

GÖRÜNTÜ İŞLEME ve BİYOMEDİKAL UYGULAMALARI

Prof. Dr. Neşe YALABIK, Ali H. GÖKTOĞAN (*>

"Bir resim» bin sözcüğe bedeldir"

1. GİRİŞ:

Görüntüyle bilgi şaklama ve aktarma insanlık tarihi kadar eskidir. İlk insanlar mağara duvarlarına yaptıkları resimlerle iletişim kuruyorlardı. İlk yazılarda da resimsel öğeler ağırlıktaydı. Günümüzde görüntü ile bilgi aktarımı ve saklanması hemen her alana girmiş, günlük yaşamın önemli bir parçası olmuştur. Hastalık teşhisleri, bilgisayarlı tomografiden ultrason cihazına kadar çeşitli aygıtların çıktıklarına bakılarak konulmakta, yer uydularıyla toplanan görüntüler jeolojiden, ormancılık, haritacılığa kadar değişik alanlarda kullanılmakta, değişik tekniklerle yaratılan fantastik görüntüler reklam sektöründe yoğunluk kazanmaktadır.

Optik disk gibi yüksek kapasiteli saklama birimleriyle hızlı entegre devreler ve paralel bilgisayarların gelişmesiyle önceleri-lüks sayılan "sayısal görüntü işleme" yöntemleri ön plana çıkmaya başlamıştır. Böylece günümüzde bilgisayarlar bu alanda da aktif rol oynamaktadır.

Bilgisayarlarla sayısal görüntü işleme'nin iki amacı ve işlevi vardır:

1. Amaca uygun olarak çeşitli aygıtlarla bilgisayara sayısallaştırılarak girilen görüntüyü insan gözüne daha anlaşılabilir, daha net, bazı önemli ayrıntıları daha kolay görülebilir, ya da daha çekici duruma getirmek. Örneğin, bir röntgen görüntüsünde kemiklerin, ya da urların daha belirgin hale getirilmesi gibi. Burada uygulanan temel işlemler de histogram düzleme kontrast, arttırıma, kenar zenginleştirme, görüntü ayıklama, restorasyon adları verilen tüm görüntü üzerine uygulanan prosedürlerdir. Bunlara biz alt düzey işlemler diyoruz.

2. Görüntüden otomatik olarak bilgi üretmek. Bu da bilgisayarla görme (computer vision) diye adlandırılır. Örneğin, bir uydu görüntüsünden fayların (yer kırıklarının) bulunması gibi. Buradaki işlemler, resmi anlamli parçalara bölme, bu parçalardaki birimleri tanıma,

birimler arasında ilişki kurma gibi daha karışık, daha zor fonksiyonlardır. Bunlar üst düzey işlemler olarak anılır..

İlk sayısal görüntüler 1920'lerde üretilmeye başlamakla birlikte bundan 10-15 yıl önceleri sayısal görüntü işleme çok pahalı ve bu nedenle lüks sayılabilen bir yöntem sayılıyor, büyük yatırımlar yapabilen az sayıda uygulamada kullanılıyordu. Bunun nedeni çok yoğun olan görüntü verisinin saklanması ve işlenmesinde o günün teknolojisinin yetersiz kalmasıydı. Gerçekte, yüksek rezolusyonla sayısallaştırılmış bir resimde 1024x1024- 1 M Bytelık kaba bilgi bulunmaktadır. Böyle görüntülerin kendi içinde ve birbiri arasında işlemler yapılması, bunlardan yüzlercesinin saklanıp hızlı erişimin sağlanması, kendi içinde belleği ve uygun donanımı olana ve "görüntü işleyici" denen özel birimler gerektiriyordu. Ancak günümüzde küçük maliyetlerle bu tür donanıma sahibolunabilecek bir laboratuvar kolaylıkla kurulabilmektedir. Hızlı bir kişisel bilgisayar ya da iş istasyonuna eklenebilen bir ya da bir kaç kartla donanım gereksinimleri karşılanmaktadır. Bu da uygulama alanlarını genişletmekte, görsel yaklaşımlar daha da önem kazanmaktadır.

Bu yazıda önce basit bir görüntü işleme laboratuvarının gerektirdiği aygıtlardan ve kurulu böyle bir laboratuvar-dan sözedeceğiz. Daha sonra Türkiye'de çeşitli üniversitelerdeki görüntü işleme faaliyetlerinden ve özellikle kanımızca en yaygın olan kullanım alanı olan biyomedikal uygulamalardan bahsededeğiz.

2. BASİT BİR GÖRÜNTÜ İŞLEME LABORATUVARI:

Düşük maliyetli bir görüntü işleme laboratuvarı kurabilmek için gerekli aygıtlar şunlardır:

1. Matematik işleyicisi de bulunan hızlı bir kişisel bilgisayar (PC) ya da iş istasyonu. PC kullanılacaksa grafik ekranı ve kartı olmalıdır. İş istasyonlarının gri seviyesi olanları tercih nedenidir.
2. Veri girişi için yüksek rezolusyonlu bir renkli ya da

(*> ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü



"Görüntü işleme, tıp, fizik, jeoloji gibi alanların yanısıra sanatta da uygulama alanı bulmuş, vazgeçilemez hale gelmiştir."

siyah-beyaz video kamera. CCD kameralar ışık değişikliklerine daha hızlı uyum sağladıklarından dolayı tercih edilmelidir.

3. Görüntü sayısallaştırıcı kartı ve ilgili yazılım. Bu kartlar ABD kökenli bazı firmalar tarafından pazarlanmaktadır. İşlevi kameradan gelen analog görüntüyü sayısala çevirmek ve istenen bir anda yakalanan sayısal görüntüyü üzerindeki "frame memory" denen bellekte tutmaktır. Aynı kart üzerinde işlenmiş görüntüyü sayısaldan analoga çeviren düzenek te bulunur. Bu tür donanımın modüller yapıda olanları vardır ve yeni kartlar eklentisiyle histogram bulma gibi bazı temel işlevlerin donanımla gerçekleştirilmesi mümkündür.

4. Analog yüksek rezolusyonlu monitör. İşlenmiş ya da işlenmemiş görüntü sayısaldan analoga çevrildikten sonra bu aygıtta izlenebilir. Alt ya da üst düzey görüntü işleme için gerekli yazılım satın alınabilmeye birlikte amaca uygun olarak kolayca geliştirilebilmektedir.

ŞEKİL 1'de ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde kurulu böyle bir sistem konfigürasyonu görüyoruz. Bu donanıma ek olarak genel amaçlı bir görüntü işleme yazılımı burada geliştirilmiştir. Bu yazılım önceki bölümde sözü edilen alt ve üst düzey işlemlerden önemli bir kısmını gerçekleştirebilmektedir.

Bundan sonraki bölümde bu ve bunun gibi kurulmuş çeşitli üniversitelerdeki görüntü işleme laboratuvarlarında yapılan uygulamalardan sözedeceğiz.

3. GÖRÜNTÜ İŞLEME UYGULAMALARI:

Görüntü işleme tekniklerinin kullanıldığı bazı örnek uygulamalar aşağıda özetlenmiştir.

a) Fizikte Görüntü işleme:

Elektron mikroskopisi ile uğraşan fizikçiler, özellikle bulanık elektron mikroskobu görüntülerinin netleştirilmesi konusunda çeşitli görüntü işleme tekniklerini sıkça kullanmaktadırlar [1]. Görüntü işleme, laser fiziği ve özellikle de holografi konusunda önemli rol oynamaktadır. Holografik kayıtlardan bilgisayar ve görüntü işleme yöntemleri kullanılarak orijinal görüntünün yeniden oluşturulması konularında önemli çalışmalar bulunmaktadır. Bilkent Üniversitesinde de bu konuda bazı çalışmalar başlatılmıştır.

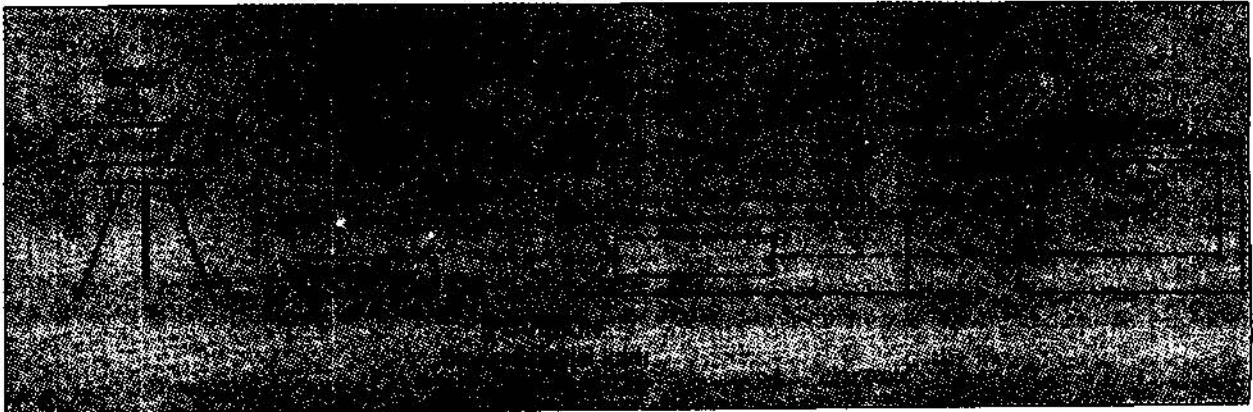
b) Sanatta Görüntü işleme:

Tıp, fizik, jeoloji vb. birçok teknik alanın yanı sıra görüntü işleme sanatta da kendini göstermiş ve bir ressamın fırçası gibi bazı sanat dallarında vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

Görüntü işlem tekniklerinin gelişmesi "elektropentur" ve bilgisayar animasyonları gibi yeni sanat dallarının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Görüntü işlemin yaygınlaşması ayrıca "Videotex Design Studios" gibi yeni iş alanlarının da doğmasına neden olmuştur [7]. Ülkemizde de başta Bilkent Grafik Sanatlar bölümü olmak üzere çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu konuda çalışan kişilerin çalışmalarında iyi bir mühendislik temelini yanı sıra sanatçı yaklaşımlarının sentezini görmek mümkündür. Grafik sanatların yanı sıra görüntü işlem tekniklerinin kullanıldığı çok yeni diğer bir alan ise üç boyutlu müzik enstrümanları (3- Dimersional Musical Instrument 3-DMI) ile müzik yapmaktır. ODTÜ bilgisayar mühendisliği bölümünde bu konuda bazı çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntemde sanatçı üç boyutlu uzayda vücut hareketleri ile müzik çalabilmektedir, diğer bir deyişle 3-DMI ile müzik yapmak müzik ve modern dansın bir sentezidir.

c) Biyomedikal Uygulamalar:

Görüntü işleme tekniklerinin en çok kullanıldığı alanların başında biyomedikal uygulamalar gelmektedir. Örneğin, ultrason ve röntgen filmleri üzerinde insan anatomisinin



Şekil 1. ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümünde kurulu sistem konfigürasyonu

ayrıntılarını daha net gösterebilmek için çok sayıda görüntü işleme tekniği uygulanmaktadır [11],[14],[15],[16],[18]. Literatürde, göğüs radyogramlarında görüntü zenginleştirme işlemlerinin yapıldığı önemli kaynakların yanısıra [11] sayısal diyod alanlı radiografi tarayıcıları (Diode Array Digital Radiography) ile elde edilen göğüs radiografileri üzerinde uygulanan görüntü işleme tekniklerini bulmak ta mümkündür [18]. Bazı tepe değeri belirleme (peak-detection) yöntemleri, göğüs radyogramlarında ciğer ve mediastinum'un ayrılabilmesi için kullanılmaktadır [16].

Radyogramlar, medikal alanda oldukça eski bir geçmişe sahiptirler. Bu nedenle radyogramlar üzerinde yapılan çok çeşitli görüntü işleme çalışmaları bulunmaktadır. Söz konusu çalışmalar göğüs radyogramları üzerinde yoğunlaşmışsa da sadece bunlarla sınırlı değildir. Örneğin el radiogramları üzerinde yapılmış ilginç çalışmalar vardır [14]. El radiogramlarındaki kemik görünümlerinin belirginleştirilmesi ve bu kemiklere ait bazı parametrelerin saptanmasında kullanılan segmentasyon teknikleri geliştirilmektedir [14].

Göğüs boşluğunun belirlenmesinde de ekokardiografik görüntüler üzerinde segmentasyon işlemlerinin yapılması [19] segmentasyon işleminin kullanıldığı alanlara yeni bir örnek sayılabilir.

Tıbbi görüntüleme deki diğer bir uygulama da damar görüntülerinin belirginleştirilmesinde çeşitli kenar zenginleştirme algoritmaları kullanılmaktadır [15].

Tıp alanında görüntü işlem tekniklerinin yaygın olarak kullanıldığı diğer bir alan ise kardiografidir. Kalp kaslarının gerilme mekanizmalarının incelenmesi amacıyla mikrobilgisayar denetimli görüntü işleme sistemleri geliştirilmektedir [20] [21]. Bu sistemlerde incelenecek kalp hareketleri önce videoya kaydedilmekte, daha sonra kaydedilmiş olan görüntüler üzerinde işlem yapılmaktadır.

Bilgisayarlı tomografide (BT) (Computed Tomograph-CT) görüntü işleme son derece büyük bir öneme sahiptir. BT de kullanılan görüntü işleme teknikleri iki grupta incelenebilir. İlk grupta, dönen x-ışını tarama verilerinden (Rotating X-Ray Scanner Data) iki boyutlu görüntünün elde edilmesi ve ikinci grupta ise elde edilen görüntü üzerinde görüntü zenginleştirme tekniklerinin uygulanması sayılabilir [16]. X-ışını tarama verilerinden iki boyutlu görüntünün oluşturulmasında Radon transformasyonu tekniği kullanılmaktadır [10]. FFT - süzgeci, Laplacian süzgeci, kenar zenginleştirme (edge enhancement), resmi anlamlı parçalara bölme (segmentation), ikili sınırlama (binary thresholding) gibi görüntü işleme yöntemlerinin kombinasyonları bilgisayarlı tomografide sıkça kullanılmaktadır [16].

Sintigrafi, vücuda verilen radio aktif maddelerin vücutta tutuldukları yerlerin saptanması temeline dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde, aslında duyarlı radyasyon de-

"Tıbbi görüntüleme alanında bilgisayarlar çok çeşitli amaçlarla ve bir çok alanda yoğun olarak kullanılmaktadır."



dektörleri olan sintigrafi kamerasından elde edilen bilgiler vücuttaki radio aktif birikimlerin haritasını (görüntüsünü) çıkarmakta kullanılmaktadır. Oluşturulan sintigrafi görüntülerinde radio aktif birikimin yoğun olduğu yerler koyu, radio aktif birikimin az olduğu yerler ise açık tonda görünmektedir. İnsan gözünün birbirine yakın tonları ayırtedebilme konusundaki sınırları radyografi görüntülerinde olduğu gibi sintigrafi görüntülerinin de tüm detaylarının algılanmasını zorlaştırmaktadır. İşte bu noktada, görüntü işleme teknikleri sorunun çözümünde büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Birbirine yakın fakat farklı gri tonlardaki detay görüntüler başta yapay renklendirme (pseudo-coloring) teknikleri olmak üzere çeşitli görüntü işleme teknikleri ile birbirlerinden kolayca ayırtedilebilecek görüntülere dönüştürülmektedir. Bu konuda ODTÜ bilgisayar mühendisliği bölümünde yapılan bazı deneysel çalışmalardan olumlu sonuçlar alınmaktadır.

Medikal uygulamalar ile uzaktan, yakından ilgisi olsun olmasın hemen hemen herkesin bildiği bir işlem de kan sayımıdır. En basit anlamda kan sayımı olarak adlandırığımız işlem, bazı ön işlemlerden geçirilmiş kan örneklerindeki elitrosit ve lokositlerin birim hacimdeki miktarlarının saptanması olarak özetlenebilir. Bu işlemin gelecekteki şekline, sayımı yapan kişi mikroskop altındaki





"Ülkemizde yeni sayılabilecek bir geçmişe sahip olmasına karşın görüntü işleme konusunda deneysel çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır."

kan örneğine bakarak beşli bir hacimdeki kan hücrelerini tek tek sayar ve daha büyük bir hacimde bulunabilecek miktarı hesaplar. Kan sayımında kullanılan çok daha farklı yöntemler olmakla birlikte en yaygın olarak kullanılan yöntem budur. Bu işlemin tekdüzeliği ve sürekli mikroskop başında çalışma gerektirmesi istenmeden yapılan hataları arttırmaktadır. Sayım işleminde insanı mikroskobun başından kaldıracak görüntü işlem teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde mikroskopta oluşturulan görüntü bir kamera ve uygun sayısallaştırıcı devrelerle bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Sayısallaştırılan bu görüntülerde sayılacak kan hücreleri çeşitli görüntü işleme ve şekil tanıma yöntemleri ile arka plandaki görüntüden (background image) ayrılmakta ve ayrılan hücre görüntüleri sayılmaktadır. Deneysel amaçlarla bu konuda ODTÜ bilgisayar mühendisliği bölümünde bazı çalışmalar yapılmıştır.

Ülkemizin sosyo-ekonomik ve kültürel yapısına bağlı olarak endişe verici düzeye ulaşan akraba evliliklerine (her beş çiftten biri) paralel olarak ülkemizde görülen kalıtsal hastalıklarda son derece fazladır. Bu hastalıklardan biri olan ve Akdeniz yöresinde daha çok görüldüğü için Akdeniz anemisi olarak anılan talasemia da sözkonusu kalıtsal hastalıklardan biridir. Bu hastalıkta kan hücreleri deformasyona uğrayıp, şekil değiştirmekte ve normalde



disk şekline yakın görünümde olan kan hücreleri orak şeklini almaktadır. Alınan kan örneklerinde bu hücrelerin saptanması ve sayımında da yukarıda özetlenen görüntü işleme teknikleri deneysel amaçlarla kullanılmıştır. Vücut simetrisinin kontrolünde ve kalp atışı gibi küçük pulse hareketlerinin algılanmasında da ilginç görüntü işleme teknikleri denenmiştir [22]. Bu yöntemler vücuda yönlendirilen sabit ışık kaynağından yansıyan ışıkların algılanıp sınıflandırılması temeline dayanır. Temas ve tahriş edici özellikleri olmaması nedeniyle yakın gelecekte daha yaygın olarak kullanılabileceği düşünülen bu yöntem ODTÜ bilgisayar mühendisliği bölümünde gerçekleştirilmiştir.

ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği bölümünde gerçekleştirilen diğer bir çalışma ise görüntü işleme tekniklerinin kullanıldığı padobarografi sistemidir. Padobarografi, insanın ayakta durduğu sırada ayak tabanına uyguladığı basıncın ayak tabanında nasıl bir dağılıma sahip olduğunu saptanmasında kullanılan bir yöntemdir. Klasik olarak basınç duyargalarından (pressure sensor array) oluşturulan bir rhatrisin kullanıldığı ve bu nedenle düşük resolusyona sahip olan klasik padobarografi sistemi yerine ışık kırılma indislerinin farklı olduğu temas halindeki iki yüzeye uygulanan basınç ile elde edilen görüntülerin kullanıldığı alternatif padobarografi yöntemleri bulunmaktadır [23] [24] [25] [26]. Sözkonusu bu yöntem kullanılarak ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği bölümünde gerçekleştirilen padobarografi sistemi Hacettepe Hastanesi Ortopedi polikliniğinde hallux vâlkus (ayak parmaklarının pozisyonlarındaki bir cins deformasyon) vakaları üzerinde başarı ile denenmiştir. Kullanılan sistemle ayak deformasyonu sonucu oluşan anormal basınç dağılımları saptanmış ve bu deformasyonların giderilmesi amacı ile yapılan operasyonlar sonunda ulaşılan nokta kontrol edilebilmiştir.

Birçok farklı bransa hitap etmeye başlamış olan görüntü işleme konusunu birkaç sayfaya sığdırmak mümkün değildir. Ülkemizde yeni sayılabilecek bir geçmişe sahip olmasına karşın görüntü işleme konusunda deneysel çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır. Görüntü işleme çalışmaları yapılan üniversitelerimizde yukarıda değinemediğimiz daha bir çok çalışmalar mevcuttur. Ege ve Boğaziçi üniversitelerinde de bu tür laboratuvarlar vardır. Yapılan diğer çalışmalara örnek olarak NMR görüntülerinin düzeltilmesi, morfolojik transformasyonlarla baskılı devre testi, holografik görüntü işleme, doku (texture) modelleme, Osmanlıca metin düzenleme ve tanıma gibi daha birçok konuyu sayabiliriz.

Biraz fazla iyimser bir bakış gibi gözükse de, görüntü işleme konusunda çalışmalar yapan bir çok daldan kişilerin "fantastik" (Fantastic-World") olarak niteledikleri görüntü işleme konusunda yapılan çalışmaların bütün üniversitelerimize yayılmasını ve uygulamaların gerçek yaşama geçirilmesi için üniversite dışındaki kuruluşlarını konuyu desteklemelerini dileriz.

KAYNAKLAR:

- [1] P.W.Hawkes, "Processing Electron Images" 25 th Scottish Universities Summer School in Physics Augustos 7-27th, 1983
- [2] B.J. Roth, "Image Processing in a Time-Sharing Environment" Computer Graphics World, Nisan 1985 pg. 53-70
- [3] R.C. Gonzalez & P. Witz, "Digital Image Processing" Addison-Wesley Publishing Company, 1987 ISBN 0-201-11026-1
- [4] BioScanInc, "Image Analysis Software", IHE International Hospital Equipment, ICR 89 Preview Paris, July 1-8, Medical Imaging Special pg. 16
- [5] M. Faintich, "Image Processing: Science or Art?", Computer Graphics World, Nisan 1985 pg. 81-86
- [6] M. Faintich, "Defense Mapping Undergoes a Digital Revolution" Computer Graphics World, Haziran 1985pg.10-28
- [7] M. Raggett, "Videotext Desing Services", Computer Graphics Vforld, Haziran 1985 pg. 79-81
- [8] J.M.S. Preuitt "Object Enhancement and Extracüon in Picture Processing" Rosenfeld, Eds. New York: Acedemic 1970
- [9] "Macmillan Contemporary Dictionary" Macmillan Publishing Co., Inc. New York ABC Yayinevi istanbul, 1986 pg. 512
- [10] A.K. Jain, "Fundamentals of Digital Image Processing" Prentice Hail, 1989
- [11] J.S. DaPonte, M.D. Fox, "Enhancement of Chest Radiographs With Gradient Operators" IEEE Transactions on Medical Imaging, Haziran 1988 Vol. 7, No. 2pg. 109-117
- [12] A.A. Moss, G. Gamsu, H.K. Gennant "Computed Tomography of The Body" W.B. Saunders Company, 1988 pg. 1-21
- [13] D.W. Capson, R.A. Maludzinski, LA. Feuerstein "Microcomputer-Based Interactive Tracing of Blood Cells at Biomaterial Surfaces" IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Ağustos 1989 Vol. 36, No. 8pg. 860-864
- [14] D.J. Michael, A.C. Nelson "HANDX: A Model-Based System for Automatic Segmentation of Bones from Digital Hand Radiographs" IEEE Transactions on Medical Imaging, Mart 1989 Vol. 8, No. 1 pg. 64-69
- [15] S. Chaudhuri, S. Chatterjee, N. Katz, Mark Nelson, Michael Goldbaum "Detection of Blood Vessels in Retinal Images Using Tivo-Dimentional Matched Filters" IEEE Transactions on Medical Imaging, Eylül 1989 Vol. 8, No. 3pg. 263-269
- [16] M. Ibrahim Sezan, A. Murat Tekalp, R. S'chaetzg "Automatic Anatomically Selective Image Enhancement in Digital Chest Radiography" IEEE Transactions on Medical Imageing, Haziran 1989 Vol. 8, No. 2pg. 154-162
- [17] A.B. Watson, Albert J. Ahuada "A Hexagonal Orthogonal-Oriented Pyramid as a Model of Image Representation in Visual Cortex" IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Ocak 1989 Vol. 36, No. 1pg. 97-106
- [18] J. Rogoivska, K. Preston, D. Sashin "Evaluation of Digital Unsharp Masking and Local Contrast Stretching as Applied to Chest Radiographs" IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Ekim 1988 Vol. 35 No. 10pg. 817-827
- [19] J.W. Klingler, C.L. Vaughan, T.D. Fraker, L.T. Andrws "Segmentation of Echocardiographic Images Using Mathematical Morphology" IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Kasım 1988 Vol. 35 No. 11 pg. 925-934
- &O] T.Sato, T. Vfatanabe, H. Honjo, Y. Naito, I. Rodama, J. Toyama "Microcomputer-Based Image Processing System for Measuring Sarcomere Motion of Single Cardiac Cells" IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Kasım 1988 Vol. 35 No. 5pg. 397-400
- [21] B.W. Steadman, K.B. Moore, K.W. Spi'zer, J.H.B. Bridge "A Video System for Measuring Motion in Contracting Heart Cells" IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Kasım 1988 Vol. 35 No. 4pg. 264-272
- [22] K.Cheung, M.D. Fox "Isoreflectance Contours For Medical İnuzging" IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Aralık 1988 Vol. 35, No. 12pg. 1059-1063
- [23] R.P. Betts, T. Duckuorth, I.G. Austin "Critical Light Reflection At a Plastic/GUtss Interface and Its Application to Foot Pressure Measurements" Journal of Medical Engineering & Technology pg. 136-142
- [24] R.J. Minns, A.D. Craxford "Pressure Under the Forefoot in Rheumatoid Arihritis A Comparison of Static and Dynamic Methods of Assessment" Clinical Orthopaedics and Related Research pg. 235-242
- [25] M. Lord, D.R. Reynolds, J.R. Hughes "Foot Pressure Measurement: A Review of Clinical Findings" J. Biomed. Eng. Ekim, 1986 Vol. 8, pg. 283-294
- [26] C.L. Franks, R.P. Betts, T. Duckivorth "Microprocessor-Based Image Processing System for Dynamic Foot Pressure Studies" Med. & Biol. Eng. & Comput. 1983, 21 pg. 566-572