

LuGre Sürtünme Giderme Yönteminin Ataletsel Stabilize Elektro-Optik Sistemlerde Kontrol Performansına Etkisi

Effect of LuGre Friction Compensation Method on Control Performance for Inertial Stabilized Electro-Optical Systems

Serhat Sisu¹, Erhan Poyrazoğlu², Murat Kalkan³

¹ASELSAN MGEO, 06172, Ankara

ssisu@aselsan.com.tr

²ASELSAN MGEO, 06172, Ankara

epoyrazoglu@aselsan.com.tr

³ASELSAN MGEO, 06172, Ankara

mkalkan@aselsan.com.tr

Özetçe

Bu çalışmada ataletsel stabilize elektro-optik gımbal sistemlerinde stabilizasyon performansını limitleyen en önemli faktörlerden biri olan sürtünme etkisinin giderilerek referans takip ve stabilizasyon performansının iyileşmesi amaçlanmaktadır. Sürtünme etkisini gidermek için gelişmiş bir model olarak kabul gören LuGre sürtünme modeli tercih edilmiştir. Gımbalın yan eksen LuGre sürtünme modelinin parametreleri sistem üzeri yapılan testler sonucunda bulunmaktadır. Kapalı çevrim ataletsel hız döngüsüne ileribesleme olarak eklenen LuGre sürtünme modeli ile elektro-optik gımbal sistemi üzerinde testler gerçekleştirilmiş ve kapalı çevrim referans takip ve stabilizasyon performans sonuçları karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Yapılan testler sonucunda LuGre sürtünme giderme yöntemiyle daha yüksek kapalı çevrim takip performansı ve stabilizasyon performansı elde edilmiştir.

Abstract

In this study, it is aimed to improve reference tracking and stabilization performance by compensating the friction effect which is one of the most important factors that limiting stabilization performance in inertial stabilized electro-optical gımbal systems. LuGre friction model which is accepted as an advanced model was preferred to compensate the friction effect. The parameters of the LuGre friction model of the azimuth axis of the gımbal are found as a result of the tests on the system. The LuGre friction model added as feedforward to the closed loop inertial rate loop was implemented on the electro-optical gımbal system, and performance results of the closed loop reference

tracking and stabilization were compared and discussed. As a result of the tests, higher closed-loop tracking performance and stabilization performance were obtained with the LuGre friction compensation method.

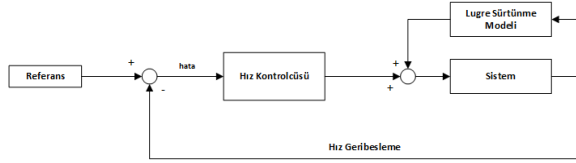
1. Giriş

Sürtünme iki hareketli yüzeyin bağıl hareketine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır [1]. Sürtünme ataletsel stabilize elektro-optik sistemler için stabilizasyon performansını limitleyen en önemli etmenlerden biridir. Gımbal sisteminde stabilize edilecek obje hareketli yüzeyin üzerinde bulunmaktadır ve yüzeylerin bağıl hareketinden dolayı oluşan sürtünme fenomeni elektro-optik gımbal sisteminin ataletsel stabilizasyon performansını düşürmektedir. Ayrıca gımbal sistemi sıklıkla yön değiştirme hareketine maruz kaldığı için sürtünmenin etkisinden dolayı pozisyon takip performansı da düşmektedir [2]. Sürtünmeden kaynaklı durağan halde pozisyon hatalarına sebep olan sınır döngü osilasyonları (ing. limit cycle oscillation) oluşmaktadır [3]. Kısaca sürtünmeden kaynaklı kontrol döngüsünün kapalı çevrim performansını düşüğü bilinmektedir [4, 5]. Bu çalışmada sürtünmenin etkilerini gidermek için model-tabanlı sürtünme giderme yöntemi tercih edilmiştir [6, 7, 8]. Bilindiği üzere farklı tiplerde sürtünme modelleri mevcuttur [9, 10, 11, 12, 13]. Bu modeller kendi içerisinde statik ve dinamik sürtünme olarak sınıflandırılmaktadır. Coulomb [14], viskoz [15] ve stribeck [16] modelleri statik sürtünme sınıfında yer almaktadır. Dahl [17], LuGre [18], Bliman-Sorine [19] dinamik sürtünme sınıfında yer almaktadır. Bu çalışmada LuGre sürtünme modeli referans alınarak sürtünme giderme yöntemi uygulanmıştır. LuGre sürtünme modeli, Dahl modeline ek olarak tutma-bırakma (ing. stick-slip) davranışını kapsamaktadır ve bu yüzden daha gelişmiş bir modeldir [18]. Bu çalışmada Bölüm 2'de sürtünme giderme yönteminde kullanılan LuGre modelinin ma-

tematiksel ifadelerini ve model parametre tanımlamasını anlatmaktadır. Bölüm 3'te uygulanan yöntemin performansı etkisi incelenmektedir. Bölüm 4'te sürtünme giderme yöntemi ile elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

2. Sürtünme Giderme Yöntemi

Gimbal sisteminin sürtünme etkisini azaltmak için kapalı çevrim ataletsel hız döngüsüne LuGre sürtünme modeli ileribesleme otılarak eklenmiştir. Testlerde kullanılan gimbal sistemi yan ve yükseliş olmak üzere iki sürüş eksenine sahiptir. Sürtünme giderme algoritması gimbalin yan eksenine uygulanmıştır. Gimbalin matematiksel modeli Erhan Poyrazoğlu'nun yüksek lisans tezinde yer alan sistem ile aynıdır [20]. LuGre sürtünme modelinin matematiksel açılımı Bölüm 2.1'de verilmektedir. Modelin parametrelerinin tanımlanması Bölüm 2.2'de verilmektedir.



Şekil 1: LuGre sürtünme giderme yönteminin kapalı çevrim ataletsel hız döngüsüne uygulanması.

2.1. LuGre Sürtünme Modeli

LuGre sürtünme modeli Dahl modelinin gelişmiş halidir [21]. Hareketli yüzeyler arasında gözlemlenen pürüzler yay olarak modellenmiştir. LuGre sürtünme modeli yüzeyler arasında gözlemlenen pürüzlerin bükülmesine dayanmaktadır. LuGre modeli kayma öncesi rejim (ing. pre-sliding) ve kayma rejimi (ing. sliding) olmak üzere iki sürtünme bölgesinden oluşmaktadır.

$$\frac{dz}{dt} = v - \sigma_0 \frac{|v|}{s(v)} z \quad (1)$$

$$T_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (2)$$

Yukarıdaki parametrelerden z sürtünme durum değişkeni, v yüzeyler arası bağıl hızı, σ_0 pürüzlerin geçirgenliğini, σ_1 viskoz sönümleme ve T_f modelin tork çıkışı olarak tanımlanmaktadır. σ_0 ve σ_1 parametreleri kayma öncesi rejime ait parametrelerdir. Yukarıdaki denklemlerde yer alan $s(v)$ kayan rejimde yer alan sürtünmeyi ifade etmektedir. Aşağıda verilen görselde LuGre sürtünme ramodelinin hızla bağılılığı verilmektedir.

$$s(v) = T_c + (T_b - T_c) e^{\frac{|v|}{v_s} \zeta} \quad (3)$$

2.2. Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Modelde yer alan kayma öncesi ve kayan sürtünme rejimlerinin parametrelerini bulmak için farklı yöntemler uygulanmıştır. Kayan sürtünme rejiminde yer alan parametreler statik (ing. static), kayma öncesinde rejiminde yer alan parametreler dinamik (ing. dynamic) parametreler olarak adlandırılmaktadır. Statik parametreleri bulmak için uygulanan test rutini aşağıdaki gibidir.

- Test rutininde tarayacağı açı alanı, başlangıç ve bitiş hız değeri ve hızın artış miktarı için adım sayısını içermektedir.
- Test rutininde gimbalin yan eksenine ataletsel hız döngüsüne alınır. Başlangıç hız değeri ile yan eksen taranır.
- Hız artış miktarı ile başlangıç hızı toplanır ve her tur üzerine eklenerek bitiş hızına ulaşma kadar gimbalin yan eksenine tarar ve bitiş hızına ulaşıldığında test tamamlanır.

Test rutini tamamlandıktan sonra statik sürtünme parametreleri Denklem 4 ve Denklem 5'te yer alan ifadeler ile bulunmaktadır. Kayan sürtünme rejiminin tork denklemi Denklem 4'te verilmektedir.

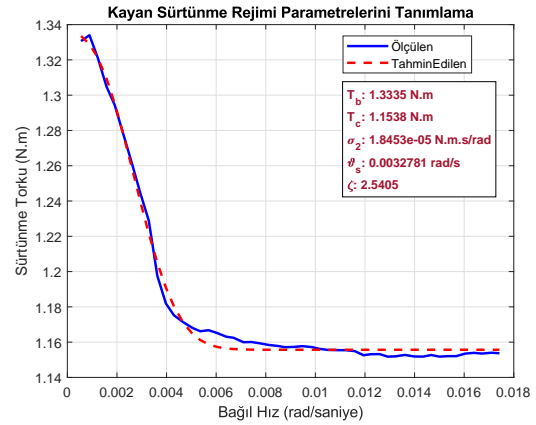
$$T_{ss} = (T_c + (T_b - T_c) e^{\frac{|v|}{v_s} \zeta} \text{sgn}(v) + \sigma_2 v \quad (4)$$

Statik sürtünme parametreleri, ölçülen tork değeri ile Denklem 4'te yer alan kayan sürtünme rejiminin tork denklemini bir kazanç fonksiyonu ile minimize edilerek bulunmaktadır.

$$\min I = \sum_{i=1}^n [T_{ss}^{\sim} - T_{ss}] \quad (5)$$

$$T_b, T_c, v_s, \sigma_2, v_s, \zeta$$

Sürtünme test rutini sonucunda elde edilen statik sürtünme modeli Şekil 2'te gösterilmektedir.



Şekil 2: Kayan sürtünme rejiminde elde edilen sürtünme modeli.

Kayan sürtünme rejiminde elde edilen parametrelerin değerleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Dinamik parametreleri bulmak için uygulanan test rutini aşağıdaki gibidir.

- Test rutininde başlangıç akım değeri, bitiş akım değeri ve uygulanacak olan akımın artış miktarı için test süresi yer almaktadır.
- Gimbalin yan eksenine akım döngüsüne alınır ve girilen başlangıç akım değeri ile test başlanmaktadır.

Tablo 1: Kayan sürtünme rejiminde elde edilen parametreler

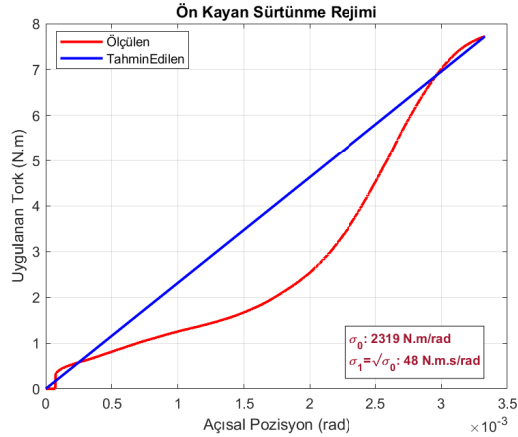
Parametre	Değer	Birim
T_b	1.3335	N.m
T_c	1.1538	N.m
σ_2	1.8453e-05	N.m.s/rad
ζ	2.5405	
v_s	0.0032781	rad/s

- Rutine girilen parametreler ile akım artış miktarı hesaplanır.
- Akım artış miktarı bir önceki turda uygulanan akım değeri ile toplanarak yan eksene uygulanır ve bitiş akım değerine ulaştığında test sonlanır.

Dinamik sürtünme parametreleri arasında yer alan σ_0 , tork-pozisyon grafiğinde kopma anından önceki durumun eğimi ile bulunmaktadır. Olsson'un 1998 yılında yaptığı çalışmada σ_1 , σ_0 parametresinin karekökü alınarak bulunmaktadır[10].

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_0} \quad (6)$$

Test rutini sonucunda elde edilen dinamik sürtünme modeli Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3: Kayma öncesi sürtünme rejiminde elde edilen model.

Kayma öncesi sürtünme rejiminde elde edilen parametrelerin değerleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2: Kayma öncesi sürtünme rejiminde elde edilen parametreler

Parametre	Değer	Birim
σ_0	2319	N.m/rad
σ_1	48	N.m.s/rad

3. Yöntemin Servo Kontrol Performansına Etkisi

Parametreleri tanımlanan LuGre sürtünme modeli Şekil 1'de gösterildiği gibi kapalı çevrim ataletsel hız döngüsüne ileribes-

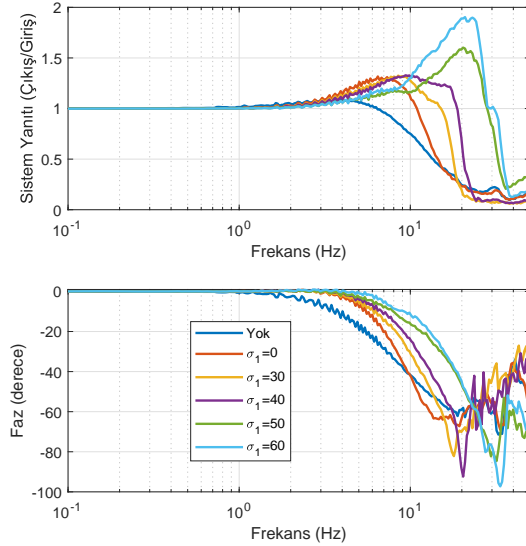
leme olarak eklenmiştir. Elde edilen LuGre sürtünme modeli parametrelerinin sistem üzerinde hassas ayarlanmasına yönelik bir parametre taraması yapılmıştır. Sürtünme giderme yönteminin kontrol performansına etkisini gözlemlemek için kapalı çevrim referans yanıtına ve stabilizasyon performansına bakılmıştır. İlgili sonuçlar Bölüm 3.1 ve 3.2'de sunulmaktadır.

3.1. Kapalı Çevrim Hız Yanıtı Performansı

Sistemin kapalı çevrim hız yanıtlarının kıyaslama senaryoları aşağıdaki gibidir.

- $\sigma_0 = 2318$ durumunda σ_1 parametresinin kapalı çevrim hız yanıtına etkisi
- $\sigma_1 = 0$ durumunda σ_0 parametresinin kapalı çevrim hız yanıtına etkisi

Yukarıdaki her iki kıyaslamada da LuGre sürtünme giderme yönteminin olmadığı ve hız kontrolcüsünün olduğu koşulda kapalı çevrim hız yanıtı alınmaktadır. Dinamik sürtünme modelinde yer alan σ_1 parametresinin kapalı çevrim hız yanıtına etkisi Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 4: σ_1 parametresinin kapalı çevrim hız yanıtına etkisi

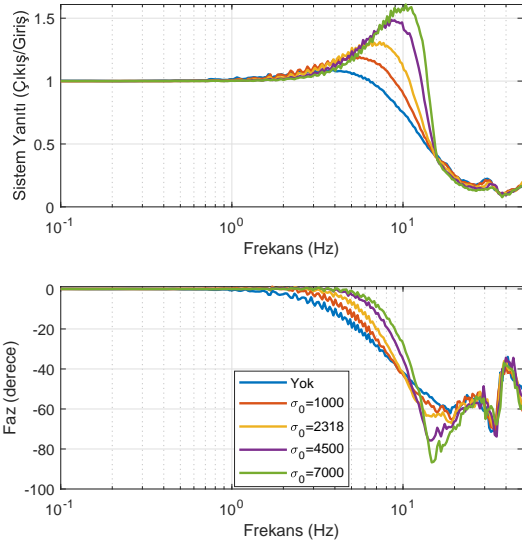
Şekil 4'te gösterildiği gibi σ_1 parametresinin artması ile kapalı çevrim bant genişliği artmaktadır. Ancak $\sigma_1 = 50$ ve $\sigma_1 = 60$ olduğu durumlarda sistem yüksek oranda aşım yapmaktadır.

İlgili parametrelerin ve performansların karşılaştırılması Tablo 3'te gösterilmektedir. Bant genişliği ve maksimum aşım-lara bakıldığında en iyi performans $\sigma_0 = 2318$ ve $\sigma_1 = 40$ olduğu durumda elde edilmiştir.

Tablo 3: σ_1 parametresinin bant genişliği ve maksimum aşım etkisi

σ_1	σ_0	Bant Genişliği [Hz]	Maksimum Aşım [%]
0	0	11	7
0	2318	12.7	28
30	2318	16.8	31
40	2318	20.1	32
50	2318	31.1	60
60	2318	33	89

Dinamik sirtünme modelinde yer alan σ_0 parametresinin kapalı çevrim hız yanıtına etkisi Şekil 5'de gösterilmektedir. Artan σ_0 ile beraber hem bant genişliği hem de maksimum aşım artmaktadır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında kayma öncesi rejimde elde edilen $\sigma_0 = 2318$ değeri ile hem yüksek bant genişliği ve daha az maksimum aşım elde edilmiştir.



Şekil 5: σ_0 parametresinin kapalı çevrim hız yanıtına etkisi

Tablo 4: σ_0 parametresinin bant genişliği ve maksimum aşım etkisi

σ_0	σ_1	Bant Genişliği [Hz]	Maksimum Aşım [%]
0	0	11	17
1000	0	11.9	7
2318	0	12.7	28
4500	0	13.8	47
7000	0	14.7	60

3.2. Stabilizasyon Performansı

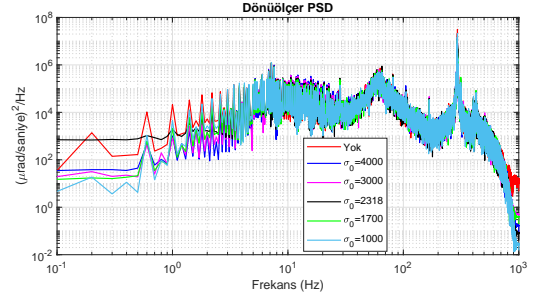
Sistemin stabilizasyon performanslarının kıyaslama senaryoları aşağıdaki gibidir.

- $\sigma_1 = 0$ durumunda σ_0 parametresinin stabilizasyon per-

formansı etkisi

- $\sigma_0 = 2318$ ve $\sigma_1 < 40$ durumunda σ_1 parametresinin stabilizasyon performansı etkisi
- $\sigma_0 = 2318$ ve $\sigma_1 > 40$ durumunda σ_1 parametresinin stabilizasyon performansı etkisi

İlk olarak $\sigma_1 = 0$ durumunda σ_0 parametresinin stabilizasyon performansına etkisi Şekil 6'de verilen dönüölçerin PSD grafiklerinde gösterilmektedir.



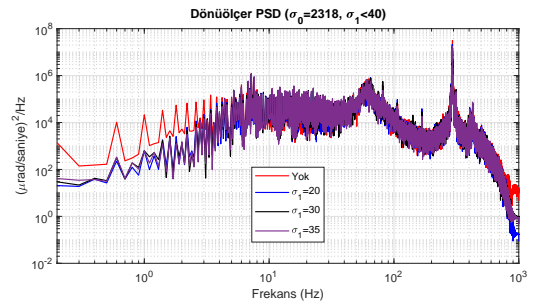
Şekil 6: σ_0 parametresinin stabilizasyon performansına etkisi

Artan σ_0 parametresine göre stabilizasyon performansının arttığı gözlemlenmiştir. Test sonuçları Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5: $\sigma_1 = 0$ durumunda σ_0 parametresinin stabilizasyon performansına etkisi

σ_0	σ_1	Stabilizasyon Performansı [urad]
0	0	32
4000	0	24
3000	0	25
2318	0	25
1000	0	27

Testlerin ikinci aşamasında $\sigma_0 = 2318$ olarak sabitleyerek ve $\sigma_1 < 40$ koşulunda stabilizasyon performansına etkisi incelenmiştir. Elde edilen dönüölçer PSD sonuçları Şekil 7'de ve stabilizasyon performansları Tablo 6'da gösterilmektedir.

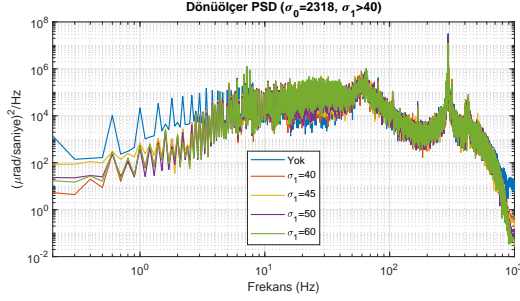


Şekil 7: $\sigma_1 < 40$ durumunda stabilizasyon performansları

Testlerin son aşamasında $\sigma_0 = 2318$ olarak sabitleyerek ve $\sigma_1 > 40$ stabilizasyon performansına etkisi incelenmiştir.

Tablo 6: $\sigma_0 = 2318$ ve $\sigma_1 < 40$ durumunda stabilizasyon performansları

σ_1	σ_0	Stabilizasyon Performansı [urad]
0	0	32
20	2318	23
30	2318	22
35	2318	21



Şekil 8: $\sigma_1 > 40$ durumunda stabilizasyon performansları

Tablo 7: $\sigma_0 = 2318$ ve $\sigma_1 > 40$ durumunda stabilizasyon performansları

σ_1	σ_0	Stabilizasyon Performansı [urad]
0	0	32
40	2318	23
45	2318	23
50	2318	23
60	2318	23

Elde edilen dönüölçer PSD sonuçları Şekil 8’de ve stabilizasyon performansları Tablo 7’da gösterilmektedir.

Test sonuçlarına göre $\sigma_1 > 40$ olduğu durumda stabilizasyon performansında artış gözlemlenmemiştir.

4. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada özetle, ataletsel stabilize bir gimbal sisteminin ataletsel hız döngüsü performansının artırılması için Lugre tabanlı bir sürtünme giderme algoritması tasarlanmış ve sonuçları paylaşılmıştır. Ataletsel hız döngüsüne ileribesleme olarak eklenen LuGre sürtünme modelinin parametreleri gerçek sistem üzerinde yapılan testler ile bulunmuştur. Model parametrelerinin sistem üzerinde hassas ayarlanması amacıyla bir parametre taraması yapılmış, buna göre optimum değerler olarak $\sigma_0 = 2318$ ve $\sigma_1 = 30$ elde edilmiştir. Nihai parametrelerle eklene sürtünme giderme algoritması ile kapalı çevrim hız yanıtının bant genişliği %70 artmaktadır. Ayrıca stabilizasyon performansında %25-%30 arasında bir artış elde edilmektedir.

Sürtünme karakteristiği seri üretim çıktısı olan örnekler arasında ve sıcaklık gibi çevresel koşullara göre değişebilmektedir. Bu çalışmanın ileri fazında LuGre sürtünme modelinde yer alan statik ve dinamik parametrelerin bahsi geçen değişimlere göre adapte edilmesine yönelik çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

5. Teşekkür

Çalışmamızda bizden yardımlarını esirgemeyen başta Serhat Duran olmak üzere tüm ASELSAN personel ve yöneticilerine teşekkür ederiz.

6. Kaynakça

- [1] J. Courtney-Pratt and E. Eisner, “The effect of a tangential force on the contact of metallic bodies,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 238, no. 1215, pp. 529–550, 1957.
- [2] H. Olsson and K. J. Astrom, “Friction generated limit cycles,” *IEEE Transactions on control systems technology*, vol. 9, no. 4, pp. 629–636, 2001.
- [3] H. Olsson, “Control systems with friction,,” 1997.
- [4] B. Armstrong-Helouvy, “Stick slip and control in low-speed motion,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 38, no. 10, pp. 1483–1496, 1993.
- [5] K. K. Tan, T. H. Lee, S. N. Huang, and X. Jiang, “Friction modeling and adaptive compensation using a relay feedback approach,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 1, pp. 169–176, 2001.
- [6] B. Friedland, Y.-J. Park, *et al.*, “On adaptive friction compensation,” *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 37, no. 10, pp. 1609–1612, 1992.
- [7] K. M. Misovec, “Friction compensation using adaptive non-linear control with persistent excitation,” *International Journal of Control*, vol. 72, no. 5, pp. 457–479, 1999.
- [8] P. Vedagarbha, D. M. Dawson, and M. Feemster, “Tracking control of mechanical systems in the presence of nonlinear dynamic friction effects,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 446–456, 1999.
- [9] B. Bona and M. Indri, “Friction compensation in robotics: an overview,” in *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4360–4367, IEEE, 2005.
- [10] H. Olsson, K. J. Åström, C. C. De Wit, M. Gäfvert, and P. Lischinsky, “Friction models and friction compensation,” *Eur. J. Control*, vol. 4, no. 3, pp. 176–195, 1998.
- [11] M. R. Kermani, M. Wong, R. V. Patel, M. Moallem, and M. Ostojic, “Friction compensation in low and high-reversal-velocity manipulators,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA’04. 2004*, vol. 5, pp. 4320–4325, IEEE, 2004.
- [12] P. E. Dupont, “Avoiding stick-slip through pd control,” *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 39, no. 5, pp. 1094–1097, 1994.
- [13] J. Amin, B. Friedland, and A. Harnoy, “Implementation of a friction estimation and compensation technique,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 17, no. 4, pp. 71–76, 1997.
- [14] S. Cull and R. Tucker, “On the modelling of coulomb friction,” *Journal of Physics A: Mathematical and General*, vol. 32, no. 11, p. 2103, 1999.

- [15] R. Kelly, J. Llamas, and R. Campa, "A measurement procedure for viscous and coulomb friction," *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 49, no. 4, pp. 857–861, 2000.
- [16] L. Márton and B. Lantos, "Control of mechanical systems with stribeck friction and backlash," *Systems & Control Letters*, vol. 58, no. 2, pp. 141–147, 2009.
- [17] P. R. Dahl, "A solid friction model," tech. rep., Aerospace Corp El Segundo Ca, 1968.
- [18] L. Freidovich, A. Robertsson, A. Shiriaev, and R. Johansson, "Lugre-model-based friction compensation," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 194–200, 2009.
- [19] M. Gafvert, "Comparisons of two dynamic friction models," in *Proceedings of the 1997 IEEE international Conference on Control applications*, pp. 386–391, IEEE, 1997.
- [20] E. Poyrazoğlu, "Detailed modeling and control of a 2-dof gimbal system," Master's thesis, Middle East Technical University, 2017.
- [21] F. Marques, Ł. Woliński, M. Wojtyra, P. Flores, and H. M. Lankarani, "An investigation of a novel lugre-based friction force model," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 166, p. 104493, 2021.