

Dairesellik Hatası Ölçümünde Kullanılan Yöntemlerin İncelenmesi

*Ahmet Murat PİNAR , **Abdulkadir GÜLLÜ
*Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu Meslek Yüksek Okulu, Makine Programı
Turgutlu, MANİSA
**Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü
06500 Teknikokullar, ANKARA

ÖZET

CNC işleme merkezlerindeki eğrisel hareketler dairesel interpolasyon hareketleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu hareketlerdeki hatalar dairesellik hatası olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada, dairesellik hatası ölçüm sistemi tanıtılmıştır. Dairesellik hatası tarif edilerek, bu hatanın değerlendirildiği algoritmalar tanıtılmıştır. Ayrıca bu sistemdeki ölçüm cihazları, ayrıntılı yayın taraması ile analiz edilerek tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dairesellik, dairesel sapma, dairesel interpolasyon, ISO 230-4, CNC

Examination of the Methods Used in Circularity Error Measurement

ABSTRACT

Circular motions in CNC machining centres are achieved by circular interpolation motions. The errors in these movements are called circularity errors. In this study circularity error measurement system is introduced. Having described the circularity error the algorithms in which this error is evaluated are introduced. Furthermore, the measurement devices in this system are discussed by a detailed literature survey.

Key Words: Circularity, circular deviation, circular interpolation, ISO 230-4, CNC

1. GİRİŞ

İmalat sanayindeki rekabetin bir sonucu olarak CNC takım tezgahlarının ve robot teknolojisi kalitesinin önemi bir kat daha artmıştır. Şüphesiz bu kalitenin en önemli amacı tezgah ve robotlardaki konum hatalarının en aza indirilmesidir. Hata kaynaklarının belirlenebilirliğinden dolayı, bu alanda en çok eğrisel profillerin konum doğrulukları incelenmektedir. İşleme merkezlerinde elde edilen eğrisel profillerin temelinde dairesel interpolasyon hareketi yatmaktadır. Bu hareket, birbiri ile 90° konumlandırılmış 2 eksenin senkronik hareketi ile sağlanmakta ve tezgah ve çevredeki birçok faktörden etkilenmektedir. Bu çalışmada, CNC işleme merkezlerindeki dairesel interpolasyon hareketlerinin konum ha-

2. DAİRESELLİK HATASI ÖLÇME SİSTEMİ

Belirli hata kaynakları sonucunda, dairesel interpolasyon hareketlerinde bir takım konum hataları oluşmaktadır. Şekil 1’de bu hatalara ait ölçüm sistemi görülmektedir. CNC işleme merkezinde dairesel interpolasyon hareketi esnasında, ölçüm cihazıyla yada iş parçası üzerinden CMM (Coordinate Measuring Machine) Koordinat Ölçme Tezgahı ile alınan koordinat verisi çeşitli algoritmalarla değerlendirilerek dairesellik hatası elde edilmektedir.

Eğrisel hareketlerdeki konum hataları, ISO 230-4 “NC Tezgahlar için dairesel testler” isimli standarda dayalı olarak belirlenmektedir (1). Standartta 3 tip sapma



Şekil 1. Dairesellik hatası ölçme sistemi

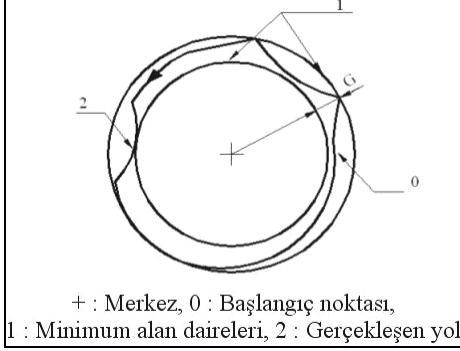
talarının belirlenmesinde kullanılan ölçüm cihazları değerlendirilmektedir.

Digital Object Identifier 10.2339/2007.10.2.137-144

bulunmaktadır. Bunlardan en sık kullanılanı dairesel sapma olarak ifade edilmektedir.

2.1. Dairesel Sapma

Gerçekleşen yolu saran 2 eş merkezli dairenin minimum radyal ayrımıdır (G). En küçük kareler dairesi, etrafındaki maksimum radyal aralık olarak da değerlendirilebilir (Şekil 2). En çok ölçümü yapılan sapma tipidir.



Şekil 2. Dairesel sapmanın değerlendirilmesi (1)

2.2. Dairesellik Hatasının Değerlendirilmesi

Dairesellik hatası, ölçüm cihazından alınan koordinat verileri aşağıdaki metotlar kullanılarak belirlenmektedir:

1. En küçük kareler metodu (EKK),
2. Maksimum iç teğet dairesi metodu (MİTD),
3. Minimum dış teğet dairesi metodu (MDTD),
4. Minimum radyal ayırım dairesi metodu (MRAD).

EKK metodu, günümüzde özellikle CMM tezgahlarında en sık kullanılan yöntem olup, diğer yaklaşımların karşılaştırılmasında referans alınan bir tekniktir. Bu metotla elde edilen dairenin merkezi, en küçük dış teğet ve en büyük iç teğet dairelerin profile uydurulması için kullanılır. Bu iki daire arasındaki fark dairesellik hatası olarak ifade edilir (2). MİTD metodunda profilin iç kısmında yer alan en büyük dairenin merkezi bulunur. Sonrasında bu merkez, profilin dış kısmındaki en küçük daireyi bulmak için kullanılır. 2 daire arasındaki radyal mesafe dairesellik hatasını vermektedir (2,3). MDTD metodunda MİTD'nin aksine ilk olarak profili içeren en küçük daire bulunur. Bu dairenin merkezi iç teğet dairesini bulmak için kullanılır. 2 daire arasındaki radyal fark dairesellik hatasıdır (4,5). Minimum radyal ayırım dairesi (MRAD) minimum alan daireleri olarak da bilinir. Minimum radyal ayrımlı 2 eş merkezli daireler arasındaki fark dairesellik hatasını verir. Bu metotlarda kullanılan algoritmalar nümerik (EKK, Chebyshev yaklaşımı, Simplex taraması, doğrusal/doğrusal olmayan optimizasyon, Monte Carlo Simülasyonu vb.) yada hesaplamalı geometrik teknikleri içermektedir.

2.3. Dairesellik Hatası Ölçme Cihazları

Dairesellik hatasını ölçmek için kullanılan cihazlar genel olarak iki sınıfa ayrılmaktadırlar. Farklı ölçüm metotları, farklı avantaj ve dezavantajlara

sahiptir. Tezgâhı tamamen ölçen tek bir ölçüm sistemi yoktur. Her bir cihaz farklı hata orijinlerinde başarı göstermektedir.

2.3.1. Doğrudan işleme testi cihazları

Bu testte, hata orijinlerini bulmak için, test edilecek ve ölçülecek parça tezgahta işlenir. Fakat, bu testte sonuç büyük ölçüde bağlama kalıbından, takımdan ve kesme mekanizmasından etkilenmektedir. Ölçüm sürecine imalatın da girmesinden dolayı çok zaman alıcıdır. Bu testlerde CMM tezgahları kullanılmaktadır. İstenen ölçüler ve CMM'den alınan gerçek ölçüler, hata kaynakları esas alınarak analiz edilmektedir.

Marsono ve Bagiasna CNC yatay işleme merkezindeki hata kaynaklarının belirlenmesi için bir metot geliştirmişlerdir. Bu amaçla, JISB-6336 standardına dayalı farklı geometriler içeren test parçasını işlemişlerdir. CMM tezgâhı kullanılarak yapılan ölçümler neticesinde tezgâh hassasiyetinin parça hassasiyetini doğrudan etkilediği sonucuna varmışlardır. Buna ek olarak, bekleş (boşluk) ve adım hata telafisinin doğrusal interpolasyon hareketi doğruluğunda iyileştirme sağlarken, dairesel interpolasyonda herhangi bir iyileştirme elde edilememiştir (6).

CMM'ler bugün ölçüm işlemlerinde en çok dokunmatik tetik probu kullanılmaktadırlar. Bunlar çok hassas olmalarına rağmen veri toplama oranları çok düşüktür. Bu tip problemler karmaşık geometriye sahip parçaların ölçümleri için uygun değildir. CMM teknolojisinin bu eksikliğini gidermek üzere, Nashman vd. CMM veri edinim esnekliğini ve hızını arttırmak için yeni bir metot sunmuşlardır. Çalışmada hiyerarşik denetim sistemi içerisinde video kamera ve analog dokunmatik probunun etkileşimi incelenmiştir. 3 boyutlu çalışma hacminde CMM'in algılama etkileşimini ölçen görüntü algoritması geliştirilmiştir. Probu hareketi, kamera, tezgah ölçeği ve bünyesindeki sensörlerden gelen bilgilerle denetlenmiştir. Sistemde CMM tezgahındaki ayar zamanı ve kalibrasyon işlemi en az hale getirilirken, karmaşık parçaların ölçümü daha sağlıklı olarak gerçekleştirilebilmiştir (7).

Phillips vd. CMM'deki küçük dairesel unsurlardaki ölçüm belirsizlikleri üzerine çalışmışlardır. Makalede, örnekleme stratejisinin bir fonksiyonu olarak ölçüm noktalarının sayısı ve dağılımı gibi faktörlerin etkileri incelenmiştir. Burada açılma mesafede 120°'de geniş olarak dağılmış noktalar ve birkaç derecede yakın gruplanmış noktalar 3 nokta örnekleme stratejisi kullanılarak dairesel unsurlar incelenmiştir. Ölçüm belirsizliğinin teorik tahmini için kavramsal model çalışma tarif edilmiştir. Hem teorik hem de deneysel çalışmalar, ölçüm belirsizliğinin örnekleme stratejisinin önemli bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir (8).

Sun vd. CMM tezgâhında ölçülen dairesellik ve düzlük form toleransı ölçümündeki belirsizlikleri istatistiksel olarak incelemişlerdir. Çalışmada örnekleme metodu, örnekleme boyutu ve form uydurma kriteri gibi kontrol edilebilir faktörler arasındaki korelasyon belir-

lenmiştir. Ek olarak, parça yüzeyinden ve diğer belirsizlik kaynaklarından gelen ölçüm belirsizliğinin etkisi deney tasarımı şeması kullanılarak modellenmiştir. Sonuç olarak çalışma, diklik ve dairesellik ölçümü için, yardımcı faktörlerin etkileşimi ve etkisini ayrıntılı olarak belirlemiştir (9).

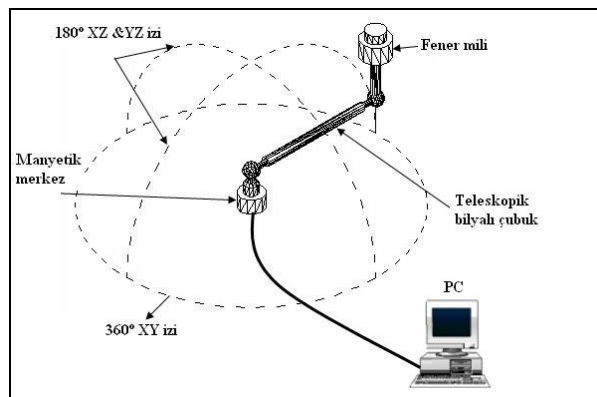
CMM tezgâhlarında izleme yeteneği hataları, belirlenen unsurun ölçümü yerine çevresinde ölçüm yapılması olarak ifade edilebilir. Bu hatanın tahmini ve giderilmesi için Huang vd. unsur tipinin ve parça konumsal değişimlerinin unsur tabanlı ölçüm üzerindeki etkilerini belirlemiştir. Önerilen yaklaşım CMM'lerdeki temaslı/temassız koordinat ölçüm sistemlerini içermektedir (10).

2.3.2. Dolaylı işleme test cihazları

Bu tür testlerde kesme işlemi yapılmaz. Uygun test cihazı tezgahın tablası ve fener miline sabitlenir ve eğrisel hareketi gerçekleştirecek komut çalıştırılarak sapmalar belirlenir. Bu tür testlerin en önemli avantajı oldukça hızlı olması ve kesme kuvvetlerinden kaynaklanan olumsuzluklardan etkilenmemesidir. Aşağıda dolaylı dairesel hareket ölçüm cihazları belirtilmiştir.

Teleskobik çift bilyalı çubuk (TCBC): Takım tezgahlarının geometrik hataları, lazerli sistemlerle çok hassas olarak ölçülebilir. Fakat, bu sistemler maliyetleri, kurulum zorlukları, ölçüm zorlukları ve yetişmiş personel ihtiyacı gibi olumsuzluklara sahiptir. Byran bu olumsuzlukları gidermek amacıyla tezgah doğruluğunun değerlendirilmesi için TÇBC'yi önermiştir (11-13).

Bu metot, kontur performansı hatalarının ölçümlerinin en hızlı ve etkin yoludur (14) TÇBC testi ile XY düzlemindeki 360°'lik çember, XZ ve YZ'de 190°'lik yayların ölçümleri yapılabilmektedir (Şekil 3). Bilyalı çubuk, eğrisel yol boyunca gezerken, sensörler yol radyüsündeki değişimleri ölçerler. Veriler, servo performansı, kontur yeteneği, bekleş (boşluk), hacimsel doğruluktaki hataları hesaplayan yazılım programı ile analiz edilir. Standart testin 2 hızda yapılması gerekmektedir. 1. hız maksimum ilerleme oranının %10'u 2.'si de maksimum ilerlemenin %80'ni olmalıdır. Teleskobik çubuğun tavsiye edilen boyu, en kısa eksen hareketinin aralığının yarısından biraz daha kısa olmalıdır (14).



Şekil 3. Teleskobik çift bilyalı çubuk (14)

Lai vd. TÇBC cihazını kullanarak çok eksenli tezgahlardaki geometrik hataların belirlenmesi üzerinde çalışmışlardır. Diğer tezgah sistemlerinde de kolayca kullanılacak dik işleme merkezi kızak sistemi için genel bir matematiksel model sunulmuştur. Bu model, ihtiyaca göre 1. derece, 2. derece ya da 3. derece gibi formlara dönüştürülebilmektedir. TÇBC cihazından gelen konum verisini analiz eden, en küçük kareler yöntemini kullanan algoritma ile, sistem parametreleri belirlenmiştir. Böylelikle, tezgah hassasiyetleri etkili bir şekilde incelenmiştir (15).

Pahk vd., TÇBC'yi kullanarak, CNC tezgahlardaki 3B'li hataları değerlendiren bir çalışma yapmışlardır. Geliştirilen sistem, aşağıdaki adımları içermektedir:

- 1.) 3B'li hacimsel hata modeli, hem dik hem de yatay işleme merkezi için tezgahın kinematik zincirine göre hazırlanmış,
- 2.) XY, YZ, ZX gibi 3 farklı düzlemde bilyalı çubuktan alınan konum verisi modele uygulanmış,
- 3.) En küçük kareler tekniği kullanılarak ve parametrik hatalara ait katsayılar belirlenerek, analiz edilmiştir.

Geliştirilen sistem uygulanarak, geleneksel uzunluk ve açı ölçme cihazı ile karşılaştırıldığında yüksek verimlilik elde edilmiştir (16).

Wang ve Ehmann, çok eksenli CNC tezgâhlarıdaki eğrisel hareketlerde oluşan konum hatasını herhangi bir modele ihtiyaç duymadan doğrudan elde edebilen, 2 ölçüm metodu geliştirmişlerdir. Ölçmelerde, diğer cihazlara göre maliyeti daha düşük ve kolay kurulabilir olan TÇBC cihazı kullanılmıştır. Birinci metot, 3 referans noktasına ihtiyaç duyan üçgenlere bölme prensibi, diğeri de tek soket metodudur. 2. metodun daha yüksek dereceli esneklik ve kapasiteye sahip olduğu belirtilmiştir (17).

Wang ve Ehmann, önceki çalışmalarında tanıttıkları 2 ölçme metodunun pratikliğini arttırmak ve sağlıklı ölçümler elde edebilmek için çeşitli prosedürler önermişlerdir. Sistem, manyetik soketlerin yerleşiminin belirlenmesi ve bilyalı çubuk uzunluğunun seçimine yardım eden yazılımlarla desteklenmiştir. Bunlara ek olarak, 2 ölçüm metodunun da fizibilitesini doğrulayan 3 eksenli işleme merkezinde gerçekleştirilen deney sonuçları tartışılmıştır (18).

TÇBC cihazının kullanıldığı farklı bir uygulama, Tsutsumi ve Saito tarafından yapılmıştır. Eş zamanlı 3 eksen kontrol hareketinin temel alındığı, 5 eksen kontrollü işleme merkezindeki konumsal ve açısal sapmalar için metot geliştirilmiştir. Önerilen sistem, hem simülasyon hem de deneysel olarak değerlendirilmiştir. Ölçme sonuçları verileri ile simülasyon verileri arasında çok az bir fark olmasına rağmen, aralarında bir uyum olduğu görülmektedir. Geliştirilen sistem, 5 eksenli işleme merkezi kalibrasyonunu etkili bir şekilde yapabilmektedir (19).

Filho ve Giacomo, CMM'nin ölçme sonucundaki belirsizliği tahmin için TÇBÇ testini kullanmışlardır. Yaklaşım, TÇBÇ cihazını kullanan performans testine ve faktöriyel tasarım tekniğine dayanmaktadır. Faktöriyel tasarım, çalışma hacmindeki oryantasyon ve uzunlukla ilgili CMM hatalarını incelemek ve performans testlerini yerine getirmek için uygulanmıştır. CMM ölçme belirsizliği, hacimsel ölçme hatalarına uygulanan istatistiksel varyans analizinden sonra varyans bileşeninin belirlenmesi ile tahmin edilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre oryantasyon ve ölçülen uzunluk arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir. Deneyler sonucunda en küçük CMM hataları ölçme uzunluğunun XY yönünde yaklaşık 270 mm olduğunda, en büyük ölçüm hatası ölçme uzunluğunun XYZ yönünde 200 mm olduğunda görülmüştür. Oryantasyon, uzunluk, oryantasyon-uzunluk etkileşimi ile ilgili tezgah standart belirsizliği sırasıyla 6, 3, 7 µm olarak hesaplanmıştır. ISO standardına göre birleştirilmiş CMM belirsizliği, 20 µm olarak ve genişletilmiş belirsizlik de, 10 µm olarak hesaplanmıştır (20).

Emmett ve Patt büyük hacimli CMM hatalarının ölçümü için TÇBÇ'ye özel bir aparat ilave etmişlerdir. Böylelikle, tezgah ölçüm aralığı önemli ölçüde artmıştır. Metot, özellikle eksen diklik hatasının belirlenmesinde kullanılmaktadır. (21)

Çapraz ızgara enkoderi (CIE) (Cross grid encoder): Düzlemdeki her çeşit serbest formlu testi gerçekleştiren nispeten yeni bir cihazdır (Şekil 4). Cihaz, hızlı test cihazları kategorisinde olup ağırlıklı olarak servo parametrelerin ayarında kullanılmaktadır. Cihaz, optik ölçeklerin çalışma prensibine dayalıdır. 2 adet ışığa dayalı sensör ve okuyucu kafada lens sistemli ışık kaynağı bulunmaktadır. Okuyucu kafa, çapraz ızgara pileyiti üzerinde tarama yapar. Kanallar, sinüs dalga formu elektrik sinyali olarak sonuçlanacak olan ışığı optik sensöre doğru yansıtır. Bu sinyal, bilgisayara takılı özel sayıcı kartla sayılır. Cihazın hassasiyeti ağırlıklı olarak pileyitin hassasiyetine bağlıdır. Oysa, ölçüm geri beslemesi, sayıcı kartın bant genişliğine ve pileyit üzerindeki 2 çizginin arasındaki mesafeye bağlıdır. Günümüzde bu cihazla 2 µm'lik hassasiyet ve 24 m/min'lik ilerleme değerlerinde testler gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 4. Çapraz ızgara enkoderi (22)

Kakino ve arkadaşları, TÇBÇ'nin başarılı olamadığı küçük radyüslü yüksek ilerlemeli hareketlerin konum hassasiyetlerini ızgara enkoderi ile incelemiştir.

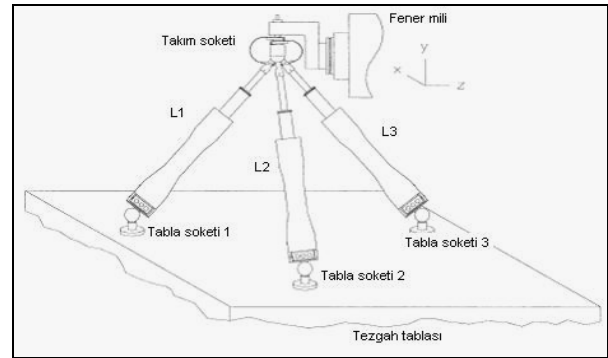
Sistemle sadece dairesel değil gelişigüzel profiller de incelenmiş ve sonuçlar diğer metotlarla karşılaştırılmıştır (23).

Ibraki vd., CNC tezgahlardaki konum hatalarının belirlenmesi ve telafisi için TÇBÇ'ye alternatif olarak Heidenhain tarafından geliştirilen ÇIE'yi kullanmışlardır. Cihaz, temassız optik bir ölçüm olduğundan çok hassas ve yüksek ilerlemeli ölçmeler için uygundur. Çalışmada, hem dairesel hem de doğrusal profilleri içeren bir örnek uygulama yapılmıştır. Hem ÇIE hem de tezgaha ait geri besleme sinyalleri sonuçları değerlendirilerek ve servo kontrolcü parametreleri tekrar ayarlanarak konum hassasiyetinde optimum sonuç alınmıştır (24).

Yamazaki ve arkadaşları, 3 adet ÇIE'yi kullanarak tezgah hareketlerinin 3B hacimsel hareketlerini incelemiştir. Sistem, 6 serbestlik dereceli hareket hatalarının belirlenmesi için temassız tarama prensibini kullanmaktadır. Bunlar, hareketli eksen boyunca 3 lineer ve 3 açısız yer değiştirmeyi ifade etmektedir (25).

Lazerli bilyalı çubuk (LBC) (Laser ball bar):

Normalde bu metot CMM'lerde ölçmek için geliştirilmiştir. Fakat diğer takım tezgahlarına da uygulanabilmektedir. LBC, 2 aşamalı tüp ve bunların ucuna takılmış hassas küreden oluşmaktadır (26). Heterodin yer değiştirme interferometresi teleskobik tüpün içine yerleştirilmiştir ve 2 küre arasındaki mukayeseli yer değiştirmeyi ölçer. LVDT yerine lazer interferometresinin ölçüm prensibi sebebi ile ölçüm aralığı 120 mm içinde verilebilir ve ölçüm doğruluğu da iyidir. Belirlenen hata kaynakları küreler, küre soketleri ve lazerin çevresel telafilerindeki belirsizliklerdir. LBC'nin geniş çalışma aralığı sebebi ile cihazın 3 ayaklı olarak kullanımı mümkündür. Böylelikle, eş zamanlı olarak 3 boyutun ölçümü gerçekleştirilmektedir. 3 ayağın kurulumundaki zorluk 3 çubuğun fener miline 3 noktadan temasının yapılandırılmasıdır. Şekil 5'de lazerli bilyalı çubuk görülmektedir. Benzer olarak, sadece 2 lazerli bilyalı çubuk kullanımı ve üçgen metodu ile düzlemde ölçüm mümkündür. Metot, yüksek örnekleme oranı ile hassas doğruluk ölçümü sunmaktadır.



Şekil 5. Lazerli bilyalı çubuk (27)

Schmitz ve Ziegert, farklı düzlemlerdeki dairesel/doğrusal intrerpolasyon hareketleri, spiral helikon hareketi gibi karmaşık CNC hareketlerini eş zamanlı

üçgen metodunu kullanarak incelemişler ve elde edilen sonuçları ÇİE ile karşılaştırmışlardır (27, 28).

Zhao ve arkadaşları, LBÇ tasarımını ve ortaya çıkabilecek hata faktörlerini tartışmışlardır. Paralel tipli takım tezgâhının konum hatasını belirlemeye yönelik bir uygulama gerçekleştirmişlerdir (29).

Lazerli dairesel test (LDT) (Laser circular test):

Bu metot, dairesel test gerçekleştirmek için genel Doppler lazeri kullanmak üzere geliştirilmiştir (30). Lazer ışını hedeften yansıtıldığında, Doppler frekans kayması hızla orantılıdır. Frekans kayması fazın değişimi, hız da pozisyonun değişimi olduğundan, bunlar zamanla ilişkili olarak birleştirilirse Doppler frekans kayması pozisyonla ilişkilendirilmiş olacaktır. Şekil 6'da görüldüğü gibi lazer kaynağı fener miline bağlanan aynaya dik olarak konumlandırılır. Fener mili dairesel yol boyunca hareket ederken, ayna lazer ışınına dik kalır ve lazer ışını yönü boyunca yer değiştirme ölçülür. Aynı ölçüm öncesine göre 90° açıda aynı hareket için tekrarlanır. Dairesel yolu oluşturmak için bu iki ölçüm verisi birleştirilir.



Şekil 6. Lazerli dairesel test cihazı (laser circular test device) (30)

Ana özellikler:

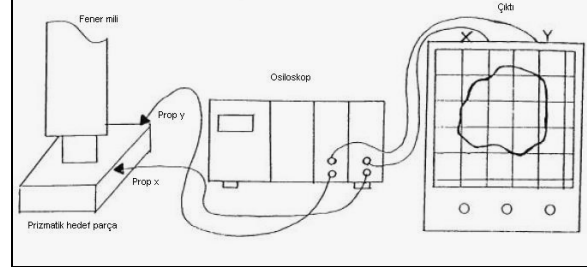
Ölçüm temassızdır, dairesel yol radüsü 1mm'den 150 mm'ye kadar sürekli değişebilir, ilerleme oranı 4m/sn ye kadar olabilir. Veri oranı 1000 veri/sn dir ve hız ve ivme profilleri de elde edilebilir (30).

Liotto ve Wang, LDT cihazının yapısını ve çalışma prensibini sunmuşlardır. TÇBÇ'la ayrıntılı olarak karşılaştırma yapmışlar ve cihazın üstünlüklerini belirtmişlerdir (31).

Kapasitans probu (Capacitance probe):

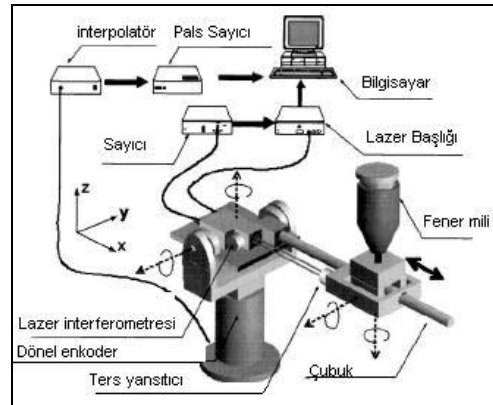
Diğerlerine göre daha az kullanıma sahip Kapasitans probu cihazı, CNC tezgâhların kontur performansı limitlerinin elde edilmesini amacıyla kullanılmıştır. Önerilen sistemde TÇBÇ'ya alternatif bir cihaz tanıtılmaktadır. Şekil 7'de deney düzeneği görülmektedir. Burada, dikdörtgen prizması şeklindeki hedef parça fener miline takılmıştır. Kübün iki yüzeyine X ve Y eksenlerine konum ölçen proplar sabitlenmiş olup, girişler osiloskoba bağlanmıştır. Böylelikle, dinamik olarak hem grafik hem de çıktı alma şansı elde

edilmiştir. Sistemin kurulumu basit, maliyeti düşüktür. TÇBÇ'nin müsaade etmediği gelişigüzel profilleri ölçmeye imkân sağlamaktadır. Buna karşın, çok düşük ölçme aralıklarında çalışması ve ayrıntılı hata verisi sunmaması sistemin kullanımını oldukça sınırlamaktadır (32).



Şekil 7. Kapasitans probu içeren deney düzeneği (32)

Bugüne kadarki dairesel hareketler için kullanılan ölçme cihazlarının en önemli sınırlılığı, ölçüm aralığının oldukça dar olması ve bir kısmının sadece dairesel hareketlerin hatalarını belirlemesidir. Iwasawa ve arkadaşları bu problemi gidermek için Lazer interferometresi ve dönel enkoderin kullanıldığı sistemi geliştirmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Ölçme cihazının konfigürasyonu (33)

Cihazla yapılan deneyler sonucunda:

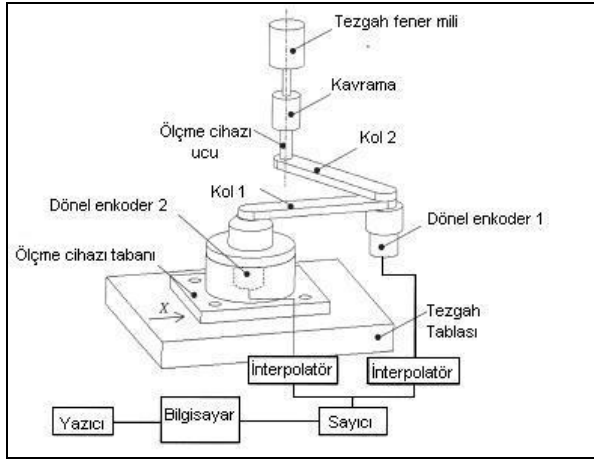
- Sistem XY düzlemi boyunca rasgele noktadaki koordinatları başarı ile ölçebilmektedir. 10 Khz'lik yüksek örnekleme oranı ile yüksek ilerleme oranlarında ölçme yapmaya olanak sağlamaktadır.
- Deneysel sonuçlar kapasitans probu ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Cihaz ayrıca tabla ilerlemesinin keskin köşelerdeki tezgâh hareketinin hassasiyetine etkisini belirlemek için kullanılmıştır. Sonuçların geçerliliği için gerçek işleme deneyleri yapılarak CMM tezgâhında ölçülmüştür. İki ölçme sonucunun da uyumlu olduğu görülmüştür (33).

Hem TÇBÇ hem de Lazer interferometresinin kullanıldığı bir başka çalışma da Florussen vd. tarafından gerçekleştirilmiştir. Burada klasik tezgâh

konfigürasyonunu temel alan ve tüm tezgâhlara kolayca uygulanabilen türetilmiş tezgâh hata modeli geliştirilmiş ve öncekilerden farklı olarak tezgâhın konum sapmalarını iyileştirmek için kullanılmıştır. İlk etapta yapılan deneyler sonucunda beklenilenin çok üzerinde 35 μm 'lik radyüs sapması elde edilmiştir. Modelin uygulanması ile takım konumlama sapmalarının %95'inin 4 μm 'dan küçük olduğu sonucuna varılmıştır. Buna ek olarak lazer interferometresi ile çift bilyalı çubuk ölçümlerinin uyumlu olduğu ancak lazer interferometresi ölçümlerinin 5 kat daha uzun sürdüğü ve daha pahalı olduğu belirlenmiştir (34).

Qiu ve arkadaşları, çift bilyalı çubuğa benzer CNC işleme merkezlerinin eğrisel hareketlerdeki hassasiyetini belirleyen yeni bir cihaz geliştirmişlerdir. Cihaz iki dönel enkoder ve çift çubuk düzeneğini içermektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Dairesel hareketler için yeni ölçme cihazı (35)

Cihaz CNC tezgâhın tablasına sabitlenmiştir. 2 kolun dönme düzlemleri birbirine paralel ve fener mili dönme eksenine diktir. Her bir enkoder 1 tam dönüşte aynı aralıkta 81000 sinüs dalgası palsı üretmektedir. Sinyaller enkoderlerle birlikte kullanılan interpolatörler üzerinden bilgisayara yollanır ve ölçümler gerçekleştirilir. 40 ve 120 mm'lik daireler için 100, 500 ve 5000 mm/min'lik ilerleme oranlarında deneyler yapılmıştır. Ek olarak duralamin malzeme kullanarak, 20 mm'lik parmak freze ile 75 mm radyüslü 50 mm/min'lik ilerlemeyle dairesel kontur operasyonu yapılmıştır. Bu deneyler ışığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (35):

- Cihazın kurulumu basit ve hızlıdır.
- Cihazın yapısal karakteristiğinden dolayı dairesel hareketlerin yörüngesini ölçmek için özellikle uygundur.
- Sistemin 1 μm 'lik küçük yer değiştirmelere karşı duyarlı olup, yüksek tekrarlanabilirliğe sahiptir.

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

CNC işleme merkezlerine ait konum hatalarının belirlenmesi ve telafisinde kullanılan dolaylı ölçüm cihazları ülkemiz sanayinde çok fazla kullanım alanına

sahip değildir. Genelde, uygulama, test parçasının imalatını ve bunun CMM tezgahında ölçülerek, NC programın yeniden düzenlenmesini içermektedir. Bu işlemler, hem zaman hem de maliyet açısından kullanışlı değildir. Bunun yanında, CMM ölçümlerinde kesme esnasındaki kuvvetler, titreşim ve bağlama hataları, ölçüm doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Buna karşın kesme parametrelerinin ve kuvvetlerinin pozisyonlama doğruluğu üzerindeki etkileri ancak CMM vasıtasıyla ölçülebilmektedir. Dolaylı ölçüm metodları CMM'den kaynaklanan olumsuzlukları gidermektedir. TÇBÇ, ÇIE, LBC ve LDT en sık kullanılan ticari dolaylı ölçüm metodlarıdır.

TÇBÇ, düşük maliyetli oluşu, eğitimli personele ihtiyaç duymaması ve hızlı bir yöntem olduğundan dolayı bu alanda kullanılan en sık yöntemdir. Özellikle tezgâh mekanik yapısından kaynaklanan hataların ölçümünde iyi sonuçlar vermektedir. Buna karşın, çalışma aralığının sınırlılığı (50-300 mm), sadece dairesel hareketlerin ölçülebilmesi, temaslı bir ölçüm olduğundan titreşimlerden etkilenmesi, yüksek ilerleme küçük radyüsteki başarısızlığı ve servo parametrelerin ölçülmesindeki yetersizliği metodun dezavantajıdır.

ÇIE, serbest formlu profillerin ölçümünü temassız olarak 2 μm 'lik hassasiyetle gerçekleştirilir. Çok küçük radyüs ve yüksek ilerleme sınırlaması yoktur. Ancak, ölçüm aralığının üst sınırı oldukça düşüktür (230 mm). Kurulum zorluğu, eğitimli personel ihtiyacı ve maliyeti negatif yönüdür. Ayrıca, kurulum esnasındaki çok küçük hizalama hatası önemli ölçüm hatalarına sebep olmaktadır.

LBC, serbest formlu 2D'li ve 3D'li karmaşık profillerin bir defada mikron seviyesinde ölçümünü gerçekleştirebilmektedir. Ancak, kurulum olarak en zor metod olup, oldukça maliyetlidir.

LDT, gelişigüzel profilleri mikron seviyesinde ölçmektedir. Özellikle, hız ve ivme bilgileri ayrıntılı bir şekilde elde edilmektedir. Buna karşın, maliyeti yüksek, ölçümü ağır ve 2 kademelidir.

Kapasitans probu çok fazla kullanım alanına sahip değildir. Ölçme aralığı oldukça küçük olup, örneklemeye veri oranı oldukça düşük olmasına karşın serbest formlu profillerin ölçümünü yapılabilmektedir.

Bu standart cihazlar dışında TÇBÇ cihazının olumsuzluklarını gidermek amacıyla prototip olarak hazırlanmış yeni ölçüm sistemleri mevcuttur. Daha çok TÇBÇ mantığına dayalı temaslı metodlar olup sisteme lazer teknolojisinin eklenmesini böylelikle daha fazla ölçüm örnekleme oranı ve çalışma aralığının artırılması amaçlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, 07/2003-20 no'lu projedeki maddi katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz.

4. KAYNAKLAR

1. ISO 230-4, "Circular Tests for Numerical Controlled Machine Tools", 1996
2. Wang, M., Ceraghi, S.H. and Masud, A.S.M., "Circularity Error Evaluation Theory and Algorithm", *Precision Engineering*, 23, 164-176, 1999.
3. Toissant, G. T., "Computing Largest Empty Circles with Location Constraints", *International Journal of Computer and Information Sciences*, 12, 347-358, 1983.
4. Melville, R.C., "An Implementation Study of Two Algorithms for The Minimum Spanning Circle Problem", Ing. T. Touissant (Ed), *Computational Geometry*, 267-285, 1985.
5. Elzinga, J. and Hearn, D.W., "Geometrical Solutions for Some Minimax Location Problems", *Transportation Science*, 6, 379-394, 1971.
6. Marsono, Bagiasna K., "Analysis of Relation Between Okuma Howa Millac 4h Machining Center Accuracy and Workpiece Accuracy as Result from Cutting Test", *Jurnal Itenas*, 6 (4), 123-129, 2002.
7. Nashman, M., Yoshimi, B., Hong, T., Rippey, W.G. and Herman, M., "A Unique Sensor Fusion System for Coordinate Measuring Machine Tasks", *OE Reports* 172, April, 1998.
8. Phillips, S.D., Borchardt B., Estler, W.T. and Buttress, J., "The Estimation of Measurement Uncertainty of Small Circular Features Measured by Coordinate Measuring Machines", *Precision Engineering*, 22, 87-97, 1998.
9. Sun, A.Y.T., Anand, S. and Tang, J.S.Y., "Comprehensive Design of Experiments-Based Framework for Optimal CMM Inspection and Uncertainty Analysis of Form Tolerances", *Int. J. Prod. Res.*, 40 (9), 2097-2113, 1998
10. Huang, W., Kong, Z., Ceglarek, D. and Brahmst, E., "The Analysis of Feature-Based Measurement Error in Coordinate Metrology", *IIE Transactions*, 36, 237-251, 2004.
11. Bryan, J.B., "A Simple Method for Testing Measuring Machines Tools", *Precision Engin.*, 4 (2), 61-69, 1982.
12. Bryan, J.B., "Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools Part 1: Principles and Applications", *Precis. Engin.*, 4, 61-69, 1982.
13. Bryan, J.B., "Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Part 2: Construction Details", *Precis. Engin.*, 4, 125-138, 1982.
14. ASME B5.54, "Methods for Performance Evaluation of CNC Machining Centers", 1992.
15. Lai, J.M., Liao J.S. and Chieng W.H., "Modeling and Analysis of Nonlinear Quideaway for Double Ball Bar Measurement and Diagnosis", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 31 (5), 687-707, 1997.
16. Pahk, H.J., Kim, Y.S. and Moon, J.H., "A New Technique for Volumetric Error Assessment of CNC Machine Tools Incorporating Ball Bar Measurement and 3D Volumetric Error Model", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 11, 1583-1596, 1997.
17. Wang, S.M. and Ehmann, K.F., "Measurement Methods for The Position Errors of a Multi-axis Machine, Part 1: Principles and Sensitivity Analysis", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 39, 951-965, 1999.
18. Wang, S.M. and Ehmann, K.F., "Measurement Methods for the Position Errors of a Multi-axis Machine, Part 2: Applications and Experimental Results", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 39, 1485-1505, 1999.
19. Tsutsumi, M. and Saito, A., "Identification and Compensation of Systematic Deviations Particular to Five-axis Machining Centers", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 43, 771-780, 2003.
20. Filho, A.P. and Giacomo, B.D., "CMM Uncertainty Analysis with Factorial Design", *Precis. Engin.*, 27, 283-288, 2003.
21. Emmet, C. and Pat, P., "Quick Check Error Verification of CMM", *Journal of Materials Processing Technology*, Nov 30. 155-156, (1-3), 1207-1213, 2004.
22. <http://www.Heidenhain.com>.
23. Kakino, Y., Ihara, Y., Lin, S., Hayama, S., Kawakami, K. and Hamamura, M., "Measurement of Motion Accuracy and Improvement of Machining Accuracy on Ultra-High Precision NC Machine Tools by Using Cross-grid Encoder Test", *Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 62, 1612-1616, 1996.
24. Ibraki, S., Kakino, Y., Lee, K., Ihara, Y., Braosch, J. and Eberherr, A., "Diagnosis and Compensation of Motion Errors in CNC Machine Tools by Arbitrary Shape Contouring Error Measurement", *Laser Metrology and Machine Performance*, 59-68, 2001.
25. Yamazaki, K., Mueller U., Liu S. and Braosch J., "Study on the Development of a 3D Linear Encoder System for In-process Motion Error Calibration and Compensation of Machine Tool Axes", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 49 (1), 403-406, 2000.
26. Jouni, H., *Method for Analyzing Planar Machine Tool Measurement*, Ph.D. Thesis, Tampere University of Technology, Finland, 1999.
27. Schmitz, T. and Ziegert, J., "A New Sensor for the Micrometer-level Measurement of Three-dimensional Dynamic Contours", *Meas. Sci. Technol.*, 10, 51-62, 1999.
28. Schmitz, T. and Ziegert, J., "Dynamic Evaluation of Spatial CNC Contouring Accuracy", *Precis. Engin.*, 24, 99-118, 2000.
29. Zhao, J., Xu, Z., Fen, K. C., Li, Z., "A Novel 3D Laser Ball Bar and Its Application", *Huazhong Ligong Daxue Xuebao/ Journal Huazhong University of Science and Technology*, 29 (5), 1-3, 2001.
30. <http://www.optodyne.com>
31. Liotto, G. and Wang, C.P., "Laser Doppler Displacement-meter Allows New Diagonal Measurement for Large Aspect Ratio Machine Tool Easily and Accurately", *3rd International Conference on Laser Metrology and Machine Performance*, Huddesfield, UK, 187-194, 1997.

32. Martin D., "Using Capacitance Probes to Measure the Limit of Machine Contouring Performance", Lion Precision Inc, 2000.
33. Iwasawa, K., Iwama, A., and Mitsui, K. "Development of a Measuring Method for Several Types of Programmed Tool Paths for NC Machine Tools Using Laser Displacement Interferometer and a Rotary Encoder", Precision Engineering, 25, 399-408, 2004.
34. Florussen, G., H., J., Delbressine, F.L.M. and Molengraft, M.J.G., "Assessing Geometrical Errors of Multi-Axis Machines by 3D Length Measurements", Measurement, 30, 241-255, 2001.
35. Qiu, H., Li, Y. and Li, Y., "A New Method and Device for Motion Accuracy Measurement of NC Machine Tools Part 1: Principle and Equipment", Int. J. Mach. Tools Manufact., 41, 521-534, 2001.