

Üç Tümyönlü Kamera Kullanarak Stereoskopik Video Karelerinin Gerçek Zamanlı Yapımı Real-Time Construction of Stereoscopic Video Frames using Three Omnidirectional Cameras

Mehmet ÇALI ve Şevket GÜMÜŞTEKİN

Elektrik – Elektronik Mühendisliği

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

35430 Urla, İzmir, Türkiye

(mehmetcali,sevketgumustekin)@iyte.edu.tr

Özetçe—Literatürde monoskopik ve stereoskopik panorama eldesine yönelik pek çok çalışma mevcuttur. Hareket paralaksının doğru ve bozulmalara yer vermeden edinilmesi oldukça zor bir problem olduğundan son dönemde özellikle 360-derece stereoskopik görüntü ve video ile ilgili çalışmalar yaygınlaşmıştır. Fakat bu alandaki çalışmalar, çok kameralı yüksek işlem gücü ve maliyet gerektiren sistemler etrafında yoğunlaşmıştır. İşlem gücü ve maliyet açısından verimli çözüm sunan çalışmamızda, üç adet tüketici seviyesi 360-derece kamera çıktısı görüş açısına göre örneklenip stereoskopik kareler gerçek zamanlı olarak işlenmiştir. Ayrıca görüş alanı sınırlarındaki bozulmaları, seçilen yardımcı kamera ile görüntü harmanlaması kullanarak gideren bir yöntem geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler — *stereoskopik video; sanal gerçeklik; 360-derece video; hareket paralaksı.*

Abstract—There are many studies about acquisition of monoscopic and stereoscopic panorama in the literature. Since obtaining motion parallax accurately without having distortions is a very challenging problem, especially 360-degree stereoscopic image and video capturing has become a prevalent research topic. However, studies in this topic have focused on costly systems with many cameras and high processing power demand. In this study, which presents an efficient solution in terms of processing power and cost, stereoscopic frames are processed in real time using three consumer grade 360-degree cameras whose outputs are sampled according to view orientation. Besides, a method is developed to eliminate the distortions around the borders of the field of view with the help of blending with selected auxiliary camera frames.

Keywords — *stereoscopic video; virtual reality; 360-degree video; motion parallax.*

I. GİRİŞ

Tümyönlü kamera ve sanal gerçeklik gözlükleri gibi cihazlardaki gelişmeler ve bunların tüketici kullanımında yaygınlaşmaları daha kaliteli ve daha verimli 360 derece video içeriği oluşturma konusunu ön plana çıkarmaktadır. 360 derece videoların deneyim kalitesini arttırmak ve daha uzun süre izlenebilirliğini sağlamak için videoların stereoskopik yani sağ ve sol göze gözler arasındaki mesafeyi dikkate alarak farklı görüntüler sunabilecek özellikte olması önem arz etmektedir.

Çünkü monoskopik videoların sanal gerçeklik gözlükleri ile izlenmesi hem üç boyut algısı oluşturmaz hem de uzun süreli kullanımda sanal gerçeklik rahatsızlığı adı verilen bulantı benzeri semptomlara neden olabilir. Bu bağlamda, 360 derece stereoskopik videoların elde edilmesine yönelik çalışmalar yaygınlaşmaktadır.

Literatürde stereoskopik panoramik video ve görüntü elde etmek üzerine pek çok makale bulunsa da [1-8] kullanılan metotların çoğu stereo eşleme ve nokta bulutundan görüntü oluşturma gibi yüksek işleme gücü gerektiren yöntemler içerdiği için gerçek zamanlı video oluşturmak için uygun değildir. Video eldesinde de derinlik tahmini veya stereo eşlemeye bağlı görüntü sentezleme kullanan çalışmalar mevcuttur [1] [2] [5]. Fakat panoramik görüntü eldesinde olduğu gibi bu yöntemler yüksek işleme gücü ve çalışma zamanına ihtiyaç duymaktadır. Örneğin [1]'de 16 adet geniş açılı kamera küre yüzeyine homojen olarak konumlandırılarak aynı anda aynı yöne en az 5 kameranın görüş açısının bulunması sağlanmıştır. Stereo eşleme ile elde edilen 16 nokta bulutundan oluşturulan stereoskopik video kareleri 1 dakika 30 saniye gibi gerçek zamandan oldukça uzak bir sürede işlenebilmektedir. Stereoskopik panorama eldesinde en yaygın yöntemlerden birisi tümyönlü stereo [9] (ODS) projeksiyon tipinin kullanılmasıdır. Bu tip yöntemlerde görüntüleme çemberi adı verilen iki göz arası ortalama mesafe (65 mm) çapında bir çember etrafında görüntüleme yapılmaktadır. Örnek olarak bir kameranın teğetsel doğrultuda döndürülmesi veya belirli aralıklarla çok sayıda kameranın yerleştirilip teğet görüş açılarının birleştirilmesi şeklinde stereoskopik görüntüler oluşturulmaktadır [10]. Bu yaklaşımlardan biri olan [3]'te geniş açılı lense sahip iki kameranın bir platform etrafında döndürülmesiyle saniyede 16 kare elde eden bir sistem tasarlanmıştır. Fakat kullandıkları sistem düşük pozlama süresi nedeniyle video modunda özellikle iç mekanda düşük kaliteli görüntüler oluşturmaktadır. ODS kullanan farklı bir çalışmada [4], 17 kameralı bir kamera sistemi kullanılmıştır. Bir kamera üstten görünümü elde ederken diğer 16 kamera çember etrafına dizilerek ODS projeksiyon yardımı ile stereoskopik video elde edilmiştir. Fakat yöntem, birkaç saniyede bir hesaplanan derinlik tahmini içerdiği için hareketli sahnelerde hatalı

görüntü oluşturmaya yatkın olmasının yanı sıra kullanılan kamera adedi nedeniyle probleme verimli bir çözüm sunmamaktadır.

Çalışmamızda da odaklanılan, 360 derece stereoskopik video eldesine verimli çözüm getirmeyi amaçlayan araştırmaların başında [5] örnek gösterilebilir. Sadece iki adet yatay eksenle konumlandırılmış tüketici seviyesi tümyönlü kamera kullanan bu yöntemde, kameraların normaline dik doğrultuya gidildikçe azalan disparite değerlerini stereo eşlemeye dayanan bir metot ile telafi etmek amaçlanmıştır. Fakat yöntem hem düşük disparite değerlerinde yüksek oranlama değerlerine sahip olduğu için bozulmalara açıktır, hem de yüksek işlem gücü gerektiren stereo eşleme kullandığı için gerçek zamandan oldukça uzak sonuç üretmektedir. Literatürde gerçek zamanlı çalışan verimli sistemlerden biri olarak [6] çalışması düşünülebilir. Önerilen sistemde üç adet geniş açılı kamera iki adet ön yön ve bir adet arka yön olarak kullanıcının yatay dönüş (pan) açısına göre tanımlanmış yönlerde konumlandırılmıştır. Fakat arka yöne doğru olan yarım küreyi görüş açısına dahil eden tek kamera bulunduğu için kullandıkları sistem gerçek zamanlı bir kamera hareketi olmadığı sürece 360 derecenin tamamında stereoskopik çıktı veremez. Benzer bir sorun aynı yöne konumlandırılmış üç geniş açılı kameradan stereoskopik görüntü elde etmeyi hedefleyen [7]'de gözlemlenmektedir. Konumlandırma şekli dolayısıyla bu sistemde kamera normallerine ters yöndeki yarım kürede görüntü oluşmamaktadır. Çalışmamızdaki öne sürülen tasarıma literatürde en yakın olarak [8]'de kullanılan sistem düşünülebilir. O çalışmada bir adet tümyönlü kameradan kenar uzunluğu 6.5 cm olan eşkenar üçgen köşelerine yerleştirilerek görüntüler alınmıştır. Bu görüntülerin yatay görüş açıları örneklenerek 360 derece stereoskopik panoramik görüntü elde edilmiştir. Fakat bu uygulama gerçek zamanlı video eldesine yönelik değildir.

Bu çalışmada 360 derece stereoskopik videonun, üç adet tüketici seviyesi tümyönlü kamera kullanılarak hem işlem yükü hem maliyet açısından verimli şekilde gerçek zamanlı olarak işlenmesi hedeflenmiştir. Maliyet ve işlem yükünün yanı sıra video aktarımı sırasında bant genişliği verimini de göz önünde bulunduran bir kamera sistemi ve stereoskopik video yakalama metodu tasarlanmıştır.

Bildirinin diğer bölümlerindeki organizasyon aşağıdaki gibidir. Bölüm II'de tasarlanan sistemin özelliklerine ve geliştirilen algoritmanın detaylarına yer verilmiştir. Bölüm III'te sistemin gerçekleşmesi ve elde edilen çıktılar yorumlanmıştır ve son olarak Bölüm IV'te sonuçlar verilmiştir.

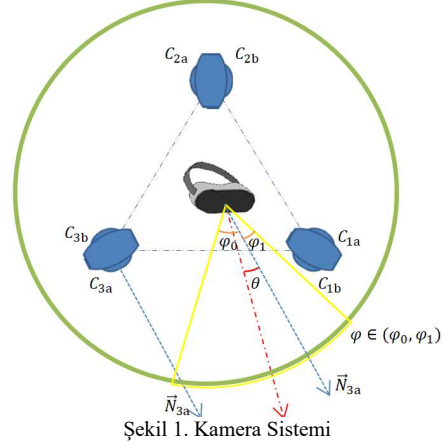
II. YÖNTEM VE MATERYAL

Kullanılan yöntem eşkenar üçgen köşelerine yerleştirilmiş çift balıkgözü lense sahip 360-derece kameraların kullanıcının görüş açısına göre verimli bir şekilde seçilerek stereoskopik video karelerinin oluşturulmasına dayanır. Bu bağlamda, sistem tasarımından sonra kamera kalibre edilip kamera örnekleme metodu uygulanır. Son olarak bozulmalar görüntü harmanlama ile iyileştirilir.

A. Sistem Tasarımı

Kullanılan tasarım 3 adet çift balıkgözü lense sahip tümyönlü kameraların yatay eksenlerinin 120°'lik açılarla

eşkenar üçgen merkezinde kesiştikleri bir sistemdir. Şekil 1'de üstten görünümü verilen kamera sisteminde C_{1a} , C_{1b} , C_{2a} , C_{2b} , C_{3a} , C_{3b} balıkgözü kameraları ifade eder. Şekil üstten görünüm olarak verildiği için açılar yatay düzlemdeki açılardır. Mavi kısa kesikli ok C_{3a} kamerasının normal vektörü olup (\vec{N}_{3a}) yataydaki referans vektörünü ifade eder. Kırmızı nokta kesikli ok sanal gerçeklik gözlüğü ile takip edilen izleme vektörünü, θ "yatay görüş açısı" olarak değinilen izleme vektörü ile referans vektörü arası açıyı (pan) ifade eder. Sarı dilim ile çerçevelen bölge "yatay görüş alanını" (FOV) ifade edip, aralık (φ_0 , φ_1) ile tanımlanır. Benzer nitelikte şekilde gösterilemeyen dikey görüş açısı ϕ , dikey görüş alanı (λ_0 , λ_1) ile tanımlanır.



Şekil 1. Kamera Sistemi

B. Kamera Kalibrasyonu

İçsel balıkgözü kamera parametreleri, [11] çalışmasındaki yöntem kullanılarak elde edilmiştir.

$$g(\rho) = a_0 + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + a_4\rho^4, \quad \rho = \sqrt{x'^2 + y'^2} \quad (1)$$

$$\lambda g(x'') = PX \quad (2)$$

$$x'' = Ax' + t \quad (3)$$

Elde edilen içsel balıkgözü kamera parametreleri $I = [a_0 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ A_{11} \ A_{12} \ A_{21} \ A_{22} \ t_1 \ t_2]$ vektörü ile ifade edilir. Burada ilk 4 eleman (1) ve (2)'yi kullanarak dünya koordinatları ile görüntü düzlemi arasındaki bağlantıyı, son 6 eleman ise (3)'ü kullanarak görüntü düzlemi ile sensör düzlemi arasındaki bağlantıyı oluşturur. Bu denklemlerde \mathbf{X} , $\mathbf{x}'' = [x'', y'']^T$ ve $\mathbf{x}' = [x', y']^T$ sırasıyla dünya görüntü ve sensör koordinatlarındaki noktaları temsil eder. λ derinlik katsayısını, \mathbf{P} perspektif projeksiyon matrisini, 2×2 boyutlu \mathbf{A} matrisi ve 2×1 boyutlu \mathbf{t} vektörü sensör düzlemi ile görüntü düzlemi arasındaki afin dönüşümü belirtir.

C. Kamera Örnekleme ve Dinamik Birleştirme

Bu çalışmada stereoskopik video kareleri balıkgözü kameraların çıktılarının doğrudan perspektif projeksiyona dönüştürülmesiyle elde edilir. İzlenen aşamaların ilki balıkgözü lens bozulmasının giderilmesidir.

1. Balıkgözü lens bozulmasının giderilmesi:

İlk olarak lens odak noktası ile kamera optik merkezi arası hizalama farkı giderilir. Daha sonra balık gözü lensindeki görüntüleme fonksiyonu olan (1)'deki $g(\rho)$ üzerinden alınan

projeksiyon $f(\rho_s)=(k^2-\rho_s^2)^{1/2}$ yarım çemberinden alınacak şekilde dönüştürülmüştür. Dönüşüm için (4)' teki denklem, çıktı görüntüsündeki her piksel değeri (x_s, y_s) için çözülerek geri haritalama ile girdi piksel (x_i, y_i) değerlerindeki renk bilgileri aktarılır. Denklem (4)'teki k değeri küre yarıçapı olup girdi görüntüsündeki çözünürlük değerinin (mxm) yarısı olarak $(m/2)$ seçilmiştir. Ayrıca çıktı çözünürlük değeri girdi çözünürlük değerine eşit olacak şekilde seçilmiştir.

$$a_0 + a_2 p_i^2 + a_3 p_i^3 + a_4 p_i^4 - \frac{\sqrt{k^2 - p_s^2} \cdot p_i}{p_s} = 0 \quad (4)$$



Şekil 2. Balıkgözü bozulması içeren görüntü solda, bozulmanın giderildiği görüntü sağda (görüntüdeki dama tahtaları sadece kalibrasyon amaçlıdır bozulma tablosu olarak kullanılmamıştır)

2. Kamera örnekleme yöntemi:

Stereoskopik videonun sağ ve sol göz görüntü kaynakları Tablo 1'de verilen kamera örnekleme sistemine göre 60° görüş alanı elde edilecek şekilde seçilmiştir. Aktif balıkgözü kameraların görüş alanı sınırlarında gözlemlenen bozulmalar aynı görüş alanını paylaşan yardımcı üçüncü kameradaki görüntülerle harmanlanarak iyileştirilmiştir.

3. Perspektif projeksiyona dönüştürme:

Kullanıcının izleyebileceği format olan perspektif projeksiyona çevirirken lens bozulması düzeltme bölümünde olduğu gibi geri haritalama kullanılmıştır. Bu kez çıktı piksel değerlerinin $([x_s, y_s]^T)$ merkezi sıfıra taşınmış, izleme yönüne göre rotasyon matrisi ile çarpılıp $[\hat{x}_s, \hat{y}_s, \hat{z}_s]^T$ vektörü elde edilmiştir. Burada sıfır merkezine taşınmış $[x_s, y_s]^T$ vektörü ile birleştirilen z_s odak uzaklığı olarak düşünebileceğimiz perspektif projeksiyonun yakınlaştırma miktarını belirleyen sabittir. Daha sonra (5) ve (6) kullanılarak sıfır merkezli girdi piksel değerleri bulunup merkez pikselleri kadar kaydırılarak bulunan piksellerdeki renk bilgileri aktarılır.

$$\hat{x}_i = \frac{\hat{x}_s}{\hat{z}_s} \cdot \sqrt{\frac{k^2}{\left(1 + \frac{\hat{x}_s^2}{\hat{z}_s^2} + \frac{\hat{y}_s^2}{\hat{z}_s^2}\right)}} \quad (5)$$

$$\hat{y}_i = \frac{\hat{y}_s}{\hat{z}_s} \cdot \sqrt{\frac{k^2}{\left(1 + \frac{\hat{x}_s^2}{\hat{z}_s^2} + \frac{\hat{y}_s^2}{\hat{z}_s^2}\right)}} \quad (6)$$

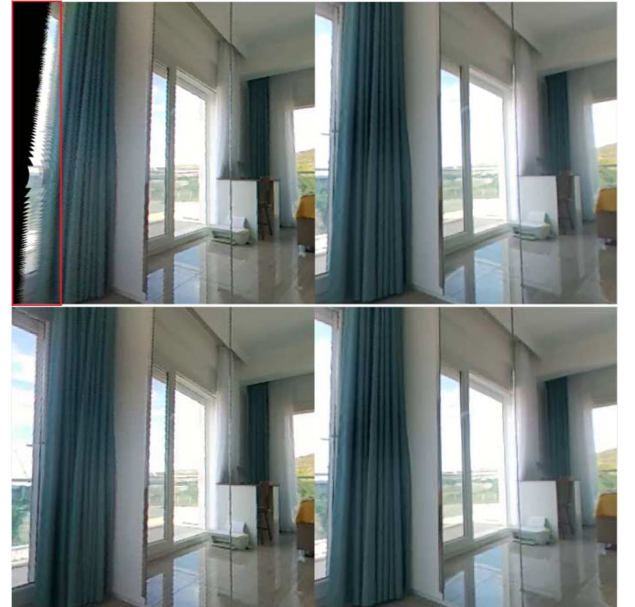
TABLO I. YATAY İZLEME AÇISI BÖLGELERİNE GÖRE KAMERA ÖRNEKLEME

Yatay görüş açısı bölgeleri	Sol göz görüntü kaynağı	Sağ göz görüntü kaynağı	Sol göz yardımcı kamera	Sağ göz yardımcı kamera	Harmanlama bölgesi $\varphi \in (\varphi_{h0}, \varphi_{h1})$
[0,15]	C _{2b}	C _{3a}	C _{1b}	-	330-345
(15,45)	C _{2b}	C _{3a}	-	-	-
[45,60)	C _{2b}	C _{3a}	-	C _{1a}	75-90
[60,75]	C _{2b}	C _{1a}	-	C _{3a}	30-45
(75,105)	C _{2b}	C _{1a}	-	-	-
[105,120)	C _{2b}	C _{1a}	C _{3b}	-	135-150
[120,135]	C _{3b}	C _{1a}	C _{2b}	-	90-105
(135,165)	C _{3b}	C _{1a}	-	-	-
[165,180)	C _{3b}	C _{1a}	-	C _{2a}	195-210
[180,195]	C _{3b}	C _{2a}	-	C _{1a}	150-165
(195,225)	C _{3b}	C _{2a}	-	-	-
[225,240)	C _{3b}	C _{2a}	C _{1b}	-	255-225
[240,255]	C _{1b}	C _{2a}	C _{3b}	-	210-225
(255,285)	C _{1b}	C _{2a}	-	-	-
[285,300)	C _{1b}	C _{2a}	-	C _{3a}	315-330
[300,315]	C _{1b}	C _{3a}	-	C _{2a}	270-285
(315,345)	C _{1b}	C _{3a}	-	-	-
[345,360)	C _{1b}	C _{3a}	C _{2b}	-	15-30

4. Görüntü harmanlama:

Bu aşamada, balıkgözü lens bozulmasının giderilmesi sırasında görüntü kalitesi düşen ve görüş açısı dışında kalan bölgeleri iyileştirmek amacıyla, ilgili bölgeler Tablo 1'de değinilen yardımcı kameradaki görüntülerle harmanlanmıştır. Görüntü harmanlama metodu olarak alfa harmanlama kullanılmış olup, alfa kanalı (7) denklemi ile oluşturulmuştur.

$$\alpha(\hat{x}_i, \hat{y}_i) = \frac{1}{1 + e^{-c \left(\tan^{-1} \left(\frac{\hat{x}_i}{\hat{z}_i} \right) - \varphi_c \right) / \pi}} \quad (7)$$



Şekil 3. Üstte sol bölgesi bozulmaya uğramış stereoskopik görüntü, altta görüntü harmanlama ile iyileştirilmiş stereoskopik görüntü

Denklem (7)'de sigmoid fonksiyonu harmanlama bölgesindeki geçiş katsayılarını sağlayacak şekilde düzenlenirken; c geçişteki keskinliği belirleyen parametreyi, ϕ_c geçişin yapılacağı açıyı ve z_i (8) ile hesaplanan görüntü küresinin z eksenini ifade eder.

$$z_i = \left(\frac{m}{2}\right)^2 - \sqrt{\dot{x}_i + \dot{y}_i} \quad (8)$$

Elde edilen alfa kanalı balıkgözü kamera çıktısı formatında olup, diğer kanallarda olduğu gibi perspektif projeksiyona dönüştürülür. Harmanlama ile birlikte kamera değişikliği sınır açılarında gözlemlenen bozulmalar Şekil 3'te görüldüğü gibi iyileştirilmiştir.

III. DENEYSEL BULGULAR

Sistem prototipi üç adet LG R105 360-derece kameranın kenar uzunlukları 10 cm olan eşkenar üçgenin köşelerine yerleştirilmesiyle Şekil 4'teki gibi oluşturulmuştur. Eşkenar üçgenin kenar uzunluklarını belirlerken, aktif kameraların merkezlerinden geçen yatay izleme doğruları arasındaki minimum uzaklığın en az ortalama iki göz arası mesafe kadar olması göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 4. Deney düzeneği

Video karelerinin ait olduğu kaynak kameralar görüş açısına göre dinamik olarak seçilip bu kameralardan gelen kareler yine dinamik olarak birleştirilmiştir. Bu bağlamda, yaygın olarak kullanılan sunucu tarafındaki eşdikdörtgensel projeksiyon üzerinde birleştirmeye kıyasla yöntemimizin çeşitli avantajları mevcuttur. Bunlardan ilki harmanlama bölgesinin hiçbir zaman görüntülerin ortasında yer almamasıdır. Eğer dikey ϕ açısı 0 derece ise harmanlama bölgesi her zaman ($\theta-15$, $\theta+15$) aralığının dışında yer alır. Anlık video karesini oluşturmada kullanılan kameralar θ açısına göre sistemden örneklendikleri için tüm kameraların kullanıldığı yöntemlere kıyasla daha verimli bir çözüm sunar. Sistem 6 balık gözü kameranın görüş yönüne göre seçilen ortalama olarak 2.5 adedinin (sağ ve sol göz için birer kamera ve harmanlama için yatay görüş açılarının toplam 180 derecelik bölümünde kullanılan bir yardımcı kamera) işlenmesini gerektirdiği için işlem yükü açısından avantajlıdır. Ayrıca video aktarımı sırasında ortalama olarak 2.5 kamera çıktısının gönderilmesi yeterli olduğundan bant genişliği kullanımını azaltır. Yöntemin dezavantajları olarak derinliğe göre oluşması gereken disparite değerlerinin kamera değişikliği açılarına doğru ortalama %14 oranına kadar azalması ve harmanlama bölgelerinde gölgeleme bozulmalarına rastlanması gösterilebilir. Ayrıca görüş açıların bazılarında kameraların ekranda yer alması da dezavantajları arasında gösterilebilir. Genel olarak sistem maliyetinden kaynaklı ilk iki bozulma türünün algılanan kaliteye yüksek etkide bulunmadığı deneyimlenmiş olup kamera sayısında artış ile iyileştirilmesi mümkündür.

Üçüncüsü ise görüntü harmanlama metodundaki değişiklikler ile iyileştirilebilir.

Program Matlab'te geliştirilip GPU üzerinde çalıştırılmış olup, NVIDIA GeForce GTX1060 3GB ekran kartında, gri tonlamalı 1280x2560 çözünürlükteki birleştirilmiş stereoskopik kare başına ortalama 44 ms işleme süresine sahiptir. Aynı çözünürlüğün RGB versiyonun eldesi ortalama 77 ms sürmektedir. Fakat kanallar birbirinden bağımsız olduklarından daha iyi bir paralelleştirme ile gri tonlamalı işleme süresine yaklaşılabılır. Balıkgözü lens bozulmasının giderilmesi aşaması, tüm karelerin aynı eşleşmeye sahip olması dolayısıyla arama tablosu kullanarak ortak bir şekilde çözülebileceği için elde edilen süreye dahil edilmemiştir.

IV. SONUÇ

Çalışmamızda 360 derece stereoskopik videoların verimli bir şekilde gerçek zamanlı aktarılmasını gerektirecek kullanımlar için önerdiğimiz bir kamera sistemi ve metodoloji tanıtılmıştır. Düşük maliyet ve işlem gücü ile elde edilen program çıktılarında insan görme sistemi ile tutarlı hareket paralaksı gözlemlenmiştir. Sistemin örnek çıktılarına [12]'den ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Pozo, A.P., Toksvig, M., Schragar, T.F., Hsu, J., Mathur, U., Sorkine-Hornung, A., Szeliski, R., and Cabral, B., "An integrated 6DoF video camera and system design," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 38, no. 6, pp. 1-16, 2019.
- [2] Anderson, R., Gallup, D., Barron, J. T., Kontkanen, J., Snavely, N., Hernández, C., Agarwal, S., and Seitz, S. M., "Jump: virtual reality video," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 35 no. 6, pp. 1-13, 2016.
- [3] Konrad, R., Dansereau, D. G., Masood, A., and Wetzstein, G., "Spinvr: towards live-streaming 3d virtual reality video," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 36 no. 6, pp. 1-12, 2017.
- [4] Limonov, A., Yu, X., Juan, L., Lei, C., and Jian, Y., "Stereoscopic realtime 360-degree video stitching," in *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Jan. 2018, pp. 1-6.
- [5] Matzen, K., Cohen, M. F., Evans, B., Kopf, J., and Szeliski, R., "Low-cost 360 stereo photography and video capture," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 36, no. 4, pp. 1-12, 2017.
- [6] Ullah, H., Zia, O., Kim, J. H., Han, K., and Lee, J. W., "Automatic 360 mono-stereo panorama generation using a cost-effective multi-camera system," *Sensors*, vol. 20, no.11, p. 3097, 2020.
- [7] Chapdelaine-Couture, V., and Roy, S., "The omnipolar camera: A new approach to stereo immersive capture," in *IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, Apr. 2013, pp. 1-9.
- [8] Gurrieri, L. E., and Dubois, E., "Efficient panoramic sampling of real-world environments for image-based stereoscopic telepresence," in *Stereoscopic Displays and Applications XXIII*, vol. 8288, Feb. 2012, pp. 819-832.
- [9] Ishiguro, H., Yamamoto, M., and Tsuji, S., "Omni-directional stereo," *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, vol.14, no.2, pp. 257-262, 1992.
- [10] Richardt, C., "Omnidirectional stereo," *Computer Vision: A Reference Guide*. Springer, pp 1-4, 2020.
- [11] Scaramuzza, D., Martinelli, A., and Siegwart, R., "A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras," in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct. 2006, pp. 5695-5701.
- [12] Çalı, M., and Gümüştekin, Ş., "Üç Tümyönlü Kameradan Oluşturulan Stereoskopik Tümyönlü Video Çıktıları". Accessed: Apr. 23, 2022, Available: osf.io/ej6p.