



BSD TORNALAMADA İŞLEME HATALARI VE DÜZELTME STRATEJİLERİ ÜZERİNE BİR DERLEME ÇALIŞMASI

Eyüp Sabri TOPAL^{a*}, Can ÇOĞUN^b

^aErciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, 38039 KAYSERİ

^bGazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü 06570 ANKARA

ÖZET

Bu çalışmada bilgisayar sayısal denetimli (BSD) tornalama işleminde iş parçası çapında ortaya çıkan boyutsal hatalar ve düzeltme stratejilerine ilişkin bir derleme çalışması sunulmuştur. İşleme hatalarının ortaya çıkışında kesme takımları, işleme şartları, tezgah hassasiyeti, iş parçası malzemesi ve geometrisi gibi birçok önemli faktör rol oynamaktadır. Düzeltme stratejileri ise Geometrik-ısı, Geometrik adaptif kontrol ve Açık modüler olmak üzere üç ana model olarak gelişmiştir. Hata düzeltme çalışmalarının çoğunlukla Geometrik adaptif kontrol teknikleri üzerine yoğunlaştığı ve bu alanda önemli gelişmeler sağlandığı görülmekle birlikte sonuçların uygulanabilirliği halen istenilen düzeyde değildir. Açık modüler kontrol modeli ise kontrol ünitelerinin NT tabanlı işletim sistemli ve açık kontrol devreli olduğu durumlarda çok avantajlıdır. Bu durumda yeni nesil kontrol ünitelerinin açık çevrimli ve güncellenebilir Pc'lerden oluşmasının hata düzeltme çalışmalarında büyük gelişme sağlayacağı açıktır.

Anahtar kelimeler: İşleme hatası, BSD, Bilgisayar destekli imalat.

MACHINING ERRORS AND COMPENSATION STRATEGIES IN CNC TURNING: A REVIEW STUDY

ABSTRACT

In this study, a review of work done on machining errors and compensation strategies in CNC turning is presented. Many important factors like machining conditions and cutting tools, machine tool accuracy, workpiece materials etc. play role on the machining errors. The compensation strategies are arranged as three main model such as Geometric-thermal, Geometric adaptive control and Open modular control. The majority of error compensation studies is focused to Geometric adaptive control techniques. But applicability of these techniques is not at the desired level. The Open modular control model has some advantage in case of control units are open loop and have NT based operation system. Then it is clearly shown the error compensation techniques will be greatly improved if the new generation control units are open loop and updatable PCs.

Keywords: Machining error, BSD, Computer aided manufacturing

1. GİRİŞ

İnsanlığın artan ihtiyaçları ve istekleri araştırmacıları teknolojiye daha büyük adımlar atmaya, enerjiyi ve zamanı daha etkin kullanmaya ve mikroişlemcilerle birlikte çalışan mekanik sistemler geliştirmeye zorlamıştır. Bu yönde gösterilen gayretler beraberinde yeni ve nitelikli teknolojik gereklilikler getirmiştir. İmalat sektöründe müşteri ihtiyaçları toleransların giderek daralmasını istemekte, fakat artan ticari rekabetin baskısıyla bunun beraberinde getireceği maliyet artışı ve üretim hızı azalması kabul edilmemektedir. Bu yüzden konuya yönelik güncel araştırmalar daha yüksek hassasiyeti daha düşük maliyette ve daha yüksek üretim hızında gerçekleştirebilmenin yoğun çabası içerisinde. Bu çalışmalarla BSD tornalama işleminde ek donanımlar kullanmaksızın ve imalat hızında düşüşe meydan vermeden boyutsal hassasiyette kaydadeğer bir iyileşme sağlanması hedeflenmektedir. Böyle bir gelişme sağlandığı takdirde ürün kalitesindeki artışın yanında tornalama işlemlerinin paso sayısında azalma ya da daha sonraki taşlama işleminde bir kısalma mümkün olacaktır. Hatta bazı işlemler için taşlama gereğinin tamamen ortadan kalkması da mümkündür. Bunlardan sadece birinin gerçekleşmesi durumunda bile seri imalat süreci için toplamda çok büyük kazanımlar ortaya çıkacaktır [1].

2. İŞLEME HATALARI VE KAYNAKLARI

İşleme hatası işlenmiş bir parçanın gerçek boyutlarıyla istenen boyutları arasındaki fark olarak tanımlanabilir. İşlenmiş bir parçadaki maksimum hata miktarı o parçanın sahip olduğu hassasiyet (tolerans) değerini de ifade eder. Bütün bunlar kullanılan sistemler bütünü (işleme ve ölçme) hassasiyetine bağlıdır. Elde edilebilecek son hassasiyet işleme sisteminin nominal hassasiyetinden daha düşük seviyelerde olmak zorundadır. Örneğin bir işleme sisteminin (tezgahın) konumlanma hassasiyeti 5 μ m ise, bu sistemle işlenen işparçasının hassasiyeti $\leq 5 \mu$ m olmak zorundadır [2].

Tornalama işlemleri için iş parçası boyutsal hatalarının sınıflandırması farklı şekillerde yapılmaktadır. Hatanın yapısına göre dinamik ve yarı-statik olarak ayrılan işleme hataları kaynakları açısından altı temel kategoride sınıflandırılabilir [2,3,4]:

1. Kesme Kuvvetlerinden kaynaklanan hatalar,
2. Takım-tezgah sisteminin geometrik ve kinematik hataları,
3. Isıl hatalar,
4. Takım ve tezgah elemanlarının aşınmasından kaynaklanan hatalar
5. Cihaz-ekipman hataları
6. Diğer hatalar (parça bağlama, malzeme kusuru, titreşim vs.)

Muhtemel hatalar ve bunların sınıflandırılması şematik olarak Şekil 1. de verilmiştir. Isıl deformasyonlar ve takım aşınması kaynaklı hatalar en fazla 10 μ m civarında seyrederken, deformasyondan kaynaklanan hatalar 100 μ m seviyelerine kadar yükselir. Bu sebeple hatada işleme sisteminin kesme kuvvetleri altındaki deformasyonu (sehimi) hakimdir [3].

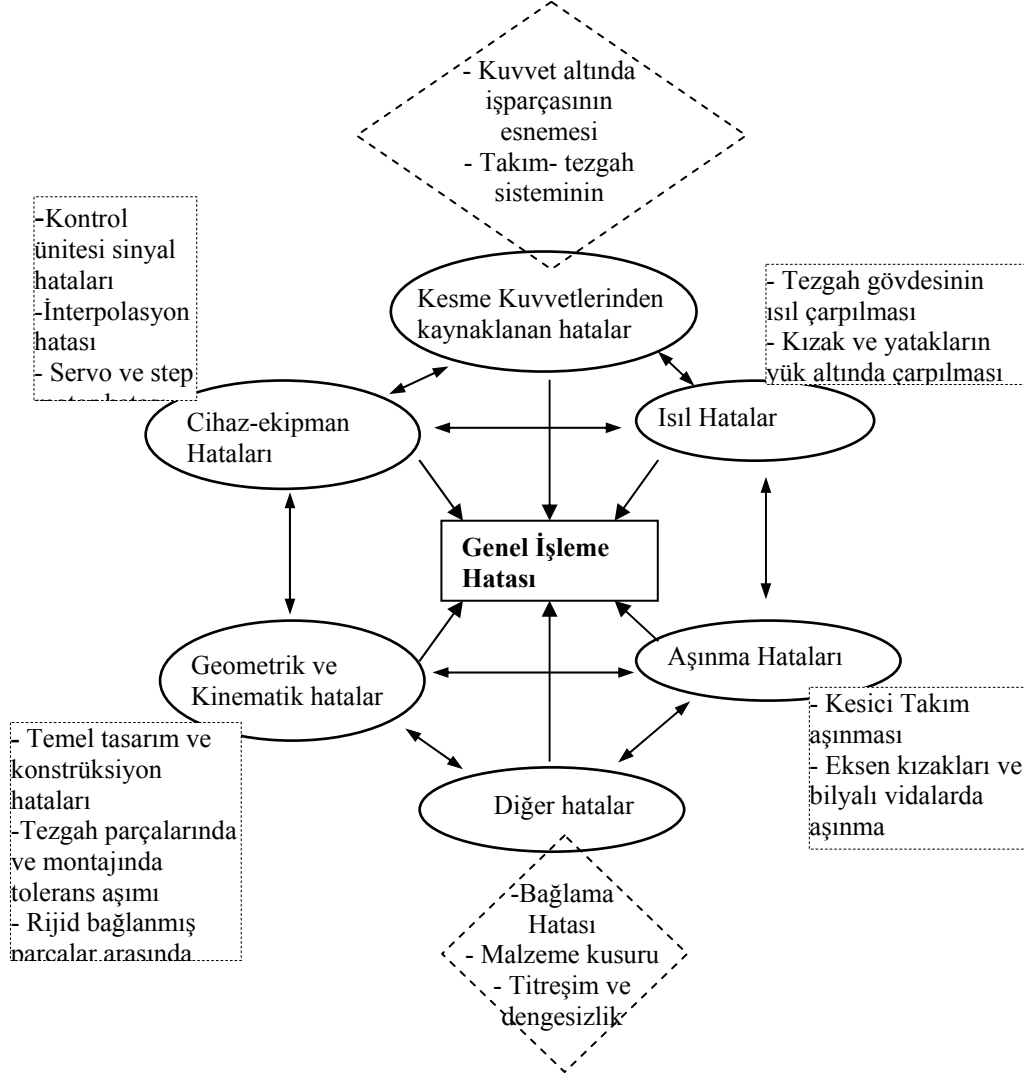
2.1 Isıl Hatalar

En çok araştırılan hata kaynaklarından biri olan ısıl hatalar tezgah gövdesi ve elemanlarının, iş parçası, takım ve takım tutucuların ısınması nedeniyle boyut değiştirmesinden kaynaklanır. Bu hata türün kolay modellenmesi nedeniyle birçok araştırmacı bu alana yönelmiştir. Ancak günümüzde giderek yaygınlaşan sıcaklık kontrollü işleme merkezleri sayesinde hem iş parçası hem de işleme sisteminin standart sıcaklıkta kalması sağlanabilmektedir. Bu yolla bu hata bileşenin büyük oranda ortadan kaldırılması mümkün olmaktadır [5,6].

2.2 Cihaz-Ekipman Hataları

Tezgah kontrol ünitesi, elektronik donanım (sensörler, anahtarlar vs.), servo ve adım motorlar ve bunları birbirine entegre eden arabirimlerin (I/O kartları, PLC'ler) sinyal üretme ve/veya algılamadaki hatalarıdır. Örneğin konumlanma ve tekrarlanma hataları bu kapsamdadır. Ayrıca eksenlerin konik ve küresel hareketlerini sağlayan enterpolasyon modüllerinin hesaplama hataları da bu kapsamda değerlendirilebilir [7]. Cihaz-Ekipman hataları

gerek sistematik oluşu, gerekse farklı disiplinleri ilgilendirmesi nedeniyle imalatçılar tarafından fazlaca irdelenmemiştir. Bu hata türünün toplam hata miktarına katkısı da düşük seviyelerde kalmaktadır [3].



Şekil 1. Genel hata dağılım şeması.

2.3 Geometrik ve Kinematik Hatalar

Geometrik hatalar tezgahın temel konstrüksiyonunda tasarım veya imalat sürecinden kaynaklanan veya işletmeyle ortaya çıkan hataları kapsar. Daha çok tezgahı oluşturan elemanların kötü toleransından kaynaklanır. Tutturma ve bağlama elemanlarının (örneğin civataların) zayıflaması nedeniyle rijid bağlı bileşenlerin bağlı hareket yapmaları da bu tür içerisinde mütalaa edilir. Kinematik hatalar ise hareket eden tezgah bileşenlerinin sebep olduğu hatalardır [8]. Örneğin elektronik olarak tanımlanan bir konuma mekanik sistemler nedeniyle hatalı gidilmesi (konumlanma hatası) veya bir konumlanmanın tekrarında önceki konumdan sapma kaydedilmesi (tekrarlama hatası) bu tür içerisindedir [9].

2.4 Aşınma Hataları

İşletme sürecinin ortaya çıkardığı hatalardır. Eğer seri imalat süreci söz konusuysa takım aşınması önemli boyutlarda hata üretebilir. Dikkatli bir takım değiştirme ve takım kaydırma rejiminin uygulanmasıyla bu hata türü de büyük ölçüde azaltılabilir. Aşınma hatalarının diğer bir ögesi de kızak/yatak ve bilyalı vidaların aşınmasıdır. Bu durum her işleme operasyonunda kendini gösteren ve zamanla artış kaydeden bir işleme hatası üretir. [3,10].

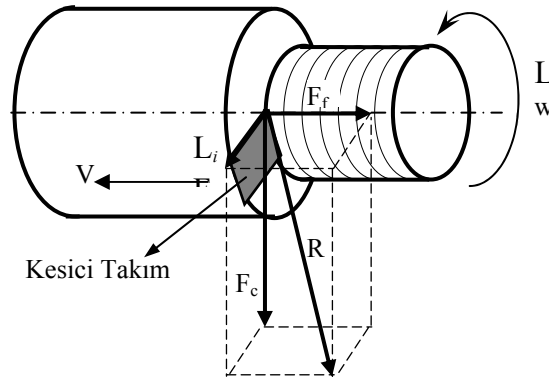
2.5 Diğer Hatalar

Tutturma ve bağlama hataları [11], iş parçası malzeme kusurları ve titreşim gibi sebeplerden kaynaklanan hatalardır [12].

2.6 Kesme Kuvvetlerinden Kaynaklanan İşleme Hataları

Talaş kaldırma işleminde oluşan kuvvetlerin sebep olduğu hatadır. Kuvvetin bir sonucu olarak takım ve iş parçasının birbirine göre konumu, iş parçasının ve çeşitli tezgah elemanlarının esneme derecesine bağlı olarak değişir. Bu durumda ağır şartlarda işleme yapılırken daha büyük hatalar görülecektir. Bilindiği gibi tornalama işleminde takım-ış parçası etkileşimi üç bileşenli bir kuvvet sistemiyle ifade edilir (Şekil 2). Bunlardan Esas Kesme kuvveti (F_c) diğer bileşenlerden daha büyüktür. Dolayısıyla hata üzerinde en etkili bileşendir. Radyal kuvvet (F_r) genellikle en küçük bileşen olmakla birlikte etkiye doğrultusu açısından önemli bir hata kaynağıdır. Besleme Kuvvetinin (F_f) ise gerek büyüklük ve gerekse doğrultu açısından hataya önemli bir etkisi olmadığından çoğunlukla ihmal edilir [13].

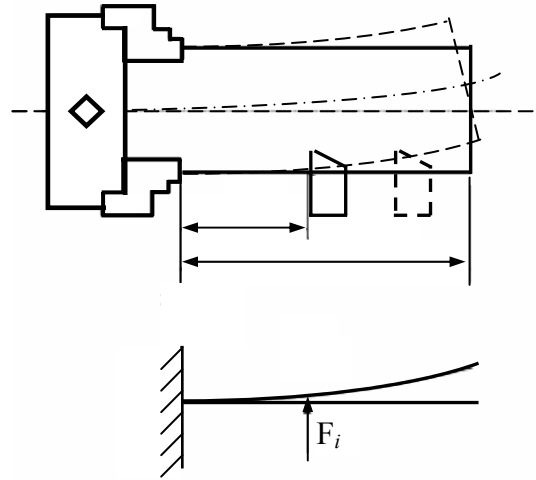
Bu kuvvetler altında iş parçasının aksel deformasyonu basit olarak Şekil 3 'de gösterilmiştir. İş parçası dönel formu ve dönme hareketi nedeniyle F_c kuvveti tarafından yukarı doğru, F_r kuvveti tarafından da yana doğru itilmektedir. Toplam esneme hareketinin doğrultusu (iş parçası orijin noktasının kayması) OO' vektörüyle temsil edilmektedir (Şekil 4). Bu doğrultu farklı takım uç geometrilerinde küçük farklar gösterebilir.



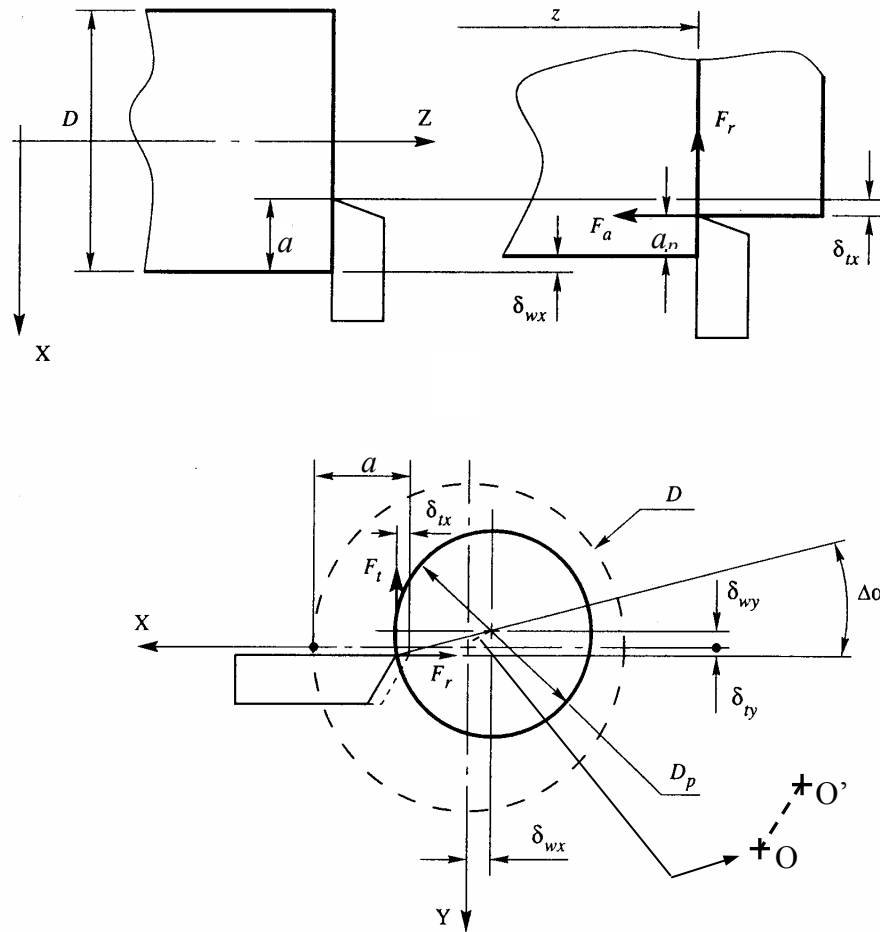
Şekil 2. Tornalama işleminde oluşan kuvvet bileşenleri [1].

Düzgün bir iş parçasının kesme kuvvetleri karşısındaki davranışına paralel olarak ortaya çıkan boyutsal hata üstel karakterli bir fonksiyondur (Şekil 3). Eğer kesme kuvvetlerinin bir işleme pasosu boyunca iş parçası boyuna bağlı değişimi ihmal edilecek olursa, kesici takım ve takım tutucuların esnemesi iş parçası uzunluğu boyunca yaklaşık olarak sabittir ve hata profilinin karakterini etkilemez. Bu yüzden takım sisteminin esnemesi daha çok bir takım sıfırlama problemi olarak değerlendirilebilir ve bu yolla azaltılabilir. Şekil 4. kesme işlemi esnasında iş parçası orijin noktasının serbest uçta nasıl kaydığını göstermektedir.

Bu şekilde yer alan d verilen talaş derinliğini, d_p gerçek talaş derinliğini, \square_{tx} ve \square_{ty} takımın X ve Y yönünde esnemesini, \square_{wx} ve \square_{wy} iş parçasının X ve Y yönünde esnemesini sembolize etmektedir.



Şekil 3. Kesme kuvvetleri altında iş parçasının aksel deformasyonu [1].



Şekil 4. Kesme esnasında iş parçası davranışının modeli [14].

3. HATA DÜZELTME STRATEJİLERİ

Hata düzeltmede kullanılan teknikler bakış açılarına göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Düzeltme girişiminin zamanlaması ve doğası yönünden değerlendirildiğinde işleme (in-process) ve işlem sonrası (post-process); hata bilgisini geri besleme (feed-back) yolu yönünden değerlendirildiğinde ise çevrimiçi (on-line) ve çevrimdışı (off-line) teknikler olmak üzere sınıflamak mümkündür. Literatürde ‘hatadan kaçınma yöntemleri’ ve ‘hatayı telafi etme yöntemleri’ şeklinde sınıflandırmaya da rastlanmıştır [2]. Bununla birlikte yapılan araştırmaların zamanla ortaya koyduğu birikim üç ana model oluşturmuştur:

1. Geometrik - Isıl model
2. Geometrik adaptif kontrol modeli
3. Açık modüller kontrol modeli

Bu modellerin ayrıntılı özellikleri ve her modelin kapsamına giren çalışmalara bazı örnekler aşağıda alt başlıklar halinde verilmiştir.

3.1 Geometrik – Isıl Model

Sensörlerle yapılan çevrimiçi boyut ölçme işleminin içerdiği birçok olumsuzluk bazı araştırmacıları geometrik-ısıll modelleri kullanmaya zorlamıştır. Geometrik-Isıl model iki alt modelin birleşmesinden oluşur. Bunlardan biri tezgahın sahip olduğu geometrik hata bileşenlerini, diğeri de ısıll hata bileşenlerini içine alır. Alt modeller genellikle çevrimdışı ölçümlere ve bunlardan elde edilen ampirik bağıntılara dayanır. Sıcaklık ölçümleri tezgahın kritik noktalarından ısıll-çiftlerle alınır. Bağıntıların katsayılarının elde edilmesinde istatistiksel paket programlar [15], matris transformasyonları [16], yapay sinir ağları [17] ve dağılım mantık yöntemleri [18] kullanılmıştır. Düzeltme aşamasında ise ısıllıcı ve soğutucu kullanılması [19], yazılım kullanılarak çevrimiçi düzeltme [20] ve koordinat sistemi kaydırarak düzeltme [3] yöntemlerine rastlanmaktadır. Çevrimdışı ölçümün yapısı gereği GI model bazı olumsuzluklara sahiptir. Sıcaklık ve hata ölçümleri gerçek kesme işlemi sırasında yapılmadığı için kesme kuvvetleri sebebiyle oluşan sehim dikkate alınmamaktadır. Ayrıca modellemede esas alınan bazı kabullerin ve tezgah şartlarının zamanla değişimi nedeniyle GI model hassasiyetini uzun süre koruyamaz [3].

3.2 Geometrik Adaptif Kontrol Modeli

İşleme düzeltme stratejilerinin en yaygın kullanılanı geometrik adaptif kontrol teknikleridir. Bu modeli kullanan çalışmaların çok büyük bir çoğunluğu çevrimiçi boyut ölçümlerine dayanır. Son yıllarda sensör ve ölçme teknolojisinde kaydedilen gelişmeler çoğu araştırmacıyı bu alana çekmiştir. Bu teknik iş parçası sehimi, takım aşınması, sıcaklık vs. gibi değişkenlerden kaynaklanan hataları işleme sırasında sensörler yardımıyla hemen algılayıp, düzeltme sinyalini eşzamanlı olarak bilgisayar yardımıyla geri besler. Düzeltme geri beslemesi çoğunlukla kesici takıma ek bir düzeltme hareketi verecek şekilde tasarlanmış ve servo motorlarla tahrik edilen bir mikro-konumlayıcıya (actuator) iletilir. Bu teknik, işleme sisteminin tekrarlı kararlılığının düşük olduğu ve hatanın gelişigüzel eğilim gösterdiği durumlarda yeni düzenlemeler gerektirmeksizin her parça için ayrı telafi imkanı sağlar. Bu ve diğer bazı avantajları sebebiyle son on yılda birçok araştırma bu tekniğe yönelmiştir [3]. Bununla birlikte araştırma sonuçları aşağıdaki iki önemli engel sebebiyle hala uygulanabilir görünmemektedir;

1. Talaş kaldırma bölgesindeki ağır şartlar: Gelişigüzel ve hızlı talaş akışı, yüksek hızda dönme ve kesme sıvısı gibi faktörler sebebiyle ölçme sistemleri işlenmekte olan parçanın geometrisini gerçek şekilde algılayamaz. Bu sınırlılık birçok araştırmacıyı sadece ısıll hataları araştırmaya zorlamıştır. Halbuki kesme kuvvetlerinin oluşturduğu sehim en öncelikli hata kaynaklarından biridir.

2. BSD kontrol ünitelerinin ‘kapalı devre kontrol’ özellikleri (closed-loop control): Bu özellik beraberinde iki problemi getirmektedir. İlk problem kontrol sinyalinin genellikle erişilemez (müdahale edilemez) nitelikte olmasıdır (closed loop). Bu yüzden takım pozisyonu, tespit edilen hatanın düzeltilebilmesi için hatayla eşgüdümlü şekilde değiştirilemez. Bu zorluk çoğu araştırmacıyı kesici takımın yolunu değiştirebilmek için harici bir öteleyici (actuator) kullanmaya itmiştir. İkinci problem ise kullanıcıların sadece tezgah imalatçılarınca belirlenen işleme kurallarını (kodlarını) kullanmak zorunda olmalarıdır. Bu kontrol kuralları çoğunlukla yazılım yerine donanım içerisine tanımlanmıştır. Böylesi tescilli kontrol ünitelerinin ihtiyaca göre güncellenmeleri de zor ve maliyetli bir işlemdir.

Kullanıcılar kendi mühendislik bilgi ve tecrübelerini, yeni kontrol tekniklerinin kullanılmasını engelleyen bu tür kontrol ünitelerine aktarma şansından yoksundurlar [3].

Bu tür araştırmaların sensör ve BSD kontrol teknolojisindeki gelişmelere bağlı olması günümüz için kayda değer araştırmaların geçmişini son yirmi yıla sınırlamaktadır. 1980'li yılların imkanlarıyla bir hata düzeltme yöntemi geliştirmeye çalışan M. Szafarczyk ve arkadaşları [21] iki talaş kaldırma işlemi arasında problemler yardımıyla hatayı ölçmüştür. Problemlerden elde ettikleri hata sinyaliyle hassas bir tablayı kontrol eden hidrolik swichleri uyarılmış ve bu yolla tablanın kesici takıma ek bir besleme hareketi vermesini sağlamıştır. Düzeltme işlemi sadece standart formda bir milin işlenmesini kapsamakla birlikte hata 0.005 mm ye kadar indirilebilmiştir.

Ölçme teknolojisindeki gelişmelerle eşzamanlı şekilde çevrimiçi boyut ölçme ve buna dayalı adaptif kontrol girişimleri 90'lı yıllarda yoğunlaşmaktadır. Bu dönemde ölçme ve düzeltme birimleri arasındaki entegrasyonda da iyileşme gözlenmektedir. K. C. Fan ve Y. H. Chao [22] işleme sırasında servo kontrollü temassız problemlerle iş parçası boyutunu ölçmüş ve boyut bilgisini geliştirdikleri düzeltme sistemine çevrimiçi olarak geri beslemiştir. Düzeltme sisteminin temel prensibi eksenlere hareket veren step motorlara hariçten müdahale yoluyla ölçülen hata bilgisinin aktarılmasıdır. Bu yolla BSD kontrol ünitesinden gelen pozisyon bilgisi kontrollü şekilde saptırılarak kesici takıma istenen ek hareketin verilmesi sağlanmaktadır. Yöntem, kademeli parçaların işlenmesinde yaklaşık 0.010 mm ve kademeli parçaların işlenmesinde 0.015 mm toleransa ulaşılmasını sağlamıştır. Uygulamada ölçme sisteminin çevrimiçi yapısı sebebiyle bazı problemler yaşandığı gözlenmektedir. Düzeltme sistemi işlenebilir bir hata yakalayınca kadar hatalı işleme devam etmekte ve ilk düzeltme sinyalinin erişmesiyle kesici takım istenen pozisyona ani bir geçiş yapmaktadır. Bu sürecin sonunda iş parçasının profili artan ve azalan hata zikzakları şeklinde görünüm vermektedir. Öte yandan çalışmada değinilmemiş olmakla birlikte temassız sensörlerle iş parçası arasından talaş parçası geçmesi durumunda ani ve büyük boyutlu yanlış hata algılaması mümkündür. Bu durumda düzeltilmesiz işleme göre daha büyük hatalar oluşabilmektedir. Bundan kaçınmak amacıyla araştırmacıların yaptıkları testlerde düşük kesme hızlarını tercih ettikleri görülmüştür.

Kesme kuvvetlerinin ölçümüne dayanan ve kesme kuvvetlerinden kaynaklanan hatayı düzeltmeye yönelik çalışmalarda ise ağırlıklı eğilim eşzamanlı (real-time) hata düzeltme teknikleridir. Önce kesme kuvvetleri işleme sırasında ölçülür ve hatayla olan ilişkisi modellenir. Düzeltme işleminde ölçülen kesme kuvvetleri anında hata bilgisine dönüştürülerek işleme sistemine geri beslenir. Bu aşamada BSD kontrol ünitelerinin önceki konularda bahsedilen kapalı devre (closed loop) kontrol özelliği bir sınırlayıcı olarak ortaya çıkmaktadır. Kimi araştırmacılar harici bir ekipmanla takıma ek bir besleme hareketi vermeyi tercih ederken, kimileri de kontrol ünitesinin orijinal yapısına müdahale ederek orijinal konum sinyallerini değiştirmeyi tercih etmiştir. S. Yang [13] ve arkadaşları kesme kuvvetlerinden kaynaklanan hatayı gidermek üzere geliştirdikleri modelde bir piezo-elektrik kuvvet sensörünü takım taretini altında oluşturdukları bir cep içine yerleştirerek kesme kuvvetlerini ölçmüştür. Kesme kuvvetleriyle hata arasındaki bağıntıları sayısal yöntemlerle iş parçası, takım ve tutucu sistemi ve ayna gibi farklı bileşenler halinde değerlendirerek modellemiştir. İşleme sırasında ölçülen kuvvetleri bu modele koyarak hatayı hesaplamış ve çevrimiçi olarak tezgaha geri beslemiştir. Bu çalışmada kontrol ünitesine yapılan geri besleme işleminde PLC ünitesi kullanıldığı ve BSD ünitesiyle entegrasyonun dijital bir I/O kartıyla sağlandığı belirtilmiştir. Buna göre BSD kontrol ünitesinin orijinal konumlanma sinyali tezgahın servo ve step motorları yerine harici bilgisayara gönderilmekte ve bilgisayar tarafından hata düzeltme sinyaliyle birleştirildikten sonra tezgahın eksen motorlarına gönderilmektedir. Bu yöntemle silindirik, konik ve düz kademeli iş parçaları denenmiş ve sırasıyla ortalama % 85, % 78 ve % 67 düzeltme sağlandığı bildirilmiştir.

Kesme kuvvetlerinden kaynaklanan hatayı düzeltme yolunda sayısal analiz çalışmaları da mevcuttur. Cloutier, Phan ve Mayer [18,19,20,21] tornalama sırasında oluşacak kuvvetleri ve buna bağlı olarak iş parçası ve takım tutucularda oluşacak sehimleri sonlu elemanlar yöntemiyle belirlemek ve düzeltmek üzere dört aşamadan oluşan bir çalışma dizisi gerçekleştirmiştir. İlk çalışmalarında [23] tornalama işleminde düz silindirik iş parçalarının sehimini hesaplayan bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Bu modeli ikinci ve üçüncü aşamada kademeli [24] ve konik [25] iş parçaları için genelleştirmiştir. Dördüncü aşamada [26] ise modeli talaş kaldırma deneylerinde uygulamıştır. Bu çalışma dizisinde sonlu elemanlar modeliyle alınan sonuçlar ve deneysel sonuçlar arasında çok iyi bir uyum sağlandığı ve sonuçta en büyük hatanın 0.014 mm olduğu bildirilmiştir. Diğer bir sayısal analiz çalışması da Qiang [27] tarafından sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada önce analitik çözümleri zaten mevcut olan temel geometrilerde sonlu farklar analizi yapılarak elde edilen sonuçlar mevcut analitik çözümlerle karşılaştırılmıştır. Geliştirilen sonlu farklar modelinin temel analitik çözümlerle uyumlu olduğu görüldükten sonra

aynı sonlu farklar modeli kompleks iş parçası geometrilerine uygulanmıştır. Ancak modelin son halinin tutarlılık seviyesi herhangi bir analitik ya da deneysel sonuçla desteklenmemiştir.

Sayısal çözümlerdeki tutarsızlıklar bazı araştırmacıları ampirik modeller oluşturmaya teşvik etmiştir. Palla ve ark. [28] iş parçası hatasıyla kesme parametreleri (kesme hızı V, paso derinliği a ve ilerleme değeri f) arasındaki ampirik ilişkileri belirlemiş ve talaş kaldırma işleminde hata miktarı kadar ek talaş derinliği beslemek suretiyle hatayı düzeltmeye çalışmıştır. Sonuçta çelikler için % 77, alüminyum için % 79 düzeltme sağlanmıştır.

3.3 Açık Modüler Kontrol Modeli

Önceki bölümlerde değinildiği üzere çoğu BSD kontrol üniteleri tescilli ve güncellenemeyen yapıya sahiptir. Açık Modüler Kontrol Modeli Amerikan otomotiv firmaları tarafından kontrol ünitelerinin daha esnek ve kullanıcı tarafından güncellenebilir şekilde imal edilmelerini teşvik etmek amacıyla başlatılmış bir grup çalışmasıdır [29]. Buradaki 'açık' terimi kontrol ünitesinin standart yazılım ve donanım ürünleriyle entegrasyona izin vermesi özelliğini tanımlar. 'Modüler' terimi ise bilişim dünyasında 'tak ve kullan' terimiyle ifade edilen aygıtların kullanımına izin vermesi özelliğini ifade eder. Grup üyeleri istenen özelliklere uygunluğu sebebiyle Microsoft Windows NT İşletim Sisteminin tezgahlara adaptasyonunu önermektedir. Ayrıca, bu grup Windows NT İşletim Sisteminin bu konudaki aksak yönlerini de tespit etmiş ve çözüm önerilerini de sunmuştur [30,31]. Gelişmeler yeni nesil BSD kontrol ünitelerinin muhtemelen Windows NT işletim sistemli ve açık kontrol çevrimli PC'ler olacağını göstermektedir. Şu anda sınırlı sayıda PC kontrollü tezgah zaten piyasaya sürülmüş durumdadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İmalatçıların dar toleranslara erişme gereği ile karşılaştıkları zaman çok küçük talaş derinliklerinde çalışma yoluna gittikleri bilinmektedir. Bu durum tezgahların verimli kullanımını sınırlamakta, imalat süresini ve maliyetini arttırmaktadır. Bilindiği gibi BSD tezgahlar daha çok aynı parçanın çok sayıda imal edileceği imalat süreçlerinde kullanılmaktadır. Böyle bir sürecin başlangıcında bu konuda kaydedilmiş gelişmelerden faydalanarak yapılan bir ön hazırlık çalışmasıyla toplam imalat süresinden büyük tasarruf sağlamak ve mamul kalitesini arttırmak mümkündür. Öne sürülen yöntem ve modellerin tutarlılığı pratiğe geçilmesiyle ve tezgah sistemlerinin değişmesiyle büyük oranlarda azalacak olsa bile yine de bütünüyle düzeltmesiz işlemlerden daha iyi sonuçlar verecektir.

Daha iyi boyutsal hassasiyetin elde edilebilmesi için 1960'lı yıllardan bu yana yapılan çok sayıda çalışmanın sonucunda araştırmacılar, çalışmaların başarısını sınırlayan iki engelin varlığında ortak görüştedirler. Bunlar talaş kaldırmanın ağır şartları ve BSD kontrol ünitelerinin "kapalı düğüm" kontrol özelliğidir. İşlemin doğası değişmeyeceğine göre kontrol ünitelerinde bazı düzenlemelerin yapılması gereği ortadadır. Kontrol ünitelerinde işleme kodlarının donanım yapısı içerisinde değil, yazılım yapısı içerisinde tanımlanması birçok problemin çözülmesini sağlayacaktır. Ayrıca matematiksel ve mantıksal operatörlerin takım yörüngesi tanımlanmasında kullanılabilirliği ve tezgah operatörünün kendine özgü yeni yörüngeler tanımlayabilmesine izin verilmesi boyutsal kaliteye katkıda bulunabilir. Bunların sağlanabilmesi Başlık 3.3 içerisinde değinilmiş olan 'Açık Modüler Kontrol' modelinin hayata geçirilmesi ve kontrol ünitelerinin güncellenebilir PC lerden oluşturulmasıyla mümkün olabilir.

KAYNAKLAR

1. Topal E.S., BSD Tornalamada Kesme Kuvveti Esaslı İşleme Hatasının İncelenmesi ve Bilgisayar Desteğiyle Düzeltilmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2003
2. Ramesh, R., Mannan M.A., Poo, A.N., Error Compensation in machine Tools- a review Part I: Geometric, cutting Force Induced and Fixture-Dependent Errors, Int. Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 1235-1256, 2000
3. Chun, F., Radial Error Feedback Geometric Adaptive Control for Bar Turning in CNC Turning Centers, PhD Thesis, The Florida State University, Florida, 2000
4. Liu, Z.Q., Venuvinod, P.K., Error Compensation in CNC Turning Solely from Dimensional Measurements Previously Machined Parts, CIRP Annals- Manufacturing Technology, 48, 429-432, 1999
5. Ramesh, R., Mannan M.A., Poo, A.N., Error Compensation in Machine Tools — a Review: Part II: thermal errors, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40 (9), 1257-1284, 2000

6. Du, Z. C., Yang, J. G., Yao, Z. Q., Xue, B. Y., Modeling approach of regression orthogonal experiment design for the thermal error compensation of a CNC turning center, *Journal of Materials Processing Technology*, 129 (1-3), 619-623, 2002
7. Schmitz, T., Ziegert, J., Dynamic Evaluation of Spatial CNC Contouring Accuracy, *Precision Engineering*, Volume 24, (2), 99-118, 2000
8. Jywe, W., Liu, C., Verification and Evaluation Method For Volumetric and Positional Errors of CNC Machine Tools, *International Journal of Machine Tools And Manufacture*, Volume 40, Issue (13), 1899-1911, 2000
9. Ni, J., CNC Machine Accuracy Enhancement Through Real-time error Compansation, *ASME Transactions Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119, 717-724, 1997
10. Chungchoo, C., Saini, D., On-Line Tool Wear Estimation in CNC Turning Operations Using Fuzzy Neural Network Model, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 42(1), 29-40, 2002
11. Lechniak, Z., Werner, A., Skalski, K., Kedzior, K., Methodology of Off-Line Software Compensation for Errors in The Machining Process on The CNC Machine Tool, *Journal of Materials Processing Technology*, 76, (1-3), 42-48, 1998
12. Schmitz, T., Ziegert, J., Examination of surface location error due to phasing of cutter vibrations, *Precision Engineering*, Volume 23, (2), 51-62, 1999
13. Yang, S., Yuan, J., Ni, J., Real-time Cutting Force Induced Error Compensation on a Turning Center, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37 (11), 1597-1610, 1997
14. Baron, L., Mayer, J. R. R., Cloutier, G., Phan, A.V., Finite Element and Experimental Studies of Diameter Errors in Cantilever Bar Turning, unpublished, Monreal, Canada, 2003
15. Ni, J., Wu, S. M., An On-line Measurement Technique for Machine Volumetric Error Compensation, *ASME Transactions Journal of Engineering for Industry* 115, 85-92, 1993
16. Mou, J., Liu, C. R., An Adaptive Metodology for Machine Tool Error Correction, *ASME Transactions Journal of Engineering for Industry*, 117 389-399, 1995
17. Veldhuis, S. G., Elbestawi, M. A., Modeling and Compensation for Five Axis Machine Tool Errors, *ASME Manufacturing Science and Engineering*, PED-Vol 68-2 827-839, 1994
18. Srinivasa, N., Ziegert, J.C., Prediction of Thermally Induced Time-Variant Machine Tool Error Maps Using a Fuzzy Artmap Neural Network, *ASME Transactions Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119, 626-630, 1997
19. Hatamura, Y., Nagao, T., Mitsuishi, M., Kato, K., Taguchi, S., Okumura, T., Nakagawa, G., Sugishita, H., Development of an Intelligent Machining Centre Incorporating Active Compensation for Thermal Distortion, *Annals of CIRP* 42/1, 549-552, 1993
20. Segonds, S., Lagarrigue, P., Redonnet, J. M., Rubio, W., Compensation for Machining Defects Due to Spindle Dilatation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41, 1439-1454, 2001
21. Szafarczyk, M., Misiewski, M., Automatic measurement and correction of workpiece diameter on NC centre lathe, *Annals of CIRP* 32/1, 305-308, 1983
22. Fan, K. C., Chao, Y. H., In-process Dimensional Control of the Workpiece During Turning, *Precision Engineering*, 13 (1), 1991
23. Phan, A.V., Cloutier, G., Mayer, J. R. R., Finite-element model with closed-form solutions to workpiece deflections in turning, *International Journal of Production Research*, 37, (17), 4039-4051, 1999
24. Cloutier, G., Mayer, J. R. R., Phan, A.V., Singularity Function Representation in Obtaining Closed-Form Solutions to Workpiece Deflections in Turning Multi-Diameter Bars, *Computer Modeling And Simulation in Engineering* 4, 133-137, 1999
25. Phan, A.V., Cloutier, G., Mayer, J. R. R., A Finite-element model for Predicting Tapered Workpiece Deflections In Turning, *Computer Modeling And Simulation in Engineering* 4 (2), 138-142, 1999
26. Mayer, J. R. R., Phan, A.V., Cloutier, G., Prediction of Diameter Errors in Bar Turning: a Computationally effective Model, *Applied Mathematical Modeling*, 24 943-956, 2000
27. Qiang, L. Z., Finite Difference Calculations of the Deformations of Multi-diameter Workpieces During Turning, *Jurnal of Material Processing Technology*, 98, 310-316, 2000
28. Palla, N., Khirishnaswami, P., Lei, S., Xin, X., An Amprical Study of Diametral Variations in Turning, Kansas State University, Manhattan, USA
29. Taylor, C.M., Yager, T. J., Caille, R. P., Walker, S. R., Open Modular Architecture Controls At GM Powertrain, GM Powertrain Group Manufacturing Engineering Controls Council, http://www.omac.org/Techdocs/Open_at_GMPTG.pdf, 2003

30. Frampton, N., Tsao, J., Yen, J., Hard Real-time Extensions of Windows NT© Evaluation Report, <http://www.omac.org/Techdocs/ntrtrpt2.pdf>, 2003
31. Chrysler, Ford G. M., Requirements of Open, Modular Architecture Controllers for Applications in the Automotive Industry, Version 1.1, <http://www.omac.org/Techdocs/omacv11.htm>, 1994