

Şekil 2: (a) Perspektif Kamera Modeli (b) Düzlem denkleminin Hough-Dönüşümü için parametrize edilişi.

modeli ve ilgili adlandırma kuralları kullanılmıştır. Bu modele göre (bkz. Şekil 2a) imge düzlemi XY düzlemine paraleldir ve f uzaklığındaki odak noktası da +Z ekseninde bulunmaktadır.

2.2. Geriçatım İçin Kullanılan Geometri

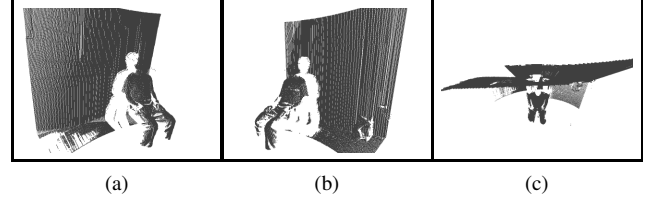
Lazer ışık çizgilerinden 3B kartezyen konaç bilgisinin elde edilmesinde nirengi yöntemi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada lazer ışık kaynağı, kameranın odak noktası ve lazerin cisim üzerine düştüğü nokta kullanılarak meydana getirilen nirengi geometrisi kullanılmıştır. Kullanılan geometri XZ düzleminde kabaca Şekil 1b'deki şekilde gösterilebilir. Soldaki ve sağdaki (uygunluk açısından "sol" ile ilgili öğeleri L altsimgesi, "sağ" ile ilgili öğeleri ise R altsimgesi ile ifade etmekteyiz) lazer ışık kaynakları için çözümün karşılıklı olmasından ötürü burada üretim sadece soldaki lazer ışık kaynağı için gösterilmiştir.

Temel olarak amaç p_L noktasının 3B kartezyen konaçlarını bulmaktır. Konaçlar için kameranın odak noktası olan O dayanak olarak alınmıştır. Bu durumda p_L noktası, Π_L ışık düzlemi ile l_L doğrusunun kesişim noktası olmaktadır. Π_L düzlemi ve l_L doğrusunun tanımları Denklem 1'deki şekilde verilebilir. Burada verilen verilen k sayısı ve düzlemle doğrunun kesişme noktası olan p_L noktası da Denklem 2'deki şekilde yazılabilir.

$$(\Pi_L) : (\mathbf{p} - \mathbf{D}_L) \cdot \mathbf{n}_L = 0, (l_L) : \mathbf{p} = k \mathbf{v}_L. \quad (1)$$

$$k = \frac{\mathbf{D}_L \cdot \mathbf{n}_L}{\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{n}_L}, \mathbf{p}_L = \left(\frac{\mathbf{D}_L \cdot \mathbf{n}_L}{\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{n}_L} \right) \mathbf{v}_L. \quad (2)$$

\mathbf{v}_L vektörü Denklem 3 şeklindedir. Bu durumda p_L daha açık şekilde Denklem 4'ya dönüşmektedir. İlgili türetmelerde görünen (x_{im}, y_{im}) ikilisi, p_L noktasına ait π imge düzlemi üzerindeki piksel konaçlarıdır. Benzer şekilde (o_x, o_y) ikilisi imge merkezini, (s_x, s_y) ikilisi ise X ve Y yönündeki etkin piksel büyüklüğünü ifade etmektedir. Denklem 4'da elde edilen sonuç karşılıklılık ilkesi uyarınca sağdaki ışık kaynağı ve de dolayısı ile p_R noktası için Denklem 5 şeklinde yazılabilmektedir.



Şekil 3: Örnek bir tarama sonucu. (a) Sol lazerden gelen bilgi (b) Sağ lazerden gelen bilgi (c) Sol ve Sağ lazerlerden gelen bilgilerin birleşimi.

$$\mathbf{v}_L = \begin{bmatrix} -(x_{im} - o_x) s_x \\ -(y_{im} - o_y) s_y \\ f \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{p}_L = \begin{bmatrix} - \left(\frac{\mathbf{D}_L \cdot \mathbf{n}_L}{\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{n}_L} \right) (x_{im} - o_x) s_x \\ - \left(\frac{\mathbf{D}_L \cdot \mathbf{n}_L}{\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{n}_L} \right) (y_{im} - o_y) s_y \\ \left(\frac{\mathbf{D}_L \cdot \mathbf{n}_L}{\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{n}_L} \right) f \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{p}_R = \begin{bmatrix} - \left(\frac{\mathbf{D}_R \cdot \mathbf{n}_R}{\mathbf{v}_R \cdot \mathbf{n}_R} \right) (x_{im} - o_x) s_x \\ - \left(\frac{\mathbf{D}_R \cdot \mathbf{n}_R}{\mathbf{v}_R \cdot \mathbf{n}_R} \right) (y_{im} - o_y) s_y \\ \left(\frac{\mathbf{D}_R \cdot \mathbf{n}_R}{\mathbf{v}_R \cdot \mathbf{n}_R} \right) f \end{bmatrix}. \quad (5)$$

2.3. Çift Lazerli Tarama Sisteminde Kalibrasyon Problemi

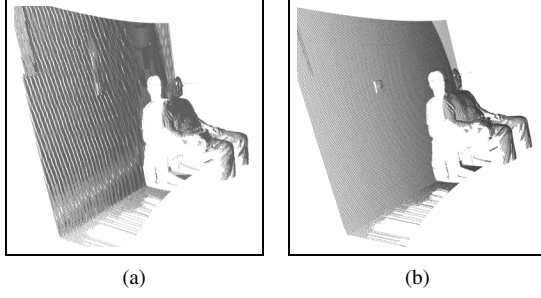
Tarayıcı sistemde bulunan iki lazer kaynağından elde edilen verilerin 3B geriçatım sonucunda tam çakışabilmesi için sistemin kalibrasyonunun tam olarak yapılması gerekmektedir. Sistemdeki bileşenlerin (kamera, lazerler v.b.) birbirlerine göre konumları standart ölçüm aletleri ile ölçülerek geriçatım işlemi gerçekleştirildiğinde iki verinin tam olarak çakışmadığı gözlemlenmektedir. Bunun sebebi ölçümden kaynaklı küçük hatalar olmaktadır.

Örnek olarak; duvar önünde oturan bir kişinin 3B taraması önerilen tarama sistemi ile yapıldığında Şekil 3'te görülen sonuçlar elde edilmektedir. Şekil 3a ve 3b sırasıyla soldaki ve sağdaki çizgisel lazer ışık kaynaklarından elde edilen tarama sonuçları olmaktadır. Her iki tarama sonucu ölçülmüş konum değerleri kullanılarak biraraya getirildiğinde ise sonucun üstten görünümü Şekil 3c şeklinde olmaktadır. Görülmektedir ki ölçülmüş değerlerle geriçatım sonucunda başarılı bir sonuç elde edilememektedir. Çalışmamızda iyi bir geriçatım sonucu elde edebilmek için ölçümden kaynaklı hataları enküçükleyen bir kalibrasyon yöntemi önermekteyiz.

3. KALİBRASYON AŞAMALARI

3.1. İmge Önileme Aşaması

Öncelikle kullanılan kameranın içsel parametrelerinin kalibrasyonu işlemi gerçekleştirilmektedir. Bunun için [8] çalışmasının bir uygulaması olan "MATLAB Toolbox for Camera Calibration" isimli MATLAB kütüphanesi kullanılmıştır. Kameranın içsel parametrelerinin kalibrasyonunun ardından tarama işlemi başlatılmaktadır.



Şekil 4: (a) Piksel-altı çözünürlük olmadan gerçekleştirilen geriçatım (b) Piksel-altı çözünürlükle gerçekleştirilen geriçatım.

İdeal bir tarama işlemi ortamın karartılması sayesinde mümkün olabilmektedir. Ancak bu durum sensör gürültüsünün olumsuz etkisini de beraberinde getirmektedir. Bu sebeple tarayıcı sistem her konum için beş adet ardışık imge almaktadır. Bu imgeler bir ortanca süzgeci işleminden geçirildikten sonra sensör gürültüsü azaltılmış bir imge elde edilmektedir.

Tarama işlemi tamamlandığında imgeler halen lens bozunumu etkisine sahip olmaktadır. Bunun giderilmesi için tarama işleminin başlangıcında gerçekleştirilen kamera kalibrasyonu aşaması sonucunda elde edilen kamera içsel parametreleri kullanılmaktadır. Bu aşamaların ardından sensör gürültüsünden ve lens bozunumundan arındırılmış imgeler elde edilmektedir.

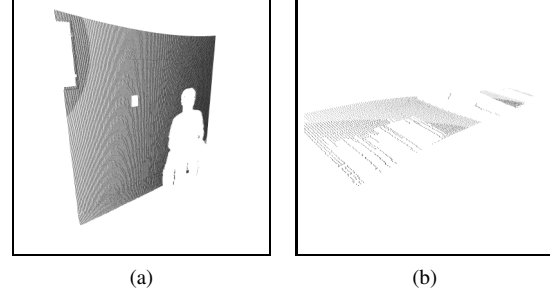
3.2. Piksel-altı Doğruluğun Elde edilmesi

Ölçüme ait imgelerde lazer ışık çizgilerinin ayrıştırılması için bu çalışmada Dijkstra'nın [9] çalışmasında anlattığı yöntem kullanılmaktadır. Ancak bu işlem sonucunda ayrıştırılan lazer çizgileri piksel çözünürlüğünde olmaktadır. Bu çözünürlükte gerçekleştirilen örnek bir geriçatım sonucu Şekil 4a'de görülmektedir. Çalışmamızda bu imgede görülen örtüşme etkisinin giderilmesine yönelik olarak [10] çalışmasında önerilen Gauss Uydurma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre lazer ışık çizgilerinin düştükleri alanda enlemesine dağılımları yaklaşık bir Gauss dağılımıdır. Denklem 6 şeklinde tanımlanan bir Gauss fonksiyonunun uydurulması ile elde edilecek olan a_2 parametresi bize Gauss fonksiyonunun tepe noktasının denk geldiği ve dolayısıyla lazer çizgisinin en parlak olduğu yeri piksel altı çözünürlükte verecektir. Elde edilen bu piksel-altı doğruluk sayesinde geriçatımda önemli ölçüde düzelme gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 4b).

$$f(x; \mathbf{a}) = a_1 e^{-(x-a_2)/2a_3^2}. \quad (6)$$

3.3. Nokta Bulutu İçerisindeki Düzlemlerin Bulunması

Önerilen kalibrasyon yöntemi sahnede gömülü olan bazı geometrik kısıtları kullanmaktadır. Özellikle sahnelerdeki düzlemler ve düzlemlerin dikgenliği önerilen kalibrasyon yöntemi için önem arz etmektedir. [11] çalışmasında da bu özellikler kullanılmaktadır ancak düzlem özelliğine sahip bölgelerin kullanıcı tarafından belirlenmesi gerekmektedir. [11]'de an-



Şekil 5: Şekil 4b'den ayrıştırılan (a) Duvar verisi (b) Yer verisi.

latılardan farklı olarak çalışmamızda bu işlem otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

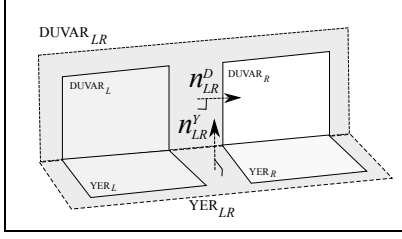
Duvar önünde oturan insan taraması örneğinde görüleceği üzere geriçatım sonuçlarında duvar ve yeri ifade eden nokta kümeleri bulunmaktadır. Öncelikle, düzlemsel bir dağılım gösteren bu noktaların sahneden ayrıştırılması gerekmektedir. Çalışmamızda nokta bulutu içerisindeki düzlemleri tespit etmek için [12] çalışmasında da önerildiği şekilde Parametre Uzayı içerisinde Hough Dönüşümü kullanılmıştır. Bunun için öncelikle düzlem denkleminin parametrize edilmesi gerekmektedir. Düzlem denklemi Şekil 2b'de gösterilen adlandırma kuralı doğrultusunda çalışmamızda Denklem 7 şeklinde parametrize edilmiştir.

$$\rho = (x \cos(\beta) + y \sin(\beta)) \cos(\theta) + z \sin(\theta). \quad (7)$$

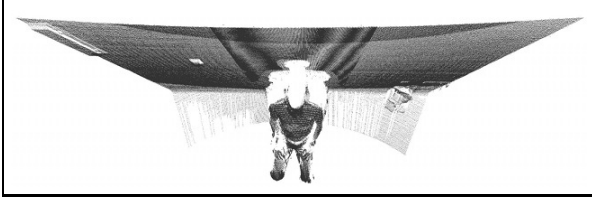
Çalışmamızda tanımladığımız düzlem bulma problemi üç boyutlu olduğundan problem 2B imge işleme problemlerine göre daha karmaşık bir hale gelmektedir. 2B problemde standart Hough Dönüşümü için kullanılan çözüm yöntemi direk olarak 3B problem için uyarlandığında ise verinin yoğunluğu sebebiyle çözüm işlemi çok uzun sürmektedir. Çalışmamızda Hough Dönüşümü'nün başarımını ve hızını arttırmak için [13] çalışmasında ayrıntılı olarak anlatılan Rastgeleleştirilmiş Hough Dönüşümü (RHD) kullanılmıştır. Bu sayede tarama sonuçlarında düzlemi ifade eden noktaların hızlı bir şekilde bulunması sağlanmıştır. Şekil 4b'deki örnek tarama sonucundan ayrıştırılan, duvarı ve yeri ifade eden nokta kümeleri sırasıyla Şekil 5a ve 5b'de görülmektedir.

3.4. Amaç İşlevi ve Nelder-Mead Algoritması

Ölçmeden kaynaklı hatalar lazer ışık düzlemlerinin türetilmesinde kullanılan (bkz. Şekil 1b ve Denklem 2) D_L, D_R noktalarında ve n_L, n_R yüzey normalerinde karşımıza çıkmaktadır. n_L ve n_R normalerini küresel konaç sisteminde Θ ve Φ şeklinde iki parametre ile gösterdiğimiz takdirde sol lazer kaynağı için üç (D_L, Θ_L ve Φ_L) sağ lazer kaynağı için üç (D_R, Θ_R ve Φ_R) olmak üzere toplam altı adet parametrenin eniyilenmesi gerekmektedir. Bunun için çalışmamızda [14]'de önerilen Nelder-Mead Algoritması'nı (NMA) kullandık. Bu eniyileme algoritmasının kullanılabilmesi için uygun bir amaç fonksiyonu (objective function) tanımlanması gerekmektedir. Nokta bulutundan düzlem çıkarma işlemi ile sol ve sağ lazer ışık kaynakları için duvar ve yeri ifade eden nokta kümeleri ayrı ayrı çıkartılabilmektedir.



Şekil 6: Amaç fonksiyonu için kullanılan düzlem geometrisi.



Şekil 7: Şekil 3c'de görülen çakışma sonucunun önerilen yöntemle düzeltilmiş görüntüsü.

Nihai amacımız iki ışık kaynağı için elde edilen duvar verilerinin ($DUVAR_L$ ve $DUVAR_R$) aynı düzlemi ($DUVAR_{LR}$), benzeri şekilde yeri ifade eden verilerin (YER_L ve YER_R) de aynı düzlemi (YER_{LR}) ifade etmesini sağlamaktır (bkz. Şekil 6. Doğrusal en küçük kareler yöntemi ile $DUVAR_{LR}$ ve YER_{LR} düzlemlerinin denklemleri ve buna bağlı olarak da yüzey normaleri (n_{LR}^D ve n_{LR}^Y) bulunabilmektedir. Duvar ve yer düzlemlerinin dik olmasından ötürü normal vektörleri nihai çakıştırma hedefine erişildiğinde birbirine dik iki vektör olacaktır. Bu koşul ve noktaların uydurulan düzleme uzaklıklarından kaynaklı hatayı hesaplayan bir fonksiyon, $f(\bullet)$, birlikte düşünüldüğünde amaç fonksiyonumuz, $f(\bullet)$, Denklem 8 şeklinde yazılabilir. Bu fonksiyon parametreler için uygun başlangıç değerleri verildiği takdirde NMA ile hızlı bir şekilde enküçüklenerek parametreler için eniyileştirilmiş değerleri vermektedir.

$$f(D_L, \Theta_L, \Phi_L, D_R, \Theta_R, \Phi_R) = (err(DUVAR_{LR}) + err(YER_{LR})) * (n_{LR}^D \cdot n_{LR}^Y). \quad (8)$$

4. SONUÇLAR

Çalışmada çoklu lazerli 3B tarayıcı sistemlerde karşılaşılan bir kalibrasyon problemi ve bunun çözüm yöntemi gösterilmiştir. Çift lazerli örnek bir tarayıcı sistem ile elde edilen bir tarama sonucu (bkz. Şekil 3) ile problemin çözüm aşamaları ayrıntıları ile verilmiştir. Son aşamada NMA ile bir amaç fonksiyonu enküçüklenerek, çakışmanın düzeltilmesi için gereken parametre eniyileme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3c'de gös geçiştirim sonucu parametre eniyileme işleminden sonra gerçekleştirildiğinde Şekil 7'deki hali almaktadır. Bu durumda çakıştırma işlemi çok daha başarılı olmaktadır.

Bundan sonraki çalışmalarımızda burada önerilen yöntem farklı lazer tarayıcı sistem düzenlemeleri üzerinde denenecektir. Örnekteki gibi taramalarda birbirine dik iki baskın düzlem bulma işlemi kolay olmasına karşın bu her zaman mümkün

olmayabilmektedir. Bunun için L şeklinde birbirine dik iki düzlemden oluşan bir kalibrasyon nesnesinin kullanımı da düşünülmektedir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Masahiro Watanabe and Shree K. Nayar, "Rational filters for passive depth from defocus," *Int. J. Comput. Vision*, vol. 27, pp. 203–225, May 1998.
- [2] D. Scharstein and R. Szeliski, "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms," *Int. J. Comput. Vision*, vol. 47, pp. 7–42, April 2002.
- [3] Robert J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," *Optical Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 139–144, 1980.
- [4] J.L. Mundy and G.B. Porter III., "A three-dimensional sensor based on structured light," *TDMV*, vol. 87, pp. 3–61, 2010.
- [5] B. Curless, "From range scans to 3d models," *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 33, pp. 38–41, November 1999.
- [6] X. Lian, Z. Liu, X. Wang, and L. Dou, "Reconstructing indoor environmental 3d model using laser range scanners and omnidirectional camera," *World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 1640–1644, 2008.
- [7] Emanuele Trucco and Alessandro Verri, *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 1998.
- [8] Zhengyou Zhang, "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations," in *ICCV*, 1999, pp. 666–673.
- [9] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269–271, 1959.
- [10] M.A.G. Izquierdo, M.T. Sanchez, A. Ibañez, and L.G. Ullate, "Sub-pixel measurement of 3d surfaces by laser scanning," *Sensors and Actuators*, vol. 76, pp. 1–8, 1999.
- [11] Ryo Furukawa and Hiroshi Kawasaki, "Laser range scanner based on self-calibration techniques using coplanarities and metric constraints," *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 113, pp. 1118–1129, November 2009.
- [12] K. Okada, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue, "Plane segment finder: algorithm, implementation and applications," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 2120–2125, 2001.
- [13] Dorit Borrmann, Jan Elseberg, Kai Lingemann, and Andreas Nüchter, "The 3d hough transform for plane detection in point clouds: A review and a new accumulator design," *3D Res.*, vol. 2, pp. 32:1–32:13, March 2011.
- [14] J. A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization," *Computer Journal*, vol. 7, pp. 308–313, 1965.