

### 3-B Tomosentez Görüntüleme Cebirsel Geriçatma Yöntemi ile Toplam Değişiminin Kullanımı

## Reconstruction for 3D Tomosynthesis Images with ART and Total Variation

Metin Ertaş<sup>1</sup>, İsa Yıldırım<sup>2</sup>, Mustafa Kamaşak<sup>3</sup>, Aydın Akan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği  
İstanbul Üniversitesi

{ertas,akan}@istanbul.edu.tr

<sup>2</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği  
İstanbul Teknik Üniversitesi

iyildirim@itu.edu.tr

<sup>3</sup>Bilgisayar Mühendisliği  
İstanbul Teknik Üniversitesi

kamasak@itu.edu.tr

### Özet

Dijital tomosentez görüntülemesinden elde edilen görüntülerde, sınırlı açıda yapılan tarama sonucu odak dışı dilim bulanıklığı meydana gelmektedir. Bu problemin çözümü için “Kaydır ve Ekle” (SAA) ve cebirsel geriçatma teknikleri (ART) kullanılmıştır. Seyrek bilgiyi kullanarak yapılan yinelemeli görüntü geriçatma (IIR) yöntemleri, sıkıştırılmış algılama (CS) ile görüntü iyileştirmesi yapılabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada, mevcut yöntemlerden olan ART ile sıkıştırılmış algılama çerçevesinde kullanılan toplam varyasyonun (TV) minimizasyonunun (ART+TV) başarımları karşılaştırılmıştır. Bu başarımların analizi 3 boyutlu bir fantom üzerinde yapılmıştır. TV minimizasyonu yöntemi uygulanırken dikkate alınması gereken koşullardan birisi de düzenleme parametresinin etkisidir. Bu parametre, kontrast gürültü oranı (CNR) değeri kullanılarak incelenmiştir.

### Abstract

In reconstructed images acquired from digital tomosynthesis, out-of-focus blur occurs due to the limited scanning angle. In order to solve this problem, “Shift and ADD” (SAA) and Algebraic Reconstruction Technique (ART) have been used. Iterative image reconstruction (IIR) with sparsity exploiting methods has shown a significant improvement in image reconstruction via using Compressed Sensing (CS). In this study, performances of ART and total variation (TV) minimization implemented ART (ART+TV), used under the CS framework, were compared. This performance analysis was done on a 3-D phantom. One of the most necessary and significant conditions in applying TV minimization methods is to take the effect of regularization parameter into account. This parameter was investigated by means of CNR value.

Bu çalışma TÜBİTAK 111E086 nolu proje kapsamında desteklenmektedir.

### 1. Giriş

Tomosentez görüntüleme, x-ışını kaynağının hareketi ile birden fazla açıdan veri toplanması ile elde edilen 3 boyutlu görüntüleme yöntemidir. Toplanan verilerin uygun matematiksel yöntemler kullanılarak birleştirilmesi sonucu elde edilen 3 boyutlu görüntüler elde edilebilmektedir. Elde edilen görüntülerdeki uzaysal çözünürlük ise bilgisayarlı tomografi (BT) cihazlarına oranla 3 kat daha fazladır [1]. Günümüzde tomosentez meme, toraks, diş ve cerrahi görüntüleme alanlarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [2-4]. Sayısal meme tomosentezi 2 boyutlu mamografi cihazında meydana gelebilecek olan dokuların üst üste gelmesi sonucunda oluşabilecek yanlış okumaların veya gözden kaçırılmaların önüne geçmeye olanak sağlamaktadır.

Tomografik görüntüleme sistemlerindeki görüntü bozukluklarının en az seviyede olması için tam bir dairesel hareket boyunca mümkün olan en yüksek sayıda ışın yolu elde edilmedir. Fakat bazı kısıtlamalar yeterli miktarda ışın yolu elde etmeyi sınırlandırmaktadır. Örneğin, verilecek radyasyon dozunun sınırlı olması ve görüntülenecek olan nesnenin geometrik şekli tomografik hareketi ve toplanacak veri miktarını kısıtlamaktadır. Bu yüzden sınırlı açıda tarama yapılmak zorunda kalınmaktadır. Sınırlı açıdan yapılan tarama sonucunda toplanamayan eksik veri Nyquist kriterini karşılayamadığından görüntünün eksiksiz olarak geri elde edilmesi mümkün olmamaktadır [5]. Bu yüzden tomosentez görüntüleri üzerinde iyileştirme yapılmasına büyük ihtiyaç duyulmaktadır.

Tomosentez verilerinin 3 boyutlu görüntüler haline getirilmesi için sıkça kullanılan ve paralel imgelerin kaydırılıp eklenmesiyle oluşan kaydır ve ekle (shift and add – SAA) yöntemidir. Fakat bu yöntem odak dışı dilim bulanıklığına yeterli çözüm sunamamıştır. Klasik geriçatma tabanlı görüntü elde etme yöntemleri de sınırlı açı ile elde edilen verilerde görüntü bozukluklarına sebep olmaktadır [6]. Bu gelişmeler, yinelemeli düzeltme tekniklerinin (IRT) tomosenteze uygu-

lanmasının önünü açmıştır. Bu algoritmalarından en yaygın olarak kullanılan cebirsel düzeltme tekniğidir (ART). IRT algoritmalarının da görüntü kalitesinde yeterli olmamasından dolayı çeşitli yöntemler kullanılarak iyileştirme sağlanmaya çalışılmıştır [6-8]. Son zamanlarda medikal görüntü işleme alanında kullanılan sıkıştırılmış algılama yöntemi ile seyrek imgelerin eksik verilerden oluşturulmasına olanak sağlamıştır [9, 10]. Bu işlemi yapmak için seyrek görüntünün  $l_1$  normunun minimize edilmesi gerekmektedir. Seyrek görüntünün elde edilmesi işlemi ise seyrek olmayan bir görüntünün toplam varyasyonun (TV) minimizasyonu ile sağlanır [5]. ART ile elde edilen seyrek olmayan imgeler TV ile gerçekleştirilmesi ile imgedeki bozukluk oranı ciddi oranda düşürülmektedir [5]. Bu çalışmada, 3 Boyutlu tomosentez imge düzeltme yöntemlerinde kullanılan ART ve TV ile gerçekleştirilmiş ART (ART+TV)' nin performansları karşılaştırılması zıtlık gürültü oranı (CNR) ile yapılmıştır. Bu karşılaştırma meme görüntülenmesinde mevcut olan yanıtıcı dokuların üst üste gelecek yanlış okumaya sebep olabileceği durumun benzetildiği 3 boyutlu bir fantom üzerinde yapılmıştır.

## 2. Yöntem

Tomosentez görüntülenmesinde, görüntülenecek olan objede taranan açılarının sayısı Shannon/Nyquist kriterini karşılamıyor ise, elde edilen görüntüde üst üste binme (aliasing) bozukluğu ortaya çıkabilir. Son zamanlarda matematiksel alanda yapılan çalışmalar ışığında eksik bilginin olduğu durumlarda da verinin elde edilmesinin mümkün olması tomosentez görüntülerinde yenilemeli görüntü elde etme yöntemlerinden olan ART' nin kullanımını tekrar gündeme getirmiştir. Herhangi bir imge (X) ölçülmüş veri kümelerinden (Y) oluşturulmak istenirse, denklem 1 deki tutarlılık şartını sağlaması gerekmektedir:

$$AX = Y \quad (1)$$

Denklem 1'de A sistem matrisidir ve x-ışını izdüşümlerinin ölçümlerinden elde edilmektedir. Böylece, Denklem 1 birçok görüntüleme problemlerine uygulanabilmektedir. Tomosentez görüntülenmesinde ART Denklem 1' deki tutarlılık şartını sağlamaktadır. Tomosentezde yapılan ışınlar sınırlı tarama açısından yapılması nedeniyle yeterli miktarda örnekleme sağlanamamaktadır ve görüntünün oluşmasında yenilemeli yöntemler kullanılmaktadır.

ART yenilemeli yöntemlerin en sık kullanılanlarından biridir ve diğer yenilemeli yöntemlere göre daha hızlı yakınsama sağlamaktadır [11, 12]. ART, kısaca ölçülen izdüşüm değerinden imgenin hesaplanmış ileri izdüşüm değerinin farkının alınarak, bu farkın o izdüşüm yolu üzerindeki o ışına etki eden pikseller ve vokseller arasında belirli katsayılar ile dağıtılmasıyla yapılır [13]. Hatanın ışın yolu üzerindeki voksellere belirli oranda dağıtılma işlemi Siddon Algoritması kullanılarak hesaplanmıştır [14]. Bu işlem hata miktarı belli bir değere yakınsayana kadar devam ettirilmektedir.

Tomosentez görüntülenmesinde, ölçülen veri yüksek oranda yeterli miktarda örneklenebilir, bu sebepten ötürü oluşması muhtemel bozuklukların önlenmesi için yeni bir düzeltme algoritması kullanılmalıdır. Sıkıştırılmış algılama (CS) son yıllarda medikal görüntüleme

yeterli örneklemenin sağlanmadığı durumlarda görüntü oluşturulmasına Denklem 1' deki tutarlılık şartını da sağlayarak olanak sağlamaktadır [10]. Bunu da seyrek olmayan görüntüleri belirli dönüşürme yöntemleri kullanarak seyrek hale getirip, seyrek görüntülerinde  $l_1$  normunu minimize ederek aşağıdaki problemi yenilemeli olarak çözmektedir:

$$\min_X \|\Psi X\|_1 \quad \text{öyleki } AX = Y \quad (2)$$

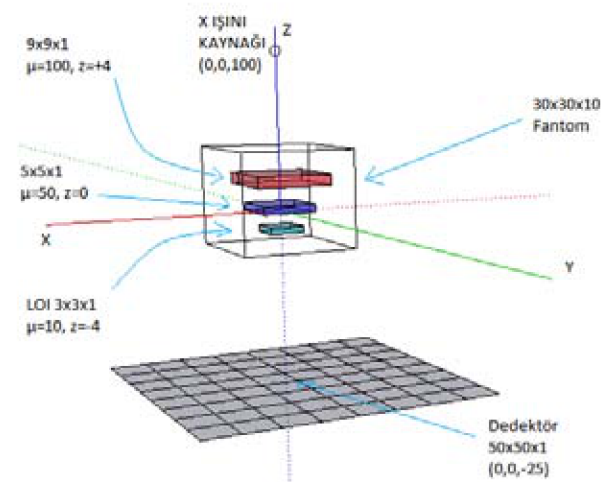
$\Psi$  simgesi seyrek olmayan bir görüntüyü seyrek hale dönüştürür. Bunu yaparken görüntüye dalgacık veya ayrık gradyan gibi belli seyrekleştirme dönüşümleri uygulanır. Bu çalışmada ayrık gradyan dönüştürücüsü yöntemi uygulanmıştır:

$$\nabla_{i,j} X(i,j) = \sqrt{(D_x X)^2 + (D_y X)^2} \quad (3)$$

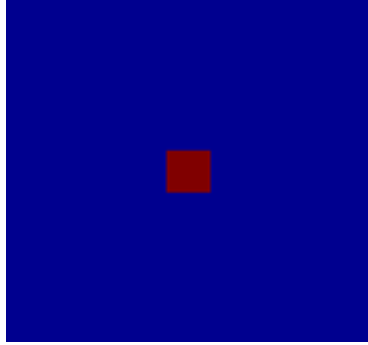
Denklem 3' de  $X(i,j)$ , (i,j) piksel değerindeki yoğunluğu,  $D_x X = X(i+1,j) - X(i,j)$  ve  $D_y X = X(i,j+1) - X(i,j)$ ' i göstermektedir. Gradyan dönüştürme işlemi bu çerçevede uygulandığı zaman minimizasyon problemi görüntünün toplam varyasyonunun (TV) minimizasyonu problemine dönüşmektedir. TV' nin ART yöntemine eklenmesi ise ART sonucu elde edilen görüntüye TV uygulanması ile hesaplanmaktadır. TV Denklem 4'deki sınırlandırılmış minimizasyon probleminin çözülmesiyle gerçekleşir:

$$\min_X \|\tilde{X} - X\|_2^2 + \alpha \|\Psi X\|_1 \quad \text{öyleki } AX = Y \quad (4)$$

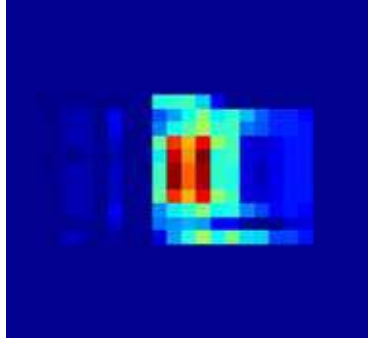
Sıkıştırılmış algılama (CS) amaç fonksiyonu  $\|\Psi \tilde{X}\|_1$  probleme belirli bir düzenleme katsayısı ( $\alpha$ ) eklenerek gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bu parametre 0,8 olarak seçilmiştir ve ART+TV yönteminin ART yöntemi ile başarımlar karşılaştırılması bu parametre sabitlenerek yapılmıştır. Yapılan ölçümlerin hepsi Matlab yazılımı (Mathworks) kullanılarak hazırlanmıştır.



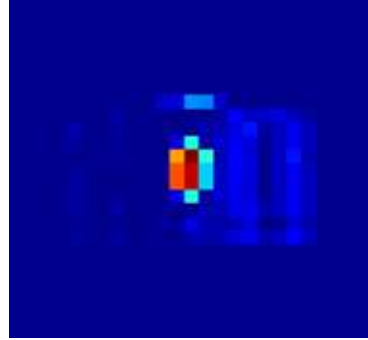
Şekil 1: Kullanılan fantom.



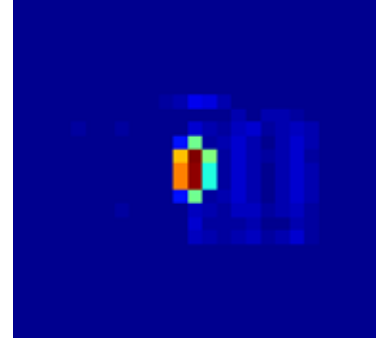
Gerçek LOI



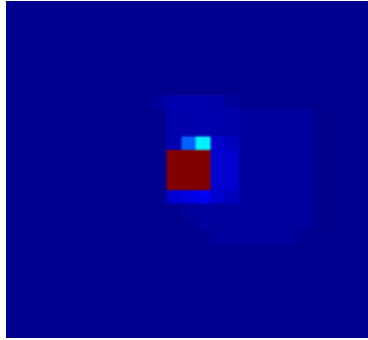
ART 1. yineleme sonucu



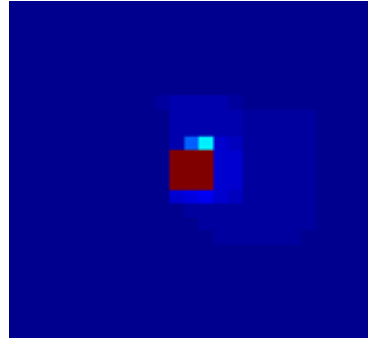
ART 30. yineleme sonucu



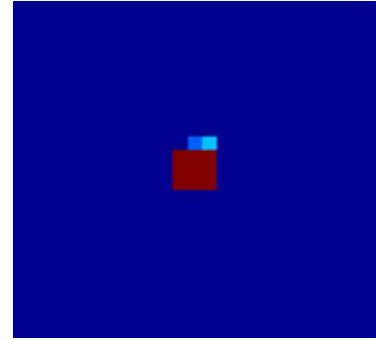
ART 60. yineleme sonucu



ART+TV 1. yineleme sonucu



ART+TV 30. yineleme sonucu



ART+TV 60. yineleme sonucu

Şekil 2: birinci satırda ilgilenilen katmanın (LOI) gerçek görüntüsü, ikinci satırda ART yönteminin 1., 30. ve 60. yinelemelerinde elde edilen geri çatılmış görüntüleri, üçüncü satırda ise ART+TV yönteminin 1., 30. ve 60. yinelemelerinde elde edilen geri çatılmış görüntüleri verilmektedir.

### 3. Geri Çatma Sonuçları

Tomosentez görüntülenmesinde daha önce yayınlanmış birçok çalışma 2 boyutlu yapılan çalışmalardan oluşmaktadır [5, 12, 13, 15]. Bu çalışmada, 3 boyutlu olarak tomosentez görüntüleme yönteminin benzetimi yapılmış olup ART ve ART+TV' nin karşılaştırılması yapılmıştır. Bunun için 3 boyutlu bir fantom ve tomosentez görüntüleme sistemi benzetimi yapılmıştır. Şekil 1 de bu fantom ve sistem görünmektedir.

Fantomda 3 ayrı katman bulunmaktadır: 1) En üstteki katmanda (9x9x1) ve x-ışını soğurma katsayısı 100 olan bir kısım bulunmaktadır. 2) Orta katmanda ise (5x5x1) boyutunda ve x-ışını soğurma katsayısı 50 olan bir başka tabaka bulunmaktadır. 3) Altta bulunan katmanda ise (3x3x1) boyutlarında ve x-ışını soğurma katsayısı ilk iki katmana oranla çok daha düşük olan ( $\mu = 10$ ) görüntülenmesi istenilen tabakadır (LOI). Alt kısımında bulunan tabaka Şekil 2'nin ilk satırında görülmektedir.

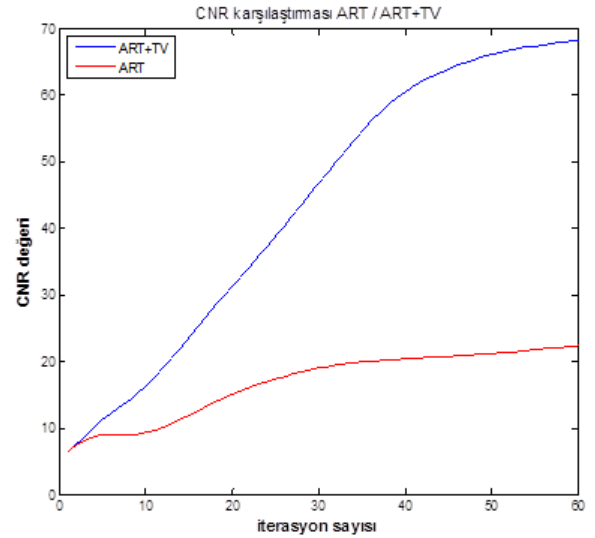
Ölçülen izdüşümler tomosentez cihazı ile benzerlik göstermesi açısından -25 den +25 ye kadar toplam 11 izdüşüm alınarak elde edilmiştir ve bu işlemin her bir tekrarı bir tarama olarak tanımlanmaktadır. Tomosentez benzetiminde ilk olarak kullanılan yöntem Yenilemeli Düzeltme Tekniğidir (ART). ART yöntemi ile tekrarlanan iterasyonlar sonucunda sırası ile 1., 30. ve 60. iterasyonlar sonunda elde edilen LOI Şekil 2'nin ikinci satırında gösterilmektedir.

Şekil 2 deki ART+TV ile elde edilen görüntü ile Şekil 1 de elde edilmesi beklenen görüntü karşılaştırıldığında yüksek x-ışını soğurma katsayısına sahip olan katmanların LOI üzerinde odak dışı dilim bulanıklığına sebep olduğu görülmektedir. Bu bulanıklığın giderilmesi için uygulanan method ise ART+TV yöntemidir. Benzer şekilde ART+TV yöntemiyle gerçekleştirilmiş tomosentez görüntülenmesi 40uncuda sırasıyla 1., 30. ve 60. İterasyonlarda elde edilen LOI sırası ile Şekil 2'nin üçüncü satırında gösterilmektedir.

Şekil 2' deki ART+TV yöntemine ART ile elde edilmiş görüntüler karşılaştırıldığında, ART+TV nin odak dışı dilim bulanıklığını ciddi oranda temizlediği görülmektedir. Bu verilere ek olarak tıbbi anlamda medikal görüntülerin yorumlanmasında önemli bir kriter olan CNR değerinin ART+TV ve ART performansları Şekil 3 de görünmektedir. Şekil 3 da CNR değeri her iki yöntem içinde aynı değerden başlamış olmasına rağmen ART+TV ile gerçekleştirilmiş tomosentez görüntülenmesinde CNR değeri hızlı bir biçimde artmaktadır. Aynı zamanda ART ile gerçekleştirilen görüntülenmedeki CNR artış hızı çok düşük değerlerdedir. 60. iterasyon sonunda ART+TV' nin CNR değeri 68.2 iken ART' nin 22.3 olmuştur. Bir başka deyişle, ART+TV' nin CNR değeri ART' nin yaklaşık 3 katı büyüklüğüne ulaşmıştır.

### 4. Sonuç

Bu çalışmada, ART ve ART+TV ile gerçekleştirilmiş iki farklı tomosentez görüntü düzeltme yönteminin performanslarını görsel ve CNR değerlerini kullanarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar bize ART+TV' nin 3-boyutlu tomosentez görüntülenmesindeki en büyük bozukluklardan olan odak dışı dilim bulanıklığını büyük oranda ortadan kaldırdığını gösterilmiştir. Ayrıca tıbbi açıdan önemli olan CNR değerinin de ART ye göre çok daha yüksek olduğunu gösterdik. Bu da klinik olarak ART+TV' nin daha



Şekil 3: Kontrast gürültü oranının ART ve ART+TV yöntemleri için yineleme sayısına göre değişimi.

başarılı bir uygulama olduğunu göstermiştir. ART+TV' deki TV' nin düzenleme katsayısının farklı durumlar için daha hızlı yakınsama yapabileceği veya iraksayabileceğinden dolayı, bu katsayının farklı durumlar için düzgün olarak seçilmesi görüntü kalitesi açısından büyük öneme sahiptir.

### 5. Kaynaklar

- [1] Flynn, Mj. , McGee, R., Blechinger, J., "Spatial Resolution of X-ray tomosynthesis in relation to computed tomography for coronal/sagittal images of knee", Proc. Soc. Photo-Opt Instrum Eng, 6510:65100D, 2007
- [2] Reiser I., Nishikawa R. M., Giger M. L., Wu T., Rafferty E. A., Moore R. ve Kopans D. B., "Computerized mass detection for digital breast tomosynthesis directly from projection images," Med. Phys., 33 :482-491, 2006.
- [3] Groenhuis R. J. A., Webber R. L ve Ruttimann U. E., "Computerized tomosynthesis of dental tissues.", Oral Surg., 56: 206-214, 1983.
- [4] Cho, M.K., Youn, H., Jang,S., Kim, H.K., "Cone-beam digital tomosynthesis for thin slab objects.", NT&E International, 47:171-176., 2012.
- [5] Velikina, J., Leng. S. ve Chen, G.H. "Limited view angle tomographic image reconstruction via total variation minimization," Proc. SPIE Medical Imaging, 6510(71), 2007
- [6] Rantala, M., Vanska, S., Jarvenpaa, S., Kalke, M., Lassas, M., Molberg, J. ve Siltanen, S., "Wavelet-Based Reconstruction for Limited-Angle X-ray Tomography.", IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol:25 No:2, 2006.
- [7] Badea, C., Kolitsi, Z., Pallikarakis, N., "A wavelet-based method for removal of out-of plane structures in digital tomosynthesis.", Computerized Medical Imaging and Graphics, 22: 309-315, 1998.

- [8] Wu, T., "A comparison of reconstruction algorithms for breast tomosynthesis.", *Med. Phys.*, 31:2636, 2004.
- [9] Sidky, E., Kao, C.M. ve Pan, X., "Accurate image reconstruction from few-views and limited-angle data in divergent-beam CT.", *Journal of X-Ray Science and Technology*, 14-2:119:139, 2006.
- [10] Donoho D. L., "Compressed Sensing," *IEEE Trans. Inform. Theory*. 52(2) :1289-1306, 2006.
- [11] Herman G., "Image Reconstruction from Projections," Academic Press, Orlando, 1980
- [12] Nett, B., Tang J., Leng S. Ve Chen G.H.. "Tomosynthesis via total variation minimization reconstruction and prior image constrained compressed sensing (PICCS) on a C-arm System," *Proc. SPIE*, 6913, 2008.
- [13] Hansen, P.C. ve Saxild-Hansen M., "AIR Tools — A MATLAB package of algebraic iterative reconstruction Methods.", *J. of Computational and Applied Maths.*, 236: 2167-2178., 2012.
- [14] Siddon R. L., "Fast calculation of the exact radiological path for a three-dimensional CT array," *Med. Phys.*, 12 :252-255, 1985.
- [15] Lauzier, P. T., Tand, J. ve Chen, G.H., "Time-resolved cardiac interventional cone-beam CT reconstruction from fully truncated projections using the prior image constrained compressed sensing (PICCS) algorithm.", *Phys in Med and Bio*, 57: 2461-2476, 2012.