

ÜÇ BOYUTLU PARÇA BİLGİLERİ VE UNSUR TANIMA YAKLAŞIMLARI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Adem ÇİÇEK, Mahmut GÜLESİN

Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, Teknikokullar/06500/Ankara

Geliş Tarihi : 21.12.2005

ÖZET

BDT (Bilgisayar Destekli Tasarım) ve BDÜ'nün (Bilgisayar Destekli Üretim) entegrasyonu için herhangi bir BDT sisteminde tasarlanan parçaların üretim bilgilerinin çıkarılması gerekmektedir. Bu parçaların BDT veri tabanındaki üretim bilgileri çağdaş BDT/BDÜ uygulamalarında genellikle yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı, parçaları ve parçalar üzerindeki unsurları tanımlamak ve bu tanımlamaları BDT/BDÜ uygulamalarında kullanmak için bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde çeşitli parça bilgileri ve unsur tanımlama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu makale, parça bilgileri ve unsur tanıma konusunda yayınlanan yirmi iki çalışmanın içeriği taranarak hazırlanmıştır. Bu makalelerdeki algoritmalar parça ve unsur tanıma yöntemlerine göre sınıflandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Üç boyutlu model, Parça tanıma, Unsur tanıma.

A SURVEY ON 3D PART DATA AND FEATURE RECOGNITION APPROACHES

ABSTRACT

To integrate the CAD and CAM, extraction of manufacturing data on parts designed in any CAD system is required. The manufacturing data belonging to these parts within CAD database is usually not sufficient for the contemporary CAD/CAM applications. Therefore, many research works have been performed to define the parts and the features on the parts, and to utilize these definitions in CAD/CAM applications. Various part data and feature recognition methods have been developed in consequence of these research works. This paper was prepared by scanning the content of twenty two research works published on part data and feature recognition. The algorithms in this paper were classified according to part data and feature recognition methods.

Key Words : 3 D Model, Part recognition, Feature recognition.

1. GİRİŞ

BDT ve BDÜ entegrasyonu için tasarlanan parçaların üretim bilgilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Veri tabanlarında kayıtlı çizim veya tasarım bilgileri Bilgisayar Destekli Üretim (BDÜ) için kullanılabilir. BDT veri tabanından üretim bilgilerinin elde edilmesi yetersiz kalmaktadır. Çünkü güncel BDT sistemleri tam anlamıyla Bilgisayar Destekli Üretim, Bilgisayar

Destekli İşlem Planlama (BDİP) ve Bilgisayar Destekli Montaj (BDM) verilerini kesin olarak sağlamamaktadır. Her ne kadar bu konuda önemli ilerlemeler kaydedilmiş olsa da tasarım işlemini desteklemek ve entegrasyonu sağlamak için daha çok araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar, unsur tabanlı tasarım, unsur tanıma, parça tanıma, işlem planlama, montaj planlama gibi ana başlıklar altında toplanabilmektedir. Özellikle son zamanlarda parça ve unsurlar üzerine araştırmalar yoğunlaşmış ve bu

çalışmalardan biri olan unsur tabanlı tasarım özellikle bazı fonksiyonel ihtiyaçları karşılamak amacıyla ortaya çıkarılmıştır. Bu nedenle, kaliteli ve iyi bir tasarım için bütün fonksiyonel ihtiyaçların tatmin edilmesi hedeflenmiştir. Bir tasarımcı ürünün unsurlara bağlı fonksiyonel ihtiyaçlarını görür. Detaylandırılmış tasarım, unsurların ilave edilmesiyle üretim ve montajı desteklemek için geliştirilmiştir. Unsur oluşturma konusundaki çalışmaların çoğu imalat alanında yoğunlaşmıştır. Eğer BDT sistemi veri tabanında parça ve unsur bilgileri hazır olarak saklanamıyorsa, 3 boyutlu bir BDT modelini ve üzerindeki unsurları tanımak için farklı parça bilgileri ve unsur tanıma yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- 1) Grafik (çizge) tabanlı tanıma,
- 2) Hacim ayrıştırma tabanlı tanıma,
- 3) STEP gibi grafik standardı tabanlı tanıma,
- 4) Artışlı unsur çıkarma tabanlı tanıma,
- 5) Yapay zeka tabanlı tanıma.

Unsur, tasarım, analiz, montaj, fonksiyonlar ve üretim uygulamaları için unsur tanımlamaları gibi farklı bakış açılarına göre tanımlanabilmektedir. Modellenen ürün üzerindeki üretim işleminin farklı şekillerde uygulanması sonucunda planlamayı destekleyecek biçimde tanımlanmalıdır. Bir üretim unsuru, tipik olarak üretim metodlarına uygun bir geometride oluşturulmuş geometrik elemanlar olarak tanımlanabilir. Bir üründe bir üretim unsurunun bulunduğu her durumda üretim operasyon tipinin yapılabirliği incelenmek zorundadır. Aynı zamanda, bu operasyonların yapılmasında gerekli olan bilgilere de karar verilebilmelidir. Parça ve unsur tanıma alanında uzun zamandır çok sayıda çalışma yapılmış ve çeşitli uygulama alanları için algoritmalar geliştirilmiştir. Bu makalede geliştirilen en yaygın parça bilgileri ve unsur tanıma algoritmaları ele alınmış ve tanıma algoritmaları yönünden irdelenmiştir.

2. PARÇA BİLGİLERİ VE UNSUR TANIMA İLE İLGİLİ GELİŞTİRİLEN YAKLAŞIMLAR

2. 1. Hacim Ayrıştırma Tabanlı Yaklaşımlar

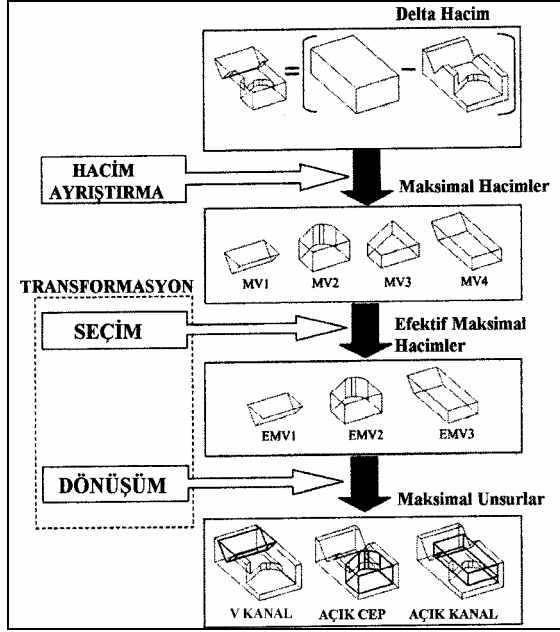
Wang ve Kim (1998) dışbükey hacim ayrıştırma metodu kullanarak bir unsur tanıma metodu geliştirmişlerdir. Yaklaşımla tanınabilen unsurları, ana yönler boyunca çok yüzlü prizmatik (polyhedral) unsurlarla etkileşen çok yüzlü prizmatik unsurlar, silindirik unsurlar ve bu çok yüzlü

prizmatik ve silindirik unsurlara uygulanan sabit yarıçaplı karışık unsurlar olarak tanımlanmışlardır. ASVP (Alternating Sum of Volumes with Partitioning - Parçalı Hacimlerin Değişken Toplamı) olarak adlandırdıkları dışbükey ayrıştırma metodunu dokuz test parçasına uygulamışlardır. Parçalar arasında kombinasyon operasyonları uygulayarak, ASVP ayrıştırma hacimsel biçim unsurlarından ibaret olan unsur ayrıştırmaya (FFD-Form Feature Decomposition) dönüştürülmüş ve negatif ve pozitif unsurlar gruplandırılmıştır. Burada unsur hacimleri mamul biçiminin anlamlı yüksek düzey öğelerini ifade etmektedir.

Sakurai (1995), "Hacim ayrıştırma ve unsur tanıma" isimli çalışmasının ilk bölümünde unsur tanıma metodunu çok yüzlü prizmatik nesnelere uygulamıştır. Yaklaşım unsurları elde etmek için hacim ayrıştırma metodunu benimsemiştir. Hacim ayrıştırma metodu, maksimal dışbükey hücreleri (MCC-Maximal Convex Cell) türetmek amacı ile ham parçadan iş parçasını işlemek için kaldırılan delta hacme uygulanmıştır. Sonra parça ile alan temasında olan her bir MCC'nin yüzleri yüze-yüz kesişme operasyonu kullanılarak bulunmuş ve MCC'nin bir hacim unsuru olup olmadığını bulmak için grafik eşleştirme metodu ile önceden tanımlanmış işleme unsurlarının yüzleri ile eşleştirilmiştir. Bu çalışmada, bir katı modeldeki yüzleri uzatarak mümkün olan bütün unsur çözümlenmelerini türetebilen bir unsur tanıma algoritması geliştirilmiştir. Metot, katı modelin geometrik yüzeyleri ile katı modeli kuşatan boşluğu maksimal dışbükey hücrelere ayrıştırılabilmektedir. Algoritma sadece düzlem yüzeyli parçalar için geliştirilmiştir.

Woo ve Sakurai'nin (2002) unsur tanıma yaklaşımı, hacim ayrıştırma metodunu benimsemiştir. Metot, parçayı işlemek için ham parçadan kaldırılan hacmi ayrıştırarak tasarlanan parçadaki maksimal hacimler olarak adlandırılan büyük ve basit hacimlere ayırtmış ve bu hacimleri maksimal unsurlara dönüştürmüştür. Bu işlemin üç aşaması vardır. Birinci aşamada, delta hacim maksimal hacimlere ayrıştırılır. Ayrıştırma delta hacmin yüzleri uzatılarak gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ayrıştırılan maksimal hacimlerin en az sayısıyla delta hacmin bütün yüzlerini içeren maksimal hacimler seçilir. Son aşamada ise ikinci aşamada seçilen her bir hacmin bir 3 eksen işleme merkezi ile tek operasyonda işlenebilir işlenemediği kontrol edilir. Eğer bu hacimler işlenebiliyorsa maksimal unsur olarak tanınır. İşlenemiyorsa daha ileri bir ayrıştırma ile bir veya daha fazla maksimal unsura dönüştürülür ve tanınır (Şekil 1). Bu çalışmada ele alınan maksimal unsurlar orta düzey unsurlardır ve yaklaşım parça üzerindeki

eğri unsur ve unsur etkileşimlerini tanımamaktadır. Bu da yaklaşım için bir dezavantajdır.



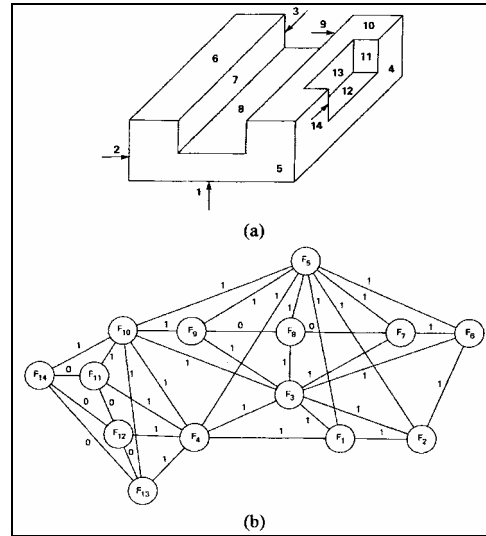
Şekil 1. Maksimal unsur tanıma işlemi.

Wang, vd.(1993) unsuru çıkarmak ve işlenen hacmi ayırtmak için ters gelişen bir yaklaşım sunmuşlardır. Ters gelişen kavramının anlamı, ham parçadan işlenmiş parçaya parça şeklini değiştiren işleme operasyonlarının sırasını ters çevirmektir. Bu prosedürün girdisi bir takım içbükey olarak bağlanan, eğik veya dairesel yüzlerdir. Çıktısı ise unsur hacimleridir. Unsur çıkarma sistemi, tasarımı biten parçanın B-rep modelini almakta ve iş parçası ham parçaya dönüştürülene kadar orta düzey iş parçası biçimleri türetmenin üç aşamasını gerçekleştirmektedir. Her bir aşamada bir yüz seçilir ve bu yüzden bir unsur geliştirilir. Bir orta düzey iş parçası biçimi, geçerli iş parçası biçimi ile geçerli gelişen unsurun kombinasyonudur. Her bir aşamadaki son adım ters gelişen ağacı güncellemektir. B-Grow (Backward Growing-Ters Gelişen), bütün gelişen unsurların bağlı listesini ters ağaçtan türetir ve temel (fatura, cep vs.) bilgiyi depolar. İşleme operasyonu iş parçasından malzeme kaldırır, ters gelişen adım iş parçasına bu işlenen hacmi ilave eder. Uygun ters gelişen algoritmalar temel boşluk unsurlarını kolayca tanıyabilir ve çıkıntı unsurlarının yanı sıra boşluk unsurlarını da temel unsurlara ayırabilir. Gelişme prosedürü esnasında unsur tipi, takım yavaşma yönü, unsurlar arasındaki öncelik, unsur tipinin modifikasyonu, niteliği ve orta düzey iş parçası biçimleri gibi kullanışlı üretim bilgisi tayin edilebilir. Unsur etkileşiminin karmaşık problemleri ters gelişen tecrübeye dayalı ayırma yöntemi ile etkin bir şekilde çözülebilmektedir.

Li and Liu (2002) köşe yuvarlatma tabanlı detay unsur ayırma metodu kullanarak 3 boyutlu bir parçadaki unsurların tanınması için bir metodoloji geliştirmişlerdir. Geometrik modelin tüm sınırını sabit bir yarıçap ile yuvarlatmanın detay unsurlarını algılamada verimli olduğu bildirilmiştir. Köşe yuvarlatmanın avantajını kullanarak sınır öğelerinin detay düzeyi değerlendirilebilmektedir. Uygun detay unsurlarının öğeleri algılama ve ayırma çevriminde, detay unsurlar yerelliği bakımından modelden bir bir ayrıştırılmaktadır. Detay unsur ayırma doğrudan 3 boyutlu bir nesnenin geometrik sadeleştirilmesi ile sonuçlanmaktadır.

2. 2. Grafik tabanlı yaklaşımlar

Joshi and Chang (1998) grafik tabanlı bir unsur tanıma algoritması geliştirmişlerdir. Bir parçadaki unsurları, parçayı temsil eden AAG'nin (Attributed Adjacency Graph-Nitelikli Bitişiklik Grafiği) alt grafikleri olarak düşünmüşlerdir. Bu grafikte, her bir yüz bir düğüm (node) ve iki yüzün paylaştığı her bir kenar ise bir yay (Arc) ile temsil edilmiştir. Eğer bir kenarı paylaşan yüzler içbükey açıyı temsil ediyorsa kenar niteliği "0" (Sıfır) değerini, dışbükey açıyı temsil ediyorsa kenar niteliği "1" (Bir) değerini almıştır (Şekil 2). Bu şekilde türetilen grafiğin alt grafikleri unsur tanıyıcı tarafından analiz edilmiş ve alt grafiklere uyan unsurlar çıkarılmıştır. Unsur tanıma yaklaşımı cep, kanal, kör kanal ve çok yüzlü prizmatik delikler gibi unsurlar ile sınırlandırılmıştır



Şekil 2. a) Örnek parça, b) Nitelikli bitişiklik grafiği.

Trappey and Lai (1995) sac metal parçalar için hiyerarşik unsur tabanlı bir temsil şeması geliştirmişlerdir. Bu temsil şemasını kullanarak sac metal parçalar, üretim sınırlamaları göz önünde bulundurularak tanımlanmıştır. Bu çalışmada unsurlar iki tip olarak sınıflandırılmıştır. Birincisi

saç metal parçaların birincil profillerini temsil etmek için kullanılan temel unsurlardır. Temel unsurlar herhangi bir geçiş operasyonu tanımlanmadan önce bir saç metal parçanın bölünmüş parçalarının biçimini temsil etmektedir. İkincisi ise tek bir saç metal üretim işlemini temsil eden üretim unsurlarıdır. Üretim unsurları temel unsurlar üzerine gerçekleştirilen saç metal operasyonlarının biçimini temsil etmektedir. Bu unsurlar, geometrik ve topolojik bilginin yanı sıra tolerans bilgisini de içermektedir. İlkel unsurlar üretim unsurlarını temsil etmek için tanımlanmaktadır. Bileşik unsurlar spesifik tasarım amacını gerçekleştirmek için ilkel unsurları bir araya getirerek tanımlanmaktadır. Daha sonra bu unsurlar ve tolerans bilgisi hiyerarşik bir yapıda temsil edilmiştir. Şema için veri yapısı, geometri, topoloji ve tolerans bilgisi dikkate alınarak geliştirilmiştir. Bu hiyerarşik şema temel unsurlar, üretim unsurları ve ilkel unsurları ile bir saç metal parçayı tanımlamaktadır.

Gao and Shah (1998) B-rep modellerinden işleme unsurlarının otomatik tanınması için yeni bir metot geliştirmişlerdir. Bu çalışmada sunulan metot etkileşen unsurların alternatif çözümlerini tanımak ve çıkarmak için geleneksel grafik tabanlı tanıma ile işaret tabanlı unsur tanımayı entegre etmesinden dolayı karma (hybrid) bir yaklaşımdır. Önce bağımsız (etkileşmeyen) unsurlar üretim yüz bitişiklik grafiği tabanlı olarak tanınmaktadır. Etkileşen unsurlar ise bir unsur işareti olarak kullanılan unsurun minimal şart alt grafiği (MCSG-Minimal Condition Sub Graph) tabanlı olarak tanınmaktadır. Önceki işaret tabanlı unsur tanıma metotlarının aksine, bütün unsurların MCSG'leri unsur tipine bağlı olarak üniform bir yolla tanımlanır, türetilir ve tamamlanır. İşaretler genişletilmiş nitelikli bir bitişiklik grafiği (EAAG-Extended Attributed Adjacency Graph) ile tanımlanır, grafik ayrıştırma ile türetilir ve etkileşimlerden dolayı kaybolan öğeleri karşılayan gerçek zincirleri ekleyerek tamamlanır. Alternatif çözümler türetilerek etkileşen unsurların her bir seti için bir çözümlenme tayin edilir ve son olarak parça unsur modeli (veri yapısı) oluşturulur.

Falcidieno and Giannini (1989) bir nesnenin katı modelinden unsur bilgisinin otomatik teşhis edilmesi ve çıkarılması için bir metot geliştirmişlerdir. Sistem, unsur tanıma, unsur çıkarma ve unsur düzenleme olmak üzere üç modülden meydana gelmiştir. Unsur tanıma modülü, bir yüz bitişiklik hiper grafiği (FAH-Face Adjacency Hypergraph) olarak adlandırılan bir katının yüz tabanlı temsili odaklı çalışmaktadır. FAH' ta bir katı model, her bir yüzü karşılayan bir düğüm, her bir kenarı karşılayan bir yay ve her bir köşe noktasını karşılayan bir hiper yay ile temsil edilmiştir. Unsur tanıma aşamasının

amacı, oyuk ve çıkıntı unsurların teşhis etmektir. Bunu yapmak için, bir nesnenin FAH modelinin bütün kenar ve halkaları, içbükey veya dışbükey olmak üzere iki kategoriye ayrılmıştır. Sonra unsurlara iliştirilen yüzlerin listesi oluşturulmuştur. Bu yüzler birincil yüzler olarak adlandırılmış ve dış ve iç halkalarda ihtiva edilen içbükey kenarlar olarak tanımlanmıştır. Son olarak bir unsura ait olan bütün yüzler teşhis edilmiş ve tanınan unsur, oyuk veya çıkıntı unsuru olarak iç halkaların içbükeyliğine göre sınıflandırılmıştır Unsur çıkarma modülünde tanınan biçim unsurları, nesnenin orijinal biçiminden unsur çıkarıcı tarafından çıkarılmış ve FAH elemanları olarak bu unsurlar temsil edilmiştir. Son modül olan unsur düzenleme modülünde ise çıkarılan unsurlar planlı, yüz bitişiklik hiper grafiği (SFAH-Structured Face Adjacency Hypergraph) olarak adlandırılan bir hiyerarşik grafikte temsil edilmiştir. Bu çalışmada tanımlanan unsurlar oyuk ve çıkıntı unsurları olarak sınırlanmıştır.

Chuang and Henderson (1990) bir katı modelin 3B'lu sınır temsilinden biçim modellerinin (unsur) bilgisayar destekli tanınması için bir metot geliştirmişlerdir. Katı modelleme, veritabanındaki nesnenin köşe noktaları, köşe noktalarını kuşatan topoloji ve geometrik özellikler analiz edilerek sınıflandırılmaktadır. Tasarlanmış bir nesnenin köşe noktası-kenar (V-E-Vertex-Edge) grafiğinin düğümlerini etiketlemek için köşe noktası tiplerini kullanarak tanıma için yeterli bir biçim bilgisi ile etiketli bir grafik kurulmuştur. Nesnenin detayları bu etiketli grafiğe çıkarıldığından dolayı etiketli V-E grafiği gerçekte nesnenin kavramsal biçimini temsil etmektedir. Bölgesel biçimler için grafikler bu etiketli grafiklerin formunda tanımlanabilmektedir. Her bir tek bölgesel modelin tanınması, model grafiğini nesne için etiketli grafikte bulunan alt grafikler ile eşleştirme ile gerçekleştirilmektedir. Grafik eşleştirme, muhakemesiz veya sonuç çıkarımsız düğümden düğüme veya yaya yayıldığından cep veya kanal gibi değişken yüz sayısına sahip olan biçim modellerini tanımak için daha yüksek boyutlu gramer inceleyen metodun bir kombinasyonu kullanılmalıdır. Bu çalışmada gösterilen yaklaşım basit bağlanan yüzeyli biçim modellerini tanıma ile sınırlandırılmıştır.

Locket and Guenov (2005) parça geometrisinden orta yüzey çıkarım tabanlı ince duvar enjeksiyon kalıp ve döküm parçaların kalıp unsurlarını çıkarmak için bir unsur tanıma yaklaşımı geliştirmişlerdir. Çalışmanın katkısı orta düzey topoloji ve geometrisini ve kalıp unsurlarını tanıma metodolojisini temsil etmek için nitelikli bir orta yüzey bitişiklik grafiğini (AMAG-Attributed Mid-Surface Adjacency Graph) geliştirmesidir. Bir parçanın orta yüzeyi parça duvarlarını sıfır kalınlıkla

yüzeyler olarak modellediğinden ölçüsel olarak temsil şeklini basitleştirmiştir. Çalışmanın sonucu orta yüzey temsili unsur tanıma kalıp parçaları için B-REP katı modelden daha iyi bir temel teşkil etmesidir. Unsur tanıma işlemi üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, orta düzey modeli AMAG'ı temsil eden bir yüz kenar bitişlik matrisini yapılandırmak için değerlendirilmiştir. İkinci aşamada, unsur tanıma algoritmaları topoloji tabanlı baştaki unsur tanımlamalarını gerçekleştirmiştir. Son aşamada ise, unsur tanıma orta yüzey modelini kullanarak geometri kontrollerini yaparak tamamlanmıştır.

2. 3. STEP (Standard For The Exchange of Product Model Data) Tabanlı Yaklaşımlar

Han ve arkadaşları (2001) işleme alanında unsur tanıma ve işlem planlamayı entegre etmek için bir sistem sunmuşlardır. Sistem, işleme unsurları, yüzey pürüzlülüğü, geometrik ve boyutsal toleranslar gibi bütün kullanışlı bilgiyi içeren girdi ve çıktı formatları olarak nötr mamul veri standardı STEP'i kullanmaktadır. Sisteme girdi olarak kullanılan parça, parçayı üretmek için ihtiyaç duyulan bir takım operasyonları üretmek için analiz edilmiştir. Üst katmanın bir düğümünün spesifik bir operasyonu karşıladığı, alt katmanın bir düğümünün ise bir unsur için spesifik bir işlemi karşıladığı iki katmanlı bir araştırma stratejisi benimsenmiştir. Ziyaret edilen her bir operasyon düğümü için üretilebilir unsurları üretmede takım veritabanına müracaat edilmekte, unsur bağıllığı kurulmakta ve alt katman araştırması istenmektedir. Alt katman optimum bir işleme sırasını ve bu sıranın üretim maliyetini hesaplamaktadır. Sonra, kontrol geri üst katmana dönmektedir. Alt katmanda hesaplanan üretim maliyeti ile birlikte operasyon maliyet analizi üst katmanın operasyon boşluk araştırmasına kılavuzluk eder. Nihayetinde, her bir operasyon başına optimum bir işleme sırasının tayin edildiği bir operasyon sırası türetilmektedir. Bu çalışmada 3 eksenli işleme merkezlerinde düz uçlu parmak freze ve yuvarlatılmış uçlu parmak freze ile işlenen cep, kanal ve delik gibi unsurlar STEP tabanlı olarak tanınmaktadır.

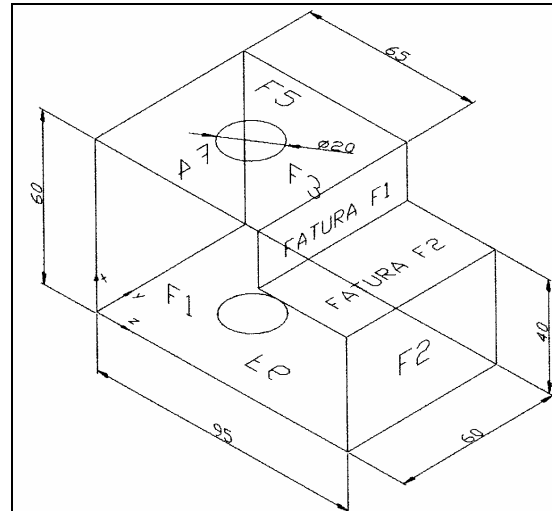
Gulesin and Jones (1994) veritabanındaki bitmiş, orta düzey ve ham parçaları temsil etmek için yüz tabanlı komşu grafiği (FONG-Face Oriented Neighbouring Graph) olarak adlandırılan bir parça modeli temsil şeması geliştirmişlerdir. STEP dosyası kullanarak yüz ve unsurlar tayin edilmiş ve yüzler arasındaki açılar hesaplanmıştır. Aynı zamanda, yüzler arasındaki komşuluk, içbükeylik ve dışbükeylik ilişkileri saptanarak parça modeli kısa ve öz bir şekilde temsil edilmiştir. Parça ilk önce birtakım yüzler olarak tanımlanmıştır.

Parça = { Yüzlerin seti }

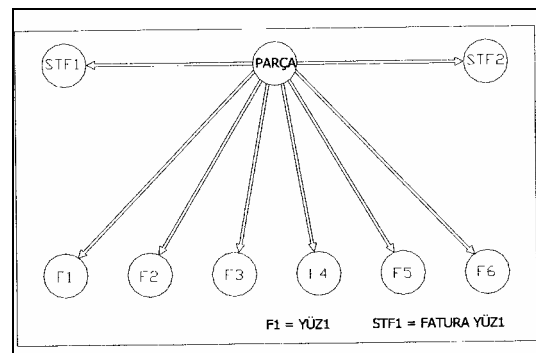
Her yüz ise aşağıdaki gibi temsil edilmiştir

Yüz = { Yüzler, unsurlar, dir, kenar halkası }

Burada yüzler, yüz için komşu yüzlerdir. Unsurlar yüzdeki alt unsurlardır, dir, yüzün yönünü ifade eder ve kenar halkası ise yüzün kenarları ve köşe noktalarının listesidir. Her bir yüz, aç ve içbükeylik-dışbükeylik ilişkisi olmak üzere iki niteliğe sahip olan bir ortak kenarı paylaşan komşu yüzlerle bağlanmaktadır. Eğer yüzler dışbükey bir açıyı biçimlendiriyorsa, yayın niteliği pozitif ve eğer içbükey bir açıyı biçimlendiriyorsa, yay niteliği negatif olarak atanır. Örneğin, Şekil 3'deki örnek parça ilkin birtakım yüzler olarak temsil edilmiştir (Şekil 4). Daha sonra, her bir yüz için komşu yüzler, yüz ve komşu yüzler arasındaki açılar ve içbükeylik-dışbükeylik ilişkileri, yön, noktalarının koordinatları ile kenar listesi ve alt unsurlar tayin edilmiş ve temsil edilmiştir.



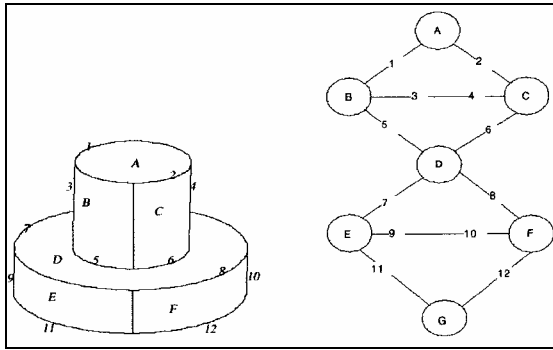
Şekil 3. FONG için örnek parça.



Şekil 4. FONG'da parça temsili.

El-Mehalawi and Miller (2003, 2003) veritabanındaki BDT modeli için bir temsili şema geliştirmişlerdir. Parçalar, parçanın yüzlerini karşılayan düğümler ve parçanın kenarlarını

karşılamanın zincirleri içeren nitelikli grafikler kullanılarak temsil edilmiştir. Parça yüzeyleri STEP dosyasında açıkça verilmiştir. Yüzey tipi, normal yönü gibi yüzey nitelikleri düğümlere ve kenar tipi, iki bağlanmış düğüm, kenar uzunluğu ve iki düğüm arasındaki nispi yön gibi kenar nitelikleri zincirlere iliştilmiştir. Grafik, bir veri dönüşüm formatı olan parçanın STEP fiziksel dosyası yardımıyla hazırlanmaktadır. Hangi BDT sistemi olursa olsun her bir parça için bir tane STEP dosyası olmalıdır. Bir parçanın grafiğini oluşturmak için işlemler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, Pro-Engineer ve Solidworks gibi bir BDT sisteminde BDT modeli oluşturulmuş ve BDT modeli STEP parça 21 formatına dönüştürülmüştür. İkinci aşamada ise STEP bilgisi temsil tabanlı nitelikli grafiklerine dönüştürülmüştür. Grafik ve nitelikleri, yüzey ve eğri tipi gibi herhangi bir koordinat sistemine bağlı olmayan bazı geometrik bilgiler ile birlikte tamamen parçanın topolojisini tanımlamaktadır (Şekil 5). Yazarlar çalışmalarının ikinci bölümünde mekanik parçaların veritabanındaki benzer tasarımlarını tekrar gözden geçirme ve eşleştirme için bir yaklaşım sunmuşlardır. Gözden geçirme ve eşleştirme işlemleri mekanik parçalar arasındaki geometrik ve topolojik benzerlik üzerine dayandırılmıştır.



Şekil 5. Örnek parça ve nitelikli grafiği.

Dereli ve Filiz (2002) 3 boyutlu parçalar üzerindeki unsurları tanımak için bir unsur tanıma sistemi geliştirmişlerdir. Sistemin önemli karakteristiklerinden iki tanesi, parçanın bitişiklik ilişkileri tabanlı olması ve girdi olarak modelin STEP bilgisini kullanmasıdır. Sistem prizmatik parçalar için optimize edilmiş işlem planlama sistemi olarak adlandırılan bir işlem planlama sistemine entegre edilmiştir. Başlama düzeyi çoğunlukla tasarım aşamasıdır. Bir BDT platformunda (Pro-Engineer) parça modellendikten ve parçanın STEP bilgisi elde edildikten sonra işleme unsurları tanınmaktadır. Sisteme girdi, katı modelleme sisteminde modellenen parça için oluşturulan STEP dosyasını son işleme ile çıkarılan B-rep veri dosyasıdır. B-rep dosyası prizmatik

parçanın bütün bilgilerini (koordinatlar, yüz numaraları, köşe noktası numaraları gibi) içermektedir. Bu dosyayı kullanarak sistem her bir yüzün yönelimini tayin eder. Parçanın bitişik yüzleri arasındaki ilişkiler bulunmakta ve bu ilişkiler bir ilişki matrisi içinde saklanmaktadır. Bu matrisin elemanların izleyerek unsurlar önce çıkarılmakta ve sonra bu unsurlar veritabanında mevcut olan unsur tipleri ile karşılaştırılarak unsurlar tanınmaktadır. Unsur çıkarma için bu çalışmada kullanılan metod birincil olarak içbükeylik tabanlıdır. Metod kenarların içbükey ayrıştırılması prensibini benimsemiştir.

2. 4. Artışlı Unsur Çıkarma Tabanlı Yaklaşımlar

Lee ve Kim (1998,1999) bir unsur tabanlı tasarım modelinden işleme unsurlarının alternatif çözümlerini üretmek için unsur tabanlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Geliştirilen yaklaşım unsur tabanlı modelleme ve işleme unsuru çıkarma prosedürleri esnasında elde edilen tasarım unsur bilgisi, nominal geometri ve fonksiyon gerekleri gibi unsur üzerindeki bilgiyi kullanarak alternatif işleme unsurlarını türetme işlemini basitleştirmektedir. İşleme unsurları, parçanın unsur tabanlı tasarımı esnasında artışlı olarak çıkarılmaktadır. Unsur dönüşüm işlemi, geometri ve unsurdaki bilgiyi kullanarak her bir tasarım unsurunu bir işleme unsuruna veya bir takım işleme unsurlarına dönüştürmektedir. Tekrar yönelim, azaltma, ve/veya ayırma operasyonları kullanarak alternatif modeller çıkarılan işleme unsurlarından türetilmektedir. Her bir operasyonun gerçekleştirilmesi esnasında arzu edilmeyen modeller erişebilirlik yönlerinin sayısını minimize etme gibi kriterler kullanarak elimine edilmiştir. İşleme unsurları ve öncelik ilişkileri veri dönüşüm amaçlı olarak STEP tabanlı bir işleme unsur grafiğinde temsil edilmiştir. Bu çalışmada ele alınan işleme unsurları 3 eksen frezeleme operasyonları ile sınırlandırılmıştır.

Sandiford and Hinduja (2001) katı bir nesnenin 3B' lu sınır temsilinde bulunan topoloji ve geometriyi kullanarak unsurların tanınması için bir algoritma sunmuşlardır. Yüzlerin, kenarların ve köşe noktalarının içbükeyliği unsurlar ve unsurlar arasındaki etkileşimleri algılamak için kullanılmıştır. İçbükeylik metodu kullanıldığından bu unsur tanıma sisteminde dışbükey köşe yuvarlatmaları ve pahlar tanınmamaktadır. Unsur tanıma algoritması dört aşamada gerçekleştirilmektedir. Unsur algılama aşamasında parçanın topoloji ve geometrisinin içbükey yapısını kullanan içbükeylik metodu vasıtasıyla unsura ait olan yüzler teşhis edilmektedir. İkinci aşamada gerçek parçanın topoloji ve geometrisi kullanılarak unsur hacmi

yapılandırmaktadır. Unsur doğrulama aşaması, ham parça ile karşılaştırma ve gerektiğinde düzeltme aşamasıdır. Son aşamada ise unsur, iş parçası ile birleştirilir ve bu işlem yeni güncel orta düzey bir iş parçası için tekrarlanmaktadır.

2. 5. Yapay Zeka Tabanlı Yaklaşımlar

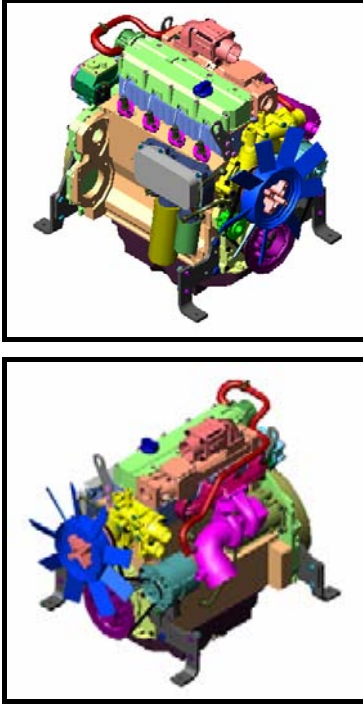
Ding and Yue (2004) yapay sinir ağları (YSA), buluşsal bir algoritma ve unsurlarla tasarımı içeren yeni bir unsur tanıma metodu geliştirmişlerdir. Unsur tanıma metodu karmaşık unsur etkileşimlerini etkin bir şekilde ele almış ve geçerli YSA tabanlı unsur tanıma metodlarının sınırlamalarını ortadan kaldırmıştır. Bu çalışma üç yönden diğer çalışmalardan farklılık arz etmektedir.

- Unsur tabanlı bir modelde unsur sınıfları için birleştirilmiş bir veri yapısı tasarlanmıştır. Bu safha ilkel unsurlarla ilgilenmesine rağmen aynı veri yapısı kullanılarak yeni unsur sınıfları tanımlanabilmekte ve unsurların geçerliliği tasarım esnasında kontrol edilebilmektedir.
- Yeni bir buluşsal algoritma etkileşen unsurları tanımlamak için tasarlanmıştır. Algoritma düzlemsel, silindirik, konik, kısmi silindirik ve kısmi konik yüzeylerden ibaret olan iç unsurların tanımlanmasında başarı ile uygulanabilmektedir. Her bir unsur çifti arasındaki etkileşen öge bir önceki yaklaşımda kullanılan tüm etkileşen unsurlar tarafından oluşturulan yeni hacmin yerine analiz edilmektedir. Unsurlarla tasarım fonksiyonları kullanılarak geçerlilik sınırlaması kontrol edilmekte ve tasarım aşamasında geçersiz unsurlar silinmektedir.
- Günümüze kadar kullanılan YSA tabanlı unsur tanıma metodlarındaki özellikle girdi temsili gibi problemlerin çözümüne yardımcı olmak ve unsurları tanımak için YSA teknikleri kullanılmıştır. Bu çalışmada girdi temsili olarak F-bitişiklik ve V-bitişiklik matrisleri kullanılarak önceki çalışmalardaki temsillerin eksiklikleri giderilmiş ve bu matrisler sayesinde unsurlar tanınmıştır.

Nezis and Vosniakos (1997) önceden eğitilmiş olan yapay sinir ağlarını kullanarak bir unsur tanıma sistemi geliştirmişlerdir. Parça tanımlaması B-rep katı modelleyici veri tabanından elde edilmiştir. Bu tanımlama nitelikli bitişiklik grafiği formunda parçadaki yüzler hakkında sadece topolojik bilgiyi temsil etmektedir. Bu grafik bir takım tecrübeye dayalı metodlar kullanılarak basit unsur tanımlamalarını karşılayan alt grafiklere bölünmüştür. Daha sonra, bu alt grafiklerin her

biri için özel temsil modelleri oluşturulmuştur. Yapay sinir ağları girdi olarak bu temsil modellerini kullanarak cep, kanal, çıkıntı, fatura, kör kanal ve delik gibi unsur sınıfları oluşturularak unsurları tanımlamıştır. Yapay sinir ağlarının diğer yöntemlere göre en önemli avantajı ağlar eğitildikten sonra unsur tanıma işlemi oldukça hızlı olmasıdır.

Çiçek (2005) bir dizel otomobil motoru parçalarının ve makinecilik alanında yaygın olarak kullanılan standart makine parçalarının yüz komşuluk ilişkileri ve nitelikleri tabanlı tanınması ve tanınan parçaların BDT ortamında otomatik montajlarının yapılması için bir yöntem geliştirmiştir. Tanıma prosedüründe uzman sistem tekniği kullanılarak parçalar uzman sistemin muhakeme ünitesinde tanınmıştır. Kullanıcı tarafından BDT ortamında oluşturulan motor parçalarının ve standart makine parçalarının katı modellerinin STEP dönüşümü yapılarak tanınacak ve montajı yapılacak her bir parçaya ait bir STEP dosyası oluşturulmuş ve oluşturulan STEP dosyasındaki 3 boyutlu modele ait öğeler; geliştirilen program tarafından yorumlanmış STEP formatındaki her bir yüz tek tek ele alınarak o yüze ait komşu yüzler ve nitelikler çıkarılmıştır. Birbirine komşu olan yüzeyler ortak bir kenarı paylaştığından, komşu yüzeyleri tespit etmek için her bir yüzeye ait kenar halkasındaki kenar eğrileri kullanılmıştır. Çıkarılan nitelikler ve komşu yüzler sayesinde parça tanıma prosedürü gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, bir yazım editörü kullanılarak bir bilgi tabanı oluşturulmuştur. Bilgi tabanındaki kurallar yine parçaya ait nitelikler ve komşuluk ilişkileri göz önünde bulundurularak kullanıcı tarafından veya programa ilave edilen bir otomatik kural yazma modülü tarafından yazılmaktadır. Bilgi tabanı ve parça tanıma prosedüründeki yüzey ilişkileri ve nitelikleri geliştirilen program tarafından parça tanıma formatına dönüştürülmüş ve parçanın STEP dosyasından ve bilgi tabanından elde edilen parça tanıma formatları birbirleriyle karşılaştırılarak parçaya ait kural bilgi tabanından tespit edilip parça tanınmıştır. Parça ismi ve kural numarası bilgi tabanında temsil edilen kuraldan alınarak çizim, elde edilen parça ismi ile bilgisayara kaydedilmiş ve parçaya ait yüz komşuluk ilişki matrisi ile temsil edilmiştir. Montaj aşamasında ise, tanınan ve bilgisayara kaydedilen parçalara ait referans yüzeyler belirlenmiş ve bu referans yüzeylerin lokal orijinlerini karşılayan noktalar tespit edilerek bu noktalar parçayı montaj dosyasına taşıma için temel noktalar olarak tayin edilmiştir. Parçalar bu noktalardan yakalanarak montaj dosyasındaki belirlenen noktalara taşınmış ve BDT ortamındaki montaj tamamlanmıştır. Şekil 6'da geliştirilen yaklaşım tarafından tanınan ve montajı yapılan dizel otomobil motorunun montajlı farklı görünüşleri verilmiştir.



Şekil 6. Parça tanıma sistemi ile tanınan ve montajı yapılan dizel otomobil motoru.

Unsur tanıma alanında yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu grafik tabanlı yaklaşımlar üzerine yoğunlaşmıştır. Grafik tabanlı unsur tanıma yaklaşımlarında parça ve parça üzerindeki topolojik ve geometrik bilgi bir grafikte temsil edildiğinden bu temsil edilen bilgi kolayca unsur tanıma ve diğer BDT/BDÜ uygulamalarına adapte edilebilmektedir. Aynı zamanda grafik tabanlı yaklaşımlarda bir grafikte tüm parça unsurları ile birlikte temsil edildiğinden parça tanıma için diğer yöntemlere göre üstünlükler sağlamaktadır. Hacim ayrıştırma metodunda ise parçadaki unsurlar parçadan ayrıştırılarak tanınmasına rağmen unsur tanıma yaklaşımları tüm unsur tipleri için geçerli değildir ve parça tanıma için bir alt yapısı yoktur. Bu da bu yöntem için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca, unsur tanıma algoritmalarında son yıllarda yapay zeka kullanılmıştır. Genellikle unsur tanıma için yapay sinir ağları ve uzman sistemler tercih edilmiştir. Yapay sinir ağlarının en büyük tercih nedeni ise eksik tanımlanan bilgi ile unsurların tanınabilmesi ve ağların eğitilmesinden sonra unsur tanıma işleminin çok kısa sürede gerçekleştirilmesidir. Bir başka avantajı ise geniş bir unsur ailesine hitap etmesidir. Tüm unsur tanıma sistemlerinin yetersiz kaldığı alan unsur etkileşimleridir. Unsur etkileşimleri farklı unsurların farklı biçim ve konumlarda birbiri ile kesişmesinden oluştuğu için araştırmacılar bu unsur etkileşimlerine kısmi çözümler üretebilmişlerdir. Bu kısmi çözümler ise BDT/BDÜ sistemlerinde esnek bir şekilde

kullanılmamıştır. Bundan dolayı, araştırmacılar son zamanlarda parça üzerindeki unsurlardan farklı olarak tüm parçayı tanıma ile ilgili çalışmalar yapmaya başlamışlardır. Parça tanıma, parça üzerindeki unsurlar ile birlikte tüm parçanın tanınmasını esas almıştır. Aynı zamanda tanınan parçaları temsil eden fonksiyonel parça tanımlama şemaları geliştirilmiştir. Bu tanımlama şemaları parçayı hem geometrik hem de topolojik veri açısından tanımlamaktadır. Parça tanımda, parçanın yüzey bağlanma ilişkileri (içbükeylik, dışbükeylik, komşuluk) ve yüzey nitelikleri tabanlı algoritmalar geliştirilmektedir. Tanınan parçalar bilgisayar destekli montaj planlama, bilgisayar destekli işlem planlama, takım yolu optimizasyonu, BSD kod türetme, FEM (Finite Element Method-Sonlu Elemanlar Metot) analizi gibi uygulama alanlarında etkin bir şekilde kullanılabilir.

Geliştirilen parça bilgileri ve unsur tanıma sistemlerinin etkin bir şekilde kullanılabilmesi BDÜ uygulamasına bir örnekte grup teknolojisidir. Grup teknolojisi benzer parçaların tanımlanıp aynı grup altında toplanmalarına dayanan bir imalat yönetim sistemidir. Bu gruplandırma, parçaların imalat ve tasarım açısından benzerliklerinden yararlanmak amacıyla yapılır. Birbirinden tamamen farklı üretim yöntemleri gerektiren parçaları gelişmiş bir sırayla üretmek mümkün olsa da bu üretim yöntemi ekonomik değildir. Bu yüzden üretilen parçalar üretim yöntemlerinin benzerliği göz önünde bulundurularak parça aileleri oluşturacak şekilde gruplara ayrılmalıdırlar. Her bir aile benzer tasarım ve imalat özellikleri gösterecektir. Böylece bir ailenin her üyesini işlem görmesi benzer şekilde olacaktır. Bu da imalatın verimliliği ile sonuçlanmaktadır. Aynı zamanda, her grubun ayrı bir parti olarak üretilmesi sabit giderleri en aza indirmektedir. Grup teknolojisinde parça aileleri oluşturulduktan sonra bu ailelerin üretiminde kullanılacak makineler belirlenerek hücreler oluşturulmaktadır. Bu uygulama atölye tipi yerleşimin daha verimli duruma getirilmesi amacı taşımaktadır. Bu çalışmada geliştirilen parça bilgileri ve unsur tanıma yaklaşımları grup teknolojisindeki parça ailelerinin oluşturulmasında etkin bir rol oynayacaktır. Parça bilgileri ve unsurlar tanıdıktan sonra benzerlik gösteren parçalar geometri ve topolojisine göre sınıflandırılarak parça grupları halinde veri tabanında saklanabilir. Gruplandırılan parçalar için imalat yöntemleri, makineler ve hücreler oluşturularak verimli bir imalat sistemi kurulabilir. Böylece grup teknolojisinde ihtiyaç duyulan parçaların gruplandırılması ve kodlanması problemine geliştirilen parça bilgileri ve unsur tanıma sistemleri farklı çözümler üretebilmektedir. Parça bilgileri ve unsur tanıma için geliştirilen yaklaşımlar Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Parça ve Unsur Tanıma İçin Geliştirilen Yaklaşımlar.

| Yazar | Yılı | Yaklaşım |
|----------------------------------|------|--------------------------------------|
| Wang, Kim | 1998 | Hacim ayrıştırma tabanlı tanıma |
| Sakurai | 1995 | Hacim ayrıştırma tabanlı tanıma |
| Woo, Sakurai | 2002 | Hacim ayrıştırma tabanlı tanıma |
| Wang, Chamberlain, Joneja, Chang | 1993 | Hacim ayrıştırma tabanlı tanıma |
| Li, Liu | 2002 | Hacim ayrıştırma tabanlı tanıma |
| Joshi, Chang | 1988 | Grafik tabanlı tanıma |
| Trappey, Lai | 1995 | Grafik tabanlı tanıma |
| Gao, Shah | 1998 | Grafik tabanlı tanıma |
| Falcidieno, Giannini | 1989 | Grafik tabanlı tanıma |
| Chuang, Henderson | 1990 | Grafik tabanlı tanıma |
| Lockett, Guenov | 2005 | Grafik tabanlı tanıma |
| Han, Kang, Choi | 2001 | STEP tabanlı tanıma |
| Gulesin, Jones | 1994 | STEP tabanlı tanıma |
| Mehalawi, Miller | 2003 | STEP tabanlı tanıma |
| Mehalawi, Miller | 2003 | STEP tabanlı tanıma |
| Dereli, Filiz | 2002 | STEP tabanlı tanıma |
| Lee, Kim | 1999 | Artışlı unsur çıkarma tabanlı tanıma |
| Lee, Kim | 1998 | Artışlı unsur çıkarma tabanlı tanıma |
| Sandiford, Hinduja | 2001 | Artışlı unsur çıkarma tabanlı tanıma |
| Ding ve Yue | 2004 | Yapay zeka tabanlı tanıma |
| Nezis, Vosniakos | 1997 | Yapay zeka tabanlı tanıma |
| Çiçek, A. | 2005 | Yapay zeka tabanlı tanıma |

3. SONUÇ

BDT ve BDÜ entegrasyonu için herhangi bir BDT sisteminde tasarlanan 2 veya 3 boyutlu modellerden modele ait üretim bilgilerinin elde edilmesi önemli bir konudur. Çağdaş BDT sistemlerinin veri tabanları bu bilgileri sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı, özellikle son zamanlarda bu boşluğu doldurmak için parça ve unsur bilgilerini tanımlama üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Parça ve unsur tanıma konusundaki çalışmaların çoğu imalat alanında yoğunlaşmıştır. Bu makalede, literatürdeki parça bilgileri ve unsur tanıma ile ilgili yaygın makaleler derlenerek yöntem ve içerik açısından incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda grafik tabanlı yaklaşımların diğer yaklaşımlara göre daha esnek ve kapsamlı olduğu ve literatürde çok yaygın olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu yaklaşımlarda unsur ve parçaya ait geometrik ve topolojik bilgiler bir grafik şeklinde temsil edildiği için bu grafikler unsur ve parça tanıma algoritmalarına girdi olarak kullanılmıştır. Aynı zamanda bu bilgiler parça ve unsur tanıma uygulamalarından farklı BDT/BDÜ uygulamalarında kullanılmaya müsaittir. Hacim ayrıştırma yaklaşımları da literatürde kabul görmüştür. Fakat sınırlı sayıda yazar bu çalışmaları sürdürmektedir. Bunun nedeni ise hacim ayrıştırma yaklaşımı geniş bir unsur ailesine hitap etmemesidir. Genellikle, düzlem yüzeyli ve basit ilkel ve etkileşen unsurların tanınmasında etkili olmuştur. Ayrıca, unsur tanıma algoritmalarında son yıllarda yapay zeka kullanılmıştır. Genellikle unsur tanıma için yapay sinir ağları ve uzman sistemler tercih edilmiştir.

Yapay sinir ağlarının en büyük tercih nedeni ise eksik tanımlanan bilgi ile unsurların tanınabilmesi ve ağların eğitilmesinden sonra unsur tanıma işleminin çok kısa sürede gerçekleştirilmesidir.

Parça tanıma ile parçanın sadece unsur bilgileri değil, aynı zamanda parçaya ait tüm geometrik, topolojik ve teknolojik bilgiler çıkarılmıştır. Parçalar, sistemde global olarak tanımlanabileceği gibi bazı sınırlamalar uygulanarak özel olarak da tanımlanabilmektedir. Global tanıma daha çok topolojisi birbirinden farklı parçalara uygulanabilmektedir. Özel tanıma ise topolojisi aynı, fakat nitelikleri farklı olan parçalarda parçaları birbirinden ayırt etmek için kullanılmaktadır. Bu tanıma işleminde topoloji parçayı tanımlamak için yeterli olmadığından, topoloji ile birlikte nitelikler de kullanılmıştır. Fakat literatürde parça tanıma algoritmaları çok kısıtlıdır. Unsur tanıma çalışmalarının ömrünü tamamlamak üzere olması ve yeterince esnek unsur tanıma algoritmalarının olmayışı araştırmacıları son yıllarda parça tanıma ile ilgili çalışmalara yönlendirmiştir. Gerek unsur gerekse parça tanıma ile ilgili yapılacak olan çalışmalarda çağdaş BDÜ sistemlerinin gereksinimlerini karşılayacak esnek çalışmalar ihtiyaç duyulmaktadır. Yani, parça üzerindeki yüzey sayısı ve tipinde herhangi bir sınırlama olmadan parçaların tanınması ve unsur etkileşimlerinin niteliğine bakılmadan etkileşen unsurların tanınması için çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılacak son çalışmaların bu yönde olması çağdaş BDÜ sistemlerinin gereksinimlerini karşılayacaktır.

4. KAYNAKLAR

- Chuang, S. H., Henderson, M. R. 1990. Three-Dimensional Shape Pattern Recognition Using Vertex Classification and Vertex-Edge Graphs. *Computer Aided Design*. 22 (6), 377-387.
- Çiçek, A. 2005. Bilgisayar Destekli Parça Tanıma Sisteminin Geliştirilmesi ve Motor Montajına Uygulanması. Doktora tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Dereli, T., Filiz, İ. H. 2002. A Note on The Use of STEP for Interfacing Design to Process Planning. *Computer Aided Design*. 34, 1075-1085.
- Ding, L., Yue, Y. 2004. Novel ANN-Based Feature Recognition Incorporating Design by Features. *Computers in Industry*. 55, 197-222.
- Falcidieno, B., Giannini, F. 1989. Automatic Recognition and Representation of Shape Based Features in A Geometric Modeling System. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. 48, 93-123.
- Gao, S., Shah, J. J. 1998. Automatic Recognition of Interacting Machining Features Based on Minimal Condition Subgraph. *Computer Aided Design*. 30 (9), 727-739.
- Gulesin, M., Jones, R. M. 1994. Face Oriented Neighbouring Graph (FONG): A Part Representing Scheme for Process Planning. *Computer Integrated Manufacturing Systems*. 7 (3), 213-218.
- Han, J. H., Kang, M., Choi, H. 2001. STEP-Based Feature Recognition for Manufacturing Cost Optimization. *Computer Aided Design*. 33, 671-686.
- Joshi, S., Chang, T. C. 1988. Graph-Based Heuristics for Recognition of Machined Features From A 3D Solid Model. *Computer Aided Design*. 20 (2), 58-66.
- Lee, J. Y., Kim, K. 1999. Generating Alternative Interpretations of Machining Features. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 15, 38-48.
- Lee, J. Y., Kim, K. 1998. A Feature-Based Approach to Extracting Machining Features. *Computer Aided Design*. 30 (13), 1019-1035.
- Li, B., Liu, J. 2002. Detail Feature Recognition and Decomposition in Solid Model. *Computer Aided Design*. 34, 405-414.
- Lockett, H. L., Guenov, M. D. 2005. Graph-Based Feature Recognition for Injection Moulding Based on A Mid-Surface Approach. *Computer-Aided Design*. 37, 251-262.
- Mehalawi, M., Miller, R. A. 2003. A Database System of Mechanical Components Based on Geometric and Topological Similarity Part I: Representation. *Computer Aided Design*. 35, 83-94.
- Mehalawi, M., Miller, R. A. 2003. A Database System of Mechanical Components Based on Geometric and Topological Similarity Part II: Indexing, Retrieval, Matching and Similarity Assessment. *Computer Aided Design*. 35, 95-105.
- Nezis, K., Vosniakos, G. 1997. Recognizing 2½D Shape Features Using A Neural Network and Heuristics. *Computer Aided Design*. 29 (7), 523-539.
- Sakurai, H. 1995. Volume Decomposition and Feature Recognition: Part I - Polyhedral Objects. *Computer Aided Design*. 27 (11), 833-843.
- Sandiford, D., Hinduja, S. 2001. Construction of Feature Volumes Using Intersection of Adjacent Surfaces. *Computer Aided Design*. 33, 455-473.
- Trappey, A. J. C., Lai, C. S. 1995. A Data Representation Scheme for Sheet Metal Parts: Expressing Manufacturing Features and Tolerance Requirements. *Journal of Manufacturing Systems*. 14 (6), 393-405.
- Wang, E., Kim, Y. S. 1998. Form Feature Recognition Using Convex Decomposition. *Computer Aided Design*. 30 (13), 983-989.
- Wang, M. T., Chamberlain, M. A., Joneja, A., Chang, T. C. 1993. Manufacturing Feature Extraction and Machined Volume Decomposition in A Computer Integrated Feature Based Design and Manufacturing Planning Environment. *Computers in Industry*. 23, 75-86.
- Woo, Y., Sakurai, H. 2002. Recognition of Maximal Features by Volume Decomposition. *Computer Aided Design*. 34, 195-20.