

Akıllı Şehirlerde 3B Nokta Bulutu ile Digital Çözümler

Cihan Altuntaş^{1*}

^{1*}Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita, Konya, Türkiye (caltuntas@ktun.edu.tr) (ORCID: 0000-0002-5754-2068)

Özet – Akıllı şehir, mevcut kaynaklar ve altyapı olanakları ile ihtiyaçların etkili, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde karşılanması için güncel teknolojinin en yüksek seviyede kullanıldığı sistemler bütünüdür. Akıllı şehirlerin başlıca bileşenleri; veri, iletişim alt yapısı ve yazılım hizmetleridir. Akıllı şehirlerde çok sayıda karar ve eylem konum analizine dayalı olarak gerçekleştirilir. Bu nedenle üç boyutlu ölçme teknikleri akıllı şehir uygulamalarının vazgeçilmez bir bileşeni ve veri kaynağıdır. Nokta bulutu ölçme verisinden cisimlerin tanımlanması, boyutlandırması, takibi yapılabilir, değişimi izlenebilir, ayrıca hareketli cisimlerin hızı ve hareket doğrultuları belirlenebilir. Nokta bulutundan çıkarılan bilgiler robotik görme, mobilite, insansız araçların navigasyonu, güvenlik, denetim, planlama ve daha pek çok amaçla kullanılmaktadır. Farklı ölçme teknikleri ile çok yoğun nokta bulutu verisi toplanarak ölçme alanı üç boyutlu modellenmektedir. Kentsel alan, arazi topografyası ve binaların modellenmesinde hava ve yersel ölçme teknikleri kullanılmaktadır. Bina bilgi sistemlerinin oluşturulmasında bina içi ölçme ve modelleme teknikleri kullanılır. Robotik uygulamalarda ölçme hızı yüksek Lidar teknikleri kullanılmaktadır. Görüldüğü gibi amaca uygun nokta bulutu ölçme yöntemi seçimi çok önemlidir. Bu çalışmada üç boyutlu nokta bulutu verisi sağlayan ölçme teknikleri incelenmiş ve nokta bulutu ile gerçekleştirilebilecek kentsel uygulamalar araştırılarak örnek uygulama yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Akıllı şehir, LiDAR, Mobil LiDAR, Fotogrametri, 3B Nokta bulutu

Atf: Altuntaş, C., (2022). Akıllı şehirlerde 3B nokta bulutu ile digital çözümler. International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 6(2): 208-217.

Digital Solutions in Smart Cities by Using 3D Point Cloud

Extended Abstract

Research Problem/Questions – Information extracted from the point cloud is used for robotic vision, mobility, navigation of unmanned vehicles, security, inspection, planning and many more. Three-dimensional modelling is performed by collecting very dense point cloud data with different measurement techniques. Aerial and terrestrial techniques are used in modeling the urban area, land topography and buildings. In-building measurement and modeling techniques are used in the creation of building information systems. Lidar techniques with high measuring speed are used in robotic applications. As can be seen, the selection of the appropriate method for measuring point cloud is very important. Thus, it is necessary to know the point cloud measurement techniques and the applications that can be made with the use of point cloud in smart cities.

Short Literature Review – Mobile mapping systems are used to obtain street views in urban areas [7]. On the other hand, oblique aerial photographs are used in modeling the building facade [8]. The integration of areas that cannot be imaged with these measurement techniques is made with point clouds obtained by terrestrial laser scanning and photogrammetric method [9]. The obtained three-dimensional point cloud data is combined in a common coordinate system, giving a structure that can be questioned and analyzed. As a result of inquiry and analysis, computer aided systems make a decision and perform tasks such as route detection, obstacle detection, mobility, and are considered as smart city applications. The use of 3D point cloud measurement techniques is common in smart cities, especially in the fulfillment of mobility services. The mobility covers services such as robot navigation, transportation with robots, security services, driver assistance systems, unmanned vehicle navigation, traffic safety and crowd management.

Methodology – The main components of smart cities are data, communication infrastructure and software services. Spatial information has an important place in the data infrastructure and is obtained by different techniques. The collection of spatial data is carried out by different techniques. Especially, lidar measurement techniques are widely used in collecting dense point cloud data. Lidar systems are active systems and work with the supported energy. Photogrammetry with passive sensors is another data source. Point cloud surveying techniques, in which active laser and images are used together to provide location data for smart cities. In order for smart city services to be sustainable, spatial information must be up-to-date and renewed

periodically. The geometric structure of the environment and other related data are transferred to the computer environment to create a digital twin of the current situation. Since smart applications will be made on this digital data, point cloud measurement techniques have an important place especially in the perception of existing geometry.

Results and Conclusions – Traditional methods based on cameras, radar and thermal sensors in smart cities cannot provide data with sufficient accuracy in all kinds of lighting and weather conditions. Especially for mobile applications, three-dimensional point cloud measurement techniques are widely used. Lidar techniques with low energy requirements and high measurement speed are suitable for mobile mapping, 3D imaging and robotic applications. Photogrammetric point cloud is a low cost measurement technique. Its most important advantage is the ability to create a point cloud from any photograph without the need for technical knowledge. Especially UAV photogrammetry is very suitable for monitoring physical changes in urban areas. Point cloud measurement techniques enable the digitization of smart city services.

Keywords – Smart city, LiDAR, Mobile LiDAR, Photogrammetry, 3D Point Cloud

Citation: Altuntas, C. (2022). Digital solutions in smart cities by using 3D point cloud. International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 6(2): 208-217.

I. INTRODUCTION

Bir karar vericiye gerek kalmadan mevcut durumu analiz ederek karar verebilen otomatik sistemler için kullanılan genel ifade “akıllı sistem” dir. Şehirlerin yönetilmesinde ve insan ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılan bu sistemler “akıllı şehir”, “akıllı kent” ve “akıllı kırsal” gibi kavramları doğurmuştur. Sürücüsüz araçlar, robot navigasyonu, kentsel denetim, cisim tespiti, takibi, insan ve araç trafiğinin yönetilmesi gibi uygulamalar elde edilen üç boyutlu nokta bulutu verisi analiz edilerek otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle üç boyutlu nokta bulutu ölçme teknikleri akıllı şehir uygulamaları için vazgeçilmez bir veri kaynağıdır.

Akıllı şehirler insan ihtiyaçlarının karşılanmasında ve kaynakların yönetilmesinde etkili ve akılcı çözümler sunan hizmetler bütünüdür. Kaynakların sınırlı olması daha etkin ve verimli karar vermeyi zorunlu kılmaktadır. Bu ise ölçme ve bilgisayar teknolojilerinden daha fazla yararlanılarak mümkündür.

Kentlerin konumsal veri alt yapısının temeli coğrafi bilgi sistemi (CBS) dir. Diğer konum esaslı uygulamalar CBS ye entegre edilerek kullanılır. Bina bilgi sistemi (BIM) bina içi işlemlerin ve yapılanmanın kontrolü için kullanılır. CBS ve BIM entegrasyonunu [1] içeren akıllı şehir uygulamaları taleplerin karşılanması ve görevlerin yerine getirilmesinde daha fazla alternatif sunar.

CBS de konum verisi çeşitli kaynaklardan elde edilir. CBS'nin temel altlığı yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları ve Lidar verileridir. Bu verilerden sayısal arazi modeli (SAM) ve ortofoto haritalar üretilir. Bu temel yapı üzerine binaların üç boyutlu modelleri oluşturularak üç boyutlu kent modelleri elde edilir. Böyle bir veri altyapısına dayalı olarak her türlü konumsal sorgulama ve analiz yapılabilir. Daha ileri aşamada binaların iç ve dış detaylarını görüntüleyen modellemeler yapılır ve bina bilgi sistemleri oluşturulur. Bina bilgi sistemlerinde 3B gösterim detay zenginliğine göre üç farklı kategoride temsil edilir [2]. Her üst seviye gerçek görünüme biraz daha yaklaşıp ve daha fazla detay bilgisi içerir. LoD4 seviyesi bina içi detayları da içeren üç boyutlu görünüm seviyesidir ve duvar, tavan, pencere ve kapı gibi detaylar seçilebilir [3,4]. Bina içi detayların ölçülmesinde ve robot navigasyonunda uçuş zamanlı kamera (ToF kamera) ve Lidar ölçme teknikleri kullanılır [5,6].

Kentsel detayların cadde ve sokak görünümünün elde edilmesinde mobil haritalama sistemleri kullanılmaktadır [7].

Diğer yandan bina yan yüzeylerinin modellenmesinde eğik çekimli hava fotoğrafları kullanılır [8]. Bu ölçme teknikleri ile ölçülemeyen alanların bütünlenmesi yersel lazer tarama ve fotogrametrik yöntemle elde edilen nokta bulutları ile yapılır [9]. Elde edilen üç boyutlu nokta bulutu verileri ortak bir koordinat sisteminde birleştirilerek sorgulama ve analiz yapılabilecek bir yapı kazandırılır. Sorgulama ve analizler sonucunda bilgisayar destekli sistemler bir karar oluşturarak yön tayini, engel tespiti, gibi görevler yerine getirirler ve akıllı şehir uygulamaları olarak değerlendirilir. Akıllı şehirlerde özellikle mobil hizmetlerin yerine getirilmesinde 3B nokta bulutu ölçme tekniklerinin kullanımı yaygındır. Mobilite; robot navigasyonu, robotlarla yapılan taşımacılık, güvenlik hizmetleri, sürücü destek sistemleri, insansız araç navigasyonu, trafik güvenliği ve kalabalıkların yönetilmesi gibi hizmetleri kapsar. Bu çalışmada akıllı şehir uygulamalarında 3B algılama ve nokta bulutu ölçme tekniklerinin kullanımı ve uygulama örnekleri araştırılmıştır.

II. MATERIALS AND METHOD

A. Akıllı Şehir

Akıllı şehir ve akıllı kırsal, üretim faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi, insan ihtiyaçlarının karşılanması, kentsel denetim ve yönetim faaliyetlerinin verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için oluşturulan veri toplama, işleme, iletişim ve karar verme sistemlerini içerir. Burada bahsedilen verimlilik kısa sürede daha düşük enerji gereksinimi ile faaliyetlerin yerine getirilmesini ifade etmektedir. Günümüzde enerji gereksinimi her geçen gün artmaktadır. Dolayısıyla akıllı şehirlerden beklenen fayda bu verimliliğin sağlanmasıdır. Nüfusun hızla artması ihtiyaçların karşılanması için mevcut kaynakların verimli kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu aşamada akıllı şehirler çevresel, sosyal ve ekonomik olarak sürdürülebilir bir gelecek amaçlar. Diğer yandan, bu amaçları gerçekleştirmekle yükümlü karar vericilere daha fazla alternatif ve etkili karar olanağı sağlar. Şehirler ne kadar akıllı sorusuna yanıt ise akıllı bileşenlerin kapsadıkları hizmetlere karşılık sayısal bir değer olarak ifade edilir [10].

Akıllı şehirlerden amaç, toplumsal yönetim ve ihtiyaçların çevreye duyarlı ve güvenli bir şekilde sağlanmasıdır. Bu amaçla çeşitli sensörler ve sensör sistemleri ile şehrin her tarafında çeşitli ölçüler yapılır ve mevcut durum görüntülenir. Sensörler bulunan konumda kullanıcılara en fazla bilgi

sağlayacak şekilde dizayn edilir. Toplanan veriler insanlar ve makinaların daha akıllı karar verebilmelerini sağlayacak şekilde analiz edilerek bilgiye dönüştürülür. Akıllı şehirlerde karar verici birim sadece makinalar ya da bilgisayarlar değildir. Akıllı şehir aynı zamanda, en uygun kararı verebilmeleri için insanlara alternatifler sunar.



Şekil 1. Akıllı şehirlerin temel bileşenleri

Akıllı şehirlerin başlıca bileşenleri, veri altyapısı, iletişim alt yapısı ve yazılım hizmetleridir (Şekil 1). Veri altyapısında konumsal bilgi önemli bir yer teşkil eder ve farklı tekniklerle elde edilir. Konum verisi alt yapısını coğrafi bilgi sistemleri oluşturur [11,12]. Konumsal verinin toplanması farklı tekniklerle gerçekleştirilir. Özellikle lidar ölçme teknikleri farklı amaçlarla yoğun nokta bulutu verisi toplamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Lidar sistemleri aktif sistemlerdir ve dışarıdan sağladıkları enerji ile çalışırlar. Pasif sensörlerle fotogrametrik ölçme diğer bir veri kaynağıdır. Aktif lazer ve fotoğrafın birlikte kullanıldığı nokta bulutu ölçme teknikleri de akıllı şehirler için konum verisi sağlar. Akıllı şehir hizmetlerinin sürdürülebilir olması için konumsal bilgiler güncel olmalı ve belirli periyotlarla yenilenmelidir. Diğer yandan, akıllı şehirlere farklı kaynaklardan da veri sağlanır. Örneğin hava kirliliği, gürültü ve su kalitesi ölçen sensörler gibi. Çevrenin geometrik durumu ve ilişkili diğer veriler bilgisayar ortamına aktarılarak mevcut durumun digital ikizi oluşturulur. Akıllı uygulamalar bu digital veri üzerinden yapılacağı için özellikle mevcut geometrinin algılanmasında nokta bulutu ölçme teknikleri önemli bir yer tutmaktadır. Akıllı şehirlerde iletişim belirli görevlerin yerine getirilmesinde internet olanaklarını ifade eder (IoT) [13,14]. Bu iletişim insan-insan (P2P), insan-makine (P2M), makine-makine (M2M) yada makine-insan (M2P) arasında olabilir. İletişim bilgisayarlar, cep telefonu yada mobil cihazlarla sağlanır. İletişim platformu sayesinde sürücüsüz araçlar, ev hizmetlerinin uzaktan kontrolü ve akıllı taşıma sistemleri gibi hizmetler yerine getirilir. Akıllı şehirlerde veri işleme birimi ihtiyaçların karşılanmasında mevcut kaynakların en etkili şekilde kullanılmasını sağlayan önemli bir bileşendir [15].

Veri işleme birimi yazılımı ile veriden bilgi çıkarımı yapılarak karar oluşturulur. Oluşturulan karar uygulamaya konularak otomatiklik derecesine göre aksiyon oluşturulur. Özellikle yapay zeka uygulamaları sayesinde pek çok hizmetin sunulmasında kalite artacaktır. Geleceğin akıllı şehirlerinde yazılımın bileşeninin daha da önemli hale geleceği değerlendirilmektedir.

B. Nokta Bulutu Ölçme Teknikleri

1. Hava 3D Lidar

Lidar algılayıcılar kentsel ve kırsal alan ölçmelerinde yaygın olarak kullanılır. Hava Lidar tekniğinde 300-3000m yükseklikten ölçü yapılır ve ölçüler yatayda 20cm, düşeyde ise 10cm civarı doğruluktur. Geiger-mode Lidar tekniğinde ölçme yüksekliği 10 km civarındadır. GPS verileri ile birlikte değerlendirildiğinde Lidar doğrudan georeferanslı veri sağlar. Kentsel planlama, bina modelleme ve afet yönetimi amacıyla yüksek yoğunluklu (70 nokta/m²) hava Lidar verileri kullanılır [16]. Kentsel modellemede Lidar veri yoğunluğu 500 nokta/m² ye kadar ulaşabilir. Ulusal boyutta daha geniş alanların ölçülmesinde daha yüksek (3000m ye kadar) seviye uçuşlarından elde edilen düşük yoğunluklu (3-15 nokta/m²) Lidar verileri kullanılır [17]. Yeni nesil Lidar sensörlerinin boyutları oldukça küçülmüş ve ağırlıkları azalmıştır. Bu sayede insansız hava aracı (İHA) larda Lidar kullanımı yaygınlaşmıştır. İHA Lidar kentsel ve kırsal alanlarda arazi topoğrafyası görüntüleme, denetim ve izleme gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Farklı periyot ölçüleri karşılaştırılarak arazide oluşan değişimler izlenebilir. Özellikle doğal afetler sonrası mevcut durum hızlıca tespit edilebilir.

Lidar ölçülerinden elde edilen çoklu dönüş sinyalleri sayısal yükseklik modeline ilave olarak başka bilgilerin de elde edilmesini sağlar. Çoklu dönüş sinyallerinden bitki örtülü alanlarda ağaç yükseklikleri ve hacimleri gibi bilgiler elde edilebilir. Ayrıca çok hızlı bir ölçme tekniği olan Geiger-mode Lidar yerde hareketli taşıtların ve diğer cisimlerin takibi ve tespiti için de kullanılabilir.

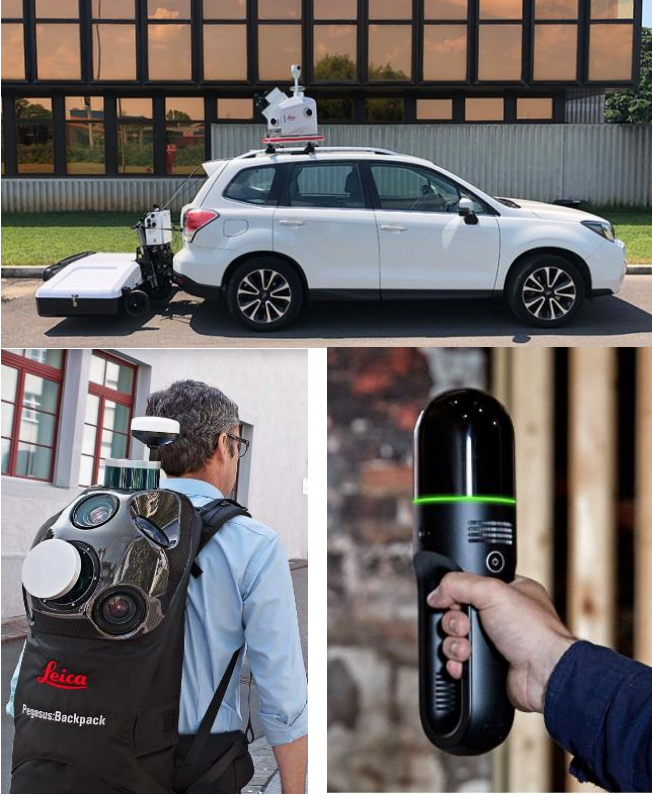
2. Yersel Mobil Lidar

Yersel mobil Lidar kara ve deniz araçlarına ve diğer hareketli platformlara yerleştirilen Lidar sensörleri ile hareket halindeyken 3B nokta bulutu ölçmeyi ifade eder. Mobil haritalama havadan ölçülemeyen kentsel detayların yüksek çözünürlüklü nokta bulutunun ölçülmesini sağlar. Kentsel alanların 3B sokak görünüşleri mobil ölçme teknikleri ile bilgi sistemlerine aktarılmaktadır. Lidar verileri ile birlikte elde edilen kamera görüntüleri renk ve doku bilgisi sağlar. Mobil Lidar verisi bulunulan noktada 3B panoramik bir görüntüleme sağlar. Mobil Lidar 3B modellemeye ilave olarak hareketli robotlar ve insansız araçlarda çevrenin görüntülenmesi ile engel tespitinde kullanılır. Mobil haritalamada doğruluk 2-3 cm civarındadır.

Kentsel alanda araçların giremediği alanlar sırt çantasında yada elde taşınabilen mobil Lidar ile ölçülmektedir (Şekil 2). GPS sinyalleri alınmayan noktalarda ölçülerin entegrasyonu SLAM yöntemi ile sağlanır. Deniz ve karanın birleştiği kıyı şeritlerinde topoğrafik yapının ve bina detaylarının görüntülenmesinde deniz araçları ile mobil ölçme gerçekleştirilir.

Mobil Lidar yönteminde aletin sarsıntılardan çok fazla etkilenmemesi için daha az hareketli parça içeren kompakt tarayıcılar kullanılır. Bu tarayıcılarda ışının yönlendirilmesi

farklı şekillerde gerçekleştirilir. Çok ışınlı Lidar (MBL) mobil haritalama ve kentsel alanların kesintisiz olarak izlenmesinde yaygın olarak kullanılır ve panoramik görüntüleme sağlar. OPA (optical phased array) ve MEMS (microelectromechanical systems) kompakt Lidar teknikleri belirli bir görüş açısı altında ölçü gerçekleştirir. Özellikle araçlarda ve hareketli robotlarda kullanımı yaygındır.



Şekil 2. Yersel mobil Lidar platformları [18]

3. Yersel Lazer Tarayıcı

Yersel lazer tarayıcı (YLT) akıllı şehir uygulamaları için zengin konum bilgisi sağlayan statik ölçme tekniğidir. Sokak ve cadde detaylarının sayısallaştırılmasında YLT oldukça kullanışlıdır. Bunun yanında akıllı şehir uygulamalarının önemli bir bileşeni olan bina bilgi sistemlerinin oluşturulmasında da yersel lazer tarayıcılar kullanılır. Bina içi detayların 3B sayısallaştırması YLT ile yapılabilir. YLT hem geometrik hem semantik bilgi toplanabilen bir ölçme tekniğidir. Bina içi ve dışı geometrik bilgiler yoğun nokta bulutu şeklinde elde edilir. Tarama ölçü doğruluğu oldukça yüksek ve milimetre seviyededir. Bina içi cisim modellemede kullanılan tarayıcıların tarama nokta sıklığı ve ölçü doğruluğu çok yüksektir. YLT, bina modellemede genellikle fotogrametrik yöntem ile birlikte kullanılır [19]. Topoğrafik ölçmelerde 6km ye kadar olan mesafede tarama yapılabilir. YLT, özellikle belirli periyotlarda ölçü gerektiren deformasyon ve değişikliklerin tespiti için oldukça kullanışlıdır [20]. Ayrıca yapımı devam eden inşaatların tamamlanma durumları periyodik ölçülerinin karşılaştırması sonucunda tespit edilebilir [21]. Uzun mesafe ölçen lazer tarayıcılarla yanına ulaşamayan topoğrafik detaylar ölçülebilir. Endüstriyel ve tıbbi modellemede lazer ve kamera birleşiminden oluşan üçgenleme tarayıcılar kullanılır ve doğruluk oldukça yüksektir.

4. ToF Kamera (Phase-Shift)

ToF kamera video çekim hızında ölçü yapar. Ölçme hızı saniyede 100 frame olan kamera modelleri vardır. Sağladığı ölçme hızı sayesinde özellikle robotik uygulamalarda ve araç etrafındaki hareketlerin tespitinde yaygın olarak kullanılır. Bunun yanında sürekli ölçme modunda fabrika sahasındaki işçilerin izlenmesi ve olağan dışı hareketler tespit edilerek uyarı sistemi oluşturulmasında kullanılır. Özellikle kalabalık alanların gözlenmesi, insan hareketlerinin analizi kamera görüntülerinden mümkündür [22]. Hareket analizi ile olası komutların kamera ölçüsünden algılanabilir. Kameranın en önemli kullanım alanlarından birisi de bina bilgi sisteminin oluşturulmasıdır. Bina içi detaylar statik ya da mobil robotlar ile ölçülerek LoD4 seviye 3B bina modelleri oluşturulur [23,24]. Diğer yandan akıllı şehir uygulamaları kapsamında fabrika sahaslarındaki üretim bantlarının izlenmesi ve kontrol edilmesinde ToF kamera verilerinden yararlanır.

5 3D Flash Lidar Kamera (Puls-Time)

Flash kamera ışın uçuş zamanı (puls yöntemi) ile ölçü yapar ve bina içi ve açık alan ölçmeleri için uygundur. Ölçme mesafesi 5km olan kamera modelleri vardır. Kameranın görüş açısına bağlı olarak ölçme mesafesi ve piksel çözünürlüğü farklılık gösterir. Enerji gereksinimi yüksektir. Örneğin GSFL-16K Flash Lidar kameranın ölçme mesafesi 1km, nokta yoğunluğu 128x128 piksel, ölçme hızı 20Hz dir.

Geleceğin akıllı şehirlerinde araçlar sürücüsüz olarak yönetilebilecektir. Flash Lidar kamera araç etrafındaki hareketli cisimlerin tespiti ve yol takibi yapılarak sürücüye destek amaçlı kullanılmaktadır. Flash Lidar kamera ölçme hızı araçların hızları ile uyumludur ve özellikle şehir için uygulamalarda oldukça etkilidir. Bu sayede akıllı şehirlerde trafik kazaları azaltılarak yollar, araçlar ve yayalar için daha güvenli hale gelecektir. Kentsel alanların üç boyutlu modellenmesi, trafik yoğunluğunun ve araç hızlarının tespiti flash kamera ile yapılabilir.

Geleceğin akıllı şehirlerinde araçlar diğer araçlarla ve kentin alt yapısı ile iletişim halinde olacaktır. Bu iletişimin sağlanmasında flash Lidar ölçüsü önemli bir yer tutmaktadır. Flash Lidar kamera gece yada gündüz her türlü hava koşulunda kullanılabilir. Hava araçlarının takibi ve yönlendirilmesinde flash kamera kullanılmaktadır. Böylece insansız uçuş yapılabilecek ve hava araçlarının kazaları önlenecektir. İnsansız kara yada hava araçları ile taksi hizmeti sunulabilecektir.

6. Fotogrametri

Fotogrametrik nokta bulutu bindirmeli fotoğraflardan otomatik olarak oluşturulur. Hesaplama tekniklerindeki gelişmelerle birlikte fotogrametrik işlemler oldukça kolaylaşmıştır. Bilgisayar yazılımları sayesinde fotogrametrik görüntüler tam otomatik değerlendirilebilmektedir. Fotoğraflardan nokta bulutu oluşturulabilen bu yöntem SfM fotogrametri olarak da isimlendirilir. SfM tekniği ile her türlü kamera görüntüsünden nokta bulutu oluşturulabilir. Nokta yoğunluğu oldukça yüksektir. Doğruluk ölçme geometrisine bağlı olarak değişir ve birkaç santimetre civarındadır.

Fotogrametrik görüntülerin yer çözünürlüğü çekim mesafesi ve kamera piksel boyutlarına bağlı olarak değişir ve 10-50cm arasındadır. Hava fotogrametrisi özellikle kentsel planlama, 3B modelleme, ortofoto üretimi ve SAM oluşturma amacıyla kullanılır [25]. Akıllı şehir uygulamalarında LoD2 seviye 3B kent modelleri hava fotogrametrisi nokta bulutundan üretilebilmektedir. SfM fotogrametri, özellikle

planlama ve büyük çaplı afetlerin kısa sürede görüntülenmesinde kolaylık sağlar. Eğik çekimli kameralar kullanılarak kentsel alanlardaki yüksek binaların yan yüzeyleri modellenebilmektedir [26]. Hava fotogrametrisinde ölçü doğruluğu resim ölçeğine bağlıdır ve 10cm den daha iyi konum doğruluğu elde edilir. Nokta bulutunun ölçeklenmesi ve georeferanslanması doğrudan uçuş esnasındaki GPS verileri ya da yer kontrol noktalarına dayalı olarak yapılır. Fotogrametrik görüntülerin doku bilgisi objelerin sınıflandırılması ve tanımlanmasında kullanılır [27].

Araziye ilişkin çok sayıda çalışmada İHA'lerden elde edilen yüksek çözünürlüklü fotogrametrik görüntülerden yararlanılır. Kentsel alanlarda oluşan kaçak yapılaşma ve diğer fiziksel değişimler İHA görüntülerinden oluşturulacak nokta bulutlarının karşılaştırılması ile tespit edilebilir. Benzer şekilde, doğal afetlerin etkileri oluşturulacak İHA nokta bulutundan hızlıca tespit edilebilir. Ölçü doğruluğu birkaç santimetre civarındadır.

Amatör kameralar ve cep telefonu kameraları ile alınan yersel fotoğraflardan SfM yöntemi ile georeferanslı nokta bulutu oluşturulabilir. Kentlerin üç boyutlu modellenmesinde özellikle bina cepheleri yersel fotogrametri ile yüksek çözünürlüklü olarak modellenebilir.

C. Nokta Bulutu İşlemleri

Lidar kullanan tarayıcıların nokta bulutu XYZ koordinatları ile birlikte cisim yüzeyinden dönen ışınların yansımaya şiddetini (I) de içerir. Yansımaya şiddeti ölçme yüzeyinin materyal ve renk yapısına göre değişir. Dolayısıyla yansımaya değeri ölçülen yüzeyi tanımlamada belirli ipuçları sağlayan önemli bir ölçme datasıdır. Yansımaya değerlerinden ölçme alanının mono renkli ortofoto ve 2B görüntüleri oluşturulabilir. Lidar ölçme tekniği entegre olarak kamera da bulunduruyorsa (Örneğin yersel lazer tarayıcı) noktalar için renk (RGB) kaydı da yapılabilir.

Sadece RGB kameradan oluşan ölçme sistemleri XYZ koordinatları ve renk değerlerini (RBG) içeren nokta bulutu sağlar. Bir baz çubuğuna yerleştirilen stereo kameralar bu tür bir ölçme sistemidir. Cisim tanımlama ve sınıflandırmada renk değeri çok önemlidir.

Infrared projektör ve termal kamera bulduran ölçme sistemleri (örneğin Kinect kamera) ise görüntü piksellerinin koordinatlarını ölçer.

Akıllı şehirlerde, ölçme teknikleri ile elde edilen yoğun nokta bulutuna segmentasyon, sınıflandırma, filtreleme, mesafe (derinlik) görüntüsü, yansımaya görüntüsü işlemleri uygulanarak obje tanımlama, takip, engel tespiti, yön tayini, hareketli insan ve araç kümelerinin izlenmesi gibi amaçlarla kullanılır.

Segmentasyon: Aynı geometrik özelliğe sahip noktaların sınıflandırılarak çoklu homojen bölgeler oluşturulması işlemidir. Aynı bölgeye ait noktalar benzer özelliklere sahiptir. Segmentasyon; robotik işlemler, akıllı araçlar, sürücüsüz navigasyon ve mobil haritalamada yaygın olarak kullanılır.

Sınıflandırma: Hem geometri hem de ölçme yüzeyine ait diğer veriler kullanılarak, önceden tanımlanmış veri etiketlerine dayalı olarak genellikle makine öğrenmesi yoluyla 3B nokta bulutunun kategorize edilmesi işlemidir. Lidar verisinden çıplak yeryüzü, bitki ve su alanlarına ait noktaların sınıflandırılması gibi.

Filtreleme: Belirli büyüklükte bir kutu gezdirilerek aranan geometrik özellikteki nokta kümesinin bulunması

işlemidir. Kutu boyutu ve şekli farklılık gösterebilir. Filtreleme genellikle 3B nokta bulutundan obje tespiti, tanımlama ve takibi için yapılır. Objeye tanımlama, objenin şekil, boyut ve dönüklüğünün belirlenmesi ve tanımlı koordinat sisteminde konumunun ifade edilmesini içerir.

Mesafe (Derinlik) görüntüsü: Derinlik görüntüsü görüntü alanındaki cisimlerin 3B ölçme aletinin faz merkezine (ya da seçilen bir noktaya) ya da görüntü düzlemine uzaklıklarına (Z koordinatına) göre oluşturulur. Detaylar seçilen renk tonu ile renklendirilir. Özellikle renk çeşitliliği bulunmayan ve algılamada zorluk çekilen görüntü alanı detaylarını tanımlamada kullanılır. Özellikle karanlık ortam şartlarında alınan Lidar ölçülerinden çevresel geometri analizinde çok kullanılır.

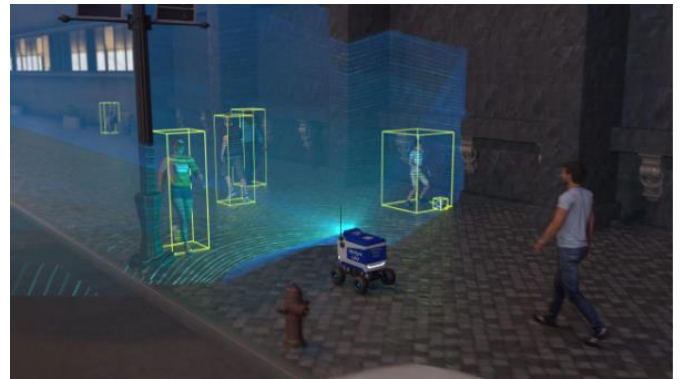
Yansımaya görüntüsü: Lidar nokta bulutunun içerdiği yansımaya değerleri ile oluşturulan 2B gri tonlu mono renkli fotoğraflık görüntüdür.

D. 3B Nokta Bulutu ile Akıllı Şehir Uygulamaları

3B nokta bulutu ölçme teknikleri ile çok sayıda akıllı şehir uygulamaları gerçekleştirilebilir. Başlıca uygulamalar aşağıda detaylandırılmıştır.

1. Mobil Robot Navigasyonu

Kendi kendine hareket eden robotlar pek çok şehirde güvenlik, kargo taşımacılığı ve temizlik işleri gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Şekil 3). Robotları hareket yönlerini tayin edebilmeleri için çevresindeki engelleri tespit ederek karar vermeleri gerekir. Çevrenin geometrik durumunu algılamada robot üzerine yerleştirilen lazer tarayıcı ya da Lidar kamera kullanılır. Özellikle MBL tarayıcı panoramik ölçme ve algılama sağlar. Diğer yandan flash lidar kamera da belirli bir görüş açısı ile algılama yapar. Robotlar hareketli olduklarından kullanılan sensör sarsıntılardan etkilenmeyen ya da çok az etkilenen bir yapıda olmalıdır. Bu amaçla kullanılan sensörlerden biriside solid-state lazer tarayıcılarıdır.



Şekil 3. 3B Lidar sensörü ile donatılmış mobil robot ile kargo dağıtımı [28]



Şekil 4. Lazer tarayıcı destekli endüstriyel otonom mobil robot [28]

Lidar, mobil robotların insan müdahalesi olmadan özerk ve güvenli bir şekilde çalışmasını ve navigasyonunu sağlar. Ayrıca değişen sıcaklık, aydınlatma ve yağış dahil olmak üzere çok zorlu iç ve dış çevre koşulları da otonom mobil robotların kullanımını gerektirir (Şekil 4).

2. Trafik Akışı Denetleme

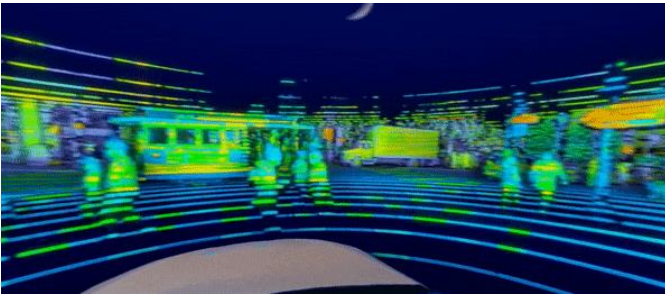
Şehrin belirli noktalarına konulan lazer tarayıcı ve kamera ile trafik akışı canlı olarak izlenir (Şekil 5). Araçlar trafik yoğun güzergahlar konusunda uyarılarak alternatif güzergah önerileri ile trafik akışı rahatlatılır ve karbon salınımı azaltılır. Aynı şekilde yaya trafik akışı da izlenerek yayalar ve araçlar için bilgilendirme ve yönlendirme yapılır. 3B nokta bulutundan yayalar ve araçlar için tespit, tanımlama ve izleme yapılabilir. Ayrıca konum, boyut ve hızları belirlenebilir.



Şekil 5. Sürekli ölçüm yapan lidar ile araç ve yaya trafiği izleme [28,29]

3. Yaya Güvenliği

Özellikle araçların yayalara verebileceği zararların önlenmesinde araç üzerinde konumlandırılmış Lidar sensörleri kullanılır. Araç etrafındaki bisikletli, yaya ve hareketli diğer cisimler nokta bulutu analizinden kolayca tespit edilebilir (Şekil 6). Araç için bir uyarı sinyali oluşturulur ve frenleme yapılır. Bu işlem hem sürücü kontrolünde hem de sürücüsüz araçlar için yapılabilir. Otomobil üzerine konumlandırılmış kamera fotoğrafları ile de yaya güvenliği uygulamaları vardır. Ancak Lidar kadar etkili değildir. Lidar sensörleri geniş bir görüş alanı sağlar ve gece gündüz koşullarında kullanılabilir. Bu tür akıllı şehir uygulamaları belediye yönetimlerinin vatandaşları için daha güvenli yaya trafiği oluşturmaya yardımcı olur.



Şekil 6. Kalabalık bir kavşakta yaya ve araç trafiğine ait Lidar nokta bulutu verisi [28]

4. Kalabalık Yönetme ve Yönlendirme

Kalabalık insan topluluklarının bulunabileceği hava alanı, müze, lokanta ve kafeler Lidar tarayıcı ve kameralar ile

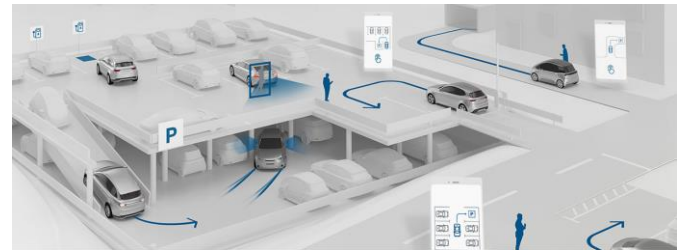
izlenerek yönlendirme yapılır (Şekil 7). Nokta bulutundan kişi sayımı yapılarak merkezi bir iletişim sistemi ile belediye ve hükümet yetkililerine ulaştırılır ve gerekli yönlendirmeler yapılır. Böylece şehir altyapısının daha verimli kullanımı sağlanmış olur. Ayrıca Covid-19 salgını sürecinde gördüğümüz gibi kişiler arası güvenli mesafenin sağlanmasında denetim ve uyarı yapılabilir. Kişi sayımı yapılarak sayı sınırlaması olan kapalı alanlara gereğinden fazla sayıda kişinin girmesi önlenir. Örneğin tek bir Lidar tarayıcı (Quanergy MQ-8) ile 140m yarıçaplı bir alanda 300 kişi ve araç böyle bir sistem tarafından aynı anda tespit edilebilmektedir.



Şekil 7. Farklı noktalara yerleştirilen lazer tarayıcı ile kişi tespiti ve takibi [29]

5. Park Yeri Tespiti

Park yerleri Lidar tarayıcı ile sürekli izlenerek araçlar boş park yerlerine yönlendirilir (Şekil 8). Böylece araçların daha kısa sürede park etmesi sağlanarak karbon salınımı azaltılmış olur. Park edecek araçlarda sürücü yardımı varsa kendi kendine park edebilir. Park alanı çizgisi sistemde tanımlı olacağı için çizgi dışı alana park edilmesi önlenmiş olur. Park uygulaması katlı otopark alanları için de uygulanabilir. Panoramik tarama yapan lazer tarayıcılar açık ve kapalı park uygulamaları için uygundur. Ancak kapalı alan uygulamalarında ToF kamera da kullanılabilir.



Şekil 8. Park yeri tespiti [30]

6. Sürücü Destek ve Otomasyonu

Hareketli araçlarda otomatiklik seviyesi farklı derecelerde ifade edilmektedir. Bazı otomatik sistemler mevcut durumu analiz ederek sürücüyü uyarırken (sürücü destek sistemi) bazılarında araç kendisi doğrudan reaksiyon gösterebilmektedir (Şekil 9). Kara ve hava araçları nokta bulutu verisini analizi ederek kendi yolunu bulabilir ve sürücüsüz olarak yol alabilir. Bu şekilde otomatik kontrolü yapılan araçlarda kaza riski en az seviyeye inecektir. Bu taşıtlar yolcu ve kargo taşımacılığında kullanılabilir. MBL

panoramik lazer tarayıcı bu işlem için uygun bir seçimdir. Diğer yandan flash Lidar kamera İHA'ların uçuş yüksekliğini belirlemede kullanılmaktadır. Sürücüsüz navigasyon deniz araçları için de uygulanmaktadır. Otonom araçlar taşıt, bisiklet ve yaya güvenliğinin sağlanmasına da katkı sağlayacaktır. Otonom sistemlerin başarısı araç çevresini görüntüleyen sensörlere ve elde edilen nokta bulutu verisinin analizine bağlıdır.



Şekil 9. Araç etrafı obje tespiti ve sürücü destek sistemi [31]

7. Fabrikalarda Üretim Hattı Otomasyonu

Özellikle Lidar kameralar üretim bantlarından çıkan ürünlerin şekil bozukluğu denetimi, paketlenmesi ve dağıtımında kullanılmaktadır. Üretim aşamalarının dijitalleştirilmesinde ve akıllı üretim tekniklerinin oluşturulmasında Lidar sensörlerin katkısı çok fazladır. Ayrıca, fabrika sahasındaki işçi hareketleri izlenerek olağan dışı düşme ve kayma gibi durumlarda güvenlik uyarısı yapılabilmektedir.

8. 3B Haritalama ve Görüntüleme

Akıllı şehir uygulamalarının çoğu 3B veri tabanına dayalı olarak gerçekleştirilir. Bu nedenle özellikle kentler için 3B modellerinin oluşturulması çok önemlidir. 3B kent modellerinin oluşturulmasında mobil Lidar hızlı ve düşük maliyetli bir görüntüleme sağlar. Diğer yandan mobil haritalamada fotogrametrik nokta bulutu tekniği de kullanılmaktadır. Lidar tekniği veri kalitesi ve doğruluk bakımından fotogrametrik yönteminden daha başarılıdır. Bina içi ayrıntı seviyelerinin modellenmesinde (LoD4) ise Lidar kamera ve kısa ölçme mesafeli optik mobil tarayıcılar kullanılır.

9. Akıllı Tarım

Akıllı tarım uygulamalarında GPS destekli sistemler kullanılmaktadır. Ancak bu sistemler gerekli verim ve tarımsal güvenliğin sağlanması için yeterli değildir. GPS'e ilave olarak ortamın 3B görüntüsünü sağlayan sensörler engel algılama, bitki türü tanımlama, analiz ve güvenlik için daha fazla olanak sağlar. Lidar, tarımsal faaliyetlerde 3B görüntülemeyi sağlayacak düşük maliyetli ve güvenilir bir ölçme tekniğidir [32]. Bu sayede tarımsal üretimin en önemli faktörü olan maliyetin azalması sağlanmış olacaktır.

III.UYGULAMA

Araç üzerine monte edilen Ouster OS1 MBL ile mobil Lidar ölçüsü gerçekleştirilmiştir. OS1 (L3 Chip) Lidar ışını

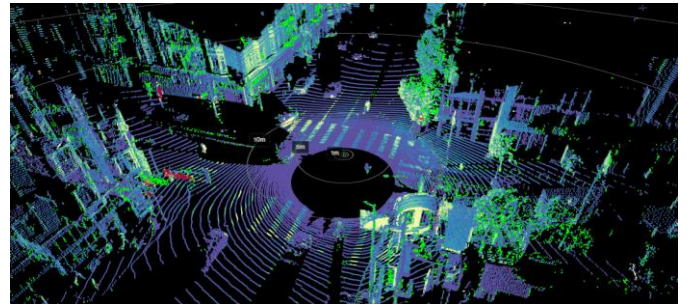
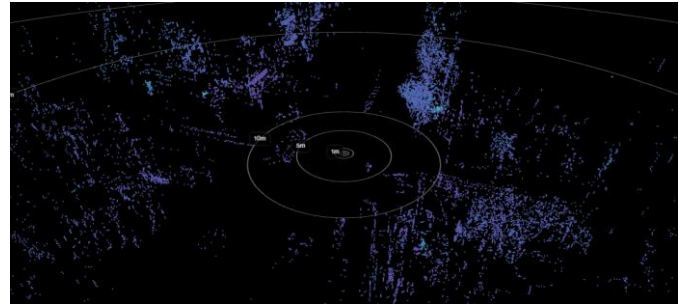
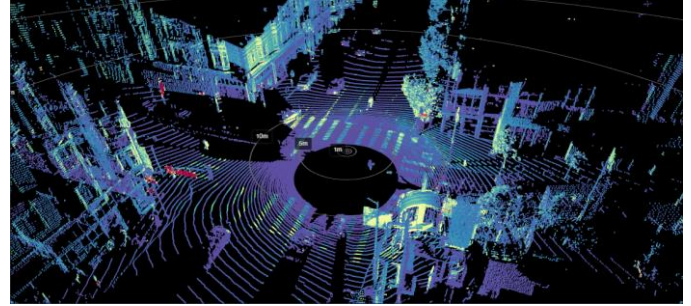
yansıtma oranı %80 olan yüzeyler için 200m ölçme mesafesine sahiptir (Table 1). Ölçme verisi koordinat bilgisi yanında yansıma değerlerini de içermektedir. Nokta bulutu yoğunluğu ölçme mesafesine bağlı olarak azalmaktadır.

Table 1. Ouster OS1(L3 Chip) teknik özellikleri [33]

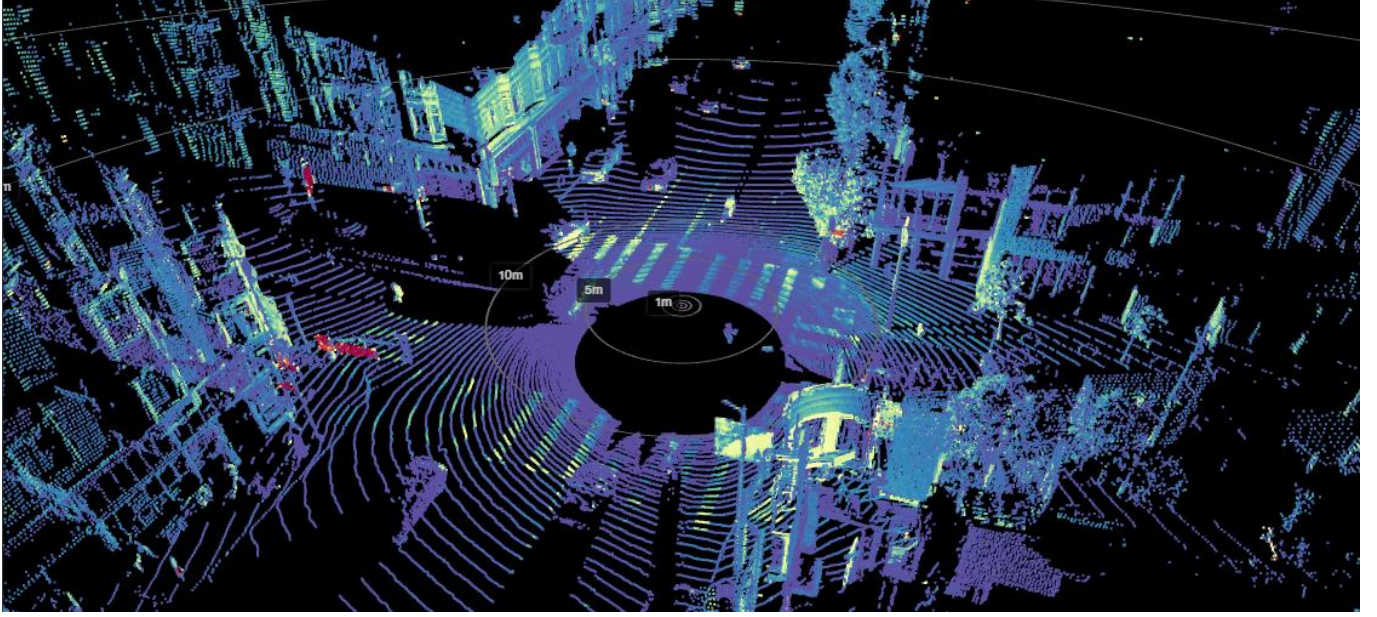
Ölçme mesafesi	90m@%10, 200m@%80
Düşey görüş açısı	45°
Işınsal çözünürlük	128 kanal
Ölçme hızı	5.2M pts/s
Ölçme hassasiyeti	± 0.7cm
Kamera	NI-Entegre
Ağırlık	447g

OS1 Lidar iki dönüş sinyali kaydeder. Bu sayede ışın doğrultusundaki farklı detaylar ortaya çıkarılabilir. Bu ölçme datasının birinci ve ikinci dönüş sinyallerine ait nokta bulutu görüntüsü Şekil 10 da görülmektedir. İkinci dönüş sinyali sayesinde ağaçlar tespit edilebilmiştir.

Lidar aleti merkez kabul edildiğinde nokta bulutunun ölçme mesafesine göre renklendirilmiş görüntüsü cisimlerin uzaklıklarını göstermektedir (Şekil 11). Nokta bulutundan oluşturulan 2B mesafe ve yansıma görüntüleri Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 10. Ouster OS1 Lidar ilk (üstte) ve son (orta) sinyal dönüşlerine ait nokta bulutu görüntüleri. İki dönüş sinyali yeşil ile renklendirilerek her iki dönüş sinyalinin birlikte görünümü alttaki şekildedir.



Şekil 11. Ouster OS1 nokta bulutu verisi



Şekil 12. Ouster OS1 nokta bulutu verisinden üretilmiş 2B mesafe (üst), yansımaya (orta), sinyal (alt) değerleri görüntüsü

Tablo 2. 3B ölçme sensörlerinin genel özellikleri

3B ölçme tekniği	Entegre RGB kamera	Ölçme datası	Görüş alanı ölçme	Mobil ölçme	Örnek ölçme aleti
Lidar	Yok	X,Y,Z	Eş zamanlı matris görüntüleyici	Evet	Geiger mode Lidar
Lidar	Yok	X,Y,Z,I	Ardışık blok nokta tarama	Evet	Hesai/PandarGT-L60
Lidar	Var	X,Y,Z,I,R,G,B	Ardışık nokta tarama	Evet	Leica City Mapper II
ToF Lidar kamera (phase shift)	Yok	X,Y,Z,I	Eş zamanlı matris görüntüleyici	Evet	SR4000
3D Flash Lidar kamera (Puls time)	Var	X,Y,Z,I,R,G,B	Eş zamanlı matris görüntüleyici	Evet	GSFL-16K
Serbest el RGB Kamera	Var	X,Y,Z,R,G,B	Post proses, eş zamanlı	Hayır	Amatör kamera, akıllı telefon kamerası
Stereo Kamera	Var	X,Y,Z,R,G,B	Eş zamanlı	Evet	ZED stereo kamera
Lidar+Kamera	Var	X,Y,Z,R,G,B	Ardışık nokta tarama	Hayır	Konica Minolta Vivid 910

IV. TARTIŞMA

Akıllı şehir, bilgilerin ve kamu hizmetlerinin sayısallaştırılmasını sağlar. 3B nokta bulutu ölçüm teknikleri 3B izleme ve mekansal analiz için yüksek yoğunluklu konum bilgisi sağlar. 3B nokta bulutu konum bilgisine ilave olarak görüntü objelerinin boyutları, sınıflandırılması ve hareketli obje takibini sağlar. Segmentasyon ve sınıflandırma ile nokta bulutu verilerinden daha fazla bilgi elde edilir. Bu adımda akıllı şehrin yazılım bileşenleri de önemli rol oynar. 3B Lidar, akıllı şehir uygulamalarında doğru ve etkili çözümler sunar. Lidar geometrik konum bilgisine ilave olarak yansıma değerlerini de kaydeder. Yansıma değeri cismin türünü tespit ve sınıflandırılmasında ilave bilgi sağlar. Lidar sadece geometrik bilgi kaydı yaptığından kamusal alanda kullanılmasında kişisel veri güvenliği açısından yasal bir sorun oluşturmaz. Fotogrametrik nokta bulutu tekniğinde konum bilgisine ilave olarak doku bilgisi de kaydedilmektedir. Bu nedenle kamuya açık alanlarda kişisel bilgi bakımından sakıncaları bulunmaktadır.

Lidar gece ve gündüz koşullarında kullanılabilirken fotoğraflar yalnızca gündüz elde edilebilir. Yüksek ölçme hızına sahip lazer tarama ve kamera sistemleri ile mobil ölçme yapılabilir. Şehirlerde kavşak noktalarına yerleştirilen Lidar sensörler ile sürekli modda 3B veri kaydı yapılabilir. Bu sayede yaya ve araç hareketleri izlenerek denetleme yapılabilir. Fotogrametrik nokta bulutu oluşturmada herhangi bir teknik bilgiye ihtiyaç olmaması yaygın bir kullanım olanağı sağlamaktadır. Her türlü kamera ile alınan görüntülerden 3B fotogrametrik nokta bulutu oluşturulabilir. Düşük maliyetli bir ölçme tekniğidir. Çoğu 3B modelleme uygulaması Lidar ve fotogrametri yöntemlerinin birlikte kullanılmasını gerektirir.

Lidar aktif bir ölçme tekniğidir ve dışarıdan sağlanan enerji ile çalışır. Dolayısıyla Lidar seçiminde enerji gereksinimi düşük aletler tercih edilmelidir. Üç boyutlu ölçme tekniklerinde Lidar ve kamera tek başına yada birlikte kullanılır. Lidar çoklu dönüş verisi ışın doğrultusundaki farklı mesafelerin ve dolayısıyla detayların algılanmasını sağlar. Lidar sistemleri noktalara renk değeri atanması için kamera görüntülerine ihtiyaç duyar. Buna göre Lidar ve kamera içeren ölçme tekniklerinin genel özellikleri Tablo 2 de verilmiştir.

V. SONUÇ

Akıllı şehirlerde kamera, radar ve termal sensörlere dayalı geleneksel yöntemler her türlü aydınlanma ve hava koşullarında yeterli doğrulukta veri sağlayamazlar. Özellikle mobil uygulamalar için üç boyutlu nokta bulutu ölçme teknikleri yaygın kullanım alanıdır. Düşük enerji gereksinimi olan ölçme hızı yüksek tarama yada kamera Lidar teknikleri mobil haritalama, üç boyutlu görüntüleme ve robotik uygulamalar için uygundur. Lidar verisinden oluşturulan mesafe ve yansıma görüntüleri renk değerine yardımcı olarak görüntü alanı geometrisini doğru algılamada önemlidir. Fotogrametrik nokta bulutu düşük maliyetli bir ölçme tekniğidir. En önemli üstünlüğü her türlü fotoğraftan teknik bilgi gereksinimi olmadan nokta bulutu oluşturulabilmesidir. Özellikle İHA fotogrametrisi kentsel alanlardaki fiziksel değişimlerin izlenmesi için çok uygundur. Nokta bulutu ölçme teknikleri akıllı şehir hizmetlerinin sayısallaştırılmasını sağlar. Daha yoğun nokta bulutu doğru ve hızlı karar vermeyi kolaylaştırır. Hava nokta bulutu ölçme teknikleri geniş alanların haritalanması ve sayısal arazi modelinin oluşturulması yersel yöntemler ise sokak görünümü ve cisim modelleme için uygundur. Hava ve yersel yöntemler akıllı şehir uygulamaları için birbirini destekler şekilde kullanılmalıdır.

ACKNOWLEDGMENT

Yazar, Lidar ölçme verisi teminindeki işbirliği için OUSTER Lidar firmasına teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] M. Garramone, N. Moretti, M. Scaioni, C. Ellul, F. ReCecconi and M.C. DeJaco, "BIM and GIS integration for infrastructure asset management: A bibliometric analysis," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. VI-4/W1-2020, pp. 77-84, 2020.
- [2] F. Biljecki, H. Ledoux, J. Stoter and G. Vosselman, "The variants of an LOD of a 3D building model and their influence on spatial analyses," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 116, pp. 42-54, 2016.
- [3] H. Fan and I. Meng, "Automatic derivation of different levels of detail for 3D buildings modeled by CityGML". *24th International Cartography Conference*, 2016, Santiago, Chile, 15-21 Novenber, pp. 15-21.

- [4] G.A. Nys, F. Poux, and R. Billen, "CityJSON building generation from airborne LiDAR 3D point clouds," *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 9, 521, 2020.
- [5] F. Chiabrando, V. Di Pietra, A. Lingua, Y. Cho and J. "Jeon, An original application of image recognition based location in complex indoor environments." *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 6, 56, 2017.
- [6] C. Wang, S. Hou, C. Wen, Z. Gong, Q. Li, X. Sun and J. Li, "Semantic line framework-based indoor building modeling using backpacked laser scanning point cloud," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 143, pp. 150-166, 2018.
- [7] S. Nebiker, J. Meyer, S. Blaser, M. Ammann and S. Rhyner, "Outdoor mobile mapping and AI-based 3D object detection with low-cost RGB-D cameras: The use case of on-street parking statistics," *Remote Sens.*, vol. 13, 3099, 2021.
- [8] I. Toschi, M.M. Ramos, E. Nocerino, F. Menna, F. Remondino, K. Moe, D. Poli, K. Lrgat and F. Fassi, "Oblique photogrammetry supporting 3D urban reconstruction of complex scenarios." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-1/W1, pp. 519-526, 2017.
- [9] D. Anton, P. Pineda, B. Medjdoub and A Iranzo, "As-built 3D heritage city modelling to support numerical structural analysis: Application to the assessment of an archaeological remain." *Remote Sens.*, vol. 11, 1276, 2019.
- [10] R. Giffinger and H. Gudrun, "Smart cities ranking: an effective instrument for the positioning of the cities?. ACE: Architecture," *City and Environment*, vol. 4, No. 12, pp. 7-26, 2010.
- [11] B. Yang, "Developing a mobile mapping system for 3D GIS and smart city planning." *Sustainability*, vol. 11, 3713, 2019.
- [12] S. Shirowzhan, W. Tan and S.M.E. Sepasgozar, "Digital twin and CyberGIS for improving connectivity and measuring the impact of infrastructure construction planning in smart cities," *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 9, 240, 2020.
- [13] T.H. Kim, C. Ramos and M. Sabah, "Smart City and IoT," *Future Generation Computer Systems*, vol. 76, pp. 159-162, 2017.
- [14] A.S. Syed, D. Sierra-Sosa, A. Kumar and A. Elmaghraby, "IoT in smart cities: A survey of technologies, practices and challenges." *Smart Cities*, vol. 4, pp. 429-475, 2021.
- [15] J.M.L. Domínguez, F. Al-Tam, T.J.M. Sanguino and N. Correia, "Analysis of machine learning techniques applied to sensory detection of vehicles in intelligent crosswalks." *Sensors*, vol. 20, 6019, 2020.
- [16] B. Höfle and M. Hollaus, "Urban vegetation detection using high density full waveform airborne lidar data-combination of object-based image and point cloud analysis." *Int. Arch. Photogramm Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. XXXVIII-7B, pp. 281-286, 2010.
- [17] M.H. Stanley and D.F. Laefer, "Metrics for erial, urban LiDAR point clouds," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 175, pp. 168-181, 2021.
- [18] Leica Geosystems. Available: <https://leica-geosystems.com/products/mobile-mapping-systems> (Erişim Tarihi: 08.05.2022)
- [19] C. Altuntas, "Integration of point clouds originated from laser scanner and photogrammetric images for visualization of complex details of historical buildings." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5/W4, pp. 431-435, 2015.
- [20] S.M.E. Sepasgozar, P.J. Forsythe and S. Shirowzhan, "Scanners And Photography: A Combined Framework," *40th Australasian Universities Building Education Association (AUBEA) Conference*, 2016. Cairns, Australia , 6-8 July, pp. 819-828.
- [21] S. Sepasgozar, S. Lim, S. Shirowzhan, P. Kim and Z.M. Nadoushani, "Utilisation of a new terrestrial scanner for reconstruction of as-built models: A comparative study," *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2015, Oulu, Finland, 15-18 June, pp. 1-9.
- [22] H. Lahamy and D.D. Lichti, "Towards real-time and rotation-invariant American sign language alphabet recognition using a range camera." *Sensors*, vol. 12, no. 11, pp. 14416-14441, 2012.
- [23] M. Yekkehfallah, M. Yang, Z. Cai, L. Li and C. Wang, "Accurate 3D localization using RGB-TOF camera and IMU for industrial mobile robots," *Robotica*, vol. 39, no. 10, pp. 1816-1833, 2021.
- [24] J. Wülfing, J. Hertzberg, K. Lingemann, A. Nüchter, T. Wiemann, and S. Stiene, "Towards real time robot 6D localization in a polygonal indoor map based on 3D ToF camera data." *IFAC Proceedings*, vol. 43, No. 16, pp. 91-96, 2010.
- [25] L. Cao, H. Liu, X. Fu, Z. Zhang, X. Shen and H. Ruan, "Comparison of UAV LiDAR and digital aerial photogrammetry point clouds for estimating forest structural attributes in subtropical planted forests," *Forests*, vol. 10, 145, 2019.
- [26] N. Haala, M. Rothermel and S. Cavegn, "Extracting 3D urban models from oblique aerial images, Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)," *IEEE Xplore*, vol. 15201729, pp. 1-4, 2015.
- [27] R. Niederheiser, M. Winkler, V. Di Cecco, et. al., "Using automated vegetation cover estimation from close-range photogrammetric point clouds to compare vegetation location properties in mountain terrain." *GIScience & Remote Sensing*, Vol. 58, No. 1, pp. 120-137, 2021.
- [28] Velodyne Lidar, Available: <https://velodynelidar.com/products/velarray-m1600/> (Erişim Tarihi: 08.05.2022)
- [29] Quanergy, Available: <https://quanergy.com/applications/smart-city/> (Erişim Tarihi: 06.05.2022)
- [30] Bosch, Available: <https://www.bosch.com.tr/ueruen-ve-hizmetlerimiz/akilli-sehirler/> (Erişim Tarihi: 06.05.2022)
- [31] Hitachi, Available: https://social-innovation.hitachi/en-us/think-ahead/transportation/?WT.ac=si_us_sp_thiah_tran (Erişim Tarihi: 10.05.2022)
- [32] Paulus, S., 2019. Measuring crops in 3D: using geometry for plant phenotyping, *Plant Methods*, 15, 103.
- [33] Ouster, Available: <https://ouster.com/products/scanning-lidar/os1-sensor/> (Erişim Tarihi: 21.11.2022).