

Speed Dependent Gain Scheduled LQI based Path Following Control System Design for Automated Vehicles

Mümin Tolga EMİRLER 

Yildiz Technical University, Faculty of Applied Sciences, Department of Aviation Electronics, 34220, Esenler/İSTANBUL

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 25/06/2019

Revision 23/08/2019

Accepted: 06/10/2019

Highlights

- LQI control based path following.
- Speed dependent gain scheduling.
- Comparison of PID, LQR and LQI control systems for automated path following.

Keywords

Automated Vehicles
 Path Following
 Control System Design
 LQI
 LQR

In this study, path following control systems are designed to minimize the lateral deviation from the desired path. Speed changes in the maneuvers are taken into consideration and LQI based speed dependent gain scheduling control system is proposed. This method is compared with PID and LQR control methods in different simulation studies.

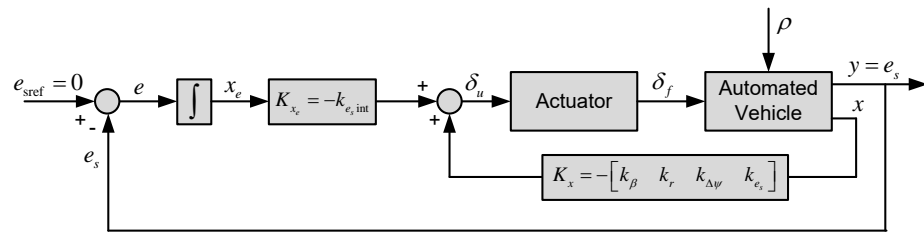


Figure A. Automated vehicle LQI path following control system block diagram

Purpose: The main aim of this study is to design and analyze path following control systems for automated vehicles focusing on the vehicle speed changes. For this purpose, the effect of the vehicle speed on the performance of different control systems are investigated in Matlab/Simulink simulation environment.

Theory and Methods: Speed dependent LQI control optimal gain matrices are computed for each scheduled speed value by solving algebraic Riccati equation. Then, these solutions are used in the form of tables in Simulink environment. The stability of the proposed method is investigated by plotting the maximum real part of closed loop system eigenvalues with speed increments. PID, LQR and LQI controlled vehicles are compared by using a high degree-of-freedom nonlinear vehicle model which also includes a steer-by-wire actuator model.

Results: Different control systems are tested in two simulation studies. Automated vehicle tries to follow constant radius road with constant speed in the first simulation and tries to track variable radius road with variable speed in the second simulation. Statistical error values such as maximum of absolute values and root mean square error are employed to evaluate different control systems. Simulation results and statistical error values indicate that the proposed speed scheduled LQI controller shows better performance than PID and LQR controllers for constant and variable vehicle speeds in terms of following desired path and obtaining less lateral deviation error.

Conclusion: The effectiveness of the proposed LQI control system over PID and LQR control systems for automated path following problem is shown with constant speed and variable speed simulation scenarios. By using the proposed approach, smaller lateral deviation values can be obtained.



Otonom Taşıtlar için Hıza Bağlı Kazanç Uyarlamalı LQI Tabanlı Yol Takip Kontrol Sistemi Tasarımı

Mümin Tolga EMİRLER * 

Yıldız Teknik Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Havacılık Elektronikliği Bölümü, 34220, Esenler/İSTANBUL

Öz

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 25/06/2019
Düzeltilme: 23/08/2019
Kabul: 06/10/2019

Anahtar Kelimeler

Otonom Taşıtlar
Yol Takibi
Kontrol Sistemi Tasarımı
LQI
LQR

Keywords

Automated Vehicles
Path Following
Control System Design
LQI
LQR

Otonom taşıt yol takibi, otonom taşıt kontrolündeki önemli problemlerden birisidir. Otonom taşıt istenilen hızda yol alırken istenilen yol profilini yoldan yana sapma miktarını en aza indirecek şekilde takip etmelidir. Problemin çözümü için bu çalışmada, LQI kontrol yöntemi önerilmiştir. LQI tabanlı kontrol sistemi, taşıt hızının taşıt dinamik davranışı üzerindeki etkisi dikkate alınarak hıza bağlı olarak kazanç uyarlamalı şekilde tasarlanmıştır. Önerilen yöntem yüksek serbestlik dereceli kablosuz direksiyon eyleyici modeli içeren doğrusal olmayan taşıt dinamiği modeliyle benzetim ortamında test edilmiştir. Önerilen kontrol sisteminin başarımı, PID ve LQR tabanlı kontrol sistemleriyle iki farklı bilgisayar benzetiminde karşılaştırılmıştır. Farklı kontrol yöntemlerinin sayısal olarak karşılaştırılmasında istatistiksel hata değerleri kullanılmıştır. Benzetim sonuçları ve hata değerleri göstermektedir ki hıza bağlı kazanç uyarlamalı LQI kontrol sistemi kullanan otonom taşıt, sabit ve değişken taşıt hızında istenilen yolu daha az hatayla takip etmektedir.

Speed Dependent Gain Scheduled LQI based Path Following Control System Design for Automated Vehicles

Abstract

Automated path following is one of the major problem in automated vehicle control. Automated vehicle should follow the desired path to minimize the lateral deviation from the path while traveling at the desired speed. In this paper, LQI control method is proposed to solve this problem. LQI based control system is designed based on speed dependent gain scheduling taking into account the effect of vehicle speed on vehicle dynamic behaviour. The proposed method is tested in a simulation environment with a high degree-of-freedom nonlinear vehicle model including steer-by-wire steering actuator model. The performance of the proposed control system is compared with PID and LQR based control systems in two different simulation scenarios. Statistical error values are used for numerical comparison of different control methods. Simulation results and error values show that speed dependent gain scheduled LQI control system equipped automated vehicle follows the desired path with less error at constant and variable vehicle speed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otonom taşıt teknolojilerine olan ilgi son yıllarda hem akademik, hem de sanayi çevrelerince yürütülen çalışmalarla hızlanarak artmaktadır. Otonom taşıt teknolojilerinin kullanımının trafik kazalarını azaltacağı, sürücü ve yolcu konforunu artıracığı, yakıt tüketimi ve emisyonları azaltarak en alt seviyeye indirgenmesine yardımcı olacağı öngörülmektedir.

Günümüzde geliştirilen otonom taşıt teknolojileri, otomotiv endüstrisi tarafından piyasada bulunan üst sınıf otomobillerde aktif güvenlik sistemleri ve ileri sürüş destek sistemleri olarak aşama aşama kullanılmaya

başlanmıştır. Bu tip sistemlere örnek olarak elektronik kararlık kontrolü, uyarlamalı seyir kontrolü, şerit uyarı ve takip sistemleri, çarpışma uyarı ve önleme sistemleri verilebilir [1].

Otonom taşıtlar, tasarımında pek çok farklı mühendislik disiplininin kullanılmasını gerektiren oldukça karmaşık yapılardır. Otonom taşıtlardaki beklenti, farklı yol koşullarında çeşitli görevleri yüksek hassasiyetle yerine getirebilmeleridir. Kontrol mühendisliği açısından otonom taşıt, üzerinde konumlandırılan algılayıcılarla çevreyi algılamalı, karar verebilmeli ve kontrol sistemleri vasıtasıyla bu kararları uygulayabilmelidir. Alınan kararlara göre otonom taşıtın kontrolü, boyuna ve yanal dinamiğin kontrol edilmesi olarak iki kısımda düşünülebilir.

Otonom taşıt yanal dinamiği kontrolünde başka deyişle yanal taşıt dinamiği otomasyonunda karşılaşılan önemli bir problem, taşıtın otonom direksiyon eyleyicisi yardımıyla önceden tanımlanan yolu takip etmesidir. Bu konuda literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Yapılan ilk çalışmalar 1990'lı yıllara gitmektedir. Ackermann ve Sienel tarafından 1990 yılında yapılan çalışmada otobüs için otomatik dayanıklı direksiyon kontrol sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir [2]. 1994 yılında yine Ackermann ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, referans yolu otomatik olarak takip etmek için kayan kipli dayanıklı doğrusal olmayan kontrol yöntemi kullanılarak benzetim ortamında başarıyla test edilmiştir [3]. 2002 yılında Aksun-Güvenç ve Güvenç tarafından otomatik otobüs yol takip probleminin çözümü için ayrık zamanlı bozucu gözleyici tabanlı çözüm önerilmiştir. Çalışmada problemin çözümü için geliştirilen ayrık zamanlı bozucu gözleyicinin tasarım detayları verilmiştir [4]. Son 20 yılda mikroişlemci ve sensör teknolojilerindeki hızlı gelişme sayesinde otonom taşıtların günlük hayatta kullanım ihtimalinin artmasıyla, otonom taşıt yol takip probleminin araştırılmasına tekrar hız verilmiş ve son yıllarda bu konuyla ilgili çeşitli araştırma sonuçları yayınlanmıştır. Örneğin 2011 yılında Choi tarafından görüş mesafesindeki hedef savrulma açısı hatasını ve referans yoldan yana sapma miktarını kullanan LMI tabanlı H_∞ dayanıklı kontrol sistemi tasarlanmış ve modelleme belirsizlikleri ile sensör gürültüsüne karşı benzetimlerle test edilmiştir [5]. Rathgeber ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptıkları çalışmada, yanal yol takibi için taşıt parametrelerindeki değişikliklere karşı dayanıklı bozucu gözleyici temelli yol takip kontrol sistemi geliştirilmiştir. Tasarımda parametre uzayı yöntemi kullanılmıştır. Önerilen kontrol yapısı şerit değiştirme manevrasıyla benzetim ve gerçek yol testi ortamında başarıyla test edilmiştir [6]. 2014 yılında Emirler ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada otonom yol takip problemi için parametre uzayı tabanlı PID kontrol sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada taşıt kütlesi, tekerlek-yol sürtünme katsayısı ve taşıt hızı belirsiz parametreler olarak ele alınarak ve doğrulanmış taşıt modeli kullanılarak benzetim ortamında test edilmiştir [7]. 2015 yılında Emirler ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise otonom dayanıklı yol takibi için gerekli olan sensör görüş mesafesindeki yanal sapma miktarı, taşıt ağırlık merkezinin yoldan sapma miktarı ve savrulma açısı hatası kullanılarak yüksek çözünürlüklü dijital harita yardımıyla hesaplanmıştır. Bu hesap kullanılarak önerilen dayanıklı PID kontrol sistemi Ohio State Üniversitesi kampüsündeki bir yol için benzetim ortamında test edilmiştir [8]. 2016 yılında ise üstte önerilen dayanıklı PID kontrol sistemi aynı yazarlar tarafından elastik bant teorisi tabanlı yol planlama algoritmasıyla birleştirilmiştir. Böylece çarpışmanın olmayacağı yol belirlenerek otonom taşıt dayanıklı yol takip kontrolcüsüyle bu yolu takip etmektedir. Önerilen bu yöntem benzetimlerle test edilmiştir [9]. 2018 yılında bu çalışma Wang ve arkadaşları tarafından geliştirilerek başarılı bir şekilde donanım içeren benzetimlerle ve gerçek taşıt deneyleriyle test edilmiştir [10]. 2016 yılında Hu ve arkadaşları yaptığı çalışmalarda dört tekerleği bağımsız kontrol edilebilen tekerlek içi elektrik motorlu taşıtlar için yol takip kontrol sistemi tasarlamışlardır. Tasarımlarını J-dönüş ve şerit değiştirme manevrası için CarSim benzetim ortamında test etmişlerdir [11, 12]. 2018 yılında Lee ve arkadaşları tarafından otonom taşıt yol takibi problemi için PID, LQG ve H_∞ kontrol sistemleri tasarımları yapılmış ve bu tasarımlar takip başarımı, dayanıklı kararlılık ve yolcu konforu kriterleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, taşıt parametrelerindeki değişimlerin bu kriterler üzerindeki etkisini araştıran bir hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir [13].

Bu çalışmada literatürden farklı olarak LQI kontrol sistemi otonom taşıt yol takip problemine çözüm olarak önerilmiştir. Taşıtın dinamik davranışını önemli şekilde etkileyen taşıt hızı, kontrol sistemi tasarımda bir tasarım parametresi olarak kullanılmıştır. Böylece otonom taşıtın yol takip başarımı artırılmaya çalışılmıştır. Önerilen yöntem, PID ve LQR kontrol yöntemleriyle yüksek serbestlik dereceli doğrusal olmayan taşıt modeli ve kablo yönlendirmeli direksiyon eyleyicisi modeli içeren benzetim ortamında karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın bundan sonraki bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2’de doğrusal otonom taşıt yol takip modeli durum uzay formunda verilerek tanıtılmıştır. Bölüm 3’te otonom taşıt ön tekerleklerinin yönlendirilmesinde kullanılacak pozisyon kontrollü kablo yönlendirmeli direksiyon eyleyicisinin modeli verilmiştir. Bölüm 4’te benzetim çalışmalarında kullanılan çok serbestlik dereceli doğrusal olmayan taşıt modeli tanıtılmıştır. Bölüm 5’te LQR ve LQI kontrol yöntemleri anlatılarak bu kontrol sistemlerinin tasarım denklemleri verilmiştir. Bölüm 6’da otonom taşıt yol takibi için PID ve hıza bağlı kazanç uyarlamalı LQR ve LQI kontrol sistemleri anlatılmış ve hıza bağlı kazanç uyarlamalı tasarım hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 7’de kontrol sistemleri test etmek için yapılan iki farklı benzetim çalışmasının sonuçları verilmiştir. Çalışma Bölüm 8’de verilen sonuçlarla sonlandırılmıştır.

2. OTONOM TAŞIT YOL TAKİP MODELİ (AUTOMATED VEHICLE PATH FOLLOWING MODEL)

Bu bölümde kontrol sistemi tasarımında kullanılan doğrusal otonom taşıt yol takip modeli anlatılmıştır. Otonom taşıt yol takip modeli, yanal taşıt dinamiği kontrolünde sıklıkla kullanılan tek izli taşıt (bisiklet) modelinin referans yolun takip edilmesinde önem kazanan savrulma açısı hatasını ve yoldan yana sapma miktarını içerecek şekilde genişletilmesiyle elde edilebilir [3, 4, 7, 8].

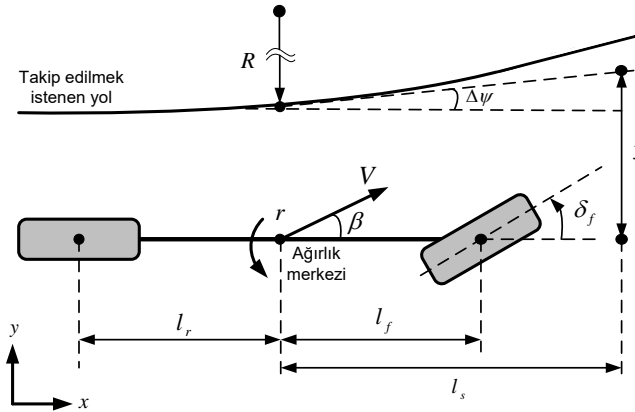
Şekil 1’de gösterilen yol takip problemi için otonom taşıt yol takip modeli durum uzay formunda alttaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{x} = Ax + B_1u + B_2u_d \quad 1$$

burada sistem durumları x , sistem girişi u ve bozucu girişi u_d alttaki gibi yazılabilir:

$$x = [\beta \quad r \quad \Delta\psi \quad e_s]^T, u = \delta_u, u_d = \rho \quad 2$$

burada β , r , $\Delta\psi$, e_s sırasıyla taşıt yana kayma açısını, taşıt savrulma açısal hızını, savrulma açısı hatasını ve sensör görüş mesafesinde yoldan yana sapma miktarını göstermektedir. δ_u ön tekerlek kontrol sinyalini ve ρ yol eğriliğini göstermektedir. δ_u kontrol sinyali elektrik motoru eyleyicisini yönlendirerek ön tekerleklerde δ_f ön tekerlek dönüş açısı elde edilmektedir. R yol yarıçapı olmak üzere $\rho = 1/R$ olarak tanımlanabilir.



Şekil 1. Otonom taşıt yol takip modeli [8]

Denklem (1)’deki durum uzay modeli matrisleri alttaki gibi tanımlanabilir [3, 4, 7, 8]:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ V & l_s & V & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -V \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3$$

burada

$$a_{11} = \frac{-(c_f+c_r)}{mV}, a_{12} = \frac{-1+(c_rl_r-c_fl_f)}{mV^2}, a_{21} = \frac{(c_rl_r-c_fl_f)}{J}, a_{22} = \frac{-(c_rl_r^2+c_fl_f^2)}{JV}, b_{11} = \frac{c_f}{mV}, b_{21} = \frac{c_fl_f}{J} \quad 4$$

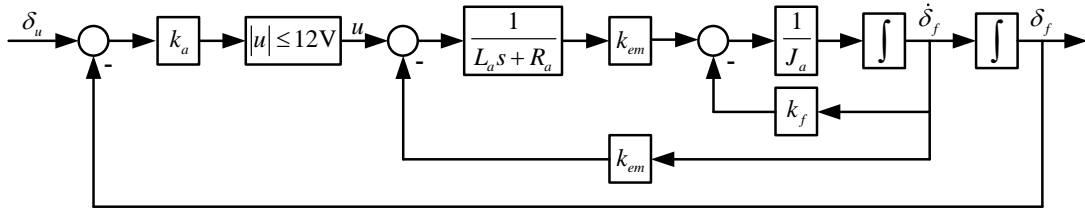
olarak ifade edilmektedir. V taşıt hızını göstermektedir. Otonom taşıt modelinde kullanılan parametreler ve sayısal değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Otonom taşıt modelinde kullanılan parametreler ve değerleri

Sembol	Açıklama	Değer
m	Taşıt kütlesi	1550 kg
J	Taşıt atalet momenti	2400 kgm ²
l_s	Taşıt ağırlık merkezine göre sensör görüş mesafesi	20 m
C_f	Ön tekerlekler için toplam dönüş katılığı	72500 N/rad
C_r	Arka tekerlekler için toplam dönüş katılığı	92500 N/rad
l_f	Taşıt ön aksıyla taşıt ağırlık merkezi arasındaki mesafe	1.07 m
l_r	Taşıt arka aksıyla taşıt ağırlık merkezi arasındaki mesafe	1.53 m

3. POZİSYON KONTROLLÜ KABLO YÖNLENDİRMELİ DİREKSİYON EYLEYİCİSİ MODELİ (POSITION CONTROLLED STEER-BY-WIRE STEERING ACTUATOR MODEL)

Otonom taşıt yol takibinde ön tekerleklerin yönlendirilmesi elektrik motoru vasıtasıyla gerçekleştirilebilir. Bu yöntem otomotiv kontrolü uygulamalarında kablo yönlendirmeli direksiyon sistemi olarak adlandırılmaktadır. Otonom yol takip kontrol sistemi tarafından belirlenen kontrol sinyali, alt pozisyon kontrollü elektrik motorunu çevirerek ön tekerleklerin dönüşü sağlanmaktadır. Pozisyon kontrollü elektrik motoru modeli blok diyagramı Şekil 2’de gösterilmiştir [14]. Burada δ_u kontrol sistemi tarafından hesaplanan ön tekerlek eyleyicisine giden kontrol sinyalini, δ_f ise elektrik motoru vasıtasıyla elde edilen ön tekerlek dönüş açısını göstermektedir. Şekil 2’de gösterilen pozisyon kontrollü elektrik motoru modeli parametreleri ve sayısal değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Güç kaynağının 12V verdiği dikkate alınarak voltaj doyum kısıtı da modele eklenmiştir ($|u| \leq 12V$). Bu kısıt dikkate alınmazsa elektrik motoru modeli üçüncü dereceden bir sistem olarak elde edilmektedir. İndüktans değerinin çok küçük olduğu kabülü altında model ikinci dereceden bir sisteme indirgenebilir [14]. Şekil 2’de gösterilen eyleyici modeli, Matlab/Simulink ortamında oluşturularak kullanılmıştır. Bu model yapısında, voltaj kısıtının eklenmesiyle gerçekçilik artırılmıştır.



Şekil 2. Pozisyon Kontrollü Kablolü yönlendirme elektrik motoru modeli [14]

4. DOĞRUSAL OLMAYAN OTONOM TAŞIT BENZETİM MODELİ (NONLINEAR AUTOMATED VEHICLE SIMULATION MODEL)

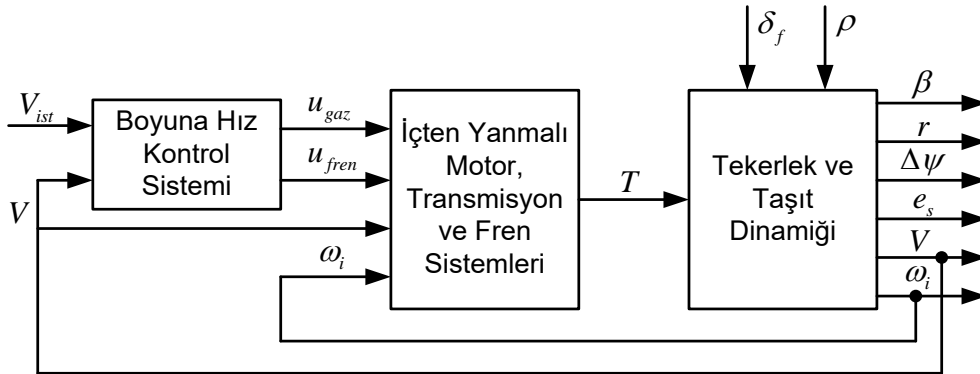
Bu bölümde benzetim çalışmalarında kullanılan doğrusal olmayan yüksek serbestlik dereceli gerçekçi otonom taşıt yol takip modeli genel olarak tanıtılmıştır. Şekil 3’te doğrusal olmayan otonom taşıt modelinin temel blokları ve sinyal akışı görülmektedir. Burada, δ_f ön tekerlek dönüş açısını, V_{ist} takip edilmesi istenen hızı, u_{gaz} gaz kontrol sinyalini, u_{fren} fren kontrol sinyalini, V taşıt hızını, ω_i i. tekerlek açılal hızını, T tekerleklere iletilen pozitif sürüş torkunu veya negatif fren torkunu ve ρ yol eğriliğini

göstermektedir. Doğrusal olmayan otonom taşıt modeli [7, 8] yayınlarındaki modellerle benzer şekilde oluşturulmuştur, ayrıca otomatik vites değişimi için tork konvertörü modeli eklenmiştir.

Tablo 2. Elektrik motoru modeli parametreleri ve değerleri [14]

Sembol	Açıklama	Değer
J_a	Motor atalet momenti	0.004053 kgm ²
k_f	Motor sönüm katsayısı	0.01625 Nms/rad
L_a	Motor armatür indüktansı (ihmal edilmiştir)	0 H
R_a	Motor armatür direnci	5 Ω
k_{me}	Motor tork sabiti = Ters-EMF sabiti (k_{em})	0.9 Nm/A
k_a	Eyleyici pozisyon kontrolü katsayısı	22.22 V/rad
\hat{u}	Voltaaj doyum değeri	12 V

Boyuna hız kontrol sistemi bloğu, gaz-fren karar algoritması ile gaz ve fren PID alt kontrolcülerini içermektedir. Bu bloktan yüzde olarak gaz kontrol sinyali u_{gaz} ve fren kontrol sinyali u_{fren} elde edilmektedir. İçten Yanmalı Motor, Transmisyon ve Fren Sistemleri bloğunda motor haritası ve denklemini içeren motor modeli, tork konvertörlü transmisyon modeli, taşıt hızına göre değişen otomatik vites algoritması ve fren torku hesaplama blokları bulunmaktadır. Bu blok ile sürüş veya fren durumlarına göre tekerleklere iletilen tork T hesaplanmaktadır.



Şekil 3. Doğrusal olmayan otonom taşıt benzetim modeli blok diyagramı

Tekerlek ve Taşıt Dinamiği bloğunda, tekerlek kuvvetleri Dug-off tekerlek modeli kullanılarak hesaplanmaktadır. Doğrusal olmayan taşıt hareket denklemleri kullanılarak model içinde geri beslenen taşıt hızı V , tekerlek açısal hızları ω_i ve taşıt durumları β , r , $\Delta\psi$ ve e_s bu blok ile hesaplanmaktadır. Direnç kuvvetleri olarak hava direnci ve yuvarlanma direnci dikkate alınmaktadır. Otonom taşıt modeliyle yapılan benzetimlerde yol takibi (yoldan yana sapma miktarı) inceleneyeceğinden taşıt düşey dinamiği (süspansiyon dinamiği), devrilme dinamiği ve yunuslama dinamiği ihmal edilmiş, bu haliyle 7 serbestlik dereceli bir model oluşturulmuştur.

5. LQR ve LQI KONTROL SİSTEMİ TASARIMI (LQR and LQI CONTROL SYSTEM DESIGN)

LQR kontrol, mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan optimal durum geri beslemeli bir kontrol yöntemidir. LQR kontrol sistemin durum değişkenlerini başlangıç koşullarından sıfıra doğru götürerek kontrolü gerçekleştirmektedir. Quadratik performans indeksindeki ağırlık matrislerinin uygun seçilmesiyle asimptotik kararlılık ve performans gereksinimleri karşılanmaktadır [15, 16]. LQR ve LQI kontrol, klasik kontrol problemlerinin yanı sıra pek çok kontrol uygulamasında da kullanılmıştır. Bu uygulamalara çeşitli örnekler verilebilir. Esmailzadeh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada optimal savrulma momenti

kontrolü için LQR yöntemi kullanılmıştır [17]. Luong ve Tsao tarafından LQI kontrol ağır yük taşıtlarında dizel güç aktarma organlarında atık ısının geri kazanımı için organik Rankine çevriminin kontrolünde kullanılmıştır [18]. LQI kontrol yöntemi, Phillips ve Şahin tarafından iki rotorlu çok girişli-çok çıkışlı bir sistemin optimal kontrolünde kullanılmıştır [19]. Yine LQI kontrol sabit kanatlı mikro hava aracının [20] ve küçük sabit kanatlı insansız hava aracının kontrolünde kullanılmıştır [21]. Poggetto ve Serpa tarafından kazanç uyarlamalı LQR kontrol sistemi taşıt devrilme önleme kontrolünde kullanılmıştır [22]. Owczarkowski ve Horla tarafından LQR ve LQI kontrol insansız bisikletin denge kontrolünde kullanılmıştır [23]. Altun tarafından çeyrek taşıt aktif süspansiyon kontrolü için LQR ve LQI kontrolcüler tasarlanmış ve yol bozucularına göre başarımları karşılaştırılmıştır [24]. Bir başka örnek olarak LQI kontrol Kisszölgýemi ve arkadaşları tarafından küçük boyutlu turbojet motorun değişken egzoz nozuluyla kontrolünde kullanılmıştır [25]. Wang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise hıza bağlı dayanıklı LQR kontrol sistemi taşıt savrulma momenti kontrolüne uygulanmıştır [26]. Bu bölümde önce LQR, daha sonra LQI kontrol yöntemlerinin denklemlerinin çıkarılışı anlatılmıştır.

Çok girişli çok çıkışlı doğrusal zamanla değişmeyen genel bir sistem, durum uzay formunda alttaki gibi yazılabilir [16]:

$$\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx \quad 5$$

burada x , u ve y sırasıyla durum, giriş ve çıkış değişkenlerini; A , B ve C ise sırasıyla durum, kontrol ve çıkış matrislerini göstermektedir. Denklem 1 – 4 ile belirtilen doğrusal otonom taşıt durum uzay modeli matrisleri genel formda A durum matrisi aynı şekilde ifade edilmek üzere $B = B_1$ olarak yazılabilir. LQI kontrol için gerekli olan $C = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$ olarak ifade edilebilir.

LQR optimal kontrol sisteminde amaç Denklem 6’da verilen J performans indeksinin minimize edilmesidir [16]:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad 6$$

burada Q simetrik pozitif yarı tanımlı ağırlık matrisini ve R simetrik pozitif tanımlı ağırlık matrisini göstermektedir. Denklem 6’yı minimize eden ve kapalı çevrim sistemi kararlı kılan kontrol kanunu alttaki gibi yazılabilir:

$$u = -R^{-1} B^T P x = K_{lqr} x \quad 7$$

burada K_{lqr} optimal kazanç matrisini ve P Denklem 8’de gösterilen cebirsel Riccati denkleminin çözümünden elde edilen pozitif yarı tanımlı matrisi göstermektedir.

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad 8$$

LQR kontrol, referans takip problemlerinde yetersiz kalmakta ve sürekli rejim hatasının giderilmesini sağlayamamaktadır. Bunun için LQR kontrolün geliştirilmiş hali olarak LQI kontrol kullanılmaktadır. LQI kontrolde sisteme integral etkisini ekleyecek yeni bir durum değişkeni tanımlanmaktadır. Bundan sonra problem LQR probleminde olduğu gibi düzenlenmekte ve cebirsel Riccati denklemi çözülerek performans indeksini minimize edecek kontrol kanunu elde edilmektedir. LQI kontrol çeşitli kontrol problemlerine başarıyla uygulanmıştır. LQI kontrolün diğer doğrusal kontrol yöntemlerine göre avantajları şu şekilde sıralanabilir [25]: (i) doğrusal kvadratik formda optimal kontrol sağlamaktadır, (ii) global olarak doğrusal zamanla değişmeyen bir sistemi kararlı kılmaktadır, (iii) integral etkiyle referans takibini sağlamaktadır, (iv) kapalı çevrim sisteme sonsuz pozitif kazanç marjini sağlayarak iyi dayanıklılık özellikleri göstermektedir. İlerleyen kısımda LQI kontrol yönteminin denklemleri çıkarılmıştır.

Referans girişi (r) ile sistem çıkışının (y) farkı olarak tanımlanan hatanın (e) integrali alttaki gibi yeni bir durum değişkeni olarak tanımlanabilir [16, 21]:

$$x_e = \int_0^{\infty} (r - y) dt = \int_0^{\infty} e dt \quad 9$$

Sürekli rejimde hatanın $e = 0$ olduğu durumda x ve u değişkenlerinin sürekli rejim değerleriyle ilgili olarak alttaki denklemler yazılabilir:

$$Ax_{\infty} + Bu_{\infty} = 0 \quad 10$$

$$Cx_{\infty} = r, (r = y) \quad 11$$

x_e 'nin sürekli rejim değeri ise tasarım serbestliği olarak seçilebilir, burada $x_{e\infty} = 0$ olarak seçilmiştir. x , u ve x_e değişkenlerinin sürekli rejim değerlerinden farkı (hatası) alttaki gibi ifade edilebilir:

$$\tilde{x} = x - x_{\infty}, \tilde{u} = u - u_{\infty}, \tilde{x}_e = x_e - x_{e\infty} \quad 12$$

Bu değişkenler kullanılarak sistemin genişletilmiş durum uzay formu alttaki şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\tilde{x}}_e \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}}_{A_z} \tilde{z} + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_z} \tilde{u} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}}_{=0} \tilde{r} \quad 13$$

Referans giriş hatası $\tilde{r} = 0$ olduğundan Denklem 13 standart formda

$$\dot{\tilde{z}} = A_z \tilde{z} + B_z \tilde{u} \quad 14$$

olarak yazılabilir ve alttaki J_I performans indeksi minimize edilebilir:

$$J_I = \int_0^{\infty} (\tilde{z}^T Q_z \tilde{z} + \tilde{u}^T R_z \tilde{u}) dt \quad 15$$

Bu performans indeksini minimize edecek \tilde{u} alttaki gibi hesaplanabilir:

$$\tilde{u} = -R_z^{-1} B_z^T P_z \tilde{z} = K_x \tilde{x} + K_{x_e} \tilde{x}_e \quad 16$$

P_z matrisi, Denklem 17'de verilen cebirsel Riccati denklemi

$$P_z A_z + A_z^T P_z - P_z B_z R_z^{-1} B_z^T P_z + Q_z = 0 \quad 17$$

çözülerek bulunur ve P_z pozitif yarı tanımlı matrisi

$$P_z = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix} \quad 18$$

elde edilerek optimal kazançlar alttaki gibi çözülebilir:

$$K_x = -R^{-1} B^T P_{11} \quad 19$$

$$K_{x_e} = -R^{-1} B^T P_{12} \quad 20$$

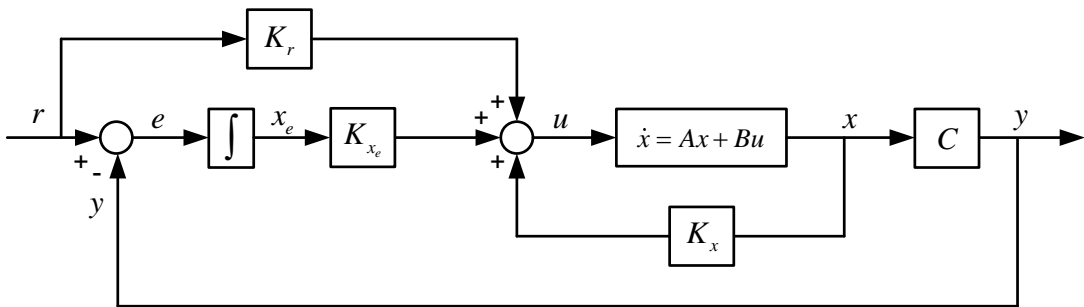
Denklem 10 – 12 ve 16 kullanılarak, verilen sistem için optimal kontrol girişi alttaki gibi yazılabilir:

$$u = K_x x + K_{x_e} x_e + K_r r \quad 21$$

burada

$$K_r = -[C(A + BK_x)^{-1}B]^{-1} \quad 22$$

olarak hesaplanabilir. LQI kontrolün geri besleme optimal kazanç matrisi $K_{lqi} = [K_x \ K_{x_e}]$ olarak belirtilebilir. LQI kontrollü genel bir sistemin blok diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir.



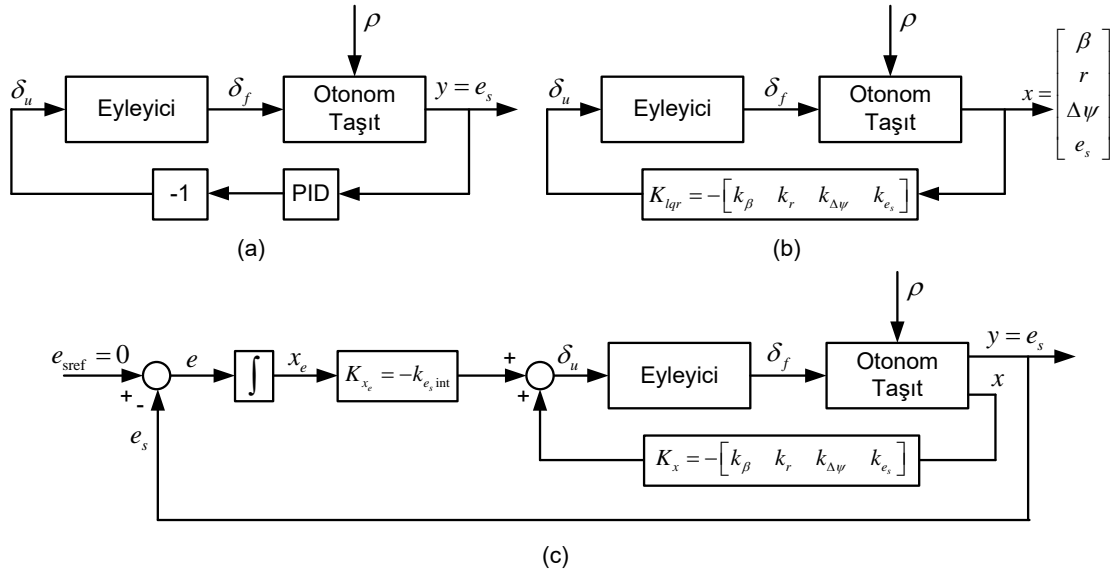
Şekil 4. LQI kontrollü genel bir sistemin blok diyagramı

6. OTONOM TAŞIT YOL TAKİBİ İÇİN HIZA BAĞLI KAZANÇ UYARLAMALI LQI KONTROL SİSTEMİ (SPEED DEPENDENT GAIN SCHEDULED LQI CONTROL SYSTEM FOR AUTOMATED VEHICLE PATH FOLLOWING)

Bu çalışmada otonom taşıt yol takip kontrolü için hız bağılı kazanç uyarlamalı LQI kontrol sistemi önerilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi için PID ve LQR tabanlı kontrol sistemleri de aynı problemin çözümü için kullanılmıştır. LQR kontrol sistemi de, LQI gibi kazançları taşıt hızıyla değişecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 5'te üç kontrol sistemi için de blok diyagramları verilmiştir.

Şekil 5.a'da gösterilen PID kontrollü otonom yol takip sisteminde sadece taşıtın sensör görüş mesafesinde yoldan sapma miktarı e_s geri beslenmektedir. PID kontrol sistemi katsayıları, doğrusal otonom taşıt modeli için Matlab PID Tuner kullanılarak elde edilmiştir. PID kontrolcünün katsayıları sırasıyla (0.067; 0.045; 0.008) olarak alınmıştır. Kontrol sistemi, ρ yol eğriliğinin (bozucu etkinin) sistem üzerindeki etkisini azaltacak şekilde kontrol işaretini δ_u 'yu üretmektedir. Bu sinyalde pozisyon kontrollü kablo yönlendirmeli direksiyon eyleyicisi üzerinden δ_f otonom taşıta etki ettirilmektedir.

Şekil 5.b'de LQR kontrollü otonom taşıt yol takip kontrol sistemi görülmektedir. Denklem 1 – 4 ile belirtilen doğrusal otonom taşıt modeli kullanılarak Denklem 5 – 8'de belirtildiği şekilde cebirsel Riccati denklemi çözülerek $K_{lqr} = -[k_\beta \ k_r \ k_{\Delta\psi} \ k_{e_s}]$ optimal kazanç matrisi hesaplanmaktadır. Burada; k_β , k_r , $k_{\Delta\psi}$ ve k_{e_s} sırasıyla geri beslenen β , r , $\Delta\psi$ ve e_s taşıt durumlarına ait hesaplanan optimal kazançları göstermektedir.



Şekil 5. Otonom taşıt yol takip sistemi blok diyagramı
(a) PID kontrollü, (b) LQR kontrollü, (c) LQI kontrollü

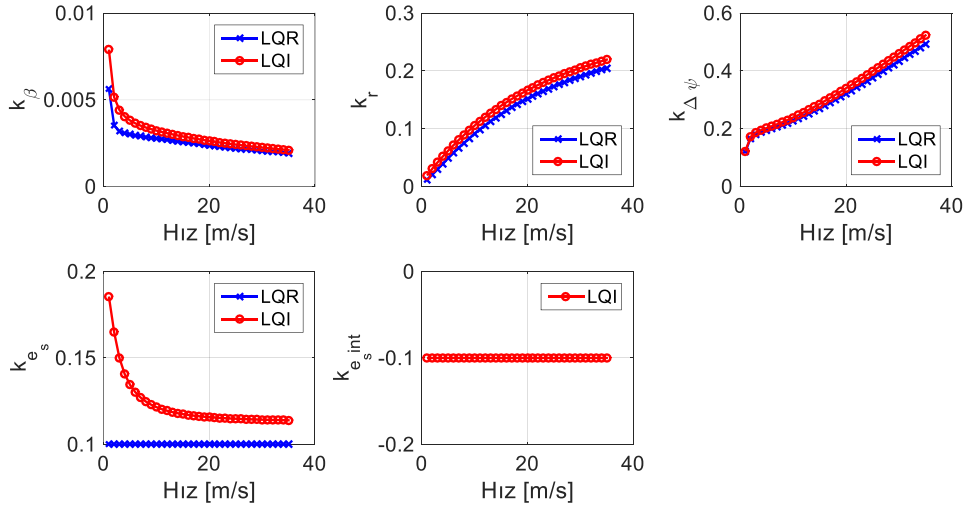
Şekil 5.c'de önerilen LQI kontrollü otonom taşıt kontrol sistemi görülmektedir. LQI kontrol sisteminde integral etkisini ekleyecek yeni bir durum değişkeni $x_e = \int_0^\infty (e_{sref} - e_s) dt$ olarak tanımlanmıştır. Burada, e_{sref} sensör giriş mesafesinde taşıtın yoldan sapma miktarının referans (istenen) değerini göstermektedir ve değeri sıfırdır. LQI kontrol sisteminin optimal kazanç matrisi $K_{lqi} = [K_x \ K_{x_e}]$ Denklem 9 – 20'da belirtildiği gibi $K_x = -[k_\beta \ k_r \ k_{\Delta\psi} \ k_{e_s}]$ ve $K_{x_e} = -k_{e_sint}$ olarak hesaplanmaktadır. Burada, k_{e_sint} yeni durum değişkeni x_e ile çarpılan optimal kazancı göstermektedir. e_s 'nin referans değeri sıfır olduğundan Denklem 22 ile hesap edilebilen K_r kazancının hesaplanmasına gerek yoktur.

LQR optimal kazanç matrisi K_{lqr} 'nin hesaplanmasında ağırlık matrisleri $Q = q_w I_{4 \times 4}$, $R = r_w$ olarak; LQI optimal kazanç matrisi K_{lqi} 'nin hesaplanmasında ise $Q = q_w I_{5 \times 5}$, $R = r_w$ olarak alınmıştır. Burada tekrarlı benzetimler sonucunda $q_w = 1$ ve $r_w = 100$ olarak seçilmiştir. $I_{n \times n}$, n boyutlu birim matrisi

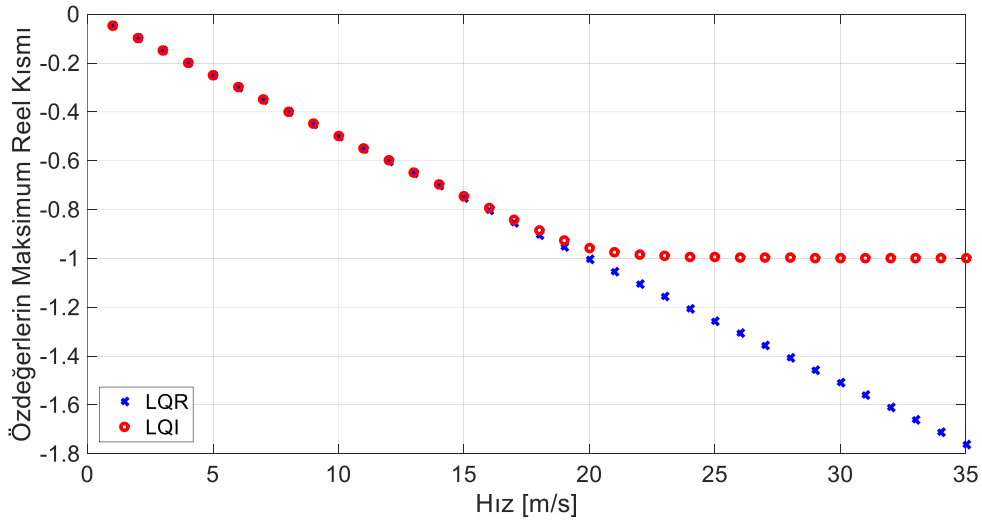
göstermektedir. LQR ve LQI karşılaştırılmasında eşit şartları sağlamak için q_w ve r_w değerleri her iki kontrol sistemi tasarımında da aynı alınmıştır.

Taşıt hızı V 'nin taşıtın dinamik davranışı üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Bu yüzden LQR ve LQI kontrol sistemleri tasarımında taşıt hızının etkisi dikkate alınmıştır. Denklem (1) ve (3)'te verilen matrisler hıza bağlı olarak $A = A(V)$, $B_1 = B_1(V)$ ve $B_2 = B_2(V)$ şeklinde gösterilebilir. Hıza bağlı bu sistem için LQR ve LQI optimal kazanç matrisleri 1 m/s'lik aralıklarla 1 ile 35 m/s arasında $K_{lqr} = K_{lqr}(V)$ ve $K_{lqi} = K_{lqi}(V)$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 6'da LQR ve LQI optimal kazanç katsayılarının hıza bağlı değişimi görülmektedir. Hesaplanan bu değerler ara hız değerlerinde interpolasyon yapılarak hıza bağlı tablolar olarak Simulink modelinde kullanılmıştır. Bu tarz bir yaklaşım daha önce taşıt yanal dinamiği kontrolünde [17] ve taşıt devrilme dinamiği kontrolünde [22] kullanılmıştır.

Her bir hız adımı için LQR ve LQI kontrollü kapalı çevrim sistemin kararlılığı araştırılmıştır. Kapalı çevrim sistemin kararlılığını gösteren özdeğerlerin reel kısımlarının maksimum değerleri hıza bağlı olarak Şekil 7'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi maksimum reel kısımlar negatif olup hem LQR, hem de LQI kontrol için kapalı çevrim sistem kararlıdır.



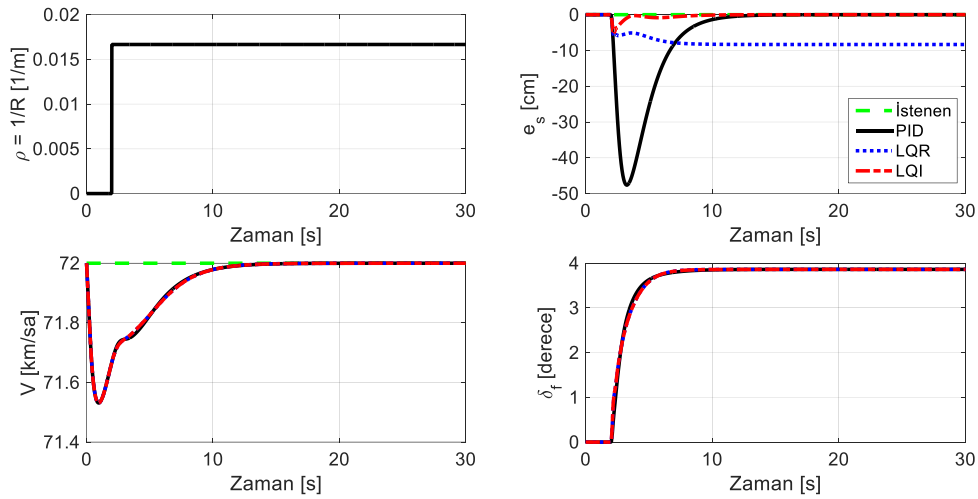
Şekil 6. LQR ve LQI için optimal kontrol katsayılarının hıza bağlı değişimi



Şekil 7. LQR ve LQI kontrollü kapalı çevrim sistem için özdeğerlerin maksimum reel kısımlarının hıza bağlı değişimi

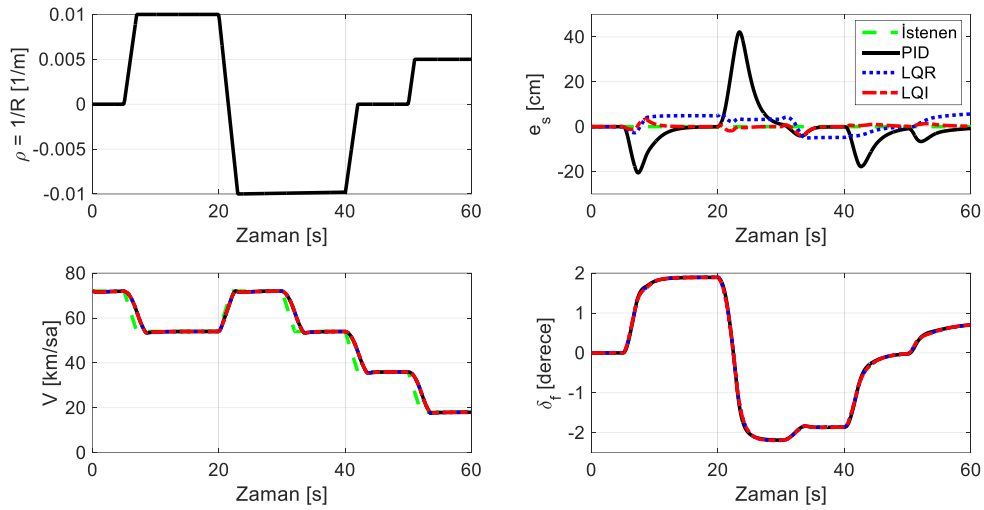
7. BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Kontrol sistemleri tasarlandıktan sonra doğrusal olmayan otonom taşıt modelini içeren benzetim ortamında birbirlerine göre test edilmişlerdir. Bunun için İki farklı test senaryosu gerçekleştirilmiştir. İlk testte otonom taşıt 30 s boyunca 60 m yarıçaplı ($\rho = 1/60 = 0.01667$ 1/m) yolu 72 km/sa (= 20m/s) hızla dönmeye çalışmaktadır. Şekil 8’de benzetime ait sonuçlar görülmektedir. Şekil 8 sol alttaki grafikte görüldüğü gibi taşıt boyuna hız kontrolcüsü iyi bir şekilde çalışarak taşıt hızını (V) 72 km/sa’lik istenen değerde sabit olarak tutmaktadır. Sağ altta görüleceği üzere otonom taşıt ön tekerlek dönüş açıları (δ_f) 4 derece’nin altındadır. Sol üstteki grafikten sensör görüş mesafesinde yoldan yana sapma miktarına (e_s) bakıldığında PID kontrollü otonom taşıt istenen yoldan en fazla 47.65 cm saptığı görülmektedir. Aynı grafiğe bakıldığında PID kontroldeki integral etki sayesinde 10.s’den itibaren hata miktarı sıfıra yaklaşmaktadır. Bununla birlikte LQR kontrollü otonom taşıtın yoldan yana sapma miktarı en fazla 8.34 cm’dir. Ancak LQR kontrollü otonom taşıta integral etki olmadığından bu sapma sürekli rejim hatası olarak otonom taşıt üzerinde kalmaktadır. LQI kontrollü otonom taşıta ise yoldan yana sapma miktarı en fazla 5.5 cm olmakta ve integral etki sayesinde çok hızlı bir şekilde sıfıra yakınsamaktadır.



Şekil 8. Farklı tip kontrol sistemleri için Benzetim 1'in sonuçları

İkinci testte otonom taşıt, 60 s boyunca değişken yol eğriliğine sahip, her iki yöne dönüşler içeren bir yolu 18 km/sa ile 72 km/sa (5 m/s ile 20 m/s) arasında değişen bir hızla takip etmeye çalışmaktadır. Hız değişken alınarak hıza bağlı kazanç uyarlamalı kontrol sistemleri test edilmek istenilmiştir. Şekil 9’da bu benzetime ait sonuçlar verilmiştir. Şekil 9 sol alttaki grafikte görüldüğü gibi taşıt boyuna hız kontrolcüsü istenen hız profilini başarılı bir şekilde takip etmektedir. Sağ alttaki grafikten anlaşıldığı üzere otonom taşıt ön tekerlek dönüş açıları (δ_f) takip edilmek istenen yol ve hız profiline göre yaklaşık olarak - 2 derece ile + 2 derece arasında değişmektedir. e_s - zaman grafiğinden görüldüğü gibi PID kontrollü otonom taşıta maksimum değeri 42.22 cm olmak üzere ani istenen yoldan sapmalar vardır ancak kontrol sisteminde bulunan integral etkiyle sürekli rejim hatası azaltılmaya çalışılmaktadır. LQR kontrollü otonom taşıtın yoldan sapma miktarı, maksimum 5.7 cm olarak PID kontrollü taşıta göre daha iyi bir başarımlı göstermektedir ancak LQR kontrol sisteminde integral etki olmadığından sürekli rejim hatası otonom taşıt üzerinde kalmaktadır. LQI kontrollü otonom taşıt ise, PID ve LQR kontrollü taşıtlara göre hem ani yana sapmalar, hem de sürekli rejim hatasının giderilmesi açısından daha başarılı sonuçlar vermektedir. İkinci benzetimde LQI kontrollü otonom taşıt için sensör görüş mesafesinde yoldan yana sapma miktarı (e_s) maksimum 3.81 cm olmaktadır.



Şekil 9. Farklı tip kontrol sistemleri için Benzetim 2'nin sonuçları

Tablo 3'te farklı tip kontrol sistemleri iki benzetim için de istatistiksel hata değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada sensor görüş mesafesinde yoldan sapma miktarının mutlak değerinin maksimumu ($\max|e_s|$) ve yine yoldan sapma miktarının ortalama karesel hatasının karekök değeri ($RMSE(e_s)$) kullanılmıştır. Bu hata değeri alttaki gibi hesaplanabilir:

$$RMSE(e_s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_s - e_{sref})^2}{n}} \quad 23$$

Burada, n veri sayısıdır.

Tablo 3'e bakıldığında her iki karşılaştırma ölçütüne göre de en düşük hata değerleri LQI kontrol sistemiyle elde edilmektedir.

Tablo 3. Benzetim sonuçlarının sayısal olarak karşılaştırılması

	$\max e_s $ [cm]			$RMSE(e_s)$ [cm]		
	PID	LQR	LQI	PID	LQR	LQI
Benzetim 1	47.6479	8.3375	5.4997	8.8115	8.0278	0.4776
Benzetim 2	42.2221	5.6783	3.8056	10.1750	3.6982	0.9634

8. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada otonom taşıt yol takibi için farklı kontrol sistemleri geliştirilerek karşılaştırılmıştır. PID, LQR ve LQI tabanlı kontrol sistemlerinin geliştirilmesinde doğrusal otonom taşıt yol takip modeli kullanılmıştır. LQR ve LQI kontrol sistemleri hıza bağlı kazanç uyarlamalı olarak geliştirilmiştir. Tasarlanan kontrol sistemleri 7 serbestlik dereceli ve pozisyon kontrollü kablolu yönlendirme eyleyicisi modeli içeren otonom taşıt modeliyle benzetim ortamında test edilmiştir. Kontrol sistemlerinin karşılaştırılması için iki farklı benzetim çalışması yürütülmüştür. İlk benzetimde sabit yarıçaplı viraja sahip yol sabit hızla, ikinci benzetimde ise değişken yarıçaplı yol değişken hızla otonom taşıt tarafından takip edilmeye çalışılmıştır. Benzetim sonuçları farklı tip kontrol sistemleri için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kontrol sistemlerinin sayısal olarak da karşılaştırılabilmesi için sensör görüş mesafesinde yoldan yana sapma miktarının maksimum değeri ve ortalama karesel hatanın karekök (RMSE) değeri kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarına ve sayısal karşılaştırma değerlerine bakıldığında otonom taşıt yol takibi açısından hıza bağlı kazanç uyarlamalı LQI kontrol sisteminin PID ve LQR kontrol sistemlerine göre daha başarılı olduğu görülmüştür. LQI kontrol sistemi kullanılarak LQR kontrol sistemine göre benzetim 1 ve 2'nin ortalama sonuçlarına göre

$\max|e_s|$ değeri açısından %33.51 başarımlı artışı, $RMSE(e_s)$ değeri açısından %89.72 başarımlı artışı olmuştur. Benzer şekilde LQI kontrol sisteminin başarımlı, PID kontrol sistemine göre değerlendirildiğinde ise $\max|e_s|$ değeri açısından %84 başarımlı artışı, $RMSE(e_s)$ değeri açısından %92.56 başarımlı artışı sağlanmıştır. Hıza bağımlı LQI kontrol sisteminin gerçek bir otonom taşıta uygulanmadan önce gerçek zamanlı donanım içeren benzetimlerle test edilerek geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca taşıt modellenmesinde ele alınmayan parametrik belirsizlikler ile modellenmeyen kısımları dikkate alan ve dış bozucu etkileri gözetim dayanlı kontrol sistemi tasarımlarına da yönelerek önerilen kontrol sistemiyle karşılaştırılması yapılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Güvenç, L., Aksun Güvenç, B., & Emirler, M. T. (2016). Connected and Autonomous Vehicles, In Internet of Things and Data Analytics Handbook, Hwaiyu Geng (Ed.), Wiley, New Jersey, 581-595.
- [2] Ackermann, J., & Sienel, W. (1990). Robust control for automatic steering, IEEE American Control Conference (ACC), San Diego, CA, USA, 795-800.
- [3] Ackermann, J., Guldner, J., & Utkin, V. I. (1994). A robust nonlinear control approach to automatic path tracking of a car, IET International Conference on Control (Control'94), Coventry, UK, 196-201.
- [4] Aksun Güvenç, B., & Güvenç, L. (2002). Robust two degree-of-freedom add-on controller design for automatic steering, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 10(1), 137-148.
- [5] Choi, J. Y. (2011). Robust controller for an autonomous vehicle with look-ahead and look-down information, Journal of Mechanical Science and Technology, 25(10), 2467-2474.
- [6] Rathgeber, C., Winkler, F., Odenthal, D., & Müller, S. (2014). Lateral trajectory tracking control for autonomous vehicles, European Control Conference (ECC), Strasbourg, France, 1024-1029.
- [7] Emirler, M. T., Uygan, İ. M. C., Aksun Güvenç, B., & Güvenç, L. (2014). Robust PID steering control in parameter space for highly automated driving, International Journal of Vehicular Technology, 259465, 1-8.
- [8] Emirler, M. T., Wang, H., Aksun Güvenç, B., & Güvenç, L. (2015). Automated robust path following control based on calculation of lateral deviation and yaw angle error, ASME Dynamic Systems and Control Conference, Columbus, Ohio, USA, 1-8.
- [9] Emirler, M. T., Wang, H., & Aksun Güvenç, B. (2016). Socially acceptable collision avoidance system for vulnerable road users, IFAC-PapersOnLine, 49(3), 436-441.
- [10] Wang, H., Tota, A., Aksun Güvenç, B., & Güvenç, L. (2018). Real time implementation of socially acceptable collision avoidance of a low speed autonomous shuttle using the elastic band method, Mechatronics, 50, 341-355.
- [11] Hu, C., Wang, R., Yan, F., & Chen, N. (2016). Output constraint control on path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65(6), 4033-4043.
- [12] Hu, C., Jing, H., Wang, R., Yan, F., & Chadli, M. (2016). Robust H_∞ output-feedback control for path following of autonomous ground vehicles, Mechanical Systems and Signal Processing, 70-71, 414-427.
- [13] Lee, K., Li, S. E., & Kum, D. (2018). Synthesis of robust lane keeping systems: Impact of controller and design parameters on system performance, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (Early Access), 1-13.
- [14] Ackermann, J., Blue, P., Bünte, T., Güvenç, L., Kaesbauer, D., Kordt, M., Muhler, M., & Odenthal, D. (2002). Robust Control: The Parameter Space Approach, Springer-Verlag.

- [15] Kozáková, A., & Hypiúsová, M. (2015). LQG/LTR based reference tracking for a modular servo, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2, 347-357.
- [16] Ebihara, Y., Hagiwara, T., & Araki, M. (1999). Sequential tuning methods of LQ/LQI controllers for multivariable systems and their application to hot strip mills, *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision & Control*, Phoenix, Arizona, USA, 767-772.
- [17] Esmailzadeh, E., Goodarzi, A., & Vosoughi, G. (2003). Optimal yaw moment control law for improved vehicle handling, *Mechatronics*, 13, 659-675.
- [18] Luong, D., & Tsao, T-C. (2014). Linear quadratic integral control of an organic Rankine cycle for waste heat recovery in heavy-duty diesel powertrain, *IEEE American Control Conference (ACC)*, Portland, Oregon, USA, 3147-3152.
- [19] Phillips, A., & Şahin, F. (2014). Optimal control of a twin rotor MIMO system using LQR with integral action, *World Automation Congress (WAC)*, Waikoloa, Hawaii, USA, 1-6.
- [20] Anjali, B. S., Vivek, A., & Nandagopal, J. L. (2016). Simulation and analysis of integral LQR controller for inner control loop design of a fixed wing micro aerial vehicle (MAV), *Procedia Technology*, 25, 76-83.
- [21] Smith, J., Su, J., Liu, C., Chen, W-H. (2017). Disturbance observer based control with anti-windup applied to a small fixed wing UAV for disturbance rejection, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 88(2-4), 329-346.
- [22] Poggetto, V. F. D., Serpa, A. L. (2016). Vehicle rollover avoidance by application of gain-scheduled LQR controllers using state observers, *Vehicle System Dynamics*, 54(2), 191-209.
- [23] Owczarkowski, A., & Horla, D. (2016). Robust LQR and LQI control with actuator failure of a 2DOF unmanned bicycle robot stabilized by an inertial wheel, *International Journal of Mathematics and Computer Science*, 26(2), 325-334.
- [24] Altun, Y. (2017). Çeyrek taşıt süspansiyon sistemi için LQR ve LQI denetleyicilerinin karşılaştırılması, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(3), 61-70.
- [25] Kisszölgýemi, I., Beneda, K., & Faltin, Z. (2017). Linear quadratic integral (LQI) control for a small scale turbojet engine with variable exhaust nozzle, *IEEE International Conference on Military Technologies (ICMT)*, Brno, Czech Republic, 507-513.
- [26] Wang, Z., Montanaro, U., Fallah, S., Sorniotti, A., & Lenzo, B. (2018). A gain scheduled robust linear quadratic regulator for vehicle direct yaw moment control, *Mechatronics*, 51, 31-45.