



Endüstriyel Barkod Görüntüsünün İyileştirilmesi için Nokta Yayılım Fonksiyonunun (PSF) Kullanımı

Can Ali GÜLYURT¹, Sümer Erkan KAYA²

¹ ASİS Otomasyon A.Ş., İstanbul, TÜRKİYE, Orcid ID:
<https://orcid.org/0009-0009-5053-6608>, E-mail: a.gulyurt@asis.com.tr

² ASİS Otomasyon A.Ş., İstanbul, TÜRKİYE, Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0001-3979-742X>, E-mail:
sumerkaya@asis.com.tr

Received 27 October 2024
Received in revised form 24 December 2024
In final form 29 December 2024

4th International Conference on Design, Research and Development
(RDCONF 2024)
December 19 - 20, 2024

Reference: GÜLYURT, C. A., & KAYA, S. E. (2024). A practical usage of point spread function for industrial barcode image enhancement. Orclever Proceedings of Research and Development, 5(1), 427-436.

Özet

Barkodlar, endüstride lojistikten envanter yönetimine kadar birçok önemli ve rutin uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaygın kullanım, barkod okuma uygulamalarına olan yüksek talebi artırmıştır. Çeşitli endüstriyel robotik sistemler ile birlikte çalışabildiğinden barkod okuyucu yazılımlar genellikle tercih edilir. Barkod okuyucu yazılımlar, başarılı bir okuma için kamera performansına ve görüntü kalitesine büyük ölçüde bağlıdır. Ancak, bu kameraların maliyetleri, aydınlatma koşulları, çalışma mesafesi ve pozlama süresi gibi etkenlere göre önemli ölçüde değişebilir. Bu çalışma kapsamında kameraları veya diğer donanımları yükseltmeye gerek kalmadan maliyetleri azaltmak için Nokta Yayılım Fonksiyonu (Point Spread Function - PSF) kullanılarak hesaplamalı bir iyileştirme yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yöntem, görüntü kalitesini artırır ve daha az ideal koşullarda bile etkili barkod çözümlemesini sağlar, böylece endüstriyel uygulamalar için daha düşük maliyetli bir çözüm sunar.

Anahtar: Hesaplamalı Görüntüleme, Bilgisayarla Görme, Nokta Yayılım Fonksiyonu, Optik Aktarım Fonksiyonu



A Practical Usage of Point Spread Function for Industrial Barcode Image Enhancement

Abstract

Barcodes are extensively utilized across industries for a variety of critical and routine applications, ranging from logistics to inventory management. Their widespread use has driven a high demand for barcode-reading devices. Optical barcode readers rely heavily on camera performance and image quality to achieve successful decoding. However, the cost of these cameras can vary significantly based on factors such as lighting conditions, working distance, and exposure time. To reduce costs without the need to upgrade cameras or other hardware, a computational enhancement approach leveraging the Point Spread Function (PSF) has been developed. This method enhances image quality, ensuring effective barcode decoding even under suboptimal conditions, thereby offering a cost-efficient solution for industrial applications.

Keywords: Computational Photography, Computer Vision, Point Spread Function, Optical Transfer Function



1. Giriş

Doğru ve hızlı barkod tarama, barkod okuyucu yazılımlarının performansına ve bunu gerçekleştiren cihazların çektiği görüntülerin kalitesine büyük ölçüde bağlıdır. Bu bağımlılık, gelişmiş görüntüleme sistemleri için gerekenlerin, (doğru aydınlatma, yüksek kaliteli lensler ve hızlı sensörler gibi) maliyetleri arttırmasına neden olmuştur. Bu soruna çözüm olarak, yüksek maliyetli kamera sistemlerine olan ihtiyacı azaltan hesaplamalı görüntüleme içeren bir yaklaşım önerilmektedir. Bu yöntem, görüntüleme sisteminin Nokta Yayılım Fonksiyonunun (PSF) matematiksel olarak modellenmesine dayanır. PSF, görüntü bulanıklığı ve gürültüsünün anlaşılması ve azaltılması için anahtar bir faktördür. Belirli bir kamera sisteminin PSF'si, aydınlatma koşulları, lens özellikleri, sensör nitelikleri, pozlama süresi ve uzamsal hizalama gibi faktörler dikkate alınarak modellenir ve bilgisayarlı görme ve hesaplamalı görüntüleme teknikleri ile görüntü kalitesinin geri kazanılmasına olanak tanır. Bu makale, endüstriyel barkod sistemleri için PSF tabanlı görüntü iyileştirmesinin pratik uygulamasını açıklar ve yüksek çözümleme doğruluğunu koruyarak maliyetin etkili bir şekilde azaltılma potansiyelini vurgular. Bulgular, barkod sistemlerinin performansını ve maliyetini optimize etmek için hesaplamalı görüntüleme tekniklerinin entegrasyonunun önemini ortaya koymaktadır.

2. Materyaller ve Yöntemler

Önerilen görüntü iyileştirme yöntemi, çeşitli parametrelerin (kamera, lens, aydınlatma, uzaysal konum, vb..) neden olduğu bulanıklığın matematiksel olarak modellenmesine ve Nokta Yayılım Fonksiyonunun (PSF) oluşturulmasına dayanmaktadır. İlk olarak, görüntüleme sisteminin neden olduğu gürültü ve bulanıklık gibi bozulmaları anlamak için bulanıklığın matematiksel temsili oluşturulur. PSF; aydınlatma, lens özellikleri, sensör nitelikleri, pozlama süresi ve mekansal hizalama gibi kamera özellikleri üzerinde noktasal ışık kaynağının etkisi simüle edilerek oluşturulur. Ardından üretilen PSF frekans uzayına dönüştürülerek Optik Aktarım Fonksiyonu (Optical Transfer Function - OTF) üretilir. Son olarak, üretilen OTF'ler de hesaba katılarak ve zaman uzayına geçilerek matematiksel modelden, okunabilecek kadar net barkod görüntüsüne ulaşmak için gereken işlemler tespit edilip uygulanır.

2.1. Bulanıklığın Matematiksel Modeli



Dijital görüntüler (Siyah-Beyaz fotoğraflar), x ve y eksenlerinde temsil edilen iki boyutlu sinyallerden oluşur. X ve y eksenleri ile konumu temsil eden ve içinde renk yoğunluğu bilgisini taşıyan piksellerin bütünü dijital görüntüyü oluşturur. Aydınlatma ve bulanıklık etkileri, orijinal görüntüyle evrişim (konvolüsyon) yapılarak her bir pikseldeki yoğunluğu değiştiren matematiksel işlemler olarak modellenenebilir. Bu etkiler, gürültü ile birleştiğinde, barkodun dijital görüntüsünü oluşturur. Gözlemlenen görüntü u_0 , gerçek görüntü u , bulanıklık operatörü K , heterojen aydınlatma I ve bunların üzerine eklenmiş gürültü n kullanılarak şu denklem ile ifade edilir:

$$u_0 = IK * u + n$$

Bulanıklık operatörü K genellikle değişimsiz (invariant) olarak kabul edilir ve orijinal görüntünün Nokta Yayılım Fonksiyonu (PSF), k ile $K = k * u$ evrişimi (konvolüsyonu) olarak temsil edilir. Pratik durumlarda, K operatörü açıkça bilinmez, ancak odak dışı bulanıklık gibi faktörleri hesaba katacak şekilde parametrize edilebilir ve yaklaşık olarak modellenenebilir [1].

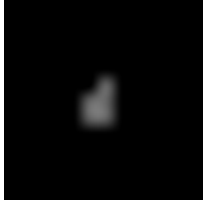
2.2. Nokta Yayılım Fonksiyonunun Oluşturulması

Nokta Yayılım Fonksiyonu (PSF); görüntüleme sisteminin, görüntü sahnesindeki bir nokta ışık kaynağına yanıtını temsil eder ve sistemin kalitesini değerlendirmede yaygın olarak kullanılır. Kırınım (difraksiyon), sapnıç (aberrasyon), odak kayması ve parlama gibi çeşitli optik etkileri içerir [2].

Sürecin başlangıcında, bir nokta ışık kaynağının etkisi benzeştirilir. Kontrol edilebilen aydınlatmaya sahip fiziksel bir kurulum yerine, siyah arka plan üzerinde bir nokta ışık kaynağını temsil eden beyaz bir dairenin yüksek çözünürlüklü dijital görüntüsü, bilgisayar yazılımı kullanılarak oluşturulur. Bu yaklaşım; aydınlatma kontrollü bir alanda beyaz ışık kaynağının, kameranın optik ekseninin üzerinde ve uzak bir mesafede tutulup noktasal ışık kaynağı üreten düzenekler gibi karmaşık donanım kurulumlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır ve maliyetleri azaltarak dijital görüntülerin iyileştirilmesini sağlar. Dijital görüntünün, doğru bir temsil için görüntüleme sisteminin optik eksenine üzerine uygun bir şekilde yerleştirilmesi gerekir.

Daha sonra nokta kaynağının farklı odak derinliklerinden (DOF) çeşitli görüntüler alınır. Bu görüntüler, iki boyutlu dağılımlar olarak görselleştirilir. Oluşturulan görüntüler mesafe, ışık, lens ve uzaydaki konumuna göre farklılık gösterir. Şekil 1 ve Şekil 3'te

belirtilen PSF'ler güneş ışığı altında, Şekil 2'de belirtilen PSF ise kontrollü aydınlatma altında alınmıştır.



Şekil 1: Güneş ışığı
altındaki bir PSF

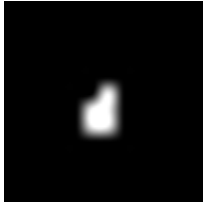


Şekil 2: Kontrollü aydınlatma
altındaki bir PSF



Şekil 3: Güneş ışığı
altındaki bir PSF

Her PSF görüntüsü, veri seti genelinde yoğunluk değerlerini standartlaştırmak için normalize edilir. Yukarıdaki şekillerde gösterilen PSF'lerin normalize edilmiş halleri sırasıyla Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Son olarak, PSF görüntülerinin boyutları, analiz edilen bulanık görüntünün boyutlarıyla aynı olacak şekilde yeniden boyutlandırılır. Bu adım, frekans uzayına Fourier dönüşümü işlemini mümkün kılarak sonraki görüntü iyileştirme işlemlerine olanak tanır.



Şekil 4: Normalize PSF.



Şekil 5: Normalize PSF.



Şekil 5: Normalize PSF.

2.3. Spektrum Dönüşümü

İmge netleştirme sürecini kolaylaştırmak için, mekansal uzaydan frekans uzayına geçiş avantajlıdır. Bu dönüşüm, net görüntünün hesaplanması için gereken matematiksel işlemleri basitleştirir ve hesaplama verimliliğini önemli ölçüde artırır. PSF'ler, orijinal görüntünün (net olmayan görüntü) boyutlarıyla eşleşecek şekilde yeniden boyutlandırılır. Bu hazırlık, PSF'lerin Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform - FFT) için uygun şekilde hizalanmasını sağlar.

Frekans uzayına dönüştürülen PSF'ler, Optik Aktarım Fonksiyonları (OTF) olarak adlandırılır. Bu OTF'ler, sistemin frekans yanıtını doğru bir şekilde temsil ettiği için netleştirme aşamasında ve görüntü restorasyon algoritmalarında hayati bir rol oynar.



2.4. Görüntü (İmge) Netleştirme Teknikleri

Netleştirme süreci, bulanık görüntüler üzerinde matematiksel modelin tersinden yola çıkılarak bulanıklaşmamış ve gürültüsüz olan görüntüye ulaşmayı amaçlar. Bulanık görüntüleri netleştirmek için ilgili kamera sistemi için üretilmiş PSF'nin Fourier dönüşümü olan OTF ile original görüntü, netleştirme işlemine tabi tutulur. Son olarak Ters Fourier Dönüşümü ile zaman uzayına geçilerek net görüntüye ulaşılır.

2.5 Uygulama ve Deneysel Kurulum

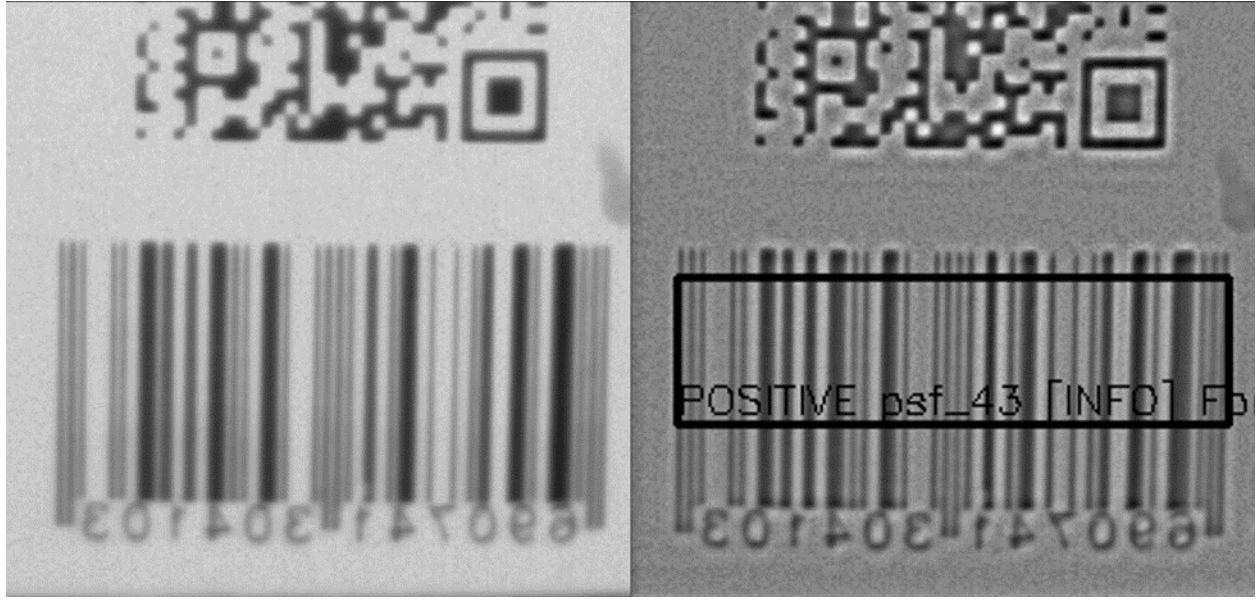
Önerilen yöntem, alan derinliği (DOF) dışında yakalanan dijital görüntüleri geliştirmek için tasarlanmıştır ve farklı kameralar ve lenslerle donatılmış çeşitli görüntüleme sistemlerinde uygulanabilir. Bu yaklaşımın deneysel doğrulaması için Arducam Global Shutter Kamera Modülü kullanılmıştır. Görüntüleme sistemi, 3.6 mm odak uzunluğuna ve f/2.5 diyafram açıklığına sahip bir S-mount lens içerir. Odak, optik eksenden 16 cm uzaklıkta olacak şekilde ayarlandı. Böylelikle deney düzeneğinin odak alanı 14.7 cm' den başlayarak 17.6 cm' ye kadar 2.9 cm olarak not edildi.

Oluşturulan PSF'nin doğruluğunu değerlendirmek için, alan derinliği (DOF) dışında çekilmiş bir dizi barkod görüntüsü, barkod okuyucu (çözücü) yazılım kullanılarak işlendi. Barkod okuyucu yazılımında, deneysel düzeneğe uygunluğu nedeniyle açık kaynaklı Python programlama dili kütüphanesi olan PyZbar kullanılmıştır. Netleştirilen bu görüntülerdeki barkodların başarılı bir şekilde çözülmesi, PSF'nin ve kameranın birbirine uygun olduğunun göstergesidir.

Bu düzenek; yöntemin kontrollü koşullar altında performansını değerlendirmek için seçilmiş, böylece sonucun kalitesinin ve pratik uygulanabilirliğinin hassas bir şekilde ölçülmesi sağlanmıştır.

3. Sonuçlar

Deneylerde aynı barkod, DOF aralığının (17.6 cm .) uzağında, kamera lensinden 17.6 cm. uzaklıktan başlayarak birinci aşamada 0.4 cm. ve sonraki aşamalarda 1'er cm. olmak üzere uzaklaştırılarak son aşamada 26 cm.'ye kadar ölçümler ve kontroller yapıldı. Bu mesafeler dikkatlice ölçülerek PSF'nin farklı mesafelerdeki performansı değerlendirildi. Farklı mesafelerde çekilen barkod görüntüleri PyZbar kütüphanesini kullanan kod çözücü yazılıma gönderildi. Kod çözücü yazılımın barkodu doğru okuduğu mesafeler kaydedildi. Bu uygulamaya ilişkin bir çıktı örneği, Şekil 7'de gösterilmiştir.

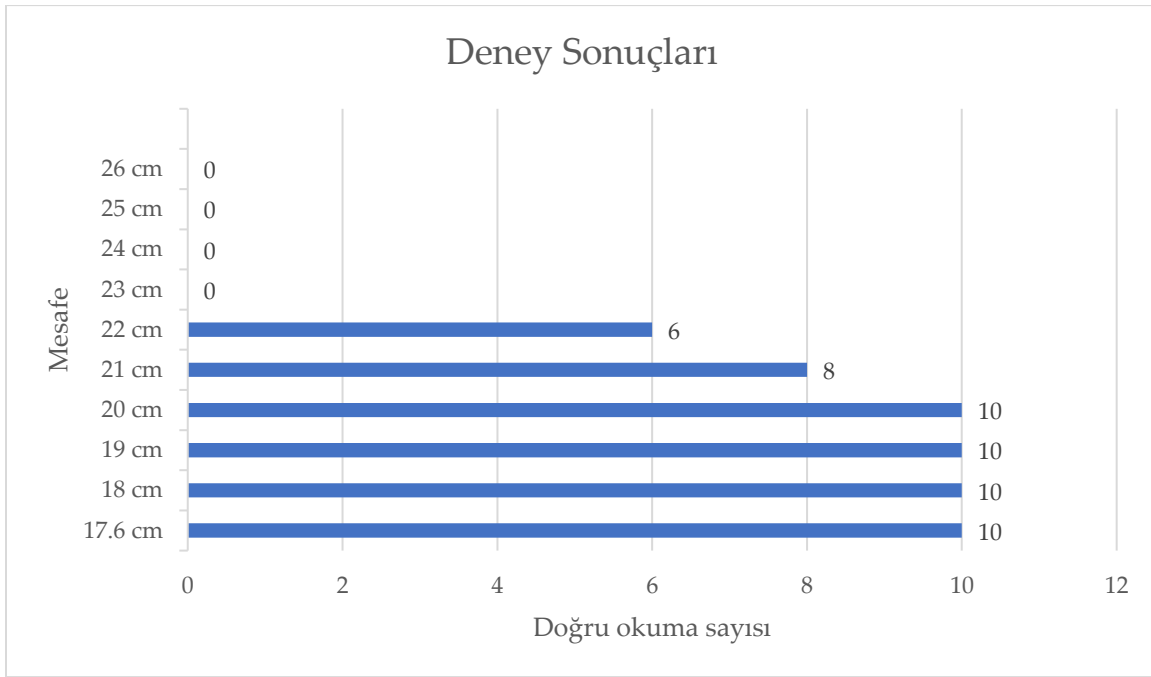


(a)

(b)

Şekil 6: (a) Bulanık (original) resim, (b) Netleştirilmiş resim

Grafik 1' de, netleştirilen görüntülerin barkod okuyucu tarafından doğru okunma sayıları gösterilmiştir. Her mesafe için 10 adet okuma yapılmıştır. Sonuç olarak; %100 doğru okuma mesafesi 20 cm. olarak belirlenmiştir. 21 cm. ve 22 cm. mesafelerden yapılan okuma başarımları (sırası ile 0,8 ve 0,6) ihtiyaca ve tercihe göre kullanılabilir.



Grafik 1: Başarılı Okuma Sayıları

DOF aralığı dışında belirli bir mesafeye kadar görüntüsü çekilen barkodlar, hatasız bir şekilde gerçek zamanlı olarak çözülmüş ve PSF'nin belirlenmiş olan mesafelerdeki verimliliklerini doğrulamıştır. Özellikle, DOF aralığı dışındaki doğru okuma yapılan mesafelerde görüntüsü çekilen 2B barkodların ve hatta QR kodların bile başarılı bir şekilde çözülmesi (Şekil 8), sistemin zorlu koşullarda kritik görüntü detaylarını geri kazanma kapasitesini ortaya koymuştur.



(a)



(b)

Şekil 7: (a) Bulanık (orijinal) QR kodu ve 2B barkod, (b) Netleştirilmiş QR kodu ve 2B barkod

Okuma başarı oranlarının nicel analizi sonucunda, PSF'in kamera uygunluğu ile görüntünün netleştirilme başarımı arasında doğru orantı gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar, PSF'nin özellikle alan derinliği dışındaki mesafelere sahip senaryolarda 2B barkod ve QR kod okuma performansını artırdığı hipotezini desteklemektedir.

4. Tartışma

Geleceğe yönelik olarak, bu çalışmanın kapsadığı yaklaşımın yapay zeka ve makine öğrenme algoritmaları ile birleştirilmesi sonucunda, daha kaliteli PSF'lerin elde edilmesini sağlayacaktır.

DOF alanının dışındaki sabit görüntüleri netleştirme amacıyla üretildiği gibi PSF'ler hareketten kaynaklı bulanıklıkların da netleşmesine olanak sağlayacaktır. Bu metod, pek çok hareketli ve gerçek zamanlı görüntüleme sisteminin kalitesini arttırdığı gibi görüntüleme sistemlerinin daha düşük maliyetli ve daha yüksek kaliteli olmalarını sağlayacaktır. Ayrıca, literatürdeki çalışmaların yakın takibi, var olan sistemden daha iyi



sonuç veren uygulamaların yolunu açacak gelişmelerden haberdar olmayı sağlayacaktır.

5. Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleşmesi için olanak ve kaynak sağlayan Asis Otomasyon A.Ş. Ar-Ge Merkezi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

- [1] L. Dumas, M. El Rhabi, and G. Rochefort, "An evolutionary approach for blind deconvolution of barcode images with nonuniform illumination," in Proc. 2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC 2011), New Orleans, LA, USA, 2011, pp. 2423–2428. doi: 10.1109/CEC.2011.5949917.
- [2] C. Zhou, Point Spread Function Engineering for Scene Recovery, Chapter 2, "Background and Overview," Section 2.1, "Point Spread Function and Depth of Field." 2013, p. 10.