

KAYDIRMA İLE DEĞİŞEN KOORDİNAT DÖNÜŞÜMÜ TABANLI GÖRÜNTÜ RESTORASYONU

Kamil B. ALICI*
TÜBİTAK Uzay Teknolojileri
Araştırma Enstitüsü, Ankara

ÖZET

Cisim düzlemindeki bir noktanın kaydırılması durumunda görüntü düzlemindeki görüntüsü aynı miktarda kaymaması, optik çarpıtma gibi çeşitli aberasyonların varlığında gerçekleşir. Uydu görüntüleme sistemlerinde aberasyonların varlığında sistemin kaydırma ile değişen (shift-variant) analizlerinin yapılması gerekir. Bu çalışmada farazi GÖKAY-1 uydusu için optik kırınım (diffraction) ve optik çarpıtma (distortion) durumunda görüntü simülasyonu ve görüntü restorasyonu sonuçlarını sunduk. Önerdiğimiz yöntemle gerçekleştirilen görüntü restorasyonu sonucu, orijinal görüntüye yaklaşan sonuçlar elde ettik.

GİRİŞ

Uydu görüntülerindeki bulanıklıklar optik sistemin özelliklerine göre uzaya bağlı, noktasal cismin uzaya kaydırılması ile değişen görüntü özelliklerine sahip olabilir. Kaydırma ile değişen (KİD) durumu için çeşitli yöntemler ile görüntü restorasyonu yapılabilir. Kırınım durumundaki etki kaydırma ile değişmezdir. Bu çalışmada optik kırınım ve optik çarpıtma (distorsiyon) aberasyonunun varlığında görüntü modellemesi ve görüntü restorasyonu sonuçlarını sunuyoruz. Kullandığımız yöntem, geometrik dönüşüm ve doğrusal, kaydırma ile değişmeyen (linear shift-invariant, LSI) görüntü restorasyonun kombinasyonudur. Bütün sonuçlar farazi bir uydu sistemi olan GÖKAY-1 için gerçekleştirilmiştir. Gerçek sistemlerde her zaman aberasyonlar mevcut olduğu için KİD görüntü restorasyon yöntemleri aberasyon etkilerinin onarımı için gereklidir. Görüntü restorasyonu, bozulmuş görüntülerden iyileştirilmiş görüntüler elde edilmesini sağladığı için tespit, teşhis, algılama ve yorumlama gibi uydu görüntüsü uygulamalarında yararlıdır. Görüntü restorasyonu uydu görüntüsü işleme basamaklarının en önemlilerindedir. Görüntü restorasyonu, yer gözlemlerinin yanında astronomi, mikroskopi ve radar görüntülemesi gibi diğer uygulamalarda da önem taşır. Optik aberasyonlar görüntüleme koşulları ve bileşenlerinin görüntü kalitesini düşürür. Görüntü restorasyonu orijinal görüntünün elde edilmesine yardımcı olur. Optik çarpıtma gibi koma, alan eğriliği ve astigmatizm de görüntünün geometrik olarak bozulmasına neden olur [Williams ve Becklund(2002)]. Burada uygulanan KİD görüntü restorasyonu optik çarpıtma ve

*Doç. Dr., Uzaktan Algılama Grubu, E-posta: kamil.alici@tubitak.gov.tr

koma durumlarında uygulanabilirken her aberasyon durumu için uygulanabilir değildir. Geometrik dönüşümler ile geometrik çarpıtmalar bir dereceye kadar uzaklaştırılabilir. Koordinat dönüşümü sırasında uygulanan örnekleme değişimleri görüntüde bozulmaya neden olmamaktadır. Bu aşamadan sonra görüntü restorasyonu filtreleri uygulanır ve görüntü bulanıklıkları azaltılır. Bu yöntemin sağladığı sonuçları görüntü kalitesi hesapları ile niceliklendirdik. Literatürde KİD durum için görüntü restorasyonu ve koordinat dönüşümü çalışmaları mevcuttur.

Koordinat dönüşümünü (coordinate transformation) takip eden, kaydırma ile değişmeyen restorasyonun uygulandığı optik çarpıtma durumu çalışılmıştır [Robbins ve Huang(1972)]. Bu yöntemde bulanıklığın azaltılması kaydırma ile değişmeyen restorasyon ile mümkün olmuştur [Sawchuk(1974)]. Astigmatizm ve alan eğriliği durumundaki KİD ters evrişim için, problemin karmaşıklığını azaltmak amacıyla koordinat dönüşümleri uygulanmıştır [Peyrovian ve Sawchuk(1975)]. KİD durum için hareket kaynaklı bulanıklık modellenmiş ve ilgili görüntü restorasyonu algoritmaları geliştirilmiştir. Sonuçlar deneylerden elde edilen gerçek görüntüler ile doğrulanmıştır [Sorel ve Flusser(2008)]. Görüntü işlemenin tersine problemi, yinelemeli, dalgacık tabanlı yöntemler kullanılarak çalışılmıştır [Beck ve Teboulle(2009)]. Kromatik aberasyon odaklama kaynaklı bulanıklığa neden olur ve bir görüntü işleme planı ile azaltılabilir [Korneliussen ve Hirakawa(2014)]. Girdi görüntüsü yamalara ayrılıp, birer birer onarılmış ve sonuçlar gelişmiş bir yöntem kullanılarak birleştirilmiştir [Papayan ve Elad(2015)]. Bağlaşik ışık olmayan aydınlatma durumu için, bir dalga cephesi düzeltme algoritması sunulmuş, simülasyon ve deneysel görüntüler ile doğrulanmıştır [Zelenka ve Koch(2016)]. Geniş boyutlu görüntülerdeki KİD bozulmalarda, dağıtımli hesaplama algoritmaları kullanılmıştır [Mourya, Ferrari, Flamary, Bianchi ve Richard(2017)]. Sabit kamera parametreleri için odaklama hatası kaynaklı bulanıklık miktarı sahnenin derinliği ile değişir. Bu durum kromatik aberasyon için de geçerlidir ve hiperspektral görüntü verisinden derinlik haritası çıkarılmasında kullanılır [Zia, Zhou ve Gao(2021)]. KİD nokta saçılım fonksiyonu ile oluşmuş görüntülerde öğrenme tabanlı Wiener filtresi yöntemi uygulanmıştır [Ghosh ve Swartzlander(2023)].

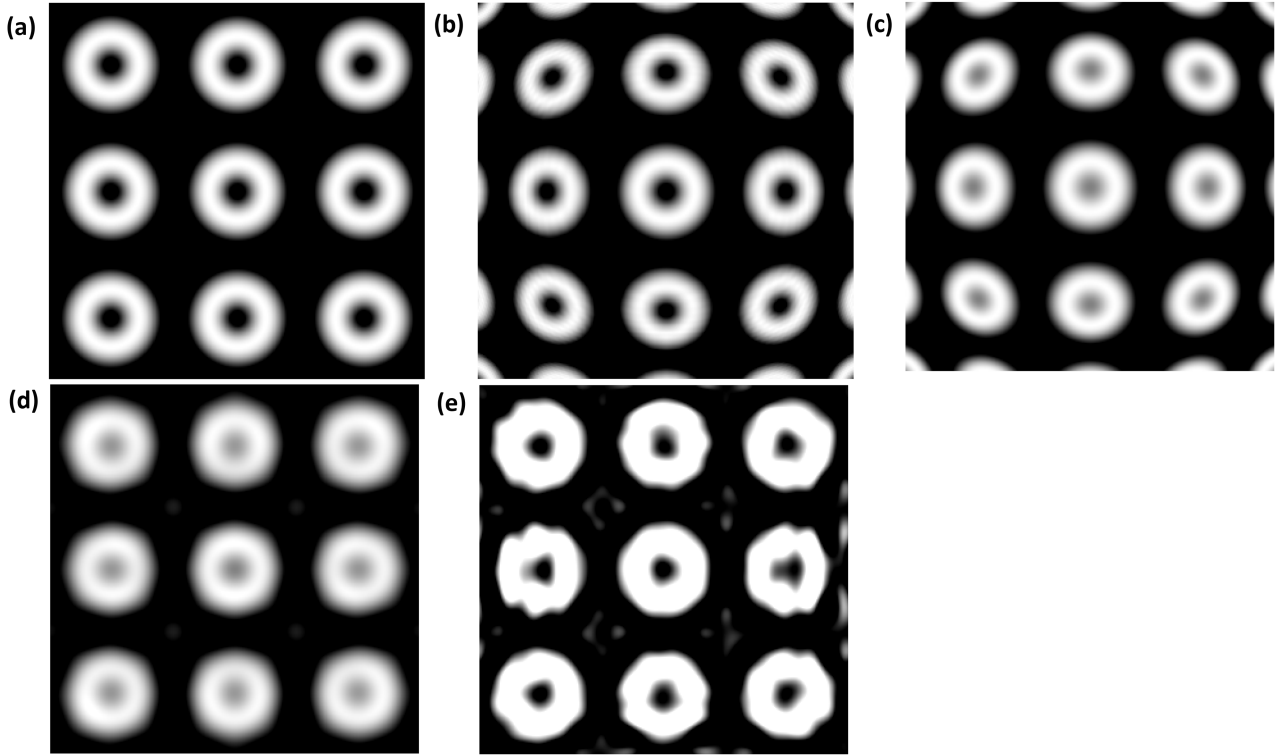
Kaydırma ile değişmeyen kırınım ile oluşan görüntü bulanıklıklarını burada gösterdik. Aynı zamanda KİD aberasyonlar durumu için de görüntü bozulmalarını modelledik. Doğrusal kaydırma ile değişmeyen (LSI) sistem yanıtını ve ilgili görüntü restorasyonunu Wiener-Helstrom filtresi ile çalıştık. Bu makalede koordinat dönüşümü restorasyonu (Coordinate transformation restoration, CTR) yöntemini kırınım ve optik çarpıtma durumu için gerçekleştirdik. Koordinat dönüşümü restorasyonunda, ilk önce geometrik koordinat dönüşümünü uyguladık, sonrasında ise LSI Wiener ters evrişim yöntemi ile kırınım etkilerini azalttık. Bütün işlemlerimiz kontrollü bir şekilde gerçekleştirildi: öncelikle sentetik görüntüler üretildi, sonrasında duruma özel Seidel aberasyonu için KİD görüntü üretildi.

Sonraki bölümde görüntü üretimi için teorik arkaplandan bahsedeceğiz. 3. Bölümde görüntü zinciri simülasyonlarının sonuçlarını KİD aberasyonların varlığında, optik kırınımın olması ve olmaması durumlarında göstereceğiz. Koordinat dönüşümü yöntemini sadece optik çarpıtma ve kırınım durumları için gösterdik.

YÖNTEM

Aberasyonların görüntü üzerine etkilerini inceledik, özellikle aşağıda formülde gösterilen Seidel aberasyonlarının etkilerini çalıştık [Introne, Block ve Schott(2005), Alici(2023), Alici(2024)]:

$$W[r, \theta, x_0] = \sum_{j,m,n} W_{2j+m,2n+m,n} x_0^{2j+m} r^{2n+m} \cos^m(\theta) \quad (1)$$



Şekil 1: (a) Optik çarpıtma için hazırlanmış sentetik görüntü, (b) Çarpıtma durumu görüntü simülasyonu, (c) Kırınım ve optik çarpıtma varlığında görüntü simülasyonu, (d) Kırınım ve optik çarpıtma durumuna koordinat dönüşümü uygulanması, (e) Koordinat dönüşümü ve görüntü restorasyonu sonucu.

Burada, x_0 çıkış gözbebeğinde, normalize görüntü noktası yüksekliğidir, $W_{2j+m, 2n+m, n} x_0^{2j+m} r^{2n+m} \cos^m(\theta)$ dalga cephesi hatası katsayılarıdır (wavefront error, WFE).

Optik çarpıtma için WFE terimi $W_{311} : x_0^3 r \cos^3 \theta$ 'dir. WFE'nin verilen maksimum değeri için, $W_{311} = 0.5\lambda$, çıkış gözbebeğindeki dalga cephesi sapmasını modelledik. Optik çarpıtma etkilerinin gösterilmesi için Şekil 1'de kısmen verilen sentetik görüntüyü kullandık. Burada iki boyutta periyodik olarak dizilmiş sinüs toroidleri mevcuttur. Görüntü simülasyonları için optik kırınım ve optik çarpıtma etkilerinin görüntü kalitesini nasıl etkilediğini belirledik. Odak düzlemindeki her bir görüntü noktası için çarpıtma aberasyonunun miktarı değişmektedir. Önce sadece çarpıtma uygulayıp Şekil 1(b)'daki görüntü simülasyonunun sonucunu gösterdik. İkinci olarak sadece üçüncü derece polinom fonksiyonu kullanarak koordinat dönüşümü gerçekleştirdik. Bu polinom fonksiyonu şu şekilde açılmaktadır:

$$u = A(1) + A(2)x + A(3)y + A(4)xy + A(5)x^2 + A(6)y^2 + A(7)x^2y + A(8)xy^2 + A(9)x^3 + A(10)y^3 \quad (2)$$

$$v = B(1) + B(2)x + B(3)y + B(4)xy + B(5)x^2 + B(6)y^2 + B(7)x^2y + B(8)xy^2 + B(9)x^3 + B(10)y^3 \quad (3)$$

burada u, v kontrol noktalarının orijinal koordinat sistemindeki gösterimi. x, y ise kontrol noktalarının dönüşüme uğramış koordinat sistemindeki gösterimidir.

Wiener filtresi ise şu formülle uygulanır:

$$W[f_x, f_y] = \frac{H^*[f_x, f_y]}{|H[f_x, f_y]|^2 + \frac{|N[f_x, f_y]|^2}{|F[f_x, f_y]|^2}} \quad (4)$$

Burada, $N[f_x, f_y]$ gürültünün güç spektrumu, $F[f_x, f_y]$ orijinal, bozulmamış cisim görüntüsünün güç spektrumu, $H[f_x, f_y]$ sistemin optik aktarım fonksiyonu, $H^*[f_x, f_y]$ ise optik aktarım fonksiyonunun kompleks eşleniğidir.

BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Şekil 1(b)'de sadece optik çarpıtma durumu çizdirilmiştir. Şekil 1(c)'de ise optik çarpıtma durumuna ek olarak optik kırınım etkisi çizdirilmiştir. Şekil 1(d)'de kırınım varlığında optik çarpıtma durumuna koordinat dönüşümü uygulanmıştır. Orijinal durum ile oluşan fark polinom dönüşümü katsayılarına ince ayar yaparak daha da düşürülebilir. Burada bozulmuş sinüs toroidlerini ele alarak görüntü bulanıklıklarının derecesini gösterdik. Varil şekli oluşturan güçlü optik çarpıtmayı gözlemledik. Aberasyonlar görüntülerin optik kesim frekansını değiştirmemektedir, çünkü açıklık kırınımı kesim frekansını belirler. Sadece kırınım olan ve aberasyonlu durumu karşılaştırdığımızda görüntülerdeki bulanıklıkların benzerliklerini görüyoruz. Uzamsal kaymalar burada gösterilen varil çarpıtmasının ana etkisini oluşturmaktadır. CTR yönteminin sonuçlarını Şekil 1(d)'de gösteriyoruz. Geometrik dönüşümü takip eden kaydırma ile değişmeyen ters evrişim işlemi Şekil 1(e)'deki görüntüyü vermektedir. Geometrik dönüşüm ile çarpıtma etkisi kaldırıldı, sonrasında uygulanan Wiener filtresi ile de bulanıklık kaldırılmıştır. Görüntülerin uzamsal çözünürlüğü artmış, varil biçimli çarpıtma etkisi kaldırılmıştır. Sentetik görüntü kullanılarak PSNR ve korelasyon katsayısı değerleri hesaplanabilir. Burada kırınım ve bir Seidel aberasyonu olan optik çarpıtma için CTR sonuçlarını sunduk.

SONUÇ

Kaydırma ile değişen görüntü restorasyonu çalışmasını optik çarpıtma aberasyonu durumunda çalıştık. Sistem parametreleri farazi olarak belirlenmiş olan GÖKAY-1 uydusu için optik kırınım ve optik çarpıtma durumunda görüntü simülasyonu ve görüntü restorasyonu sonuçlarını sunduk. Görüntü kalitesi karşılaştırma metriği olarak korelasyon katsayısı, tepe sinyal gürültü oranı (PSNR) ve yapısal benzerlik indis ölçeği (SSIM) kullanılır. Burada orijinal görüntü ile kaydırma ile değişen durum için gerçekleştirdiğimiz ilk restorasyon sonucu arasındaki farkları görsel olarak çalıştık.

Kaynaklar

- [Williams ve Becklund(2002)] Williams, C. S. ve Becklund, O. A., 2002. *Introduction to the optical transfer function*, SPIE Press, Cilt.60, s.862-872
- [Robbins ve Huang(1972)] Robbins, G. M. ve Huang, T. S., 1972. *Inverse filtering for linear shift-variant imaging systems*, Proceedings of the IEEE, Cilt.60, s.862-872
- [Sawchuk(1974)] Sawchuk, A. A., 1974. *Space-variant image restoration by coordinate transformations*, Journal of Optical Society A, Cilt.64, s.138-144
- [Peyrovian ve Sawchuk(1975)] Peyrovian, M. J., Sawchuk, A. A., 1975. *Restoration of astigmatism and curvature of field*, Journal of Optical Society A, Cilt.65, s.712-715
- [Sorel ve Flusser(2008)] Sorel, M., Flusser, J., 2008. *Space-variant restoration of images degraded by camera motion blur*, IEEE Transactions on Image Processing, Cilt.17, s.105-116
- [Beck ve Teboulle(2009)] Beck, A., Teboulle, M., 2009. *A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems*, SIAM journal on imaging sciences, Cilt.2, s.183-202

- [Korneliussen ve Hirakawa(2014)] Korneliussen, J. T., Hirakawa, K., 2014. *Camera processing with chromatic aberration*, IEEE Transactions on Image Processing, Cilt.23, s.4539-4552
- [Papayan ve Elad(2015)] Papayan, V., Elad, M., 2015. *Multi-scale patch-based image restoration*, IEEE Transactions on Image Processing, Cilt.25, s.249-261
- [Zelenka ve Koch(2016)] Zelenka, C., Koch, R., 2016. *Restoration of images with wavefront aberrations*, 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR), s.1388-1393
- [Mourya, Ferrari, Flamary, Bianchi ve Richard(2017)] Mourya, R., Ferrari, A., Flamary, R., Bianchi, P., Richard, C., 2017. *Distributed approach for deblurring large images with shift-variant blur*, 2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), s.2463-2470
- [Zia, Zhou ve Gao(2021)] Zia, A., Zhou, J., Gao, Y., 2021. *Exploring Chromatic Aberration and Defocus Blur for Relative Depth Estimation From Monocular Hyperspectral Image*, IEEE Transactions on Image Processing, Cilt.30, s.4357-4370
- [Ghosh ve Swartzlander(2023)] Ghosh, A., Swartzlander, G., 2023. *ShiVaNet: Shift Variant Image Deconvolution using Deep Learning*, 2023 IEEE Western New York Image and Signal Processing Workshop (WNYISPW), s.1-4
- [Introne, Block ve Schott(2005)] Robert E. Introne, Noah R. Block, and John R. Schott, *Comparison of monochromatic and polychromatic modeling of sparse-aperture image quality*, 2005 IEEE Aerospace Conference
- [Alici(2023)] Alici, K. B., 2023. *Numerical study of satellite images in the presence of fifth-order aberrations and tri-arm fractal sparse apertures*, Optical Engineering, Cilt.62(12), s.123104
- [Alici(2024)] Alici, K. B., 2024. *Numerical study of satellite image quality in the presence of Seidel aberrations*, Microwave and Optical Technology Letters, Cilt.66(1), s.e34024