

Şerit takibi ve uyarlanabilir hız kontrolünde güvenlik-kritik olay tetiklemeli model öngörülü kontrol

Safety-critical event-triggered model predictive control for lane keeping and adaptive cruise control

Ali Can Erüst¹ , Gökay Güçlü² , Fatma Yıldız Taşcıkaraoğlu^{3,*} 

^{1,2,3} Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 48000, Muğla Türkiye

² Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 48300, Muğla Türkiye

Öz

Otonom araçlarda şerit takibi ve uyarlamalı hız kontrolü sistem kararlılığı ve sürüş güvenliği açısından kritik problemlerdir. Bu çalışmada, güvenlik-kritik tabanlı model öngörülü kontrol (MPC) yöntemi, güvenlik ve kararlılığı garanti altına almak amacıyla kontrol bariyer fonksiyonları (CBF) ve kontrol Lyapunov fonksiyonları (CLF) içeren karesel programlama (QP) yapısı ile tasarlanmıştır. Araç dinamikleri ve CBF'ler nedeniyle lineer olmayan MPC problemi özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda hesaplama maliyetini artırmaktadır. Hesaplama süresini azaltmak için yalnızca tetiklenme anlarında optimal kontrol probleminin çözümünü güncelleyen olay tetiklemeli bir mekanizma kontrolcüye eklenmiştir. Önerilen yöntem, CARLA simülasyon ortamında üç senaryo ile test edilmiş ve olay-tetiklemeli mekanizmanın performansı korurken hesaplama maliyetini %50'nin üzerinde azalttığı gösterilmiştir. Ayrıca CBF performans parametreleri ve alt tetikleme indisi değişimlerinin performansa ve hesaplama süresine etkileri değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Güvenlik-kritik model öngörülü kontrol, Otonom araçlar, Kontrol bariyer fonksiyonları, Olay-tetiklemeli kontrol

1 Giriş

Verimlilik ve güvenlik, otonom araç kontrolünün temel unsurlarıdır ve her ikisini bir arada ele alan yaklaşımlar güvenlik gerekliliklerini korurken yüksek performanslı sonuçlar elde etmek için kritik öneme sahiptir. Güvenlik protokollerinin sağlanması amacıyla kullanılan kontrol bariyer fonksiyonları (CBF) sistemin zaman içerisindeki davranışını dikkate alarak güvenlik kısıtlarını uygular ve küme değişmezliği kavramı sayesinde sistem durumlarının önceden belirlenmiş güvenli sınırlar içinde kalmasını sağlar [1].

Sistem kısıtlarını etkin bir şekilde ele alma yeteneğiyle bilinen Model Öngörülü Kontrol (MPC) yöntemine CBF kısıtlarının eklenmesiyle, sistem önceden tanımlanmış güvenli sınırlar içinde tutulabilirken, aynı zamanda Kontrol Lyapunov fonksiyonlarının (CLF) eklenmesiyle kararlılık sağlanmakta ve dinamik performans iyileştirilmektedir. CBF

Abstract

Lane keeping and adaptive cruise control in autonomous vehicles are critical problems in terms of system stability and driving safety. In this study, a safety-critical model predictive control (MPC) method is designed within a quadratic programming (QP) framework that incorporates control barrier functions (CBF) and control Lyapunov functions (CLF) to guarantee safety and stability. Due to the nonlinear vehicle dynamics and nonlinear CBF constraints, the MPC problem becomes computationally demanding, particularly in real-time applications. To reduce the computational burden, an event-triggered mechanism that updates the solution of the optimal control problem only at triggering instants is integrated into the controller. The proposed method is evaluated in three scenarios within the CARLA simulator. The results demonstrate that the event-triggered mechanism reduces computational cost by more than 50% while maintaining performance. Moreover, the effects of CBF performance parameters and the minimum interexecution time on both performance and computational efficiency are investigated.

Keywords: Safety-critical model predictive control, Autonomous vehicles, CBFs, Event-triggered control

tabanlı MPC literatürde iki şekilde uygulanmaktadır. Birinci strateji, CBF kısıtlarını doğrudan optimal kontrol problemi formülasyonuna dahil etmektedir [2]. İkinci stratejide ise klasik MPC ile kontrol sinyalinin hesaplanması alt seviyede, Karesel Programlama (QP) tabanlı bir güvenlik filtresiyle CBF kısıtlarının uygulanması üst seviyede gerçekleştirilmektedir [3]. Bu yaklaşımlar, güvenlik açısından kritik sınır ihlallerini önlerken aynı zamanda performansı korumayı da mümkün kılar.

Özellikle gerçek zamanlı sistemlerde, kontrol sistemlerinin bir diğer önemli unsuru ise hesaplama kaynaklarının verimli kullanımıdır. Optimal kontrol problemini çevrimiçi olarak her zaman adımında tekrar çözen MPC, doğrusal olmayan sistem modeline ve kısıtlarına sahip olduğunda ve geniş tahmin ufuklarında yüksek hesaplama maliyeti getirmektedir [4]. Bu sorun, optimal kontrol probleminin yalnızca tetikleme zamanları

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fatmayildiz@mu.edu.tr (F. Yıldız Taşcıkaraoğlu)

Geliş / Received: 26.08.2025 Kabul / Accepted: 13.10.2025 Yayınlanma / Published: 15.01.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1772241

olarak adlandırılan belirli zaman adımlarında çözülmesiyle, yani hesaplamaların sıklığının azaltılmasıyla giderilmektedir [5]. Tetikleme zamanı kavramı ilk olarak sürekli zamanlı sistemlerde PID denetleyiciler ile kullanılmıştır [6]. Ayrık zamanlı sistemler için bir tetikleme mekanizmasının önerilmesiyle olay tetiklemeli MPC yöntemlerinin kullanımına başlanmıştır [7]. Sonrasında, periyodik tetikleme, kendi kendine tetikleme ve olay tabanlı tetikleme gibi çeşitli mekanizmalar da geliştirilmiştir [8, 9, 10-12]. Bu yöntemlerde, kontrol sinyali yalnızca uygulanabilirlik ve kararlılık şartlarına dayalı olarak önceden belirlenen bir tetikleme koşulu sağlandığında güncellenmektedir. Bunun haricinde önceki tetikleme anında hesaplanan kontrol giriş dizisi, bir sonraki tetikleme anına kadar uygulanmaya devam etmektedir.

Dayanıklı MPC çalışmalarında olay tabanlı tetikleme koşulu genellikle, öngörülen ve gerçek durumlar arasındaki hatayı sınırlayan önceden belirlenmiş bir eşik değeri olarak ele alınır. Bu eşik değeri, bozucu etkiler için en kötü durum sınırları dikkate alınarak, yinelemeli uygulanabilirlik ve Lyapunov kararlılık kriterlerine dayalı biçimde çevrimdışı olarak belirlenir [13-17].

Otonom araç sistemi çalışmalarında güvenlik-kritik MPC'de yaygın bir yaklaşım, güvenlik kısıtlarının Öklid normu cinsinden ifade edilen mesafe kısıtları şeklinde modellenmesidir. Bu sayede, sistem durumlarının minimum mesafe gereksinimini hiçbir zaman ihlal etmemesi garanti altına alınır [16-18]. Ancak, tahmin ufku yeterince uzun değilse, bu mesafe kısıtı optimal kontrol probleminde aktif olmayabilir. Böylece tehlikeli bir durum ortaya çıkana kadar herhangi bir işlem yapılmaz. Bu durum, özellikle sistem davranışının hızlı değiştiği olay tabanlı MPC'de ciddi bir güvenlik sorunu oluşturur. Bunun nedeni, bu tür mekanizmaların güncellemeleri ya çok seyrek tetiklemesi ya da aşırı basitleştirilmiş koşullara dayanmasıdır; bu da güvenlik kısıtlarının ihlaline yol açabilir.

Uyarlamalı hız kontrolü ve şerit takip problemleri, yalnızca optimal kontrolörlerle değil, aynı zamanda öğrenme tabanlı yaklaşımlar aracılığıyla da ele alınmaktadır. Özellikle derin pekiştirmeli öğrenme yöntemleri, güvenlik kriterleri dikkate alınarak uyarlamalı hız kontrolü problemlerine uygulanmakta [19] ve yüksek hız limitlerinde şerit takip problemlerinde test edilmektedir [20]. Ayrıca, şerit takip problemlerinde kontrol sinyali doğrudan derin öğrenme tabanlı yöntemlerle de üretilebilmektedir [21]. Bununla birlikte, öğrenme tabanlı yöntemler uygulamaya bağlı olarak başarılı sonuçlar sunsa da, olasılıksal yapılarından dolayı üretilen kontrol sinyalinin kesinliği ve sistemin kararlılığı sınırlı kalmakta, ve dolayısıyla güvenliği mutlak olarak garanti edememektedir. Bu nedenle, sistem kararlılığını gözetin ve güvenliği matematiksel olarak garanti altına alan yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Modele dayalı yöntemlerden güvenlik-kritik MPC yönteminin olay tetiklemeli kullanımı mevcut literatürde henüz az çalışılmış bir alan olarak görünmektedir. Ayrık zamanlı sistemleri ele alan bir çalışma mevcut olsa da [22], bu çalışmada tetikleme mekanizmasına CBF'ler entegre edilmediği için olay tabanlı tetikleme süreci performans odaklı kalmakta, güvenlik boyutu ise göz ardı edilmektedir.

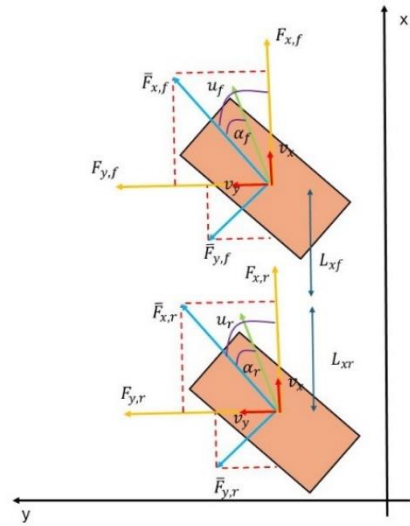
Bu çalışmada önerilen kontrol yönteminde CBF kısıtları olay tetiklemeli MPC mekanizmasından ayrı uygulanarak nihai kontrol sinyalinin her zaman güvenlik şartlarını sağlamasını garanti etmektedir. Bu filtre QP aşamasında uygulanmaktadır. Ayrıca, bu aşamada kararlılık durumunun bozulmaması için CLF kısıtları da eklenmiştir. Önerilen yöntem şerit takibi ve uyarlamalı hız kontrolü problemlerine uygulanmıştır. Gerçek zamanlı bir benzetim ortamı elde etmek için kentsel sürüş ortamlarını modelleyebilen, açık kaynaklı yüksek doğrulukta bir benzetim platformu olan CARLA simülatörü tercih edilmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde, öncelikle araç dinamik modeli ile güvenlik-kritik planlama modeline ilişkin temel bilgiler sunulmuştur. Ardından, önerilen olay-tetiklemeli MPC yaklaşımı ve QP tabanlı güvenlik filtresi tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde CARLA simülasyon ortamı açıklanmış, gerçek zamanlı benzetim sonuçları paylaşılmış ve elde edilen bulgularla çalışma sonuç bölümüyle tamamlanmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1. Araç dinamik modeli

Bu çalışmada kullanılan otonom araç modeli, klasik yaklaşım olarak kullanılan bisiklet modeline dayanmaktadır ve Şekil 1'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Otonom araca ait durum vektörü $\zeta = [x, y, v_x, v_y, \psi, r]$ olarak tanımlanmıştır. Burada x, y aracın küresel koordinat sistemindeki konumunu; v_x, v_y bu sistemdeki hız bileşenlerini; ψ , yalpa (yaw) açısını; r ise yalpa açısal hızını gösterir. Sürekli-zaman araç dinamiği Denklem (1)'de sunulmaktadır. Araç modeli ve tekerlek dinamiklerine ait detaylı bilgi Zhou vd. tarafından sunulan çalışmada yer almaktadır [17].



Şekil 1. Araç dinamik modeli

$$\dot{x} = v_x \cos(\psi) - v_y \sin(\psi) \quad (1a)$$

$$\dot{y} = v_x \sin(\psi) + v_y \cos(\psi) \quad (1b)$$

$$\dot{v}_x = v_y r + \frac{1}{m} \sum_{i=f,r} F_{x,i} \quad (1c)$$

$$\dot{v}_y = -v_x r + \frac{1}{m} \sum_{i=f,r} F_{y,i} \quad (1d)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (1e)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I} (L_{xf} F_{y,f} - L_{xr} F_{y,r}) \quad (1f)$$

Denklem (1)'de $\dot{x}, \dot{y}$ aracın küresel koordinat düzleminde hızını, $\dot{v}_x, \dot{v}_y$ aracın ivmelenmesini ve $\dot{r}$ ise açısal hızlanmasını tanımlamaktadır. Ayrıca m aracın kütlesini, I etrafındaki atalet momentini, L_{xr} ve L_{xf} sırasıyla arka ve ön tekerlek bileşke noktalarının araç kütle merkezine olan boyuna mesafelerini; $F_{y,i}$ ise yanal lastik kuvvetini temsil eder. Boyuna ve yanal lastik kuvvetleri $F_{x,i}$ ve $F_{y,i}$ gövde koordinatlarında modellenir; küresel koordinatlardaki karşılıkları, aracın yönelim açısı ψ ile tanımlanan dönüşüm matrisi kullanılarak elde edilir. Bu dönüşüm **Denklem (2)** ve **(3)**'te verilmektedir.

$$F_{x,i} = \bar{F}_{x,i} \cos(u_i) - \bar{F}_{y,i} \sin(u_i) \quad (2)$$

$$F_{y,i} = \bar{F}_{x,i} \sin(u_i) + \bar{F}_{y,i} \cos(u_i) \quad (3)$$

burada, $\bar{F}_{x,i}$ ve $\bar{F}_{y,i}$ gövde (araç) koordinatlarındaki boyuna ve yanal kuvvetleri temsil eder. İndis $i \in \{f, r\}$ olup sırasıyla ön ve arka tekerleği belirtmektedir. Küçük kayma açıları varsayımı altında yanal kuvvet $\bar{F}_{y,i}$ doğrusal olarak **Denklem (4)** ile verilen lastik modeliyle ifade edilmektedir.

$$\bar{F}_{y,i} = C g_i \alpha_i \quad (4)$$

burada, C tekerleğin yanal sertliğini gösterirken, α_i tekerlek kayma açısını tanımlamaktadır, $g_i, i \in \{f, r\}$ ise ön ve arka tekerleğe uygulanan sürtünme kuvvetini göstermekte olup, **Denklem (5)** ile hesaplanmaktadır.

$$g_f = \mu \frac{L_{xr} m g}{2(L_{xf} + L_{xr})}, \quad g_r = \mu \frac{L_{xf} m g}{2(L_{xf} + L_{xr})} \quad (5)$$

burada, μ sürtünme kuvveti katsayısını, g yer çekim ivmesini temsil etmektedir. Son olarak aracın gövde koordinatları ve küresel koordinatlardaki hız ilişkileri **Denklem (6)** ile ifade edilmektedir.

$$\bar{V}_{x,f} = v_x, \quad \bar{V}_{y,f} = v_y + r L_{xf} \quad (6a)$$

$$\bar{V}_{x,r} = v_x, \quad \bar{V}_{y,r} = v_y - r L_{xr} \quad (6b)$$

Sürekli-zamanda **Denklem (1)** ile tanımlanan araç modeli bu çalışmada Euler ayrıklaştırma metodu ile ayrık zamanda modellenerek kullanılmaktadır. Bu doğrultuda araç sistemine ait model **Denklem (7)** ile ifade edilmektedir.

$$\zeta(k+1) = \zeta(k) + T_s f(\zeta(k), u(k)) \quad (7)$$

burada, $f(\cdot)$ araç dinamiklerini, T_s örnekleme zamanını, $u(k)$ ise kontrol girdisini tanımlamaktadır. Bu çalışmada amaç güvenli şerit takibi ve öndeki araçla güvenli takip mesafesini korumaktır. Bu doğrultuda kontrol vektörü

$u(k) = [u_f(k), F_{y,f}(k)]$ olarak kullanılmakta ve $u_f(k)$ ön tekerlek yönlendirme açısını ifade etmektedir.

2.2. Güvenlik-kritik planlama modeli

Bu çalışmadaki güvenlik-kritik planlama yapısı öndeki araçla güvenli takip mesafesinin korunması ve güvenli şerit takibinin sürdürülmesi olarak ele alınmaktadır. Diğer bir ifadeyle, güvenlik konsepti araç modeline ait durum değişken vektörü ζ 'nin sürekli olarak her iki alt problemi de kapsayan $\mathbb{C} \in \mathbb{R}^n$ güvenli küme içerisinde kalması ile sağlanmaktadır. Küme için eğer $\zeta(0) = \zeta_0 \in \mathbb{C}$ başlangıç koşulu sağlanıyorsa, bu durum zamana bağlı olarak $\zeta(t) \in \mathbb{C}, \forall t$ biçiminde ifade edilir ve **Denklem (8)** ile tanımlanır.

$$\mathbb{C} = \{\zeta \in \mathbb{R}^n \mid h(\zeta) \geq 0\} \quad (8)$$

burada, $h(\cdot)$ bariyer fonksiyonunu göstermekte ve güvenli kümeye ait sınırları belirlemektedir. Bu kümenin zamana bağlı olarak küme değişmezliğinin korunması ise tasarlanan kontrol sinyali $u_k \in \mathbb{R}^2$ ile sağlanmakta olup bu yaklaşım bariyer fonksiyonunu kontrol bariyer fonksiyonuna dönüştürmektedir. Bu doğrultuda, **Denklem (9)**'daki eşitsizlik sağlanıyor ve $\gamma \in [0,1]$ aralığında bir değer varsa, araç modeli (1) için güvenli bölge tanımlanabilir.

$$\Delta h(\zeta(k)) \geq -\gamma h(\zeta(k)) \quad (9)$$

burada, $\Delta h = h(\zeta(k+1)) - h(\zeta(k))$ ve γ performans parametresidir. Buna göre, araç modeline ait öndeki araç ile güvenli mesafenin korunması için tasarlanan h_{acc} bariyer fonksiyonu **Denklem (10)** ile tanımlanmaktadır.

$$h_{acc}(\zeta) = d_s - d_a \quad (10a)$$

$$d_s = v_{ego} \cdot T_s + d_{min} \quad (10b)$$

$$\Delta h_{acc} \geq -\gamma_{acc} h_{acc} \quad (10c)$$

burada, d_a gerçek zamanlı mesafe ölçümünü, d_s ise **Denklem (10b)** ile hesaplanan güvenli mesafeyi temsil etmektedir. **Denklem (10b)**'deki v_{ego} öndeki aracın hızını, d_{min} ise önceden tanımlanan minimum mesafeyi ifade etmektedir. Bu doğrultuda güvenli mesafenin kontrolü **Denklem (10c)** ile garanti altına alınmaktadır.

Otonom araca ait güvenli şerit takibinin sağlanması için tasarlanan kontrol bariyer fonksiyonu h_{LK} **Denklem (11)**'de verilmektedir.

$$h_{LK}(\zeta) = \frac{w_l}{2} - |e_{lat}| \quad (11a)$$

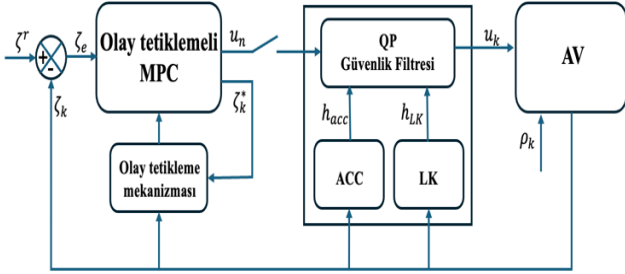
$$e_{lat} = y_v - y_{lc} \quad (11b)$$

$$\Delta h_{LK} \geq -\gamma_{LK} h_{LK} \quad (11c)$$

burada w_l şerit genişliğini, y_v araca ait y eksen pozisyonunu ve y_{lc} şeride ait orta noktanın pozisyonunu ifade etmektedir. Son olarak **Denklem (11c)** ile şerit takibinin sağlanması garanti altına alınmaktadır.

2.3. Kontrolcü tasarımı

Bu bölüm, [Denklem \(1\)](#)'deki otonom araç modeline ait uyarlamalı hız kontrolü ve güvenli şerit takibi için tasarlanan olay-tetiklemeli MPC'yi ve hesaplama yükünü azaltmaya yönelik tetikleme mekanizmasını tanıtmaktadır. Önerilen kontrol mimarisinin genel yapısı [Şekil 2](#)'de özetlenmiştir.



Şekil 2. Olay-tetiklemeli MPC ve QP-tabanlı güvenlik filtresiyle ACC-LK kontrol yapısı

2.3.1. Olay tetiklemeli MPC yaklaşımı

Bu çalışmada hesaplama yükü, optimal kontrol problemini yalnızca tetikleme anlarında çözülmesi, yani çözüm frekansının düşürülmesi ile azaltılmaktadır. Buna göre $k = k_i$ anında çözülen ve bir sonraki k_{i+1} tetiklenme anına kadar geçerli olarak tanımlanan optimal kontrol problemi [Denklem \(12-15\)](#) ile sunulmaktadır.

$$\min_{u_{k_i}} \left(V(\zeta(k_i + N|k_i)) + \sum_{j=0}^{N-1} \ell(\zeta(k_i + j|k_i), u(k_i + j|k_i)) \right) \quad (12)$$

$$s.t \quad \zeta(k_i + j + 1|k_i) = f(\zeta(k_i + j|k_i), u(k_i + j|k_i)) \quad (13)$$

$$\zeta(k_i + j|k_i) \in X, \quad u(k_i + j|k_i) \in U \quad (14)$$

$$\zeta(k_i + N|k_i) \in X_f \subset X \quad (15)$$

burada X, U sırasıyla durum değişkenleri ve kontrol sinyalleri için sınır koşullarını ifade ederken, X_f terminal bölgeyi ve N tahmin ufkunu göstermektedir. Anlık maliyet $\ell(k_i) = \zeta_e(k_i)^T Q \zeta_e(k_i) + u(k_i)^T R u(k_i)$ ile tanımlanırken, ζ_e durum değişkenleri ve referans arasındaki hatayı belirtmektedir, $V(k_N) = \zeta_e(k_N)^T P \zeta_e(k_N)$ ise terminal maliyeti ifade etmektedir. Ağırlık matrisleri Q, R, P uygun boyutlarda seçilir ve sistemin performansı ile kararlılık gereksinimlerine göre belirlenir. Denklem içerisindeki $\zeta(k_i + j|k_i)$, k_i ve k_{i+1} tetiklenme aralığında $j \in N - 1$ adım sonrasına kadar $f(\cdot)$ araç modeli kullanılarak tahmin edilen durum değişken matrisini göstermektedir. Ayrıca j adım içerisinde optimal kontrol problemi çözülmezse, durum değişkenlerinin N indisinde terminal alana girmesi [Denklem \(15\)](#) ile sağlanmaktadır.

Optimal kontrol problemi için bir sonraki çözüm anının $k_{i+1} = k_i + j$ belirlenmesi ve çözüm frekansının düşürülmesi tasarlanan olay tetikleme mekanizması ile sağlanmaktadır. Buradaki amaç elde edilen optimum kontrol sinyallerini sırasıyla uygularken, anlık olarak ölçülen durum değişkenleri $\zeta(k_i + j|k_i)$ ile optimum durum değişkenleri $\zeta^*(k_i + j|k_i)$ arasındaki sapmayı takip etmek ve bu sapmaların belirlenen eşik değeri geçmesi durumunda optimal kontrol problemini tekrar çözmektir. Bu sapmalar model eşitsizliklerinden ve sistemdeki gürültülerden dolayı ortaya çıkabilmektedir, buna göre k_{i+1} anı [Denklem \(16\)](#) ile belirlenmektedir [\[23\]](#).

$$k_{i+1} = \sup_j \{ \|\zeta(k_i + j|k_i) - \zeta^*(k_i + j|k_i)\| < \xi \} \quad (16)$$

burada ξ tetiklenme mekanizmasına ait eşik değerini ifade etmektedir. Amaç, araç modelinde ölçülen durum vektörü ile optimal öngörü arasındaki farkı dikkate alarak sistem performansını mümkün olduğunca korumak ve hesaplama yükünü azaltmaktır. Bu doğrultuda ξ eşik değerinin belirlenmesine temel oluşturan j adımlık optimal kontrol problem çözümü [Denklem \(17\)](#)'de tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} & \|\zeta(k_i + j|k_i) - \zeta^*(k_i + j|k_i)\| = \\ & \left\| \zeta(k_i) + \sum_{m=0}^{j-1} T_s f(\zeta(k_i + m), u^*(k_i + m)) \right. \\ & \quad \left. + \omega(k_i + m) - \zeta^*(k_i) - \sum_{m=0}^{j-1} T_s f(\zeta^*(k_i + m), u^*(k_i + m)) \right\| \end{aligned} \quad (17)$$

Buradaki denklem için $\zeta(k_i) = \zeta^*(k_i)$ eşitliği ve Lipschitz süreklilik koşulu L_ζ kullanıldığında [\[23, 24\]](#), [Denklem \(18\)](#) elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} & \|\zeta(k_i + j|k_i) - \zeta^*(k_i + j|k_i)\| \\ & = L_\zeta T_s \sum_{m=0}^{j-1} \|\zeta(k_i + m|k_i) - \zeta^*(k_i + m|k_i)\| + j\rho \end{aligned} \quad (18)$$

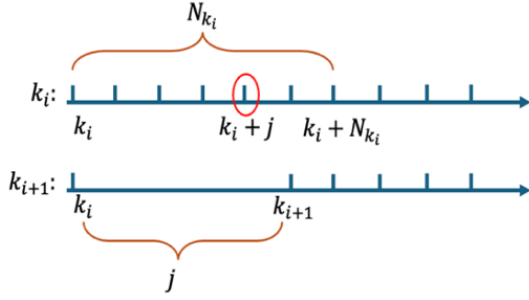
burada, ρ sistem içerisinde bulunan gürültüye ait üst sınırı göstermektedir. [Denklem \(18\)](#) için [\[23\]](#)'de detayları yer alan Gronwall-Bellman-Ou-Iang-type eşitsizliğinden yararlanılarak elde edilen eşik değeri [Denklem \(19\)](#)'da verilmektedir.

$$\|\zeta(k_i + j|k_i) - \zeta^*(k_i + j|k_i)\| < j\rho e^{L_\zeta T_s(j-1)} \quad (19)$$

[Denklem \(19\)](#)'da yer alan j indisi yerine sabit bir alt tetiklenme indisi kullanılarak [Denklem \(20\)](#) elde edilmektedir.

$$\|\zeta(k_i + j|k_i) - \zeta^*(k_i + j|k_i)\| < j_{min} \rho e^{L_\zeta T_s(j_{min}-1)} \quad (20)$$

burada j_{min} tetiklenme indisine ait en alt sınırı belirtmekte olup $j_{min} \leq j \leq N$ ilişkisi ile açıklanmaktadır. Seçilen j_{min} değeri sistemin performans ve hesaplama yükü arasında denge kurulmasını sağlamaktadır. Bunlara ek olarak sisteme ait ölçülen durum değişkenleri ile optimumum durum değişkenlerinin arasındaki fark $\xi = j_{min} \rho e^{L\zeta T_s(j_{min}-1)}$ eşik değerini aşması durumunda optimal kontrol probleminin tekrar çözülmesi sağlanmaktadır. k_i , k_{i+1} , j , ve N arasındaki bağlantı Şekil 3'te açıklanmaktadır.



Şekil 3. k_i , k_{i+1} , j , ve N arasındaki ilişki

2.3.2. QP tabanlı güvenlik-kritik problem tanımı

Bu bölüm, olay tetikleme gerçekleştiğinde optimal kontrol problemi (12-15) çözümü ile elde edilen optimum kontrol sinyalinin (u_n) güvenlik filtresinden geçirilmesini ele almaktadır ve QP tabanlı CLF-CBF güvenlik filtresi Denklem (21-25) ile verilmektedir.

$$\min_{u_k, \delta_{acc}, \delta_{LK}, \delta_V} \frac{1}{2} (u_k - u_n)^T \begin{bmatrix} W_v & 0 \\ 0 & W_w \end{bmatrix} (u_k - u_n) + w_{\delta_V} \delta_V^2 + w_{\delta_{acc}} \delta_{acc}^2 + w_{\delta_{LK}} \delta_{LK}^2 \quad (21)$$

$$s.t. \Delta h_{acc}(\zeta(k), u_k) \geq -\gamma_{acc} h_{acc}(\zeta(k)) - \delta_{acc} \quad (22)$$

$$\Delta h_{LK}(\zeta(k), u_k) \geq -\gamma_{LK} h_{LK}(\zeta(k)) - \delta_{LK} \quad (23)$$

$$\Delta V(\zeta(k), u_k) \geq -\gamma_V V(\zeta(k)) - \delta_V \quad (24)$$

$$u_k \in U, u_{k+1} - u_k \in \Delta U \quad (25)$$

Denklem (21)'deki kontrol sinyali, W_v ve W_w pozitif ağırlık matrisleri ile ağırlıklandırılmakta ve δ_{acc} , δ_{LK} , $\delta_V > 0$ yumuşatma değişkenlerini göstermektedir. Burada amaç QP filtresinin sürekli olarak sonuç üretebilir formda olmasını sağlamaktır. Kısıt (21-22) sırasıyla öndeki araç ile güvenli mesafenin korunmasını ve şerit takibinin yapılmasını sağlamaktadır. Denklem (24)'teki eşitsizlik CLF kısıtını içermekte olup $\Delta V(\zeta(k), u_k) = V(\zeta(k+1)) - V(\zeta(k))$ şeklinde hesaplanmaktadır. Ayrıca Lyapunov fonksiyonu $V(\zeta(k))$ ise $\zeta(k)^T P \zeta(k)$ olarak seçilmektedir ve QP güvenlik filtresinin kararlı kalmasında kullanılmaktadır [25].

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, önerilen kontrol yönteminin etkinliğini araştırmak amacıyla CARLA simülör ortamında bir otonom araç için uyarlamalı hız kontrolü ve şerit takibi problemleri ele alınmıştır. Bu amaçla üç farklı uygulama gerçekleştirilmiştir:

(1) Sürekli tetiklemeli ve olay tetiklemeli kontrolcülerin kontrol performansının karşılaştırılması

(2) CBF parametrelerinin, γ_{acc} , γ_{LK} , güvenli mesafe koruma ve şerit takip performansına etkisinin analiz edilmesi

(3) Olay tetikleme mekanizmasında yer alan j_{min} tetiklenme alt indis parametresinin eşik değerine, kontrol ve hesaplama yüküne etkisinin analiz edilmesi

Tanımlanan kontrol yaklaşımına ait mimari Algoritma 1 ile sunulmaktadır. Algoritma içerisinde Satır 1-2 sırasıyla simülasyon parametrelerini, kontrolcü parametrelerini, araç model parametrelerini, güvenlik filtresine ait bariyer fonksiyonu ve tetiklenme mekanizmasına ait parametreleri girdi olarak tanımlamaktadır. Satır 4 ölçüm ile optimal kontrol problemi çözümüne ait hatanın takibini, simülasyon başlangıç koşulunu ve tahmin ufku takibini gerçekleştirmektedir. Bu koşullara bağlı olarak Satır 5 ile problem çözülmekte ve elde edilen optimum kontrol sinyali ve durum değişken vektörü kaydedilmektedir. Satır 9-10'da, optimum kontrol sinyali sırasıyla Denklem (22-24)'te yer alan CBF ve CLF filtrelerinden geçirilerek gerçek zamanlı olarak sisteme uygulanmakta ve araca ait durum değişkenleri ölçülmektedir. Son olarak Satır 11 ile bu sürecin belirlenen süre boyunca devam etmesi sağlanmaktadır.

Algoritma 1: Carla simülöründe otonom araç modelinin güvenlik-kritik olay tetiklemeli MPC yaklaşımı ile şerit takibi ve uyarlanabilir hız kontrolü.

```

1  Girdiler:  $T_s, N, Q, R, P, X, U, \rho$ 
   Araç model (1) parametreleri  $m, I, L_{xr}, L_{xf}, \mu, C_f, C_r$ 
   CBF  $\gamma_{acc}, \gamma_{LK}$ , Tetiklenme mekanizması  $L_\zeta, j_{min}$ 

2  Eşitle:  $\zeta(k_i) \leftarrow 0, \zeta^*(k_i) \leftarrow 0$ 

3  while adım  $i < \text{simülasyon zamanı}$  do

4      if  $\|\zeta(k_i + j) - \zeta^*(k_i + j)\| \geq \xi$  or  $i = 0$  or  $j \geq N - 1$ 

5           $\zeta^*(k_i), u^*(k_i) \leftarrow \text{problem (11) çöz}$ 

6           $u_n \leftarrow u^*(k_i)$ 

7           $j \leftarrow 0$ 

8      end if

9      QP-güvenlik filtresi (21) çöz

10      $u_k \leftarrow u_n(k_i + j)$ 

11     Araç modeline  $u_k$  uygula ve  $\zeta(k_i + j)$  ölçümünü yap

12      $i \leftarrow i + 1, j \leftarrow j + 1$ 

13 end while

```

2.4. CARLA simülör ortamı

Gerçek zamanlı bir otonom sürüş simülörüne olan CARLA [26], çoklu araç ve trafik simülasyon desteği sunmaktadır. Bu sebeple, simülasyon ortam koşulları hava durumuna (güneş, yağmur, bulutlu ve sisli), yol durumuna ve trafik yoğunluğuna göre belirlenebilmektedir. Test çalışmaları Town10 haritasında yapılmıştır ve fiziksel parametreleri Tablo 1'de verilen Lincoln MKZ modeli araç kullanılmıştır. Ayrıca, araç modeline ait lastik parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. CARLA'daki araç modeline ait parametreler

Araç fiziksel parametreleri	Değeri
Araç Kütle m	1715 kg
Atalet Momenti I	2800 kg·m ²
Dingil Mesafesi L_x	3.0 m
Ön Dingil Mesafesi L_{xf}	1.35 m
Arka Dingil Mesafesi L_{xr}	1.65 m
Araç Genişliği	1.86 m
Araç Uzunluğu	4.93 m
Araç Yüksekliği	1.47 m
Maksimum Dönüş Açısı u_i	$\pm 30^\circ$ ($\pm \pi/6$ rad)

Gerçek zamanlı simülasyondaki kontrolöre ait parametreler Tablo 3'te verilmiştir. Burada örnekleme zamanı T_s , araç dinamiklerini yeterli doğrulukta yakalayabilecek şekilde seçilirken, tahmin ufkü N ise sistem performansı ve gerçek zamanlı hesaplama yükü dikkate alınarak belirlenmiştir. Durum değişkenleri ve girişler üzerindeki fiziksel kısıtların sınırlarını gösteren X, U parametreleri CARLA simülatöründe bulunan araç modeline bağlı olarak seçilmiştir. MPC'ye ait parametreler Q, R, P ise sistemin kararlılığını ve takip doğruluğunu gözeterek, dengeleyici bir performans elde edecek şekilde deneysel olarak ayarlanmıştır.

Tablo 2. CARLA içerisindeki araç modeline ait lastik parametreleri

Araç lastik parametreleri	Değeri
Lastik Tipi	Radyal lastik
Ön Lastik Köşe Sertliği C_f	95,000 N/rad
Arka Lastik Köşe Sertliği C_r	140,000 N/rad
Maksimum Kayma Açısı α_i	$\pm 15^\circ$ (± 0.262 rad)
Sürtünme Katsayısı μ	0.8
Yerçekimi İvmesi g	9.81 m/s ²
Lastik Basıncı	2.2 bar (32 psi)

Tablo 3. Güvenlik-kritik olay tetiklemeli MPC yaklaşımına ait simülasyon parametreleri

Simülasyon parametreleri	Değeri
T_s	0.1 s
N	15
Q	[2, 2, 0.1, 0.5, 0.5, 0.3]
R	[0.1, 0.05]
P	[10, 10, 1, 2, 2, 1]
X	[200, 200, 2π , 30, 30, 3]
U	$\left[\pm 3000, \pm \frac{\pi}{6}\right]$
ΔU	$\left[\pm 800, \pm \frac{\pi}{12}\right]$
ρ	0.5

Benzetim sonuçlarının değerlendirilmesi aşamasında kontrol performansı Denklem (26)'daki gibi Ortalama

Karesel Hata (OKH) metriğinden faydalanılarak hesaplanmıştır.

$$OKH = \frac{1}{T_{sim}} \sum_{i=0}^{T_{sim}} \|\zeta(k_i) - \zeta_i^r\| \quad (26)$$

Burada, $\zeta(k_i)$ ve ζ_i^r sırasıyla aracın durum değişken vektörünü ve referans sinyali tanımlarken, T_{sim} toplam simülasyon süresini göstermektedir.

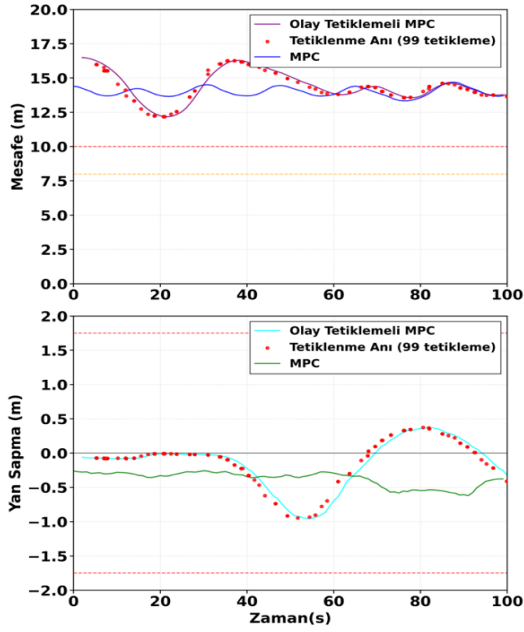
2.5. Benzetim sonuçları

Önerilen kontrol yönteminin otonom aracın güvenli mesafe ve şerit takibi kontrolündeki performansını ölçmek için CARLA gerçek zamanlı simülatöründe yapılan üç uygulamanın sonuçları bu bölümde sunulmaktadır.

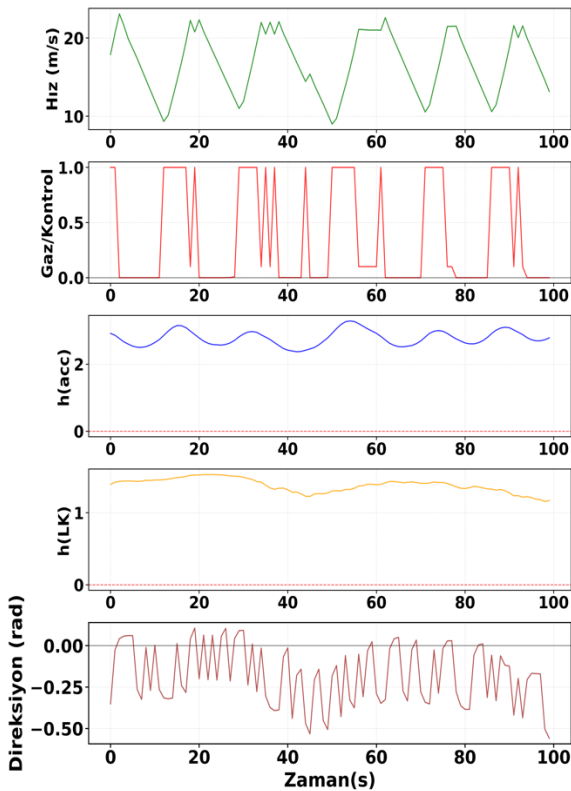
Uygulama (1): Olay tetiklemeli MPC ile sürekli zamanlı klasik MPC yaklaşımlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. İki yöntem de güvenlik-kritik MPC'dir. Şekil 4 her iki yönteme ait güvenli mesafe ve şerit takibi korunumunu göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi uyarlamalı hız kontrolü için öndeki araçla olması gereken mesafe (10m) korunmuş ve şerit takibi ($\pm 1.75m$) güvenli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Grafiklerden her iki yöntemin de benzer kontrol performansı ürettiği görülmektedir. Olay tetiklemeli ve sürekli zamanda MPC yaklaşımları için OKH değerleri karşılaştırıldığında ise önerilen yöntemin sadece %1.78 performans kaybı yaşadığı hesaplanmıştır. Ancak tetiklenme sayıları karşılaştırıldığında sürekli zamanda MPC, 0.1 s örnekleme zamanı ve toplam 100 s simülasyon süresi boyunca 200 kez tetiklenirken önerilen olay-tetiklemeli MPC şekil içerisinde de kırmızı noktalar ile işaretlendiği üzere 99 kez tetiklenmiş olup sayısal sonuçlar Tablo 4'te sunulmaktadır. Buna göre önerilen yöntemin yaklaşık olarak hesaplama yükünü %50.5 azalttığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu sonuca göre önerilen yöntemin gerçek zamanlı uygulamalarda büyük bir avantaj sağlayacağı açık olup, özellikle hesaplama maliyetinde ve sistem performans kriterinde önemli bir rolü olan tahmin ufkü seçiminde esneklik sağlamaktadır. Aynı uygulama için Şekil 5'te güvenlik-kritik olay tetiklemeli MPC yaklaşımına ait kontrol sinyalleri ve durum değişkenlerine yer verilmiştir. Bunlara ek olarak güvenli mesafe ve şerit takibi için tanımlanan CBF değerleri de şekilde sunulmakta olup güvenli bölge kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Simülasyon süresince hem güvenli mesafenin hem de şerit takip değerlerinin sürekli olarak güvenli küme içerisinde yer aldığı çıkarımı yapılmaktadır.

Tablo 4. Olay tetiklemeli MPC ve sürekli zamanda MPC için kontrol performans karşılaştırması

Yöntem	Tetiklenme Sayısı	Şerit takip hatası (OKH)	Mesafe takip hatası (OKH)
Sürekli zamanda MPC	200	0.16	15.87
Olay tetiklemeli MPC	99	0.17	16.16



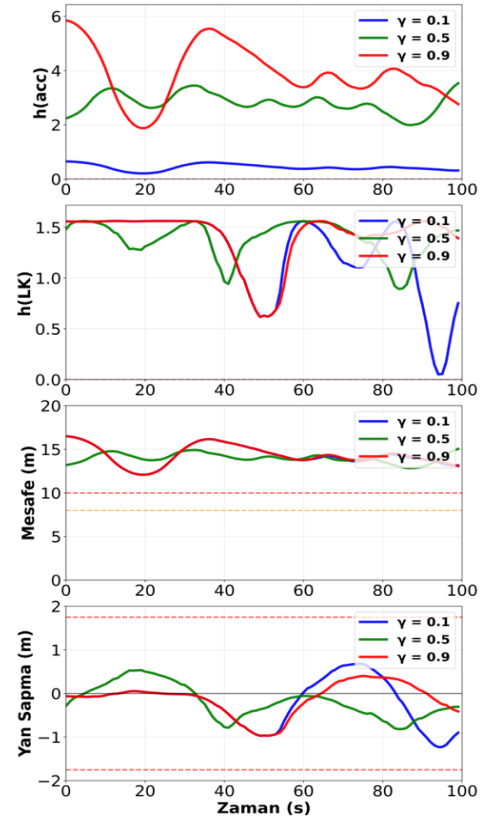
Şekil 4. Olay tetiklemeli MPC ve sürekli zamanda MPC için güvenli mesafe ve şerit takip performans karşılaştırması



Şekil 5. Olay tetiklemeli MPC durum değişken performansları

Şekil 5'te kontrol sinyalleri incelendiğinde, ani değişimlerin eklenen kısıtlar (25) ile önlenerek sürüş konforunun istenilen ölçülerde sağlandığı görülmektedir. Bu sonuç araçta gaz/fren dengesinin korunduğu, sert manevraların önlenildiği anlamına gelmektedir.

Uygulama (2): İkinci uygulamada ise CBF performans parametreleri γ_{acc} , γ_{LK} değerlerinin model güvenliği ve performansa etkileri analiz edilmektedir. Bu amaçla Denklem (22)'de kullanılan γ_{acc} değeri sırasıyla 0.1, 0.5 ve 0.9 seçilerek testler yapılmıştır. Şekil 6'da görüldüğü üzere γ_{acc} arttırıldığında h_{acc} fonksiyonu güvenli mesafeye çok daha yaklaşmakta, γ_{acc} azaltıldığında ise güvenli mesafenin daha esnek bir şekilde korunduğu gözlemlenmektedir. Benzer bir test şerit takip performansı üzerine yapılmıştır. Bu amaçla Denklem (23) içerisinde kullanılan γ_{LK} parametresi sırasıyla 0.1, 0.5 ve 0.9 değerleri seçilerek simülasyon sonuçları alınmıştır. Sonuçlara göre, yine yüksek γ_{LK} değeri için şerit sınırlarına yaklaşma çok daha fazla olmaktadır. Benzer şekilde γ_{LK} değerinin düşük değerleri için h_{LK} fonksiyonunun daha esnek cevap ürettiği gözlenmektedir. Şekil 6'da γ_{acc} ve γ_{LK} parametrelerinin uygun aralıktaki değerleri için sistem güvenliği ve kararlılığının sürdürüldüğü araca ait mesafe ve şerit takip performansı sonuçlarında görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda, γ_{acc} ve γ_{LK} parametrelerinin, sistemin güvenlik sınırına ne kadar yakın çalışmasının istendiğine bağlı olarak seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. Değişken γ_{acc} ve γ_{LK} parametrelerine ait güvenli mesafe ve şerit takip performansı

Uygulama (3): Son uygulamada ise olay tetikleme mekanizmasında kullanılan alt tetiklenme indisi j_{min} değerinin hesaplama yüküne ve kontrol performansına etkisi analiz edilmektedir. Simülasyon çalışmasında, önerilen yöntemin gürbüzlüğüne ele almak amacıyla önceki uygulamalara ek olarak farklı araç modelleri ve parametrik

değişiklikler de değerlendirilmiştir. Bu kapsamda Lincoln MKZ araç modeline ek olarak Mini Cooper ve Nissan Patrol SUV araç modelleri kullanılmıştır. Farklı araç modelleri için alt tetiklenme indisi seçimine bağlı simülasyon sonuçlarına ait performans değerleri Tablo 5'te sunulmaktadır.

Tablo 5. Alt tetiklenme indisi j_{min} değerinin kontrol performansına etkisi

Araç tipi	j_{min}	Tetiklenme Sayısı	Şerit takip hatası (OKH)	Mesafe takip hatası (OKH)
Lincoln MKZ	2	142	0.11	16.99
	3	123	0.17	16.17
	4	116	0.18	16.40
Mini Cooper	2	143	0.17	16.16
	3	124	0.17	17.27
	4	116	0.22	16.11
Nissan Patrol	2	142	0.17	17.51
	3	122	0.23	23.39
	4	116	0.20	20.38

Burada seçilen j_{min} değeri artırıldıkça Denklem (20) ile tanımlanan eşik değeri artmakta ve tetiklenme sayısı bu doğrultuda azalmaktadır. Buna ek olarak tetiklenme sayısının azalması ise önerilen yöntemde yaklaşık olarak %39 performans kaybına neden olurken, hesaplama yükünü yaklaşık olarak %18 düşürmektedir. Bu doğrultuda j_{min} değerinin kontrol performansı ve hesaplama yükündeki dengenin gözetilerek seçilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır. Buna ek olarak, farklı araç modelleri ile yapılan testlerde önerilen yaklaşımın tetiklenme sayısı ile şerit ve mesafe takip performansları açısından benzer sonuçlar ürettiği, OKH metriğine bağlı olarak gözlenmiştir. Bu sonuçlar, önerilen yöntemin model içerisindeki parametrik değişiklikler altında da gürbüzlüğünü koruduğunu ortaya koymaktadır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada bir otonom aracın güvenli şerit takibi ve uyarlamalı hız kontrolü problemleri ele alınmıştır. Bu amaçla hem fiziksel kısıtları hem de güvenlik kısıtlarını dikkate alan iki aşamalı bir kontrolcü önerilmiştir. İlk aşamada sadece tetiklenme anlarında kontrol sinyalinin güncelleyen bir MPC, ikinci aşamada ise kontrol bariyer fonksiyonlarını ve kararlılık şartlarının bozulmasını önleyen kontrol Lyapunov fonksiyonlarını kısıtlar şeklinde içeren bir karesel programlama yer almaktadır.

Önerilen olay tetiklemeli güvenlik-kritik MPC yönteminin gerçek zamanlı uygulamalardaki etkinliği CARLA simülöründe üç farklı uygulama ile ele alınmıştır. İlk uygulamada olay tetikleme mekanizmasının aynı performans değerlerini %50.5 oranında düşük hesaplama hızıyla sağlayabildiği gözlenmiştir. İkinci uygulamada CBF performans parametrelerinin artırılmasıyla kısıt daha sıkı hale geldiği için güvenliğe verilen önem artarken performanstan ödün verildiği gözlenmiştir. Son uygulamada, olay tetikleme mekanizmasında yer alan alt tetiklenme

indisinin artırılmasının hesaplama yükünü azalttığı gözlenmiştir. Ancak indis değeri, sistemin hedeflediği kontrol performansı ve hesaplama maliyeti arasındaki dengeye göre seçilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Önerilen çalışmada hesaplama yükü ile kontrol performansı arasındaki denge alt indis parametresi üzerinden kurulmuştur. Ancak, farklı sürüş koşulları göz önünde bulundurulduğunda çevrimdışı belirlenen bu değer performansı etkileyebileceği öngörülmektedir. Bu doğrultuda, gelecek çalışmalarda anlık koşullara uyum sağlayabilmek amacıyla tetikleme mekanizmasının çevrimiçi olarak ortam koşullarına uyarlandığı öğrenme-tabanlı yaklaşımlar geliştirilebilir. Bir diğer konu, mevcut yöntemde tetiklenme mekanizmasının yalnızca kontrolör tarafında uygulanması ve kontrol sinyalinin her adımda güvenlik filtresinden geçirilmesidir. Gelecek çalışmalarda, hesaplama maliyetlerini daha da azaltmak için güvenlik kriterlerinin de tetikleme mekanizmasına entegre edilmesi, böylece her adımda güvenlik filtresi çözümüne duyulan ihtiyacın ortadan kaldırılması mümkün olabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] A. D. Ames, J. W. Grizzle and P. Tabuada, Control barrier function based quadratic programs with application to adaptive cruise control. 53rd IEEE conference on decision and control, pp. 6271-6278, Los Angeles, CA, USA, 15-17 December 2014.
- [2] J. Zeng, B. Zhang and K. Sreenath, Safety-critical model predictive control with discrete-time control barrier function. 2021 American Control Conference (ACC), pp. 3882-3889, New Orleans, LA, USA, 25-28 May 2021.
- [3] S. Brüggemann, D. Steeves and M. Krstic, Simultaneous lane-keeping and obstacle avoidance by combining model predictive control and control barrier functions. 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC), pp. 5285-5290, Cancun, Mexico, 10 January 2023.
- [4] U. Dursun, F. Yıldız Taşçıkaraoğlu, and İ. Üstoğlu, An algebraic and suboptimal solution of constrained model predictive control via tangent hyperbolic function. Asian Journal of Control, 23(5), 2420-2430, 2021. <https://doi.org/10.1002/asjc.2357>.
- [5] H. Li and Y. Shi, Event-triggered robust model predictive control of continuous-time nonlinear systems. Automatica, 50(5), 1507-1513, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.03.015>.
- [6] K. E. Årzen, A simple event-based PID controller. IFAC Proceedings Volumes, 32(2), 8687-8692, 1999. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)57482-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)57482-0).
- [7] A. Eqtami, D. V. Dimarogonas and K. J. Kyriakopoulos, Event-triggered control for discrete-time systems. Proceedings of the 2010 American Control Conference, pp. 4719-4724, Baltimore, MD, USA, 29 July 2010.

- [8] F. D. Brunner, M. Heemels, and F. Allgöwer, Robust self-triggered MPC for constrained linear systems: A tube-based approach. *Automatica*, 72, 73-83, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.05.004>.
- [9] C. Liu, H. Li, Y. Shi, and D. Xu. Codesign of event trigger and feedback policy in robust model predictive control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 65(1), 302-309, 2019. <https://doi.org/10.1109/TAC.2019.2917378>.
- [10] Z. Sun, L. Dai, K. Liu, D. V. Dimarogonas, and Y. Xia. Robust self-triggered MPC with adaptive prediction horizon for perturbed nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 64(11), 4780-4787, 2019. <https://doi.org/10.1109/TAC.2019.2899434>.
- [11] L. Deng, Z. Shu, and T. Chen, Event-triggered robust model predictive control with stochastic event verification. *Automatica*, 146, 110638, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2022.110638>.
- [12] J. Wang, J. Sun, J. Yang, and S. Li, Periodic event-triggered model predictive control for networked nonlinear uncertain systems with disturbances. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 54(12), 7501 – 7513, 2024. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2024.3472284>.
- [13] Z. Sun, L. Dai, K. Liu, D. V. Dimarogonas and Y. Xia, Robust self-triggered MPC with adaptive prediction horizon for perturbed nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 64(11), 4780–4787, 2019. <https://doi.org/10.1109/TAC.2019.2905223>.
- [14] N. He and D. Shi, Event-based robust sampled-data model predictive control: A non-monotonic Lyapunov function approach. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 62(10), 2555–2564, 2015. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2015.2468997>.
- [15] K. Hashimoto, S. Adachi, and D. V. Dimarogonas, Event-triggered intermittent sampling for nonlinear model predictive control. *Automatica*, 81, 148–155, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2017.03.028>.
- [16] Z. Sun, Y. Xia, L. Dai, and P. Campoy, Tracking of unicycle robots using event-based MPC with adaptive prediction horizon. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(2), 739–749, 2020. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2962099>.
- [17] Z. Zhou, C. Rother, and J. Chen, Event-triggered model predictive control for autonomous vehicle path tracking: Validation using CARLA simulator. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(6), 3547–3555, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3266941>.
- [18] B. Lindqvist, S. S. Mansouri, A. A. Agha-Mohammadi and G. Nikolakopoulos, Nonlinear MPC for collision avoidance and control of UAVs with dynamic obstacles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 6001–6008, 2020. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3010730>.
- [19] R. Zhao, K. Wang, W. Che, Y. Li, Y. Fan, and F. Gao, Adaptive cruise control based on safe deep reinforcement learning. *Sensors*, 24(8), 2657, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24082657>.
- [20] J. Liu, Y. Cui, J. Duan, Z. Jiang, Z. Pan, K. Xu, and H. Li, Reinforcement learning-based high-speed path following control for autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(6), 7603-7615, 2024. <https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3352543>.
- [21] S. Pachpol, C. C. Vignesh, J. G. Jeslin, B. P. Kumar, C. Viswanathan, and C. Srinivasan, Enhanced Lane Keeping Assistance through IoT Sensor Fusion and Deep Learning. 2024 IEEE Second International Conference on Intelligent Cyber Physical Systems and Internet of Things, pp. 419-424, India, 28-30 Aug 2024.
- [22] M. Liu, D. Wu, Y. Gao and L. Gao, Safety-Critical Model Predictive Control with Self-Triggered Mechanism for Obstacle Avoidance, 2023 China Automation Congress (CAC), pp. 1823-1828, Chongqing, China, 2023.
- [23] Z. Sun, Y. Xia, L. Dai, and P. Campoy, Tracking of unicycle robots using event-based MPC with adaptive prediction horizon. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(2), 739-749, 2019. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2962099>.
- [24] W. Peng-Biao, X. Ren, and D. Zheng, Robust nonlinear MPC with variable prediction horizon: An adaptive event-triggered approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 68(6), 3806-3813, 2022. <https://doi.org/10.1109/TAC.2022.3200967>.
- [25] M. N. Nguyen, M. Van, S. McIlvanna, Y. Sun, J. Close, K. Olayemi, and Y. Jin. Model-free safety critical model predictive control for mobile robot in dynamic environments. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 59(11), 6830 – 6842, 2024. <https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3389111>.
- [26] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez, and V. Koltun. CARLA: An open urban driving simulator. *Conference on robot learning*, pp. 1-16, PMLR, 2017.

