TIPTEKNO'24 MEDICAL TECHNOLOGIES CONGRESS
10-12 October 2024
Yasmin Bodrum Resort, Muğla, Türkiye

BT Görüntülerinde Radyomik Analizler için Dokum İmzaları Tekniğinin Değişkenliğinin İncelenmesi

Investigation of Variability of Texture Signatures for Radiomics Analysis in Computed Tomography

Mahmut Ozan Gökkan, İsmail Özsoykal
Bioizmir
Dokuz Eylül Üniversitesi
İzmir, Türkiye

Ece Kaplan
Elektrik Elektronik Mühendisliği
Dokuz Eylül Üniversitesi
İzmir, Türkiye

Deniz Elmalı
Medikal Fizik Anabilim Dalı
Dokuz Eylül Üniversitesi
İzmir, Türkiye

Ayşegül Yurt
BioİzmirSağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu
Dokuz Eylül Üniversitesi
İzmir, Türkiye

Mustafa Alper Selver
BioİzmirElektrik Elektronik Mühendisliği
Dokuz Eylül Üniversitesi
İzmir, Türkiye

***Özetçe*— Tıbbi görüntülemede Dokum (Texture) Analizi (DA), hastalardan edinilen görüntülerdeki bilginin karakterizasyonunu iyileştirmek ve nihayetinde öngörücü veya prognostik bir biyobelirteç olarak hizmet etmek için tasarlanmış ve halen gelişmekte olan bir hesapsal araçtır. Tıbbi görüntü eldesinin doğası gereği DA kullanışlılığını tehlikeye atabilecek değişkenlikler sebebiyle teşhis ve tedavide DA özelliklerinin kullanılabilirliği halen sorgulanmaktadır. Bu çalışmada, ilk kez bu parametrelerin görüntü üzerindeki bütüncül etkilerinin dokum imzaları üzerinden ayrıntılı inceleme ve analizi gerçekleştirilmiştir. Bu değişkenliğin önemini belirlemek için oluşturulan Credence Cartridge Radiomics (CCR) veri kümesi üzerinden yapılan analizler sonucunda hem Bilgisayarlı Tomografi (BT) cihazına bağlı aynı parametreler (protokol) için çoklu kesitler hem de farklı protokol olarak farklı görüş alanı (field of view) için kesitler incelenmiştir. Kesitlerin DA analizinde yönlendirilebilir piramit temelli Riesz dönüşüm metodu kullanılmıştır. Riesz metodu rotasyon kovaryant özelliğini sağlamaktadır. Bu sayede her dokum için enerji öznitelikleri çıkarılmıştır. Destek vektör makineleri (DVM) kullanımı sayesinde eğitilmiş ağırlık katsayılarının Riesz şablonları ile doğrusal kombinasyonu sonucu iki-boyutlu dokum imzaları elde edilmiştir. Sonuç olarak hem farklı kesitler için hem de farklı görüş alanı ayarlı kesitler için imzaların kabul edilir tutarlılıkta yapısal benzerlik indislerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.**

Anahtar Kelimeler — Dokum Analizi, Bilgisayarlı Tomografi, Uzay-Frekans Dönüşümü, Fantom, Dokum İmzaları

***Abstract*— Texture Analysis (TA) in medical imaging is an evolving computational tool designed to improve the characterization of information in images acquired from patients and ultimately serve as a predictive or prognostic biomarker. Due to the nature of medical image acquisition, there are variables that can compromise the usefulness of TA, and therefore the usability of TA features in diagnosis and treatment is still questioned. In this study, for the first time, a detailed examination and analysis of the holistic effects of these parameters on the image has been performed over texture signatures. As a result of the analysis performed on the Credence Cartridge Radiomics (CCR) dataset, both multiple slices for the same parameters (protocol) depending upon the CT device and slices for different field of view (FOV) as a different protocol have been analyzed. The Riesz transformation method based on the steerable pyramid has been used for the DA analysis of the CT slices. The method provides rotation-covariant property. In this way, energy features have been extracted for each texture. With the use of Support Vector Machines (SVM), two-dimensional texture signatures have been obtained by linear combination of trained weight coefficients with Riesz templates. Finally, It is observed that the signatures have acceptable structural similarity indices for different slices and for slices with different field of view CT setting.**

Keywords — Texture Analysis, Computed Tomography, Space-Frequency Transform, Phantom, Texture Signatures.

I. GİRİŞ

Bilgisayarlı Tomografi (BT) ile görüntüleme, çok çeşitli klinik durumlar için teşhis, tedavi ve takibin önemli parçalarından birini oluşturur. BT görüntüleri, gözleme bağlı görsel değerlendirmeler yanında, ilgilenilen bölgedeki dokularla ilgili nicel ölçümlere ve numerik analizlere de olanak sağlar [1].

Söz konusu analizlerle ilgili güncel yaklaşımlardan biri olan dokum analizi (DA), anatomik/patolojik dokular içerisinde yer alan ve genellikle gözle doğrudan ayırt edilemeyen dokum (ing, texture) yapılarını niceliksel olarak değerlendiren ileri bir görüntü analiz tekniğidir [1,2]. Bu yöntem, anatomik yapılardaki piksel veya voksel yoğunluk değişimlerini hedef alarak ilgili bölgelerin dokum özniteliklerine (texture features) dayalı veriler üretmeyi amaçlar [2]. Klinik onkoloji uygulamalarında tümör karakterizasyonu, tedavi yanıtının izlenmesi ve sonuçların öngörülmesi gibi hedeflerin gerçekleştirilmesinde söz konusu dokum öznitelik verilerindeki farklılıklar/değişimlerin rolü bulunmaktadır [3,4]. Bu analizlerin, onkolojik uygulamalar haricinde nörolojik hastalıklarda, karaciğer hastalıklarında ve akciğer rahatsızlıklarında da uygulanabilir olduğu raporlanmıştır.

979-8-3315-2981-9/24/$31.00 ©2024 IEEE

DA'da kullanılan dokum özniteliklerinin, doku dokumuna özgü değişimler haricinde, görüntülemeye (BT marka/model ve görüntüleme protokolü) ve görüntüleme sonrası işlemlere (öznitelik tanımlamaları ve hesaplama yöntemleri) bağlı olarak da önemli oranda değişebildiğini gösteren birçok çalışma mevcuttur [3,4,5,6,7]. Örneğin, tarayıcılar arası değişkenliğin önemini belirlemek için gerçekleştirilen yakın tarihli Credence Cartridge Radiomics (CCR) çalışmasında, 20 hastadan alınan küçük hücreli olmayan akciğer kanseri (KHOAK) tümörleri için hesaplanan radyomik özellikler, özel olarak tasarlanmış bir radyomik fantomunun 17 taraması için hesaplanan özelliklerle karşılaştırılmıştır. Fantom, her biri geniş bir radyomik özellik değeri aralığı üretmek için farklı malzemelerle doldurulmuş 10 kartuştan oluşmaktadır. Taramalar, rutin torasik görüntüleme protokollerini kullanan 4 tıp merkezinden General Electric, Philips, Siemens ve Toshiba tarayıcıları kullanılarak elde edilmiştir. İncelenen radyomik özellik, BT sayılarının ortalama ve standart sapmalarının yanı sıra yerel (bölgesel) gri ton farkı matrisinden türetilen dokumları içermektedir [8].

BT incelemelerinde DA 'nın (BTDA) standart bir ölçüm aracı olarak kullanılmasını zorlaştıran bu bağımlılığın kompanzasyonu için tüm parametrelerin etkisini bütünsel olarak ele alabilen veri uyarlamalı yaklaşımlar gereklidir. Literatürdeki çalışmalar görüntü uzayındaki dokum özelliklerine (istatistiksel, morfolojik vb.) odaklanmış olup [9], yüksek başarıma sahip uzay-frekans tabanlı BTDA özelliklerinin kalibrasyonda kullanımına ilişkin bir çalışma yapılmamıştır.

Bu çalışma, BT için bu açığı kapatma yolunda var olan fantom görüntülerini kullanarak DA tekniklerinin değişkenliğini ve güvenilirliğini dokum imzaları yöntemi üzerinden ölçmek üzere kurgulanmıştır. Bu kurgu doğrultusunda CCR fantomunu oluşturan dokumların farklı BT taramaları için dokum imzaları çıkartılarak, dokum imza değişkenlikleri analiz edilmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

A. CCR Fantomu ve Veri Bankası

Radyomik özniteliklerin klinik kullanıma girmeden önce tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik gibi kriterlere uygun olması beklenir. Bu kriterlerin karşılanıp karşılanmadığını test edebilmek amacıyla, geometrisi ve malzeme içeriği bilinen çeşitli araçlara ait BT görüntüleri üzerinden ilgili analizler gerçekleştirilmektedir.

Dokum fantomu olarak adlandırılan bu test araçları, farklı görüntüleme cihazlarından görüntü edinim tekniklerine ve farklı dokum öznitelik hesaplama algoritmalarına kadar veri üretiminin birçok aşamasında araştırmacılara analiz ve kalibrasyon (düzeltme) olanağı sunar. Böylelikle farklı çalışma grupları tarafından yürütülen çalışmaların standardizasyonuna da katkı sağlar.

Amerika Ulusal Kanser Enstitüsü tarafından finanse edilen bir proje kapsamında hazırlanan CCR fantomu, her biri 10,1 × 10,1 × 3,2 cm^3 boyutlarında olan 10 farklı kartuştan oluşmuştur. Kartuş malzemeleri, tarandığında geniş bir radyomik özellik değeri aralığı üretecek ve ideal olarak insan dokusunda, özellikle KHOAK tümörlerinde bulunan özellik değerleri aralığını kapsayacak şekilde seçilmiştir.

CCR fantomuna ait, farklı BT cihazlarında, farklı edinim ve geriçatma parametreleriyle elde edilen 251 adet görüntü DA tabanlı birçok çalışmaya kaynaklık etmesi ve çalışmalar arası standardizasyonun sağlanması amacıyla açık şekilde kullanıma sunulmuştur.

İlk 4 kartuş akrilonitril bütadien stiren plastikten oluşmakta olup MakerBot Replicator 2 3D (MakerBot Industries, LLC Brooklyn, NY) yazıcısı kullanılarak üretilmiştir. Bu 4 kartuş, yaklaşık 6,0, 1,4, 1,0 ve 0,9 mm boyutlarında hava dolu deliklere sahip akrilonitril bütadien stiren plastikten yapılmış petek desenleriyle doldurulmuştur. Takip eden 6 kartuş ise doğal dokumları temsil etmek üzere seçilmiş olan farklı materyallerden (çınar ağacı, kauçuk, yoğunlaştırılmış mantar tıpa, akrilik, doğal mantar tıpa ve reçine) oluşmaktadır.

B. Veri Seçimi

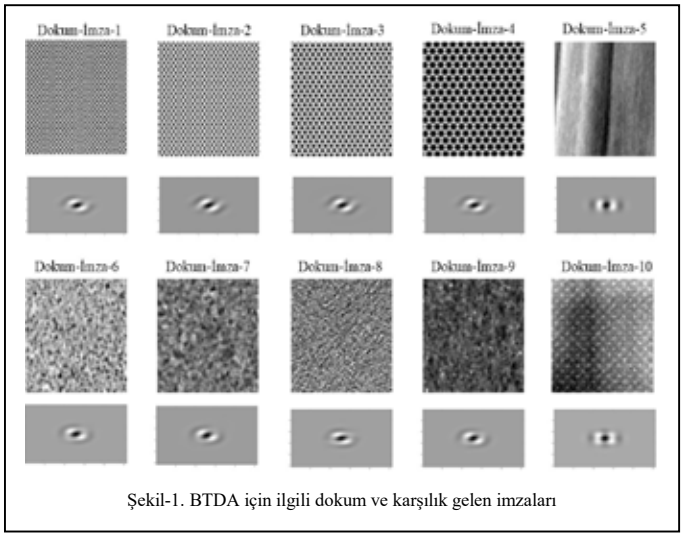
CCR fantomuna ait veri bankasından alınan BT görüntüleri, aynı görüntüde aynı dokum kartuşunun ardışık kesitlerine bağlı değişimi ve farklı görüş alanı kullanımına bağlı değişimi analiz etmek üzere seçilmiştir.

Kesite bağlı değişim için kartuş başına 13 ardışık kesit seçilmiş ve her biri için bir sonraki kısımda detaylıca ele alınan Riesz imzaları oluşturulup karşılaştırmalı analizler yapılmıştır.

Kesite bağlı değişim haricinde, piksel boyutlarına bağlı değişimi incelemek amacıyla farklı görüş alanı boyutlarında (200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm 450 mm, 500 mm) alınan BT görüntüleri seçilmiş ve bu görüntülerde her dokum kartuşu için merkez kesit üzerinden Riesz imzaları oluşturulup karşılaştırmalı analizler yapılmıştır.

C. Dokum İmzaları Tekniği

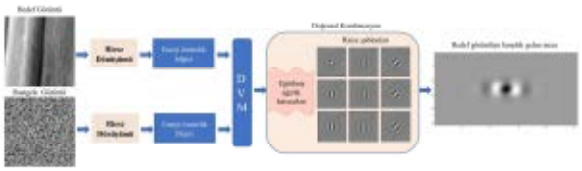
Yüksek çözünürlüklü bilgisayarlı tomografi görüntülerinin dokum tabanlı bilgisayarlı analizi, radyologların görüntü yorumlamasına yardımcı olmak için dokum imzaları tekniği ile tanımlanmaya çalışılmıştır. Yaklaşımın temel taşı, birden fazla ölçekte N'inci dereceden Riesz şablonlarının doğrusal bir kombinasyonunu kullanarak ilgili doku imzalarını öğrenmektir [10]. Doğrusal kombinasyonun ağırlıkları, bire karşı tüm DVM türetilmiştir. Riesz dalgacıklarının yönlendirilebilirliği ve çok ölçekli özellikleri, doku tanımlayıcılarının sonsuz küçük hassasiyetle ölçek, dönüş kovaryansı koşulunu sağlamasına izin verir [11-15]. Yönlendirmeler, analitik olarak gerçekleştirilen



Şekil-1. BTDA için ilgili dokum ve karşılık gelen imzaları

Riesz şablonlarını yerel olarak hizalayarak dokum örnekleri arasında normalleştirilir.

Bu çalışma kapsamında, her dokum örneği için N=8. dereceden (Riesz order) ve N+1 (0. indisten 8. indise kadar) yani 9 seviye ayrıştırma yaparak her seviye için öznitelik çıkarımı yapılmıştır. Ayrıştırma, yönlendirilebilir piramit yapısına göre her seviyede görüntü boyutlarının yarıya indirgenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Her seviye görüntü için Fourier domain'de Riesz filtre bankası ile belli katsayılı değerlerle filtrelenen görüntüler tekrardan konumsal alan'a aktarılarak öznitelik çıkarımı için hazır hale getirilmiştir. Söz konusu her seviye için işlenmiş Riesz haritalarından enerji hesaplamaları yapılarak nihai öznitelik vektörleri oluşturulmuştur. Enerji, bir görüntüde alt-bölge (piksel grubu) değişiminin bir ölçüsünü temsil edebilmektedir. İlgili alt-bölgedeki piksel grubunun renk/parlaklık/değer büyüklüğünün değişim miktarının nicemsel karşılığıdır. Bu durum özellikle dokum analizi için görüntüde yer alan nesnenin kenar bilgisini temsil etmede kullanılabilmektedir.



Şekil-2. Dokum imza üretiminin akış diyagramı

Şekil-2'de yer alan akış diyagramında gösterildiği gibi, her örüntü için çıkarılan bu öznitelikler bire karşı tüm DVM kullanımıyla sınıflandırılmıştır. Bunun sonucunda örüntü-duyarlı DVM ağırlık katsayılarının kullanımıyla Riesz şablonlarının doğrusal kombinasyonu sonucunda imza üretilmiştir. İmzalar karakterize olup, rotasyon için kovaryans, renk için invaryans özelliğe sahip olabilmektedir. Aynı zamanda Şekil 1'de görüldüğü gibi kendi orijinal kaynağı olan örüntüyü temsil edebilecek benzeri bir başka örüntü (imza) elde edilmesi sağlanmaktadır.

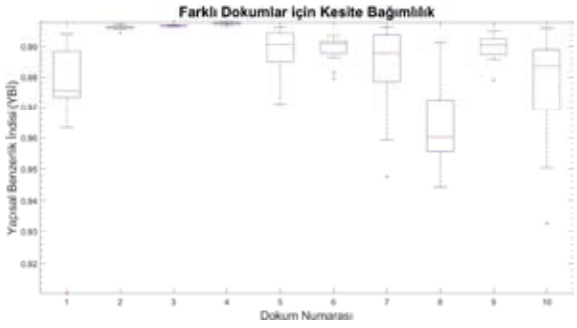
D. Veri Analizi

Kesitsel görüntülere ait Riesz dönüşüm tabanlı dokum imzalarının hesaplanmasının ardından karşılaştırmalı analizler için Yapısal Benzerlik İndisleri (YBİ) kullanılmıştır. YBİ, iki görüntü arasındaki benzerliği ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Hesaplanan indis değeri 1'e yaklaştıkça iki görüntü arasındaki benzerlik artmaktadır [16].

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen YBİ hesaplamalarında her görüntü serisine (kesite bağlı ve görüş alanı'na bağlı görüntüler) ait ilk görüntünün imzası referans alınarak diğer imzaların referans imzaya benzerliği değerlendirilmiştir. Örneğin, ardışık kesit analizlerinde her dokumun ilk kesiti ile diğer kesitler ikili olarak karşılaştırılmıştır. Aynı şekilde, görüş alanı'na bağlı değişim analiz edilirken her dokum için farklı görüş alanı durumları analiz edilirken 200 mm görüş alanı ile alınan görüntü referans alınmıştır.

III. BULGULAR

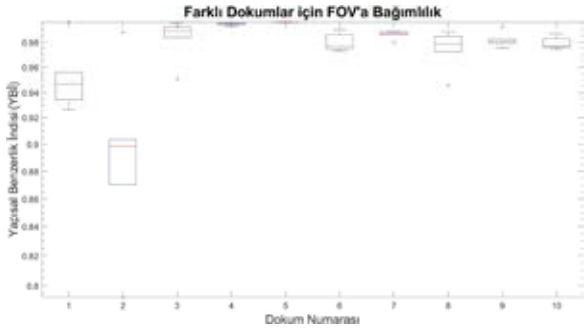
10 farklı fantoma ait ardışık kesitlere ve görüş alanına bağlı dokum imza değişimleri YBİ cinsinden sırasıyla Şekil-3 ve Şekil-4'te kutu diyagramı şeklinde verilmiştir. Oluşturulan Riesz imzaları üzerinden yapılan nümerik analizler, farklı dokumlar için, kesitler arası ve protokol bazlı farklı görüş alanlarına bağlı önemli bir değişimin olmadığına işaret etmektedir. Örneğin Şekil-3'te her fantom için çoklu kesit analizi yapıldığında, YBİ veri dağılımlarının birbirinden farklı ve ayırt edilir şekilde olduğu görülmektedir. Fantom 2, 3 ve 4 için kutu aralığı çok dar alanda sıkışmıştır.



Şekil 3. Farklı dokumlara ait ardışık kesitlerin Yapısal Benzerlik Analizi.

Bunun sebebi, örüntülerin aynı fantom yapısında ve birbirine benzer olmasından kaynaklıdır. Bundan dolayı YBİ medyan değerleri sırasıyla %99,6, %99,8 ve %99,9 oranlarında yer almaktadır. Sonuç olarak, Şekil-3'te kesite bağlı yaklaşımda her dokum (fantom) için üretilen karakteristik imzalara yönelik

kabul edilir tutarlılıkta ve değişkenlikte YBİ sonuçları gözlemlenmiştir. Bu durumun sebepleri arasında, 1-) Riesz dönüşüm metodunun rotasyon-kovaryant koşulunu sağlıyor olması, 2-) sabit protokole sahip kesitlerin mikro düzeyde kontrast, gürültü, keskinlik ve parlaklık gibi etki ve farklılıkları olabilmektedir. Şekil-4'te 7 farklı görüş alanı değeri için yine her dokuma ait imza üzerinden YBİ analizi yapılmıştır. Stabil, tekrarlanabilir ve kabul edilir değerler üretildiği gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda görüş alanına bağlı dokum boyutları farklı olsa bile üretilen imzaların tutarlı değişkenlikte sonuçlar ürettiği söylemek mümkündür.



Şekil 4. Farklı dokumların farklı görüş alanı ayarlı görüntülerine ait Yapısal Benzerlik Analizi.

IV. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada yapay zeka destekli Riesz dönüşüm tabanlı dokum öğrenme yaklaşımı ele alınmıştır. Bu yaklaşımın performansı ise YBİ değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Tüm dokumları kapsayan kesit bazlı ve görüş alanı bazlı analizlerde elde edilen YBİ bulguları, Riesz imzalarının, farklı kesitlerde ve farklı görüş alanı ayarlı görüntülemelerde birbirinden ayırt edilebilir dokumlar üretebildiğini göstermiştir.

Bu çalışmada önerilen Riesz dönüşüm tabanlı dokum öğrenme yaklaşımının gelecek çalışmalarımız için farklı BT cihazları ve görüntüleme protokolleri ile elde edilen görüntüler üzerinde de test edilerek, dokum imzalarının tekrarlanabilirlik sorununa bir çözüm getirebileceği düşünülmektedir.

Gelecek çalışmalarımız için ayrıca derin öğrenme modelleri [11] ve teleradyoloji için BT tabanlı DICOM verilerinin sistematik analizi, arşivlenmesi ve transmisyonu üzerine hedefler yer almaktadır [17-20].

BİLGİLENDİRME

Bu çalışma TUBİTAK tarafından 123R036 numaralı 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Espinasse, Mathilde, et al. CT texture analysis challenges: influence of acquisition and reconstruction parameters: a comprehensive review. Diagnostics, 2020, 10.5: 258.

[2] Varghese, Bino A., et al. "Reliability of CT-based texture features: Phantom study." Journal of applied clinical medical physics 20.8 (2019): 155-163.

[3] Reiazi, Reza, et al. "The impact of the variation of imaging parameters on the robustness of computed tomography radiomic features: a review." Computers in Biology and Medicine 133 (2021): 104400.

[4] Varghese, Bino A., et al. "Identification of robust and reproducible CT-texture metrics using a customized 3D-printed texture phantom." Journal of applied clinical medical physics 22.2 (2021): 98-107.

[5] Yip SS, Aerts HJWL. Applications and limitations of radiomics. Phys Med Biol. 2016;61:R150–R166.

[6] Park JE, Park SY, Kim HJ, Kim HS. Reproducibility and generalizability in radiomics modeling: possible strategies in radiologic and statistical perspectives. Kor J Radiol. 2019;20:1124–1137..

[7] Rizzo S, Botta F, Raimondi S, et al. Radiomics: the facts and the challenges of image analysis. Eur Radiol Exp. 2018;2:36.

[8] Mackin D, Fave X, Zhang L, et al. Measuring computed tomography scanner variability of radiomics features. Invest Radiol. 2015;50:757– 765.

[9] Fave X, Zhang L, Yang J, et al. Impact of image preprocessing on the volume dependence and prognostic potential of radiomics features in non-small cell lung cancer. Translat Cancer Res. 2016;5:349–363.

[10] A. Depeursinge, A. Foncubierta, D. Van De Ville, and H. Muller, "Rotation-covariant texture learning using steerable Riesz wavelets," IEEE Trans. Image Process., vol. 23, no. 2, pp. 898–908, Feb. 2014.

[11] Joyseeree, R., Otálora, S., Müller, H., & Depeursinge, A. (2019). Fusing learned representations from Riesz filters and deep cnn for lung tissue classification. Medical image analysis, 56, 172-183.

[12] Depeursinge, A., Andrearczyk, V., Whybra, P., van Griethuysen, J., Müller, H., Schaer, R., & Zwanenburg, A. (2020). Standardised convolutional filtering for radiomics. arXiv preprint arXiv:2006.05470.

[13] Flouris, K., Jimenez-del-Toro, O., Aberle, C., Bach, M., Schaer, R., Obmann, M. M., & Konukoglu, E. (2022). Assessing radiomics feature stability with simulated CT acquisitions. Scientific Reports, 12(1), 1-11.

[14] A. Depeursinge, C. Kurtz, C. Beaulieu, S. Napel, and D. Rubin, "Predicting visual semantic descriptive terms from radiological image data: preliminary results with liver lesions in CT," IEEE Trans. Med. Imaging, vol. 33, no. 8, 1669–1676, 2014.

[15] A. Depeursinge, A. Foncubierta, D. Van De Ville, and H. Muller, "Rotation-covariant texture learning using steerable Riesz wavelets," IEEE Trans. Image Process., vol. 23, no. 2, pp. 898–908, Feb. 2014.

[16] Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). "Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity." *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600-612.

[17] Aldemir, E., Gezer, N. S., Tohumoglu, G., Barış, M., Kavur, A. E., Dicle, O., & Selver, M. A. (2020). Reversible 3D compression of segmented medical volumes: usability analysis for teleradiology and storage. Medical Physics, 47(4), 1727-1737.

[18] Fischer, F., Selver, M. A., Hillen, W., & Guzelis, C. (2010). Integrating segmentation methods from different tools into a visualization program using an object-based plug-in interface. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 14(4), 923-934.

[19] Felix Fischer, M. Alper Selver, Sinem Gezer, Oğuz Dicle, and Walter Hillen , "Systematical Parameterization, Storage and Representation of Volumetric DICOM Data", Journal of Medical and Biological Engineering (Special Issue on Big Data in Bioinformatics), vol. 35, issue 6, Page(s):709-723, 2015.

[20] National Electrical Manufacturers Association (NEMA), Digital imaging and communications in medicine (DICOM), version: 2015, Virginia, USA. Available: http://medical.nema.org/standard.html.