

## KATI MODELLEME İLE İMALAT HATALARININ TESPİTİ

M. Cemal ÇAKIR\*

### ÖZET

*Bu çalışmada iş parçalarındaki imalat hatalarının bir koordinat ölçme cihazı ile iş parçasının yüzeyinden alınan ölçümlerin aynı iş parçasının bilgisayar yardımıyla hazırlanmış referans katı modeli (master solid model) ile karşılaştırılarak otomatik olarak tespiti incelenmiştir.*

*Çalışma süresince Bath Üniversitesinde geliştirilmiş lazerli koordinat ölçme cihazının<sup>1</sup> çalışma prensibi örnek alınmış olup yine Bath Üniversitesinde John Woodwark tarafından hazırlanmış DORA katı modelleme paket programı<sup>2</sup> bazı değişikliklerle kullanılmıştır.*

### ABSTRACT

#### Detecting Manufacturing Errors By Using Solid Models

*In this paper some newly devised automatic methods are described that compare a set of measurements of an engineering component taken by a coordinate measuring machine with a master solid model of the measured component obtained from a CAD system. Once matched, the two may then be compared to find any differences resulting from manufacturing errors and those manufacturing errors can automatically be reported.*

*The algorithms used in the project have been developed especially to handle the large numbers of surface points that may be gathered from a component using*

\* Yrd. Doç. Dr.; Uludağ Üniv. Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle/BURSA.

## 1. GİRİŞ

Bir iş parçası imal edildikten sonra (veya imalat esnasında) bir seri kontrol işlemine tabi tutulur. Bu kontrol işlemleri bir referans parçaya göre yapılır ve bu referans parçadan belirli bir tolerans dışındaki farklılıklar imalat hatalarını meydana getirir.

Bu çalışmada bir iş parçası yüzeylerinden toplanmış bir noktalar grubunu (bu işlem bir koordinat ölçme cihazı ile gerçekleştirilir) bir iş parçasının katı modeli ile otomatik olarak karşılaştıran bir grup algoritma tanıtılacaktır. Şekil 1 de basit bir iş parçasının yüzey noktaları (her bir + bir noktayı temsil etmektedir) ve katı modeli gösterilmiştir.

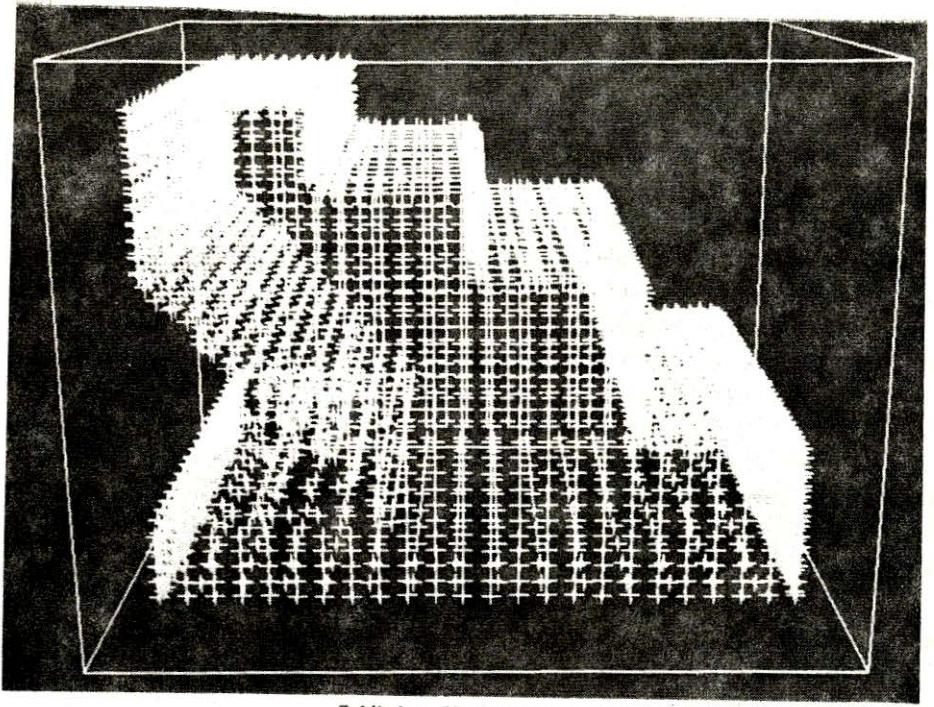
Karşılaştırma öncesinde iki önemli sorun ortaya çıkmaktadır: karşılaştırılacak veri tiplerindeki farklılık-iş parçasının ölçüm yoluyla üç boyutlu koordinatları belirlenen yüzey noktaları aynı iş parçasının bilgisayarca oluşturulan katı modelinin yüzeyleri ile karşılaştırılacaktır, yani bir noktalar grubu ile yüzeylerin karşılaştırması söz konusudur ve iş parçası ile katı modelin ait oldukları koordinat sistemlerinde veya konumlarında olabilecek farklılık. Bunun yanı sıra ölçme cihazının hassasiyetine bağlı olarak yüzey noktalarının koordinatlarının tespitinde olabilecek küçük bir hata da dikkate alınmak zorundadır. Bu çalışmada tanıtılan tüm algoritmalar bu sorunları çözümlenerek imalat hatalarının otomatik olarak tespitine olanak verecek algoritmalarlardır.

## 2. ALGORİTMALAR

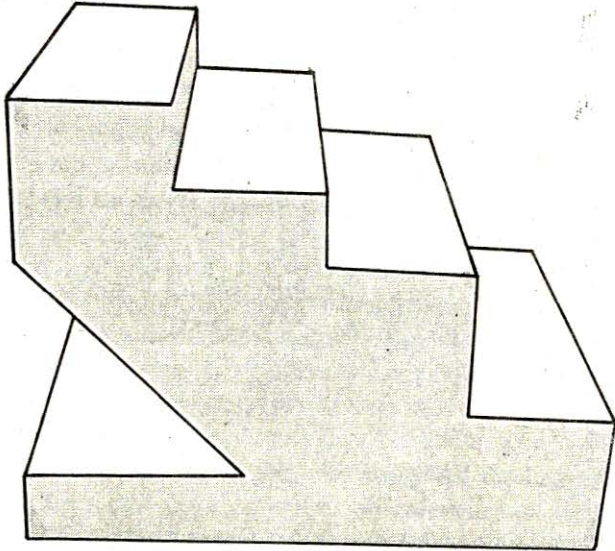
Amacın gerçekleştirilmesi için şu algoritmalar kullanılmıştır:

- a. Ölçülen yüzey noktalarının birer uç (vertex) teşkil ettiği bir üçgen prizmalar yapısı oluşturan algoritmalar - böyle bir yapı iş parçasının yüzeylerinin üçgenler grubu ile temsil edilebilmesine olanak sağlayacaktır;
- b. Üçgen prizmalar yapısı içerisinde hangi üçgen prizmaların katı (solid) olduğunu tespit eden algoritmalar - tüm katı üçgen prizmaların toplamı ölçülen iş parçasını temsil edecektir,
- c. Ölçülen iş parçasının yüzey modelini (surface model) oluşturan algoritmalar - her bir katı üçgen prizmasının iş parçasının yüzeyinde yer alan yüzlerinin bulunması yüzey modelin oluşturulmasını sağlayacaktır,
- d. Aynı düzlemde yer alan üçgenlerin bulunarak iş parçasının gerçek yüzlerinin tespitini sağlayan algoritmalar,





Şekil: 1 a - Yüzey Noktaları



Şekil: 1 b - İş parçasının katı modeli

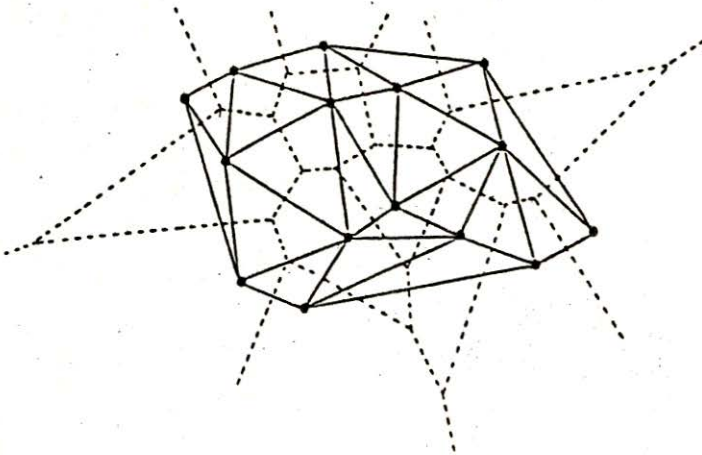
e. İş parçasının bulunan gerçek yüzlerinin katı modelin yüzleriyle karşılaştırılmasına olanak sağlayan algoritmalar,

Böyle bir karşılaştırma iş parçasındaki mevcut imalat hatalarının otomatik olarak tespit edilmesini sağlayacaktır.

## 2.1. Üçgen Prizmaların Oluşturulması-Delaunay Üçgen Prizmaları

Yukarıda da belirtildiği gibi karşılaştırma işleminin hemen başlangıcında katı modeli ile karşılaştırılacak ölçülmüş iş parçasının sadece yüzey noktalarının koordinatları  $(x, y, z)$  bilinmektedir. Bu noktalardan hangilerinin komşu olduğu veya hangilerinin aynı yüzey üzerinde bulunduğu gibi bilgiler bu ilk aşamada bilinmemektedir. Tüm bu bilgilerin elde edilmesi amacıyla yüzey noktaları grubunun Voronoi diagramı<sup>3,4</sup> oluşturulur. Voronoi diagramında her bir nokta için bir Voronoi çokgeni vardır ve her bir çokgenin köşelerine en yakın üç noktanın (üç boyutta dört nokta) birleştirilmesi Delaunay üçgenlerini meydana getirir. Üçgenleri meydana getiren noktalar çokgenin köşelerine eşit mesafede olup Voronoi kenarları bu üçgenlerin dik açı ortaylarıdır.

Voronoi diagramı veya Delaunay üçgenleri yöntemi çeşitli özelliklerinden dolayı (üçgenlerin eşkenar üçgen olmaları, uzayda dağılmış bir noktalar grubu için yalnızca bir Voronoi diagramı oluşturulabilmesi gibi) çok yaygın bir yöntemdir. Uzayda rastgele dağılmış noktaların temsil ettiği en optimum şeklin bulunması ve bu noktalardan geçen yüzeylerin en iyi şekilde yakınsanmalarının (polyhedral approximation) yanı sıra cisimlerin hacimlerin, ağırlık merkezlerinin ve denge konumlarının bulunması, sonlu elemanlar yönteminde gerilme ve ısı analizlerinde kullanılmak üzere ağ oluşturulması (mesh generation) gibi alanlarda



Şekil: 2 - Voronoi diagramı (noktalı çizgiler) ve Delaunay üçgenleri (koyu çizgiler)



da bu yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle ilgili geniş bir literatür araştırması referans 4 de verilmiştir. Şekil 2 de 15 nokta için Voronoi diagramı ve Delaunay üçgenleri (2 boyutta) gösterilmiştir.

Üç boyutlu uzayda Delaunay üçgenleri ölçülen yüzey noktalarının uç noktalarını teşkil ettiği Delaunay üçgen prizmalarına dönüşür. Bu üçgen prizmaların toplamı ise ölçülen iş parçasını oluşturur. Bazı üçgen prizmaların bazı üçgen yüzleri iş parçası yüzeylerinin üçgenler kümesi ile temsilini sağlayacak ve iş parçasının yüzeylerini en iyi şekilde yakınsayacaklardır. Ancak önce bu üçgen yüzlerin hangileri olduğunun bulunması gerekir.

## 2.2. Üçgen Prizmaların Sınıflandırılması

Ölçülmüş iş parçasının yüzeylerinin üçgenler kümesi olarak temsil edilebilmesi için öncelikle Delaunay üçgen prizmalarının sınıflandırılması gerekir. Üçgen prizmalarının oluşturulması sırasında bazı prizmalar ölçülmüş iş parçasının içinde kalmış ve dolayısıyla katı (solid) kabul edilmiş, bazıları ise iş parçasının dışında yer almış ve hava (air) olarak sınıflandırılmışlardır. Böyle bir sınıflandırmanın varlığı katı prizmalar ile hava prizmalar arasında sınır teşkil eden bir grup üçgen yüzün bulunmasını sağlar ve bu üçgen yüzlerinde toplamı ölçülmüş iş parçasının yüzeylerini oluşturur. Şimdi sınıflamanın ne şekilde gerçekleştirildiğini inceleyelim.

Her bir noktanın ölçülmesi için bir laser ışınının bu noktaya yönlendirilmesi veya mekanik bir probun bu noktaya dokunması yeterlidir. Eğer ışın veya prob tarafından alınan yol (path) kaydedilecek olursa bu yolun içerisinden geçtiği her Delaunay üçgen prizması hava olarak sınıflandırılmalıdır. Her bir noktanın yüzeyde bulunduğu gözönüne alınacak olursa bunun nedeni çok açıktır. Sınıflandırma işleminde kullanılan algoritma ışın veya prob tarafından noktanın ölçülmesi sırasında alınan yolu noktadan başlayarak geriye doğru takip eder ve yol üzerinde bulunan tüm üçgen prizmaları hava olarak sınıflandırır.

Algoritmanın nasıl çalıştığı referans 5'de verilmiştir. Yolu geriye doğru izleme işlemi bütün yüzey noktaları için tekrarlanırsa üçgen prizmaların büyük bir çoğunluğu katı veya hava olarak sınıflandırılabilir. Daha özel bir sınıflama şekli 4 de detaylı olarak anlatılmıştır. Geriye kalan bazı belirsiz durumlar ölçme cihazının belirsizliğinin olduğu noktalarda tekrar ölçü alması ile giderilir. Bu amaçla geliştirilen bir algoritma her bir katı prizmanın merkezini bularak merkezden belirli bir mesafe kadar uzaklaşır ve merkez üzerine bir ışın gönderir. Katı cismi oluşturan yüzeylerin konumları bilgisayarca bilinmektedir. Algoritma ışın ile yüzeyin kesişim noktasını kontrol eder, eğer kesişim noktası merkez noktadan daha geride ise bu üçgen prizma iş parçasının içinde değildir dolayısıyla hava olarak sınıflandırılır aksi halde prizmanın tipinde bir değişiklik yapılmaz. Bu algoritmanın akış diagramı diğer tüm akış diagramları gibi referans 4 de verilmiştir.

Üçgen prizmaların bu şekilde sınıflandırılmaları ölçülmüş iş parçasının yüzeylerini teşkil eden üçgen yüzlerin bulunmasına olanak verir. Daha önceden



de belirtildiği gibi katı prizma ile hava prizma arasında bir sınır teşkil eden her üçgen yüz iş parçası yüzeyinin bir parçasıdır. Tüm bu yüzlerin bulunması iş parçası yüzeyinin her köşesinde bir yüzey noktasının bulunduğu üçgenlerin bir topluluğu olarak temsil edilebilmesini sağlar. Sınıflamanın bir başka yararı her bir üçgen yüzün yüzey normallerinin hesaplanabilmesidir ki bu hesaplama katı ve hava üçgen prizma arasında bir sınır teşkil eden üçgen yüzlere dik Voronoi kenarlarından yararlanılarak yapılır (bakınız ref. 4). Bunun yanısıra böyle bir sınıflama her bir üçgen yüzün komşusu olan üçgen yüzlerin bulunmasına da yarar ki bu ölçülmüş iş parçasının gerçek yüzlerinin bulunması amacıyla üçgen yüzlerin gruplanması aşaması için çok yararlı bir bilgidir. Bu bilgi üçgen yüzlerle aynı kenarları paylaşan diğer üçgen yüzlerin bulunması ile elde edilir. Böyle bir bilginin gruplamaya ne ölçüde yararlı olacağı bir sonraki bölümde anlatılacaktır.

### 2.3. Üçgen Yüzlerin Gruplanması

Katı prizmalar ile hava prizmalar arasında sınır oluşturan üçgen yüzlerin bulunması ölçülmüş iş parçasının yüzeylerinin bulunması demektir. Bu aşamada problem tüm yüzeye ait hangi yüzey parçalarının gerçek bir yüz oluşturduğunun tespitidir ki bu da yüzeyi oluşturan üçgenlerin (yüzey üçgeni) gruplanarak hangilerinin aynı düzlem üzerinde bulunduğu tespitini gerçekleştirir. Böyle bir gruplama sonucunda her bir grup iş parçasının gerçek birer yüzünü oluşturacaktır (biraz aşağıda bahsedilecek sahte pahların dışında).

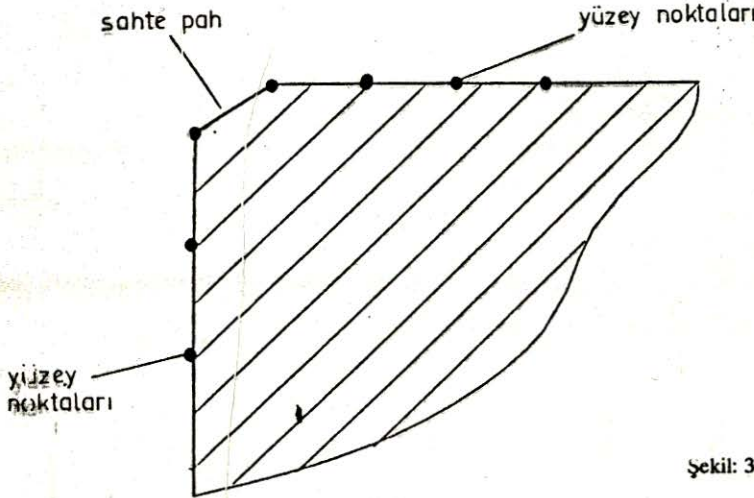
Her bir yüzey üçgeni uzayda küçük bir düzlem oluşturur. Ölçme cihazının hassasiyetine bağlı olarak oluşabilecek ölçme hataları nedeniyle aynı yüzdeki yüzey üçgenleri bile tam olarak aynı düzlemde olmayacaklardır. Yüzey üçgenlerinin hangilerinin aynı düzlemde bulunduğu tespit edilebilmesi amacıyla yüzey üçgenleri gruplama analizine tabi tutulurlar. Bu amaçla yüzey üçgenleri üzerine önce SLINK<sup>6</sup> algoritması (bu algoritma tek-bağlı veya en yakın komşu gruplama analizine (Single-link or nearest neighbour cluster analysis) dayanan bir tekniktir) uygulanmış ancak yüksek sayıdaki (bu çalışmada kullanılan yüzey noktası sayısı 4000-7500 arasında değişmektedir) yüzey noktası bilgisayarın hafızasının yetersiz kalmasına yol açmış ve başka bir gruplama yöntemi olan yüzey normallerine göre gruplama yöntemi tercih edilmiştir.

Bu yöntemde yüzey üçgenleri ve bu üçgenlerin uç noktalarını oluşturan yüzey noktaları, üçgenlerinin oluşturdukları küçük düzlem parçalarının normallerine (buna yüzey normalleri de denilebilir) göre sınıflandırılırlar. Eğer iki üçgenin yüzey normallerinin skalar çarpımı belirli bir sayıdan (bu bire çok yakın bir sayıdır) büyükse bu iki üçgen aynı grupta toplanır. Yüzey normalleri normalize edildiklerinden skalar çarpım iki normal arasında açının cosinüsüne eşittir ve sonucun bire yakın olması açının 0 dereceye yakın olduğunu dolayısıyla iki yüzey üçgeninin aynı düzlem üzerinde yer aldığını belirler. Algoritma paralel düzlemlerde yer alıp aynı grup içerisinde sınıflandırılmış üçgenleri (dolayısıyla yüzey noktalarını) üzerinde buldukları düzlem parçasının orijinden olan dik mesafe-

sini (doğru denklemi olan  $Ax+B+Cz+D = 0$  daki D ifadesi) kontrol ederek değişik gruplarda sınıflar. Bu işlem algoritmanın paralel düzlemler arasında bir orta düzlem tanımlayıp D ifadeleri bu düzlemin D sinden büyük olan yüzey üçgenlerini bir grupta, küçük olanları ise ayrı bir grupta toplaması ile gerçekleştirilir. Daha sonra her bir grup tekrar kontrol edilir, paralel düzlemlere rastlanırsa her grupta yalnızca bir tek düzlem olana dek aynı işlem tekrar edilir.

Algoritma her bir üçgenin komşu üçgenlerini de dikkate alarak hatalı gruplandırılmış yüzey üçgenlerinin ait oldukları grupları da belirler. Şöyleki eğer bir yüzey üçgeninin üç komşu üçgeni aynı grupta sınıflandırılmış iken yüzey üçgeni farklı bir grupta sınıflandırılmış ise bu yüzey üçgeni komşularına ait olduğu grup içerisine dahil edilir. Eğer iki komşu aynı gruba bir komşu farklı bir gruba ait ise her üç komşunun yüzey normaleri incelenir ve merkez üçgenin çift komşu ile mi yoksa diğeri ile mi aynı gruba dahil edileceği bir faktör yardımı ile belirlenir.

Bir başka problem ise sahte pahlardır, Bunlar koordinat ölçme cihazının iş parçasının tırn köşelerinden ölçü alamaması sonucu ortaya çıkan suni özel durumlardır. Ölçü cihazının yarattığı bu hataların bulunup iş parçalarının gerçek yüzleri tespit edilirken dikkate alınmamaları gerekir. Şekil 3 te sahte pah gösterilmiştir.

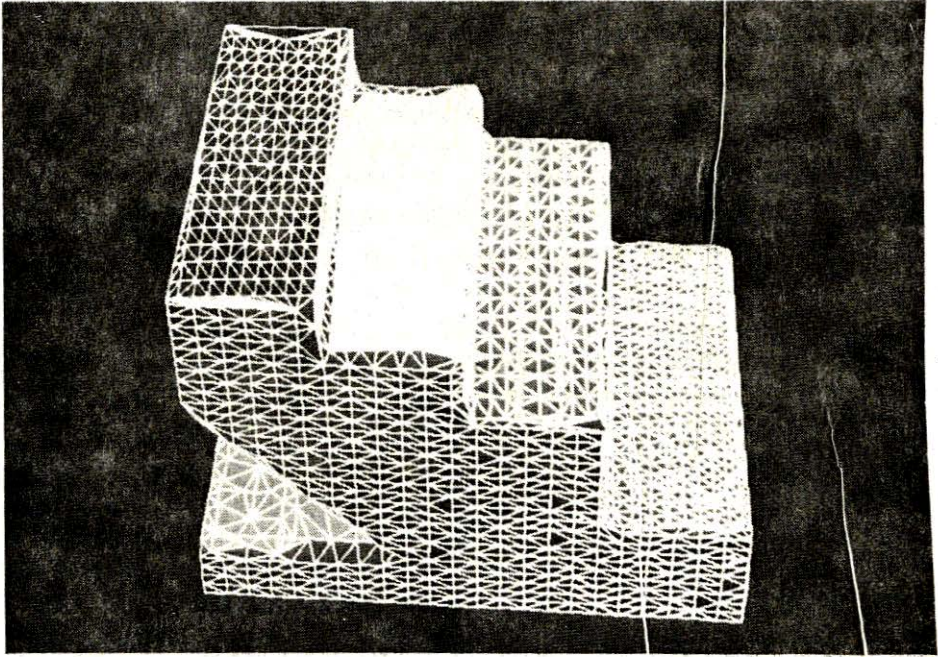


Şekil 3 - Sahte pah

Sahte pahlar yalnızca bir üçgen genişliğinde olmak zorunda olduklarından algoritma her grubun sınırlarını bularak yalnızca bir üçgen genişliğindeki grupları sahte pah olarak sınıflar ve bu sahte pahların gerçek yüz olarak dikkate alınmamalarını sağlar.



Grupların oluşturulması ve sahte pahların bulunmasından sonra algoritma her bir gruba grubu oluşturan yüzey noktalarından geçen en iyi düzlemin bulunmasına olanak sağlayacak temel bileşen analizini (Principal Component Analysis) uygular ve ölçülmüş iş parçasının gerçek yüzlerini oluşturan düzlemleri belirler. Tüm bu işlemler sonucu yüzey üçgenleri (dolayısıyla yüzey noktaları) her bir grup ölçülen iş parçasının gerçek birer yüzünü temsil edecek şekilde gruplanmış olurlar. Şekil 4 de Şekil 1 de gösterilen basit iş parçasının gruplamadan sonraki hali gösterilmiştir. Her bir değişik ton (orijinal renkli fotoğrafta her bir yüz değişik bir renk ile gösterilmiştir) bir yüzü temsil eder, köşelerde ise sahte pahlar gösterilmiştir.



Şekil: 4 - Yüzey üçgenleri ve gruplama

İş parçasının gerçek yüzlerinin ait oldukları düzlemler belirlendikten sonra sıra bu düzlemlerin katı modeli tanımlayan düzlemlerle (yani katı modelin yüzleri ile) karşılaştırılmasına gelmiştir. Artık bu aşamada karşılaştırılacak veri tiplerindeki farklılık diye bir sorun söz konusu değildir.

#### 2.4. Karşılaştırma ve Hataların Tespiti

Ölçülmüş iş parçası ve katı model artık hemen hemen aynı formdadırlar: iş parçası ve katı modelin yüzlerini oluşturan düzlemler grubu. Ancak en genel halde bunlar ayrı koordinat eksenlerine göre tanımlanmış olacaklardır ve bu nedenle karşılaştırma işleminden önce her iki konfigürasyonun birbirleriyle en iyi



uyum sağlayacak hale ötelenmeleri ve döndürülmeleri gerekmektedir. Bu çalışmada bu işlem için Procrustean tekniği<sup>4,6</sup> uygulanmıştır.

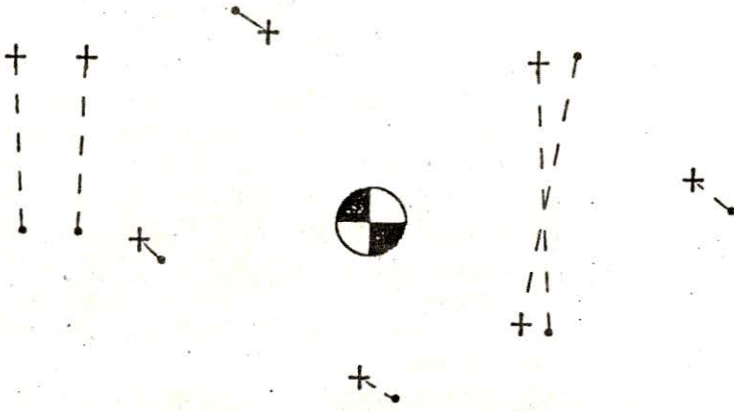
Bu teknikte iş parçası ve katı modelin düzlemleri merkezler koordinat sistemlerinin orijinine gelecek şekilde ötelenirler ve iş parçası veya katı model döndürme işlemine tabi tutulurlar. Döndürme işlemi sonucunda değişmeyen tek özellik düzlemlerin merkeze olan mesafeleridir. İş parçası ve katı modelin merkezlerinin koordinat sistemlerinin orijinine alınması sonucunda düzlemlerin merkezden mesafeler döndürme işlemi sonrasında hiç bir değişikliğe uğramayacaktır. Sibson<sup>6</sup> tarafından Procrustean tekniğine göre benzer, K boyutlu uzaydaki N noktadan oluşan iki konfigürasyon X ve Y nin döndürme işlemi sonunda en iyi uyumu PY ile sağlandığı (P KxK lık ortogonal bir döndürme matrisidir) gösterilmiştir. Burada P döndürme matrisi

$$P = XY^T (YX^TXY^T)^{1/2}$$

olarak verilmiştir. Yapılacak karşılaştırmada bu teknikten farklı olan karşılaştırılacak ve birbiriyle uyumu kontrol edilecek konfigürasyonların noktalardan değil düzlemlerden oluşmasıdır. Procrustean tekniğindeki bire-bir karşı gelme burada söz konusu değildir. Hatta ölçme hatalarından dolayı iş parçası ve katı modelin oluşturduğu konfigürasyonlarda farklı sayıda düzlemler ile bulunabilir.

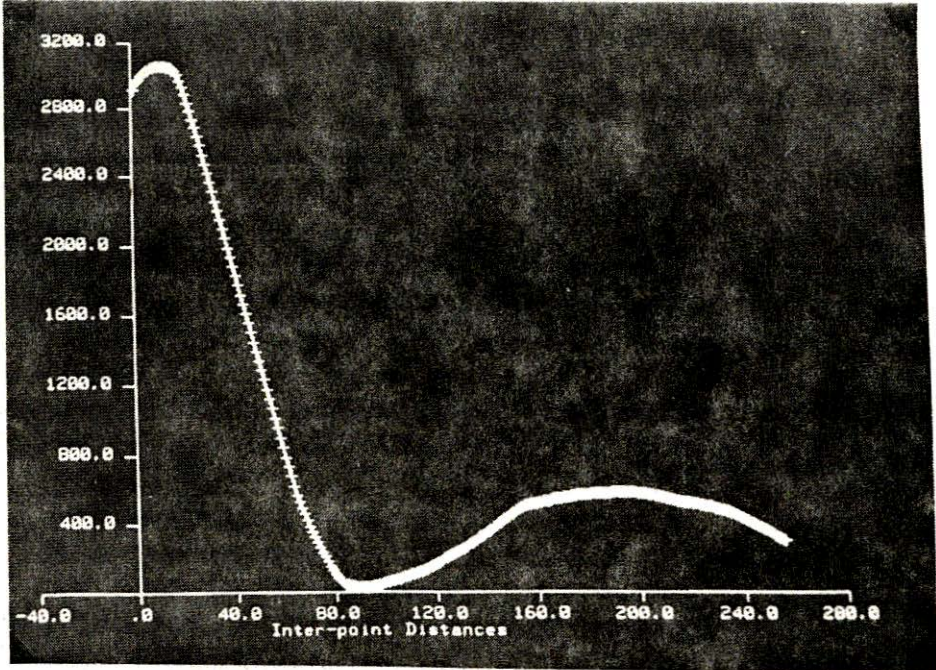
Döndürme, düzlem denklemleri topluluğunun Genişletilmiş Gauss Küreleri (Extended Gaussian Spheres) (GGK) üzerindeki noktaları üzerine uygulanır. Düzlemlerin topluluğunun Gauss küresi normalize edilmiş düzlem normalerince birim küre üzerinde oluşturulan noktalardır. Düzlem normalerinin kuyrukları birim kürenin merkezine gelecek şekilde yerleştirildiğini varsayacak olursak bu düzlem normalerin tepe noktaları birim kürenin yüzeyinde bir grup nokta meydana getirir ki bu küreye Gauss küresi adı verilir ve küre üzerindeki her nokta değişik bir yüzey oryantasyonuna karşı gelir. Genişletilmiş Gauss küreleri ise her bir düzlem normalinin düzlemlere ait bazı faktörlerce (düzlemlerin orijinden olan dik mesafesi, yüzey pürüzlülüğü yüzey yapısı, yüzey üzerindeki işaretler her bir yüzün yüzey alanı gibi) ölçeklendirilmesi ile elde edilmiş noktalar grubudur. Gauss küreleri ve GGK sayesinde düzlemler bir noktalar grubu olarak temsil edilebilirler. Bu çalışmada düzlem normaleri düzlemlerin orijinden olan dik mesafeleri ve her bir düzlem üzerinde bulunan yüzlerin yüzey alanları ile ölçeklendirilmiştir. Bu yöntemin en iyi tarafı ölçekleme işlemi için her türlü ölçülebilir karakterin işlemin geri kalan kısmına herhangi bir etkide bulunmaksızın kullanılabilir olmasıdır.

Yukarıda da belirtildiği gibi döndürme işleminden etkilenmeyen tek özellik yarıçaptır. Her iki GGK deki noktalar grubu önce yarıçaplara göre eşlenirler ve daha sonra döndürme işlemine tabi tutulurlar. Bunun sonucunda bir çok nokta doğru olarak eşlenecektir. Ancak yarıçaplardaki çok yakın benzerlikler nedeniyle yine de bazı hatalı eşlenmiş noktalar da söz konusu olabilecektir. Şekil 5 de doğru ve hatalı eşlenmiş noktalar grubu gösterilmiştir.



Şekil 5 - Döndürmeden sonra doğru ve hatalı eşlenmiş çiftler

Bu aşamada ölçülmüş iş parçasının düzlemleri ile katı modelin düzlemleri arasında iki tür bağ ortaya çıkmaktadır. Doğru eşlenmeyi temsil eden kısa bağlar ve hatalı eşlenmeyi temsil eden uzun bağlar. Bu uzun bağları oluşturan hatalı eşleri bulmak amacıyla önceleri Kernel fonksiyonları<sup>8</sup> kullanılmış ve tahmini yoğunluk eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 6 da bir tahmini yoğunluk eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 6 - Tahmini yoğunluk eğrisi



Bu eğride sivri mod kısa bağları temsil etmekte, ikinci daha yaygın olan mod ise hatalı eşlemeleri göstermektedir. Bu eğri referans alınarak iki mod arasındaki minimum nokta bir sonraki hatalı eşlemelerin düzeltilmesi işleminde maksimum bağ uzunluğunun tespiti için kullanılır. Bu tespit edilen bağ uzunluğundan uzun bağlar bozularak tekrar eşleme yapılır ve tüm noktaların (dolayısıyla düzlemlerin) doğru olarak eşlenmeleri sağlanabilir.

Daha sonraki uygulamalarda minimum bağ uzunluğunun saptanmasının hatalı eşlemelerin tamamının bulunmasına olanak sağlamadığı görülmüş ve tüm bağlar bozularak ikinci bir eşleme bu kez noktalar arasındaki mesafelere göre yapılmıştır. Bu işlemden sonra uygulanan döndürme işlemi ile de ölçülmüş iş parçası katı modelinin göreceli oryantasyonlarında ince bir ayar yapılmış ve her iki konfigürasyon GGK ları arasındaki konumsal farklılıkları minimum olacak şekilde (en küçük kareler prensibi ışığında) eşlenmiştir.

Kullanılan algoritma farklı sayıdaki düzleme sahip konfigürasyonlar (iş parçasının bir yüzünün bir nedenden dolayı işlenmemiş veya açılması gereken yivini açılmamış olması gibi) içinde verimli olarak çalışabilen bir algoritmadır. İş parçası ve katı modelin tüm yüzlerinin karşılaştırılması, saptanan bir tolerans değerinin dışında kalan farklılıkların otomatik olarak tespitine yarayacak ve bu farklılıkların irdelenerek imalatın hangi aşamasında ortaya çıktıkları saptanabilecektir.

### 3. VERİLERİN HAZIRLANMASI

Yukarıda belirtildiği gibi karşılaştırma işleminde kullanılan veriler uzayda bir noktalar grubundan ibarettir. Bu noktalar grubu iki şekilde elde edilebilir: laser veya herhangi bir tip koordinat ölçme cihazı kullanarak veya bu laser cihazının fonksiyonlarını simule eden bir algoritma kullanarak. Laser koordinat ölçme cihazının fonksiyonlarını simule etmek amacıyla ışın takibi (ray-tracing) prensibine göre çalışan DORA modelcisi<sup>2</sup> kullanılmıştır. Laser koordinat ölçme cihazı ışın takibi prensibine tam anlamıyla analog olarak çalışır. Işın demetleri ölçülerek yüzeyin üzerine yönlendirilerek bu demetlerin çarptığı yüzey noktaları tespit edilir. Karşılaştırma işleminde kontrollü deneyler yapılması amacıyla veriler DORA'nın ışın takipçisi kullanılarak oluşturulmuştur. Bir ışın gözlemciden ölçülen iş parçasının bir modeli üzerine yönlendirilmiş ve ışın ile yüzey arasındaki kesişim noktası saptanmıştır. Bu işlemin bir çok ışın ve çeşitli bakış yönleri için tekrar edilmesiyle tüm yüzey noktaları saptanmıştır. Koordinat ölçme cihazının hassasiyetini simule etmek amacıyla yüzey noktalarının koordinatları küçük bir miktar rastgele (random) değiştirilmiştir.

### 4. SONUÇ

Bu çalışmada iş parçalarındaki imalat hatalarının otomatik olarak tespiti incelenmiştir. Bu hatalar yüzey hataları ile sınırlı olup malzeme iç yapı hataları-

nın bahsedilen metodlarla tespiti mümkün değildir. Her ne kadar bu çalışmada amaç sadece pozisyonel hataların (yüzeylerin pozisyonlarındaki hatalar, işlenmesi unutulmuş yüzeyler, vs.) tespiti gibi görülüyorsa da bahsedilen algoritmalarla yüzey pürüzlülüğü, yüzeylerin birbirine diklik veya paralelliklerindeki hatalarda rahatlıkla saptanabilir.

Algoritmalarda kullanılan programlama dili FORTRAN 77 dir. Çok sayıda yüzey noktasının incelenmesi gerekliliği programın işlem zamanının (processing time) uzun (Vax 11/730 da 7200 yüzey noktasında bir iş parçasının karşılaştırılması 32 dakika sürmüştür ancak bu süre yeni SUN 4 serisi makinelerle rahatlıkla 10 dakikanın altına inebilecektir) olmasına neden olabilmektedir. Ancak paralel işlemciliğin (paralel processing) gelişmesi ve bu probleme uygulanması işlem zamanını çok büyük ölçüde azaltacaktır.

Kullanılan algoritmalar yalnızca düzlem düzeylerin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Ancak bazı ilavelerle silindirik ve konik yüzeylerin de incelenmesi mümkündür.

### KAYNAKLAR

1. HENRY, G.K.: Three-dimensional vision by laser triangulation, Ph.D. dissertation, University of Bath, 1988.
2. WOODWARK, J.R., BOWYER, A.: Better and faster pictures from solid models, IEEE Computer Aided Engineering Journal, Volume 3, Number 2, 1986.
3. SIBSON, R.: Locally equiangular triangulations, The Computer Journal, Volume 21, Number 3, pp 243-245, 1978.
4. ÇAKIR, M.C.: The reconstruction of measured engineering components and their comparison with solid models, Ph.D. dissertation, University of Bath, 1989.
5. ÇAKIR, M.C., BOWYER, A.: Matching measured components into solid models, Proc. of the International Conference on Theory and Practice of Geometric Modelling, Blaubeuren, W. Germany, 1988.
6. SIBSON, R.: Studies in the robustness of multi-dimensional scaling: Procrustean scaling, Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Volume 40, pp 234-238, 1978.
7. LITTLE, J.J.: Extended Gaussian Images, mixed volumes, and shape reconstruction, Proc. First ACM Symposium on Computational Geometry, Baltimore, June 1985.
8. SILVERMAN, B.W.: Using Kernel density estimates to investigate multimodality, Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Volume 43, pp 97-99.