

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOMOGRAFİK GÖRÜNTÜ VERİLERİNDEN 3 BOYUTLU
CAD MODELİNİN OLUŞTURULMASI**

Makina Müh. Ünal USLU

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erhan ALTAN

İSTANBUL, 2006

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TOMOGRAFİK GÖRÜNTÜ VERİLERİNDEN 3 BOYUTLU
CAD MODELİNİN OLUŞTURULMASI**

Makina Müh. Ünal USLU

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 16 Şubat 2006

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erhan ALTAN

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Ferhat DİKMEN

: Yrd. Doç. Dr. Semih ÖNÜT

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
3. TERSİNE MÜHENDİSLİK ve SAYISALLAŞTIRMA	26
3.1 Sayısallaştırmada Kullanılan Yöntemler	27
3.1.1 3D Optik Ölçme Tekniği	27
3.1.1.1 Optik Ölçmede Aktif Metodlar	28
3.1.1.2 Optik Ölçmede Pasif Metodlar	29
3.1.2 3D Tarama Sisteminde Topogrametri	30
3.1.3 3D Koordinat-ölçme Cihazı ve Tersine Mühendislik Yazılımı CopyCAD	32
4. SAYISAL GÖRÜNTÜ İŞLEME	36
4.1 Görüntülerin Bölümlemesi ve Sınıflandırılması	37
4.1.1 Kenar ya da sınır esaslı bölümleme	40
4.1.2 Kenar Arama Operatörleri	40
4.2 MATLAB ile Görüntü İşleme ve Kenar Bulma (Edge-Detection)	50
4.2.1 MATLAB Programı ile Kontur Çizme (Contouring)	51
4.2.2 Sınır Takibi (Boundary Tracing)	53
5. MEDİKAL GÖRÜNTÜLEMENİN FİZİĞİ VE BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ	57
5.1 Bilgisayarlı Tomografinin Temel Prensipleri	59
5.2 Medikal Görüntü İşleme ve Analiz Yazılımları	60
5.3 CT 'nin Yapısındaki Tarihsel Gelişimler	60
5.4 CT Rekonstrüksiyon Teknikleri	68
5.5 Tomografi Tarayıcısının İç Yapısı ve Endüstriyel Tomografi Cihazları.....	70
5.6 CT Sisteminde Özel Teknikler	73
5.6.1 Dijital Radyografi	74

5.6.2	CT Sistemlerinde Görüntü İşleme ve Analizi.....	74
6.	2D ve 3D MATEMATİK MODELLERİN OLUŞTURULMASINDA FAYDALANILAN METODLAR	78
6.1	Eğrilerin Gösterimi	79
6.2	Yüzeyin Parametrik Gösterimi	91
6.3	Yüzey Elemanları	94
6.4	Yüzey Tasarım Uygulamalarıyla İlgili Örnekler.....	96
6.5	MasterCAM ile Yüzey Modelleme	97
6.5.1	MasterCAM ve Yüzey Tipleri	98
6.5.2	MasterCAM ve Yüzey Matematiği	99
6.5.3	Yüzey Tipleri	101
7.	TOMOGRAFİK GÖRÜNTÜ VERİLERİNDEN 3D CAD MODELİN OLUŞTURULMASINA YÖNELİK UYGULAMA.....	105
7.1	Tomografiden Görüntü Alınması	105
7.2	Çekim Parametreleri	106
7.3	Görüntü İşleme Yöntemiyle Kesit Konturlarının Elde Edilmesi.....	108
7.4	CAD Programına Aktarılan 2D Verilerden, 3D Geometrik Modellemeye Geçiş	110
7.5	Bitmap Görüntüyü Polyline Formunda Grafiğe Çeviren Bir Program Uygulaması	112
7.6	Sonuçların Konvansiyonel Tarama Cihazlarında Yapılan Ölçümlerle Karşılaştırılması.....	114
8.	SONUÇLAR.....	118
	KAYNAKLAR.....	119
	EKLER	121
Ek 1	Tersine Mühendislik'te (Reverse Engineering) Sıkça Kullanılan Terimler	122
Ek 2	3D Tarama Maksadıyla Yaygın Kullanılan Cihazların Karşılaştırılması	124
Ek 3	Uygulamada Kullanılan Numuneye Ait Tomografik Görüntüler.....	126
	ÖZGEÇMİŞ.....	128

SİMGE LİSTESİ

$B_{i,n}(u)$	Bezier eğrilerinde Bernstein polinomunu
C^j	Birinci dereceden eğri sürekliliği katsayısı
f	Dijital görüntülerde, gri tonun yoğunluğunu gösteren genlik
G_x	Kenar arama maskelerinde birinci dereceden türev
I_t	Transmisyon ölçümlerinde dedektörlerde hissedilen X-ışının yoğunluğu
n	Eğri üzerindeki noktaya ait indis
μ	Dokudan geçen X-ışınının lineer zayıflama katsayısı
P_i	Poligonsal yüzeyler üzerinde sentroide göre oluşturulan köşe noktası
P_i	Sentetik eğrilerde kontrol noktası
$P(u)$	Sentetik eğriye ait segmentin üzerindeki pozisyon vektörü
$P(u,v)$	3-boyutlu uzayda yüzey üzerindeki bir noktaya ait vektör
$R_{i,k}(u)$	Rasyonel B-Spline eğrilerin temel fonksiyonu
T	Sınır bulma operatörlerinde, bölgeler arası threshold (eşik) değeri
u	Eğriyi tarif eden polinomun sınır değişkenlerini gösteren parametre
z_i	3x3.lük filtre ile çevrelenmiş bölgedeki piksellerin parlaklık seviyesi
∇f	Görüntünün gradyan vektörü

KISALTMA LİSTESİ

ACT	Abrasive Computed Tomography
BBF	Berstein Basis Function
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAT	Computerized Assisted Tomography
CCD	Charge-coupled Device
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMM	Coordinate Measuring Machine
CT	Computed Tomography
DICOM	Digital Imaging and Communication in Medicine
DIP	Digital Image Processing
DR	Digital Radiography
FEA	Finite Element Analysis
FOV	Field of View
GPS	Global Positioning System
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IPT	Image Processing Toolbox
MPT	Miniature Projection Technique
MR	Magnetic Resonance
MRI	Magnetic Resonance Imaging
NDT	Non-destructive Testing
NURBS	Non-uniform Rational B-Spline
RE	Reverse Engineering
RP	Rapid Prototyping
STL	Standard Triangulated Language
XCT	X-Ray Computed Tomography

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Otomotiv firmaları tarafından kullanılan tersine mühendislik iş akış şeması..... 2
Şekil 2.1	Segmentasyon için kullanılan farklı eşik değerlerine göre silindirik nokta bulutunun çap ölçümleri 4
Şekil 2.2	16 farklı pozisyonda yapılan ölçümlerin; (a) dilim-eşikleme ve (b) global eşiklemeye göre hesaplanmış halini karşılaştıran grafik 5
Şekil 2.3	Yeniden kontur oluşturma ile konvansiyonel metodların karşılaştırılması: (a) CT'den alınan ilk kontur, (b) Gaussian yumuşatması, (c) Ortalama yumuşatma, (d) Tekrar kontur oluşturma metodu 6
Şekil 2.4	Teğet (tanjant) vektörü yardımıyla kestirimi yapılan ilk kompozit kontur..... 7
Şekil 2.5	Yüzey modellemesi uygulamaları:(a) CT görüntülerinden alınan konturlar, (b) Final yüzey modeli, (c) Sonlu elemanlar ile üretilmiş model, (d) Hızlı prototiplenmiş parça 7
Şekil 2.6	Poligonsal düzlemsel kesitlerde bir sonraki köşenin seçimi..... 9
Şekil 2.7a	Vertebra tomogramlarından elde edilen beş seri kesit ve bunların arasında oluşturulmuş üçgen yamalar 9
Şekil 2.7b	Planar konturlar arasında örülmüş yüzeyler ve gölgelendirilmiş hali 10
Şekil 2.8	3D medikal doku görüntüleme ve analiz yazılımı MİPAS'tan bir pencere..... 11
Şekil 2.9	Endüstriyel bir tomografide kesit görüntüsünün elde edilme safhaları 12
Şekil 2.10	CT ile metal ve plastik malzemeler üzerinde yapılan tahribatsız muayenelerde kullanılan kesit görüntüleri ve hassas parçaların taranma sonucunda oluşturulan geometrik modeli 14
Şekil 2.11	Dökümantasyonu olmayan parçaların CT yardımıyla yeniden imal edilmesi. 15
Şekil 2.12	Bir dış modelinin enine kesit sınırları..... 16
Şekil 2.13	(a) Dış modelinin nokta bulutu hali , (b) STL formatına dönüştürülmüş şekli, (c) gölgelendirilmiş 3D CAD modeli 17
Şekil 2.14	Sekiz hareket yönünü esas alan iç ve dış sınırının takibi yöntemi..... 18
Şekil 2.15	Farklı kontrol noktası sayılarına göre eğri uyduma sonuçlarındaki değişim.... 19
Şekil 2.16	Parçanın dışına örülmüş "loft" yüzeyin; (a) kafes halinde ve (b) gölgelendirilmiş halde gösterimi 20
Şekil 2.17	CT tarayıcısı kullanarak tersine mühendisliğin ve segmentasyonun basamakları 21
Şekil 2.18	Çekirdek büyümesi segmentasyonunun evreleri 22
Şekil 2.19	Çekirdek büyümesi segmentasyonundan faydalanılarak oluşturulan; (a) medikal ve (b) endüstriyel modeller 23
Şekil 2.20	BBF sınır ağı tarafından üretilen sentetik yüzeyler 24
Şekil 2.21	Radyal başlığın dış geometrisini tarif eden kapalı konturlar 25
Şekil 3.1	Tersine mühendislik tekniklerinin sınıflandırılması 27
Şekil 3.2	(a) Optik üçgenleme örneği, (b) Işık kesiti tekniği örneği , (c) Fringe izdüşüm tekniği..... 29
Şekil 3.3	(a) İki kameralı stereografi, (b) Bir kamera ile farklı yönlerden fotogrametri . 30
Şekil 3.4	(a) Üçgenleme açısındaki kamera ve projektör ile sensör düzeneği, (b) Cismin yüzeyinde deformasyona uğrayan izdüşürülmüş fringe'ler 31
Şekil 3.5	Standard OptoTOP sistemi ve sensörün geometrik düzenlemesi 31
Şekil 3.6	CMM'ler üzerinde çalışan 3D ölçme ve tarama yazılım örnekleri..... 32
Şekil 3.7	CopyCAD'in vertebra üzerinde tarama sürecinden model sürecine kadar geçen aşamaları gösteren örnek..... 33
Şekil 4.1	Sayısal Görüntü İşlemede Koordinatlar..... 41
Şekil 4.2	Lineer düzlem filtrelemenin mekanizması..... 43

Şekil 4.3	Bir nokta arama maskesi	44
Şekil 4.4	Çizgi arama maskeleri.....	44
Şekil 4.5	Bazı kenar arama maskeleri ve birinci dereceden türevleri	46
Şekil 4.6	Sobel maskesi uygulanmış görüntü ve belli bir eşik değeri için çeşitli yönlerde, bulunmuş kenarlar.....	47
Şekil 4.7	Biomodal bir histogramda görsel analiz yaparak eşik değerinin tespiti	48
Şekil 4.8	Canny kenar bulma operatörü uygulaması (orijinal görüntü).....	50
Şekil 4.9	Sobel ve Canny operatörlerinin karşılaştırılması	51
Şekil 4.10	“Contour” fonksiyonu ile görüntü işleme	52
Şekil 4.11	Matlab’te sınır takibi uygulaması	54
Şekil 4.12	Morfolojik görüntü işleme komutu “imfill” uygulaması	55
Şekil 4.13	Kenar takibinde yön seçimi	56
Şekil 5.1	Radyolojik görüntüleme tekniklerinin tarihsel gelişimi	57
Şekil 5.2	Radyografi ile bilgisayarlı tomografinin mukayesesi	58
Şekil 5.3	CT’den taranan bir diliminin görüntüsünü meydana getiren unsurlar	59
Şekil 5.4	Birinciden dördüncü nesil tarayıcılara X-ışınlı tomografinin gelişim evreleri ..	62
Şekil 5.5	X-ışının toplam zayıflama katsayısı.....	64
Şekil 5.6	Piksel boyutunu etkileyen faktörler	65
Şekil 5.7	CT sayısı ile ± 1000 skalası için parlaklık değeri (gri skala) arasındaki ilişki ..	66
Şekil 5.8	Zayıflamaya maruz kalmış X-ışın demeti ve iki boyutlu lineer zayıflama katsayıları matrisi.....	68
Şekil 5.9	CT görüntüsünün basit ve filtrelenmiş geri izdüşüm prosedürleri ile geriçatımının (rekonstrüksiyon) şematik gösterilişi.....	69
Şekil 5.10	X-ışın tüpü, jeneratörü ve dedektörü içinde bulunduran ganrtı kabini	70
Şekil 5.11	Endüstriyel CT ve DR tarayıcısı	71
Şekil 5.12	Endüstriyel CT tarayıcılar ve data toplama çeşitleri.....	72
Şekil 5.13	CT tarayıcısında, malzemeye göre X-ışını enerjisi ve hacimsel çözünürlüğe ait performans diyagramı	73
Şekil 5.14	Uçak motoru türbin kanatçığının dijital radyografisi.....	74
Şekil 5.15	CT’de enine kesit görüntüsü üzerinden otomatik cidar kalınlığı ölçümü.....	75
Şekil 5.16	Türbin kanadının CT’de alınan datalar ile üretilmiş 3D görünüşü	77
Şekil 6.1	P noktasının konum vektörü	80
Şekil 6.2	3-boyutlu bir eğrinin parametrik gösterimi.....	81
Şekil 6.3	Eğrilerin muhtelif derecelerdeki süreklilikleri	84
Şekil 6.4	Kübik Bezier eğrisinin genel gösterilişi.....	88
Şekil 6.5	B-spline eğrilerinin lokal kontrol noktaları.....	90
Şekil 6.6	B-spline şekil değişiminin, eğrinin derecesi üzerindeki etkileri.....	90
Şekil 6.7	3-boyutlu yüzeyin parametrik gösterimi	92
Şekil 6.8	(a) Kılavuz kenarlı (ruled) ve (b) dönel eksenli (revolved) yüzeylerin parametrik gösterilişi	93
Şekil 6.9	(a) Kapalı Bezier yüzeyleri , (b) 4x5 B-spline yüzey yamaları	94
Şekil 6.10	Verilen bir nokta bulutundan B-spline yüzey oluşturulması	96
Şekil 6.11	Değişik yöntemlerle oluşturulmuş yüzeylerin karşılaştırılması.....	97
Şekil 6.12	Tekli ve çoklu yama yüzeyler (Coons patch)	99
Şekil 6.13	MasterCAM’de Bezier yüzey	100
Şekil 7.1	Bir 4.kuşak jenerasyon bilgisayarlı spiral tomografi -512 matris, 3D görüntüleme- (SIEMENS SOMATOM AR)	105
Şekil 7.2	Tomografide taranan plastik fön nozulu ve alüminyum motor fanı	105

Şekil 7.3	Tomografiden alınmış bir görüntü bilgisinin, Matlab penceresindeki görünüşü.....	106
Şekil 7.4	Tomografide taranmış nozulun, cihaza ait yazılımla ekranda elde edilen 3-boyutlu "render" görüntü (SIENET MagicView).....	107
Şekil 7.5	Fan parçasının tomografide taranması neticesi oluşan, 3-boyutlu ekran görüntüsü.....	107
Şekil 7.6	MATLAB programı yardımıyla görüntü işlemeye yönelik çalışma penceresi	108
Şekil 7.7	Bir fan kesit konturunun, MASTERCAM penceresinde nokta bulutu şeklindeki gösterimi	110
Şekil 7.8	Bir fan kesit konturunun, kapalı bir spline eğrisi olarak gösterimi.....	110
Şekil 7.9	Fanın 2D konturlarının bir araya getirilmesiyle oluşan perspektif görünüşü .	111
Şekil 7.10	Fan parçasının “loft” komutuyla oluşturulan 3D yüzey modelinin gösterimi	112
Şekil 7.11	Bitmap görüntüyü polyline formunda kırık çizgiler topluluğuna dönüştüren program penceresi.....	113
Şekil 7.12	Raster görüntüden vektörel geometriye geçiş programının akış diyagramı ..	113
Şekil 7.13	Fan kesitinin CAD ortamına aktarılmış 2D polyline geometrisi	114
Şekil 7.14	Nokta temalı CMM ile muhtelif kesit profilleri taranmış nozul	115
Şekil 7.15	CAD ile yüzey modellemesi yapılmış nozul	115
Şekil 7.16	MIMICS programında, fanın tomografik kesitleri ve 3D görüntüsü	117
Şekil 7.17	Fan parçasının, Mimics’ten alınan STL datası üzerindeki kritik çaplar	117

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Endüstriyel malzemelerin taranmasında kullanılan bir CT cihazının teknik özellikleri ile metal malzemeler için izin verilen kümülatif kalınlık tablosu ...	13
Çizelge 6.1 Sentetik eğrilerin tarif edilme şekilleri	83
Çizelge 6.2 Geometrik Yüzeyler	102
Çizelge 6.3 Serbest Formlu Yüzeyler	103
Çizelge 6.4 Dönüştürülmüş (Türetilmiş) Yüzeyler	104
Çizelge 7.1 Numunelerin tarandığı tomografinin çekim parametreleri	106
Çizelge 7.2 Uygulama çalışması ile mevcut programlardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması	116

ÖNSÖZ

"Tomografik Görüntü Verilerinden 3 Boyutlu CAD Modelinin Oluşturulması" konulu tez çalışmamı verimli bir şekilde sonuçlandırmamda bilimsel desteği ve çok kıymetli görüşleriyle her aşamada bana yol gösteren danışmanım Sn. Prof. Dr. E. ALTAN' a teşekkür ederim.

Çalışmalarımın başlangıcından bugüne değin; her zaman sabır ve anlayışını esirgemeyerek, sürekli yanımda olan sevgili eşime, çocuklarıma, anneme, babama ve böyle faydalı bir eserin ortaya çıkmasında katkıda bulunan tüm arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Tomografi; literatürde "dilimlenmiş bir kesitin görüntüsü" manasına gelir. Özellikle medikal sahada doktorlar insan vücudunu ona zarar vermeden izleme imkanı bulmuşlar ve anormal oluşumların yerinin yüksek doğrulukta tespit edilmesinde kullana gelmişlerdir. Endüstride ise; mühendisler ve araştırmacılar için bu görüntüleme teknikleri, Tahribatsız Muayene Deneylerinde (NDT) , malzemenin iç yapı tetkiki, boyutsal ölçümler, yoğunluk hesabı ve karmaşık parçaların mekanik montaj detaylarının analizinde, başvuru yöntemleri arasında önemli bir yere sahiptir.

Sayısal formda kısmen ya da tamamen verisi olmayan, bununla birlikte elimizde fiziksel olarak mevcut bulunan bir nesneden CAD model oluşturabilme yeteneğine imalat mühendisliğinde "Tersine Mühendislik" denilmektedir.

Bu çalışmada; Bilgisayarlı Tomografi (CT) cihazında taranarak, karmaşık iç ve dış yapıya sahip parçaların, 3-boyutlu (3D) modelinin ortaya çıkarılması böylece konvansiyonel ölçme cihazlarıyla yapılamayan boyutsal ölçüm ve katı modellemelerin ne kadar yüksek bir doğrulukla elde edilebileceği konusu araştırılmıştır. Bu amaca ulaşabilmek için; radyoloji, sayısal görüntü işleme, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) ve tersine mühendislik teknikleri bir araya getirilmiştir.

Uygulama için; 3-boyutlu numunenin yüzey datalarını ortaya çıkarabilmek amacıyla; önce parça tomografide taranarak, kesit görüntüleri elde edilmiştir. Bu raster görüntüler üzerinde, MATLAB mühendislik yazılımı yardımıyla çeşitli görüntü analizi yöntemleri uygulanmış ve Pascal dilinde yazılan bir program aracılığıyla da 2-boyutlu (2D) konturların vektör geometrisi çıkarılmıştır. Daha sonra bu veriler MASTERCAM tasarım yazılımına gönderilerek nesnenin birebir modelinin elde edilmesine çalışılmıştır. Sonuçta bu yöntemle ile alınan veriler, hem MIMICS tersine mühendislik yazılımında analiz edilerek ve hem de COORD3 koordinat-ölçme tezgahında yapılan taramalarla karşılaştırılarak, bahsi geçen metod ile CT yardımıyla modelleme yapmanın avantajlı ve dezavantajlı yönleri irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Tersine Mühendislik (RE), Bilgisayarlı Tomografi (CT), Sayısal Görüntü İşleme (DIP), Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD)

ABSTRACT

In literature, tomography means the image of layered/sliced intersection. Especially in medical experiences, the physicians have been using these images to assess the locations of abnormal formations with higher accuracy and to monitor human body without giving any harm. In industry, they have significant role to analyze Non-Destructive Testing (NDT), investigation of inner structure of materials, dimensional measurements, density counting and montage details of complex mechanic pieces for engineers and researchers.

The ability of CAD modeling of an object without partly or completely digital data is called as “Reverse Engineering” in manufacturing engineering and it is developed with only physical data.

In this research, complex interior and exterior pieces are aimed to be modeled in 3-dimensional (3D) way by digitizing with the Computed Tomography (CT) instrument, and after to compare the results of dimensional measurement and solid modeling with high accuracy which are not to be handled with conventional measuring techniques. Radiology, digital image processing, Computer Aided Design (CAD) and Reverse Engineering techniques are combined together to achieve these objectives in this research.

After digitizing the piece in tomography, intersection images were obtained to figure out the surface data of sample in the experimental stage. Different image analyzing techniques were used on these raster images by the MATLAB engineering software and 2-dimensional (2D) vector geometry were drawn by using Pascal Programming language. After, all the data were sent to MASTERCAM design software to obtain the exact modeling of the object. Finally, the obtained data was compared with either analyses on MIMICS reverse engineering software or scanning via COORD3 coordinate measuring machine and the above method and modeling with CT were assessed with their advantageous and disadvantageous features.

Keywords: Reverse Engineering (RE), Computed Tomography (CT), Digital Image Processing (DIP), Computer Aided Design (CAD).

1. GİRİŞ

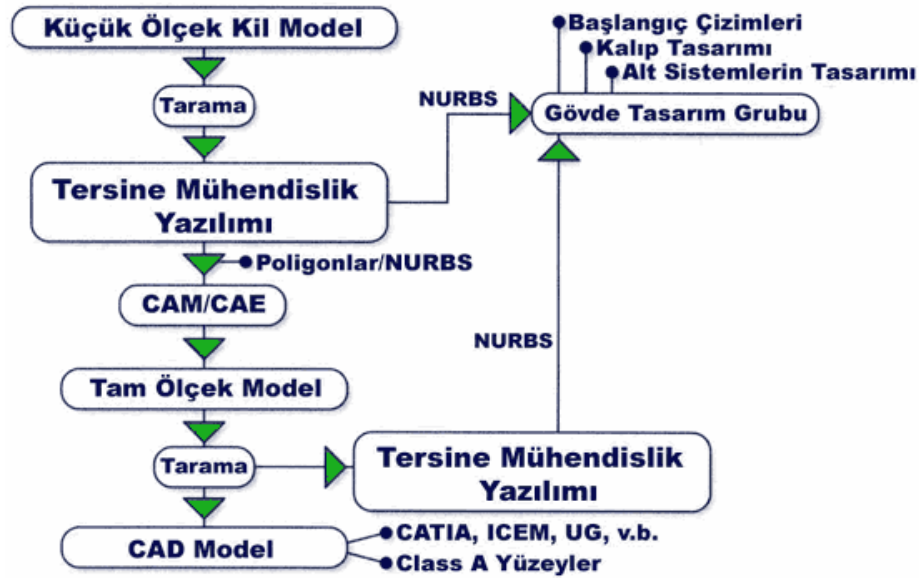
Günümüzden 110 yıl önce Willhelm C. Röntgen'in X-ışınlarını buluşu tıpta yeni bir dönemin başlamasına neden olmuştur. Bilgisayarlı tomografinin matematik prensiplerinin 20.yy başlarında Radon tarafından ortaya konmuş olması rağmen, teknolojik uygulamalarına daha geç başlanmıştır. 1960'ların sonlarına ve 1970'lerin başlarına doğru G. Hounsfield, İngiltere'de ilk ticari X-ışınlı CT sistemini –CAT (Bilgisayar Destekli Tomografi) tarayıcısını geliştirmiştir. 1970'lerde bilgisayarlı tomografinin endüstriyel amaçlı ve araştırma uygulamaları için kullanımı sınırlıydı bu yüzden çalışmalar medikal sistemler üzerine yoğunlaşmıştır. Cisimlerin kesilmeden muayenesini sağlayan radyolojik görüntüleme yöntemlerinden olan “röntgen” ile “bilgisayarlı tomografi” arasındaki en büyük farklılık; incelenen parçanın iki boyutlu izdüşümü değil, kesit görüntüsünün elde edilebilmesidir. Böylece üç boyutlu uzayda numunenin hem dış hem de iç yüzeyinin şekli hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür. 1970 ve 80'li yıllarda dijital görüntü işleme teknolojisindeki ilerleme ve bilgisayar destekli tasarım alanında üretilen yeni yazılımlar sayesinde tomografiden alınan verilerin 2D ve 3D boyutlu ölçüm analizi fevkalade kolaylaşmıştır.

Endüstrinin artan ihtiyaçlarını karşılamak üzere, 3D ölçme tekniklerine olan ilgi ve işletmelerin bu konudaki yatırımları giderek artmaktadır. Gerek mühendislik uygulamaları ve imalat prosesleri gerekse endüstriyel tasarım ve ürün geliştirme faaliyetleri hızlı, hassas ve kullanıcı dostu ölçme sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Özellikle dijital görüntüleme teknikleri sayesinde iş parçasına ait nokta verilerinin tek tek toplanması ile imalat toleranslarını doğrulama, yeniden imal edilecek parçalar için geometri belirleme ve deformasyon problemleri görüntüleme gibi pek çok tersine mühendislik ve muayene işlemleri mümkün olmaktadır. Günümüz CAD/CAM uygulamalarında çoğunlukla bilgisayar ile oluşturulan üç boyutlu modelden hareket edilerek uygun CNC veri oluşturulması yoluyla imalat aşamasına geçilmektedir. Buna alternatif bir uygulama olarak "tersine mühendislik" diye tanımlanan yöntem de mevcuttur. Esasen bu yöntemi genel anlamı ile ele aldığımızda, elde mevcut olan mamul parçadan hareketle ve imalat prosesindeki işlem sırasında geriye doğru gidilmek suretiyle, operasyonların tümünün çözümlenmesine yönelik çalışmaların bütünü olarak görmek gerekmektedir.

Geleneksel CAD/CAM/CAE yöntemlerini kullanarak tam ölçekli bir otomobili tamamlamak için üç ay gibi bir süre gerekmekteydi. Bu süreyi üç güne indirgemeye çalışan otomobil firmaları için bu kabul edilebilir bir süre değildir. Hızlandırılmış bir süreç yeni bir çalışma

akışı ile sağlanabiliyor. Bu süreç tasarımcının otomobil gövdesini dörtte bir ölçeğinde kilden çalışması ile başlıyor. Küçük ölçekli bu model bir 3D optik tarama cihazı ile ölçülüyor. Bu tarama cihazı ile birçok parçadan oluşan yoğun 3D nokta bulutu dataları elde ediliyor. Bu nokta bulutu verileri hizaya getirilip birleştiriliyor ve yoğunluğu da uygun seviyeye getirilerek tek bir nokta bulutu elde ediliyor. RE yazılımları yardımıyla, kafes (mesh) yapısında poligon model veya NURBS yüzeyler elde edilebilir. Poligon modeller mühendislik hesaplamaları için analiz (FEA, CFD) yazılımlarına ve hızlı prototip imalatı için otoinşa cihazlarına (STL formatında) veri aktarmak için kullanılıyor. RE yazılımları yardımıyla elde edilen NURBS yüzeyler de CAD/CAM yazılımlarına (IGES formatında) veri aktarmak için kullanılmaktadır.

Elde edilen bu dijital model güncellemeler için yüzey tasarım grubuna ve ilk imal kısıtlamalarını hesaplamaları için üretim grubuna gönderiliyor. Üretime gidecek dijital model tam boyutuna büyütülüyor ve kil veya başka bir malzemeden işleniyor. Yine optik tarama cihazı ile işlenen tam boyuttaki model taranıyor. Buradan elde edilen yoğun nokta bulutu üretilen fiziksel model ile işlenen dijital model arasındaki toleransı doğrulamak için kullanılıyor. Eğer bu değer tolere edilebilir ise tasarımcılar RE yazılımını tam boyuttaki CAD yüzeyini çıkarmak için, geleneksel CAD yazılımını da fonksiyonel tasarımını yapmak için



Şekil 1.1 Otomotiv firmaları tarafından kullanılan tersine mühendislik iş akış şeması [5]

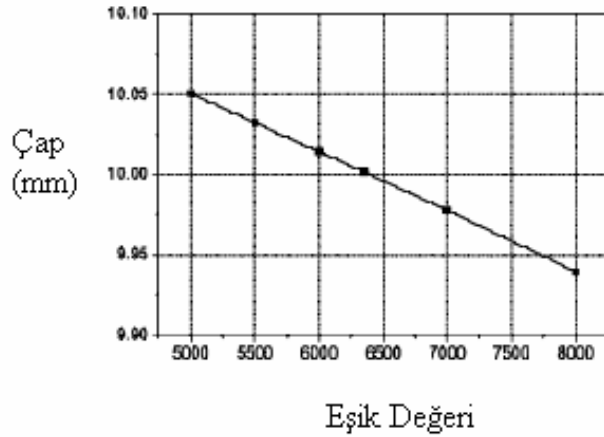
kullanıyorlar. Eğer değer tolere edilebilir değil ise kil model modifiye ediliyor ve tarama, modelleme, kıyaslama aşamaları tekrar ediliyor ve bu aşamalar, tolere edilebilir ve tasarımda

istenen değerler elde edilinceye kadar sürdürülüyor (Şekil 1.1).[5]

Konvansiyonel lme cihazlarıyla tanımlanamayan girift yzeylelere sahip parçaların CAD datasının hızlı ve nispeten hassas bir şekilde oluşturulması için en uygun çözüm bir CT tarayıcısından faydalanmaktır. Buradan yola çıkarak yapılan çalışmamızın bir sonraki bölümünde, daha önce CT yardımıyla nasıl modelleme yapıldığına dair bilgileri ortaya koyan araştırmalar açıklanmıştır. nc bölümde, tersine mühendislik alanında faydalandığımız mevcut sistemlerden bahsedilmiştir. Dört ve beşinci bölümlerde çalışmamızda faydalandığımız dijital görüntü işleme yöntemleri hakkında temel bilgilere yer verilerek, tomografi cihazlarının çalışma esasları özetlenmiştir. Matematik modellemede kullanılan esaslar ise altıncı bölümde hatırlatılmıştır. Sonraki bölümde ise; seçilen birkaç endüstriyel parçanın, tomografik kesit görüntülerinden yola çıkarak, 3D tasarımının MATLAB ve MASTERCAM programları yardımıyla gerçekleştirilmesine ilişkin yaptığımız bir uygulama anlatılmıştır. Yedinci bölümde ayrıca; dijital görüntülerden vektörel geometriye geçiş amacıyla, bu uygulama için yazılan ve Pascal dilinde çalıştırılan bir prototip program denemesi yapılmıştır. Son bölümde, master model ile tarama sonucu alınan verilerin bahsedilen metodlarla işlenmesi sonucu ortaya çıkan verilerin karşılaştırması yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

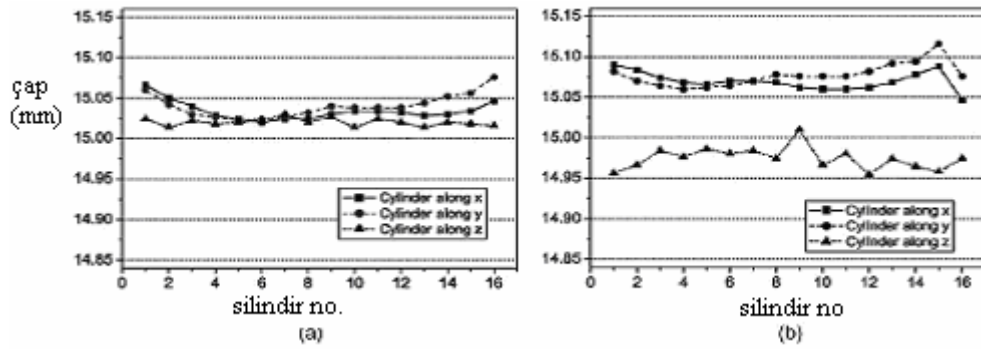
XCT (X-ışınlı bilgisayarlı tomografi), NDT (tahribatsız muayene) alanında en çok kabul gören teknolojilerden biridir. Parçaları kesmeksizin iç yapılarını gözlemleme imkanı sunar. Özellikle malzemelerin döküm boşluklarının tespitinde, kopma analizinde kullanıla gelen XCT cihazları günümüzde, 3D sayısallaştırma amaçlı tarama operasyonları için sıklıkla başvurulmuş bir tersine mühendislik aracı haline gelmiştir. Bugün nesnelerin en yaygın sayısal temsil şekli, iç ve dış yüzeylerini tarif eden üçboyutlu konum koordinatları olan nokta bulutuyla gösterimidir. Şayet noktalar arası bir komşuluk ilişkisi varsa, üçgen gözlü ağ kafesi oluşturulabilir ve ortaya çıkan veriden geometrik ölçüm işlemlerinde faydalanılabilir. Parça üzerindeki elemanların formlarının hassasiyeti ve boyutlarının tamlığı threshold (eşik) değeriyle yakından ilgilidir (Şekil 2.1). Bilindiği gibi bu parametre görüntünün gri-ton seviye değerini binary (ikili) siyah-beyaz formata dönüştürür. Optimum eşik değerini seçerken; görüntünün histogramı, gri seviye eşikleme, kenar bulma, çekirdek büyümesi teknikleri ya da fuzzy set teorisi kullanılabilir.



Şekil 2.1 Segmentasyon için kullanılan farklı eşik değerlerine göre silindirik nokta bulutunun çap ölçümleri (Hofmann vd., 2003)

(Hofmann vd., 2003), iki boyutlu endüstriyel X-ışınlı bilgisayarlı tomografi tarayıcısı kullanılarak elde ettikleri görüntü demetinden, yüksek tamlıkta nokta bulutunun hesaplamasına dair bir metodoloji sunmuştur. Temel düşünce, her tomograma farklı threshold

(eşikler) uyguladıktan sonra nokta bulutunu oluşturmaktır. Pikseller arasında gri değerlerin interpolasyonu sayesinde yoğun ve pürüzsüz bir bulut elde etmişlerdir. Her bir dilim üzerinde eşik yaklaşımı yapmak için, basit bir eşikleme algoritması tatbik edilmiştir ve yüksek hassasiyette nokta bulutunu reconstruct (geriçatmak) için bir interpolasyon algoritması kullanılmıştır. Endüstriyel bir tomografide; kare kesitli alüminyum piramit ve silindirik delikli küplerden imal edilmiş test fantomları kullanarak bir seri deney yapmışlardır. Tarama sonrası elde edilen parçanın 16 bitlik gri tonlu kesit görüntülerinden, bir yazılım yardımıyla nokta bulutunu oluşturmuşlardır. Her bir görüntüye üç farklı eşikleme metodu –slice-adaptive, step adaptive ve global- tatbik etmişlerdir. Dilim-eşikleme yöntemiyle alınan sonuçlarda, nokta bulutundan alınan ölçümün, taranan parçanın gerçek boyutlarına, pikselden daha küçük (pikselaltı) bir sapmayla, çok yakın sonuçlar verdiğini kanıtlamışlardır (Şekil 2.2).

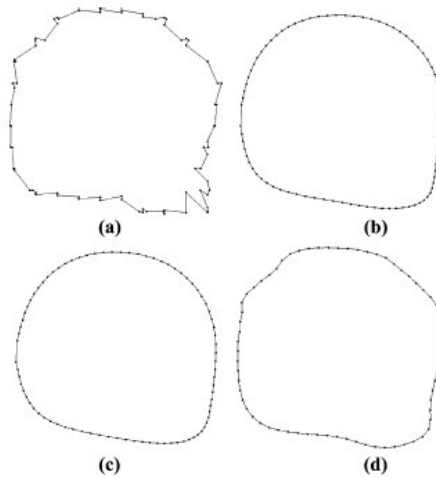


Şekil 2.2 16 farklı pozisyonda yapılan ölçümlerin; (a) dilim-eşikleme ve (b) global eşiklemeye göre hesaplanmış halini karşılaştıran grafik (Hofmann vd., 2003)

CT (bilgisayarlı tomografi) yanı sıra; MR (manyetik rezonans), PET (pozitron emisyon tomografisi-radyonüklid görüntüleme)- ve ultrason sistemi, medikal diyagnostik (tanı) alanında ve cerrahi operasyon planlamasının vazgeçilmez teknikleridir. Medikal/Endüstriyel 3D rekonstrüksiyon (yeniden inşa) metodları iki ana kategoride toplanır. İlki hacim esaslı yaklaşıma örnek olan ve düzlemsel üçgen içeren eş-yüzeyler üreten Marching Kübü; diğeri ise kontur esaslı yaklaşımdır. Bu uygulamada ise, nesnenin sınırı ya manuel ya da bir görüntü işleme algoritması –Marr-Hilderth, Sobel, Prewitt vb. operatörler- kullanarak kenar bulma yöntemi her bir kesit görüntüsü için tarif edilmelidir. Böylece kapalı kontur elde edildiğinde, üçgenler yada parametrik yüzeyler kullanarak yumuşak bir geçiş ile 3D nesne ortaya çıkar. Medikal görüntüler taranan nesnenin malzeme özelliklerini ve geometrik özelliklerini temsil

eden üç boyutlu voksel dizileriyle tarif edilmektedir. Görüntülerden hassas kontur elde edilebilmesi için; kapalı kesitli nesne üretebilmek için morfoloji ve yarı otomatik sınır takibi gibi görüntü işleme operasyonları kullanılmaktadır.

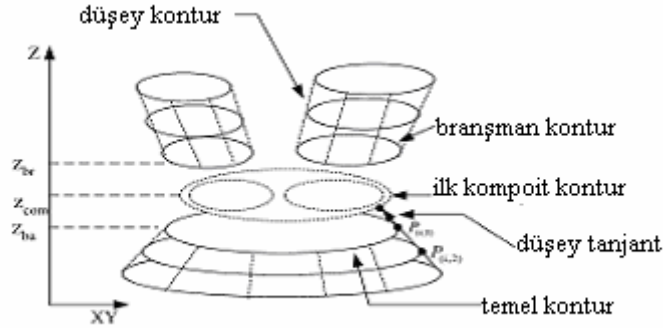
(Ryu vd., 2004) ; medikal görüntüler üzerinden 3D CAD model üretmek için, kontur esaslı algoritmalar üzerinde başarılı denemeler yapmıştır. Kontur algoritmaları yardımıyla oluşturulan 3D model, hassas üretim için gerekli CAM (bilgisayar destekli imalat) datalarını üretmek için kullanılır. Takibettiği prosedürün genel hatları şöyle özetlenebilir: 1. Medikal görüntüden kontur datasının açılımını oluşturma, 2. Bu eğrilerin yumuşatılması ve 3. Branşmanlı (dallanmış) yüzey modelinin inşa edilmesi. Yüksek kalitede yüzey modelleme işleminde , çift taraflı yumuşatma olarak adlandırılan yeni bir yumuşatma metodu öngörmüştür. Bu metodun arkasındaki temel düşünce (u, v) parametrik yönler boyunca konturları iyileştirmektir. Gaussian ve ortalama yumuşatma gibi konvansiyonel metodlarla mukayese edildiğinde, bu metodun ilk kısmını içeren yeniden kontur oluşturma, aşırı iterasyon işleminden sonra kontur şeklinin distorsiyonunu önlemiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Yeniden kontur oluşturma ile konvansiyonel metodların karşılaştırılması:(a) CT'den alınan ilk kontur, (b) Gaussian yumuşatması, (c) Ortalama yumuşatma, (d) Tekrar kontur oluşturma metodu (Ryu vd., 2004)

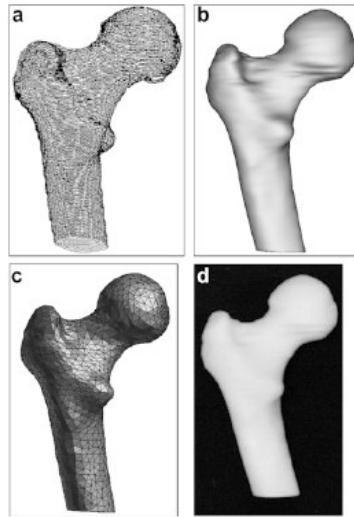
Sonraki aşamada; çok kesitli nesnelere yüzey giydirme işleminden önce, tanjant vektör yardımıyla kompozit konturu oluşturmuştur (Şekil 2.4). Yaptıkları uygulamada ise; femur kemiğinin 150 katmanlı 512x512 boyutlu matris 16 bit gri seviyeli görüntülerinden yola

çıkarak, geliştirdikleri “Medisurf” yazılım paketi yardımıyla; yeniden kontur oluşturma boyunca, yatay ve düşey bağlantı tahmini ve yumuşatma metodları uygulanmış ve otomatik bir şekilde 3D anatomik CAD modeli üretilebilmiştir.



Şekil 2.4 Teğet (tanjant) vektörü yardımıyla kestirimi yapılan ilk kompozit kontur (Ryu vd., 2004)

Biomedikal operasyonlarda, yukarıda bahsedilen yöntemle elde edilen yüzey modelinden faydalanarak FEA (sonlu elemanlar analizi) ve RP (hızlı prototipleme) uygulamalarına temel oluşturulmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Yüzey modellemesi uygulamaları:(a) CT görüntülerinden alınan konturlar, (b) Final yüzey modeli, (c) Sonlu elemanlar ile üretilmiş model, (d) Hızlı prototiplenmiş parça (Ryu vd., 2004)

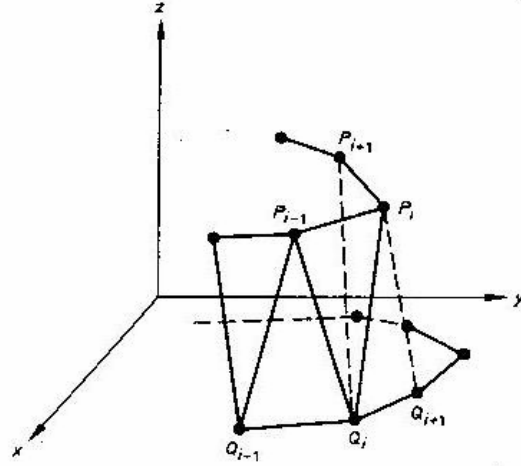
Parametrik yüzeyler ve kuadratik yüzeylerin yanı sıra diğer bir yaygın 3D yüzey modelleme tekniği de poligon mesh (kafes) ile gerçekleştirilmektedir. Poligon sal yüzeyler, komşu pek

çok planar (düzlemsel) yüzeyin birbirine bağlanmasıyla oluşturulur. Bir poligon nesnesi; kenarlar, köşeler ve her köşesi tam olarak iki kenar tarafından paylaşılan kapalı poligonlardan oluşur. Poligonsal tanımlama yöntemleri yaklaşık bir netice vermesine rağmen, kolay ve esnek çözümler sunması bakımından, eğrisel şekillerin temsilinde de kullanılabilir. Oluşan hataları en aza indirerek daha hassas neticeler elde etmek için daha küçük ama fazla poligon oluşturmak ise şekli oluşturmakta kullanılan algoritmaların hesaplanma zamanını uzatır. 3D konumları genellikle kesitlerin konturları boyunca elde edilir (tıpkı haritalarda olduğu gibi; farklı yüksekliklerdeki kesitlerden geçen konturların sınırlarından faydalanılarak yeryüzünün rölyefi elde edilebilmektedir). Düzensiz şekilli makine parçalarının tasarımında ve özellikle X-ışınli bilgisayarlı tomografi (CT) tarayıcılarında inşa edilen görüntüler de seri kesitlerden faydalanılmıştır. Ancak aksiyal olarak alınan çok tabakalı kesitlerin aralarındaki mesafenin fazla olması ve şeklin karmaşıklık derecesi doğrudan örülecek yüzeyin kalitesini düşürmektedir.

(Shirai, 1987), bu problemi aşmak için üçgensel yüzeylerden faydalanmıştır. Bağlantı yapılacak iki komşu kesitin kontur ya da poligondan oluştuğu kabul edilmiştir. Bu poligonsal yüzeyler arasında ideal üçgen setini kurabilmek için iki problemin çözülmesi gerekmektedir. Öncelikle, birbirine benzer kesitlerde yer alan karşılıklı köşe konumları sentroide göre en uzakta oluşturulan vektöre göre P_i ve Q_i noktaları bulunur, ki bu köşelere ilaveten seçilecek P_{i+1} yada Q_{i+1} noktası ile de ilk üçgen artık tanımlanabilir. Bunu takideden bir sonraki köşe çifti (P_{i+1}, Q_i) olacaktır. Yatayda, kısa mesafede olan köşe çiftleri arasında doğal bir bağlantı oluşurken, düşeyde durum biraz farklı olduğu görülmüştür. Köşe noktalarının x koordinatlarının birbirine göre ileride ya da geride olması halinde seçimi kolaylaştırmak için aşağıdaki algorithmadan faydalanılmıştır (Şekil 2.6):

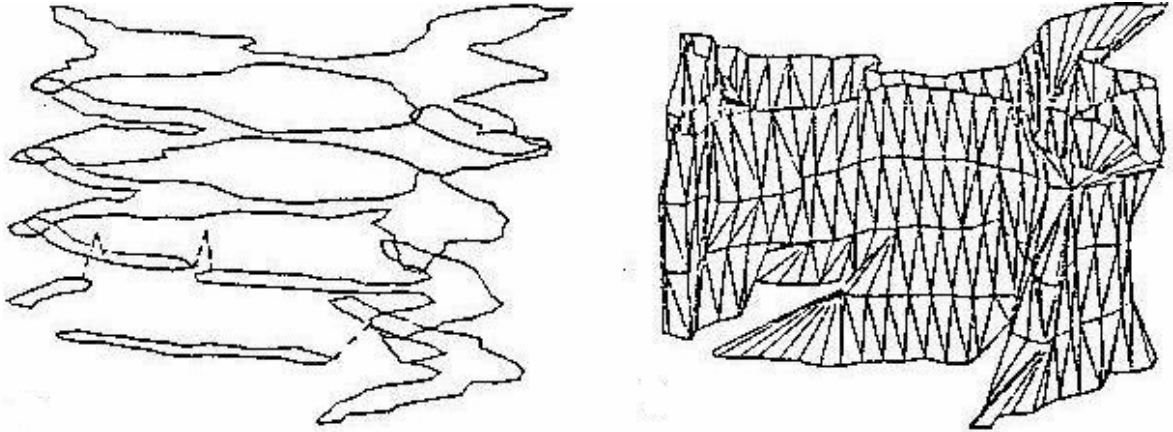
$P_{i+1}Q_i < P_iQ_{i+1}$ olması halinde; P_iP_{i+1} ve $Q_{i-1}Q_i$ yönleri arasında oluşan açı α_i ve $P_{i-1}P_i$ ve Q_iQ_{i+1} için β açısı tarif edilmiştir.

eğer, $\cos \alpha_i > t$ ise, P_{i+1} seçilir,
aksi takdirde eğer, $\cos \beta_i > t$ ise, Q_{i+1} seçilir,
“ P_{i+1} seçilir,
(yukarıdaki ifadelerde t threshold (eşik) değeridir)

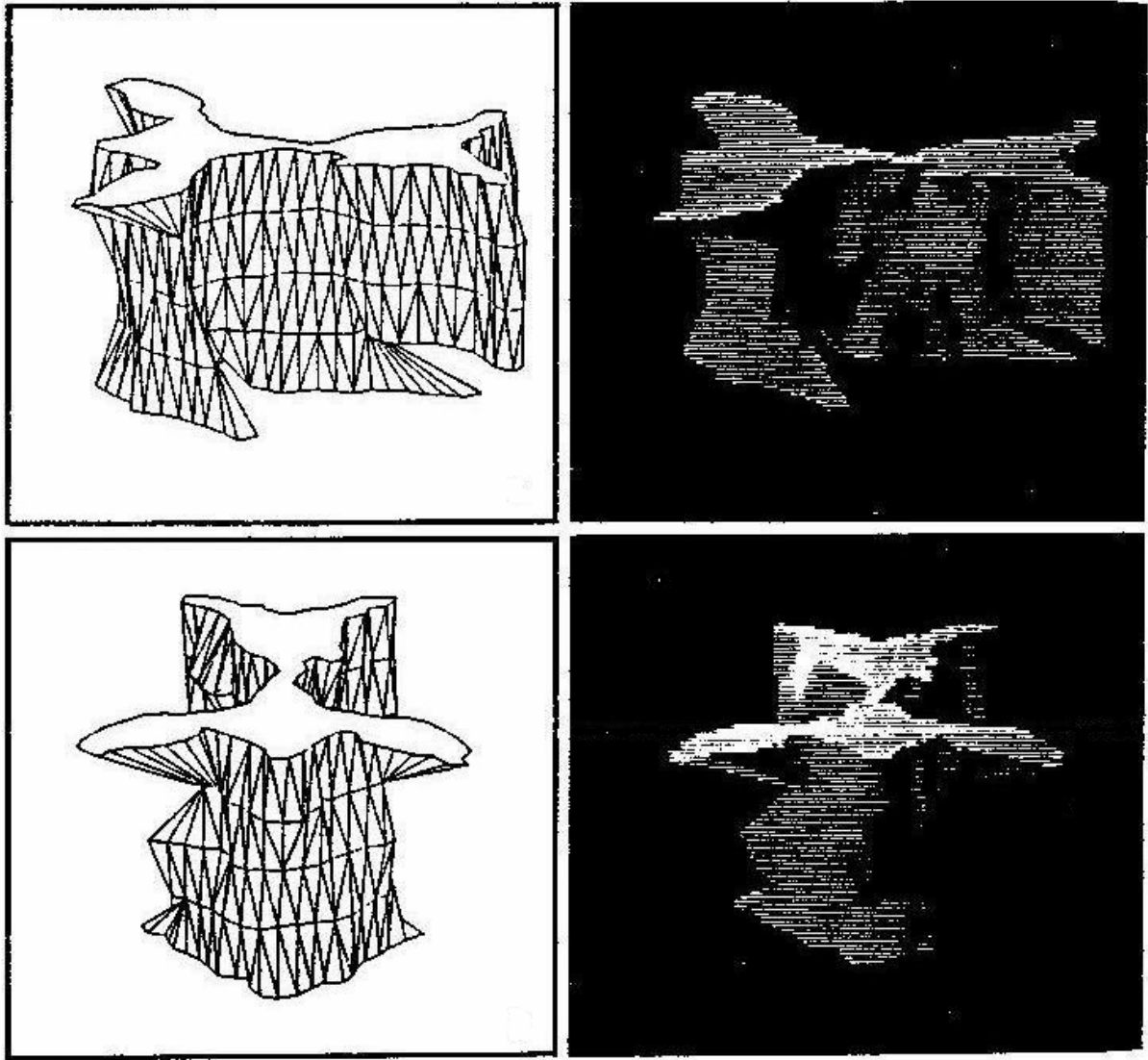


Şekil 2.6 Poligonalsal düzlemsel kesitlerde bir sonraki köşenin seçimi (Shirai, 1987)

Deneylerde kullanılan tomogramlardan çıkarılan vertebra kesitleri arasında oluşturulmuş yamalar belli bir yönde yapılan aydınlatmaya göre, her bir üçgen yamanın parlaklığı hesaplanarak tüm görüntü yumuşatılmıştır (Şekil 2.7a ve b).



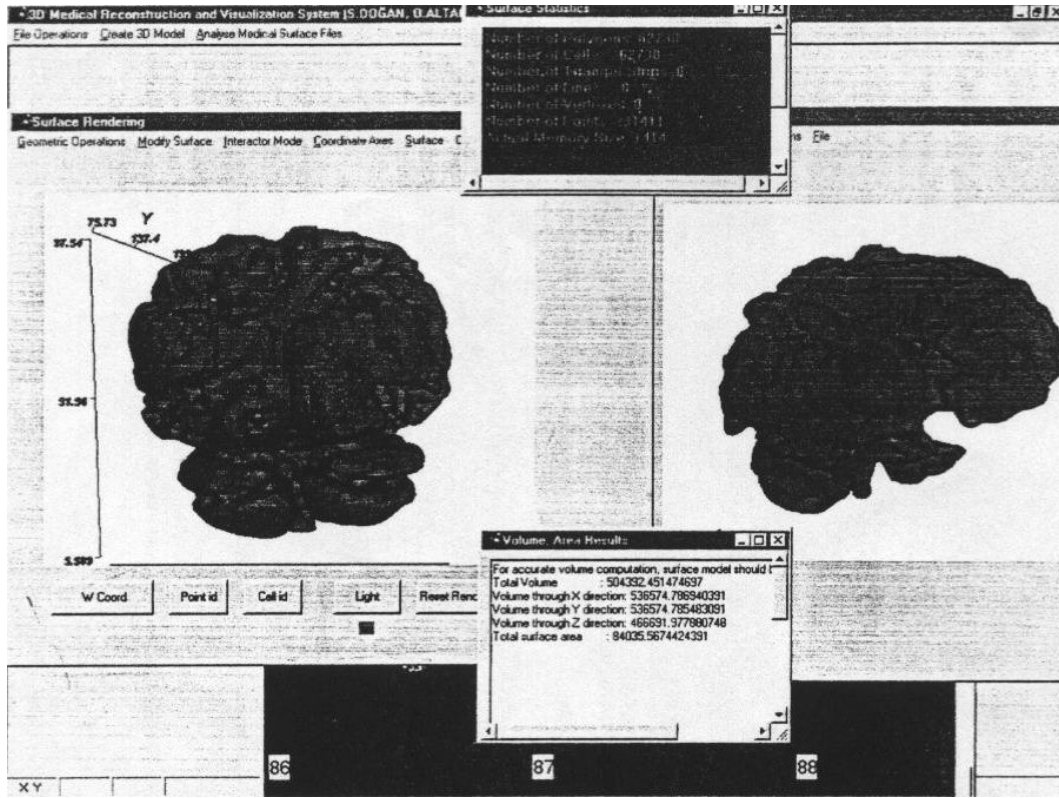
Şekil 2.7a Vertebra tomogramlarından elde edilen beş seri kesit ve bunların arasında oluşturulmuş üçgen yamalar (Shirai, 1987)



Şekil 2.7b Planar konturlar arasında örülmüş yüzeyler ve gölgelendirilmiş hali (Shirai, 1987)

Tıp dünyasında birçok hastalığın tanısında ve cerrahi operasyonlarda dokuların görüntülerinden yararlanılmaktadır. Görüntüleme için CT, MR, NMR ve Ultrason gibi görüntüleme teknikleri kullanılır. Özellikle cerrahi operasyonlar esnasında hastalıklı dokuların yerlerinin tam olarak belirlenmesi, bir başka deyişle, vücudun 3-boyutlu modellerinin oluşturulması gerekmektedir. Diğer taraftan, diş hekimliğinde, protezlerin tasarımı, implantın doğru bir şekilde yerleştirilmesi ve dolgu hacimlerinin belirlenmesi gibi konularda hastanın çene dokusunun 3-boyutlu hacim ve yüzey modellerinin oluşturulmasına gerek duyulmaktadır. Plastik cerrahide, böbrek taşlarının teşhisinde ve her türlü tıbbi uygulamada da yüzey ve hacim analizi yapmanın faydaları bulunmaktadır. (Doğan, 2003) CT ve MR kesitlerini kullanarak, vücudun iç ve dış dokuların 3-boyutlu modellerinin oluşturulması ve

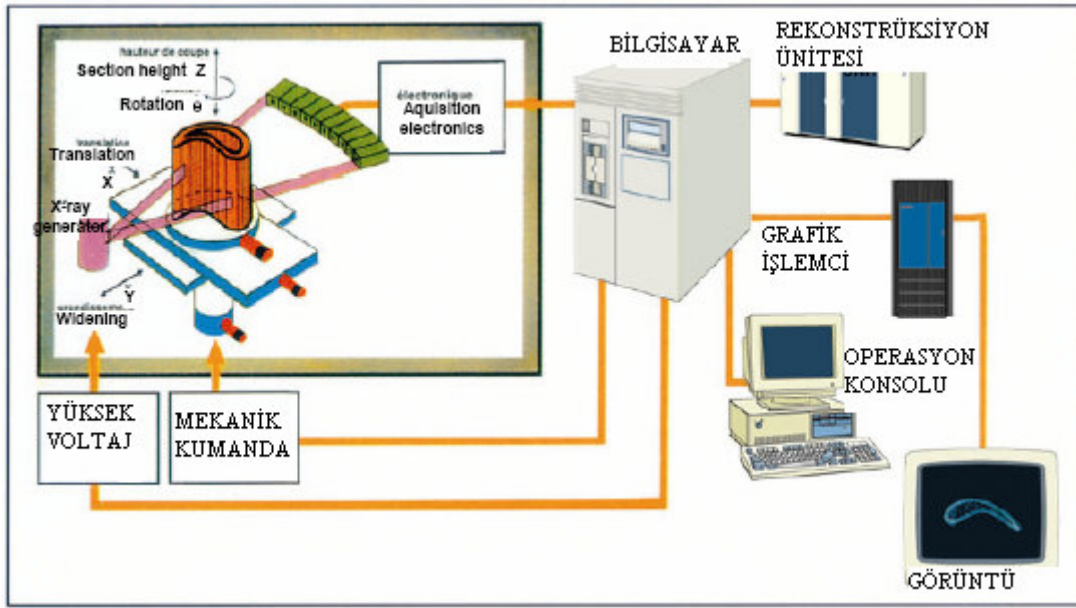
buradan yol çıkarak anormal oluşumların gerçek konumlarını ve büyüklüğünü yüksek doğrulukta belirleyebilmek amacıyla faydalı çalışmalar yapmıştır. 3-boyutlu medikal görüntüleme teknikleri için hacim kaplaması veya yüzey kaplaması tekniklerini kullanan 3D-Doctor, VolView, PolyViz gibi yazılımların eksik yönlerini tamamlayan, MİPAS isimli bir medikal görüntüleme ve fotogrametri yazılımı geliştirmiştir. Adı geçen sistemde 2-boyutlu dijital görüntüler olan CT ve MR kesitlerinin bölümlenmesi ve sınıflandırılmasını sağlayan fonksiyonlar kullanılmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 3D medikal doku görüntüleme ve analiz yazılımı MİPAS'tan bir pencere (Doğan, 2003)

Kesit görüntüsü manasına gelen tomografi, malzemeyi tahrip etmeden düzlemsel kesitler almak suretiyle inceleme imkanı veren cihazlardır. X-ışın jeneratörü, kesiti alınacak objeye yönlendirilerek yoğun ışın demeti yayar. Objenin içinden geçen X-ışın demeti aynı eksene yerleştirilmiş çoklu detektöre ulaşır ve geçiş yapan foton sayısı ile orantılı bir akım üretilir. Buradan alınan sinyaller kontrol ünitesinde kodlandıktan sonra, bilgisayarda hassas rekonstrüksiyon algoritmaları ile matris halinde yeniden görüntü oluşturulur (Şekil 2.9).

Bilgisayarlı Tomografi (CT) önceleri, malzemelerin içyapı bozukluklarını analiz eden bir araç idi. Deney parçasının 2D kesitlerinden, hava boşlukları ve zayıf olduğu bölgeleri ortaya çıkarılabilir. Bilinen diğer teknolojilerle yapılamayan iç yüzey ölçümlerinde çok hızlı sonuç veren bir yöntem olduğundan CT, 2D analizde güçlü bir takım haline gelmiştir. Yakın zamanda geliştirilen yazılımlar ve bilgisayar yardımıyla, çok büyük dosyaların işlenmesi mümkün olduğundan, CT artık bir 3D endüstriyel sayısallaştırma aleti haline gelmiştir.



Şekil 2.9 Endüstriyel bir tomografide kesit görüntüsünün elde edilme safhaları (Dastarac, 1999)

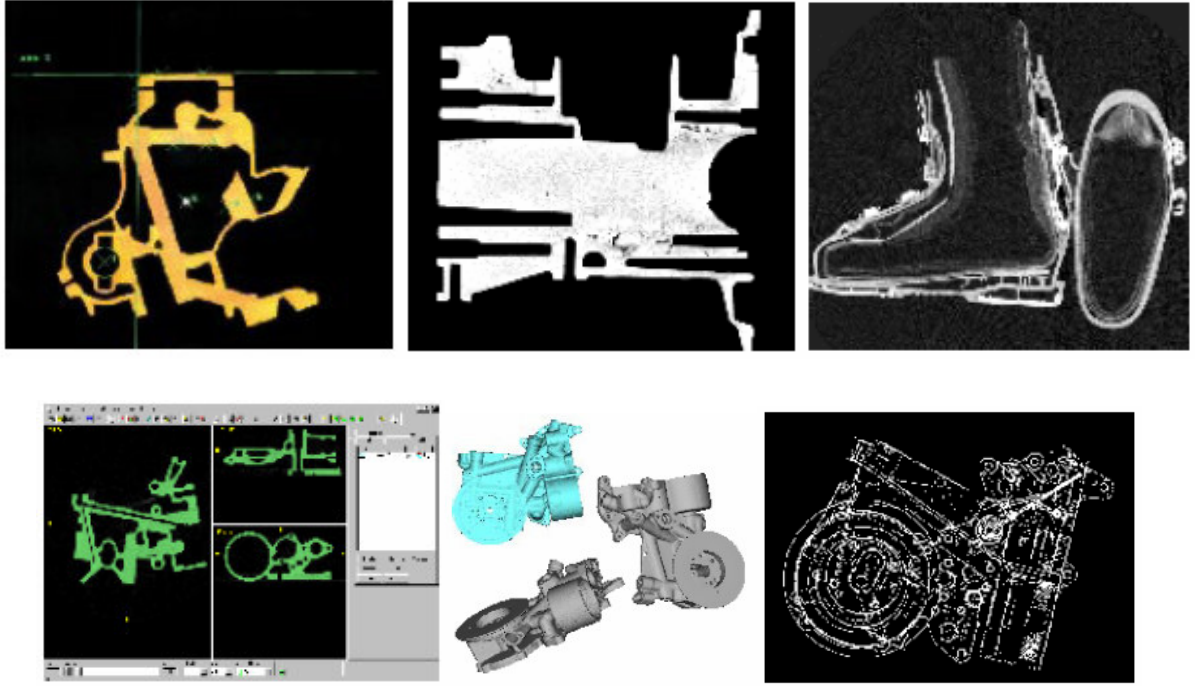
(Dastarac, 1999) Almanya Berlin’de düzenlenen bir radyoloji seminerinde, Fransa’daki TOMO ADOUR firmasında endüstriyel tomografi cihazıyla özellikle uçak ve uzay sanayine yönelik yaptıkları uygulamaları aktarmıştır. Firmada bulunan tomografik tarama cihazlarından biri endüstriyel ölçümlerde kullanılmak üzere 450 kV kapasiteli, diğeri 200 kV x-ışın tüpüne sahip mikro-fokus yapabilen bir cihazdır (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 Endüstriyel malzemelerin taranmasında kullanılan bir CT cihazının teknik özellikleri ile metal malzemeler için izin verilen kümülatif kalınlık tablosu (Dastarac, 1999)

Mod	Maksimum yüksek voltaj	Odaklanma spot çapı	Maksimum parça yüksekliği	Maksimum parça ağırlığı	Maksimum parça çapı	Tipik boyutsal ölçüm hassasiyeti
1: Standard çözünürlük	450 kV	1*1 mm ²	1 m	50 kg	500 mm	± 50 µ
2: Yüksek çözünürlük	200 kV	10-20 µ	220 mm	2.3 kg	80 mm	± 40 µ

YÜKSEK VOLTAJ	450 kV (mod 1)	200 kV (mod2)
MAZLEME		
Alüminyum	340 mm	80 mm
Çelik	100 mm	40 mm
Kompozitler	500 mm	80 mm

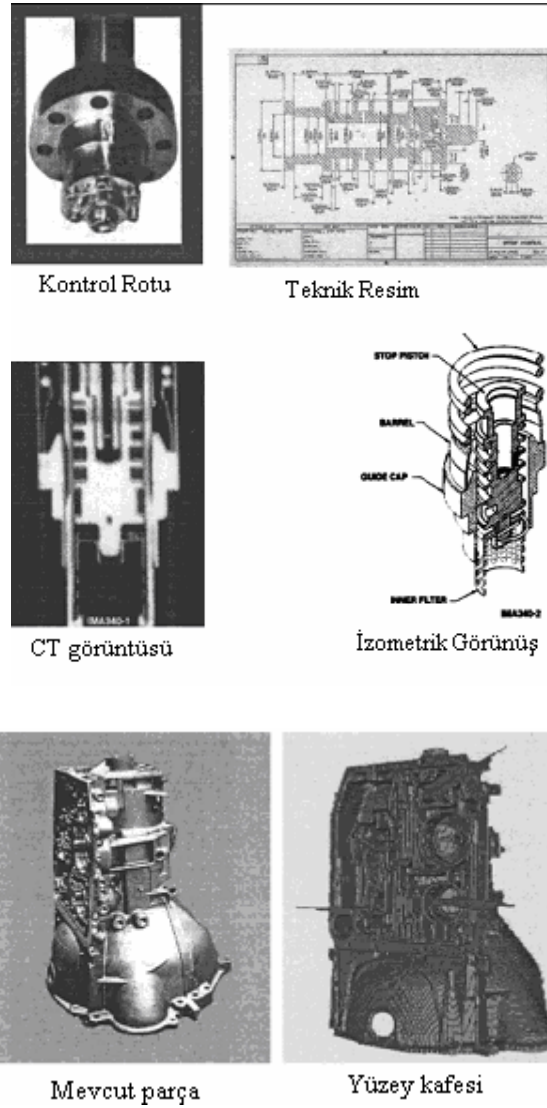
Şekil 2.10’da tipik 2D kesit cidarı ölçme, döküm boşluk hataları ve farklı yoğunluktaki metal ya da plastik malzemelerin NDT tahribatsız muayenesi esnasında alınmış görüntüler bazı örnekler yer almaktadır. Tersine mühendislik maksatlı 3D model oluşturma’nın önemli aşamaları olan; alınan 2D verilerin eşiklenmesi, bölümlenmesi, hassas kontur yaklaşımları ve parametrelerin üretilmesi işlemlerini “Mimics” ve “Magics” yazılımıyla gerçekleştirmişlerdir. Aynı şekilde uçak iniş takımlarının taranması neticesi elde edilen tomografik görüntülerinden, 2D ve 3D geometrik modellerinden STL uzantılı CAD data’ya nasıl ulaşıldığının evrelerinden bahsedilmektedir. Ayrıca bu verilerden faydalanarak, simülasyon çalışmalarına ve hızlı prototip üretimine nasıl temel oluşturulduğunu gösteren başarılı deneyler yapmışlardır. Böylece konvesiyonel boyut ölçme sensörleriyle yapılamayacak karışıklıktaki ölçümlerin çok kısa zamanda ve doğru bir şekilde yapılabildiğini göstermişlerdir.



Şekil 2.10 CT ile metal ve plastik malzemeler üzerinde yapılan tahribatsız muayenelerde kullanılan kesit görüntüleri ve hassas parçaların taranma sonucunda oluşturulan geometrik modeli (Dastarac, 1999)

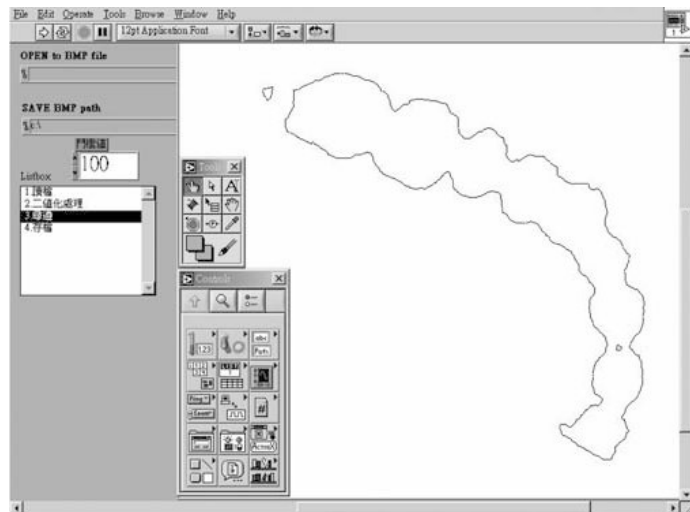
Anlık imalatla sayısal bir model üretebilmek için dört mevcut teknoloji ortaya konulmaktadır. Koordinat-ölçme Makinaları (CMM); lazer tarayıcılar; fiziksel kesit çıkarma frezeleri ve Bilgisayarlı Tomografi (CT) tarayıcılar. CMM'lerin propları karmaşık parçaların her yanına dokunamayabilir; lazerler de yüzey finişlerinden olumsuz etkilenir. Ayrıca her iki yöntem için de; parçayı doğrultmak için yapılan ön hazırlık süresi ve parça ölçüm programlaması oldukça uzundur. Numuneyi frezeleme işleme ise, ölçülecek kesitin deforme olmasına sebep olur ve operasyon zamanı uzundur. Halbuki CT sistemleri bütün bu handikapların aksine; malzemenin iç ve dış geometrisini tamamen elde edebilme imkanı ve X-ışını lineer zayıflama katsayısı haritasından yola çıkarak parça yoğunluğunu çıkarabilme özelliği sayesinde Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile imalat analizleri yapmaya da olanak tanımaktadır. Bir CT görüntüsünün CAD datası olarak temsil edilebilmesi için görüntü bölümlleme, görüntü sınıflandırma, görüntü topolojisi ve 2D kontur yada 3D yüzey oluşturma gibi görüntü işleme teknikleri kullanılmaktadır. X-Işınılı Bilgisayarlı Tomografi , endüstriyel parçaların şekil ve boyut bilgilerini elde etmek için, endüstriyel görüntülemelerde önemli ve güçlü bir araçtır.

Üstelik imalat sanayisinde tutulan CT destekli mühendislik ve tasarım, yeni ve gelişmekte olan teknolojiler için parçaların dijital modellerini elde edebilme imkanı da sunar. Endüstriyel CT sahasında karşımıza çıkan bir çok nesne, ya tek homojen malzeme yada birden fazla homojen malzemeden oluştuğundan dolayı, discrete-ayrık CT algoritması prensipte, konvansiyonel algoritmalar ile elde edilen CT görüntülerine nazaran çözünürlük ve boyutsal tamlıkta çok daha iyi görüntüler üretir. Bu sonucunda; CT destekli imalatla geniş bir parça grubunun dijital modelleri için CT görüntülerinden elde edilen sınırların doğruluğunda kayda değer gelişmeler olduğunu (Browne vd., 1998) Amerika'daki ARACOR firmasında yaptıkları denemelerle göstermişlerdir (Şekil 2.11).



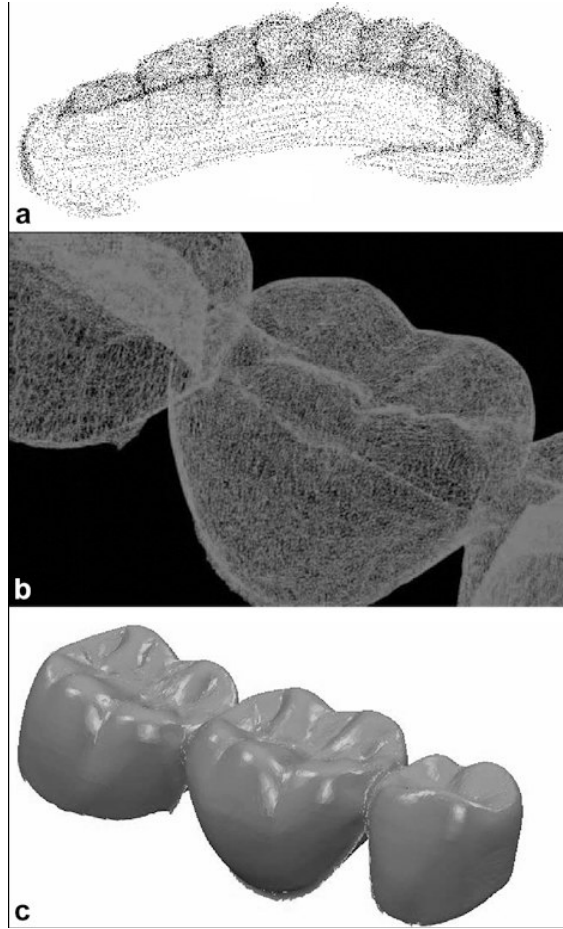
Şekil 2.11 Dökümantasyonu olmayan parçaların CT yardımıyla yeniden imal edilmesi (Browne vd., 1998)

Yüzey data örneklemesi yardımıyla cisimlerin şekillerini algılama ve 3D CAD modelini üretme işlemine Tersine Mühendislik (RE) adı verilir; çünkü bu normal tasarım ve imalat safhalarının ters yönünde gelişen bir prosestir. RE genel olarak imalat, medikal uygulamalarda, otomotiv ve uzay sanayinde ve hatta heykel tasarımıyla üretimi sahalarında geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Sayısallaştırma işlemi koordinat ölçme tezgahı (CMM) tarafından toplanan uygun ölçümler yardımıyla yapılabilir. CMM'de data toplama yöntemleri temaslı ya da temassız metotlar şeklinde, ikiye ayrılabilir. Dokunmalı probalar temaslı ölçümlere uygulanırken, diyetli lazerler ya da CCD kameralar genellikle temassız ölçme sahasında uygulanır. Prop temaslı CMM'ler ile nokta bulutu toplamak zaman aldığı gibi, karmaşık yüzeylerde ölçüm kalitesi düşerken, optik temassız teknikler ile çalışmak hem uç kompanzasyonu gerektirmediği ve hem de bir anda yüzbinlerce noktayı toplayabilme imkanı verdiği için hızlı ve pratiktir. Lazerli tarayıcılar 5-10 mikron çözünürlükte, saniyede 2500-3500 nokta okuyabilir ancak ortamdaki ışıktan kolayca etkilenir. Kameralı sistemlerin çözünürlüğü daha kaba (10-100 mikron) olmakla birlikte, milyonlarca noktayı, okuyucunun yerini değiştirmeden aynı anda işleyebilme imkanı vermektedir. Buna rağmen, üzerinde ters açılı yüzeylere sahip yada iç yapı geometrisi merak edilen karmaşık parçalardan veri toplamada bazı sınırlamalar vardır. Bunu aşmak için, (Chang ve Chiang, 2003) abrasif bilgisayarlı tomografi (ACT) isimli yeni bir cihaz geliştirilmiştir. Cihazda, abrasif-aşındırma yöntemi kullanarak parçadan tabaka tabaka malzeme kaldırırken bir CCD kamera yardımıyla kesit görüntüsü alınmaktadır. LabView ve CopyCAD programları kullanılarak, bu tabakaların sınır konturları nümerik metodlarla çıkarmak suretiyle, nesnenin CAD modelini oluşturmuşlardır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Bir diş modelinin enine kesit sınırları (Chang ve Chiang, 2003)

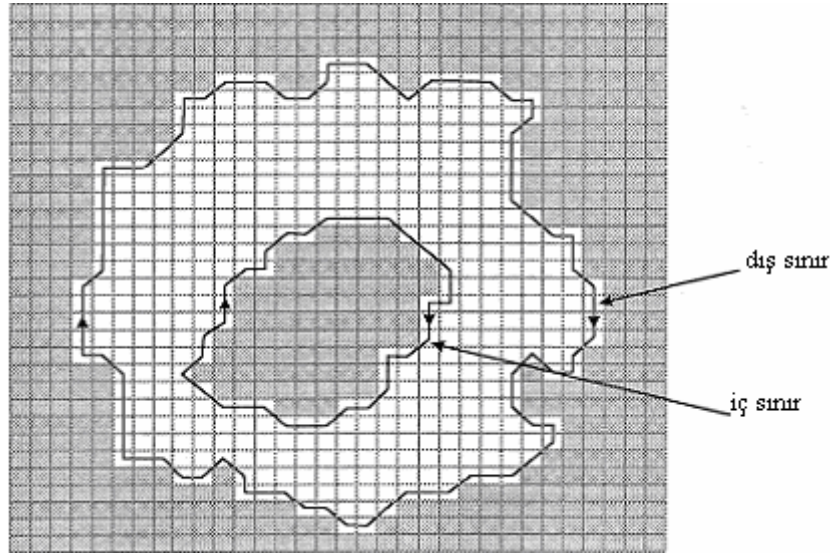
ACT fiziksel modele tatbik edilerek bitmap formatında (siyah-beyaz) görüntüler alınmış ve her bir tabakaya gri gradyan eşiklemesi uygulanarak “binari segmentasyon” ile görüntü işleme prosedürü kullanılarak nesne kesit görüntüsünden sınır konturları çıkarılmıştır. Ortaya çıkan nokta bulutundan STL (Stereolitogtafi) formatında 3D CAD modeli oluşturulmuştur (Şekil 2.13). CTM ve MRI sistemlerinin pahalı oluşu ve medikal merkezler haricinde bulunmayışı sebebiyle, bu metodun diş protezlerinin tasarımında faydalı olacağı savunulmaktadır.



Şekil 2.13 (a) Diş modelinin nokta bulutu hali , (b) STL formatına dönüştürülmüş şekli, (c) gölgelendirilmiş 3D CAD modeli (Chang ve Chiang, 2003)

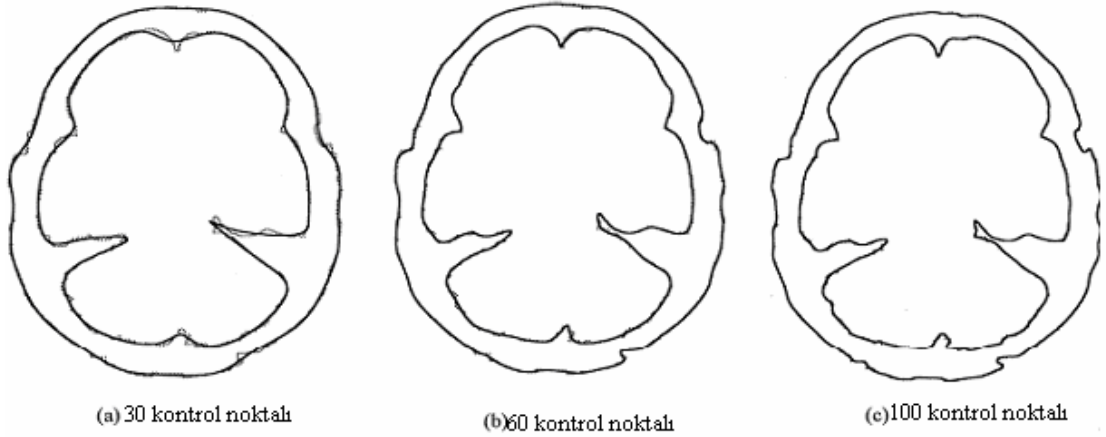
Önceleri CT ve MRI cihazlarından alınan görüntüler 2D kesit görüntüleri idi, fakat bu durumda operatörler, taranan bölgeye dair resimler üzerinden yorum yapmak için aynı anda birden fazla görüntüye bakmak zorunda kalıyor ve 3D şekli aklından oluşturmaya çalışırdı. Gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde, üç boyutlu (3D) şeklin, iki boyutlu (2D) görüntüden

yeniden oluşturulması –geriçatım- medikal mühendisliğin gittikçe daha fazla dikkatini çekmektedir. Günümüzde böyle cihazlarda artık 3D formlar halinde görüntü elde etmek mümkündür. Genellikle çoğu sistem, poligon esaslı yüzeyler halinde sonucu verdiği için, verilerin çok büyük olması grafik gösterim ve CPU işlem hızını düşürmekte ve böylece şekle ait faydalı bilgilerin kaybolmasına sebep olduğundan, CAD esaslı geriçatım metodları üzerine incelemeler yoğunlaşmıştır. (Lai vd., 1999) yaptıkları çalışmada; CT görüntülerinin 3D yüzey geriçatımı için, tersine mühendislik tekniği tabanlı bir aloritmadan faydalanmıştır. Objenin her bir CT kesitinin 2D konturunu tespit etmek için önce ön işleme, segmentasyon ve sınır arama gibi bir dizi görüntü analizi tekniği uygulanmıştır (Şekil 2.14). Daha sonra bu konturları 3D yüzey modeline dönüştürmek için; ilk etapta, kontur verileri başlangıç noktaları birbirine çok yakın olacak şekilde ayarlanmış, ikinci aşamada ise her bir kontur datasını parametrik bir eğriye uydurma algoritması öngörülmüştür.



Şekil 2.14 Sekiz hareket yönünü esas alan iç ve dış sınırının takibi yöntemi (Lai vd., 1999)

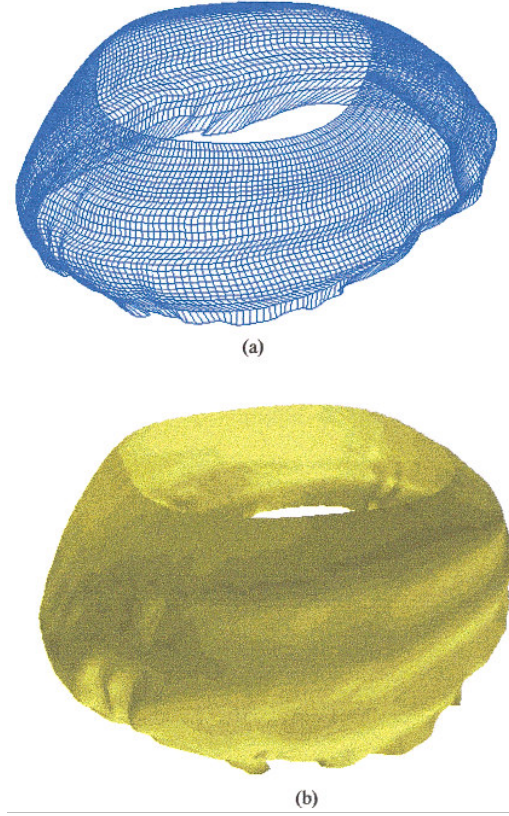
Sonuçta, yumuşak kesitli yüzey algoritmasının, tüm parametrik eğrilerin “loftlu yüzey”lere uydurulduğu kabul edilmiştir. Eğri uydurma algoritmasını, her bir kesitteki kontur nokta bulutuna, bir rasyonel olmayan B-spline eğrisine uyacak şekilde uygulamıştır. Loft yüzey oluşturma işlemi her bir kesitteki eğrilerin, rasyonel olmayan B-spline formuna girmesine müsaade eder.



Şekil 2.15 Farklı kontrol noktası sayılarına göre eğri uydurma sonuçlarındaki değişim (Lai vd., 1999)

Bir beyin tomografisinden 5 mm aralıklarla alınan kesit resimleri üzerinde yaptığı çalışmada, orijinal görüntüdeki çözünürlüğün kesit verilerinin hassasiyetini etkilediğini göstermiş ve ayrıca 30, 60 ve 100 kontrol noktasına sahip sınır verilerine “best-fit” (lineer olmayan en küçük kareler metoduyla optimizasyon) eğri uydurma yöntemini uygulayarak oluşan farklılıkları karşılaştırmıştır. Şekil 2.15’ten görüleceği üzere; kontrol noktalarının sayısı arttıkça, hatalar minimuma inmekte; aslında, kontrol noktalarının sayısı sınır verilerine eşit olursa, eğri tamamen sınır verisinden geçecektir. Bununla beraber, kontrol noktalarının sayısındaki artış, eğrinin daha az pürüzsüz olması sonucunu doğuracaktır. Bir kafatasının tomografisinden alınan 19 kesitine tatbik edilen bu yöntemde 120×15 adet kontrol noktası kullanılarak oluşturulan yüzey ağ halinde Şekil 2.16’da gösterilmiştir.

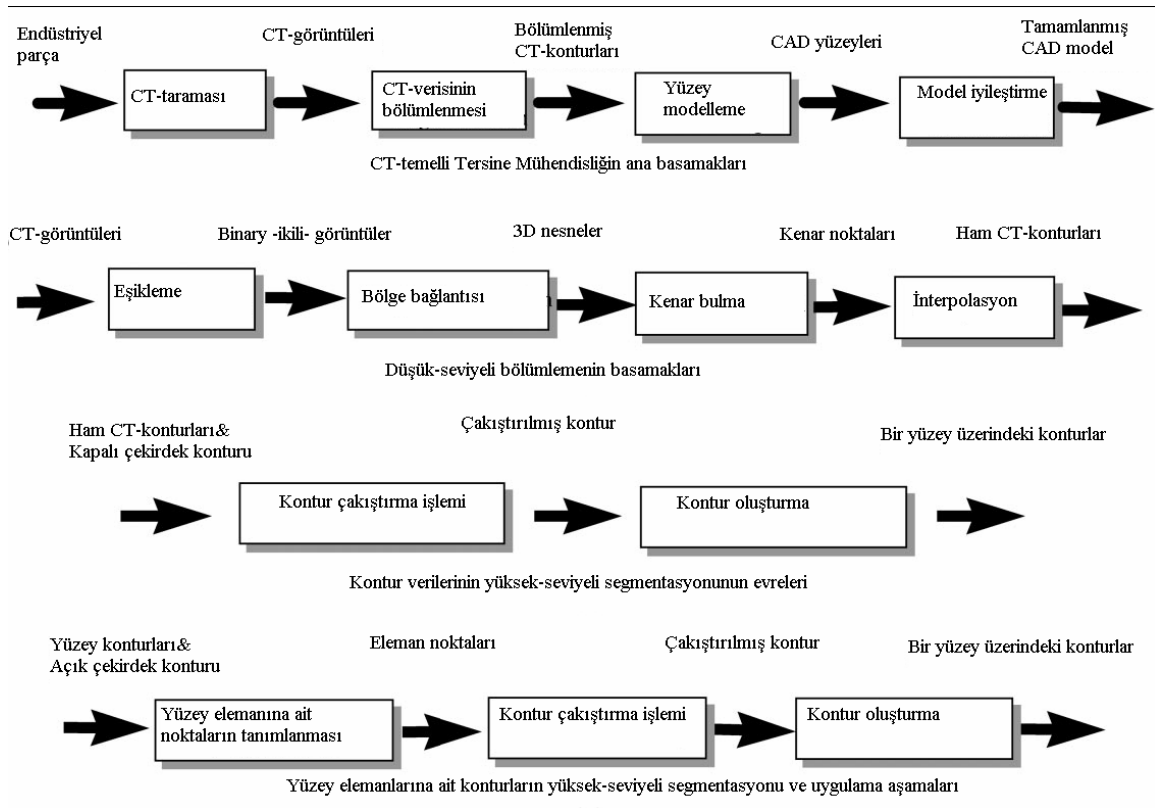
Tersine mühendislik; bütünü ya da bir kısmının sayısal biçimi mevcut olmayan fiziksel bir nesnenin CAD modelinin üretilmesini ifade eder. Bundan; elimizdeki parçanın birebir kopyalanarak çoğaltılması, fiziksel model üzerinde tasarım açısından değişikliklere gidilmesi ve hasar görmüş bir parçanın onarılmasına yardımcı olmak maksadıyla yararlanılabilir.



Şekil 2.16 Parçanın dışına örülmüş “loft” yüzeyin; (a) kafes halinde ve (b) gölgelendirilmiş halde gösterimi (Lai vd., 1999)

Günümüz teknolojisinde bilgisayar ekranında bir CAD sistemi kullanılarak tam bir dijital model ortaya çıkarılabilir ancak serbest formlu şekillerde bir sınırlama olduğundan; tasarımcılar genelde kilden bir model inşa etmeyi tercih ederler. Tersine mühendislik teknikleri özellikle, otomotiv endüstrisi, gemi inşası, havacılık sanayi, oyuncak imalatı ve pek çok alanda, fiziksel bir modelin geometrik bilgisini bir CAD programına transfer etmek için tatbik edilmektedir. Bu amaçla birçok boyutsal ölçüm metodundan faydalanılır: En popüler olanı mekanik temaslı ölçme cihazları yani koordinat-ölçme tezgahlarıdır. Tetiklemeli prop ile temaslı CMM’ler 10µm civarında bir hata ile çalışmakla birlikte veri toplama hızı düşüktür. Üstelik prop yarıçapının ölçülen noktaya göre telafi edilmesi gerekirken buna karşın yumuşak yada kırılğan parçalarda sadece temassız optik problu sistemler kullanılabilir. Parlayan nesneleri ölçmekte kullanılamayan optik ölçme sistemlerinin boyutsal hata payı milimetrenin onda biri ila yüzde biri arasında değişir. Fakat bu iki teknik ters açılı yüzeylerde ve iç kısımların ölçülmesine uygun değildir. Parçanın doğrultulması için pek çok ayar kullanılır ve bu da zaman kaybına sebep olur. Hem iç hem de dış tarafta gizli kalan yapıya ulaşmak için CT tarayıcılarından faydalanılır. Önceleri medikal diyagnostik, protez tasarımı ve endüstriyel muayene sahalarında kullanılan bilgisayarlı tomografiden artık, tersine mühendislik yapmak

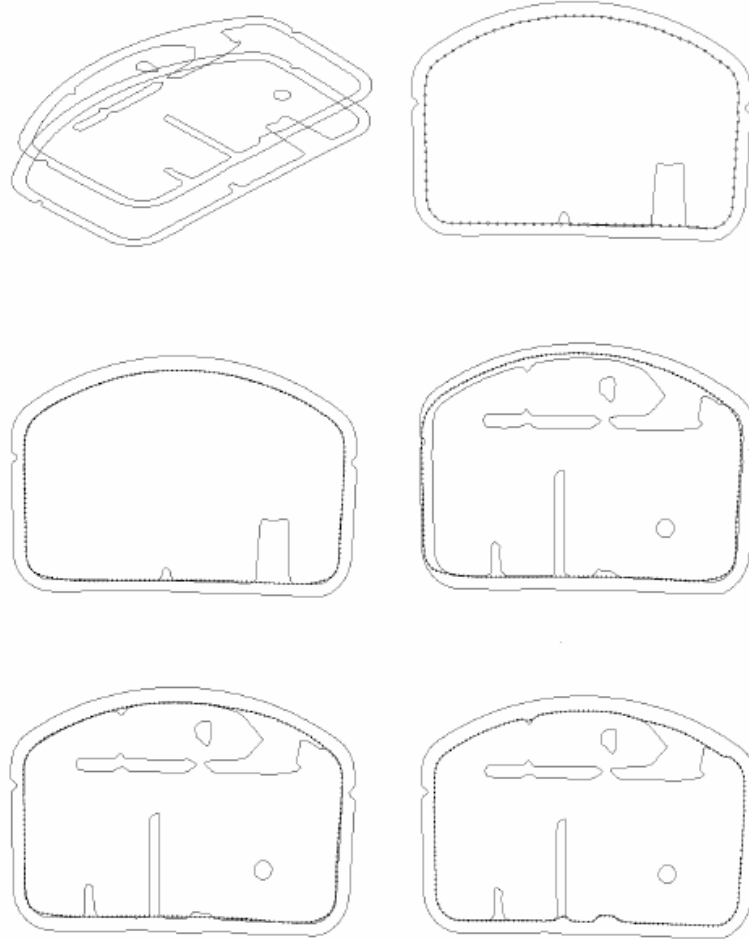
için bir 3D sayısallaştırıcı gibi hizmet alınabilmektedir. RE maksatlı ölçmelerde medikal CT tarayıcıların hassasiyetleri 0.1 – 1.0 mm arasında değişmektedir. Halbuki endüstriyel CT’lerde bu değerin, CMM ve lazer tarayıcılarındaki kadar hassas olduğu görülmektedir. Tarama neticesinde elde edilen gri tonlu görüntü demeti, aynı zamanda paralel kesitler halinde ölçülmüş parçaya ait yoğunluk dağılımlarını temsil eder. Buradan, yüzey konturlarını tarif etmek için kenar bulma, kavis yada ikinci dereceden yüzey analizi, aktif kontur, sinir ağları, Hough Transformu, fuzzy teorisi ve tabaka esaslı düzlem eğri analizi gibi segmentasyon tekniklerinden biri uygulanarak, parçanın CAD modeline çeşitli metodlarla geçilebilmektedir. İç ve dış yüzey CT verisi segmentasyonunda (görüntü bölümlenmesi) iki yaklaşımdan bahsedilmektedir: Bir aşamalı yaklaşımda; ilgilenilen yüzey konturları, doğrudan katman katman CT görüntülerinden oluşturulabilir. İki aşamalı yaklaşımda ise; tomogramlar düşük seviyeli segmentasyon rutinlerini (eşikleme) izleyen yüksek seviyeli segmentasyon işlemlerine tabi tutulurlar.



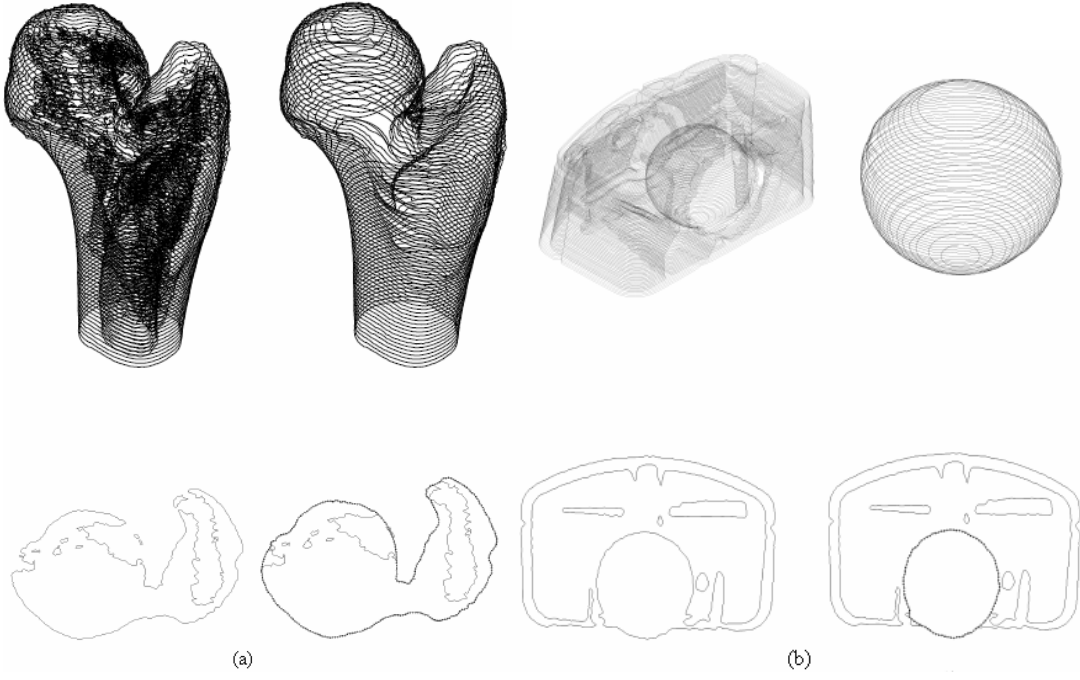
Şekil 2.17 CT tarayıcısı kullanarak tersine mühendisliğin ve segmentasyonun basamakları (Liu ve Ma, 1999)

Tüm kesitlerdeki konturlar artık kolayca bilinen tarama aralığında 3D'ye dönüştürülebilir.

Yüksek seviyeli segmentasyon ise, ham CT verisinden yola çıkarak 3D yüzey elemanlarının oluşturulması işlemidir. (Şekil 2.17). (Liu ve Ma, 1999) katman esaslı çekirdek büyümesi tekniğinden faydalanarak, Bilgisayarlı Tomografiden (CT) alınan kontur verilerinin 3-D yüzey segmentasyonunu sağlayan bir yöntem geliştirmiştir. Ön işlemlerden sonra, 2-D CT görüntülerinde, tabaka esaslı 3-D kontur modeli elde edilir. Operatör ilgilendiği katmanın üzerine çekirdek konturu girdikten sonra, aynı yüzeye yada elemana ait kontur noktaları, tabakalar halinde gelişen diğer çekirdek konturlarından ayrıldığı için, bu yöneme çekirdek büyümesi segmentasyonu adı verilmiştir. Çekirdek kontur hem kapalı hem de açık konturlardan oluşturulabilir. Karmaşık parçalarda, segmentasyon iki aşamada gerçekleştirilir. Önce kompozit yüzey, ham CT kontur verisinden bölümlenir. Kompozit yüzeyler konturları oluşturulduktan sonra ayrık yüzey elemanları bölümlenebilir. Genişleme operasyonunda elastik spline ve bir optimizasyon algoritması kullanılmıştır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 Çekirdek büyümesi segmentasyonunun evreleri (Liu ve Ma, 1999)

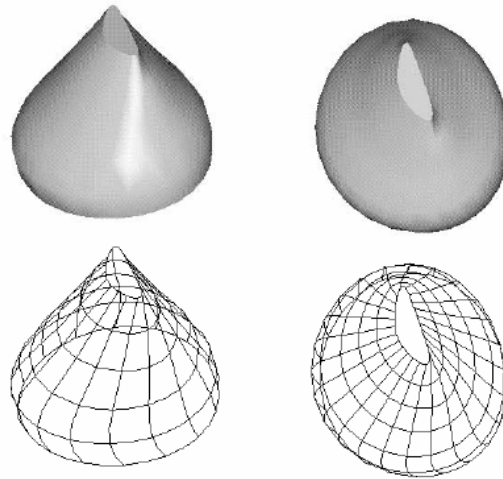


Şekil 2.19 Çekirdek büyümesi segmentasyonundan faydalanılarak oluşturulan; (a) medikal ve (b) endüstriyel modeller (Liu ve Ma, 1999)

Bahsi geçen makalede, boyutsal ölçüm yapabilen CT-tarayıcıdan faydalanılarak endüstriyel (bilgisayar mouse) ve medikal (kalça kemiği) nesnelerin CAD modelinin oluşturulmasında kullanılan bir tersine mühendislik çalışması yapılmıştır. Bu amaçla medikal örnekte çekirdek büyümesi segmentasyonu uygulaması için, 34 CT görüntüsü üzerinde, ara kesit interpolasyonu sonrası 68 ham CT kontur dilimi kullanılmıştır. Endüstriyel örnekte ise, çıkan 114 CT görüntüsünden önişleme neticesi 226 ham CT kontur dilimi elde edilmiştir (Şekil 2.19).

Temassız koordinat-ölçme sistemleriyle taranan kesitlerden 1,000 ila 500,000 nokta verisi toplanabilir. Yüzeye uygun bir matematik model kullanılarak aynı kompleks şekil, sadece 50-500 parametre ile kolayca ifade edilebilir. Kontrol noktaları, düğüm değerleri yada rasyonel ağırlık değerleri gibi birkaç parametreyi değiştirerek şeklin kolayca modifiye edilebilmesinden dolayı, mühendislik tasarımlarında parametrik matematik modeller tercih edilir. Geometrik model üretmeye uygun en yaygın parametrik gösterimler arasında; Bezier, B-spline ve üniform olmayan rasyonel B-spline (NURBS) sayılabilir. Bilindiği gibi, Bezier form, düğüm değeri ve rasyonel ağırlık gibi karmaşık B-spline ve NURB formlar tarafından kullanılan ilave kontrol parametrelerine ihtiyaç duymadığı için; birkaç kontrol noktası

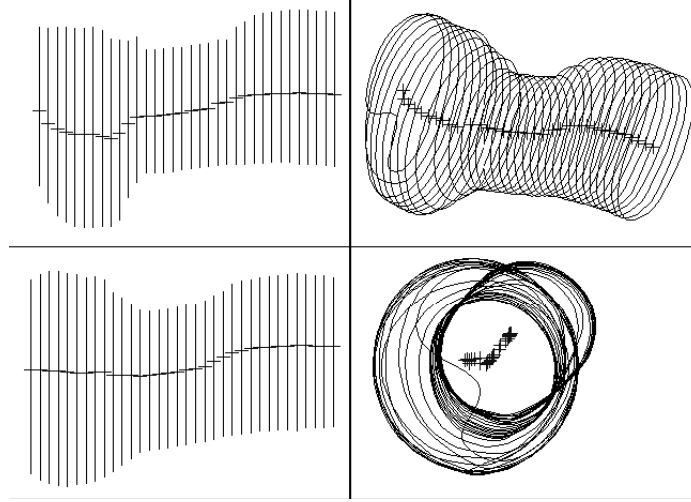
değiştirildiğinde tamamen şekli tanımlayabilir. B-spline ve NURB formların bir parçası olan Bezier modeller günümüz yazılım uygulamalarında benimsenen bir gösterim şeklidir. Kişiyi özel ortopedik protezlerin tasarımında olduğu gibi, pek çok biyomedikal uygulamalar, hassas matematik modellenmiş kemik geometrilerine gereksinim duyar. Yüzey geometrisi, Bilgisayarlı Tomografi (CT), Manyetik Rezonanslı Görüntüleme (MRI) yada Ultrasonla Görüntüleme cihazları kullanılarak alınan aralıklı kesit görüntülerin kenar noktalarından geçecek şekilde kontur yada parametrik kapalı eğriler uydurulmak suretiyle, ortaya çıkarılır. (Knopf ve Al-Naji, 2001) yaptığı simülasyonlarda; iki katmanlı bir sinir ağı olan Bernstein Temel Fonksiyonu (BBF) kullanarak, eğri ve yüzey uydurma konularına yeni bir fonksiyonel yaklaşım getirmiştir. BBF ağını, bölümlenmeye tabii olmuş herhangi bir kemik bölgesinin sınırı boyunca ölçülen data'lara en iyi yaklaşımı veren bir kapalı Bezier eğrisi tarif etmek için kullanmıştır (Şekil 2.20). Yapılan deneysel çalışmalarda; ortopedik implantın kişiselleştirilmesi maksadıyla, CT görüntülemeyle alınan radyal başlığın şekli, BBF ağı kullanılarak adaptif olarak tekrar konstrüğe edilmiştir. Bunun için; 150 mm/512 piksel çözünürlüklü yüksek hızlı bir CT tarayıcısından alınan bir seri görüntüye, kenar piksellerini görüntü düzlemindeki gerçek x ve y koordinatlarına çevirecek bir morfolojik kenar belirleme algoritması uygulanarak, her bir kemik diliminin dış hattı hesaplanmıştır.



Şekil 2.20 BBF sinir ağı tarafından üretilen sentetik yüzeyler (Knopf ve Al-Naji, 2001)

Son aşamada ise; “loft” metoduyla bu enine kesitler arasında interpolasyon yapılarak pürüzsüz bir yüzey ortaya çıkarılmıştır. Yüzeyin başarılı bir şekilde elde edilmesinin; başlangıçta CT’de yapılan tarama işleminde bir eksen boyunca eşit aralıklarla alınan

konturların, doğru bir şekilde doğrultulmasına bağlı olduğu görülmüştür. Yeniden çizilmiş kapalı konturların eksenlere oturtulması için; BBF eğri uydurma işleminde kesitin ağırlık değerlerini belirleyen başlangıç şartı olarak bir önceki kesitin ağırlıkları kullanılmıştır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 Radyal başlığın dış geometrisini tarif eden kapalı konturlar
(Knopf ve Al-Naji, 2001)

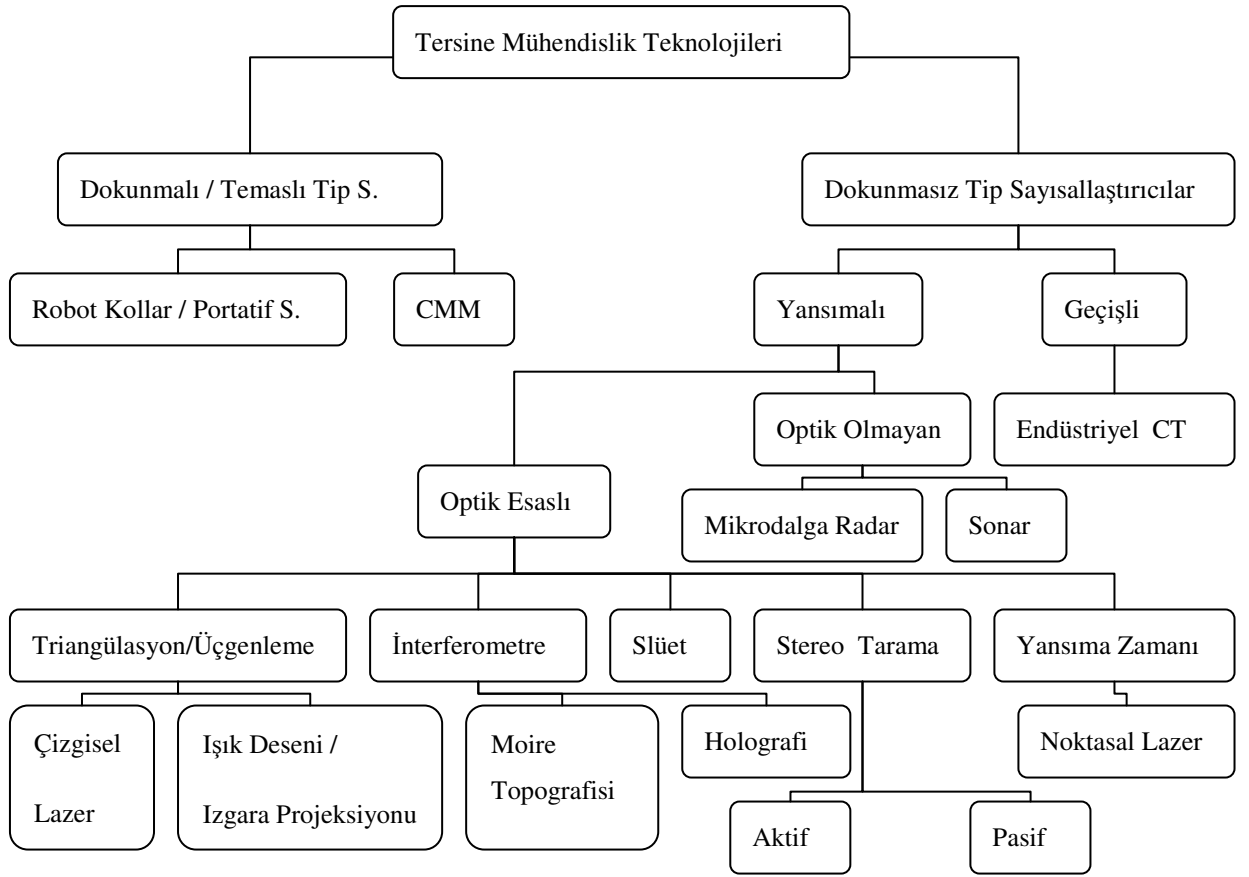
3. TERSİNE MÜHENDİSLİK ve SAYISALLAŞTIRMA

Üç boyutlu sayısallaştırma işlemi, var olan fiziksel bir objenin üç boyutlu bilgisayar modelini elde etme yöntemidir. Objeden elde edilen ve henüz işlenmemiş olan bu bilgi, tersine mühendislik yazılımları ve uygulamaları sayesinde ürün geliştirme sürecinin ilerideki aşamaları için kullanılabilir hale getirilmektedir.

Tersine mühendislik, 3D sayısallaştırma tekniklerini uygulamak suretiyle bir iş parçasına ait nokta bulutu verilerinin toplanmasına ve dolayısıyla CAD modelinin yaratılmasına olanak tanımaktadır. Günümüzde, özellikle imalat proseslerinde karşımıza çıkan problemlerin analizinde, tersine mühendislik uygulamalarına yaygın olarak yer verilmektedir. Ayrıca, tasarımların modifikasyonu ve yeniden gerçekleştirilmesi amacıyla, iş parçasının orijinal CAD modeli ile ölçülen iş parçasının yaratılan CAD verisi karşılaştırılmaktadır. Orijinal CAD verisi ile bu veriye bağlı olarak imal edilmiş parçanın 3D sayısallaştırma verisinin karşılaştırıldığı kalite kontrol uygulamalarına da sıkça rastlanmaktadır. Karmaşık geometriye sahip bir parçanın 3D CAD verisi çok hızlı ve hassas bir şekilde elde edildikten sonra yazılımın ilgili modülleri kullanılarak taranan parçanın tasarımı parametrik olarak yeniden yapılabileceği gibi herhangi bir tasarım değişikliğine de gidilebilmektedir.

Optik 3D sayısallaştırma işlemleri, genellikle var olan bir objenin 3D modelini yaratmak, objeyi çok küçük detaylarına kadar modellemek ve gerçek yapıyı 3D modeliyle ilişkili olarak haritalamak gibi amaçlar için uygun düşmektedir.

İş parçalarından sayısal veri toplamak amacıyla uygulanan teknikler dokunmasız ve dokunmalı metotlar olmak üzere iki grupta incelenmektedir (Şekil 3.1). Dokunmasız metotlardan ızgara projeksiyonu ve lazer ölçme metodu en çok kullanılan optik veri toplama teknikleri olarak tanınmaktadır (Görür vd., 2003).



Şekil 3.1 Tersine mühendislik tekniklerinin sınıflandırılması (Görür vd., 2003)

3.1 Sayısallaştırmada Kullanılan Yöntemler

Bu bölümde, günümüzde gittikçe yaygınlaşan optik ölçme tekniklerine değinilmiştir. Daha sonraki kısımlarda ise, CMM cihazları ve bunlardan toplanan data ları işleyerek yüzey modellemesi yapabilen bir programdan bahsedilmektedir.

3.1.1 3D Optik Ölçme Tekniği

Fotoğraflama işleminde bazı bilgilerin kaybolmasından ötürü 3-boyutlu görüntü oluşturmak için birden fazla çekim yapmak gereklidir. Bu şekilde daha fazla bilgi edinilerek işlem daha iyi hale getirilir. 3D optik taramada kullanılan hem fotogrametri hem de topogrametri metodları, 3-boyutlu cisimlerin 2-boyutlu fotoğraflarının çekilmesi ve bu fotoğrafların

bilgisayar ortamında tekrar 3-boyutlu hale döndürülmesi işlemini hassas biçimde gerçekleştirir. Bu işlemler için dijital kameralar kullanılmaktadır. Bu kameralarda film yerine, lensler arkasında ışık yoğunluğunu elektronik sinyallerine dönüştüren ve bunu bilgisayara transfer edebilen bir CCD sensör bulunmaktadır. 3-boyutlu topogrametrik ölçüm üçüncü boyutta görüntü işlemede fotogrametri ve stereometri kadar iyi bir yöntemdir. Tüm teknikler optik üçgenleme prensibini temel alır. Kelime anlamı belli sayıda noktanın konumunu kesin olarak tespit edebilmek için, bu noktaları tepe olarak kabul ederek bir alanı üçgenlere bölme işi olan “üçgenleme (triangulation)” tüm 3-boyutlu ölçme/tarama tekniklerinin kullandığı yöntemdir. Çok çeşitli uygulamaları olan üçgenleme prensibi haritacılıktan GPS ile konum belirlemeye kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu prensiple, matematiksel olarak uzayda kesişen doğruların yardımı ile noktanın bulunduğu yer hassas olarak elde edilir. 3-boyutlu taramada, cisim, bir veya daha fazla kamera ile 2-boyutta taranır. Sonra 3-boyutlu koordinat sistemine aktarılır. Bilgisayar yardımı ile cismin referansları veya yüzeylerinin ve formlarının nokta bulutu şeklinde ölçümlendirilmesi mümkündür. Optik ölçüm (metroloji) aktif ve pasif metodlar olmak üzere farklılık gösterir.

3.1.1.1 Optik Ölçmede Aktif Metodlar

Optik üçgenleme

Bir lazer pointer ve optik dedektör üçgensel bir yapıda düzenlenir, sonuç olarak üçgensel dayanak noktası olarak adlandırılan, üzerine lazerle ışık düşürülen noktanın uzaklığı dedektör tarafından belirlenir (Şekil 3.2a).

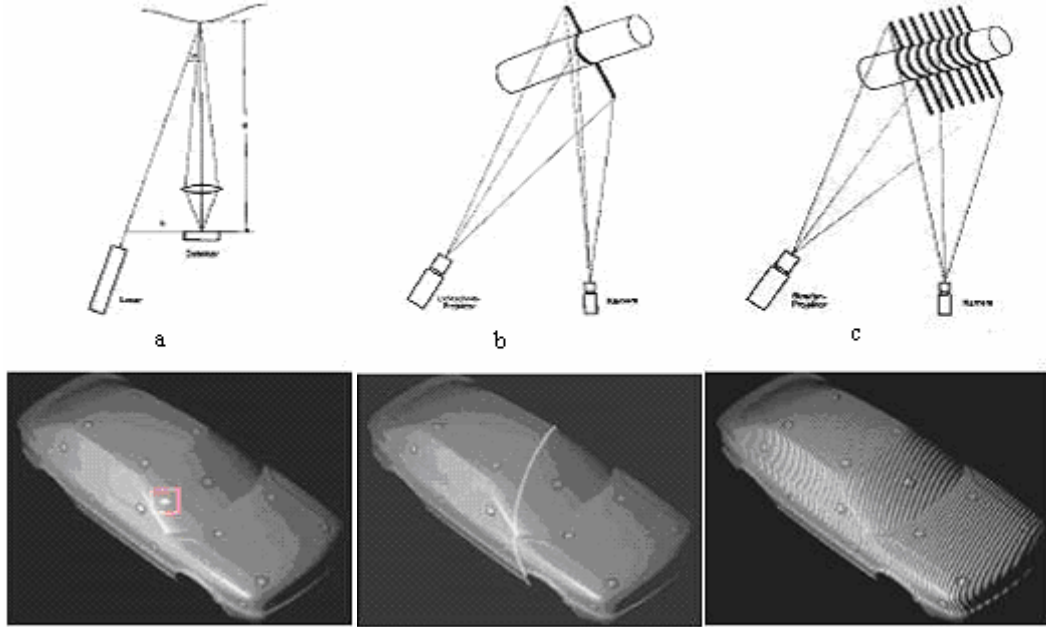
Işık kesiti teknikleri

Işık kesiti tekniği, optik üçgenlemenin geliştirilmiş halidir. Bu teknikte cismin üzerine düşürülen bir çizgi ve optik dedektör yardımı ile cismin 3-boyutlu profili düzlemde elde edilir (Şekil 3.2b).

Fringe izdüşümü (ızgara izdüşümü) teknikleri

Fringe izdüşümü tekniği ışık kesiti tekniğinin gelişmiş halidir. Bu yöntemde çoklu ışık kesitleri başka bir deyişle siyah ve beyaz şeritler halindeki desenler cismin yüzeyine

düşürülerek ve bir ya da daha fazla yüksek çözünürlükteki kamera yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılarak 3-boyutlu yüzey bilgisi elde edilir (Şekil 3.2c).



Şekil 3.2 (a) Optik üçgenleme örneği, (b) Işık kesiti tekniği örneği , (c) Fringe izdüşüm tekniği (Çakır, 2005)

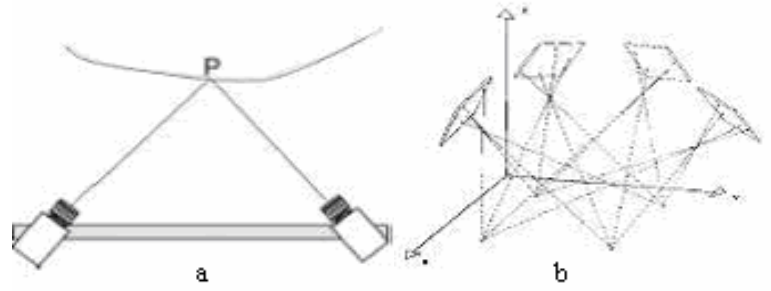
3.1.1.2 Optik Ölçmede Pasif Metodlar

Stereometri

Ölçümü yapılacak olan cismin yüzeyi üzerine herhangi bir ışık kesiti (fringe) düşürülmez. Bunun yerine cismin 3-boyutlu yüzeyi, iki kameradan alınan üst üste binen görüntülerden hesaplanarak elde edilir (Şekil 3.3a).

Fotogrametri

Bu yöntemde taranan obje bir kamera ile farklı açılardan görüntülenip üzerindeki indexmark'lar yardımı ile referansları bilgisayar ortamında 3-boyutlu nokta bulutu halinde elde edilir (Şekil 3.3b).



Şekil 3.3 (a) İki kameralı stereografi, (b) Bir kamera ile farklı yönlerden fotogrametri (Çakır, 2005)

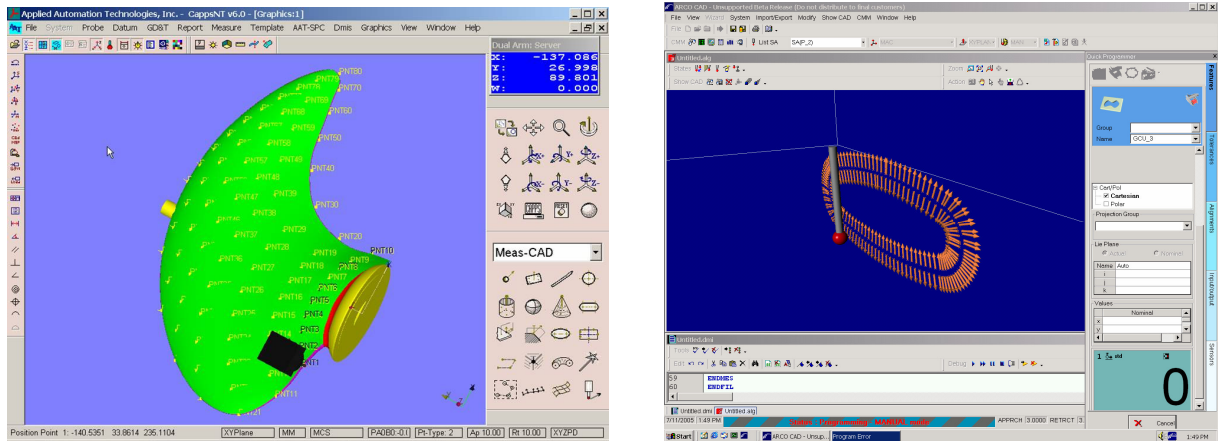
3.1.2 3D Tarama Sisteminde Topogrametri

3-boyutlu optik ölçüm tekniklerinde topogrametrik metodun yapılı aydınlatma tekniği esnekliği ve güvenilirliği bakımından göze çarpmaktadır. Bu tekniğin avantajları Breuckmann firmasının 3-boyutlu tarama sistemlerinde maksimum düzeyde görülmektedir. Bu sistemler Gri kod ve faz kaydırma metodu ile birleştirilmiş patentli MPT (Miniature Projection Technique) tekniğini kullanarak yüksek çözünürlük ve ölçüm hassasiyetini, hızlı veri edinme, esnek veri analizini en iyi şekilde sağlamaktadır. Topogrametrik 3D sistemi, güçlü bir ışık kaynağı ile cismin üzerine farklı dokusal özellikleri olan fringe'ler düşürür. Cismin yüzeyi üzerinde bu kodlanmış yapılı ışıklar, cismin şeklinin karakteristik özellikleri doğrultusunda deformasyona uğrar. Yüksek çözünürlükteki bir kamera sistemi ile bu deformasyon bilgileri alınır. Bu kamera sistemi, projeksiyon sistemi ile özel bir açı yapacak şekilde yönlendirilmiştir. Bu açığa üçgenleme açısı denir. Cismin üzerine düşürülen fringe'lerin deformasyon bilgileri analiz edilerek 1 milyon kadar noktanın 3D koordinatları birkaç saniye içerisinde elde edilmiş olur (Şekil 3.4). Kullanılan sensor sistemine bağlı olarak birkaç milimetreden birkaç metreye kadar olan objeler bir ölçümde sayısallaştırılabilmektedir. Breuckmann'ın 3D tarama sistemi ve sensor geometrisi Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

ve faz kaydırma metodu için gerekli ışık demetleri gönderilir. Bu şekilde ızgaraların faz hatası 0.5 μm olmaktadır. Bu şekildeki birleşik yapı sayesinde gri kod ve faz bilgisi ayrı bir cihaza gerek duymaksızın elde edilmiş olur (Çakır, 2005).

3.1.3 3D Koordinat-ölçme Cihazı ve Tersine Mühendislik Yazılımı CopyCAD

Genelde boyut kontrolü yapmak maksadıyla kullanılan CMM cihazları ile; proplama sistemi, kontrol ünitesi ve 3D ölçme/tarama yazılımına bağlı olarak tersine mühendislik sahasında da faydalanılmaktadır. Tetiklemeli sensör (touch trigger prop) yada lazer prop ile yüzeyden bilgi toplayan bu tür sistemlerin; ölçüm hataları üzerindeki skala sistemine ve gövde konstrüksiyonuna bağlı olarak, birkaç mikrondan başlayıp onlarca mikronlara kadar uzanır.



Şekil 3.6 CMM'ler üzerinde çalışan 3D ölçme ve tarama yazılım örnekleri [4]

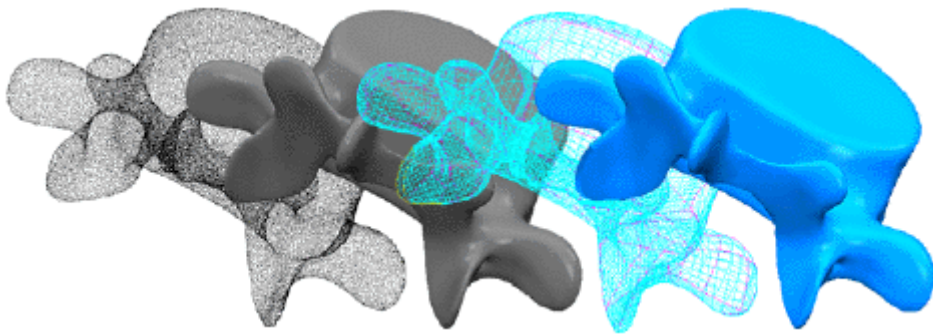
3D ölçme sistemlerinde üzerinde çalıştırılan yazılımlar yardımıyla; geometrik elemanların tolerans hesaplamaları yapılabildiği gibi, kesit profili ve yüzey taraması verileri de elde edilebilmektedir (Şekil 3.6).

CAD/CAM uygulamacısının elinde teknik resim olmaması ve sadece modelin bulunması halinde "tersine mühendislik" yöntemi kullanmak kaçınılmaz olmaktadır. CopyCAD var olan parçalardan veya fiziksel modellerden 3 boyutlu CAD bilgisayar destekli tasarım modelleri oluşturma işleminde kullanılan güçlü bir "tersine mühendislik" sistemidir. Ekranın üst kısmında bulunan menü çubuğunda tüm seçenekler bulunmaktadır ve bu sayede klavye ile herhangi bir komut girmeye gerek kalmamaktadır. Basit kullanıcı arabirimi sayesinde

kullanıcılar minimum zaman içinde üretken olurlar ve fonksiyonellik de herhangi bir kullanıcının yazılımı kolayca kullanmasını kolaylaştırır. Ayrıca profesyonel kullanıcılar için klavye ile komut girme seçeneği ve makro yaratma olanakları mevcuttur. Doğrudan tarama verilerinden tezgah kesme verilerine geçilememesinin nedeni, model tarayıcı ile taranırken mekanik tarayıcı kullanılması halinde probun bazı yerlerde sapma yaptığı ve sağlıklı data topladığı görülür. Lazer tarayıcılarda ise bazı sapmalar ve tarayıcı ile ulaşılamayan yerler olabilir. Bu tip hataları ortadan kaldırıp, datanın yüzey haline getirilip işlenebilir bir hale gelmesi için CopyCAD benzeri bir yazılıma ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanıcılar seri bir şekilde taranmış verileri düzenleyebilmekte ve yüksek kalitede kompleks yüzeyler yaratabilmektedirler. Yazılım yüzey sınırlarının seçiminde kontrol sağlar ve sonra seçilen toleransa göre düzgün, multi-patch yüzeyleri otomatik olarak oluşturur. CopyCAD ayrıca bitişik yüzeyler arasındaki teğetliğin sürekliliğini de korumaktadır.

CopyCAD'in uygulama alanı içinde, analiz ve mühendislik operasyonları için fiziksel modellerden CAD modelleri oluşturma; var olan parçalar ve prototiplerde oluşturulan değişiklikleri CAD modeline yansıtma, modelleri CAD dosyaları olarak arşivleme veya bilgisayarla canlandırma ve animasyon amaçları için data elde edimi bulunmaktadır.

Aşağıda, bu yazılım vasıtasıyla, taranmış modelden geometrik modele ulaşma süresi maddeler halinde açıklanmaktadır (Şekil 3.7):



Şekil 3.7 CopyCAD'in vertebra üzerinde tarama sürecinden model sürecine kadar geçen aşamaları gösteren örnek [1]

Nokta bulutu verilerini okuma :

- Her türlü ASCII ve Binary nokta bulut datalarını okur.
- Konfigüre edilebilir bir Binary nokta okuyucu desteği sayesinde, kullanıcının tarayıcı sistemi tarafından direkt olarak okuduğu Binary dataları destekler.
- Tarama aygıtlarından doğrudan CopyCAD içine basit Visual Basic programları sayesinde data aktarılabilir.

Nokta işlemleri :

- İleri düzey otomatik nokta filtreleri sayesinde nokta sayısını azaltma ve nokta bulutunda 'smoothing' yapılabilir.
- Kullanıcı tarafından tanımlanabilen tam yetenekli nokta manipülasyon ve filtre araçları ile veri setlerindeki problemleri düzeltici araçlar içerir. Spike düzeltme, smoothing, karmaşık verilerde yada karmaşık olmayan triangulated modellerde.
- Koordinat ölçme makinalarından yada 'touch trigger' tarayıcılardan gelen verilerdeki prop radüslerini otomatik olarak kompanse yeteneğine sahiptir.
- Sıralanmamış ve rasgele nokta veri setleri ile çalışabilir.
- Birden fazla data setiyle çalışırken bu data setlerini hizalamak için bazı yollar içerir.

Kaba hizalama : İki data setinde 3 bilinen noktayı grafik ekran üzerinde klikleyerek,

Hassas hizalama: Kullanıcı tarafından tanımlanan toleransa göre iki data seti içinde hizalanır,

Küre Hizalama : Kullanıcı hizalanmış data setlerinden önce fiziksel model üzerinde üç küre yüzey tanımlayabilir.

Triangulation (polygonisation) :

- Taranmış nokta verilerden ve dışarıdan okunmuş yüzeylerden “su sızdırmaz” yani aralıksız üçgen modeller yaratılabilmektedir. Sıralı noktalar sırasız noktalar tarama çizgileri düzenli grid datalar ve yüzeylerden Üçgen modeller oluşturulabilir.

- Rapid Prototyping ve işleme için STL formatında dosya oluşturulabilir.
- Üçüncü parti CAD sistemlerinden import edilmiş nokta bulut datalar, eksik yada hatalı üçgen modeller onarılır.
- Takım yolları üretimi için OLE bağlantısı ile üçgen modeller PowerMILL içine direkt olarak alınabilir.

Yüzey Yaratma :

- İnteraktif kullanıcı arabirimi ve menü yapısı ile kullanıcılar kısa bir sürede yüzey oluşturabilir.
- Kullanıcı, yüzey yaratma için gereken yüzey kenarlarının saptaması esnasında, taranmış modelin karakteristik özelliklerini (eğriler, noktalar ve daha önce yaratılmış yüzeylerin kenarları kullanarak) sürekli olarak kontrol altında tutmaktadır.
- Kullanıcı yüzey yaratma işlemi esnasında, taranmış nokta kümesi ile oluşturulan yüzey arasındaki “fitting” kalitesini otomatik olarak güncellenen hata haritaları sayesinde eş zamanlı olarak görebilmekte ve fare ile ek kesitler eklenebilmektedir. Yaratılmış yüzeyler OLE bağlantısı ile düzenleme veya hybrid modellere ekleme amacı ile PowerSHAPE’e doğrudan aktarılabilmektedir.
- Yüzeyler IGES dosya formatı ile herhangi bir CAD sistemine aktarılabilir. [1]

4. SAYISAL GÖRÜNTÜ İŞLEME

CT tarayıcılarından elde edilen sayısal görüntüler, tarayıcı sistemleri tarafından *.dcm formatında kaydedilir. DICOM formatında, tarayıcıların dedektörlerinden elde edilen ham veriler saklanırlar. Gri düzeyli görüntülerde üç bandın genlik değeri de birbirine eşittir. Bu durumda her banddaki genlik değerleri, 8 bit kullanılarak 0-255 aralığında sayılarla ifade edilir. Bunun anlamı, 8 bitlik bir gri düzey görüntüde toplam 256 tane farklı tonun ifade edilmesidir. Örneğin ham CT verileri, önceki bölümde anlatıldığı gibi Hounsfield Birimi (HU) yada CT sayısı adı verilen sayısal değerlerden oluşur. X ışınının emilim derecesini ifade eden bu sayılar, 0-2000 arasında değerlerden oluşmaktadır. Oysa her renk bandı için 8 bit genişliğe sahip bir bilgisayarda en çok 0-255 arasındaki değerler görüntülenebilir. Bu durumda 0- 2000 arasındaki CT sayılarının 255'den büyük değerlerinin örneklenmeden görüntülenmesi mümkün olamaz. Bu durumda yüksek CT sayısı değerlerine sahip olan kemik dokuları görüntülenemez. Bu sorunun çözülmesi için 0-2000 aralığındaki CT sayılarının 0-255 aralığına projekte edilmesi yani bu aralıkta yeniden örneklenmesi gerekir. Bu işlem, sayısal görüntü işleme tekniklerinde kullanılan nicelleme (quantization) işlemidir. Çünkü kemik doku sadece 1000 değerinden oluşmaz. Kemik dokuyu ifade eden sayısal değerler 900-1300 civarında belli bir standart sapmaya sahip farklı CT sayılarıyla ifade edilir. Bu standart sapma içindeki sayılar, 8 bitlik örneklenmede daha az sayıda gri düzey değer değeriyle temsil edilse de bu dokuların görüntüsü kaybolmamaktadır. Yani kemik doku çok geniş aralıktaki tonlar yerine tek bir renkle ifade edilmiş gibi düşünülse bile, aslında hiçbir kaybın oluşmadığı, zira kemik dokunun yine ifade edildiği görülecektir. Burada kolay anlaşılması için kemik dokunun tek bir renkle ifade edildiği söylenmiştir. Aslında gerçekte bir tek renkte değil yine belli bir aralıkta ifade edilir. 0-255 aralığında yeniden örneklenen CT kesitleri, artık bilgisayar ekranında gri tonlu görüntüler şeklinde görüntülenebilir. CT görüntülerinin sahte renklerle renklendirilmesi uygulaması öteden beri kullanılmaktadır. Bilgisayar ekranında 8 bitle ya da 24 bitle görüntülen CT görüntülerinin bilinen raster görüntülerden (dijital görüntülerden) hiçbir farkı yoktur. Yani bu görüntüler, *.tiff, *.jpeg, *.gif, *.bmp, *.png vb. gibi herhangi bir raster görüntü formatında saklanabilir. Bu aşamadan sonra da, bu görüntülere her türlü sayısal görüntü işleme teknikleri uygulanabilir .

Bilinen bir görüntü formatına dönüştürülen CT görüntüleri ile, 3-boyutlu doku modellerinin elde edilmesi için gerektiğinde bu görüntülerin iyileştirilmesi gerekir. Örneğin, bir CT görüntüsü, hem görüntü ilk olarak elde edilirken atmosferik şartlarda nedenlerden dolayı hem

de 0-255 aralığında yeniden örneklenirken dokuların detaylarını ifade eden gri düzey değerleri, dar bir aralığa yığılmış olabilir. Bu durumda, aslında birbirinden farklı dokulara ait olan pikselleri çıplak gözle birbirinden ayırt etmek mümkün olmayabilir. Yani farklı iki dokuya ait iki pikselin var olduğu düşünülürse, bu iki pikselin gri düzeyleri birbirinden farklı olmakta olup çok yakın değerlere sahiptirler, bu iki ayrı pikseli birbirinden ayırt etmek mümkün olmaz. Bu durumda görüntünün tamamı birbirine benzer tonlardan oluşmuş bir görüntü olur ve detayları ayırt edilemez. Matematiksel olarak böyle görüntülerin histogramlarıyla da pikselle fonksiyonları belli bir aralığa sıkışmış olur. Bu durumdaki görüntülerin detaylarının açığa çıkarılması için histogramın geniş bir aralığa yayılması ya da olasılık yoğunluk fonksiyonunun uniformlaştırılması gerekir. Bu durumda görüntüdeki detaylar çok net bir şekilde ortaya çıkar. Bu tarz görüntü iyileştirme işlemleri, gerek duyulduğunda CT görüntülerine uygulanmak zorundadır.

Öncelikle, kesit görüntülerinin ön işlemlerden geçirilerek iyileştirilmesi (image enhancement) gerekir. Daha sonra, 3-boyutlu modeli oluşturulmak istenen dokuların, görüntü bölümlenme ve sınıflandırma (image segmentation/classification) teknikleri ile çıkarılması gerekir.

4.1 Görüntülerin Bölümlenmesi ve Sınıflandırılması

Dijital görüntülerin kullanıldığı uygulamalarda, görüntüdeki nesnelerin neler olduğunun bilinmesi gerekir. Bu nesnelerin şeklinin ve büyüklüğünün belirlenmesi sayesinde farklı amaçlar için çok yararlı bilgiler ortaya çıkarılır. Görüntülerden nesnelerin çıkarılması işlemi, görüntüyü parçalayıp, sadece nesneleri oluşturan piksellerin görüntüden çekilip çıkarılması şeklinde de yorumlanabilir. Bu durumda görüntü, bölümlere yani parçalara ayrılmış olur. Bu nedenle, görüntüden nesnelerin çıkarılması için kullanılan teknikler genelde görüntü bölümlenme modelleriyle yapılır.

Görüntü bölümlenme için renk değişimleri kullanıldığında öncelikle nesnelerin sınır çizgilerini belirleyen sınır yaklaşımları kullanılabileceği gibi, nesnelerin içindeki pikselleri belirleyerek aslında nesneyi oluşturan görüntü bölgelerini tanımlayan bölge ya da alan yaklaşımlı bölümlenme teknikleri de kullanılır.

Buna göre görüntü bölümlenme işlemi bölge esaslı ve kenar ya da sınır esaslı bölümlenme teknikleri olmak üzere iki genel yaklaşımla yapılır.

Bölgeler

Görüntüdeki bir bölge, birbirine benzer özellikleri olan piksellerinin birbirine bağlanmasıyla oluşan görüntü parçasıdır. Bölgeler, görüntüdeki nesnelerin yüzeylerine de karşılık geldiği için bölgelerin yorumlanması sonucunda çok önemli bilgiler elde edilir. Bir görüntüde birden fazla nesne olabileceği gibi, her nesnenin de farklı bölgelere sahip birden fazla bölgeleri de olabilir. Bir görüntünün doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için, görüntünün hem nesnelere karşılık gelen bölgelerinin hem de nesnelerin içindeki farklı bölgelerinin bölümlenmesi gerekir. Bu işlemler sırasında ortaya çıkabilecek bölümlenme hatalarını en aza indirmek ve da ortadan kaldırmak için tek başına bölge-nesne ilişkilerinin yorumlanması yeterli olmayacaktır. Bu ilişkilerin yanı sıra nesneye özgü bilgilerin de ortaya çıkarılıp, ileri aşamalarında bu bilgilerin de yorumlamada kullanılması gerekir.

Bölgeler ve kenarlar

Bir görüntünün analizi ve bölgelerin çıkarılması için izlenmesi gereken ilk adım, görüntünün her nesneyi ayrı ayrı temsil eden bölgelerinin belirlenmesi ve bu bölgelerin her nesne için birbirinden farklı ama nesne içinde birbiriyle aynı renkte olacak şekilde bölgeye ait piksellerin işaretlenmesi yani etiketlenmesidir. Bu şekilde görüntünün bölgelere ayrılması için, görüntüyü oluşturan piksellerin gri-düzey değerlerinin karakteristik özelliklerinden yararlanılabilir. Bu görüntüyü bölgelere ayırmak için iki yaklaşım kullanılabilir. Bunlar, bölge esaslı bölümlenme ve kenar belirleyerek nesne sınırlarının kestirimi ile görüntü bölümlenme.

Bölge esaslı yaklaşımda, bir nesneye karşılık gelen pikseller bir arada gruplandırılır ve bu piksellerin aynı bölgeye ait olduğunu ifade eden bir işaretle etiketlenirler. Bu süreçte "bölümlenme" (segmentasyon) adı verilir. Belirli bir kritere göre bir bölgeye atanan pikseller, görüntünün geri kalan piksellerinden ayırt edilebilecek bir şekilde ya işaretlenir ya da farklı bir renge boyanır. Bölümlenmede çok önemli iki prensip vardır. Bunlar piksel değerlerinin birbirine benzerliği ve piksel konumlarının birbirine göre yakınlık ölçütleridir. İki piksel aynı gri-düzey değerine sahipse ve birbirine tanımlanan uzaklıktan daha yakınsa, bu iki pikselin aynı bölgeye ait olduğu söylenir. Benzerlik kriteri olarak örneğin iki pikselin gri düzeylerinin

farkları kullanılabilir. Konumsal yakınlık içinse Euklides uzaklığı ölçüt olarak kullanılabilir. Değer benzerliği için bir bölgeye ait piksellerin varyans değerleri de kullanılabilir. Aynı varyans değeri konumsal benzerliğin tanımlanmasında da kullanılabilir.

Benzerlik ve yakınlık yaklaşımı, bir nesneye ait noktaların yaklaşık olarak aynı renkte ve geometrik olarak da birbirlerine yakın olmaları, bir varsayımdan yola çıkılarak ortaya atılmıştır. Ama biraz dikkatlice düşünülürse, bu varsayımın bir çok durum için geçerli olamayacağı anlaşılabılır. Ancak bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak da mümkündür. Bunun iç bu iki varsayıma göre görüntüyü bölümledikten sonra, geometrik ya da konumsal ilişkilerden bağımsız olan ve farklı koşullarda değişmeden kalan özelliklerin (Spatial invariant properties), eşleştirilmesi ile doğru bölümlmeyi yapmak mümkündür.

En basit durumlarda, 8 bölümleme işlemi, eşikleme ve etiketleme yöntemleri ile yapılabilir. Daha karmaşık görüntüler için eşiklemeden daha gelişmiş yaklaşımların kullanılması gerekir.

Görüntü bölümleme işlemi, bir bölgenin sınır çizgisi üzerindeki piksellerin bulunması yoluyla da yapılabilir. Sınır çizgisi üzerindeki piksellere kenar pikselleri adı verilir. Kenar pikselleri sınır çizgisi üzerinde bulunacağından ve sınırın bölge tarafındaki piksellerle diğer taraftaki bölgeye ait olmayan piksellerin renk farklarıyla ayırt edildiğine ya da ortaya çıktığına dikkat edilirse, bu durumda sınır piksellerinin komşu piksellerin gri düzey değerlerinin farklarına bakılar kolayca anlaşılacaktır. Sınır ya da kenar belirleme işlemi in farklıklar kullanılır.

Bunun için kenar arama operatörlerinin çoğu sadece piksellerin gri düzey ya da yoğunluk değerlerinin karakteristik özelliklerini esas alarak çalışır. Doğrudan yoğunluk değerleri kullanılabileceği gibi bu değerlerin yan yana diziliş şeklini inceleyerek texture yada doku şekillerinin belirlenip bu dokuların karakteristik özelliklerine bakılarak da kenarlar belirlenebilir.

İdeal bir görüntüde, bir bölge kapalı eğri sınırı ile ya da başka bir kapalı bir eş yoğunluk eğrisi (kontur) ile çevrilidir. Bu konturun işlenmesi yoluyla da görüntü bölümlmesi yapılabilir. Ancak bu yöntem yukarıdaki yöntemlerle tam olarak aynı sonucu vermese de, hemen hemen aynı denebilecek düzeyde sonuçlar üretir. Çizgi izleme yöntemiyle kontur belirlendikten sonra, alan doldurma teknikleri ile konturun içindeki bölge kolayca tanımlanabilir. Ancak gerçek görüntülerde kenarlar tam olarak aynı değerlerden oluşmadığı için kenarların ve bölgelerin kusursuz ve etkin bir şekilde belirlenmesi mümkün olamamaktadır.

4.1.1 Kenar ya da sınır esaslı bölümlleme

Görüntüden kenar ve doğruların aranması için birçok değişik arama operatörü kullanılmaktadır. Bunların da çoğu konvolüsyon maskeleriyle uygulanır ve çoğu diferansiyel işlemlerdir. Diferansiyel işlemleri, görüntüde renk ya da parlaklık değişimlerini ve değişim yönünü saptamak için kullanılır Çok kısa bir aralıkta, şiddetli bir parlaklık değişiminin var olması demek büyük ihtimalle o yerde bir kenarın var olması demektir. Bazı kenar arama operatörleri, yukarıda da değinildiği gibi, parlaklık değişiminin yanı sıra değişimin yönüyle de ilgili bilgiler içerir.

Kenar arama operatörleri, nesneleri belirlemek için ilk adım olarak kullanılır. Karmaşık sınırları bulunan nesnelerin olası kenarları, kenar arama yöntemleri ile ilk adımda saptanır. Bu işlem sırasında, her bir olası kenarın yönü de belirlenir. ikinci adım olarak, bulunan olası kenar değişimleri, yön bilgileri de kullanılarak birleştirilir ve kenarların son hali elde edilir.

Kenar arama amacıyla kullanılan operatörlerin çoğu gürültülü görüntülerde gürültü noktalarından olumsuz yönde etkilenir. Bu nedenle, gürültülü görüntülerden kenar aramadan önce gürültülerin olabildiğince ayıklanması gerekir. Kenar arama operatörlerinin gürültülerden fazlaca etkilenmemesi için parametrelerinin uygun seçilmesi önemlidir. Eğer parametreler gürültülere duyarlı olacak şekilde seçilirse, bu durumda gürültü noktalarının da kenar olarak algılanması mümkündür. Ayrıca kenar arama için kullanılan maske boyutu ne kadar büyükse, operatör gürültülerden o kadar fazla etkilenir.

Kenar arama operatörlerinin temel ilkesi, görüntüdeki her pikselin komşularıyla arasındaki parlaklık değerlerinin karşılaştırılması esasına dayanır. Örneğin; eğer bir pikselin gri düzey değeri komşularının gri düzey değerlerine eşit ya da yakınsa, bu bölgede büyük ihtimalle bir kenar bulunmayacaktır. Ancak, pikselin gri düzey değerleriyle komşuları arasında belirgin bir fark varsa bu durumda bu noktada bir kenarın varlığından söz edilebilir. İdeal olarak bir kenar ani ve belirgin gri düzey farkıyla ortaya çıkacaktır. Ancak pratikte böyle ani değişimler yerine, yavaşça değişen renk tonları oluşur (Doğan, 2003).

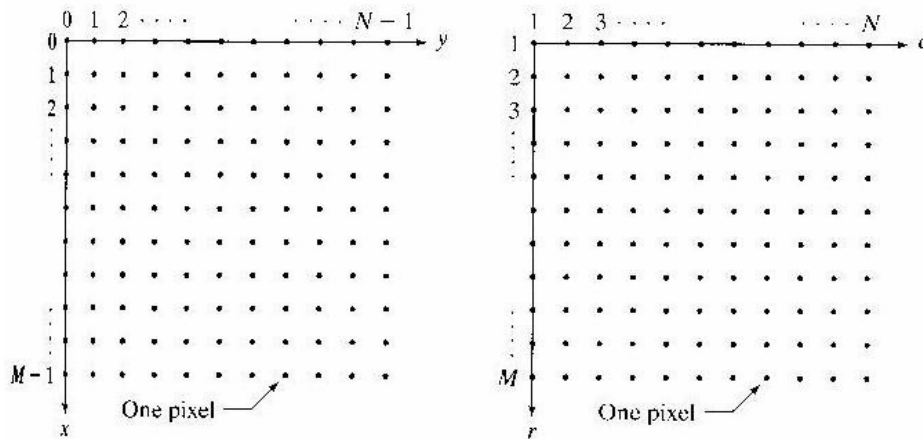
4.1.2 Kenar Arama Operatörleri

Dijital Görüntü İşleme

Görme insanın en gelişmiş duyu organlarından biridir. Bununla birlikte elektromanyetik spektrumun görünüm bandı –gama dalgalarından radyo sinyallerine- ile bu sınırlıdır. Böylece dijital görüntü işleme teknikleri ultrason, elektron mikroskobu ve bilgisayarda türetilen görüntüler üzerinde geniş bir uygulama sahası bulmuştur. Görüntü işleme, görüntü analizi ve bilgisayarlı görü ile yakından ilintilidir. Bu bağlamda üç tip bilgisayar destekli işlemden bahsedilebilir: Düşük seviyeli işlemler; görüntü önışlemede gürültü giderme, kontrast iyileştirme ve görüntü netleştirme gibi temel operasyonları kapsar. Segmentasyon (görüntüyü bölgelere yada nesnelere bölme) , bilgisayarda işlemeye uygun nesne tanımlama (klasifikasyon) orta seviyeli işlemlere girer. Bu işlemde görüntü girdisi, kenarlar ve konturlar şeklinde çıkar.

Dijital Görüntünün Temsili

İmaj iki boyutlu bir $f(x,y)$ fonksiyonu olarak tarif edilebilir. Burada x ve y düzlem koordinatları olup, f genliği o noktadaki imajın gri seviyesi yada parlaklığını (yoğunluğunu,şiddetini) ifade eder. Gri seviye genelde monokrom görüntüleri belirtmekte kullanılır. Görüntüyü dijital forma çevirmek için koordinatların yanı sıra genliğinin de sayılaştırılması/dijitize etmek gerekir (görüntü örnekleme ve gri ton ayrıklaştırması). Hem düzlemsel koordinatların ve hem de parlaklığın ayrık biçimde ifade edildiği bu fonksiyona sayısal görüntü (digital image) diyebiliriz. Örnekleme ve ayrıklaştırmanın sonucu reel sayılı $M \times N$ boyutunda bir matris oluşur (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Sayısal Görüntü İşlemede Koordinatlar (Gonzalez vd., 2004)

Görüntü Tipleri

Monokrom görüntüler genelde iki ana grup altında toplanabilir:

- Gri tonlu görüntüler (*intensity*)
- İkili görüntüler (*binary*)

Gri tonlu görüntüler uint8 veya uint16 sınıfından [0,255] ve [0,65535] aralığında veriler alan matristir. İkili görüntüler ise 0 ve 1'ler içeren bir mantık dizisidir.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0, N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1, N-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Yukarıdaki denklemin sağ tarafı tarif edilen sürekli bir dijital resim/ sayısal görüntüdür. Bu matrisin satır ve sütun indisleri resimdeki noktanın koordinatlarını, bu konumdaki *piksel* olarak adlandırılan eleman da gri ton değerini gösterir.

Morfolojik Görüntü İşleme

Matematiksel morfoloji; sınır, iskelet ve konveks kavislerin bölgesel şeklini tarif etmek ve temsil etmekte faydalı olan görüntü komponentlerinin ortaya çıkarılmasında kullanılan bir araçtır. Dilasyon ve erozyon morfolojik görüntü işlemenin temel operasyonlarıdır. *Dilasyon*, siyah-beyaz bir görüntüdeki nesnelerin “genişlemesini” ya da “kalınlaşmasını” sağlar. *Erozyon* ise ikili görüntüdeki objelerin “daralması” ya da “incelmesi” anlamına gelir.

Görüntü Bölümleme

Segmentasyon bir görüntüyü, onu oluşturan alt bölge ve nesnelere ayırır. Segmentasyonun hata miktarı bilgisayarlı analiz prosedürünün başarısını belirler. Monokrom görüntülere uygulanan segmentasyon algoritmaları, görüntü yoğunluğunun iki temel özelliği olan; süreksizlik ve benzerliktir. Kenar gibi, yoğunluktaki ani değişiklikleri temel alan görüntünün parsellenmesi yaklaşımı ilk kategoriye girer. Görüntünün, önceden belirlenmiş kriterlere göre benzer olan alanlara parsellenmesi ise, ikinci kategorideki prensip yaklaşımdır. Son yıllarda, doğrusal kenar segmentlerini bulmakta *Hough transform*undan faydalanılmaktadır. *Thresholding* (eşikleme), özellikle hızın ön plana çıktığı uygulamalarda kullanılan popüler bir

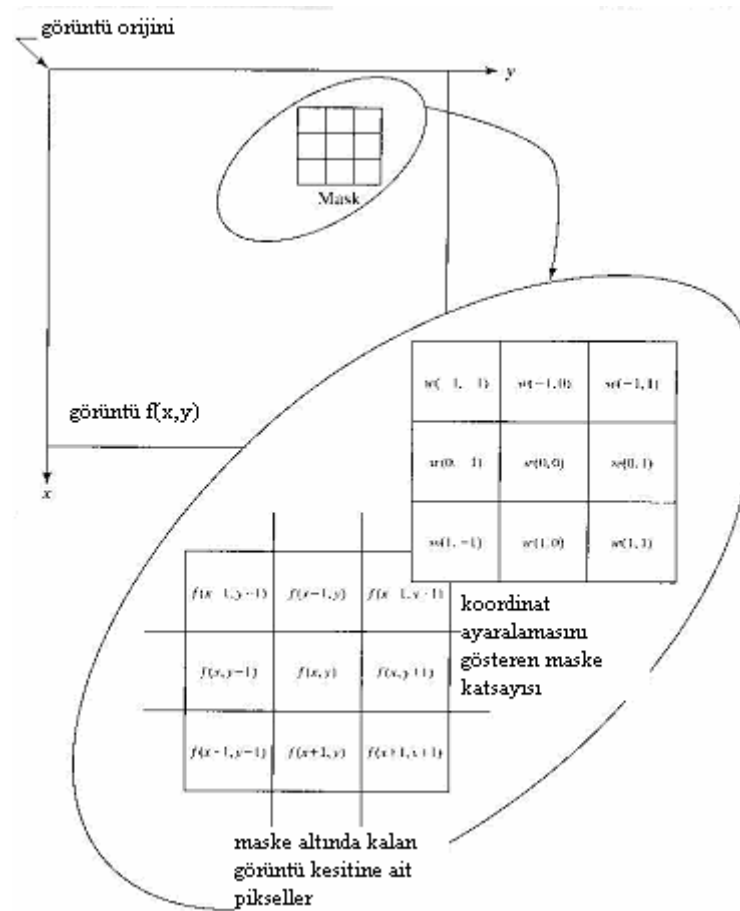
yöntemdir.

Nokta, Çizgi ve Kenar Arama/Belirleme

Süreksizlikleri aramanın en bilinen yolu görüntü üzerinden bir *maske* (filtre, pencere) geçirmektir. 3×3 lük bir maske için bu prosedür, maske tarafından çevrilmiş bölgenin içinde kalan z_i yoğunluk/parlaklık seviyesi ile w_i katsayının çarpımlarının toplanmasıyla gerçekleşir. Böylece görüntüdeki herhangi bir noktadaki maskenin yanıtı/tepkisi aşağıdaki gibi verilebilir (Şekil 4.2):

$$R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_9 z_9 = \sum_{i=1}^9 w_i z_i \quad (4.2)$$

Önceki gibi, maskenin yanıtı merkezine göre tarif edilmiştir.



Şekil 4.2 Lineer düzlem filtrelemenin mekanizması (Gonzalez vd., 2004)

Hemen hemen sabit parlaklıktaki alana işlemiş izole bir noktanın belirlenmesi prensipte açıktır. Şekil 4.3'teki maskeyi kullanılacak olursa,

$$|R| \geq T$$

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Şekil 4.3 Bir nokta arama maskesi

merkezinde izole bir nokta bulunabilir (T , negatif olmayan bir eşik –koyu bölgeden parlak bölgeye geçiş sınırı- değeridir). Nokta belirlemede diğer bir yaklaşım ise, belirli bir T eşik değerini aşan maksimum ve minimum piksel değerleri arasındaki fark için $m \times n$ boyutundaki tüm komşuluklarındaki noktaları tespit etmektir.

Çizgi Arama

Eğer Şekil 4.4'te gösterilen ilk maskeyi, görüntünün etrafında hareket ettirirsek, daha çok yatay doğrultuda bir piksel kalınlığında doğrulara daha kuvvetli tepki verir. Sabit bir arka plan ile çizgi, maskenin orta satırından geçtiği zaman, maksimum tepkiyi verecektir. Benzer şekilde ikinci maske, $+45^\circ$ 'doğrultusunda uzanan hatta çok tepkiyi verirken; üçüncü maske düşey çizgilere ve dördüncü maske de -45° diyagonal uzanan çizgilere tepki verir.

-1	-1	-1
2	2	2
-1	-1	-1
Yatay		
-1	-1	2
-1	2	-1
2	-1	-1
$+45^\circ$		
-1	2	-1
-1	2	-1
-1	2	-1
Düşey		
2	-1	-1
-1	2	-1
-1	-1	2
-45°		

Şekil 4.4 Çizgi arama maskeleri

Matlab edge Fonksiyonunu Kullanarak Kenar Belirleme

Kenar bulma gibi parlaklık değerindeki süreksizlikler, birinci ve ikinci dereceden türevler kullanılarak tespit edilir. Görüntü işlemede birinci dereceden türevin seçimi *gradyan* verir.

2-D $f(x,y)$ fonksiyonun gradyanı vektör olarak aşağıda tarif edilmiştir:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Bu vektörün magnitudü, aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\nabla f = \text{mag}(\nabla f) = \left[G_x^2 + G_y^2 \right]^{1/2} = \left[(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2 \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

Hesabı aşağıdaki basitleştirmek mümkündür:

$$\nabla f \approx G_x^2 + G_y^2 \quad \text{yada} \quad \nabla f \approx |G_x| + |G_y| \quad (4.5)$$

IPT (görüntü analiz modülü) **edge** fonksiyonu pek çok türevsel yaklaşımlar temin eder. Bunlardan bazıları kenarın yataya veya düşeye mi, ya da hem yataya hem de düşeye mi hassas olduğunu gösterir. Genel komut satırı ;

[g, t] = edge(f, 'metod', parametreler)

burada f girdi görüntü, metod ise Sobel, Prewitt, Roberts, Laplacian (LoG), Zero Crossing ya da Canny yöntemlerinden biridir. Fonksiyondaki g ise f içerisinde tespit edilen kenar noktalarının yerini veren 1 ve 0.lardan oluşan mantık dizisidir. Öte yandan t parametresi ise opsiyonel olarak, kenar noktalarını isimlendirecek kadar kuvvetli gradyan değerini belirlemek için, edge komut tarafından kullanılan eşikleme değerini göstermektedir.

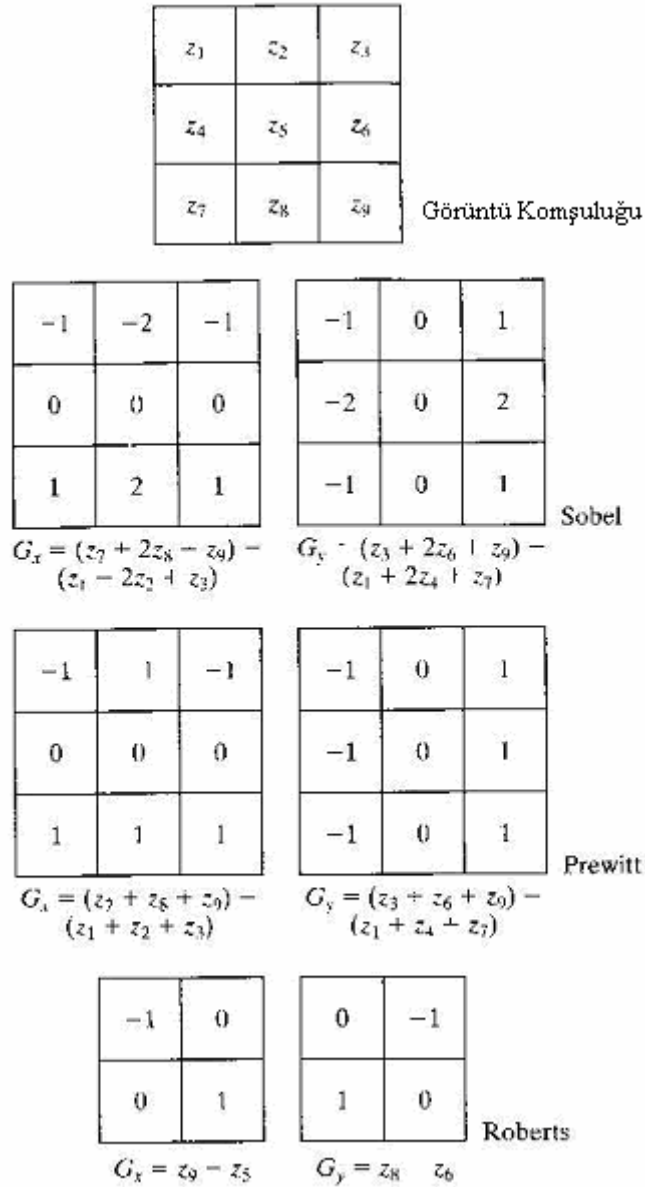
Aşağıda en çok kullanılan üç operatörden kısaca bahsedilmiştir:

Sobel Kenar Arama Operatörü

Sobel kenar dedektörü, Şekil 4.5'te verilen maskeyi dijital olarak G_x ve G_y birinci türevlerine yaklaşım yapmakta kullanır. Başka bir deyişle, komşuluk merkezindeki gradyan, aşağıda verilen Sobel dedektörü vasıtasıyla hesaplanır:

$$g = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \quad (4.6)$$

$$= \left\{ [(z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)]^2 + [(z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)]^2 \right\}^{1/2}$$



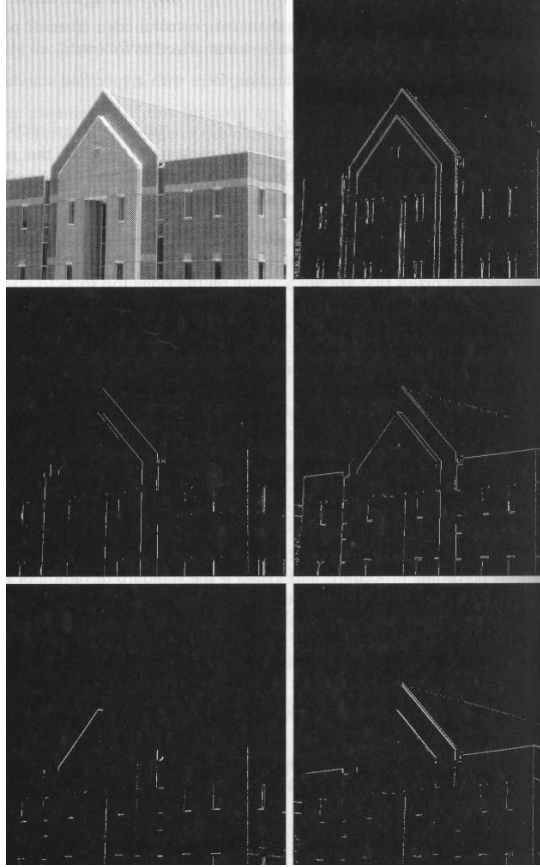
Şekil 4.5 Bazı kenar arama maskeleri ve birinci dereceden türevleri (Gonzalez vd., 2004)

Öyleyse, (x,y) konumundaki pikselin, eğer $g \geq T$ o bölgedeki eşik değerinden büyükse ise, bir kenar pikseli olduğu söylenebilir. Sobel dedektörünün genel yazılışı şöyle verilmektedir:

$$[g, t] = \text{edge}(f, \text{'sobel'}, T, \text{dir})$$

Burada T otomatik olarak verilen ya da kabul edilen bir eşik değerini ve dir kenarların

aranması esnasında tercih edilen doğrultu 'dir' ; yatay 'horizontal' , düşey 'vertical' , her ikisi de 'both' olabilir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Sobel maskesi uygulanmış görüntü ve belli bir eşik değeri için çeşitli yönlerde, bulunmuş kenarlar (Gonzalez vd., 2004)

Prewitt Kenar Arama Operatörü

Prewitt kenar dedektörü, Şekil 4.5'te verilen maskeyi dijital olarak G_x ve G_y türevlerine yaklaşım yapmakta kullanır. Genel formül ise;

$$[g, t] = \text{edge}(f, \text{'prewitt'}, T, \text{dir})$$

Prewitt dedektörü Sobel'e göre daha basit hesaplanır ancak sonuçta bir takım lekeler/gürültüler üretir.

Roberts Kenar Arama Operatörü

Roberts kenar dedektörü, Şekil 4.5'te verilen maskeyi dijital olarak G_x ve G_y türevlerine yaklaşım yapmakta kullanır.

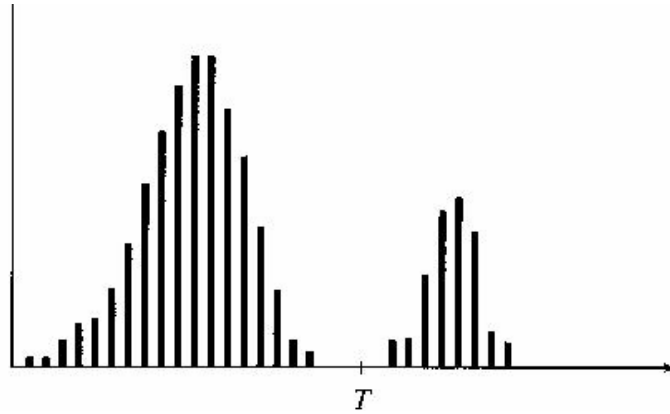
`[g, t] = edge(f, 'roberts', T, dir)`

Formülüyle ifade edilen Roberts en eski ve basit kenar bulma dedektörüdür. Simetrik olmadığı ve 45° lik kenarlarda sınırlamalar getirir. Buna karşın Sobel'e nazaran daha basit hesaplandığı için, baskın faktörlerin alınmasında hızlı netice vermektedir.

Thresholding (Eşikleme)

Görüntü bölümlleme uygulamalarının daha etkin ve hızlı biçimde yapılabilmesi için eşiklemenin, lokal görüntü komşuluklarının özelliklerine göre otomatik olarak tayin edilebilmesi gerekir.

Şekil 4.7'de koyu renkli arka plan üzerinde parlak nesnelerden oluşan bir $f(x,y)$ görüntüsünün yoğunluk histogramı gösterilmektedir. Burada nesne ve arka plandaki piksellerin, yoğunluk değerlerinin iki baskın mod halinde gruplanmış olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.7 Biomodal bir histogramda görsel analiz yaparak eşik değerinin tespiti (Gonzalez vd., 2004)

Nesneleri zeminden ayırmanın bir yolu, bu modları ayıran bir T eşik değeri seçmektir. O takdirde, $f(x,y) \geq T$ şartını gerçekleyen herhangi bir (x,y) noktası *nesne noktası*, aksi durumda

zemin noktası olarak tarif edilir. Bir başka deyişle, eşiklenmiş $g(x,y)$ görüntüsü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y) \geq T & 1 \\ f(x, y) < T & 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

1 ile işaretlenmiş pikseller nesneye ait, 0 ile işaretlenenler ise zemine aittir. Bu kabulde T sabiti ise *global eşikleme* olarak adlandırılır.

Global Eşikleme

Eşikleme için bir yol, görüntü histogramına bakarak iki farklı bölgeyi birbirinden ayıran basamağı seçmek olabilir. Diğerisi ise deneme yanılma ile bir T değeri belirlemektir.

Şayet eşikleme otomatik olarak yapmak istenirse aşağıdaki prosedür izlenebilir:

1. T için ilk tahmin, görüntüdeki minimum ve maksimum parlaklık değerlerinin ortasında bir yerde yapılır.
2. T kullanılarak görüntü iki piksel grubuna bölünmüş olur: Eşik değerinden büyük yada ona eşit olan parlaklık değerindeki pikselleri içeren G_1 ile eşikten küçük piksellerin toplandığı G_2 bölgeleri.
3. G_1 ve G_2 bölgelerinde yer alan piksellere ait μ_1 ve μ_2 gri ton değerlerinin ortalaması hesaplanır.
4. Yeni bir eşik değeri ortaya çıkarılır: $T = 1/2 * (\mu_1 + \mu_2)$
5. Hassas tarif edilmiş T_0 parametresinden daha küçük bir fark bulunana kadar iterasyon 2. ve 4. adımlar arasında tekrarlanır.

Güçlü bir görüntü analiz paketi sunan MATLAB, Otsu metodunu kullanarak graythresh fonksiyonuyla eşik değerini tespit eder.

$$T = \text{graythresh}(f)$$

Görüntüyü segmentlerine ayırmak için im2bw fonksiyonu içindeki T kullanılır. Eşik değeri $[0,1]$ aralığında bir sayı olduğundan uint8 sınıfından görüntü girdilerinde T değerini 255 ile çarpmak gerekir.

Lokal Eşikleme

Aydınlatmanın düzensiz olduğu durumlarda morfolojik opertörler ile kompanzasyon yapıldıktan sonra global eşikleme uygulanır.

$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y) \geq T(x, y) & 1 \\ f(x, y) < T(x, y) & 0 \end{cases} \quad T(x, y) = f_o(x, y) + T_o \quad (4.8)$$

Yukarıdaki ifadelerde; $f_o(x, y)$ görüntüsü f 'nin morfolojik açılımıdır ve T_o ise f_o 'a graythresh fonksiyonu uygulanması sonucu ortaya çıkan bir sabittir (Gonzalez vd., 2004).

4.2 MATLAB ile Görüntü İşleme ve Kenar Bulma (Edge-Detection)

Matlab görüntü işleme modülünün içerisinde yer alan “edge” fonksiyonu; herhangi bir dijital görüntüde yer alan objenin sınırlarını bulmak için kullanılabilir. Kenarları bulmak için görüntüdeki ani parlaklık değişimlerini izler. Bunu gerçekleştirirken; parlaklığın birinci türevinin hangi bölgede şiddetini aştığına ve parlaklığın ikinci türevinin nerede sıfıra geçtiğine bakar.

“edge” birkaç tahmin edici (kestirici) için yatay, düşey yada her iki kenara hassas olanı belirlenebilir. “edge” kenarı bulduğu yere 1, arka zemine 0 değerini atar.

En güçlü kenar bulma metodlarından olan Canny’yi kullanır. Diğer metodlardan farkı, iki değişik eşik değeri kullanarak kuvvetli ve zayıf kenarları ayıklayabiliyor olmasıdır.

Aşağıda Canny operatörünün, kenar tayininde Sobel ile mukayesesi ortaya konulmaktadır.

Görüntüyü (Şekil 4.8) okuyup, göstermek için;

```
I = imread('coins.png');
```

```
imshow(I)
```



Şekil 4.8 Canny kenar bulma operatörü uygulaması (orijinal görüntü) [3]

Bu görüntüye Sobel ve Canny kenar dedektörleri tatbik edilmesi için;

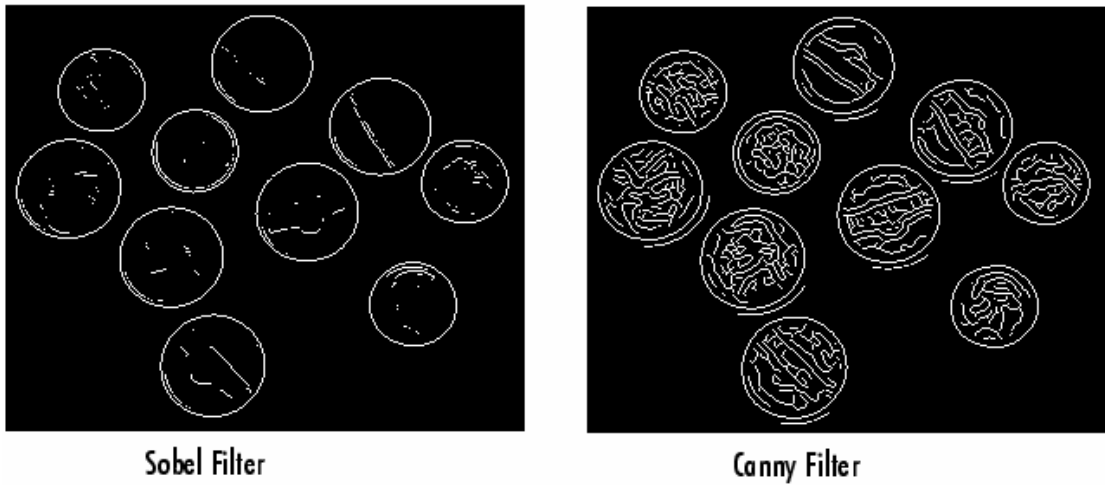
```
BW1 = edge(I,'sobel');
```

```
BW2 = edge(I,'canny');
```

```
imshow(BW1)
```

```
figure, imshow(BW2)
```

fonksiyonu yazılıp çalıştırıldığında Şekil 4.9'daki pencere ekrana gelir.



Şekil 4.9 Sobel ve Canny operatörlerinin karşılaştırılması [3]

4.2.1 MATLAB Programı ile Kontur Çizme (Contouring)

```
imcontour(I)
```

```
imcontour(I,n)
```

```
imcontour(I,v)
```

```
imcontour(x,y,...)
```

```
imcontour(...,LineStyle)
```

```
[C,h] = imcontour(...)
```

Açıklama:

`imcontour(I)` komutu; I olarak tarif edilen bir intensity –gri renkli resim- görüntünün

konturlarını çizer, otomatik olarak eksenlerin birbirine göre oryantasyonunu ayarlar ve görüntüye göre büyütme/küçültmeyi tamamlar.

`imcontour(I,n)` komutu; yukarıda bahsedilenin aynısını gerçekleştirir. Burada `n`, çizimdeki eşit aralıklı kontur seviyesi sayısını gösterir. Eğer bu parametreleri dikkate almazsan, program katman sayısı ve bunların değerlerini otomatik olarak atar.

`imcontour(I,v)` komutu ise; `v` vektörüyle belirtilen verilere göre `I` resmine ait konturları çizer. Kontur katmanlarının sayısı `v` boyuna eşittir.

`imcontour(x,y,...)`; `x`- ve `y`- eksen sınırlarını göstermek için; `x` ve `y` vektörlerini kullanır.

`imcontour(...,LineStyle)`; çizgi tipini ve `LineStyle` ile belirtilen renkleri kullanarak kontur çizer. Marker sembolleri ihmal edilmiştir.

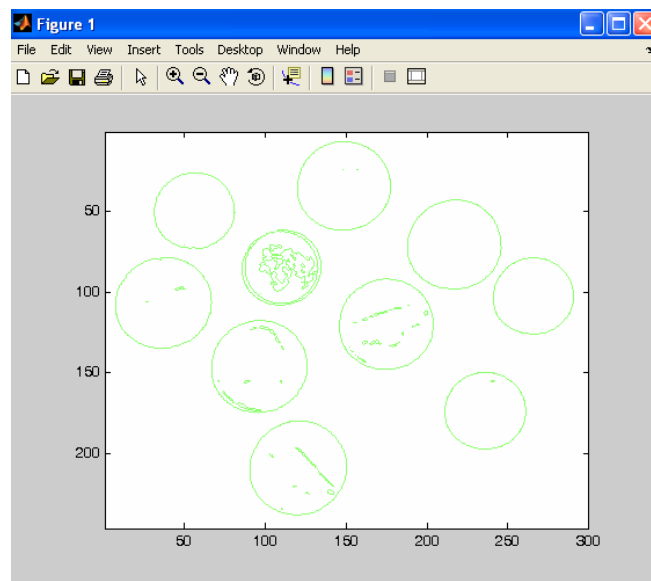
`[C,h] = imcontour(...)` ; konturu `C` matrisine ve grafikteki nesneye yönelen vektöre dönüştürür (nesne gerçekte patch/kafeslerden oluşmaktadır ve doğrular kafesin kenarlarıdır).

Girdi görüntüsü 8 bitli, 16 bitli, tekli, çift, veya lojik/mantıksal sınıftan olabilir.

Örnek (Şekil 4.10):

```
I = imread('coins.png');
```

```
imcontour(I,1)
```



Şekil 4.10 “Contour” fonksiyonu ile görüntü işleme

4.2.2 Sınır Takibi (Boundary Tracing)

MATLAB Toolbox, ikili siyah-beyaz (binary) görüntülü nesnelerin sınırlarını/kenarlarını bulmak için iki fonksiyon sunmaktadır; *bwtraceboundary* ve *bwboundaries* .

bwtraceboundary fonksiyonu; görüntüdeki nesneye ait sınır piksellerinin koordinatlarını, satır ve sütun haline dönüştürür. Ancak, nesne üzerinde takibe başlama noktası olarak sınır pikselinin yeri belirtilmelidir.

bwboundaries fonksiyonu; görüntüdeki nesneye ait sınır piksellerinin koordinatlarını, satır ve sütun haline dönüştürür.

Her iki fonksiyon da; nesnedeki binary görüntüye ait sıfır olmayan pikseller ile arka zemini oluşturan 0 (sıfır) değerleri pikseller için kullanılır.

Aşağıdaki örnekte “*bwtraceboundary*” fonksiyonu; binary görüntüdeki nesnenin sınırını takip etmek için ve sonra “*bwboundaries*” görüntüdeki nesnenin tümünü çevreleyen sınırları takip etmek için kullanılmıştır.

Görüntüyü okuyup ve ekrana yansıtmak için ;

```
I = imread('coins.png');
```

```
imshow(I)
```

Görüntüyü binary hale sokmak için;

```
BW = im2bw(I);
```

```
imshow(BW)
```

İzlenmesi istenen nesne sınırında yeralan piksellerin koordinatları satır ve sütunlar halinde belirleyebilmek için, “*bwboundary*” başlangıç noktasının yerini kullanır:

```
dim = size(BW)
```

```
col = round(dim(2)/2)-90;
```

```
row = min(find(BW(:,col)))
```

Belirtilen bir noktadan itibaren sınırı takip etmek için “bwtraceboundary” komutu çağırılır. Bu işlemi gerçekleştirmek için; bir binary/ikili görüntü, başlangıç noktasının koordinatları ve ilk adımın yönü belirtilmelidir. Örnekte ('N') kuzeyi göstermektedir

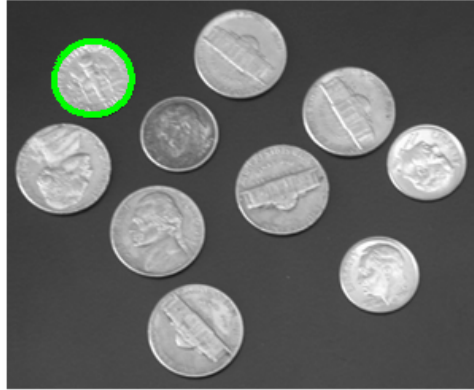
```
boundary = bwtraceboundary(BW,[row, col],'N');
```

Ekran orijinal gri seviyeli görüntüyü yansıtır ve bundaki sınır çizmek için “bwtraceboundary” tarafından oluşturulan koordinatları kullanır (Şekil 4.11).

```
imshow(I)
```

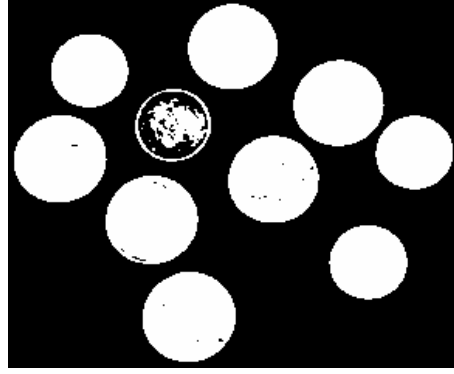
```
hold on;
```

```
plot(boundary(:,2),boundary(:,1),'g','LineWidth',3);
```



Şekil 4.11 Matlab’te sınır takibi uygulaması [3]

Şekil 4.8’de yearalan fotoğraftaki madeni paraların kenarlarını takip etmek için “bwboundaries” fonksiyonunu kullanırız. Bu örnek çalışmada kullanılan görüntüde bazı parçalar karartılı çıkmıştır ve bwboundaries komutunun bunları ayrı birer obje gibi algılamaması için, her birinin içlerinin “imfill” komutuyla doldurulması gereklidir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Morfolojik görüntü işleme komutu “imfill” uygulaması [3]

```
BW_filled = imfill(BW,'holes');
```

```
boundaries = bwboundaries(BW_filled);
```

“bwboundaries”, görüntü içerisindeki nesnelere ait satır/sütun koordinatlarını bir hücre dizisine dönüştürür ve bundan faydalananarak orijinal gri skaladaki parçaların sınırlarını çizer.

```
for k=1:10
```

```
    b = boundaries{k};
```

```
    plot(b(:,2),b(:,1),'g','LineWidth',3);
```

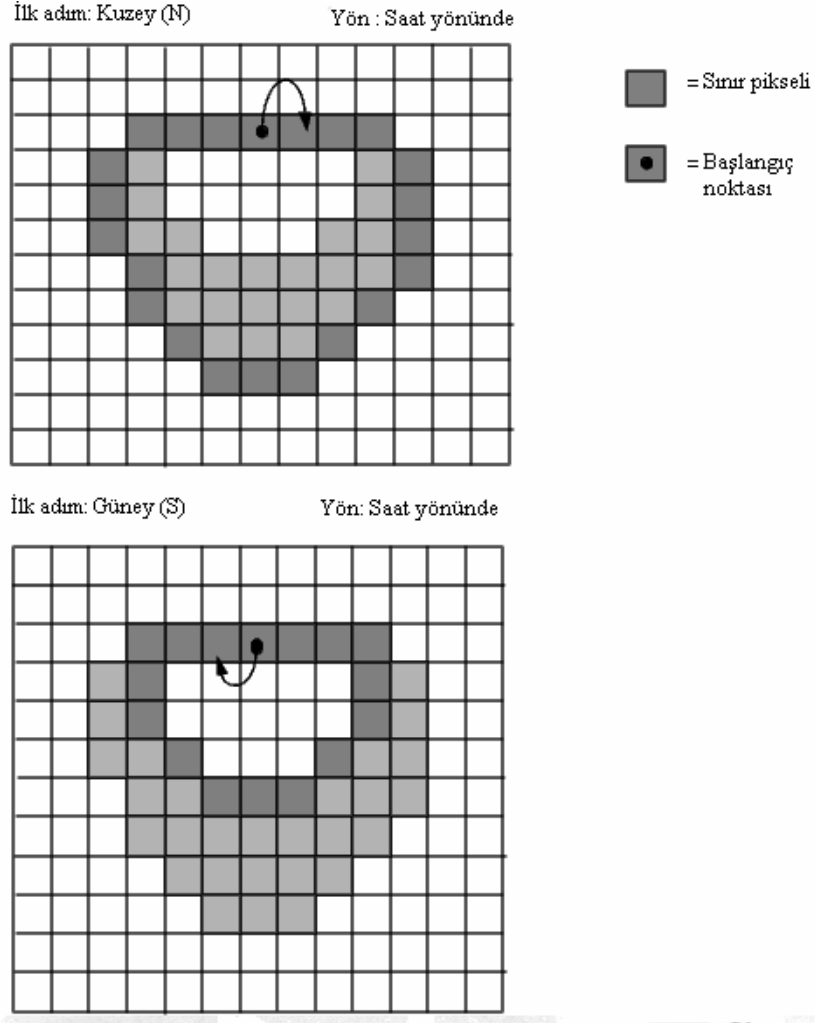
```
end
```

Kenar takibini başlatmak için ilk adımın ve yönünün seçimi

Belli bir nesne için, başlangıç noktası olarak seçilecek kenar pikseli ve yönü (kuzey, güney gibi) olarak adlandırılan ilk adım parametrelerine dikkat edilmelidir.

Örneğin, üzerinde bir delik içeren bir nesne ile çalışıyorsanız, nesnenin ince parçası üzerinde bir piksel seçerseniz, ilk adım için seçilecek yöne bağlı olarak nesnenin dış sınırını ya da

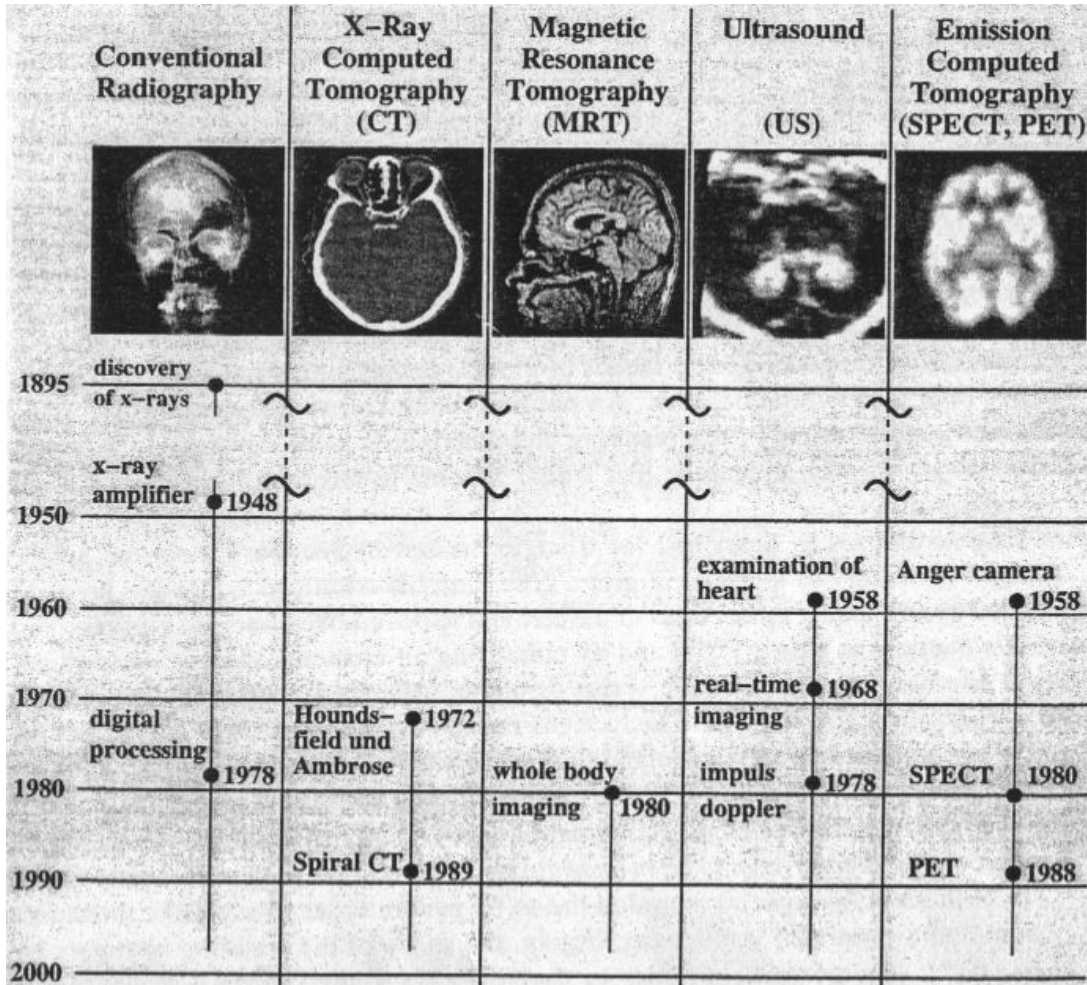
deliğin içini takip edebilirsiniz. Dolu objeler için yön seçimi parametresi çok önemli değildir (Şekil 4.13). [3]



Şekil 4.13 Kenar takibinde yön seçimi [3]

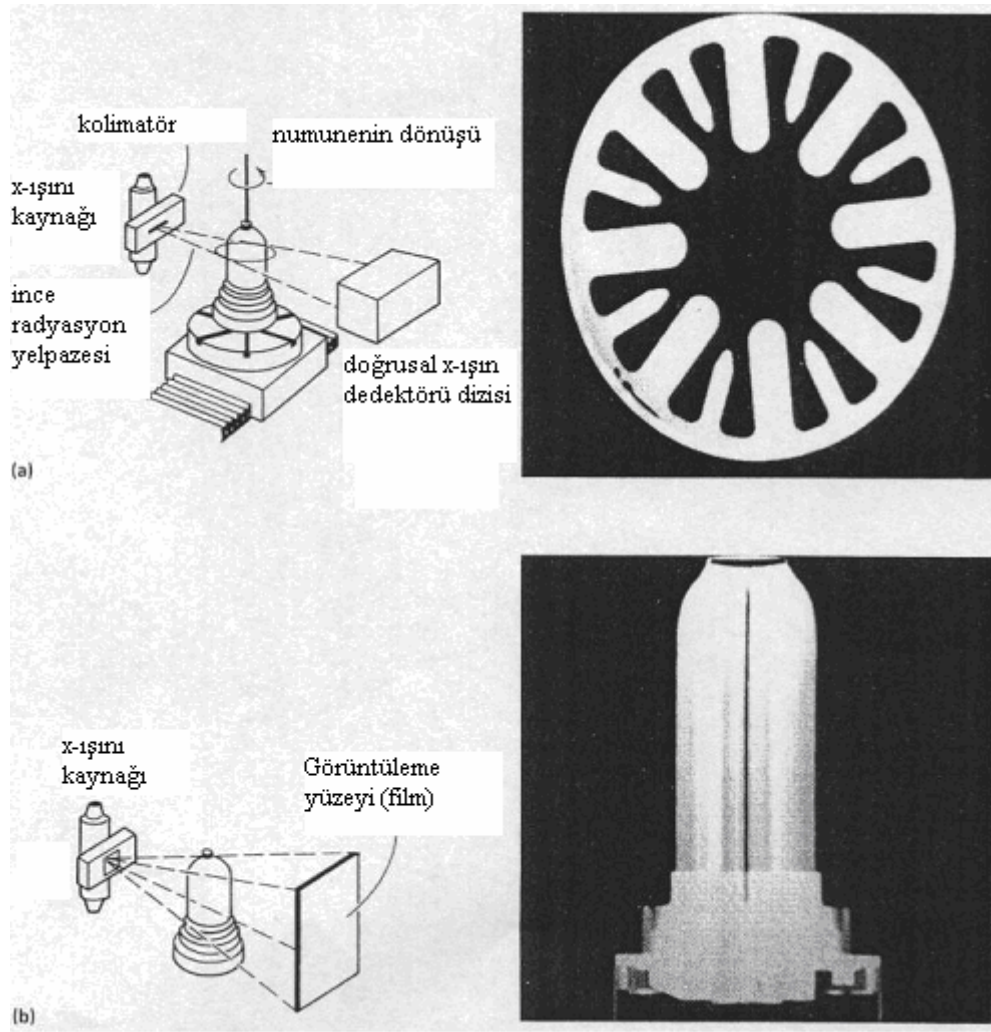
5. MEDİKAL GÖRÜNTÜLEMENİN FİZİĞİ VE BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ

Tomografi klinik uygulamaların vazgeçilmez diagnostik aygıtıdır. CT; vücudu dilim dilim bölmek suretiyle iç derinliklerine kadar görüntüleme imkanı sunan yegane sistemdir. 1972’de EMI Mark I adlı ilk CT tarayıcı baş inceleme amaçlı olarak kullanıldığında 80x80 piksel çözünürlüğünde (3 mm.lik pikseller) görüntü elde edilmiştir. O zamanlar her bir dilimin taranması için 4,5 dakika ve geriçatma için 1,5 dakika geçmesi gerekiyordu. Geometrisi, detektör teknolojisi, çoklu detektör dizileri ve X-ışını tüplerindeki teknolojik gelişmeler tarama operasyonlarının saniyeler mertebesine inmesine sebep olmuştur. Yaptıkları çalışmalardan ötürü Hounsfield ve Gormack’a 1979’da Nobel Ödülü verilmiştir. Modern CT’ler sadece tıp medikal sahada değil tahribatsız deneyler ve maden analizinde de faydalı hizmetler vermektedir. Spiral tomografinin gelişimi ancak 1990’ların başlarında gerçekleşmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Radyolojik görüntüleme tekniklerinin tarihsel gelişimi (Hastreiter, 2002)

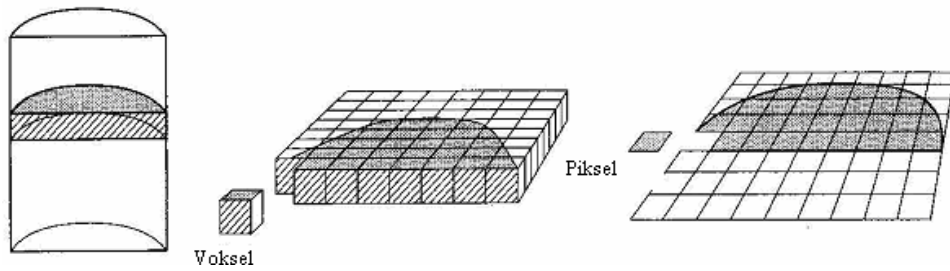
Petrol endüstrisi, medikal tıp tarayıcıları ilk kullanan sektör olmuştur. Bu tür cihazlar, hem hastane hem de işletmelerin laboratuvarlarında örneğin, karbon kompozit malzemelerin ve hafif alaşımlı metallerin iç yapılarının, tahribatsız muayenesinde kullanılmıştır. Endüstriyel CT sistemlerini, medikal sahada kullanılanlardan ayıran en büyük fark; daha büyük ve yoğun malzemeleri, yüksek enerjili X-ışın kaynağıyla, daha yüksek çözünürlükte ve imalat ortamında analiz edebiliyor olmasıdır. Askeri kaynaklı taleplerin de etkisiyle; 1970'lerin sonları ve 1980'lerin başlarına doğru Şekil 5.2'de gösterildiği gibi büyük roket motorları, uçak motorlarının küçük ama hassas döküm parçaları inceleme programına alınmıştır.



Şekil 5.2 Radyografi ile bilgisayarlı tomografinin mukayesesi (Dennis, 1992)

5.1 Bilgisayarlı Tomografinin Temel Prensipleri

CT'nin ilk matematik prensipleri 1917'de Radon tarafından ortaya konmuştur. "Plain film" görüntülemesiyle, 3D anatomik objelerden 2D izdüşüm görüntü elde edilebilir. Herhangi bir görüntü üzerinde verilen bir noktanın yoğunluğu, X-ışını fokal spot ile görüntü üzerindeki noktaya karşılık gelen dedektör üzerindeki nokta arasında uzanan objeye ait X-ışını zayıflama özelliğini ifade eder. CT görüntüsündeki 2D piksel –resim elemanı- dizisi, objedeki 3D voksellerin –hacim elemanı- sayısına karşılık gelir. Vokseller piksellerle aynı düzlemde yer alırken aynı zamanda dilimin enine boyutunu/kalınlığını da içerir. CT görüntüsündeki her bir piksel, voksele karşılık gelen dokunun ortalama X-ışını zayıflama özelliğini gösterir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 CT'den taranan bir diliminin görüntüsünü meydana getiren unsurlar (Dennis, 1992)

CT sisteminde görüntü oluşumu, tarama aşaması ile başlar. Bu aşama sırasında, görüntülenen vücut kesitinden geçen X-ışını demetinin izdüşümü alınır. Kesite yayılan radyasyon, bir dizi dedektör tarafından ölçülür. Dedektörler vücut kesitinin bütün bir görüntüsünü değil, sadece tek yönden sadece bir izdüşümü alabilmektedir. İzdüşüm bilgileri, her bir dedektörün ölçümünden meydana gelir. Bütün bir görüntünün oluşması için yeterli bilginin elde edilmesi amacıyla X-ışını demeti farklı açılardan görüntü elde etmek üzere vücut kesitinin etrafında döndürülür. Tipik olarak, birkaç yüz görüntü alınır ve her bir görüntünün izdüşüm bilgisi bilgisayar belleğinde saklanır. Tarama sırasında yapılan izdüşüm ölçümlerinin toplam sayısı, görüntü sayısı ve her bir görüntü içindeki ışın sayısının bir ürünüdür. Operatör tarafından seçilen tarama değişkenleri ve tarama mekanizmasının tasarımına bağlı olarak bir kesitin toplam tarama süresi yaklaşık olarak 1-15 saniye arasında değişmektedir. Genel olarak, görüntü kalitesi tarama süresinin artırılması ile iyileştirilebilir.

Görüntü oluşumunun ikinci aşaması (geriçatım) rekonstrüksiyondur. Bu işlem CT sisteminin bir parçası olan dijital bilgisayar tarafından gerçekleştirilir. Görüntü geri oluşturma, her bir görüntünün tarama datasının sayısal görüntüye dönüştürüldüğü matematiksel bir prosedürdür. Görüntü resim elemanları ya da pikseller dizisi içinde yapılandırılır. Her bir piksel, sayısal değer ya da CT sayısı ile temsil edilir. Her bir piksel için belirli bir değer, ilgili hacimsel elemanın, dokunun yoğunluğu ile ilgilidir. Geri oluşturma, görüntünün karmaşıklığına ve bilgisayarın yeterliliğine bağlı olarak birkaç saniye sürebilir. Daha sonra dijital görüntü, bilgisayar belleğinde saklanır.

Son aşama, dijital görüntünün, doğrudan izlenmesi yada filme kaydedilmesi için video görüntüsüne dönüştürülmesidir. Bu aşama, dijital dataları analog datalara dönüştürmeye yarayan elektronik bileşenler tarafından gerçekleştirilir. Piksel CT sayı değerleri ile görüntüdeki gri gölge yada parlaklık arasındaki ilişki operatörün seçtiği pencere seviyeleri ile belirlenir. Üst ve alt pencere seviyeleri seçilerek görüntülenen resmin parlaklık ve kontrastlığı ayarlamak mümkündür. Pencere ayarları tüm gri skala resme yayılan CT sayı aralığını belirler.

5.2 Medikal Görüntü İşleme ve Analiz Yazılımları

AIR, ANALYZE, ApX, AVS/Expres, IDL, Image-Pro Plus, IPLab IRIS Explorer, Khoros, MISDK/DCSDK/ Examinet, MICROMORPH, NIH, ROSS, Slicer Dicer, VIDA, Volvis, VTK gibi yazılımlarla, çok boyutlu biyomedikal görüntüleme ve bilimsel görselleştirme uygulamaları yapılabilmektedir (Spisz ve Bankman, 2000).

5.3 CT 'nin Yapısındaki Tarihsel Gelişimler

a) Birinci Jenerasyon: Döner/Ötelenir, Kalem Demeti

CT tarayıcıları bilgisayar donanımı, motor kontrol sistemi, X-ışını dedektörleri, sofistike geriçatım algoritmaları ve X-ışın tüpü yada jeneratörü gibi teknolojik unsurları bir araya getirir. İlk CT tarayıcılarında, sadece iki X-ışın dedektörü kullanılır ve X-ışınlarının transmisyonunu iki farklı dilim için ölçülürdü. Belirli bir açıdan başlayan, X-ışın tüpü ve dedektör sistemi, FOV (Field of View) görüntü alanında doğrusal bir ötelenmeyle; 24 cm.lik FOV boyunca 160 paralel ışını oluşturulur. X-ışın

tüpü/dedektörü ötelenme hareketini tamamladığında, tüm sistem yavaşça döner ve daha sonraki ötelenme, 160 ışının toplanacağı gelecek izdüşümü elde etmek üzere kullanılır. Bu prosedür 1'er derecelik adımlarla 180 projeksiyon tamamlanıncaya kadar tekrarlanır. Bir başka deyişle toplam $180 \times 160 = 28,800$ ışın ölçülür. "Scatter rejection" etkisi kalem tipi ışın geometrisini birincil-jenerasyonlarda en avantajlı yöntem kılar.

b) İkinci Jenerasyon: Döner/Ötelenir, Dar Yelpaze Işını Demeti

CT tarayıcılardaki bir sonraki gelişme 30 dedektörün yan yana dizilmesiyle oldu. Alternatif olarak 10 derecelik dar açılı yelpaze kullanıldı. Prensipde tarama süresinin 30 kat azalacağı beklenirken; (600 ışın x 540 görünüm=324,000 veri noktası) görüntü kalitesini artıracığından zaman kazancı gerçekleşmedi. Birinci jenerasyona göre bir dilimin tarama süresi 18 sn.de yani 15 kez daha hızlı gerçekleşmiştir.

c) Üçüncü Jenerasyon: Döner/Döner, Geniş Yelpaze Işını Demeti

Birinci ve ikinci jenerasyon tarayıcılarda her bir öteleme hareketi sonunda X-ışın tüpü/dedektör sistemi durmak zorundaydı, tüm sistem döndükten sonra yine öteleme hareketi tekrar başlardı. Halbuki bu yeni jenerasyonda 800'den fazla dedektör kullanıldı ve yelpaze demetinin açısı, tüm objeyi kapsayacak şekilde daha geniş bir yay formunda dizilmiş dedektörlere karşılık gelecek şekilde, artırıldı. Mekanik olarak birbirine bağlı X-ışın tüpü ve dedektör dizisi, obje çevresinde öteleme olmaksızın dolaşır. Bu durum tarama zamanını 5 sn ve hatta yeni sistemlerde 1,5 sn.ye indirir.

d) Dördüncü Jenerasyon: Döner/Sabit

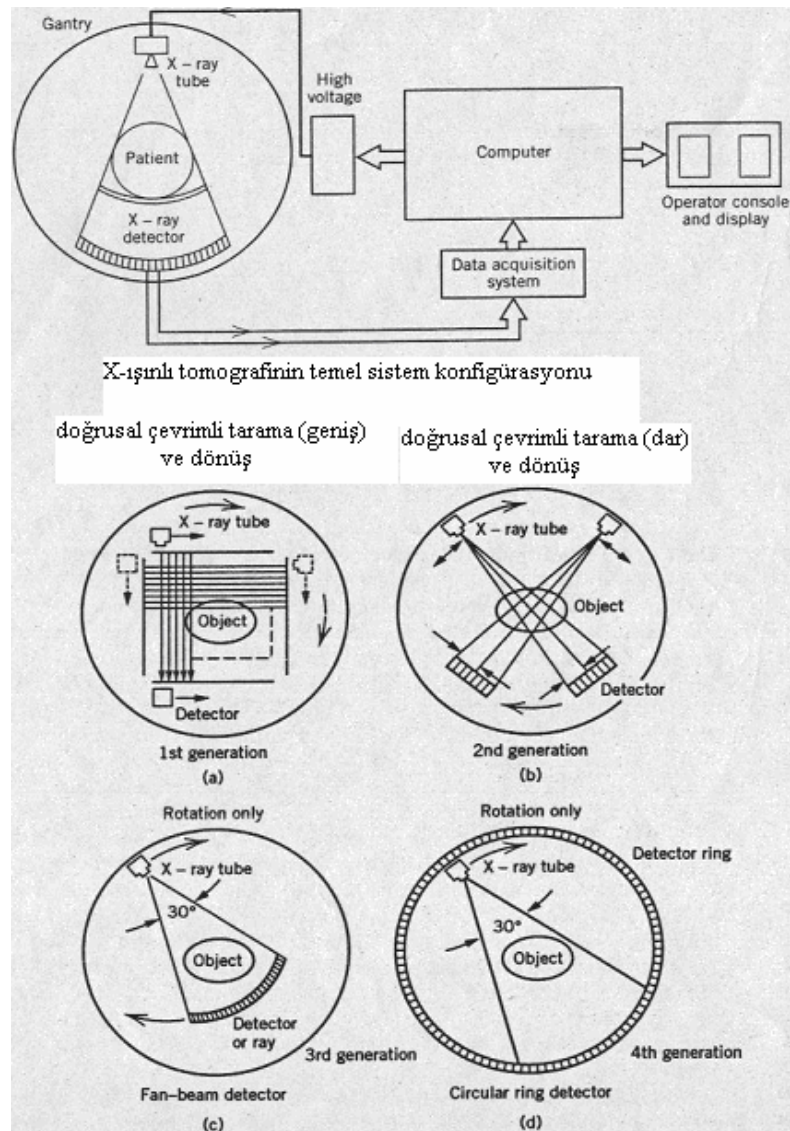
Üçüncü jenerasyon tarayıcılarda yaşanan halka artifaktları problemini bertaraf etmek için, 1970'lerin sonlarında dördüncü-jenerasyon tarayıcılar geliştirildi. Bu tip sistemlerde, objenin etrafında dönen çerçeve/köprü ile 360° açılı sabit halka yer değiştirildi. Modern sistemlerde 4,800 bağımsız dedektör bulunmaktadır (Şekil 5.4).

e) Beşinci Jenerasyon: Sabit/Sabit

Kardiyak tomografik görüntülemelerde bir çığır açan bu tip CT'lerde bilinen X-ışın tüpleri yerine büyük tungsten çemberler kullanılır. Tarayıcı çerçeve hareket etmez. Köprünün gerisinde vakumda üretilen elektron ışını konisi, her bir tungsten hedeften yansıyarak objenin etrafından geçerek veri toplayan dedektörlere ulaşır.

f) Altıncı Jenerasyon: Helisel

Üçüncü ve dördüncü jenerasyon CT geometrileri her ne kadar birinci ve ikinci jenerasyon tarayıcılarına nazaran ötelenme hareketini ortadan kaldırdıysa da; köprü her bir dilimde ölçüm yapıldıktan sonra durdurulması gerekiyordu. 1990'ların başlarında üçüncü ve dördüncü jenerasyon tarayıcılarda “kayan halka” teknolojisine geçilerek; kayan fırçalar sayesinde, döner çerçevenin obje etrafında serbestçe hareket etmesi sağlanmıştır.



Şekil 5.4 Birinciden dördüncü nesil tarayıcılara X-ışınlı tomografinin gelişim evreleri (Cho vd., 1993)

Helisel yada spiral CT’lerde; tabla hareket ettiği için, X-ışın kaynağı obje etrafında bir helis yörüngesi çizerek veri toplar. Planar kesitlerin geriçatımlarını oluşturabilmek için, helisel data setinden alınan ham data yaklaşık planar geriçatım data akuzyonuna interpolate edilir.

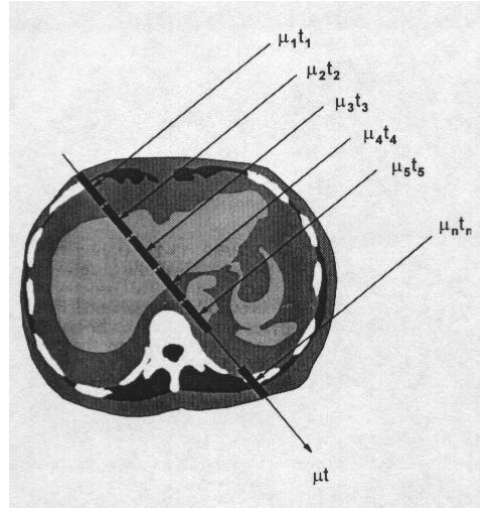
g) Yedinci Jenerasyon: Çoklu Dedektör Dizisi

Çoklu dedektör dizileri kullanıldığında, kolimatör boşluğu daha geniştir ve bu yüzden tüpte üretilen daha fazla X-ışını görüntüyü oluşturmakta kullanılır. Tek dedektör dizili konvansiyonel sistemlerde, kolimatör/yönlendirici dilim kalınlığını artıracak şekilde aralanacağından X-ışın demetinin etkisi artar ancak dilim kalınlığı ölçüsünde temel çözünürlük düşer; oysa çoklu dedektör dizisine haiz CT tarayıcısında, dilim kalınlığı kolimatöre değil dedektör boyutuna bağlı olarak belirlenir (Bushberg vd., 2001).

Tarama İşlemi

Tarama işlemi bir CT görüntüsünün oluşumunun ilk adımıdır. Tarama fazı boyunca görüntüyü tekrar geri oluşturacak datalar toplanır. Tarama işlemi X-ışını demetinin vücut boyunca döndürülmesi ve birçok farklı bölgeden vücuda gönderilen X-ışınlarının geri toplanmasından oluşmaktadır. Bir tarama yüz binlerce izdüşüm ölçümünün ve örneğinin toplanmasından oluşmaktadır. Şekil 5.5’te gösterildiği gibi bir ışıın, X-ışın demetinin bir parçasını oluşturmaktadır. Tipik olarak bir ışıın vücut kesitinden geçerken ışıınla gelen radyasyon doku boyunca emilir. Emilim oranı yol boyunca lineer zayıflama katsayısına ve ışıının foton yoğunluğuna bağlıdır. Dokuyu blok olarak parçalara ayırdığımızı düşünürsek her parça birbirinden farklı zayıflama katsayılarına bağlıdır.

$$\mu t = \mu_1 \Delta t + \mu_2 \Delta t + \mu_3 \Delta t + \dots + \mu_n \Delta t = \Delta t [\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots + \mu_n] \quad (5.1)$$



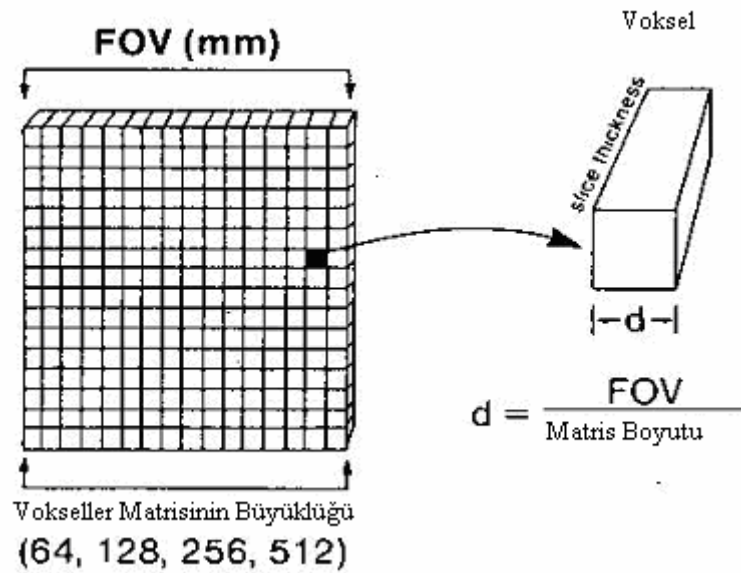
Şekil 5.5 X-ışının toplam zayıflama katsayısı (Bushberg vd., 2001)

Prensip olarak dokunun her bloğu X-ışının zayıflama katsayısına bağlı olarak zayıflatır. (5.1) eşitliğinde belirtilen toplam zayıflama, yol boyunca her bir dokunun zayıflama katsayılarının toplamına bağlıdır. Bir ışının vücut boyunca izdüşümü toplam zayıflamanın o yol boyunca, ölçülmesini sağlamaktadır. Ölçüm, ışın boyunca dokunun her bir hacimsel elemanının zayıflama katsayısını yansıtmaktır. Tek bir ölçüm ile her bir hacimsel elemanının zayıflama katsayılarının hesaplanması mümkün değildir. Bir çok farklı açıdan ışın göndererek alınan her bir ölçüm ile her bir dilim için zayıflama katsayıları hesaplanır. Işınlardan gönderildiği yer ışınların toplandığı ortak bir noktadır. Dedektör konfigürasyonuna göre nokta tek bir odak noktası ya da bir çok farklı noktadan oluşabilir.

Üçüncü jenerasyon dedektör konfigürasyonlarına sahip tarayıcılarda ışınların gönderildiği yer dedektörlere göre tek bir odak noktasıdır. Tek bir ışın göndermek gerçekten hızlı ve tekrar edilen işlemler X-ışın tüpünün, dedektörlerin vücut etrafında döndürülmesi ile oluşur. Vücudu geçen ışınlardan eş zamanlı olarak izdüşüm edilir. Dördüncü jenerasyon dedektör konfigürasyonlarına sahip tarayıcıların bu sistemden temel farkı budur. X-ışını tüpü hareket ettikçe sırayla ışınlardan geri izdüşüm edilir. Toplam ölçümler ve alınan örnekler, bir tarama sırasında gönderilen ışın sayısına ve gönderilen açığa bağlı olarak değişmektedir. Bu rakamlar bir tarama cihazından diğerine operatörün seçtiği tarama faktörlerine bağlı olarak değişmektedir. Prensip olarak ölçüm parametreleri artırıldıkça görüntü kalitesi ve tarama zamanı artmaktadır. Bir taramada yaklaşık olarak ölçüm tipik olarak 500.000 ila 1.5 milyon arasında değişmektedir.

Görüntü Oluşturma

CT görüntü oluşturma vücut boyunca geçerek zayıflayan X-ışınlarından elde edilen izdüşüm ölçümlerinin dijital ortama aktarılmasıdır. Görüntü piksel elemanlarından oluşan dizilerle ifade edilmektedir ki 64x64 pikselden 512x512 piksele değişmektedir. Matris boyutu tarama işleminden önce operatör tarafından seçilmektedir. Piksel boyutu 'd' ise görüntü kalitesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Görüntüdeki her piksel gerçekte vücudun görüntülenen bölümündeki bir hacim elemanını yansıtmaktadır. Şekil 5.6'da gösterildiği gibi matris boyutu, görüntülenen alan (FOV) ve kesit kalınlığını dolayısıyla hacim elemanının boyutunu etkilemektedir.



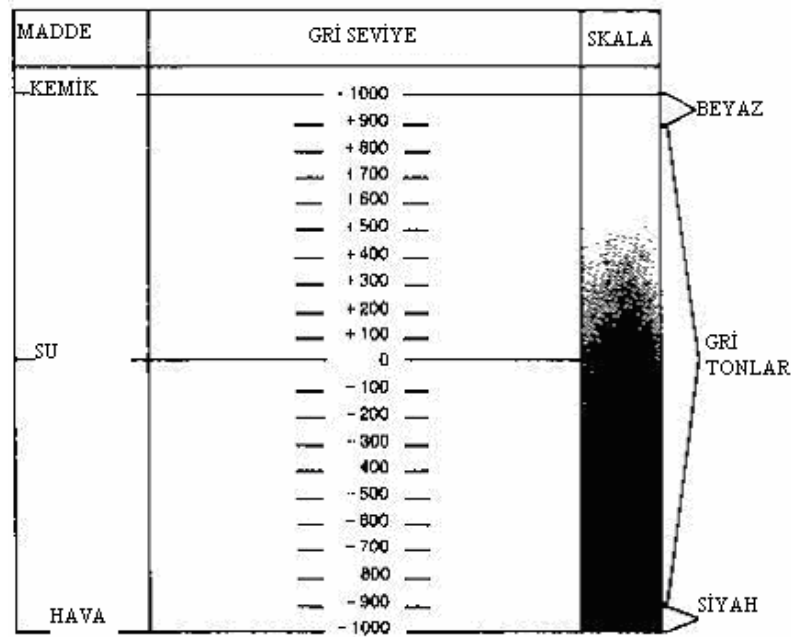
Şekil 5.6 Piksel boyutunu etkileyen faktörler (Seeram, 2001)

Hacimsel olan bölge matris boyutuna bölünmektedir. Örnek olarak görüntülenen 25.4 cm.lik 256 matrislik alan 1 mm.lik derinlik ve uzunluğa sahip dolu hacimsel elemanı yaratmaktadır. Matris boyutunun veya görüntülenen alandaki herhangi bir değişim her bir hacim elemanının boyutunu etkilemektedir. Tekrar yeniden oluşturulan görüntüde her bir piksel bir hacimsel elemanın lineer zayıflama katsayısına bağlı nümerik olarak ifade edilmektedir. Prensipte yeniden oluşturma işlemi ilk önce hacim elemanındaki zayıflama katsayılarının hesaplanması

ve daha sonra bu bilgiyi görüntüdeki piksel değerine çevirme sistemine dayanmaktadır. Bir çok CT sistemi Hounsfield birimlerini kullanmaktadır (Şekil 5.7). CT numarası ile ona denk gelen zayıflama katsayısı arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$CT \text{ sayısı} = (\mu_{doku} - \mu_{H_2O}) / (\mu_{H_2O}) \times 1000 \quad (5.2)$$

Su CT sayısı belirlemede en çok kullanılan maddedir. Suyun CT sayısı 0 olarak kabul edilmektedir. Zayıflama katsayıları sudan daha büyük olanlar pozitif, küçük olanlar ise negatif CT sayısına sahiptir CT tarayıcıları dokularla Compton etkileşimi için genellikle yüksek gerilimlerde çalışmaktadır. Compton etkileşimlerini lineer z katsayıları m yoğunluğuna göre değişmektedir. Bu yüzden yumuşak CT rakamları doku yoğunluğu ile birlikte doğrudan alakalıdır. Sudan daha az yoğunluğa sahip bir doku elamanı negatif CT numarasına sahiptir.



Şekil 5.7 CT sayısı ile ± 1000 skalası için parlaklık değeri (gri skala) arasındaki ilişki (Seeram, 2001)

Pozitif CT rakamı ise doku yoğunluğunun sudan daha fazla olması anlamına gelmektedir. Sistem kalibrasyon faktörleri ve kullanılan farklı X-ışını enerjisi (kV ve filtreleme) aynı dokunun farklı taramalarında farklı CT numarası vermesine neden olmaktadır. Aynı CT tarayıcısından alınan belli bir dokuya ait CT numaraları zamandan zamana görüntülenen

görüntüdeki yerine göre değişebilmektedir (Arslan, 2005).

Tomografide Veri Toplama

Tek bir dedektör tarafından, belli bir anda objeden geçen tekil transmisyon ölçümüne ışın denilir. Aynı oryantasyonda objenin içinden geçen ışın demetine projeksiyon ya da görünüm adı verilir. İki temel ışın geometrisinden; paralel ışın demetinde projeksiyondaki her bir ışın diğerlerine paraleldir. Tüm modern CT tarayıcıları süpürme işlemi; yelpaze ışın geometrisinde verilen bir projeksiyon açısı boyunca yapılır. CT donanımında amaç, objeden farklı konumlar boyunca, mümkün olduğu kadar fazla miktarda transmisyon ölçümü toplayabilmektir. Herhangi bir aksiyal CT görüntüsünün oluşturulması için; 1000 farklı pozisyon açısında alınan yaklaşık 800 ışın ile yaklaşık toplam 800,000 transmisyon ölçümü yapmak gerekir. Bir sonraki dilimin aksiyal akuzyonundan önce, cihazın z eksenini boyunca konumlandırılan obje yavaşça hareket ettirilir.

Tomografik Geriçatım

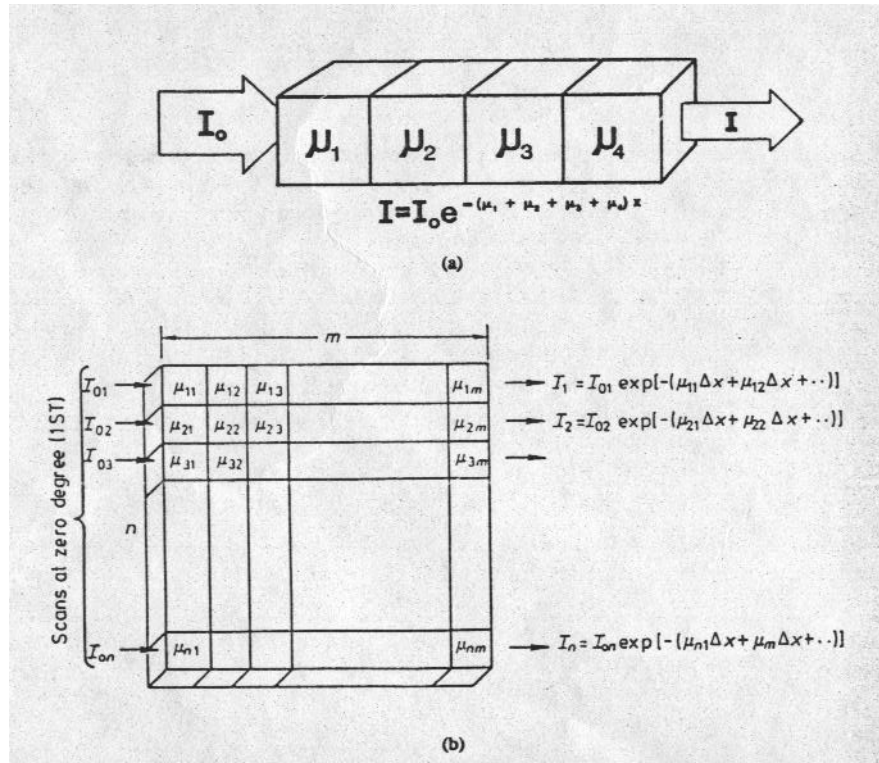
CT'de obje içinden belli bir hat boyunca geçirilen her bir transmisyon ölçümünde dedektörlerin tespit ettiği değer X-ışınının I_t yoğunluğudur. Ayrıca X-ışın demetinin zayıflama kuvveti, referans dedektör tarafından tarama esnasında ölçülür ve bu I_0 X-ışını yoğunluğunu yakalar. I_t ile I_0 arasında aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

$$I_t = I_0 e^{-\mu t} \quad (5.3)$$

Burada t , ışın boyunca objenin kalınlığı ve μ de ortalama lineer zayıflama katsayısıdır. I_t ve I_0 cihaza bağlı parametreler olup μ ise objenin malzeme içeriğine bağlıdır. Denklem tekrar düzenlenecek olursa;

$$\ln(I_0 / I_t) = \mu t \quad (5.4)$$

Mukayese etmek gerekirse, radyograf filmi poz-altı seviyesi altında (I_0 çok düşük) çok beyaz ve eğer poz-üstü seviyesindeyse (I_0 çok yüksek) çok koyu görünür (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Zayıflamaya maruz kalmış X-ışın demeti ve iki boyutlu lineer zayıflama katsayıları matrisi (Cho vd., 1993)

Ham datanın önışlemden geçmesinden sonra, herhangi bir CT geriçatım algoritması CT görüntüsü oluşturmak için kullanılır.

5.4 CT Rekonstrüksiyon Teknikleri

Farklı tarama açılarından alınan bir boyutlu radyasyon ölçümlerinden 2D görüntü üretir. Rekonstrüksiyon algoritmaları iki grupta toplanabilir:

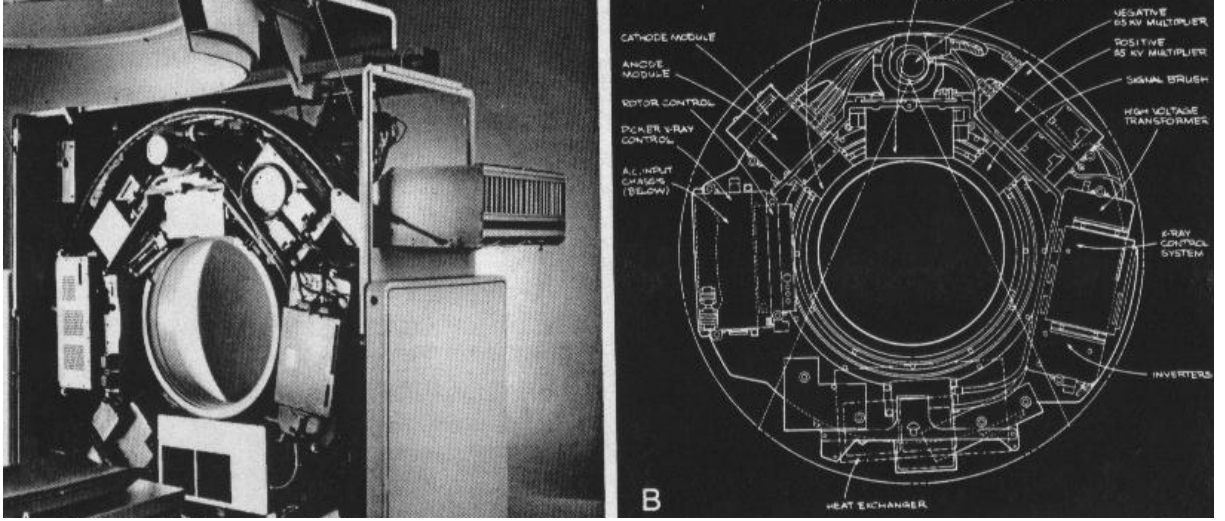
Transform Teknikleri: Radon Teoremini esas alan bu teknikte; herhangi iki boyutlu dağılım, doğru integral setinin sonsuza giden sınır içerisinde, dağılım boyunca yeniden oluşturulabilir. (CT'deki bir doğru integrali, eninde kesit uzunluğundan geçen tek yönlü radyasyona ait doğrusal zayıflama katsayılarının toplamıdır.)

İteratif Teknikler: Genel olarak cebirsel yöntemlerdir ve 2D görüntüyü, neye benzeyebileceğinin başlangıç tahmini üzerinde iteratif düzeltmeler yaparak yeniden oluştururlar. Bu metotlar, sınırlı veri bulunması hali (ki birçok tarama açılarından toplanan

projeksiyon tekniği daha çok tercih edilmektedir.

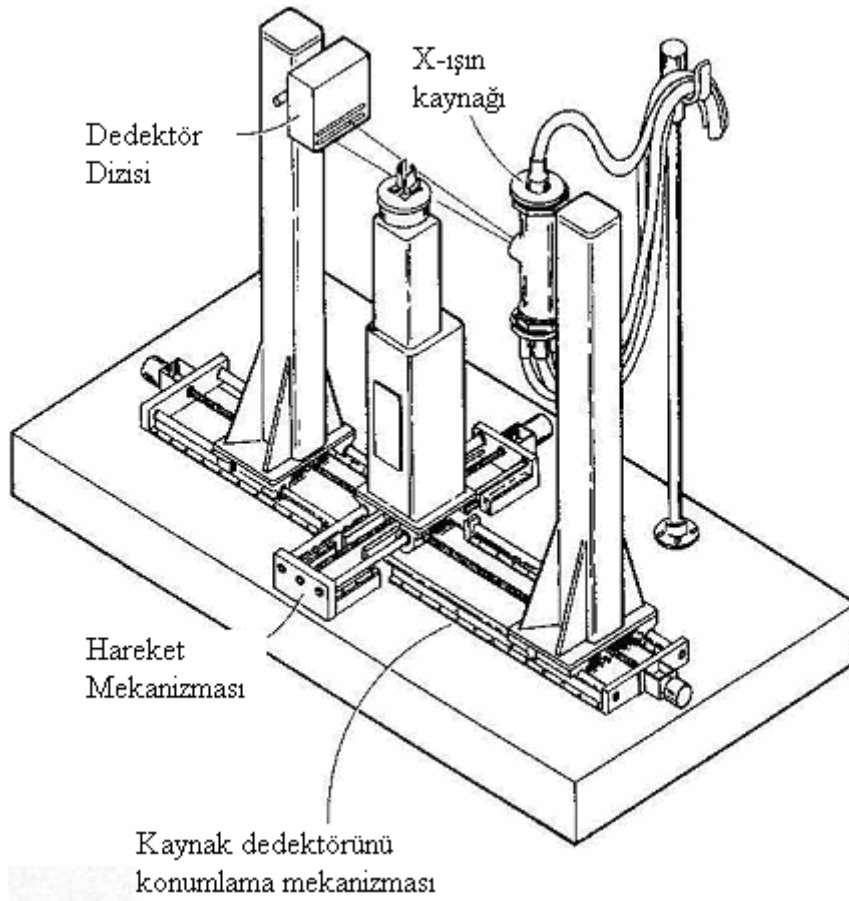
5.5 Tomografi Tarayıcısının İç Yapısı ve Endüstriyel Tomografi Cihazları

CT tarayıcısından görüntü üretmek için temel olarak; X-ışını jeneratörü, X-ışın tübü, kolimatör, ‘gantry’ (Şekil 5.10) düzeneği, dedektörler, nesneyi taşıyan tabla ve görüntüleme ekranı, veri kayıt birimlerini içeren bir teknolojik donanıma gerek duyulur.



Şekil 5.10 X-ışın tüpü, jeneratörü ve dedektörü içinde bulunduran ganrtı kabini
(Seeram, 2001)

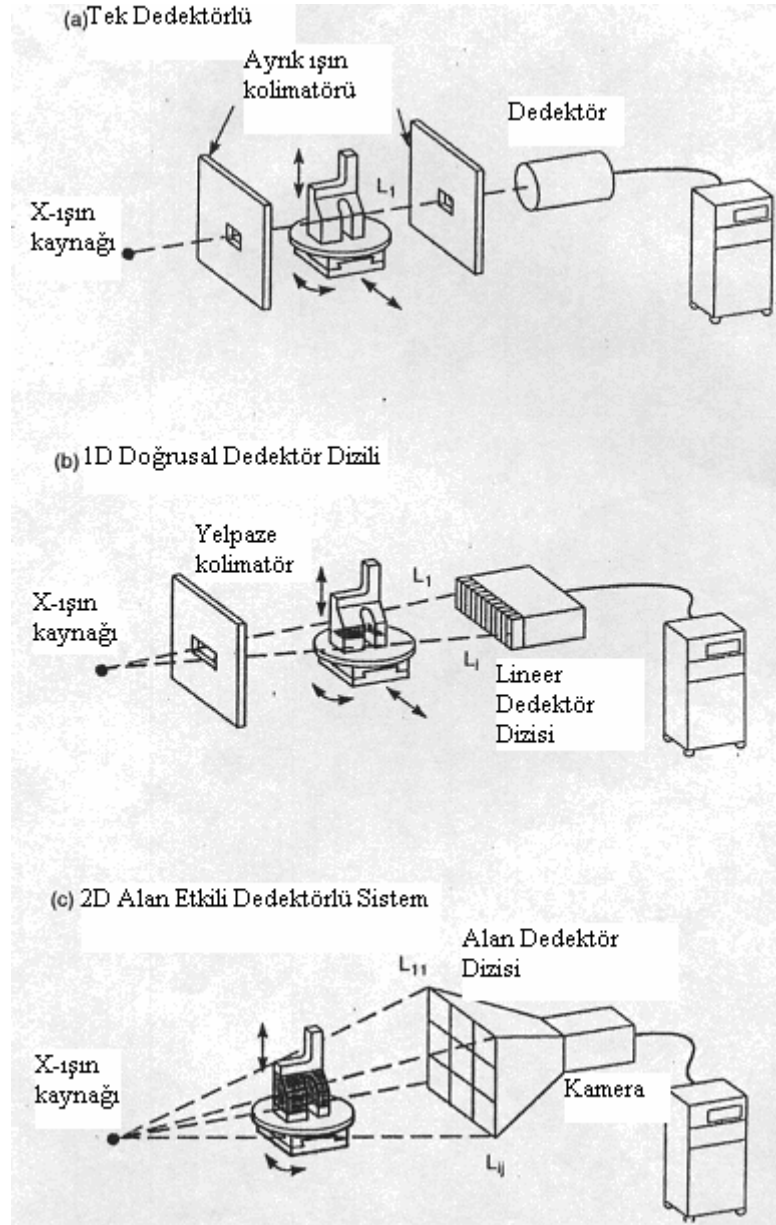
Şekil 5.11’de ise 300 mm çapa ve 600 mm boya kadar olan büyük endüstriyel amaçlı parçaların tahribatsız muayenesi ve boyut analizi için tasarlanmış bir tomografi görülmektedir.



Şekil 5.11 Endüstriyel CT ve DR tarayıcısı (Dennis, 1992)

Veri toplama geometrisi bakımından endüstriyel tomografiler üç ana sınıfa ayrılır:

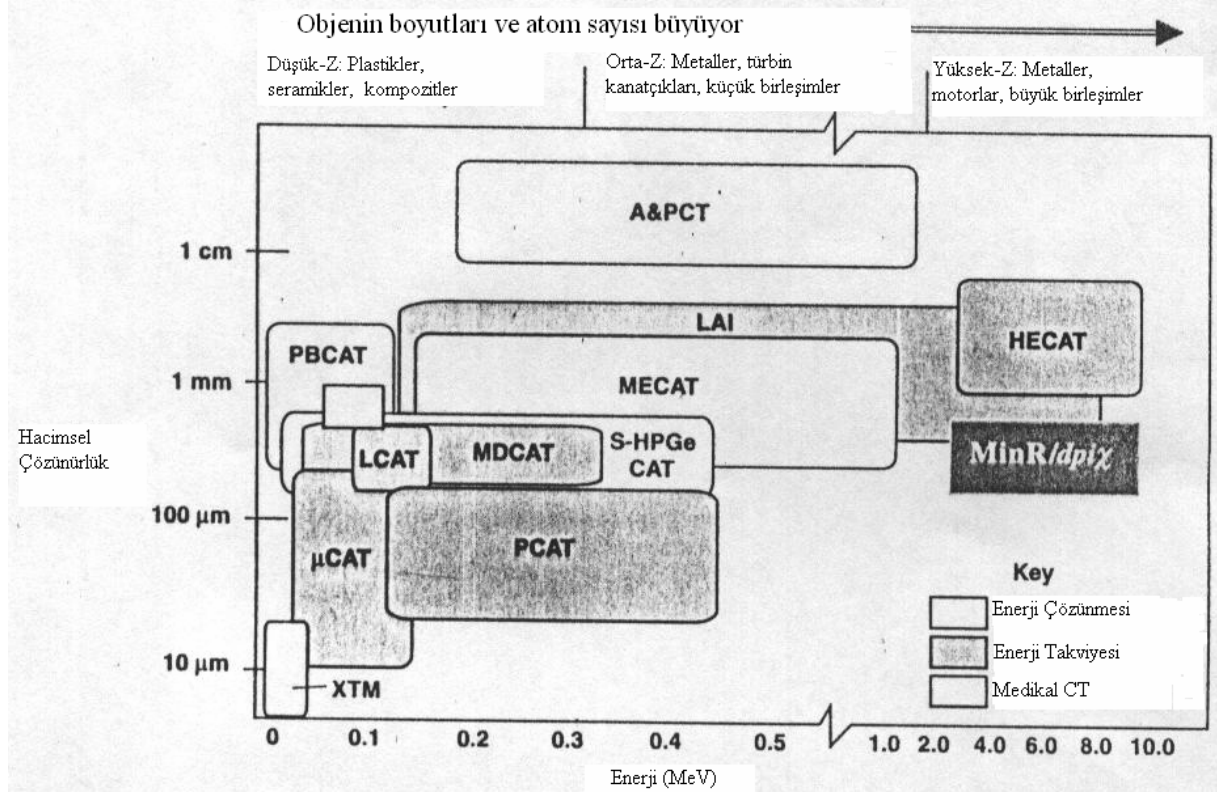
- Birinci nesil; ayırık ışıın sınırlayıcılı, ilerleyen/dönen tipte tek dedektörlü tarayıcılardır.
- İkinci nesil; ince yelpaze huzmesi şeklinde sınırlandırılmış doğrusal dedektör dizisinden oluşur.
- Üçüncü nesil; geniş açılı konik ışıın demeti ve alan dedektörü yardımıyla tarama yapar. Birinci nesilden, farkı yatay hareket yerine olduğu yerde parçanın dönmesi yada tüp/dedektör sisteminin parçanın etrafında dolanmasıdır (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 Endüstriyel CT tarayıcılar ve data toplama çeşitleri (Martz ve Schneberk, 2001)

Medikal CT operatörleri tarama esnasında bazı zorluklarla karşılaşılır; az da olsa radyasyon alma tehlikesi ve hareketli organların çekimini yapmak gibi. Bununla birlikte muayene edilecek doku ya sert ya da yumuşak olacak şekilde sınırlıdır. Sert dokularda ya da kemik taramalarında yüksek enerjili X-ışının faydalanılır. Hacimsel hassasiyeti artırmak için daha fazla sınırlanmış bir ışın huzmesi, daha küçük dedektörler ya da daha çok veri toplayabilen bir tarama geometrisi seçilmelidir.

Endüstriyel nesneler, medikal sahadan çok daha geniş alana yayılmaktadır. İncelencek parça boyutları 1 mm.den 100 cm.ye kadar uzanır. Bu malzemeler, X-ışını daha az zayıflatan plastik malzemeler olabildiği gibi, plutonyum gibi yüksek zayıflatma katsayılarına sahip özel yapılarda bulunabilir. Böyle geniş bir enerji ihtiyacı gerektiren malzeme yelpazesi Şekil 5.13'te gösterilmiştir (Martz ve Schneberk, 2001).



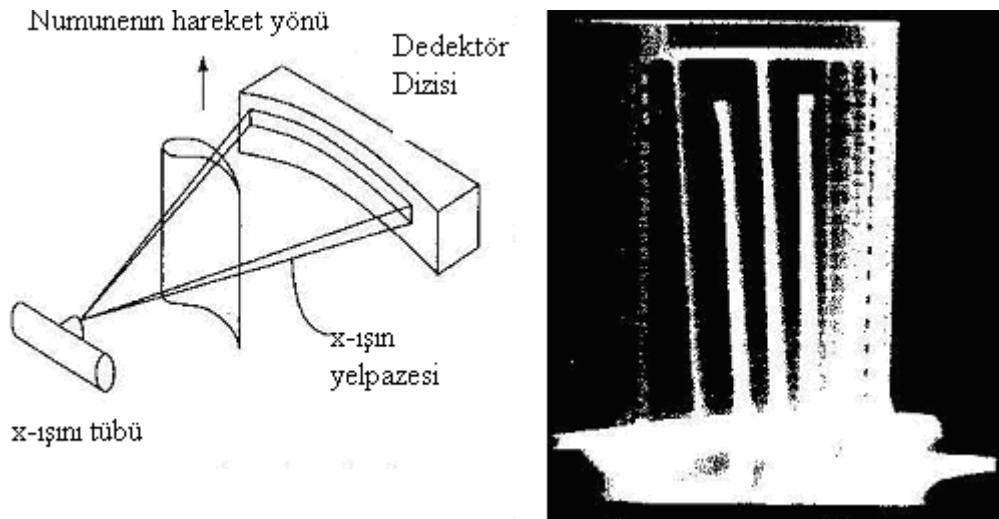
Şekil 5.13 CT tarayıcısında, malzemeye göre X-ışını enerjisi ve hacimsel çözünürlüğe ait performans diyagramı (Martz ve Schneberk, 2001)

5.6 CT Sisteminde Özel Teknikler

İlave donanım ile bir CT sistemi kesit görüntüsü vermekten daha ileri imkanlar sunabilmektedir. X-ışın kaynağı, dedektör ve manipülasyon sistemi konvansiyonel radyografik görüntü almayı sağlarken; görüntü işleme ve otomatik analiz yazılımları kullanan bilgisayar donanımı yardımıyla, dijital görüntüler toplanarak değerlendirilmektedir. Böylece, kesit verilerinden yola çıkarak 3D veri işleme, görüntü üretme ve analiz yapma imkanı bulunmaktadır.

5.6.1 Dijital Radyografi

CT ile muayeneyi sınırlayan unsurlardan biri de sınırlandırılmış bir hacme ait dilimlerin kesitleri üzerinden detaylı bilgi alınabilmesidir. Zira parçanın tümünün muayene edilmesi için çok fazla sayıda dilimin incelenmesi gerekecektir. Bu yüzden imalat operasyonları esnasında, CT ekipmanları genelde DR (Dijital Radyografi) modunda çalışma tercih edilirken; CT görüntüleme modu özel krtitik bölgeler için yada DR görüntüsünde tespit edilen belirtiler hakkında daha fazla bilgi edinmek için kullanılır (Şekil 5.14).



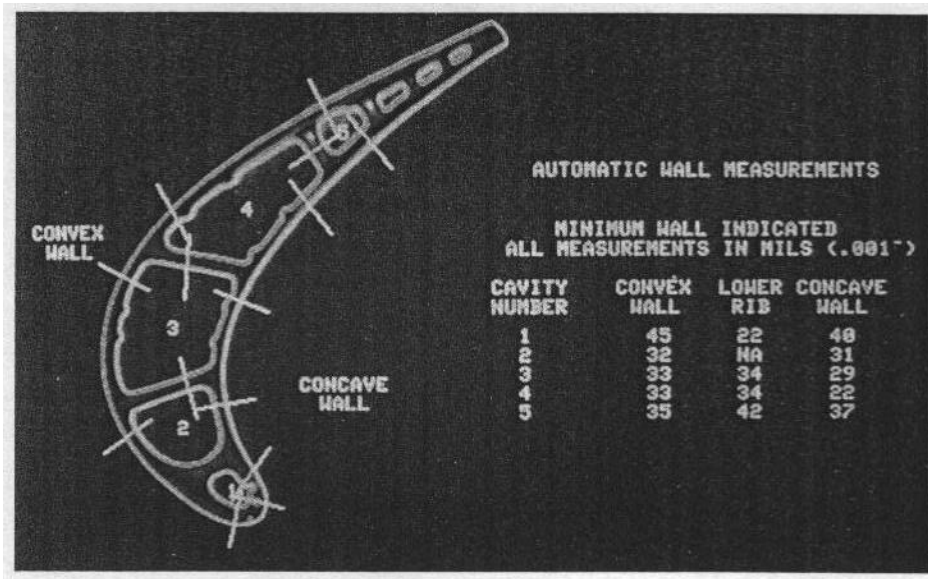
Şekil 5.14 Uçak motoru türbin kanatçığının dijital radyografisi (Dennis, 1992)

5.6.2 CT Sistemlerinde Görüntü İşleme ve Analizi

DR ve CT görüntüleri bir sayı matrisi formunda saklanabildiği için, bilgisayar, özel görüntü bilgilerini elde edebilmek, görüntü iyileştirmesi veya veri analizine destek vermek için, bir alet gibi kullanılabilir.

Ekranın Özellikleri: Ekran; özel görüntü bilgileri elde edebilmek için operatöre çok sayıda fonksiyon sunar. Cihazın bu bölümünde kullanılan program herhangi bir görüntü parçasını tarif ederken aynı zamanda ilgili kısmında yer alan piksel değerlerinden örneğin; minimum, maksimum ve ortalama CT sayısı değerlerini; CT sayılarının standart sapmasını yada incelenen bölgenin içerdiği piksel sayısını ve kapladığı alan bilgilerini bize sağlar. CT sayısı değerlerinin sıklığını (rölatif frekans dağılımını) bir histogram ile gösterebilir. Cursor yardımıyla; görüntü üzerinden aydınlatıcı bilgiler ile noktalar arası mesafe, doğrular arasındaki açılar ve koordinatların belirlenmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca, tarif edilen bir hat boyunca tespit edilen CT sayılarından bir profil çizdirilebilmektedir.

Görüntü İşleme: Görüntü sınırlarının iyileştirilmesi ve parazitlenmeyi azaltmak için yumuşatma işlemleri yapılır. Görüntüyü netleştirmek için lineer operasyonlar yada filtreler kullanmakla birlikte, görüntü gürültüsü artacaktır ve yumuşatma filtreleri ise hem gürültüyü hem de bulanıklığı azaltır yada görüntünün keskinliğini düşürür. Lineer olmayan işleme teknikleri görüntü iyileştirme yada yumuşatmada da kullanıldığı gibi aynı zamanda, işlemeyi bozacak etkileri minimize eder. Medyan filtreleme ve yumuşatma gibi lineer olmayan teknikler istatistik olarak birbirine benzer piksel değerleri ile sınırlıdır; her iki teknik de kenar konturlarının keskinliğini korurken, görüntü gürültüsünü düşürür.



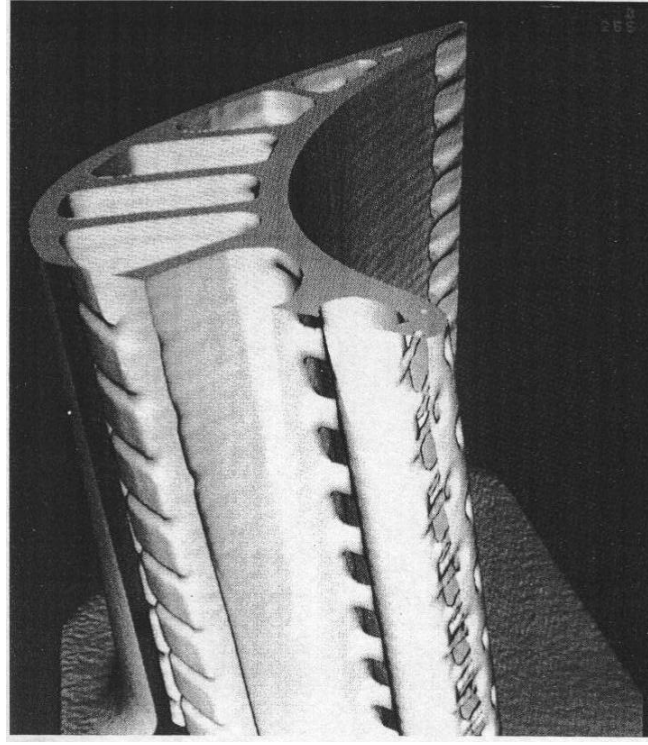
Şekil 5.15 CT’de enine kesit görüntüsü üzerinden otomatik cidar kalınlığı ölçümü
(Dennis, 1992)

Görüntü Analizi: Dijital görüntüler, farklı yapıları ortaya çıkarmak yada görüntü verisinde tanımlanabilen parametrelerin ölçümü için analiz edilebilir. Herhangi bir görüntünün kendine has bir işlenebilirlik kapasitesi vardır ve özel komponentlerdeki farklı içerikleri incelemek için otomatik görüntü analizi programları yazılmıştır. Özel tasarlanmış komponentlerin parametreleri otomatik olarak ölçüldüğünde daha çabuk tanımlanabilir ve hesaplanabilir. Tomografik görüntüde yer alan komponentin yapısının enine kesitler halinde gösterilmesi, kritik ölçülerin -cidar kalınlıkları, doğru parçalarının boyları ve eğri yaylarının radyusları gibi alınmasına imkan verir.

Şekil 5.15'te uçak motorlarının türbin kanatçıklarının imalatında faydalanılan CT sistemlerinin standart bir özelliği olan; karmaşık bir hassas döküm parçası üzerindeki kritik cidar kalınlıkların otomatik ölçüm sonuçları irdelenmektedir.

Düzlemsel ve 3 Boyutlu Görüntünün Yeniden Şekillendirilmesi: Elde edilen birbirine çok yakın aralıklarla sıralanmış CT dilimleri, üç boyutta taranmış hacimdeki yoğunluk dağılımını karakterize eder. Bilgisayarda toplanan bu veri kümesi ile, nesne içinden geçen düzlemler tanımlanabilir ve CT görüntüsü verisi bunlara göre birleştirilir. Diğer yandan, CT görüntü verisi, düzlemsel olmayan yüzeyler boyunca da çıkarılabilir. Bir roket çıkış lülesindeki konik yüzeye karşılık gelen tomografik veri gösterilebilir. Bu datalar ayrıca koordinatları üretmek için (örneğin; ekranın düşey eksenini boyunca radyal mesafe ve açısal pozisyona karşılık gelen yatay eksenindeki boru kesitine ait veri) tekrar şekillendirilebilir.

Taranmış nesnede yer alan yapılar özel olarak karakterize edilebilir. 3D yüzeyi görüntüleme; CT görüntü yığınındaki yapıya ait yüzeyi ortaya çıkarır, bu yüzeye karşılık gelen hücreleri tanımlar ve yapının bilgisayar destekli tasarımıyla (CAD) perspektif görüntüsünü üretir. (Şekil 5.16). CT görüntüleri iç taraftaki yüzeyleri de ekrana yansıttığı için, bilgisayar, iç yapıya ekrana getirmek için buna ait yüzey modellerini içeren dilimler açık bir şekilde kullanabilir (Dennis, 1992).



Şekil 5.16 Türbin kanadının CT’de alınan datalar ile üretilmiş 3D görünüşü (Dennis, 1992)

Bu imkanlar, ürünü meydana getiren parçaların tasarım aşamasını, fiziksel prototipleri ve operasyonel komponentlerin konfigürasyonunun dökümante edilmesi yoluyla hızlandırır.

Ayrıca, sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemleri için doğrudan bilgi girişi oluşturan iç yoğunluk dağılımını içeren, ilgili komponentleri tarif etmek için de bilgisayarlı tomografiden faydalanılır. Otomatik mesh etme (birim hücre örme) teknikleri, FEA modelleri üretmek için gerekli zamanı başarıyla düşüren analizler yapılmasını sağlar. CT yada MR görüntülerinden STL data elde etmekte faydalanılan paket programlar arasında; MIMICS, GEOMAGIC ve RAPIDFORM sayılabilir.

6. 2D ve 3D MATEMATİK MODELLERİN OLUŞTURULMASINDA FAYDALANILAN METODLAR

Karmaşık parçaların -kara, deniz, hava/uzay taşıtlarının yanı sıra, elektronik ve beyaz eşyaların gövdeleri, medikal protezler ile bunlara ait plastik ve metal kalıplarının- şekil tasarımı ve gösterimi yalnızca tel-kafes modelleme teknikleri yetersiz kalmaktadır. Bu gibi hallerde nesneyi daha hassas ve tamlikta tarif eden ve gün geçtikçe popüler hale gelen yüzey modellemeden faydalanılmaktadır.

Yüzey oluşturma esnasında iki unsur öne çıkar: Kantitatif veri –teğet ve nokta bulutu- ve kalitatif veri – şekil ve yüzey pürüzlülüğü- . Bu öğeler donanım ve yazılım tarafını da ilgilendirir. Yüzey formülasyonu tasarımcıya her iki öğeyi esnek ve interaktif bir şekilde kullanabilme kolaylığı vermelidir. Eğrilerde olduğu gibi örneğin B-Spline yüzeyler hem interpolasyona (ara değer bulmaya) ve hem de eğri uydurmaya (yaklaşım yapmaya) imkan verir. Bunlara ilaveten, deneysel verilerin uygunluğunu görmek ve diferansiyel denklemlerin çözümlerini yorumlamak maksadıyla geometrik nesneleri modellemek için yine yüzeylerden faydalanılır. Örneğin; yüzeydeki basınç dağılımı ve mekanik parçalardaki gerilim yığılması gibi değişken değerleri, gözler önüne sermek için; hesaplanacak mükemmel konturların renk kodlarıyla gösterilebilmesi mümkündür.

Yüzey formunun seçimi, uygulamaya göre yapılır, tek bir çözüm yoktur. Yüzeyi üretmek için gerekli imalat metoduna bağlı olarak tercih kullanılmalıdır. Bununla birlikte, tüm yüzey formları, yüzeyin teğeti, normali ve kavislerini belirlemek için farkı kolayca ortaya koyabilmelidir. Yüzey modelleme, içindeki yüzey elemanlarını oluşturmak için temelde tel-kafes elemanlara ihtiyaç duyar. Katı modellemeyle yüzey modelleme arasındaki en belirgin fark; yüzeyin nesneye ait sadece geometri bilgisini tarif edebiliyor oluşudur. Başka bir deyişle nesnenin topoloji bilgisini saklamaz. Katı temelli sınır gösteriminde, hem yüzler, kenarlar ve köşeler hem de katı ilkelerden faydalanılır.

Pratik olarak yüzey modelini izometrik görünüşte oluşturmak , detayları kolaylıkla algılama açısından tercih edilir. Yüzey gösteriminde “mesh” denilen $m \times n$ büyüklüğünde kafes (ağ, örgü, ızgara) örtülerden faydalanılır. Bu ölçü ne kadar küçük olursa CPU üzerinde hesaplama zamanı o kadar uzun olur ve ekranda konstrüksiyon ve güncelleme yapmak ya da çizim işlemleri zor olur.

Yüzey ve tel-kafes formları tüm CAD/CAM sistemlerinin özünde vardır. Modelleme esnekliği kazandırmak için yüzey tarifleri genelleştirilir. Örneğin; Gordon yüzeyleri Bezier ve Coons yüzeylere alternatif olarak düşünülebilir. Üçgen Bezier ve Coons kafesler rasgele yerleştirilmiş veri girişi olan durumlarda kullanılır.

6.1 Eğrilerin Gösterimi

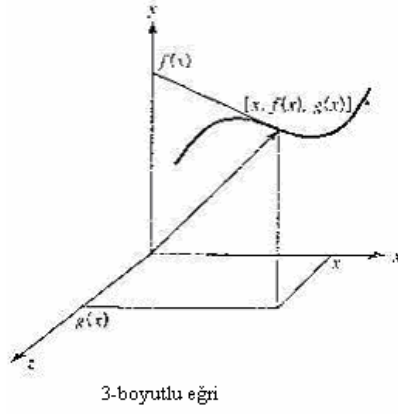
CAD/CAM sistemlerinde binlerce eğri yada doğru parçası saklanır ve değiştirilir. Dolayısıyla bunların en verimli ve efektif bir şekilde temsil edilmesi hesaplama zamanı ve hafızada kaplayacağı yerin minimize açısından önemlidir. Bilindiği gibi; eğrileri tarif etmek için iki tür denklemden yararlanılır: Non-parametrik (parametrik olmayan) ve parametrik denklemler.

Non-parametrik Eğrilerin Temsili

Mühendislik uygulamalarında, hem 2D eğriler (planar eğriler) ve hem de 3D uzay eğrilerden faydalanılmaktadır. Bunlar parametrik olmayan denklemlerle tarif edilebilirler. Eğrilerin parametrik olmayan denklemleri; açık/detaylı ve kapalı/dolaylı non-parametrik eşitlikler olmak üzere ikiye ayrılır. 3D eğrilerin parametrik olmayan açık olarak aldıkları ifade şekli şöyledir:

$$P = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x & f(x) & g(x) \end{bmatrix}^T \quad (6.1)$$

Burada P , üç boyutlu uzayda P noktasının konum vektörünü göstermektedir. Şekil 6.1’de bu eşitliğin grafik ifadesi verilmiştir.



Şekil 6.1 P noktasının konum vektörü

n -boyutlu uzay eğrisinin parametrik olmayan kapalı ifadesi aşağıdaki hali alır:

$$\begin{cases} F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \dots\dots\dots \\ F_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

Buna göre 3D eğri denklemi şöyle ifade edilecektir:

$$F(x, y, z) = 0 \quad (6.3)$$

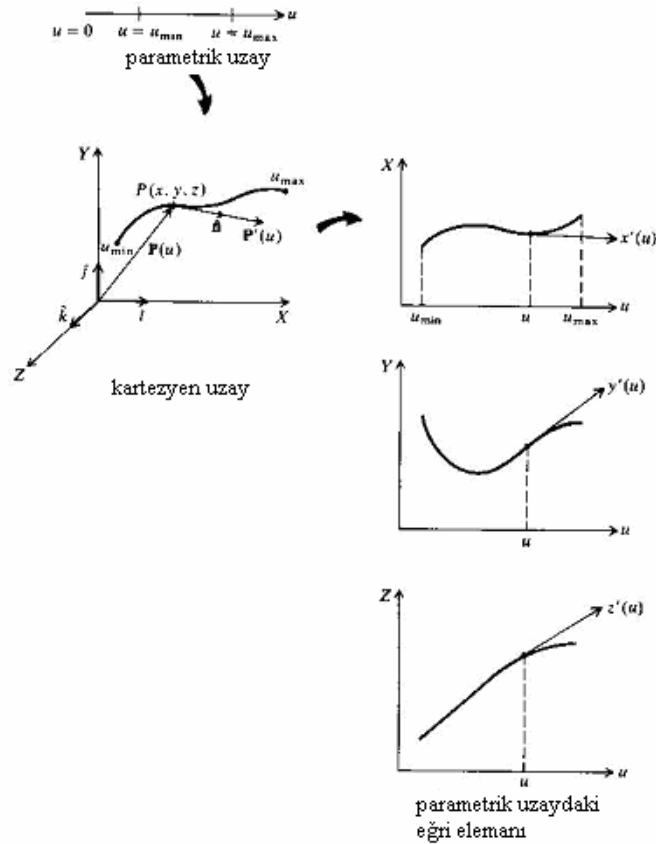
Bu eşitlik, üç boyutlu uzayda yer alan her bir noktanın x ile y ve x ile z koordinatları arasındaki ilişkiyi ifade eder; y ile z arasındaki bağıntı dolaylıdır (implicit). Bu denklem, açık ifade edilmek istenirse analitik olarak çözülebilir ancak bunun bilgisayar tarafından yapılması kolay olmadığından CAD/CAM sistemlerinde kullanımı sınırlıdır.

Parametrik Eğrilerin Temsili

Özellikleri itibariyle CAD/CAM sistemleri için kullanımı daha elverişli olan, eğrilerin parametrik formda gösteriminde, eğri üzerindeki her bir nokta, $x=x(u)$, $y=y(u)$ ve $z=z(u)$ eşitliklerinde yeralan u parametresinin bir fonksiyonu olarak yazılabilir. u parametresinin değeri ya (u_{min}) minimum ve (u_{max}) maksimum alanı içerisinde sınırlandırılır ya da 0 ile 1 aralığında tutulur. u parametresi, eğri üzerinde yeralan noktaya ait lokal koordinat olarak davranır. 3D ya da uzay eğriye ait parametrik denklem aşağıdaki formu alır:

$$P(u) = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x(u) & y(u) & z(u) \end{bmatrix}^T \dots\dots\dots u_{min} \leq u \leq u_{max} \quad (6.4)$$

Yukarıdaki eşitlikte, $P(u)$ nokta vektörünü u denklemin parametresini göstermekte; buradan kolayca eğrinin iniş-çıkış meyiline ulaşabilmek için tanjant vektör kavramı açıklanmalıdır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 3-boyutlu bir eğrinin parametrik gösterimi (Zeid, 1991)

$P'(u)$ olarak ifade edilen tanjant/teğet vektör kartezyen uzayda aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$P'(u) = \frac{dP(u)}{du} \quad (6.5)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy/du}{dx/du} = \frac{y'}{x'} \quad (6.6)$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{z'}{y'} \quad \text{ve} \quad \frac{dx}{dz} = \frac{x'}{y'}$$

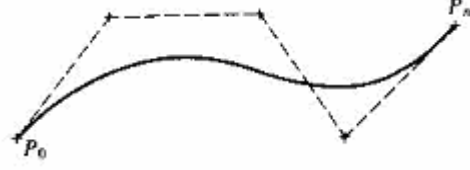
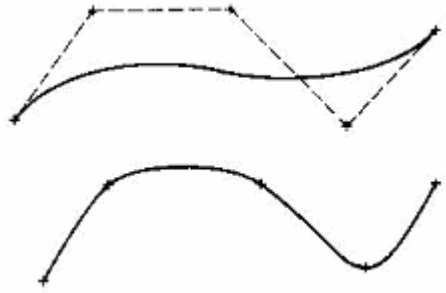
Sentetik Eğrilerin Parametrik Gösterimi

Genellikle, mühendislik parçalarının daha iyi tasvir edilebilmesi için aşağıdaki yol izlenir:

1. Tasarlanacak eğrinin sürekliliği kolaylıkla kontrol edebilmelidir.
2. Eğriyi tanımlamak için daha küçük bir hafızaya ihtiyaç duymalıdır.
3. Aritmetik hatalar olmamalı ve hesaplama süresi düşük tutulmalıdır.
4. Operatör tarafından kolaylıkla girilebilir olmalıdır.

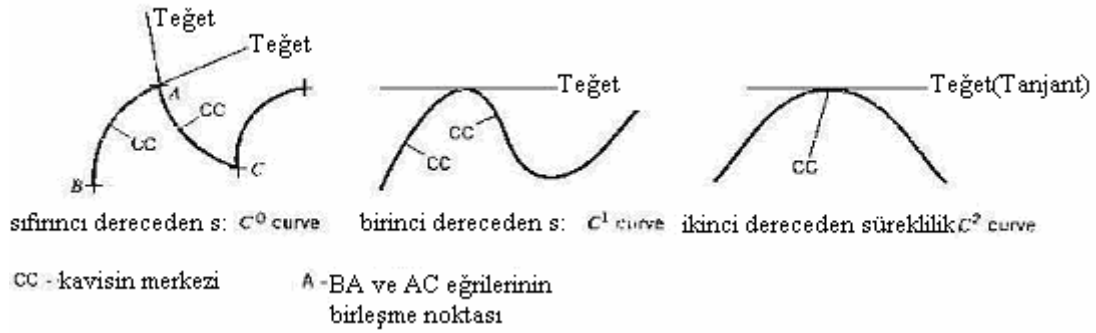
CAD/CAM sistemlerinde kullanılan sentetik eğrileri tarif etme metodları, Çizelge 6.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.1 Sentetik eğrilerin tarif edilme şekilleri (Zeid, 1991)

Metod	Şematik Gösterimi
Kübik Spline Verilen bir nokta datası grubu ile başlangıç ve bitiş hareketleri	
Bezier Eğrileri Verilen bir nokta datası grubu	
B-spline Eğrileri Bir grup nokta datasına yaklaşık geçen bir eğri Aynı noktalardan interpolasyon ile geçen eğri	

Analitik eğriler detaylı tarif edilebilmesine rağmen, makine parçalarının geometrik tasarımında daha başka eğrilere ihtiyaç duyulur. Örneğin otomobil gövdelerinin kıvrımları sadece mekanik parçaları örtmek için değil, aynı zamanda hava akış direncini kırmaya yardımcı olmalıdır. Diğer bir örnek de uçaklardaki pervaneler ve türbin kanatçıkları, aerodinamik ve akışkan akım simülasyonları esas alınarak tasarlanır.

Bu eğrilerin CAD/CAM sistemlerinde matematiksel gösteriminde, süreklilik konsepti önemli bir yer tutar. Süreklilik; iki eğri ya da yüzeyin kesiştiği yerdeki nokta ya da kenar bağlantısının pürüzsüz ve yumuşak bir geçişle yapılabilirliği anlamına gelir. Normalde, iki eğrinin birleşme pürüzsüzlüğünü C^0 , C^1 ve C^2 ile tarif eden üç süreklilik tipi vardır. C^0 iki eğri arasında basit bağlantıyı gösterir. Bunun anlamı bu eğrilerin kavislerinin yönü kadar birleşim yerindeki gradyanları da farklı olabilir. C^1 sürekliliğinde, birleşme noktasındaki gradyanlar aynı olmalıdır. Bununla birlikte C^2 kavis sürekliliğini gösterir ki, sadece gradyan değil, kavisin merkezi de aynı olmalıdır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 Eğrilerin muhtelif derecelerdeki süreklilikleri

Birçok eğri segmentinin bir araya gelerek oluşturduğu elemanlara sentetik (harmanlanmış) eğri adı verilir. CAD/CAM sistemleri tarafından sağlanan sentetik eğri tipleri şöyle sıralanabilir:

- Hermit kübik spline
- Bezier eğrileri
- B-spline eğriler
- Rasyonel B-spline
- Üniform olmayan rasyonel B-spline (NURBS)

Hermit Kübik Spline

Parametrik spline eğriler, belirli bir süreklilik derecesi ile polinomial eğri olarak tarif edilirler. Parametrik kübik spline eğriler, verilen datalar arasında interpolasyon yapar, Bezier ve B-spline eğriler gibi serbest form şeklinde tasarlanamaz. Ana fikir eğriyi segmentlere bölmektir. Her bir segment bir parametrik kübik fonksiyona yaklaştırılır. Kübik fonksiyonun genel formu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P(u) = C_0 + C_1u + C_2u^2 + C_3u^3 \quad (6.7)$$

Burada $P(u)$ parametrik denklem ile tanımlanan kübik eğrinin, nokta vektörüdür. Denklemlerle tanımlanan segmentin en yüksek derecesi u^3 polinomudur. u parametresi $0 \leq u \leq 1$ aralığıyla sınırlandırılmıştır. İstenilen bir eğriyi (C_0, C_1, C_2, C_3) katsayı vektörlerinin belirtilmesiyle, tarif edebiliriz.

Segmentinin uç noktalarında $P(0)$ ve $P(1)$ konum vektörleri ile yine buralarda teğet / tanjant vektörleri $P'(0)$ ve $P'(1)$ olan Hermit kübik bir eğrinin çizimi aşağıdaki şekilde verilmiştir. Böylece iki farklı eğrinin belli bir süreklilik derecesi altında birleştirilmesi operasyonu yapılmış olur. (6.7) eşitliğinin türevi alınır;

$$P'(u) = c_1 + 2c_2u + 3c_3u^2 \quad (6.8)$$

bulunur ve sınır şartları bu iki eşitliğe uygulanırsa;

$$u = 0 \quad \text{iken:} \quad P_0 = C_0, \quad P'_0 = C_1 \quad (6.9)$$

$$u = 1 \quad \text{iken:} \quad P_1 = C_0 + C_1 + C_2 + C_3, \quad P'_1 = C_1 + 2C_2 + 3C_3$$

Bu dört eşitliği aynı anda çözersek aşağıdaki katsayıları elde ederiz:

$$\begin{aligned} C_0 &= P_0 \\ C_1 &= P'_0 \\ C_2 &= 3[P_1 - P_0] - 2(P'_0 - P'_1) \\ C_3 &= 2[P_0 - P_1] + P'_0 + P'_1 \end{aligned} \quad (6.10)$$

Daha sonra bu eşitlikleri (6.8) denkleminde yerlerine koyup düzenlersek;

$$P(u) = P_0(1 - 3u^2 + 2u^3) + P_1(3u^2 - 2u^3) + P'_0(u - 2u^2 + u^3) + P'_1(-u^2 + u^3) \quad (6.11)$$

$$P'(u) = P_0(-6u + 6u^2) + P_1(6u - 6u^2) + P'_0(3u^2 - 4u + 1) + P'_1(3u^2 - 2u) \quad (6.12)$$

Böylece (6.11) denkleminin matrissel gösterimi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\text{VMA} = \begin{bmatrix} 1 & u & u^2 & u^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 2 & -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P'_0 \\ P'_1 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Bezier Eğrileri

Bilindiği üzere Hermit eğri interpolasyon tekniği temeline dayanmaktadır. Buna karşılık, Bezier eğrileri, birinci ve son kontrol noktası hariç verilen tüm noktalardan geçmeyen eğrileri üreten yaklaşım tekniği esasına göre oluşturulur. Bezier eğrisinde, eğrinin şekli kontrol noktaları tarafından kontrol edilir.

$n+1$ kontrol noktası için, n . dereceden bir polinomla tarif edilen Bezier eğrisi aşağıdaki gibidir:

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(u), \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (6.14)$$

burada $P(u)$, eğri segmenti üzerindeki noktanın pozisyon vektörünü, P_i kontrol noktasını ve $B_{i,n}$ Bezier eğrisinin temel fonksiyonu olarak ya da harmanlamaya yarayan Bernstein polinomlarını gösterir.

Bernstein polinomları şöyle tarif edilmektedir:

$$B_{i,n}(u) = C(n,i) u^i (1-u)^{n-i} \quad (6.15)$$

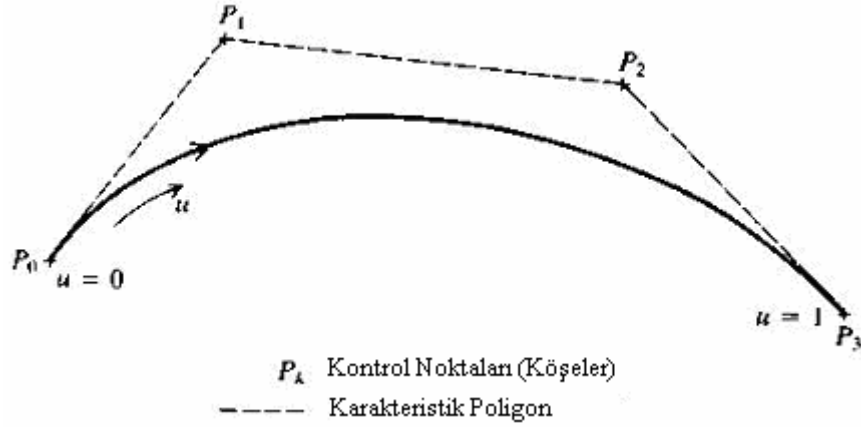
$C(n,i)$ binominal katsayı olarak aşağıda verilmiştir:

$$C(n,i) = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (6.16)$$

Yukarıdaki (6.15) ve (6.16) eşitliğinin kombinasyonundan;

$$\begin{aligned} P(u) = & P_0(1-u)^n + P_1 C(n,1)u(1-u)^{n-1} + P_2 C(n,2)u^2(1-u)^{n-2} \\ & + \dots + P_{n-1} C(n,n-1)u^{n-1}(1-u) + P_n u^n, \quad 0 \leq u \leq 1 \end{aligned} \quad (6.17)$$

bulunur. Buradaki $P_0, P_1, \dots, P_n$ $n+1$ adet noktanın pozisyon vektörleri, aynı zamanda Bezier karakteristik poligonunun köşeleridir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Kübik Bezier eğrisinin genel gösterilişi (Zeid, 1991)

Bezier eğrilerinin özellikleri

1. Parametrenin 0 ve 1 değerlerini alması halinde, eğriler ilk ve son kontrol noktasından geçer. İkinci çizginin başlangıç noktası P_1 ve birinci çizginin bitiş noktası P_4 aynı pozisyonda yer alır.
2. İlk ve son noktanın teğetleri, karakteristik poligonun ilk ve son segmentinin doğrultusundadır.
3. Bezier eğrisi konveks büküm özelliğine sahiptir. Bir başka deyişle, giriş eğrisi karakteristik poligonun içinde uzanır. Bu özellik, eğri ara kesişimi ve eğri segmenti üzerindeki sınır bölgelerin hesaplanmasında faydalıdır.

B-Spline, Rasyonel B-Spline ve Üniform Olmayan B-Spline Eğriler

B-Spline , Bezier eğrilerinin genelleştirilmiş hali olarak kabul edilebilir. Lokal kontrol noktaları sayesinde B-Spline ile eğrinin sadece bir kısmını etkilemek mümkündür. Halbuki Hermit ve Bezier eğrilerde sadece bir kontrol noktası yada eğim yönünün değişmesi bile tasarımcıyı olumsuz etkiler.

Bezier eğrilerine benzer şekilde, $n+1$ kontrol noktası P_i için tarif edilen B-Spline

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u), \quad 0 \leq u \leq u_{\max} \quad (6.18)$$

ifadesi kullanılmaktadır. (6.14) ve (6.18) eşitlikleri arasındaki temel farklılıklar; k parametresinin B-Spline sonuçlandıran $(k - 1)$ derecesini kontrol ediyor olması ve u parametresinin maksimum limitte bulunmasıdır.

B-Spline eğrilerinin tasarımda faydalı olan karakteristik özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

1. Kontrol noktalarının pozisyonunu, aynı bölgede yeralan pek çok noktayı çoklu kontrol noktalarıyla, yer değiştirmek suretiyle eğrinin lokal kontrolü sağlanabilir (Şekil 6.5).
2. Periyodik olmayan B-Spline eğrisi ilk ve son kontrol noktasından geçer ve kontrol poligonun ilk ve son segmentine teğettir.
3. Derecesini yükseltmek eğriyi daraltır. Düşük derecelerde eğri kontrol noktalarına yaklaşır.
4. İkinci dereceden bir eğri her zaman iç poligon segmentinin ortasına teğettir (Şekil 6.6).
5. k , kontrol noktası $(n+1)$ 'e eşit olursa B-Spline, Bezier Eğrisi haline gelir.
6. Çoklu kontrol noktası B-Spline eğrisinin yüksek kavisli bölgelerinin keskinleşmesini sağlar.
7. Eğrinin derecesini arttırmak, kontrolü ve hassas hesaplamayı zorlaştırır. Bu yüzden kübik bir B-Spline çoğu uygulamada tatmin edici sonuç verir.

$$R_{i,k}(u) = \frac{h_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n h_i N_{i,k}(u)} \quad (6.20)$$

$R_{i,k}(u)$ rasyonel B-Spline temel fonksiyonudur.

Eğri Manipülasyonları

CAD/CAM sistemlerinde eğriler üzerinde değişiklik yapılabilme imkanı vardır. Bunların arasında, eğrinin ekran üzerinde gösteriliş tarzı, eğrinin farklı segmentleriyle farklı süreklilik taşıyan diğer bir eğrinin kaynaşması, eğrinin segmentler halinde bölünmesi, budama (trimleme), ara kesişimler yapma ve taşıma/öteleme, açısal döndürme, büyütme-küçültme yapma ve simetri oluşturma gibi transformasyonlar sayılabilir.

6.2 Yüzeyin Parametrik Gösterimi

Bilgisayar grafikleri ve CAD/CAM sahasında programlana ve hesaplama maksadıyla yüzeylerin işlenmesi için ideal denklemler ve algoritmalar geliştirilmesi gerekmektedir.

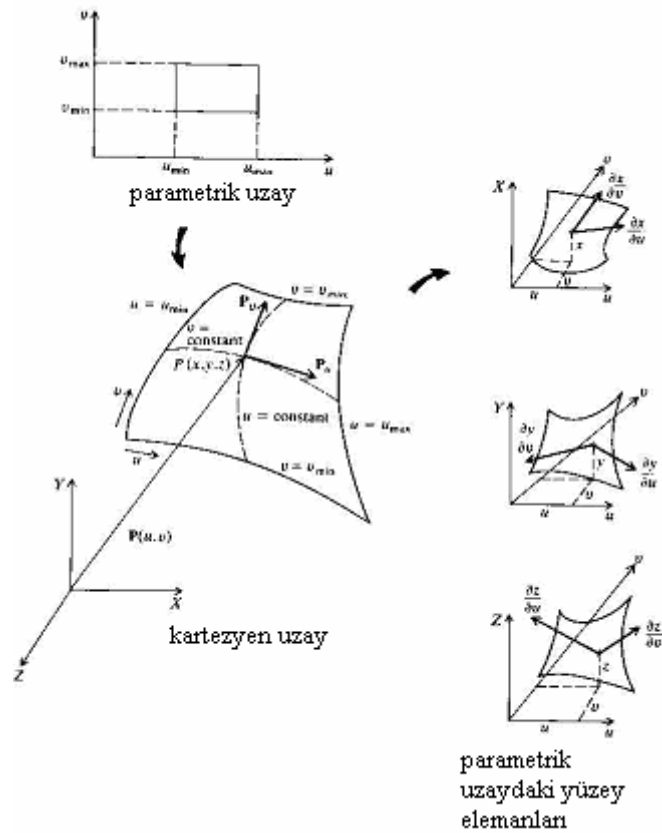
Yüzeyler matematiksel olarak 3D uzayda parametrik ve parametrik olmayan (non-parametrik) denklemler olarak tarif edilir. Verilen bir nokta bulutuna, non-parametrik yüzey uydurmanın pek çok yolu vardır. Bunlar iki ana kategoride toplanabilir. Birincisinde; bütün noktalardan geçecek şekilde bir denklem yazmak, ikincisinde ise nokta verilerini bir seri yüzey kafesi –ki en azından konumuyla birlikte ve ilk süreklilik dönüşümü yapılmış halde birbirine bağlı- geliştirmek için kullanmaktır. Her iki kategoride de yüzey denklemi ya da yüzey kafesi aşağıdaki gibi verilir:

$$P = [x \ y \ z]^T = [x \ y \ f(x, y)]^T \quad (6.21)$$

Burada P, yüzey üzerindeki noktaya ait konum vektörünü göstermektedir. Verilen bütün noktalardan geçen bir yüzey için $f(x, y)$ fonksiyonun doğal formu aşağıdaki gibi bir polinomdur:

$$z = f(x, y) = \sum_{m=0}^p \sum_{n=0}^q a_{mn} x^m y^n \quad (6.22)$$

Burada yüzey nokta boyutu $(p+1) \times (q+1)$ olan XY ızgarası ile tarif edilmektedir.



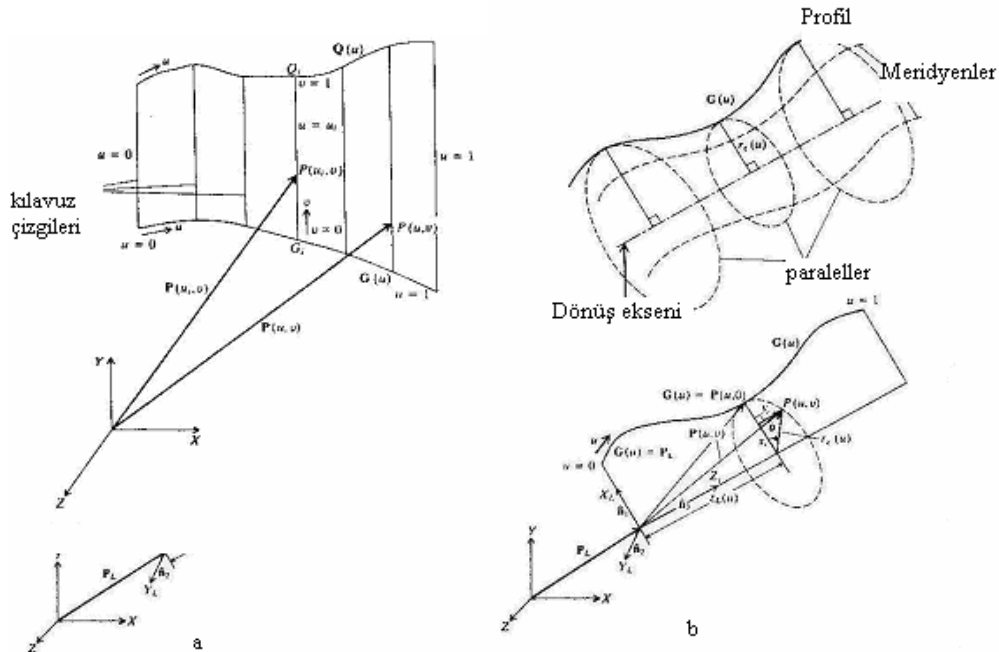
Şekil 6.7 3-boyutlu yüzeyin parametrik gösterimi (Zeid, 1991)

Bir yüzeyin parametrik gösteriminden kastedilen, sürekli bir vektör değerine sahip iki değişkenli yada parametrelili $P(u, v)$ fonksiyonudur. Belli bir u ve v değerindeki $P(u, v)$ fonksiyonu, bu değerlerdeki yüzey üzerinde bir noktadır. Uzayda 3D eğrilerden oluşmuş bir yüzeyin parametrik denklemi en genel şekilde şöyle yazılabilir (Şekil 6.7):

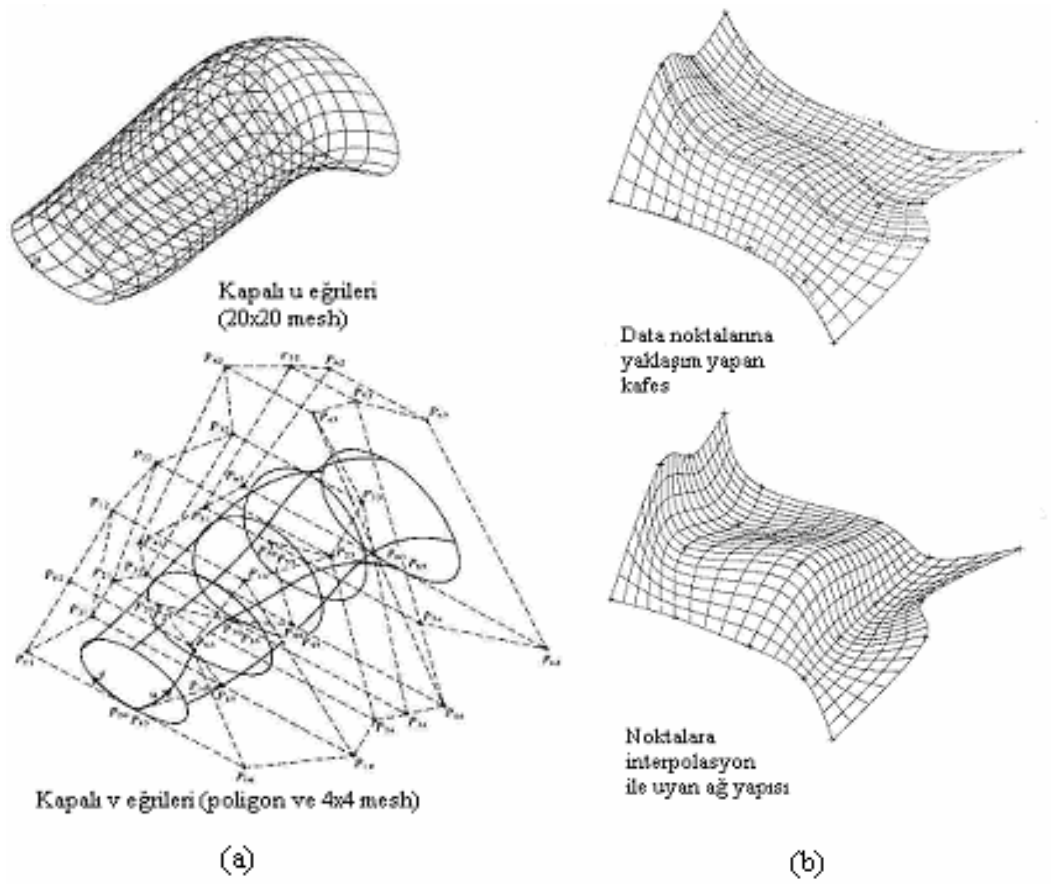
$$P(u, v) = [x, y, z]^T = [x(u, v) \quad y(u, v) \quad z(u, v)]^T \dots\dots\dots u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \quad (6.23)$$

Eğrilere benzer şekilde, analitik ve sentetik yüzeyler de vardır. Analitik yüzeyler, telkafes elemanlardan oluşur ve aynı zamanda; düzlem yüzey, paralel çizgiler arasına (ruled) yüzey, eksen etrafında döndürülmüş (revolved) yüzey, silindir (tabulated) yüzeyleri içerir. Sentetik yüzeyler, verilen bir nokta bulutundan ya da bikübik, Bezier, B-Spline ve Coons ağı gibi eğrilerden oluşturulur. Tensör ürün, rasyonel ve harmanlama metodları kullanılarak sentetik yüzeyler üretilir. En sık kullanılan tensör ürün yöntemi dörtgen yamalara kendiliğinden uyar.

Burada analitik ve sentetik yüzeylerin parametrik gösterimlerinin detayına inilmeksizin birkaçı çizimlerle hatırlatılmıştır (Şekil 6.8) ve (Şekil 6.9).



Şekil 6.8 (a) Kılavuz kenarlı (ruled) ve (b) dönel eksenli (revolved) yüzeylerin parametrik gösterilişi (Zeid, 1991)



Şekil 6.9 (a) Kapalı Bezier yüzeyleri , (b) 4x5 B-spline yüzey yamaları (Zeid, 1991)

6.3 Yüzey Elemanları

Tel-kafes öğelerine benzer şekilde, mevcut CAD/CAM sistemleri, hem analitik hem de sentetik yüzey öğeleri sağlar. Analitik elemanlar; düzlem yüzey, paralel kesitli yüzey, döndürülmüş yüzey, uzatılmış silindiri kapsar. Sentetik elemanlar ise bi-kübik Hermit spline yüzey, B-spline yüzey, karesel ve üçgensel gözlü Bezier ağları, karesel ve üçgensel Coons ağları ve Gordon yüzeyi .

CAD/CAM sistemleri tarafından sağlanan temel yüzey elemanları:

Düz(Plane)Yüzey: Farklı konumda bulunan üç nokta bir sonsuz düzlem tanımlar. Örneğin bu tür basit yüzeylerden; kütle özellikleri hesaplayabilmek maksadıyla bir yüzeyin ara kesitini görüntülenmesinde faydalanılabilir.

Keskin/Yumuşak Kenarlı (Ruled/Loft) Yüzeyler: Birine paralel yüzey sınır eğrileri arasında lineer interpolasyonla oluşturulur. Herhangi bir burkulma olmayan yüzeyleri tarif etmek için idealdir.

Dönel (Revolved)Yüzeyler: Asimetrik nesnelerin modellenmesinde; belli bir rotasyon (simetri) eksenini etrafında planar bir eğrinin döndürülmesi şeklinde kullanılır.

Figüratif (Tabulated) Silindir: Belirtilen bir doğrultu (generatrix) boyunca, planar eğrilerin (directrix) ötelenmesi yoluyla üretilen yüzey çeşididir. Eğri düzlemi silindir eksenine dik olduğundan, benzer kesite sahip yüzeyler için uygundur.

Kenar-çek (Draft/Extrude) Yüzey: Bir bölgesel profili açısal yada dik bir doğru çizgi boyunca taşıyarak oluşturulan yüzey modelleme metodudur.

Süpürme (Swept) Yüzey: Bölgesel bir profili bir yada daha fazla yönlendirici eğri boyunca veya iki bölgesel profili bir yönlendirici eğri boyunca süpürmek surtiyle oluşturulan bir yüzey türüdür.

Bezier Yüzey: Verilen nokta kümesi üzerinde ancak tümünden geçmeksizin yaklaşım yapılarak üretilen bir yüzeydir. Bükülmelere izin verir ancak; tüm yüzey üzerinde kontrol noktalarını değiştirmek mümkündür.

B-spline Yüzey: Tarama cihazlarından ölçülen nokta bulutu üzerinde yaklaşım ya da interpolasyon yöntemiyle, yüzey oluşturmaya temine eden sentetik bir yüzeydir. Avantajlı yönü sadece belli kontrol noktalarını değiştirme imkanı sunmasıdır.

Coons Yaması/Ağı: Yukarıdaki yüzey oluşumlarının aksine yalnızca kapalı formda yüzey oluşturulması gereken uygulamalarda çok işe yarar. Dört kenarlı yüzey parçacıklarını yumuşak geçişlerle birleştirmek suretiyle istenilen yapıya uygun örülen bir yüzey tipidir.

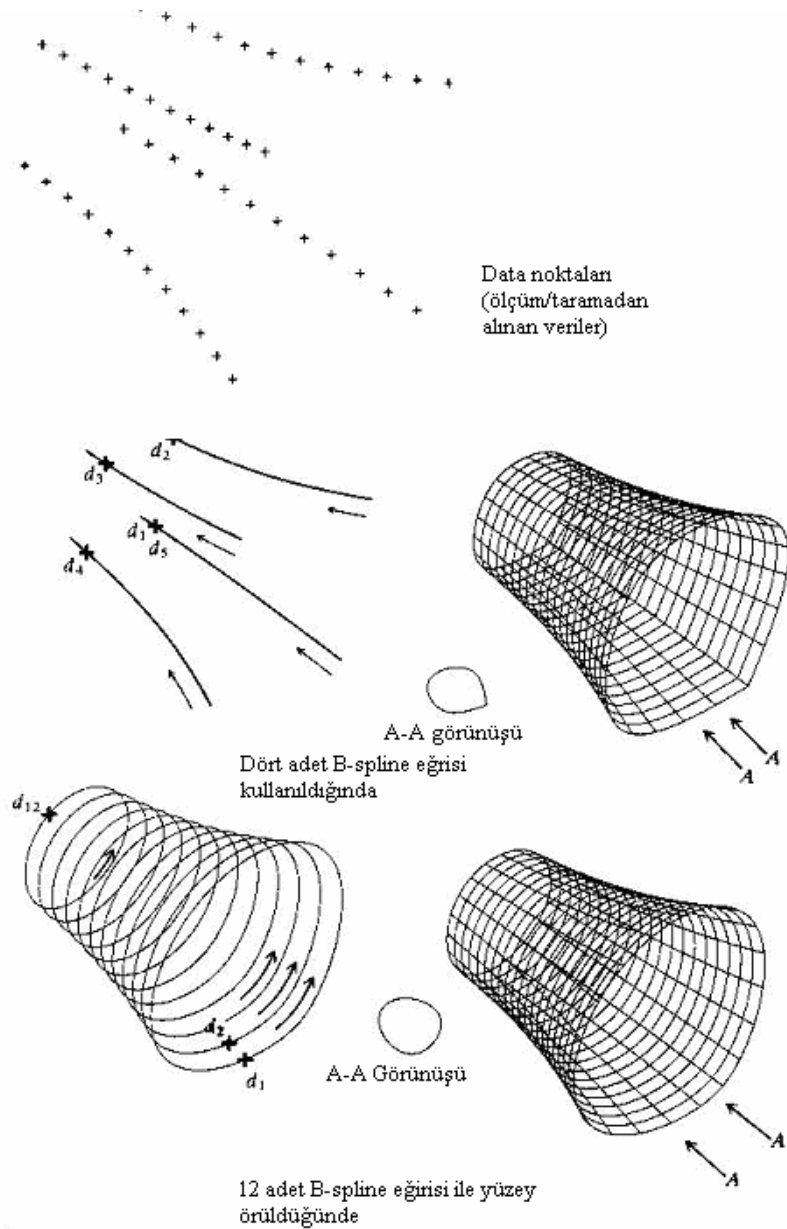
Yuvarlatma (Fillet)Yüzey: İki B-spline yüzeyin kesişmesiyle oluşturulan kavisli yüzeylerdir.

Kaydırma (Offset)Yüzey: Mevcut yüzeylerin –özellikle orijinal yüzey kompozitse- şeklini birebir muhafaza ederek yalnızca boyutsal değişiklikle yeni bir yüzey oluşturmak için kullanılır.

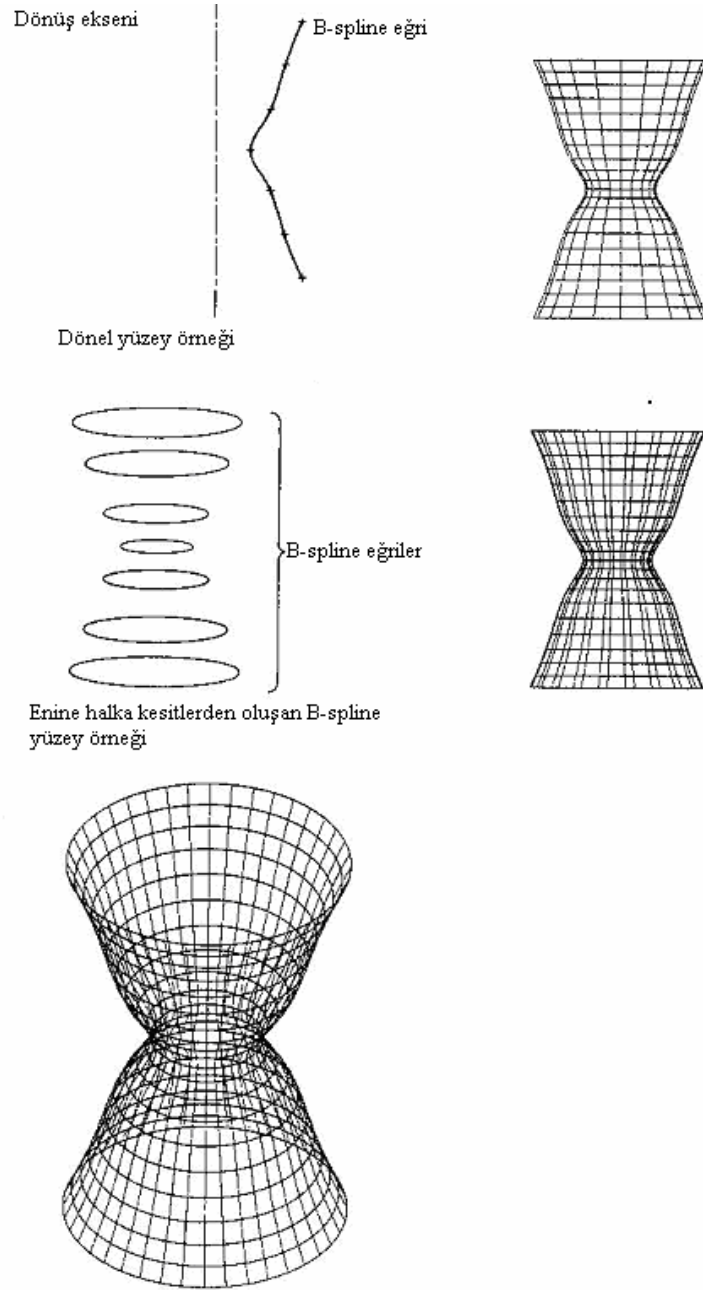
Harmanlanmış (Blending) Yüzey: Birbiriyle temasta olmayan iki ya da üç yüzey parçasını sıfırıncı ya da birinci dereceden teğet birleşmeyle birbirlerine bağlamak suretiyle tamamen farklı bir yüzey oluşturulabilmektedir (Zeid, 1991).

6.4 Yüzey Tasarım Uygulamalarıyla İlgili Örnekler

Mühendislik tasarımlarında sıklıkla karşımıza çıkan ve yukarıda bahsedilen teorileri kapsayan birkaç uygulama örneğine (Şekil 6.10) ve (Şekil 6.11)'de yer verilmiştir :



Şekil 6.10 Verilen bir nokta bulutundan B-spline yüzey oluşturulması (Zeid, 1991)



Şekil 6.11 Değişik yöntemlerle oluşturulmuş yüzeylerin karşılaştırılması (Zeid, 1991)

6.5 MasterCAM ile Yüzey Modelleme

Yüzeyi , bir parçanın biçimini ifade eden ve matematiksel denklemlerle tarif edilen derisi olarak tanımlayabiliriz. Bir yüzey normal şartlar altında pek çok kesitleri ya da patch denilen ve birbirine, geometrik bir eleman oluşturacak formda, yumuşak geçişlerle bağlı kafesler

içerir. Güçlü bilgisayarlar ve yeni yüzey modelleme teknikleri sayesinde, gün geçtikçe CAD/CAM sistemlerinde karmaşık parça şekillerini tamamıyla ve hassas bir şekilde modelleyebilmek mümkün olabilmektedir. Buna ilaveten, pek çok kompleks parçada bulunan çoklu yüzeyler, tasarım analizi ve NC takım yolu üretimi için tekil bir yüzey modeli oluşturacak şekilde bir araya getirilebilir. Bu tip çoklu-yüzey modeline “kompozit yüzey” adı verilir.

Yüzey modelleme; otomobil, gemi ve uçak gövdesi gibi kompleks nesneleri ve özellikle bunlara ait kalıpları tasarlamak için sıklıkla kullanılır. Yüzey modeli bilgisi, aşağıda açıklanan mühendislik, tasarım ve imalat konularını yerine getirmekte kullanılır:

- Parçanın geometrik tasarımı ve sunumunda,
- Kütsel özelliklerinin hesaplanmasında,
- Birbiriyle uyumlu çalışan parçaların kontrolünde,
- Kesit görüntülerinin oluşturulmasında,
- Sonlu eleman biriminin (mesh) ortaya çıkarılmasında,
- NC takım yolu üretmekte.

6.5.1 MasterCAM ve Yüzey Tipleri

Serbest formlu ve dönüştürülmüş (türetilmiş) yüzeyler temelde üç yüzey matematiği prensibine dayanır. MASTERCAM üç çeşit yüzey oluşturulmasını sağlar: Parametrik, NURBS (üniform olmayan düğümler ile rasyonel temel spline) ve Kesiştirilmiş Eğrilerden Oluşturulmuş (Harmanlanmış) yüzeyler.

Parametrik

Yüzey üzerinde uzanan enine ve boyuna nokta dizisiyle parametrik spline oluşturmak için bi-kübik yaklaşım kullanır. Parametrik bi-kübik yüzey kafesi, dört köşedeki veri noktasını birbirine kenetler ve bi-kübik denklemden faydalanır.

NURBS

Yüzey cidarında yer alan kontrol noktalarının ağırlık etkisini dengeleyerek, yüzeye enterpole eder.

Harmanlanmış (Blend)

Birbirine bakan parçalar arasında yüzey konturlarının kesişmesiyle geliştirilmiş bir yüzey yaklaşımıdır.

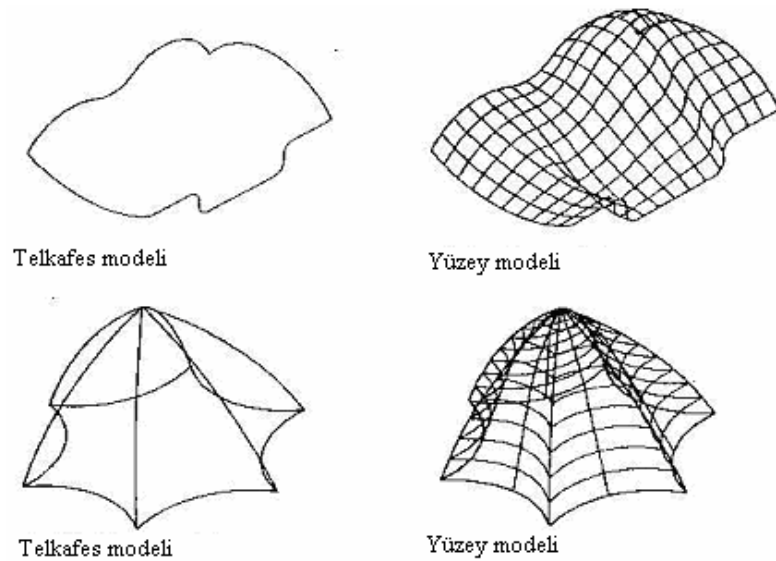
6.5.2 MasterCAM ve Yüzey Matematiği

Genelde tüm yüzeyler aşağıda açıklanan dört matematik metodla oluşturulur:

Coons yüzeyler, Bezier yüzey, B-spline yüzey ve NURBS.

Coons Yüzeyler

Coons yüzey genellikle “Coons patch (yaması)” olarak karşımıza çıkar. Tekli bir Coons yaması, dört sınır eğrisinin harmanlanarak oluşturduğu bir yüzeyin parçasıdır. Çok gözlü Coons yüzeyler, pek çok bağımsız yamanın yumuşak bir şekilde birbirlerine bağlanmasıyla oluşturulur (Şekil 6.12). Coons yüzeylerde kullanılan bağlantı fonksiyonları ya bi-lineer ya da bi-kübik olmaktadır.

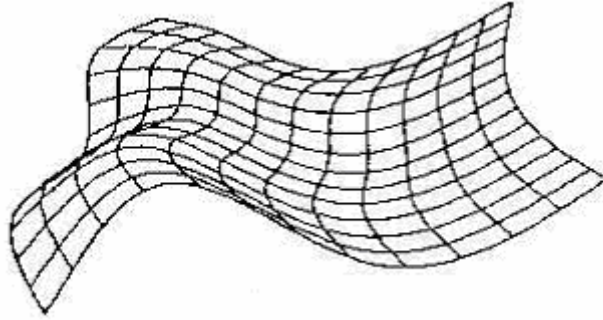


Şekil 6.12 Tekli ve çoklu yama yüzeyler (Coons patch) (Lin ve Shinue, 1996)

Coons yüzeylerin gücü, telkafes eğriler ya da sayısallaştırılmış nokta verisi yardımıyla pürüzsüz bir yüzeye çok hassas biçimde uymasından kaynaklanır. Zayıf yönü ise, bir yüzeyin formunu değiştirmek için kontrol eğrilerinin de farklılaşmasını gerektirmesidir.

Bezier Yüzeyler

Bezier yüzey, kontrol noktalarından oluşan bir ızgara tarafından şekillendirilmiş yüzlerin ya da bağlantı çizgilerinin tamamının harmanlanmasıyla elde edilir (Şekil 6.13). Çok gözlü Bezier yüzeyler de, tekil Bezier yamaların yumuşak geçişlerle biraraya gelmesinde, tıpkı Coons yüzeylerinkine benzer tarzda şekillendirilirler.



Şekil 6.13 MasterCAM’de Bezier yüzey (Lin ve Shinue, 1996)

Bezier eğrilerin kullanım avantajı, kontrol noktalarına müdahale edilmek suretiyle yüzeyin tekrar şekillendirilmesine olanak sağlamasında yatar. Kontrol noktaları yeni bir tasarım için çekilip uzatılabilir. Buna karşılık, herhangi bir kontrol noktasını hareket ettirdiğinde giriş yüzeyinin şeklinin kolaylıkla etkileniyor olması ise Bezier eğrilerin zayıf yönünü gösterir. Diğer taraftan; elde edilmesi mümkün olmayan zor belli pozisyonlardaki, özel kesitli şekillere sahip yüzeylerin yaklaşık oluşturulmasında kullanılabilmektedir.

B-Spline Yüzeyler

B-Spline yüzey, hem Coons hem de Bezier yüzeylerin güçlü yönlerinin bir kombinasyonuna sahiptir. Coons yamasına benzer şekilde B-Spline yüzeyler de bir set kesit eğrisinden ve

Bezier yaması gibi, kontrol noktalarına sahip olduğundan yüzey örüntüsünü değiştirme yeteneğine sahip yüzeylerdir. Çoklu yamalı B-Spline yüzey, bitişik gözlerin arasındaki sürekliliği, kontrol noktalarını hareket ettirilmesine rağmen, garanti eder. B-Spline yüzeylerin zayıf yönü; silindir, küre ve koni gibi primitif yüzeylerin hassas bir biçimde temsil edilemeyeşidir. Bu yüzden bu tür temel yüzeylerin işlenmesi sonrası ortaya boyut sapmaları çıkabilir.

NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) Yüzeyler

Rasyonel yüzey, her bir noktası ağırlık bileşkesiyle tarif edilen bir yüzey çeşididir. NURBS yüzey gerçekçidir. B-Spline yüzeyin bütün özelliklerini taşır. Buna ilaveten, yüzey örüntüsündeki kontrol noktalarının etkisini değiştirmek için bir ağırlık fonksiyonu sağlar. Ağırlık fonksiyonu sabit bir değer aldığında, NURBS yüzey B-Spline yüzey haline gelir.

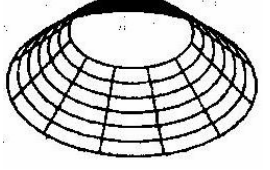
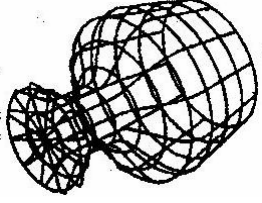
NURBS yüzeyler, primitif yüzeylerde B-Spline'nın sakıncalarını bertaraf eder. Yüzey temelli konik, yay yada küreler NURBS yüzey ile hassas biçimde tanıtılabilir. NURBS yüzey modelleme en ileri yüzey matematiği tekniğidir.

6.5.3 Yüzey Tipleri

Geometrik Yüzeyler

Geometrik yüzeyler; küre, koni ve silindirde olduğu kadar çekme yüzey ve döndürme yüzeyler gibi sabit ve geometrik şekillere sahiptir. Bunlar doğru, yay, spline ve koni öğelerinden üretilmiştir. Bu yüzden, bu türden yüzeylerin tariflerinden farklı manalar çıkabilir. Mastercam, iki farklı geometrik yüzey oluşturma tekniği sunmaktadır: Çekilerek uzatılmış yüzey modelleme ve döndürülerek oluşturulmuş yüzey modelleme (Çizelge 6.2).

Çizelge 6.2 Geometrik Yüzeyler (Lin ve Shinue, 1996)

YÜZEY TİPİ	AÇIKLAMA&UYGULAMALAR	ÖRNEK ÇİZİM
Kenar-çek (Draft) Yüzey	Kesit şeklinin bir hat boyunca yükseltilerek oluşturulan yüzey tipi; koni ve silindir çizmek için kullanılır.	
Dönel (Revolved) Yüzey	Kesit formunun bir eksen etrafında çepeçevre dönmesiyle elde edilen yüzey; yay yada dairesel enine kesitler gerektiren parçalarda faydalanılır.	

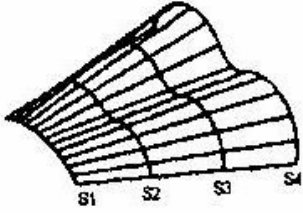
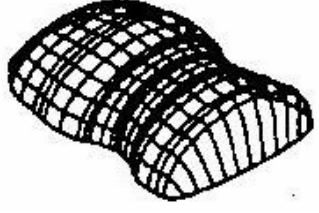
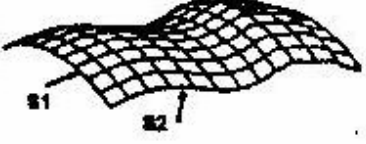
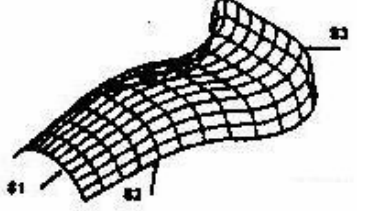
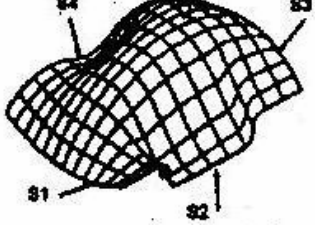
Serbest Formlu Yüzeyler

Serbest formlu yüzeyler geometrik eleman örneği içermeyen ve normalde geliş güzel doğru ve eğrileri izler. Bu yüzeyler Coons yaması, Bezier yaması, B-spline yüzey ve NURBS yüzeylerinden daha karmaşık bir matematik gerektirir. Serbest formlu yüzeyler iki sınıf altında toplanabilir: Kısıtlı yüzeyler ve doğal yüzeyler.

Kısıtlı yüzeyler; form kesitleri yada enine kesitlerde yer alan belli datalarla sınırlandırılmıştır. Başka bir deyişle yüzeyler verilen bir kesitten geçmek zorundadır. Coons kafesi tipik zorlanmış yüzeye girer, zira doğrudan geometrisine bağlıdır.

Doğal yüzeyler; önceden belirlenmiş nokta ya da eğri verileriyle sınırlandırılmamıştır. Yani, şeklin yüzeyini oluşturmak için kullanacağı kontrol noktalarının, evvelce tayin edilmiş bir veri kümesinden geçmesi gerekmez. Bunlardan temelde konsept tasarımlarında faydalanılır. Bezier, B-Spline ve NURBS yüzeyler bu gruba girer (Çizelge 6.3).

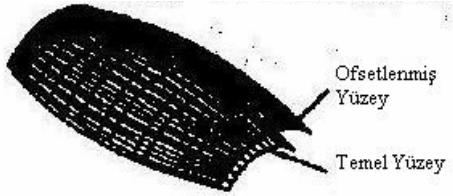
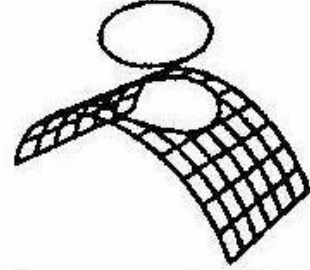
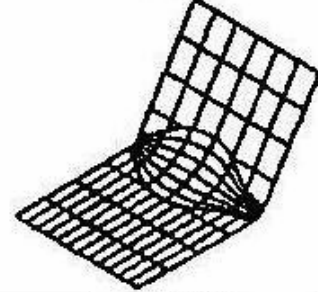
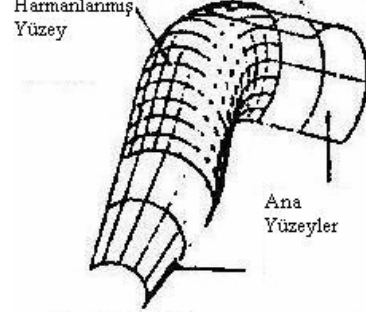
Çizelge 6.3 Serbest Formlu Yüzeyler (Lin ve Shinue, 1996)

YÜZEY TİPİ	AÇIKLAMA&UYGULAMALAR	ÖRNEK ÇİZİM
Keskin Kenarlı (Ruled) Yüzey	Eğri arasından geçirilen doğrusal hatların birleştirilmesiyle oluşturulan yüzeyler; iki yada daha çok eğriye uyması beklenen modellemelerde kullanılır.	
Yumuşak Kenarlı (Lofted) Yüzey	Enine kesit eğri grubuna uydurulan yüzey çeşidi; ikiden fazla eğri ile parabolik olarak kesişen karkas yüzeylerde kullanılır.	
2D Süpürme (Swept) Yüzey	Kesit profilinin kılavuz eğri boyunca ötelenmesi yada döndürülmesi yoluyla oluşturulan yüzey; burada herhangi bir noktadaki yüzey kesiti sabit kalır.	
3D Süpürme (Harmanlayarak Çekme) Yüzey	Bir kesit profilinin iki kılavuz eğri boyunca ötelenmesi yada iki kesit profilinin tek bir kılavuz eğri boyunca ötelenmesi ile çizilen yüzeyler; çapraz yönde kesit şekli değişen modellerde kullanılır.	
Yama (Coons) Yüzeyi	Kapalı bir sınır teşkil eden dört yamanın kesişmesiyle oluşturulan yamaların harmanlanmasıyla örülen yüzey; birkaç yama seti tarafından biçimlendirilen yüzeylerde kullanılır.	

Dönüştürülmüş (Edit) Yüzeyler

Bu tip yüzeyler mevcut yüzeylerden türetilir (Çizelge 6.4)

Çizelge 6.4 Dönüştürülmüş (Türetilmiş) Yüzeyler (Lin ve Shinue, 1996)

YÜZEY TİPİ	AÇIKLAMA&UYGULAMALAR	ÖRNEK ÇİZİM
Kaydırılmış (Offset) Yüzey	Orijinal yüzeyin normali doğrultusunda belli bir mesafe kaydırılarak oluşturulan yeni yüzey tipidir.	
Budanmış (Trimmed) Yüzey	Mevcut yüzeyin daha önceden tarif edilmiş bir sınırla budanmasıyla oluşturulmuş yüzeylerdir.	
Yuvarlatma (Fillet) Yüzey	Keskin kenarlı iki yüzeyi, teğet bir yay kesitiyle birleştirerek türetilen bir yüzeydir.	
Harmanlanmış (Blend) Yüzey	Farklı ana yüzeyleri birbirine teğet olarak bağlamak suretiyle üretilen bir yüzey tipi.	

7. TOMOGRAFİK GÖRÜNTÜ VERİLERİNDEN 3D CAD MODELİN OLUŞTURULMASINA YÖNELİK UYGULAMA

7.1 Tomografiden Görüntü Alınması

Bu çalışmanın başladığı dönemde Türkiye’de bir endüstriyel tomografi cihazı mevcut olmadığı için, uygulama medikal bir bilgisayarlı aksiyal tomografide gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.1). Konvansiyonel tarama cihazları ile geometrik ölçümü kolaylıkla yapılamayacak kadar karmaşık ya da ters açılı iç ve dış yüzeylere sahip parçaların seçilmesine dikkat edilmiştir. Öncelikle Şekil 7.2’de gösterilen numune plastik fön nozulu ve alüminyum motor fanı üzerinde deneme çekimleri yapılmıştır.

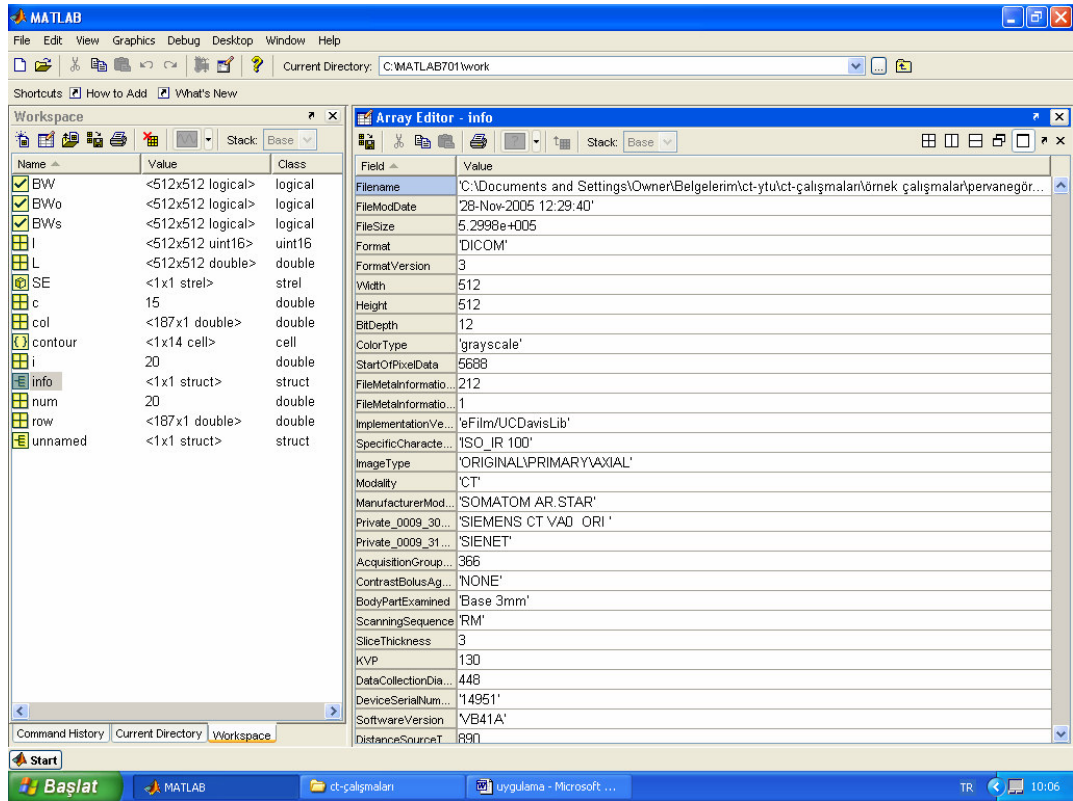


Şekil 7.1 Bir 4.kuşak jenerasyon bilgisayarlı spiral tomografi -512 matris, 3D görüntüleme- (SIEMENS SOMATOM AR)



Şekil 7.2 Tomografide taranan plastik fön nozulu ve alüminyum motor fanı

Tomografiden alınan dijital görüntüler DICOM formatında *.dcm uzantılı dosyalardır ve herhangi bir kesitteki görüntü bilgisinin yanı sıra cihazın özellikleri hakkında geniş bilgi verir (Şekil 7.3).



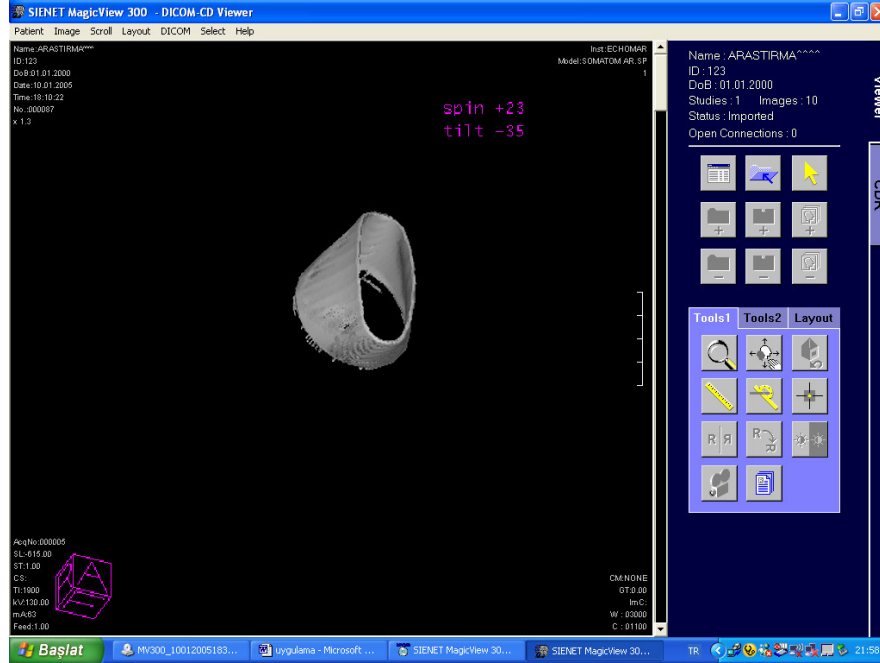
Şekil 7.3 Tomografiden alınmış bir görüntü bilgisinin, Matlab penceresindeki görünüşü

7.2 Çekim Parametreleri

Çizelge 7.1 Numunelerin tarandığı tomografinin çekim parametreleri

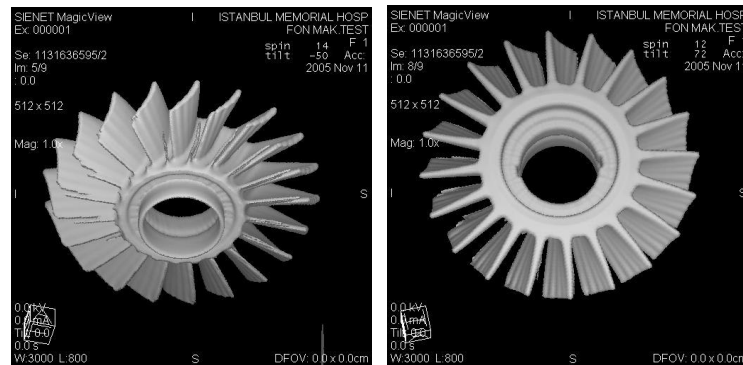
Tarayıcının Tipi:	Spiral Tomografi.
X-Işın Tüpünün Enerjisi:	130 kV.
Yaydığı Akım:	63 - 105 mA.
Alınan Kesit Sayısı:	20 - 25 adet.
Görüntü Matrisinin Boyutu:	512 x 512.
Piksellerin Gri Ton Değerleri:	16 bit.
Dilimler Arası Mesafe:	1 - 3 mm.
Piksel Aralığı:	0.36523 mm.

Nozul çekimleri Çizelge 7.1’de belirtilen çalışma parametreleri dahilinde gerçekleştirilmiştir. Spiral tomografide 1 mm.lik dilimler halinde yapılan tarama işlemi sonucu, cihaz üzerinde kullanılan bir yazılım yardımıyla Şekil 7.4’te verilen 3D görüntüler alınmıştır. Bunun yanı sıra, mevcut yazılım ile kesit resimlerini inceleme, mesafe ölçümü ve zoom işlemleri yapılabilmektedir. İkinci aşamada, benzer tip bir diğer medikal tarayıcıda, fan parçası üzerinde yapılan uygulamalarda, metal parçalardan da tomografik görüntülerin net bir şekilde alınabileceği anlaşılmıştır (Şekil 7.5).



Şekil 7.4 Tomografide taranmış nozulun, cihaza ait yazılımla ekranda elde edilen 3-boyutlu “render” görüntü (SIENET MagicView)

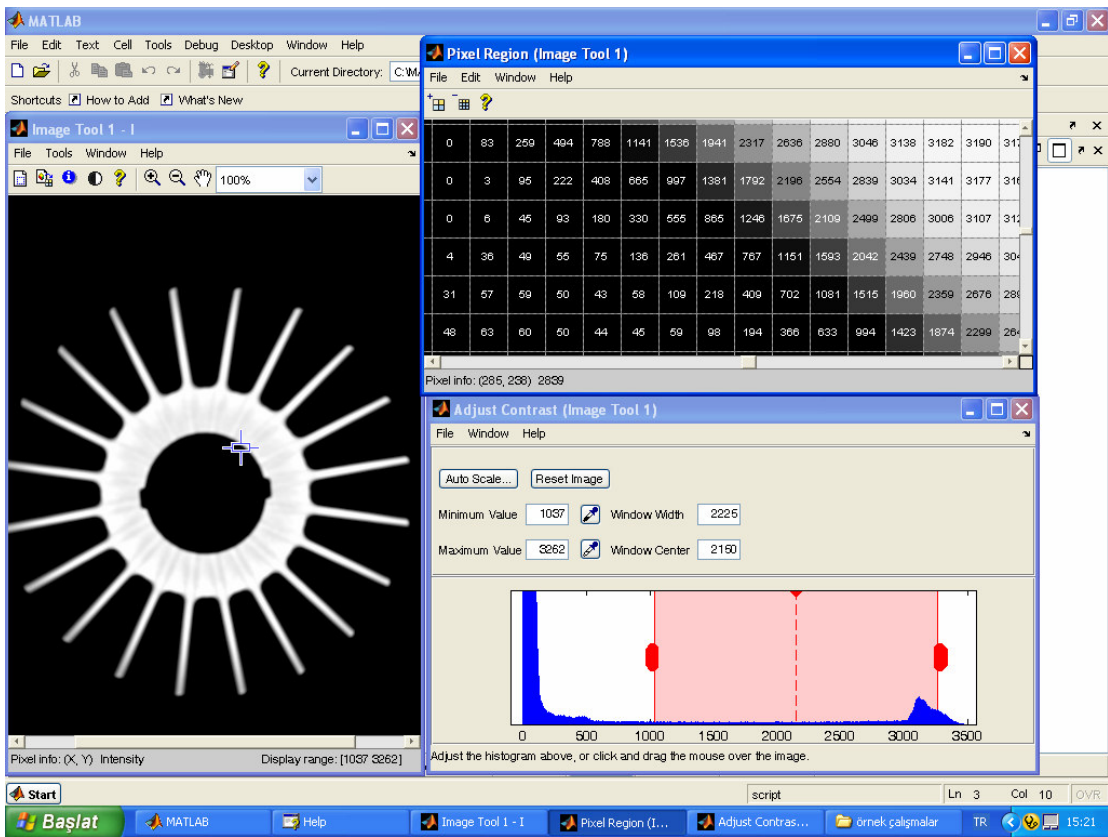
Cihazın kullanım süresinin kısıtlı oluşu sebebiyle, tarama işlemini kısa tutacak şekilde 3 mm.lik dilimler halinde kesit görüntüleri alınmıştır.



Şekil 7.5 Fan parçasının tomografide taranması neticesi oluşan, 3-boyutlu ekran görüntüsü

7.3 Görüntü İşleme Yöntemiyle Kesit Konturlarının Elde Edilmesi

Sırayla alınan kesit görüntüleri monokrom gri tonludur (Şekil 7.6) . Bu yüzden, boyut deformasyonuna uğramayacak şekilde optimum bir eşik değeri seçilmelidir. Bunu sağlayabilmek için, Bölüm 4.2.2’de bahsedilen MATLAB fonksiyonları kullanılarak, ikili (siyah-beyaz) görüntü formatına dönüştürülmüştür. Daha sonra, kapalı bir şekil oluşturmak maksadıyla, ortaya çıkan görüntüye morfolojik görüntü işleme fonksiyonu uygulanmış ve kenar arama operatörleri yardımıyla iç ve dış konturlar oluşturulmuştur. Böylece, nesnenin dışına sınır takibi algoritması tatbik edilerek sınır piksellerin konumlarına ulaşılır.



Şekil 7.6 MATLAB programı yardımıyla görüntü işlemeye yönelik çalışma penceresi

Aşağıda yazılan MATLAB fonksiyonunun çalıştırılması sonucunda “workspace” penceresinde, görüntüye ait “contour” dizisi bulunmuş olur ki; bu matrislerin her satır ve sütunu aynı zamanda sınır piksellerinin, kartezyen koordinat sistemindeki (x,y)

koordinatlarına işaret etmektedir. İşlem diğer kesitlere de aynen tatbik edilerek numune parçanın 2-boyutlu konturlarına ulaşılır.

```
function contour=konturbulma('*.dcm',thresh)

% dosya: dicom dosya adi

% thresh: olabilecek en dusuk contour pixel sayisi

% Or: contour=contourbulma('dicomdosya',20);

info = dicominfo(dosya)

I = dicomread(info);

BW = edge(I,'sobel');

SE = strel('square',3);

BWo = imdilate(BW,SE);

BW_s = bwmorph(BWo,'skel',Inf);

[L,num] = bwlabel(BW_s);

c=1;

for i=1:num

    if nnz(L==i)>thresh

        [row col]=find(L==i);

        contour{c} = bwtraceboundary(BW_s, [row(1), col(1)], 'W');

        c=c+1;

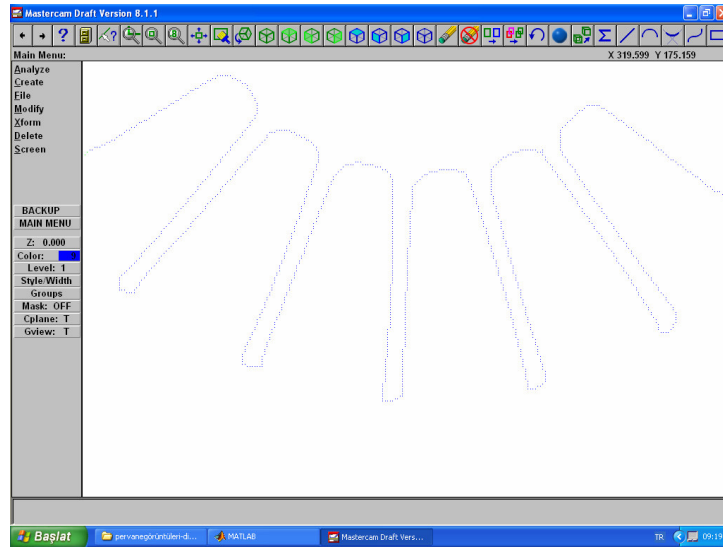
    end

end

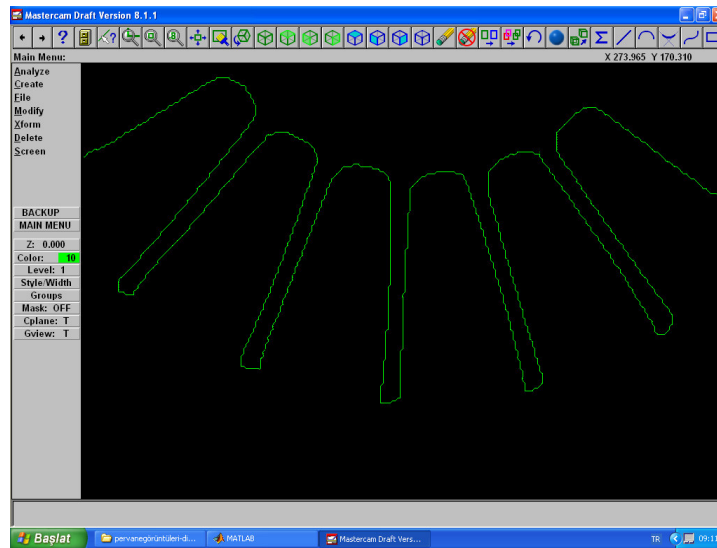
end
```

7.4 CAD Programına Aktarılan 2D Verilerden, 3D Geometrik Modellemeye Geçiş

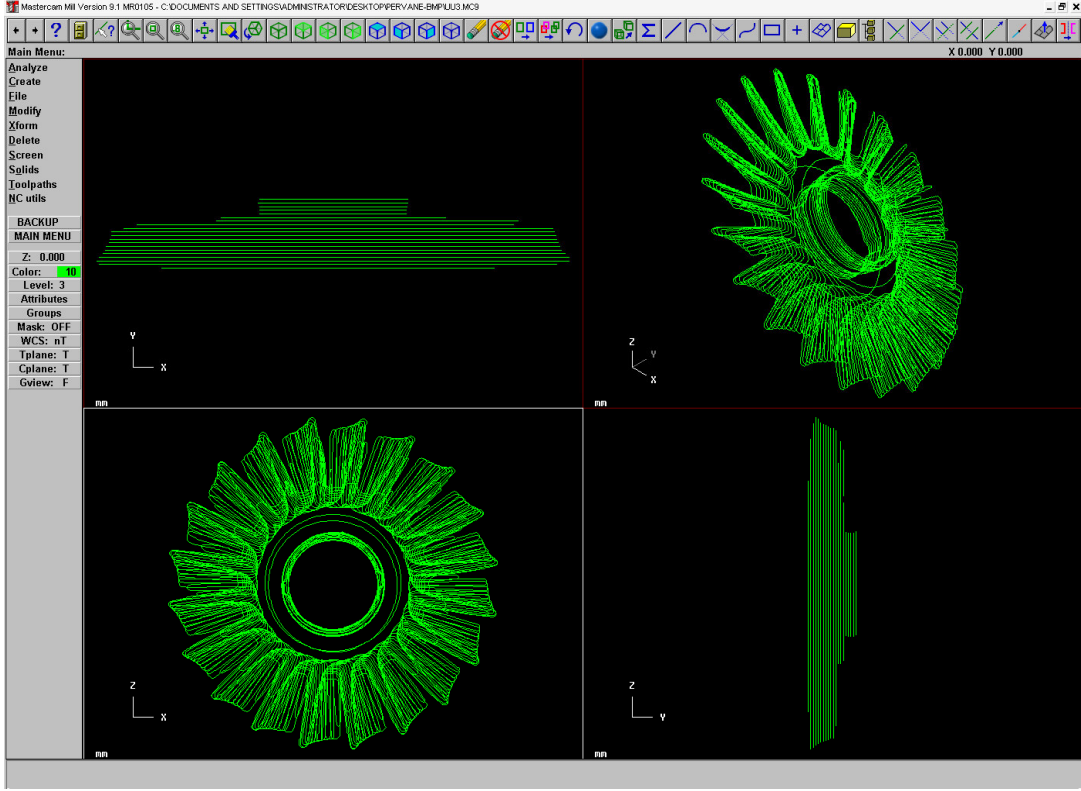
Diziler halinde alınan piksel koordinatları, MASTERCAM tasarım modülüne, ASCII formatının algılayabileceği şekilde *.doc uzantısıyla gönderilir. Böylece CAD programında piksel koordinatları, “point” komutuyla geometrik “2D nokta bulutu” halinde ekrana getirilmiş olur (Şekil 7.7). Eğri uydurma metoduyla bu noktalardan geçen bir “spline” ise Şekil 7.8’da gösterilmektedir.



Şekil 7.7 Bir fan kesit konturunun, MASTERCAM penceresinde nokta bulutu şeklindeki gösterimi



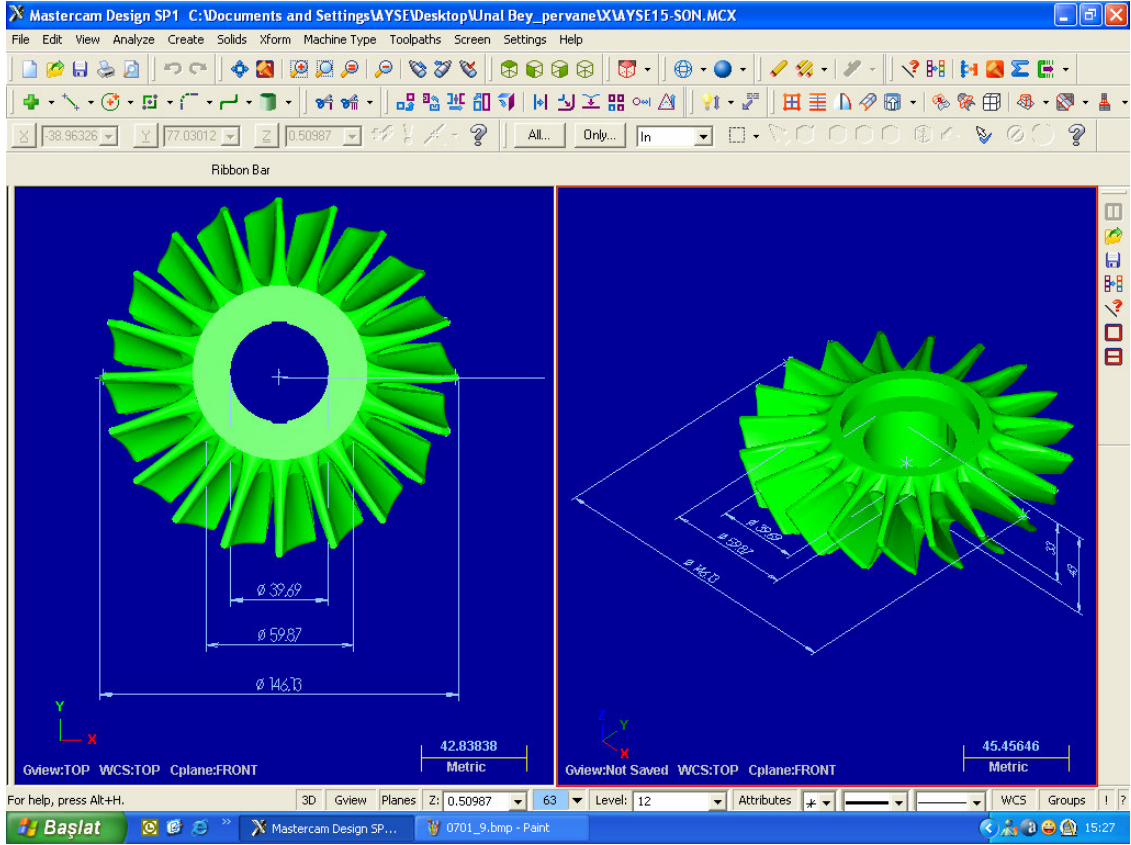
Şekil 7.8 Bir fan kesit konturunun, kapalı bir spline eğrisi olarak gösterimi



Şekil 7.9 Fanın 2D konturlarının bir araya getirilmesiyle oluşan perspektif görünüşü

Bundan sonra, 3D modellemeye geçilebilmesini temin edecek şekilde, 2D düzlemsel eğriler kümesi, Şekil 7.9'daki gibi üst üste katmanlar halinde “merge” edilmiştir. Son aşamada ise, olası şekil deformasyonlarını önlemek için her iki kapalı eğride bir “loft” komutu tatbik edilerek, yüzey örme işlemi tamamlanmıştır. Bu çalışmalarda asıl amaç olan ve elimizde bulunan fiziksel parçaya oldukça yakın boyutlarda oluşturulan CAD modeli Şekil 7.10'de göstermektedir.

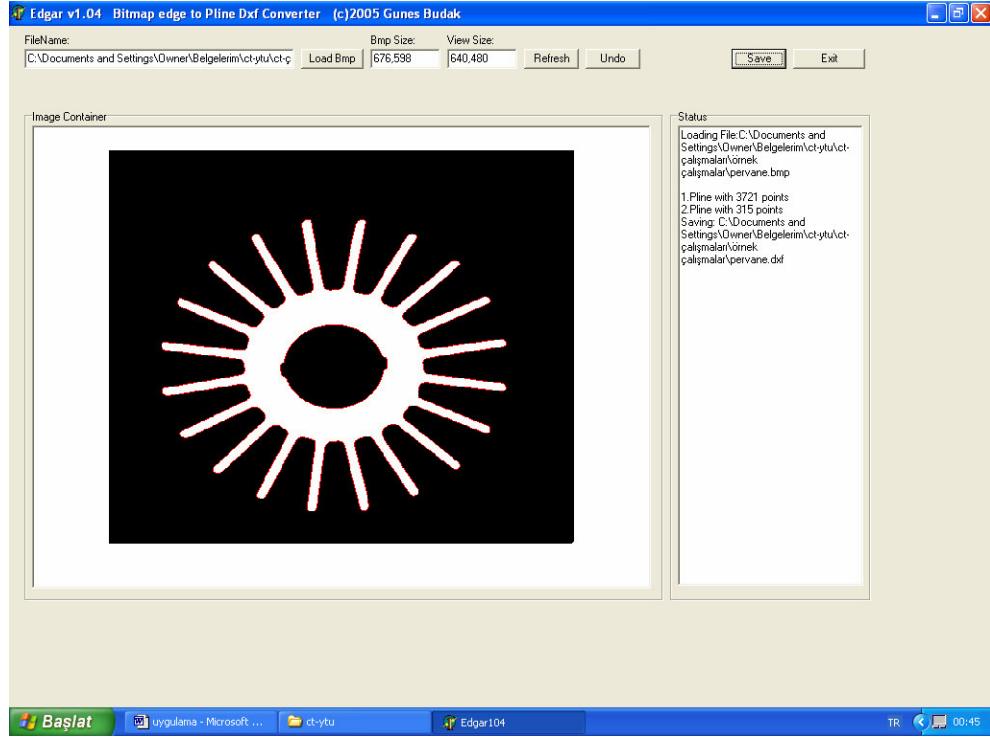
Tomografiden, görüntü işleme yazılımlarına aktarılan görüntü, Çizelge 7.1'de belirtilen birim pikselin ölçü karşılığı olan 0.365 değerinden ötürü büyük çıkmaktadır. Bu sebepten, CAD modelin yüzeyi tüm yönlerde aynı oranda küçültülerek, parçanın şekil gerçek boyutlarına getirilmiştir. Çalışmalar esnasında; parçanın tomografi cihazının tablasına tam dik bağlanamamasından dolayı, kesit yüzeylerinin eğik olduğu ve aynı katmanda birden çok kapalı kontur geliştiği görülmüştür. Burada, CAD datanın uzayda doğrultulması ve aynı düzlemde çoklu konturların birleştirilmesi konularına değinilmemiştir.



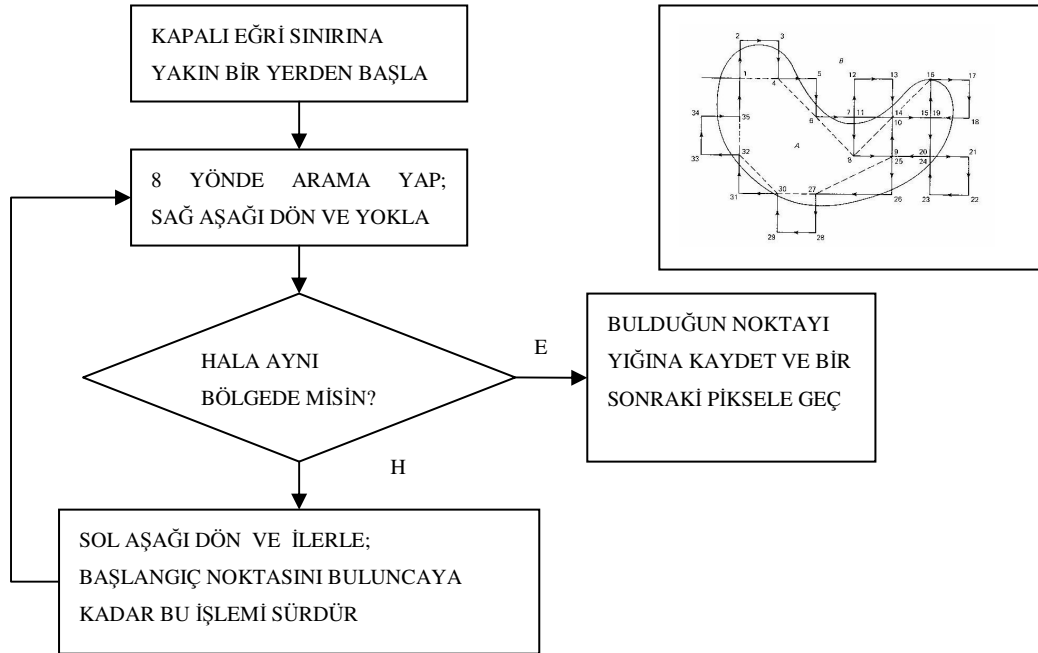
Şekil 7.10 Fan parçasının “loft” komutuyla oluşturulan 3D yüzey modelinin gösterimi

7.5 Bitmap Görüntüyü Polyline Formunda Grafiğe Çeviren Bir Program Uygulaması

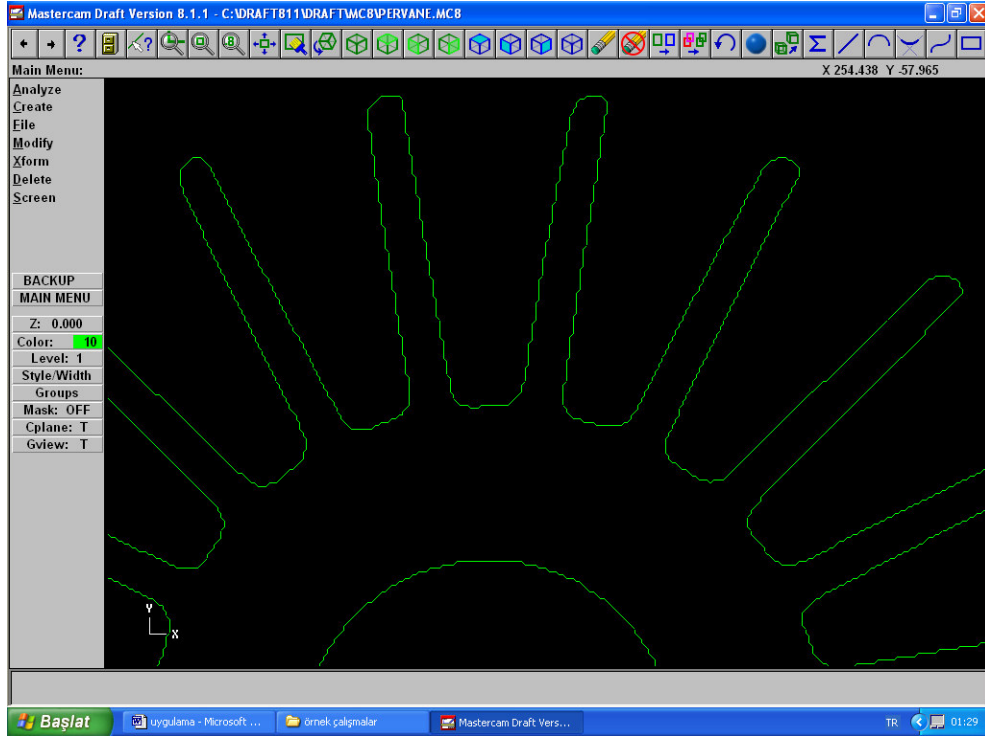
Nokta bulutunu elde etmenin alternatif bir yolunu bulmak amacıyla, bu çalışma içerisinde Pascal dilinde geliştirilen prototip yazılım ekranı Şekil 7.11’de gösterilmektedir. MATLAB görüntü işleme programı yardımıyla Bölüm 7.3’te açıklanan yöntemlerle *.bmp uzantısıyla kaydedilen kesit görüntüsü, bu yazılım modülünün içine gönderilmiştir. İkili görüntü formatında sınır takibi algoritması Şekil 7.12’de verilen yazılım ile tüm kesitler *.dxf uzantılı dosyalara dönüştürülerek MASTERCAM’ye tanıtılmıştır.



Şekil 7.11 Bitmap görüntüyü polyline formunda kırık çizgiler topluluğuna dönüştüren program penceresi



Şekil 7.12 Raster görüntüden vektörel geometriye geçiş programının akış diyagramı

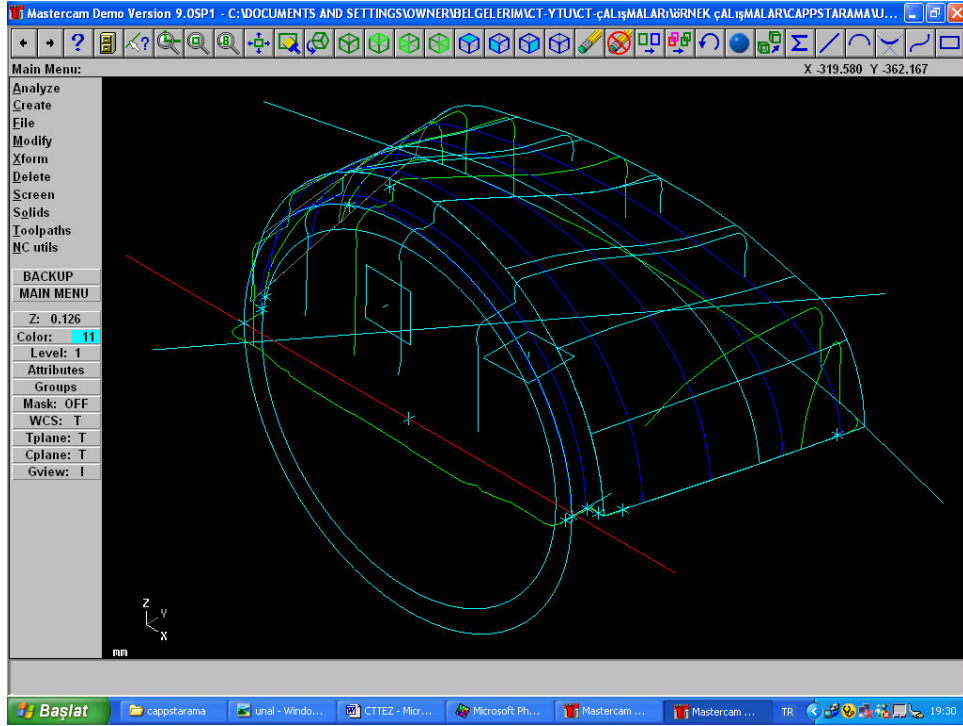


Şekil 7.13 Fan kesitinin CAD ortamına aktarılmış 2D polyline geometrisi

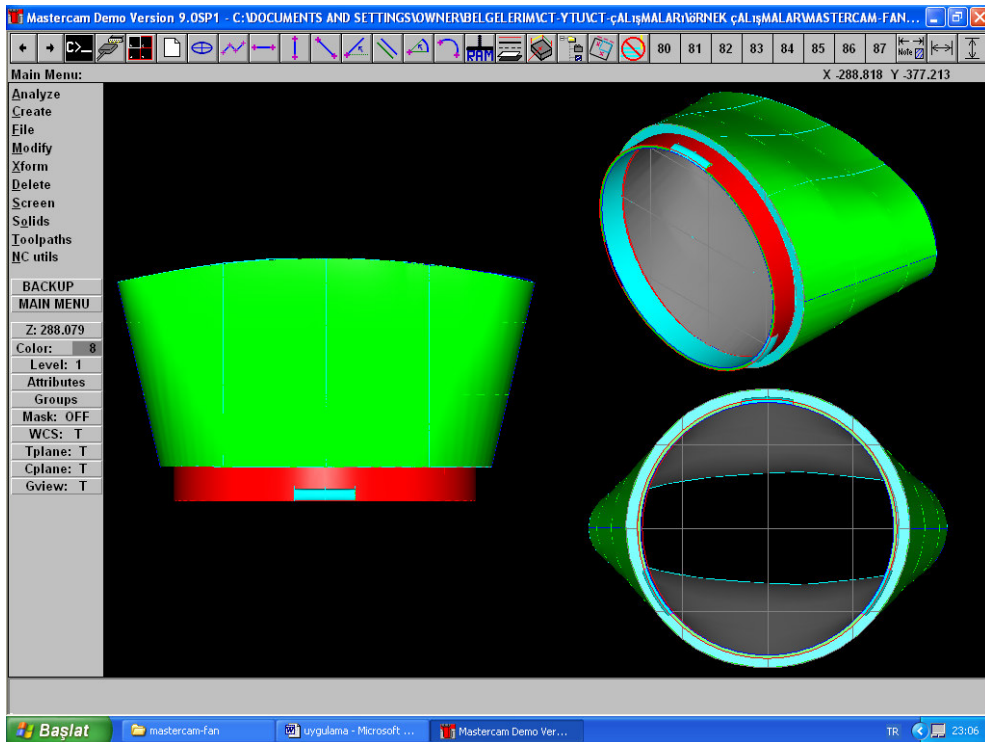
Sınır piksellerinden geçirilen konturun kırık çizgiler halinde Şekil 7.13'te gösterildiği gibi CAD ortamına aktarılmasından kaynaklanan bu geometriyi, sürekli ve yumuşak formlu kapalı bir eğri haline getirmek uzun işlemler gerektirmektedir. Bu prototip yazılımın, konturları nokta bulutu halinde CAD programına göndermesi ve dolayısıyla kolaylıkla spline eğirler oluşturmak suretiyle daha pürüzsüz bir kesit elde edilebilmesi; bunun daha ileri bir aşaması olarak, tersine mühendislik uygulamalarının vazgeçilmez ögesi 3D yüzeye doğrudan geçiş, bundan sonra yapılacak bir başka proje çalışmasının konusunu teşkil etmektedir.

7.6 Sonuçların Konvansiyonel Tarama Cihazlarında Yapılan Ölçümlerle Karşılaştırılması

Sanayide modellemeye yardımcı olarak en yaygın ve hassas bir şekilde kullanılan cihazlar; nokta temaslı koordinat-ölçme tezgahları ile optik CCD kameralı veya lazer proflu sayısallaştırıcılarıdır. Örneğin; CAPPSNT Ölçme yazılımı vasıtasıyla, COORD3 CMM cihazından aktarılan verilerden faydalanarak, nozulun belirli bölgelerinde kesit profili ölçülmesi işlemi Şekil 7.14'te gösterilmektedir. Bu operasyon esnasında, öncelikle parça belli



Şekil 7.14 Nokta temaslı CMM ile muhtelif kesit profilleri taranmış nozul



Şekil 7.15 CAD ile yüzey modellemesi yapılmış nozul

referans noktaları ve düzlemlerine göre doğrultulmuştur. Daha sonra verilen yön ve aralıkta, x eksenine boyunca y eksenine paralel taramalar gerçekleştirilmiştir. Böylece, CAD programında simetri eksenine göre çizilen eğrilerden yola çıkarak parçanın yüzey modellemesi bilinen tekniklerle tamamlanmıştır (Şekil 7.15).

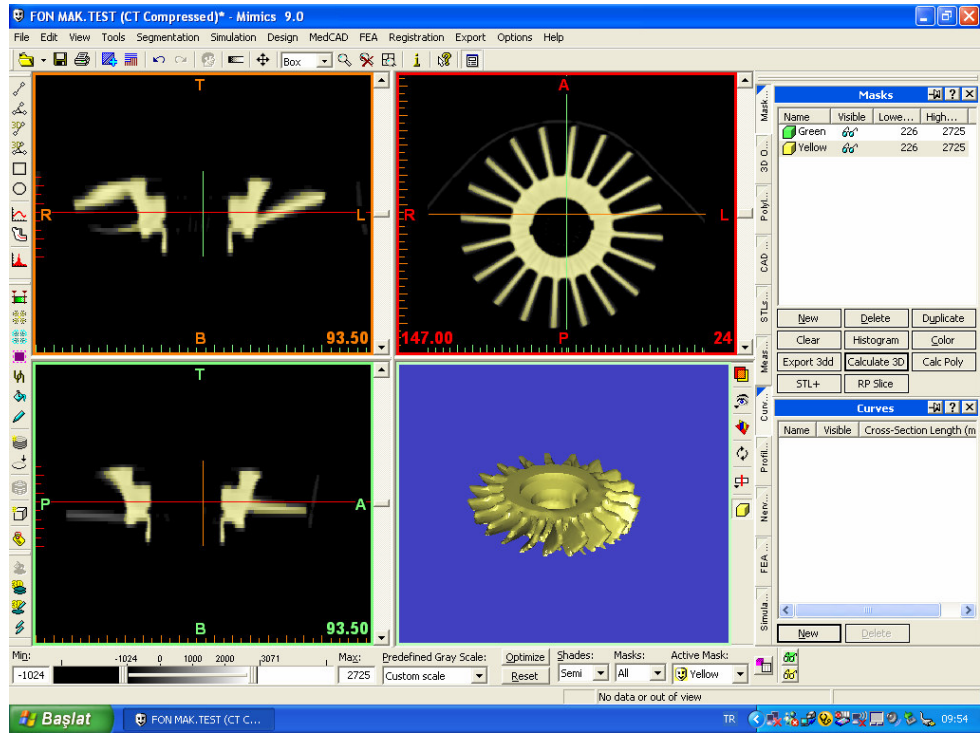
Motor fanı için Bölüm 7.4'te alınan netice, yukarıda bahsedilen yöntemle tasarlanan bir “master” model ve özellikle medikal alanda sıklıkla kullanılan MIMICS yazılımından alınan sonuçla mukayese edildiğinde ortaya çıkan sapma Çizelge 7.2’de açıklanmaktadır.

Çizelge 7.2 Uygulama çalışması ile mevcut programlardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması

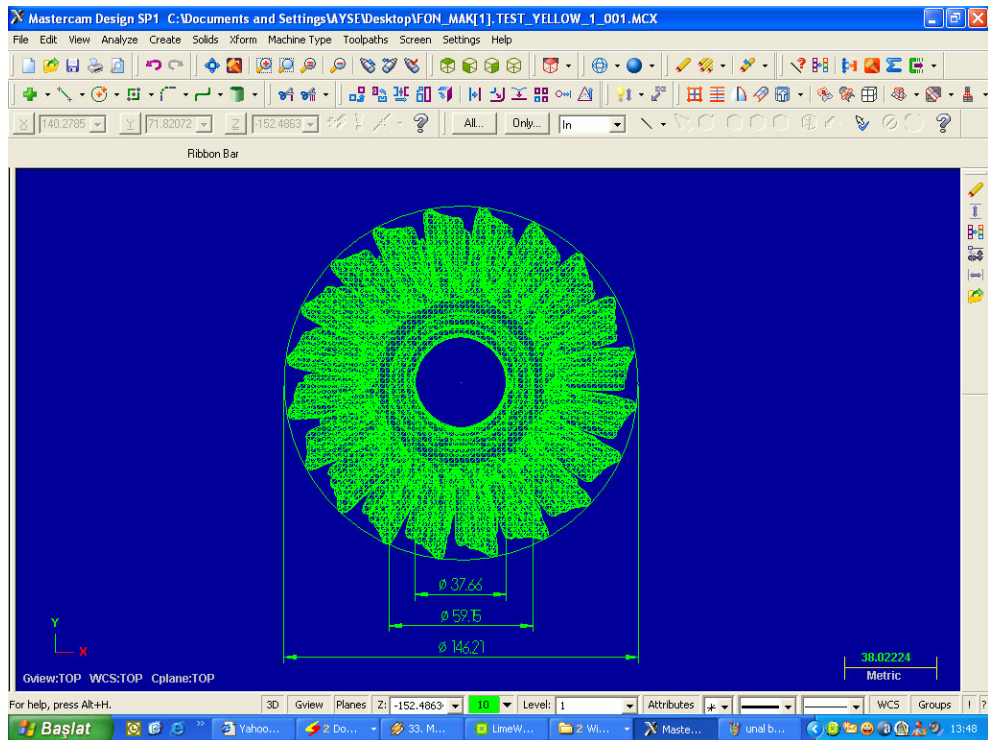
FANA AİT KRİTİK ÇAP DEĞERLERİ	NOMİNAL ÖLÇÜ	ÖRNEK ÇALIŞMA NETİCESİ	MIMICS İLE ÖLÇÜLEN
MİL YATAĞI ÇAPI	40.00 mm	39.69 mm	37.66 mm
RULMAN YUVASI ÇAPI	60.00 mm	59.87 mm	59.15 mm
KANAT UCU ÇAPI	145.00 mm	146.13 mm	146.21 mm

Mevcut imkanlarla yapılan bu çalışmada; profesyonel programlardan alınanlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bununla beraber, mm mertebesinde sapmalar görülmesinin sebepleri arasında; klinik tomografik görüntülerin endüstriyel anlamda yeterince hassas elde edilememiş olması dolayısıyla, görüntü işleme esnasındaki kayıplar ve CAD modelleme için transfer edilen bazı konturlardaki şekil bozuklukları sayılabilir.

MIMICS doğrudan “dicom” formatındaki tomografi görüntülerini hızlı bir şekilde analiz edip, STL formatında üçgen poligon yüzeyler örerek CAD programlarına yollayabilmektedir (Şekil 7.16 ve Şekil 7.17). Geometrik boyut tamlığının yanı sıra, form uyumu açısından köşe yarıçapları ve faturalı bölgelerde, tarama sıklığı detayların belirginleşmesinde büyük rol oynamaktadır. Dokunmalı CMM cihazları propun inceliği mertebesinde yüzeyden veri toplayabilmektedir. Bununla beraber yapılan uygulama ile; dıştan görülemeyen iç yüzeylerdeki yada ters açılı yüzeylerdeki ölçümlerde, bir tahribatsız bir ölçme tekniği olan tomografik görüntüleme sisteminin bu sahada rakipsiz olduğu gösterilmiştir. Böylece, bu verilerden yola çıkılarak RP (hızlı prototipleme) ve CAM (bilgisayar destekli imalat) aşamalarına kolaylıkla geçilebilmektedir.



Şekil 7.16 MIMICS programında, fanın tomografik kesitleri ve 3D görüntüsü



Şekil 7.17 Fan parçasının, Mimics'ten alınan STL datası üzerindeki kritik çaplar

8. SONUÇLAR

Tasarım mühendisleri gün geçtikçe karmaşılaşan makine parçalarının modellenmesinde, CMM ve tarayıcılarının yetersiz kaldığı yerlerde endüstriyel CT cihazlarına gerek duymaktadırlar. Örneğin yurtdışında yapılmış çalışmalardan yola çıkarak; bir motor bloğunu konvansiyonel metodlarla ölçüp tasarlamak bir hafta sürebiliyorken; endüstriyel bir tomografiden faydalanarak CAD çizimini elde etmenin bir gün gibi çok kısa sürede bitirilebileceğini rahatlıkla söyleyebiliriz. Bununla birlikte çok geniş karoseri gövdelerinin tasarımında ve kalite kontrolünde CMM'ler önemini korumaya devam edecektir. Yurtiçinde makul maliyetlere düşen CMM cihazlarına, artık her tasarım bürosunda ve KOBİ atölyelerinde rastlayabilmekteyiz. Oysa CT tarayıcılarının maliyeti aynı ebatta bir tam otomatik bir CMM'ye nazaran 5 kat daha pahalıdır. Buna rağmen, imalatla verimli çalışmaya getireceği katkılardan ötürü, ülkemizde de önümüzdeki 10 sene içerisinde belli başlı AR-GE laboratuvarlarında yüksek teknolojiye sahip CT sistemlerinin hizmet vereceğini inanıyorum.

Bundan sonra yapılacak araştırmalara bir basamak oluşturacağını düşündüğümüz bu çalışma vasıtasıyla; yaygın olarak kullanılan bir görüntü işleme yazılımı ve pratik bir bilgisayar programlama dilinden yola çıkarak basitçe raster görüntüden vektörel geometriye nasıl geçilebildiğine dair bir yaklaşım getirilmiştir. Yapılan uygulamalarda mevcut tersine mühendislik yazılımlarına nazaran boyut tamlığında daha iyi neticeler alınmakla birlikte, işlem süresi ve fonksiyonellik açısından düzenlenmesi ve geliştirilmesi gereken birçok husus bulunmaktadır. Türkiye'de yerli CAD yazılımı yapan merkezler çoğalmasına paralel olarak, piyasada sıklıkla adı geçen tersine mühendislik programlarına benzer ve hatta onların eksik yönlerini tamamlayabilecek yazılımların, yakın gelecekte bilgisayarlardaki yerini alacağını ümid ediyorum...

KAYNAKLAR

- Arslan, B., (2005), Bilgisayarlı Tomografi ile Görüntüleme Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Browne, J. A., Koshy, M. ve Stanley, J., (1998), "On the Application of Discrete Tomography to CT-Assisted Engineering and Design", *Int J Imaging Syst Technol*, 9: 78–84.
- Bushberg, J. T., Sibert, J. A., Leidholdt, E. M., Bone, J. M., (2001), *The Essential Physics of Medical Imaging*, Lippicott Williams&Wilkins, USA.
- Chang, C. C. ve Chiang, H., (2003), "Three-dimensional Image Reconstructions of Complex Objects by an Abrasive Computed Tomography Apparatus", *Int J Adv Manuf Technol*, 22: 708-712.
- Cho, Z. H., Jones, J. P. ve Singh, M., (1993), *Foundations of Medical Imaging*, Wiley-Interscience Publication, Newyork.
- Çakır, A., (2005), "3D Optik Taramanın Temel Prensipleri", *CAD-CAM Dizayn*, 3:54-56.
- Dastarac, D., (1999), "Industrial Computed Tomography at TOMO ADOUR: Control and Digitizing", *Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology*, 15-17 March 1999, Berlin/Germany.
- Dennis, M. J., (1992), "Industrial Computed Tomography", *Non-Destructive Evaluation and Quality Control*, *ASM Handbook Vol.17*: 358-386.
- Doğan, S., (2003), CT MR Kesitleri ve Dijital Görüntüler Kullanılarak Dokuların Üç Boyutlu Modellerinin Oluşturulması ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gonzalez R. C., Woods, R. E., Eddins S. L., (2004), *Digital Image Processing Using MATLAB*, Pearson Education Inc., USA.
- Görür, V., AKDOĞAN, A. N. ve YURCİ, M. E., (2003), "Optik Ölçme Yöntemlerinin Sac ve Plastik Parçaların İmalatındaki Sayısallaştırma, Tersine Mühendislik ve Muayene Prosesleri Yönünden Sağladığı Yararlar", *Mühendis ve Makina*, 527.
- Hastreiter, P., (2002), "Data Acquisition", 252-261, *Principles of 3D Image Analysis and Synthesis*, B. Girod, G. Greiner ve H. Niemann (Derl.), Kluwer Academic Publishers, USA.
- Hofmann, J., Flisch, A. ve Obrist, A., (2004), "Point Cloud Reconstruction with Sub-pixel Accuracy by Slice-adaptive Thresholding of X-ray Computed Tomography Images", *NDT&E International*, 37: 373-380.
- Knopf, G. K. ve Al-Naji, R., (2001), "Adaptive Reconstruction of Bone Geometry from Serial Cross-sections", *Artificial Intelligence in Engineering*, 15: 227-239.
- Lai, J. Y, Doong, J. L. ve Yao, C. Y., (1999), "Three-Dimensional CAD Model Reconstruction from Image Data of Computer Tomography", *Int J Imaging Syst Technol*, 10: 328-338.
- Lin, J., Shinue, T., (1996), *MASTERCAM Version 6*, Scholars International Publishing Corp., Michigan.

Liu, S. ve Ma, W., (1999), "Seed-growing Segmentation of 3-D Surfaces from CT-contour Data", Computer-Aided Design, 31: 517-536.

Martz, H. E. ve Schneberk, D., (2001), "Industrial Computed Tomographic Imaging", Advanced Signal Processing Handbook, CRC Press, USA.

Ryu, J. H., Kim, H. S. ve Lee, K. H., (2004), "Contour-based Algorithms for Generating 3D CAD Models from Medical Images", Int J Adv Manuf Technol, 24: 112-119.

Seeram, E., (2001), Computed Tomography, W.B.Saunders Company, USA.

Shirai, Y., (1987), Three-Dimensional Computer Vision, Springer-Verlag, Germany.

Spisz, T. S., Bankman, I., (2000), "Medical Image Processing and Analysis Software", Handbook of Medical Imaging Procesing and Analysing , Academic Press., USA.

Zeid, İ., (1991), CAD/CAM Theory and Practice, McGraw Hill Inc., Singapore.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] [www. cagcadcam.com](http://www.cagcadcam.com)

[2] [www. geomagic.com](http://www.geomagic.com)

[3] [www. mathworks.com](http://www.mathworks.com)

[4] [www. ses3000.com](http://www.ses3000.com)

[5] [www. turkcadcam.net](http://www.turkcadcam.net)

EKLER

Ek 1	Tersine Mühendislik'te (Reverse Engineering) Sıkça Kullanılan Terimler
Ek 2	3D Tarama Maksadıyla Yaygın Kullanılan Cihazların Karşılaştırılması
Ek 3	Uygulamada Kullanılan Numuneye Ait Tomografik Görüntüler

Ek 1 Tersine Mühendislik'te (Reverse Engineering) Sıkça Kullanılan Terimler [1]

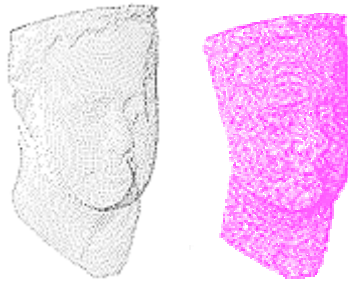
Tarama (Scanning): Modele ait nokta verilerin kesintisiz biçimde otomatik olarak toplanması (FIDIA, Cyclone gibi sistemlerde).



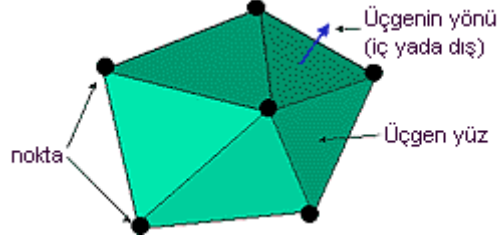
Sayısallaştırma (Digitising): Modele ait nokta verilerin tek tek toplanması (genellikle touch probe'lu sistemlerde).



Nokta bulutu: Tarama işlemi sırasında toplanan nokta gurubu.



Üçgen yaratma (Triangulation): Yüzeyi temsil edecek şekilde nokta bulutunun üzerli gruplar halinde işlenmesi. Bu temsil şekli genellikle “facet” olarak adlandırılır.



Poligonizasyon (Polygonisation): Üçgen yaratmanın aynısı.

Facet: Yukarıda bahsedilen üçgen yaratma işlemindeki her üçlü gurubun oluşturduğu yüz. Her facet bir yöne (veya normal vektörüne) sahiptir.

Normal: Bir yüzey veya facet'in yönü (genellikle içi veya dışı).

STL (Standard Triangulated Language): Hızlı prototip uygulamalarındaki gücünde dolayı, genellikle Sterolitografi olarak tanımlanan dosya formatı.

Sterolitografi (Stereolithography): Genellikle SLA olarak adlandırılan Hızlı Prototip işlemi.

Yüzey Hazırlama: Taranan modelin biçimine ve elde edilen nokta setinin karakteristik özelliklerin uygun olarak mühendislik yüzeyleri yaratma işlemi.

Dokunmalı

Koordinat Ölçme Makinası (CMM): RE amaçları için az sayıda nokta toplamak için kullanılan sistemler.

Sürekli Tarayıcılar: Taranan modelli sürekli olarak izleyen tarama kafası kullanan sistemler.

Dokunmasız

Lazer tarayıcılar: Genellikle nokta, bant ve alan tarayan cihazlar. Bu cihazlar tek başına veya herhangi bir CMM üzerine retrofit olarak ta olabilir.

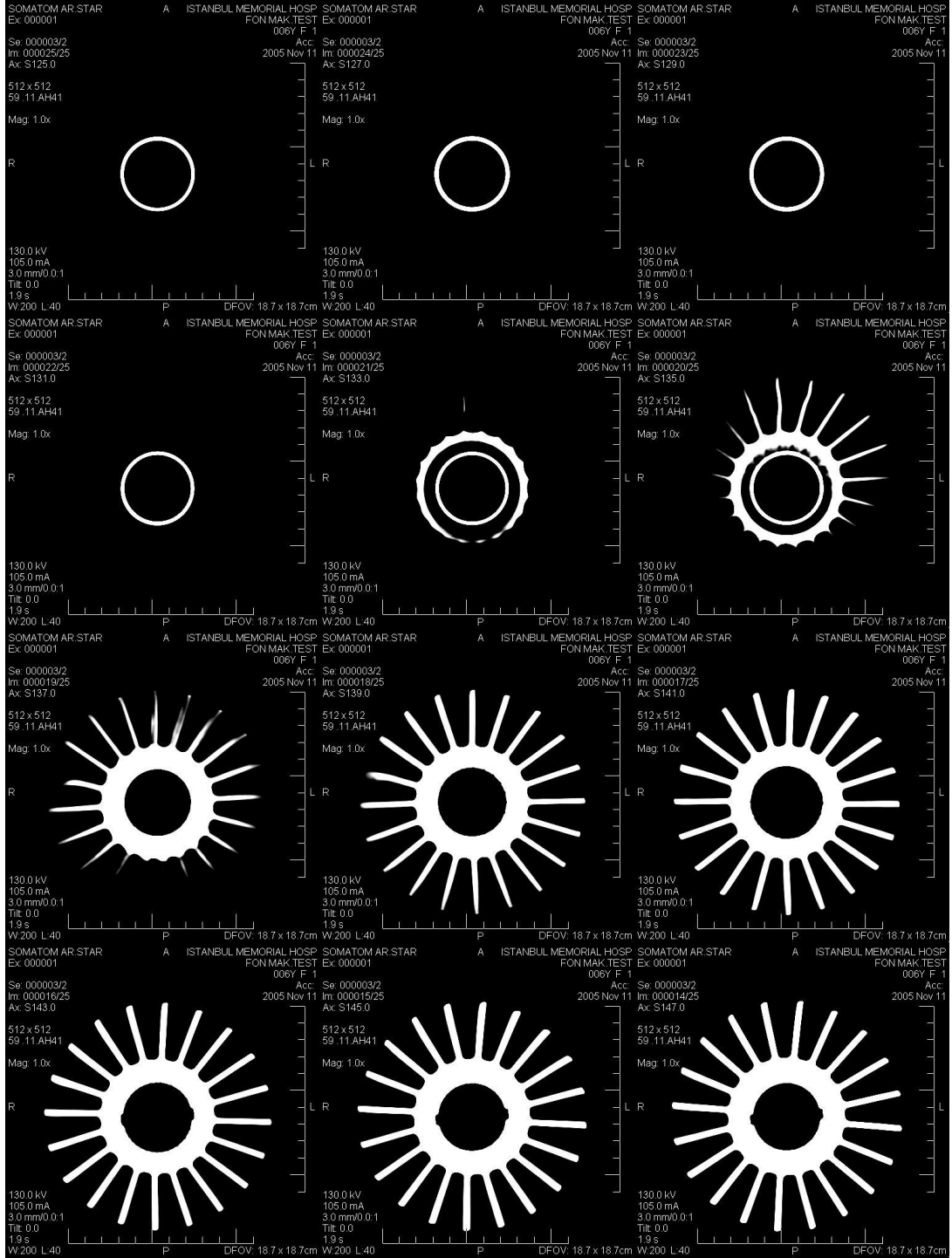
Işıklı tarama Sistemleri: Fiziksel objenin taranacak yüzeyleri üzerine özel bir ışık dizisi yansıtıp, sayısal kamera ile veri toplayan optik cihazlar.

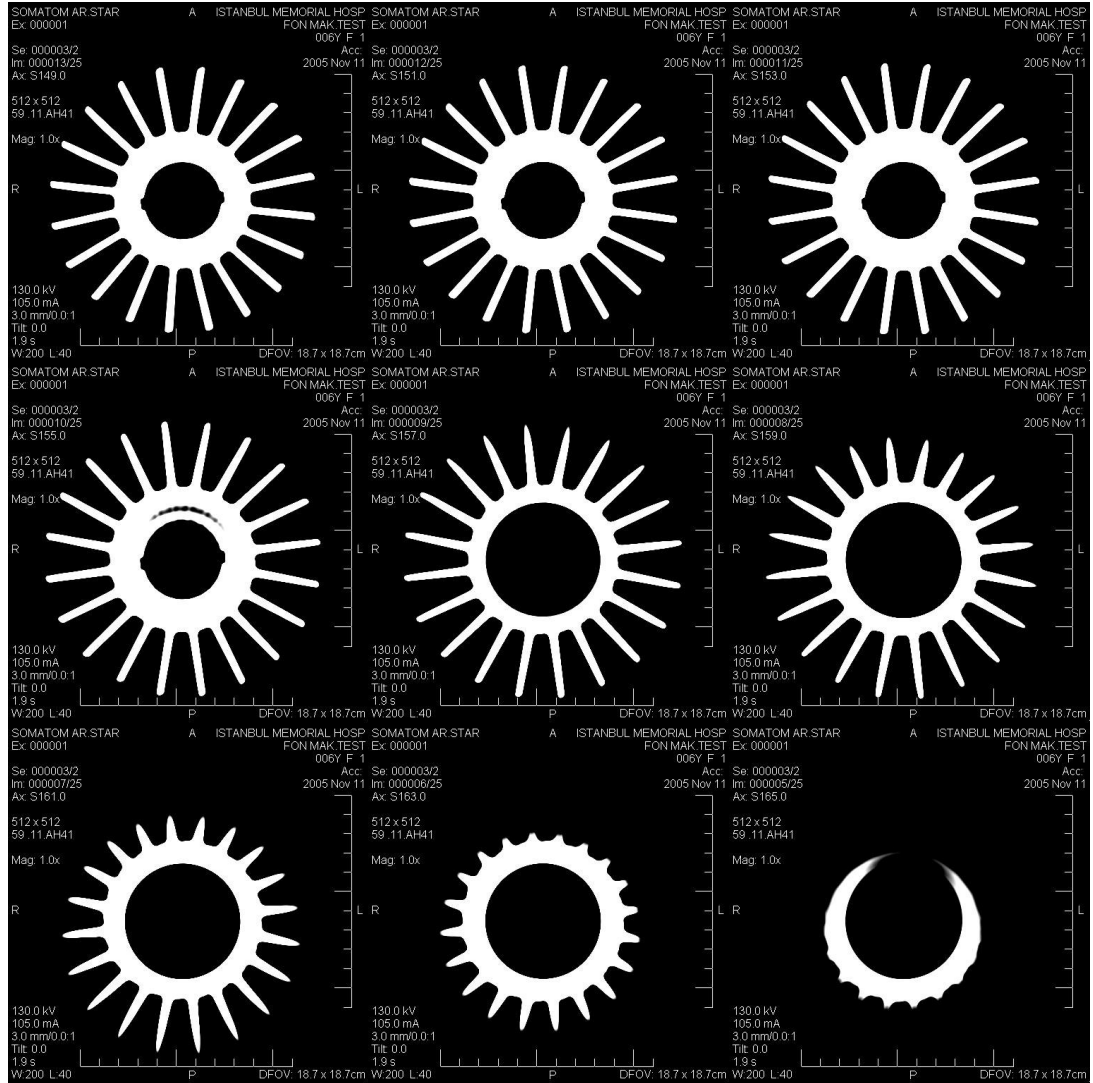
Ek 2 3D Tarama Maksadıyla Yaygın Kullanılan Cihazların Karşılaştırılması [2]

FİRMA	ÜRÜN	TEKNOLOJİ	HASSASİYET	ÇALIŞMA HACMİ	HIZ	AÇIKLAMA
3D Digital	Optix 400M	Lazer Demeti	± 0.1 @ 650 mm	300x300 - 650x650 mm	1,000,000 Nokta / Tarama	Orta Büyüklükteki Nesneler İçin...
3D Scanners	ModelMaker Z35	Çizgisel Lazer	(0.025 mm)	50 mm	30 Çizgi / Saniye	
Brueckmann	OptoTOP	Izgara Projeksiyonu	0.007 - 0.06 mm	30x40x25 - 480x640x400 mm	1,400,000 Nokta / .9 Saniye	Renk Seçeneği Mevcut...
Callidus	Callidus CT 900	Lazer Üçgenleme	(.01-.07 mm)	R, 800 ; H, 1400 mm	4,000 Nokta / Saniye	5 eksen...
CGI	CSS-300	Enine Kesit Taraması	± 0.0015 mm	180x125x230 mm	-	Karmaşık İç Şekiller İçin...
Cimcore	Stinger II	Çizgisel Lazer + Temaslı Prop	± 0.185 mm	R, 4600	-	
Cyberware	Model 3030RGB/PS	Kameralı Lazer Üçgenleme	-	1000x260x300 mm	14,580 Nokta / Saniye	Yüksek Çözünürlüklü Renkli
FARO Technologies	FARO Arm ControlStation	Temaslı Prop	± 0.013 mm	R, 1850 mm	-	
Geodetic Systems	V-Stars/S8	Fotogrametri	± 0.025 mm	77°x55°	1 Resim / 4 Saniye	
GOM	ATOS III	Izgara Projeksiyonu	0.004 - 0.05 mm	0.150x0.150x0.130 - 2x2x2 m	4,000,000 Nokta / Tarama	
Hytec	FlashCT FCT-1600	X-Ray (Bilgisayarlı Tomografi)	(0.127 mm)	406 mm	-	
Immersion	MicroScribe MX	Temaslı Prop	± 0.101 mm	R, 635	-	
Konica-Minolta	VIVID 9i	Demet Lazer	± 0.05 mm	93x69x26 - 1485x1121x1750 mm	2.5 Saniye / Tarama	
Kreon	ZEPHYR KZ 25	Çizgisel Lazer	± 15 μ	Kullanıldığı CMM'ye bağlı	30,000 Nokta / Saniye	Renishaw PH10 uyumlu, FARO, ROMER, GARDA portatif CMM ve CNC tezgah üzerine takılabilir.

Laser Design	CS - 7139	Lazer	3.2 + 3.5L μ	H, 1005 mm	.75 Metre / Saniye	
Metron Systems	MSG2	Lazer Tarama Kafası (Çizgisel)	± 0.025 mm @ 2σ	305 mm x 60°	5,400 Nokta / Saniye	
Nextec	WIZblade 12-7-5	Lazer	0.014 mm @ 2σ	1200x650x500 mm	50 Nokta / Saniye	
Perceptron	Scanworks Contour Probe	Çizgisel Lazer	0.035 mm @ 3σ	L, 23 – 71 mm	23,040 Nokta / Saniye	
Polhemus	FastSCAN	Çizgisel Lazer	1 @ 200mm	R, 750 mm	50 Çizgi / Saniye	
Roland DGA	LPX – 1200	Lazer (Döner Tip)	± 0.05 mm	130x130x203.3 mm	-	
Shapegrabber	LM600	Lazer	± 0.03 mm	600x160x165 mm	15,000 - 100,000 Nokta / Saniye	
Steinbichler	Comet IV 4M	Izgara Projeksiyonu	$\pm 0.005 - 0.02$ mm	80x80x60 - 760x760x500 mm	4,000,000 Nokta / Tarama	
Steintek	Line Sensor	Çizgisel Lazer	$\pm 0.2-0.5$ mm	L, 10 – 200 mm	-	
Wolf&Beck	OTM 3S	Çizgisel Lazer	(0.002 mm)	Kullanıldığı CMM'ye bağlı	3,500 Nokta / Saniye	

Ek 3 Uygulamada Kullanılan Numuneye Ait Tomografik Görüntüler





ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 20.09.1967

Doğum yeri İstanbul

Lise 1981-1984 Şişli Lisesi

Lisans 1984-1990 İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fak.
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2003-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı

Çalıştığı kurumlar

1992-1994 TEKNİKEL Ticaret ve Sanayi. A.Ş. Satış Destek

1994-1997 LIBRA Yapı Otomasyon A.Ş. Ürün Satış Şefi

1997-1999 GLOBAL Yapı Elemanları Ltd. Satış Koord.

1999-2001 GLOBUS Teknik Ekipmanları Ltd. Satış Müh.

2001-Devam ediyor SES3000 CNC Ltd. Şti. CMM Satış Müd.