



Alınış tarihi (Received): 26.09.2022

Kabul tarihi (Accepted): 19.10.2022

Hava LiDAR Teknikleri: Lineer LiDAR ve Foton Sayma LiDAR

Cihan ALTUNTAŞ^{1,*}

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42250, Selçuklu, Konya, Türkiye

*Sorumlu yazar: caltuntas@ktun.edu.tr

ÖZET: LiDAR tekniklerindeki gelişmeler, hava platformlarından arazi topoğrafyası ölçmelerinde geleneksel lineer-mode LiDAR (LML) yöntemine alternatif olarak, Geiger-mode LiDAR (GML) ve tekli-foton LiDAR (Single-Photon LiDAR) yöntemlerini ortaya çıkarmıştır. Geleneksel LML çoklu foton kaydı ile mesafe ölçerken, GML ve SPL tek bir foton ile mesafe ölçer ve foton sayma LiDAR olarak isimlendirilirler. Bu yeni LiDAR teknikleri ile daha geniş alanlar kısa sürede ve düşük maliyetle ölçülebilmektedir. LiDAR ölçme verisi temel olarak sayısal yükseklik bilgisi içerir. Farklı LiDAR ölçme teknikleri bunlara ilave olarak yansıma değeri ve çoklu dönüş sinyallerini de kaydeder. Bu durum, açık arazi, bina ve bitki örtüsü ile kaplı alanlarda LiDAR ölçmelerinde farklılıklar oluşturur. Örneğin, çoklu dönüş sinyalleri kaydedilen LiDAR verisinden ağaç yükseklikleri belirlenebilirken, tek dönüş sinyali kaydedilen LiDAR verisinde bu mümkün değildir. Bu çalışmada LML ve foton sayma GML ve SPL teknikleri incelenmiştir. LiDAR tekniklerinin detayları verildikten sonra üstün ve zayıf özelliklerine vurgu yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Hava LiDAR, Lazer tarama, Lineer LiDAR, Geiger-mode LiDAR, Tekli foton LiDAR, Foton sayma LiDAR

Aerial LiDAR Techniques: Linear-Mode LiDAR and Photon Counting LiDAR

ABSTRACT: Developments in LiDAR techniques have revealed Geiger-mode LiDAR (GML) and single-photon LiDAR (Single-Photon LiDAR) methods as an alternative to the traditional linear-mode LiDAR (LML) for terrain topography measurements from aerial platforms. While conventional LML measures distance with multi-photon recording, GML and SPL measure distance with a single photon and are called as photon counting LiDAR. These new LiDAR techniques can measure larger areas in a short time and at low cost. LiDAR measurement data basically includes numerical altitude information. Different LiDAR measurement techniques additionally record the reflectance values and multiple returns of the signals. This situation creates differences in LiDAR measurements in bare, buildings and vegetation covered lands. For example, tree heights can be determined from LiDAR data recorded with multiple return signals, while this is not possible with LiDAR data recorded with single return signal. In this study, LML and photon counting GML and SPL techniques were examined. After giving the details of these LiDAR techniques, their superior and weak features are emphasized.

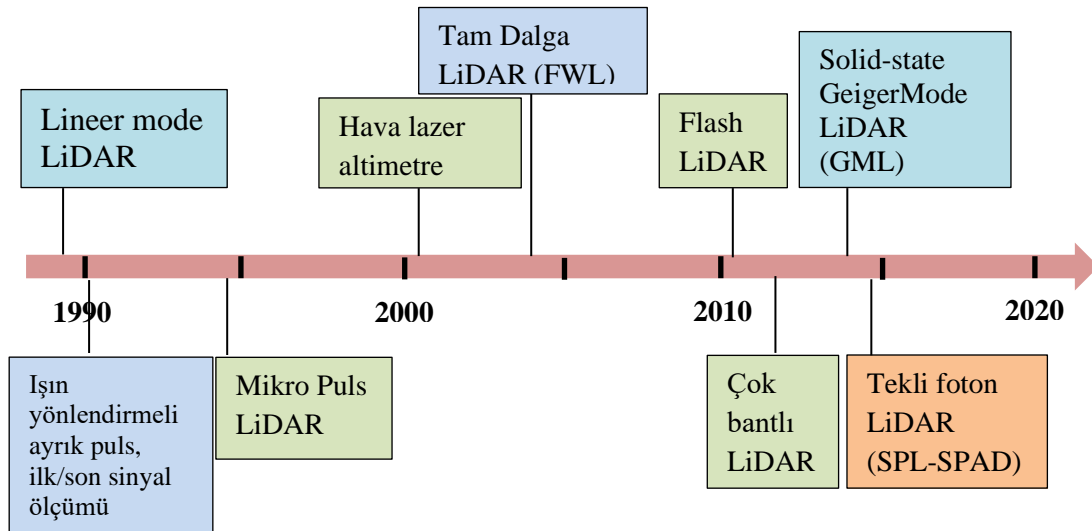
Keywords – Aerial LiDAR, Laser scanning, Linear-mode LiDAR, Geiger-mode LiDAR Single-photon LiDAR Photon counting LiDAR

1. Giriş

LiDAR (light detection and ranging), yüksek hızda ve doğrulukta mesafe ve konum ölçme yöntemidir. Ölçme alanına ait LiDAR verisi yoğun konum bilgisi içerir ve nokta bulutu olarak isimlendirilir. LiDAR sistemleri, lazer ışın kaynağı yani ölçme aletinin bulunduğu platform ve ölçme konfigürasyonuna göre yersel LiDAR (yersel lazer tarama), mobil LiDAR (yersel mobil LiDAR), hava LiDAR (helikopterden ve yaygın olarak uçaktan), İHA LiDAR ve uydu LiDAR (dopler LiDAR, laser altimetry) gibi isimlerle adlandırılır. İlk LiDAR

uygulamaları bir ışık kaynağından gönderilen ışınının farklı doğrultularda yönlendirilerek ölçme alanının belirli aralıkta nokta dizileri şeklinde ölçülmesidir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan geleneksel LiDAR taramada tek bir ışın yönlendirilerek tarama yapılır ve LML (lineer-mode LiDAR) yada çoklu foton LiDAR olarak da isimlendirilir.

Özellikle son otuz yılda LiDAR teknolojisindeki gelişmelerle nokta bulutu ölçmede yeni teknikler ortaya çıkmıştır. Bu yenilikler LiDAR cihazlarının boyutlarının küçülmesi, ağırlıklarının azalması, ölçme hızının artması ve maliyetin azalması şeklindedir. LiDAR aleti boyutlarının küçülmesi ve ağırlıklarının azalması İHA vb platformlardan LiDAR ölçüsünü mümkün hale getirmiştir. İHA' larda LiDAR kullanımı ile hava LiDAR ölçmelerinde uçuş yüksekliği azalmıştır. Ancak araştırmalar daha geniş alanların daha kısa sürede ölçülmesine yoğunlaşmış ve Geiger-mode LiDAR (GML) ve tekli foton LiDAR (single photon LiDAR) yöntemleri ortaya çıkmıştır. Yeni LiDAR tekniklerinin ortaya çıkması LiDAR görüntüleme sensörlerinin gelişmesi ile birlikte olmuştur. Geleneksel çoklu foton LiDAR tek bir görüntüleme sensörü (avalanche photodiode-APD) içerirken GML ve SPL matris dizilim piksellerden oluşan görüntüleme sensörüne sahiptir. Tek bir lazer ışını gönderilerek görüş alanını kaplayan bütün pikseller için ölçü değeri elde edilir (Hao ve ark., 2021; Mandlbürger ve ark., 2019; McManamon ve ark., 2017). LiDAR ölçme tekniklerinin tarihsel gelişim süreci Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Hava LiDAR sistemlerinin tarihsel süreçte değişimi
Figure 1. Historical development of aerial LiDAR techniques

Hava LiDAR tarama uçak yada helikopter gibi araçlardan yapılır ve ölçme sistemi lazer ışın kaynağına ilave olarak GPS (global positioning system) ve INS (inertial navigation system) gibi konumlama ve doğrultu belirleme bileşenlerinden oluşur. Geniş arazi topoğrafyaları kısa sürede ve yüksek doğrulukla ölçülebilir. Hava LiDAR taramada genel başarı ölçütleri nokta yoğunluğu, mesafe, doğruluk ve ölçme hızının maksimum, ölçü hatası, maliyet, süre ve enerji gereksiniminin minimum olmasına odaklanmıştır. Stanley ve Leafer (2021) kentsel alan ölçmelerinde LiDAR nokta bulutu yoğunluğu ve doğruluğu için beş ölçüt ortaya koyarak nokta yoğunluğunu yatay ve düşey nokta yoğunluğu olarak sınıflandırmıştır. Özellikle düşey yoğunluk ve doğruluğun artırılmasında bindirmeli ilave uçuşların etkili olduğu ifade edilmiştir.

LiDAR, öncelikle ayrıntılı sayısal yükseklik modelleri oluşturmak için kullanılır. Ayrıca elde edilen yansımaya değerlerinden ölçme alanının siyah-beyaz fotoğrafa benzer yansımaya görüntüsü de oluşturulabilir. Diğer yandan birden fazla bantta LiDAR ölçüsü ile hedef cisim hakkında daha fazla bilgi sahibi olunur, örneğin ağaç türü, nemlilik oranı tespiti vb (Okhrimenko ve ark., 2019; Kaasalainen ve Malkamaki, 2020). Ormanlık alana ait LiDAR ölçüsünün düzeltilmiş yansımaya değerleri bitki türlerinin sınıflandırılmasında kullanılır (Sparks ve Smith., 2022). Yansımaya değerleri için en iyi sonuç nadir yakını tarama noktaları için elde edilir (Yan ve ark., 2020). Diğer yandan yansımaya değerleri kullanılarak tarım arazileri ve kısmen yapılaşmış alanlardaki hendek (Roelens ve ark., 2018) ve karayolu kavşakları (Chen ve ark., 2019) gibi geometrik özellikler tespit edilebilir. Yapılan bir çalışmada eski tarihli haritalar ve LiDAR verileri birlikte kullanılarak kent ve kırsal alanda insan yapımı objeler ve bunlardaki değişimler tespit edilmiştir (Terrone ve ark., 2021; Lyu ve ark., 2020). Kıyı şeridi ve akarsularda su yüzeyine ait ölçülerin sınıflandırılması çok bantlı LiDAR nokta bulutundan gerçekleştirilmiştir (Shaker ve ark., 2019). Sayısal yükseklik modeli oluşturma ve toprak hareketlerinin izlenmesinde LiDAR ve fotogrametrik nokta bulutu ölçme yöntemleri birlikte yada ayrı olarak kullanılmıştır (Fernandez ve ark., 2020). LiDAR nokta bulutu toprak hareketleri gibi arazi değişimlerinin izlenmesinde etkili bir yöntemdir (Domlija ve ark., 2019).

LiDAR tarama, arazi topoğrafyası ve batimetrik ölçmelerde kullanılmaktadır (Yu ve ark., 2020; Mandlbürger ve Jutzi, 2019; Stoker ve ark., 2016). Yansımaya değeri ölçme ve çoklu dönüş sinyali kaydı geleneksel LiDAR yönteminin önemli bir üstünlüğüdür. Diğer yandan, GML ve SPL yöntemleri ile daha geniş alanlar düşük maliyetle ölçülebilmektedir (Ulrich and Pfennigbauer, 2016). SPL yansımaya değerlerini de ölçülebilmekte ve çoklu dönüş sinyalleri kaydedilebilmektedir. LML ve SPL yöntemleri yeni gelişmelere açık durumdadır ve birbirlerine göre üstün ve zayıf yanları bulunmaktadır. Bu çalışmada hava LiDAR temel prensipleri verildikten sonra tarama sistemleri ayrıntılı olarak ele alınmış ve karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Makalenin bundan sonrasında; 2.bölümde LiDAR koordinat sistemi ve yaygın teknik terimlerin açıklamaları, 3.bölümde LML, GML ve SPL içeren hava LiDAR teknikleri, 4.bölümde LiDAR tekniklerinin üstün ve zayıf özellikleri ile genel karşılaştırması ve son olarak 5.bölümde LiDAR tekniklerinin genel değerlendirmesini içeren sonuçlar yer almaktadır.

2. LiDAR Tarama Sistemi ve Terminolojisi

2.1. Lazer Sinyallerinin Digital Kodlara Dönüşümü

Lazer kaynağından gönderilen ve cisim yüzeyinden yansdıktan sonra tekrar alete dönen sinyaller digital kodlara dönüştürülerek ölçü değeri olarak kaydedilir. Bu işlemin ilk adımında dönen sinyalin radyasyonu avalanche photodiode (APD) sensörü tarafından analog sinyale çevrilir. Daha sonra analogue-to-digital convertor (ADC), analog sinyali digital formda ölçü değerine dönüştürür.

2.2. Hava LiDAR Mesafe Ölçme

Lazer kaynağı ile ölçülen tarama noktası arasındaki mesafe (r) ışının seyahat süresinden yararlanarak hesaplanır (Eşitlik 1).

$$r = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t \quad (1)$$

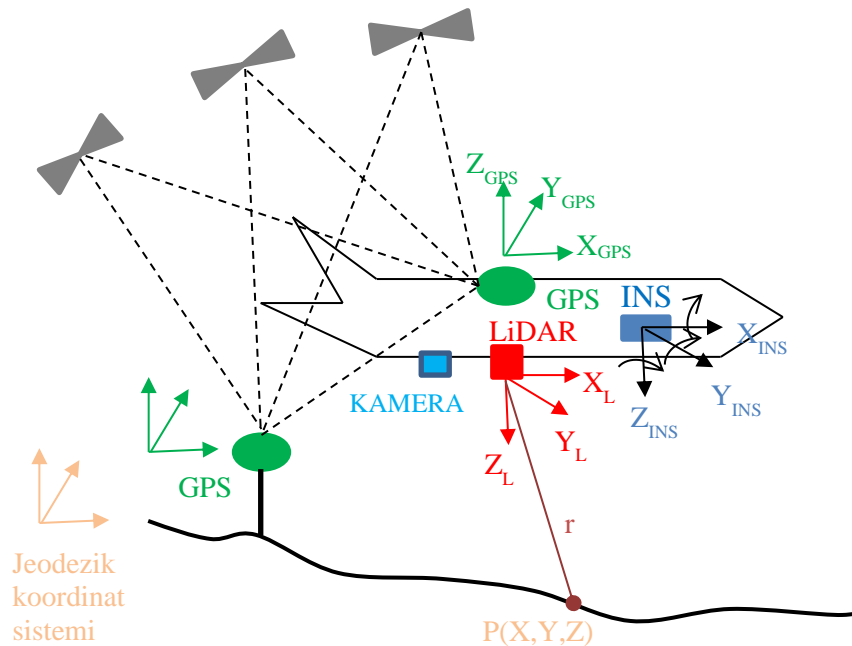
Eşitlik (1)'de; c bilinen ışık hızı, Δt ise ışının gönderilme anından cisim yüzeyine çarpıp geri dönüşüne kadar geçen süredir. Hava LiDAR mesafe ölçmede faz farkı (continuous wave) yöntemi genellikle kullanılmaz.

2.3. LiDAR Koordinat Sistemi

Hava LiDAR ölçmelerinde tarama noktasının alete olan mesafesi (r) ışın uçuş zamanı yada faz farkı yöntemi ile belirlenir. LiDAR ölçme tekniğine bağlı olarak ölçülen her tarama noktası için dönen ışının yansıma şiddeti (I) de kaydedilir. Işın yönlendirici sistemlerde ışının doğrultusu aletin tanımlı referans sistemine göre açı ölçme ünitesi ile belirlenir ve ölçülen mesafe değeri ile birlikte kaydedilir. Matris tabanlı LiDAR ölçme sistemlerinde ışın doğrultusu görüntü sensörünün odak uzaklığı ve piksel koordinatları ile belirlenir. LiDAR tarama sistemlerinde entegre kamera da bulunur ve fotoğraftan tarama noktalarına renk değeri atanır.

Hava LiDAR sistemi, ardışık ölçüler arasında koordinat ilişkisinin kurulması ve jeodezik koordinat sistemine dönüşüm için lazer birimine ek olarak GPS ve INS sistemlerini de içerir. Bu sayede ardışık tarama noktaları aynı bir koordinat sisteminde elde edilir.

Hava aracının her epokta konumu GPS ile ölçülür. Bu ölçme anında eksenler etrafındaki dönüklükler ise INS ile belirlenir. Ölçülen mesafe (r) değerini de kullanarak tarama noktasının koordinatları elde edilir (Şekil 2). Sistem bileşenlerinin koordinat sistemleri arasında ki dönüşümler ve tarama noktası koordinatının hesaplanması başka bir makale konusu olacak derecede detaylıdır ve burada bu kadar bahsedilecektir.



Şekil 2. Hava LiDAR koordinat sistemi
Figure 2. Aerial LiDAR coordinate system

2.4. Puls Tekrarlama Frekansı

Puls tekrarlama frekansı (pulse repetition frequency) lazer biriminin bir saniyede gönderdiği puls sayısıdır ve ölçme hızını ifade eder. PRF yüksek olması nokta yoğunluğunun yüksek olmasını dolayısıyla yüksek çözünürlüğe karşılıktır. LiDAR ünitesinin ölçme hızı yüksek

olursa daha yüksek uçuş irtifasından istenilen nokta yoğunluğunda ölçü yapılabilir. Uçuş yüksekliğinin artması daha geniş tarama bandı ölçümü, diğer yandan uçuş süresi ve maliyetin azaltılması demektir. PRF için 10kHz, 10000 nokta/s demektir. Puls LiDAR sistemlerinde PRF değeri 1-2MHz kadar civarındadır.

2.5. Puls Boyu

Lazer puls boyu ölçülen mesafe için çözünürlüğü ifade eder. Bu değer hava LiDAR ölçmelerinde düşey doğruluğa karşılık gelir. Puls yöntemi kullanan LiDAR aletlerinde puls boyu 2-5ns (30-75cm) kadardır. Yani düşey mesafe ölçümünde puls boyundan daha küçük ayrıntılar tespit edilemez. Tam dalga LiDAR (full waveform LiDAR) ile mesafe ölçümündeki bu olumsuzluk giderilmiştir. FWL, ayrık (discrete) puls yöntemine kıyasla daha fazla fiziksel ayrıntıyı ölçebilir.

2.6. Sinyal Gücü ve İraksama Açısı

Lazer sinyalinin maksimum ölçme mesafesi sinyal gücü ve ölçme yüzeyinin yansıtma oranına bağlıdır. Cisim yüzeyinden geri yansıyan ışıktan ölçü değeri elde edilebilmesi için yansıyan ışının şiddeti belirli eşik değerinin üstünde olmalıdır. Bu nedenle daha yüksek uçuş seviyesinden topoğrafik LiDAR ölçüsü daha yüksek sinyal gücü gerektirir.

LiDAR ışınının yer izi çapı uçuş yüksekliği ve ışın ıraksama açısına bağlıdır. Örneğin ıraksama açısı 0.4mrad olan bir LiDAR ile 1000m uçuş yüksekliğinden tarama yapılması durumunda yer üzerindeki ışın izi çapı 40cm olacaktır. Uçuş yüksekliğinin artırılması durumunda ışın izi çapı artar. Uçuş yüksekliğinin artmasına rağmen aynı ışın çapı değerinin korunması istendiğinde ıraksama açısı 0.2mrad olan LiDAR kullanılmalıdır. Diğer yandan, uçuş yüksekliğinin artması PRF değerinin artmasını gerektirir. Bu durumda sinyal gücü zayıflayacağı için sinyal gürültü oranı (signal-to-noise ratio) değeri küçülür.

2.7. Çoklu Dönüş Sinyali

Lazer ışınının çarptığı yüzeyden belirli bir miktarı geri döner ve dönen sinyalin şiddeti ölçme için yeterli ise mesafe ölçülür. Işının diğer kalan kısmı yoluna devam ederse aynı ışın yolu üzerinde başka bir yüzeye çarparak geri yansır. Bu yansıyan kısım da yeterli enerji seviyesinde ise mesafe ölçülür. Bu şekilde bir puls için birden fazla mesafe ölçüsü elde edilir. Bu durum genellikle ağaçlık alanlarda olur ve ilk ve son dönüş sinyalleri farkı ile ağaç yükseklikleri hesaplanır. Ölçme aletleri bir ışın için genellikle dört dönüş sinyali kaydederler. Bu sinyallerde ilk dönüş sinyalinin şiddeti genellikle en yüksektir. Dönüş sinyallerinin her biri için bu şekilde koordinat hesaplanabilir. LiDAR ölçme yalnızca aletsel bir değer değil aynı zamanda verilerin değerlendirilmesini içeren bir yazılım da gerektirir ki çoklu dönüş sinyallerinin tespiti bu yazılımlarla mümkün olmaktadır.

2.8. Tam Dalga LiDAR

Tam dalga LiDAR (FWL) tekniğinde cisim yüzeyinden yansıyarak dönen lazer sinyali çok küçük zaman aralıklarında kesintisiz olarak kaydedilir. Dolayısıyla bu yöntemde çok yoğun bir veri kaydı yapılır. Veri kaydı ilk dönüş sinyali ile başlar son dönüş sinyaline kadar devam eder. Her puls için kaydedilen dönüş sinyalleri özellikle ağaç dalları ve altındaki topoğrafyanın detaylı olarak ölçülmesini sağlar. Elde edilen verinin analizinden yüzey pürüzlüğü, eğimi ve ışın izi alanındaki arazi örtüsü türüne ait bilgiler çıkarılabilir. Ayrıca çoklu dönüş sinyalleri analiz edilerek ağaç yükseklikleri belirlenebilir.

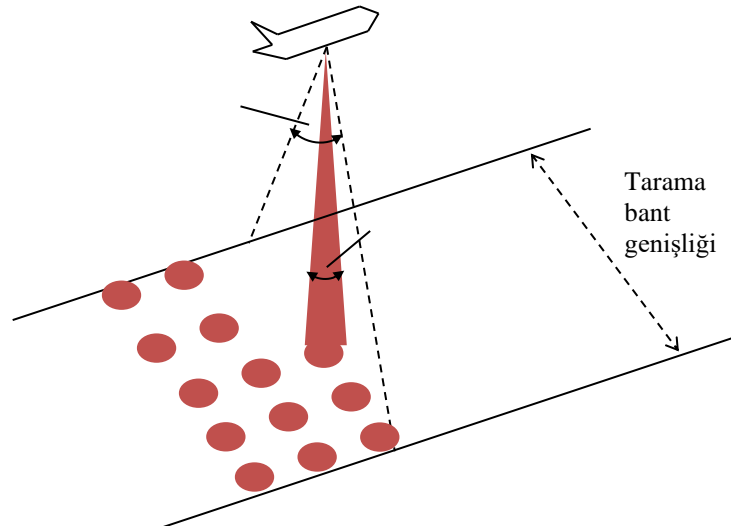
3. Hava LiDAR Teknikleri

Hava LiDAR denildiğinde genellikle uçaktan 600m ve daha yüksek irtifadan yapılan LiDAR ölçmeleri ifade edilir. İHA LiDAR ölçmeleri daha düşük uçuş yüksekliğinden gerçekleştirilir. İHA LiDAR ölçmelerinde flash LiDAR yada çok kanallı dönen LiDAR (MSL) kullanılmaktadır. Bu çalışmada hava LiDAR ölçmelerinde kullanılan LML, GML ve SPL sistemleri incelenmiştir.

3.1. Lineer LiDAR

Geleneksel LiDAR yönteminde tek bir dedektör kullanılarak LiDAR sinyali ölçü değerine dönüştürülür. Ölçülen değerler cisim noktasının mesafesi (r), doğrultu açıları ve dönen ışının yansıma (I) şiddetidir. Bu ölçülerden tanımlı referans sistemine göre XYZ koordinatları hesaplanır. Puls yönteminde dönen bir ışından ölçü değeri elde edilebilmesi için en az 500 foton kaydedilmesi gerekir.

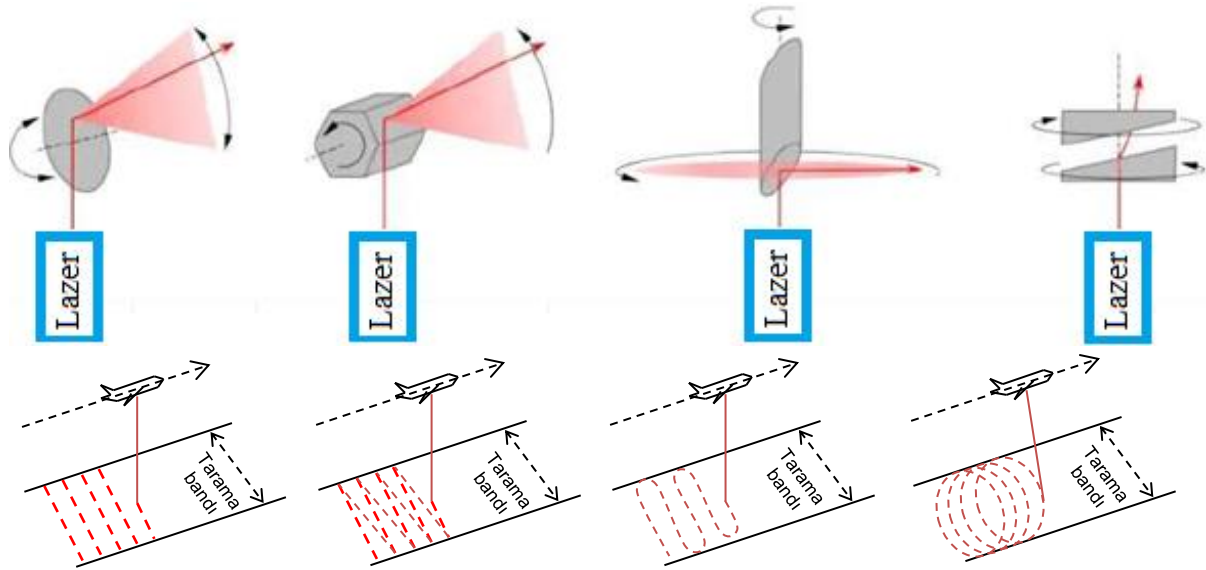
Işın izi çapı ortalama 10cm dir. Işın izinin merkezi olacak şekilde bir nokta ölçü noktası olarak alınır (Şekil 3). Ölçü doğruluğu düşey yönde 10cm, yatayda 30 cm civarındadır. Tarama ışını uçuş yönüne dik doğrultuda hareket eder. Dolayısıyla tarama noktaları düşey (nadir) doğrultunun her iki yanında belirli bir açı altında ölçülür. Tarama noktalarının doğruluğu nadirden uzaklaştıkça azalır. Taramalar ortalama 5000m uçuş yüksekliğinden yapılır ve bant genişliği 1-2km civarındadır. Sabit uçuş hızında nokta yoğunluğunu artırmak için PRF artırılmalıdır. LML puls yayım hızı PRF 2MHz' e ulaşmaktadır. Puls yayım hızının artırılması sistemin enerji gereksinimini de artırır. Ölçmede kullanılan lazer ışını dalga boyu topoğrafik LiDAR için 1064-1550nm arasında değişirken, batimetrik LiDAR 532nm dir.



Şekil 3. Geleneksel ışın yönlendirici LML tarama
Figure 3. Conventional light orientation LML

Işın yönlendirmede kullanılan tekniklere göre farklı tarama noktası görüntüsü (tarama paterni) oluşur. Işının yönlendirilmesinde salınan ayna (oscillating mirror), dönen poligonal

ayna (rotating polygon mirror), dönen ayna (rotating mirror) ve dağıtıcı prizmalar/ızgaralar (dispersive prisms or gratings) kullanılır (Şekil 4).



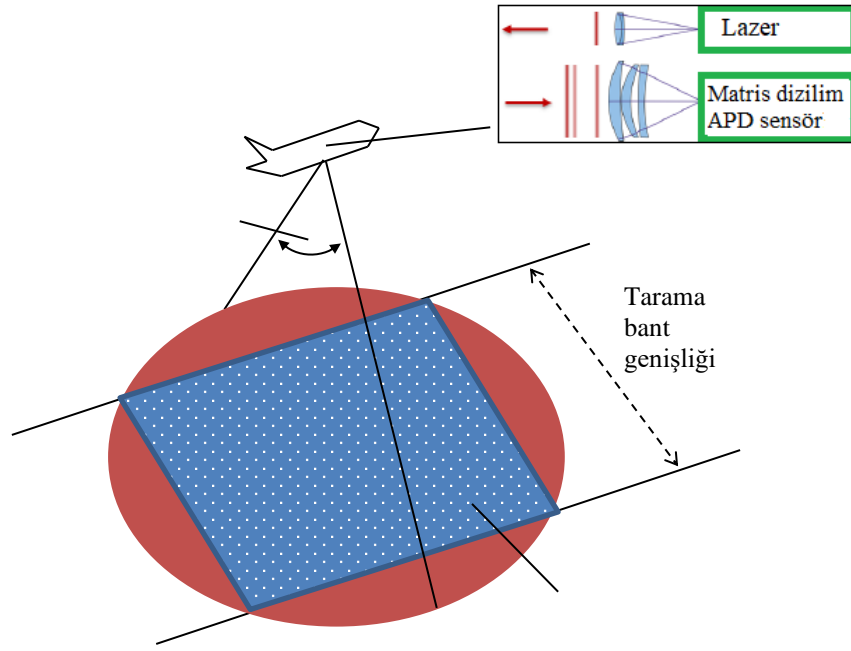
Şekil 4. LML ışın yönlendirme teknikleri ve tarama paternleri (Soldan sağa; salınan ayna, dönen poligon ayna, dönen ayna ve dağıtıcı prizmalar/ızgaralar yöntemleri)

Figure 4. Light orientation and their patterns in conventional LML (Oscillating mirror, rotating polygon mirror, rotating mirror, and dispersive prisms or gratings from left to right)

3.2. Geiger-Mode LiDAR

GML tek bir ışın göndererek tüm görüntü alanının nokta bulutu verisini eş zamanlı olarak ölçer. Gönderilen sinyal görüş alanındaki yüzeylerden geri yansır ve piksel diziliminde Geiger-mode APD (GmAPD) sensöründe (32x128 piksel) kaydedilir. Bir pikselin ölçü değeri oluşturabilmesi için bir yada birkaç foton yeterlidir. Her piksel yeterli seviye foton kaydetmesi durumunda time-to-digital convertor (TDC) foton kaydını durdurur. Ölçü değeri oluşturan pikseller bu andan itibaren aynı sinyale ait foton kaydı yapmazlar. Aynı sinyal için bütün pikseller ölçme işlemini tamamladıktan sonra pikseller, bir sonraki sinyalin foton kaydı için tekrar aktif hale gelir. Bir piksel ilk foton kaydından bir sonraki sinyalin foton kaydına kadar geçen sürede başka foton kaydı yapmaz ve bu süreye bekleme süresi (10-100ns) denir.

Tek ışın kullanıldığı için daha az enerjiye gereksinim duyar ve daha yüksek irtifadan ölçü yapılabilir (Şekil 5). Uçuş yüksekliğinin artması tarama bant genişliğinin de artması demektir. Bu sayede geniş alanlar daha az maliyet ile kısa sürede ölçülebilir. GML nokta yoğunluğu, piksel sayısı ve uçuş yüksekliğine bağlıdır. Piksel boyutu yani ışınlar arası açıklık tarama noktaları arası mesafeyi belirler. Piksel boyutu 35 mikron ve uçuş yüksekliğinin 1000m olması durumunda noktalar arası mesafe 35cm olacaktır. Tarama noktalarının yalnızca mesafeleri ölçülmektedir. GML yönteminde dönüş sinyalinin yansıma (I) değeri ölçülmez, ancak yerel nokta yoğunluğundan kestirim yapılarak belirlenebilir. Bunun için gelen fotonların sayısı dönen tüm foton sayısına oranlanarak istatistiksel bir analiz ile göreceli yansıma değerleri hesaplanır. Diğer yandan çoklu dönüş sinyalleri ölçülemediği için bitki örtüsü kaplı alanlarda arazi topoğrafyası ölçülemez.

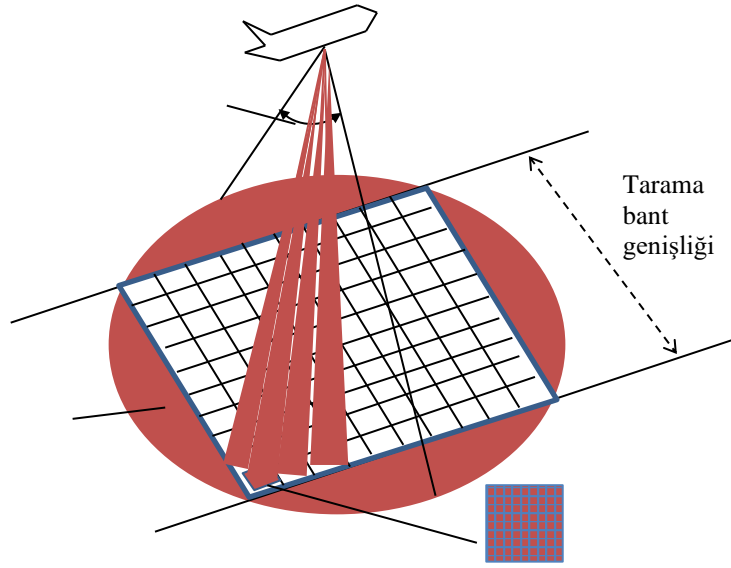


Şekil 5. Giger-mode LiDAR tarama
Figure 5. Giger-mode LiDAR scanning

3.3. Tekli Foton LiDAR

Tekli foton LiDAR (SPL) tekniğinin temeli GML yöntemidir. Yüzlerce foton kaydı gerektiren geleneksel LML yönteminden farklı olarak tek bir foton ile ölçülen noktanın alete olan mesafesi belirlenir. Bu durum 3B ölçüme daha geniş tarama mesafesi, nokta yoğunluğu ve uçuş yüksekliği sağlar. Tarama için enerji gereksinimi düşüktür. Dolayısıyla ölçme maliyeti düşük, ölçme hızı yüksektir. SPL topoğrafik, batimetrik, meteoroloji ve atmosferik LiDAR uygulamalarında kullanılır. 532nm LiDAR dalga boyuna sahip SPL ile su yüzeyi ve su altı (batimetrik) detaylar ölçülebilmektedir.

Foton kaydedici APD birimi (piksel) ilk sinyal kaydından sonra foton kaydını durdurur. Bütün sinyaller için foton kaydı yapıldıktan sonra pikseller daha sonraki sinyalin foton kaydı için tekrar aktif hale gelir. Foton kaydedici hücreler (pikseller) çoklu süre ölçerlere sahiptir ve ardışık ölçme için yenilenme süresi nanosaniye (1.6ns) birimindedir. Bu teknolojinin eksik penetrasyon kabiliyeti, yüksek ölçüm hızı ve zeminde yüksek oranda örtüşen lazer ayak izleri ile telafi edilir. Ticari olarak kullanılan Leica SPL100 aletinde gönderilen ışın mikro yansıtıcılar kullanılarak 10x10 luk alt birimlere ayrılır. Her alt birim cisim yüzeyinden yansıtılarak geri dönen sinyali kaydeden tek bir fotona duyarlı GML prensibi ile çalışan hücreler (SiPM) içerir. Alt birimler bindirmeli veri oluşturmayacak yada birimler arasında boşluk kalmayacak şekilde dizayn edilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. SPL LiDAR tarama. Tek kaynaktan gönderilen ışın 10x10 ışın demetine ayrılarak eş zamanlı ölçü yapılır.

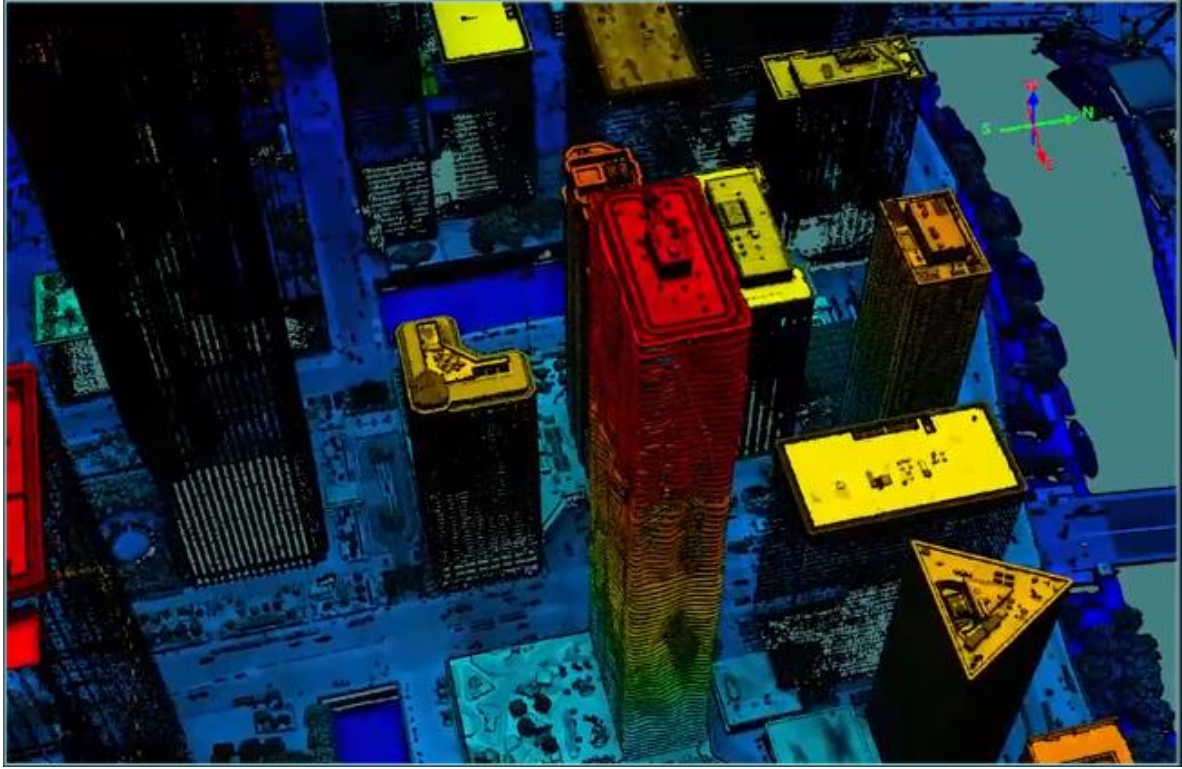
Figure 6. SPL scanning. Single light emitted from the source is divided 10x10 sub parts, and instantly measure the FoV.

4. Tartışma

Geleneksel LML; SPL' dan daha fazla bilgi içerir. LML tarama noktalarını tek bir sensör kullanarak ardışık olarak ölçer dolayısıyla cisimlerin hareketleri tespit edilemez. Nokta yoğunluğu, tarama ışını açısını değiştirilerek belirlenir.

GML ve SPL ölçme datası geometrik bilgi içeren nokta bulutu şeklindedir ve SfM (structure from motion) yöntemi ile fotoğraftan üretilen nokta bulutuna benzer. GML ve SPL foton sayıcı yöntemler olarak da isimlendirilir. Foton sayıcı terimi bir pikselde digital ölçü değeri oluşturulabilmesi için gerekli foton sayısını ifade eder (Aull, 2016).

GML ve SPL sistemleri tek bir ışın kullanarak ölçme alanının tamamının üç boyutlu bilgilerini ölçer. Işın gönderici lazer birimi hareketli parça içermez, dolayısıyla LiDAR sistemi sarsıntılardan etkilenmez. Görüntü sensörü matris formundadır ve görüş alanındaki noktaların tamamı anlık olarak ölçülür ve ölçü tekrar hızı çok yüksektir. Bu nedenle hareketli cisimler bu LiDAR datasından tespit edilebilir. GML ve SPL nokta yoğunluğu matris dizilim görüntüleme sensörünün piksel sayısına bağlıdır, uçuş yüksekliği arttıkça azalır. GML ve SPL ölçme ışını koni şeklinde yayıldığından tek bir ölçme ışını ile değişik açılardan aynı anda ölçü gerçekleştirilir. Eğik tarama ışınları (oblique LiDAR) dikey yüzeylerin ölçülmesinde üstünlük sağlar. Özellikle yüksek binaların bulunduğu kentsel alanlarda bina yan yüzeyleri LiDAR ile ölçülebilmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Geiger-mode LiDAR nokta bulutu (L3HARRIS, 2022)
 Figure 7. Point cloud of Geiger-Mode LiDAR (L3HARRIS, 2022)

Tablo 1. Hava LiDAR tarama sistemlerinin genel teknik özellikleri

Table 1. Prevalent technical specifications of aerial LiDAR scanning systems

	LML	GML	SPL
Tarama bant genişliği (@max.FoV ve yükseklik)	1km-3km	4.876km	2.3km
FoV	0°-60°	30°	30°
Foton sayısı	500-1000 foton	>1	>1
Enerji gereksinimi	200-900w	20-40w	5w
Puls genişliği		300-600ps	400ps
Dalga Boyu	1064-1550nm	1064nm	532nm
Lazer ışın açıklığı	0.23-0.70mrad		0.08mrad
Puls tekrar hızı (PRF)	200Hz-2MHz	50-90kHz	25-60kHz
Uçuş yüksekliği (max.)	400-5500m	4000-11000m	2000-4500m
Uçuş hızı	60m/s		100-200m/s
Nokta yoğunluğu	20pts/m ²	100pts/m ²	12-30pts/m ²
Ölçme hızı	929000pts/s	205000000pts/s	2500000pts/s
Piksel yenilenme süresi	0.6sec	NA	1.6ns
Dönüş sinyali sayısı	1,4, Çoklu max.15 dönüş	Çoklu	Çoklu max.10 dönüş
Ölçü doğruluğu	5-10cm(V), 13-30cm(H)	NA	10cm(V), 15cm(H)
Tarama paterni	Çizgi	Matris	Matris
Boyutlar	50x50x50cm	NA	59.7x50.8x45.4cm
Ağırlık	20-48kg	NA	21.8 kg

LiDAR tarama sistemlerinde önemli parametrelerden biriside enerji gereksinimidir. LML tekniğinde ışının yönlendirilmesi ve yayılımı için gerekli enerji seviyesi oldukça yüksektir. GML ve SPL tek bir ölçme ışını kullanarak ölçü yapar ve daha düşük enerji gerektirir. Diğer yandan foton sayıcı LiDAR yöntemleri daha yüksek irtifadan ölçü yaparlar ve daha geniş bir tarama bandına sahiptir. Dolayısıyla geniş alanlar daha hızlı ve düşük maliyetle ölçülebilir. Hava LiDAR sistemlerinin genel özellikleri Tablo 1 de verilmiştir.

Yapılan çalışmalara göre GML' in ağaçlık alanlarda yapraklara nüfuz etme oranı LML ve SPL' dan daha düşüktür. LiDAR ölçmelerinde yükseklik modeli verisine ilave olarak önemli bir veri de yansıma değeridir. Yansıma görüntüsü LiDAR ölçüsünden detay seçimini mümkün kılmaktadır (Tablo 2). Yapılan araştırmalar; gece gündüz koşullarında, GML yansıma değerlerinin kendi arasında ve LML ile uyumlu olduğunu göstermiştir (Stoker ve ark., 2016).

LiDAR verilerinin digital ortamda kaydı LAS dosya formatında yapılmaktadır, ancak bu dosya formatı GML ve SPL verilerinin kaydı için uygun değildir. Bütün tarama tekniklerine ait LiDAR veri kaydını içerecek dosya formatı üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Tablo 2. Çoklu foton LML ve SPL karakteristik özellikleri

Table 2. Main specifications of multiphoton LML and SPL

	LML	SPL
Gürültü	Hatalı ölçü oranı çok düşük	Hatalı ölçü oranı nispeten yüksek
Çoklu dönüş	Her puls için çoklu dönüş	Çoklu dönüş kaydedilir.
Doğruluk	Yüksek doğrulukta konum bilgisi ve yansıma değeri	
Nokta yoğunluğu	Düşük nokta yoğunluğu	Aynı uçuş yüksekliğinde 10-100 kat yoğun nokta bulutu
Yansıma şiddeti	Doğrudan yüksek doğrulukta ölçülür	İstatistiksel analiz ile düşük çözünürlükte elde edilir.
Tarama bandı genişliği	Dar	Geniş
Ölçme hızı	Düşük	Yüksek
Maliyet	Yüksek	Düşük

5. Sonuç

GML ve SPL ile LiDAR taramada köklü değişiklikler olmuştur. Ancak yansıma değerinin doğrudan kaydedilememesi bu yöntemlerin bir zayıflığı olarak değerlendirilebilir. LiDAR araştırmalarının yoğunlaştığı doğrultu bu eksikliklerin ileriki yıllarda giderileceğini göstermektedir. Hava LiDAR tekniklerindeki bu yeniliklerin etkisi yersel ve mobil LiDAR ölçmelerine de yansımıştır. Özellikle sürücüsüz araçlarda araç etrafı hareketlerin tespitinde SPL yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel LML yönteminde de önemli gelişmeler olmuş, ölçme hızı, yoğunluk ve doğruluk artmıştır. LiDAR ölçmelerinde yenilikler özellikle alınan sinyallerden ölçü değeri üretilerek digital kodlara dönüştürülmesi ve görüntülenmesi aşaması ile ilgilidir. Diğer yandan LiDAR ölçmeleri alınan lazer sinyallerini analiz ederek bilgi üretimini içeren yoğun bir veri işlemeyi de gerektirir.

6. Kaynaklar

- Aull, B., 2016. Geiger-mode avalanche photodiode arrays integrated to all-digital CMOS circuits. *Sensors*, 16(4), 495, <https://doi.org/10.3390/s16040495>.
- Chen, Z., Liu, C., Wu, H., 2019. A higher-order tensor voting-based approach for road junction detection and delineation from airborne LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 150, 91-114, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.003>.
- Domlija, P., Bernat Gazibara, P., Arbanas, Z., Mihalic Arbanas, S., 2019. Identification and mapping of soil erosion processes using the visual interpretation of LiDAR imagery. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 8, 438, <https://doi.org/10.3390/ijgi8100438>.
- Fernandez, T., Pérez-García, J.L., Gómez-Lopez, J. M., Cardenal, J., Calero, J., Sanchez-Gomez, M., Delgado, J., Tovar-Pescador, J., 2020. Multitemporal analysis of gully erosion in olive groves by means of digital elevation models obtained with aerial photogrammetric and LiDAR data. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 9, 260, <https://doi.org/10.3390/ijgi9040260>.
- Hao, Q., Tao, Y., Cao, J., Cheng, Y. 2021. Development of pulsed-laser three-dimensional imaging flash LiDAR using APD arrays. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 63, 2492-2509, <https://doi.org/10.1002/mop.32978>.
- Kaasalainen, S., Malkamaki, T., 2020. Potential of active multispectral LiDAR for detecting low reflectance targets. *Optics Express*, 28(2), 1408-1416, <https://doi.org/10.1364/OE.379491>.
- Lyu, X., Hao, M, Shi, W., 2020. Building change detection using a shape context similarity model for LiDAR data. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 9, 678, <https://doi.org/10.3390/ijgi9110678>.
- L3HARRIS, 2022. <https://www.l3harris.com/all-capabilities/geiger-mode-lidar> [Erişim: 7 Nisan 2022]
- Mandlbürger, G., Jutzi, B., 2019. On the feasibility of water surface mapping with single photon LiDAR. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 8, 188, <https://doi.org/10.3390/ijgi8040188>.
- Mandlbürger, G., Lehner, H., Pfeifer, N., 2019. A comparison of single photon and full waveform LiDAR. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. IV-2/W5, 397-404, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-397-2019>.
- McManamon, P.F., Banks, P., Beck, J., Fried, D.G. Huntington, A.S., Watson, E.A., 2017. Comparison of flash LiDAR detector options. *Optical Engineering*, 56(3), 031223, <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.031223>.
- Okhrimenko, M., Coburn, C., Hopkinson, C., 2019. Multi-spectral LiDAR: Radiometric calibration, canopy spectral reflectance, and vegetation vertical SVI profiles. *Remote Sensing*, 11, 1556, <https://doi.org/10.3390/rs11131556>.
- Roelens, J., Höfle, B., Dondeyne, S., Orshoven, J.V., Diels, J., 2018. Drainage ditch extraction from airborne LiDAR point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 409-420, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.014>.
- Shaker, A., Yan, W.Y., LaRocque, P.E., 2019. Automatic land-water classification using multispectral airborne LiDAR data for near-shore and river environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 94-108, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.005>.
- Sparks, A.M., Smith, A.M.S., 2022. Accuracy of a LiDAR-Based Individual Tree Detection and Attribute Measurement Algorithm Developed to Inform Forest Products Supply Chain and Resource Management. *Forests*, 13(1), 3, <https://doi.org/10.3390/f13010003>.

- Stanley, M.H., Laefer, D.F., 2021. Metrics for aerial, urban LiDAR point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 175, 268-281, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.01.010>.
- Stoker, J.M., Abdullah, Q.A., Nayegandhi, A., Winehouse, J., 2016. Evaluation of single photon and Geiger mode LiDAR for the 3D elevation program. *Remote Sensing*, 8, 767, <https://doi.org/10.3390/rs8090767>.
- Terrone, M., Piana, P., Paliaga, G., Orazi, M.D., Faccini, F., 2021. Coupling historical maps and LiDAR data to identify man-made landforms in urban areas. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 10, 349, <https://doi.org/10.3390/ijgi10050349>.
- Ulrich, A., Pfennigbauer, M., 2016. Linear LIDAR versus Geiger-mode LIDAR: Impact on data properties and data quality. *Proc. of SPIE Vol. 9832*, 983204. doi: 10.1117/12.2223586
- Yan, W.Y., Ewijk, K.V., Treitz, P., Shaker, A., 2020. Effects of radiometric correction on cover type and spatial resolution for modeling plot level forest attributes using multispectral airborne LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169, 152-165, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.09.001>.
- Yu, X., Kukko, A., Kaartinen, H., Wang, Y., Liang, X., Matikainen, L., Hyypä, J., 2020. Comparing features of single and multi-photon LiDAR in boreal forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 168, 268-276, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.08.013>.