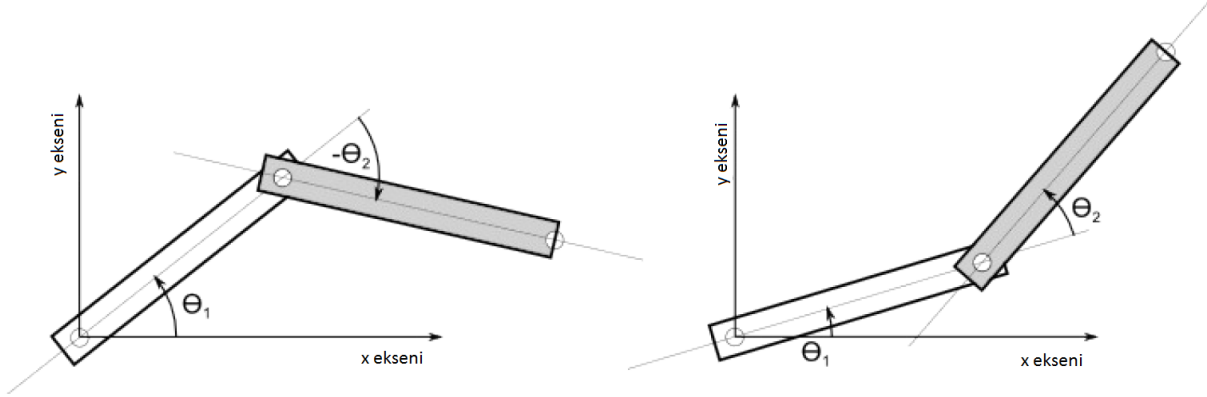
S=Sin

C=Cos

$$P_y = I_1 S\theta_1 + I_2 S(\theta_1 + \theta_2) + I_3 S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

$$\theta_2 = \text{Atan2} \left(\mp \sqrt{1 - \left[\frac{P_x^2 + P_y^2 - I_1^2 - I_2^2}{2I_1 I_2} \right]^2}, \frac{P_x^2 + P_y^2 - I_1^2 - I_2^2}{2I_1 I_2} \right)$$

Robot kol kinematik denklemleri hesaplanırken, tasarlanan robot kol 4 DOF hareket kabiliyetine sahip olarak düşünülmüştür. 2 DOF bir sistem için koordinat ekseninde yerleşim ve açı bilgileri aşağıdaki Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. 2 DOF Robot Kol Sistemi

Bu robot kol sistemi için düz kinematik hesabı aşağıdaki gibidir.

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

Ters kinematik denklemlerinin hesaplanmasında ilk adım $x^2 + y^2$ eşitliğinin bulunmasıdır.

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2[\cos \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (5)$$

Bu eşitliği sadeleştirebilmek için aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

$$\sin(x \pm y) = \sin x \cos y \pm \cos x \sin y \quad (6)$$

$$\cos(x \pm y) = \cos x \cos y \pm \sin x \sin y \quad (7)$$

Sonuç olarak;

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \theta_2 \quad (8)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \quad (9)$$

“arccos” fonksiyonu çeşitli yazılım ortamlarında küçük açılar için hassas sonuç vermediği için bu denklemi kullanmak yerine aşağıdaki dönüşüm gerçekleştirilmiştir.

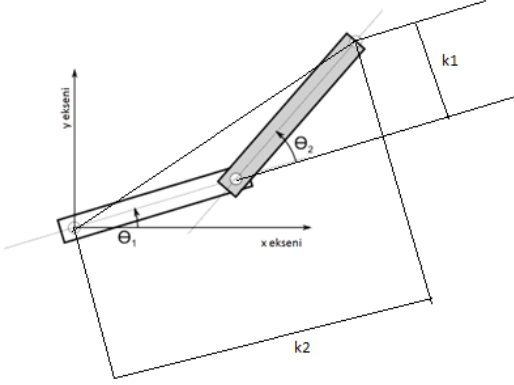
$$\cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_2 = 1 \quad (10)$$

$$\sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_2} \quad (11)$$

Sonuç olarak Şekil 8’de gösterilen iki farklı konfigürasyon için (dirseğin yukarı ve aşağı doğru olması) açı değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\theta_2 = \text{atan2} \left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \right)^2}, \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \right) \quad (12)$$

θ_1 ile ilgili çözüme ulaşabilmek için Şekil 8’de gösterilen parametrelerin tanımlanması gerekmektedir.



Şekil 8. Yeni Parametreler

Şekil 8’de gösterilen parametrelere göre sistem revize edilmiştir.

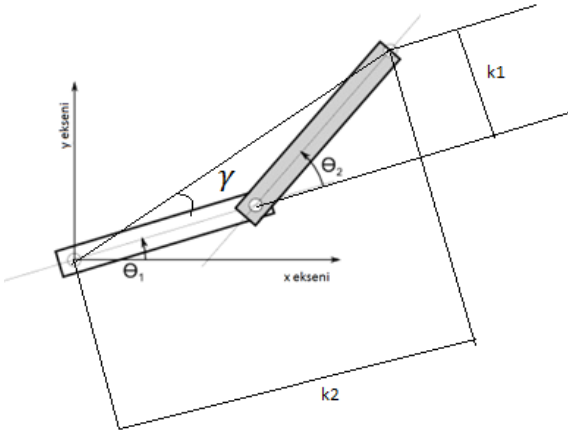
$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (13)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (14)$$

$$x = k_1 \cos \theta_1 - k_2 \sin \theta_1 \quad (15)$$

$$y = k_1 \sin \theta_1 + k_2 \cos \theta_1 \quad (16)$$

Sistem üzerinde tanımlanan yeni açı parametresi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 9. Yeni Açı Parametresi

Şekil 9’da gösterilen açı tanımlandığında ve yeni parametrelerde kullanıldığında;

$$r = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \quad (17)$$

$$\gamma = \text{atan2}(k_1, k_2) \quad (18)$$

$$k_1 = r \cos \gamma \quad (19)$$

$$k_2 = r \sin \gamma \quad (20)$$

k_1 ve k_2 değerlerini x ve y denklemlerinde yerleştirmiştir;

$$x = r \cos \gamma \cos \theta_1 - r \sin \gamma \sin \theta_1 \quad (21)$$

$$y = r \cos \gamma \sin \theta_1 - r \sin \gamma \cos \theta_1 \quad (22)$$

Bu denklemler kullanılarak;

$$\gamma + \theta_1 \operatorname{atan2}\left(\frac{y}{r}, \frac{x}{r}\right) = \operatorname{atan2}(y, x) \quad (23)$$

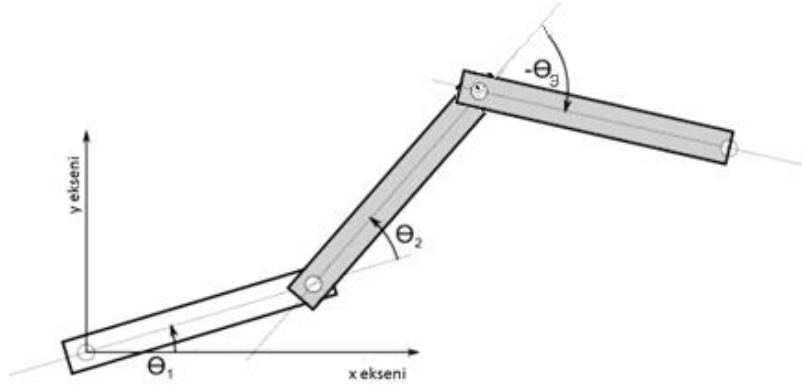
$$\theta_1 = \operatorname{atan2}(y, x) - \operatorname{atan2}(k_1, k_2) \quad (24)$$

Sonuç olarak kinematik denklemler aşağıdaki gibi belirlenmiştir;

$$\theta_2 = \operatorname{atan2}\left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right)^2}, \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \quad (25)$$

$$\theta_1 = \operatorname{atan2}(y, x) - \operatorname{atan2}(k_1, k_2) \quad (26)$$

3 DOF sistemlerin açı ve eksen yerleşimi ise Şekil 10 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 10. 3 DOF Robot Kol Sistemi Açılı ve Eksen Yerleşimi

Şekil 10 üzerinde gösterilen sistem için ise düz kinematik hesap aşağıda gösterilmiştir.

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (27)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (28)$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (29)$$

Bu denklemlerdeki ϕ açısı sistemin son linkinin yer ile olan açısını belirtmektedir. Sistemin kinematik denklemleri ise;

$$\theta_2 = \operatorname{atan2}(\sin \theta_2, \cos \theta_2) \quad (30)$$

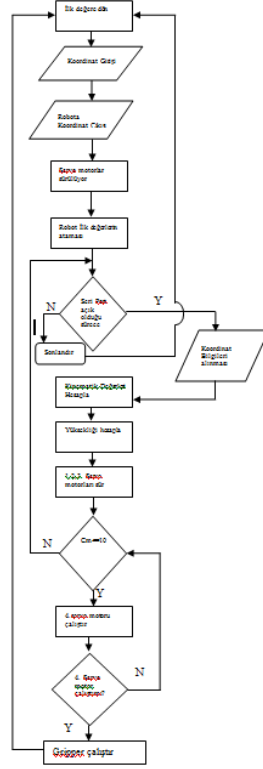
$$\theta_1 = \operatorname{atan2}((k_1 y_n - k_2 x_n), (k_1 x_n - k_2 y_n)) \quad (31)$$

$$\theta_3 = \phi - (\theta_1 + \theta_2) \quad (32)$$

Bu denklemleri kullanan Matlab kodu aşağıda gösterilmiştir. l_1, l_2, l_3 robot kol sisteminin link uzunluklarıdır.

```
function [] = invkin3(X,Y,phi)
phi=degtorad(phi);           //phi açısının radyan dönüşümü
X=X-20;
L1=20;                        //link uzunlukları
L2=17;
L3=15;
Xn=X-L3*cos(phi);            //kinematik hesaplar
Yn=Y-L3*sin(phi);
Teta2=atan2(((1-((X^2+Y^2-L1^2-L2^2)/(2*L1*L2))^2)^0.5,((X^2+Y^2-L1^2-
L2^2)/(2*L1*L2))^2);
K1=L1+L2*cos(Teta2);
K2=L2*sin(Teta2);
Teta1=atan2(K1*Yn-K2*Xn,K1*Xn-K2*Yn);
Teta3=phi-(Teta1+Teta2);
Teta1 = radtodeg(Teta1)      //sonuçlar
Teta2 = radtodeg(Teta2)
Teta3 = radtodeg(Teta3)
```

Bu hesaplamalar ve program USB port aracılığıyla robotik sistem kontrol kartındaki işlemciye yüklenmiştir. Programın çalışması için gerekli olan programın yazılması ile görüntü işleme yapan 2D kamera arasındaki iletişim sağlanmıştır. Robot kol gelen bu koordinat eksenlerine göre hareket etmesini sağlanmıştır. Sistemin tüm çalışma parametrelerinin tanımlanması ve program içine yerleştirilmesi için Şekil 11'de gösterilen algoritma kurulmuştur.



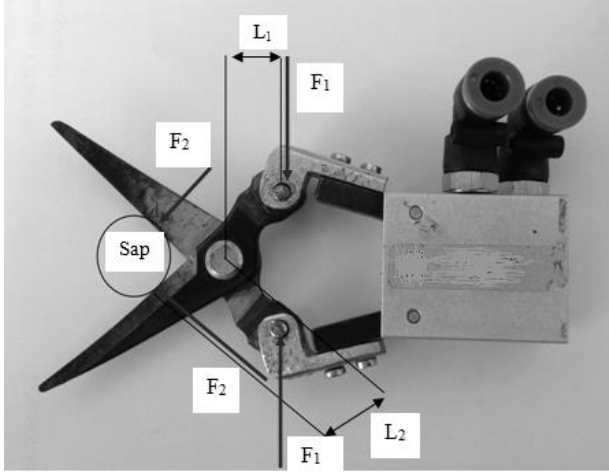
Şekil 11. Robotik Sistemin Çalışma Algoritması

Pnömatik makasın kontrol edilmesi robotik kontrol kartı ile yapılmış ve yazılan program ile servonun dönüşü sağlanmıştır. Pnömatik sistem 5 ile 8 bar arasında basınç veren kompresöre 8 mm. çapında hortumlarla bağlanmıştır. Sistemin kontrolü yazılan program vasıtasıyla kontrol valflerinin çalıştırılması şeklinde yapılmıştır. Kontrol valfleri yardımıyla 5 ile 8 bar arasındaki basınç altında makasın açılıp kapanması sağlanmıştır. Şekil 12’de kesme durumu gösterilmiştir.



Şekil 12.Kivi meyvesi kesme (orijinal)

Şekil 13’de pnömatik makas sistemi için hesaplamalara giren değerlerin yerleri gösterilmiştir.



Şekil 13.Pnömatik sistem için hesaba giren değerler

Makasta kesme gerilmesinin hesaplanması:

Kesme Gerilmesi (D. Dursun 2001) :

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (33)$$

τ = Kesilme Gerilimi ($N \text{ mm}^{-2}$)

A = Kesit Alanı (mm^2) (D. Dursun 2001)

F = Kuvvet (N)

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (34)$$

d = Sap çapı (mm)

Kesme Kuvveti (D. Dursun 2001) :

$$F_1 * L_1 = F_2 * L_2 \quad (35)$$

L_1 = Sap Uzunluğu (mm)

L_2 = Kesme Uzunluğu (mm)

F_1 = Kola Uygulanan Kuvvet (N)

F_2 = Kesme Kuvveti (N)

Pnömatik Basınç (D. Dursun 2001):

$$P = \frac{F}{A} \quad (36)$$

P = Basınç (Pascal)

F = Kuvvet (N)

A = Kesit Alanı (mm^2)

Meyvelerin sap üzerinden kesilmesi için Şekil 4 ve Şekil 5'deki sistemler robotik sisteme takılmıştır. Meyvelerin kesilmesi sırasında uygulanan kesme gerilmesi hesabı için Formül33, Formül34, Formül35 ve Formül36' da belirtilmiş formüller kullanılmıştır. Formül hesapları sırasında sap kalınlıkları kumpas ile ölçülmüş ve değerler kaydedilmiştir. L_1 ve L_2 uzunlukları, pnömomatik hortum iç çapı kumpas yardımıyla ölçülmüş değerleri aşağıda verilmiş.

$$L_1=20 \text{ mm}$$

$$L_2=25 \text{ mm}$$

Hortum iç çapı 4 mm'dir. Hortumun Alanı (A) = 12,56 mm² bulunmuştur.

3.Bulgular ve Tartışmalar

Pnömomatik sistemin çalışmasını sağlayan kompresörün basınç değerleri denemeler sırasında 5 - 8 bar arasında değişim gösterdiği yapılan ölçümler sonucunda görülmüştür. Değerlerin tam olarak çıkması için referans değerleri 5,6,7, 8 bar olarak alınmıştır. Kola uygulanan kuvvet (F_1) Formül 35, kesme kuvveti (F_2) Formül 34 yardımıyla hesaplanmıştır. Çizelge 4'de F_1 ve F_2 değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.Pnömomatik Kesme sistemi

	Basınç Değerleri(Bar)			
	5	6	7	8
$F_1(N)$	6.28	7.53	8.79	10.04
$F_2(N)$	5.02	6.03	7.03	8.04

Formül 34 ve Formül 35 yardımıyla hesaplanan kola uygulanan kuvvet (F_1) ve kesme gerilmesi (F_2) değerleri Formül 33 yerine yerleştirilip sap kesme gerilmesi (τ) hesaplanmıştır. Meyve için 100' er adet yapılan hesaplamalar istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İstatistiksel analiz meyvelerin kesme durumuna göre hesaplanmıştır. Uygulanan basınç değerlerinin kesme için anlamlı olduğu görülmüştür. Çizelge 5'de değerler özetlenmiştir.

Çizelge 5.Kivi için kesme kuvveti değişimleri

		Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Sig.
a*	Arasında Gruplar	6.698	72	.108	4.859E 32	.000
	Gruplar İçinde Toplam	.000 6.698	28 100	.000		
b*	Arasında Gruplar	9.682	72	.156	2.916E 33	.000
	Gruplar İçinde Toplam	.000 9.682	28 100	.000		
c*	Arasında Gruplar	13.132	72	.212	1.905E 33	.000
	Gruplar İçinde Toplam	.000 13.132	28 100	.000		
d*	Arasında Gruplar	17,243	72	.278	2.502E 33	.000
	Gruplar İçinde Toplam	.000 17.243	28 100	.000		

*a=5 bar, b=6 bar, c=7 bar, d=8 bar

Denemeler sırasında robot kolun doğru konumlanma oranı %83, yanlış konumlanma oranı %17 olarak tespit edilmiştir. Bunun sebebi denemeler sırasında yan yana veya arka arkaya duran meyvelerde koordinat bulma sırasında kameranın meyveyi rastgele seçtiğidir. İlk şekli tam olan değil tanıtılan şekle en uygun meyvenin koordinatlarının verildiği tespit edilmiştir.

Doğru konumlanmadan sonra meyveyi kesme oranı %72 olarak tespit edilmiştir. Bulma ile kesme arasındaki farklılık nedeni meyvenin makas üzerindeki konumu olduğu görülmüştür. Yapılan T-testi sonucunda meyvenin dal üzerinde kopartılması için sadece x eksenini değil ayrıca y ekseninin de önemli olduğu tespit edilmiştir. Makasın konumlanması sırasında y eksen değeri makasın meyvenin sapına konumlanmasını sağladığı görülmüştür. Meyve sapının makasın ucunda olması, makasın meyvenin sapına değil meyve yumrusuna gelmesi, meyve ile meyve sapı başlangıç noktasına gelmesi ve saptaki budağa gelmesi koparma işlemi için hata oluşmasına neden olduğu görülmüştür.

Anova testine göre kompresörün uyguladığı 5 ile 8 bar arasında değişen basınç değerlerinin kesme kuvveti için anlamlı olduğu görülmüştür. Pnömatik sistemi çalıştıran kompresör basıncının kesme işlemi için yeterli basınç sağladığı anlaşılmıştır. Basıncıdaki 5 ile 8 bar arasındaki değişimin kesme kuvveti için yeterli basınç değerleri olduğu görülmüştür. Kompresördeki basınç değişiminin kesme kuvvetini etkilemeyeceği tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Robotik sistem için son hareketi sağlayan tutucu(gripper) için tasarlanan ve prototipi yapılan pnömatik sistemin uygun olduğu anlaşılmıştır. Dört eksen bir robot kola takılacak olan tasarımın benzer meyvelerin hasadı için uygun olacağı kanısına varılmıştır. Pnömatik sistemlerin basınç değerlerinin kesme işlemi için yeterli olması nedeniyle bu tür sistemlerde kullanılmasının uygun olacağı görülmüştür. Denemelerde robot kol ile meyve arasındaki mesafe 28 cm. olarak ayarlanmıştır. Bu mesafenin arttırılması ile daha uzakta bulunan meyvelerin kopartılabileceği görülmüştür. Robot kolun 4 eksen yerine 6 eksen ile tasarımın yapılması veya sistemin hareketli hale getirilmesiyle mesafenin artacağı anlaşılmıştır. Dizayn yapılırken kesme başarı oranının artırılması için meyvenin makas ucundan içeri doğru çekilmesi ve sabit tutulması gerektiği görülmüştür. Meyvenin makas içine çekilmesi için kullanılan vakum jeneratörü ucundaki vakum pedinin her meyve için özel tasarım yapılmasıyla başarının artacağı düşünülmektedir. Robotik hasat için en önemli unsurlar robot kol tasarımı, görüntü işleme ve tutucu tasarımıdır. Yapılan çalışmada robotik hasadın önemli unsurlarından biri olan ve en son hareketi sağlayan tutucunun(gripper) pnömatik sistem ile çalışması gerektiği anlaşılmıştır. Bu üç faktörün bir bütün olarak tasarlanması ile istenen robotik hasadın ağaçta yetiştirilen pek çok meyve üzerinde kullanılabileceği görülmüştür.

Kaynaklar

Arima S, Shibusawa S, Kondo N, Yamashita J (2003). Traceability Based On Multi-Operation Robot Information From Spraying, Harvesting And Grading Operation Robot. Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME International Conference on, Volume 2,1204-1209,ISBN: 0-7803-7759-1.

Hayashi S, Ganno K, Ishii Y, Tanaka I (2002). Robotic Harvesting System For Eggplants. JJARQ., Japan Agricultural Research Quarterly (Jarq, Jpn. Agric. Res. Q.) ISBN 0021-3551.

Hayashi S, Shigematsu K, Yamamoto S, Kobayashi K, Kohno Y, Kamata J, Kurita M (2010). Evaluation of a Strawberry-Harvesting Robot in a Field Test, Biosystems Engineering, Published By Elsevier, Volume 105(2),160-171.

Durkal D(2001). Cisimlerin Dayanımı Temel Ders Kitabı.Milli Eğitim Basımevi, ISBN 975-11-1913-8, Ankara

Bingül Z.,Küçük S (2009),Robot Kinematığı ,Birsen Yayınevi, ISBN 978-975-511-424-6,İstanbul