

KENDİ KENDİNE PİVOT EDEBİLEN KÜBİK BİR MODÜLÜN (MODUCUBE) TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

Halil İbrahim DOKUYUCU^{1, a)} ve Nurhan GÜRSEL ÖZMEN^{2, b)}

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 61080, TRABZON

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü 61080, TRABZON

^{a)}halilibrahimdokuyucu@ktu.edu.tr, ^{b)}gnurhan@ktu.edu.tr

Son yıllarda afet yönetimi yöntemleri önemli ölçüde gelişerek, araştırmacıları konfigürasyon değiştirebilen modüler robotlar tasarlamaya ve üretmeye teşvik etmektedir. Bu süreç minyatür ve esnek yeni mekatronik cihazların geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. Bu çalışma, farklı amaçlar için kullanılabilir, kendi kendine pivot hareketi yapabilen kübik bir modülün (Moducube) mekanik tasarımını ve geliştirilmesini içermektedir. Modüller, konfigürasyon değiştirebilen modüler robotik sistemlerin yapı taşı olarak kullanılabilir veya tekil olarak görevlendirilebilecek kübik otonom mekatronik cihazlar olarak tasarlanmıştır. Modülün pivot hareketi ve yönlendirilmesi için bir açık çevrim kontrolcü kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler ile tasarım doğrulanmış ve ulaşılan başarılı sonuçlar literatürle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Önerilen yöntemin, etkili bölge içinde ortalama %82 başarı oranına ulaşabildiği gösterilmiştir. Yerleştirme işlemi ortalama 67 saniye sürmüştür. Deneyler, 50 deneme üzerinden yapılmış ve elde edilen doğrusal ve açısal sapmalar kaydedilmiştir. Ortalama doğrusal ve açısal sapmalar sırasıyla 16.4 [mm] ve 4.97[°] şeklindedir.

Anahtar Kelimeler: Konfigürasyon değiştirebilen modüler robotlar (KDMR), pivot hareketi, çoklu robot sistemleri, volan

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SELF-PIVOTING CUBIC MODULE (MODUCUBE)

ABSTRACT

Disaster management methods have emerged significantly in past decades, which motivates researchers to design and produce self-reconfigurable modular robots. This process paving the way for smaller and flexible electronic devices. This study proposes a mechanical design and implementation of a self-pivoting cubic module (Moducube) that can be used for different purposes. The modules were designed as cubic autonomous mechatronic devices that can be used as a building block of a self-reconfigurable modular robotic system or utilized individually. An open loop controller is used for the pivoting motion and steering of the module. The design is verified through real time experiments and the successful results are presented. The proposed method has performed an average success rate of 82% within the effective region. The average positioning took 67 seconds. Experiments were executed over 50 trials, and the resulting linear and angular deviations were recorded. The average linear and angular deviations were 16.4 mm and 4.97°, respectively.

Keywords: Self-reconfigurable modular robots (SRMR), pivoting motion, multi-robot systems, flywheel

1. GİRİŞ

Minyatür robotlar alanındaki gelişmeler, daha verimli afet yönetimi sistemlerinin geliştirilmesi için yeni bakış açıları ve yenilikçi çözümler sunmaktadır. Afet alanları genellikle

bina enkazları ve yapı kalıntıları içerdiğinden, bu durum etkin arama kurtarma operasyonları için özelleşmiş müdahaleyi gerektirmektedir. Özel eğitilmiş profesyoneller, çekiç, matkap ve kırıcı gibi ekipman kullanarak bu görevleri yerine getirmektedir. Enkaz ve yapı kalıntıları

içindeki dar geçitlerin varlığı, minyatür robotik sistemlerin bu alanlarda önemli faydalar sağlama potansiyelini ön plana çıkarmaktadır. Konfigürasyon değiştirebilen modüler robot sistemi, homojen veya heterojen basit modüllerden oluşan bir sistemdir. Tek bir modülün yetenekleri sınırlıdır, ancak birden fazla modülle bir araya getirilen robotlar, çok yönlülük ve sağlamlık sergilerler. Bu tür bir araya getirilen robotlar çeşitli görevlere ve ortamlara uyum sağlayabilirler. Tek bir KDMR platformu, afet alanlarındaki canlıları tespit etme, kapalı alanlara su ve temiz hava sağlama ve yaşam koridorları açma gibi acil ihtiyaçları karşılayabilme potansiyeline sahiptir. Bu tür robotik sistemler ucuz üretilibilmelerinin yanı sıra, basit navigasyon ve kontrol gereksinimleri sayesinde birden fazla kullanıcı tarafından derinlikli bir eğitime gerek duymadan da yönetilebilirler.

Literatürde bir görevin yerine getirilmesi için eş modüllerin birlikte kullanılması kavramını ilk kez, su tanklarını temizlemek için geliştirilen CEBOT tanıtmıştır, [1]. Bu tarihten sonra alanda hızlı bir ilerleme kaydedilmiştir. KDMR sistemlerinin çok yönlülük, güvenilirlik ve düşük maliyet gibi üç ana hedefi bulunmaktadır [2]. Çok yönlülük, farklı alanlarda geniş bir uygulama çeşitliliği sunmaktadır. Güvenilirlik, çok sayıda modülün iletişim ve hesaplama yükü açısından önemlidir. Son yıllarda elektronik ürünlerin ulaşılabilirliği artmış olsa da yüksek sayıda modül için düşük maliyet hedefine ulaşmak önemli bir zorluktur. Alanın doğrulanmış yenilikçi örnekleri arasında PolyBot [3], MTran-III [4], Roombots [5], SMORES [6] ve Catom 3D [7] sayılabilir. Mekanik yapı açısından KDMR'lerin ana kategorileri kafes tipi, zincir tipi, hibrid, kirişli ve serbest yapılarıdır [8]. Özellikle, kafes tipi KDMR'ler için modül sayısını milyon mertebesine çıkarmayı ve modül boyutunu minimize etmeyi amaçlayan "Million Module March" kavramı alanda önemli bir ilgi uyandırmıştır [9]. Bugüne kadar kaydedilen en fazla modül sayısına sahip simülasyonlardan biri, 32 milyon modülden oluşan bir yapı ile gerçekleştirilmiştir [10]. Ancak, hesaplama kapasitesi, yüksek sayıda modüle sahip KDMR'lerin fiziki deney çalışmalarını sınırlamaktadır [11].

Kafes tipi KDMR alanında, hataya dayanımlı uzay uygulamaları [12], eyleyici ve kenetleme mekanizmalarının kontrolü [13] ve momentum transferiyle çalışan sistemler kullanan yüksek torklu eyleyici [14] gibi örnekler bulunmaktadır. KDMR'lerde pivot küp modeli (PKM), kayan küp modeli (KKM), sıkıştırılabilir küp modeli (SKM) ve modül taşıyıcı model (MTM) bulunmaktadır. Bunlar arasında PKM, diğer modellere kıyasla daha tutarlı bir hareket modeli olarak ortaya çıkmıştır [15]. KKM, içbükey dönme hareketi için uygulanamamaktadır [16]. SKM, genellikle hareketin gerçekleştirilmesi için uzun zaman dilimine ihtiyaç duymaktadır [17]. MTM'de ise iki farklı modül kullanılması, kontrol karmaşıklığına yol açmaktadır [18].

Bu çalışmada PKM üzerinden bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Küpün yönlendirme hareketi için bir titreşim motoru ile desteklenen, momentum transferi prensibiyle çalışan bir pivot hareketi eyleyicisi sunulmaktadır. Belirlenmiş bir görev için bir KDMR'nin yapı taşı olan kendi kendine pivot edebilen bir modül geliştirilecektir. Küp şeklindeki modül, bir kenarı etrafında dönerek hareket edecektir. Çalışmanın özgünlüğü, modülün hareket mekanizmasında kendini göstermektedir. Modülün bir kenarı üzerine devrilmesini sağlamak için modül gövdesine yerleştirilen bir BLDC motor tarafından döndürülen volanın ürettiği açısız momentum, titreşim motorları tarafından üretilen yönlendirme kuvveti ile birleşecektir. Pivot hareketi üretilirken, herhangi bir frenleme sistemi kullanılmadığı için 3D M-Blocks robotunun hareketinden [14] farklıdır. Bu yöntemde, tork ve frenleme kontrolü ortadan kalktığı için daha basit bir hareket tipi ile devrilme sağlanmaktadır.

Pivot hareketini ve yönlendirmeyi gerçekleştirmek için basit bir açık çevrim kontrolcü kullanılmıştır. Kontrolcü, tutarlı bir dönme hareketi için test edilmiştir. Sunulan kübik modül, bir modül gövdesi ve bir iç yapıdan oluşmaktadır. Kenetlenme mekanizması, tasarımın sonraki aşamalarında kenarlarda bulunan küresel daimi mıknatıslar tarafından sağlanacaktır. Modül bünyesinde minyatür bir güç kaynağı, sensörler, eyleyiciler ve bir mikroişlemci yer alacaktır.

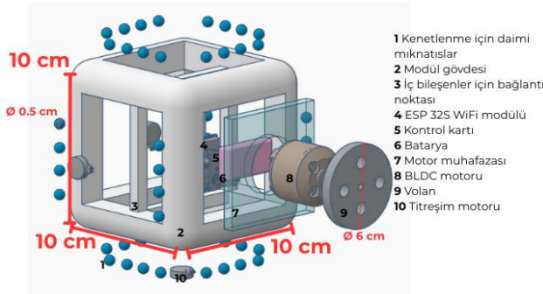
Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de kendi kendine pivot edebilen modülün genel görünümü ve çalışma prensibi dahil olmak üzere tasarım aşamaları sunulmaktadır. Bölüm 3, açık çevrim kontrolcü yaklaşımını açıklamaktadır. Bölüm 4'te deneysel sonuçlar ve tartışmalar sunulmuştur. Son olarak, Bölüm 5'te sonuçlar ve gelecekteki çalışmalar tartışılmaktadır.

2. MODÜLÜN MEKANİK TASARIMI

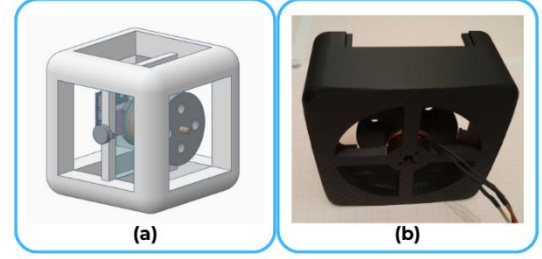
Bu çalışmada üretimi ve montajı kolay, basit bir modül tasarlamak amaçlanmıştır. Tüm eyleyicilerin, sensörlerin, işlem birimlerinin ve bataryanın modülün içine sığması gerekmektedir. Kübik modülün kenar uzunluğu 100 mm ile sınırlandırılmıştır. İhtiyaca göre ileride modülü minyatürleştirmek planlanmaktadır. Eklemeli imalat tekniğinin basitliği ve güvenilirliği göz önünde bulundurularak üretim için 3D baskı teknolojisi kullanılmıştır.

2.1. Mekanik tasarım ve dinamik hareket

Kübik bir modül, modül gövdesi, BLDC motoru, mıknatıslar, ESP 32S WiFi modülü, kontrol kartı, batarya, motor muhafazası, volan ve titreşim motorundan oluşmaktadır. Bu bileşenler Şekil 1'de gösterilmektedir. Eyleyiciler (BLDC motor ve üç titreşim motoru), işlemci (PCB kartı), kablosuz iletişim modülü (ESP 32S), sensörler (IMU) ve kenetlenme elemanları (küresel daimi mıknatıslar) piyasadan temin edilmiştir. Yapısal bileşenler 3D baskı ile imal edilmiştir. Modülün CAD modeli ve 3D baskılı yarım modüle ait görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Önerilen modülün mekanik yapısı



Şekil 2. (a) CAD modeli, (b) Üretilen yarım modül

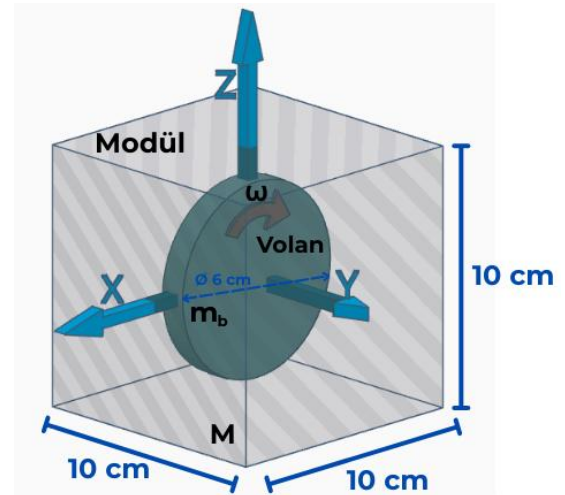
Hareket mekanizması bir BLDC motoru ve üç titreşim motorundan ibarettir. BLDC motor, pivot hareketinin ana kaynağı iken, titreşim motorları dönme eksenini değiştirme ve modülün yönlendirilmesinden sorumludur.

2.2. Elektronik donanım

Ana işlem birimi özel bir PCB kartı olarak geliştirilecektir. Bu kontrol kartı, çalışma gereksinimlerine göre BLDC ve titreşim motorlarını sürecektir. Gömülü ESP32 modülü, modül ile PC arasındaki kablosuz iletişimi sağlayacaktır.

2.3. Dönme hareketinin matematiksel modeli

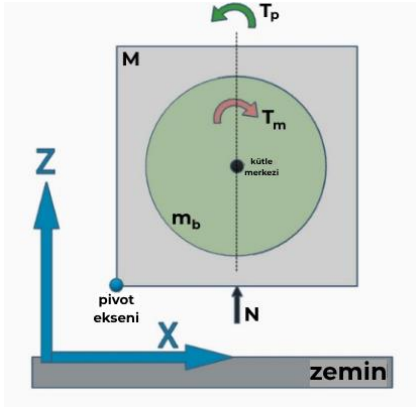
Toplam kütlesi M olan modülün bir kenarı üzerine dönüşü yani pivot hareketi gövdeye bağlı dönen bir volan (m_b) ile sağlanacaktır. (Şekil 3)



Şekil 3. Pivot hareketinin fiziksel modeli

Volan, "Torque Capsules" robotuna [19] benzer bir yaklaşım kullanarak ürettiği açısal momentumu ani ivmelenme sayesinde modül gövdesine aktarır. Pivot hareketinin prensibi açısal momentumun korunmasına dayanmaktadır. Motor sürücüsü, pivot torku

oluşturmak için volanı anlık olarak hızlandırır. Şekil 4'te, genel bir pivot hareketinin serbest cisim diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 4. Pivot hareketi

Şekil 4'te, eyleyici tarafından üretilen tork (T_m) ve modül gövdesine aktarılan tork (T_p) gösterilmektedir. Sistem üzerine uygulanan herhangi bir harici tork bulunmamaktadır. Açısal momentumun korunumu prensibi kullanılarak, pivot hareketinin temeli gösterilmiştir. Eyleyicinin tork değerleri (1) numaralı denklemde gösterilirken, modüle aktarılan tork (3) numaralı denklemde sunulmuştur. Açısal momentumun korunumu prensibi (2) numaralı denklemde gösterilmiştir. Volanın eylemsizlik momenti değeri I sembolü ile gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

$$\vec{T}_m = \frac{d\vec{L}_m}{dt} = I \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = I\dot{\vec{\omega}}_m \quad (1)$$

$$\Delta L = 0 \rightarrow \dot{\vec{L}}_m + \dot{\vec{L}}_{modül} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{T}_p = -I(\dot{\vec{\omega}}_m) \quad (3)$$

Tablo 1. Parametreler

İsim	Sembol	Değer
Kütle (Pivot eden yarım modül)	M	117.7 [g]
Kütle (yönlendirilen yarım modül)	M	97.9 [g]
Kübik modül kenar uzunluğu	d	10 [cm]
BLDC motor açısal hızı	ω_m	6,965 [rpm @ 6.6 V]
Yer çekimi ivmesi	g	9.81 [m/s ²]
Volan eylemsizlik momenti	I	1.755E-3 [kg.m/s ²]
Motorun ürettiği tork	T_m	- [N.m]
Modül gövdesine aktarılan tork	T_p	- [N.m]

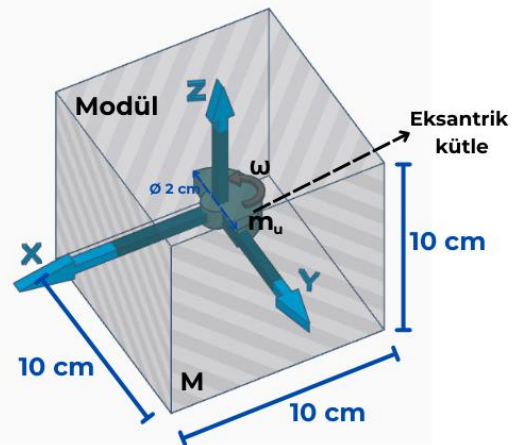
2.4. Yönlendirme prensibi

Momentum prensibiyle çalışan pivot sistemleri yüksek tork üretirken, bu durum sıklıkla modülün hedef yönünden sapmasına neden olmaktadır. Hassas konumlandırma ve karmaşıklığı azaltma, yönlendirme işlevi ile sağlanır. Bu nedenle, bu çalışmada pivot hareketini ve yönlendirme işlevlerini tek bir modülde birleştirmek için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Yönlendirme alt sisteminin iki ana görevi vardır:

- 1) bir pivot hareketinden sonra modülün yönünü ayarlamak,
- 2) Z ekseninde modülü döndürerek tek bir eyleyiciyle hem X hem de Y eksenlerinde pivot hareketi sağlamak.

Yönlendirmeyi sağlamak için titreşim motorları kullanılmaktadır. Şekil 5'te, kütlesi M olan modül gövdesine bağlı dönen eksantrik kütle (m_u) içeren yönlendirme sisteminin fiziksel modeli gösterilmektedir. Açısal hız (ω) sabittir. Şekil 5'te gösterilen fiziksel model, yönlendirme hareketini pivot hareketinden bağımsız bir şekilde genel olarak göstermektedir. Bu eksen takımı ile Şekil 3'teki eksen takımının birbiriyle ilişkisi bulunmamaktadır.

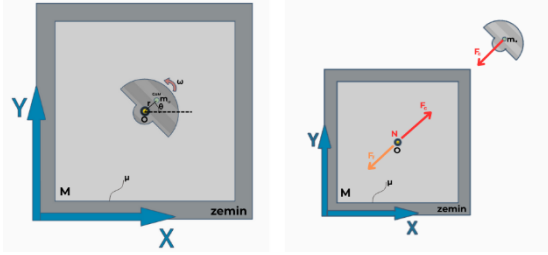
Şekil 6'da, açısal hareketin düzlemsel görünümü (sol) ve ilgili serbest cisim diyagramı (sağ) gösterilmiştir. Şekildeki sarı nokta, sayfa düzleminin dışarı doğru olan normal kuvvet vektörünü göstermektedir.



Şekil 5. Yönlendirme sistemi fiziksel modeli

Yönlendirme sistemine etki eden sürtünme kuvvetini modellerken statik (μ_s) ve dinamik (μ_k) durumları gözetilen Coulomb sürtünme modeli kullanılmıştır. Eksantrik kütle (m_u)

tarafından açısız hızı (ω) bağı olarak üretilen merkezkaç kuvveti (F_c), vektörel bileşenleriyle birlikte (4)-(6) numaralı eşitliklerde gösterilmiştir. Normal kuvvet (N) ile ilişkili olan sürtünme kuvveti (F_f), (7)-(9) numaralı eşitliklerde gösterilmektedir. Merkezkaç kuvveti, sistemin mekanik dengesi için türetilmiştir. Matematiksel model, düzlemsel hareket için titreşim motorları kullanan MechaCell robotu ile benzerdir [20].



Şekil 6. Yönlendirme sistemi XY düzlemi görünümü (sol), ilgili serbest cisim diyagramı (sağ)

$$F_c(\omega) = m_u r \omega^2 \quad (4)$$

$$F_{cx}(\omega) = F_c \cos(\omega t) = m_u r \omega^2 \cos(\omega t) \quad (5)$$

$$F_{cy}(\omega) = F_c \sin(\omega t) = m_u r \omega^2 \sin(\omega t) \quad (6)$$

$$F_f = N \mu_s \quad (\text{statik}) \quad (7)$$

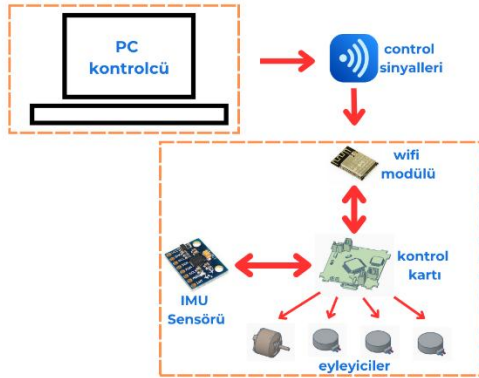
$$F_f = N \mu_k \quad (\text{dinamik}) \quad (8)$$

$$N = Mg \quad (9)$$

Eksantrik kütle titreşim motoru tarafından sürülmektedir. Titreşim motorunun periyodik salınım hareketi yapmasından dolayı hareketin bir bölümünde statik sürtünme kuvveti üstün gelmekte, bir bölümünde ise kinetik sürtünme kuvvetine karşı kayma hareketi gerçekleşmektedir. Böylece modül düzlemsel hareketini gerçekleştirebilmektedir.

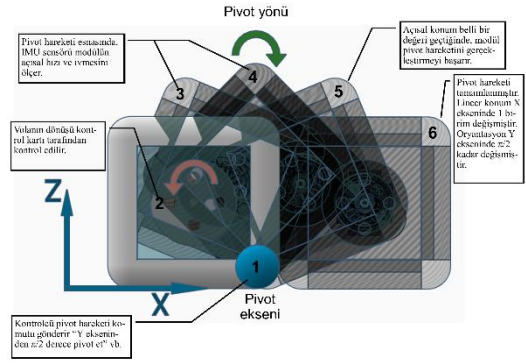
2.5. Deney düzeneği

Tüm deneyler tek bir yarım modül kullanılarak yapılmıştır. Başlangıç ve istenen konum bilgileri açık çevrim kontrolcüye dışarıdan girilmiştir. İleriki çalışmalarda geliştirilecek olan ileri kontrol stratejisi için iletişim şeması



Şekil 7. Moducube ile bilgisayar arasındaki iletişim

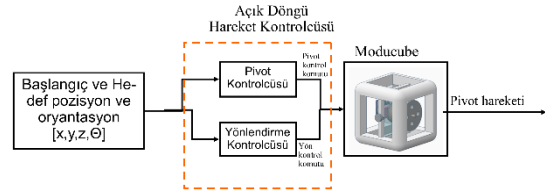
Şekil 7'de gösterilmektedir. Bu senaryoda, modülün konumu ve yönelimi IMU tabanlı bir modül izleme algoritması kullanılarak hesaplanır. Algoritma, her pivot eyleminden önce modülün uzamsal yönelimini belirtir. Pivot yönü bilgisi kullanılarak yeni konum ve yönelim elde edilir. Şekil 8'de bu hareket gösterilmiştir. Şekil 8'de yer alan aşamalar şu şekildedir. 1- Kontrolcü pivot hareketi komutu gönderir "Y ekseninde $\pi/2$ pivot et" vb. 2- Volanın dönüşü kontrolcü tarafından kontrol edilir. 3/4- Pivot hareketi esnasında IMU sensörü modülün açısız hızı ve ivmesini ölçer. 5- Açısız konum belli bir değeri geçtiğinde, modül pivot hareketini gerçekleştirmeyi başarır. 6- Pivot hareketi tamamlanmıştır. Lineer konum X ekseninde 1 birim değişmiştir. Oryantasyon Y ekseninde $\pi/2$ kadar değişmiştir.



Şekil 8. Pivot hareketinin aşamaları

3. TEK BİR MODÜLÜN PİVOT VE YÖNLENDİRME HAREKETİ

Modül, Şekil 9'da gösterilen ve kararlı bir pivot hareketinden sorumlu açık çevrim bir hareket kontrolcüsü ile yönetilmektedir.



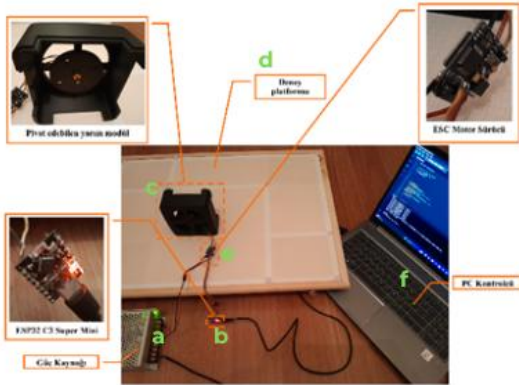
Şekil 9. Açık döngü hareket kontrolcüsü

Şekil 9'da gösterilen hareket kontrolcüsü iki alt kontrolcü içermektedir. İlk alt kontrolcü (Pivot kontrolcüsü), volanı anlık olarak hızlandırarak pivot torkunu kontrol eden bir BLDC motorunun Aç/Kapa kontrolcüsüdür. İkinci alt kontrolcü (yönlendirme kontrolcüsü), hassas bir dönme hareketini sağlayan titreşim

motorunun açılma hızını yöneten bir Aç/Kapa kontrolcüsünden oluşmaktadır. Pivot hareketi kontrolcüsüne gönderilen komut, pivot hareketi için gerekli olan gücün daha önceden ölçülerek kaydedilmesi sonucu elde edilmiştir. Benzer şekilde yönlendirme hareketi kontrolcüsü için gerekli olan komutlar, titreşim motoruna gönderilen PWM sinyallerine modülün gösterdiği tepkiler ölçülerek elde edilmiştir.

4. DENEYLER

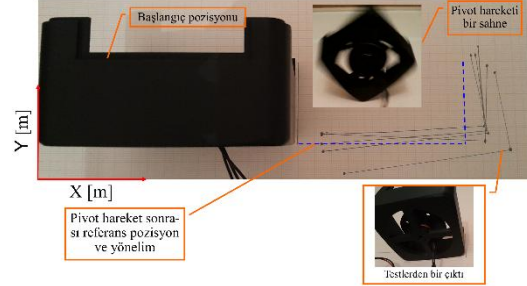
Deney düzeneği, düz bir platform, bir bilgisayar ve Şekil 10'da gösterildiği gibi bir BLDC motor (Torster A2204/14) ve bir volan ile donatılmış tek bir yarım modül den oluşmaktadır. Deneyler iki gruba ayrılmıştır. İlk grupta pivot hareketi test edilmiştir. Modülün konum ve yönelimindeki sapmalar tespit edilmiştir. İkinci grupta ise yönlendirme sistemi test edilmiştir. Titreşim motoru, birinci grubun sapmalarına göre konum ve yönelimi ayarlamaya çalışmaktadır. Bu çalışma öncelikli olarak hareketin gerçekleştirilmesine odaklanmıştır. Bu nedenle, dönme ve yönlendirme sistemleri basit açık döngü kontrolcülerle uygulanmıştır.



Şekil 10. Pivot hareketi deney düzeneği (konum bilgileri milimetrik kâğıt vasıtasıyla kaydedilmiştir), a: Güç kaynağı, b: ESP 32 C Süper Mini, c: Pivot edebilen yarım modül, d: Deney platformu, e: ESC motor sürücü, f: PC kontrolcü

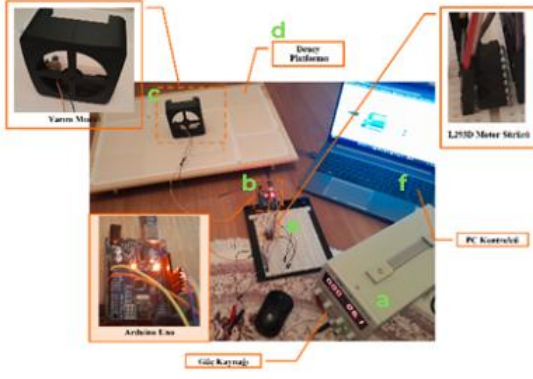
Şekil 11'de, ilk deney grubunun sonuçları seçilen beş test için gösterilmiştir. Pivot mekanizması sırasında hem doğrusal hem de açılma sapmalarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. İlk grup deneyler 50 deneme üzerinden yapılmış ve elde edilen doğrusal ve açılma sapmalar kaydedilmiştir. Ortalama doğrusal ve açılma sapmalar sırasıyla 16.4 [mm] ve 4.97[°] şeklindedir. Pivot mekanizması momentum prensibine dayandığı

için sapmalar olması olağandır. Bu çalışma, bu sapmaları ortadan kaldırmayı ve hareketin genel kararlılığını artırmayı amaçlayan bir yönlendirme sistemi önermektedir. Yönlendirme sisteminin bir diğer amacı, tek bir eyleyici kullanarak iki eksenli pivot hareketi sağlamaktır.

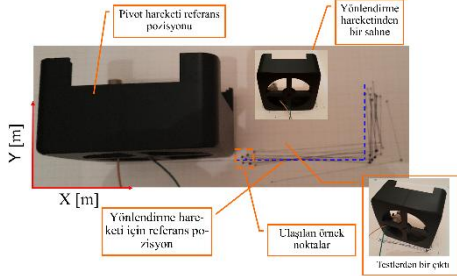


Şekil 11. Pivot hareketi deney sonuçları

Yönlendirme sistemi, modülün bir köşesine yerleştirilmiş bir titreşim motoru (R140 DC motor) içermektedir. Bu motorun açılma hızının ayarlanmasıyla düzlemsel bir hareket elde edilmektedir. Deneylerin ikinci grubunda amaç, pivot hareketi sonrası referans konum ve yönelime ulaşmaktır. Burada, deneylerin ilk grubunun çıktıları girdi olarak kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda, tepeye monte edilmiş bir HD kamera ile tasarlanmış bir kapalı döngü kontrol sistemi uygulanacaktır. Şekil 12, deneylerin ikinci grubu için kurulmuş olan düzeneği göstermektedir. Şekil 13'te ise deneylerin sonuçları verilmiştir. Deneylerin ikinci grubu da yine 50 deneme üzerinden yapılmış ve ortalama doğrusal ve açılma sapmalar sırasıyla 7.49 [mm] ve 3.48 [°] olarak kaydedilmiştir. Deneylerin hata oranları, gelecekteki çalışmalar için umut vericidir. Tablo 2'de, bu deneylerin sonuçları, MechaCell [20] robotunun deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 14'te, pivot hareketi ve yönlendirme eylemi denemeler boyunca birlikte gösterilmektedir.



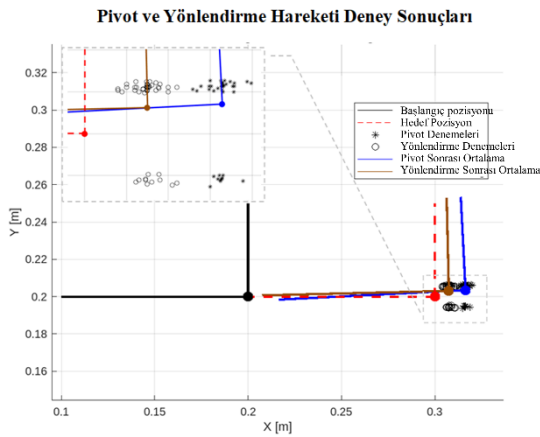
Şekil 12. Deney düzeneği: Yönlendirme hareketi sonuçları deney platformunda yer alan milimetrik kâğıt vasıtasıyla kaydedilmiştir, a: Güç kaynağı, b: Arduino Uno, c: Yarım modül, d: Deney platformu, e: L293D Motor sürücü, f: PC kontrolcü



Şekil 13. Yönlendirme hareketi deney sonuçları

Tablo 2: Performans Karşılaştırması

	Moducube	MechaCell [20]
Lineer sapma [mm]	7.49	4.69
[cm] mertebesi altı	evet	evet



Şekil 14. Deney gruplarının sonuçları

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, konfigürasyon değiştirebilen modüler bir robotik sistemin yapı taşı olarak kendi kendine pivot edebilen bir modülün (Moducube) mekanik tasarımını ve basit hareket kontrolünü sunmaktadır. Tasarım, pivot hareketinden sonra pozisyon ve yönelimi ayarlamak için titreşim motorları kullandığı için hassas bir pivot hareket sistemi önermektedir. Pivot hareketi yapabilen modül prototipi, 3D baskı süreçleri ve piyasadan temin edilen elektronik bileşenlerle oluşturulmuştur. Bunun sonucunda, ortaya çıkan prototip uygun maliyetlidir. Ayrıca, kararlı bir pivot hareketinden sorumlu bir kontrolcünün tasarımı sunulmuştur.

Dönme hareketi ve yönlendirme deneyleri basit düzeneklerle yapılmış ve ilgili çıktılar kaydedilmiştir. Modülün prototipi, kararlı bir pivot hareketini başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir.

Elde edilen sonuçların değerlendirilmesine dayanarak, modülün performans metrikleri hesaplanmıştır. Önerilen modül, hata oranlarına göre umut verici bir performansa sahiptir.

Gelecekteki çalışmalar, modülün daha iyi bir pivot hareketi gerçekleştirebilecek şekilde iyileştirilmesini içermektedir. Bu çalışmanın ana bulguları, tasarım prosedürü için bir rehber görevi görecektir. Modül tasarımı, kenetlenme sistemi de dahil olmak üzere tasarım sürecinin tüm unsurları entegre edilerek tamamlanacaktır. Bir HD kamera ve IMU dahil olmak üzere uygun sensörler entegre edilerek kapalı çevrim kontrol sistemleri uygulanacaktır. Ayrıca, modülün minyatürleştirme çalışmaları da sürdürülecektir. Konfigürasyon değiştirebilen modüler bir robotik sistemde birden fazla Moducube modülünün takım çalışması performansını araştırmak için daha fazla sayıda modül üretmek sonraki çalışmaların odağı olacaktır.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FBA-2025-16374

İlk yazar, TÜBİTAK 2211-A Programı kapsamında kısmen desteklenmiştir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Fukuda, T., Nakagawa, S., Kawauchi, Y., Buss, M. (1989). Structure decision method for self-organising robots based on cell structures – CEBOT, *International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, Scottsdale, AZ, ABD.
- [2] Yim, M., Shen, W.M., Salemi, B., Rus, D., Moll, M., Lipson, H., Klavins, E., Chirikjian, G.S. (2007) Modular self-reconfigurable robot systems [grand challenges of robotics], *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1), 43–52, doi: 10.1109/MRA.2007.339623.
- [3] Yim, M., Duff, D.G., Roufas, K.D. (2000). PolyBot: a modular reconfigurable robot, *International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, San Francisco, CA, ABD.
- [4] Kurokawa, H., Tomita, K., Kamimura, A., Kokaji, S., Hasuo, T., Murata, S. (2008). Distributed self-reconfiguration of M-TRAN III modular robotic system, *International Journal of Robotics Research*, 27(3–4), 373–386, doi: 10.1177/0278364907085560.
- [5] Sproewitz, A., Billard, A., Dillenbourg, P., Ijspeert, A.J. (2009). Roombots: mechanical design of self-reconfiguring modular robots for adaptive furniture, *International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, Kobe, Japonya.
- [6] Davey, J., Kwok, N., Yim, M. (2012). Emulating self-reconfigurable robots—design of the SMORES system, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, Vilamoura-Algarve, Portekiz.
- [7] Piranda, B., Chodkiewicz, P., Holobut, P., Bordas, S., Bourgeois, J., Lengiewicz, J. (2021). Distributed prediction of unsafe reconfiguration scenarios of modular robotic programmable matter, *IEEE Transactions on Robotics*, 37(6), 2226–2233. doi:10.1109/TRO.2021.3074085.
- [8] Dokuyucu, H.İ., Gürsel Özmen, N. (2023). Achievements and future directions in self-reconfigurable modular robotic systems, *Journal of Field Robotics*, 40, 701–746. doi: 10.1002/rob.22139.
- [9] Kirby, B.T., Aksak, B., Campbell, J.D., Hoberg, J.F., Mowry, T.C., Pillai, P., Goldstein, S.C. (2007). A modular robotic system using magnetic force effectors, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE/RSJ, San Diego, CA, ABD.
- [10] Thalamy, P., Piranda, B., Naz, A., Bourgeois, J. (2022). VisibleSim: A behavioral simulation framework for Lattice modular robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 147:103913. doi: 10.1016/j.robot.2021.103913.
- [11] Holobut, P., Bordas, S.P., Lengiewicz, J. (2020). Autonomous model-based assessment of mechanical failures of reconfigurable modular robots with a Conjugate Gradient solver, *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE/RJS, Las Vegas, NV, USA, 2020.
- [12] Nisser, M., Cheng, L., Makaram, Y., Suzuki, R., Mueller, S. (2022). ElectroVoxel: Electromagnetically actuated pivoting for scalable modular self-reconfigurable robots, *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, Philadelphia, PA, ABD.
- [13] Hauser, S., Mutlu, M., Ijspeert, A.J. (2020). Kubits: Solid-state self-reconfiguration with programmable magnets, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 6443–6450. doi: 10.1109/LRA.2020.3013884.
- [14] Romanishin, J.W., Gilpin, K., Claici, S., Rus, D. (2015). 3D M-Blocks: Self-reconfiguring robots capable of locomotion via pivoting in three dimensions, *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, Seattle, WA, ABD.
- [15] Song, Q., Ye, D., Sun, Z., Wang, B. (2022). Motion planning techniques for self-configuration of homogeneous pivoting cube modular satellites, *Aerospace Science and Technology*, 120:107249. doi: 10.1016/j.ast.2021.107249.

- [16] Piranda, B., Laurent, G.J., Bourgeois, J., Clévy, C., Möbes, S., Fort-Piat, N.L. (2013). A new concept of planar self-reconfigurable modular robot for conveying microparts, *Mechatronics*, 23(7), 906-915. doi: 10.1016/j.mechatronics.2013.08.009.
- [17] Rus, D., Vona, M. (2001). Crystalline robots: self-reconfiguration with compressible unit modules, *Autonomous Robots*, 10, 107–124. doi: 10.1023/A:1026504804984.
- [18] Ünsal, C., Kiliççöte, H., Khosla, P.K. (2001). A modular self-reconfigurable bipartite robotic system: implementation and motion planning, *Autonomous Robots*, 10, 23–40. doi: 10.1023/A:1026592302259.
- [19] Yang, W.Y., Zou, Y., Huang, J., Abujaber, R., and Nakagaki, K. (2024). “TorqueCapsules: Fully-Encapsulated Flywheel Actuation Modules for Designing and Prototyping Movement-Based and Kinesthetic Interaction,” *37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '24)*, ACM, New York, NY, USA.
- [20] Ristevski, R., Çakmakcı, M. (2015). Mechanical design and position control of a modular mechatronic device (MechaCell), *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, Busan, Güney Kore.