

Otonom Araçlarda Hareket Planlaması

Ahmet Kemal Nennioğlu^{*1}, Tahsin Köroğlu¹

¹*Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği, Adana*

Geliş Tarihi: 27.11.2018

Kabul Tarihi:26.12.2018

Özet

Son yıllarda, otomotiv teknolojisinde insan müdahalesi olmadan yolculuk gerçekleştirebilen otonom araçlar, akıllı sistemler ışığında gelinen son nokta olup kontrollü çevrelerde neredeyse tüm görevleri başarıyla yerine getirebilmektedir. Otonom araçlarda mevcut yol ve trafik durumu iletişim sistemleri ve sensörler aracılığıyla modellenmekte ve çeşitli tekniklerle aracın hareketi tasarlanmaktadır. Algılama ve kontrol aşamaları arasında bağlantı kuran hareket planlaması, son yıllarda üzerine çalışılan önemli bir araştırma alanı olmuştur. Bu alanda, taşıtın izleyeceği yolu belirleme görevini yerine getiren yörünge planlaması büyük aşama kaydedilen konulardan biri olarak dikkat çekmektedir. Bu makalede, literatürde yer alan hareket planlama teknikleri ve algoritmaları sınıflandırılarak tanımlamaları ve uygulama örnekleri detaylı olarak sunulmuştur. Literatürde yer alan çalışmalar incelenerek teknolojinin bugünkü durumu, boşlukları, ihtiyaçları ve gelecekteki odak noktaları belirtilmiştir. Bununla birlikte güvenlik, konfor ve enerji tasarrufu gibi konular göz önünde bulundurularak, hareketli ve belirsiz çevrelerdeki aracın manevra kabiliyeti konusunda da araştırmalar yapılmasına ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı ulaşım sistemleri, Otomotiv mühendisliği, Otonom araçlar.

Motion Planning for Autonomous Vehicles

Abstract

In recent years, autonomous vehicles which are capable of travelling without human intervention are the last point reached in the light of intelligent systems and can perform almost all tasks successfully in controlled environments. Road and traffic situation in autonomous vehicles are modelled with the help of communication systems and sensors, then the motion of the vehicle is designed by implementing various techniques and algorithms. Being the link between perception and control stages, motion planning has become an interesting research field. In this field, trajectory planning, which fulfills the task of determining the route to be followed by the vehicle, is the topic in which a great progress has been made. In this paper, the descriptions and applications of the motion planning techniques and algorithms are presented in detail by classifying according to the literature. The current status, the gaps, the needs and future focus of the technology are pointed out by examining previous studies. In addition to these, it is emphasized that further researches on the subject of maneuverability in uncertain and dynamic environments should be carried out by considering the issues such as safety, comfort and energy saving.

Keywords: Intelligent transportation systems, Automotive engineering, Autonomous vehicles.

^{*}Sorumlu yazar (Corresponding author): Ahmet Kemal Nennioğlu, aknennioğlu@adanabtu.edu.tr
Artibilim:Adana BTU Fen Bilimleri Dergisi

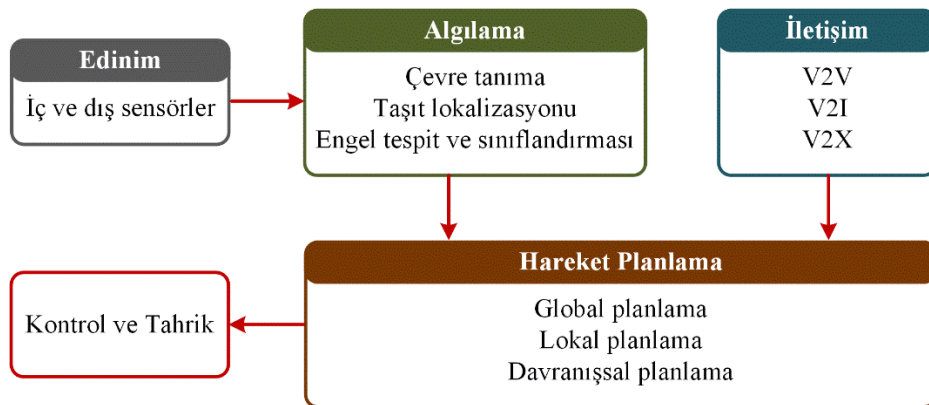
1. Giriş

Gündelik hayatın birçok alanında hızla yer edinen akıllı sistemler, otomotiv sektörünün yüzyılı aşan tarihinde son yılların en çok ilgi çeken araştırma konularından birisi olmuştur. Bu sistemlerin ışığında geliştirilen akıllı park etme, hız ve şerit kontrolü, acil fren sistemi gibi teknolojiler taşıtlarda yerini almıştır [1]. Bu gelişmelerin son noktası olan sürücüsüz (otonom) araçlar birçok kuruluş tarafından incelenmekte ve hızla kullanılabilir hale gelmektedir.

İstenilen iki nokta arasındaki yolculuğu insan müdahalesi olmadan gerçekleştiren sürücüsüz araçlar güvenlik, konfor ve enerji tasarrufu gibi konularda birçok katkı sağlamaktadır [2]. Otomotiv mühendisleri topluluğu (Society of Automotive Engineering - SAE) taşıt otomasyonunu 6 seviyede değerlendirmekte olup, ilk seviye 0 tamamen sürücü idaresinde olan araçlar olarak, seviye 5 ise tamamen bilgisayar idaresinde hareket eden otonom araçlar olarak ifade edilmektedir [3]. Günümüzde son kullanıcı tarafından kullanılan taşıtlar maksimum 2. veya 3. seviyede olarak sınıflandırılmaktadır.

Sürücüsüz araçların çalışma döngüsü iç ve dış sensörlerden bilgi alınması ile başlamaktadır. Savrulma oranı ve tekerlek hız sensörü gibi iç sensörler aracın iç algısı (proprioepsiyon) hakkında bilgi verirken, radar, lidar, GPS gibi dış sensörler ise aracın dış algısını (eksterospsiyon) karar mekanizmasına iletmektedir [4]. İç sensörler aracın yönelimini (savrulma, sapma vb.) hız ve ivmelenmesini belirlerken, dış sensörler ise dış çevreye göre lokalizasyonunu belirler. Sensörlerden gelen işlenmemiş veri, algılama safhasında yorumlanır ve aracın, yolun ve mevcut engellerin konumu hakkında anlamlı bilgiler oluşturulur [5,6]. Ayrıca, araç diğer taşıtlar (Vehicle to vehicle - V2V), mevcut altyapı (Vehicle to infrastructure - V2I) ve diğer trafik bileşenleri (Vehicle to X - V2X) ile sürekli iletişim halinde olmaktadır [7]. Bu iletişim bilgileri ve algılama safhasından gelen bilgiler kullanılarak akıllı araçlar izlenilecek hareketi planlamaktadır.

Hareket planlaması aşaması literatürde global, lokal ve davranışsal olmak üzere üç sınıfta incelenmektedir [2,8]. Global planlama aracın izleyeceği yolu rota ve görev planlaması açısından inceler, başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki en kısa yolu bulmaya odaklanır. Lokal planlama dönemeçler ve engellerden kaçınma gibi daha küçük çaplı görevleri üstlenir. Son yıllarda bilgi işleme hızının da gelişmesiyle birlikte üzerine daha çok çalışma yapılabilen davranışsal planlama ise anlık oluşan durumlarda araca manevra kabiliyeti gibi yetenekler kazandırmayı hedeflemektedir. Çalışma döngüsündeki son aşama olan kontrol ve tahrik aşamasında ise aracın planlanan şekilde hareket etmesi için gereken şekilde tahrik edilmesi sağlanır. Bütün bu çalışma döngüsü Şekil 1’de görselleştirilmiştir.



Şekil 1. Sürücüsüz araçların genel çalışma döngüsü [2,9,10]

Otonom Araçlarda Hareket Planlaması

Otonom araçlar ve gezgin robotlarda hareket planlaması literatürde çoğunlukla global ve lokal planlama dallarında incelenmiştir. İki nokta arasındaki en kısa yolu seçme işlemi olan global planlama [11], yörünge planlamasının ilk adımı olarak kabul edilmekte; rota üzerindeki belirleyici noktaların seçilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu belirleyici noktalar arasındaki kısa mesafeleri optimize etmekte olan lokal planlama ile yörünge planlaması tamamlanmaktadır. Ancak, aracın çalışması gereken çevrelerin dinamik ve belirsiz olmasıyla kritik hale gelen davranışsal planlama dalında da son yıllarda gelişen sensör ve işlemci teknolojisiyle ilerlemeler kaydedilmiştir [12,13]. Bu planlama çeşitlerinin yaptıkları görevleri gündelik sürücü görevleriyle eşleştirmek gerekirse, global planlama başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki yolu genel hatlarıyla belirleme görevini, lokal planlama kavşaklarda ve dönemeçlerde aracın şeridi gibi mikro görevlerini, davranışsal planlama ise beklenmedik ani araç çıkışı gibi anlık görevleri gerçekleştirmektedir.

Bu makalede, otonom araçların çalışma döngüsündeki hareket planlama safhası üzerine yapılan çalışmalar ve teknikler derlenmiştir. Literatürde geliştirilmiş olan teknikler ve algoritmalar incelenmiş ve kıyaslanmıştır. Son olarak ise bu alanda yapılması planlanan çalışmalar ve otonom araçlardaki hareket planlamasının geleceği hakkında bilgi verilmiştir.

2. Hareket planlama teknikleri

Sürücüsüz araçlar üzerine yapılan çalışmalar alana yapılan kısıtlı yatırım sebebiyle 90'lı yılların başına kadar sınırlı kalmıştır. Shladover ve arkadaşları çalışmalarında literatürde otonom araç tanımını kullanan ilk isimlerden olmuşlardır [14]. Behringer ve arkadaşları görüntü işleme ve yörünge bulma teknikleriyle kontrol edilen bir araç tasarımı önerisinde bulunmuşlardır [15]. Bu ilk çalışmalar sonrası hızla gelişme gösteren alan, tarihi daha önceye dayanan mobil robot üzerine çalışmaların da yardımıyla hızla gelişmiştir. Bu süreçte geliştirilen hareket planlama teknikleri uygulanma şekillerine göre dört sınıfta incelenebilir: Grafik taraması temelli planlayıcılar, örnekleme temelli planlayıcılar, eğri interpolasyonu ve nümerik optimizasyon.

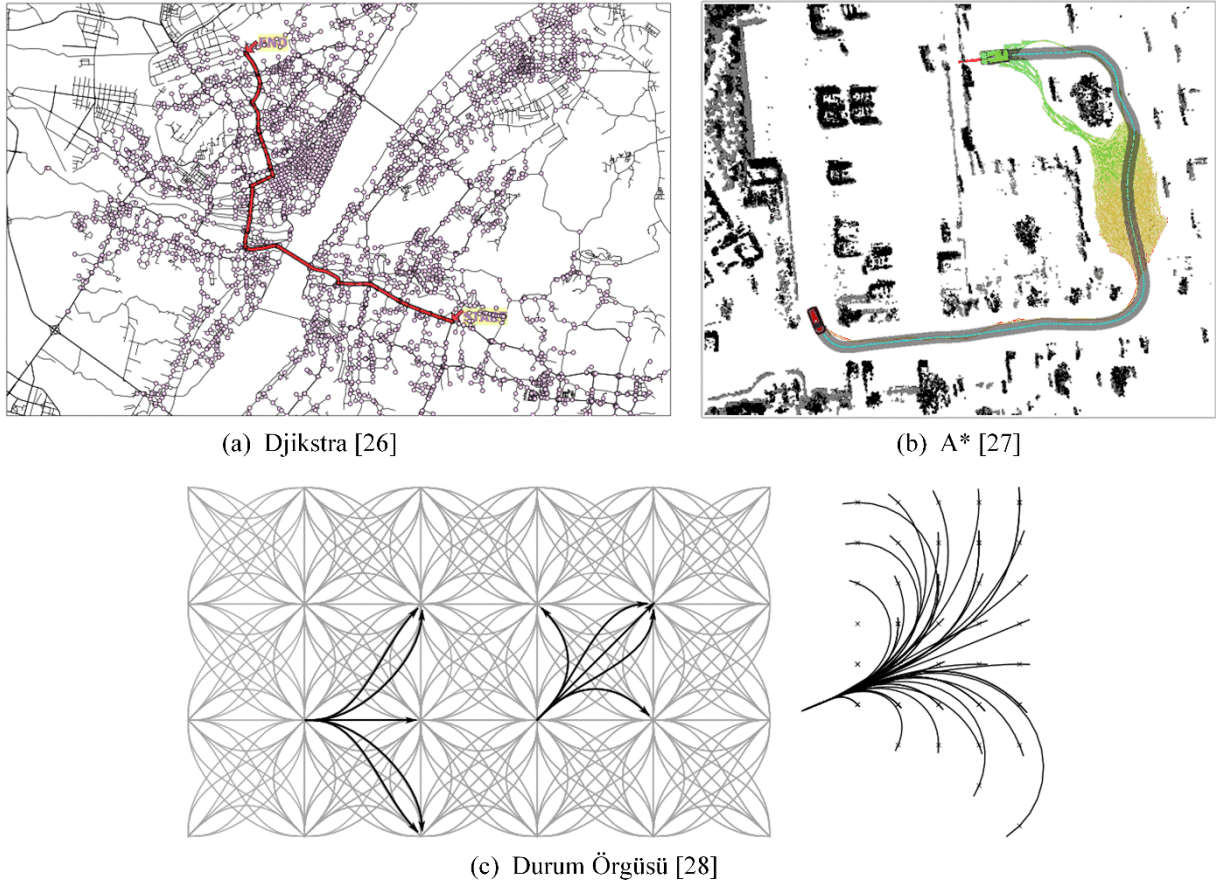
2.1. Grafik taraması temelli planlayıcılar

Otomatik sürüşte temel prensip bir durum uzayını bir noktadan başka bir noktaya yönlendirmektir. Bu durum uzayı aracın çalışacağı çevreyi ve engelleri belirtecek şekilde grafik bir örgü ya da kafes şeklinde temsil edilebilir [2]. Grafik taraması temelli planlayıcılar bu modellenen çevrede en kısa yolu olası durumlardan geçerek belirlemektedir. Literatürde bu konu üzerine aşağıda listelenen algoritmalar geliştirilmiştir.

- **Dijkstra Algoritması:** Bu algoritmada başlangıç noktası ile bitiş noktası arasında çeşitli noktalar düğüm olarak belirlenmektedir. Bu düğümler arasında maliyet ağırlıkları belirlenip, iki nokta arasındaki olası tüm yolların maliyet fonksiyonu hesaplanmaktadır. En küçük maliyet fonksiyonuna sahip yol seçilmektedir [16]. Global planlama için uygun olan Dijkstra algoritmasının literatürde birçok örneği bulunabilir [17,18,19].
- **A-Star Algoritması(A*):** Bu algoritma, Dijkstra algoritmasının sezgisel olarak geliştirilmiş sürümüdür. Her ne kadar diğer bütün sezgisel algoritmalar gibi daha hızlı sonuç vermeyi vaat etse de, Dijkstra algoritması kadar doğru sonuç veremeyebilir [20]. Global olarak sürekli olmayan yörüngeler planlayan A* algoritmasının literatürde örnekleri bulunmaktadır [21,22].
- **Durum Örgüsü (State Lattice) Algoritması:** Bu algoritmada ayırık durumlar ile tasvir edilen bir örgü oluşturulur. Grafik tarama gerçekleştirilecek olan bu örgüye *durum örgüsü (state lattice)* adı verilir [23]. Yukarıdaki algoritmalara benzer şekilde, maliyet fonksiyonu yardımıyla en iyi yol seçilir. Lokal ve davranışsal planlama için uygun olan algoritmanın literatürde örneklerini

bulmak mümkündür [24,25]. Şekil 2c’de Ziegler ve arkadaşlarının, davranışsal planlamaya odaklandıkları çalışmalarında kullandıkları durum örgüleri görülebilir.

Grafik taraması temelli planlayıcılardan ilk ikisi, Dijkstra ve A* algoritması global planlamada rol almakta olup sürekli bir rota planlayamamaktadır. Rotadaki süreksizlik sarsıntı gibi durumlara sebebiyet vererek konforda azalmaya yol açar. Bu durumun üstesinden gelmek için durum örgüsü algoritması veya diğer lokal planlayıcılar kullanılabilir. Grafik taraması temelli planlayıcıların literatürdeki görsel örnekleri Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Grafik tarama temelli planlayıcılar [26-28]

2.2. Örneklemeye temelli planlayıcılar

Determinist yöntemlerin en büyük problemi çok uzun sürelerde sonuç vermesidir. Örneklemeye temelli planlayıcılar bu problemin üstünden gelmek için geliştirilmiştir. Bu yaklaşım çalışma alanında rasgele örnekler alıp bunların maliyet fonksiyonunu ve engeller üzerinden geçip geçmediğini kontrol etmektedir [29]. En çok kullanılan ve araştırılan örnekleri Olasılıksal Yol Haritası (Probabilistic Roadmap Method – PRM) ve Süratle Keşfeden Rasgele Karar Ağacı (Rapidly-exploring Random Tree – RRT) yöntemleridir. PRM, başlangıç ve hedef noktalar arasında rasgele örnekler arasından en kısa olanı bulurken, RRT bu yolu tek seferde bulmayıp düğümler arasında rasgele seçenekler olarak ilerler [30]. Anlaşılacağı üzere, PRM global planlamada, RRT lokal planlamada daha çok tercih

Otonom Araçlarda Hareket Planlaması

edilmektedir. Literatürde otonom araçlar hareket planlamasında daha popüler bir uygulama olan RRT davranışsal hareket planlamada en olumlu sonuçlar veren algoritma olarak görülmektedir [31].

2.3. Eğri interpolasyonu

İnterpolasyon, var olan sayısal değerleri kullanarak bilinmeyen değerlerin bulunması işlemi olarak tanımlanabilir. Yol planlaması açısından interpolasyon ise belirlenen bazı noktalar arasındaki yolu yumuşatma, diğer bir ifadeyle sürekli hale getirmek için kullanılmaktadır [32]. Global olarak belirlenmiş olan rotanın sürekliliği bozan, yani sarsılmalara yol açan kısımlarında, lokal ve davranışsal planlayıcı olarak kullanılırlar. Eğri interpolasyonu yöntemleri belirlenmiş global noktalara ihtiyaç duyarlar ancak birlikte kullanıldığında dönemeçler, kavşaklar, şerit değiştirme, ani manevra gibi birçok mikro görevi yerine getirebilirler. Literatürdeki görsel örnekleri Şekil 3'te verilmekte olup bu interpolasyon teknikleri alt başlıklarda ifade edilmektedir.

2.3.1. Doğru ve çember

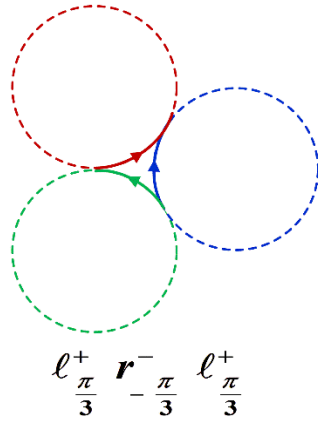
En basit interpolasyon yöntemi olan doğru ve çemberler çeşitli yol kısımlarında rahatlıkla kullanılabilir. Bir aracın geriye dönüşünde kullanılabileceği en optimum yol Reeds ve arkadaşlarının çalışmasında gösterilmiştir [33]. Ancak sürekli olmayan sonuçlar verdiklerinden dönüşler, kavşaklar veya şerit değiştirme durumlarına uygun değildir.

2.3.2. Klotoyid eğrileri

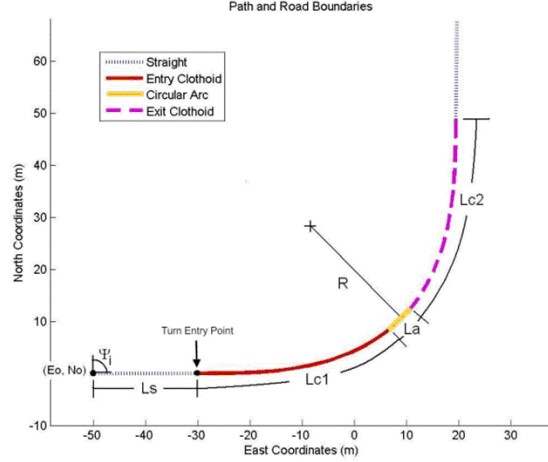
Fresnel integralleri ile tanımlanan bu tip eğriler, yolun düz ve eğri kısımları arasındaki bağlantıyı pürüzsüz bir şekilde yapmak için kullanılabilirler. Otoyol ve demiryolu tasarımında da kullanılan klotoyid eğrileri, araçlar ve araç benzeri robotlar için oldukça kullanışlıdır. Şekil 3.(b)'deki görsel örneğinde Funke ve arkadaşları, otonom aracın dönemeçte izleyeceği yolu giriş klotoyidi, çember yayı ve çıkış klotoyidi olmak üzere üç parçaya ayırıp incelemişlerdir.

2.3.3. Polinomlar

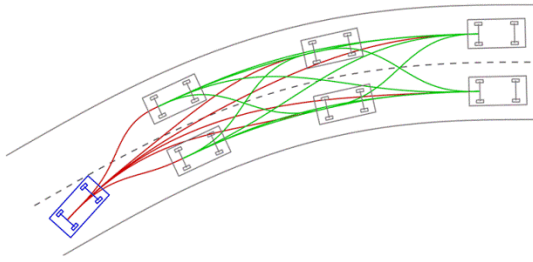
Polinomlar genellikle diğer eğri interpolasyonu yöntemlerinde birleşme noktalarını pürüzsüzleştirmek için kullanılır. "Araçlar, Altyapı ve Sürücüler Arası Etkileşimler Laboratuvarı (LIVIC)" polinomlar kullanarak şerit değiştirme senaryoları üzerine teknikler geliştirmişlerdir [37]. Ayrıca Şekil 3.(c)'de de görüleceği üzere, Xu ve arkadaşları polinomların gerçek zamanlı hareket planlama çalışmalarında şerit değiştirme görevinde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Petrov ve arkadaşları çalışmalarında polinomlardan araç sollama senaryolarında yararlanmışlardır [38]. Literatürdeki bu çalışmalar polinomların davranışsal planlamada kullanımına birer örnektir.



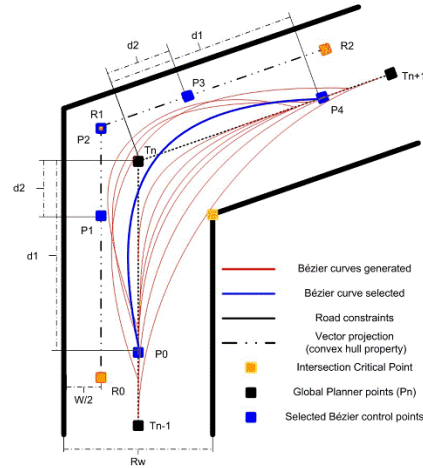
a) Doğru ve Çember [33]



b) Klotoyid Eğrileri [34]



c) Polinomlar [35]



d) Bezier Eğrileri [36]

Şekil 3. Eğri interpolasyonu örnekleri [33-36]

2.3.4. Bezier eğrileri

Başlangıç ve bitiş noktaları dışında fazladan kontrol noktaları ile şekilleri tayin edilen Bezier eğrilerinin hesaplama maliyetleri düşüktür. Bu eğriler, diğer interpolasyon tekniklerine özellikle de klotoyid eğrilerine benzetim için kullanılır [39]. Şekil 3.(d)'de verilen görsel örnekte, Bautista ve arkadaşları bu eğrileri kullanarak sürekli ve engellerden kaçınan bir yörünge planlamayı amaçlamışlardır.

Otonom Araçlarda Hareket Planlaması

2.4. Nümerik optimizasyon

Nümerik optimizasyon belli bir fonksiyonu sahip olduğu kısıtlamalara göre maksimuma ya da minimuma getirmeye yarayan matematiksel bir yöntemdir. Otonom araçlarda hareket planlaması açısından kullanımı ise önceki yöntemlerle elde edilen rota fonksiyonunu optimize etmektir. Böylece enerji tasarrufu, konfor, güvenlik gibi konularda avantaj elde edilir.

General Motors'un 1939 yılında düzenlediği *Futurama* adlı sergide ortaya atılan sürücüsüz araç fikrinin mevcut duruma gelmesi uzun yıllar almıştır. Bu sürecin erken zamanlarında üniversiteler tarafından araştırılan konu, son yıllarda Google gibi bilişim kuruluşlarının ve Audi, Volvo, Volkswagen gibi otomotiv şirketlerinin de büyük yatırımlar yaptığı alanlardan biri haline gelmiştir [2]. Dünya genelindeki bu gruplar tarafından yakın geçmişte ve halen en çok kullanılan yöntemler eğri interpolasyonu ve grafik taraması temelli planlayıcılar olmuştur. Mevcut çalışmalar hareket planlaması sınıflarından biri olan davranışsal planlamaya odaklanmaktadır. Hareketli çevrelerde eş zamanlı planlama ve hatta araçtaki yolcu ile etkileşime geçen ve ona karar hakkı veren arayüzler üzerine çalışmalar yapılmaktadır [37].

3. Sonuç ve öneriler

Dünyada ve ülkemizde hızla gelişen akıllı sistemler ulaşım alanında da incelenmekte ve yıllar içerisinde sürücüsüz araçların yollarda yerini alacağı düşünülmektedir. Otonom araçların çalışma döngüsünde algılama ve kontrol aşamaları arasında yer alan hareket planlaması konusu literatürde global, lokal ve davranışsal olarak üç sınıfta incelenmiştir. Mevcut çalışmalar global ve lokal planlama problemlerini büyük ölçüde çözmüş olarak görünmektedir.

Literatürde hareket planlaması konusunda grafik taraması ve örnekleme temelli planlayıcılar, eğri interpolasyonu ve nümerik optimizasyon gibi çeşitli tekniklerden faydalanılarak çalışmalar yürütülmüştür. Gerçekleştirilen çalışmalarda önerilen hareket planlama tekniklerinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmakta olup bu tekniklere ait karşılaştırma Tablo 1'de verilmektedir. Bu çalışmalar arasında grafik taraması temelli planlayıcılar ve eğri interpolasyonu en çok kullanılan yöntemler olarak görülmektedir. Gerçek zamanlı otonom sürüş için çok kritik olan davranışsal planlama problemi ise güncel çalışmaların konusu olmaktadır. Şehir içindeki araç yollarının yayalar, bisikletler, diğer araçlar gibi öğeleri sürekli olarak değerlendirme ve buna göre hareket tasarımında güncelleme yapmak bu problemin çözülmesi önündeki engel olarak görünmektedir. Mevcut algılama algoritmalarının da uzun sürelerde çalışması planlama için zaman aralığını daraltmaktadır. Yukarıda bahsedilen algoritmalar yeterli hesaplama hızında çalışmamaktadır. Daha hızlı çalışan hareket planlaması algoritmaları ile birlikte işlemci hızlarının artması, görüntü işleme tekniklerinin geliştirilmesi gibi diğer alanlardaki ilerlemeler ile otonom araçların manevra kabiliyetlerinde artış hedeflenmektedir.

Tablo 1. Hareket Planlama Tekniklerinin Kıyaslanması

Teknik	Avantajlar	Dezavantajlar
Dijkstra algoritması	İstenilen iki nokta arası en kısa yolu bulmaktadır. Global planlama için kullanılabilir.	Uzun mesafelerde yavaş çalışmaktadır. Planladığı rota süreksiz olmaktadır.
A* algoritması	Dijkstra algoritmasının sezgisel yollarla hızlandırılmış versiyonu olup global planlama için kullanılabilir.	Belirlenen rota her zaman optimum olmayabilir. Planladığı rota süreksiz olmaktadır.
Durum örgüsü	Planladığı rota süreklidir. Lokal ve davranışsal planlamada kullanılabilir.	Çözüm oluşturulan örgülere bağımlıdır ancak örgü sayısı

		arttırıldığında hesaplama hızı düşmektedir.
Örnekleme temelli planlayıcılar	Hesaplama hızı yüksektir. Global, lokal ve davranışsal planlamada tercih edilebilir.	Belirlenen çözüm optimum olmayabilir.
Doğru ve çemberler	Hesaplama maliyeti düşüktür. Lokal planlama için kullanılabilir.	Belirlenen çözüm süreksiz olabilir. Global planlama ile belirlenen çözüme ihtiyaç duyulmaktadır.
Klotoyid eğrileri	Yolun düz ve eğri kısımları arasındaki bağlantıyı pürüzsüz şekilde gerçekleştirir. Lokal planlama için kullanılabilir.	Kullanılan integraller dolayısıyla hesaplama hızı düşüktür. Global planlama ile belirlenen çözüme ihtiyaç duyulmaktadır.
Polinomlar	Hesaplama maliyeti düşüktür ve sürekli çözümler üretir. Lokal planlama için kullanılabilir.	Global planlama ile belirlenen çözüme ihtiyaç duyulmaktadır.
Bezier eğrileri	Sürekli çözümler üretir. Lokal planlama için kullanılabilir.	Kullanıldığı dönemeç keskinleştikçe hesaplama süresi artmaktadır. Global planlama ile belirlenen çözüme ihtiyaç duyulmaktadır.

Kaynakça

- [1] Gökaşar, I., & Dündar, S. Sürücüsüz taşıtların trafik akım hızına etkisinin yapay sinir ağları ile incelenmesi. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 1(2), 59-75.
- [2] González, D., Pérez, J., Milanés, V., & Nashashibi, F. (2016). A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles. *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, 17(4), 1135-1145.
- [3] SAE, T. (2016). Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. *SAE Standard J3016*.
- [4] Matzka, S., & Altendorfer, R. (2009). A comparison of track-to-track fusion algorithms for automotive sensor fusion *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems* (pp. 69-81): Springer.
- [5] Aufrère, R., Gowdy, J., Mertz, C., Thorpe, C., Wang, C.-C., & Yata, T. (2003). Perception for collision avoidance and autonomous driving. *Mechatronics*, 13(10), 1149-1161.
- [6] Lozano-Perez, T., Mason, M. T., & Taylor, R. H. (1984). Automatic synthesis of fine-motion strategies for robots. *The International Journal of Robotics Research*, 3(1), 3-24.
- [7] Nagel, R., Eichler, S., & Eberspacher, J. (2007). *Intelligent wireless communication for future autonomous and cognitive automobiles*. Intelligent Vehicles Symposium, IEEE.
- [8] Hwang, Y. K., & Ahuja, N. (1992). Gross motion planning—a survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 24(3), 219-291.
- [9] Jo, K., Kim, J., Kim, D., Jang, C., & Sunwoo, M. (2014). Development of autonomous car—Part I: Distributed system architecture and development process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(12), 7131-7140.
- [10] Jo, K., Kim, J., Kim, D., Jang, C., & Sunwoo, M. (2015). Development of autonomous car—Part II: A case study on the implementation of an autonomous driving system based on distributed architecture. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(8), 5119-5132.

Otonom Araçlarda Hareket Planlaması

- [11] Tounsi, M., & Le Corre, J. (1996). Trajectory generation for mobile robots. *Mathematics and computers in simulation*, 41(3-4), 367-376.
- [12] Chung, S.-Y., & Huang, H.-P. (2011). Robot motion planning in dynamic uncertain environments. *Advanced Robotics*, 25(6-7), 849-870.
- [13] Du Toit, N. E., & Burdick, J. W. (2012). Robot motion planning in dynamic, uncertain environments. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(1), 101-115.
- [14] Shladover, S. E., Desoer, C. A., Hedrick, J. K., Tomizuka, M., Walrand, J., Zhang, W.-B., McKeown, N. (1991). Automated vehicle control developments in the PATH program. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 40(1), 114-130.
- [15] Behringer, R., & Muller, N. (1998). Autonomous road vehicle guidance from autobahnen to narrow curves. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(5), 810-815.
- [16] Noto, M., & Sato, H. (2000). *A method for the shortest path search by extended Dijkstra algorithm*. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2000.
- [17] Anderson, S. J., Karumanchi, S. B., & Iagnemma, K. (2012). *Constraint-based planning and control for safe, semi-autonomous operation of vehicles*. Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE.
- [18] Bacha, A., Bauman, C., Faruque, R., Fleming, M., Terwelp, C., Reinholtz, C., Anderson, D. (2008). Odin: Team victortango's entry in the darpa urban challenge. *Journal of Field Robotics*, 25(8), 467-492.
- [19] Bohren, J., Foote, T., Keller, J., Kushleyev, A., Lee, D., Stewart, A., . . . Satterfield, B. (2008). Little ben: The ben franklin racing team's entry in the 2007 DARPA urban challenge. *Journal of Field Robotics*, 25(9), 598-614.
- [20] Likhachev, M., & Ferguson, D. (2009). Planning long dynamically feasible maneuvers for autonomous vehicles. *The International Journal of Robotics Research*, 28(8), 933-945.
- [21] Ziegler, J., Werling, M., & Schroder, J. (2008). *Navigating car-like robots in unstructured environments using an obstacle sensitive cost function*. Paper presented at the 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium.
- [22] Ferguson, D., Stentz, A., & Thrun, S. (2004). *PAO for planning with hidden state*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'04.
- [23] Pivtoraiko, M., & Kelly, A. (2005). *Efficient constrained path planning via search in state lattices*. International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space.
- [24] Howard, T. M., Green, C. J., Kelly, A., & Ferguson, D. (2008). State space sampling of feasible motions for high- performance mobile robot navigation in complex environments. *Journal of Field Robotics*, 25(6- 7), 325-345.
- [25] Kushleyev, A., & Likhachev, M. (2009). *Time-bounded lattice for efficient planning in dynamic environments*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'09..
- [26] Li, Q., Zeng, Z., Yang, B., & Zhang, T. (2009). *Hierarchical route planning based on taxi GPS-trajectories*. 17th International Conference on Geoinformatics..
- [27] Montemerlo, M., Becker, J., Bhat, S., Dahlkamp, H., Dolgov, D., Ettinger, S., Huhnke, B. (2008). Junior: The stanford entry in the urban challenge. *Journal of Field Robotics*, 25(9), 569-597.
- [28] Ziegler, J., & Stiller, C. (2009). *Spatiotemporal state lattices for fast trajectory planning in dynamic on-road driving scenarios*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS 2009..

- [29] Elbanhawi, M., & Simic, M. (2014). Sampling-based robot motion planning: A review. *IEEE Access*, 2, 56-77.
- [30] Karaman, S., & Frazzoli, E. (2011). Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *The International Journal of Robotics Research*, 30(7), 846-894.
- [31] Ferguson, D., Kalra, N., & Stentz, A. (2006). *Replanning with rrts*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2006.
- [32] Brezak, M., & Petrović, I. (2014). Real-time approximation of clothoids with bounded error for path planning applications. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(2), 507-515.
- [33] Reeds, J., & Shepp, L. (1990). Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards. *Pacific journal of mathematics*, 145(2), 367-393.
- [34] Funke, J., Theodosis, P., Hindiyeh, R., Stanek, G., Kritatakirana, K., Gerdes, C., Huhnke, B. (2012). *Up to the limits: Autonomous Audi TTS*. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV),.
- [35] Xu, W., Wei, J., Dolan, J. M., Zhao, H., & Zha, H. (2012). *A real-time motion planner with trajectory optimization for autonomous vehicles*. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
- [36] Bautista, D. G., Rastelli, J. P., Lattarulo, R., Milanés, V., & Nashashibi, F. (2014). *Continuous curvature planning with obstacle avoidance capabilities in urban scenarios*. IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).
- [37] Glaser, S., Vanholme, B., Mammari, S., Gruyer, D., & Nouveliere, L. (2010). Maneuver-based trajectory planning for highly autonomous vehicles on real road with traffic and driver interaction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(3), 589-606.
- [38] Petrov, P., & Nashashibi, F. (2014). Modeling and Nonlinear Adaptive Control for Autonomous Vehicle Overtaking. *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, 15(4), 1643-1656.
- [39] Wang, L., Miura, K. T., Nakamae, E., Yamamoto, T., & Wang, T. J. (2001). An approximation approach of the clothoid curve defined in the interval $[0, \pi/2]$ and its offset by free-form curves. *Computer-Aided Design*, 33(14), 1049-1058.