

Adaptif Kontrol Yöntemiyle Bacaklı Robotlarda Yüksek Performanslı Koşma Davranışı Geliştirilmesi

Program Kodu: 1002

Proje No: 215E050

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Ömer Morgül
Doç. Dr. Uluç Saranlı

Bursiyerler:

İsmail Uyanık
Mustafa Gül
A. Mansur Arısoy

NİSAN 2017
ANKARA

Önsöz

Bu proje, bacaklı robotlarda hassas, model tabanlı koşma davranışlarının gerçekleşmesini sağlayacak adaptif kontrolcülerin geliştirilmesi konusuna odaklanmıştır. Bu kapsamda öncelikle önerilen model tabanlı kontrol algoritmalarının test edilebileceği, gerçek zamanlı ve yüksek frekanslı veri toplama ve işleme yeterliğine sahip bir robot platformu geliştirilmiştir. Ardından, geliştirilen fiziksel robot platformunun davranışlarının tanımlanabilmesi amacıyla literatürde yer alan bir matematiksel model üzerine geliştirme çalışmaları yapılmış ve sistematik deneyler aracılığıyla önerilen modelin gerçek robot hareketlerini ne kadar iyi ifade ettiği ortaya konulmuştur. Ayrıca, robotun geliştirilen model kullanılarak model tabanlı koşma davranışı sergilemesi sağlanmış, fiziksel sistem çeşitli adaptif kontrolcülerin test edilebileceği bir altyapıya kavuşturulmuştur. Bu proje TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı bünyesinde bir yıllık bir süreç zarfında geliştirilmiştir.

İçindekiler

Önsöz.....	2
İçindekiler	3
Tablolar	4
Şekiller	5
Özet	6
Abstract.....	7
1. Giriş	8
2. Bacaklı Hareketlilik ve Model Tabanlı Analiz	8
3. Proje Süreci.....	10
3.1 Tork-Tahrikli Ve Kayıplı Yaylı Ters Sarkaç (TTK-YTS) Modeli İçin Adaptif Kontrolcü Geliştirilmesi	11
3.2 Laboratuvarımızda Bulunan Tek Bacaklı Zıplayan Robot Platformunun Tork-Tahrikli Koşma Davranışını Destekleyecek Şekilde Mekanik Olarak Revize Edilmesi	16
3.3 Elektronik Sistem Revizyonları Ve Gerçek Zamanlı Veri Toplama Sistemi.....	19
3.4 TTK-YTS Modeli Yakınsamalı Analitik Çözümünün Robot Platformu Üzerinde Doğrulanması	22
3.5 Model Tabanlı Kontrolcü Geliştirilmesi	29
4. Sonuç.....	32
5. Gelecekte Yapılacak Çalışmalar.....	33
6. Kaynakça	34

Tablolar

Tablo 1. Genişletilmiş TTK-YTS modeli için bulunan tahmini sistem parametreleri.....	28
Tablo 2. On-katlı bağımsız geçerlilik sınaması yzde ortalama hataları.....	28

Şekiller

Şekil 1. Hatalı sistem parametrelerinin YTS gezinmesindeki etkisi	12
Şekil 2. Ters çevrilmiş yakınsamalı analitik çözüm üzerinden tam-hedef YTS yürüyüş kontrolü	12
Şekil 3. Adaptif kontrolcü diyagramı.....	13
Şekil 4. Adaptif kontrolcü devre dışı, yay ve sönümlenme katsayıları %20 oranında hatalı olarak başlatılıp (Koyu renkli bölge) yaklaşık zaman 1.4 saniyeye ulaştığında adaptif kontrolcünün başlatıldığı (Açık renkli bölge) örnek bir TTK-YTS modeli benzetimi ..	14
Şekil 5. Yay ve sönümlenme katsayıları %5 hata ile biri adaptif bir kontrolcü, diğeri adaptif olmayan bir kontrolcüyle yapılan iki farklı benzetim örneği.	15
Şekil 6. Tork-tahrikli YTS modelinin %20 yay ve sönümlenme hatasıyla biri adaptif diğeri adaptif olmayan kontrolcülerle yapılan sinüsoidal takip performansı örnekleri.	16
Şekil 7. Proje başvuru aşamasında önerilen motor—bacak bağlantı tasarımı.....	17
Şekil 8. Sönümleyici kaplin içeren yeni motor—bacak bağlantı mekanizması tasarımı	18
Şekil 9. Tasarlanan yeni motor-bacak arayüzü	19
Şekil 10. Tek bacaklı zıplayan robot platformunun elektronik altyapısı ve iletişim sistemi.	20
Şekil 11. Hareket fazları ve geçiş olayları ile birlikte genişletilmiş TTK-YTS modeli	22
Şekil 12. Deneysel tek-adım testleri ve yaklaşımsal analitik çözümlerin karşılaştırması.....	28
Şekil 13. Tam-Hedef kontrolcüsü sistem diyagramı	29
Şekil 14. Benzetim ortamında uygulanan tam-hedef kontrolcüsünün örnek bir test için sonuçları	30
Şekil 15. Sabit istenilen değerler ile yapılan örnek koşma deneyi	31
Şekil 16. Değişken istenilen değerler ile yapılan örnek koşma deneyi	32

Özet

Model tabanlı ve dinamik kararlılığa ihtiyaç duyan bacaklı yürüme ve koşma davranışlarının fiziksel robotlarda gerçekleşmesi statik kararlılık özelliğine sahip davranışlara göre oldukça zordur. Bu zorluğun temel nedenlerinden birisi ilgili dinamiklerin sistem parametrelerine hassas bağımlılık göstermesidir. Bu parametrelerin hassas bir şekilde ölçülememesi ve malzeme yorulması veya aşırı kullanım nedeniyle zamanla değişim göstermesi de problemi daha da kötü bir hale getirmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı tek bacaklı zıplayan bir robot platformu için çevrimiçi parametre kestirimi yaparak model-tabanlı yüksek performanslı koşu davranışını destekleyen bir adaptif kontrolcü yapısı ortaya koymaktır. Aslında daha önceki çalışmalarımızda benzetim ortamlarında basit Yaylı Ters Sarkaç (YTS) modeli için çevrimiçi parametre kestirimi yaparak kalıcı hal takip hatalarını gideren bir adaptif kontrolcü geliştirilmiştir. Bu noktada amacımız öncelikle bu adaptif kontrolcü yapısının Tork-Tahrikli ve Kayıplı Yaylı Ters Sarkaç (TTK-YTS) modeline uyarlanmasını sağlamak ve ardından geliştirilen adaptif kontrolcü yapısının test edilebileceği tek bacaklı zıplayan robot platformunu ortaya koymaktır.

Bu amaçla öncelikle daha önce laboratuvarımızda geliştirmiş olduğumuz tek bacaklı zıplayan robot platformu üzerinde yüksek performanslı koşma davranışını destekleyecek mekanik ve elektronik revizyonlar yapılmıştır. Daha sonra öncelikle TTK-YTS modeli için geliştirilen bir yakınsamalı analitik çözümün gerçek robot verileri üzerinde doğrulaması yapılmıştır. Bu amaçla robotun tek adımlık testleri üzerinden veri toplanmış, ardından bu matematiksel model için parametrik sistem tanınması yapılarak robot parametrelerinin kestirimi sağlanmıştır. Bu modelin robot gezintilerini ne kadar iyi tahmin ettiği fiziksel testler aracılığıyla detaylıca gösterilmiştir.

Projenin son aşamasında, fiziksel olarak doğrulanmış yakınsamalı analitik çözüm kullanılarak robotun istenen hız ve yükseklikte koşmasını sağlayacak model-tabanlı tam hedef kontrolcü yapısı geliştirilmiştir. Bu kontrolcünün robot üzerindeki performansı farklı deneylerle incelenmiş ve bu şekilde robotun başarılı bir biçimde koşması sağlanmıştır. Böylece projemizde bir sonraki safhaya geçebilmek amacıyla robotumuz revize edilmiş ve daha önce benzetim ortamlarında doğrulaması yapılmış birçok çalışmamız deneysel olarak da doğrulanmıştır. Projenin bitimini takiben adaptif kontrolcü yapılarının robot üzerinde detaylı incelenmesine başlanacaktır.

Abstract

Practical realization of model-based dynamic legged walking and running behaviors on physical robot platforms is more challenging than their statically stable counterparts. The main reason behind this difficulty is the critical dependence of related dynamics to system parameters. This problem is aggravated by the inevitably inaccurate measurements of these parameters and their time varying nature due to extensive use and associated material fatigue.

The main goal in this work is to develop an adaptive controller that supports model-based high performance running behavior for a one legged hopping robot platform via online once-per-step parameter correction. Actually, in our previous works, we developed an adaptive controller that eliminates the steady state tracking error via online parameter adjustment for the Spring-Loaded Inverted Pendulum (SLIP) model in simulation studies. At this point, our aim is to first extend the proposed adaptive controller strategy for the Torque-Actuated Dissipative Spring-Loaded Inverted Pendulum (TAD-SLIP) model and then present a one-legged hopping robot platform as a test bench for the proposed method.

To this end, we first performed necessary mechanical and electrical revisions on our one legged hopping robot platform, which was previously developed in our laboratory, to support its high performance running behavior. Then, we worked on experimental validation of an approximate analytical solution for the TAD-SLIP dynamics on our robot data. In this context, we first collected single stride trajectories of the robot platform and performed parametric system identification to estimate the physical system parameters. After that, we showed how successfully these models can represent robot trajectories.

As a last step, we developed a model-based deadbeat controller to regulate the velocity and height of the robot by using the experimentally validated approximate analytical solution. We investigated the performance of this model-based controller in various experiments and it has been shown that the robot can successfully track the desired trajectories. Thus, in this project, we presented the revised one-legged hopping robot platform as well as our experimental investigations of some previous studies on the new robot platform. Subsequent to this project, we plan to investigate the performance of the adaptive controllers on our physical robot platform.

1. Giriş

Bu projenin temel fikri bacaklı robotlarda dinamik koşma davranışının hassas bir şekilde sağlanabileceği model-tabanlı adaptif kontrolcü algoritmalarının geliştirilmesidir. Bu bağlamda adaptif kontrolcülerin bacaklı robotlara uygulanması konusunda iki temel problem göze çarpmaktadır. Birinci olarak adaptif kontrolcülerin bacaklı robotlarda test edilebilmesi için öncelikle bu testlere olanak sağlayacak, gerçek zamanlı veri toplama ve analizini destekleyebilecek bir robot platformunun ortaya çıkarılması gerekmektedir. İkinci olarak ise geliştirilen robot platformunun hareketlerini tanımlayabilecek bir matematiksel modelin ortaya konması ve bu modelin gerçek robot hareketlerini hassas bir şekilde betimleyebildiğinin doğrulanması gerekmektedir. Aynı zamanda fiziksel robot platformunun model-tabanlı kontrolcülerle periyodiğe yakın bir hareketle koşu davranışını sergileyebilmesi önemli bir gereksinimdir. Bu proje bu problemlerin ikisi üzerinde de ilerleme göstererek adaptif kontrolcülerin bacaklı robot sistemlerine uygulanmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Bu raporda bu konu ile ilgili literatürdeki son durum, proje süresince yapılan çalışmalar ve önerilen yöntemlerin sonuçları sunulmuştur.

2. Bacaklı Hareketlilik ve Model Tabanlı Analiz

Bilindiği üzere bacaklı robotik sistemler tekerlekli ve paletli platformlara nazaran bozuk arazi ortamlarında daha başarılı hareket kabiliyetleri sergileyebilmektedir [Raibert, 1986]. Bu fikirden yola çıkarak bacaklı robotik sistemlerin analizi, sistem tanınması ve kontrolü üzerine bir çok çalışma yapılmıştır (Dadashzadeh vd., 2014; Seok vd., 2013; Martin vd., 2017). Özellikle son yıllarda bacaklı robotların bozuk arazi ortamlarında performanslarının iyileştirilmesine yönelik çok olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Seok vd., 2013; Raibert vd., 2008; Feng v.d., 2015). Geliştirilen bu platformlar bacaklı robotların geleceği konusunda ümit vaat etmektedir.

Bacaklı hareketlilik konusunda ilginç fakat sıklıkla kullanılan bir özellik ise bacak sayısından ve morfolojiden bağımsız olarak yürüme ve koşma gibi bacaklı hareketlilik davranışlarının basit yay-kütle modelleriyle ifade edilebilmesidir (Blickhan ve Full, 1993; Farley ve Ferris, 1998). Bu modeller arasında Yaylı Ters Sarkaç (YTS) modeli canlı hareketlerinin hassas tanımlayabilmesi ve basit yapısı nedeniyle sıklıkla tercih edilen bir model olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca, farklı robot sistemlerine uyarlanabilmesi amacıyla YTS modelinin farklı versiyonları da ortaya atılmıştır (Seipel ve Holmes, 2007; Poulakakis ve Grizzle, 2009; Saranlı vd., 2010). Bu modeller robotlarda sistem tanımlama ve kontrol amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır (Martin vd., 2017; Shahbazi vd., 2016; Ankaralı ve Saranlı, 2010; Uyanık vd., 2011).

Basit görünümüne rağmen YTS modelinin robotlarda kullanımıyla ilgili olarak iki temel problem göze çarpmaktadır. Öncelikli olarak YTS modeli iki farklı dinamiğin tekrarlı olarak ardı sıra aktive olmasıyla ortaya çıkan hibrit dinamik bir yapıya sahiptir. Bu nedenle bu fazlara ait hareket denklemleri ayrı ayrı çözülmekte ve fazlar arasındaki geçiş fonksiyonlarının belirlenmesiyle genel hareket denklemi ortaya çıkarılmaktadır. İkinci olarak robot bacağının yerle temas halinde bulunduğu “temas” fazında sistem dinamiklerinin integrali alınamaması nedeniyle analitik çözümler türetilmemektedir (Holmes, 1990). Bu noktada çözüm olarak YTS temas fazı dinamiklerinin numerik olarak integrali alınarak bir çözüm elde edilebilse de bu çözümlerin işlemcilerde zaman alması nedeniyle gerçek zamanlı bir kullanımda faydalı olmayacağı öngörülmüştür. Dolayısıyla, bu probleme çözüm olarak bazı kabullenmeler altında gerçek sistem dinamiklerini hassas bir şekilde tanımlayabilen bazı yakınsamalı analitik çözümler ortaya konulmuştur (Saranlı vd., 2010; Geyer vd., 2005; Schwind ve Koditschek, 2000; Yu vd., 2010; Shahbazi vd., 2015).

Bir kaç deneysel doğrumala çalışması dışında (Martin vd., 2017; Uyanık vd., 2015), ilgili yakınsamalı analitik çözümlerin doğruluğu sadece benzetim ortamlarında gösterilmiştir. Ancak bu çözümlerin deneysel olarak fiziksel robotlar üzerinde doğrulanması model-tabanlı kontrolcülerin geliştirilebilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda kayıplı YTS modeli için geliştirilen bir yakınsamalı analitik çözümün fiziksel bir tek bacaklı robot platformu üzerinde doğrulama çalışmaları literatürde yer almaktadır (Uyanık vd., 2015). Aynı şekilde YTS modeli üzerinden geliştirilen bir model-tabanlı kontrolcünün oldukça karmaşık ATRIAS robotu üzerinde kontrolcü olarak çalıştırılması bu modellerin geleceği açısından önemli bir bulgudur (Martin vd., 2017).

Literatürde yer alan çözümlerle ilgili olarak ortaya çıkan en önemli problem fiziksel sistemlerde kaçınılmaz bir şekilde ortaya çıkan mekanik enerji kayıplarıdır. Bu kayıplar nedeniyle robotun periyodik bir şekilde hareketine devam edebilmesi mümkün olmamaktadır. Bu bağlamda kullanılacak bir kalça motorunun sisteme enerji girdisi sağlayabilmesi hakkında çeşitli modeller ortaya atılmıştır (Seipel ve Holmes, 2007; Ankaralı ve Saranlı, 2010; Hamzaçebi ve Morgül, 2017; Shen ve Seipel, 2012; Hu vd., 2015). Bu modeller zaman-tabanlı ya da durum-tabanlı olarak sisteme tork girdisi sağlayıp robotun istenen enerji seviyesinde koşmasını sağlamaktadırlar. Biz de bu projede tork girdisi yardımıyla sistemin enerji ihtiyacını karşılayan bir yakınsamalı analitik çözüm üzerinden robotun sistem tanımlamasını ve model-tabanlı kontrolünü gerçekleştirmeyi hedeflemekteyiz.

3. Proje Süreci

Bu bölümde proje sürecinde yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar proje başvuru raporunda sunulan iş paketleri üzerinden anlatılmıştır. Yapılan çalışmalarda iş paketlerinde önerilen basamaklar başarıyla tamamlanmış olup, robotumuz önceden hedeflenen başarı kriterlerini sağlamıştır. Bu bağlamda proje sürecinde gerçekleştirilen temel iş paketleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Tork-tahrikli ve kayıplı yaylı ters sarkaç (TTK-YTS) modeli için adaptif kontrolcü geliştirilmesi: Bu iş paketi kapsamında daha önce YTS modeli için geliştirmiş olduğumuz adaptif kontrolcü alt yapısının TTK-YTS modeli için uyarlanması tamamlanmıştır. İlgili iş paketi detayları Bölüm 3.1'de anlatılmaktadır.

2. Laboratuvarımızda bulunan tek bacaklı zıplayan robot platformunun tork-tahrikli koşma davranışını destekleyecek şekilde mekanik olarak revize edilmesi: Bu iş paketi kapsamında daha önce 109E032 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında laboratuvarımızda geliştirmiş olduğumuz tek bacaklı zıplayan robot platformunun model-tabanlı ve tork-tahrikli olarak yüksek performanslı koşma davranışını sağlayabilmesi amacıyla çeşitli mekanik güncellemeler yapılmıştır. Bu bağlamda tork girdisi sağlayacak motor ile bacak arasında verimli bir şekilde güç aktarımını sağlayacak bir sönümleyici kaplin bağlantısı yapılmıştır. İlgili iş paketi detayları Bölüm 3.2'de anlatılmaktadır.

3. Elektronik sistem revizyonları ve gerçek zamanlı veri toplama sistemi: Bu iş paketi kapsamında robotumuzun tüm elektronik altyapısı, yenilenmiş robotun gerçek zamanlı olarak veri toplayabilmesi ve işleyebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, Matlab Simulink arayüzü sayesinde robotun hızlı programlanabilmesi için yazılım tamamen güncellenmiş, robot Matlab bilen herhangi bir lisans/lisansüstü öğrenci tarafından kolaylıkla programlanabilir bir forma kavuşturulmuştur. İlgili iş paketinin detayları Bölüm 3.3'de sunulmaktadır.

4. TTK-YTS modeli yakınsamalı analitik çözümünün robot platformu üzerinde doğrulanması: Bu iş paketi TTK-YTS modeli için geliştirilen yakınsamalı analitik çözümün gerçek robot hareketlerini ne kadar iyi tasvir ettiğini ortaya koymak adına yapılan sistem tanılama çalışmalarını içermektedir. Projenin en önemli özgün değerlerinden birisi olarak iş paketi kapsamında literatürde yer alan modeller genişletilmiş ve fiziksel robot verileri üzerinde geliştirilen çözümün performansı gösterilmiştir. Detayları Bölüm 3.4'te bulunabilir.

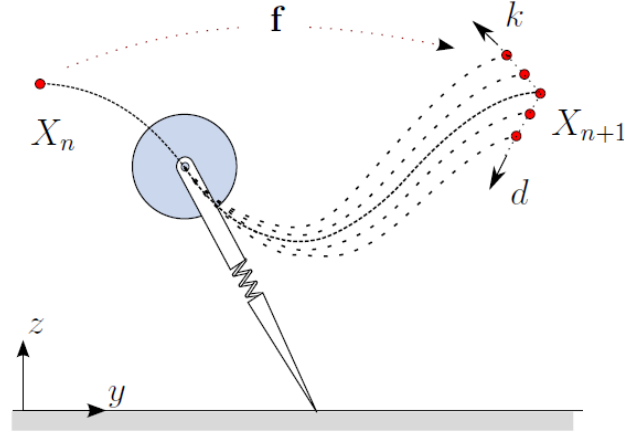
5. Robot platformunun model-tabanlı yüksek performanslı koşma davranışı: Bu iş paketi kapsamında fiziksel robot sisteminin TTK-YTS modelinin yakınsamalı analitik çözümü kullanarak kontrolü sağlanmış ve yüksek performanslı koşma davranışı elde edilmiştir. Robotun koşma davranışını başarıyla sergilemesiyle ilgili detaylar Bölüm 3.5'te bulunabilir.

6. Adaptif kontrolcü yönteminin gerçek robot üzerinde uygulanmaya başlaması: Bu iş paketinin temel amacı adaptif kontrolcü vb. kontrol yapılarının uygulanabileceği test düzeneğinin ortaya konmasıdır. Bir önceki iş paketlerinde elde edilen başarılı sonuçlar robotumuzun adaptif kontrolcü mantığıyla koşmasına olanak sağlamış, proje başvuru raporunda da anlatıldığı üzere adaptif kontrolcülerin robot üzerinde kullanımıyla ilgili detaylı analiz proje sonrası çalışmalara bırakılmıştır.

3.1 Tork-Tahrikli Ve Kayıplı Yaylı Ters Sarkaç (TTK-YTS) Modeli İçin Adaptif Kontrolcü Geliştirilmesi

Adaptif kontrolcü yöntemlerinin bacaklı robotlarda yüksek performanslı koşma davranışı elde edilmesi amacıyla kullanılabileceği fikri daha önce benzetim ortamlarında denenmiş ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Uyanık vd., 2011). Ancak bu çalışmalarda kullanılan modeller tork tahriği bulunmayan ve enerji regülasyonu yapamayan sistemler için test edilmiştir. Halbuki, projemizde önerilen bacaklı robot modeli tork tahrikli ve kayıplı yaylı ters sarkaç (TTK-YTS) modeli üzerine kurulmuş olup bu tip modeller üzerinde henüz adaptif kontrolcülerin nasıl performans sergiledikleri incelenmemiştir. Bu nedenle bu iş paketinde öncelikli amacımız adaptif kontrolcü mantığının TTK-YTS modeline uyarlanması ve benzetim ortamlarında doğrulamalarının yapılması üzerine kurulmuştur.

Bu projede önerilen adaptif kontrol yöntemi doğası gereği bir model-tabanlı kontrolcüye ek olarak faaliyet göstermektedir. Bu çalışmada önerilen adaptif kontrolcü ise 3.4 altbaşlığında detayları anlatılan genişletilmiş TTK-YTS modelinin yakınsamalı analitik çözümleri üzerine kurulmuştur. Adaptif kontrol yönteminin baz aldığı yakınsamalı modelin tam hedef kontrol stratejisi geliştirilmesi konusunda iki temel hata nedeniyle istenen robot gezintilerine hassas olarak ulaşamadığı gözlemlenmiştir. Birinci olarak sistem parametrelerinin hassas bir şekilde ölçülemiyor olması nedeniyle bu modelle geliştirilecek kontrolcüler sistemin istenen hedef durumuna ulaşmasını sağlayamamaktadır. Ayrıca, bu sistem parametreleri hassas olarak bilinse bile yakınsamalı analitik çözüm elde etmek noktasında yapılan yakınsamalar ve kabullenmeler nedeniyle ilgili model çözümleri robot gezintilerini hassas bir şekilde ifade edememektedir. Şekil 1 sistem parametrelerinin farklı ölçülmesi ya da bilinen değerinden sapması sonucunda robot gezintisinin ne kadar kötü bir şekilde etkilendiğini açıkça ortaya koymaktadır. Projede ortaya çıkan adaptif kontrolcü yapısının temel amacı sistem parametrelerinin çevrimiçi olarak hassas kestirimini yapıp robotun gerçek gezintisinin daha etkin bir şekilde matematiksel modellerle ifade edilebilmesidir. Böylece kullanılan model-tabanlı kontrolcüler de robotun istenen gezinteye ulaşmasını sağlayabilecektir.



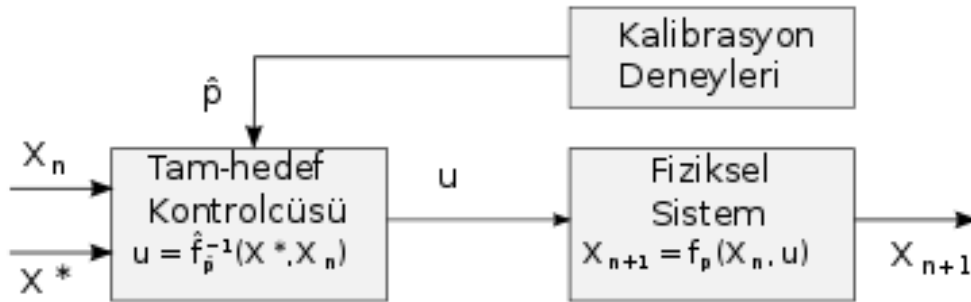
Şekil 1. Hatalı sistem parametrelerinin YTS gezinesindeki etkisi

Fiziksel sistemlerde robot dinamiklerinin nümerik integral yardımıyla çözümü üzerinden geliştirilecek kontrolcülerin yüksek çözüm zamanı nedeniyle kullanılmaması, robotlar üzerinde ancak yakınsamalı da olsa analitik çözümlerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu noktada projemizde genişletilmiş TTK-YTS modelinin yakınsamalı analitik çözümünün fonksiyonel tersi alınmak suretiyle istenen durum noktasına ulaşılmasını sağlayacak kontrol sinyallerinin hesaplanması sağlanmaktadır. Matematiksel olarak anlatmak gerekirse, robotun belirli bir durum noktası olan X_n 'den bir sonraki durum noktası olan X_{n+1} 'e olan hareketi, sistem parametreleri ve kontrol sinyalleri varlığında aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir

$$X_{n+1} = \hat{f}_{\hat{p}}(X_n, u).$$

Model-tabanlı kontrolcülerin amacı ise robotun belirli bir durum noktası olan X_n 'den istenen bir X^* noktasına gitmesini sağlayacak kontrol sinyallerinin hesaplanmasıdır. Bu amaçla, yine sistem parametrelerine bağlı olarak ilgili kontrol sinyalleri şu şekilde hesaplanabilir

$$u = \hat{f}_{\hat{p}}^{-1}(X_n, X^*).$$



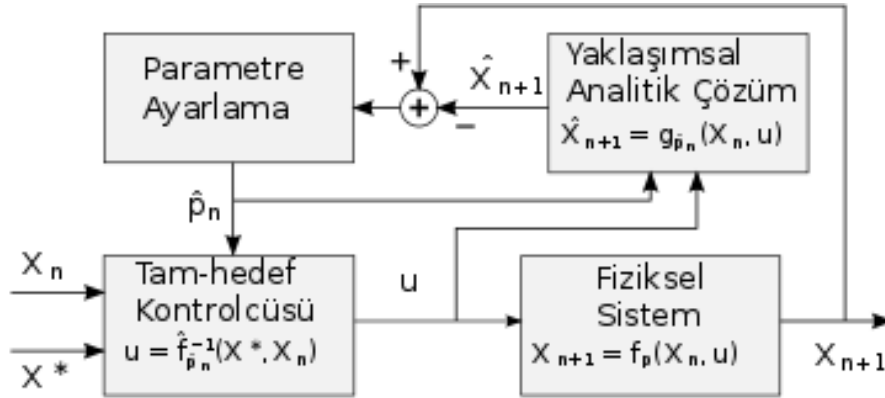
Şekil 2. Ters çevrilmiş yakınsamalı analitik çözüm üzerinden tam-hedef YTS yürüyüş kontrolü

Şekil 2’de görüldüğü üzere sistem dinamikleri ve dolayısıyla iki tepe durum noktası arasındaki ilişkiyi sağlayan matematiksel fonksiyon tahmini sistem parametrelerinden oluşan bir vektöre bağlı olarak ifade edilmiştir:

$$p := [k, d]^T$$

Bu nedenle bu sistem parametrelerinin ölçümünde yapılacak hatalar robot gezinmesinin doğru ifade edilememesi ve dolayısıyla model-tabanlı kontrolcü tarafından üretilecek kontrol sinyallerinin yanlış hesaplanmasına neden olacaktır.

Projede kullanılan adaptif kontrolcü metodunun temel mantığı robotun yanlış parametrelerle ürettiği kontrol sinyallerini kullanarak elde edilen fiziksel robot gezinmesi ve model üzerinden elde edilen gezinme tepe noktalarının arasında oluşan farkın giderilmesi üzerine oluşturulmuştur. Bu noktada Şekil 3’te görülen parametre ayarlama bloğu gerçek robot gezinmesi sonucunda elde edilen tepe noktası ve model tahmini sonucundan elde edilen tepe noktası arasındaki farkı kullanarak ilgili sistem parametreleri üzerinde Kalman filtresine benzer bir yapıda filtreleme yaparak sistem parametrelerini adım başına bir kez olacak şekilde güncellemektedir.



Şekil 3. Adaptif kontrolcü diyagramı

Tepe durumu hatası (gerçek robot ve model tahmini arasında oluşan fark) her adımda yaklaşım analitik çözüm ve fiziksel sistemden elde edilen tepe noktası durum bilgisine göre

$$e := X_{n+1} - \hat{X}_{n+1} = f_p(X_n, u) - g_{\hat{p}_n}(X_n, u)$$

şeklinde yeniden hesaplanmaktadır. Sistemdeki adaptif kontrolcünün ana amacı tahmin hatasını sıfırlamak ve buna ek olarak en uygun sistem parametrelerini tahmin etmektir.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\hat{X}_n - X_n) = 0$$

$$\hat{p} = \lim_{n \rightarrow \infty} (\hat{p}_n)$$

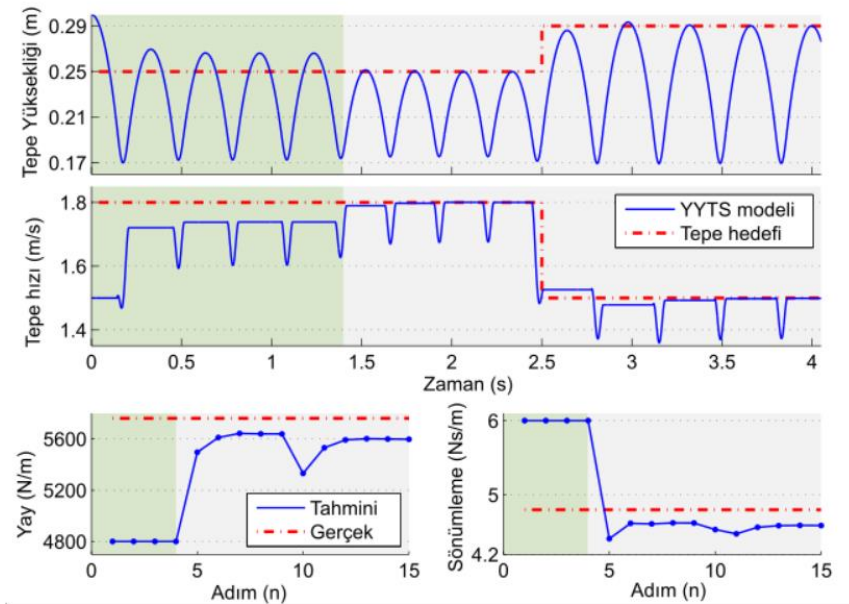
Bu hedefleri yerine getirmek için daha öncede belirtildiği gibi fiziksel sistemden nümerik olarak hesaplanan Jacobian matrisini temel alan basit fakat etkili bir parametre ayarlama stratejisi kullanılmaktadır. Doğası gereği, Jacobian matrisleri tepe noktasındaki sistem parametrelerinin sonsuz küçük değişimlerine belirtilen şekilde bağlıdır.

$$\delta \hat{X}_{n+1} = (\partial g / \partial p)|_{x_n} \delta p$$

Bu bağıntı ve hesaplanan tepe noktası hatasını kullanarak parametre güncelleme stratejisini

$$\hat{p}_{n+1} = \hat{p}_n + K_e (\partial g / \partial p)^{-1}|_{x_n} e$$

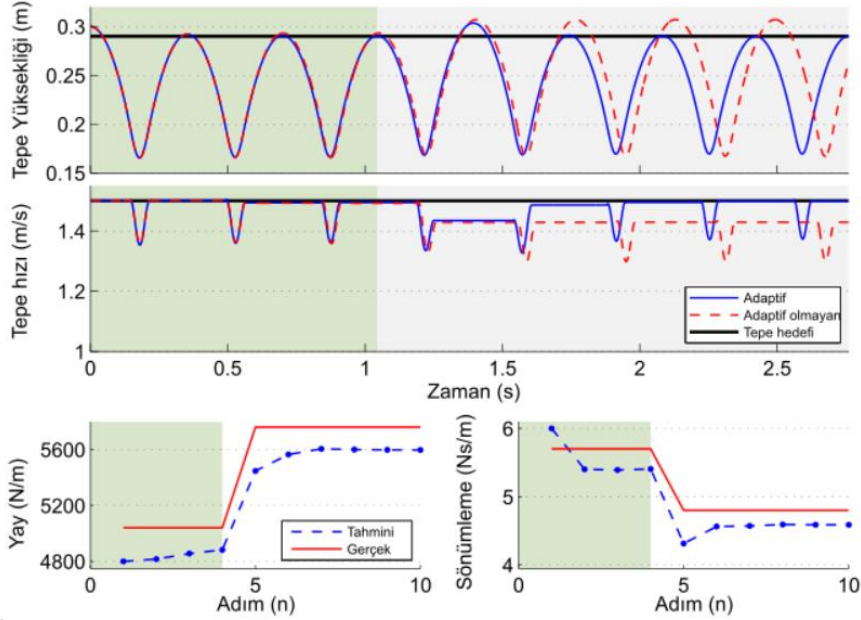
olarak tanımlayabiliriz. Denklemden belirtilen K_e elemanı birden küçük bir kazanç katsayısı olup yaklaşımı garantilemek ve salınımları engellemek için ayarlanabilir. Bu kontrol stratejisinin fiziksel sistemler üzerindeki başarısı büyük oranda kullanılan YTS modeli için geliştirilmiş yaklaşımsal analitik çözümünün kesinliğine bağlıdır.



Şekil 4. Adaptif kontrolcü devredışı, yay ve sönümlenme katsayıları %20 oranında hatalı olarak başlatılıp (Koyu renkli bölge) yaklaşık zaman 1.4 saniyeye ulaştığında adaptif kontrolcünün başlatıldığı (Açık renkli bölge) örnek bir TTK-YTS modeli benzetimi

Şekil 4'te gösterilen benzetim ortamı testinde sistem modeli yay ve sönümlenme sabiti için %20 oranında hata ile başlatılmış ve dolayısıyla koyu renk ile gösterilen başlangıç bölgesinde hem dikey pozisyon hem de yatay hız kontrol verilerinde büyük bir takip hatası gözlenmiştir. Ancak $t = 1.4$ s civarında adaptif kontrolcünün aktif hale getirilmesiyle sistem parametreleri üzerinde güncelleme yapılmış ve kalıcı hal takip hatası bir kaç adım içinde sıfıra indirilmiştir. Sistem performansının değişken hedef durumlarında nasıl davrandığını gözlemlemek amacıyla $t = 2.5$

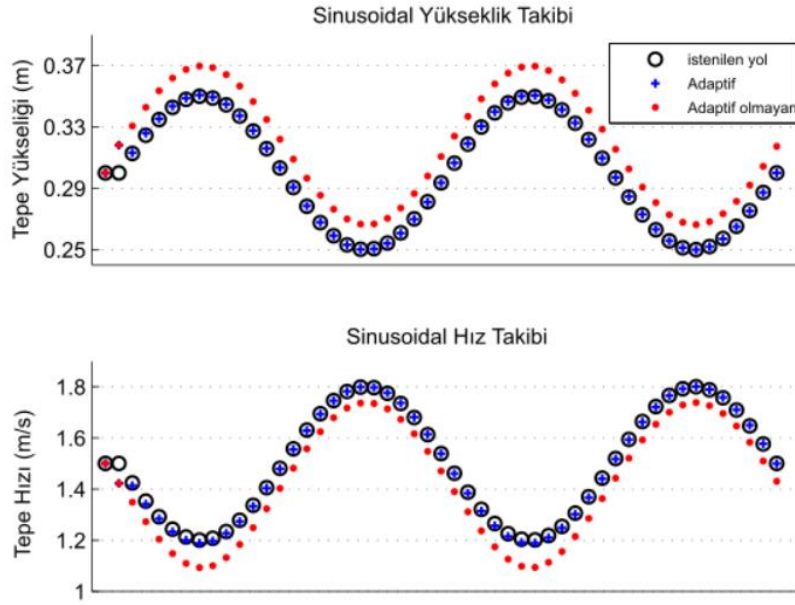
s civarında hedef durumlarında ani bir değişim yapılmış ve sistem performansı incelenmiştir. Bu değişiklikle beraber adaptif kontrolcü sistem parametreleri üzerinde yeni bir güncelleme yaparak istenen yeni hedef durumlarının da hassas bir şekilde kontrolünü sağlamıştır.



şekil 5. Yay ve sönümlenme katsayıları %5 hata ile biri adaptif bir kontrolcü, diğeri adaptif olmayan bir kontrolcüyle yapılan iki farklı benzetim örneği.

Hedef değişimlerinin yanı sıra önerilen adaptif kontrol yönteminin sistem parametrelerinde oluşabilecek ani bir değişim varlığında nasıl davranış gösterdiği de incelenmiştir. şekil 5'te gösterilen test sistem parametrelerinin %5 oranda hatayla ölçüldüğü bir durumda başlatılmış ancak daha sonra sistem parametreleri ölçümü yapılmayan bir şekilde ani bir değişime uğramıştır. Bu değişiklikle beraber adaptif kontrolcü sistem parametrelerinin yeniden kestirimini sağlamış ve kalıcı hal takip hatasının sifıra yakın tutulmasını sağlamıştır. Ancak adaptif kontrolcünün çalışmadığı durumda sistem parametrelerinde meydana gelen bu ani değişim kalıcı hal takip hatasının artmasına ve istenen robot gezinesinden hızla uzaklaşmasına neden olmaktadır.

Sistemi daha da zorlamak adına hedef gezinge sinüsoidal bir fonksiyona bağlı olarak değiştirilmiş ve adaptif kontrolcünün devamlı olarak değişen hedef durumları varlığında nasıl davrandığı incelenmiştir. şekil 6'da görüldüğü üzere adaptif kontrolcü varlığında istenen sinüsoidal gezinge hassas bir şekilde takip edilebilmektedir. Ancak adaptif kontrolcünün çalışmadığı ve dolayısıyla sistem parametrelerinin hassas bir şekilde ölçülemediği durumlarda istenen gezinge ancak belirli bir yükseklik ve hız farklıyla takip edilebilmektedir.



Şekil 6. Tork-tahrikli YTS modelinin %20 yay ve sönümlenme hatasıyla biri adaptif diğeri adaptif olmayan kontrolcülerle yapılan sinüsoidal takip performansı örnekleri.

Yapılan tüm bu testler benzetim ortamında adaptif kontrolcünün TTK-YTS modeli üzerinde kalıcı hal takip hatalarını gidermek konusunda oldukça başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle amacımız önerilen adaptif kontrol yönteminin fiziksel sistemlerde uygulanabilmesi amacıyla öncelikle TTK-YTS modeline uygun hareket edebilen bir fiziksel robot platformu ortaya koymak ve bu platformun TTK-YTS modelinin yakınsamalı çözümüne dayalı model-tabanlı kontrolcülerle kontrol edilebilmesini sağlamaktır. Bu adımlar başarılı olduğunda adaptif kontrolcü mantığının sistem üzerinde yapacağı temel görev ilgili model tabanlı kontrolcü için adım başına bir kez olmak üzere çevrimiçi bir şekilde parametre kestirimini yapmak olacaktır.

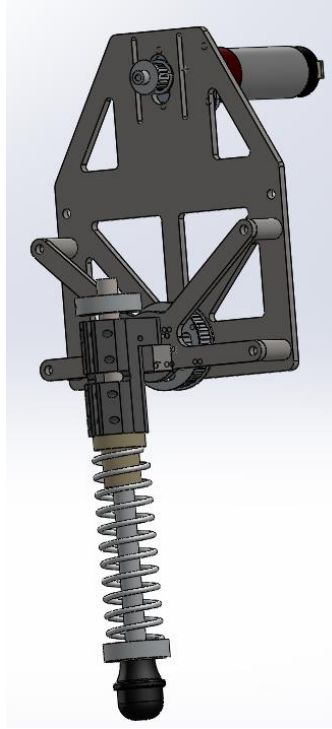
3.2 Laboratuvarımızda Bulunan Tek Bacaklı Zıplayan Robot Platformunun Tork-Tahrikli Koşma Davranışını Destekleyecek Şekilde Mekanik Olarak Revize Edilmesi

Bu bölümde projemiz kapsamında robotumuzla model-tabanlı yüksek performanslı koşu davranışının gerçekleştirilebilmesi için yapılan mekanik revizyonlardan bahsedilecektir.

Proje başvuru raporunda belirtildiği üzere robotumuzla daha önce yüksek performanslı koşu davranışının gerçekleştirilememesi yönünde iki temel problem göze çarpmaktaydı. Bunlardan birincisi mekanik sistemin yüksek enerji kaybı nedeniyle kullanılan kalça motorunun robotun istenen gezinmelerde koşabilmesi için gerekli enerji ihtiyacını karşılayamamasıydı. İkincisi ise motor mili ile bacak arasında tek bir mekanik kaplin bulunması nedeniyle koşu sırasında her

adımda meydana gelen ani çarpışmaların motor miline direk yansması ve motor dişlilerinin zarar görmesidir.

Bu nedenlerden ötürü proje başvuru raporunda Şekil 7’de üç boyutlu CAD tasarımı gösterilen motor bacak bağlantı sistemi tasarımı problemlerimize bir çözüm olarak sunulmuştur. Bu tasarımın temel dayanak noktası motor milinin bir kasnak aracılığıyla bacağa bağlanması suretiyle hem kasnak oranı miktarında güç artışı elde edilmesi hem de bacakta meydana gelen ani çarpışmaların motor miline aktarılmasına engel olunmasıdır.

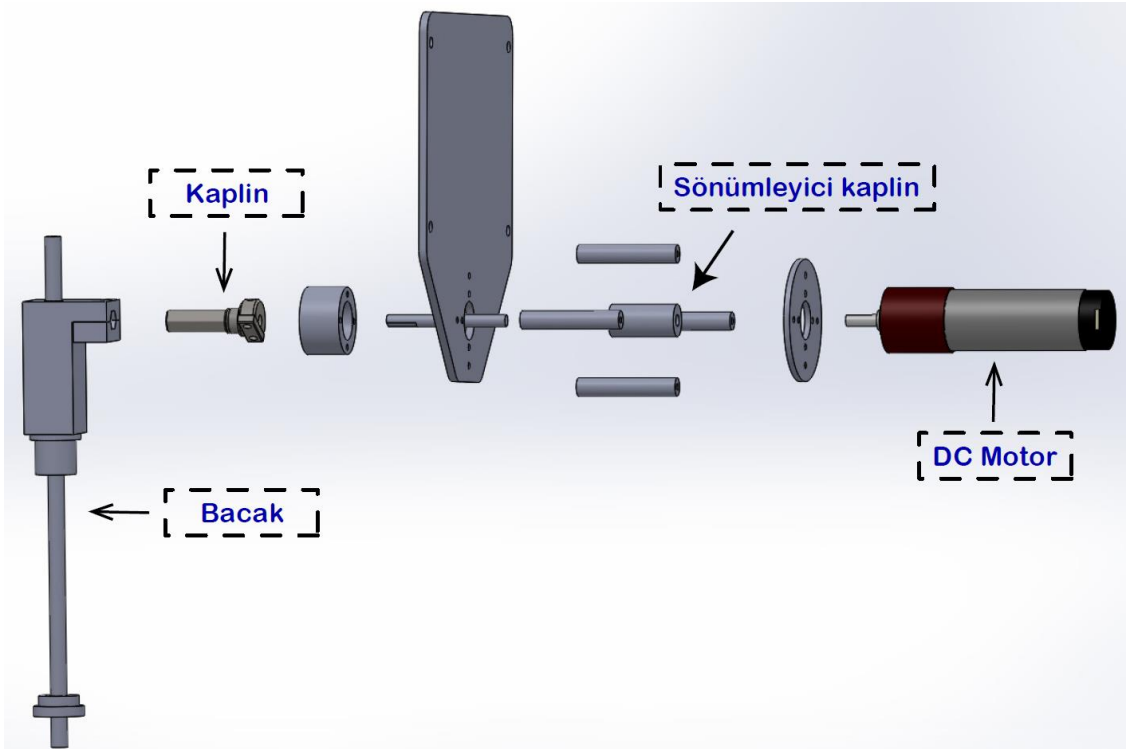


Şekil 7. Proje başvuru aşamasında önerilen motor—bacak bağlantı tasarımı.

Ancak proje başvuru sırasında yaptığımız bu tasarımın ön prototipleme çalışmaları sırasında iki temel sorun ortaya çıkmıştır. Birinci olarak güç sağlamak amacıyla tasarıma eklenen 1x3 oranındaki kasnak sistemi nedeniyle uygulanan güç bu oranda artsa da tersi oranda ortaya çıkan hız kaybı nedeniyle motor, bacağı yeterince hızlı bir şekilde istenen noktaya götürememektedir. Bu nedenle de birçok durumda koşu davranışı sırasında bacak yerle temas noktasına geldiğinde hedeflenenden farklı bir açıyla yere çarpmaktadır. Başka bir problem ise kasnak aktarma sistemiyle motordan uygulanan tork girdisinin bacak ucuna hangi miktarda aktarıldığının hassas bir şekilde ölçülememesidir. Bu nedenle bacağa koşu sırasında hedeflenen tork girdisi uygulanamamakta ve dolayısıyla robot yanlış kontrol sinyalleri nedeniyle hedeflenen koşu davranışını gerçekleştirilememektedir.

Bu probleme çözüm oluşturabilmek amacıyla robotun mekanik tasarımında sadeliğe gidilmiş, enerji ihtiyacının daha güçlü motorlar kullanılarak giderilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla proje başvuru raporunda öngörülen DC motor güncellemesi yapılmış ve daha güçlü tork girdisi sağlayan bir fırçasız motor alımı yapılarak robotun enerji ihtiyacı problemi çözülmüştür. Ancak daha önce de bahsedildiği üzere robotumuzun ikinci problemi bacağın koşu sırasında yere çarpması dolayısıyla oluşan ani çarpışmaların motor miline ve dişlilerine zarar vermesi ve bu nedenle motorların hızla bozulmasıdır. Bu problemi çözebilmek amacıyla literatürde örneklerine sıklıkla rastlanan ek bir sönümleyici kaplin kullanılması mantığıyla motor ve bacak arasındaki bağlantı mekanizmasının güncellenmesi planlanmıştır.

Bu amaçla robotumuzda önerilen mekanik tasarım tekrar güncellenmiş ve Şekil 8'de gösterilen, sönümleyici kaplin bağlantısını içeren yeni mekanik tasarım hazırlanmıştır. Bu tasarımın temel dayanağı motor tarafından dönüş ekseninde uygulanan tork girdisinin en az kayıp ile robot bacağına aktarılırken bacak tarafından dikey ekseninde gelecek ani çarpışma kuvvetlerinin sönümleyici kaplinde sönümlenmesidir. Böylece bacak tarafından dönüş ekseninde dışarıda gelen çarpışma kuvvetlerinin motor miline ve dolayısıyla dişlilere ulaşması engellenmiş, motor yorulması azaltılmıştır. İlk tasarıma göre yeni tasarımımızın temel dezavantajı ek bir kasa sisteminin olmaması nedeniyle motor gücünün birebir bir şekilde bacak tarafında aktarılmasıdır. Ancak seçilen yeni fırçasız DC motor zaten bu ihtiyacı ortadan kaldırmış ve robotun enerji ihtiyacı problemi kalıcı olarak çözülmüştür.



Şekil 8. Sönümleyici kaplin içeren yeni motor—bacak bağlantı mekanizması tasarımı

Şekil 9 tasarlanan yeni motor—bacak bağlantı arayüzünün üretilmiş halini göstermektedir. Görüldüğü üzere DC motor sönümleyici kaplin aracılığıyla korunmakta ardından bir mekanik kaplin yardımıyla bacağa bağlanmaktadır. Böylece robotumuzun yüksek performanslı koşu davranışının önünde yer alan mekanik engeller ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 9. Tasarlanan yeni motor-bacak arayüzü

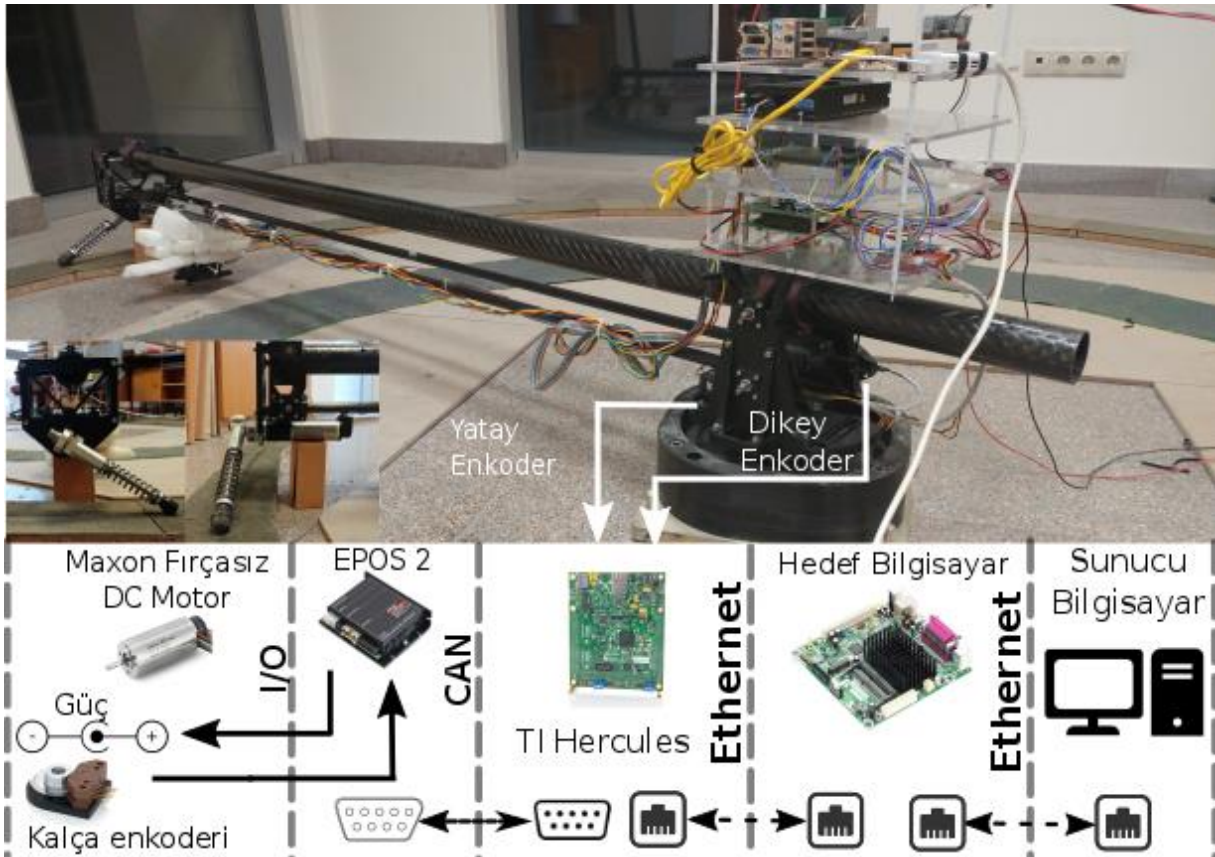
3.3 Elektronik Sistem Revizyonları Ve Gerçek Zamanlı Veri Toplama Sistemi

Proje kapsamında geliştirilen tek bacaklı zıplayan robot platformunun mekanik güncellemelerinin yanı sıra robotun istenen davranışları yüksek frekansta gerçekleştirebilmesi için platformun tüm elektronik aksamı ve yazılımı baştan tasarlanarak yenilenmiştir. Bu bölüm robot üzerinde gerçekleştirilen elektronik revizyonları ve ortaya çıkarılan gerçek zamanlı veri toplama sistemini anlatmaktadır.

Kesin ve güvenilir bir kontrol döngüsü elde etmek ve tüm lisansüstü ve lisans öğrencilerimiz tarafından kolay programlanabilir bir arayüze sahip olmak amacıyla tek bacaklı zıplayan robotumuzun elektronik altyapısı Matlab/Simulink Real Time (Gerçek Zamanlı) işletim sistemi üzerine kurulmuştur. Ayrıca bu işletim sistemi üzerinde yenilediğimiz yazılım sayesinde robotumuzdan gerçek zamanlı veri toplama ve veri analiz çalışmaları yapılabilmektedir. Ancak sağladığı birçok avantaja rağmen Matlab/Simulink tabanlı gerçek zamanlı işletim

sistemleri literatürde yaygın olarak tercih edilmemektedir. Bunun temel nedeni Matlab/Simulink tabanlı gerçek zamanlı işletim sisteminin sadece belirli donanım ürünleri için yazılım desteği vermeleri ve bu ürünlerin de sınırlı ulaşılabilirliğine sahip olup, bir hayli pahalı olmasıdır. Bu nedenle projemizde sistemin elektronik altyapısı oluşturulurken maddi nedenlerden ötürü bu hazır ürünler tercih edilememiş, bunun yerine yazılım arayüzleri kendimiz tarafından hazırlanmak suretiyle alternatiflerine göre oldukça düşük fiyatlı anakartlar ve mikrodenetleyiciler kullanarak donanım ve yazılım çözümleri üretilmiştir.

Matlab/Simulink gerçek zamanlı işletim sistemi temel olarak iki farklı bilgisayar altyapısının birleşiminden oluşmaktadır. Bu bilgisayarlardan birincisi robot üzerinde çalışan ve hedef bilgisayar olarak alınan tüm hesaplamaların, algoritmaların ve işlemlerin gerçekleştirildiği birimdir. Bu amaçla projemizde yüksek performanslı bir anakart kullanılarak bu ihtiyaç giderilmiştir. Mekanik olarak da bu anakart Şekil 10'da gösterildiği üzere robot üzerindeki elektronik aksam platformuna yerleştirilmiştir. İkinci bilgisayar ise sunucu bilgisayar olarak adlandırılan ve hedef bilgisayarın programlanmasını sağlayan, sistemden gerçek zamanlı ve yüksek frekansta gelen tüm verilerin anlık olarak toplanmasını ve kaydedilmesini sağlayan veri toplama sistemi bilgisarıdır. Bu amaçla projemiz çerçevesinde yüksek frekansta veri işleme ve kayıt desteği verebilecek bir iş istasyonu kurulmuştur.



Şekil 10. Tek bacaklı zıplayan robot platformunun elektronik altyapısı ve iletişim sistemi.

Hedef ve sunucu bilgisayarlar arasındaki bağlantı ethernet veya RS-232 seri iletişim protokolleri üzerinden yapılabilmektedir. Her ne kadar RS-232 programlanabilirlik açısından daha uygun bir çözüm gibi görünse de iletişim hızı tüm robot verilerinin gerçek zamanlı ve yüksek frekanslı (1 Khz) olarak aktarılmasına olanak sağlamamaktadır. Bu nedenle iki bilgisayar arasındaki iletişimi kurabilmek amacıyla ethernet arayüzünün kullanılmasına karar verilmiştir. Fakat Matlab/Simulink gerçek zamanlı işletim sistemleri sınırlı sayıda ethernet sürücüsüne destek verdiği için bilgisayarlarımız farklı PCI ethernet kartları eklenerek desteklenmiştir.

Hedef ve sunucu bilgisayarlar arasındaki bağlantının ethernet yardımıyla kurulmasının ardından hedef bilgisayar tarafındaki elektronik yapının ortaya çıkarılması sürecine başlanmıştır. Robot tarafında elektronik olarak kurulması gereken yapının kalça motorunun kontrolünün sağlanması ve robot ana eksenini etrafındaki enkoderları okuyarak robotun pozisyon verilerini oluşturması gerekmektedir. Öncelikle kalça motoru olarak kullanılan Maxon EC40 fırçasız DC motoru sürebilmek amacıyla laboratuvarımızda bulunan Maxon EPOS-2 motor sürücüsünün kullanılmasına karar verilmiştir. Bu motor sürücü yardımıyla ayrıca robotun bacak açısı, uygulanan voltaj, akım ve tork gibi birçok yapısal verisi de okunabilmekte ve robot ana bilgisayarına aktarılabilir.

Bu noktada Maxon EPOS-2 motor sürücüsü ile ana bilgisayar arasındaki bağlantıyı kuracak bir köprü altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Zira motor kısmından ana bilgisayara gerçek zamanlı ve yüksek frekanslı olarak aktarılması gereken verilerin transferi ancak motor sürücüsü üzerinde bulunan CAN BUS iletişim arayüzüyle sağlanabilmektedir. Ancak robot ana bilgisayarında bulunan ana kart, birçok ana kartta olduğu gibi direk olarak bir CAN BUS bağlantısını desteklememektedir. Bu amaçla birçok ana kart bir PCI kartı bağlantısıyla CAN BUS çıkış desteği verebilmektedir. Ancak hem Matlab/Simulink iletişim sistemi tarafından desteklenen hem de istediğimiz frekanslarda iletişim sağlayabilen PCI kartlarının fiyatları proje bütçemize göre oldukça yüksek rakamlardadır. Bu nedenle projemizde hem CAN BUS arayüzünü hem de ethernet altyapısını destekleyen TI Hercules adı verilen bir mikrodenetleyici kullanılmıştır. Bu mikrodenetleyicinin temel görevi Maxon EPOS-2 motor sürücüsü ve robot ana bilgisayarları arasındaki iletişimi sağlamak amacıyla köprü oluşturarak CAN BUS ve Ethernet arayüzleri arasında veri dönüşümü yapmaktır. Bu noktada ortaya çıkan tek zorluk mikro denetleyici üzerinde hem CAN BUS hem de ethernet arayüzlerinin programlanmasını sağlayacak yazılımların geliştirilmesi olmuştur.

Kullanılan mikrodenetleyicinin bir diğer özelliği ise üzerine yer alan yapısal elektronik çipler sayesinde robot üzerinde bulunan dikey ve yatay enkoderlerin sayımını yaparak robot pozisyonunu anlık olarak hesaplayabilmesidir. Böylece ekstra yeni bir donanıma ihtiyaç

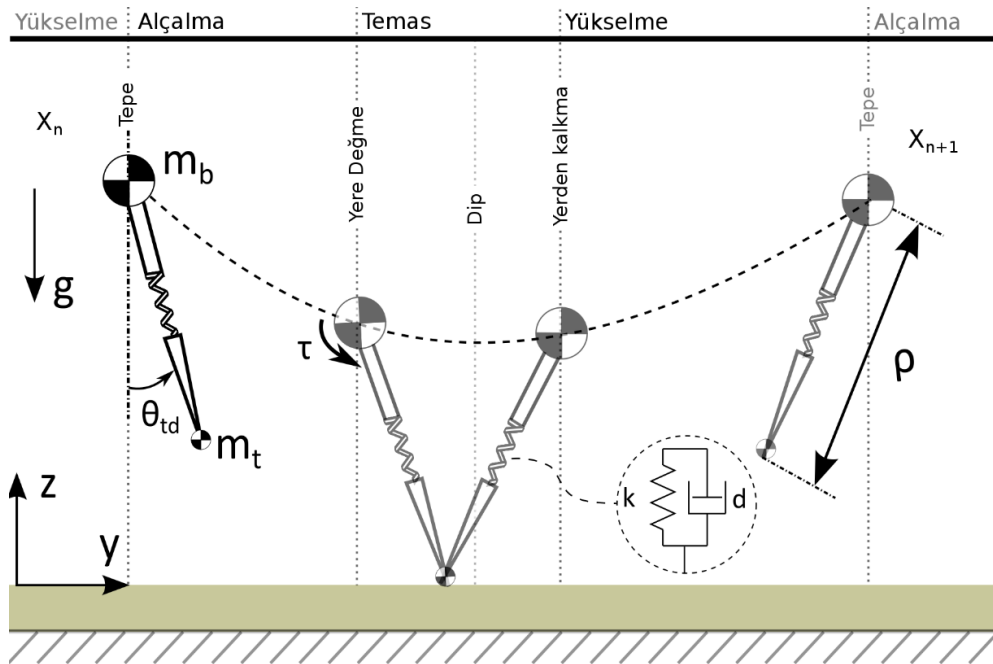
duymadan robot enkoderleri aynı mikrodenetleyicinin elektronik çipleri üzerinde okunmakta ve ortaya çıkan pozisyon bilgileri ethernet üzerinden robot ana bilgisayarına iletilmektedir.

Şekil 10'da gösterildiği üzere laboratuvarımızda bulunan tek bacaklı zıplayan robot platformun tüm elektronik aksamları yenilenmiş, robot Matlab/Simulink gerçek zamanlı işletim sistemi ile programlanarak gerçek zamanlı veri toplanmasını ve analizini destekler niteliğe kavuşturulmuştur.

3.4 TTK-YTS Modeli Yakınsamalı Analitik Çözümünün Robot Platformu Üzerinde Doğrulanması

Tork tahrikli ve kayıplı yaylı ters sarkaç (TTK-YTS) modelinin yakınsamalı analitik çözümünün performans analizi daha önce benzetim ortamlarında yapılmış olsa da fiziksel bir robot platformunda ilgili yakınsamalı analitik çözümün doğrulanması model-tabanlı kontrolcülerin geliştirilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu modelin gerçek robot platformu üzerinde doğrulanması hem fiziksel robot için bir parametrik sistem tanılama çalışması olacak hem de model-tabanlı kontrolcü geliştirilmesinin yolunu açarak robot üzerinde uygulayacağımız adaptif kontrolcü testleri için büyük ve önemli bir adım olacaktır.

Fakat fiziksel model doğrulama çalışmalarını anlatmaya başlamadan önce sistem dinamiklerini ve bu dinamiklerin robot üzerinde uygulanabilmesi için geliştirilen yakınsamalı analitik çözüm üzerinde yaptığımız güncellemelerden bahsetmek gerekmektedir. İlk olarak genişletilmiş TTK-YTS modelinin sistem dinamiklerinde yapılan güncellemeler tartışılacaktır.



Şekil 11. Hareket fazları ve geçiş olayları ile birlikte genişletilmiş TTK-YTS modeli

Projede kullanılan sistem modelinin, hareket fazları ve bu fazlar arasındaki geçiş olayları Şekil 11'de detaylı olarak görülebilmektedir. Sistem üzerindeki periyodik hareketlilik, tepe noktası X_n olarak seçilen, belirli Poincaré kesitlerinin dönüş planlarını gözlemleyerek analiz edilmektedir. Modelin hareketi iki temel fazda incelenmektedir. Uçuş fazı robotun havada olduğu sürede geçirdiği zaman olup robotun ağırlık merkezinin dikey hızına göre yükselme ve alçalma olarak adlandırılan iki alt faza ayrılmaktadır. Temas fazı ise robotun topuk kısmının yer ile temas ettiği zaman olarak adlandırılıp, benzer bir şekilde sıkışma ve açılma olarak adlandırılan iki alt faza ayrılmaktadır. Kalça motorundan uygulanan kalça torku sadece temas fazında uygulanmakta ve azalan bir rampa profilini takip edecek şekilde Ankaralı ve Saranlı (2010) da anlatıldığı gibi sınırlanmıştır.

Özgün TTK-YTS modeline ek olarak genişletilmiş model yatay ve dikey uçuş sönümlerini, küçük topuk ağırlığını ve kalkış anındaki topuk-beden çarpışmasını içermektedir. Bu genişletmeler ile birlikte uçuş fazındaki hareket denklemleri

$$\begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_n^f \dot{y} \\ -g - d_v^f \dot{z} \end{bmatrix}$$

formunu almaktadır. Benzer bir şekilde temas fazı denklemleri

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} m\dot{\rho} \\ m\rho^2\dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m\rho\dot{\theta}^2 - mg\cos\theta - k(\rho - \rho_0) - d\dot{\rho} \\ mg\rho\sin\theta + \tau \end{bmatrix}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Yukardaki denklemlerden de görülebileceği üzere temas fazında yatay ve dikey uçuş sönümlerinin etkileri bacak yayı sönümlemesinin baskın etkisi nedeni ile ihmal edilmişlerdir. Bunların dışında modelin dinamiklerine kalkış çarpışması olarak adlandırılan robotun yerden kalktığı anda topuk ve robotun bedeni arasında oluşan ve sistemde küçük salınımlara neden olan çarpışma etkisi de eklenmiştir. Bu çarpışma sistem dinamiklerine anlık bir hız değişimi olarak

$$[\dot{y}^+ \ \dot{z}^+]^T := \frac{m_b}{m_b + m_t} [\dot{y}^- \ \dot{z}^-]^T$$

şeklinde +,- ifadeleri sırasıyla çarpışma sonrası ve çarpışma öncesi olacak şekilde yansıtılmıştır. Topuk ağırlığının sistem üzerindeki etkisi sadece bu noktada hesaplamalara katılmış, diğer tüm analizlerde bacak ağırlığı sıfır olarak kabul edilmiştir.

Robot üzerinde geliştirilmesi planlanan model-tabanlı kontrolcü de bu dinamiklere sahip olan modelin yakınsamalı analitik çözümünü kullanacaktır. Özgün modelden farklı olarak genişletilmiş TTK-YTS modelinde hareket denklemlerine uçuş sönümleri eklenmiştir. Uçuş fazının yatay pozisyon denklemleri

$$y(t) = \frac{\dot{y}_0}{d_h^f} (1 - e^{-d_h^f t}) + y_0$$

olarak elde edilmektedir. y_0 ve \dot{y}_0 sırası ile başlangıç yatay pozisyonu ve başlangıç yatay hızı şeklinde ifade edilmektedir. Benzer bir şekilde dikey pozisyon denklemi

$$z(t) = \frac{g}{(d_v^f)^2} (1 - e^{-d_v^f t} - d_v^f t) + \frac{\dot{z}_0}{d_v^f} (1 - e^{-d_v^f t}) + z_0$$

şeklinde z_0 ve \dot{z}_0 sırası ile başlangıç dikey pozisyonu ve başlangıç dikey hızı olmak üzere ifade edilmektedir. Yatay ve dikey hız denklemleri ise basit türevlemeler ile

$$\dot{y}(t) = \dot{y}_0 e^{-d_h^f t}$$

$$\dot{z}(t) = \dot{z}_0 e^{-d_v^f t} - \frac{g}{d_v^f} (1 - e^{-d_v^f t})$$

olarak türetilmişlerdir.

Genişletilmiş modelin temas fazı dinamikleri için YTS modelinin dinamiklerindeki entegre edilemeyen terimler nedeni ile kesin bir analitik çözüm elde edilememektedir. Benzetim ortamında başarılı olmuş benzer yakınsamalı analitik çözümlerden esinlenerek TTK-YTS modeli içinde benzer bir çözüm üretilmiştir.

Sisteme kalça torku uygulanmadığı zaman, genişletilmiş modelin temas dinamikleri, yaklaşımsal analitik çözümü Saranlı vd., (2010)'da verilmiş, kayıplı YTS modeline dönüşmektedir. Bu çözüm iki ana yaklaşım üzerine kurulmuştur. Bunlardan birincisi bacak üzerinde düşük açısal değişimler olduğunu varsaymakta diğeri ise bacak yayı sıkışmasının küçük oranlarda olduğunu varsaymaktadır. Önerilen varsayımlar eşliğinde model gezinmelerinin ortaya çıkarılabilmesi adına öncelikle çeşitli değerler tanımlanmaktadır. Bu değerlerden başlıcaları: topuk etrafındaki açısal momentum $p_\theta := m\rho^2 \dot{\theta}$, doğal frekans $\hat{\omega}_0^2 := \left(\frac{k}{m}\right)^2 + 3\left(\frac{p_\theta}{m\rho_0^2}\right)^2$, sönümlenmiş frekans $\omega_d := \hat{\omega}_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$ ve zorlayıcı terim $F := -g + \rho_0 \omega_0^2 + 4\rho_0 \omega^2$ olarak verilebilir. Bu tanımların eşliğinde tork uygulanmayan sistem için yakınsamalı analitik çözüm

$$\rho(t) = M e^{-\zeta \hat{\omega}_0 t} \cos(\omega_d t + \phi_1) + F/\hat{\omega}_0^2$$

$$\dot{\rho}(t) = -M \hat{\omega}_0 e^{-\zeta \hat{\omega}_0 t} \cos(\omega_d t + \phi_1 + \phi_2)$$

$$\theta(t) = \theta_{td} + Xt + Y(e^{-\zeta \hat{\omega}_0 t} \cos(\omega_d t + \phi_1 - \phi_2) - \cos(\phi_1 - \phi_2))$$

$$\dot{\theta}(t) = 3\omega - 2\omega F/(\rho_0 \hat{\omega}_0^2) - 2\omega M e^{-\zeta \hat{\omega}_0 t} \cos(\omega_d t + \phi_1)/(\rho_0)$$

şeklinde elde edilebilmektedir. Bu çözümü tamamlamak ve tork uygulama süresini hesaplayabilmek için kalkış zamanını tanımlayan bir denklemi de elde etmemiz gerekmektedir. Kayıplı YTS modelinde kalkış anı beden üzerinde uygulanan net gücün sıfırlandığı an $k(\rho_0 - \rho(t_{lo})) - d \dot{\rho}(t_{lo}) = 0$ olarak belirlenmektedir. Temas anında simetrik hareketi varsayarak $t_{lo} \approx 2t_b$, kalkış zamanı için yaklaşık bir çözüm

$$t_{lo} = (2\pi - \arccos(k(\rho_0 - F/\hat{\omega}_0^2)/(\bar{M}Me^{-\zeta\hat{\omega}_0 2t_b})) - \phi_1 - \phi_3)/\omega_d$$

olarak $\bar{M} := \sqrt{k^2 - 2dk\hat{\omega}_0 \cos\phi_2 + d^2\hat{\omega}_0^2}$ ve $\phi_3 := \arctan((d\hat{\omega}_0 \sin\phi_2)/(d\hat{\omega}_0 \cos\phi_2 - k))$ olacak şekilde bulunabilmektedir.

TTK-YTS modelinde kullanılan tork profili

$$\tau(t) = \begin{cases} \tau_0(1 - \frac{t}{t_f}), & \text{if } 0 \leq t \leq t_f \\ 0, & \text{if } t > t_f \end{cases}$$

olarak t_f hip torkunun kapatılacağı zamanı ve τ_0 başlangıç torkunu belirtecek şekilde sistem için gerekli enerjiyi geri besleyebilmesi için tanımlanmıştır. Sistemimizde azalan rampa profilini kullanmanın üç temel avantajı bulunmaktadır. Bunlardan ilki azalan rampa fonksiyonunun zamana basit fonksiyonel bağımlılığı nedeniyle temas denklemleri ile kolay entegre edilebilmesidir. İkinci avantaj ise t_f tahmini kalkış zamanı şeklinde seçildiği takdirde kalkış anında tork sıfıra ulaşacağından erken kalkış durumundan kaçınılabilmektedir. Son olarak azalan rampa torku yapısı gereğince sistem içinde negatif iş yapmaktan kaçınmayı sağlamaktadır. Ankaralı ve Saranlı, (2010) da yazarlar kalça torkunun sistem üzerindeki etkisinin Saranlı vd., (2010) da sunulan yakınsamalı analitik çözümün anlık açıl momentumuna bir düzeltme olarak

$$p_\theta(t) = p_\theta(0) + \int_0^t \tau(\eta) d\eta + \int_0^t mg\rho(\eta) \sin(\theta) d\eta$$

eklenebileceğini belirtmektedir. Ankaralı ve Saranlı, (2010) da belirtilen yaklaşım açıl momentum üzerindeki sabit bir düzeltme olan

$$\hat{p}_\theta = p_\theta(0) + \Delta p_\tau + \Delta p_g$$

denklemlerine dayanmaktadır. Burada belirtilen Δp_τ ve Δp_g sırası ile kalça torku ve simetrik olmayan yer çekiminin etkisini yakalamak için tanımlanan terimlerdir. Bu düzeltmeler için belirlenen yaklaşık değerler

$$\Delta p_\tau = \frac{1}{t_{lo}} \int_0^{t_{lo}} \left(\int_0^{\eta_1} \tau(\eta_2) d\eta_2 \right) d\eta_1 = \tau_0 \frac{t_{lo}}{3}$$

$$\Delta p_\tau = \frac{mgt_{l_0}}{6} (2\rho_o \sin(\theta_{td}) + \rho_{l_0} \sin(\theta_{l_0}))$$

olarak verilmektedir. Yinelemeli bir şekilde hesaplanan tahmini açısal momentum, p_θ , diğer sistem denklemleri içine eklendiğinde oluşturulan yeni yaklaşımsal analitik çözüm hem kalça torkunun hem de simetrik olmayan adımların etkisini içermektedir.

TTK- YTS modeli için geliştirilen yakınsamalı analitik çözümün tahmin performansını analiz etmemiz gerekmektedir. Bunu gerçekleştirebilmek için ilk olarak sistemin bilinmeyen parametrelerini saptamak için parametrik sistem tanılama yapılmıştır. Şu ana kadar robotun parametreleri dikkatli bir şekilde belirlenip yakınsamalı analitik çözümün tahminsel performansı bağımsız geçerlilik sınaması ile istatistiksel olarak güçlü bir şekilde belirlenmiştir.

İlk olarak robot üzerinde tek-adım testleri denilen beş farklı adımdan oluşan bir bilgi toplama algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmanın başlangıç fazı olarak adlandırılan ilk fazında robot bacak açısını kullanıcı tarafından belirlenen sabit dereceye getirmekte ve robot yere çarpma kadar oransal sabiti $K_p = 537$, integral sabiti $K_i = 2179$, türevsel sabiti $K_d = 705$ olan PID kontrolcü ile yere çarpma öncesi fazına kadar sabit tutulmaktadır. Yere çarpma öncesi fazında PID kontrolcü geri sekmeleri engellemek için devre dışı bırakılmaktadır. Bu aşamada aynı zamanda tork profilinin belirleyebilmek için kalkış zamanı tahmini yapılmaktadır. Üçüncü faz ise robotun yerle temas ettiği ve kalça motoru tarafından belirlenen azalan rampa tork profilini uygulandığı aşamadır. Dördüncü aşamada robot yerden kalkmaktadır ve aynı zamanda yerden kalkma açısı da PID kontrolcü eşliğiyle sabit tutulmaktadır. Beşinci aşama ikinci tepe noktasından sonra başlar ve robotun hızını kesip durdurulmasını sağlamaktadır ve bu aşamadaki bilgiler analiz sırasında kullanılmamaktadır.

Geliştirilen bilgi toplama algoritması ile elde edilen 120 farklı tek adım testi ile parametrik sistem tanımlamasına başlanmıştır. Bu testlerde yükseklik değerleri 0.26 cm ile 0.43 cm arasında değişmekte iken yatay hız değerleri 0.86 m/s ile 2.5 m/s arasında değişmektedir. Benzer bir şekilde kalça torku 3 N ve 8 N arasına bacak açısı ise 10 derece ve 45 derece arasına sınırlandırılmıştır.

Sistem tanımlama işlemine başlamadan önce sistem üzerindeki hata ölçütlerinin tanımlanması gerekmektedir. Bunlar tepe pozisyonu, tepe yatay hızı ve tepe zaman hataları olarak

$$E_p = 100 \frac{\| [z_a \ y_a] - [\hat{z}_a \ \hat{y}_a] \|_2}{\| [z_a \ y_a] \|_2}$$

$$E_v = 100 \frac{\| [\dot{y}_a] - [\dot{\hat{y}}_a] \|_2}{\| [\dot{y}_a] \|_2}$$

$$E_t = 100 \frac{\| [t_a] - [\hat{t}_a] \|_2}{\| [t_a] \|_2}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu hata ölçütlerinin tanımlanması ile birlikte Nelder-Mead simplex methodu (Lagarias vd., 1998) kullanılarak yapılan eniyileme işlemi ile parametrik sistem tanımlama işlemi başlatılmıştır. Bu işlemin amacı beden ağırlığının, topuk ağırlığının, yer çekimi ivmesinin, yay sabitinin, yay sönümlenme katsayısının, uçuş sönümlenme katsayılarının gider fonksiyonunu

$$C = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_p^i\right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_v^i\right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_t^i\right)^2}$$

eniye hale getiren değerlerini bulmaktır. Ancak bütün verinin tamamını kullanmak yerine, 10-katlı bağımsız geçerlilik sınaması uygulanmıştır.

Robotun sistem parametrelerinin tahmini ortalama ve standart devinimleri Tablo 1 de verilmiştir. Bu değerler sistemin fiziksel değerleri ile uyum sağlamaktadır. Tablodan da görülebileceği üzere yer çekimi ivmesi normalde olması gereken $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ değerinden daha yüksek görülmektedir. Bunun nedeni ise sistemin ağırlık merkezinin uzun, karbon fiber boru üzerinde olması nedeni ile robot bedeni normalden daha çok bir yer çekimi ivmesi hissetmesidir.

On-katlı bağımsız geçerlilik sınamasının sonuçlarını temel alan yaklaşımsal analitik çözümün tahminsel performansı

Tablo 2 de gösterilmektedir. Tepe pozisyon, yatay hız ve zaman hatalarının hem eğitim, hemde test sonuçları sunulmuştur. Bu tablodan da görülebileceği üzere pozisyon ve yatay hız üzerinde %5 e yakın hatalar varken, tepe zamanında %3 civarında bir hata değeri görülmektedir. Bu sonuçlar Uyanık vd. (2015) ile uyumlu değerler verse bile TTK-YTS modeli Uyanık vd. (2015) de işlenen tork-tahrirsiz modele göre daha düşük sonuçlar vermektedir. Hatalardaki bu artışın en büyük nedeninin kalça torkunun açılmal momentuma entegrasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Kalça torkunun etkisi üzerine yapılabilecek daha detaylı bir inceleme ile tahmin hatalarının biraz daha azalması sağlanılabilecektir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında model-tabanlı kontrolcüler eşliğinde adaptif kontrolcüsü kullanılarak bu hata oranlarının daha da düşürülebileceği tahmin edilmektedir.

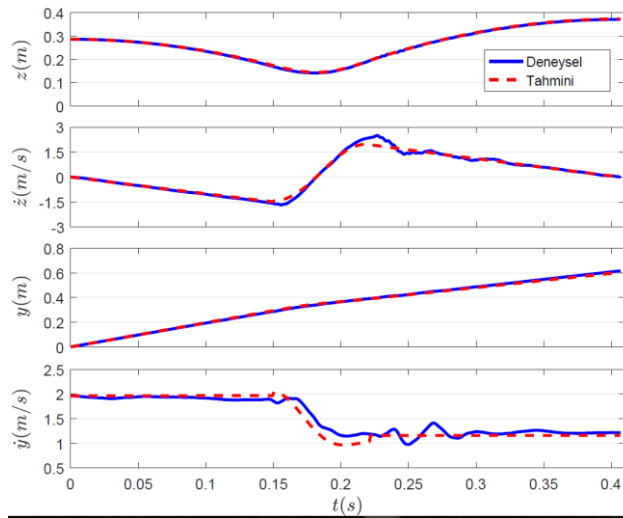
Tablo 1. Genişletilmiş TTK-YTS modeli için bulunan tahmini sistem parametreleri

Tahmini Genişletilmiş TTK-YTS Sistem Parametreleri				
Parametre	Tanım	Ortalama	Std. Sapma	Birim
m_b	Vücut kütlesi	2,1960	$\pm 0,0586$	kg
m_t	Ayak kütlesi	0,0334	$\pm 0,0027$	kg
g	Düzeltilmiş yerçekimi [†]	11,417	$\pm 0,0679$	m/s^2
k	Yay sabiti	4696,0	$\pm 213,50$	N/m
d	Sönüm sabiti	9,8670	$\pm 0,6024$	$N.s/m$
d_h^f	Yatay uçuş sönümlemesi	0,0103	$\pm 0,0111$	$N.s/m$
d_v^f	Dikey uçuş sönümlemesi	0,2270	$\pm 0,0628$	$N.s/m$

Tablo 2. On-katlı bağımsız geçerlilik sınavası yüzde ortalama hataları

Hata ölçütleri	Test verisi	Eğitim verileri
E_p	5,250 \pm 0,549	5,163 \pm 0,173
E_v	5,632 \pm 1,372	5,535 \pm 0,173
E_t	2,929 \pm 0,849	2,894 \pm 0,138

Son olarak Şekil 12'de örnek bir tek-adım testlerinin karşılaştırması görülmektedir. Bu şekilde de görüldüğü üzere yaklaşımsal analitik çözüm gelecek tepe noktası verilerini başarılı bir şekilde tahmin edebilmekte ve aynı zamanda başarılı bir şekilde deneysel gezingeyi de takip edebilmektedir.



Şekil 12. Deneysel tek-adım testleri ve yaklaşımsal analitik çözümlerin karşılaştırması.

3.5 Model Tabanlı Kontrolcü Geliştirilmesi

Bu bölümdeki amacımız daha önce sistem tanılama performansı tek adımlık testlerde doğrulanmış TTK-YTS modeli yakınsamalı analitik çözümü üzerinden model-tabanlı tam-hedef kontrolcülerinin geliştirilmesidir. Bu bağlamda amacımız istenen bir tepe noktası durumu için (belirli bir yükseklik ve yatay hız içeren) her adımda robotun o noktaya ulaşmasını sağlayacak kontrol sinyallerini üreten bir kontrolcü geliştirmektir. Daha önce de bahsedildiği üzere bu projede kalça motorundan uygulanan tork girdisi ve yere çarpma anında sahip olunan bacak açısı kontrol sinyalleri olarak kullanılacaktır.

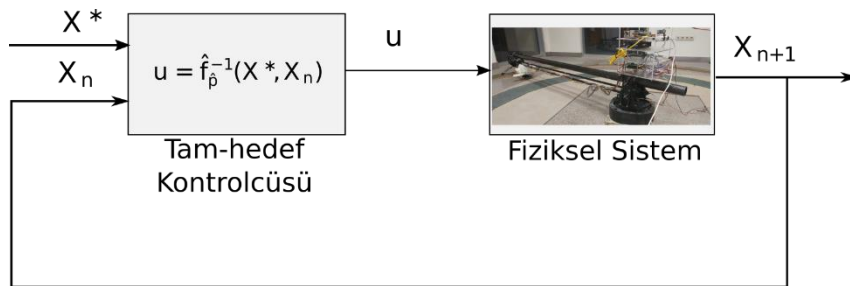
Bölüm 3.4'te robotun belirli bir tepe noktasından bir diğer tepe noktasına olan hareketinin yakınsamalı analitik çözümler kullanılarak matematiksel olarak ifade edilebileceği gösterilmiştir. Bu çerçevede robotun bir tepe noktasından belirli kontrol sinyalleri ile harekete başladığında bir sonraki tepe noktasında ulaşacağı durum aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilmektedir

$$X_{n+1} = \hat{f}_{\hat{p}}(X_n, u).$$

Bu bölümde ise amacımız robotun istenen bir tepe noktasına ulaşmasını sağlayacak kontrol sinyallerinin hesaplanmasıdır. Bu problem yakınsamalı analitik çözümün tersinin alınması suretiyle aşağıdaki şekilde ifade edilebilir

$$u = \hat{f}_{\hat{p}}^{-1}(X_n, X^*).$$

Burada belirtilen $u = [\tau_0^*, \theta_{td}^*]$, $X_n = [\dot{y}_{a_n}, z_{a_n}]$ ve $X^* = [\dot{y}_a^*, z_a^*]$ şeklinde robotun kontrol parametreleri ve durum değişkenleri üzerinden ifade edilebilir. Geliştirilen kontrolcünün eş zamanlı olarak hem enerjinin korunması prensibine bağlı olarak gerekli tork değerini τ_0^* hesaplaması hem de tek boyutlu bir optimizasyon problemi çözümü kullanarak yere değme bacak açısını θ_{td}^* hesaplaması ve böylece istenilen tepe noktası değerleri için gerekli kontrol sinyali olan u vektörünü oluşturması gerekmektedir.



Şekil 13. Tam-Hedef kontrolcüsü sistem diyagramı

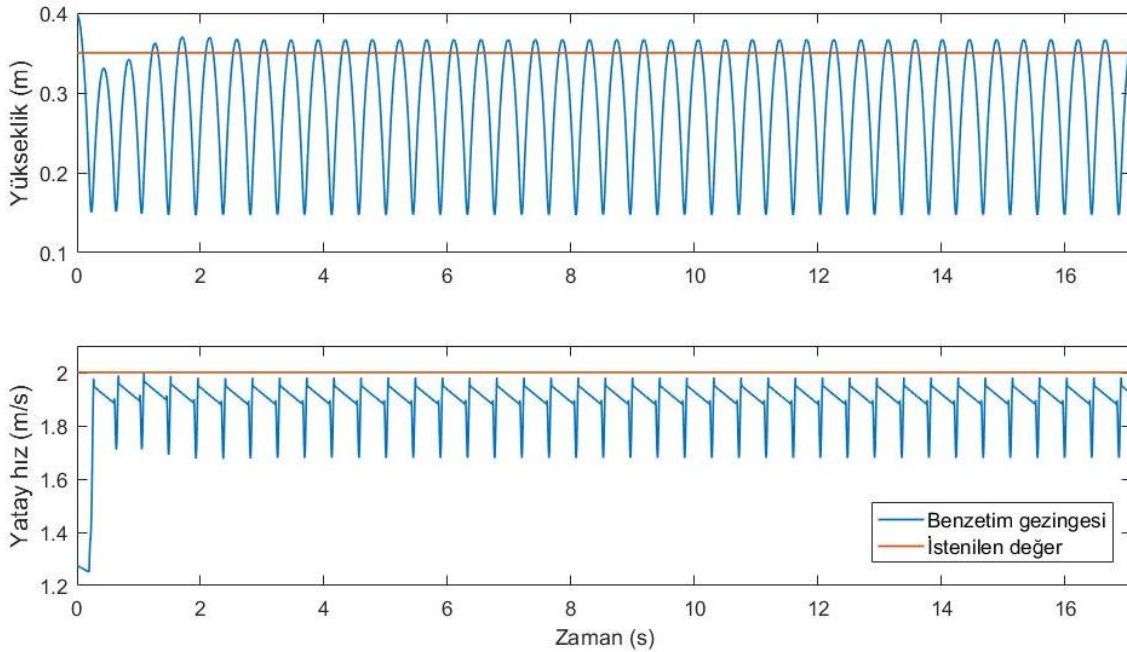
Kontrol sinyallerinin hesaplanması konusunda detay verilmesi gerekirse, öncelikle kullanıcı tarafından dışarıdan belirlenen tepe noktası değerine ulaşmak için gerekli enerji ihtiyacı hesaplanır. Robot koşusunda öncelikli amacımız periyodik bir hareket elde etmek olduğunu için öncelikle sistemin enerjisinin korunması üzerine bir mantık oluşturulmaktadır. Bu nedenle (Ankaralı ve Saranlı, 2010)'da sunulan kontrolcüye benzer bir şekilde kalça motorundan uygulanan tork sisteme gerekli enerji girdisini sağlayan bir kontrol parametresi olarak kullanılmaktadır. Bu enerji ihtiyacı

$$E_{\tau} = \frac{1}{2}m((\dot{y}_a^*)^2 - \dot{y}_a^2) + mg(z_a^* - z_a) + E_{loss}$$

şeklinde hesaplanmakta ve bu ihtiyacı karşılayacak başlangıç torku τ_0 hesaplanmaktadır. İstenilen başlangıç tork değeri bulunduktan sonra, dönüş fonksiyonunda belirli olmayan tek kontrol girdisi yere değme bacak açısı θ_{td} kalmaktadır. Bu sayede tam-hedef kontrolcüsü tek boyutlu bir eniyileme işlemi şeklinde

$$\theta_{td} = \underset{-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}}{\operatorname{argmin}} \left(\dot{y}_a^* - \left(\pi_{\dot{y}_a} \circ \hat{P}(\theta_{td}, [z_a, \dot{y}_a]_n) \right) \right)^2$$

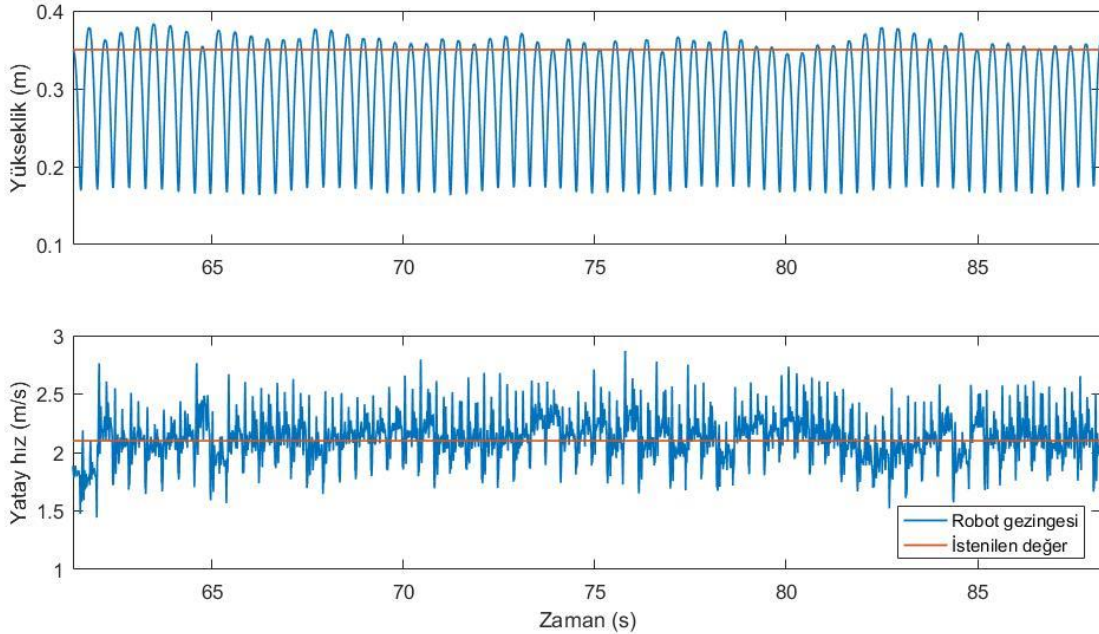
olarak gösterilebilmektedir. Bu formülde belirtilen \hat{P} yaklaşımsal analitik çözümü ve n adım sayısını belirtmektedir. Nelder-Mead Simplex methodu (Lagarias v.d., 1998) kullanılarak eniyileme sonucu elde edilmekte ve bir sonraki adımda ulaşılması istenilen tepe noktası değerlerine ulaşmak için gerekli kontrol girdisi u hesaplanmaktadır.



Şekil 14. Benzetim ortamında uygulanan tam-hedef kontrolcüsünün örnek bir test için sonuçları

Tanımlanmış tam-hedef kontrolcüsü ile benzetim ortamında yapılan testlerin sonuçları Şekil 14'te gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere sistem benzetim ortamında gerçekleşmesine rağmen kalıcı bir takip hatası gözlemlenmektedir. Bu hatanın başlıca nedeni sistem parametrelerinin hassas olarak ölçülmesi durumunda bile ortaya çıkan yakınsama ve kabullenmelerdir. Bu da bu tip yaklaşımlı analitik model çözümleri üzerinden geliştirilen model-tabanlı tam-hedef kontrolcülerinin kullanılması durumunda adaptif kontrolcülerin ne kadar gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

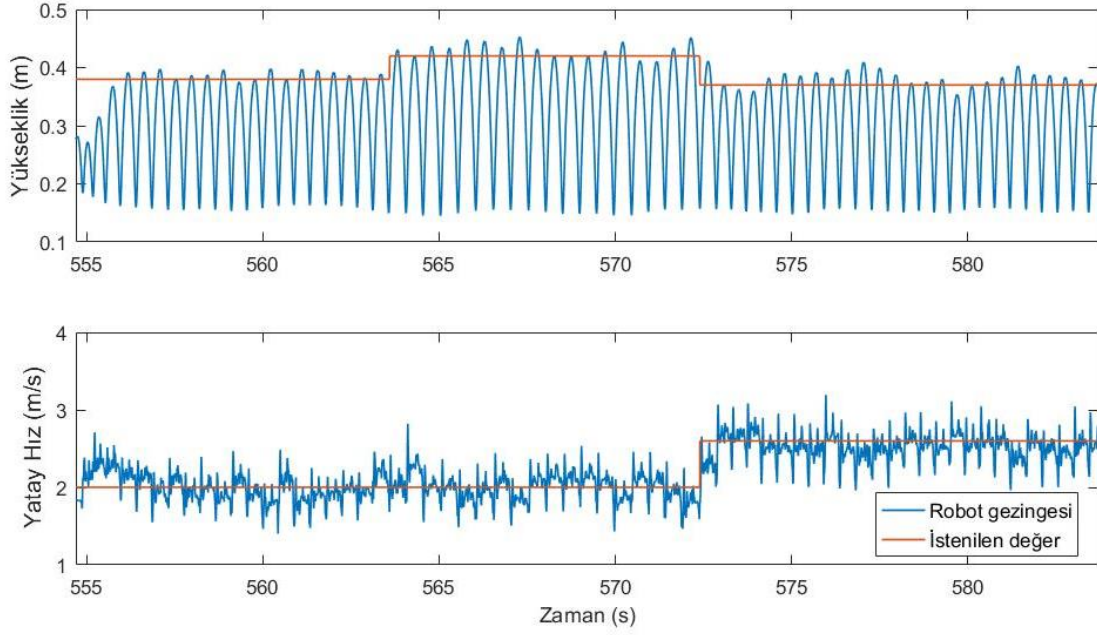
Benzetim ortamında geliştirilen bu kontrolcü altyapısı proje kapsamında yenilenen tek bacaklı zıplayan robot platformuna da başarı ile uygulanmıştır. Robot üzerinde yapılan örnek bir deneyin sonucu Şekil 15'te gösterilmektedir. Bu örnekte istenilen yükseklik 0.35 m ve istenilen yatay hız 2.1 m/s olarak belirlenmiştir ve görülebileceği gibi robot hem yükseklik hem de yatay hız isterine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Yükseklik ve hız verilerindeki hataların olası nedenleri robotun koştuğu zeminin düzgün olmaması, yaklaşımsal analitik çözümün sonucundaki %5 civarındaki pozisyon ve yatay hız kestirim hatası ve son olarak da sistem parametrelerinin tam olarak tahmin edilememesi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 15. Sabit istenilen değerler ile yapılan örnek koşma deneyi (video eki bulunmaktadır)

Bu testlerin ardından kontrolcü mantığının değişken hedef durumları varlığında nasıl bir performans sergilediğini görmek amacıyla Şekil 16'da sonuçları gösterilen deney yapılmış ve robotun kontrol sinyallerinin güncellemesi sayesinde istenen hedeflere doğru bir şekilde ulaştığı gözlemlenmiştir.

Benzetim ortamındaki testlerden farklı olarak gerçek robot üzerinde yapılan deneylerde yukarıda bahsedilen problemler nedeniyle periyodik bir hareket elde edilememektedir. Bu duruma bir çözüm olarak model-tabanlı kontrolcü üzerinde çalışacak ve sistem parametrelerinin çevrimiçi bir şekilde güncellenmesini sağlayacak bir adaptif kontrolcünün kullanılması elzemdir. Bu da projemizde önerilen adaptif kontrolcü yapısının gerekliliğini bir kez daha ortaya koymaktadır.



Şekil 16. Değişken istenilen değerler ile yapılan örnek koşma deneyi

4. Sonuç

Bu proje raporunda yapmış olduğumuz çalışmalar tek bacaklı zıplayan bir robot platformunun model tabanlı adaptif kontrol yöntemleriyle koşma davranışı gerçekleştirilmesi üzerine kurulmuştur. Öncelikle daha önce yaylı ters sarkaç modeli üzerinde geliştirilen adaptif kontrol yönteminin tork-tahrikli ve kayıplı yaylı ters sarkaç modeline uyarlamaları yapılmış ve adaptif kontrolcü mantığının bu model için de yeterince başarılı kontrol performansı sergilediği gösterilmiştir.

Bu çalışmaların fiziksel sistemlerde doğrulanabilmesi adına öncelikle model tabanlı ve yüksek performanslı koşu davranışını destekleyecek bir tek bacaklı zıplayan robot platformunun ortaya çıkarılması gerekmektedir. Bu bağlamda proje çerçevesinde daha önce laboratuvarımızda bulunan tek bacaklı zıplayan robot platformu üzerinde mekanik ve elektronik güncellemeler yapılmış ve robotumuz gerçek zamanlı veri toplama ve işleme yeteneğine sahip, mekanik açıdan kararlı bir yapıya kavuşmuştur.

Ardından literatürde genellikle benzetim ortamlarında doğrulamaları yapılan ancak pratik olarak gerçek robotlar üzerindeki performansları detaylı olarak incelenmemiş matematiksel modeller ve bu modellere ilişkin yakınsamalı analitik çözümler için deneysel doğrulama çalışmaları yürütülmüştür. Bu bağlamda öncelikle tork-tahrikli ve kayıplı yaylı ters sarkaç modeli üzerine geliştirilen bir yakınsamalı analitik çözüm üzerinde geliştirme çalışmaları yapılmış ve bu çözümün gerekli parametrik sistem tanılama çalışmalarının ardından fiziksel robot gezintilerini oldukça hassas bir şekilde ifade edebildiği ortaya konulmuştur.

Projenin son bölümünde deneysel olarak kestirim performansı doğrulanmış yakınsamalı analitik çözümler kullanılarak robotun model-tabanlı koşu davranışını gerçekleştirme sağlanmıştır. Bu noktada farklı testler yapılarak robotun çeşitli hedef değerleri için başarılı ve kararlı bir şekilde koşu davranışını sergilediği gözlemlenmiştir.

5. Gelecekte Yapılacak Çalışmalar

Bu projeden sonra yapılacak ilk çalışmalardan birincisi önerilen adaptif kontrol yönteminin fiziksel sistemde çalıştırılması adına detaylı bir çalışma yürütülerek farklı durumlarda sistem performansının incelenmesi olacaktır. Böylece model-tabanlı olarak periyodığe yakın bir hareket sergileyen robotun istenen enerji seviyelerinde periyodik bir hareket elde etmesi sağlanabilecektir. Ayrıca, değişen sistem parametrelerinin anlık olarak çevrimiçi kestiriminin yapılması robotun farklı ortamlarda ve değişken parametrelili sistemler varlığında da başarılı bir şekilde koşma davranışını gerçekleştirebileceği öngörülmektedir.

İkinci olarak ise her ne kadar proje raporunda detaylı bir şekilde anlatılmasa da aslında adaptif kontrolcü yöntemi tarafından kestirimi yapılan sistem parametrelerinin aynı zamanda yer esnekliği ve sönümlenme katsayısını da içerdiği gerçeğinin üzerine gidilmesidir. Bu noktada aslında robotumuz değişken esnekli yüzeylerde koşması durumunda sistem parametrelerinde bir değişim olmasa bile yer esnekliğinin değişmesi nedeniyle adaptif kontrolcü tarafından kullanılan sistem modelinin parametrelerinde güncellemeler yapmaktadır. Bu nedenle bu çalışmanın devamında değişken yer esnekliğine sahip ortamlarda robotun adaptif kontrolcüyle koşmasını sağlamak üzerine çalışmalar yapılacaktır.

6. Kaynakça

- [Ankaralı ve Saranlı, 2010] Ankaralı, M. M., ve Saranlı, U. (2010). Stride-to-stride energy regulation for robust self-stability of a torque-actuated dissipative spring-mass hopper. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 20(033121).
- [Blickhan ve Full, 1993] Blickhan, R., ve Full, R. J. (1993). Similarity in multilegged locomotion: Bouncing like a monopode. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 173(5):509–517.
- [Dadashzahed vd., 2014] Dadashzahed, B., Vejdani, H.R. ve Hertz, J. (2014) From template to anchor: A novel control strategy for spring-mass running of bipedal robots. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2566-2571.
- [Feng vd., 2015] Feng, S., Xinjilefu, X., Atkeson, C.G., ve Kim, J. (2015) Optimization based controller design and implementation for the atlas robot in the darpa robotics challenge finals. *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 1028-1035.
- [Farley ve Ferris, 1998] Farley, C.T., ve Ferris, D.P. (1998). Biomechanics of walking and running: Center of mass movements to muscle action. *Exercise and Sport Science Reviews*, 26:253-283
- [Geyer vd., 2005] Geyer, H., Seyfarth, A., and Blickhan, R. (2005). Spring-mass running: simple approximate solution and application to gait stability. *Journal of Theoretical Biology*, 232(3):315–328.
- [Hamzaçebi ve Morgül, 2017] Hamzaçebi, H., ve Morgül, Ö. (2017). On the periodic gait stability of a multiactuated spring-mass hopper model via partial feedback linearization. *Nonlinear Dynamics*, 1-20.
- [Holmes, 1990] Holmes, P. (1990) Poincaré, celestial mechanics, dynamical-systems theory and "chaos". *Physics Reports*, 193(3):137-163.
- [Hu vd., 2015] Hu, C.-J., Huang, C.-K., ve Lin, P.-C. (2015). A torque-actuated dissipative spring loaded inverted pendulum model with rolling contact and its use as the template for design and dynamic behavior generation on a hexapod robot. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 5177-5183
- [Lagarias vd., 1998] Lagarias, J.C., Reeds, J.A., Wright, M.H., ve Wright, P.E. (1998). Convergence properties of the Nelder–Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on Optimization*, 9(1):112-147

- [Martin vd., 2017] Martin, W.C., Wu, A. ve Geyer, H. (2017). Experimental evaluation of deadbeat running on the atrias biped. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2):1085-1092
- [Poulakakis ve Grizzle, 2009] Poulakakis, I., ve Grizzle, J.W. (2009). The spring loaded inverted pendulum as the hybrid zero dynamics of an asymmetric hopper. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(8):1779-1793
- [Raibert, 1986] Raibert, M. (1986). *Legged robots that balance*. MIT Press series in artificial intelligence. MIT Press, Boston.
- [Raibert vd., 2008] Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G. ve Playter, R. (2008). Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *{IFAC} Proceedings Volumes*, 41(2):10822-10825
- [Saranlı vd., 2010] Saranlı, U., Arslan, Ö., Ankaralı, M. M., and Morgül, Ö. (2010). Approximate analytic solutions to non-symmetric stance trajectories of the passive spring-loaded inverted pendulum with damping. *Nonlinear Dynamics*, 62(4):729–742.
- [Schwind ve Koditschek, 2000] Schwind, W. J., ve Koditschek, D. E. (2000). Approximating the stance map of a 2-dof monoped runner. *Journal of Nonlinear Science*, 10:533–568.
- [Seipel ve Holmes, 2007] Seipel, J., ve Holmes, P. (2007). A simple model for clock-actuated legged locomotion. *Regular and Chaotic Dynamics*, 12(5):502–520.
- [Seok vd., 2013] Seok, S., Wang, A., Chuah, M.Y., Otten, D., Lang, J. ve Kim, S. (2013) Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3307-3312.
- [Shahbazi vd, 2015] Shahbazi, M., Babuska, R., ve Lopez, G.A.D. (2015). Analytical approximation for the double-stance phase of a walking robot. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 5754-5760.
- [Shahbazi vd, 2016] Shahbazi, M., Babuska, R., ve Lopez, G.A.D. (2016). Unified modeling and control of walking and running on the spring-loaded inverted pendulum. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(5):1178-1195.
- [Shen ve Seipel, 2012] Shen, Z., ve Seipel, J. (2012). A fundamental mechanism of legged locomotion with hip torque and leg damping. *Bioinspiration & Biomimetics*, 7(4):046010

- [Uyanık vd., 2015] Uyanık, İ., Morgül, Ö., and Saranlı, U. (2015). Experimental validation of a feed-forward predictor for the spring-loaded inverted pendulum template. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(1):208–216.
- [Uyanık vd., 2011] Uyanık, İ., Saranlı, U., and Morgül, Ö. (2011). Adaptive control of a spring-mass hopper. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2138 –2143.
- [Yu vd., 2012] Yu, H., Li, M., Wang, P., ve Cai, H. (2012). Approximate perturbation stance map of the SLIP runner and application to locomotion control. *Journal of Bionic Engineering*, 9(4):411-422.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. ÖMER MORGÜL
Proje No:	215E050
Proje Başlığı:	Adaptif Kontrol Yöntemiyle Bacaklı Robotlarda Yüksek Performanslı Koşma Davranışı Geliştirilmesi
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	ULUÇ SARANLI
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İHSAN DOĞRAMACI BİLKENT Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/03/2016 - 01/03/2017
Onaylanan Bütçe:	30000.0
Harcanan Bütçe:	29729.43
Öz:	<p>Model tabanlı ve dinamik kararlılığa ihtiyaç duyan bacaklı yürüme ve koşma davranışlarının fiziksel robotlarda gerçekleşmesi statik kararlılık özelliğine sahip davranışlara göre oldukça zordur. Bu zorluğun temel nedenlerinden birisi ilgili dinamiklerin sistem parametrelerine hassas bağımlılık göstermesidir. Bu parametrelerin hassas bir şekilde ölçülememesi ve malzeme yorulması veya aşırı kullanım nedeniyle zamanla değişim göstermesi de problemi daha da kötü bir hale getirmektedir.</p> <p>Bu çalışmanın temel amacı tek bacaklı zıplayan bir robot platformu için çevrimiçi parametre kestirimi yaparak model-tabanlı yüksek performanslı koşu davranışını destekleyen bir adaptif kontrolcü yapısı ortaya koymaktır. Aslında daha önceki çalışmalarımızda benzetim ortamlarında basit Yaylı Ters Sarkaç (YTS) modeli için çevrimiçi parametre kestirimi yaparak kalıcı hal takip hatalarını gideren bir adaptif kontrolcü geliştirilmiştir. Bu noktada amacımız öncelikle bu adaptif kontrolcü yapısının Tork-Tahrikli ve Kayıplı Yaylı Ters Sarkaç (TTK-YTS) modeline uyarlanmasını sağlamak ve ardından geliştirilen adaptif kontrolcü yapısının test edilebileceği tek bacaklı zıplayan robot platformunu ortaya koymaktır.</p> <p>Bu amaçla öncelikle daha önce laboratuvarımızda geliştirmiş olduğumuz tek bacaklı zıplayan robot platformu üzerinde yüksek performanslı koşma davranışını destekleyecek mekanik ve elektronik revizyonlar yapılmıştır. Daha sonra öncelikle TTK-YTS modeli için geliştirilen bir yakınsamalı analitik çözümün gerçek robot verileri üzerinde doğrulanması yapılmıştır. Bu amaçla robotun tek adımlık testleri üzerinden veri toplanmış, ardından bu matematiksel model için parametrik sistem tanılaması yapılarak robot parametrelerinin kestirimi sağlanmıştır. Bu modelin robot gezintilerini ne kadar iyi tahmin ettiği fiziksel testler aracılığıyla detaylıca gösterilmiştir.</p> <p>Projenin son aşamasında, fiziksel olarak doğrulanmış yakınsamalı analitik çözüm kullanılarak robotun istenen hız ve yükseklikte koşmasını sağlayacak model-tabanlı tam hedef kontrolcü yapısı geliştirilmiştir. Bu kontrolcünün robot üzerindeki performansı farklı deneylerle incelenmiş ve bu şekilde robotun başarılı bir biçimde koşması sağlanmıştır. Böylece projemizde bir sonraki safhaya geçebilmek amacıyla robotumuz revize edilmiş ve daha önce benzetim ortamlarında doğrulanması yapılmış birçok çalışmamız deneysel olarak da doğrulanmıştır. Projenin bitimini takiben adaptif kontrolcü yapılarının robot üzerinde detaylı incelenmesine başlanacaktır.</p>
Anahtar Kelimeler:	bacaklı hareketlilik, adaptif kontrol, model-tabanlı kontrol, deneysel doğrulama
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır