

Yük hücresi temelli iki tekerlekli denge robotunun PID kontrolör kullanarak gerçek zamanlı kontrolü

Real-time control of load cell based two-wheel balancing robot using PID controller

Muhammed Mustafa KELEK^{1*}, Yüksel OĞUZ², Uğur FİDAN³, Tolga ÖZER⁴

^{1,2,4}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye.
mmustafakelek@aku.edu.tr, yukseloguz@aku.edu.tr, tolgaozer@aku.edu.tr

³Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye.
ufidan@aku.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 19.08.2020
Kabul Tarihi/Accepted: 26.12.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 27.11.2020

doi: 10.5505/pajes.2021.72708
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, yük hücresi temelli iki tekerlekli denge robotu (İTDR)'nin gerçek zamanlı uygulaması gerçekleştirilmiştir. İki tekerlekli denge robotun üzerine yerleştirilen dört adet yük hücresi ile sistemin kontrolü PID kontrolör tarafından sağlanmaktadır. Yük hücresinden gelen kütle bilgilerine ait analog sinyaller 24 bit çözünürlüklü HX711 tümleşik entegre ile sayısal sinyallere dönüştürülmektedir. Sayısal sinyallere dönüştürülen veriler senkron seri haberleşme protokolü üzerinden mikroişlemci ile aracılığı ile anlaşılmaktadır. Ölçülen kütle bilgisine göre sistemin dinamik modelinin çıkışı anlık olarak güncellenebilmektedir. Bu işlem maksimum yunuslama açısını güncellemektedir. Böylelikle iki tekerlekli denge robotunun kontrolü kolaylaşmakta ve kullanıcının araç üzerinden düşme riski azaltılmaktadır. Sistemin kontrolü ARM mimariye sahip STM32F103C8T6 mikroişlemci kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aracın gerçek zamanlı uygulaması sırasında Fırçasız Doğru Akım Motoru'nun (FDAM) akım değerleri ve motor dönüş hız bilgileri elde edilmektedir. Ayrıca SD kart modülü yardımıyla 12 adet farklı veri SD kart üzerine kaydedilmektedir. Karta kaydedilen veriler sonucunda yük hücrelerinin tekrarlama testinde her bir yük hücresinin korelasyon değeri 0,99 olarak elde edilmiştir. Sonuçta iki tekerlekli denge robotun üzerindeki kütle ölçüm hata oranı %1 olarak elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: İki tekerlekli denge robotu (İTDR), Yük hücresi, Elektrikli araç, PID kontrolör, Mikrodenetleyici.

Abstract

In this study, real-time application of load cell-based two-wheel balancing robot (TWBR) has been realized. The control of the system is provided by the PID controller with four load cells placed on the two-wheel balancing robot. The analog signals of the weight information coming from the load cell are converted into digital signals with the 24-bit resolution HX711 module. The data converted into digital signals are interpreted through the microprocessor over the synchronous serial communication protocol. The output of the dynamic model of the system can be updated instantly, according to the measured weight information. This process updates the maximum pitch attitude. Thus, the control of the two-wheel balancing robot is facilitated and the risk of the user falling off the vehicle is reduced. The control of the system is carried out using an ARM architecture based STM32F103C8T6 microprocessor. Current values and motor rotation speed information of the Brushless Direct Current Motor (BLDC) are obtained during the real time application of the vehicle. In addition, 12 different data are recorded on the SD card with using the SD card module. As a result of the data recorded on the card, the correlation value of each load cell is obtained as 0.99 in the repetition test of the load cells. As a result, the measurement error rate of the weight on the two-wheel balancing robot is obtained as 1%.

Keywords: Two-Wheel balancing robot (TWBR), Loadcell, Electrical vehicle, PID controller, Microprocessor.

1 Giriş

Ulaşım için karayolu, demiryolu, denizyolu ve havayollarından yararlanılmaktadır. Ulaşım araçlarının giderek artmasıyla birlikte insanların ulaşım konusundaki rahatsızlıkları da artmaya başlamıştır. Bu rahatsızlıklara trafik yoğunluğu, trafik sıkışıklığı, trafik kazaları, park problemi, gürültü kirliliği, sera gazı emisyonu vb. hususlar örnek olarak verilebilir. Gürültü ve gaz kirliliği problemlerinin temel nedeni, kullanılan araçların büyük bir yoğunluğunda petrol ürünlerinin kullanılmasıdır. Motorlu taşıtların egzozlarından çıkan sera gazları havayı kirletmektedir. Sera gazının çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmak için bilim insanları temiz enerji kullanımına yönelmiştir. Dean Kamen tarafından ilk olarak literatüre 2001 yılında literatüre giren iki tekerlekli denge robotu (İTDR), iki teker üzerinde kendi dengesini koruyabilen tek kişilik ulaşım araçları veya mobil robotlar için kullanılan genel bir tanımlamadır [1]. Kullanımının basit olması, boyutlarının

küçük olması, dar yerlerde manevra kabiliyetinin yüksek olması nedeni ile birçok uygulamada tercih edilmektedir. İTDR'nin çalışma mantığı genel olarak iki gruba ayrılmıştır. Bunlardan birincisi bir kullanıcı tarafından kontrol edilen ve ulaşım aracı olarak kullanılan türdür [5],[6],[8]-[12],[14],[15]. İkincisi ise otonom hareket edebilen ve verilen görevleri yerine getiren mobil robot türüdür [2]-[4],[7],[13]. Bu araçların havaalanlarında, golf sahalarında, gezi turlarında, güvenlik hizmetlerinde, hastanelerde ve büyük fabrika gibi birçok yerde ulaşım aracı olarak kullanımı mevcuttur [17]. Mobil robot olarak kullanılan platformlarda ise İTDR'ye çeşitli görevler verilmektedir. Bu görevleri otonom olarak yerine getirmesi istenilmektedir. Bunlara örnek olarak; üzerindeki kamera modülü ile çevresinin haritalandırmasını yapan robotlar, uzaktan kumanda edilerek verilen görevleri yerine getirebilen robotlar ve çeşitli yükleri taşımak için tasarlanmış olan mobil robotlar örnek olarak verilebilir.

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Literatürde İTDR'nin kontrolünde çeşitli sensör ve algoritmalar kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur. Çalışmalarda genellikle jiroskop ve ivmeölçer sensörlerden gelen veriler ile sistemin kontrolü sağlanmaktadır [2],[4],[6],[11]. Sistemlerin kontrolünde Doğrusal Karesel Regülatör (LQR), Oransal, İntegral ve Türevsel (PID), Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağı tabanlı kontrol yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar mevcuttur [2]-[7],[9]-[15],[24],[26]. Yapılan sistemlerin bazıları simülasyon üzerinde [7],[11],[26] olmakla beraber gerçek zamanlı yapılan uygulamalar da bulunmaktadır [2]-[6],[8],[9],[12]. Kullanılan sensörlerden gelen verilerde oluşan gürültüleri en aza indirmek için çalışmalar yapılmıştır. Bunun için çeşitli filtreleme yöntemleri kullanılmakla beraber genellikle Kalman filtresi kullanılmıştır [8],[14],[15]. Otonom olarak hareket eden mobil robot türlerinde sistemde çeşitli lazer sensörler kullanılarak robotun engelden kaçması üzerine çalışmalar mevcuttur [3]. Sensör veri füzyonu, gürültü filtreleme, veri birikimi ve aktarımında gecikmelerin giderilmesi amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir [8]. Tasarlanan robotun uzaktan kumanda ile kontrol edilmesi üzerine yapılan çalışmalar da bulunmaktadır [2],[13]. İki tekerlekli araçlarda bataryanın önemi ve mevcut batarya ile daha uzun menziller gidebilmek için optimizasyon çalışması yapılarak bataryanın ömrünü uzatma üzerine çalışma yapılmıştır [21],[22]. Pranav ve arkadaşları iki tekerlekli elektrikli aracın kontrolünde Robust tabanlı yüksek dereceli hareketli kayan kipli kontrol algoritmasını kullanarak daha stabil ve daha güvenli bir sürüş elde etmişlerdir [23].

İki tekerlekli denge robotun LQR ile kontrolünde sistemin daha kararlı çalışması için Genetik Algoritma optimizasyonu ve Bakteri sürü optimizasyonu kullanılmışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda bakteri sürü optimizasyonu tabanlı kontrolün daha iyi çalıştığını simülasyon ortamında göstermişlerdir [24]. Literatürde İTDR'nin daha kararlı çalışması için kullanılan lastik türleri üzerine de çalışmalar bulunmaktadır [25].

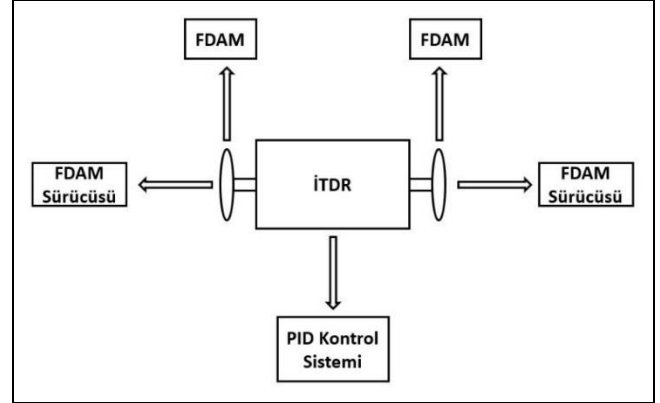
Literatür incelemeleri sonucunda, İTDR'lerin kontrolünün ters sarkaç sistemine göre yapıldığı görülmektedir. Sistemin eğimini kontrol edebilmek için genellikle jiroskop sensör ve ivme sensörü kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu sensörlerden gelen verilerde oluşabilen gürültü vb. durumlar için filtrelemeler yapılmaktadır. Çalışmalarda sistemin dinamik modeli çıkartılmıştır ancak kullanıcıya bağlı olarak dinamik modelin çıkarımının, eş zamanlı olarak güncellenmesi, kullanılan sensörlerden dolayı yapılamamıştır. Bu çalışmada, İTDR'nin kontrolü için literatürde kullanılan sensörlerden farklı olarak yük hücreleri kullanılmıştır. Yük hücreleri sayesinde İTDR'yi kullanacak olan kişinin ağırlık merkezindeki savrulma bilgilerine ulaşılmıştır. Bu çalışmada ağırlık ve ağırlık merkezi bilgileri ile kullanıcının İTDR'yi daha verimli, daha yüksek güçlü ve daha uzun batarya ömrü ile kullanabilmesi amaçlanmıştır.

2 İTDR sisteminin genel görünümü

2.1 Sistemde kullanılan donanımların özellikleri

Kontrolü gerçekleştirilen sistem 350 W, 400 dev/dk. hıza sahip iki adet Fırçasız Doğru Akım Motorundan (FDAM) oluşmaktadır. FDAM'ların sürülmesi için 48 V ile 84 V çalışma gerilimi aralığına sahip olan iki adet motor sürücüsü kullanılmıştır. Sürücüler 1200 W güce ve maksimum 40 A akım kapasitesine sahiptir. FDAM ve FDAM sürücülerinden oluşturulan sistem, yük hücresi tabanlı kontrol yöntemi

kullanılarak İTDR'nin kontrolü sağlanmıştır. Şekil 1'de İTDR sisteminin genel blok görünümü verilmiştir.



Şekil 1. İki tekerlekli denge robotu sisteminin blok şeması.

Figure 1. Block diagram of the two-wheel balancing robot system.

İTDR'de kullanılan FDAM'lar, dıştan rotorlu, 30 kutup ve 27 endüvi oluşuna sahiptir [27]. Motorların sırasıyla doğru fazda tetiklenebilmeleri için Alan Etkisi (hall effect) sensöründen motorun konumu ve hangi fazın tetikleneceği hakkında veriler alınmaktadır. Şekil 2'de tekerlek içerisine gömülü olan FDAM'ın görüntüsü verilmiştir. FDAM'ların enerji ihtiyacı 54.8 V, 4300 mAh ve 236 Wh güce sahip batarya bloğu üzerinden sağlanmaktadır.

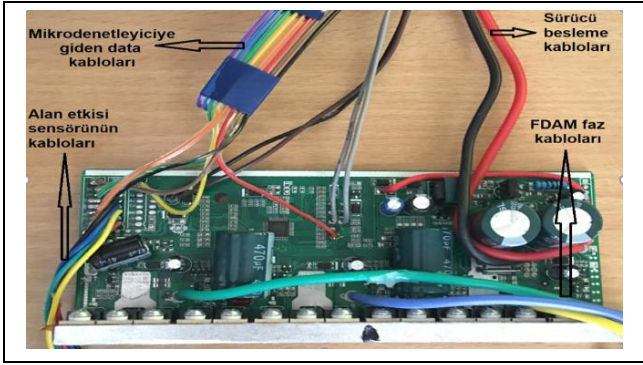


Şekil 2. Tekerlek içerisine gömülü FDAM.

Figure 2. BLDC Motor which is embedded in the wheel.

FDAM yüksek verimli olması, yüksek tork sağlayabilmesi, sessiz çalışabilmeleri ve sağlam yapılı olmalarından dolayı endüstride çok tercih edilmektedir. Özellikle havacılık, tıp, bilgisayar teknolojileri, endüstriyel otomasyon, askeri uygulamalar, parlama riski olan ortamlarda ve robotik alanlarında kullanılmaktadır [16].

FDAM'ları sürmek için K-D 1.5 kart numaralı WİWİ marka 48 V ile 84 V çalışma gerilimi aralığına sahip olan 2 adet motor sürücüsü kullanılmıştır. Sürücüler 1200 W güce ve 40 A akım kapasitesine sahiptir. Şekil 3'te motor sürücüsü ve bu sürücü üzerindeki kabloların bilgileri verilmiştir.

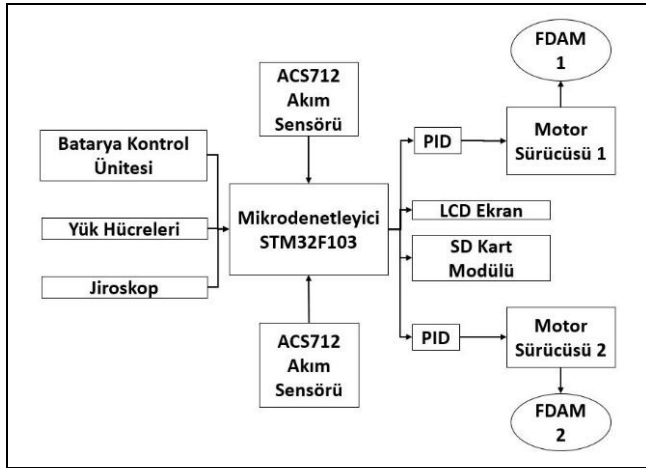


Şekil 3. WİWİ K-D 1.5 kart numaralı FDAM sürücüsü.

Figure 3. WİWİ K-D 1.5 coded BLDC driver.

2.2 Yük hücresi temelli İTDR kontrol sistemi

İTDR kontrol sistemi ARM mimariye sahip STM32F103C8T6 tip mikroişlemci ile tasarımı oluşturulmuştur. Şekil 4'te tasarımı gerçekleştirilen İTDR kontrol sisteminin blok diyagramı görülmektedir. Sistem tasarımında yük hücreleri, batarya kontrol ünitesi, jiroskop ve akım sensörleri giriş birimleri olarak belirlenmiştir. Sistemin çıkış birimleri ise LCD izleme paneli, SD kart modülü, iki adet FDAM sürücüsü ve bu sürücülere bağlı FDAM'lardır.



Şekil 4. İki tekerlekli denge robotu kontrol sisteminin blok diyagramı.

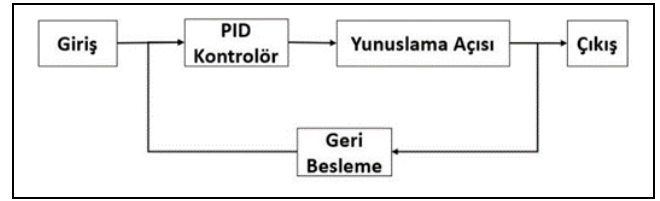
Figure 4. Block diagram of the two-wheel balancing robot control system.

Sistemin çalışma mantığına bakıldığında, PID kontrolör ile sistemin dengesi kontrol edilmektedir. Bu kontrol sayesinde İTDR'nin dengede durabilmesine ve yük hücrelerine yapılan baskıya göre sistemin sürüş kontrolü PID ile sağlanarak yunuslama açısının kontrolüne yönelik sinyaller gönderilmektedir. PID kontrolörün kazanç katsayıları gerçek zamanlı uygulamada sistemin cevap eğrisine bakılarak deneme yanılma yoluyla belirlenmiştir. Şekil 5'te PID kontrol algoritmasının blok diyagramı verilmiştir.

Şekil 6'da verilen sistemin akış diyagramına göre öncelikle İTDR'nin denge durumuna bakılmaktadır. İTDR eğer dengede ise İTDR üzerindeki yük hücrelerine baskı olup olmadığı kontrol edilmektedir.

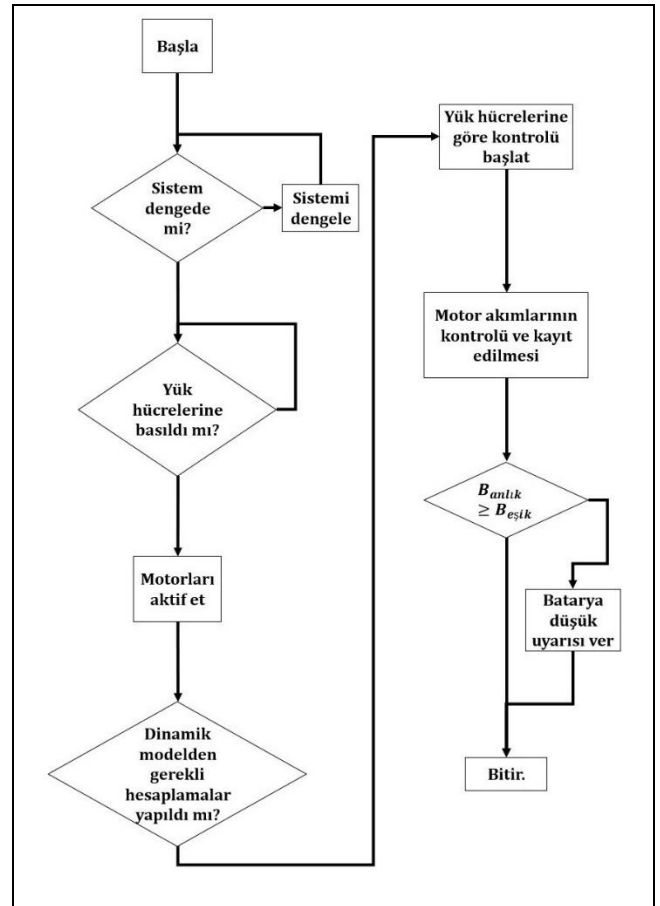
Tasarlanan algoritmada 4 adet yük hücresine de baskı yapılması gerektiği aksi takdirde motor sürücüsünün motoru tetiklemesi engellenmiştir. Böylelikle herhangi bir kullanıcının

İTDR'nin üzerine bineceği esnada tek ayağını atıp diğer ayağını atacak olan süre içerisinde İTDR'nin hareket etmesi engellenmektedir. Aksi takdirde kullanıcıların İTDR'ye binme esnasında düşmeye bağlı yaralanmalar olabilmektedir. Yük hücrelerinin hepsine baskı yapıldığında motor sürücülerini motorları tetikleyebilecek konuma gelmektedir. Motorların aktif edilmesinden sonra sistemin dinamik modelinden gerekli hesaplamaların yapıp yapılmadığı kontrol edilmektedir. Gerekli hesaplar elde edildikten sonra aktif edilen motorların kontrolü yük hücrelerine göre yapılmaktadır. Motorların çekmiş olduğu akımlar sensörler yardımıyla ölçülmekte ve SD kart modülü sayesinde SD karta yazdırılmaktadır. Batarya kontrol ünitesi, sistemin bataryasını kontrol etmekte ve sistemin çalışmaya devam edip etmeyeceğine karar vermektedir.



Şekil 5. İki tekerlekli denge robotu PID kontrolörün blok diyagramı.

Figure 5. Block diagram of the two-wheel balancing robot PID controller.



Şekil 6. İki tekerlekli denge robotu kontrol sisteminin akış diyagramı.

Figure 6. Flow diagram of the two-wheel balancing robot control system.

3 Gerçekleştirilen İTDR kontrol sistemi

Bu çalışmada, MikroC program ara yüzünde ARM mimarisine sahip olan STM32F103C8T6 model bir mikrodenetleyici kullanılarak İTDR'nin yazılımı gerçekleştirilmiştir. Sistemin blok diyagramındaki donanımların akış diyagramına uygun olarak çalışması amaçlanmış olup gerekli donanımlar birleştirilerek kontrol kartı oluşturulmuştur. Kontrol kartı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Tasarlanan iki tekerlekli denge robotu sisteminin kontrol kartı.

Figure 7. Control card of the designed two-wheel balancing robot system.

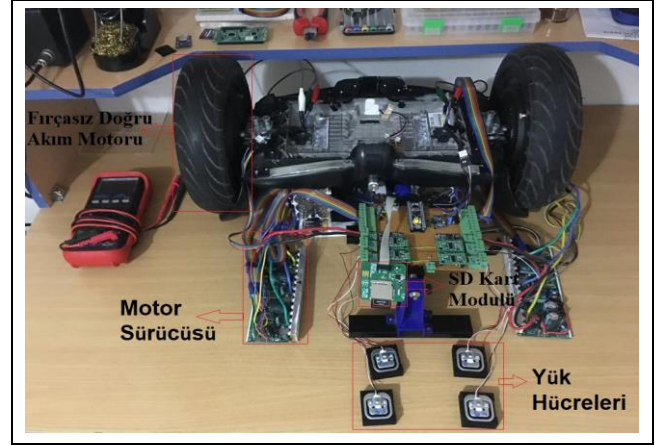
Kullanılan modüllerin tanıtımı Tablo 1'de yapılmıştır. Sisteme enerji verildiğinde İTDR öncelikle çoklu sensör kartı (IMU) üzerinden verileri alarak dik konumda olacak şekilde kendisini dengelemektedir. Herhangi bir kullanıcı tarafından yük hücrelerine baskı yapıldığında tasarlanmış olan algoritmaya göre motor sürücülerini tetiklenmekte ve motorların sürülme işlemi gerçekleşmektedir. Ancak olası hataları engellemek için kullanıcı İTDR üzerine bineceği esnada kullanıcının dört yük hücresine de baskı yapması gerekmektedir.

Tablo 1. Kontrol kartı üzerindeki modüllerin/soketlerin tanıtımı.

Table 1. Introduction of modules/sockets on the control card.

Numara	Açıklama
1	STM32F103C8T6 Mikrodenetleyici
2	2x16 LCD ekran
3	SD kart okuyucu modülü
4	ACS712-30 A akım modülü
5	HX711 Modülü
6	MPU5060 IMU
7	PWM'ler için doğrultucu LC devresi
8	5V Voltaj regülatörü
9	Batarya seviye kontrol ünitesi
10	Ana enerji girişi
11	Sol motor sürücü besleme soketi
12	Sağ motor sürücü besleme soketi
13	Motor sürücülere giden soketler
14	Yük hücresi soketleri

Kullanılan mikroişlemcinin ADC çözünürlüğü 12 bittir. İTDR'nin kullanım hassasiyeti, hayati bir öneme sahip olduğu için 24 bitlik bir ADC çözünürlüğe sahip HX711 modülü kullanılmıştır. Böylelikle sistemin daha hassas kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Yük hücresi temelli İTDR sisteminin görüntüsü Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Gerçekleştirilen iki tekerlekli kontrol sistemi.

Figure 8. Implemented two-wheel balancing robot system.

Gerçekleştirilen İTDR sistemi verilerinin anlık olarak takip edilmesi için kontrol kartı üzerinde bulunan LCD ekrana istenilen bilgiler yazdırılmaktadır. Aynı şekilde İTDR kullanımı sonrasında istenilen verilerde inceleme yapılabilmesi için, SD kart modülü yardımıyla 12 farklı veri kayıt altına alınmaktadır. SD kartla kayıt altına alınan veriler, ilk veriden son veriye doğru aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- ✓ Yük hücre 1-2-3-4'ten gelen veriler,
- ✓ Sol ve sağ motorların anlık hızı,
- ✓ Sol ve sağ motorların çektiği anlık akımlar,
- ✓ Jiroskop x-y-z ekseninden gelen veriler,
- ✓ Bataryadan gelen voltaj gerilimi olmak üzere 12 farklı veri kaydı yapılmaktadır.

4 Deneysel sonuçlar ve tartışma

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda alınan verilerin doğruluğu kontrol edilmiştir. Yük hücrelerinin üzerine uygulanan ağırlığın doğru bir şekilde ölçülüp ölçülmediği Shimpo marka FGJN-50 model kuvvetölçer cihazı ile test edilmiştir. 8.30 kg kütledeki sabit yük kullanılarak her bir yük hücresi için 10 sn. aralıklarla 10 adet ölçüm alınmış ve bu ölçüm sonuçları Tablo 2'de verilmiştir

Tablo 2. 10 sn. aralıklarla ölçülen yük hücresi ölçüm değerleri.

Table 2. Measured load cell values with 10 second intervals.

Referans kg	Yük Hücresi	Yük Hücresi	Yük Hücresi	Yük Hücresi
	1 (kg)	2 (kg)	3 (kg)	4 (kg)
8.30	8.20	8.40	8.50	8.20
8.30	8.20	8.40	8.50	8.30
8.30	8.50	8.30	8.40	8.10
8.30	8.60	8.30	8.40	8.10
8.30	8.20	8.30	8.40	8.10
8.30	8.10	8.30	8.40	8.40
8.30	8.30	8.40	8.40	8.40
8.30	8.10	8.30	8.40	8.40
8.30	8.30	8.40	8.40	8.10
8.30	8.30	8.20	8.30	8.30

Tablo 3'te verildiği gibi her bir yük hücreğine sırasıyla 5 kg'dan 25 kg'a kadar 5 kg artışlarla yük uygulanmıştır.

Tablo 3. Farklı kütlelerin referans alınarak ölçülen yük hücreсі ölçüm değerleri.

Table 3. Measured load cell values with reference to different weights.

Referans kg	Yük Hücreсі 1 (kg)	Yük Hücreсі 2 (kg)	Yük Hücreсі 3 (kg)	Yük Hücreсі 4 (kg)
5.00	5.10	4.90	4.90	5.00
10.00	10.11	10.18	10.15	10.03
15.00	15.29	15.33	14.98	15.30
20.00	20.40	20.12	20.05	19.96
25.00	25.43	25.26	25.02	25.07

Farklı kütlelerde yapılan ölçüm sonuçları incelendiğinde yük hücrelerinde oluşan hata miktarları ve hesaplanan korelasyon değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Elde edilen ölçümler gerçekleştirilen İTDR sisteminin yük hücrelerinden gelen verileri doğru bir şekilde ölçerek sisteme aktarabildiğini göstermektedir.

Tablo 4. Yük hücrelerinin hata ve korelasyon değerleri.

Table 4. Error and correlation values of load cells.

	Yük Hücreсі 1	Yük Hücreсі 2	Yük Hücreсі 3	Yük Hücreсі 4
Sapma	±430 g	±330 g	±150 g	±300 g
Korelasyon	0.99	0.99	0.99	0.99

Gerçekleştirilen sistemde 100 kg kütleli bir kullanıcı tarafından çeşitli yüzdelerde kütlelerini ön tarafa verdiğiğinde FDAM'ların hızlarındaki değişimler TT T-ECHNI-C marka DT6236B model dijital takometre ile ölçülmüştür. Elde edilen ölçümler Tablo 5'te verilmiştir. FDAM'ın başlangıç devri 115 dev/dk. olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular incelendiğinde ön-arka yük dağılımı eşit olduğunda motorlar durmaktadır. Ön yük hücrelerdeki kütlelerin arka yük hücrelerdeki kütlere oranına göre motor dönüş hızları da değişmektedir. Her bir %1'lik yük farkı için motorlarda ortalama 7.5 dev/dk.'lık dönüş hızı sağlanmaktadır.

Tablo 5. Ön yük hücrelerine farklı ağırlıkların uygulanması sonucunda FDAM'ın hızındaki değişimler.

Table 5. The speed change of BLDC as a result of applying different weights to the front load cells.

Kişi Kütleсі	Ön Yük Hücreleri Yüzdesi	Arka Yük Hücreleri Yüzdesi	Sağ Motor Hızı (dev/dk.)	Sol Motor Hızı (dev/dk.)
100 kg	50	50	0	0
100 kg	55	45	149.5	149.8
100 kg	58	42	194.9	195.8
100 kg	63	37	274.9	275.1
100 kg	67	33	346.7	347.0
100 kg	70	30	408.1	409.0

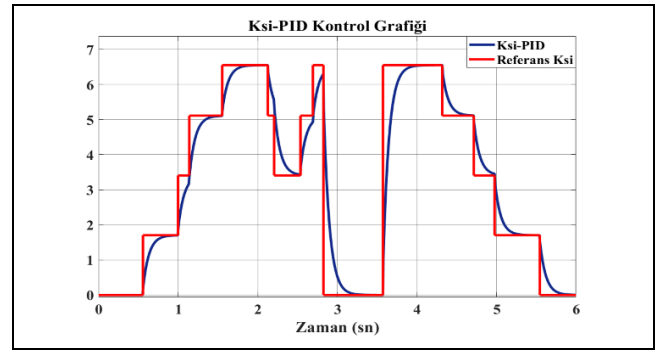
Kütlesinin yüzde altmışını öne veren bir kullanıcının sağ ve sol taraftaki yük hücrelerine uyguladığı baskıya göre sağ ve sol motorların dönüş hızları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Kütlesinin %60'ını ön tarafa uyguladığında yük hücrelerindeki baskıya göre motorların dönüş hızları.

Table 6. The rotation speed of the motors according to the pressure in the load cells when 60% of its weight is applied to the front.

Kişi Kütleсі	Ön Yük Hücreleri Yüzdesi	Sağ Yük Hücreleri Yüzdesi	Sol Yük Hücreleri Yüzdesi	Sağ Motor Hızı (dev/dk.)	Sol Motor Hızı (dev/dk.)
100 kg	60	50	50	219.5	219.7
100 kg	60	52	48	219.5	221.2
100 kg	60	55	45	219.5	225.0
100 kg	60	57	43	219.5	228.6
100 kg	60	60	40	219.5	231.2
100 kg	60	65	35	219.5	240.0

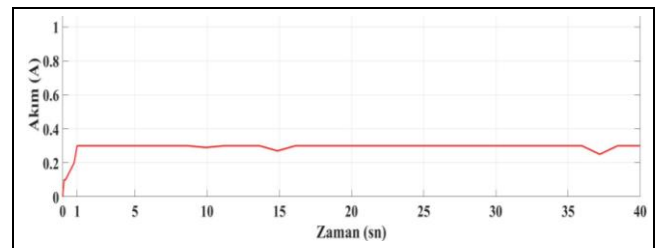
Yunuslama açısı (Ksi)'nin kontrolünde PID tip kontrolör kullanılmıştır. Yunuslama açısına PID kontrolörün uygulanması sonucunda elde edilen cevap eğrisi Şekil 9'da verilmiştir. Kullanılan kontrol yöntemi uzun zamandır bilinen yöntemlerden biridir. İki temel durumdan kaynaklı olarak bu kontrol yöntemi seçilmiştir. Birincisi PID kontrolörün birçok kontrolör tipinin temelini oluşturması ve kontrol edilecek sisteme düşük maliyetle kolay uygulanabilmesidir. İkincisi karmaşık bir yapısının olmamasına karşın mevcut kontrol yönteminin kullanılarak sistem çıkışında başarılı sonuçlar elde edilmesidir. Bu özelliklerinden kaynaklı olarak PID ve ters sarkaç kontrol yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 9. Sistemdeki yunuslama açısının PID kontrolör ile kontrolü.

Figure 9. Control of pitch angle in the system with PID controller.

İTDR'nin yüksüz çalıştırılması durumunda FDAM çekmiş oldukları akım değerleri SD modülü yardımıyla alınmış olup Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Gerçekleştirilen iki tekerlekli denge robotu sisteminin yüksüz çalışmada FDAM'ın çekmiş olduğu akım (A) değerleri.

Figure 10. Current (A) values drawn by BLDC in the no-load operation of the two-wheel balancing robot system.

Yapılan bu çalışma için literatür incelemesi yapıldığında genellikle sistemlerin simülasyonu üzerine odaklandığı görülmektedir. Sistemin kontrolünde çoğunlukla jiroskop ve ivmeölçer sensör kullanılmaktadır [4],[5],[7],[14],[18]-[20]. Bu çalışmada ise literatürdeki çalışmalarda kullanılan sensörden farklı olarak yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücreleri ile yapılan kontrol sayesinde sistemin dinamik modelinin çıkışı anlık olarak güncellenebilmektedir. Dinamik modelin anlık olarak güncellenmesi kullanıcıya göre maksimum yunuslama açısının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. İTDR sisteminin kontrolündeki bu önemli rol, sistemin maksimum yunuslama açısını aşmasını engelleyerek güvenli bir sürüş sağlamaktadır. Yük hücrelerine yapılan baskı farklarına göre direksiyon açısı belirlenmekte olup herhangi bir donanıma ihtiyaç bulunmamaktadır. Yük hücrelerinin farklı kütlelerdeki ölçümlerinde her bir yük hücresinde 0.99 korelasyon bulunmuştur. Yani ölçümlerden oluşan hata oranı %1 olarak gözlemlenmiştir.

5 Sonuçlar

Önerilen çalışmanın sonucunda yük hücresi temelli iki tekerlekli denge robotu (İTDR)'nin gerçek zamanlı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Kullanıcının kütle bilgisine göre İTDR'yi kullanacak olan kişiye özgü yunuslama açısı belirlenerek bu açı değerine göre sistemin kontrolü sağlanmaktadır. Kullanıcının maksimum yunuslama açısını geçmeyecek şekilde motorların kontrolü sağlanmaktadır. Bu sayede kullanıcının araçtan düşme riski azaltılmıştır. İTDR motorların tetiklenmesi için tasarlanan algoritmaya göre dört yük hücresine de baskı uygulanması gerekmektedir. Yük hücrelerine uygulanacak baskının kontrolü sayesinde kullanıcıların İTDR'ye binme esnasında oluşabilecek kazalar minimize edilmiştir. Direksiyon açısı yük hücrelerine oluşturulan baskı ile belirlenmekte olup direksiyon açısını kontrol edebilmek için ek bir donanıma ihtiyaç duyulmamaktadır. Yük hücrelerinin ağırlık ölçümleri 24 bitlik ADC (Analog Digital Converter) kullanarak daha hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

6 Conclusions

As a result of the proposed study, the real-time application of the load cell-based two-wheel balancing robot (TWBR) has been realized. According to the user's weight information, the pitching angle that is specific to the person who will use the TWBR is determined and the system is controlled according to this angle value. The motors are controlled in a way that does not exceed the user's maximum pitching angle. Thus, the risk of the user falling from the vehicle is reduced. According to the designed algorithm, pressure must be applied to all four load cells to trigger TWBR motors. In this way, the accidents that may occur while the users get on the İTDR are minimized. The steering angle is determined by the created pressure on the load cells, and no additional equipment is required to control the steering angle. The weight measurements of the load cells are performed more precisely by using a 24-bit ADC (Analog Digital Converter).

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Muhammed Mustafa KELEK, fikrin gerçekleştirilmesinde, tasarımın/uygulamanın yapılması ve literatür taraması başlıklarında; Yüksel OĞUZ, elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde ve yazım denetimi başlıklarında, Uğur FİDAN, kullanılan malzemelerin temin edilmesi ve tasarımın/uygulamanın yapılması başlıklarında;

Tolga ÖZER, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

- [1] Kamen DL, Ambrogi RR, Duggan RJ, Field JD, Heinzmann RK, Amesbury B, Langenfeld CC. "U.S. Patent No: 6,302,230". US. Patent and Trademark Office, Washington, DC, 2001.
- [2] Chiu CH, Peng YF. "Design and implement of the self-dynamic controller for two-wheel transporter". *2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vancouver, BC, Canada, 16-21 July 2006.
- [3] Charles E, Forrest Jr. A Neural Network Control System for the Segway Robotic Mobility Platform. PhD Thesis, North Carolina State University, Raleigh, USA, 2006.
- [4] Jeong S, Takahashi T. "Wheeled inverted pendulum type assistant robot: Inverted mobile, standing and sitting motions". *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego CA, USA, 29 October-2 November 2007.
- [5] Butler LJ, Bright G. "Feedback control of a self-balancing materials handling robot". *10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Hanoi, Vietnam, 17-20 December 2008.
- [6] Grepl R. "Balancing wheeled robot: Effective modelling sensory processing and simplified control". *Engineering Mechanics*, 16(2), 141-154, 2009.
- [7] Küçük D. Design of Two Wheeled Twin Rotored Hybrid Robotic Platform. MSc Thesis, Atılım University, İstanbul, Turkey, 2010.
- [8] Pinto LJ, Kim DH, Lee JY, Han CS. "Development of a Segway robot for an intelligent transport system". *In 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, Fukuoka, Japan, 16-18 December 2012.
- [9] Draz MU, Ali MS, Majeed M, Ejaz U, Izhar U. "Segway electric vehicle". *2012 International Conference of Robotics and Artificial Intelligence*, Rawalpindi, Pakistan, 22-23 October 2012.
- [10] Han M, Kim K, Lee J. "Implementation of unicycle segway using unscented Kalman filter in LQR control". *In 2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Jeju, Korea, 30 October-2 November 2013.
- [11] Umay Y. İki Tekerlekli Kendini Dengeleyen Mobil Bir Aracın Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye, 2018.
- [12] Pham DB, Kim H, Kim J, Lee S G. "Balancing and transferring control of a ball segway using a double-loop approach [applications of control]". *IEEE Control Systems Magazine*, 38(2), 15-37, 2018.
- [13] Steiner M. ROS Navigation Stack On A Loomo Segway Robot. BSc Thesis, Vienna University, Munich, Vienna, 2018.
- [14] Çelik Y. Nesne Takibi Yapan Denge Robot Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye, 2018.

- [15] Morantes J, Espitia D, Morales O, Jiménez R, Aviles O. "Control system for a segway". *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(18), 13-767, 2018.
- [16] Yedamale P. "Brushless DC (BLDC) motor Fundamentals". *Microchip Technology Inc*, 20(1), 3-15, 2003.
- [17] Get Your Guide Web Interface. "Segway Tour Organizations". <https://www.getyourguide.com.tr/s/?q=Segway&customerSearch=1&p=1>, (18.08.2020).
- [18] Önkol M. İki Tekerlekli Hareketli Platform Üzerindeki Bir Robot Kolun Modellenmesi ve Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2018.
- [19] Polat B. Denge Robotu Tasarımı ve Modellenmesi/Balancing Robot Design and Modeling. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye, 2018.
- [20] Sasaki M, Yanagihara N, Matsumoto O, Komoriya K. "Steering control of the personal riding-type wheeled mobile platform (PMP)". *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, AB, Canada, 2-6 August 2005.
- [21] Reckemmer SK, Zang X, Zhang W, Sawodny O. "Lifetime optimized charging strategy of Li-ion cells based on daily driving cycle of electric two-wheelers". *Applied Energy*, 251(1), 1-13, 2019.
- [22] Prabhakar G, Selvaperumal S, Pugazhenti P N, Umamaheswari K, Elamurugan P. "Online optimization based model predictive control on two wheel Segway system". *Materials Today: Proceedings*, 33(7), 3846-3853, 2020.
- [23] Sevekari P, Tamhane B, Kurode S. "Robust control for stable and safe performance of a two wheeled human transporter". *IFAC-PapersOnLine*, 53(1), 616-621, 2020.
- [24] Mohammed IK, Abdulla AI. "Balancing a segway robot using LQR controller based on genetic and bacteria foraging optimization algorithms". *Telkomnika*, 18(5), 2642-2653, 2020.
- [25] Yun H, Zhang H, Lee J. "stability improvement of segway based on tire model using the SEA". *Robotica*, 1, 1-13, 2020.
- [26] Ahmed AA, Saleh Alshandoli AF. "On replacing a PID controller with neural network controller for segway". *2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Istanbul, Turkey, 25-27 September 2020
- [27] Kelek MM, Çelik İ, Fidan U, Oğuz Y. "The Simulation of mathematical model of outer rotor BLDC motor". *4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences*, Samsun, Turkey, 22-24 November 2019.