

A Comprehensive Study on the Sensing Characteristics of a Piezoresistive Tactile Sensor

Bilsay SÜMER

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Received: 21/01/2019

Revision 03/04/2019

Accepted: 09/04/2019

Highlights

- Microfabrication of thin and flexible tactile sensor
- Piezoresistive scanning circuit design
- Measurement of the static and dynamics characteristics of a taxel

Keywords

Touch Sensor
 Tactile Sensor
 Contact Pressure and Area
 Microfabrication
 Signal Conditioning

In this study, the sensing characteristics of a taxel inside a flexible piezoresistive tactile sensor were investigated for accurate contact pressure measurements. A signal conditioner was designed to acquire the resistance change of a taxel during the loading and unloading. The static and dynamic characteristics of the sensor such as the linearity, hysteresis, repeatability, time drift, response time and frequency response were measured on a flat substrate.

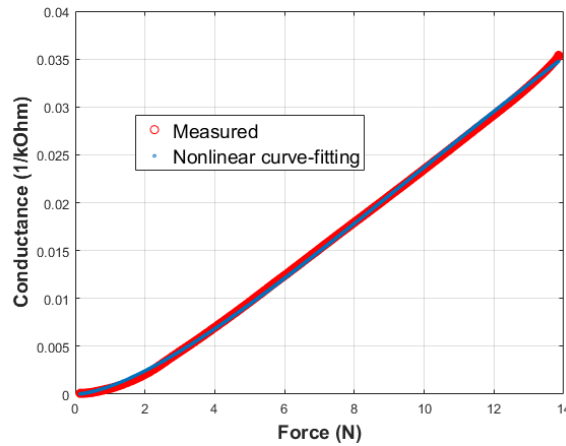


Figure A. The variation of conductance of the sensor with force during the loading experiment

Purpose: The flexible and slimness of the tactile sensor gives a unique and outstanding ability to measure the contact force/pressure of two contacting solid surfaces which is unachievable with other methods. In this work, the static and dynamic characteristics of a taxel inside a tactile sensor was investigated for proper calibration and accurate measurements.

Theory and Methods: A tactile sensor with 64 taxels was designed and manufactured using the microfabrication techniques. A SPICE simulation was carried out to find the relation between the excite voltage, feedback resistor and output voltage. An electronic circuit was designed to scan and acquire the tactile data. Two custom-build experimental setups were designed and implemented for the measurement purposes. In the first experimental set-up, the variation of electrical resistance was measured while a rigid punch was loaded and unloaded on a taxel. The second experimental setup utilized a piezoelectric shaker for the dynamic excitation of the sensor.

Results: The transfer function of the sensor was found which relates the conductance of the taxel to the force. The resistance of the taxel was decreased with the application of the compression load. Thus, the thin-film sensor shows a semi-conductive property when it is loaded. Moreover, stable change of the resistance was characterized and lower limit of the pressure was found. In the second experimental setup, the frequency response of the sensor was revealed.

Conclusion: In this study, it was shown that the taxel had an accuracy of 5.5% which is an acceptable limit for a flexible and bendable sensor. It was found that within a $48 \pm 27 \mu\text{sec}$, the sensor was responsive to the impact loading. The gain of the taxel was not flat and might be used carefully in the dynamic load configuration after accurate calibration.



Piezodirenç Dokunsal Algılayıcı Karakteristikleri Hakkında Kapsamlı Bir Çalışma

Bilsay SÜMER

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe/ANKARA

Öz

Günümüzde, dokunsal algılayıcı teknolojisi normal temas durumunda bulunan iki katının basınç ve temas alanının ölçümünü yapabilen tek çözümdür. Bu çalışmada, esnek bir dokunsal algılayıcı dizini içinde bulunan bir adet algılayıcının statik ve dinamik özellikleri, bu algılayıcılar ile yapılan ölçümlerin doğruluğunun geliştirilmesi için araştırılmıştır. İlk olarak, 64 tane teksele sahip algılayıcı dizini tasarlanmış ve mikrofabrikasyon teknikleri kullanılarak üretilmiştir. Daha sonra, dokunsal algılayıcının kuvvet ile yüklemeye ve boşaltılması sırasında oluşan direnç değişimini ölçmek için bir elektronik tarama devresi tasarlanmıştır. Algılayıcının statik ve dinamik özelliklerini ortaya çıkarmak için dokunsal algılayıcının içerisinde belirli bir teksele seçilmiştir. Ölçümler için iki adet özel yapım deney düzeneği kurulmuştur. İlk deney düzeneğinde, tekrarlanabilirlik, histerezis, duyarlılık ve zaman kayması gibi algılayıcının statik özellikleri ölçülmüştür. Ayrıca, piezodirenç algılayıcıların fiziksel algılama mekanizması tartışılmış ve algılayıcının kuvvet ölçüm aralığı bulunmuştur. Algılayıcının doğruluğu %5.5 olarak bulunmuştur. İkinci deney düzeneğinde ise algılayıcının frekans tepkisi 0.1Hz ila 40Hz frekans bandında ortaya çıkarılmıştır. Algılayıcının kazanç oranının incelenen frekans bant aralığında sabit olmadığı ve dinamik yük altında kullanımının dikkatli bir ölçümleme süreci sonunda kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca, bir başka test düzeneği kullanılarak algılayıcının ani bir yük girişine karşı tepki süresi $48 \pm 27\mu\text{s}$ olarak bulunmuştur.

Makale Bilgisi

Başvuru: 21/01/2019
 Düzeltme: 03/04/2019
 Kabul: 09/04/2019

Anahtar Kelimeler

Dokunsal Algılayıcı
 Dokunsal Algılayıcı Dizini
 Temas Basıncı ve Alanı
 Mikrofabrikasyon
 Sinyal Şartlandırıcı

Keywords

Touch Sensor
 Tactile Sensor
 Contact Pressure and Area
 Microfabrication
 Signal Conditioning

A Comprehensive Study on the Sensing Characteristics of a Piezoresistive Tactile Sensor

Abstract

At present, tactile sensor technology is the only solution to measure the pressure and contact area of two solid in normal contact. In this study, the sensing characteristics of a taxel inside a flexible tactile sensor were investigated for accurate contact pressure measurements with the tactile sensors. First, a tactile sensor with 64 taxels was designed and manufactured using the microfabrication techniques. Then, an electronic scanning circuit was designed to acquire the resistance change of the tactile sensor during the loading and unloading. A particular taxel was selected inside the tactile sensor to reveal the static and dynamic characteristics of the sensor. Two custom-built experimental setups were realized for the measurements. In the first experimental setup, the static characteristics of the taxel such as the repeatability, hysteresis, sensitivity and time drift were measured. Moreover, the physical sensing mechanism of the piezoresistive sensors was discussed to find the span of the force measurement. The accuracy of the taxel was found to be 5.5%. In the second experimental setup, the frequency response of the sensor was revealed for a frequency band of 0.1Hz to 40Hz. The gain of the taxel was not flat in the measured frequency band and might be used carefully in the dynamic load range after accurate calibration. Moreover, it was found that within a $48 \pm 27\mu\text{s}$, the sensor was responsive to the impact loading using an another test set-up.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İki katı cisim temas haline getirildiğinde ara yüzde sınırlı bir temas alanı ve normal gerilme oluşmaktadır. Katılardan biri saydam değilse, optik yöntemler kullanarak temas basıncı ve alanını gözlemlemek mümkün değildir. Bu ölçümü yapmak için kullanılan bir yöntemde iki katı arasına konulan ince kâğıt formunda olan

filmlerde gerçekleşen renk değişimi ve yoğunluğundan temas bilgileri elde edilmeye çalışılmaktadır[1]. Fakat bu ölçüm yöntemi gerçek zamanlı ölçüm yapan herhangi bir algılayıcı, elektronik cihaz ve yazılım kullanmadığından dolayı ölçüm, analiz ve niceliksel bilginin elde edilmesinde zorluklar içermektedir. Son zamanlarda, temas ara yüzüne ince ve esnek dokunsal algılayıcı dizini yerleştirilerek temas basıncı ve alanını gerçek zamanlı olarak ölçmek mümkün olmuştur. Bu yapıların katı hal silikon teknolojilerinden farklı olarak esnek olarak üretilebilmelerini sağlayan teknolojinin adı esnek elektronik olarak adlandırılmaktadır. Katı cisimlerin temasında, temas alanı ve basıncının ölçülmesine duyulan ihtiyaç, otomotiv, medikal, robotik ve havacılık alanı gibi birçok bilimsel ve endüstriyel alanda büyük ölçüde artmaktadır[2-4]. Örnek olarak, dokunsal algılayıcılar robotik el uygulamalarında dokunma geri bildirimini vermek için insansı ve medikal robotlarda giderek daha fazla kullanılmaktadır[5,6]. Ayrıca, dokunsal algılayıcıların esnek özellikleri, sadece düz-düz katı cisim temasın değil aynı zamanda pürüzlü ve kavslü yüzeylerde de ölçüm yapılmasına izin vermektedir[7].

Dokunsal algılayıcı dizinin herhangi bir temas yüzeyinin basınç haritasını çıkarabilmesi için bir dizin halinde üretilmeleri gerekmektedir. Temel olarak, dokunsal algılayıcı dizini birçok tekil dokunsal algılayıcıdan (teksel) oluşmaktadır. Dokunsal algılayıcı ağında tekselin yanal çözünürlüğünü belirleyecek olan etken her bir dokunma algılayıcısının boyutu ve yerleştirme sıklığıdır. Her bir satır ve sütunun keşimi bir adet tekseli verir. Elektronik anahtar aracılığı ile belirli bir örnekleme frekansında ayrı ayrı okunan algılayıcı çıktıları uygun bir elektronik kart ve tarama algoritması kullanılarak bilgisayara aktarılır. Bilgisayara gönderilen bilgi işlenerek temas yüzeyinde oluşan basınç haritası ve temas alanı bir kullanıcı ara yüz yazılımı kullanarak görüntülenir.

Temel olarak, teksel elemanları uygun bir algılama mekanizması kullanarak kuvvet ölçümünden sorumludur. Dokunsal algılayıcı dizini teknolojisi yapımında yaygın olarak kullanılan, piezodirenç[8,9], kapasitif[10,11] ve piezoelektrik[12,13] olmak üzere üç farklı algılama mekanizması vardır. Algılama prensiplerinin her birinin, dokunsal tanıma yönünden kendi avantajları ve dezavantajları vardır ve genellikle bu algılayıcıların kullanılması uygulamaya özeldir. Piezoelektrik algılayıcılar tipik olarak kuvvet veya temas basıncının dinamik ölçümlerinde tercih edilirken, kapasitif ve piezodirenç temelli algılayıcılar statik veya yarı-statik yüklemelerin ölçümleri için kullanılmaktadır. Piezoelektrik algılayıcıların doğrusallığı bahsi geçen iki algılama yönteminden daha yüksek olmasına rağmen statik yüklemelerde piezoelektrik temelli algılayıcılar yük boşalması probleminde dolayı tercih edilmemektedir. Kapasitif algılayıcıların nem ve sıcaklık değişimine karşılık gelen kararlılığı diğerlerinden daha üstündür. Bununla birlikte, piezodirenç algılayıcılar, geniş bir ölçüm aralığına sahip olacak şekilde tasarlanabilirken, kapasitif algılayıcılar, uygulanan kuvvete yanıt olarak hızlı olarak gelişen doygunluklarından dolayı sınırlı kuvvet ve temas basıncı ölçüm aralığına sahiptir[3].

Yukarıda bahsedilen algılayıcı tiplerinin ortak bir gereksinimi, doğru ve tekrarlanabilir kuvvet ölçümünü sağlamak için yapılan ölçümleme prosedürüdür. Dokunsal algılayıcılar esnek olduğundan ve bükülebilir malzemelerden yapıldığından, statik ve dinamik karakteristik değerleri, yarı iletken silikon teknolojisi kullanılarak oluşturulan kuvvet algılayıcılarından daha kötüdür. Buna rağmen, dokunsal algılayıcılar, ince film şeklinde olmaları ve bükülebilir özelliklerinden dolayı temas basıncı ve alanı ölçümlerinde kullanılabilen tek algılayıcı ölçüm teknolojisidir. Bu duruma diş ve çene cerrahisinden örnek vermek gerekirse, aşırı oklüzal kuvvetlerin, abfraksiyon da dâhil olmak üzere diş restorasyonların ömrünü azaltan önemli bir faktör olduğu bildirilmiştir[14]. Bu kuvvetlerin ölçümü hastalıkların tanı ve tedavisinde kritik bir olgu olarak görülmekte ve dokunsal algılayıcı dizini teknolojisi kullanılarak gerçek zamanlı olarak dişler arası temas basıncı ve alan ölçümü yapılabilmektedir. Bu algılayıcıların medikal alanda tanı ve tedavide kullanımlarına yönelik bir başka örnek ise yürüyüş örüntüsü analizlerinde kullanımları ile ilgili verilebilir[15,16]. Bu medikal uygulamada, dokunsal algılayıcı dizinleri, ayak tabanının yer ile olan basınç dağılımı ve temas alanı ölçümlerinde kullanılarak diyabet, Parkinson, ortopedi ve nörolojik bozukluk gibi hastalıkların ortaya çıkardığı yürüyüş bozuklukları ile ilgili tanı koymak ve tedavinin durumunu izlemek için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, bir dokunsal algılayıcı dizininin içinde bulunan birim algılayıcının (teksel) statik ve dinamik algılayıcı özellikleri özel yapım deney düzenekleri kullanılarak incelenmiştir. İlk olarak, içerisinde 64 adet teksel barındıran bir dokunsal algılayıcı dizininin mikrofabrikasyon teknikleri kullanılarak imalatı yapılmıştır. Daha sonra bu algılayıcının çalıştırılması için elektronik bir sinyal tarama ve şartlandırıcı devresi tasarlanmış ve üretilmiştir. Sinyal koşullandırma cihazı farklı giriş uyarı voltajlarını verme

yeteneğine sahiptir ve algılayıcı çıkışları için bir yükselticiye sahiptir. Algılayıcı ağında tek bir algılayıcının seçimi yapılmış ve bu algılayıcının doğrusallık, histerizis, tekrarlanabilirlik ve sinyalin zamanla kayması gibi statik özellikleri ölçülmüştür. Bu değerler kullanılarak tekselin doğruluğu bulunmuştur. Ayrıca, algılayıcının tepki zamanı, frekans tepkisi ve kazanç gibi dinamik özellikleri de bir başka özel yapım test düzeneği kullanılarak ölçülmüş ve algılayıcının dinamik yükler altında kullanımı ile ilgili durum ortaya konulmuştur.

2. MALZEMELER ve YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

2.1 Piezodirenç Dokunsal Algılayıcı Dizini İmalatı (Fabrication of the Piezoresistive Tactile Sensor)

Direnç ve piezodirenç etkileri, kuvvet ve basınç algılayıcılarında en çok kullanılan iki algılama prensibidir[17,18]. Her iki algılama yöntemi de direnç değişimini gerektirse de, iki algılama prensibi arasında önemli bir fark vardır. Bir malzemenin elektriksel direnci Denklem 1 ile hesaplanabilir.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad 1$$

Burada;

R : Elektriksel direnci

ρ : Elektrik özdirenci

L : Akım boyunca uzunluk

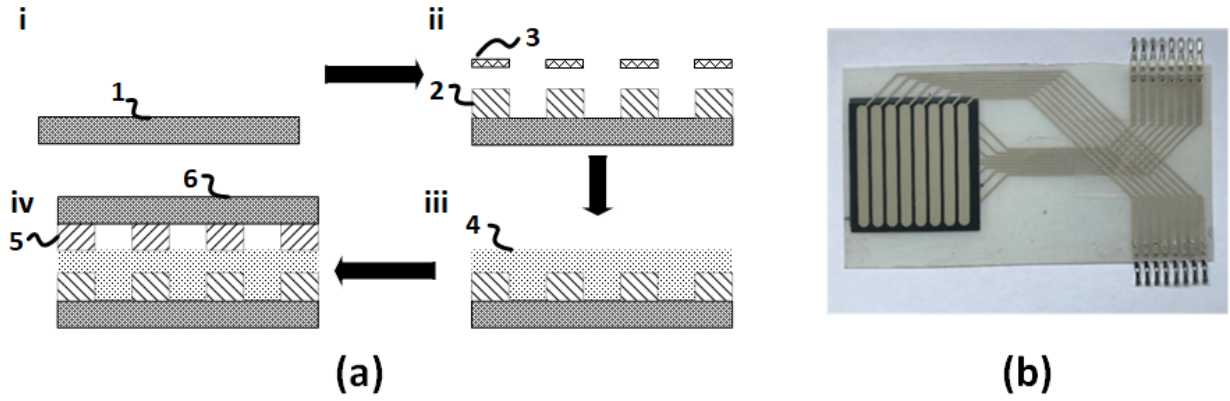
A : Kesit alanı

Gerinim pulu gibi elektrik özdirencinin sabit kaldığı ve uygulanan gerilim altında fiziksel boyut değişikliği sonucunda elektriksel direncin değiştiği algılayıcılar direnç etkisi ile çalışan algılayıcılar olarak adlandırılır. Buna karşılık, piezodirenç etki ile çalışan algılayıcılar ise boyutsal bileşeninin elektriksel direnç değişimine önemsiz bir katkısı olduğu, uygulanan gerilme üzerindeki elektrik özdirencinin değişiminin önemli olduğu algılayıcılarıdır.

Dokunsal algılayıcı dizini mikrofabrikasyon teknikleri kullanılarak imal edilmiştir ve imalat aşamaları Şekil 1(a)'da gösterilmiştir. Şekil 1(b)'de olan örnek resimde gösterildiği gibi algılayıcı elektriksel iletken elektrot serileri arasına sıkıştırılan piezodirenç bir algılama katmanından oluşur. Piezodirenç algılama tabakası, sıvı silikon kauçuğu ve iletken karbon siyahının uygun birleşiminden yapılan yarı iletken bir polimer kompozit malzemedir. Elektriksel iletken hatlar gümüş (Ag) temelli bir solüsyondan bir maske yardımı ile oluşturulmuştur. Katmanlar, çift eksenli yönelimli polietilen tereftalat ince filmler üzerinde büyütülmüştür. Bu filmler katmanların üzerinde bulunduğu bir alttaş görevi görmelerinin yanında algılayıcı dizinin çevresel etkilerden korumasını da sağlamaktadır. Dokunsal algılayıcı dizininin toplam kalınlığı $290\mu\text{m}$ 'dir. Algılayıcı, dizi ve sütun şeklinde düzenlenmiştir ve yapıda elektriksel iletken dizi (n) ve sütun (m) sayısı sekizdir. Bu nedenle, $n \times m$ yapılandırmasında dokunsal algılayıcı dizini 64 adet teksel barındırmaktadır. Bu düzenleme ile dokunsal algılayıcı dizinin okuma devresindeki hesaplamaların azalması sağlanmaktadır ve bir sonraki bölümde kullanılan teknoloji ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Dahası, dikey ve yatay çizgilerin kesişimi basitçe teksel birimini vermektedir. Böylece, dokunsal algılayıcı dizinin uzamsal çözünürlüğü $2.73\text{teksel}/\text{cm}^2$ olarak bulunabilir ve teksellerin her biri kare yapısında olarak $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ bir alanı kaplamaktadırlar. Dokunsal algılayıcı dizini ise toplamda $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 'lik bir alanı çevrelemektedir.

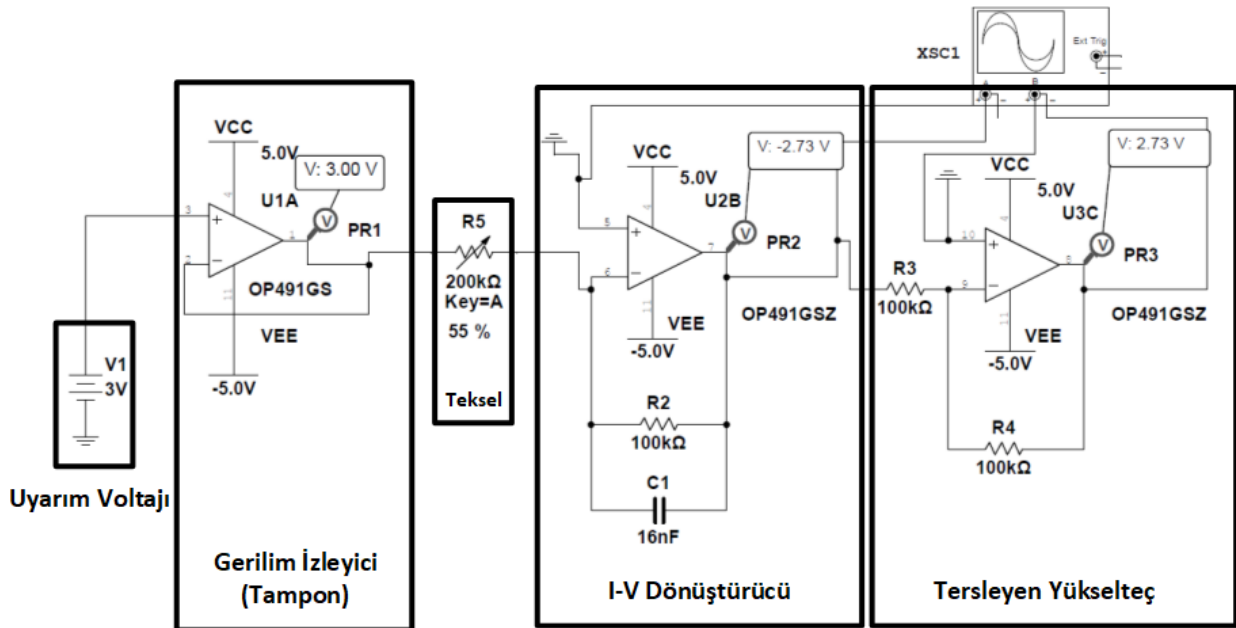
2.2 Elektronik Tarama Devresi Tasarımı (Design of Electronic Scanning Circuit)

Algılayıcı dizinini taramak ve her bir teksel verisini elde etmek için bir elektronik devre tasarlanmıştır. İlk olarak, entegre devre vurgulu simülasyon programı (SPICE) kullanılarak uyarma gerilimi, geri besleme direnci ve çıkış gerilimi arasındaki ilişkileri bulmak için elektronik devre simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, 64^{e} kadar teksele sahip dokunsal algılayıcı dizininin tarama kabiliyetine sahip elektronik sinyal tarama ve şartlandırıcı devresi tasarlanmıştır. Bu elektronik kartta teksel verisinin 100Hz örnekleme frekansına kadar gerçek zamanlı olarak elde edilmesi mümkündür.



Şekil 1. a) Dokunsal algılayıcı dizinin imalat akış diyagramı: alt alltaş (1), alt elektrot katmanı (2), maske (3), piezodirenç algılama katmanı (4), üst elektrot katmanı (5), üst alltaş (6), b) Dokunsal algılayıcı dizinin resmi

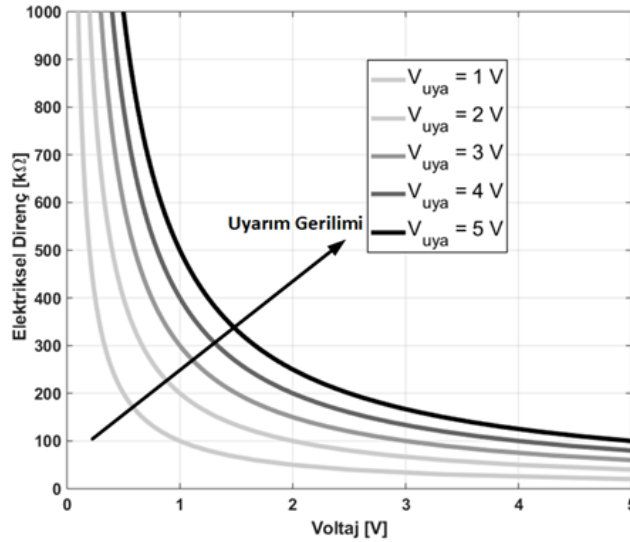
Bir tekssel için tarama devresinin SPICE benzetimi Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu elektronik devre gerilim izleyici (tampon), akım-gerilim dönüştürücü ve tersleyen yükselteç olmak üzere üç temel bölüme sahiptir. Gerilim izleyicinin amacı, giriş gerilimine yüksek empedans sağlayarak, tekselin direnç değişimden kaynaklanan gerilim düşüşlerini önlemektir. İkinci kısım, tekselin direnç değişimini geri besleme direnci ile kıyaslayarak ölçmektedir ve aynı zamanda birinci dereceden alçak geçiren filtre görevi görmektedir. Simülasyonda kesim frekansı 99.5Hz olarak ayarlanmıştır. Üçüncü kısımda ise gerilimin işareti değişmektedir ve algılayıcıyı diğer elektronik bileşenlerin bozucu etkilerinden ayırmaktadır. Sabit bir geri besleme direnci (R_{ref}) için uyarma gerilimi (V_{uya}), çıkış gerilimi ($V_{çık}$) ve tekssel direnci (R_{teks}) arasında bulunan ilişki Şekil 3’te verilmiştir. Bu benzetime göre kuvvetin artmasıyla algılayıcı direnci azalmaktadır ve buna karşın çıkış gerilimi artmaktadır. Ayrıca, uyarma gerilimi arttıkça, bir tekselin direnç değişim farkının oranı azalmaktadır. Dolayısı ile elektronik devrenin uyarma gerilimi arttıkça kullanılabilir olan kuvvet aralığı daralmaktadır. Ayrıca, çıkış voltajını etkileyen önemli bir faktör ise işlemsel yükselteçlerin besleme gerilimlerinin algılayıcı çıkış gerilimini sınırlandırmasıdır. Dolayısı ile uyarma voltajı ne kadar artırılırsa artırılırsın algılayıcının çıkış voltajı işlemsel yükselteçlerin besleme gerilimlerinden büyük olamayacaktır.



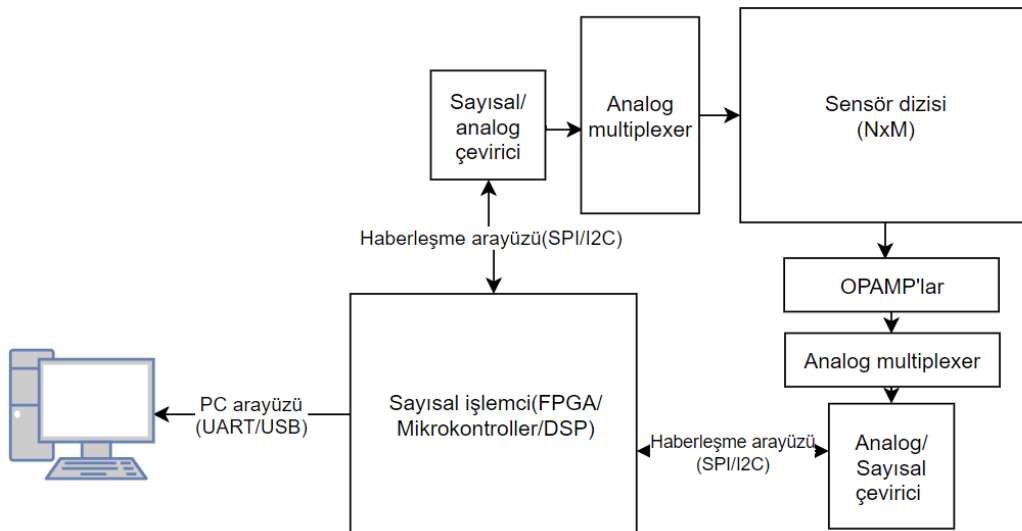
Şekil 2. Dokunsal algılayıcı dizinin bir elemanı için yapılan SPICE benzetimi şeması

Şekil 4’de ise elektronik tarama devresinin akış diyagramı gösterilmiştir. Elektronik devre algılayıcının satırlarına uyarma gerilimi uygulama ve algılayıcının sütunlarından ise gerilim okunmasından sorumludur.

Dijital-analog dönüştürücüler (DAC) algılayıcıya istenilen seviyede uyarma gerilimi verebilmeyi sağlar. Analog çoklayıcılar (MUX) ise matris yapıları algılayıcının istenen tekselini seçebilmeyi sağlar. Böylelikle, uygun tarama hızı ile çoklayıcılar açılıp kapatılarak her bir tekselin bilgileri toplanabilmektedir. Elektrotlar, piezodirenç katmanının her iki tarafına yerleştirildiğinden tekseller arasında elektriksel çapraz konuşma meydana gelmektedir. Bu durum, seçilen teksellerin direnç değişiminin doğru okunmasını engellemektedir. Bu problemin üstesinden gelmek amacı ile bu çalışmada sıfır-gerilim tarama metodu kullanılmıştır[12]. Bu teknikte, tüm sütunlar, işlemsel yükselteçlerin (OPAMP) sanal toprak özelliği sayesinde toprak seviyesine çekilmiştir. Dolayısı ile anlık olarak tüm taranmayan sütun ve satırlar toprak seviyesinde bulunmaktadır ve akım kaçağı azaltılmış veya yok edilmektedir. Terslendirici işlemsel yükselteçlerin yapısı istenen oranda kazanç ayarı yapmak için kullanılmıştır. İşlemsel yükselteçlerin çıkış gerilimleri direnç değişimi ile orantılıdır ve algılayıcının kalibrasyonunun yapılması durumunda uygulanan kuvveti verir. Bu sebeple, doğru kalibrasyon, bu algılayıcıların mühendislik uygulamalarında kullanılması için en önemli adımlardan birisidir. Analog- dijital dönüştürücüler (ADC) analog gerilim değerlerini sayısal veriye çevirir. Elektronik devrede yüksek hızlı işlemci olarak alanda programlanabilir kapı dizileri (FPGA) elektronik entegresi kullanılmaktadır. FPGA ADC'den gelen sayısal veriyi uygun bir seri haberleşme protokolü ile okumaktadır ve bilgisayara UART-USB dönüştürücüsü kullanarak göndermektedir. Son olarak bilgisayarda bulunan kullanıcı ara yüzü vasıtası ile temas halinde bulunan yüzeylerin temas basıncı ve alanı görüntülenir ve veriler uygun bir formatta kaydedilmektedir.



Şekil 3. Uyarma gerilimi (V_{uya}), çıkış gerilimi ($V_{çık}$) ve teksele elektriksel direnci (R_{teks}) ilişkisi

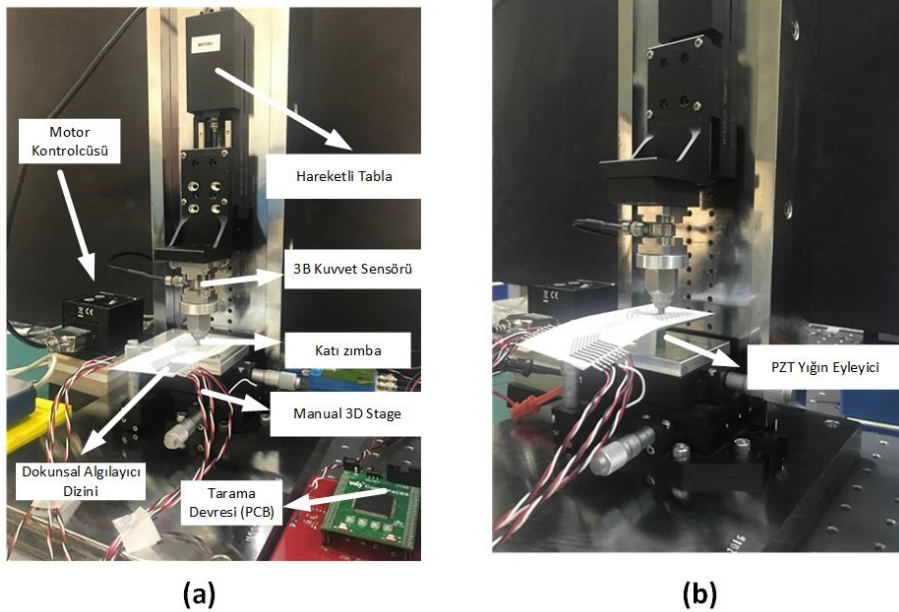


Şekil 4. Elektronik tarama devresinin sistem mimarisi

2.3 Deney Düzenekleri Tasarımı ve Kurulumu (Design and Installation of the Experimental Setups)

Dokunsal algılayıcı dizinleri herhangi bir kuvvet uyarımına karşılık olarak elektriksel direnç değişikliği göstermektedirler. Dokunsal algılayıcı dizinin uzamsal özellikleri birim alanda bulunan teksel elemanlarının sayısı ile ilgilidir. Uzamsal çözünürlük dokunsal algılayıcı dizini ile yapılan temas alan ölçümünün doğruluğunu belirlemektedir. Buna karşın algılayıcının dikey özellikleri ölçebileceği kuvvet aralığı ile ilgilidir. Dikey çözünürlüğün uzamsal çözünürlük ile birleşimi, temas eden yüzeylerin genel bir basınç ve temas alanı haritasını çıkarmaktadır. Bu bölümde algılayıcının dikey özelliklerini çıkarmak amacı ile iki adet özel yapım deneysel test düzeneklerinin kurulumu hakkında bilgi verilecektir. Bu test düzenekleri tekselin statik ve dinamik özelliklerini hassas bir biçimde ölçmek için kullanılacaktır.

İlk deney düzeneğinde, algılayıcının elektrik direncinin baskı kuvveti altında değişimi ve statik karakteristikleri, Şekil 5(a) 'da gösterilen test düzeneği kullanılarak bulunmuştur. Bu test düzeneğinde doğrusal yönde hareket edebilen bir adet hareketli tabla (Thorlabs MTS-50) dikey yönde yerleştirilmiştir. Bu tablanın kontrolü bir adet kontrolcü vasıtası ile yapılmaktadır ve hareketli tablanın 50nm pozisyon hassasiyeti bulunmaktadır. Üç boyutta (3B) kuvvet ölçebilen bir adet piezoelektrik kuvvet algılayıcısı (Kistler 9347C) hareketli tablaya bir L-braketi vasıtası ile bağlanmıştır. 3B kuvvet algılayıcısının her bir yönde olan çıkışları yük yükselticisine bağlanmıştır ve yük yükselticinin çıkışı bir adet veri alım elektronik kartına bağlanmıştır. Böylelikle yatay iki yönde $0.01N$ ve dikey yönde ise $0.1N$ kuvvet çözünürlüğü ile ölçümler yapılabilmektedir. Yatay yönlerde kuvvet izlemesinin yapılmasının sebebi sadece dikey yönde dokunsal algılayıcı üzerine baskı kuvveti yapıldığı ve ölçüm zamanı süresince yatay yönde herhangi bir sürtünme kuvvetinin oluşup oluşmadığını belirlemektir. 3D kuvvet algılayıcısına bir plaka yardımı ile teksel ile düzlemsel olarak aynı boyutlarda ve çelikten üretilmiş sert bir zımba bağlanmıştır. Dokunsal algılayıcı dizini manüel olarak kontrol edilebilen üç eksenli bir hareketli tablaya (Thorlabs RB13M) bağlanmıştır ve böylelikle dokunsal algılayıcı dizini içerisinde bulunan bir tekselin zımba altına konumlandırılması sağlanmıştır. Tipik bir deneyde, dikey hareketli tabla önceden belirlenmiş bir baskı kuvvetine ulaşıncaya kadar zımba ile tekselin üzerine düşük ve sabit bir hızla girinti oluşturmaktadır. Hareketli tabla istenilen baskı kuvvetine ulaşıncaya aynı hız ile ters yönde baskı kuvvetini azaltarak ilk pozisyonuna döner. Aynı zamanda, sinyal tarama devresi, dokunsal algılayıcı dizini içerisinde seçilen tekselin voltaj çıkışını kaydeder. Deney düzeneğinin tüm bileşenleri gerçek zamanlı olarak Labview programı kullanılarak yazılmış bir kontrolcü programı tarafından kontrol edilmektedir.



Şekil 5. a) Algılayıcının statik özelliklerini ölçmek için kullanılan test düzeneği, b) Algılayıcının dinamik özelliklerini ölçmek için kullanılan test düzeneği

Algılayıcının dinamik özelliklerini bulmak için Şekil 5(b)'de gösterilen deney düzeneği kullanılmıştır. Bu test düzeneğinde, birinci deney düzeneğine bir adet piezoelektrik yığın eyleyici eklenmiştir. Bu eyleyici manüel tablanın üzerine sabitlenmiştir ve dokunsal algılayıcı dizini zımba ve eyleyici arasında yerleştirilmiştir. Bu test düzeneğinde, istenilen teksel üzerine ön yükleme kuvveti dikey olarak uygulanır. Böylece, teksel zımba ile piezoelektrik elemanın üst yüzeyi arasında sıkıştırılmış olur. Bir sinyal üretici kullanılarak piezoelektrik yığın eyleyicisi istenilen genlik ve frekansta sürülmektedir. Dokunsal algılayıcının kuvvet ve voltaj çıkışı aynı anda kaydedilmekte ve tekselin frekans cevabını karakterize etmek için kazanç faktörü hesaplanabilmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1 Tekselin Statik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu bölümde bir adet tekselin kuvvet ölçüm aralığı, duyarlılığı, doğrusallığı, tekrarlanabilirliği, histerezisi, sinyalin zaman ile kayması ve doğruluğu gibi statik özellikleri bulunmuştur. İlk olarak, algılayıcının transfer fonksiyonunu ve duyarlılığını bulmak için deney yapılmıştır. Tipik bir deneyin yükleme ve boşaltma çevrimi için örnek grafik Şekil 6' da verilmiştir. Bu test sırasında doğrusal motor $0.05mm/sn$ sabit bir hızla doğrusal olarak hareket ettirilmiştir. Sert ve eksenel simetrik sürtünmesiz bir zımba, önceden belirlenmiş bir maksimum kuvvet değerine ulaşıncaya kadar, teksel elemanına girinti oluşturmuştur. Ardından, düz zımbanın algılayıcı yüzeyi ile teması kopuncaya kadar hareketli tabla geri çekilmektedir. Yükleme ve boşaltma çevrimi sırasında kuvvet ve gerilim çıkışı gerçek zamanlı olarak kaydedilmektedir. Algılayıcı üzerine uygulanan kuvvet ile çıkış gerilimi arasındaki ilişkiyi tanımlamak için güç denkleminin yararlanılabilir.

$$V_{çık} = \alpha L^{\beta} \quad 2$$

Burada;

$V_{çık}$: Çıkış gerilimi

α, β : Eğri uydurma parametreleri

L : Kuvvet

Tekselin gerilim çıkışının direnç değişimi ile ilişkisi sinyal koşullandırıcının I-V dönüştürücü bölümü dikkate alınarak Denklem 3 ile hesaplanabilir.

$$V_{çık} = V_{uya} \frac{R_{ref}}{R_{teks}} \quad 3$$

Böylece, kuvvet ve elektriksel iletkenlik arasında bulunan ilişki eğri uydurma parametreleri cinsinden Denklem 4 ile hesaplanabilir.

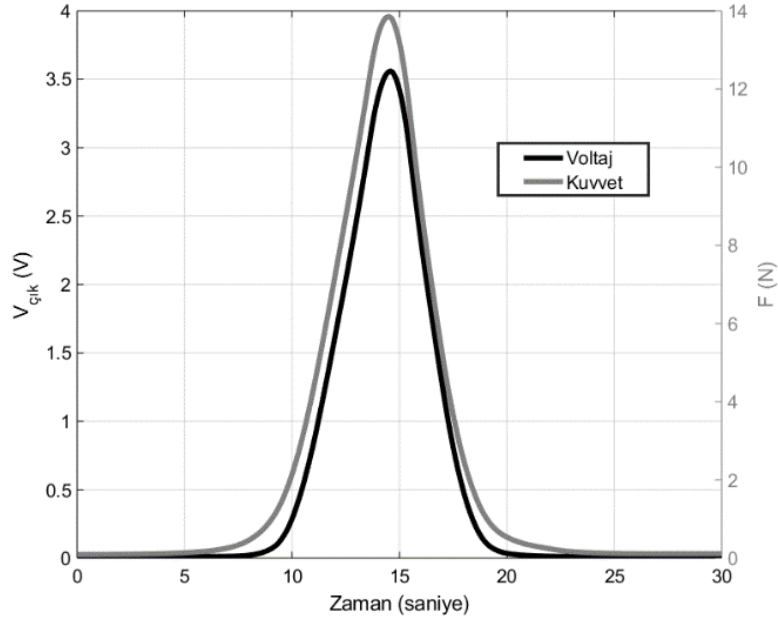
$$G = \gamma L^{\vartheta} \quad 4$$

Burada;

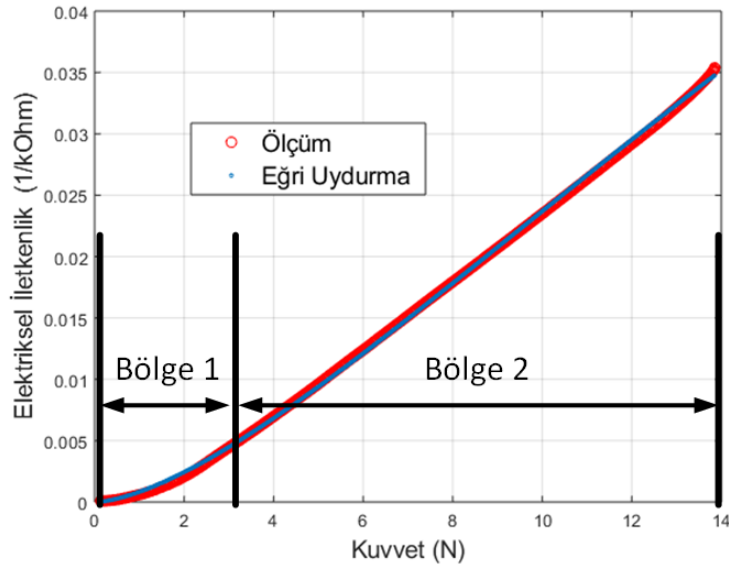
G : Elektriksel iletkenlik.

γ, ϑ : Eğri uydurma parametreleri

Teksel elemanın iletkenliği yükleme sırasında kuvvetle doğrusal olmayan bir şekilde artmaktadır (Şekil 7). Bu çalışmada, elektriksel iletkenlik ile kuvvet verilerini incelemek ve verilere bir eğri uydurma amacı ile sönümlü en küçük kareler metodu kullanılmıştır. Veri noktaları ve fonksiyon arasındaki hataların karelerinin toplamını en aza indirmek için dereceli azalma ve Gauss-Newton metodunun birleşimi olan bir doğrusal olmayan regresyon yöntemi uygulanmıştır. Güç denkleminin doğrusal olmayan regresyon uydurma parametreleri $\gamma = 0,0012$ ve $\vartheta = 1,2984$ olarak bulunmuştur.



Şekil 6. Yüklemeye ve boşaltma sırasında referans kuvvet algılayıcısı ve tekse voltaj çıktısı



Şekil 7. Elektriksel iletkenliğin kuvvet ile olan değişimi

Piezodirenç algılayıcılar bir polimer matrisinin içinde dağıtılmış elektriksel iletken parçacıklardan oluşan ince film kompozitlerdir. Böylece, yalıtkan polimerin elektriksel özellikleri değiştirilmiştir olmaktadır. Algılayıcı üzerinde herhangi bir yüklemeye olmadığında, tekse $10M\Omega$ 'dan daha büyük bir elektriksel dirence sahiptir ve dolayısı ile elektriksel olarak yalıtkan bir davranış sergilemektedirler. Bununla birlikte, dikey yönde yüklemeye maruz bırakıldıklarında iletken parçacıklar polimer matrisin içinde tek eksenli yönde toplanmakta ve iletken yollar oluşturmaktadır. Dolayısıyla ince algılayıcı film, bir yüklemeye ile sıkıştırıldığında yarı iletken bir davranış sergilemeye başlamaktadır. Yüklemeye sırasında tekse yüzeyine verilen basınç değeri göreceli olarak tekdüze olarak düşünülebilir. Fakat tekse et kalınlığı yönünde gerilme tekdüze değildir ve merkezden kenarlara doğru yayılan bir gerilme dağılımı oluşmaktadır. Dolayısıyla temas basıncı altında oluşan birbirine paralel olan iletken hatların hepsi aynı iletkenliğe sahip olmamaktadırlar. Bu durum kuvvet uygulanmadan önce yalıtkan özellik gösteren algılayıcının kuvvet uygulanması ile birlikte elektriksel iletkenlikte gerçekleşen anlamlı değişiminin algılamak için minimum bir gerilmenin gerekli olduğunu da göstermektedir. Bu fiziksel mekanizma dokunsal algılayıcının kuvvet ölçüm aralığının alt limitini belirlemektedir. Ayrıca, piezodirenç malzemenin bu davranışı düşük basınç

altında iletken değişiminin Şekil 7 üzerinde gösterilen Bölge 1’de olduğu gibi doğrusal olmamasına yol açmaktadır. Şekil 7 üzerinde gösterilen bölge 2’de ise kompozit malzeme içerisinde oluşan elektriksel iletken yolların oluşumunun yavaşladığı ve uygulanan yük ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Böylelikle, iletkenlik davranışının kuvvet ile değişiminin Bölge 2’de doğru orantılı olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu çalışmada deney düzeneğinde bulunan hareketli tablaların belirli bir yük taşıyabilmelerinden dolayı üst kuvvet değeri tespit edilememiştir. Fakat yükleme ile birlikte direnç değişimindeki azalma oranın gittikçe azaldığı görülmektedir. Dolayısı ile piezodirenç kompozitin sıkıştırılabilirlik davranışının belirli bir noktada azalması ile birlikte iletken parçacıkların yanal olarak kaymaya başlayacağı öngörülebilir. Bu eylemin tünel yollarını baskı kuvveti yönünde yok etmeye başladığını ve direnç değişim oranının gittikçe azalacağını göstermektedir. Sonuç olarak, direnç değişim oranı kuvvetin artması ile azalmaya başlar ve bir tolerans bandı içerisinde anlamlı bir değişiklik göstermemektedir. Bu durum dokunsal algılayıcının kuvvet ölçüm aralığının üst sınırını vermektedir.

Bir algılayıcının doğrusallığı algılayıcının istenilen ölçüm aralığında ideal bir doğrusal düz çizgiden sapması olarak tanımlanmaktadır. Algılayıcıların doğrusallık hatası sıklıkla iki farklı yöntem kullanılarak analiz edilebilir: en küçük kareler regresyonu veya son nokta doğrusallık analizi. Bu çalışmada en küçük kareler regresyon analizi kullanılarak ideal doğrusal eğri elde edilmiştir. Doğrusallık hatası Denklem 5 ile hesaplanmıştır.

$$\epsilon_{doğr} = \% \frac{mak_doğ (\Delta V_{çık})}{V_{öa}} \times 100 \quad 5$$

Burada;

$\epsilon_{doğr}$: Doğrusallık hatası

$V_{öa}$: Voltaj ölçüm aralığı

$mak_doğ (\Delta V_{çık})$: İdeal doğrusal eğriden elde edilen voltaj değerleri ile deneyden elde edilen voltaj çıktısı arasında oluşan maksimum değişim değeri

İdeal bir kuvvet algılayıcısında yükleme ve boşaltma yolu aynı eğri üzerinde olmak zorundadır ve bu durumdan sapma histerizis olarak adlandırılır. Başka bir deyişle, istenilen bir kuvvet değerine yaklaşırken artarak veya azalarak ulaşmanın ideal bir algılayıcı için önemi yoktur. Bununla birlikte, tüm kuvvet ve basınç algılayıcıları algılama mekanizmasına ve kullanılan malzemelere bağlı olarak bir miktar histerizis gösterir. Bu çalışmada kullanılan algılayıcının büyük ölçüde polimerik malzemelerden yapıldığı düşünüldüğünde daha önce tartışılan elektriksel direnç ile ilgili reolojik davranış ve viskoelastik öğelerin histerizis oluşumunda etkili olduğu söylenebilir. Histerizis davranışını incelemek için Şekil 6’da verilen yükleme ve boşaltma grafiği kullanılmıştır. Algılayıcın ölçüm aralığında maksimum voltaj farkına bakılarak histerizis değeri Denklem 6 ile verilebilir.

$$\epsilon_{his} = \% \frac{mak_his (\Delta V_{çık})}{V_{öa}} \times 100 \quad 6$$

Burada;

ϵ_{his} : Histerizis hatası

$mak_doğ (\Delta V_{çık})$: Yükleme ve boşaltma sırasında oluşan maksimum voltaj farkı

Tekselin tekrarlanabilirlik hatasını bulmak amacı ile ardışık olarak beş adet basma ve çekme deneyi yapılmıştır ve hata hesaplamasında sadece yükleme bölgesi göz önüne alınmıştır (Şekil 8). Aynı kuvvet değeri için algılayıcının çalışma aralığında gerçekleşen maksimum voltaj farkı bulunmuş ve tekrarlanabilirlik hatasını bulmak için Denklem 7’den yararlanılmıştır:

$$\epsilon_{tek} = \% \frac{mak_tek (\Delta V_{çık})}{V_{öa}} \times 100. \quad 7$$

Burada;

ϵ_{tek} : Tekrarlanabilirlik hatası

$mak_tek (\Delta V_{çık})$: Yükleme bölgesinde denemeler arasında oluşan maksimum voltaj farkı

Son olarak algılayıcının voltaj sinyalinde zaman ile gerçekleşen kayma miktarı bulunmuştur. Bu amaçla algılayıcı yaklaşık olarak $11N$ kuvvet ile 24 saat boyunca yüklenmiş bir durumda bırakılmış ve bu durumda voltaj sinyali kaydedilmiştir. Bu süre zarfında algılayıcının çıkış voltajında gerçekleşen maksimum voltaj farkının zamana bağlı olarak kaydedilen çıkış voltajın kök ortalama karesi (rms) değerinden maksimum sapması Denklem 8 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\epsilon_{kay} = \% \frac{mak_kay (\Delta V_{çık})}{rms (V_{çık})} \times 100 \quad 8$$

Burada;

ϵ_{kay} : Sinyal kayma hatası

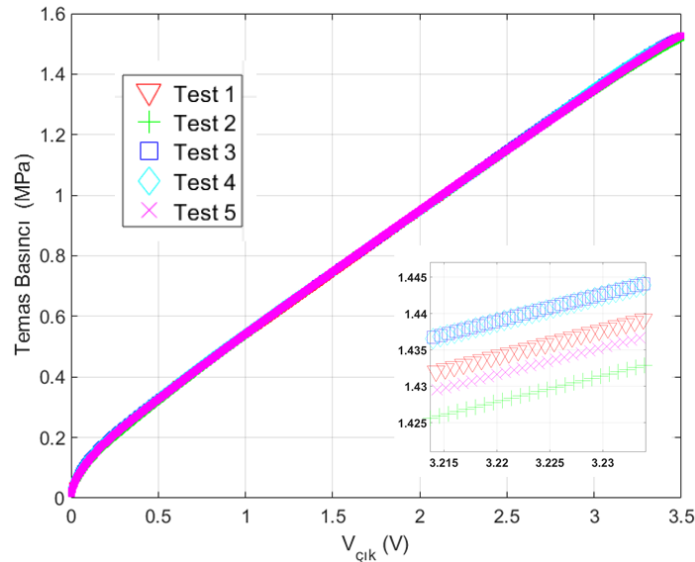
$mak_kay (\Delta V_{çık})$: Algılayıcının çıkış voltajında gerçekleşen maksimum voltaj farkı

Algılayıcının yukarıda verilen yöntemler ile hesaplanmış statik karakterizasyon değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak tekselin doğruluk değeri her bir statik özelliğin karelerinin toplamının karekökü olarak Denklem 9 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\epsilon_{doğ} = \sqrt{\epsilon_{doğr}^2 + \epsilon_{his}^2 + \epsilon_{tek}^2 + \epsilon_{kay}^2} \quad 9$$

Tablo 1. Tekselin Statik Karakteristikleri

Kuvvet Ölçüm Aralığı	Basınç Ölçüm Aralığı	Doğrusallık(%)	Histerezis(%)	Tekrarlanabilirlik(%)	Sinyal Kayması (%)	Doğruluk (%)
0.14-13.50	0.016-1.522	3.95	3.73	0.4	0.87	5.52

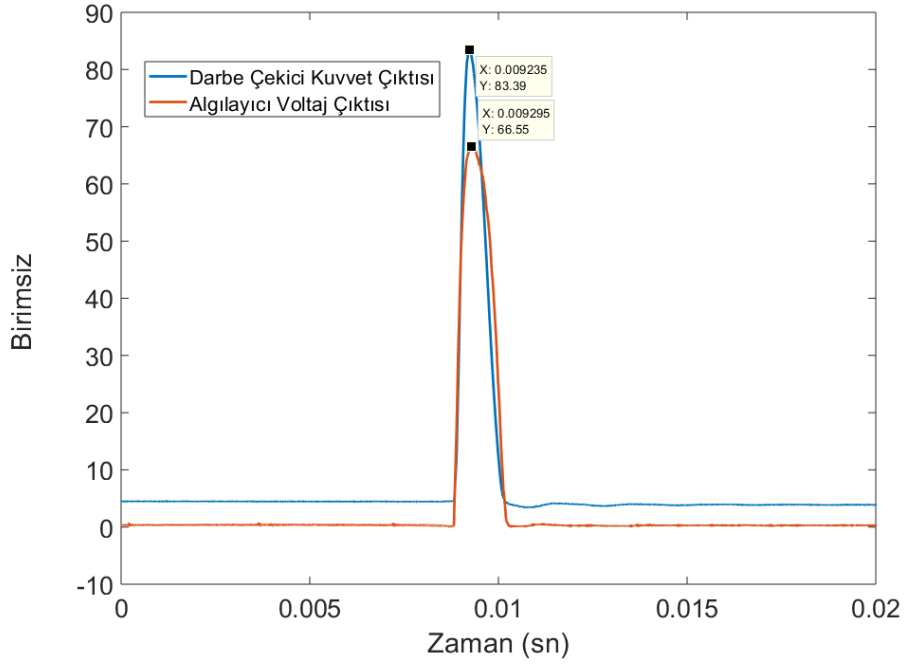


Şekil 8. Algılayıcı üzerinde yapılan 5 adet yükleme durumunda oluşan basınç ve voltaj değişim grafiği.

Ekli küçük resim algılayıcının maksimum sapma bölgesini göstermektedir.

3.2 Tekselin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu bölümde algılayıcının dinamik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar yapılacaktır. İlk olarak algılayıcının tepki süresi (τ) ölçülmüştür. Ölçüm teknolojilerinde, tepki süresi, harici bir uyarı nedeniyle algılayıcı çıkışında oluşan gecikme süresidir ve algılayıcının önemli bir dinamik özelliğidir. Bu çalışmada ucunda piezoelektrik kuvvet algılayıcısı takılmış olan bir darbe çekici kullanılarak sıfırcı zamanda teksele ani darbe girişi verilmiştir. Darbe girişinin kuvvet genliğinin maksimuma ulaştığı zaman tespit edilmiştir (t_{darbe}). Aynı anda tekselden gelen voltaj çıkışı kaydedilmiş ve genliğinin maksimuma ulaştığı zaman (t_{teksel}) bulunmuştur. Bu çalışmada tepki süresi Şekil 9'da gösterildiği üzere iki zaman arasında oluşan değer farkı olarak tanımlanmıştır ($\tau = t_{teksel} - t_{darbe}$). Algılayıcının beş adet deney sonucuna göre $48 \pm 27 \mu sn$ içerisinde tepki verebildiği tespit edilmiştir.



Şekil 9. Algılayıcının tepki süresinin ölçümü ile ilgili örnek bir grafik

Tekselin dinamik bir tahrik kuvveti karşısında oluşan frekans tepkisi dinamik bir deney düzeneği kullanılarak ölçülmüştür. Bu test sırasında algılayıcı üzerine gelen kuvvet uyarımı Denklem 10 ile verilebilir.

$$L_{din} = L + L_o \sin(w_{tah}t) \quad 10$$

Burada;

L_{din} : Kuvvet Uyarımı

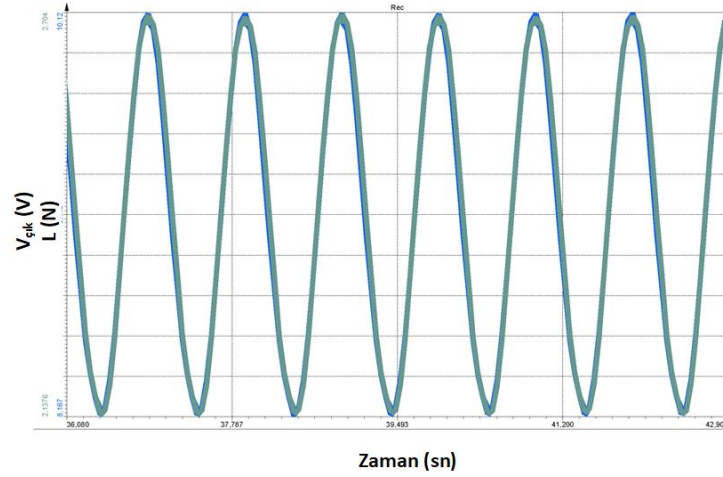
L : Ön yükleme kuvveti

L_o : Titreşim tahrik kuvvetinin genliği

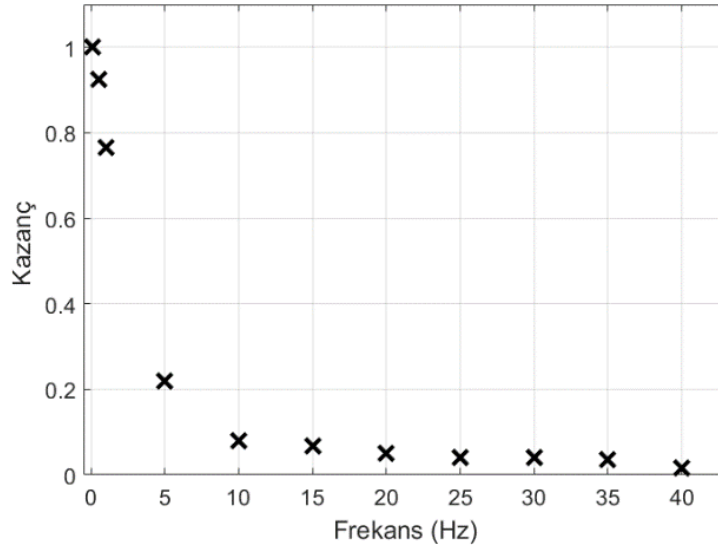
w_{tah} : Tahrik frekansı

t : Zaman

Tekselin 1Hz uyarım frekansı altında dinamik bir yüke olan tepkisi Şekil 10'da göstermektedir. Grafikten takip edilebileceği üzere teksel voltaj çıkışı referans ölçümlerine algılayıcısının çıkışı olan kuvvet sinyalini yakından takip etmektedir ve algılayıcının ölçek faktörünün (tepeden tepeye gerilim çıkışının tepeden tepeye kuvvet algılayıcı çıkışına oranı) ortalama olarak 0.264 olduğu bulunmuştur. Ayrıca, dokunsal algılayıcının frekans tepkisi, Şekil 11'de gösterildiği gibi 0.1 ila 40Hz aralığında ölçülmüştür. Algılayıcının kazancı düz değildir ve monoton şekilde azalmaktadır. Bununla birlikte, 40Hz'e kadar voltaj çıkışında önemli bir bozulma gözlenmemiştir. Böylece, dokunsal algılayıcı istenen dinamik frekansa göre uygun şekilde kalibre edilebilirse dinamik temas basınç ölçümünde de kullanılabilir.



Şekil 10. Referans kuvvet algılayıcı sinyali (mavi) ile teksel voltaj çıkışının (yeşil) karşılaştırılması.



Şekil 11. Algılayıcının 0,1 Hz ile 40 Hz arasında gerçekleşen kazanç grafiğidir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Dokunsal algılayıcının esnekliği ve inceliği, iki temas eden katı yüzeyin temas kuvvetini / basıncını ölçmek için diğer yöntemlerle ulaşılamayan benzersiz ve olağanüstü bir yetenek sağlar. Bu nedenle dokunsal algılayıcı teknolojisinin kullanımı birçok bilimsel ve endüstriyel alanda yer bulmaktadır. Bu çalışmada dokunsal algılayıcı dizini içerisinde bulunan bir adet algılayıcının statik ve dinamik özellikleri bu tip algılayıcılar ile yapılan basınç ölçümlerinde ki doğruluğu arttırmak için incelenmiştir.

Bu çalışmada ilk olarak 64 tane teksele sahip algılayıcı dizini mikrofabrikasyon teknikleri kullanılarak üretilmiştir. Daha sonra, yükleme sırasında dokunsal algılayıcı dizinde bulunan teksellerin direnç değişimini elde etmek için bir sinyal tarayıcısı tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu tasarımda tekseller arası elektriksel konuşmayı önlemek amacı ile elektronik devrede sıfır potansiyel tarama yöntemi kullanılmıştır. Ardından, dokunsal algılayıcı dizini içerisinde bir tane teksel statik ve dinamik karakterizasyon yapmak amacı ile seçilmiştir. Bu amaçla iki adet özel yapım deney düzeneğinin tasarımı yapılmıştır. İlk test düzeneğinde, tekselin doğrusallık, tekrarlanabilirlik, histerezis ve zaman kayması gibi statik özellikleri ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda tekselin elektriksel iletkenliğini kuvvet ile ilişkilendiren transfer

fonksiyonu bulunmuştur. Buna göre algılayıcıya sıkıştırma yükü uygulandığında, tekselin elektriksel iletkenliği düşük kuvvetlerde doğrusal olmayan bir biçimde ve daha sonra ise ölçüm aralığında yaklaşık olarak doğrusal bir biçimde değişmektedir. Böylece, ince film algılayıcı yüklendiğinde yarı iletken bir özellik gösterir. Bu olguya ek olarak direncin kararlı bir şekilde değişmesi karakterize edilmiş ve algılayıcının ölçüm aralığı tespit edilmiştir. Teksell, esnek ve bükülebilir bir algılayıcı için kabul edilebilir sınırdaki olan %5.5 oranında bir doğruluğa sahiptir. İkinci test düzeneğinde ise tekselin dinamik özellikleri ölçülmüştür. İlk olarak algılayıcının tepki cevabı $48 \pm 27 \mu\text{s}$ olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla ile algılayıcı herhangi bir dış etkiye ortalama $48 \mu\text{s}$ içerisinde anlamlı olarak cevap verebilmektedir. Daha sonra algılayıcı 1Hz frekansında bir dinamik yük ile yüklenmiştir. Algılayıcının dinamik ölçek faktörü ortalama olarak 0.264 bulunmuştur. Ayrıca, algılayıcının 1Hz ile 40Hz arasında frekans tepkisi bulunmuştur. Tekselin kazancı düz değildir ve doğru kalibrasyondan sonra dinamik yük aralığında dikkatli bir şekilde kullanılabilir olduğu görülmüştür. Sonuç olarak dokunsal algılayıcı davranışı uygulamaya özeldir ve algılayıcının kullanımı farklı uygulama alanları için dikkatli olarak değerlendirilmelidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Elektronik kart tasarım ve imalatı ile ilgili yardımlarından dolayı Berker Işık'a teşekkür ederim. Temiz oda ve algılayıcı imalat imkânlarını kullandırmasından dolayı Senslab A.Ş. firmasına şükranlarımı sunarım.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İ. Mutlu, Y. Kişioğlu, M.Y. Çırpıcı, M.S. Müezzinoğlu, L. Buluç, Temas Basınç Sensörü Kalibrasyonu ve Kalibrasyon Eğrilerinin Karşılaştırılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 16 (2012) 361-365.
- [2] L. Zou, C. Ge, Z.J. Wang, E. Cretu, X. Li, Novel tactile sensor technology and smart tactile sensing systems: A review, Sensors, 17(11) (2017) 1–24.
- [3] H. Yousef, M. Boukallel, K. Althoefer, Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics - A review, Sensors and Actuators A: Physical, 167(2) (2011) 171–187.
- [4] R.S. Dahiya, P. Mittendorfer, M. Valle, G. Cheng, V.J. Lumelsky, Directions toward effective utilization of tactile skin: A review, IEEE Sensors Journal, 13(11) (2013) 4121–4138.
- [5] R.S. Dahiya, M. Valle, Robotic Tactile Sensing, Springer Netherlands, Dordrecht, 2013.
- [6] C. Chi, X. Sun, N. Xue, T. Li, C. Liu, Recent progress in technologies for tactile sensors, Sensors, 18(4) (2018) 948 .
- [7] T. Dumbleton, A.W.P. Buis, A. McFadyen, B.F. McHugh, G. McKay, K.D. Murray, S. Sexton, Dynamic interface pressure distributions of two transtibial prosthetic socket concepts, Journal of Rehabilitation Research and Development, 46(3) (2009) 405.
- [8] A. TermehYousefi, S. Azhari, A. Khajeh, M.N. Hamidon, H. Tanaka, Development of haptic based piezoresistive artificial fingertip: Toward efficient tactile sensing systems for humanoids, Materials Science and Engineering C, 77 (2017) 1098–1103.
- [9] S. Stassi, V. Cauda, G. Canavese, C.F. Pirri, Flexible tactile sensing based on piezoresistive composites: A review, Sensors, 14(3) (2014) 5296–5332.
- [10] M. Chandra, S.Y. Ke, R. Chen, C.Y. Lo, Vertically stacked capacitive tactile sensor with more than quadrupled spatial resolution enhancement from planar arrangement, Sensors and Actuators A: Physical, 263 (2017) 386–390.
- [11] P. Maiolino, M. Maggiali, G. Cannata, G. Metta, L. Natale, A flexible and robust large scale capacitive tactile system for robots, IEEE Sensors Journal, 13(10) (2013) 3910–3917.
- [12] J. Lee, W. Choi, Y.K. Yoo, K.S. Hwang, S.M. Lee, S. Kang, J. Kim, J.H. Lee, A micro-fabricated force sensor using an all thin film piezoelectric active sensor, Sensors, 14(12) (2014) 22199–22207.

- [13] L. Seminara, L. Pinna, M. Capurro, M. Valle, A Tactile Sensing System Based on Arrays of Piezoelectric Polymer Transducers, *Smart Actuation and Sensing Systems – Recent Advances and Future Challenges*, (2012) 611–638.
- [14] T.P. Verma, Bite Force Recording Devices - A Review, *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 11(9) (2017) 37–45.
- [15] T.L. Chevalier, H. Hodgins, N. Chockalingam, Plantar pressure measurements using an in-shoe system and a pressure platform: A comparison, *Gait Posture*, 31(3) (2010) 397–399.
- [16] S. Bakbak, R. Kayacan, Hastalıkların Teşhis Ve Takibinde Kullanılan Yürüyüş Analiz Sistemleri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 2(4) (2014) 323–332.
- [17] S.D. Senturia, *Microsystem Design*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.
- [18] J.C. Doll, B.L. Pruitt, *Piezoresistor Design and Applications*, Springer New York, New York, NY, 2013.