

Uçuş Zamanlı Üç Boyutlu Ölçme Teknikleri ve Flash LiDAR

Cihan Altuntaş^{1,*}

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

Özet

Lazer teknolojisinin ölçme aletlerinde kullanılmaya başlanması ölçme tekniklerinde büyük gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Bu sayede üç boyutlu ölçmede önceden mümkün olmayan ölçme hızı ve doğruluğuna ulaşılabilmektedir. 1990 lar da geliştirilen lazer tarayıcılar ile cisim yüzeyleri nokta dizileri şeklinde ölçülebilmektedir. Daha sonra, 2000 li yılların başında yaygınlaşmaya başlayan uçuş zamanlı kameralar (lazerli ölçme kamerası) ile görüntü alanı video çekim hızında üç boyutlu olarak ölçülebilmektedir. Ancak lazer tarayıcıların anlık ölçü yapamaması ve uçuş zamanlı kameraların kısa ölçme mesafesi yeni ölçme tekniklerini ortaya çıkarmış ve Flash LiDAR (yada Flash LiDAR kamera) ölçme tekniği geliştirilmiştir. Bu çalışmada İHA ve yersel araçlarla mobil topoğrafya ölçümü, robotik yönlendirme, araç navigasyonu, üç boyutlu modelleme vb. uygulamalarda yaygın olarak kullanılan Flash LiDAR ölçme tekniği açıklanmış ve kullanım alanları hakkında bilgiler verilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Lazer Tarayıcı, Uçuş Zamanlı Kamera, Nokta Bulutu, Flash LiDAR, Üç Boyutlu Ölçme

1. Giriş

Geçtiğimiz yüzyılın ikinci yarısında lazer teknolojisindeki hızlı gelişme pek çok alanda yeniliklere yol açmıştır. Sahip olduğu özellikler sayesinde lazer teknolojisi tıp, endüstri, eğlence ve ölçme çalışmalarında giderek artan bir oranda kullanılmaktadır. Işık hızının bugünkü değeri dahi 1970 li yıllardaki lazer teknolojisindeki gelişmeler sonunda tespit edilebilmiştir. Daha sonra lazer ışınları ölçme aletlerinde kullanılmaya başlanmış ve çok yüksek doğrulukta ölçümler yapılabilmektedir. Lazer ışınını ölçme aletlerinde kullanımını sağlayan temel özellikler; ışın açıklığının küçük, yönlendirilebilir ve ışın yolu boyunca enerjisinin çok az değişmesidir.

Lazer yardımıyla mesafe ölçmede temel prensip alet ile ölçülen nokta arasında ışının seyahat süresinin belirlenmesidir. Bilinen ışık hızı ve ışının seyahat süresinden yararlanarak mesafe ölçülmektedir. Diğer yandan ışının bilinen dalga boyundan yararlanarak ölçme yolu boyunca oluşan dalga sayısı ile de mesafe hesaplanabilmektedir. Ölçme aletleri mesafe ile birlikte cisim noktasından dönen lazer ışınının şiddetini de ölçerek kaydetmektedir.

Elektronik total stationlardan sonra lazer tarayıcıların kullanılmaya başlanması üç boyutlu modellemeye büyük hız kazandırmıştır. Işın uçuş zamanı ile ölçü yapan yersel lazer tarayıcılar cisim modelleme, topoğrafik ölçme gibi amaçlarla yaygın olarak kullanılmaktadır (Altuntaş vd. 2016, Hayakawa vd. 2016). Sensör teknolojisindeki hızlı gelişme ile birlikte 2000 li yılların başında ölçme hızında büyük gelişmeler olmuştur. Uçuş zamanı tekniğini kullanan kameralar görüş alanının tamamını eş zamanlı olarak ölçülebilmekte ve bu işlemi saniyede pek çok kez tekrarlayabilmektedir. Bu ölçme hızı sayesinde uçuş zamanlı kameralar, robot navigasyonu, hareket analizi, deformasyon görüntüleme gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Qi vd. 2014). Ancak sinyal gürültü oranındaki artış nedeniyle bu kameralar açık alan ölçmelerinden çok bina içi ölçmeler için daha uygundur (Li 2014). Bu olumsuzlukları giderecek çalışmalar 2010 yılında kullanılmaya başlanan Flash LiDAR teknolojisini beraberinde getirmiştir. Matris formunda görüntü sensörleri içeren flash kameralar bina içi ve açık arazi ölçmelerinde kullanılmaktadır (Laux 2010).

Lazer ışını, üç boyutlu ölçmelerde sadece uçuş zamanı tekniği ile kullanılmamaktadır. Kamera ve lazer ışık kaynağının bulunduğu aktif üçgenleme yöntemi ile de üç boyutlu ölçme yapılmaktadır. Diğer yandan ışın uçuş zamanı tekniği ile havadan LiDAR ölçmeleri de gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada yersel ölçmelerde kullanılan ışın uçuş zamanlı nokta bulutu ölçme teknikleri incelenmiştir. Işın uçuş zamanlı mesafe ölçme teknikleri açıklandıktan sonra üç boyutlu tarama nokta bulutunun nasıl elde edildiği açıklanarak üstün ve zayıf özellikleri belirtilmiştir.

2. Uçuş Zamanlı Mesafe Ölçme Teknikleri

2.1 Doğrudan Uçuş Zamanlı Ölçme (Puls Metodu)

Bu yöntemde ışının havada geçirdiği uçuş süresi ile mesafe ölçülür (Şekil 1). Lazer ışık kaynağından gönderilen ışının cisim yüzeyine çarpıp geri döndüğündeki süre aletin alıcı sensöründe kaydedilir ve mesafe ölçülür (Eşitlik 1).

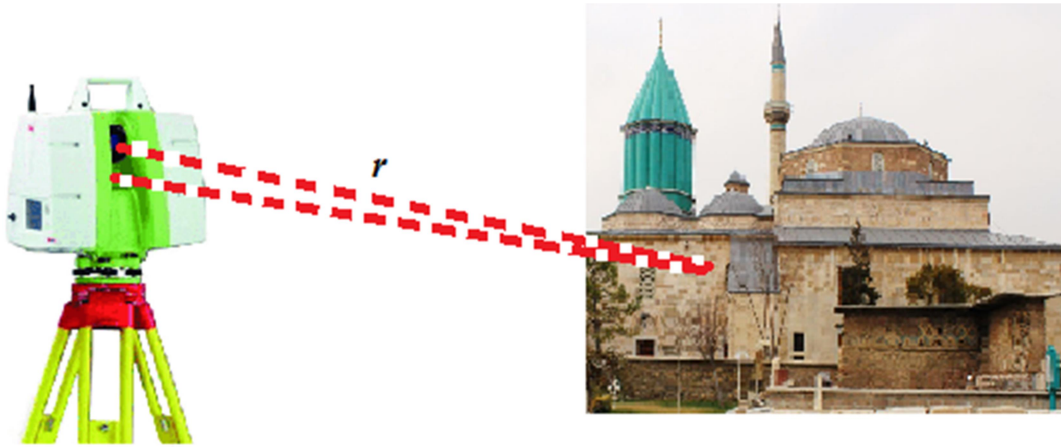
$$r = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

r : Alet ve cisim noktası arasındaki mesafe

c : Işık hızı

Δt : Işının havada seyahat süresidir

Lazer ışını alet ve ölçülen cisim noktası arasındaki mesafeyi iki kez kat ettiği için uçuş süresi ikiye bölünerek mesafe hesaplanır. Bu ölçme yönteminde doğruluk ışının aletten çıkış ve giriş sürelerinin belirlenme hassasiyeti ile doğrudan ilişkilidir. Örneğin uzunlukların 1mm doğruluk ile ölçülebilmesi için ışının seyahat süresinin $6.67 \cdot 10^{-2}$ sn hassasiyet ile belirlenmesi gerekir. Işın gönderici ve kaydedici sensörlerin alet içerisinde aynı düzey konumda hizalanması da uçuş zamanını etkiler. Diğer yandan Eşitlik (1) de c ışığın boşluktaki hızıdır. Oysa ölçme ışını farklı hava ortamlarından geçer ve bu hava ortamları ışının seyahat süresini etkileyerek ölçü hatasına neden olur. Dolayısıyla bu ölçme yönteminde doğruluk ölçü yapılan ortamın atmosferik koşullarına doğrudan bağlıdır ve ölçü doğruluğu düşüktür. Dönen ışının enerjisi yüzeyin yansıtma özelliğine bağlı olarak değişir. Yansıtma özelliğinin yüksek olması aletin maksimum ölçme mesafesini de etkiler. Gelen ışını yansıtma oranı yüksek olan yüzeylerde maksimum ölçme mesafesi daha uzundur. Ancak ölçme mesafesi ve doğruluk yalnızca ışının enerjisine bağlı olmayıp başka etkenlerde vardır. Dolayısıyla uzun mesafelerde sinyal gürültü oranı (SNR) artar. Teorik olarak düşünüldüğünde dönen ışının enerjisi aletten gönderilen ışının enerjisinden daha düşüktür. Çünkü cisim yüzeyi ve hava ile temas ışının enerjisini azaltır. Uzun mesafelerin ölçülmesi yüksek enerji gerektirir. Diğer yandan ölçü hızını yani ölçünün tekrarlanma frekansını artırmak içinde puls sayısının artırılması gerekir. Bu durum elektronik sinyal işleme devrelerinin hızını artırmakla mümkündür ve ölçme aletinin maliyetini artırır. Puls yöntemi uzun mesafe açık arazi ölçmeleri için oldukça uygundur.



Şekil 1. Doğrudan ışın uçuş zamanlı (puls metodu) mesafe ölçme.

2.2. Dolaylı Uçuş Zamanlı Ölçme (Genlik Modülasyonu (AMCW) ve Frekans Modülasyonu (FMCW))

Ölçme ışını hava şartlarından oldukça fazla etkilendiğinden yüksek doğruluk elde edilebilmesi için ölçme ışını bir taşıyıcı dalga ile modüle edilerek ölçü yapılır. Bu modülasyonda genlik ve faz modülasyonu yaygın olarak kullanılır. Genel olarak dolaylı uçuş zamanlı ölçmede ışının tam dalga boyları sayısına artık kısım yani faz farkı da eklenerek mesafe ölçülür. Bu ölçme Eşitlik (2) ile ifade edilir.

$$r = \frac{N \cdot \lambda}{2} + \frac{\Delta \phi \cdot \lambda}{4\pi} \quad (2)$$

r : Ölçülen mesafe

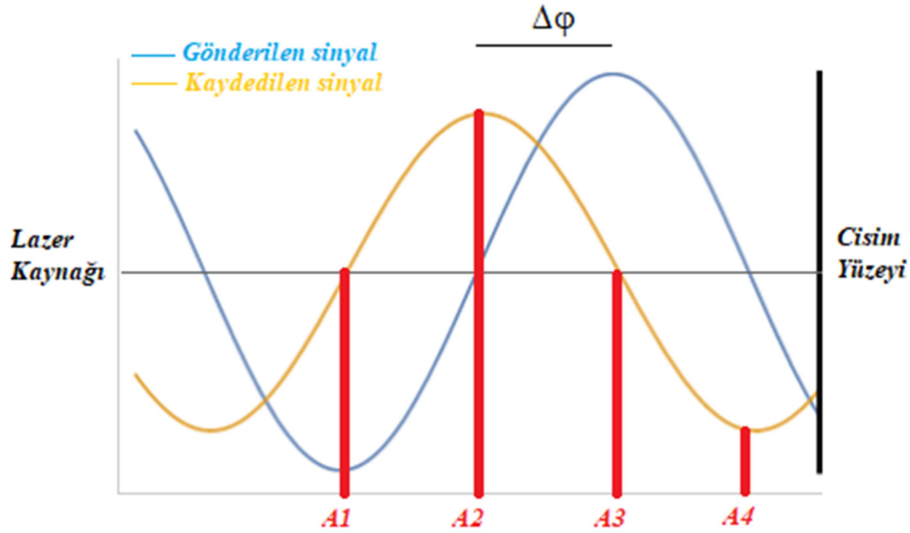
$\Delta \phi$: Artık dalga boyu faz açısı

N : Tam dalga boyları sayısı

λ : Dalga boyu

Gönderilen ışının tam dalga boyları sayısı bir sayaç yardımı ile ölçülür. Artık dalga boyunun ölçülmesi genlik modülasyonu (AMCW) yönteminde giden ve dönen ışınların dalga boylarının dört ayrı bölgesindeki şiddetleri karşılaştırılarak yapılır (Şekil 2). Buna göre artık kısma karşılık gelen faz açısı Eşitlik (3) ile hesaplanır (Kahlmann 2007, Li 2014).

$$\Delta \phi = \arctan\left(\frac{A_1 - A_3}{A_2 - A_4}\right) \quad (3)$$

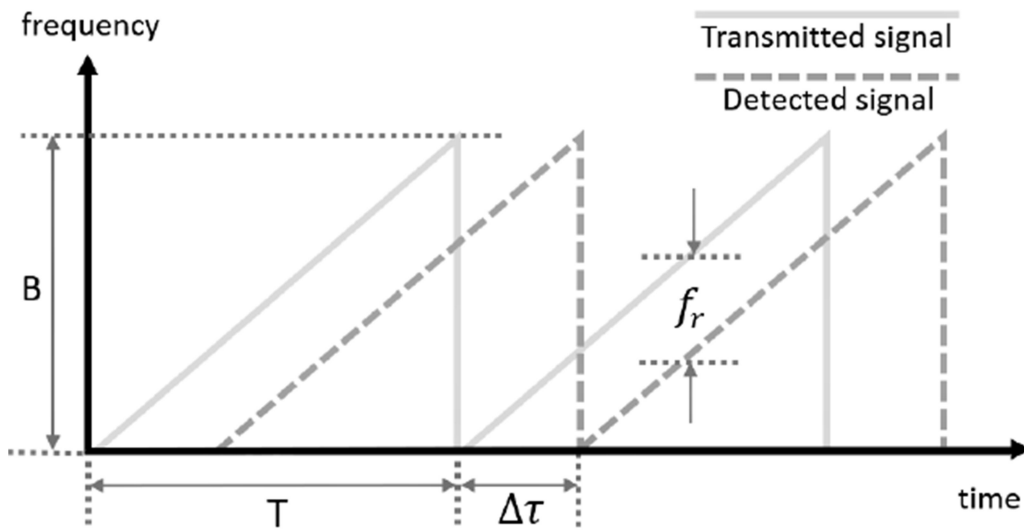


Şekil 2. Genlik modülasyonu (AMCW) faz karşılaştırma

Faz farkı yönteminde frekansın artırılması artık faz açısına karşılık gelen mesafe belirsizliğini azaltır. Faz farkı yöntemi ölçü belirsizliğini belirli derecede giderir. Mesafe doğruluğunu artırmanın diğer bir yolu integraton time (IT) değerinin artırılmasıdır. IT dönen sinyal için kabul edilebilir sinyal oranı (şiddeti) dir. IT değerinin artırılması kabul edilebilir ölçü sinyaline karşılık gelecek şekilde ölçü periyodunun artırılmasını ifade eder (Piatti ve Rinaudo 2012). Yüksek IT değeri kamera ölçü hızının azalmasına neden olur. AMCW faz farkı ölçüsü dönen sinyal belirli şiddette ve SNR oranı belirli değer altında ise uygulanabilmektedir. Dolayısıyla kamera sinyalleri şiddeti belirli değer altına düşmeyecek şekilde ölçme mesafeleri kısadır. Bu nedenle daha çok bina içi ölçmeler için uygundur ve üç boyutlu ölçme, robotik navigasyon ve video oyunları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

Frekans modülasyonu (FMCW) yönteminde taşıyıcı dalganın frekansı ölçme ışınının dalga hareketine uyacak şekilde periyodik olarak artırılıp azaltılarak değiştirilir. Cisim yüzeyine çarpıp alete geri dönen sinyal gönderilen sinyal ile karşılaştırılarak faz farkı belirlenir. Alet ve ölçülen noktanın sabit olması durumunda ışının seyahat süresine (ToF) karşılık sabit bir frekans farkı değeri hesaplanabilir (Eşitlik 4). Yada değişken frekans için artık dalga boyu hesaplanır. Bu durumda, dalga boyuna karşılık gelen anlık frekans değişken olduğu için artık kısımdaki frekans değeri uçuş zamanı ($\Delta\tau$) ile orantılı olacaktır (Şekil 3).

$$f_r = slope \cdot \Delta\tau = \frac{B}{T} t_{of} = \frac{B}{T} \frac{2R}{c} \Rightarrow R = f_r \frac{cT}{2B} \quad (4)$$



Şekil 3. Frekans modülasyonu ve ana parametrelerin belirlenmesi (Royo ve Garcia, 2019)

3. Nokta Bulutu Ölçme Teknikleri

LiDAR yöntemi ile ölçülen mesafelerden 3B koordinat bilgisine dolayısıyla nokta bulutuna ulaşmak için tanımlı referans sisteminde ölçme ışını doğrultusunun da bilinmesi gerekir. Ölçü doğrusu lazer tarayıcılarda olduğu gibi ya

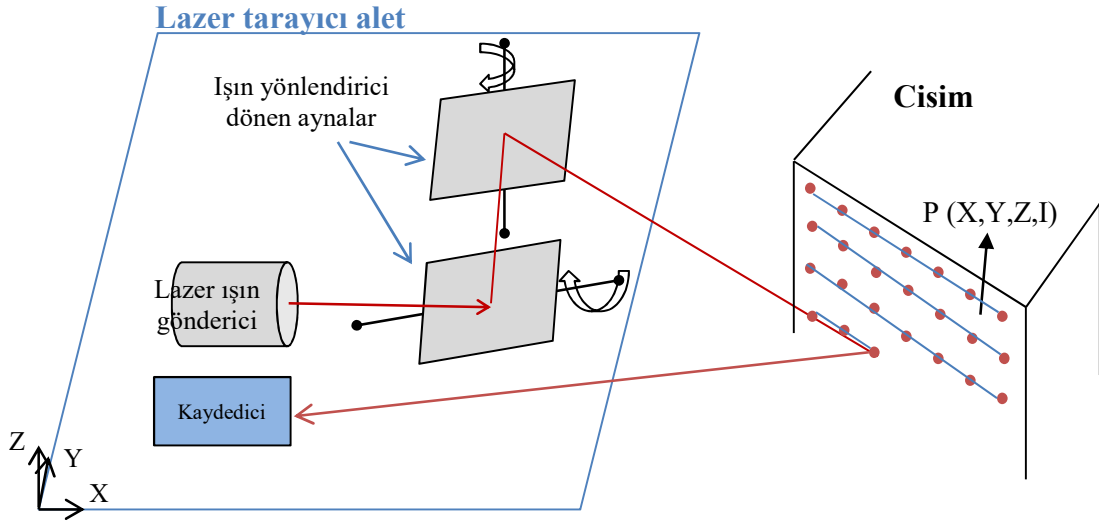
doğrultu açıları ile yada uçuş zamanlı kamera (UZK) da olduğu gibi piksel koordinatları ile tanımlıdır. Ölçme aletinin faz merkezi referans sistemin merkezidir. Dolayısıyla 3B koordinatlar tarayıcı alet merkezli bir koordinat sisteminde ölçülür.

3.1. Işın Yönlendirici Tarayıcılar

Lazer tarama yönteminde ölçme ışını galvanometre yada dönen aynalar ile yönlendirilerek görüş alanındaki detaylar nokta dizisi şeklinde taranır (Şekil 4). Panoramik tarayıcılarda ölçme alanı 360(H)x290(V) derecelik açı altında taranır. Tarama ışınına ait mesafe değerinden 3B koordinatlara geçiş için yatay ve düşey açılar ölçülür. Bu aşamada problem kutupsal koordinatlardan dik koordinatlara geçiş şekline dönüşür ki her tarama noktasına ait (r, α, β) değerlerinden xyz dik koordinatları hesaplanır (Altuntaş ve Yıldız 2008).

Ayrıca her tarama noktası için dönen ışının yansıma şiddeti (I) de ölçülür ve kaydedilir. Ölçülerin renklendirilmesi tarayıcıya entegre kamera görüntüleri ile gerçekleştirilir. Lazer tarama sistemlerinde puls metodu ve faz farkı yöntemleri kullanılır. Puls yöntemini kullanan tarayıcılarda ölçme mesafesi 1km den daha uzun olabilir ve açık arazi topoğrafya ölçmeleri için daha uygundur. Ölçme mesafesine bağlı olarak enerji gereksinimi daha yüksektir. Faz farkı yöntemini kullanan tarayıcılarda ölçme mesafesi daha kısa 600m civarındadır ancak doğruluk puls metoduna göre yüksektir. Puls yönteminde ölçü doğruluğu 5-10cm@1km civarındadır ve mesafe arttıkça azalır. Ancak faz farkı yönteminde mesafe ölçme doğruluğu 1.5cm@1km dir. Ölçme hızı faz farkı yönteminde daha yüksektir.

Lazer tarayıcılar çok sayıda mekanik parça içerir ve bu parçaların matematiksel modele tam uygun olarak bir araya getirilmeleri oldukça zordur. Dolayısıyla bu tarayıcılar, sistemin yapısından kaynaklanan ölçü hataları içerirler ve sarsıntı ve çarpmalara karşı korunmaları gerekir. Mekanik tarayıcılardaki bu olumsuzlukların giderilmesi için satır yada matris şeklinde sensörlerden (solid-state sensor) oluşan tarayıcılar (uzk kameralar) geliştirilmiştir (Royo ve Garcia 2019). Matris kaydedici (solid-state) kameralar özellikle araç otomasyonu ve robot navigasyonu gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4. Işın yönlendirici lazer tarayıcı şematik gösterimi

3.2. Uçuş Zamanlı Kameralar

Solid-state kamerada optik bir ışık kaynağından gönderilen ışın görüş alanındaki cisim yüzeyine eş zamanlı olarak gönderilir ve dönen sinyal matris formunda bir sensör dizisi tarafından kaydedilir. Flash LiDAR teknolojisi yeni gelişmeye başlayan bir teknolojidir. Ölçme alanını ardışık nokta dizileri şeklinde ölçen lazer tarama gibi yöntemlerden farklı olarak tek bir sinyal gönderilerek tüm piksellere karşılık gelen detay noktaları eş zamanlı olarak ölçülür. Ölçme işlemi video çekim hızında gerçekleştirilir dolayısıyla mobil ölçme yapılabilir. Ölçme ışını puls yada faz farkı yöntemine (AMCW yada FMCW) göre olabilir. FMCW ve flash LiDAR ölçme mesafesi AMCW den daha uzundur. Uçuş zamanlı kameralarda (ToF camera) AMCW yöntemi kullanılır. Flash LiDAR kamerada doğrudan ışın uçuş zamanı ile ölçü yapılır.

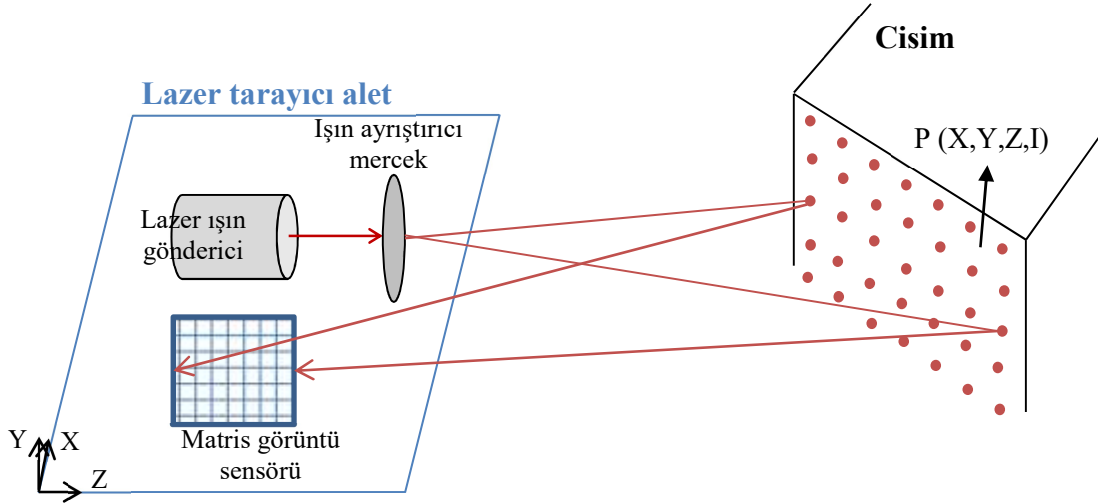
3.2.1. AMCW Uçuş Zamanlı Kamera

Optik bir merkezden tek bir ölçme sinyali gönderilir ve matris şeklindeki piksellere karşılık gelen mesafeler AMCW faz ölçme tekniği kullanılarak ölçülür. Uçuş zamanlı lazerli ölçme kameraları bu ölçme yöntemine en iyi örnektir. Ölçme kamerasının boyutları oldukça küçüktür. Kamerada görüntü iğne deliği kamera modeline göre oluşturulur. Ölçme mesafesi maksimum 10m civarındadır. Farklı modülasyon frekansları ile ölçü yapılabilir ve ölçme hızı 60fps

civarındadır. Ölçmede yakın kızılötesi bölgesinde 850 nm dalga boylu ışınlar kullanılır. Dış mekan ölçmelerinde güneş ışınları kameranın görüntü sensöründe fazladan yansımaya değerleri oluşturarak SNR oranını artırmaktadır. Bu nedenle açık alan ölçmeleri için uygun değildir. Bina içi alanlarda robotik, oyun konsolları ve bilgisayar görmesi uygulamalarında kullanılmaktadır.

3.2.2. Flash LiDAR

Flash LiDAR kamerada cisim noktalarının kameraya olan mesafeleri doğrudan uçuş zamanı ile ölçülür. Ölçme mesafesi 1 m den birkaç kilometreye kadar değişmektedir. Saniyede 30 ve daha fazla sayıda ardışık ölçü kaydedilebilir. Kamera ışınları güneş ışığından etkilenmediği için açık alan ölçmelerinde kullanılabilir. Cisim noktasının mesafesi (r) ile birlikte dönen ışınının şiddeti (I) de ölçülerek kaydedilir (Şekil 5).




Şekil 5. Flash LiDAR kamera ölçüsü şematik gösterimi

Flash LiDAR kamera ölçme için herhangi bir hareketli parça içermez. Dolayısıyla sarsıntılardan etkilenmeyecek sağlam bir yapıya sahiptir. Görüntüleme sensörünün boyutları oldukça küçüktür ve IMU (inertial measurement unit) sistemleri ile birlikte entegre olarak kullanılabilir. Düşük ağırlığı nedeniyle insansız hava araçlarında flash kamera kullanılmaktadır. Ölçme mesafesi arttıkça doğruluk ve nokta yoğunluğu azalır. Örneğin ASC DragonEye kamera 1.5 km ölçme mesafesine sahiptir ve mesafe ölçme hatası maksimum 10 cm dir. Uzun mesafelerin ölçülmesi yüksek enerji gereksinimi doğurur. Bu nedenle uzun mesafe ölçen kameralarda görüş alanı küçültülür. Kameranın görüş açısı küçüldükçe ölçme mesafesi artar. Örneğin TigerEye kamera, görüş alanı 3x3 derece olarak sınırlandırılırsa 1100 m, 9x9 derece görüş alanı olması durumunda 450 m maksimum ölçme mesafesine sahiptir. Farklı özelliklere sahip 3D Flash LiDAR kameralar üretilmiştir (Tablo 1).

Flash kameralarda lazer kaynağından yoğun bir ışık yayıldığından dolayı bu ışının insan sağlığına olumsuz etkisi giderilmiş olmalıdır. Flash kameralarda birinci sınıf lazer ışını kullanılmaktadır. Flash kamera ölçme datası 3B nokta bulutu koordinatlarıdır. Bununla birlikte ölçme alanını görüntülemeye bu ölçme datasından oluşturulan mesafe (derinlik) ve yansımaya görüntüleri de kullanılmaktadır.

Tablo 1. GSFL-16K 3D Flash LiDAR kamera teknik özellikleri (url-1)

Ölçme mesafesi	0.5-1000m	
Mesafe ölçme doğruluğu	5-10cm	
Görüntü formatı	128x128 piksel	
Pixel pitch	100 mm	
Frame ölçme hızı	> =20 Hz	
Görüş açıları (FOV)	3, 6, 8.6, 9, 15, 30, 45, 60	
Lazer ışını	1570nm,1064nm	
Veri giriş çıkış bağlantısı	Ethernet / RS422-High Speed Serial	
Kamera boyutları	20.32 x 9.2 x 24.46 cm ³	
Ağırlık	3.2kg	
Güç (Batarya)	<50W	
Çalışma sıcaklığı	-10 ile +60 derece arası	

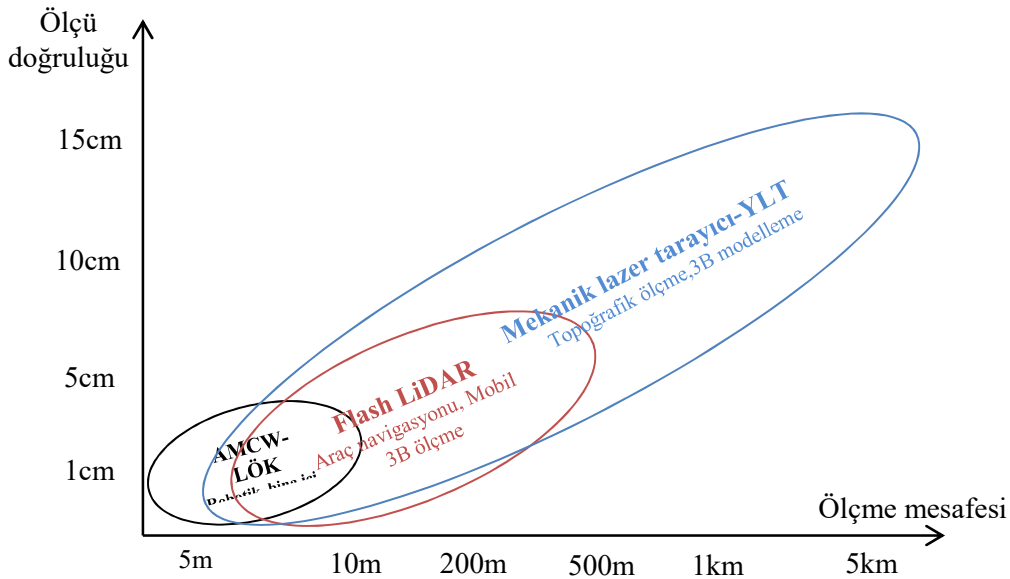
Flash LiDAR kamera ilk kez 2011 yılında NASA tarafından Endeavour uzay mekiğinin Uluslararası Uzay İstasyonuna kenetlenmesinde kullanılmıştır. Mekiğin itici güç birimleri kamera ölçülerinin analizi ile yönlendirilmiştir. Kameranın uzay çalışmalarında bu ilk kullanımından sonra, Uluslararası Uzay İstasyonuna yapılan nakliye ve diğer çalışmalarda pek çok kez kullanılmıştır. Flash LiDAR kameralar, robotik uygulamalar, insansız hava araçları, madencilik, uzay çalışmaları, kentsel alan görüntüleme ve daha pek çok alanda, navigasyon, hareketli cisimlerin tespiti, 3B modelleme gibi amaçlarla kullanılmaktadır (McManamon vd. 2017). Özellikle sürücülü yada sürücüsüz araçlarda araç etrafındaki engellerin tespitinde farklı ölçme sensörlerine sahip flash LiDAR tarayıcılar kullanılmaktadır.

4. Sonuç

3B ölçmede ışın yönlendirici lazer tarayıcı ve uçuş zamanlı kameraların birbirlerine göre üstün ve zayıf yanları bulunmaktadır. Bazı özellikler özet olarak Tablo 2 ve Şekil 6 da verilmiştir.

Tablo 2. Lazer tarama yöntemlerinin temel özellikleri

	Lazer tarayıcı	Uçuş zamanlı kamera	
		AMCW-ToF kamera (LÖK)	Flash LiDAR kamera
Ölçme tekniği	Galvanometre ve dönen aynalarla ışın yönlendirme	Tek ölçme ışını gönderme ve piksel esaslı faz ölçme	Tek ışın gönderme ve APD (avalanche photo diod) ile mesafe ölçme
Üstün özellikleri	– Uzun ölçme mesafesi (6km ye kadar)	– Yüksek ölçme hızı – Mobil ölçme – Düşük maliyet	– İç ve dış mekan ölçmeleri – Yüksek ölçme hızı – Mobil ölçme – Uzun ölçme mesafesi (6km ye kadar) – Düşük maliyet
Zayıf yanları	– Uzun tarama süresi – Statik ölçme – Yüksek maliyet	– Kısa ölçme mesafesi (max. 10m) – Yüksek SNR – Yalnız iç mekan ölçmeleri	– Yüksek enerji gereksinimi – Uzun mesafede düşük nokta yoğunluğu



Şekil 6. Uçuş zamanı ile mesafe ölçülen nokta bulutu oluşturma teknikleri

Lazer ışınının sahip olduğu özellikler 3B ölçmede yeni tekniklerin geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Dahası yeni tekniklerin sağladıkları yüksek ölçme hızı sayesinde hareketli cisimlerin ölçülebilmektedir. Böylece motorların hareketli parçalarının çalışma anındaki hareketleri görüntülenebilmekte, araç etrafındaki hareketler tespit edilebilmekte,

mobil haritalama yapılabilmekte vb. Bina içi ve açık arazi ölçmelerinde kullanılabilen flash LiDAR, daha uzun mesafelerin mobil olarak ölçülebilmesine olanak sağlamıştır. Flash LiDAR, otomobil çevresi hareketlerin algılanması ve sürücüsüz araç navigasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. İnsansız hava araçları ve taşıt üzerine takılan sistemlerle mobil haritalama diğer bir yaygın kullanım alanıdır. Son söz olarak, bilimsel gelişmelerin LiDAR ölçme sistemlerinde daha yüksek hız ve doğruluk sağlayacak yeni teknikler doğuracağı açıktır. 3B ölçmede, yeterli doğrulukta ve verimlilikte ölçü yapılabilmesi kullanılan aletlerin teknik özelliklerinin ve kapasitelerinin bilinmesi ile mümkün olabilecektir.

Kaynaklar

- Altuntaş, C., Yıldız, F. (2008) Yersel lazer tarayıcı ölçme prensipleri ve nokta bulutlarının birleştirilmesi. *hkm Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi* 2008/1, Sayı 98, 20-27.
- Altuntaş, C., Yıldız, F., Scaioni, M. (2016) Laser scanning and data integration for three-dimensional digital recording of complex historical structures: The case of Mevlana Museum. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 5(2), paper no: 18.
- Hayakawa, Y.S., Kusumoto, S., Matta, N. (2016) Application of terrestrial laser scanning for detection of ground surface deformation in small mud volcano (Murono, Japan). *Earth, Planets and Space* 68, 114, doi:10.1186/s40623-016-0495-0
- Kahlmann, T. (2007) Range imaging metrology: Investigation, calibration and development. PhD Thesis, ETH, Zurich, Switzerland
- Laux, T. (2010) ASC's 3D Flash LIDAR™ Camera: The science behind ASC's 3D Depth Imaging Video Camera. *SMPTE International Conference on Stereoscopic 3D for Media and Entertainment, New York, NY, USA*, pp. 1-10, doi: 10.5594/M001404.
- Li, L. (2014) Time-of-flight cameras: An introduction, Texas Instruments. Technical White Paper SLOA190B.
- 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.
- Piatti, D., Rinaudo, F. (2012) SR-4000 and CamCube3.0 Time of Flight (ToF) Cameras: Tests and Comparison. *Remote Sensing* 4, 1069-1089.
- Royo, S., Garcia, M. B. (2019) An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles. *Applied Sciences* 9, 4093, doi:10.3390/app9194093.
- Qi, X, Lichti, D. D., El-Badry, M., Chan, T.O., El-halawany, S.I., Lahamy, H., Steward, J. (2014) Structural dynamic deflection measurement with range cameras, *The Photogrammetric Record* 29(145): 89-107.
- url-1: https://asc3d.com/gsfl_16k/ [Erişim: 27 Mayıs 2021]