

Yüksek Çözünürlüklü Uydu Kameralarının Bilgisayar Destekli Hizalanması

İsmail BAŞLAR¹ ve Mustafa EKİNCİ²
TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma
Enstitüsü, ODTÜ Yerleşkesi, 06800,
Çankaya, Ankara

Özgür KARCI³
TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma
Enstitüsü, ODTÜ Yerleşkesi, 06800,
Çankaya, Ankara
The Institute of Optics, University of
Rochester, Rochester, NY 14620, USA

ÖZET

Yüksek çözünürlüklü uydu kameralarının hizalanması, istenilen performansın sağlanması açısından önemli yer tutmaktadır. Sıkı hizalama gereksinimlerine sahip olan teleskobun bilgisayar destekli hizalama yöntemi ile kısa zamanda yüksek hassasiyette hizalanması için gerekli yöntem ve yazılımın geliştirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada iki yöntem kullanılarak hizalama prosedürü oluşturulmuştur. İlk önce Cassegrain bir kolimatör sisteminin ikinci aynasının optik eksenindeki kaçıklıklarının görüntü bozulmasına etkisini belirten hassasiyet matrisi belirlenmiştir. Bu matristen faydalanılarak hizalama prosedürü oluşturulmuştur. Bu yöntemle balangıçta büyük olan hizalama hatası küçük değerlere indirilmiştir. İkinci yöntemde ise Merit Fonksiyonu Regresyonu yöntemi uygulanarak hizalama işlemi tamamlanmıştır. Belirlenen hizalama prosedürü optik tasarımda hizalamanın bozularak tekrar düzeltilmesi ile test edilmiştir. Yapılan çalışma ile bilgisayar destekli hizalama platformu oluşturulmuştur. Kısa zamanda performans kriterlerine ulaşabilen hizalama adımları saptanmıştır. Oluşturulan analiz ve tasarım programlarının entegrasyonları aracılığıyla farklı optik sistemlerin hizalanması mümkün olacaktır.

¹ Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK UZAY, E-posta: ismail.baslar@tubitak.gov.tr

² Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK UZAY, E-posta: mustafa.ekinci@tubitak.gov.tr

³ Dr. Başuzman Araştırmacı, TÜBİTAK UZAY, E-posta: ozgur.karci@tubitak.gov.tr

GİRİŞ

Yüksek hassasiyetli optik sistemlerin hizalanması ve bu hizalanmanın operasyon boyunca korunması sistem performansının yakalanmasındaki en önemli etmendir. Yüksek çözünürlüklü uydu kameraları ve bu kameraların yer testlerinde kullanılan kolimatör sistemleri bu tür optik sistemlere örnek olarak gösterilebilirler. Optik hizalama işlemi genel olarak optik sistemin ürettiği dalga cephesi ölçülerek ve bu ölçümlerden elde edilen sonuçların aberasyon teorisi kullanılarak yapılan analizler ile mümkün olmaktadır. [Kingslake, 1951; Thompson, 2005]

Yüksek hassasiyetli optik sistem hizalaması zaman alan bir işlem olduğundan hizalamanın daha hızlı ve nicel olarak yapılabilmesi için bilgisayar destekli yöntemler üzerinde çalışılmaktadır. Bu yöntemlerin kullanılması hem istenilen performansın yakalanması açısından hem de kısa sürede hizalama işleminin gerçekleştirilmesi açısından önemlidir. Bilgisayar destekli hizalama yöntemi interferometre cihazından alınan dalga cephesinden elde edilen görüntü bozulması verisini, optik tasarım programını, bilgisayar programlarını ve optimizasyon algoritmalarını bileştiren bir yöntemdir. [Huang, Li, ve Cao, 2006]

Bilgisayar destekli hizalama ile teorik tasarım performansı ve sistemin ölçülen performansı arasındaki fark minimize edilmeye çalışılmaktadır. Hizalama adımlarını gerçekleştirmek için sistemin hiza kaçıklığının optik bozunumların üzerindeki etkisini belirleyen hassasiyet değerlerine ihtiyaç vardır. Bu değerler hizalama yapılırken hangi ekseninde ne kadar hareket yapılacağını ve hizalama adımlarının hangi sırada yapılacağını belirlemede yardımcı olmaktadır. [Bin, Fan, ve Tang, 2012; Huang ve Li, 2007] Bilgisayar destekli hizalama ile ilgili yapılan çalışmalarda, optik tasarım programının kabiliyetine göre sistem geliştirildiği görülmüştür. Kimi tasarım programları doğrudan ölçüm verisi üzerinden tahmin yapabilmekteyken, bu işleve sahip olmayan tasarım programlarında analizlerin diğer araçlar yardımı ile yapıldığı görülmüştür. [Figoski, Shrode, ve Moore, 1989; Rimmer, 1990]

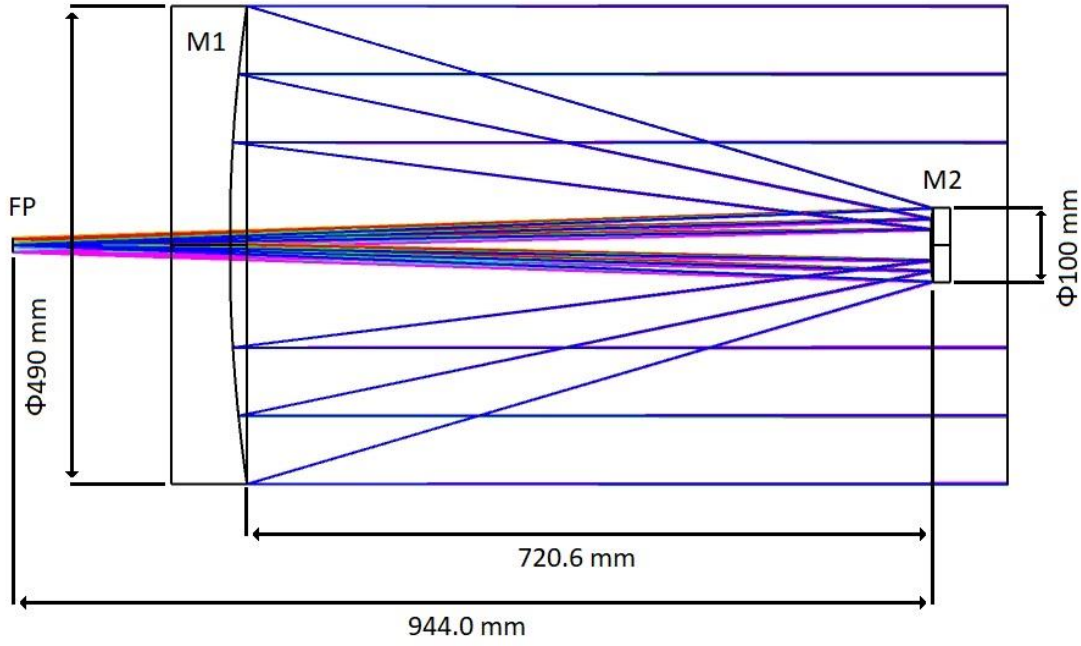
Bu çalışmada, TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü bünyesinde geliştirilen yüksek hassasiyetli Cassegrain tipi bir kolimatör sisteminin bilgisayar destekli hizalanması gösterilmiştir.

OPTİK TASARIM

Geliştirilen Bilgisayar Destekli Hizalama (BDH) yöntemi Cassegrain kolimatör sistemi ele alınarak geliştirilmiştir. [Ekinci ve Selimoglu, 2016] Kolimatör teleskoplar, uydu teleskoplarının yer testlerinde kullanılan kritik öneme sahip referans optik sistemlerdir. Bu nedenle optik giriş açıklıkları test edilecek teleskoptan daha büyük olmalı ve ürettiği kolime ışığın optik kalitesi test edilecek teleskoptan daha yüksek kalitede olmalıdır. Çalışmada kullanılan yüksek hassasiyetli kolimatör teleskop sistemi kırınım-limitli Cassegrain optik tasarımına sahiptir. Bu tasarım parabolik birinci ayna ve hiperbolik ikinci aynadan oluşmaktadır. Birinci aynanın ayna yarıçapı değeri -1.700 mm ve konik katsayısı -1 iken ikinci aynanın ayna yarıçapı -300 ve konik katsayısı -1,737'dir. Teleskobun tasarım parametreleri Tablo 1'de, tasarımı ise Şekil 1'de gösterilmiştir. Optik tasarımın kolimasyon performansı 0.001369 mrad olarak belirlenmiştir.

Tablo 1: Cassegrain Kolimatör Tasarım Parametreleri

Parametre	Değer
Optik Açıklık (mm)	490
Referans Dalga Boyu (nm)	550
Odak Uzaklığı (mm)	6.200
F-sayısı	12.7
İkinci Ayna Karartması (Çap ile orantılı)	20%
Toplam Uzunluk (mm)	944

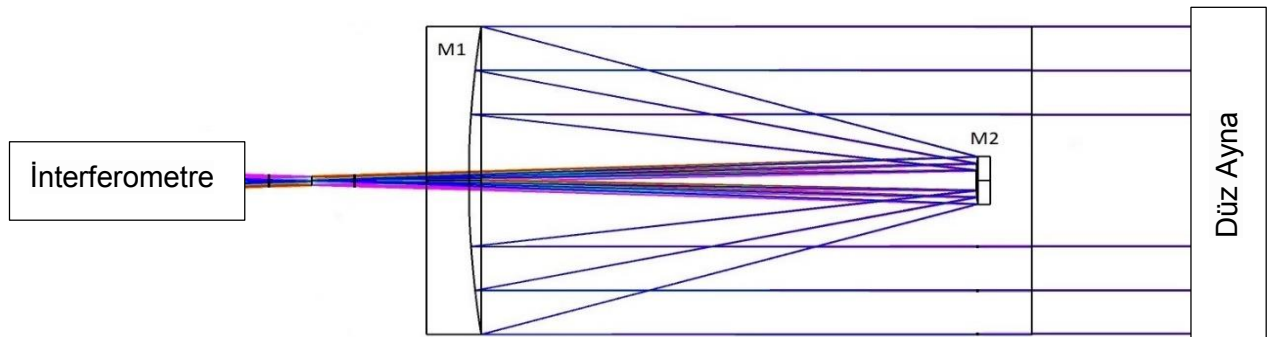


Şekil 1: Cassegrain Kolimatörün Optik Tasarımı (M1: Birinci Ayna, M2: İkinci Ayna, FP: Odak Düzlemini ifade etmektedir)

YÖNTEM

Hizalama Ölçüm Donanımı

Hizalama için kurulan çift geçişli interferometrik düzenek Şekil 2’ de verilmiştir. İnterferometrenin odağı kolimatörün odak düzlemine getirilmektedir. İnterferometrenin içerisindeki kaynaktan çıkan ışığın bir kısmı kolimatörden geçtikten sonra düz ayna üzerinden geri dönerek interferometrenin ölçüm sensörüne gelirken, bir kısmı interferometrenin içindeki optik sistem sayesinde dışarı çıkmadan ölçüm sensörüne erişmektedir. Bu iki grup ışığın arasındaki faz farkından kaynaklanan bir girişim deseni oluşmaktadır. Bu girişim deseni ile dalga cephesi hatası hesaplanmaktadır. Dalga cephesi hatası Zernike terimlerine dönüştürüldükten sonra hizalama adımları M2 üzerinde uygulanmaktadır. Hizalamada gerek duyulan, M2 üzerindeki hassas hareketler piezo eyleyiciler ile beş ekseninde sağlanmaktadır.



Şekil 2: Otokolimasyon, Kolimatör Hizalama Deney Düzeneği

Hizalama Kaçıklığının Hassasiyet Matrisi İle Tahmini

Kamera hizalama adımları oluşturulurken görüntü bozulmalarının ifade edilmesinde Zernike polinomlarından faydalanılmaktadır. [Choi ve Kim, 2003] Zernike katsayıları ile ifade edilen dalga cephesi verileri, hizalama kaçıklığı ile birlikte lineer bir değişim gösterdiği öngörülerek hizalama algoritması çalışmasında kullanılmaktadır. [Kim, Choi, ve Kang, 2005]

Bilgisayar destekli hizalamada kullanılan ters hassasiyet analizi yönteminin matematiksel modeli Denklem 1 ile verilmiştir. [Bin, Lei, ve Tian, 2010]

$$A\Delta X = \Delta F \quad (1)$$

Denklem 1' de:

A, Hassasiyet Matrisini, $\Delta X = X - X_0$ hizalama kaçıklığını (optik eksenenden uzaklaşma (decenter)), yatma (tilt)) $\Delta F = F - F_0$ ise optik tasarımda elde edilen Zernike katsayıları ile yapılan ölçümde elde edilen Zernike katsayıları arasındaki farkı ifade etmektedir. Zernike polinomları hizalamadan kaynaklanan görüntüdeki bozuklukları gösterebilmektedir. Zernike polinomları ve görüntü bozulması açıklamaları Tablo 2'de verilmiştir. [Zhang, Zheng, ve Li, 2013; Zhao, Ji, ve Yue, 2018]

Tablo 2: Zernike Polinomları

Z_n	Zernike Polinomu	Açıklama
Z_0	1	Piston
Z_1	$P\cos\theta$	x eksenindeki yatma
Z_2	$p\sin\theta$	y eksenindeki yatma
Z_3	$2p^2-1$	Odak kayması
Z_4	$p^2\cos 2\theta$	Astigmatizm 0 ya da 45°
Z_5	$p^2\sin 2\theta$	Astigmatizm 45°
Z_6	$(3p^3-2p^2)\cos 2\theta$	x koma ve yatma
Z_7	$(3p^3-2p)\sin\theta$	y koma ve yatma
Z_8	$6p^4-6p^2+1$	Küre biçiminde ve odak

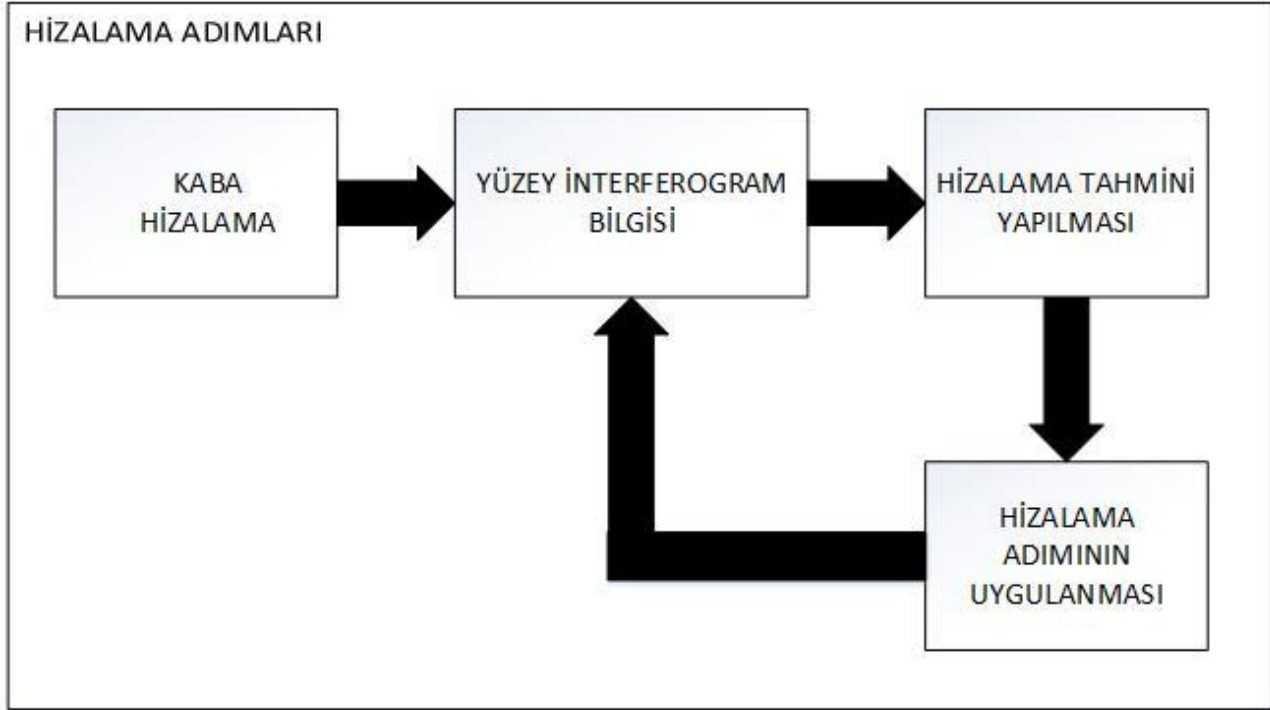
Hizalama Kaçıklığının Merit Fonksiyonu Regresyonu Yöntemi İle Tahmini

ZEMAX optik tasarım programının kullanmış olduğu Merit Fonksiyonu Regresyonu (MFR) aslında sönümlü en küçük kareler metodudur. MFR'nin denklemi Denklem 2'de verilmiştir. V_i değeri değişkenin anlık değerini, T_i değeri değişkenin hedef değerini, W_i değeri herbir değişkenin ağırlık değerini göstermektedir. MFR yöntemi MF^2 değerini minimize etmeye çalışmaktadır. Hizalama kaçıklığı tahmin edilirken Zernike katsayıları değişken olarak alınmıştır. Kullanılan Zernike katsayılarının ağırlıkları ise eşit alınmıştır. [Huang ve Li, 2010; Lee, Ryoo, Park, ve Lee, 2012]

$$MF^2 = \sum \frac{W_i(V_i - T_i)^2}{\sum W_i} \quad (2)$$

Hizalama Adımları

Şekil 3’de hizalama sürecinde yapılan işlemler verilmiştir. Donanım üzerinde hizalama tahminlerinin yapılması için ilk önce kaba hizalama yapılması gerekmektedir. [Zhao, Jiao, Liao, Wang, ve Chen, 2010] Kaba hizalamadan sonra alınan interferogram verisi ile hassasiyet matrisi ve merit fonksiyonu regresyonu yöntemleri kullanılarak eksenlerin hizalama miktarları tahmin edilmektedir. Cassegrain sistemlerin hizalanmasında görüntü bozulmalarına karşı hareketi en hassas olan elemanın ikinci ayna olduğu bilinmektedir. Bu yüzden hizalama adımları bu ayna üzerinde yapılacak değişiklikler üzerine tasarlanmaktadır. [Kim, Choi, ve Kang, 2004]



Şekil 3: Hizalama Adımları

UYGULAMALAR

Hassasiyet Matrisi Oluşturulması ve Hizalama Adımlarının Belirlenmesi

Hizalama için gerekli düzeltme miktarını belirleyebilmek için hizalama yapılacak serbestlik derecelerinin görüntü kalitesine etkisinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için optik tasarım programında M2 üzerinde beş serbestlik derecesinde çeşitli bozulmalar oluşturularak sistemin optik kalitesinin değişimi analiz edilmiştir. Buradan çıkan sonuç MATLAB’a aktarıldıktan sonra yapılan analizlerle hassasiyet matrisi oluşturulmuştur. Görüntü bozulmasını ifade eden Z_5, Z_6, Z_7, Z_8 terimlerinin hizalama kaçıklığı ile lineer değişim gösterdiği saptanmıştır. Oluşturulan hassasiyet matrisi Tablo 3’de verilmiştir. Bu tablodaki:

- THI : M2’ye optik ekseninde uygulanan öteleme bozunumu (M1-M2 arasındaki mesafe)
- DECX : M2’ye x ekseninde uygulanan öteleme bozunumu
- DECY : M2’ye y ekseninde uygulanan öteleme bozunumu
- TX : M2’nin x ekseninde uygulanan dönü bozunumu
- TY : M2’nin y ekseninde uygulanan dönü bozunumu

değerlerini ifade etmektedir.

Tablo 3: Hassasiyet Matrisi

	THI	DECX	DECY	TX	TY
Z ₅	0	0	0	0	0
Z ₆	0	3.4983	0	0	51.9
Z ₇	0	0	3.4983	-51.9	0
Z ₈	0.2791	0	0	0	0

Hassasiyet matrisi incelendiğinde Z₈'in THI'dan etkilendiği görülmektedir. Z₆'nın DECX ve TY den, Z₇'nin ise DECY ve TX'den etkilendiği ve TX-TY'nin sistem performansına etkisinin büyük olduğu görülmektedir. Hassasiyet matrisinin incelenmesi ile oluşturulan hizalama adımlarının akış diyagramı Şekil 4'de verilmiştir. Öncelikle Z₈ değerine bakılarak hassasiyet matrisindeki değere göre THI hareketi hesaplanır ve düzeltme uygulanır. Daha sonra aynı işlem sırasıyla TX, TY, DECX, DECY için uygulanır. Bu adımlar bittikten sonra Z₈ için tekrar hizalama yapılır. Bu hizalamanın sebebi diğer eksenlerdeki hareketlerin aslında Z₈'e etki etmesidir. Bu küçük etkiler hassasiyet matrisinde göz ardı edilmiştir. Her hizalama adımı sonrası görüntü bozulması değeri tekrar hesaplanmaktadır.



Şekil 4: Hassasiyet Matrisi ile hizalama akışı

Hassasiyet matrisi ile yapılan hizalamada aynı Zernike terimine birden fazla eksenlerdeki hareketin etki etmesinden dolayı görüntü bozulması değerleri optik tasarımdaki değerlere yeterince yaklaştırılamamaktadır. Bir diğer durumda bazı eksenlerdeki hareketin Zernike terimlerine etkisinin doğrusal olmamasıdır. Bu yüzden hassasiyet matrisi ile yapılan hizalamanın ardından tasarımdaki değerlere yaklaştırılan sistem Merit Fonksiyonu Regresyonu yöntemi ile tekrar hizadaştırılmaktadır. Merit Fonksiyonu Regresyonu yöntemi ile yapılan hizalamanın akış diyagramı Şekil 5'de verilmiştir. Hassasiyet matrisi ile hizadaştırılan sistemin Zernike katsayıları alınarak merit fonksiyonu parametresi olarak ZEMAX programına girilir. Daha sonra optik tasarım üzerinde Merit Fonksiyonu optimizasyonu uygulanır ve böylelikle elde edilen Zernike katsayıları oluşturulan hizalama hatası değerleri elde edilir.



Şekil 5: MFR Yöntemi ile hizalama akışı

Hizalama Simülasyonu ve Optik Hizalama

Optik tasarımda, Tablo 4'te belirtilen hizalama kaçıklıkları oluşturulmuştur. Tasarımdan okunan dalga cephesi hatasından yola çıkılarak, hassasiyet matrisi ve MFR teknikleri uygulanmış ve hizalama kaçıklıkları tahmin edilmiş, tasarıma uygulanan hizalama kaçıklıkları ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 4: Hizalama adımları testi

Bozunum	Başlangıç hizalama kaçıklığı	Tahmin edilen hizalama kaçıklığı	Tahmin hatası
THI(mm)	0.7	0.6999901000	-0.0000099000
DECX (mm)	0.5	0.5000034257	0.0000034257
DECY(mm)	0.3	0.2991436778	-0.0008563222
TX(derece)	0.5	0.4999424000	-0.0000576000
TY(derece)	0.8	0.7999997000	-0.0000003000

SONUÇ

Yapılan çalışma ile bilgisayar destekli hizalama simülatörü geliştirilerek, iki aynalı Cassegrain tipi bir optik sistemde başarıyla uygulanmıştır.

Hassasiyet matrisinden faydalanılarak hizalama hatası çabuk hesaplanabilmektedir. Ancak istenilen hassasiyette bir doğruluk sağlanamamaktadır. Merit fonksiyonu regresyonu metodu ise hizalama hatasının küçük olduğu durumlarda kısa zamanda doğru sonuca gidebilmektedir. Bu yüzden hizalama işlemine hassasiyet matrisi kullanılarak başlanılmıştır. Hizalama hatası küçültüldükten sonra Merit fonksiyonu regresyonu yöntemi ile sistem, optik tasarım değerlerine çok yakın pozisyona getirilmiştir.

Yapılan simülasyon ile tasarım ortamında, sisteme bilinen hizalama kaçıklıkları uygulanmış, bu kaçıklıkların oluşturduğu interferometrik veri ile başta uygulanan hizalama kaçıklıkları düşük tahmin hataları ile bulunabilmiştir. Geliştirilen yöntemler ve programlar ile farklı teleskop sistemlerinin de kısa zamanda hizalanması mümkün olacaktır.

Kaynaklar

- Bin, W., Fan, W., ve Tang, Y. Y. (2012). Computer-aided Alignment of Off-axis Two-mirror Reflective System. In Y. Zhang, L. Xiang, ve S. To (Eds.), 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment (Vol. 8417). Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering.
- Bin, W., Lei, J. S., ve Tian, Q. (2010). Study on Computer-aided Alignment Method of Cassegrain System. In 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Large Mirrors and Telescopes (Vol. 7654). Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering.
- Choi, S.C., ve Kim, H.S. (2003). Sensitivity analysis of 20:1 zoom infrared optical system with zernike polynomial coefficients. In (pp. 535-544): Korean J. Opt. Photon. 14.
- Ekinci, M., ve Selimoglu, O. (2016, Jun 26-Jul 01). Development of a 0.5m clear aperture Cassegrain type collimator telescope. Paper presented at the Conference on Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II, Edinburgh, UNITED KINGDOM.

- Figoski, J.W., Shrode, T.E., ve Moore, G.F. (1989). Computer-Aided Alignment Of A Wide-Field, Three-Mirror, Unobscured, High-Resolution Sensor. In (Vol. 1049). SPIE: Recent Trends in Optical Systems
- Huang, Y. F., ve Li, L. (2007, Sep 09-12). Computer-aided alignment for the segmented mirrors of three-mirror optical system - art. no. 66241V. Paper presented at the International Conference on Photoelectronic Detection and Imaging, Beijing, PEOPLES R CHINA.
- Huang, Y. F., ve Li, L. (2010). Novel method of computer-aided alignment for large aperture space systems. In L. Yang, Y. Namba, D. D. Walker, ve S. Li (Eds.), 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies (Vol. 7655). Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering.
- Huang, Y. F., Li, L., ve Cao, Y. H. (2006). Computer-aided alignment for space telescope optical system. In L. Yang, S. Wen, Y. Chen, ve E. B. Kley (Eds.), 2nd International Conference on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies (Vol. 6149). Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering.
- Kim, E.D., Choi, Y., ve Kang, M. (2005). Reverse-optimization Alignment Algorithm using Zernike Sensitivity. In (Vol. 9, pp. 68-73): SPIE.
- Kim, E.D., Choi, Y., ve Kang, M. (2004). Medium-sized aperture camera for Earth observation from space. In (Vol. Earth Observing Systems IX): SPIE.
- Kingslake, R. (1951). Wave Theory of Aberrations. H. H. Hopkins. New York: Oxford Univ., 113(2935). doi:10.1126/science.113.2935.368
- Lee, J. H., Ryoo, S. Y., Park, K. W., ve Lee, H. B. (2012). Development of a Computer-Aided Alignment Simulator for an EO/IR Dual-Band Airborne Camera. In Y. Zhang, L. Xiang, ve S. To (Eds.), 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment (Vol. 8417). Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering.
- Rimmer, M. (1990). Computer-aided optical alignment method. In (Vol. Adaptive Optics and Optical Structures): SPIE.
- Thompson, Kevin. (2005). Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry. *Journal of the Optical Society of America A*, 22(7), 1389-1401. doi:10.1364/JOSAA.22.001389
- Zhang, M., Zheng, M., ve Li, Y. Q. (2013). The application of variable universe fuzzy PID control in computer-aided alignment of lithography projector. In H. Y. Tam, K. Xu, H. Xiao, ve J. Zhu (Eds.), 2013 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems (Vol. 9046). Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering.
- Zhao, X. T., Ji, Y., ve Yue, P. Y. (2018, Jun 26-29). Research on Computer-aided alignment for an afocal off-axis optical system. Paper presented at the 9th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies - Large Mirrors and Telescopes, Chengdu, PEOPLES R CHINA.
- Zhao, X. T., Jiao, W. C., Liao, Z. B., Wang, Y., ve Chen, J. Y. (2010). Study on computer-aided alignment method of a three-mirror off-axis aspherical optical system. In Y. Zhang, J. M. Sasian, L. Xiang, ve S. To (Eds.), 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment (Vol. 7656). Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering.