



MEMS JİROSKOPLARIN DAYANIKLI KONTROLÜ

Zeynep İLKILIÇ

**Yüksek Lisans Tezi
Kontrol Sistemleri Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT
ARALIK-2016**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEMS JİROSKOPLARIN DAYANIKLI KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynep İLKILIÇ

(141134102)

Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği

Programı: Kontrol Sistemleri

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 12 ARALIK 2016

Tezin Savunulduğu Tarih: 29 ARALIK 2016

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT (F.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Gonca ÖZMEN KOCA (F.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü.)

(Handwritten signatures in blue ink)

ARALIK – 2016

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca engin bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım, bana yol gösteren ve destek olan değerli danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT' a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim öğrenim süresi boyunca maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen, her türlü sıkıntıda sabırla bana destek olan canım babam Doç. Dr. Cumali İLKILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında bilgi ve tecrübelerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, Sayın Yrd. Doç. Dr.Cafer Bal'a, Arş. Gör. Dr. Deniz Korkmaz'a, Arş. Gör. Dr. Mustafa Can BİNBÖL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Her yönde ve her an desteklerini hissettiğim, birlikte fikir alışverişinde bulunduğum lisans ve lisansüstü arkadaşım Gökçe YILDIRIM ve Seda YETKİN'e, çalışma süresince üzerimden desteğini esirgemeyen aileme gösterdikleri sabır ve anlayıştan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Zeynep İLKILIÇ
ELAĞIĞ- 2016

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ.....	IX
KISALTMALAR LİSTESİ.....	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin İçeriği.....	2
1.2. Jiroskop.....	3
1.3. Mikro Elektro-Mekanik Sistemlerin (MEMS) Yapıları	4
1.4. MEMS Jiroskopların Kontrolü Konusunda Yapılan Çalışmalar	6
2. MEMS JİROSKOPLARIN YAPISI VE DİNAMİĞİ.....	16
3. Z-EKSENLİ MEMS JİROSKOPLARIN KONTROLÜ.....	21
3.1. Z-eksenli MEMS Jiroskop Yapısının Dinamiği	22
3.2. Z-eksenli MEMS Jiroskobun PID İle Kontrolü.....	24
3.3. Z-eksenli MEMS Jiroskobun KKK Tabanlı Kontrolü	28
3.4. Z-eksenli MEMS Jiroskobun Kontrol Sonuçları	31
4. ÜÇ EKSENLİ MEMS JİROSKOPLARIN KONTROLÜ	33
4.1. Üç Eksenli MEMS Jiroskobun Dinamiği	34
4.2. Üç Eksenli MEMS Jiroskobun PID İle Kontrolü	37
4.3. Üç Eksenli MEMS Jiroskobun KKK Tabanlı Kontrolü	38
4.4. Üç Eksenli MEMS Jiroskobun Kontrol Sonuçları	40
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	45
KAYNAKLAR	46

ÖZET

Jiroskoplar dönme hareketi ile dengede kalma olayını yön bulma ve hız ölçümü için kullanan cihazlardır. Yıllar geçtikçe teknolojiadaki ilerlemeler ile birlikte daha küçük boyutlarda olan Mikro Elektro-Mekanik Sistemler (MEMS) ile oluşturulan jiroskoplar geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında z-eksenli ve üç eksenli MEMS jiroskopların sinüzoidal yörünge takibi için çeşitli kontrol yöntemleri incelenmiştir. Z-eksenli ve üç eksenli MEMS jiroskobun dinamik modellerinden elde edilen matematiksel modeller ile her iki sistem, Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Oluşturulan blok diyagramları ile sistem, PID kontrolör ve Kayma Kipli Kontrolörden (KKK) esinlenerek oluşturulan KKK tabanlı kontrolör ile denetlenmiştir. Bu kontrol yöntemleri sayesinde z-eksenli ve üç eksenli MEMS jiroskopların istenen sinüzoidal referansları takip etmesi sağlanmıştır. Her iki kontrol yöntemi ile elde edilen sonuçlar irdelenerek tezde sunulmuştur. Bu çalışmada bir MEMS jiroskobun yörüngesinin istenilen sinüzoidal yörüngeyi takip etmesi amaçlanmış ve ileride yapılabilecek çalışmalara zemin oluşturması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jiroskop, MEMS Jiroskop, PID kontrolör, Kayma Kipli Kontrolör

SUMMARY

Robust Control of MEMS Gyroscopes

Gyroscopes are devices using turning movement to balance for detection of direction and calculation of speed. Over the years, with advances in technology gyroscopes have been developed that built with smaller size Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS).

In this thesis study, various control methods for tracking sinusoidal trajectories of z-axis and triaxial MEMS gyroscopes have been investigated. With mathematical models obtained from z-axis and triaxial MEMS gyroscope dynamic models both systems are modeled in Matlab/Simulink environment. Based on the block diagrams generated, the system have been inspected by the PID controller and the KKK based control method inspired by the Sliding Mode Control (KKK). These control methods enable to follow the desired sinusoidal references with z-axis and triaxial MEMS gyroscopes. The results obtained by both control methods are presented in the thesis. In this study, it was aimed to create a ground for future work which is aimed to for a MEMS gyroscope orbit follow the desired sinusoidal trajectory.

Key words: Gyroscopes, MEMS Gyroscopes, PID controller, SMC controller

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Jiroskobun temel yapısı	3
Şekil 1.2. Oransal jiroskobun çalışma prensibi	6
Şekil 1.3. Kapasitif bir jiroskobun şematikleri	9
Şekil 1.4. Adaptif bulanık sürücü mod kontrol sistemi	10
Şekil 1.5. Adaptif sürücü mod kontrolünün blok diyagramı	12
Şekil 2.1. Bir MEMS jiroskobun genel çalışma yapısı.....	17
Şekil 2.2. Jiroskobun farklı bağlantı şekilleri	17
Şekil 2.3. Jiroskobun üç farklı frekans seçeneği	19
Şekil 3.1. MEMS jiroskobun kütle-yay yapısı	22
Şekil 3.2. Z-eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamanda oluşturulan MATLAB/Simulink blok diyagramı.....	26
Şekil 3.3. Z-eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamanda oluşturulan Subsystem MATLAB/Simulink blok diyagramı.....	26
Şekil 3.4. Z-eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamanda oluşturulan Subsystem1 MATLAB/Simulink blok diyagramı.....	27
Şekil 3.5. Z-eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamanda oluşturulan Subsystem2 MATLAB/Simulink blok diyagramı.....	27
Şekil 3.6. Z-eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı sürekli zamanda MATLAB/Simulink blok diyagramı	29
Şekil 3.7. Z-eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolün MATLAB/Simulink blok diyagramı	29
Şekil 3.8. Z-eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolörün sürekli zamandaki yapısı	30
Şekil 3.9. Z-eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamandaki kontrol sonuçları	31
Şekil 3.10. Z-eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolünün sürekli zamandaki kontrol sonuçları	32
Şekil 3.11. Z-eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolü ve PID kontrolünün sürekli zamandaki hata sinyalleri.....	32

Şekil 4.1. Üç eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamanda kontrolünün MATLAB/Simulink ile oluşturulmuş blok diyagramı.....	37
Şekil 4.2. Üç eksenli MEMS jiroskobun sürekli KKK tabanlı kontrolünün MATLAB/Simulink blok diyagramı.....	38
Şekil 4.3. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolünün MATLAB/Simulink blok diyagramı	39
Şekil 4.4. Üç eksenli MEMS jiroskobun sürekli zamanda KKK tabanlı kontrol yapısı	39
Şekil 4.4. Üç eksenli MEMS jiroskobun PID kontrolör kullanılarak sürekli zamanda x-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları	40
Şekil 4.5. Üç eksenli MEMS jiroskobun PID kontrolör kullanılarak sürekli zamanda y-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları	41
Şekil 4.6. Üç eksenli MEMS jiroskobun PID kontrolör kullanılarak sürekli zamanda z-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları	41
Şekil 4.7. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolün sürekli zamanda x-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları	42
Şekil 4.8. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolün sürekli zamanda y-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları	42
Şekil 4.9. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolün sürekli zamanda z-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları	43
Şekil 4.10. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrol ve PID kontrolün sürekli zamanda x-eksenindeki hata sinyalleri.....	43
Şekil 4.11. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrol ve PID kontrolün sürekli zamanda y-eksenindeki hata sinyalleri	44
Şekil 4.12. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrol ve PID kontrolün sürekli zamanda z-eksenindeki hata sinyalleri.....	44

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Z-eksenli MEMS Jiroskobun parametreleri	24
Tablo 3.2. Z-eksenli MEMS Jiroskobun PID parametreleri.....	25
Tablo 4.1. Üç eksenli MEMS jiroskobun sistem parametreleri	36
Tablo 4.2. Üç eksenli MEMS jiroskobun PID parametreleri	37



SEMBOLLER LİSTESİ

$q_{sürme}$	: Tahrik genliği
M	: Kütle
$Q_{algı\ etkisi}$	: Algılama modu kalite faktörü
k_B	: Boltzmann sabiti
T	: Mutlak sıcaklık
x	: Sürme modu titreşim genliği
Q	: Kalite faktörü
Ω	: Dönme girişinin genliği (rad/sn)
f	: Frekans
$2\Omega\dot{x}$	: x ekseninde ki Coriolis ivmesi
$2\Omega\dot{y}$	: y ekseninde ki Coriolis ivmesi
Ω	: Dönme açısı
ω_n	: Doğal frekans
ω_c	: Kontrolörün bant genişliği
ω_0	: Gözlemcinin bant genişliği
ζ	: Sönümleme katsayısı
k	: Kontrolör kazancı
u_d	: Tahrik ekseninin kontrol girişi
$N(t)$	: Bozucu giriş
T_s	: Örnekleme periyodu
K_p	: Oransal katsayı
K_i	: İntegral katsayısı
K_D	: Türev katsayısı
ω_{xy}	: x eksenini asimetrik yay katsayısı

ω_{xz}	: y eksenini asimetrik yay katsayısı
ω_{yz}	: z eksenini asimetrik yay katsayısı
d_{xy}	: Asimetrik sönümleme katsayısı
d_{yz}	: Asimetrik sönümleme katsayısı
d_{xz}	: Asimetrik sönümleme katsayısı
ω_x	: x eksenindeki yay katsayısı
ω_y	: y ekseninde ki yay katsayısı
ω_z	: z ekseninde ki yay katsayısı
τ_i	: Adaptif kazanç
K	: Telafi katsayısı
λ	: Kayma yüzeyi

KISALTMALAR LİSTESİ

MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
KKK	: Kayma Kipli Kontrol
PID	: Oransal, İntegral, Türev
ADRC	: Aktif Hataları Yok Etme
FPGA	: Dijital Tabanlı Programlanabilir Bir Giriş Alan Dizisi
RNSM	: Sağlam Sinir Kayma Modu
DC	: Doğru Akım



1. GİRİŞ

Jiroskop bir eksen çevresinde, birbirine ve dönme eksenine dik iki eksenenden oluşur. Bu eksenlerden biri veya her ikisi çevresinde serbestçe dönebilecek biçimde yapılmıştır ve kütle merkezi sabittir. Diğer döner algılayıcıların aksine, jiroskoplar harici bir sinyal olmadan bir cismin hareketini ölçebilme yeteneğine sahiptir [1]. Jiroskoplar bir nesnenin açısal hareketinin izlenmesine olanak tanır. Aynı zamanda tüm jiroskoplar açısal hız veya yön ölçen jiroskoplar olarak ikiye ayrılır [2]. Hız jiroskopları bir nesnenin açısal hızını veya dönüş hızını ölçer. Açık jiroskopları ise bir nesnenin açısal konumunu ya da yönünü doğrudan ölçer.

Jiroskobun örneklerine tabiatta çeşitli şekillerde rastlamak mümkündür ve uzun zamandır mevcut olmasına rağmen, 19. yüzyıla kadar hakkında pek az şey bilinen bir cihazdır. Fransız Jean Bernard Leon Foucault 1852’de dünyanın döndüğünü göstermek için yaptığı bu alete jiroskop ismini vermiştir. Ancak dönme hareketi sürekli olarak sağlanamadığından yaklaşık olarak 60 yıl boyunca jiroskop, matematikçilerin oyuncacı olarak kalmıştır. Gemilerde çelik kullanıldıkça, manyetik pusulaya verilen güven azalmıştır ve jiroskopik pusula önem kazanmaya başlamıştır. İlk olarak Almanya’da ve daha sonra Amerika Birleşik Devletlerinde uygulanmaya başlanmıştır. Gemi ve uçakların hareketlerini kontrol etmek için jiroskopik aletler geliştirilmiştir. Gemilerde yalpa hareketlerini engelleyen jiroskoplar, ayrıca torpidolara da yön vermek için kullanılır. 1943’te deniz toplarının yönlendirilmesinde jiroskoptan istifade edilmiştir ve İkinci Dünya Savaşının ortaya çıkması ile birlikte, jiroskop hızla gelişmeye başlamıştır [3].

Jiroskop uçaklarda, otomatik uçuş kontrolünde ve rota tespiti gibi önemli kullanım alanlarına sahiptir. Yeraltında ise petrol kuyularının ekseninin şaşmaması önemli durumlarda jiroskoplarla sağlanır. Roket, füze ve güdümlü nükleer füzelerin hassas hız ve ivme ölçümlerinde jiroskop vazgeçilmez bir araçtır. Ölçümlerde kullanılan hassas cihazların yalnızca harekete ait değerleri ölçmesi istenildiğinden dolayı yerçekimi etkisinin göz önüne alınmaması gerekir. İstenilen bu özellik ise jiroskoplar ile sağlanır. Böylece ölçüm yerçekimine dik olarak gerçekleştirilebilmiştir. Ölçü âletlerinin konulduğu tablanın, kullanılan bir kaç jiroskop yardımıyla yatay z-ekseni etrafında kararlılığı sağlanır.

1.1. Tezin İçeriği

Bu tez çalışması beş bölüm olarak düzenlenmiştir. Yukarıda verilen amaç ve yöntemlere uygun olarak;

Bölüm 1’de, MEMS jiroskop hakkındaki çalışmalardan bahsedilmiş ve literatürdeki MEMS jiroskop çalışmalarından bazıları irdelenmiştir.

Bölüm 2’de, MEMS jiroskobun yapısı verilmiş ve MEMS jiroskoba etki eden kuvvetler incelenmiştir.

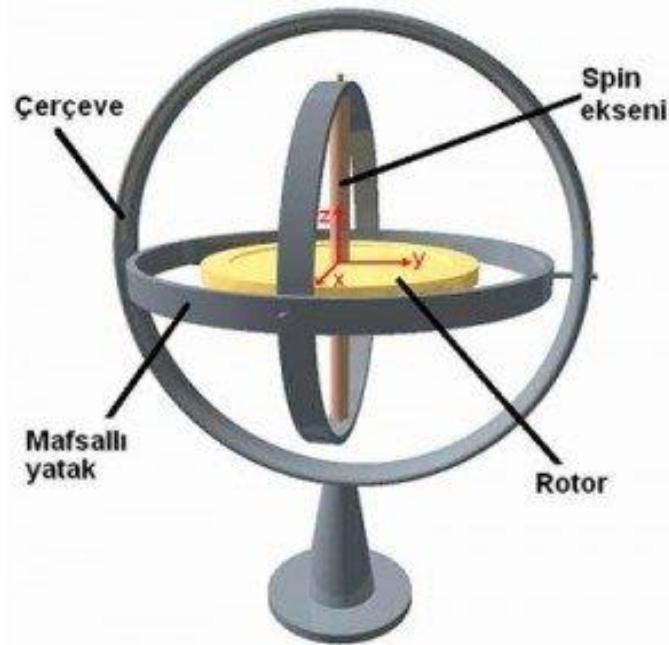
Bölüm 3’de, Z-eksenli MEMS jiroskobun matematiksel modeli oluşturulmuş ve z-eksenli MEMS jiroskobun *MATLAB/Simulink* blokları kullanılarak PID ve KKK tabanlı kontrol yöntemleri ile kontrolü sağlanmıştır.

Bölüm 4’de, üç eksenli MEMS jiroskobun matematiksel modeli oluşturulmuş ve üç eksenli MEMS jiroskobun *MATLAB/Simulink* blokları kullanılarak PID ve KKK tabanlı kontrol yöntemleri ile kontrolü sağlanmıştır.

Bölüm 5’de, Yapılan deneysel çalışmalardan ve simülasyon sonuçlarından elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilen yöntemin uygunluğu tartışılmıştır.

1.2. Jiroskop

Jiroskop, bir tekerlek veya dönen bir silindir, rotor ve eksenden oluşur ve devamlı olarak sürme modunda sürülür. Açısal hız jiroskopları belirlenen bir referans yörüngesinde dönme hızını ölçmek için kullanılırlar [3]. Jiroskobun temel görevi dönme hareketi ile dengede kalma olayını yön bulma ve hız ölçümü için kullanmaktır [4]. Eksen, rotor içinde dönebileceği bir çember üzerine yataklanmıştır. Bu çember, başka bir dış çembere dik açı yapacak şekilde kenetlenmiştir. Son dış çember ise hem iç hem de dış çemberle dik açı yapan bir çerçeveye oturtulmuştur. Rotorun dönmesi göz önüne alınmazsa, jiroskop iki serbestlik derecesine sahiptir. Yani jiroskop, iki serbestlik derecesine sahip olduğu için hem düşey hem de yatay eksen etrafında dönebilecektir. Dönmediği durumda, jiroskoba has özellikler belirgin değildir. Yalnızca ağırlık merkezinin değişmediği, her doğrultuya dönebilen bir cihazdır. Rotor döndüğünde jiroskobun ilk özelliği ortaya çıkmaya başlar ve şekil değiştirmez bir durum aldığı gözlenir. Ekseni ve durduğu zemin ne kadar oynatılırsa oynatılsın doğrultusunu korur. Bu özelliğe jiroskobik atalet denir [5]. Bu jiroskobik atalet açısal hıza, ağırlığa ve ağırlığın yoğunlaştığı çapa bağlıdır. İkinci özelliği ise, kuvvet uygulanması ile ortaya çıkar. Yatay eksen doğrultusunda uygulanacak bir kuvvet, jiroskobun mukavemeti ile karşılaşır ve yatay eksen etrafında dönmek yerine düşey eksen etrafında döner. Tersine olarak düşey eksen yönünde kuvvet uygulandığında ise, jiroskop karşı koyar ve yatay eksen etrafında döner. Şekil 1.1 de jiroskobun temel yapısı görülmektedir [3].



Şekil 1.1. Jiroskobun temel yapısı

Jiroskoplar dış etkilere, yer çekiminden ve merkezkaç kuvvetinden etkilenmeyen bir referans eksenini sağlar. Jiroskobun pratik bütün uygulamaları yukarıda anlattığımız iki özelliğe dayanır. Yeni geliştirilen Mikro Elektro-Mekanik Sistem (MEMS) temelli jiroskoplar titreşen bir objenin destek yüzeyi değiştirilirken bile aynı düzlemde kalma eğilimine dayanarak çalışmaktadır.

1.3. Mikro Elektro-Mekanik Sistemlerin (MEMS) Yapıları

Mikro elektromekanik sistemler günümüzde var olan mekanik ve elektrik sistemlerin entegre ve minyatürize versiyonları olup mikron boyutlarında olan bu sistemleri Nano Elektro-Mekanik Sistemler (NEMS) vasıtasıyla nano teknoloji uygulamaları için de kullanmak mümkündür. MEMS kavramı ilk olarak 1987 yılında bir mikro dinamik çalışmayı esnasında ortaya çıkmıştır. [6]. Küçük aygıtların yapılması konusunda ortaya çıkan ilk fikir ünlü fizikçi Richard Feynman tarafından 1959 yılında yapılan "There's plenty of room at the bottom" isimli konuşmada ortaya atılmıştır. MEMS'lerin boyutları 1 ile 100 mikrometre arasında değişim gösterir. Bu derece küçük boyutlarda standart fizik kuralları genellikle geçersizdir. MEMS yapılarında yüzey alanının hacme oranı oldukça yüksektir bu nedenle yüzeyde oluşan etkiler, hacim etkilerine baskın gelir. MEMS yapıları üç bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler mekanik bölüm, mekanik bölümü çalıştıran tahrik bölümü ve mekanik hareketlerin davranışlarını inceleyen algılama bölümüdür. MEMS sistemlerini çalıştırma mekanizmaları verilen tahrik tipine göre farklılık gösterir. MEMS yapıları termal, elektrostatik, manyetik, pnömatik ve optik olarak tahrik edilebilir. Algılama işlemi ise genellikle optik ve elektronik sinyaller yardımıyla yapılır. MEMS, Makina-Malzeme-Elektronik başta olmak üzere, tüm mühendislik dalları ve temel bilimlerle birlikte pek çok dalı kapsayan çalışmaların yapıldığı disiplinler arası bir kavramdır [6].

Temelde MEMS aygıt tasarımı, entegre devre üretiminde gerçekleşen yenilikler ışığında ortaya çıkmıştır. Entegre devre üretiminde ortaya çıkan gereksinimlerden doğan aygıtları küçültme fikri sayesinde küçük aygıt tasarımlarına imkan veren üretim yöntemleri geliştirilmiş ve ilk olarak entegre devre endüstrisinde kullanılmıştır. Entegre devrelerde önemli bir yer teşkil eden transistörün küçültülmesi günümüz modern işlemcilerinin performansına büyük bir katkı sağlamıştır. Günümüzde 45 nanometre boyutunda transistörler hemen hemen bütün işlemcilerde kullanılmaktadır. Entegre devrelerin geneli silikon materyalinden üretilir. Silikon, mekanik ve elektronik özellikleri itibarıyla

entegre devre yapımına en uygun malzeme olarak göze çarpmaktadır. Entegre devre üretim tekniklerinin büyük bir kısmı silikona yönelik tasarlandığı için silikon, MEMS yapıları için de vazgeçilmez bir materyaldir. Silikon materyali ve entegre devre üretim metotları kullanılarak pek çok MEMS yapısı üretilebilir. Silikon işlenebildiği için, aygıt boyutlarının daha küçük değerlere indirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Aygıtları küçültmek ise aygıt performansını arttırmış, birim aygıt fiyatını düşürmüş ve güç tüketiminin azalmasına neden olmuştur. Aygıt boyutları küçültülürken pek çok yeni üretim metodu da geliştirilmiştir (Molekül Demeti ile Kaplama, Metal Organik Kimyasal Buharlaştırma Metodu). Bu gelişmeler neticesinde ise mikron boyutlarında fonksiyonel mekanik aygıtlar yapılması ve bu aygıtların elektronik olarak kontrol edilmesi mümkün hale gelmiştir [7].

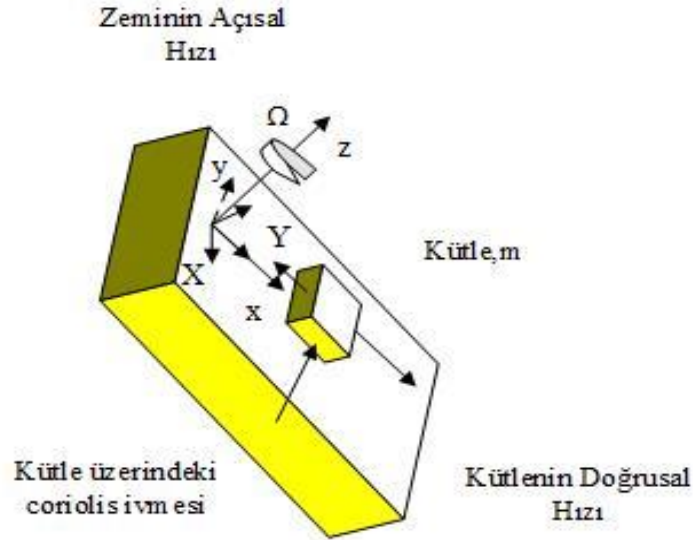
1.3.1. MEMS Yapılarının Limitleri

MEMS yapılarını sınırlayan en temel faktörlerden birincisi bu yapıların fiziksel davranışının Newton fiziği tarafından ifade edilmesinin oldukça zor olmasıdır. Bu yapılarda meydana gelen kuantum etkilerinin de fiziksel modele eklenmesi ise bu yapıların fiziksel olarak modellenmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Kuantum etkilerinin bir kısmının halen ifade edilememiş olması ise bazı MEMS yapılarının fiziksel olarak modellenmesini engellemektedir. MEMS yapılarını sınırlayan başka bir faktör ise çevre değişimlerinden hızlı etkilenmeleridir. Oluşan bu durumun engellenebilmesi için bu aygıtların çevreden izole edilmesi gerekmektedir. İzolasyon seçenekleri çok sınırlı olduğu için, MEMS boyutları izolasyon opsiyonları ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca MEMS yapıları, günümüzde var olan malzeme ve fabrikasyon yöntemleri sayısı ile de sınırlandırılmıştır. Bu yapılar farklı sistemlerden meydana gelebildiği için farklı MEMS yapılarının da içinde bulunan sistemler uyarınca farklı limitleri vardır. Optik tahrik ile çalışan veya üretilen MEMS yapılarının çoğunluğu kullanılan dalga boyu ile sınırlıdır [8]. Sıvı akışını ölçen veya kullanan MEMS yapıları ise akışkanlar mekaniği içinde geçerli olan türbülanslı akışın, kanalın boyutunun küçülmesi ile doğru orantılı olarak küçülmesi prensibi uyarınca sürekli laminar akış rejimine bağlı kalmalıdır. Bu durumda herhangi bir sıvı karışımı mümkün olmamaktadır [9]. Biyolojik algılama aygıtları için kullanılan MEMS yapılarını sınırlayan en önemli faktör ise yapının küçülmesi ile doğru orantılı olarak incelenen örneğin de küçülmesidir [10]. Ayrıca kuvvet ölçmek için kullanılan MEMS yapıları da, algılama aygıtlarının çözünürlükleri ile sınırlanmıştır [11].

1.4. MEMS Jiroskopların Kontrolü Konusunda Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde, MEMS Jiroskop kontrolü ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında kısa bir bilgi verilmektedir.

Batur vd. titreşimli bir jiroskobun dizaynı ve kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Cihaz Pro-E ortamında inşa edilmiş ve lumped modelle (toplu model) dinamik karakteristiklerine yaklaştığı için sonlu eleman etkisinde simüle edilmiştir. Cihazların kararlılığını devamlı kılmak için geri besleme kontrolörü ve sürgülü mod kontrolörüne uyarlanabilir referans bir model düşünülmüştür. Şekil 1.2’de titreşimli oransal bir jiroskobun çalışma prensibi görülmektedir [12].



Şekil 1.2. Oransal jiroskobun çalışma prensibi

Bu çalışmanın amacı var olan bir MEMS tasarımının performansını geliştirmek için bir sürücü modlu kontrolör ve uyarlanabilir bir referans model tasarlamaktır. Referans model, kontrolörün bazı sınırlayıcı varsayımlara yakınsayabildiğini gösterir. Özellikle sinyallerin sınırlarının, aktif kontrol sinyallerini içeren hem tahrik hem de algılama eksenleri olmazsa bilinmeyen bir açısal hızın tutarlı bir tahmininin alınmadığını görmekteyiz [12].

Sungsu Park vd. açısal hızın entegrasyonu olmadan, dönme açısını direk olarak ölçmek için titreşimli bir MEMS jiroskop kontrolü üzerine bir algoritma geliştirmiş ve böylece açısal orandan açı elde edilmesi için yapılan sayısal entegrasyon hatalarını ortadan

kaldırmışlardır. Önerilen kontrol algoritması ağırlıklı enerji kontrolü ve mod ayarlama kontrolünden oluşmuştur. Simülasyon sonuçları kontrol algoritmasının fizibilitesini ve doğrudan döndürme açısını ölçmek için titreşimli bir jiroskop kullanılmasını göstermiştir. MEMS hız jiroskobu kullanılarak dönme açısı elde etmek için, zamana bağımlı açısal hız ölçme entegrasyonu gereklidir. Entegrasyon sürecinde zamana bağlı olarak dönme açısında değişimler olur ve bu yüzden sapmada açı hatası ve açısal hız sinyalinden dolayı gürültü hızla saptmaya başlar. Bu çalışma, açı ölçüm jiroskobunun gerçekleştirilmesi için yeni bir algoritma üzerine değinmiştir. Bu süreç; ağırlıklı enerji kontrolü, mod ayarlama kontrolü ve ilk kalibrasyon aşamasından oluşmuştur. Geliştirilmiş kontrol algoritması MEMS jiroskoplarda oluşan eşleşmeyen sertlik, birleştirilmiş sertlik ve eşit olmayan sönümleme oranı gibi hataları sıfırlamamış ve ideal bir jiroskop gibi davranan ideal olmayan bir jiroskop oluşturmuştur. Toplam enerjiyi hesaplama ve çıkış sinyalini demodüle etme gibi kontrol problemlerinin basit ve kolay sinyal işleme sonuçları, tasarımcı tarafından belirlenen referans frekansta jiroskobu çalıştırmıştır. Simülasyon sonuçları açısal hızın entegrasyonu olmadan doğrudan ölçülen dönme açısından elde edilerek geliştirilen algoritmanın fizibilitesi ve etkinliğini göstermiştir [13].

P.J.Ngana vd. bir MEMS jiroskobun simülasyon modeli üzerinde çalışmışlardır. Bu model bir jiroskobun dinamik davranışlarının analiz edilmesini sağlar. Ayrıca bu model, jiroskobun tasarım parametrelerinin optimizasyonunu verir. Sürücü modu ölçümleri, farklı sapma gerilimlerinde yapılmıştır. Bu çalışma rezonans frekansını arttırarak gürültüyü iyileştirmeyi amaçlamıştır. Bu da cihazın tahrik genliği ve kütle artışı olmadan yüksek oranda istenen bant genişliğinde gürültü sinyalini tutmuştur. Bir titreşimli jiroskobun mekanik Brownian gürültüsü Denklem 1.1'de ifade edilen denklem takımı kullanılarak hesaplanmaktadır.

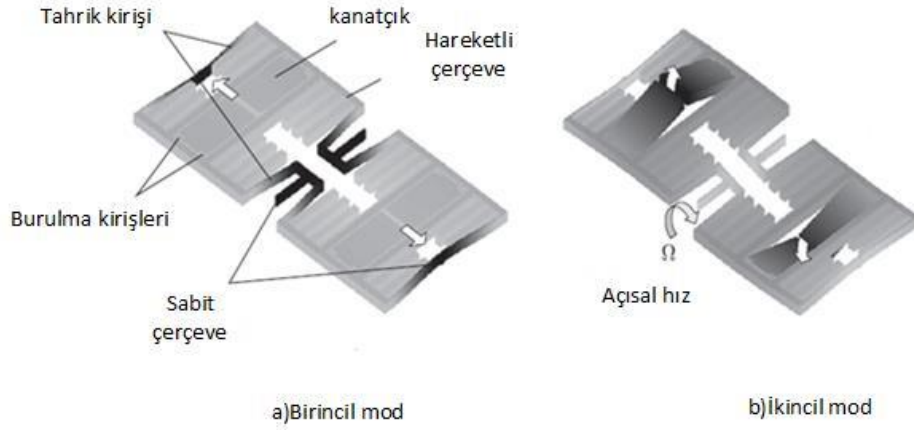
$$\Omega_Z \propto \frac{1}{q_{sürme}} \sqrt{\frac{4k_B T}{\omega M Q_{algı etkisi}}} \quad (1.1)$$

$q_{sürme}$ tahrik genliği, M kütle, $Q_{algı etkisi}$ algılama modunda kalite faktörü, k_B Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. Önerilen tasarım 50 Hz civarında bir mekanik rezonans'a sahiptir ve 1.5 μm inceliğinde üretilmiştir. Bilinen tekniklerle kıyaslanırsa, önerilen jiroskop daha yüksek mekanik rezonans'a ve alçak kütleyle sahiptir. Elde edilen sonuçlar, farklı dönme açılarında algılama ve tahrik modları arasında ki frekans bölünmelerini gösterir. Uygulanan simülasyon modeli, tasarlanan bir jiroskobun algılama ve

tahrik modlarının eşleşmesine izin vermiştir ve Coriolis kuvvetlerini içermektedir. Bununla birlikte farklı dönme açılarındaki bir jiroskobun dinamik davranışını simüle edebilir [14].

Burak Eminoğlu vd. titreşimli MEMS jiroskoplarda kullanılan analog sürücü modlu denetleyiciler için optimize edilmiş analitik tasarım yöntemlerini anlatır. Başlatma sırasında denetleyicinin davranışı kontrolör devresinin sınırlı voltaj salınımının etkisini içeren detayları analiz eder. Sonuç olarak, 50.000 kalite faktörüne sahip bir jiroskop için uygun bir tasarım yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen yeni tasarım yöntemi, yüksek vakum altında paketlenen bile çok hızlı başlayan MEMS jiroskopları elde etmek için uygun hale getiren ve Q kalite faktörüne neredeyse duyarsız, yerleşme zamanlı sürücü modu yapmıştır. Yüksek Q'ya sahip MEMS jiroskoplarda sürücü mod salınımının kararlılığı, uygun kontrolör dizaynı ile yakından ilişkili tüm sistemin genel kararlılığı için çok önemlidir. Bu çalışma jiroskobun sürücü mod transfer fonksiyonunun düşük frekans kutbunun etkilerinin kaldırıldığı bir kutup-sıfır iptal yöntemi yardımıyla yerleşme zamanını düşüren, geleneksel analog kontrolörler için yeni bir analitik tasarım yaklaşımı önermektedir. Çalışma da optimize edilmiş sürücü mod kontrolörü elde etmek için, bir tasarım yöntemi oluşturmaya çalışılmıştır. Tüm sistem performansı üzerinde kontrolör devresinin sınırlı gerilim salınımının etkisi analiz edilmiştir [15].

Markus Egretzberger vd. titreşimli MEMS jiroskoplar da açık ve kapalı çevrim kontrolörlerinin tasarımı için sistematik bir yöntem sunmuşlardır. Jiroskop, elektrostatik tahrik ve okuma elemanlarıyla örnek olarak yürütülmüştür. Jiroskobun özel olarak tasarlanmış kapasitif aktuatörleri, harici bir açısal oranla sistemin mekanik dengesizliğini telafi edebilmiştir. Kullanılan zarf modeli jiroskobun sistem dinamiklerini yakalayıp aynı zamanda işlenmesini açıklamış ve ayrıntıları okuma mekanizmalarının uygun bir seviyesine basitleştirmiştir, böylece sistematik ve etkili bir kontrol dizaynı için temel sağlamıştır. Kapasitif bir jiroskobun şematikleri Şekil 1.3'de görülmektedir [16].

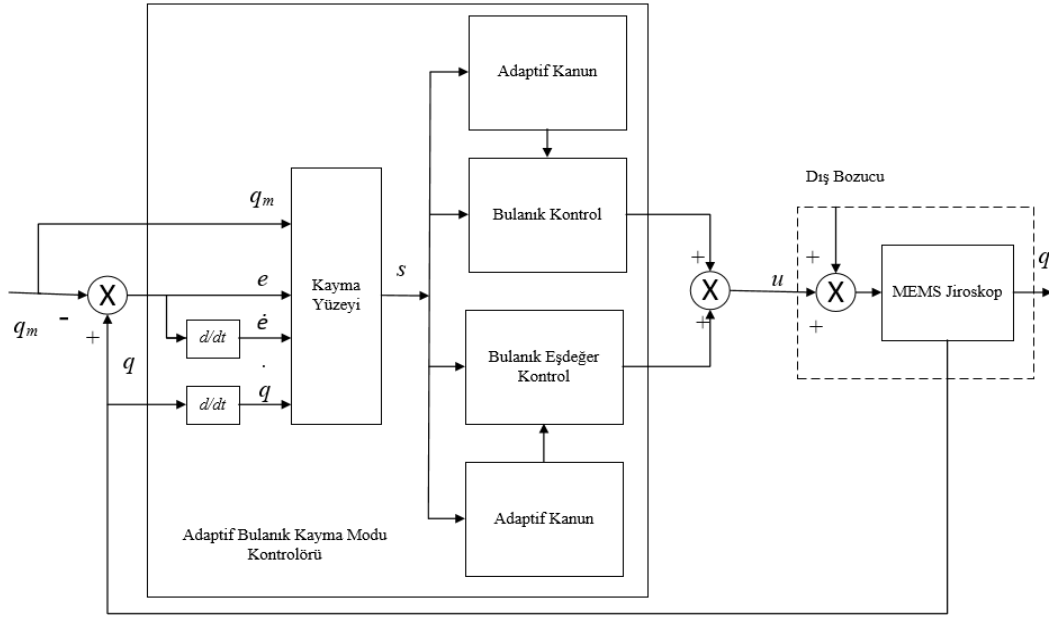


Şekil 1.3. Kapasitif bir jiroskobun şematikleri

Bu çalışma da zarf modellerine dayalı titreşimli MEMS jiroskoplar için açık ve kapalı çevrim kontrolörlerinin sistematik tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Kapasitif bir jiroskobun birincil modu için optimize edilmiş başlangıç stratejisi sunan yöntemin avantajlarını vurgulamak için türetilmiştir. Kullanılan bu yaklaşım aynı zamanda, ideal olmayan üretim süreciyle doğal dengesizlik hareketlerini telafi etmek amacıyla ikincil modda temel bir kuadratur kontrolörünün sistematik tasarımında da kullanılmaktadır. Jiroskobun tipik zayıf sönümlü açık çevrim dinamiklerini ortadan kaldırmak için, kapalı çevrim kuadraturünün daha karmaşık bir birleşimi olan açısal hız sinyalleri arasındaki geçici birleşme ve geri besleme kuvveti kontrolü üzerinde de çalışılmıştır.

Geri besleme kuvvetinin kontrolü ve kapalı çevrim kuadraturünün daha karmaşık bir birleşimi olan açısal hız sinyali ve kuadratur arasındaki geçici birleşme ve jiroskobun tipik zayıf sönümlü açık çevrim dinamiklerini ortadan kaldırılmak için çalışılmıştır. Simülasyon ve ölçüm sonuçları, bir prototip jiroskop için matematiksel modellerini doğrulamış ve önerilen kontrol kavramları fizibilitesini kanıtlamıştır [16].

Fei vd. üç eksenli MEMS jiroskobun dış bozucuları, belirsizlik ve doğrusalsızlık parametrelerini düzenleyebilmek için, sürücü mod kontrolünün ve dolaylı adaptif bulanık kontrolünün faydalarını birleştiren bir adaptif sürücü mod kontrol stratejisi geliştirmişlerdir. Bu kontrol stratejisi modelin mevcut olan dış bozucu ve belirsizliklerinde ve MEMS jiroskobun pozisyon kontrolünde yardımcı olmuştur. Bu amaçla tasarlanan bir adaptif sürücü mod kontrol sistemi Şekil 1.4’de görülmektedir [17].



Şekil 1.4. Adaptif bulanık sürücü mod kontrol sistemi

Sürücü modu kontrolünde hem eşdeğer kontrol devresi hem de anahtarlama kontrol devresinde adaptif bulanık sistemler yaklaşık olarak kullanılmıştır. Daha sonrasında anahtarlama kontrolü devamlı hale gelmiştir ve gürültü bozucuları zayıflatılmıştır. Adaptif bulanık kapalı çevrim kontrol sistemlerinin asimptotik kararlılığını kontrol altına almak için Lyapunov analizine bağımlı uyum yasaları, bulanık sisteme uyumlu bir şekilde uyarlanabilir. Sayısal simülasyonlar önerilen adaptif bulanık kontrol şemalarının etkinliğini doğrulamak için incelenmiştir [17]. MEMS jiroskobu kontrol etmek için tahmini bir üst sınırla bir adaptif sürücü mod kontrolörü geliştirilmiştir. Sistem doğrusalsızlıkları bu model belirsizlikleri için ya adaptif ya da dirençli bir kontrolör gerektirir. Sinir ağı veya bulanık kontrol gibi akıllı kontrol yaklaşımları matematiksel modellere gerek duymaz ve yaklaşık doğrusal olmayan sistem yeteneklerine sahiptir. Sinir ağı teknolojileri doğrusal olmayan kontrol sistemlerine uygulanabilir [18]. Wang, evrensel bir yaklaşım teoremi önermiştir ve fonksiyonların belirli bir kümesinde keyfi bir fonksiyonun, bir kompakt alan üzerinde bulanık sistem kullanarak rastgele bir doğrulukla elde edilebilir olduğunu göstermiştir. Bu yüzden bulanık mantık sistemi keyfi doğrusal olmayan sistemler için yaklaşık adaptif uygulamalarda kullanışlı bir araç haline gelmiştir. Guo, robot manipülatörü için adaptif bulanık sürücü mod kontrolörü önermiştir. Yoo, bulanık kompensatör (dengeleyici) kullanarak robot manipülatörü için adaptif kontrolör geliştirmiştir. Wai, elektrik servo sürücü uygulamalarıyla bulanık adaptif

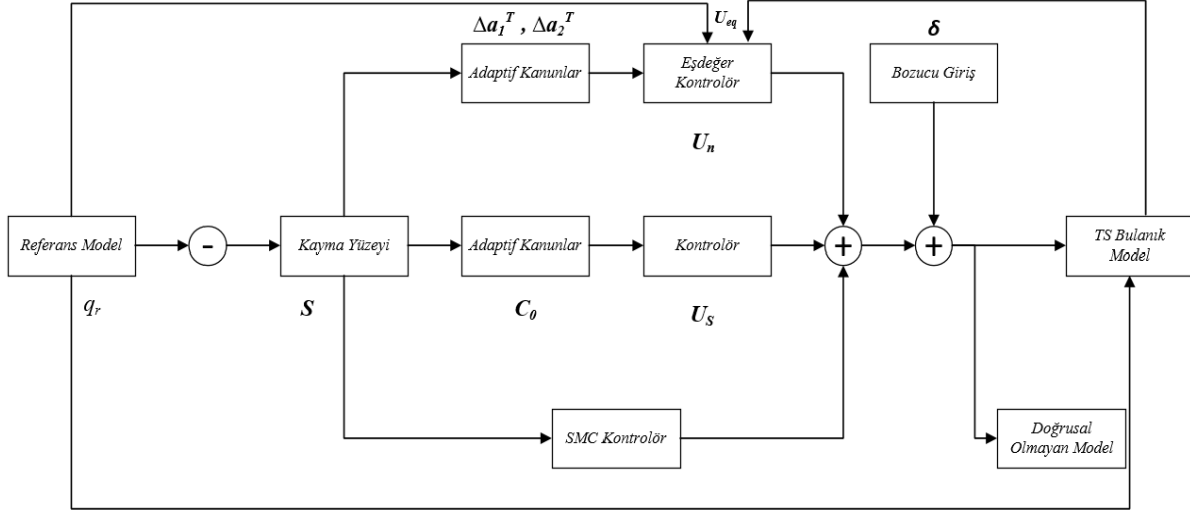
sürücü mod kontrolü üzerinde çalışmıştır. Bazı adaptif bulanık kontrol yaklaşımları hidrolik basınç uygulamaları, kumandalı piezo fazları ve birleştirilmiş sürücülerle araştırılmıştır. Wang, bulanık anahtarlama yaklaşımını kullanarak dolaylı adaptif bulanık sürücü mod kontrolü geliştirmiştir. Sürücü mod kontrolünde eşdeğer kontrol devresi ve anahtar kontrol devresinde yaklaşık olarak kullanılabilen bulanık kontrolörler, Lyapunov sisteminde adaptif sürücü mod kontrol şemasına dahil edilmiştir [17].

Yunmei Fang bir MIMO Takagi-Sugeno (T-Z) bulanık modeli, MEMS jiroskobun doğrusal olmayan modellerinin temeli üzerine inşa etmiştir. Modelin belirsizlik parametrelerinin tahmini ve dış bozucuların üst sınırları için sağlam bir adaptif sürücü mod kontrolü önermiştir. Lyapunov metotlarına dayanarak bu adaptif kanunlar asimptotik kararlılığı ve verilen genlik ve frekansta x ve y yönünde salınım için dayanıklı kütle kuvvetini garantileyebilmiştir. Kontrolör aynı anda MEMS jiroskobun doğrusal olmayan modeli üzerinde uygulanmıştır. Sayısal simülasyonlar, T-S model ve doğrusal olmayan modeller üzerinde önerilen kontrol şemasının etkinliğini doğrulamak için incelenmiştir [19].

Park, jiroskobun tüm uygulamalarında hem titreşim eksenleri hem de kontrollerini sürececek bir MEMS jiroskop için adaptif bir kontrol yöntemi sunmuştur. Leland, uygulamayı yeniden dengeleme kuvvetini kullanarak bir MEMS jiroskop için adaptif bir kontrol yöntemi önermiştir. John ve Vinay, üç eksenli açısal hız sensör cihazının adaptif bir şekilde kontrolü için yeni bir kavram önermiştir. Sürücü mod kontrolü, dış bozuculara duyarsızlık ve parametre değişimlerine karşı dayanıklılık gibi birçok cezbedici özelliğe sahiptir ve pratik uygulamalarda yüksek frekans salınımı ya da gürültü gibi bazı sınırlara sahip kuvvetli bir kontrol tekniğidir [19].

Adaptif sürücü mod kontrolü, adaptif kontrol stratejilerinin izleme yeteneği ile değişken yapı metotlarının sağlamlıklarını birleştirme avantajlarına sahiptir. Adaptif sürücü mod kontrol yaklaşımları, MEMS jiroskopları kontrol etmek için geliştirilmiştir. MEMS jiroskobun titreşim kontrolü için, tahmini bir üst sınıra sahip bir adaptif sürücü mod kontrolörü geliştirilmiştir. Bulanık kontrol gibi akıllı kontrol yaklaşımları matematiksel modellere bağımlı değildir ve doğrusal olmayan sistemlerin yaklaşıklık yeteneklerine sahiptir. Adaptif bulanık sürücü mod kontrolörü, modelin belirsizliklerini dengelemek için ve sürücü mod kontrolü, bulanık çıkarım mekanizması ve adaptif algoritmanın faydalarını birleştirip sistem bozucuları için kullanılabilir. Burada adaptif bulanık mantık sürücü mod kontrolü geri besleme ile doğrultma yaklaşımı kullanarak bilinmeyen sistem

doğrusalsızlıklarıyla üç eksenli mikro elektromekanik sistemler için kullanılmıştır. Şekil 1.5’de verilen blok diyagramında görüldüğü gibi T-S bulanık model kullanarak MEMS jiroskobun açısal hız sensörü için sağlam bir adaptif sürücü mod kontrolü üzerinde çalışılmıştır [19].



Şekil 1.5. Adaptif sürücü mod kontrolünün blok diyagramı

Belirsiz parametrelerin adaptif algoritması, sürücü yüzey yakınsaklık (yakınsama) performansını geliştirmesinin yanı sıra, seçilen T-S model ve uygun T-S model arasındaki hatayı en aza indirmiştir. Önerilen kontrol şeması dış bozucular ve parametre değişimlerine karşı uygun bir izleme performansı ve sağlamlık kazandırmıştır. Simülasyon çalışmaları, model belirsizlikleri ve dış bozucularda bilinmeyen üst sınırların varlığında açısal hız sensörleri için önerilen adaptif bulanık kontrolün etkinliğini doğrulamak için uygulanmıştır [19].

Robert P. Lealand titreşimli bir MEMS jiroskobun tüm modlarını kontrol etmek için adaptif bir kontrolör tasarlamıştır. Bu kontrolör, sürme ekseninin doğal frekansını ayarlamış, sürme ekseninde oluşan titreşimlerin genliğini düzenlemiş ve sertlikten dolayı oluşan kuadratur hatalarını sıfıra indirgemıştır. Burada hem ileri kontrol hem de geri besleme kontrolü kullanılmıştır. Kullanılan Lyapunov fonksiyonu, özellikle otomatik kazanç kontrol döngüleri ve dengeleme için sistem cevabı üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Bir titreşimli jiroskobun doğal frekanslardaki belirsizliklerini düzenlemek için adaptif kontrolörlere dayalı iki Lyapunov tanımlanmıştır. Bu adaptif kontrol yasası, herhangi bir sistem parametrelerinin kesin değerlerine bağımlı değildir. Tasarlanan bu Lyapunov da dönme oranı Ω sabit kabul

edilmiştir. Gelecek tasarımlarda Ω değişkenini takip etmek için bir adaptif kontrolör geliştirmeyi hedeflemişlerdir [20].

Cunchao Wang vd. dönme oranını ölçmek için iki kütleli titreşimli bir jiroskop tasarlamışlardır. Jiroskop paralel olmayan yönde salınan ve diferansiyel Coriolis kuvvet algısı oluşturan iki kütleden oluşmuştur. Bu iki kütle diferansiyel Coriolis kuvvet algısı oluşturmak için sürme eksenini boyunca zıt yönlerde elektrostatik olarak sürülmüştür. Öteleme hızı gibi bozucu ifadeler bu kütleler tarafından yok edilebilmiştir. Kararlılık ve kuadratür hatalarının telafisi için mod ayarlama ve adaptif kuvvet kontrolünü yeniden dengeleme işlemi tasarlanmıştır. Yaptıkları çalışmada MEMS jiroskobun performansını geliştirmek için bir adaptif kontrol metodu geliştirmişlerdir. Bu metot verilen frekansta doğal sürme frekanslarını ayarlamış, gerekli bir değerde sürme ekseninin genliklerini düzenlemiş, dönüşümsel ivmeleri yok etmiş ve sertlikten dolayı oluşan kuadratür hatalarını yok etmiştir. Simülasyon sonuçları kontrol yönteminin etkisini doğrulamıştır [21].

Qing Zheng vd. bir MEMS jiroskobun çıkış genliğini ve rezonansını sabit bir seviyede düzenlemek ve sürücü eksenini tahrik etmek için yeni bir kontrol metodu geliştirmişlerdir. Bu kontrol metodu gerçek zamanda aktif bir şekilde dış bozucuları ve sürme ekseninin dahili dinamik değişimlerini düzenleyen ve tahmin eden ADRC (Aktif Hataları Yok Etme) kontrol stratejisine bağlıdır. Kararlılık analizi hem hata tahmini ve sürme eksenini çıkışının izleme hatasını sınırlandırdığını hem de kontrolörün bant genişliğinin artması ile hataların üst sınırının azaldığını göstermiştir. Kontrol sistemi simüle edilmiş ve piezoelektrik titreşimli jiroskopta bir FPGA (programlanabilir tabanlı alan) tabanlı dijital uygulama kullanılarak test edilmiştir. Hem simülasyon hem de deney sonuçları önerilen kontrolörün sadece istenen yörünge boyunca sürme eksenini sürmekle kalmamış aynı zamanda parametre değişimleri ve gürültülere duyarsız jiroskop performansı sağlayan dirençli bir tasarımda ki üretim kusurlarını düzenlediğini göstermiştir [22].

J. Fei vd. z-eksenli MEMS jiroskoplar için adaptif kontrol yaklaşımlarını, adaptif kontrolör ve adaptif sürme modlu kontrolörü sırasıyla anlatmış ve simülasyonlarını kıyaslamışlardır. Önerilen adaptif kontrol yaklaşımları üretim hatalarından dolayı oluşan sönümlenme ve sertlik katsayılarını ve aynı zamanda açısal hızı tahmin edebilmiştir. Kapalı çevrim sistemlerin kararlılığı önerilen adaptif kontrol stratejileriyle oluşturulmuştur. Önerilen kontrol şemalarının sisteme etkisini kanıtlamak için sayısal simülasyonlar incelenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarının neticesinde model belirsizlikleri ve dış

bozucuların varlığında sürme modlu kontrolörün sistem kararlılığını, adaptif kontrolörden çok daha iyi sağladığı kanıtlanmıştır [23].

Samira Mir Mazhari Anvar vd. doğrusal olmayan mekanik bir sistem olan döner ters sarkacın tasarım ve uygulamalar için kararlılığı üzerinde çalışmışlardır. Döner ters sarkacın kararlılığı için geri beslemeli sürme modlu kontrol şeması önerilmiştir. Bu şemada geri besleme kontrolü ve sürme modlu kontrolün kombinine dayalı genetik bir algoritma oluşturulmuştur. Sarkaç yukarı doğru sallandıktan sonra önerilen sürme modlu kontrol aktif hale getirilmiştir ve sarkaç dik konumda stabilize edilmiştir. İstenmeyen gürültü ve kontrol enerji tüketiminin yüksek miktarları sürme modlu kontrolör uygulamasının temel dezavantajlarındandır. Gürültüyü yok etmek ve sarkacın kararlılığından sonra kontrol enerjisini düşürmek için sürme modlu kontrolör, denge ifadeleri ile sistemi kararlılığa götüren mükemmel bir kontrol kanunu olan geri besleme kontrolüne anahtarlanmıştır. Deney sonuçları önerilen bu geri beslemeli sürme modlu kontrol yönteminin, sürme modlu kontrole göre daha yüksek bir performansta olduğunu göstermiştir [24].

Juntao Fei vd. z-eksenli MEMS jiroskopta kararlılığı sağlayacak ve asimptotik izleme hatasını yakınsayacak radyal tabanlı fonksiyon kullanarak yeni bir sürme modlu sinir ağ kontrol şeması oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu kontrolör şeması büyük belirsiz sistem dinamiklerini dengelemek ve yaklaştırmak için geliştirilmiş ve ağ model hatalarını ve dış bozucularının etkisini azaltmak için sağlam bir kompensatör (dengeleyici) tasarlanmıştır. Dahası dış bozucular ve sinir ağ model hatalarının üst sınırlarını öğrenmek için başka bir radyal tabanlı sinir ağ fonksiyonu kullanılmıştır, böylece sistem belirsizliklerinin üst ön sınır bilgisi gerekliliği ortadan kalkmıştır. Sağlam Sinir Kayma Modu (RNSM), kontrol sistemlerindeki tüm adaptif kanunlar, kapalı çevrim sistemin kararlılığını garanti altına alabilen aynı Lyapunov çerçevesinde türetilmiştir. Önerilen RNSM kontrol şemasının etkinliğini doğrulamak için MEMS jiroskobun sayısal simülasyonları incelenmiştir [25].

Mingang Hua vd. MEMS jiroskoplar için adaptif bulanık kontrol ile denetim kompensatörü yaklaşımını önermişlerdir. Fonksiyon parametreleri Lyapunov temelli adaptif bir kontrolör tarafından belirlenmiştir. Bulanık kontrolör sistemin bilinmeyen parametrelerine yaklaşmak ve hataları telafi etmek için kullanılmıştır. Kapalı çevrim sistemin kararlılığını garanti altına almak ve durum değişkenlerinin sınırlarını belirleyebilmek için bir denetim kompensatörü kullanılmıştır. Sayısal simülasyonlar, sistemde dış bozukların mevcudiyetinde önerilen denetim kompensatörlü bulanık kontrolör

kullanılmasında yeterli bir performans ve sağlamlık özellikleri gösterdiğini kanıtlamıştır [26].

Mahyar Fazlyab vd. tek eksenli titreşimli MEMS jiroskoplardaki uygulamalar için akıllı bir kontrolör tasarlamışlardır. İlk olarak açısal hızın bilinmeyen zaman parametrelerini içeren bir mikro jiroskobun bilinmeyen parametreleri, sürekli zamanda en küçük dörtlü algoritma aracılığıyla tahmin edilmiştir. Daha sonra iki bulanık kayan kipli kontrol aralığı, rezonans frekansını eşleştirmek ve istenmeyen mekanik bağlantıları telafi edebilmek için eklenmiştir. Bu kontrol stratejisinin temel amacı jiroskobun parametre değişimlerine, dış bozuculara ve gürültü ölçümlerine karşı sağlamlığını arttırmaktır. Parametrelerin tutarlı tahminleri garanti altına alınabilmiş ve kapalı çevrim sistemin kararlılığı Lyapunov kararlılık teoremi aracılığıyla sağlanmıştır. Son olarak önerilen bu yöntemin etkinliğini geçerli kılabilmek için hem sabit hem de zamanla değişen çok sayıda simülasyon yapılmıştır [27].

Qing Zheng vd. MEMS jiroskopta ADRC'nin pratik uygulamalarını geliştirmeye çalışmışlardır. Titreşimli MEMS jiroskopta bağlantılı iki temel kontrol problemi vardır, bunlar jiroskobun iki titreşim eksenini kontrol etmek ve zamanla değişen dönme oranını tahmin etmektir. İki eksen arasındaki doğal frekansın eşleşmemesi, mekanik termal gürültüler, kuadratur hataları ve parametre değişimi gibi sorunları çözmek için yeni bir ADRC yaklaşımı kullanılmıştır. MEMS jiroskoptaki ADRC uygulamaları sürücü eksen için ayrı ADRC uygulamasının yanı sıra dönme oranının tahmini, sürme eksen ve algılama eksen için sürekli zamanda ADRC'yi içermiştir. Elde edilen başarılı sonuçlar MEMS jiroskoptaki problemleri çözmede en iyi yöntemin ADRC olduğunu göstermiştir [28].

2. MEMS JİROSKOPLARIN YAPISI VE DİNAMİĞİ

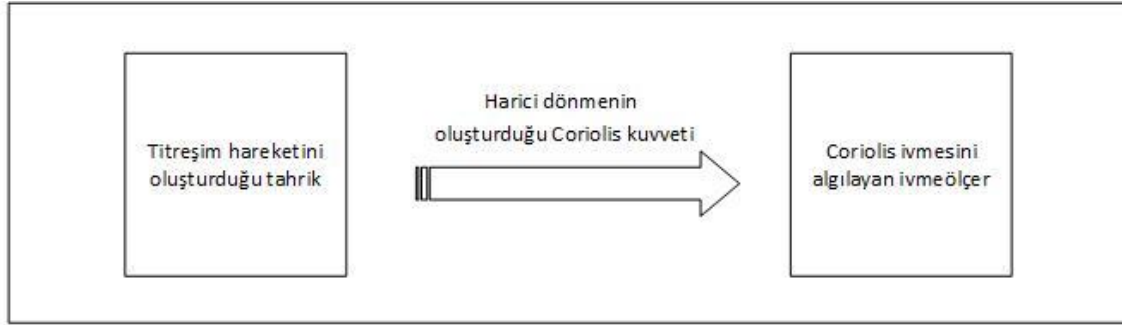
MEMS jiroskoplar açısal hızı ölçmek için tasarlanmış açısal hız jiroskoplarıdır [18]. Bir MEMS hız jiroskobu kullanarak dönme hızı elde etmek için, ölçülen hız zamana göre entegre edilmelidir. Ancak bu entegrasyon süreci dönme açısının zamanla kaymasına neden olur ve bundan dolayı açısal hız sinyalinde gürültü ve sapma oluştuğu için açısal hata hızlı bir şekilde değişim göstermektedir. Bu etkiler düşük maliyetli oransal MEMS jiroskoplarda daha çok görülür. Jiroskobun entegrasyonundan kaynaklanan sapma hatalarını sınırlamak için çeşitli teknikler önerilmiştir. Bu tekniklerden en yaygın olanı kararlı durumda ivme ölçerler kullanılarak elde edilebilen dönme ve eğim açılarına dayalı jiroskoplardır ve oluşan sapma açıları da manyetometreler kullanılarak elde edilebilir. Ancak bu tekniğin bazı dezavantajları vardır. Manyetometre sinyalleri, sensörlerin etrafında oluşan istenmeyen manyetik alanlarla ciddi bir şekilde bozulabilir. Dönme açıları sadece hareketli nesne kararlı durumdayken, ivmeölçerin ölçüm sonuçlarından doğru bir şekilde elde edilebilir [29].

İvmeölçerler harici ivmelenmeyi ölçen algılayıcılardır. Sensör, hız değerini belirlemek için yaylar vasıtasıyla sabit bir çerçeveye bağlı taşınabilir bir kütleden oluşmaktadır. Harici bir ivmelenme oluştuğu zaman kütlenin sabit pozisyonu değişir. Oluşan bu pozisyon değişiminin genliği, ivmenin büyüklüğü ile doğru ve yay yapılarının sağlamlılığı ile ters orantılıdır. Bundan dolayı sensöre uygulanan ivme girişi sensördeki kütle yer değişimine dönüştürülür. Daha sonra sensör, algı şemasında kullanılan bu yer değişiminin büyüklüğünü belirler. İvmeölçerler algılama şemaları kullanılarak karakterize edilmiştir.

Jiroskop dış açısal hızı ölçen bir algılayıcıdır. Jiroskobun kütlenin yer değişimini açısal hız girişi olarak dönüştürmesi, ivmeölçer ile jiroskobun çalışma prensibinin benzerliğini göstermektedir. Bu amaçla jiroskop, Coriolis ivmelenme prensibini kullanır [30-32]. İlk olarak jiroskobun kütlesi bir ekseninde titreştirilir ve sonra açısal bir hız oluştuğunda, kütle Coriolis ivmelenme prensibinden dolayı bir diğer ekseninde titreşmeye başlar. İkinci titreşim büyüklüğü açısal hız giriş büyüklüğü ile orantılıdır. Bu sebeple jiroskobun algı şeması, ikinci titreşim büyüklüğünün genliği ile açısal hız girişinin genliğini oluşturur.

Şekil 2.1 bir jiroskobun genel yapısını gösterir. Jiroskoplar açısal hız sensörleri olduğu için bu amaçla Coriolis ivmesini kullanırlar. Bundan dolayı jiroskopun sürme modu veya birincil modu olarak adlandırdığımız Coriolis kuvvetinin üretimi için gerekli olan bir titreşim

hareket üretici ve Coriolis ivmesini algılamak için algılama modu veya ikincil mod olarak adlandırdığımız bir algılama kısmı olmalıdır.

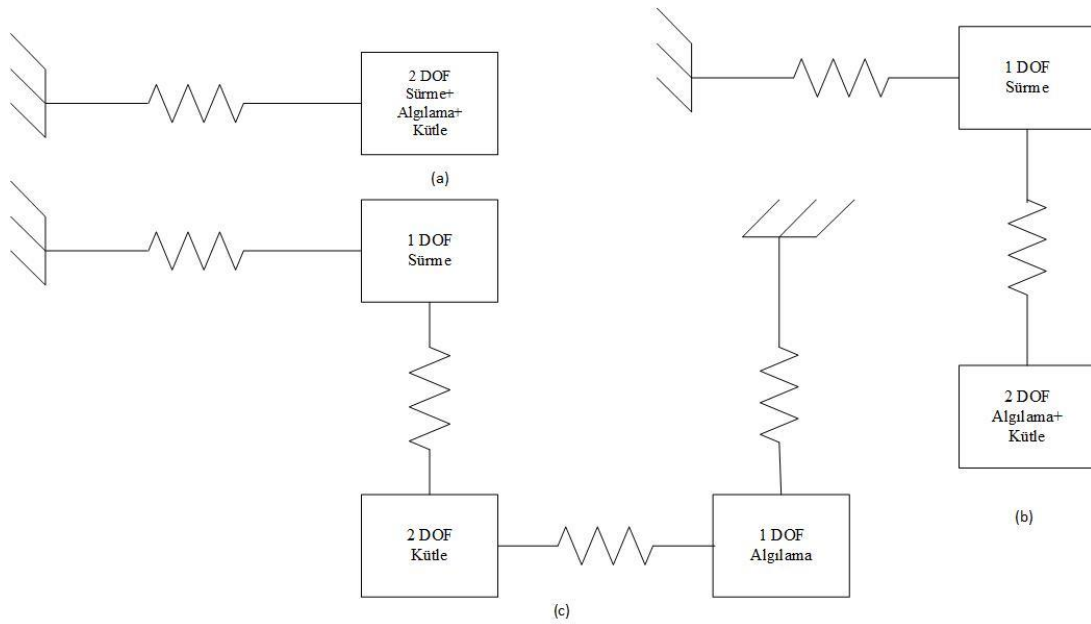


JİROSKOP

Şekil 2.1. Bir MEMS jiroskobun genel çalışma yapısı

Şekil 2.1 deki jiroskop ilk titreşimi oluşturan bir aktuatör ve harici dönmeden dolayı oluşan Coriolisi algılayan bir ivme ölçer parçasından oluşmaktadır.

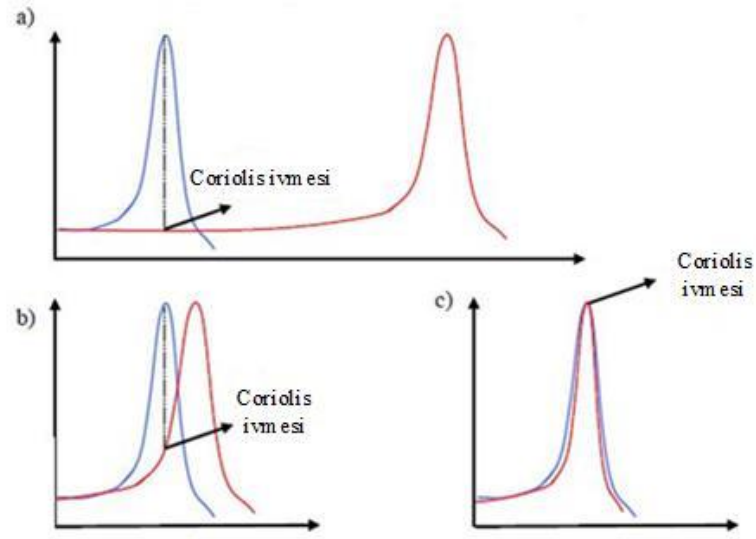
Coriolis güç üretiminden bilindiği gibi Coriolis kuvveti titreşim hareketi yapan bir nesneyi etkiler. Bundan dolayı jiroskopta, titreşim hareketini yapan nesne, Coriolis ivmesini algılayan bir kütle olmalıdır. Bu sebeple birincil mod ya da sürme modundaki titreşim hareketleri arasında mekanik bir bağlantı olmalıdır.



Şekil 2.2. Jiroskobun farklı bağlantı şekilleri

Şekil 2.2 jiroskopların üç farklı bağlantı konfigürasyonunu göstermektedir. İlk konfigürasyonda jiroskop sürme modunda titreştiğinde algılama modu, harici dönmeden etkilenmeden titreşir ve benzer şekilde sürme modu da algılama modunda oluşan titreşimden etkilenir. İkinci konfigürasyonda, sürme modunun hareketi, algılama modundan direk olarak etkilenirken algılama modunun hareketi, sürme modunun hareketini etkilemez. En kazançlı mod olan üçüncü modda, sürme modu ve algılama modu mekanik olarak ayrılmıştır ve bu yüzden birbirlerini etkilemezler. Jiroskoplar, yüksek performans elde edebilmek için üçüncü konfigürasyonda tasarlanmalıdırlar.

Jiroskop da Coriolis ivmesini algılayan bir algılama parçası olmasına rağmen bu ivmeölçer parçası standart bir ivmeölçer gibi davranmaz. Şekil 2.3 jiroskobun algı ve tahrik modunda üç farklı frekans seçeneğini gösterir. Sürme modunda Coriolis hızına dönüşecek dönme girişi sürme modunun doğrusal titreşiminden dolayı sürme modunun rezonans frekansına taşınmalıdır. Bu yüzden doğru akım (DC) bir dönme girişi sinyali uygulandığında, oluşan Coriolis hızı, sürme modu rezonans frekansına sahip bir sinüzoidal sinyal oluşacaktır. Benzer şekilde zamanla değişen bir dönme girişi sinyali uygulandığında Coriolis hız frekansı bu dönme girişinin frekansına göre değiştirilecektir. Bu yüzden algılama modu ve sürücü modu rezonans frekansının istenen bant genişliğindeki frekanslarla hız girişlerini algılama yeteneğine sahip olmalıdır. Şekil 2.3.a' da algılama modunun rezonans frekansı, farklı Coriolis hızlanma frekanslarında doğrusal tepki elde etmek için çok büyüktür. Doğrusal tepki gözlemlerinden elde edilen bant genişliğinden jiroskobun algılama modu rezonans frekansı, doğrusal bir cevaba sahip olan sürme modu rezonans frekansından 20-25 kat daha büyük olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 2.3.b'de jiroskobun sürme ve algılama modunun rezonans frekansları uyumsuz olacak şekilde tasarlanmıştır ancak farkları a'daki kadar büyük değildir. Hata yanıtı Coriolis hız frekansına duyarlı dış elektronik güçlerle telafi edilebilir. Şekil 2.3.c'de sürme ve algılama modlarının rezonans frekansları eşleşecek şekilde tasarlanmıştır. Bu durumda Coriolis ivmesinin genliği sistemin kalite faktörü ile çarpılır ve bu yüzden b' dekine kıyasla oldukça büyüktür ancak sistemin bant genişliği azalır. Burada oluşan hata yanıtı benzer şekilde dış elektronik güçlerle telafi edilebilir.



Şekil 2.3. Jiroskobun üç farklı frekans seçeneği

Kaçınılması imkansız üretim hatalarından dolayı, jiroskoplar uyuşmayan rezonans frekanslarına sahiptir [30]. Jiroskop tasarımlarında frekans uyumsuzluğunu telafi eden bazı kontrol elektrodları da bulunmalıdır. Tasarımlarda sürme modu ekseninin algılama modu eksenine göre yanlış yerleştirilmesinden kaynaklanan kuadratur hatalarını yok etmek için bazı elektrodlar da bulunmalıdır [34-35].

Jiroskobun hassasiyeti algılama elektrodu titreşim genliğinin miktarıyla ilişkilidir. Algılama modunun rezonans frekansı azaltılırsa, buna bağlı olarak jiroskobun hassasiyeti artar. Duyarlılığı doğrudan değiştiren bir diğer faktör ise kalite faktörünün değeridir. Algılama elektrodu titreşim genliğinin matematiksel ifadesi [36]:

$$Y_{algılama} = \frac{\Omega Q x}{\pi f} \quad (2.1)$$

x sürme modu titreşim genliği, Q kalite faktörü, Ω dönme girişinin genliği (rad/sn), f sürme modunun rezonans frekansıdır.

MEMS jiroskoplar dönme açısı ölçüm modunda kavramsal olarak çalışabilir. Bir izotropik osilatör serbest bir şekilde çalıştığında, salınım çizgisinde oluşan yalpalama bize dönme açısının bir ölçüsünü sağlar. Serbest salınım için, iki titreşim modunun salınımının doğal frekansları aynı olmalıdır ve modlar sönümsüz olmalıdır. İdeal olarak bir MEMS jiroskobun titreşim modlarının mekanik olarak ayrılmış olması gerekir, doğal frekansları eşleşmeli ve jiroskobun çıkışı yalnızca dönmeye karşı hassas olmalıdır. Ancak pratikte

üretim hataları ve çevresel değişimler, iki titreşim modu ve sönüm katsayılarına sahip bozucu kuvvetlerin mevcut olduğu durumlarda salınım frekanslarının uyumsuzluğuna neden olurlar [37]. Üretim hataları açı ölçen bir jiroskobun gerçek sınırlarını belirleyen en önemli faktörlerdir. Hız jiroskobu ile ilgili yayınlanmış birçok makale olmasına rağmen [38-39], açı ölçme jiroskoplarını gerçekleştirmek için birkaç kontrol algoritması sunulmuştur. Friedland ve Huttonun yaptığı çalışma göz önüne alındığında [40], dönme açısını ölçmek için titreşimli bir jiroskop kullanılması gerektiği kanıtına varılmıştır. Doğrusal olmayan geri beslemeli bir kontrol R. Horowitz vd., A. Shkel vd. tarafından verilen analitik sonuçlara dayalı olarak açısal momentum kontrolü ve enerji kontrolünün geliştirildiği kaynaklarda sunulmuştur [41]. Ancak eşit sönümleme varsayımına dayalı enerji kontrolü ve açısal momentum kontrolü Coriolis hızı ile etkileşime açıktır. D. Piyabongkarn vd.'nin yaptığı çalışmada kontrol edilen sistemin kararlılığını ispatlamak için başka bir kompozit doğrusal olmayan geri besleme kontrolü verilmiştir [41].

3. Z-EKSENLİ MEMS JİROSKOPLARIN KONTROLÜ

MEMS jiroskobun titreşim eksenini üzerinde bir titreşim oluşturmak ve dönme oranını tahmin etmek için çeşitli kontrol yöntemleri kullanılır. Ancak MEMS jiroskopların küçük boyutları nedeniyle kontrolör tasarımı üzerinde büyük problemler çıkar. İki eksen arasındaki mekanik bağlantılardan dolayı hassas olmayan mikro fabrikasyonlar ve bozucular, parametre değişimleri ve mekanik termal gürültüler oluşturur ve bunlar MEMS jiroskobun performansını düşürür. Mekanik bozucular ve kontrol güçlerindeki bozulmaları düzenlemek için MEMS jiroskobun performansını arttıracak bir kapalı çevrim kontrol sistemi geliştirilmelidir [22].

1990'lı yıllardan beri MEMS jiroskopların geri beslemeli kontrolü üzerinde sınırlı sayıda ve yetersiz çalışmalar yapılmıştır. L. Dong ve R. Leland gürültülü bir ortamda adaptif kontrolörlerle yaptıkları çalışma da performans artışı sağlamışlardır [42-43]. S. Park, adaptif modda MEMS jiroskopları çalıştırmak için bir adaptif kontrolör geliştirmiştir. Ancak tahrik eksenini boyunca kütle hareketinin nispeten büyük ve algılama eksenini boyunca çok küçük olduğu geleneksel jiroskoplar çok daha yaygın kullanım alanına sahiptir [44].

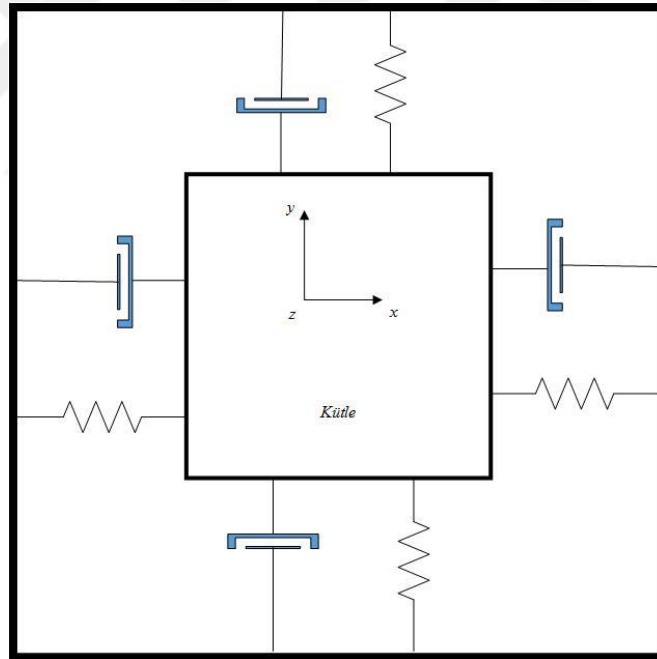
Jiroskoplar, enerjiyi Coriolis güçleri yardımıyla bir ekseninden diğer eksene taşır. Geleneksel olarak jiroskoplar sürme modunda bilinen bir salınım hareketinde hareket ettirilir ve daha sonra algılama modu boyunca Coriolis hızı oluşur. Coriolis ivmesi sürme moduna diktir ve algılama modunun hareketi uygulanan açısal hız hakkında bilgi sağlar. Ancak jiroskobun performansı üretim hataları, parametre değişimleri ve pratik uygulamalarda var olan dış bozucularla belirlenir. Bu yüzden jiroskobun hareketini kontrol etmek için çeşitli kontrol yöntemleri geliştirilmiştir [45].

Bu kontrol yöntemlerinden biri MEMS jiroskopların tahrik moduna uygulanan ADRC'dir [46-47]. ADRC birçok mekanik sistemde başarılı olarak kullanılmıştır. Bu kontrol stratejisinin temel fikri sistem dinamiklerini ve hatalarını tahmin etmek ve kontrol güçlerinde oluşan aktif bozucuları gidermektir. Durum uzay modeli kullanarak sistem dinamikleri ve hatalarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi ile ADRC sürücü ekseninin çıkışı, rezonansa başarılı bir şekilde sürdürülebilir. ADRC, eksenin belli bir modeline bağımlı olmadığı için parametre değişimlerine, hatalara ve gürültülere karşı oldukça sağlamdır. Bu kontrolörün başka bir avantajı ise kontrolörün gerçek bir sistemde uygulanmasını kolaylaştıran birkaç ayar parametresidir. ADRC'nin verimliliğini test etmek

için FPGA tabanlı kontrolör, piezoelektrik olarak tahrik edilen bir titreşimli jiroskop da çalıştırılır. Deney sonuçları kontrolörün verimliliğini gösterir [22].

3.1. Z-eksenli MEMS Jiroskobun Yapısının Dinamiği

MEMS jiroskobun mekanik yapısı şekil 3.1’de görüldüğü gibi yaylarla ve sönümleyicilerle sert bir çerçeveye tutturulmuş sağlam bir ktle olarak tanımlanabilir [48]. Ktle, x sürme eksenini boyunca rezonansa sürülürken, sert ereve dönme ekseninde (z-ekseninde) döner ve bu sırada Y eksenini (algılama eksenini) zerinde hem sürme hem de dönme eksenine dik bir Coriolis ivmesi oluşur. Coriolis ivmesi, sürme ekseninin çıkışı ve bilinmeyen dönüş hızının genliği ile doğru orantılıdır. Coriolis ivmesi yardımıyla, algılama ekseninin titreşimini algılayarak dönme oranını tahmin edebiliriz. Dönme oranını doğru bir şekilde tahmin edebilmek için sürme ekseninin titreşim genliği sabit bir seviyeye ayarlanmalıdır. Sürme eksenini kontrolörü, tahrik eksenini rezonansa sürmek ve çıkış genliğini istenilen bir değerde tutmak için kullanılır.



şekil 3.1. MEMS jiroskobun ktle-yay yapısı

İki eksen arasındaki sönümlemeyi ihmal edersek ve her iki eksenin doğal frekansının aynı olduğunu varsayarsak titreşimli MEMS jiroskobun matematiksel olarak ifadesi:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x + \omega_{xy}y - 2\Omega\dot{y} = \frac{k}{m}u_d \quad (3.1)$$

$$\ddot{y} + 2\zeta\omega_n\dot{y} + \omega_n^2y + \omega_{xy}x + 2\Omega\dot{x} = \frac{1}{m}N(t) \quad (3.2)$$

Burada x ve y sırasıyla sürme ve algılama eksenlerinin çıkışları, $2\Omega\dot{x}$, $2\Omega\dot{y}$ Coriolis ivmeleri, Ω dönme açısı, ω_n sürme ve algılama eksenlerinin doğal frekansı, $\omega_{xy}y$, $\omega_{yx}x$ z-eksen arasındaki yay çiftlerinin oluşturduğu kuadratür hataları, ζ sönümleme katsayısı, m MEMS jiroskobun kütlesi, k kontrolör kazancı, u_d tahrik ekseninin kontrol girişidir. Denklem 3.2’de N(t) bozucu girişin, algılama eksenindeki mekanik-termal güçleridir. Tahrik eksenindeki termal gürültülerin etkisi ihmal edilebilir [49]. Denklemden verilen kuadratür hataları bilinmeyen sabit sinyallerdir, zamanla değişen dönme hızı bilinmemektedir ve sönümleme katsayısı tipik olarak değişen bir aralığa sahiptir. Algılama ekseninin açık çevrim mod’da çalıştığını varsayılır.

Dinamik model, MEMS jiroskobun sistem dinamiklerini belirlemek, çıkışta oluşan hataları düzenlemek, zamanla değişen bilinmeyen dönme hızını, mekanik kusurlardan dolayı oluşan kuadratür hatalarını belirlemek ve bu hataları düzeltmek için kullanılır.

Denklem 3.1’i düzenleyerek yeniden yazarsak

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}, d) + bu_d \quad (3.3)$$

$$b = k/m; \quad (3.4)$$

$$d = -\omega_{xy} + 2\Omega\dot{y} \text{ dış bozukları ifade eder.} \quad (3.5)$$

$f(x, \dot{x}, d)$ yada basitçe f olarak ifade edilen fonksiyon hem sistem dinamiklerinin hem de dış bozucuların denklem olarak ifade edilmiş şeklindedir.

$$f = -2\zeta\omega_n\dot{x} - \omega_n^2x - \omega_{xy}y + 2\Omega\dot{y}. \quad (3.6)$$

$$\Omega = \Omega_0 \sin(2\pi ft) \quad (3.7)$$

Tablo 3.1. Z-eksenli MEMS Jiroskobun parametreleri

Parametreler	Değerler
Eksenlerin doğal frekansı (ω_n)	63881.1 rad/sn
Sönümlleme katsayısı (ζ)	0.0005
Kuadratur hatası (ω_{xy})	$6000 \text{ rad}^2/\text{sn}^2$
Genlik (Ω_0)	0.1 rad/sn
Frekans (f)	50 Hz
İdeal çıkış genliği (A)	215 mV
Gözlemcinin bant genişliği (ω_0)	$2.5 \times 10^6 \text{ rad/sn}$
Kontrolörün bant genişliği (ω_c)	$5 \times 10^5 \text{ rad/sn}$
Örnekleme periyodu (T_s)	$1 \times 10^{-8} \text{ sn}$

Titreşimli MEMS jiroskobun parametreleri Tablo 3.1’de verilmiştir. $\Omega = \Omega_0 \sin(2\pi ft)$ denkleminde Ω_0 genlik ve $2\pi ft$ açısal frekanstır. Dönme oranının esas genliği 0.1 rad/sn ve f frekansı 50 Hz olarak kabul edilmiştir. Piezoelektrik olarak tahrik edilen titreşimli jiroskop için sürme ekseninin referans sinyali $r = A \cos(\omega t)$ ve $\omega = 63428 \text{ rad/sn}$ ’dir. Sürme ekseninin ideal çıkış genliği $A = 215 \text{ mV}$ ’dur. Bu gerilim çıkışı mikrometre cinsinden jiroskobun doğrusal olarak yer değişim sonucu ile doğru orantılıdır. $A = 215 \text{ mV}$ simülasyonda sürme ekseninde çıkış genliğini temsil eder. Kontrol sinyalinin genliği $\pm 250 \text{ mV}$ ’dur. Simülasyonda bu değerler 215 ve 250 olarak alınmıştır. Simülasyon süresi boyunca mekanik ve termal gürültülerin etkisi ihmal edilmemiştir. Tasarım parametresi $b = k/m = 2.7178 \times 10^8$ ‘dir. Kontrolörün bant genişliği $\omega_c = 5 \times 10^5 \text{ rad/sn}$ ve gözlemcinin bant genişliği $\omega_0 = 2.5 \times 10^6 \text{ rad/sn}$ ’dir.

3.2. Z-eksenli MEMS Jiroskobun PID İle Kontrolü

Bu tez çalışmasında MEMS jiroskop kontrolü için uygulanan ilk kontrol yöntemi PID ile kontrol yöntemidir. PID kontrolör PI ve PD kontrolörün birleşiminden yani K_p , K_i ve K_D katsayılarından oluşmaktadır. K_p oransal katsayısı sistemin kontrol işaretini, kontrolör çıkışına sabit bir oranla aktarır. K_i integral katsayısı giriş işaretinin integralinden ve K_D katsayısı da giriş işaretinin türevinden faydalanmamızı sağlar. PD ve PI kontrolörleri de kontrol edilecek sisteme uygulanabilir. PD kontrolörü yalnızca oransal ve türevsel katsayılardan oluşmaktadır. PD kontrolörü sistem yanıtının yerleşme zamanını ve aşmayı azaltır ancak yükselme zamanını ve kararlı hal hatasını çok az etkiler. PI kontrolör, oransal

ve integral katsayılarından oluşmaktadır. PI kontrolör sistem yanıtının yükselme zamanını azaltıp, aşma ve yerleşme zamanını artırır ve kararlı hal hatasını yok eder. Her iki kontrolöründe avantaj ve dezavantajları mevcuttur bundan dolayı PI ve PD kontrolörün avantajlarından faydalanabilmek için PID kontrolör tasarlanmıştır. PID kontrolör ile aşma olmadan, hızlı yükselme zamanına sahip ve kararlı hal hatası olmayan bir sistem yanıtı elde edilebilir. PID kontrolörünün genel transfer fonksiyonu:

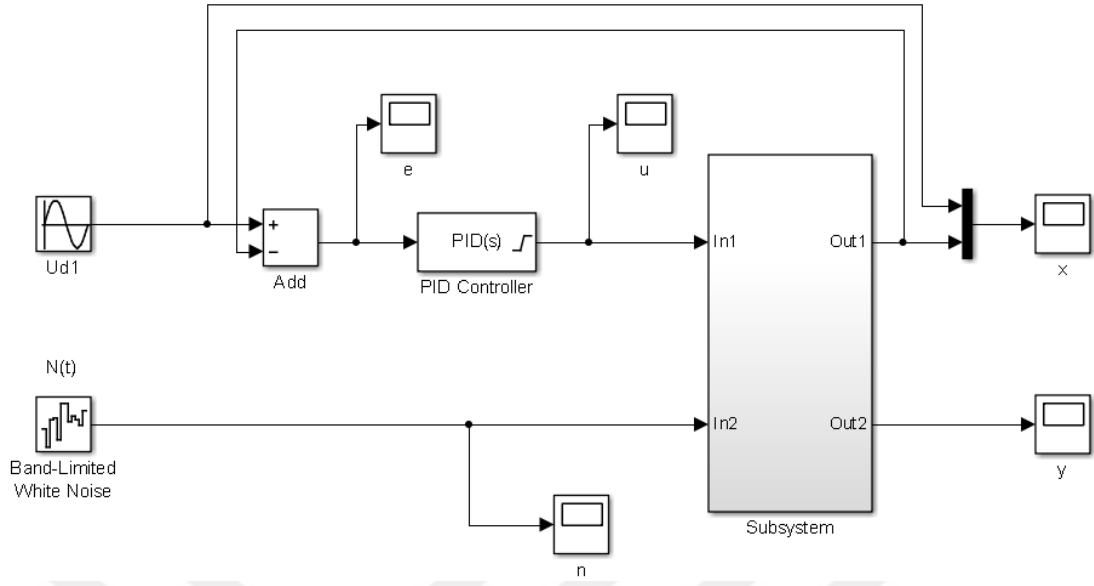
$$G_c(s) = K_p + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir. Bu tez çalışmasında MEMS jiroskop sistem girişine referans olarak genliği 215 mV, frekansı $2\pi \times 10100$ olan bir sinüzoidal dalga uygulanmıştır. Sisteme uygulanan PID katsayıları Tablo 3.2’de görülmektedir. Bu PID katsayıları PID kontrolörünün tune ayar seçeneğinden otomatik olarak elde edilmiştir. PID kontrolörü yardımıyla kapalı çevrimli kontrol yöntemi kullanılarak sistem çıkışı referansa yaklaştırılmıştır. Burada ki kontrol hedefimiz sürme ekseninin mekanik-termal gürültüler, mekanik bağlantılar ve parametre değişimlerinin varlığında belirlenen genlik ve frekansta salınmasıdır.

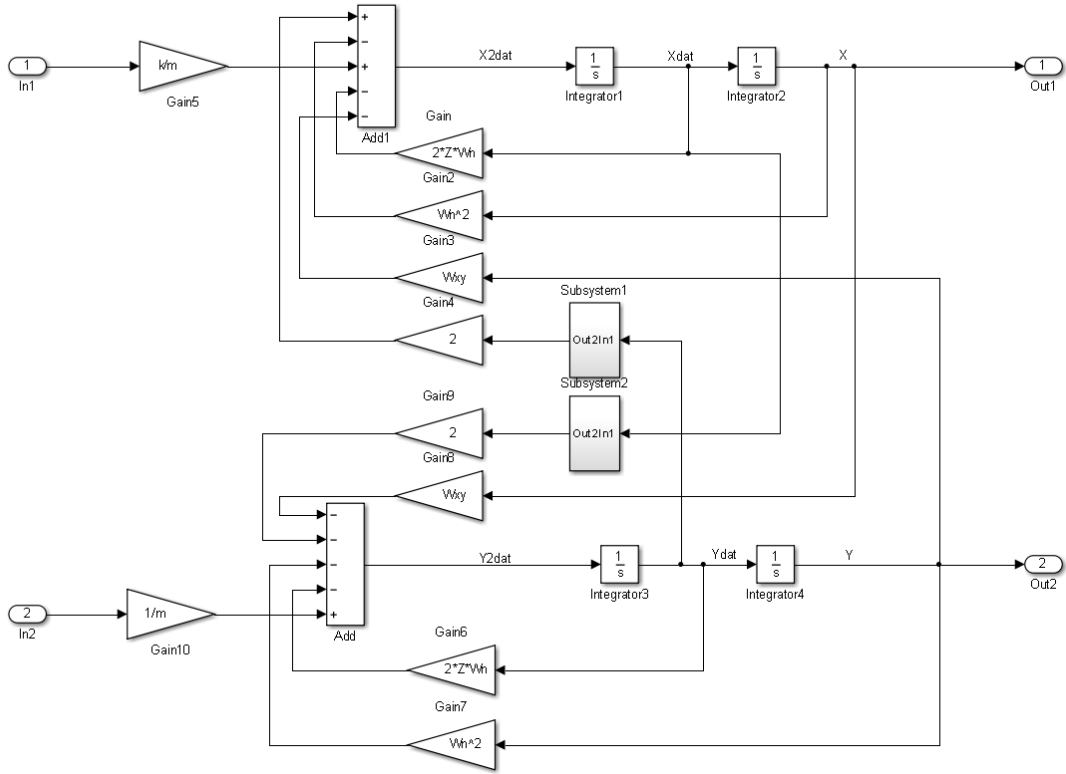
Tablo 3.2. Z-eksenli MEMS Jiroskobun PID parametreleri

Parametreler	Değerler
K_p	181
K_i	1044981
K_D	2.84×10^{-5}

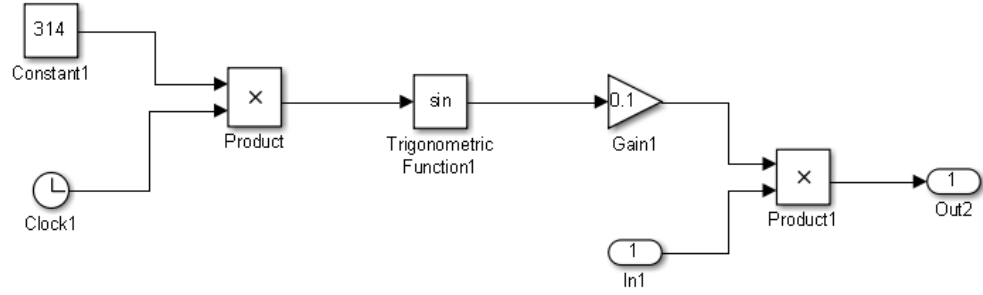
Şekil 3.2 z-eksenli bir MEMS jiroskobun sürekli zamanda PID ile kontrolünün blok diyagramını göstermektedir. Burada MEMS jiroskop Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Modellemede sürekli zamanda PID bloğu kullanılmıştır. Oluşturulan blok diyagramın matematiksel ifadesi subsystem olarak indirgenmiştir. Şekil 3.3 indirgenmiş olarak ifade edilen subsystem bloğunu göstermektedir. Şekil 3.3’de verilen Subsystem1 ve Subsystem2 blokları Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de ifade edilmiştir.



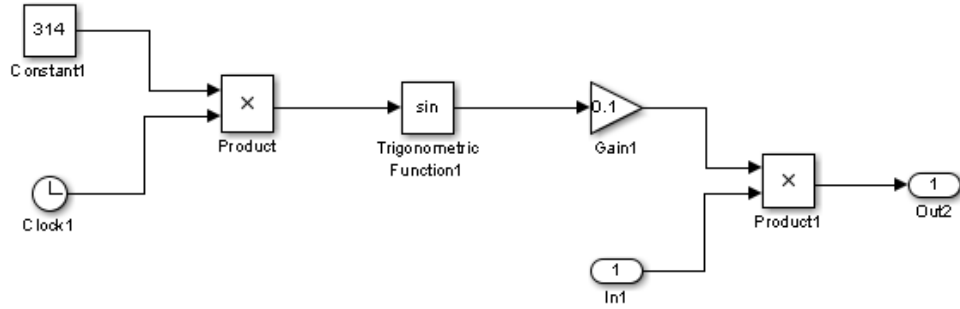
Şekil 3.2. Z-eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamanda oluşturulan MATLAB/Simulink blok diyagramı



Şekil 3.3. Z-eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamanda oluşturulan Subsystem MATLAB/Simulink blok diyagramı



Şekil 3.4. Z-eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamanda oluşturulan Subsystem1 MATLAB/Simulink blok diyagramı



Şekil 3.5. Z-eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamanda oluşturulan Subsystem2 MATLAB/Simulink blok diyagramı

3.3. Z-eksenli MEMS Jiroskobun KKK Tabanlı Kontrolü

KKK tabanlı kontrol dış bozululara hassasiyet ve parametre değişimlerine sağlamlık gibi birçok cezbedici özelliğe sahip, sağlam bir kontrol tekniğidir [50]. KKK, yörüngeler kayma alanının üzerinde kaldığında sistem davranışını tanımlayan eşdeğer bir kontrol parçasından ve yörüngeleri kayma alanına erişmeye zorlayan değişken bir yapının kontrol yapısından oluşur ve bunların kayma alanına ulaşmasını engeller. Kayma modu, pratik uygulamalarda yüksek frekans salınımı ya da gürültü gibi bazı limitlere sahiptir. Kayma kipli kontrol dış bozululara hassasiyet, parametre değişimlerine sağlamlık ve kolay uygulanabilir olması gibi birçok cezbedici özelliğe sahip sağlam bir kontrol tekniğidir. Maksimum aşma ve izleme hatalarının yakınsama oranı gibi geçici performans indisleri pratik ölçme uygulamalarında oldukça önemlidir. Örneğin çok büyük aşma oranı ölçme aleti ölçeğinin fazlasıyla ötesine gidebilir ve bu yüzden ölçme aleti zarar görebilir. Çok yavaş yakınsama oranı yani uzun yerleşme zamanı, ölçme taleplerini karşılamayabilir. Bu performans ölçütlerini karşılamak için çeşitli kontrol yöntemleri kullanmak oldukça önemlidir [45].

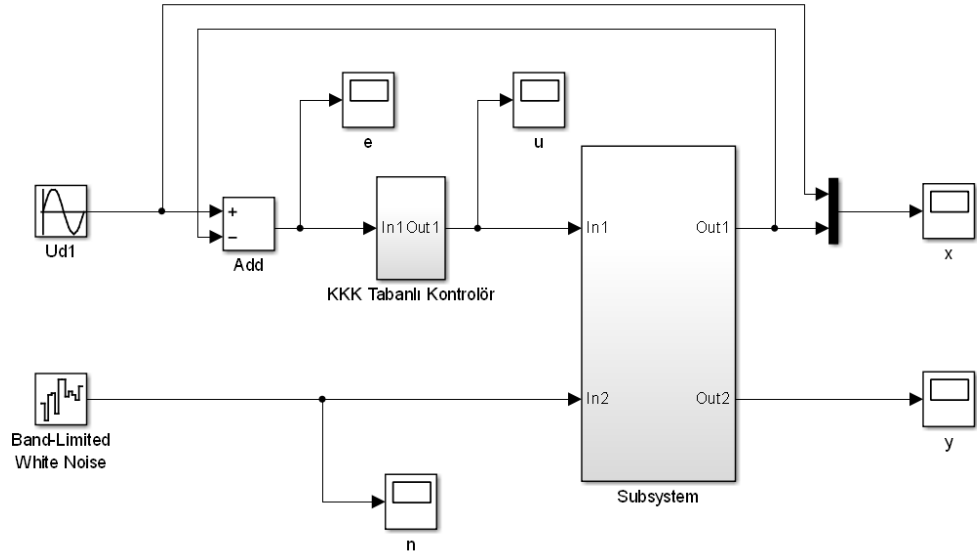
Bu tez çalışmasında z-eksenli MEMS jiroskop için PID kontrolörün yanı sıra aynı sistem dinamikleri ve referans giriş için KKK tabanlı bir kontrol yapısı kullanılmıştır. KKK tabanlı bu kontrol yapısında,

$$u=K \times S \quad (3.9)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada K sabit kazanç değeridir ve kayma yüzeyi anahtarlama fonksiyonu;

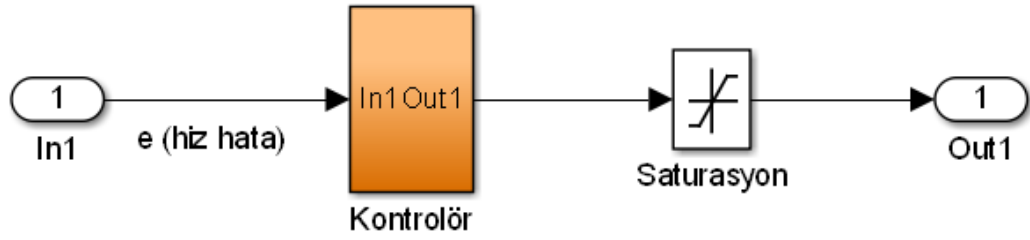
$$S= \lambda e + \dot{e} \quad (3.10)$$

olarak ifade edilir. Kayma yüzeyi eğimi ise λ ile temsil edilmektedir. Bu kontrol yöntemi ile PID kontrol sisteminden daha iyi bir sonuç elde edilmiş ve hata değeri daha kısa sürede sifıra erişmiştir. Şekil 3.6'da z-eksenli MEMS jiroskobun sürekli zamanda KKK tabanlı bir kontrol yapısının kullanıldığı MATLAB/simulink blok diyagramı verilmiştir.



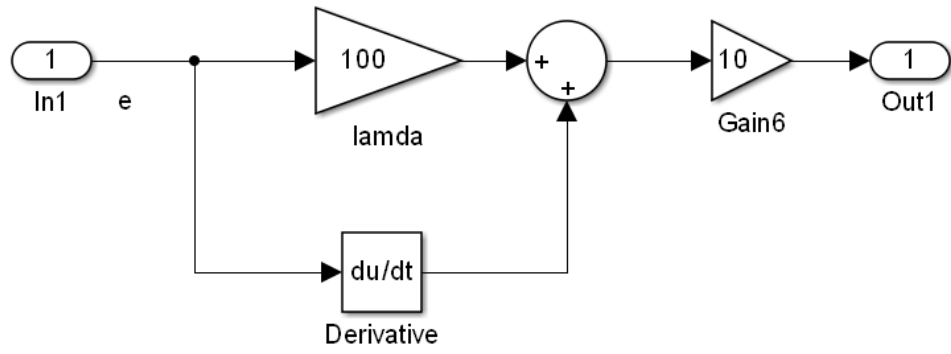
Şekil 3.6. Z-eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı sürekli zamanda MATLAB/Simulink blok diyagramı

Şekil 3.7 z-eksenli MEMS jiroskobun sürekli zamandaki kontrolünün blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 3.7. Z-eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolün MATLAB/Simulink blok diyagramı

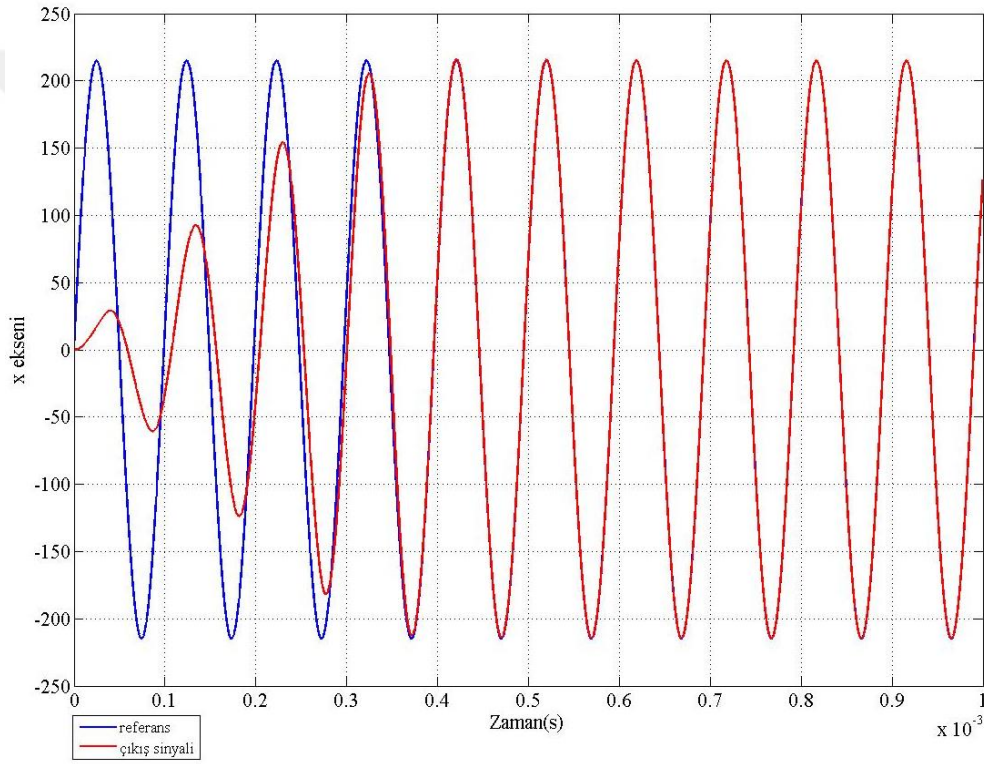
Kontrolörün sürekli zamanda ki blok diyagramı Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



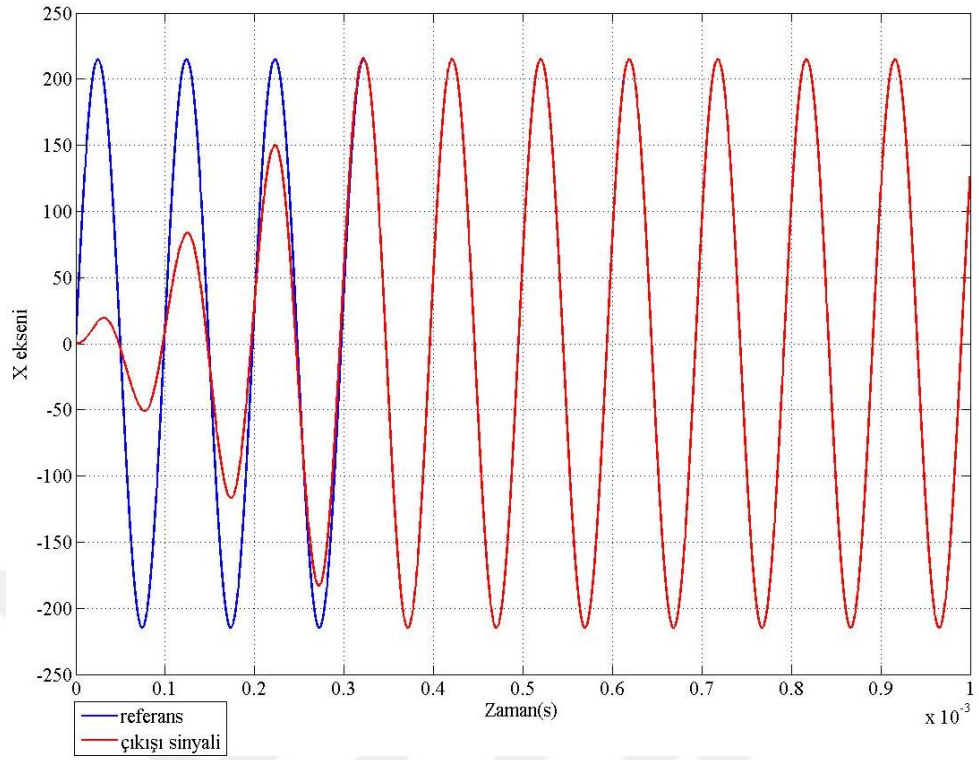
Şekil 3.8. Z-eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolörün sürekli zamandaki yapısı

3.4. Z-eksenli MEMS Jiroskobun Kontrol Sonuçları

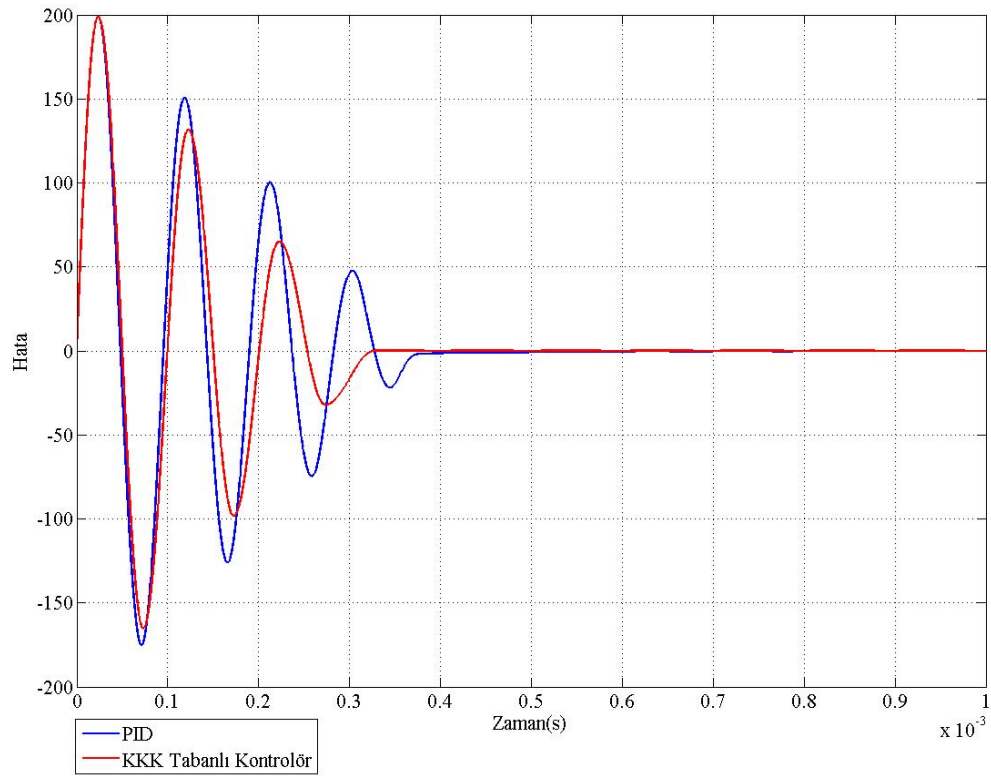
Z-eksenli MEMS jiroskobun dinamik denklemleri üzerinden matematiksel modeli oluşturulmuştur. Sistem PID ve kayma kipli kontrolörün benzetiminden oluşturulan kontrolör ile kontrol edilmiştir. PID ile sürekli zamanda elde edilen kontrol sonuçları Şekil 3.9’da görülmektedir. Şekil 3.10’da kayma kipli kontrolöre esinlenerek oluşturulan kontrolörün kontrol sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan tasarlanan yeni kontrolörün sistem çıkışını daha hızlı yakaladığını görmekteyiz. Şekil 3.11’de tasarlanan kontrolörün, PID ile kontrolden daha hızlı kararlılığa eriştiği hata farkı sinyallerinden görülmektedir.



Şekil 3.9. Z-eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamandaki kontrol sonuçları



Şekil 3.10. Z-eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolünün sürekli zamandaki kontrol sonuçları



Şekil 3.11. Z-eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolü ve PID kontrolünün sürekli zamandaki hata sinyalleri

4. ÜÇ EKSENLİ MEMS JİROSKOPLARIN KONTROLÜ

MEMS jiroskopların performansı zamanla değişen parametreler, kuadratur hataları ve titreşen iki eksen arasındaki salınım uyumsuzluğundan kaynaklanan dış bozucularla belirlenir. Son yıllar da üç eksenli açısal hız sensörlerinin, MEMS üretim teknolojisinin hızla gelişmesiyle birlikte uygulama alanı oldukça artmıştır. Akıllı kontrol ya da adaptif kontrol gibi kontrol yöntemleri MEMS jiroskop kontrolüne uyarlanabilir kontrol yöntemleridir. MEMS jiroskobu kontrol etmek için çeşitli kontrol yaklaşımları önerilmiştir ve MEMS jiroskop takibine gerekli önem verilmeye başlanmıştır [51]. Leland tahrik ekseninin frekansını, belirlenmiş bir frekansa ayarlamak ve kuvvetin yeniden dengelenmesi için algılama ekseninin titreşimini sıfıra indirmek için titreşimli bir jiroskop da iki adaptif kontrolör üretmiştir [43]. Batur ve Sreeramreddy MEMS jiroskop için bir kayma modlu kontrolör geliştirmiştir [12]. Sung ve Lee jiroskobun mod uyum kontrolü üzerinde çalışmak için bir faz-alan tasarımı geliştirmişlerdir [52]. Antonello vd. titreşimli MEMS jiroskoplarda titreşim modunu otomatik olarak eşleştirmek için uç değerleri arama kontrolü üzerinde çalışmışlardır [53]. Park vd. hem titreşim eksenini hem de jiroskobun tüm performansını kontrol eden adaptif bir kontrolör önermişlerdir [54]. John ve Vinay üç eksenli açısal hız sensör cihazını adaptif bir şekilde kontrol etmek için yeni bir kontrol kavramı geliştirmiştir [55]. MEMS jiroskopları kontrol etmek için kayma kipli kontrol, adaptif kontrolöre dahil edilmiştir [56-57].

Model belirsizlikleri mühendislik alanlarında kaçınılmazdır ve bu model belirsizliklerinin ya uyarlanabilir ya da sağlamlaştırılması gereklidir. Sinir ağı ya da bulanık mantık gibi akıllı kontrol yaklaşımları matematiksel modellere gerek duymaz ve doğrusal olmayan sistemlere yaklaşıklık yeteneği kazandırır. Bulanık mantık yaklaşımının temel fikri doğrusal olmayan sistemi, bulanık bir sistem tarafından isteğe bağlı bir yakınlığa yaklaştırabilmektir. Adaptif bulanık kayma kipli kontrolör, kapma kipli kontrolün, bulanık çıkarım mekanizmasının ve adaptif algoritmanın özelliklerinin birleşiminden oluşmuştur. Wang evrensel bir yaklaşıklık teoremi önermiştir ve kompakt bir alanda bulanık sistem kullanarak belirli bir fonksiyon takımının keyfi bir fonksiyona rastgele doğrulukla yaklaşabildiğini kanıtlamıştır [58]. Bu yüzden rastgele doğrusal olmayan sistemlere yaklaşımda bulanık mantık sistemini kullanmak, uyarlanabilir uygulamalar için kullanışlı bir araçtır. Guo ve Woo bir robot manipülatörü için adaptif bir bulanık kayma kipli kontrolör önermiştir [59]. Yoo ve Ham robot manipülatörü için bir bulanık kompensatör kullanarak

adaptif (uyarlanabilir) bir kontrolör geliştirmiştir [60]. Sun vd. robot manipülatörü için kayma kipine dayalı bulanık bir adaptif kontrolör önermiştir [61]. Jin robot manipülatörünün adaptif bulanık kontrolünü bağımsızlaştırmaya çalışmıştır [62]. Yi ve Chung belirsizliklerin var olduğu robot manipülatörü için sağlam bir bulanık mantık kontrolörü tasarlamıştır [63]. Robot manipülatörleri için bulanık yaklaşımlar kullanılarak adaptif bulanık kontrol yaklaşımları incelenmiştir [64-65]. Doğrusal olmayan sistemler için adaptif T-S bulanık kontrol ve adaptif bulanık geri beslemeli kontrol önerilmiştir [66-67]. Ancak sistematik kararlılık analizi ve MEMS jiroskoplara uygulanan adaptif bulanık kontrolörlerin kontrolör tasarımı henüz literatürde bulanamamıştır. Bu sebeple MEMS jiroskobun kontrolünde model belirsizliklerini, harici arızaları telafi etmek ve doğrusal olmayan sisteme yaklaşmak için bulanık kontrol şemasına uyarlamak gereklidir böylece MEMS'in takibi ve hataları telafi etme performansı artar.

Bu tez çalışmasında üç eksenli MEMS jiroskobun kapalı çevrim sisteminin asimptotik kararlılığını sistemin bilinmeyen doğrusalsızlıklarıyla tasarlayabilmek için PID kontrolör ve SMC kontrolör kullanılmıştır.

4.1. Üç Eksenli MEMS Jiroskobun Dinamiği

Jiroskobun sabit bir doğrusal hızda hareket ettiğini varsayarsak; jiroskop sabit bir açısal hızda döner. Merkezkaç kuvvetlerinin ihmal edilir ve jiroskobun x, y, z eksenleri boyunca hareket ettiği düşünülürse üç eksenli MEMS jiroskobun dinamik denklemleri aşağıdaki gibi olur:

$$m\ddot{x} + d_{xx}\dot{x} + d_{xy}\dot{y} + d_{xz}\dot{z} + k_{xx}x + k_{xy}y + k_{xz}z = u_x + 2m\Omega_z\dot{y} - 2m\Omega_y\dot{z} \quad (4.1)$$

$$m\ddot{y} + d_{xy}\dot{x} + d_{yy}\dot{y} + d_{yz}\dot{z} + k_{xy}x + k_{yy}y + k_{yz}z = u_y - 2m\Omega_z\dot{x} + 2m\Omega_x\dot{z} \quad (4.2)$$

$$m\ddot{z} + d_{xz}\dot{x} + d_{yz}\dot{y} + d_{zz}\dot{z} + k_{xz}x + k_{yz}y + k_{zz}z = u_z + 2m\Omega_y\dot{x} - 2m\Omega_x\dot{y} \quad (4.3)$$

m , kütleyi ifade eder. Üretim hataları temel olarak ω_{xy} , ω_{xz} , ω_{yz} asimetrik yay katsayılarına etki eder. d_{xy} , d_{yz} , d_{xz} asimetrik sönümleme katsayılarıdır. ω_x , ω_y , ω_z x,y ve z eksenlerindeki yay katsayılarıdır. d_{xx} , d_{yy} , d_{zz} x,y,z eksenlerindeki sönümleme terimleridir. Ω_x , Ω_y , Ω_z x,y,z eksenlerindeki açısal hızlardır. u_x , u_y , u_z x,y,z eksenlerindeki kontrol güçleridir.

Üç eksenli MEMS jiroskoptaki kontrol hedefimiz x,y ve z eksenlerindeki sistem çıkışlarını sinüzoidal olarak istenen yörüngede takip edebilmektir.

$x_m = \sin(\omega_1 t)$, $y_m = 1.2 \sin(\omega_2 t)$, $z_m = \sin(\omega_3 t)$ 'dir ve $\omega_1 = 6.71$ kHz, $\omega_2 = 5.11$ kHz, $\omega_3 = 4.17$ kHz'dir. MEMS jiroskobun sistem parametreleri; $m = 0.57 \times 10^{-8}$ kg, $\omega_0 = 1$ kHz, $q_0 = 10^{-6}$ m, $d_{xx} = 0.429 \times 10^{-6}$ Ns/m, $d_{yy} = 0.0429 \times 10^{-6}$ Ns/m, $d_{zz} = 0.895 \times 10^{-6}$ Ns/m, $d_{xy} = 0.0429 \times 10^{-6}$ Ns/m, $d_{xz} = 0.0687 \times 10^{-6}$ Ns/m; $d_{yz} = 0.0895 \times 10^{-6}$ Ns/m; $k_{xx} = 80.98$; $k_{xy} = 5$ N/m; $k_{yy} = 71.62$ N/m, $k_{zz} = 60.97$ N/m, $k_{xz} = 6$ N/m; $k_{yz} = 7$ N/m'dir.

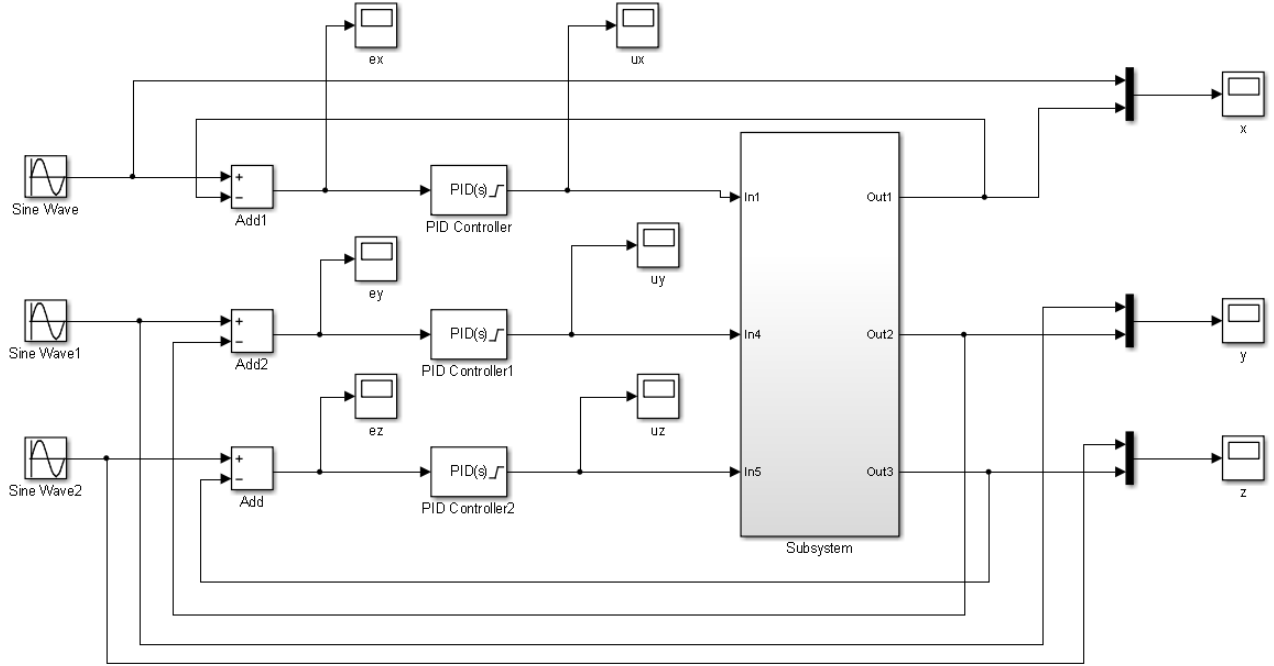
MEMS jiroskobun sistem parametreleri Tablo 4.1'de verilmektedir. Sistemin her eksenindeki genel yerleşme aralığı mikrometre seviyelerinde olduğu için referans uzunluğu q_0 , 1 μ m olarak seçilir ve kHz cinsinden yazdığımız ifadeleri tez çalışmamızda Hz olarak kullandık bu yüzden de $\omega_0 = 1000$ Hz olarak alındı. Bilinmeyen açısal hızlar $\Omega_z = 5$ rad/sn, $\Omega_x = 3$ rad/sn ve $\Omega_y = 2$ rad/sn olarak alınmıştır. Kayma yüzeyi $\lambda = [1000 \ 1000 \ 1000]$; K telafi katsayısı 20 olarak alınmıştır. Adaptif kazanç olan $\tau_i = 0.001$ olarak alınır.

Tablo 4.1. Üç eksenli MEMS jiroskobun sistem parametreleri

Parametreler	Değerler
Kütle (m)	$0.57e-8 \text{ kg}$
Bant genişliği (ω_0)	1000 Hz
Sönümlleme terimi (d_{xx})	$0.429e-6 \text{ Ns/m}$
Sönümlleme terimi (d_{yy})	$0.0429e-6 \text{ Ns/m}$
Sönümlleme terimi (d_{zz})	$0.895e-6 \text{ Ns/m}$
Asimetrik sönümlleme katsayısı (d_{xy})	$0.0429e-6 \text{ Ns/m}$
Asimetrik sönümlleme katsayısı (d_{xz})	$0.0687e-6 \text{ Ns/m}$
Asimetrik sönümlleme katsayısı (d_{yz})	$0.0895e-6 \text{ Ns/m}$
Açısal hız (Ω_z)	5 rad/sn
Açısal hız (Ω_x)	3 rad/sn
Açısal hız (Ω_y)	2 rad/sn
Kayma yüzeyi (λ)	1000
Telafl katsayısı (K)	20
Adaptif kazanç (τ_i)	0.001

4.2. Üç Eksenli MEMS Jiroskobun PID İle Kontrolü

Üç eksenli MEMS jiroskop sistemine x ekseninde genliği 1 ve frekansı 6710 Hz, y ekseninde genliği 1.2 ve frekansı 5110 Hz ve z ekseninde genliği 1.5 ve frekansı 4170 Hz olan sinüzoidal referans girişleri verilmiştir. Sistem PID kontrolör yardımıyla sürekli zamanda kontrol edilmiştir. Şekil 4.1 sistemin MATLAB/simulink blok diyagramları ile sürekli zamanda ki tasarımıdır.



Şekil 4.1. Üç eksenli MEMS jiroskobun PID ile sürekli zamanda kontrolünün MATLAB/Simulink ile oluşturulmuş blok diyagramı

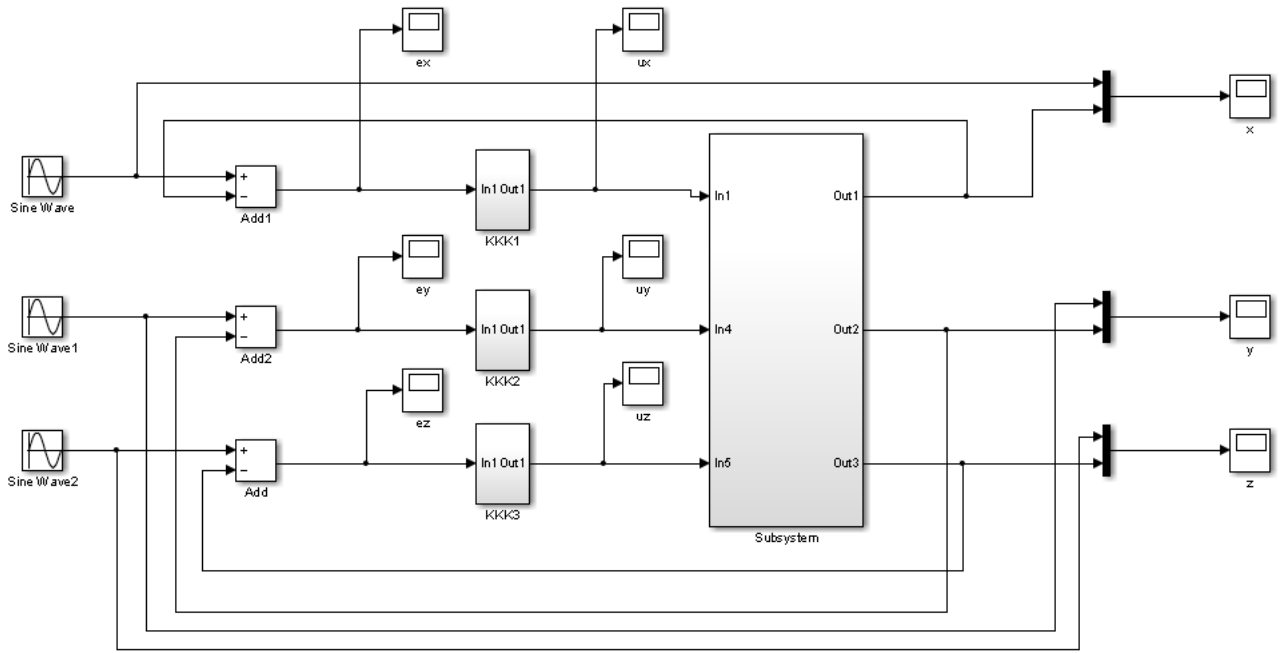
Tablo 4.2. Üç eksenli MEMS jiroskobun PID parametreleri

Katsayılar	K_p	K_i	K_D
x eksen	962	15898055	8.2×10^{-4}
y eksen	836	8333102	7.6×10^{-4}
z eksen	731	6810265	7.103×10^{-6}

Tablo 4.2’de sisteme uygulanan PID kontrolör parametreleri verilmiştir. Bu parametreler PID bloğunun tune otomatik ayar seçeneğinden elde edilmiştir.

4.3 Üç Eksenli MEMS Jiroskobun KKK Tabanlı Kontrolü

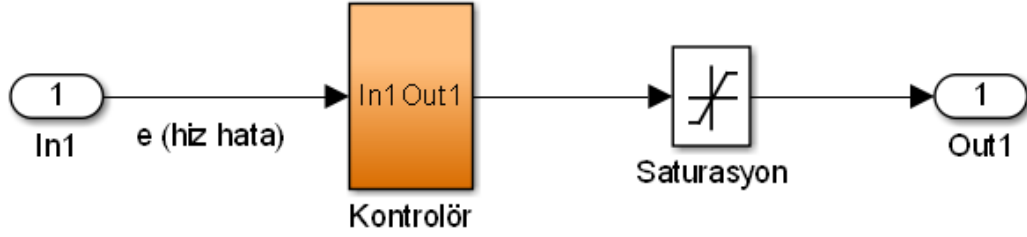
Üç eksenli MEMS jiroskop daha iyi bir sonuç elde edebilmek için daha sağlam bir kontrolör yöntemi olan KKK tabanlı kontrol yöntemi ile denetlenmiştir. Sistem referans girişi PID ile kontrol edilen üç eksenli jiroskop sistemi ile aynıdır.



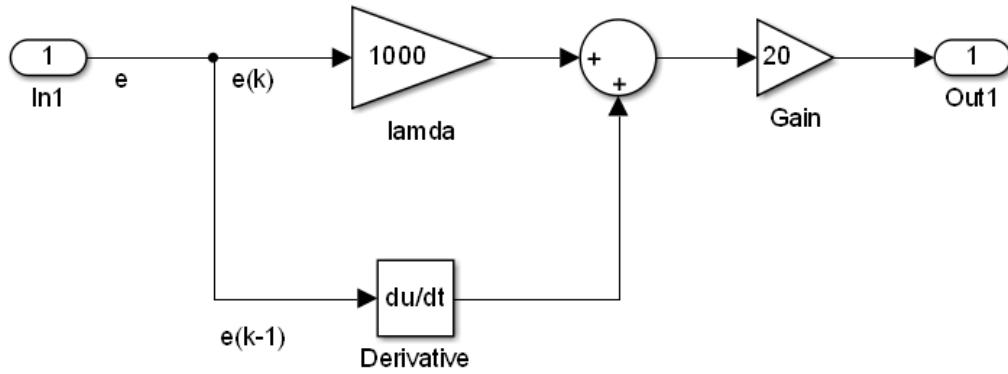
Şekil 4.2. Üç eksenli MEMS jiroskobun sürekli KKK tabanlı kontrolünün MATLAB/Simulink blok diyagramı

Üç eksenli MEMS jiroskop, KKK tabanlı kontrol yöntemi ile tasarlanırken x, y ve z eksenleri için katsayılar $\lambda=1000$ ve $K=20$ olarak alınmıştır. Kullanılan saturasyon değeri 100 ve -100 aralığındadır.

Şekil 4.3 üç eksenli MEMS jiroskobun sürekli zamanda kayma kipli kontrolörden esinlenerek oluşturulan blok diyagramıdır. Şekil 4.4 oluşturulan kontrolörün modelidir.



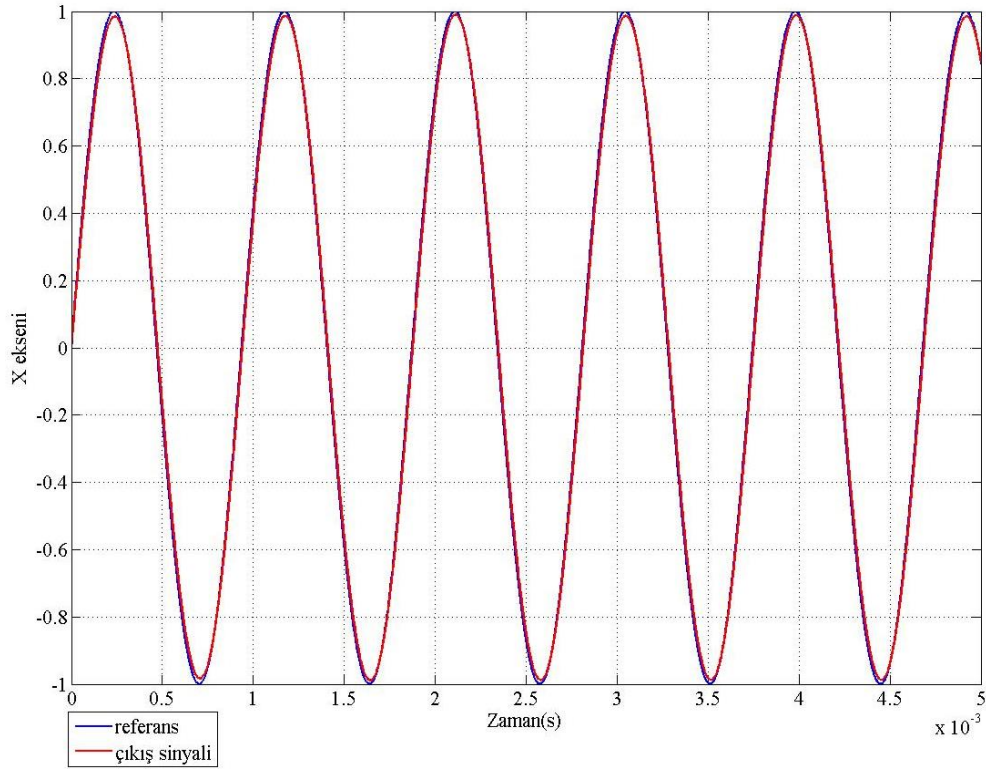
Şekil 4.3. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolünün MATLAB/Simulink blok diyagramı



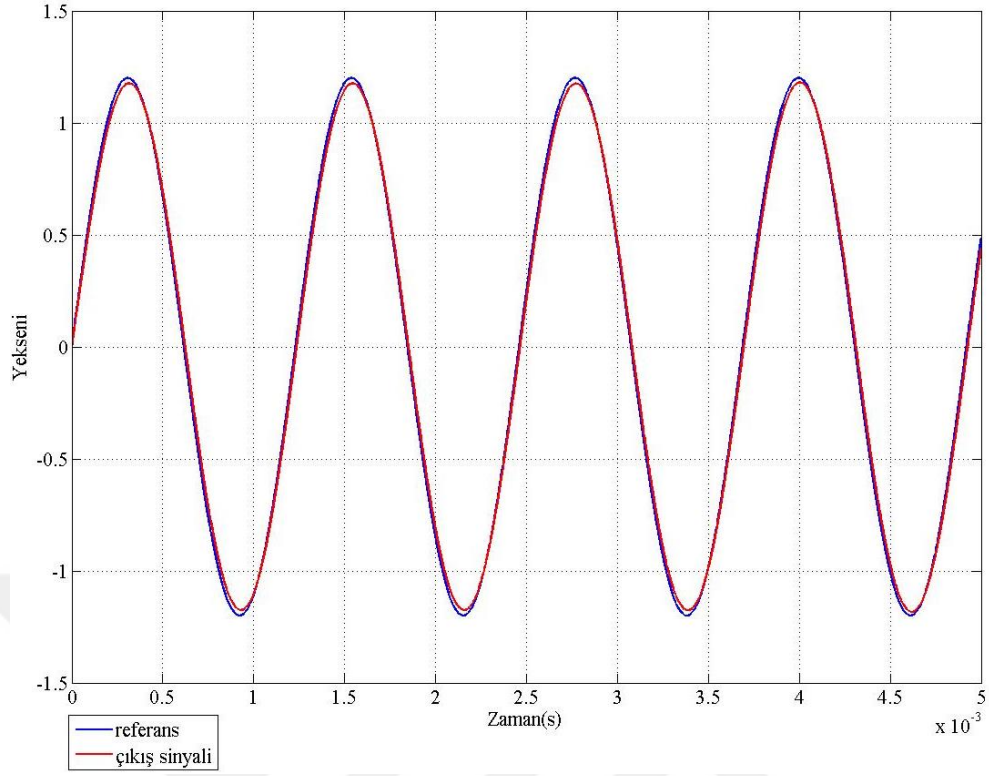
Şekil 4.4. Üç eksenli MEMS jiroskobun sürekli zamanda KKK tabanlı kontrol yapısı

4.4. Üç Eksenli MEMS Jiroskobun Kontrol Sonuçları

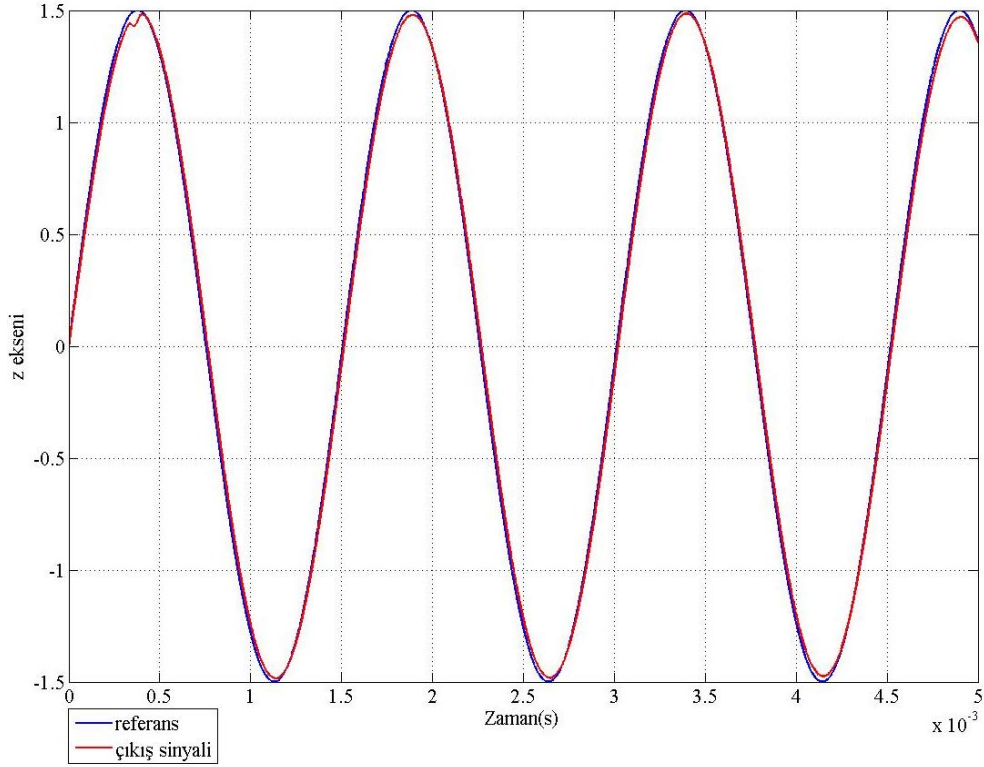
Üç eksenli MEMS jiroskobun dinamik denklemleri üzerinden matematiksel modeli oluşturularak sistem PID ve KKK tabanlı kontrol yöntemi ile denetlenmiştir. PID ile sürekli zamanda x, y ve z eksenlerinde elde edilen kontrol sonuçları Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görülmektedir. Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da KKK tabanlı kontrolün x, y ve z eksenlerindeki kontrol sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan tasarlanan yeni kontrolörün sistem çıkışını daha hızlı yakaladığını görmekteyiz. Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 KKK tabanlı kontrolörün PID ile kontrolden daha hızlı kararlılığa eriştiğini gösteren hata farkı sinyalleridir. Bu kontrol sonuçlarından da görüldüğü gibi KKK tabanlı kontrol yönteminin hata sinyalleri PID kontrolöre göre daha hızlı kararlılığa ulaşmıştır. Bu da PID kontrolörden daha verimli bir kontrol yöntemi olduğunu kanıtlamaktadır.



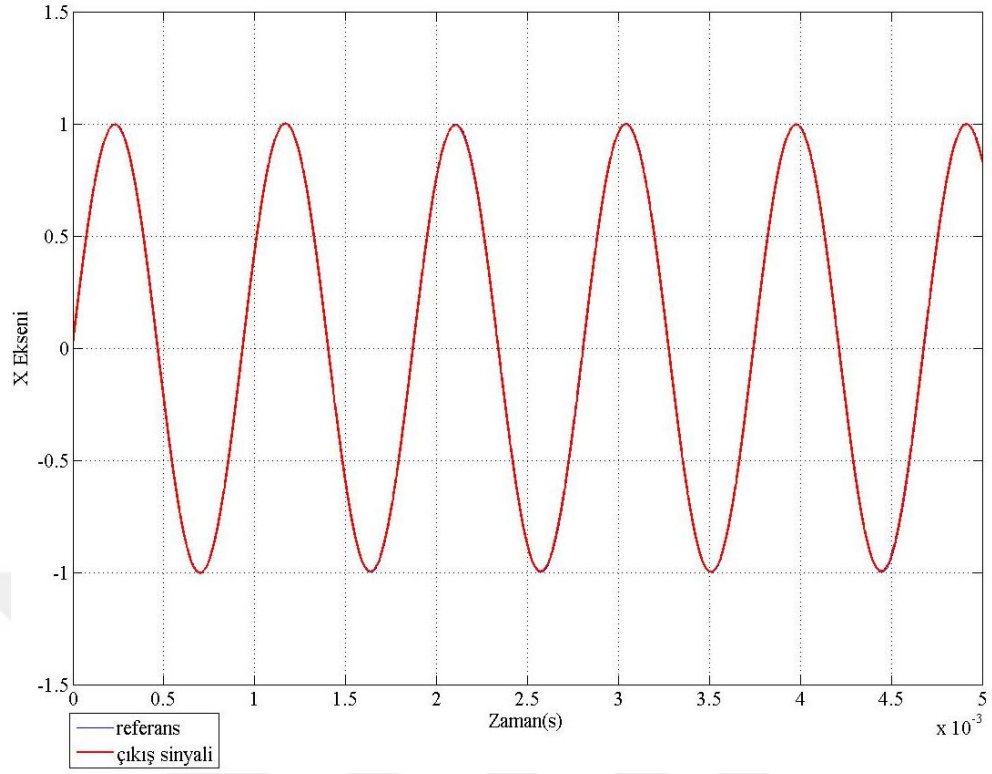
Şekil 4.4. Üç eksenli MEMS jiroskobun PID kontrolör kullanılarak sürekli zamanda x-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları



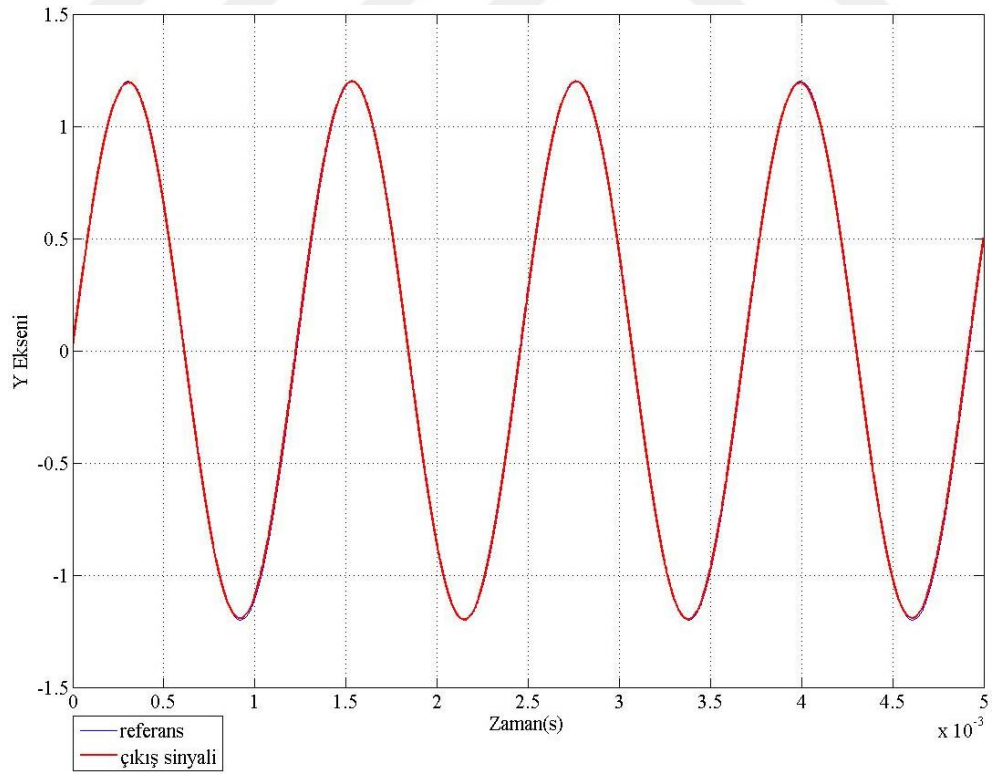
Şekil 4.5. Üç eksenli MEMS jiroskobun PID kontrolör kullanılarak sürekli zamanda y-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları



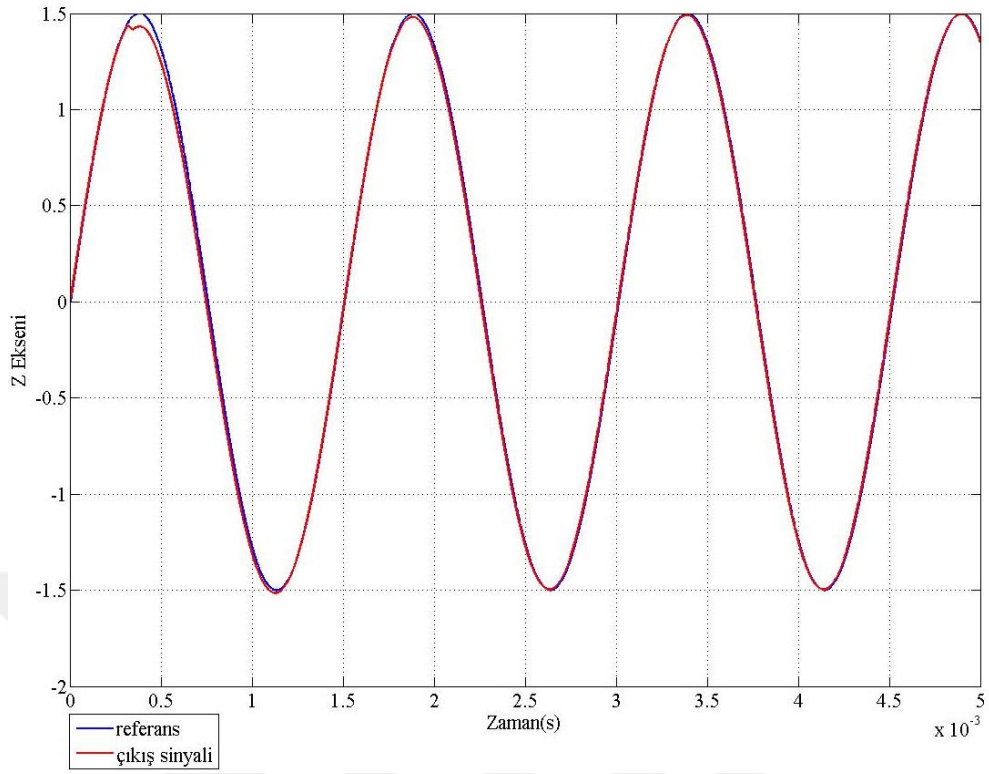
Şekil 4.6. Üç eksenli MEMS jiroskobun PID kontrolör kullanılarak sürekli zamanda z-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları



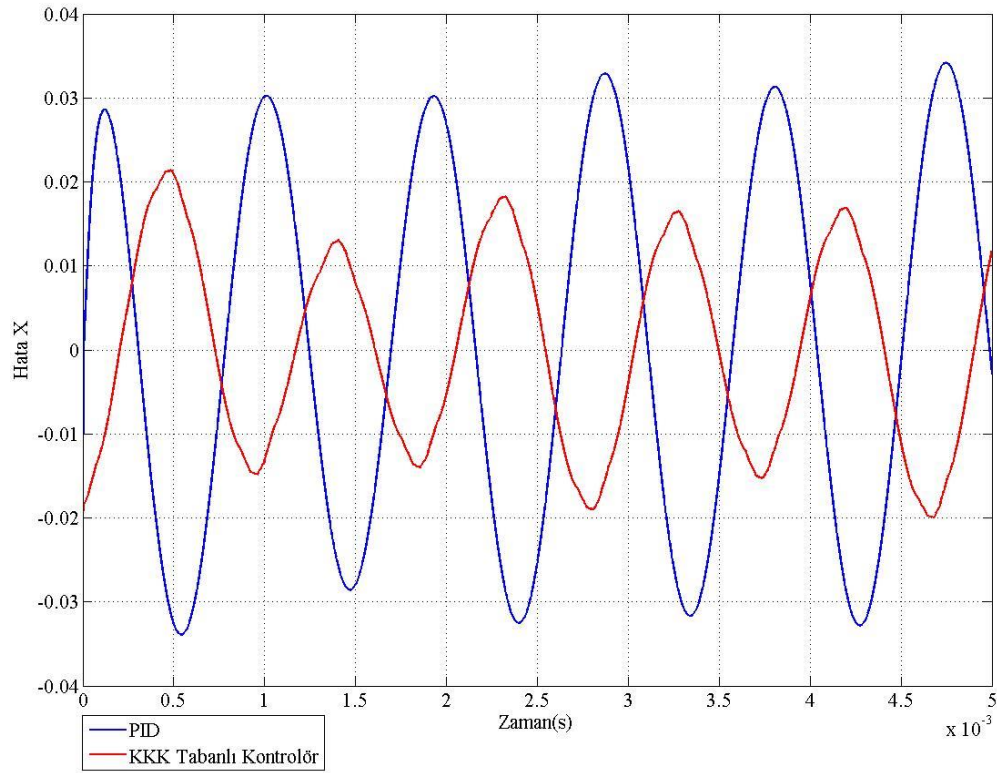
Şekil 4.7. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolün sürekli zamanda x-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları



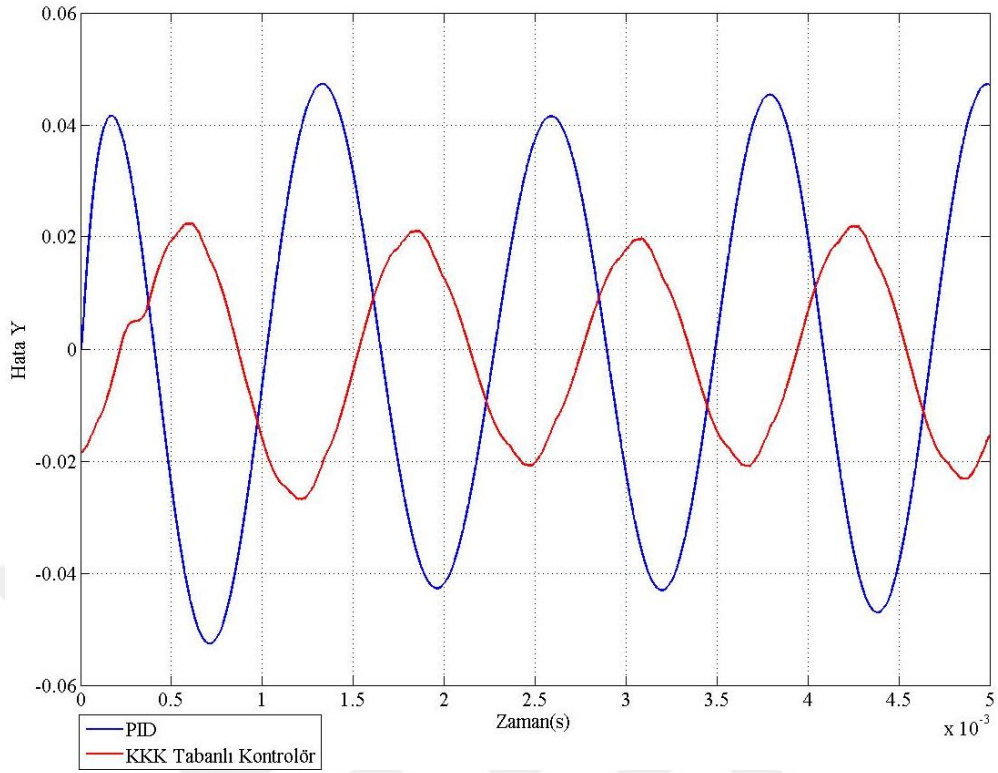
Şekil 4.8. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolün sürekli zamanda y-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları



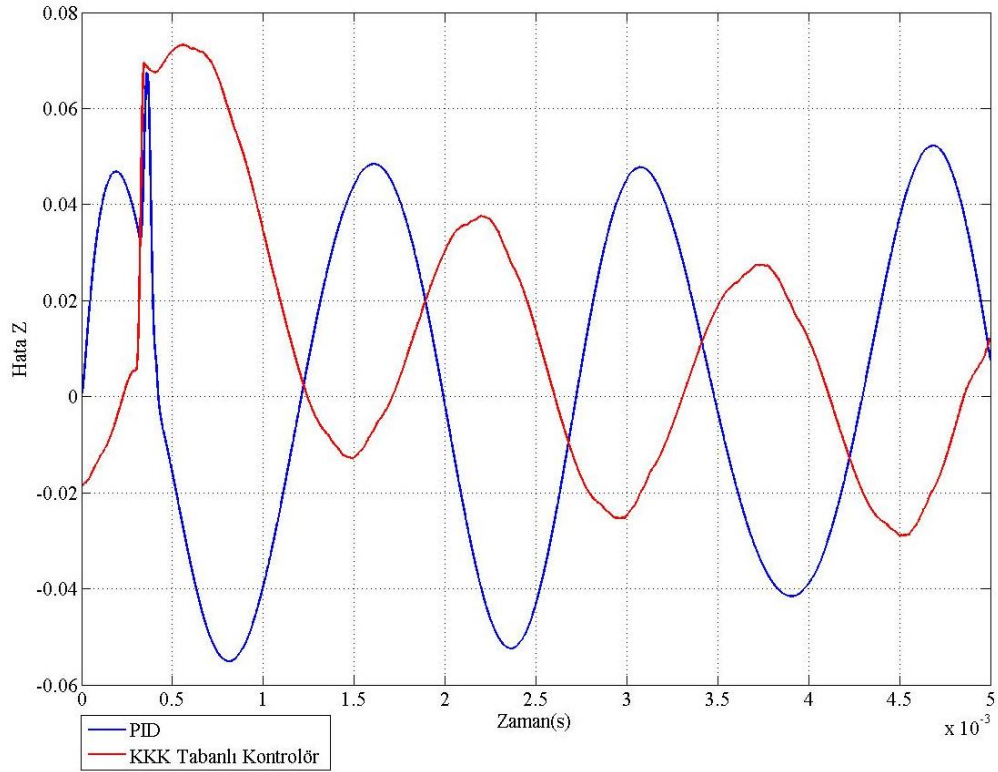
Şekil 4.9. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrolün sürekli zamanda z-ekseninde elde edilen kontrol sonuçları



Şekil 4.10. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrol ve PID kontrolün sürekli zamanda x-eksenindeki hata sinyalleri



Şekil 4.11. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrol ve PID kontrolün sürekli zamanda y-eksenindeki hata sinyalleri



Şekil 4.12. Üç eksenli MEMS jiroskobun KKK tabanlı kontrol ve PID kontrolün sürekli zamanda z-eksenindeki hata sinyalleri

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında z-eksenli ve üç eksenli MEMS jiroskop kontrolü yapılmıştır. Bu kontrol çalışması MEMS jiroskobun istenilen sinüzoidal yörüngeyi takip etmesini amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda MEMS jiroskobun matematiksel modeli kullanılarak Matlab/Simulink ortamında oluşturulan blok diyagramlarına PID ve Kayma Kipli Kontrol (KKK) esinlenerek oluşturulan KKK tabanlı kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Bu kontrol yöntemleri, z-eksenli MEMS jiroskop ve üç eksenli MEMS jiroskobun blok diyagramlarına uygulanmıştır. Z-eksenli sisteme uygulanan PID ve KKK tabanlı kontrolün, sisteme uygun katsayıları elde edilerek sistem kontrol edilmiştir. Aynı şekilde üç eksenli MEMS jiroskoba da her iki kontrol yönteminin uygun katsayıları uygulanmıştır. Bu kontrol yöntemlerinden elde edilen sonuçlar, MEMS jiroskobun yörüngesinin, istenilen referans ve yörüngede kontrol edildiğini göstermiştir. Her iki kontrol yönteminin sonuçları karşılaştırılmış ve KKK tabanlı kontrol yönteminin PID ile kontrol yönteminden daha başarılı bir kontrol performansı sağladığı benzetim sonuçlarından anlaşılmıştır.

Bundan sonraki çalışmalarda daha iyi bir kontrol performansı elde edebilmek için akıllı ve adaptif kontrol yöntemlerinin kullanılması önerilebilir. Ayrıca yapay zeka uygulamaları ile kontrol parametrelerini belirlemek daha iyi bir kontrol performansı sağlar.

KAYNAKLAR

- [1] **Trusov A. A., Ph.D. 2011.** Overview of MEMS Gyroscopes: History, Principles of Operations, Types of Measurements, *MicroSystems Laboratory, Mechanical and Aerospace Engineering University of California, Irvine, CA, 92697, USA.*
- [2] **Shkel, A.M., 2006.** "Type I and Type II Micromachined Vibratory Gyroscopes," *Position, Location, And Navigation Symposium, 2006 IEEE/ION* , vol., no., s. 586- 593, April 25-27.
- [3] <http://www.turkcebilgi.com/jiroskop>, Jiroskop.29 Kasım 2016.
- [4] **Akın T.,** Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler, ODTÜ Ders Notları.
- [5] <http://www.muhendisbeyinler.net/jiroskop-nedir/>, Jiroskop nedir?.29 Kasım 2016
- [6] **M.C. Roco,2001.** "A Frontier for Engineering,"*Mech.Eng.*123, January, s. 52–55.
- [7] **M. Mehregany and S. Roy,1999.** Introduction to MEMS, 2000, Microengineering Aerospace Systems, El Segundo, CA, Aerospace Press, AIAA, Inc.
- [8] **W. Ehrfeld et al., 1987.** "Fabrication of microstructures using the LIGA process", *Proc.IEEE Micro Robots Teleoperators Workshop.*
- [9] **F.M. White,1999.** "Fluid Mechanics 4th edn", (Boston, MA: McGraw-Hill).
- [10] **A.J. Tobin, R.E. Morel. 1997.** "Asking about Cells", (Fort Worth, TX: Saunders).
- [11] **K.L Ekinici, Y.T. Yang, M. L. Roukes,2004.** "Ultimate limits to inertial mass sensing based upon nanoelectromechanical systems", *Journal of Applied Physics*, 95, 5.
- [12] **Batur, C., Sreeramreddy, T., Khasawneh, Q., 2006.** Sliding mode control of a simulated MEMS gyroscope, *ISA Transactions*,**45(1)**, s. 99-108. Jan.
- [13] **Park, S., Horowitz, R., Tan, C.W., 2008.** Dynamics and control of a MEMS angle measuring gyroscope, *Sensors and Actuators A*, **144**, s. 56–63.

- [14] **Ngana, P.J., Koning, J.J., French, P.J., Bontemps, J.J.M., Seetharaman, K., 2009.** Design, modelling and simulation of a High Frequency MEMS Gyroscope in 1.5um SOI, *Procedia Chemistry* 1, s. 903–906.
- [15] **Eminoglu, B., Alper, S.E., Akin, T., 2011.** An Optimized Analog Drive-Mode Controller for Vibratory MEMS Gyroscopes, *Procedia Engineering*, 25, s. 1309-1312.
- [16] **Egretzberger, M., Mair, F., Kugi, A., 2012.** Model-based control concepts for vibratory MEMS gyroscopes, *Mechatronics*, 22, s. 241–250.
- [17] **Fei, J., Xin, M., 2013.** Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control of MEMS Gyroscope Sensor Using Fuzzy Switching Approach, *SICE Annual Conference*, s. 14-17.
- [18] **N. Yazdi, F. Ayazi, K. Najafi, 1998.** Micromachined inertial sensors, *Proc. IEEE* 86 (8) 1640–1659.
- [19] **Fang, Y., Wang, S., Fei, J., 2014.** Adaptive T-S Fuzzy Sliding Mode Control of MEMS Gyroscope, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, s. 6-11.
- [20] **Robert P. Leland, 2002.** Lyapunov Based Adaptive Control of a MEMS Gyroscope,
- [21] **Wang C., Wang S., and Yin Y., 2007.** A Dual-Mass MEMS Vibratory Gyroscope with Adaptive Control Scheme, *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology*, Hong Kong, August 2 - 5, s.25-28.
- [22] **Zheng Q., Dong L., Lee D., and Gao Z., 2009.** Active Disturbance Rejection Control for MEMS Gyroscopes, *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, Vol. 17, No. 6, November, 1432-1438.
- [23] **Fei J., Hua M., Xue Y., 2010.** A Comparative Study of Adaptive Control Approaches for MEMS Gyroscope, *2010 IEEE International Conference on Control Applications Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control Yokohama, Japan, September 8-10*, s. 1856-1861.
- [24] **Anvar S.M.M , Hassanzadeh I., Alizadeh G., 2010.** Design and Implementation of Sliding Mode-State Feedback Control for Stabilization of Rotary Inverted

Pendulum, *International Conference on Control, Automation and Systems*, Oct. 27-30, 2010 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, s.1952-1957.

- [25] **Fei J., Yang Y., Wu D., 2013.** Robust RBF Neural Network Control with Adaptive Sliding Mode Compensator for MEMS Gyroscope, College of Computer and information, Hohai University, Changzhou, 213022, P. R. China.
- [26] **Fang Y., Fei J., Zhou J., Hua M., 2014.** Adaptive Fuzzy Control with Supervisory Compensator for MEMS Gyroscope, *SICE Annual Conference*, September 9-12, 2014, Hokkaido University, Sapporo, Japan, s. 1-5.
- [27] **Fazlyab M., Pedram M.Z., Salarieh H., Alasty A., 2013.** Parameter estimation and interval type-2 fuzzy sliding mode control of a z-axis MEMS gyroscope, *ISA Transactions* 52, s. 900–911.
- [28] **Qing Z., Zhiqiang G., 2011.** Disturbance Rejection in MEMS Gyroscope: Problems and Solutions, *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, July 22-24, Yantai, China, s. 6334-6339.
- [29] **Erişmiş M.A., 2004.** Mems Accelerometers And Gyroscopes, *The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University For Inertial Measurement Units*, SEPTEMBER, s. 27-32.
- [30] **M. D. Pottenger, 2001.** “Design of Micromachined Inertial Sensors,” *PhD. Dissertation*, Univ. of California.
- [31] **S. E. Alper, 2000.** “Silicon Surface Micromachined Gyroscopes Using MEMS Technology,” *M.S. Thesis*, Middle East Technical Univ.
- [32] **N. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi,** “Micromachined Inertial Sensors,” *Proc. of the IEEE*, Vol. 86, No 8, s. 1640-1659, August.
- [33] **M. W. Putty, 1998.** “A Micromachined Vibrating Ring Gyroscope,” *PhD. Dissertation*, Univ. of Michigan, 1995.
- [34] **W. A. Clark and R. T. Howe, 1996.** “Surface Micromachined Z-Axis Vibratory

Rate Gyroscope,” *Tech. Dig. Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, , s.283-287, June.

- [35] **X. Jiang, J. I. Seeger, M. Kraft, and B. E. Boser, 2000.** “A Monolithic Surface Micromachined Z-Axis Gyroscope with Digital Output,” *Symp. on VLSI Circuits Dig. of Tech. Papers*, , s. 16-19, June.
- [36] **S. D. Senturia, 2001.** “Microsystem Design,” Kluwer Academic Publishers.
- [37] **A. Shkel, R. Howe, R. Horowitz, 1999.** Modeling and simulation of micromachined gyroscopes in the presence of imperfections, in: *Proceedings of the International Conference On Modeling and Simulation of Microsystems*, Puerto Rico, USA, s. 605–608.
- [38] **R. M’Closkey, A. Vakakis, 1999.** Analysis of a microsensor automatic gain control loop, in: *Proceedings of the American Control Conference*, San Diego, CA, s. 3307–3311.
- [39] **S. Park, 2000.** Adaptive control strategies for MEMS gyroscopes, PhD Dissertation, U.C. Berkeley.
- [40] **B. Friedland, M. Hutton, 1978.** Theory and error analysis of vibrating-member gyroscopes, *IEEE Trans. Autom. Control* 23 (4) s. 545–556.
- [41] **D. Piyabongkarn, R. Rajamani, M. Greminger, 2005.** Development of a MEMS gyroscope for absolute angle measurement, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 13 (2) 185–195.
- [42] **L. Dong and R. P. Leland, 2005.** “The adaptive control system of a MEMS gyroscope with time-varying rotation rate,” in *Proc. Amer. Control Conf.*, s. 3592–3597.
- [43] **R. Leland, 2006.** “Adaptive control of a MEMS gyroscope using Lyapunov methods,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 14, no. 2, s. 278–283, Mar.
- [44] **S. Park and R. Horowitz, 2003.** “Adaptive control for the conventional mode of operation of MEMS gyroscopes,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol.

12, no. 1, s. 101–108, Feb.

- [45] **Lu C., Fei J., 2015.** Adaptive Prescribed Performance Sliding Mode Control of MEMS Gyroscope, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 16 December, s. 1-24.
- [46] **Z. Gao, 2003.** “Scaling and parameterization based controller tuning,” in *Proc. Amer. Control Conf.*, s. 4989–4996.
- [47] **Z. Gao, 2006.** “Active disturbance rejection control: A paradigm shift in feedback control system design,” in *Proc. Amer. Control Conf.*, s. 2399–2405.
- [48] **Y. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi, 1998.** “Micromachined inertial sensors,” *Proc. IEEE*, vol. 86, no. 8, s. 1640–1659, Aug.
- [49] **R. P. Leland, 2005.** “Mechanical thermal noise in MEMS gyroscopes,” *IEEE Sensors J.*, vol. 5, no. 3, s. 493–450, Jun.
- [50] **Fei J., Ding H., 2012.** Adaptive Neural Sliding Mode Control of MEMS Triaxial Gyroscope Based on Feedback Linearization Approach, *SICE Annual Conference 2012 August 20-23*, Akita University, Akita, Japan, s. 1271-1276.
- [51] **Fei J., Zhou J., 2012.** Robust Adaptive Control of MEMS Triaxial Gyroscope Using Fuzzy Compensator, *Ieee Transactions On Systems, Man, And Cybernetics—Part B: Cybernetics*, Vol. 42, No. 6, December, s. 1599-1607.
- [52] **W. Sung and Y. Lee, 2009.** “On the mode-matched control of MEMS vibratory gyroscope via phase-domain analysis and design,” *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 14, no. 4, s. 446–455, Aug.
- [53] **R. Antonello, L. Oboe, F. Prandi, and F. Biganzoli, 2009** “Automatic modematching in MEMS vibrating gyroscopes using extremum-seeking control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 10, s. 3880–3891, Oct.
- [54] **R. Park, R. Horowitz, S. Hong, and Y. Nam, 2007.** “Trajectory-switching algorithm for a MEMS gyroscope,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 6, s. 2561–2569, Dec.
- [55] **J. John and T. Vinay, 2006.** “Novel concept of a single mass adaptively controlled

- triaxial angular velocity sensor,” *IEEE Sensors J.*, vol. 6, no. 3, s. 588–595, Jun.
- [56] **J. Fei and C. Batur, 2009.** “A novel adaptive sliding mode control with application to MEMS gyroscope,” *ISA Trans.*, vol. 48, no. 1, s. 73–78, Jan.
- [57] **J. Fei and F. Chowdhury, 2010.** “Robust adaptive controller for triaxial angular velocity sensor,” *Int. J. Innov. Comput., Inf. Control*, vol. 7, no. 6, s. 2439–2448.
- [58] **L. Wang, 1994.** *Adaptive Fuzzy Systems and Control-design and Stability Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [59] **Y. Guo and P. Woo, 2003.** “An adaptive fuzzy sliding mode controller for robotic manipulators,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, Syst., Humans*, vol. 33, no. 2, s. 149–159, Mar.
- [60] **B. Yoo and W. Ham,** “Adaptive control of robot manipulator using fuzzy compensator,” *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 8, no. 2, s. 186–199, Apr. 2000.
- [61] **F. C. Sun, Z. Q. Sun, and G. Feng, 1999.** “An adaptive fuzzy controller based on sliding mode for robot manipulators,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 29, no. 5, s. 661–667.
- [62] **Y. Jin,** “Decentralized adaptive fuzzy control of robot manipulators,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 28, no. 1, s. 47–57,
- [63] **S. Y. Yi and M. J. Chung, 1998.** “A robust fuzzy logic controller for robot manipulators with uncertainties,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 27, no. 4, s. 706–713, Aug. 1997.
- [64] **V. Santibanez, R. Kelly, and M. A. Llama, 2004.** “Global asymptotic stability of a tracking sectorial fuzzy controller for robot manipulators,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 34, no. 1, s. 710–718, Feb
- [65] **C. Tao, J. Taur, J. Chang, and S. Su, 2010.** “Adaptive fuzzy switched swingup and sliding control for the double-pendulum-and-cart system,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 40, no. 1, s. 241–252, Feb.
- [66] **Y. Chien, W. Wang, Y. Leu, and T. Lee, 2011.** “Robust adaptive controller design

for a class of uncertain nonlinear systems using online T–S fuzzy-neural modeling approach,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 41, no. 2, s. 542–552, Apr.

- [67] **S. Tong, Y. Li, G. Feng, and T. Li, 2011.** “Observer-based adaptive fuzzy backstepping dynamic surface control for a class of MIMO nonlinear systems,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, vol. 41, no. 4, s. 1124–1135, Aug.

