

Asılı Sarkaç Yapıların Aktif Döner Atalet Sistemi ile Salınım Titreşim Kontrolü

Vibration Control of Suspended Pendulum Structures Using Active Rotational Inertia Systems

Doğan Yıldırım¹, Serkan Zeren¹

¹Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli
doganiss36@gmail.com
serkan.zeren@kocaeli.edu.tr

Özetçe

Doğal felaketler karşısında yapıların güvenliğini sağlama, büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda, aktif, yarı aktif ve pasif yapısal kontrol yöntemleri, bu tür yapıların güvenliği için kullanılmaktadır. Sismik yükler, yapılarda hasara hatta can kaybına yol açabilen önemli bir tehdittir. Bu bağlamda, sismik yükler altında yapının davranışını modellemek için asılma noktası ivmelenen bir sarkaç modeli kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, ARID (Active Rotary Inertia Driver) sistemi sayesinde yapının modeli olan sarkacın sismik yükler altında yaptığı salınım açısının kontrolüdür. Söz konusu kontrol, kayan kipli kontrol yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ARID sistemi ve kayan kipli kontrol için farklı parametre değerleri kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmaları sonucunda kayan kipli kontrol kullanılarak ARID sisteminin sarkacın salınım açısını başarılı bir şekilde azalttığı görülmüştür.

Abstract

Ensuring the safety of structures in the face of natural disasters is of great importance. In recent years, active, semi-active and passive structural control methods have been used for the safety of such structures. Seismic loads are an important threat that can cause damage to structures and even loss of life. In this context, a suspended point accelerated pendulum model was used to model the behavior of the structure under seismic loads. The aim of this study is to control the swing angle of the pendulum, which is the model of the structure, under seismic loads, using the ARID (Active Rotary Inertia Driver) system. The control in question is achieved through the implementation of a sliding mode control method. Simulation studies were carried out using different parameter values for the ARID system and sliding mode control. As a result of the simulation studies, it was seen that the ARID system successfully reduced the swing angle of the pendulum by using the sliding mode control.

1. Giriş

Köprü ve bina gibi yapıların güvenliğini sağlama problemi, uzun süredir önemli bir mühendislik görevidir. Geleneksel olarak, çevresel yükler altında yapı güvenliği sağlamak için kütlelerin, dayanıklılığın ve rijitliğin artırılmasıyla sağlanmıştır[1].

Son yıllar içerisinde yapısal kontrol yöntemleri büyük bir ölçüde gelişmiştir. Bu cihazlar genellikle yeni aktif, pasif ve yarı-aktif kontrol teknolojilerinden faydalanmaktadır[2],[3].

Sismik yükler, binalarda ve diğer yapılarda önemli hasara veya yıkıma neden olabilir. Bu nedenle binaların depreme dayanıklılığı önemlidir. Genelde yapıların sismik yükler altında davranışını modellemek için asılı sarkaç sistemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, sabit bir yapıya asılı sarkaç sistemi üzerinde ARID sistemi kullanılarak, sarkaç açısının kontrolü hedeflenmiştir. Önceki çalışmalar, sarkaçların açı kontrolü için farklı yöntemler önermiştir. Kontrol teorisi, sarkaç sistemi üzerinde açı kontrolü için kullanılabilir pek çok yöntem sunmaktadır. Bu yöntemler arasında, PID kontrolü [4], Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) kontrolü [5], Adaptif (Adaptive) kontrol [6] ve Kayan kipli kontrol (SMC) [7] gibi yöntemler yer almaktadır.

PID kontrolü, açılma hata ve hız hatalarını ölçerek, bir kontrol sinyali oluşturur[4]. Bu yöntem basit ve etkilidir, ancak sarkaç sisteminin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle yetersiz kalabilir. Bulanık Mantık kontrolü, belirsizliklerin olduğu durumlarda daha etkili bir kontrol yöntemi olabilir[5]. Adaptif kontrol, sarkaç sisteminin dinamik özelliklerini öğrenerek, bu özelliklere uygun bir kontrol sinyali üretir[8]. Ancak, sistem parametrelerinin değişkenliği nedeniyle bu yöntemler yetersiz kalabilirler.

SMC yöntemi, bir eşiği takip ederek, belirli bir hedef değeri yakalamayı amaçlar. Bu yöntem, doğrusal olmayan sistemlerde ve belirsizliklerin olduğu durumlarda da etkili bir kontrol yöntemidir[9].

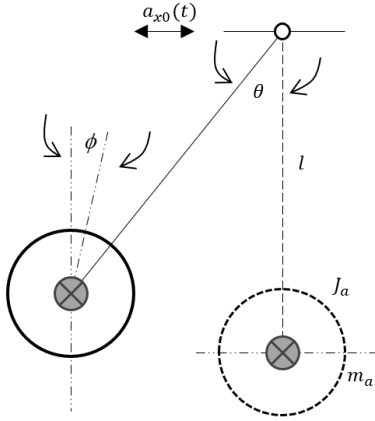
Bu çalışmada, sabit bir yapıya asılı sarkaç sistemi üzerinde, ARID sistemi kullanılarak SMC yöntemiyle sarkaç açısı kontrol edilecektir. Sarkaç sistemine uygulanan deprem verileri, sarkacın açısındaki değişimi tetiklemiştir. SMC yöntemi, ARID sistemi kontrolü altında kullanılmış ve sarkacın stabilitesi sağlanmıştır. Bu çalışma, deprem dayanıklılığı konusunda yapılan aktif kontrol araştırmalarına katkı sağlayabilecek önemli bulgular sunmaktadır.

2. Matematiksel Model

İncelenen yapı Şekil 1'de gösterilen asılı bir sarkaç sistemi olarak modellenmiştir. Daha sonra ARID sistemiyle beraber basitleştirilmiş bir matematik modeli geliştirilmiştir. Model, genelleştirilmiş koordinatlar olarak kullanılan iki serbestlik derecesine sahiptir: yapısal salınım açısı θ ve yer tabanına göre

kütle ataleti görelî dönme açısı ϕ . Asılı yapının uzunluğu l olarak belirlenmiştir. Asılı parçacığın kütlesi m ve yapısal sönümlenme katsayısı c 'dir. ARID sisteminin döner atalet kütlesi m_a , döner atalet momenti J_a , döner katılık katsayısı ve sönümlenme katsayısı c_a şeklinde ifade edilmektedir. Asılı yapının taşıma noktasındaki ivmesi yani sismik bozucu etki $a_{x0}(t)$ ve kontrol torqu $M_a(t)$ olarak tanımlanmaktadır. Modelin hareket denklemleri, Lagrange denklemleri kullanılarak türetilmiştir.

Lagrange yöntemi, sistemin toplam kinetik ve potansiyel enerjisi bilindiğinde uygulanabilen bir analiz yöntemidir. Kinetik ve potansiyel enerjileri bulabilmek için, sistemin konum ve hız denklemleri elde edilmelidir.



Şekil 1: Sadeleştirilmiş model

Tüm sistemin kinetik enerjisi T ve potansiyel enerjisi V şu şekilde ifade edilebilir:

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} ml^2 + m_a l^2 \right) \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_a \dot{\phi}^2 \quad (1)$$

$$V = \left(\frac{m}{2} + m_a \right) gl (1 - \cos \theta) + \frac{1}{2} k_a (\phi - \theta)^2 \quad (2)$$

Tüm sistemin Lagrange fonksiyonu L şu şekildedir:

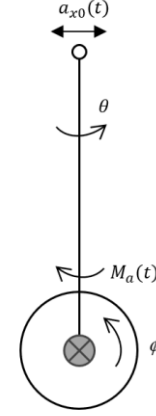
$$L = T - V$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} ml^2 + m_a l^2 \right) \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_a \dot{\phi}^2 \quad (3)$$

$$- \left(\frac{m}{2} + m_a \right) gl (1 - \cos \theta) - \frac{1}{2} k_a (\phi - \theta)^2$$

L'nin her bir genelleştirilmiş koordinata göre kısmi türevi şu şekildedir:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = - \left(\frac{m}{2} + m_a \right) gl \sin \theta + k_a (\phi - \theta) \quad (4)$$



Şekil 2: Aktif Döner Atalet Sürücü sisteminin taslak diyagramı

$$\frac{\partial L}{\partial \phi} = -k_a (\phi - \theta) \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = \left(\frac{1}{3} ml^2 + m_a l^2 \right) \dot{\theta} \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} = J_a \dot{\phi} \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = \left(\frac{1}{3} ml^2 + m_a l^2 \right) \ddot{\theta} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) = J_a \ddot{\phi} \quad (9)$$

Genelleştirilmiş kuvvetin enerjisi şu şekilde ifade edilebilir[10]:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \quad (10)$$

$$W_1 = -c_a (\dot{\phi} - \dot{\theta}) (\phi - \theta) \quad (11)$$

$$W_2 = -c \dot{\theta} \quad (12)$$

$$W_3 = M_a(t) (\phi - \theta) \quad (13)$$

$$W_4 = - \left(\frac{m}{2} + m_a \right) a_{x0}(t) l \sin \theta \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \delta W &= \delta W_1 + \delta W_2 + \delta W_3 + \delta W_4 = -c_a (\dot{\phi} - \dot{\theta}) (\delta \phi - \delta \theta) \\ &\quad - c \dot{\theta} \delta \theta + M_a(t) (\delta \phi - \delta \theta) - \left(\frac{m}{2} + m_a \right) a_{x0}(t) l \cos \theta \delta \theta \\ &= \left[-c_a (\dot{\phi} - \dot{\theta}) + M_a(t) \right] \delta \phi + \end{aligned} \quad (15)$$

$$\left[c_a (\dot{\phi} - \dot{\theta}) - c \dot{\theta} - M_a(t) - \left(\frac{m}{2} + m_a \right) a_{x0}(t) l \cos \theta \right] \delta \theta$$

(4), (5), (8), (9), (15) denklemleri Lagrange denklemlerinde yerine konulursa:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \frac{\partial W}{\partial \theta} \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} = \frac{\partial W}{\partial \phi} \quad (17)$$

Aşağıdaki hareket denklemleri denklemler elde edilir:

$$\left(\frac{1}{3}ml^2 + m_a l^2\right)\ddot{\theta} + \left(\frac{m}{2} + m_a\right)gl \sin \theta - k_a(\phi - \theta) = c_a(\dot{\phi} - \dot{\theta}) - c\dot{\theta} - M_a(t) - \left(\frac{m}{2} + m_a\right)a_{x0}(t)l \cos \theta \quad (18)$$

$$J_a \ddot{\phi} + k_a(\phi - \theta) = -c_a(\dot{\phi} - \dot{\theta}) + M_a(t) \quad (19)$$

Denklem (18) ARID sistemin sönümlenme kuvveti, burulma direnci ve aktif kontrol torku arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu çalışmada sönümlenme kuvveti ve burulma direnci ihmal edilmiştir. Bu nedenle sistem denklemi şu şekilde sadeleştirilebilir:

$$\left(\frac{1}{3}m + m_a\right)l^2\ddot{\theta} + \left(\frac{m}{2} + m_a\right)gl \sin \theta = -c\dot{\theta} - M_a(t) - \left(\frac{m}{2} + m_a\right)a_{x0}(t)l \cos \theta \quad (20)$$

$$J_a \ddot{\phi} = M_a(t) \quad (21)$$

3. Kontrolcü Tasarımı

Kayan kipli kontrol (SMC), doğrusal olmayan sistemlerde gürbüz ve hassas kontrol elde etmede etkili bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bu kontrol yöntemi, değişken koşullarda sistemin istenilen performansı göstermesini sağlamak için kullanılan bir geri besleme mekanizmasıdır. SMC'nin çeşitli formları arasında, birinci dereceden kayma modu kontrolü geniş uygulama alanına sahip etkili bir yaklaşım olarak öne çıkar.

Birinci dereceden kayan kipli kontrolünün özü, kontrol sisteminin davranışını belirleyen kayma yüzeyinin tasarımında yatmaktadır. Kayma yüzeyi, sistemin izlemesi için ideal bir yol sağlar ve bu yüzey, bozulma durumunda istenen performansı sağlar.

Birinci dereceden kayan kipli kontrol genellikle şu şekilde ifade edilir:

$$e = x - x_{DES} \quad (22)$$

$$\sigma = \dot{e} + pe = \dot{x} - \dot{x}_{DES} + p(x - x_{DES}) \quad (23)$$

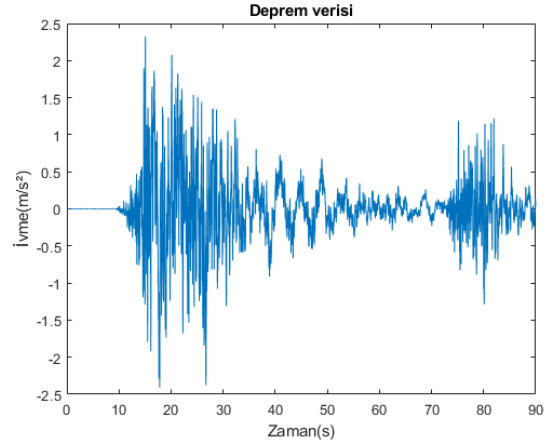
$$u = -k \text{sign}(\sigma) \quad (24)$$

Denklem (22) takip hatasıdır, gerçek durum (x) ile hedeflenen durum (x_{DES}) arasındaki farkı ifade eder. σ kayan yüzey, u ise kontrol girişidir.

Kayma yüzeyi denklemi, kontrol sisteminin sağlamlığı ve kararlılığının sağlanmasında önemli bir rol oynar. Birinci dereceden SMC, kayma kipi kavramını kullanarak sistem dinamiklerini kayma yüzeyine yönlendirir ve sistem yörüngesini iyi tanımlanmış bir bölge içinde tutar. Bu özellik, kontrol sisteminin dikkate değer bozucu reddetme yetenekleri ve gelişmiş takip doğruluğu sağlamasına olanak tanır[9].

4. Benzetim Sonuçları

Benzetim sonuçlarında kullanılan ve Şekil 3'te yer alan bozucu etki, 17 Ağustos 1999 Gölcük depremi ivme verisi olarak bilinen veri setinden sağlanmıştır [11].



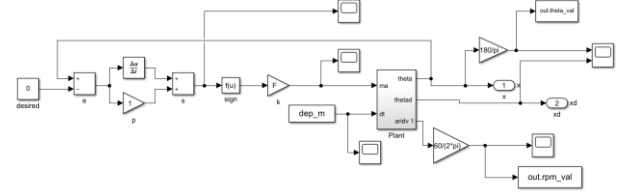
Şekil 3: Deprem ivme grafiği

Benzetim sonuçlarında kullanılan fiziksel parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Simülasyonda kullanılan değerler

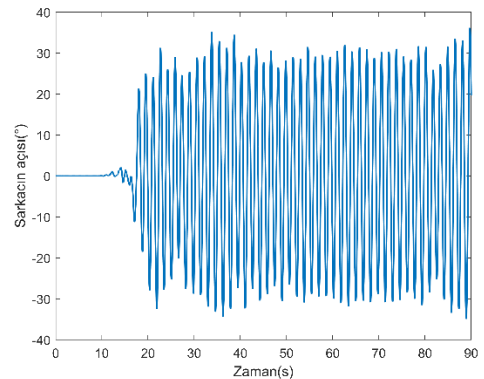
Sembol	Değer	Birim	Açıklama
m	0.2368	kg	Sarkacın kütlesi
m_a	0.5	kg	Disklin kütlesi
l	0.65	m	Sarkacın uzunluğu
J_a	3.01e-05	kgm ²	Disklin atalet momenti

Simülasyon, MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, Şekil 4'te Simulink modeli gösterilmektedir.



Şekil 4: Simulink modeli

Şekil 5, sisteme kayan kipli kontrol uygulanmadığında, yalnızca deprem yükü altında sistemin cevabını göstermektedir.

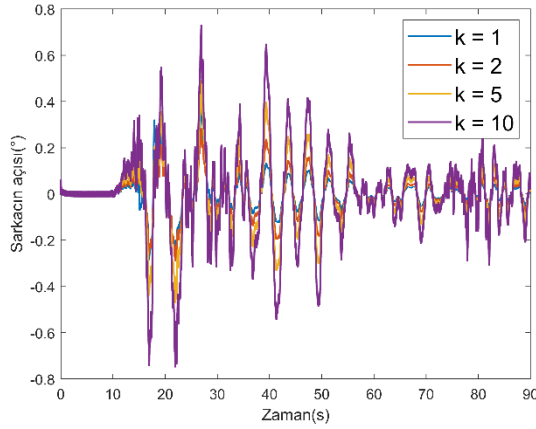


Şekil 5: Kontrolsüz sistem cevabı

Şekil 5'te görüldüğü gibi kontrolsüz durumda salınım açıları 30°'ye kadar çıktığı görülmektedir.

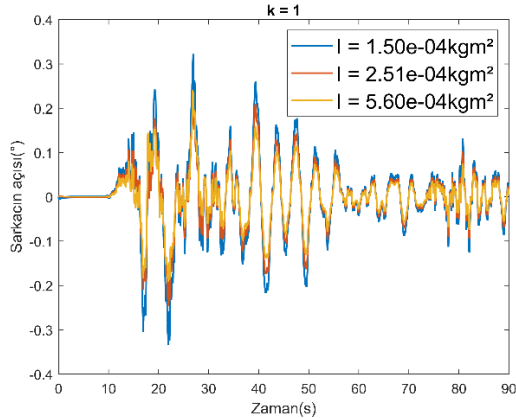
Kontrol girişinde yer alan k değerinin farklı değerlerle uygulandığı benzetim sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.

Birinci dereceden kayan kipli kontrol, aktif döner atalet sürücüye sahip bir salınım sistemine uygulandığında, yüksek kontrol kazancı (k) ve deprem bozulmasıyla birlikte çatırtı (chattering) ortaya çıkabilir. Şekil 6'ya dayanarak, en uygun k değeri seçilebilir.

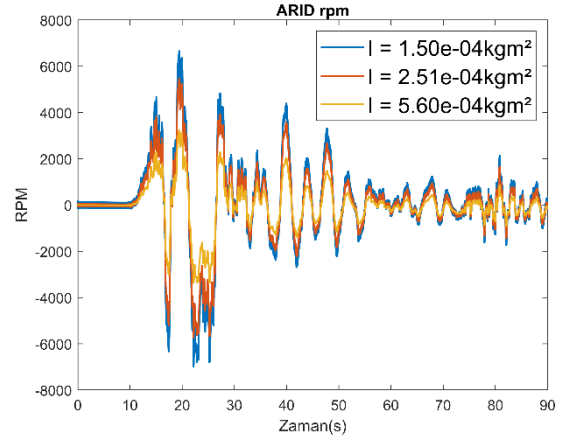


Şekil 6: Farklı k değerleri için sarkaç açısı

Şekil 7 ve Şekil 8, Şekil 6'dan seçilen en uygun k değerine göre, ARID sisteminde kullanılan diskin farklı atalet momentlerine bağlı olarak sarkaç açısını ve diskin devir sayısını (RPM) göstermektedir. Grafikler, diskin atalet momentinin ne kadar büyük olduğuna bağlı olarak, hem diskin daha az RPM ile döndüğünü hem de sistemi düşük atalet momentlerine göre daha iyi bir şekilde kontrol ettiğini göstermektedir.



Şekil 7: Farklı atalet momentleri için sarkaç açısı ($k=1$)



Şekil 8: Farklı atalet momentleri için diskin RPM değerleri

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, sabit bir yapıya asılı sarkaç sistemi üzerinde ARID sistemi kullanılarak kayan kipli kontrol (SMC) yöntemiyle sarkaç açısının kontrolünün başarıyla sağlandığı görülmüştür. SMC yöntemi, belirsiz sistemlerin ve dış etkilerin etkisini tolere etme yeteneği sayesinde güçlü bir performans sergilemiştir. Kontrolcü tasarımında kullanılan SMC yöntemi, karmaşık sistemlerde etkili bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Benzetim sonuçları, çalışmada kullanılan deprem verisiyle elde edilmiştir. Kontrol girişindeki k değerinin farklı değerlerle uygulanması sonucunda, birinci dereceden kayan kipli kontrolün çatırtı (chattering) oluşturabileceği gözlemlenmiştir. En uygun k değeri seçilerek istenilen performans elde edilebilir.

Sonuçlar ayrıca, diskin atalet momentinin artmasıyla sarkaç açısının azaldığını ve daha yüksek atalet momentine sahip disklerin daha iyi kontrol sağladığını göstermiştir.

Bu çalışma, yapısal kontrolcü tasarımında SMC yönteminin etkili bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. Sarkaç açısının kontrolü ile depreme dayanıklı daha güvenilir yapıların elde edilmesi mümkündür. Çalışmada ortaya koyulan bulgular, yapısal kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve deprem dayanıklılığına yönelik araştırmalara katkı sağlamaktadır.

Kaynakça

- [1] T. Soong, *Active Structural Control: Theory and Practice*. London: Longman Scientific & Technical, 1990.
- [2] W. Shi, L. Wang, and Z. Lu, "Study on self-adjustable tuned mass damper with variable mass," *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 25, no. 3, p. e2114, Mar. 2018, doi: 10.1002/stc.2114.
- [3] V. Gattulli, F. Potenza, and B. F. Spencer, "Design criteria for dissipative devices in coupled oscillators under seismic excitation," *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 25, no. 7, p. e2167, Jul. 2018, doi: 10.1002/stc.2167.
- [4] Y. Y. Lim, C. L. Hoo, and Y. M. Felicia Wong, "Stabilising an Inverted Pendulum with PID Controller," *MATEC Web Conf.*, vol. 152, p. 02009, Feb. 2018, doi: 10.1051/mateconf/201815202009.
- [5] A. Jain, D. Tayal, and N. Sehgal, "Control of Non-Linear Inverted Pendulum using Fuzzy Logic Controller," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 69, no. 27, pp.

7–11, May 2013, doi: 10.5120/12141-8278.

- [6] A. A. M. Hakim and I. M. H. Sanhoury, “Adaptive Control for x Inverted Pendulum Utilizing Gain Scheduling Approach,” in *2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, IEEE, Aug. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCCEEE.2018.8515839.
- [7] O. Jedda, J. Ghabi, and A. Douik, “Sliding Mode Control of an Inverted Pendulum,” 2017, pp. 105–118. doi: 10.1007/978-981-10-2374-3_6.
- [8] S. Ozcelik, J. DeMarchi, H. Kaufman, and K. Craig, “Control of an Inverted Pendulum Using Direct Model Reference Adaptive Control,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 30, no. 6, pp. 585–590, May 1997, doi: 10.1016/s1474-6670(17)43427-6.
- [9] V. I. Utkin, “Survey Paper: Variable Structure Systems with Sliding Modes,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 22, no. 2, pp. 212–222, Apr. 1977, doi: 10.1109/TAC.1977.1101446.
- [10] C. Zhang and H. Wang, “Swing vibration control of suspended structures using the Active Rotary Inertia Driver system: Theoretical modeling and experimental verification,” *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 27, no. 6, Jun. 2020, doi: 10.1002/stc.2543.
- [11] “Strong Motion Center.”
<https://www.strongmotioncenter.org/>